



BTS CIRA

Régulation Industrielle

Lycée Rouvière
<http://cira83.com>

SOMMAIRE

1. Généralités	7
1.1. Définitions	7
1.2. Influence de la régulation	7
1.2.1. Baisse du coût de la transformation.....	7
1.2.2. Baisse du coût de l'installation et gain de temps.....	7
1.2.3. Exemple industriel.....	8
1.3. Régulation ou Asservissement	8
1.4. Les servomécanismes.....	8
1.5. Principe de fonctionnement	9
1.6. Fonctionnement en boucle ouverte (Manuel)	9
1.7. Fonctionnement en boucle fermée (Automatique).....	9
2. Schémas de représentation	10
2.1. Schéma TI (P&ID Piping and Instrumentation Diagram)	10
2.1.1. Principe.....	10
2.1.2. Exemple	10
2.1.3. Signification des lettres	11
2.1.4. Les symboles	12
2.2. Schéma fonctionnel.....	13
2.3. Représentation fonctionnelle d'une boucle de régulation	13
3. Caractéristiques statique et dynamique d'un système.....	15
3.1. Stabilité.....	15
3.1.1. Système stable	15
3.1.2. Système instable	15
3.1.3. Système intégrateur.....	15
3.2. Régime transitoire - Régime permanent.....	15
3.3. Caractéristiques statiques d'un système	16
3.3.1. Courbe caractéristique.....	16
3.3.2. Gain statique.....	16
3.3.3. Erreur statique	16
3.3.4. Linéarité	16
3.4. Caractéristiques dynamiques	16
3.4.1. Temps de réponse.....	16
3.4.2. Dépassement.....	17
4. Les régulateurs	17
4.1. Structure de principe d'un régulateur	17
4.2. Choix du sens d'action d'un régulateur	18
4.2.1. Définition	18
4.2.2. Règle de stabilité.....	18
4.2.3. Mise en œuvre pratique.....	18
4.3. Raccordements électriques	19
4.3.1. Le transmetteur	19
4.3.2. Schéma de principe d'une boucle de courant	19
4.3.3. Générateur ou récepteur ?.....	19
4.3.4. Mise en œuvre pratique.....	19
4.3.5. Schéma de câblage d'une boucle de régulation de débit.....	20
4.4. Astuce de calcul.....	20

5.	Régulation Tout Ou Rien	21
5.1.	Action continue - Action discontinue.....	21
5.2.	Présentation.....	21
5.3.	Fonctionnement	21
5.4.	Influence du paramètre seuil.....	21
6.	Action Proportionnelle	22
6.1.	Rappel.....	22
6.2.	Présentation.....	22
6.3.	Bande proportionnelle	22
6.4.	En fonctionnement.....	22
6.5.	Détermination du point de fonctionnement.....	23
6.6.	Influence de la bande proportionnelle	23
6.6.1.	Comportement statique	23
6.6.2.	Comportement dynamique.....	24
6.7.	Décalage de bande - Talon - Intégrale manuelle	24
6.8.	Influence du décalage de bande	25
6.8.1.	Statique	25
6.8.2.	Dynamique.....	25
6.9.	Représentation fonctionnelle d'une régulation proportionnelle	25
7.	Action intégrale	26
7.1.	Comparaison avec intégrale manuelle	26
7.2.	Qu'est-ce qu'une action intégrale ?	26
7.3.	Fonctionnement	26
7.4.	Actions conjuguées PI.....	27
7.5.	Réponses indicielles	27
7.6.	Influence du paramètre temps intégral	28
7.6.1.	Comportement statique en boucle fermée	28
7.6.2.	Comportement dynamique en boucle fermée	28
8.	Action Dérivée	28
8.1.	Qu'est-ce qu'une action dérivée ?	28
8.2.	Fonctionnement	28
8.3.	Actions conjuguées PD	29
8.4.	Influence du paramètre temps dérivé en boucle fermée	29
8.4.1.	Comportement statique	29
8.4.2.	Comportement dynamique.....	29
9.	Correcteur PID.....	30
9.1.	Structures des correcteurs PID.....	30
9.2.	Réponse indicielle	30
9.3.	Déterminer la structure interne d'un correcteur	31
9.4.	Mise en œuvre pratique.....	31
9.5.	Influence des actions P, I et D	31
9.5.1.	Quand X_p augmente.....	31
9.5.2.	Quand T_i augmente	31
9.5.3.	Quand T_d augmente.....	31
10.	Transformée de Laplace	32
10.1.	Les transformées mathématiques	32
10.2.	Propriétés de la transformée de Laplace.....	32
10.3.	Structures des régulateurs PID	32
10.4.	Table des transformées de Laplace.....	33

10.5.	Gain statique.....	33
11.	Identification et réglages	34
11.1.	Identification et réglage en boucle ouverte	34
11.1.1.	Mise en œuvre.....	34
11.1.2.	Pour un procédé stable	34
11.1.3.	Pour un procédé instable.....	34
11.1.4.	Réglages.....	35
11.2.	Identification et réglage en boucle fermée.....	36
11.2.1.	Méthode de Ziegler & Nichols	36
11.2.2.	Réglages.....	36
11.3.	Méthode du régleur – Méthode par approches successives	37
12.	Se souvenir.....	38
12.1.	Schémas TI de base.....	38
12.2.	Les nombres complexes	38
12.2.1.	Présentation	38
12.2.2.	Plan complexe	38
12.2.3.	Module et argument.....	38
12.2.4.	Propriétés	38
12.3.	De la boucle ouverte à la boucle fermée.....	39
12.3.1.	Notations.....	39
12.3.2.	Calcul de $T(p)$, la fonction de transfert en boucle ouverte	39
12.3.3.	Calcul de $F(p)$, la fonction de transfert en boucle fermée.....	39
12.3.4.	Formules à connaître.....	39
12.3.5.	Rappel des objectifs de la régulation	39
13.	Boucles complexes	40
13.1.	Introduction.....	40
13.2.	Mixte ou Cascade	40
13.3.	Régulation mixte.....	40
13.3.1.	Présentation	40
13.3.2.	Programmation sur T2550.....	40
13.3.3.	Détermination théorique d'un correcteur statique.....	41
13.3.4.	Détermination pratique d'un correcteur statique	41
13.3.5.	Exemple de régulation mixte.....	41
13.4.	Régulation cascade	42
13.4.1.	Présentation	42
13.4.2.	Programmation sur T2550.....	42
13.4.3.	Cascade sur une grandeur intermédiaire	42
13.4.4.	Cascade sur la grandeur réglante.....	43
13.5.	Régulation de rapport (ou de proportion)	44
13.5.1.	Présentation	44
13.5.2.	Programmation sur T2550.....	44
13.5.3.	Exemple de boucle de proportion	44
13.5.4.	Calcul du gain k	44
13.6.	Régulation parallèle (override ou de limitation)	45
13.6.1.	Présentation	45
13.6.2.	Programmation sur T2550.....	45
13.6.3.	Exemple de régulation parallèle	45
13.7.	Régulation à échelle partagée (split range)	46
13.7.1.	Présentation	46

13.7.2.	Régulation à deux grandeurs à effets complémentaires.....	46
13.7.3.	Régulation à deux grandeurs à effets antagonistes.....	46
13.7.4.	Programmation sur T2550	46
13.7.5.	Détermination du sens d'action du régulateur	47
13.7.6.	Détermination des équations de sortie	47
14.	Stabilité et précision.....	48
14.1.	Stabilité d'un système bouclé	48
14.1.1.	Notation	48
14.1.2.	Représentations harmoniques.....	48
14.1.3.	Critère simplifié du revers.....	49
14.1.4.	Marges de stabilité	49
14.1.5.	Calcul des marges	49
14.1.6.	Calcul du gain A du correcteur	50
14.1.7.	Influence des marges.....	50
14.2.	Dilemme stabilité-précision.....	50
14.2.1.	Précision statique	50
14.2.2.	Action proportionnelle	50
14.2.3.	Action intégrale	51
14.2.4.	Action dérivée	51
15.	Régulation en temps discret.....	52
15.1.	Classification des signaux.....	52
15.2.	Conversion d'un signal analogique vers un signal numérique	52
15.2.1.	Processus.....	52
15.2.2.	Retard de groupe.....	53
15.2.3.	Quantification	53
15.2.4.	Conséquence de l'échantillonnage	53
15.2.5.	Choix de la fréquence d'échantillonnage	54
15.3.	Conversion d'un signal numérique vers un signal analogique	54
15.3.1.	Fonction de transfert du bloqueur d'ordre 0.....	55
15.3.2.	Schéma complet de la régulation numérique	55
15.4.	Transformée en Z.....	56
15.4.1.	Introduction	56
15.4.2.	Table des transformées en z	56
15.4.3.	Équations récurrentes	57
15.4.4.	Discrétisation de la fonction de transfert $H(p)$	57

1. Généralités

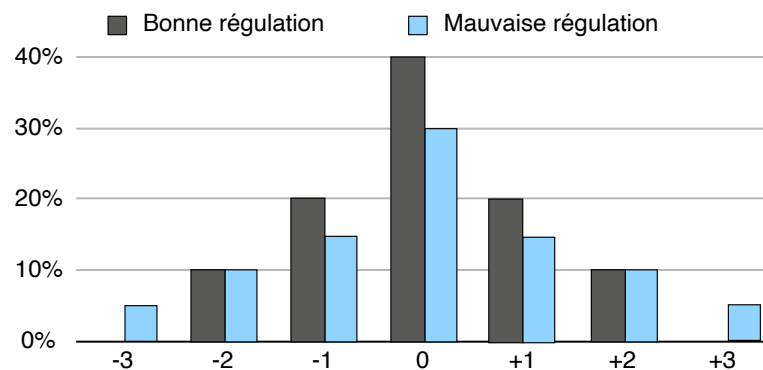
1.1. Définitions

- ⦿ La **régulation** regroupe l'ensemble des techniques utilisées visant à contrôler dans un **procédé** industriel une grandeur physique.
- ⦿ On appelle **grandeur physique**, toute propriété qui peut être mesurée ou calculée. (Wikipédia)
- ⦿ La **grandeur réglée**, c'est la grandeur physique que l'on désire contrôler. Elle donne son nom à la régulation.
- ⦿ La **consigne** : C'est la valeur que doit prendre la grandeur réglée.
- ⦿ La **grandeur réglante** est la grandeur physique du procédé qui a été choisie pour contrôler la grandeur réglée. Elle n'est généralement pas de même nature que la grandeur réglée.
- ⦿ Les **grandeurs perturbatrices** sont les grandeurs physiques qui influencent la grandeur réglée. Elles ne sont généralement pas de même nature que la grandeur réglée.
- ⦿ L'**organe de réglage** est l'élément du procédé qui modifie la grandeur réglante.

1.2. Influence de la régulation

1.2.1. Baisse du coût de la transformation

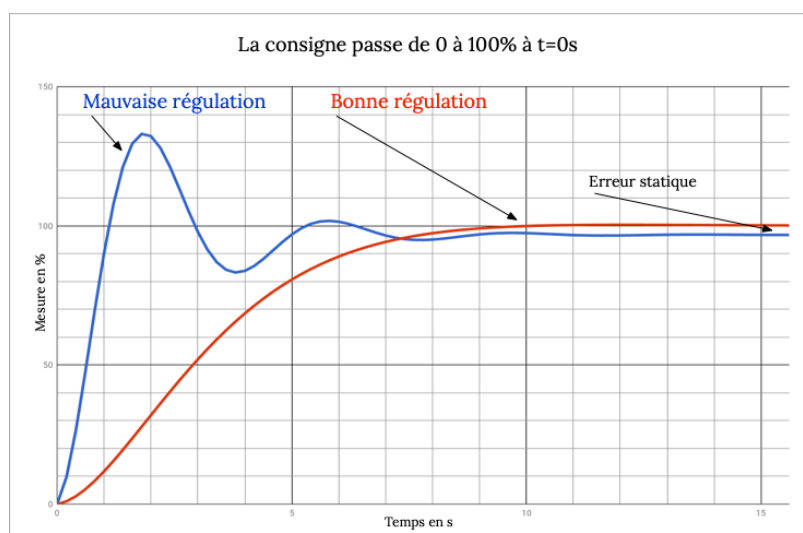
La bonne régulation amène une plus grande précision sur la grandeur réglée, permettant une diminution de la consigne pour un fonctionnement à la limite.



Dans l'exemple ci-dessus, la diminution de la disparité dans la valeur de la grandeur réglée, entraîne une diminution de la consigne de 1 μm pour l'obtention d'une épaisseur minimale sur toutes les pièces.

1.2.2. Baisse du coût de l'installation et gain de temps

On reconnaît une bonne régulation par sa capacité à accélérer le système sans entraîner de dépassement de la consigne. Dans l'exemple ci-dessous une bonne régulation entraîne une diminution du temps nécessaire à l'élévation de la température, ainsi que l'économie d'un dispositif de refroidissement.



1.2.3. Exemple industriel

Le sécheur reçoit l'amidon sous forme d'une pâte qui est projetée dans une boucle de séchage. En sortie l'amidon est sous forme de poudre.

Le taux d'humidité optimal commercial de la poudre est de 12 %.

La puissance électrique de séchage est de 5MW.

Principe de la régulation :

La chauffe est constante, on règle la vitesse de la vis d'alimentation pour tenir la température en sortie du sécheur ce qui correspond à tenir le taux d'humidité.

La régulation de la vitesse de la vis pour tenir la température posait de gros problèmes :

- Pompage dû à l'inertie du sécheur, d'où une fluctuation importante du taux d'humidité trop élevé.
- Bourrage du sécheur quand le taux d'humidité est trop haut.
- Irrégularité de l'alimentation de la vis.

L'apport des outils WinPIM+TR d'ADAPTECH a été décisif. En effet, grâce à la modélisation nous avons pu bien appréhender le process.

À notre grande surprise, nous nous sommes retrouvés face à un banal système du 1^{er} ordre sans retard.

Du fait de la simplicité du modèle, l'outil WinREG-PID nous a calculé des paramètres PID que nous avons introduits dans notre régulateur avec des résultats immédiats impressionnants.

La stabilité apportée, nous permet à l'heure actuelle d'obtenir un taux moyen d'humidité de 11.5 %, sans risque de bourrage du sécheur.

Gain estimé : 500 KF/an

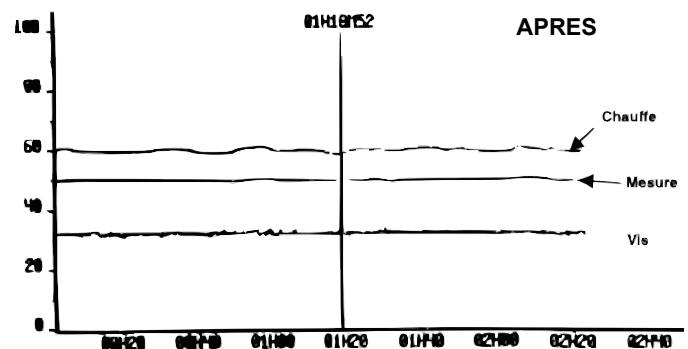
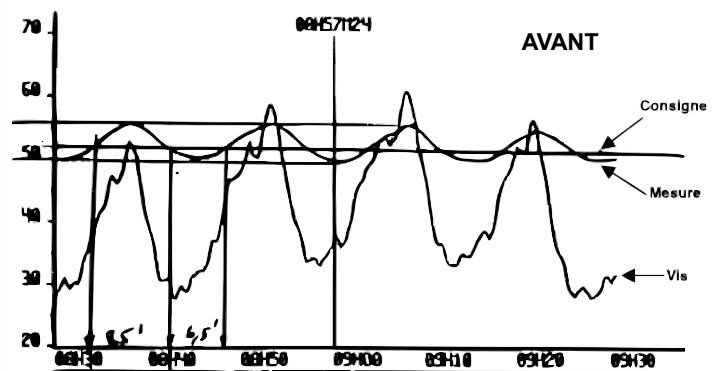
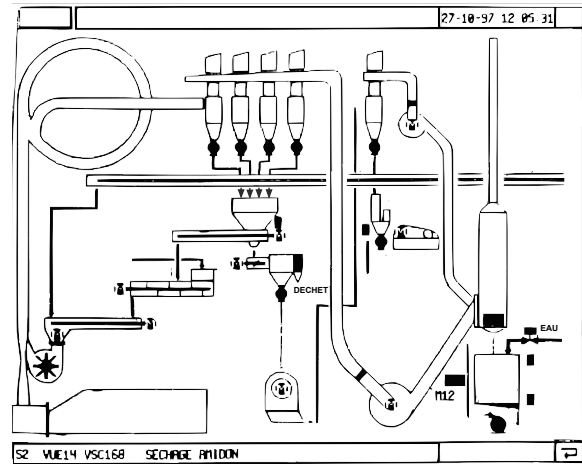
On peut souligner l'avantage de la modélisation en boucle fermée [WinPIM-BF] qui permet d'optimiser sans perturber le process.

Philippe LEJEUNE (CHAMTOR)

Responsable Automatisme Régulation

Erwan MAILLY (CHAMTOR)

Automaticien



1.3. Régulation ou Asservissement

- Dans une **régulation**, on s'attachera à maintenir constante la grandeur réglée d'un procédé soumis à des perturbations.
- Dans un **asservissement**, la grandeur réglée devra suivre les variations de la consigne.

1.4. Les servomécanismes

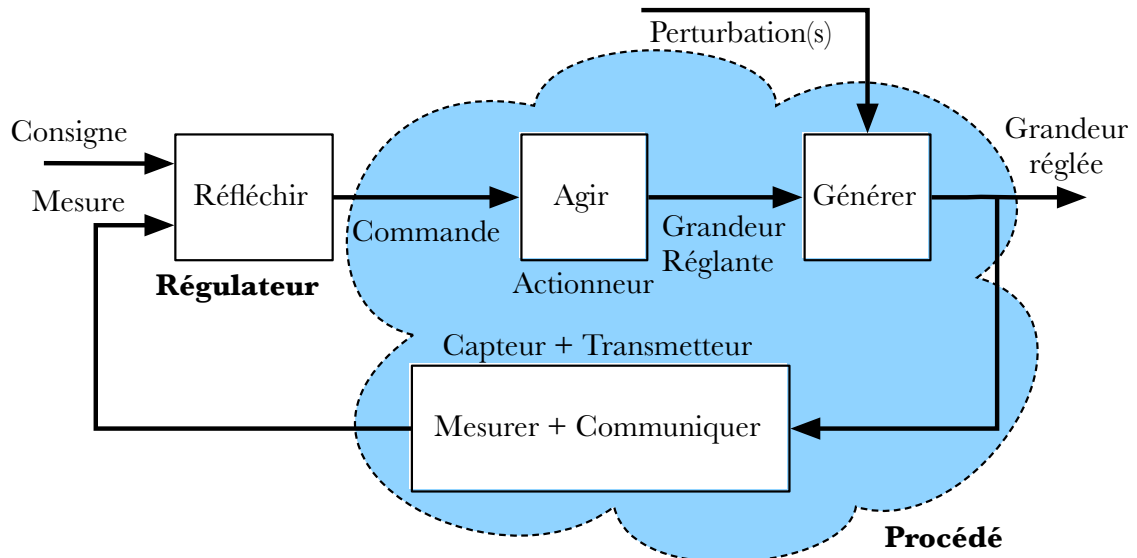
On appelle **servomécanisme**, un système asservi dont le rôle consiste à amplifier la puissance et dont la grandeur réglée est une grandeur mécanique tel qu'un effort, un couple, la position ou l'une de ses dérivées par rapport au temps, comme la vitesse et l'accélération.

1.5. Principe de fonctionnement

Pour réguler, il faut :

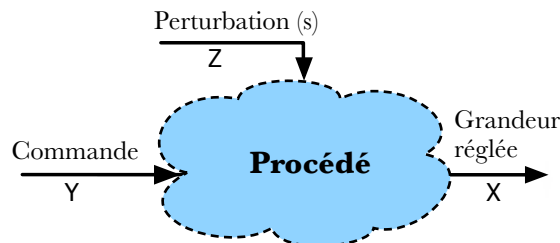
- ⊛ **Mesurer** la grandeur réglée avec un capteur.
- ⊛ **Réfléchir** sur l'attitude à suivre : c'est la fonction du régulateur. Le régulateur compare la mesure avec la consigne et élabore le signal de commande.
- ⊛ **Agir** sur la grandeur réglante par l'intermédiaire d'un organe de réglage.

On peut représenter une régulation de la manière suivante :



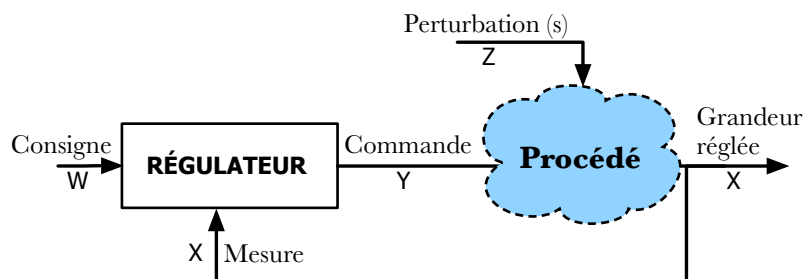
1.6. Fonctionnement en boucle ouverte (Manuel)

On parle de fonctionnement en boucle ouverte quand c'est l'opérateur qui contrôle l'organe de réglage. Ce n'est pas une régulation.



1.7. Fonctionnement en boucle fermée (Automatique)

C'est le fonctionnement normal d'une régulation. Le régulateur compare la mesure de la grandeur réglée et la consigne et agit en conséquence pour s'en rapprocher.



Remarque :

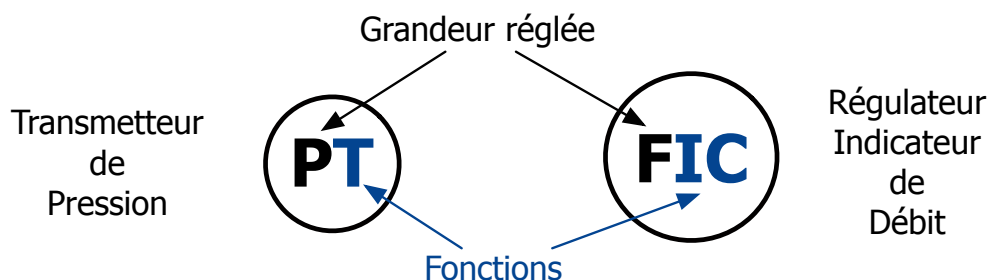
Pour simplifier les calculs, on confond souvent la grandeur réglée avec sa mesure X.

2. Schémas de représentation

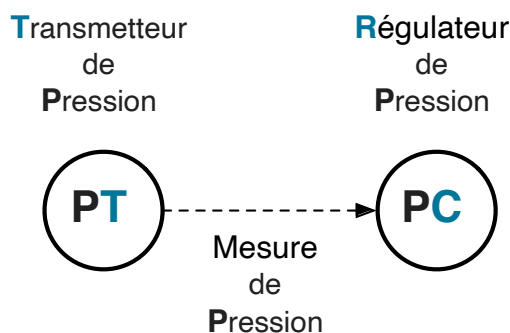
2.1. Schéma TI (P&ID Piping and Instrumentation Diagram)

2.1.1. Principe

La norme NF E 04-203 définit la représentation symbolique des régulations, mesures et automatisme des processus industriels. Les instruments utilisés sont représentés par des cercles entourant des lettres définissant la grandeur physique réglée et leur(s) fonction(s). La première lettre définit la grandeur physique réglée, les suivantes la fonction des instruments.

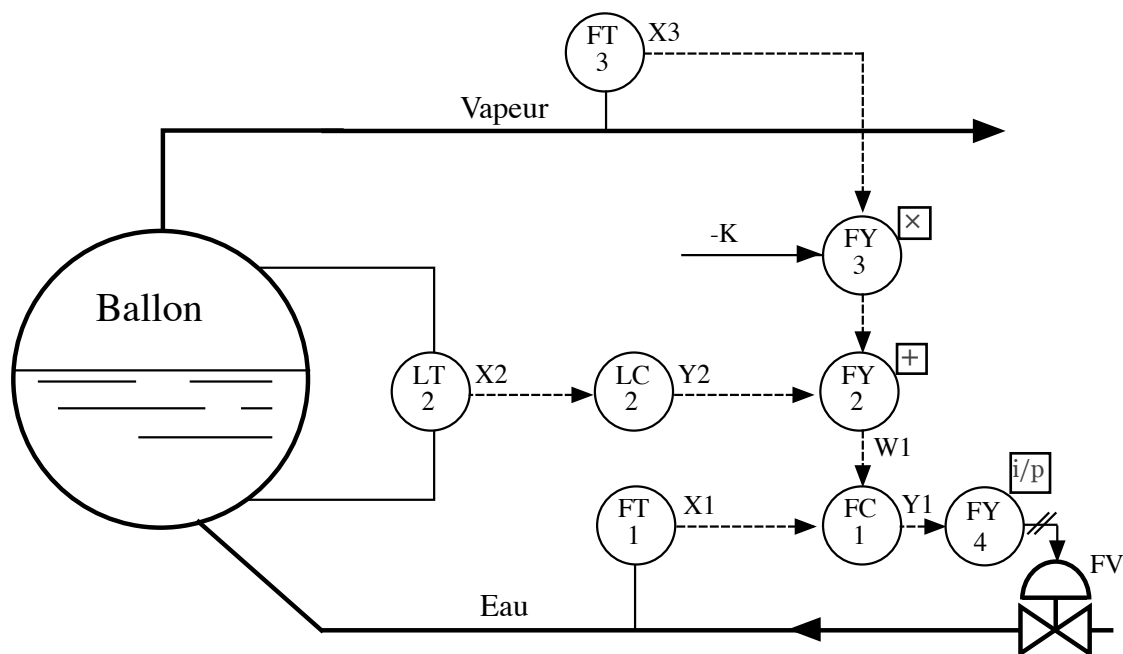


Les parcours de l'information est matérialisé par une flèche dont l'allure dépend du support de l'information.



2.1.2. Exemple

Schéma TI d'une régulation de niveau à trois éléments dans un ballon :



2.1.3. Signification des lettres

	Grandeur physique	Fonction	Complément
A	Analyse	Alarme	
B	Combustion (Flamme)		
C	Conductivité (ou autre)	Régulateur	
D	Masse Volumique (ou autre)		Différence
E	Tension	Élément primaire	
F	Débit		Proportion
G	(Libre)	à glace	
H	Commande manuelle		Haut - HH = Très haut
I	Courant électrique	Indicateur	
J	Puissance		
K	Temps		
L	Niveau	Voyant lumineux	Bas - LL = Très bas
M	Humidité (ou autre)		
N	Viscosité (ou autre)		
O	(Libre)		
P	Pression		
Q	Quantité	Totaliseur	
R	Rayonnement	Enregistreur	
S	Vitesse	Commutateur	
T	Température	Transmetteur	
U	Variables multiples		
V	Vibrations	Vannes	
W	Masse ou Force	Puits thermométrique	
X	(Libre)		
Y	Événement	Relai de calcul	
Z	Position		

2.1.4. Les symboles

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

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

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

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

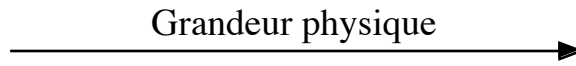
	Pompe	
	Pompe volumétrique	
	Electrovanne	

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

2.2. Schéma fonctionnel

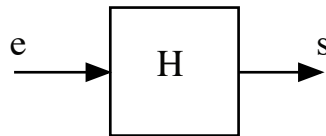
Le schéma fonctionnel tente de représenter les relations entre les différentes grandeurs physiques des boucles de régulation. Il sera composé uniquement des éléments suivants :

- De lignes de parcours d'une **grandeur physique**. Ces lignes représentent le sens et le parcours d'une grandeur physique de la régulation :



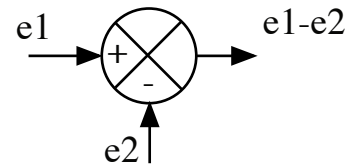
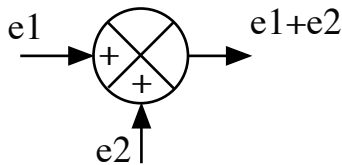
- On peut mesurer une grandeur physique.

- De blocs qui représentent un ou plusieurs **éléments** de la chaîne de régulation qui assure la relation entre deux grandeurs physiques, relation caractérisée par la fonction de transfert. La fonction de transfert permet pour tous types de signaux d'avoir la relation suivante : $s = H \times e$



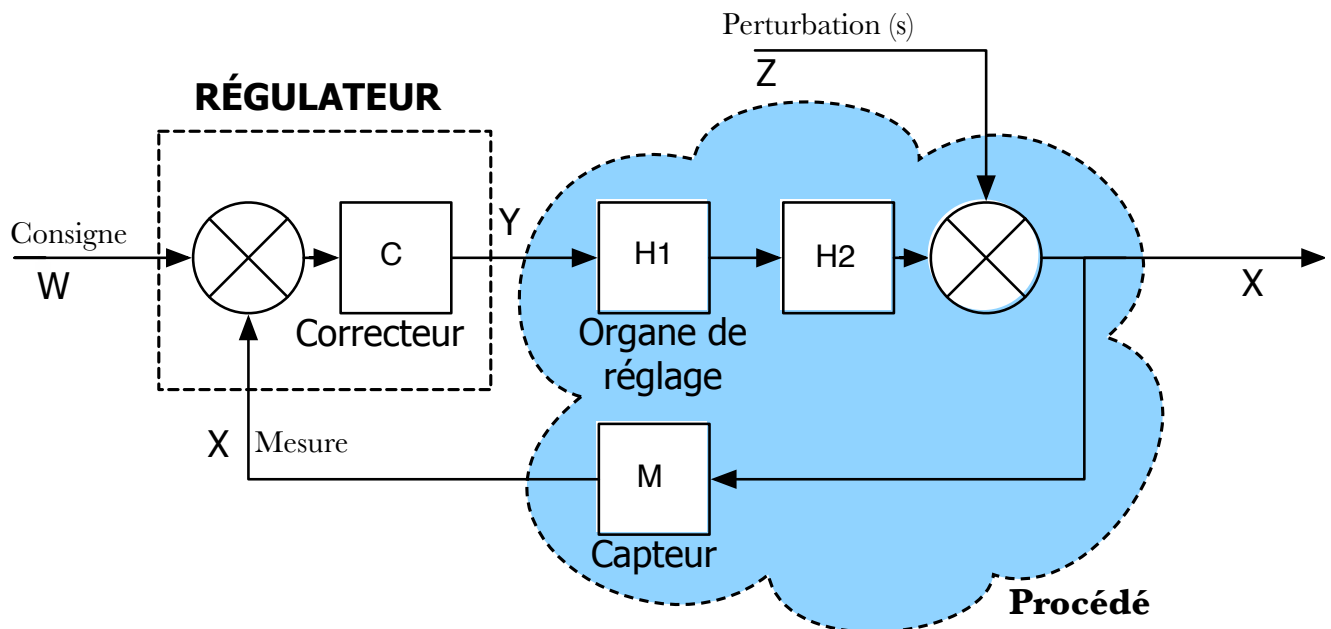
- On peut toucher un élément (mais pas une grandeur physique).

- De sommateurs ou comparateurs, qui permettent l'addition ou la soustraction de **grandeurs physiques** de même nature :



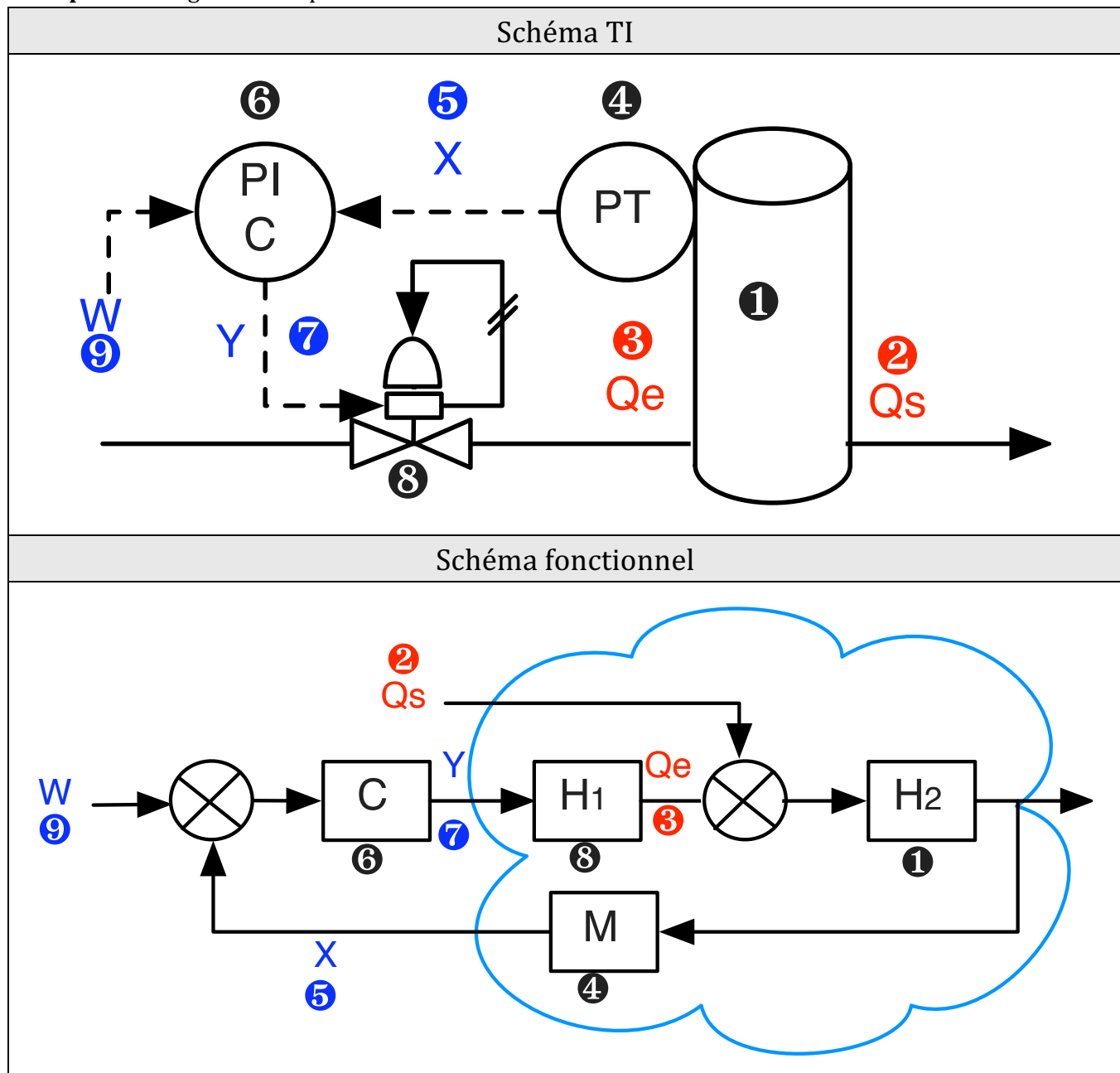
2.3. Représentation fonctionnelle d'une boucle de régulation

D'une manière générale, une boucle de régulation peut être représentée de la manière suivante :



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

Exemple : une régulation de pression.



Éléments de la régulation :

- ① Réservoir.
- ② Débit de sortie Q_s du réservoir – Grandeur perturbatrice.
- ③ Débit d'entrée Q_e du réservoir – Grandeur réglante.
- ④ Transmetteur de pression PT.
- ⑤ Mesure X de la pression.
- ⑥ Correcteur du régulateur PIC.
- ⑦ Sortie commande Y du régulateur PIC.
- ⑧ Vanne de régulation – Organe de réglage.
- ⑨ Consigne W du régulateur PIC.

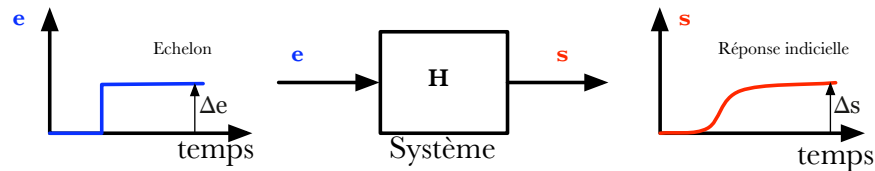
3. Caractéristiques statique et dynamique d'un système

Dans ce qui suit le système pourra être un procédé ou une régulation.

3.1. Stabilité

3.1.1. Système stable

Un système est dit naturellement stable si à une variation finie de la grandeur réglante e correspond une variation finie de la grandeur réglée s .

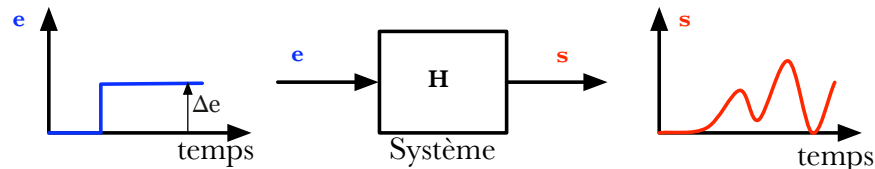


Exemple de procédé :

- ⊕ Grandeur réglée : température d'une pièce ;
- ⊕ Grandeur réglante : puissance du radiateur.

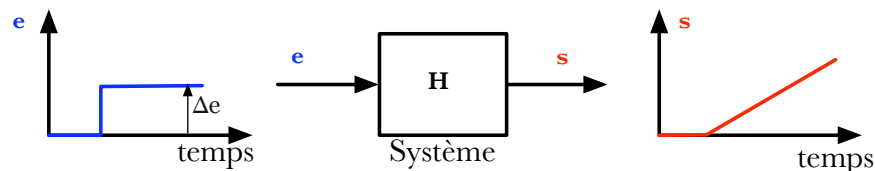
3.1.2. Système instable

Un système est dit instable si à une variation finie de la grandeur réglante e correspond une variation continue de la grandeur réglée s .



3.1.3. Système intégrateur

On dit qu'un système est intégrateur, si pour une entrée e constante, la sortie s est une droite qui n'est pas horizontale. Un procédé intégrateur est instable.

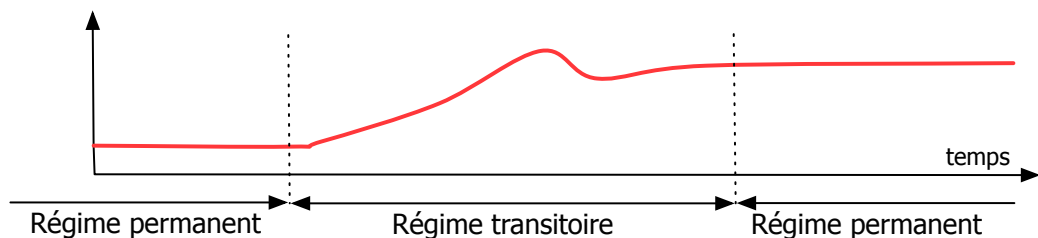


Exemple de procédé :

- ⊕ Grandeur réglée : niveau ;
- ⊕ Grandeur réglante : débit d'alimentation.

3.2. Régime transitoire - Régime permanent

On dit que le système fonctionne en régime permanent, si l'on peut décrire son fonctionnement de manière « simple ». Dans le cas contraire, on parle de régime transitoire.

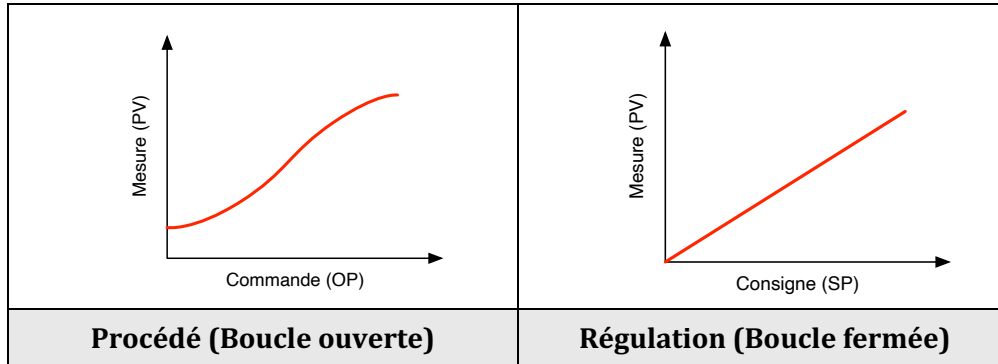


Pour passer d'un régime permanent à un autre, le système passe par un régime transitoire.

3.3. Caractéristiques statiques d'un système

3.3.1. Courbe caractéristique

La caractéristique statique est la courbe représentant la grandeur de sortie **s** en fonction de la grandeur d'entrée **e** : $s = f(e)$.



Remarque : On ne peut pas tracer la caractéristique statique d'un système instable.

3.3.2. Gain statique

Si le système est naturellement stable, le gain statique **K** est le rapport entre la variation de la grandeur de sortie Δs et la variation de la grandeur d'entrée Δe .

$$K = \frac{\Delta s}{\Delta e}$$

Remarque : Le gain statique n'est défini que pour un système stable.

3.3.3. Erreur statique

Dans une régulation, l'erreur statique ε_s (ou écart), c'est la différence entre la consigne **w** et la mesure **x** en régime permanent. L'erreur statique caractérise la précision d'une régulation.

$$\varepsilon_s = w - x$$

3.3.4. Linéarité

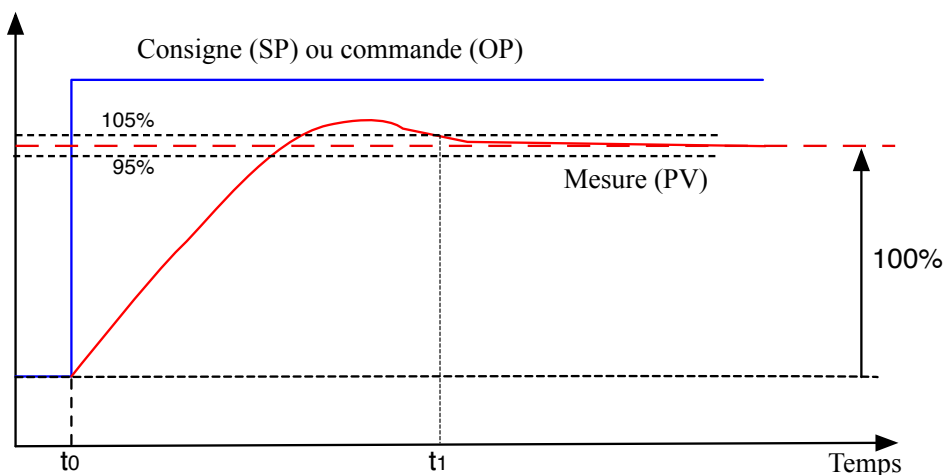
Un système linéaire obéit au principe de superposition. L'effet de la somme d'excitations est égal à la somme des effets de chaque excitation.

3.4. Caractéristiques dynamiques

3.4.1. Temps de réponse

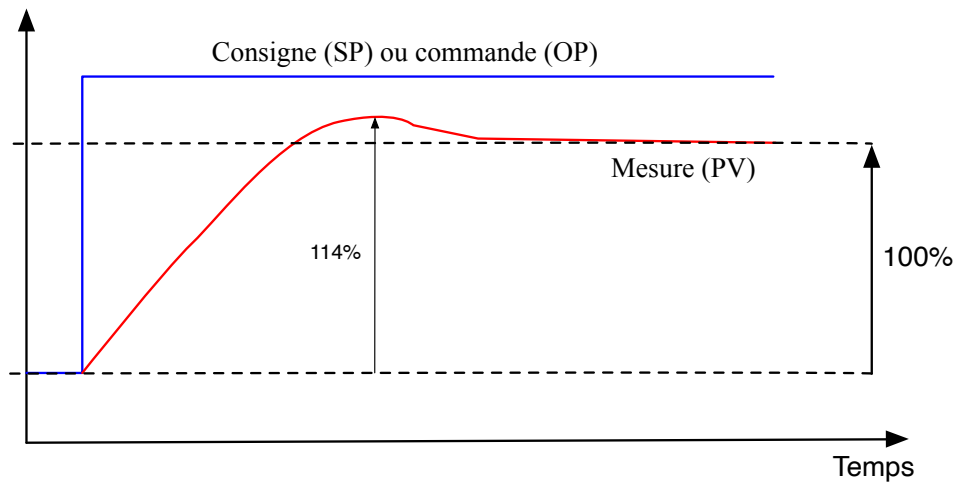
C'est l'aptitude d'un système à suivre les variations de son entrée, elle caractérise sa rapidité. Dans le cas d'un échelon à son entrée, la réponse indicielle de la sortie définit les différents temps de réponse.

Dans l'exemple ci-dessous, on mesure le temps de réponse à $\pm 5\%$ qui est égal à $t_1 - t_0$.



3.4.2. Dépassement

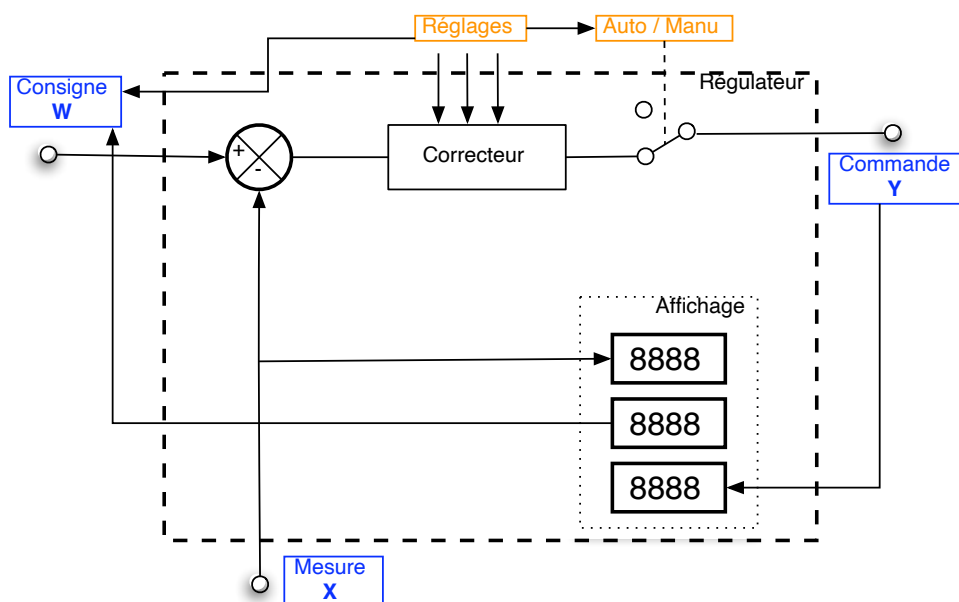
Le premier dépassement de la réponse indicielle permet de qualifier la stabilité d'un procédé. Plus celui-ci sera important, plus le procédé sera proche de l'instabilité. Dans certaines régulations, aucun dépassement n'est toléré. Dans d'autres régulations, un dépassement inférieur à 15 % est considéré comme acceptable. Dans la réponse indicielle ci-dessous, le premier dépassement est de 14%.



4. Les régulateurs

4.1. Structure de principe d'un régulateur

- Le régulateur compare la mesure **X** et la consigne **W** pour générer le signal de commande **Y**.
- La mesure **X**, image de la grandeur réglée provenant d'un capteur et transmetteur, est transmise sous forme d'un signal électrique ou pneumatique ;
- La consigne **W** qui peut être interne (fournie en local par l'opérateur) ou externe ;
- L'affichage se fait en % pour la commande **Y** et généralement en unités physiques pour la consigne **W** et la mesure **X**.
- Quand un régulateur est en fonctionnement automatique, sa sortie **Y** dépend de la mesure **X** et de la consigne **W**. Ce n'est pas le cas s'il est en fonctionnement manuel.



Les notations utilisées ci-dessus ne correspondent pas à celles que l'on retrouve dans un régulateur industriel :

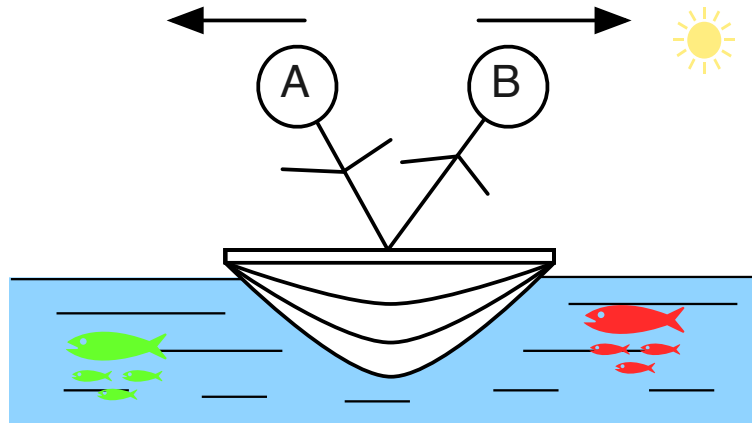
- La mesure **X** devient PV (Point Value).
- La consigne **W** devient SP (Set Point).
- La commande **Y** devient OP (Output Power).

4.2. Choix du sens d'action d'un régulateur

4.2.1. Définition

Un système est direct, quand sa sortie varie dans le même sens que son entrée. Dans le cas contraire, le système est dit inverse. Dans un régulateur, c'est la mesure qui est considérée comme une entrée.

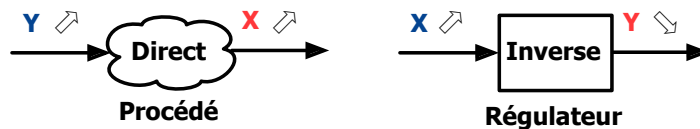
4.2.2. Règle de stabilité



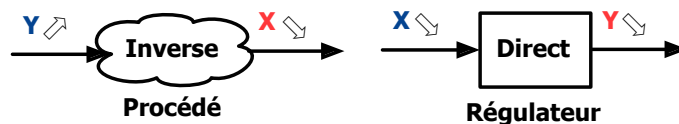
Dans la barque représentée ci-dessus, si **A** se penche trop vers la gauche, **B** est obligé de se pencher sur la droite pour maintenir la barque en équilibre et ne pas finir dans l'eau. Dans une boucle de régulation c'est la même chose, le régulateur doit agir pour limiter les variations du procédé.

Règle : Pour avoir un système stable dans une boucle de régulation, le régulateur doit agir de manière à s'opposer à une variation de la mesure **X** non désirée. Si la mesure augmente, le couple régulateur + procédé doit tendre à la faire diminuer.

Si le procédé est direct : Il faut mettre le sens d'action du régulateur sur inverse.



Si le procédé est inverse : Il faut mettre le sens d'action du régulateur sur direct.



Important : Dans le cours sur les correcteurs, on ne considérera que les correcteurs inverses.

4.2.3. Mise en œuvre pratique

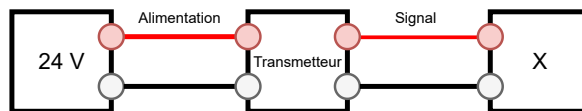
- ⊕ Mettre le régulateur en fonctionnement manuel.
- ⊕ Augmenter la sortie commande du régulateur.
- ⊕ Si la mesure augmente, mettre le régulateur en sens inverse.
- ⊕ Si la mesure diminue, mettre le régulateur en sens direct.

4.3. Raccordements électriques

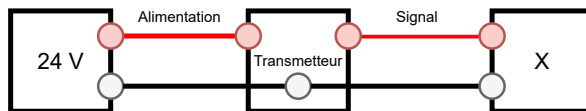
4.3.1. Le transmetteur

On peut séparer trois types de transmetteur :

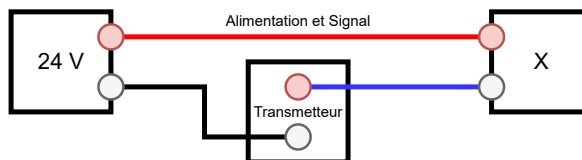
- Les transmetteurs 4 fils (actifs) qui disposent d'une alimentation et qui fournissent le courant I.



- Les transmetteurs 3 fils (actifs) sont des transmetteur 4 fils, avec les entrées moins reliées.



- Les transmetteurs 2 fils (passifs) qui ne disposent pas d'une alimentation et qui contrôlent le courant I fourni par une alimentation externe.



4.3.2. Schéma de principe d'une boucle de courant

Une boucle 4-20 mA est composée :

- D'un générateur, qui fournit le courant électrique.
- De récepteurs, qui mesurent le courant électrique qui les traverse.

Remarque :

- Le courant sort par la borne + du générateur.
- Le courant entre par la borne + des récepteurs.

4.3.3. Générateur ou récepteur ?

Récepteur	Générateur
Transmetteur 2 fils	Transmetteur 4 fils
Entrée mesure du régulateur	Transmetteur 3 fils
Organe de réglage	Alimentation
Enregistreur	Sortie commande régulateur

4.3.4. Mise en œuvre pratique

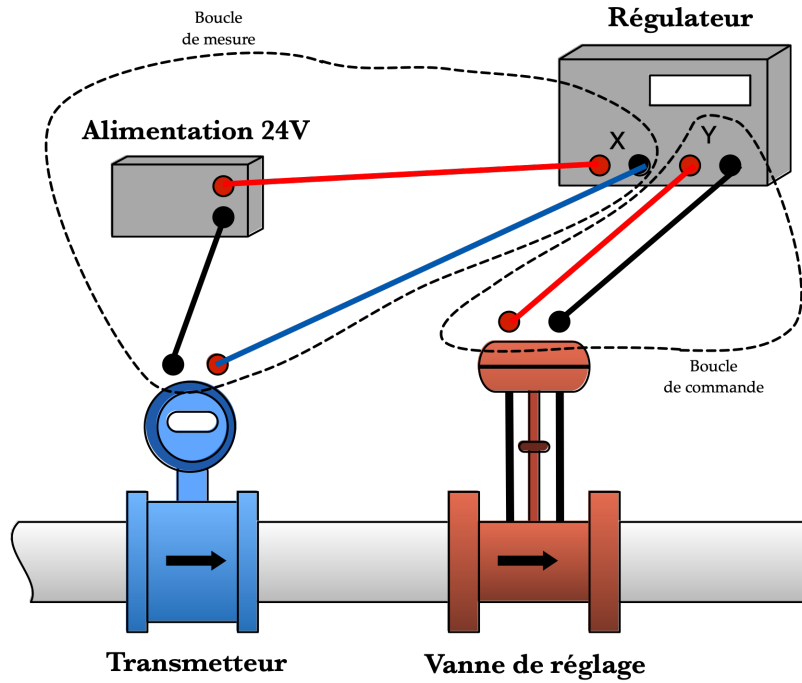
Chercher le nombre de boucle de courant. Pour chaque boucle de régulation, il y a une boucle de commande et une boucle de mesure, soit deux boucles de courant.

- Pour chaque boucle de courant, faire la liste de l'instrumentation mise en œuvre.
- Dans chaque liste, déterminer l'unique élément générateur.
- Relier le **(+)** du générateur au **(+)** d'un récepteur avec un fil **rouge**.
- Relier le **(-)** du générateur au **(-)** d'un récepteur avec un fil **noir**.
- Si possible, relier les **(+)** disponibles des récepteurs, aux **(-)** disponibles d'autres récepteurs avec un fil **bleu**.

Remarques :

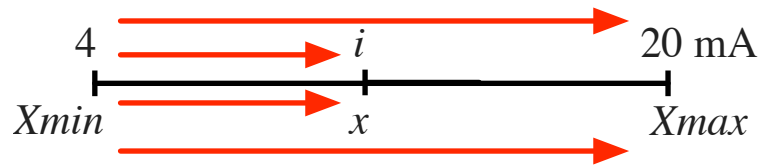
- Dans chaque boucle de courant, il y a autant de fils de liaison que d'éléments.
- Pas de fil de couleur **bleu** sur le générateur.

4.3.5. Schéma de câblage d'une boucle de régulation de débit



4.4. Astuce de calcul

Dans une boucle de courant, le courant est l'image d'une grandeur physique. Grandeur physique qui peut être une mesure ou une commande. On pourra représenter cette relation linéaire à l'aide du graphique suivant :



Ce graphique nous permet alors d'écrire la relation suivante :

$$\frac{i - 4}{x - X_{min}} = \frac{20 - 4}{X_{max} - X_{min}} \Rightarrow (i - 4)(X_{max} - X_{min}) = (20 - 4)(x - X_{min})$$

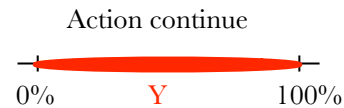
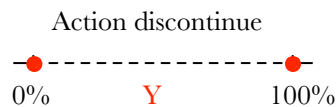
Remarque : Pour faciliter les calculs, mettre ce que l'on cherche en haut dans le graphique.

5. Régulation Tout Ou Rien

5.1. Action continue - Action discontinue

On sépare le fonctionnement d'un régulateur en deux types d'actions distincts :

- Une action continue avec une sortie du régulateur peut prendre toutes les valeurs comprises entre 0 et 100%.
- Une action discontinue, dans laquelle la sortie Y du régulateur ne prend que deux valeurs. On appelle aussi le fonctionnement discontinue fonctionnement Tout Ou Rien.

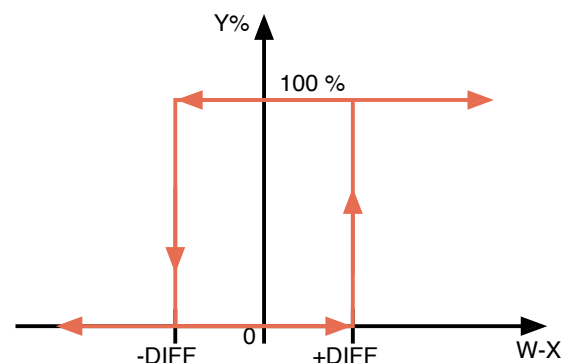


5.2. Présentation

Le fonctionnement TOR se caractérise par deux états possibles pour la commande. Celui qui correspond à la commande maximale (100 %) et celui qui correspond à la commande minimale (0 %). Un seuil limite la fréquence de commutation du système pour éviter une fatigue prématurée des organes de réglages.

Le réglage du régulateur se fait à l'aide de deux paramètres :

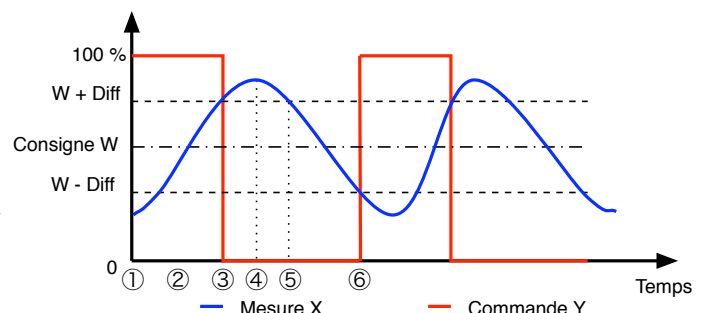
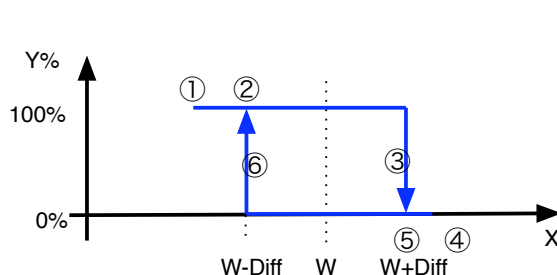
- La consigne W, fournie en unité de mesure ;
- Le seuil DIFF, donné généralement en % de la consigne.



5.3. Fonctionnement

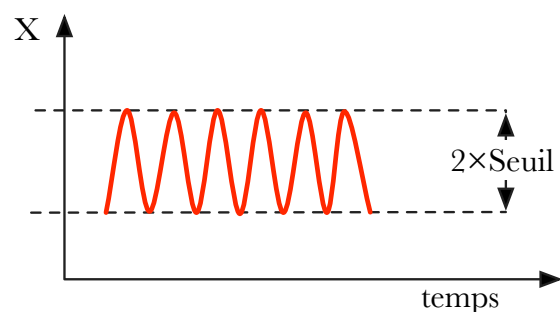
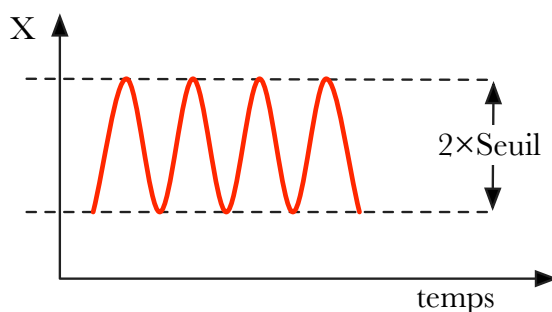
La grandeur réglée oscille autour du point de fonctionnement. À chaque dépassement des seuils de commutation, la sortie du régulateur change d'état. Compte tenu de l'inertie du système, la valeur absolue de l'erreur ε peut dépasser le seuil DIFF.

Remarque : La mesure ne peut pas être constante dans ce type de régulation, le système est en régime d'instabilité entretenue.



5.4. Influence du paramètre seuil

La valeur du seuil influe sur la fréquence des permutations et l'amplitude de la variation de la grandeur mesurée. Plus le seuil est faible, plus la fréquence est élevée, moins l'amplitude est grande. Une augmentation de la fréquence réduit d'autant la durée de vie de l'organe de réglage.



6. Action Proportionnelle

6.1. Rappel

Pleine échelle : C'est l'étendu des mesures que peut prendre le régulateur.

$$PE = X(100\%) - X(0\%)$$

Elle est réglée au niveau du régulateur par deux paramètres.

Sur les régulateurs Eurotherm de la salle de TP, le nom des paramètres est VALL et VALH.

6.2. Présentation

Dans la mesure où Y est compris entre 0% et 100%, la valeur de la commande Y du régulateur est proportionnelle à l'erreur (W-X).

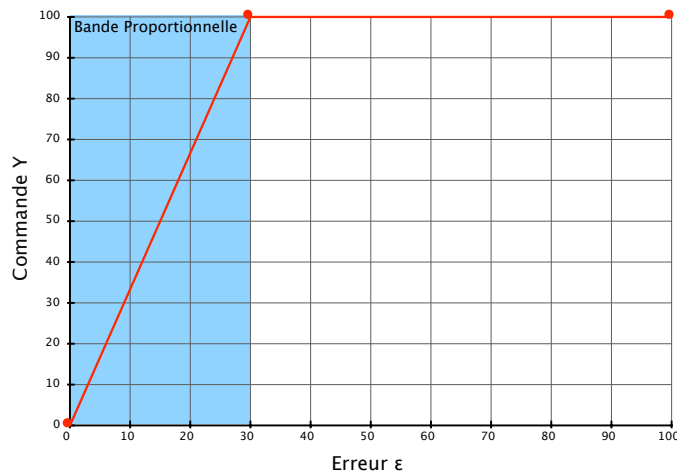
Pour un régulateur inverse, on a :

$$Y = A(W-X)$$

Avec A, le gain proportionnel.

6.3. Bande proportionnelle

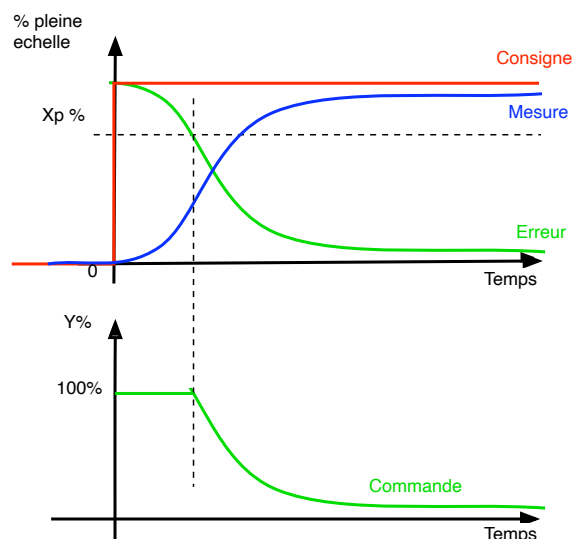
Si on représente la relation entre la commande et l'erreur, la bande proportionnelle X_p est la partie où la commande est proportionnelle à l'erreur.



On remarque que $A \times X_p = 100$.

6.4. En fonctionnement

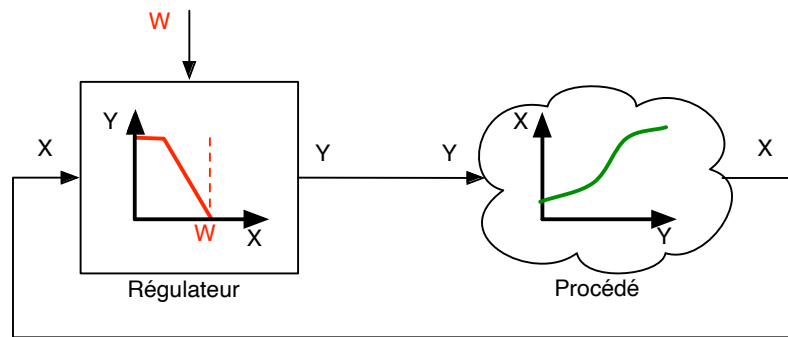
Lors d'une variation en échelon de la consigne, le système à une réponse ressemblant à celle représentée sur la figure ci-dessous.



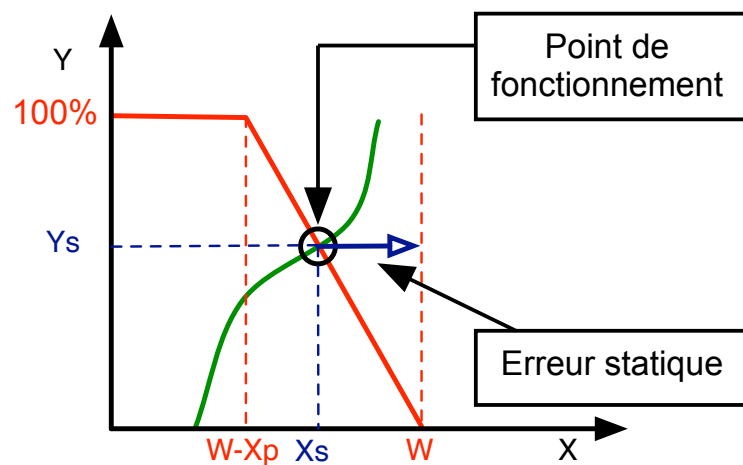
La mesure évolue pour se rapprocher de la consigne, sans jamais l'atteindre.

6.5. Détermination du point de fonctionnement

La régulation d'un procédé peut être représentée par la figure ci-dessous.



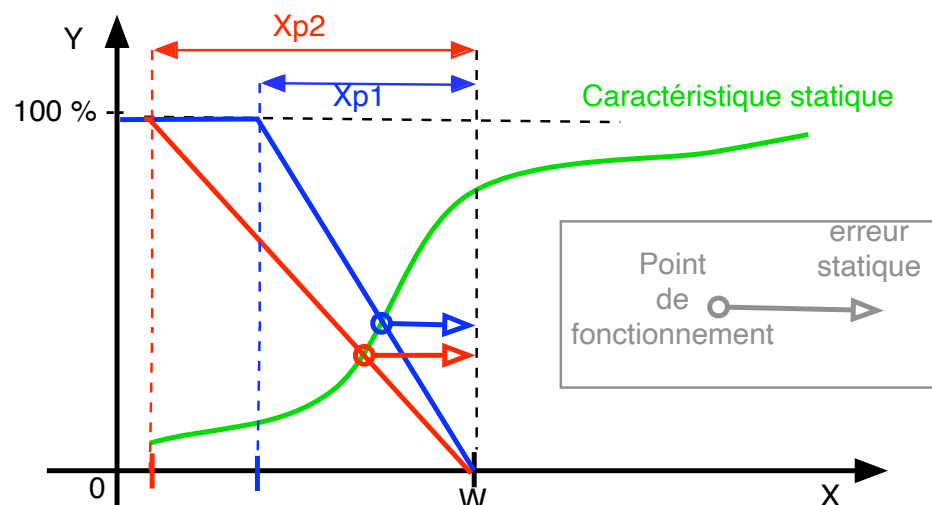
- On trace sur le même graphe les relations entre la mesure X et la commande Y , pour le régulateur et le procédé.
- Le point de fonctionnement en régime permanent appartient aux deux courbes. Il correspond à leur intersection (X_s, Y_s) .
- La valeur de l'erreur statique est alors $E_s = W - X_s$.



6.6. Influence de la bande proportionnelle

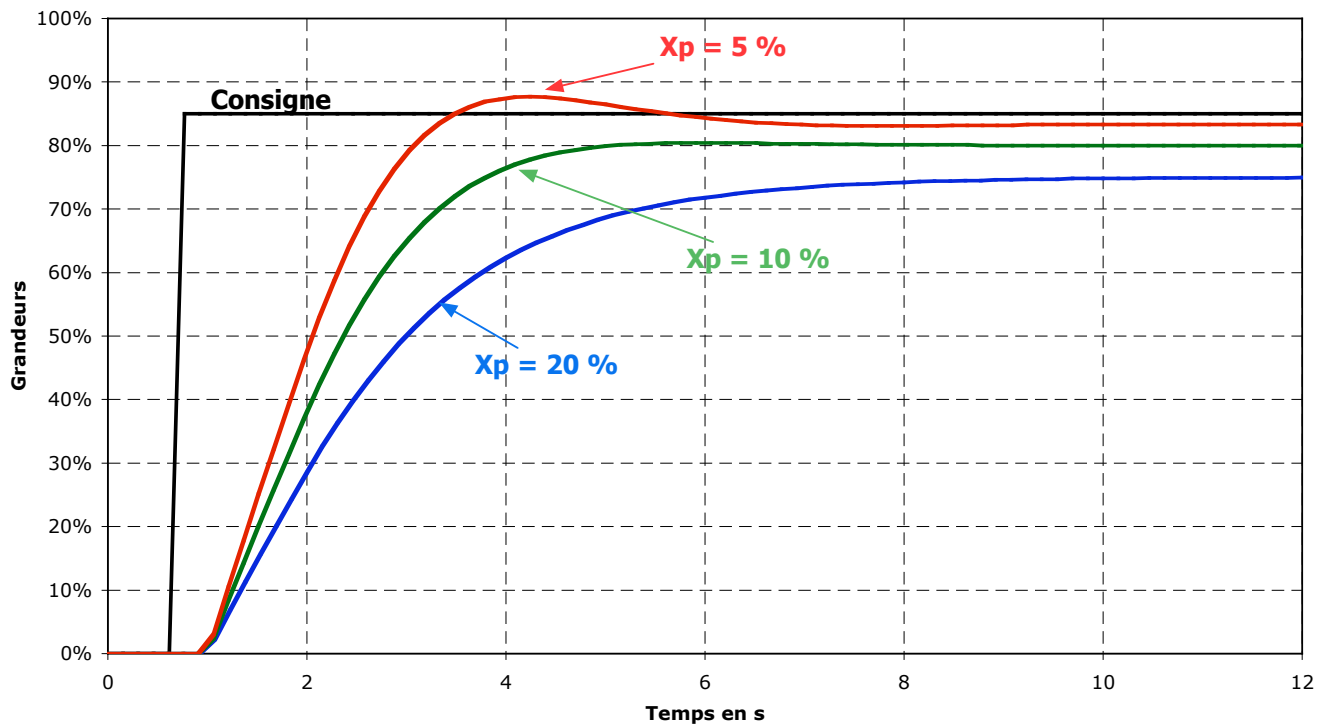
6.6.1. Comportement statique

On s'aperçoit graphiquement que plus la bande proportionnelle est petite, plus l'erreur en régime permanent est petite. Sur la figure ci-dessous $X_{p1} < X_{p2}$:



6.6.2. Comportement dynamique

Plus la bande proportionnelle est petite, plus le temps de réponse du système est court. En effet, pour la même erreur, la commande fournie est plus importante. Si la bande proportionnelle se rapproche trop de 0, le système devient instable.



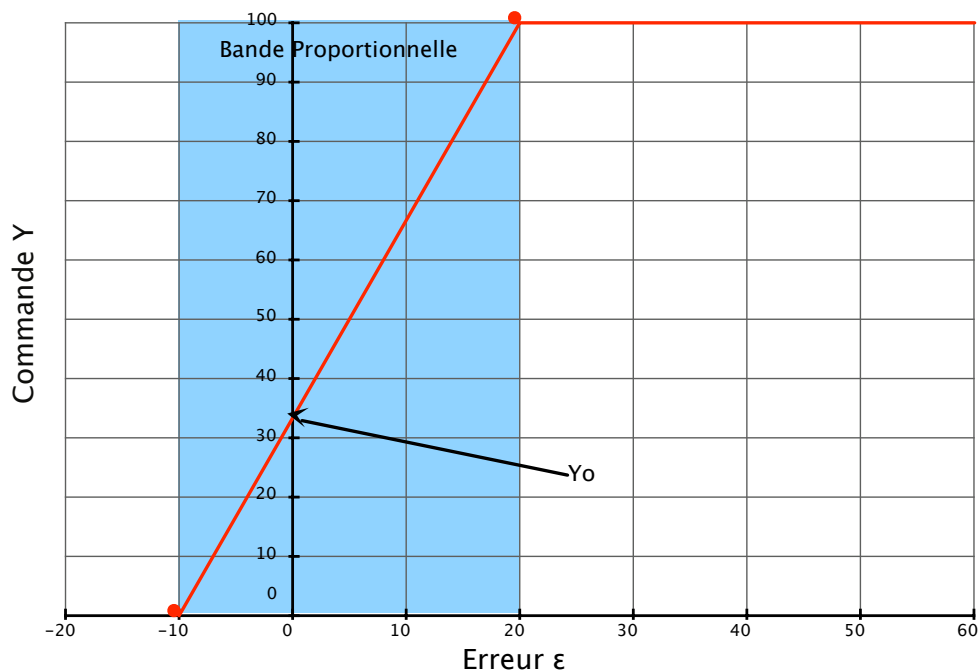
Le fonctionnement TOR correspond à une bande proportionnelle nulle.

6.7. Décalage de bande - Talon - Intégrale manuelle

De manière plus générale, la formule qui relie la sortie Y du régulateur à la différence entre la mesure et le consigne est :

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

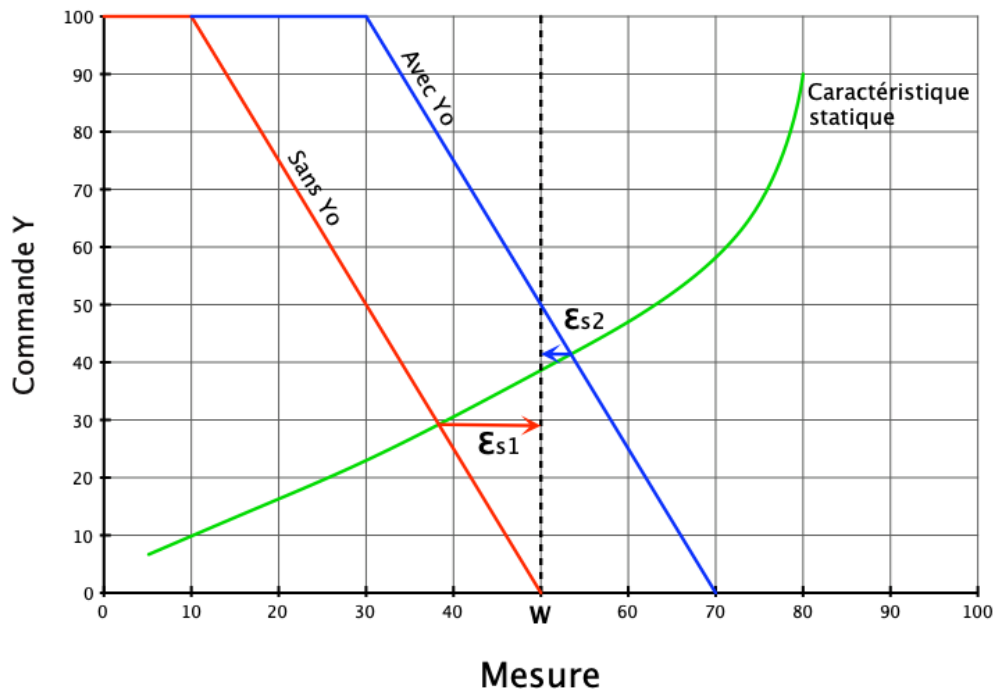
Avec Y_0 , le décalage de bande à régler sur le régulateur. Ainsi, pour un régulateur à action inverse on a la caractéristique ci-contre.



6.8. Influence du décalage de bande

6.8.1. Statique

On s'aperçoit qu'avec un bon choix de la valeur du décalage de bande, on réduit très fortement l'erreur statique.

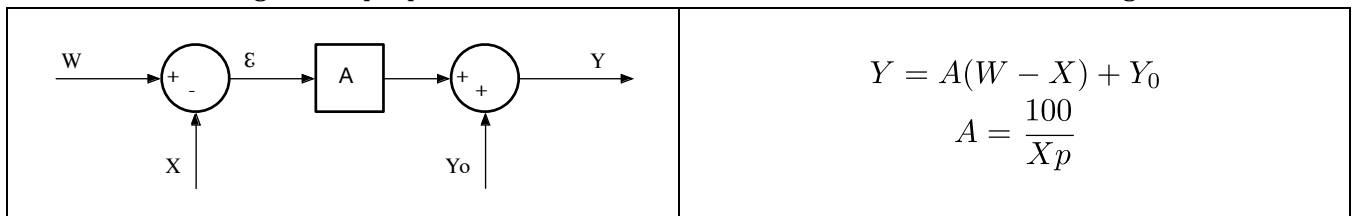


6.8.2. Dynamique

L'influence sur le comportement en régime transitoire est principalement fonction de la caractéristique statique.

6.9. Représentation fonctionnelle d'une régulation proportionnelle

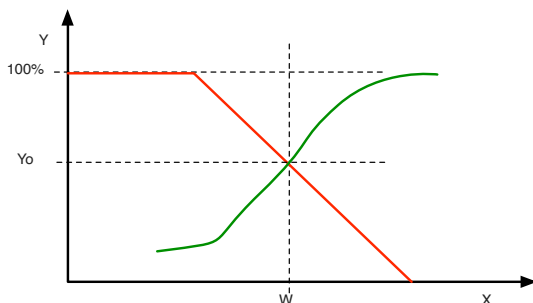
Dans le cas d'une régulation proportionnelle à action inverse, le schéma fonctionnel du régulateur devient :



7. Action intégrale

7.1. Comparaison avec intégrale manuelle

On a vu dans le paragraphe précédent l'utilité de l'intégrale manuelle. Si on la choisit bien, on annule l'erreur statique.



Mais cette valeur doit être modifiée quand :

La caractéristique statique se déplace sous l'effet d'une grandeur perturbatrice.	La valeur de la consigne W change

7.2. Qu'est-ce qu'une action intégrale ?

On veut :

- ⊕ Une action qui évolue dans le temps.
- ⊕ Une action qui tend à annuler l'erreur statique.

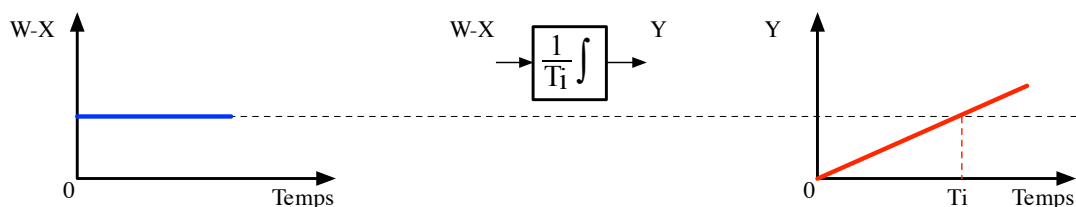
Cette fonction est remplie par l'opérateur mathématique : 'intégration de l'erreur par rapport au temps'. Ainsi, dans un régulateur, on définit l'action intégrale à partir d'un paramètre T_i avec :

$$Y = \frac{1}{T_i} \int (W - X) dt$$

T_i est le temps intégral, définie en unité de temps.

7.3. Fonctionnement

Pour étudier l'influence de l'action intégrale, on s'intéressera à la réponse du module intégral à un échelon. Plus T_i est petit, plus Y augmente rapidement. Le temps T_i est le temps pour que la commande Y augmente de la valeur de l'entrée $W-X$.



Pour annuler l'action intégrale, il existe deux solutions fonction du régulateur.

- ⊕ Mettre T_i à zéro, si c'est possible ;
- ⊕ Sinon mettre T_i à sa valeur maximale. Si le correcteur est coopératif, il indiquera Supp.

Dans les régulateurs de la salle de TP, il faut mettre T_i à 0, pour qu'il affiche $T_i = \text{Supp.}$

7.4. Actions conjuguées PI

En général, le régulateur ne fonctionne pas en action intégrale pure (trop instable). Il fonctionne en correcteur Proportionnel Intégral (PI). Le couple, Bande Proportionnelle - Temps Intégral, définit deux types de fonctionnement qui sont représentés dans le tableau suivant.

Série	Parallèle
$Y = A \left(\varepsilon + \frac{1}{T_i} \int \varepsilon . dt \right) = A . \varepsilon + \frac{A}{T_i} \int \varepsilon . dt$	$Y = A . \varepsilon + \frac{1}{T_i} \int \varepsilon . dt$

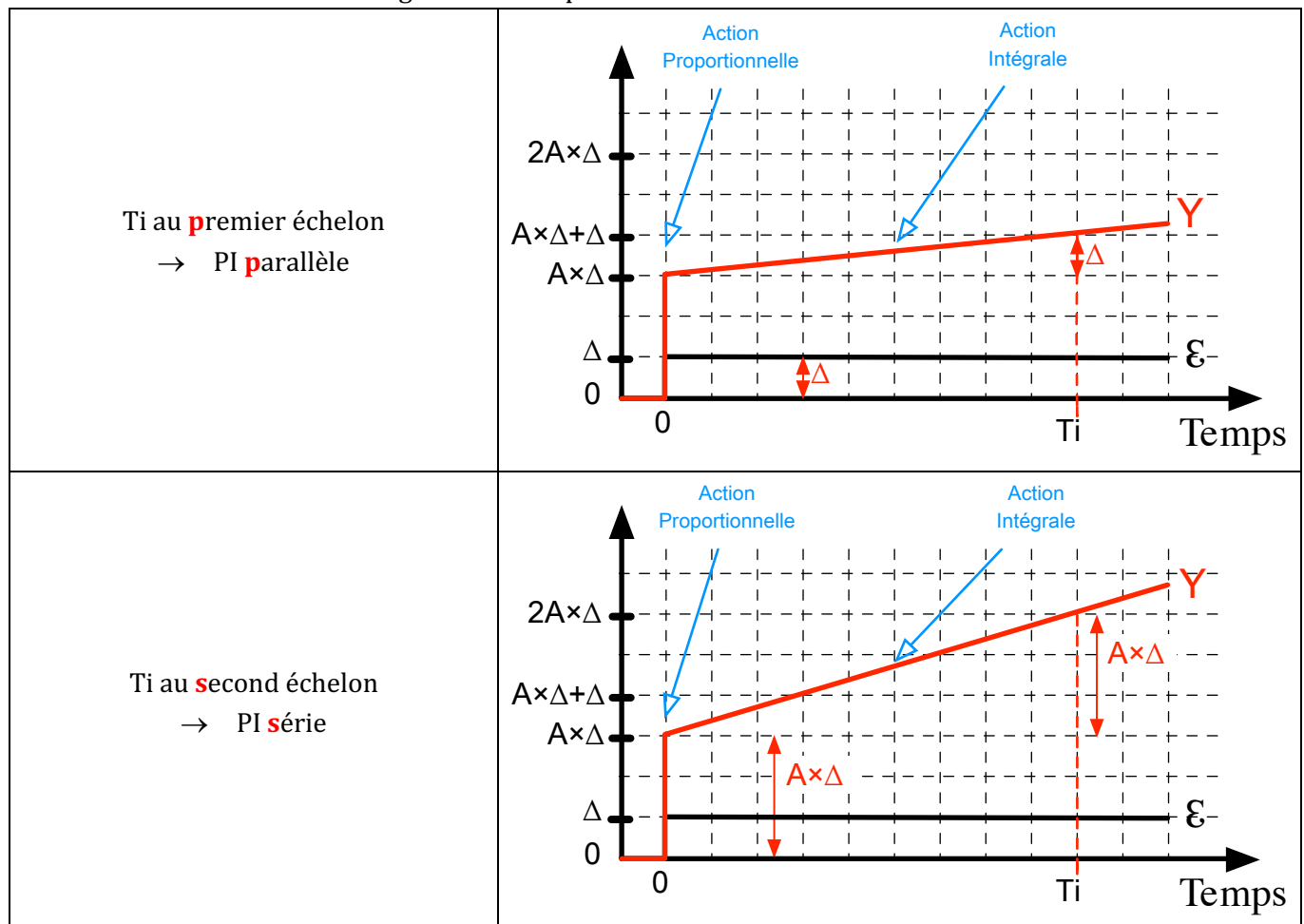
Conséquences :

Dans un régulateur série, la modification de la bande proportionnelle entraîne la modification de l'influence de l'action intégrale.

Avant de procéder au réglage du régulateur, il est nécessaire de connaître sa structure interne.

7.5. Réponses indicielles

On observe la commande d'un régulateur en réponse à un échelon Δ d'erreur ε .



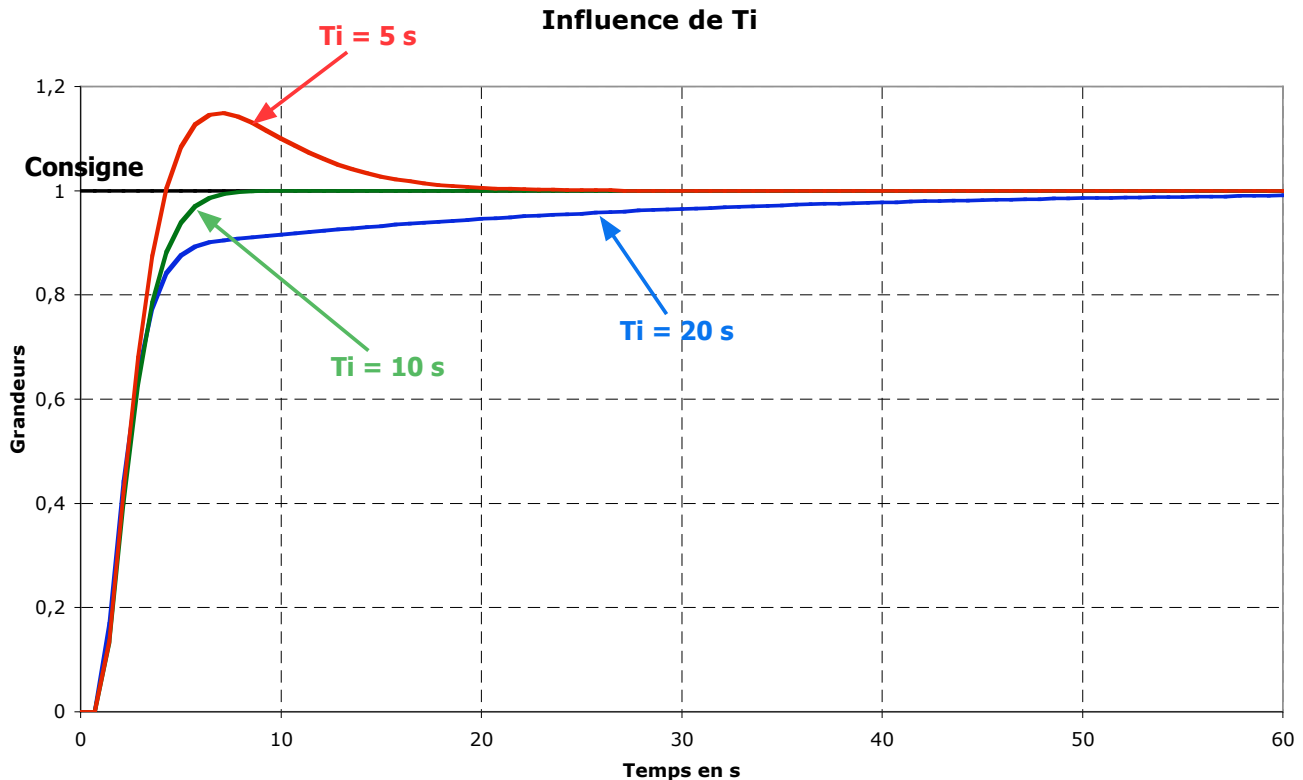
7.6. Influence du paramètre temps intégral

7.6.1. Comportement statique en boucle fermée

Quelle que soit la valeur de l'action intégrale, l'erreur statique est nulle (si le système est stable).

7.6.2. Comportement dynamique en boucle fermée

Lors d'une réponse indicielle, plus T_i est petit, plus le système se rapproche de l'instabilité.



8. Action Dérivée

8.1. Qu'est-ce qu'une action dérivée ?

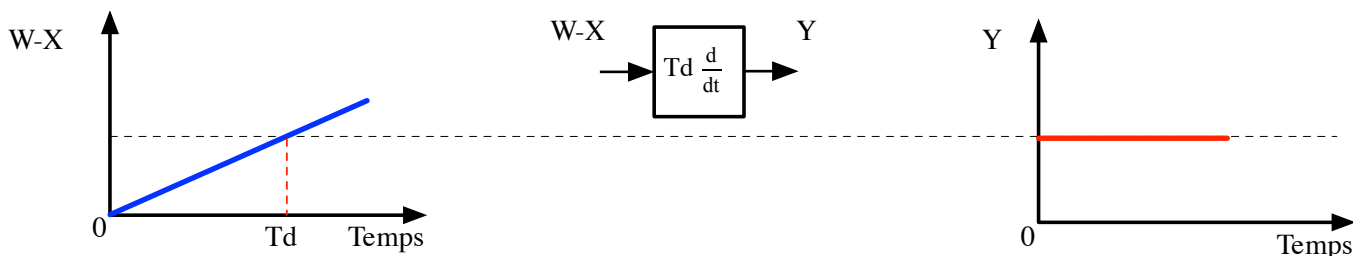
C'est une action qui amplifie les variations brusques de la consigne. Elle a une action opposée à l'action intégrale. Cette fonction est remplie par l'opérateur mathématique : 'dériver par rapport au temps'.

$$Y = T_d \cdot \frac{d}{dt}(W - X)$$

Ainsi, dans un régulateur, on définit l'action dérivée à partir du temps dérivé T_d . Le temps dérivé T_d s'exprime en unité de temps.

8.2. Fonctionnement

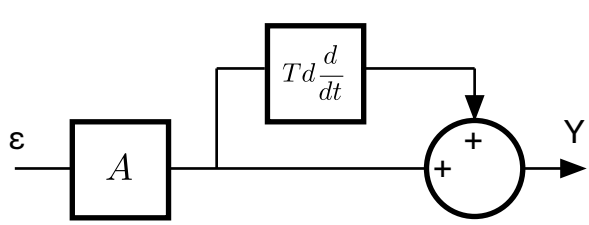
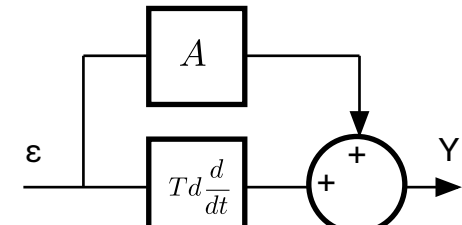
Pour étudier l'influence de l'action dérivée, on s'intéressera à la réponse du module dérivé à une rampe.



- ⊕ Le temps T_d est le temps pour que l'entrée $W-X$ augmente de la valeur de la sortie Y .
- ⊕ Plus T_d est grand, plus la valeur de la sortie Y sera importante.
- ⊕ Pour supprimer l'action dérivée, il suffit de mettre T_d à 0.

8.3. Actions conjuguées PD

En général, le régulateur ne fonctionne pas en action dérivée uniquement (trop instable). Il fonctionne avec un correcteur Proportionnel Dérivé (PD). Le doublet, Bande Proportionnelle - Temps dérivé, définit deux structures qui sont représentées sur les figures suivantes.

Série	Parallèle
	
$Y = A(\varepsilon + Td \cdot \frac{d\varepsilon}{dt})$	$Y = A \cdot \varepsilon + Td \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}$

Conséquences : Dans un régulateur série, la modification de la bande proportionnelle entraîne la modification de l'influence de l'action dérivée. Avant de procéder au réglage du régulateur, il est nécessaire de connaître sa structure interne.

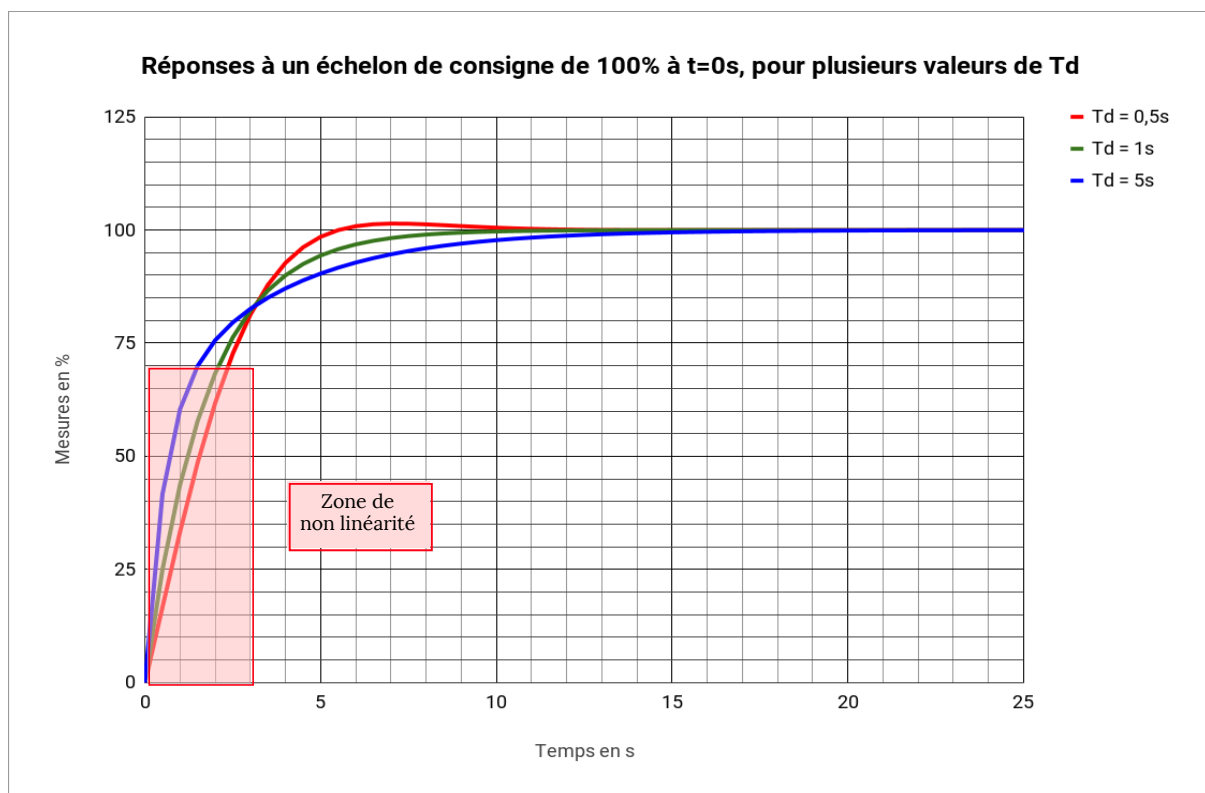
8.4. Influence du paramètre temps dérivé en boucle fermée

8.4.1. Comportement statique

L'action dérivée a peu d'influence dans le comportement statique.

8.4.2. Comportement dynamique

Lors d'une réponse indicielle, plus T_d est grand, plus le système est rapide, plus le premier dépassement est faible. Attention, si T_d est trop grand cela entraîne une instabilité due à une trop forte amplification des parasites.



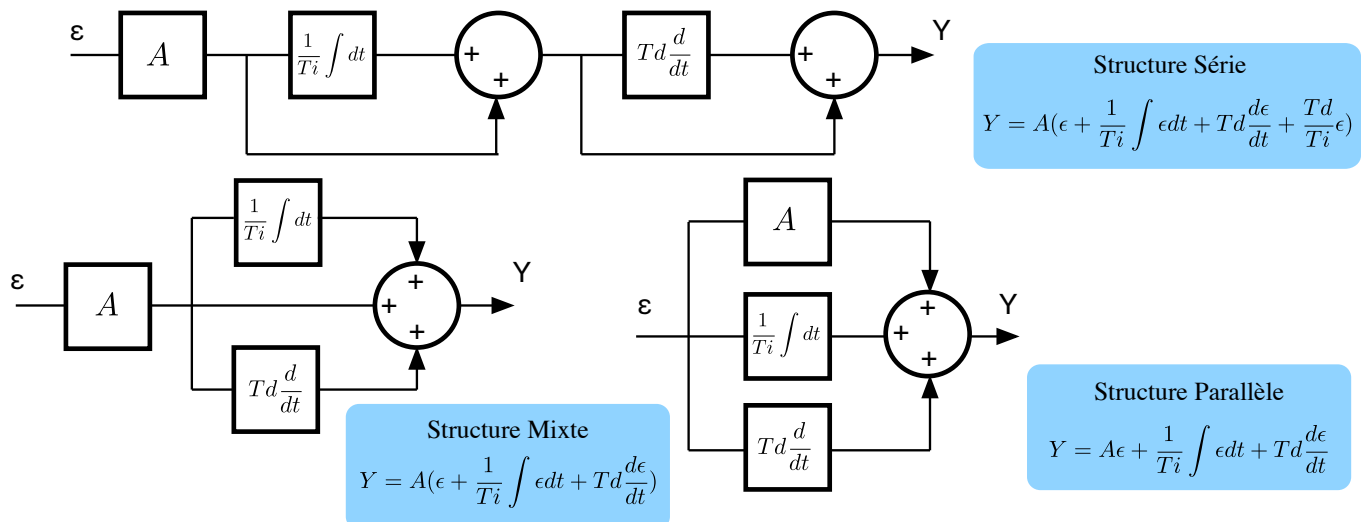
Remarque :

La zone de non linéarité correspond à une partie des courbes qui ne correspond pas probablement au fonctionnement réel du système qui serait soumis à des saturations. (La commande ne peut dépasser 100%).

9. Correcteur PID

9.1. Structures des correcteurs PID

Les trois corrections, **P**roportionnelle, **I**ntégrale et **D**érivée, permettent de définir trois structures de régulateur différentes.

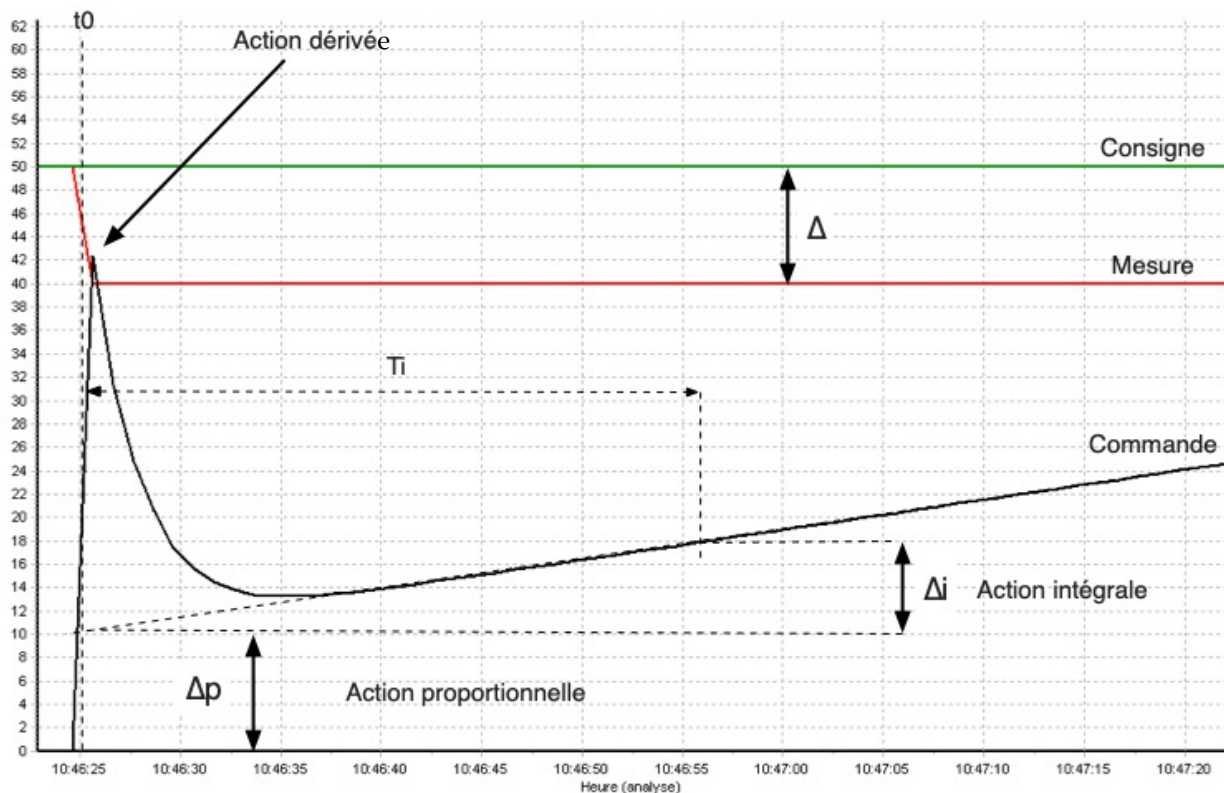


Remarque : Les régulateurs électroniques (tous ceux de la salle de travaux pratiques) ont une structure mixte.

9.2. Réponse indicielle

On observe la commande d'un régulateur en réponse à un échelon Δ d'erreur. La réponse Y est alors composée de trois parties distinctes :

- Un pic résultant de l'action dérivée ;
- Un échelon résultant de l'action proportionnelle ;
- Une rampe résultant de l'action intégrale.



9.3. Déterminer la structure interne d'un correcteur

La figure ci-avant montre les constructions nécessaires à la détermination de deux Δ , Δ_p et Δ_i , permettant de déterminer la structure du régulateur. Le tableau suivant permet de connaître la valeur de ces deux Δ en fonction de la structure du régulateur.

Structure	Δ_p	Δ_i
Mixte	$A \times \Delta$	$A \times \Delta$
Série	$A(1+T_d/T_i) \times \Delta$	$A \times \Delta$
Parallèle	$A \times \Delta$	Δ

9.4. Mise en œuvre pratique

Régulateur en automatique, sens d'action réglé en inverse, commande à 0%. On règle X_p à 200%, T_i et T_d à 10s. On fait un échelon de mesure Δ de 25% et on relève Δ_p et Δ_i à l'aide de constructions graphique.

On détermine la structure à l'aide du tableau suivant :

Structure	Δ_p en %	Δ_i en %
Mixte	12,5	12,5
Série	25	12,5
Parallèle	12,5	25

9.5. Influence des actions P, I et D

9.5.1. Quand X_p augmente

- ⊕ La stabilité augmente.
- ⊕ La rapidité diminue.
- ⊕ La précision diminue.

9.5.2. Quand T_i augmente

- ⊕ La stabilité augmente.
- ⊕ La rapidité diminue.
- ⊕ La précision reste parfaite.

9.5.3. Quand T_d augmente

- ⊕ La stabilité augmente.
- ⊕ La rapidité augmente.
- ⊕ La précision ne bouge pas.

10. Transformée de Laplace

10.1. Les transformées mathématiques

Pour avoir la relation ($s = H \times e$) écrite au §2.2 pour tous les types de signaux que l'on rencontre, on a 'inventé' des transformées différentes :

- ⊕ Pour les signaux sinusoïdaux ; les nombres complexes ;
- ⊕ Pour les signaux périodiques : la transformée de Fourier ;
- ⊕ Pour les signaux causaux ; la transformée de Laplace ;
- ⊕ Pour les signaux numériques : la transformée en Z.

On remarquera que toutes ces représentations utilisent des nombres complexes.

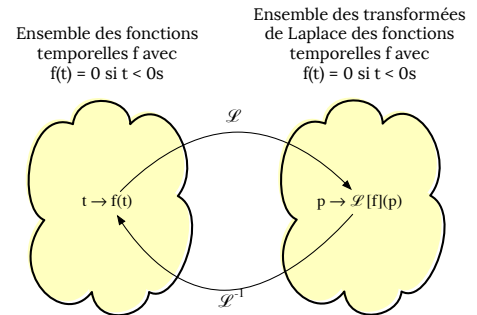
10.2. Propriétés de la transformée de Laplace

En régulation, partant du fait qu'au 'début' toutes les grandeurs physiques sont à 0 (ou presque), on utilise la transformée de Laplace.

$$F(p) = \int_0^{\infty} f(t) \cdot e^{-pt} dt$$

Par abus de langage on notera $F()$ la transformée de Laplace de $f()$.

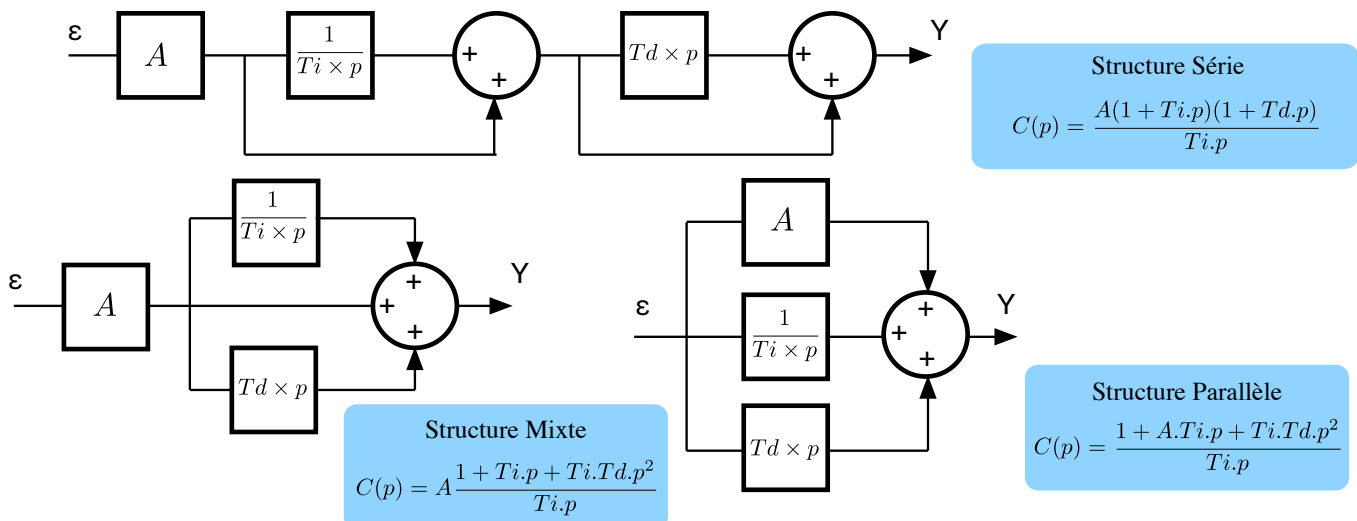
Unicité : À $f()$ correspond une et une seule fonction $F()$ et inversement ;



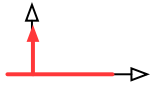
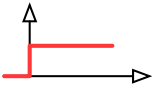
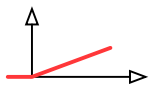
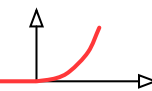
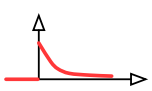
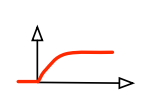
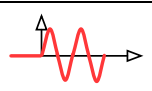
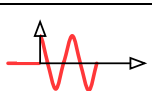
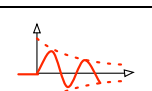
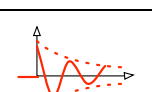
$f() : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} ; g() : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} ; a \in \mathbb{R}$	
$\mathcal{L}[f() + g()] = \mathcal{L}[f()] + \mathcal{L}[g()]$	$\mathcal{L}[a \times f()] = a \times \mathcal{L}[f()]$
$\mathcal{L}[f'()] = p \times \mathcal{L}[f()] - f(0)$	$\mathcal{L}\left[\int f()\right] = \frac{\mathcal{L}[f()]}{p}$
$f() : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} ; g() : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} ; T \in \mathbb{R} ; \forall t \in \mathbb{R} : g(t) = f(t - T) ; F() = \mathcal{L}[f()]$	
$\lim_{t \rightarrow +\infty} f(t) = \lim_{p \rightarrow 0} pF(p)$	$\mathcal{L}[g()] = \mathcal{L}[f()] \times e^{-Tp}$

10.3. Structures des régulateurs PID

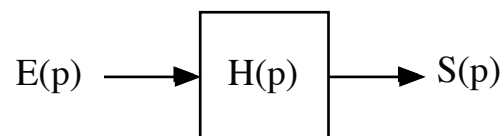
On note $C(p)$ la fonction de transfert du correcteur, les différentes structures de correcteur PID donnent les fonctions de transfert suivantes :



10.4. Table des transformées de Laplace

Fonction	Allure	$f() : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$ $a \in \mathbb{R}, n \in \mathbb{N}$	$\mathcal{L}[f()]$ $\mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$
Dirac		$t \rightarrow \delta(t)$	$p \rightarrow 1$
Échelon		$t \rightarrow 1$	$p \rightarrow \frac{1}{p}$
Rampe		$t \rightarrow t$	$p \rightarrow \frac{1}{p^2}$
Puissance		$t \rightarrow t^n$	$p \rightarrow \frac{n!}{p^{n+1}}$
Exponentielle		$t \rightarrow e^{-at}$	$p \rightarrow \frac{1}{p+a}$
Premier ordre		$t \rightarrow 1 - e^{-at}$	$p \rightarrow \frac{1}{p} \times \frac{a}{p+a}$
Sinus		$t \rightarrow \sin(\omega t)$	$p \rightarrow \frac{\omega}{p^2 + \omega^2}$
Cosinus		$t \rightarrow \cos(\omega t)$	$p \rightarrow \frac{p}{p^2 + \omega^2}$
Sinus amortie		$t \rightarrow e^{-at} \times \sin(\omega t)$	$p \rightarrow \frac{\omega}{(p+a)^2 + \omega^2}$
Cosinus amortie		$t \rightarrow e^{-at} \times \cos(\omega t)$	$p \rightarrow \frac{p+a}{(p+a)^2 + \omega^2}$

10.5. Gain statique



La transformée de Laplace permet aux blocs des schémas fonctionnels de définir la relation suivante :

$$S(p) = H(p) \times E(p)$$

Si le système est naturellement stable, le gain statique K peut s'écrire :

$$K = \frac{\Delta s}{\Delta e} = H(0)$$

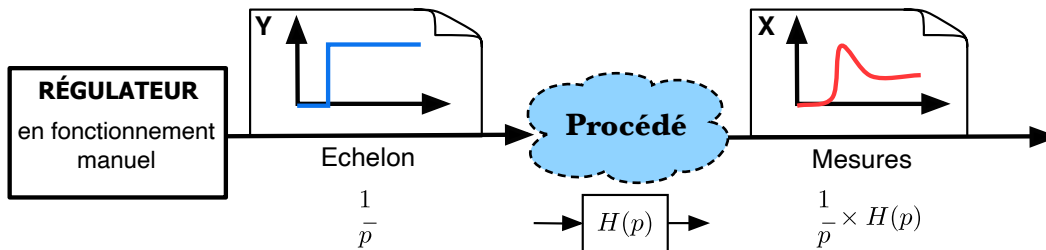
11. Identification et réglages

11.1. Identification et réglage en boucle ouverte

11.1.1. Mise en œuvre

Autour du point du fonctionnement en boucle ouverte (régulateur en mode **Manuel**), on relève la réponse du procédé à un petit échelon de commande du régulateur.

Attention !! Ne pas saturer la mesure.



11.1.2. Pour un procédé stable

Méthode simple :

Allure des signaux	Modèle de Broïda
	$H(p) = \frac{K \cdot e^{-Tp}}{1 + \tau p}$ À partir des constructions, on calcule : - Le gain statique : $K = \Delta X / \Delta Y$; - Le retard : $T = t_1 - t_0$; - La constante de temps : $\tau = t_2 - t_1$.

Méthode de Broïda (on privilégie cette méthode si T est proche de 0) :

Allure des signaux	Modèle de Broïda
	$H(p) = \frac{K \cdot e^{-Tp}}{1 + \tau p}$ À partir des constructions, on calcule : - Le gain statique : $K = \Delta X / \Delta Y$; - Le retard : $T = 2,8(t_1 - t_0) - 1,8(t_2 - t_0)$. Attention !! T doit être positif ; - La constante de temps : $\tau = 5,5(t_2 - t_1)$.

11.1.3. Pour un procédé instable

Allure des signaux	Modèle intégrateur retardé
	$H(p) = \frac{e^{-Tp}}{\tau p}$ À partir des constructions, on calcule : - Le retard : $T = t_1 - t_0$; - Le temps d'intégration $\tau = t_2 - t_1$;

11.1.4. Réglages

Modèle stable	Modèle instable
$H(p) = \frac{K \cdot e^{-Tp}}{1 + \tau p}$	$H(p) = \frac{e^{-Tp}}{\tau p}$

Le facteur de réglabilité $k_r = T/\tau$, permet de connaître quel type de régulation PID utiliser :

TOR	0,05	P	0,1	PI	0,2	PID	0,5	Autre
-----	------	---	-----	----	-----	-----	-----	-------

La régulation PID, avec un seul correcteur, est d'autant moins efficace que :

- Le facteur de réglabilité est supérieur à 0,5 ;
- La perturbation z est trop importante.

À partir des tableaux suivants, on détermine les réglages du correcteur PID :

Modèle stable

	P	PI série	PI //	PID série	PID //	PID mixte
Xp	$125k_r K$			$120k_r K$	$120 \frac{Kk_r}{1 + 0,4k_r}$	
Ti	Supprimé	τ	$125KT$	τ	$133KT$	$\tau + 0,4T$
Td	0			$0,4T$	$\frac{0,35\tau}{K}$	$\frac{T}{2,5 + k_r}$

Modèle instable

	P	PI série	PI //	PID série	PID //	PID mixte
Xp	$125k_r$			$120k_r$	$111k_r$	
Ti	Supprimé	$5T$	$6,67k_r T$	$4,8T$	$6,67k_r T$	$5,2T$
Td	0			$0,4T$	$\frac{0,35}{k_r}$	$0,4T$

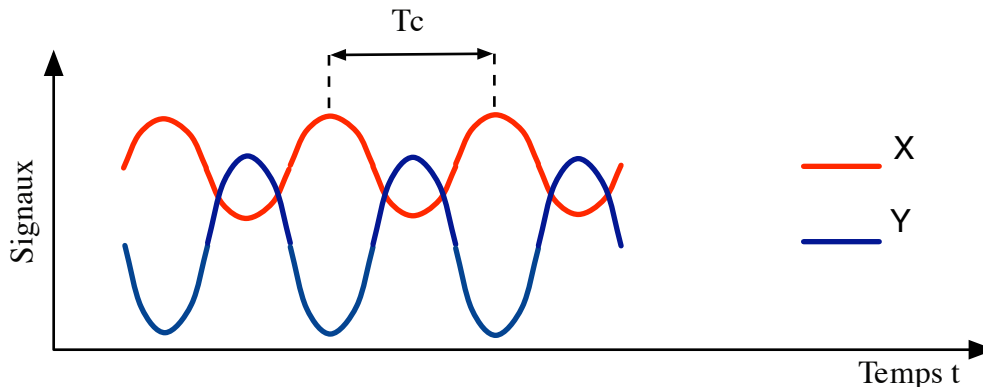
Note : On rappelle que le correcteur PI série est un correcteur PID mixte avec $Td = 0$.

11.2. Identification et réglage en boucle fermée

11.2.1. Méthode de Ziegler & Nichols

La méthode de Ziegler–Nichols est une méthode heuristique de réglage d'un régulateur PID. Elle utilise une identification du système en boucle fermée (régulateur en mode **automatique**). Elle ne nous donne pas à proprement parler un modèle, mais nous permet de relever deux caractéristiques du procédé qui nous permettront de déterminer un réglage satisfaisant.

Le système est en régulation proportionnelle (actions intégrale et dérivée annulées). On diminue la bande proportionnelle X_p jusqu'à obtenir un système en début d'instabilité (régime critique). Le signal de mesure X et la sortie du régulateur Y sont périodiques, sans saturation.



On relève alors la valeur de la bande proportionnelle que l'on a réglée X_{pc} et la période des oscillations T_c .

11.2.2. Réglages

Les deux valeurs déterminées précédemment permettent de calculer les actions PID du régulateur à l'aide du tableau fourni ci-après :

	P	PI série	PI //	PID série	PID //	PID mixte
Xp	$2X_{pc}$	$2,2X_{pc}$	$2,2X_{pc}$	$3,3X_{pc}$	$1,7X_{pc}$	$1,7X_{pc}$
Ti	Supprimé	$T_c/1,2$	$T_c.X_{pc}/50$	$T_c/4$	$T_c.X_{pc}/118$	$T_c/2$
Td	0	0	0	$T_c/8$	$7,5T_c/X_{pc}$	$T_c/8$

Remarques :

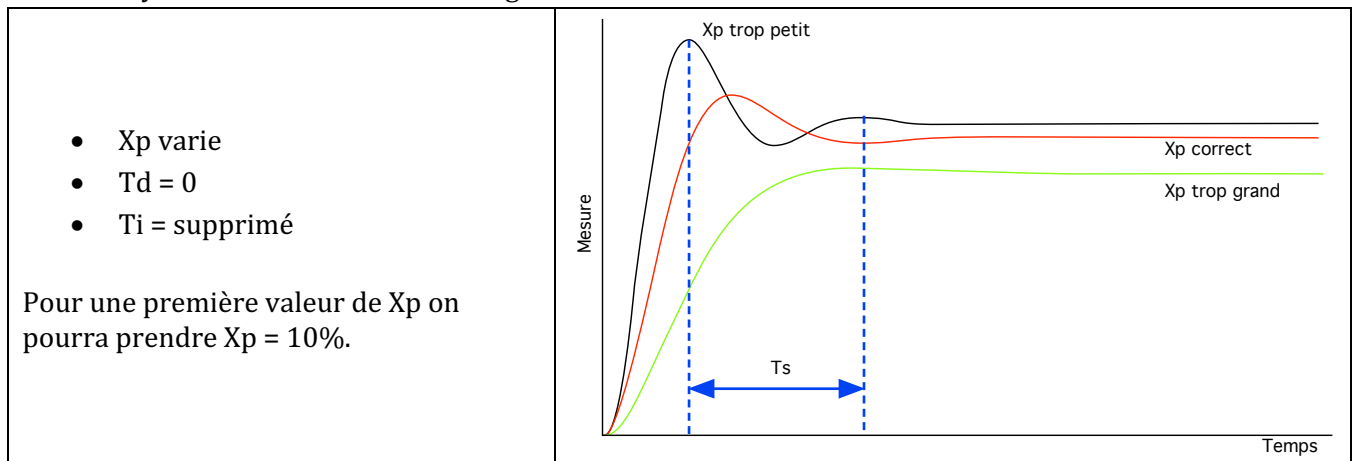
- ⊕ La méthode de Ziegler-Nichols donne un gain agressif qui favorise les dépassements.
- ⊕ Pour les applications qui ont besoin de dépassements minimaux voire nuls, la méthode de Ziegler-Nichols est inappropriée.

Le principal intérêt de cette méthode est sa grande simplicité : il n'est pas nécessaire de déterminer la fonction de transfert $H(p)$ du procédé pour en réaliser la correction.

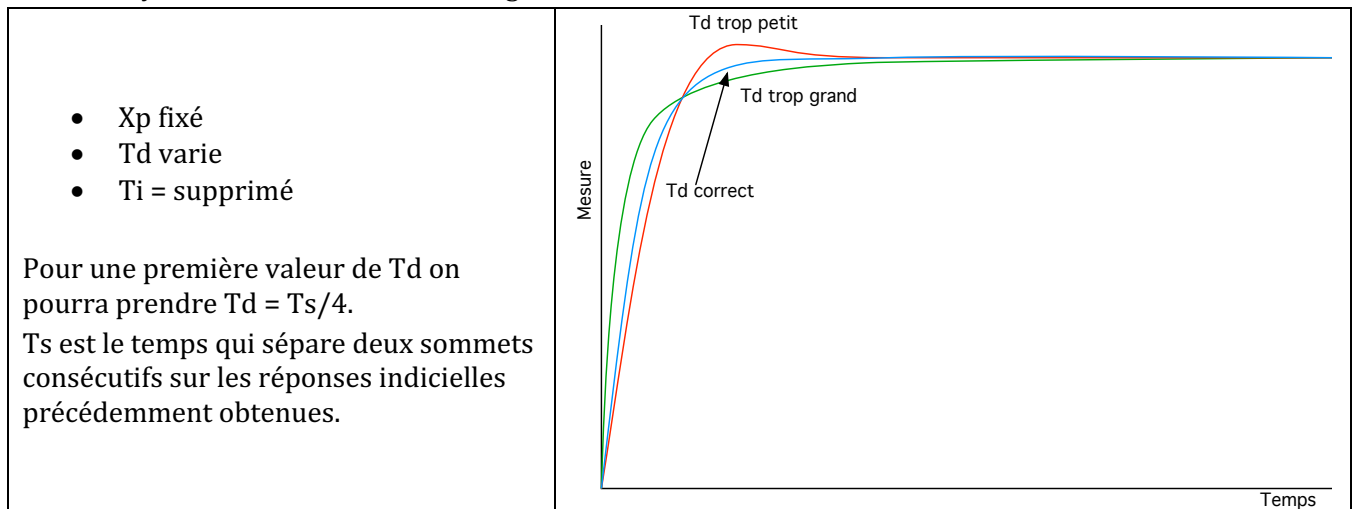
11.3. Méthode du régleur – Méthode par approches successives

Le réglage du régulateur se fait par petit pas, régulateur en mode **automatique**. Le système fonctionnant en boucle fermée, autour du point de consigne, on observe la réponse de la mesure à un échelon de consigne.

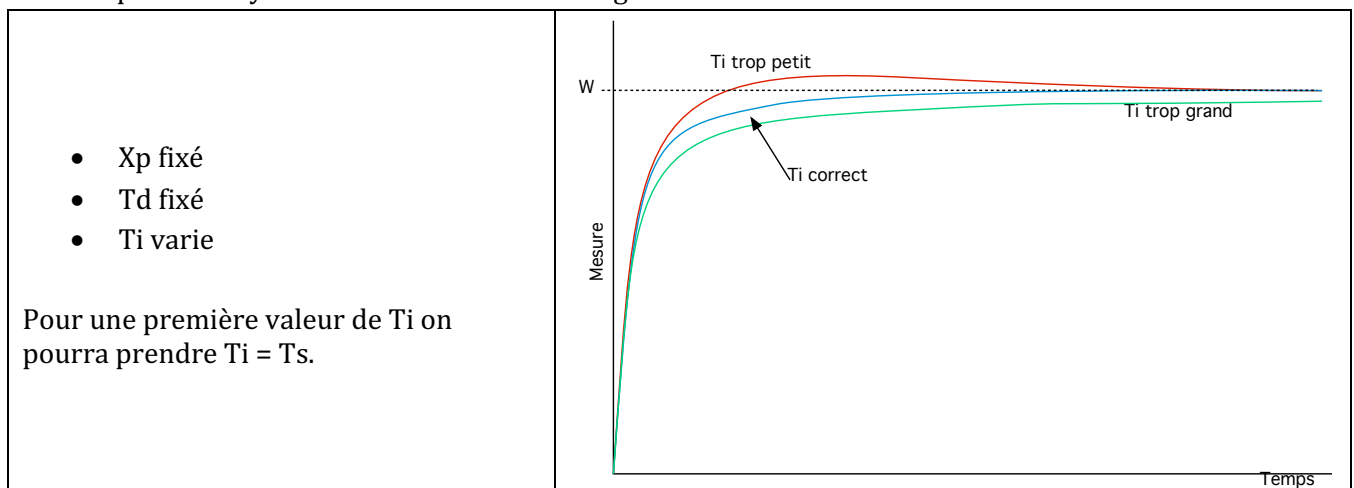
1. En régulation proportionnelle, on cherche la bande proportionnelle correcte en observant la réponse du système à un échelon de consigne :



2. En régulation proportionnelle dérivée, on cherche le temps dérivé correct en observant la réponse du système à un échelon de consigne :



3. En régulation proportionnelle intégrale dérivée, on cherche le temps intégral correct en observant la réponse du système à un échelon de consigne :

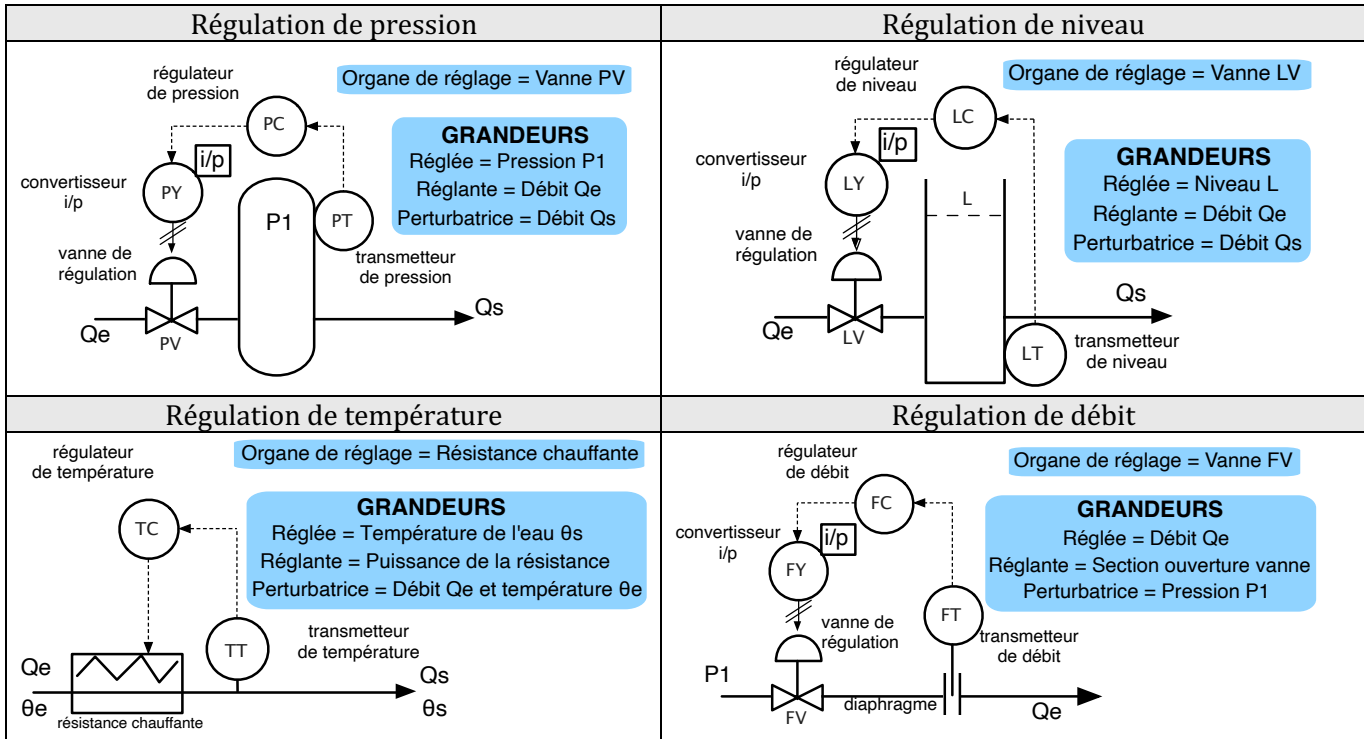


Remarques :

- Si T_d amène des instabilités pour de petites valeurs, on préférera prendre $T_d = 0$;
- L'ordre $P \gg D \gg I$ permet un réglage plus fin de l'action D que l'ordre $P \gg I \gg D$.

12. Se souvenir

12.1. Schémas TI de base



12.2. Les nombres complexes

12.2.1. Présentation

j est le nombre imaginaire tel que $j^2 = -1$. Tout nombre complexe z peut se décomposer de façon unique comme la somme d'un nombre réel et d'un nombre imaginaire. $z = a + jb$ avec a la partie réelle et b la partie imaginaire. a et b sont des nombres réels.

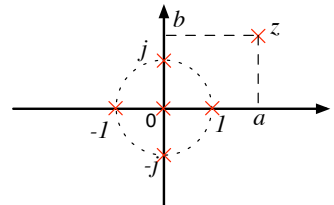
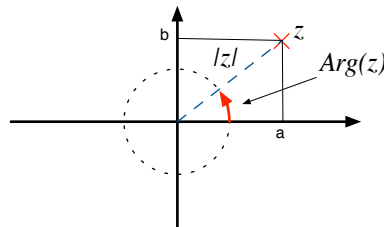
12.2.2. Plan complexe

Dans la mesure où un nombre complexe se décompose en deux parties, on peut représenter z sur le plan complexe, avec b comme ordonnée et a comme abscisse.

12.2.3. Module et argument

$z = a + jb$ peut s'écrire sous la forme $z = |z| \cdot e^{j \times \text{Arg}(z)}$, avec $|z|$ le module de z et $\text{Arg}(z)$ l'argument de z . Sur le plan complexe :

- ⊕ $z = a + jb$;
- ⊕ $|z| = \sqrt{a^2 + b^2}$;
- ⊕ $\text{Arg}(z) = \arctg\left(\frac{b}{a}\right)$;
- ⊕ $\frac{b}{a} = \text{tg}(\text{Arg}(z))$.



12.2.4. Propriétés

Avec $n \in \mathbb{N}$, $a \in \mathbb{R}^+$, $z \in \mathbb{C}$, $z' \in \mathbb{C}$:

$$j^2 = -1 ; \frac{1}{j} = -j ; \frac{1}{e^{-ja}} = e^{ja}$$

$$\text{Arg}(a) = 0 ; \text{Arg}(ja) = \frac{\pi}{2} ; \text{Arg}(e^{ja}) = a ; \text{Arg}(zz') = \text{Arg}(z) + \text{Arg}(z') ;$$

$$\text{Arg}(z^n) = n \times \text{Arg}(z) ; \text{Arg}\left(\frac{1}{z}\right) = -\text{Arg}(z) ;$$

$$|a| = a ; |ja| = a ; |e^{ja}| = |e^{-ja}| = 1 ; |zz'| = |z||z'| ; |z^n| = |z|^n ; \left|\frac{1}{z}\right| = \frac{1}{|z|} ;$$

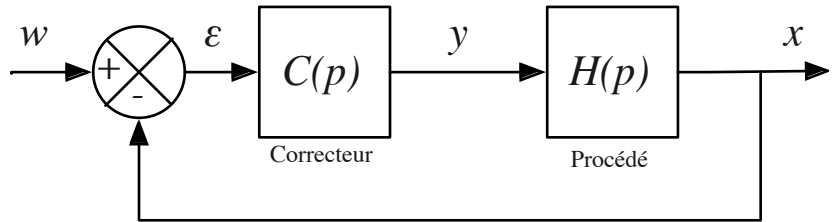
12.3. De la boucle ouverte à la boucle fermée

12.3.1. Notations

Dans la suite on représentera une boucle de régulation par le schéma bloc simplifié ci-dessous :

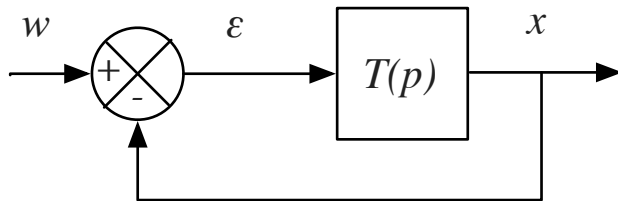
On trouve :

- ⊕ La mesure x ;
- ⊕ La consigne w ;
- ⊕ La commande y ;
- ⊕ L'erreur ε ;
- ⊕ La fonction de transfert du correcteur du régulateur $C(p)$;
- ⊕ La fonction de transfert du procédé $H(p)$.



12.3.2. Calcul de $T(p)$, la fonction de transfert en boucle ouverte

On cherche $T(p)$ telle que ci-dessous :

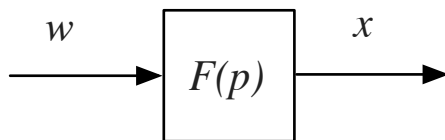


$$T(p) = \frac{x(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{y(p)}{\varepsilon(p)} \times \frac{x(p)}{y(p)}$$

$$T(p) = C(p) \times H(p)$$

12.3.3. Calcul de $F(p)$, la fonction de transfert en boucle fermée

On cherche $F(p)$ telle que ci-dessous :



$$F(p) = \frac{x(p)}{w(p)} = \frac{x(p)}{\varepsilon(p) + x(p)}$$

$$F(p) = \frac{T(p) \times \varepsilon(p)}{\varepsilon(p) + T(p) \times \varepsilon(p)}$$

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

12.3.4. Formules à connaître

$T(p) = \frac{x(p)}{\varepsilon(p)} = C(p) \times H(p)$	$F(p) = \frac{x(p)}{w(p)} = \frac{1}{1 + \frac{1}{T(p)}}$	$\varepsilon(p) = w(p) - x(p)$
---	---	--------------------------------

12.3.5. Rappel des objectifs de la régulation

Dans une régulation, on veut que la mesure x soit le plus proche possible de la consigne w .

- ⊕ L'objectif de toute régulation est de se rapprocher de : $x(p) = w(p)$.
- ⊕ L'objectif de toute régulation est de se rapprocher de : $F(p) = 1$.
- ⊕ L'objectif de toute régulation est de se rapprocher de : $T(p) = +\infty$

13. Boucles complexes

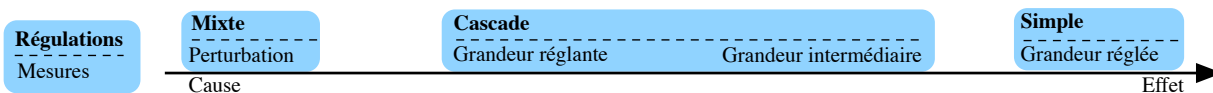
13.1. Introduction

On a vu précédemment que pour améliorer notre boucle de régulation on peut être amené à ajouter une mesure ou un organe de réglage. Ce paragraphe développera les différentes boucles complexes en séparant les différents types de mesures ajoutées et les différents organes de réglage.

13.2. Mixte ou Cascade

Pour les deux boucles complexes suivantes, on ajoute une mesure supplémentaire à la boucle simple afin d'anticiper les effets d'une perturbation sur la grandeur réglée. En fonction de la position de la mesure ajoutée sur l'arbre des causes, on utilisera une boucle mixte ou une boucle cascade.

- Si l'organe de réglage modifie la nouvelle mesure, alors c'est une régulation cascade.
- Sinon, c'est une régulation mixte.

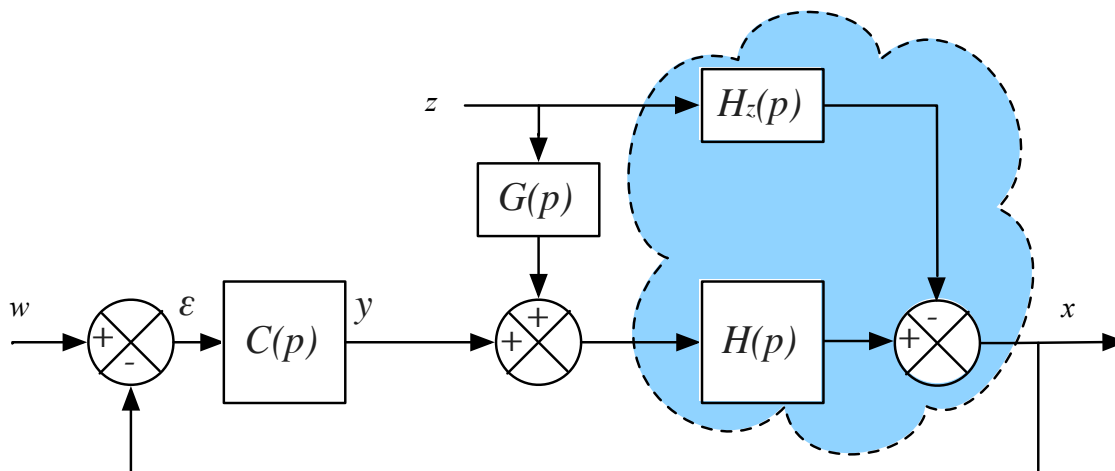


Dans la mesure où on a le choix, on préférera une boucle cascade à une boucle mixte.

13.3. Régulation mixte

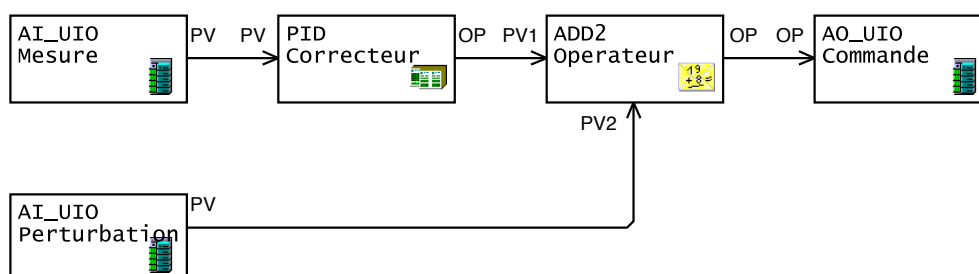
13.3.1. Présentation

On ajoute à la boucle simple la mesure d'une perturbation, l'organe de réglage n'agit pas sur la mesure ajoutée. Le système peut alors être représenté de la manière suivante :



La régulation utilise alors deux mesures (x et z), une boucle fermée avec le correcteur $C(p)$ et une boucle ouverte (boucle de tendance) avec $G(p)$. Le correcteur de tendance $G(p)$ peut être un simple gain, un module avance/retard ou un opérateur plus complexe.

13.3.2. Programmation sur T2550



La boucle est composée de deux mesures (grandeur réglée x et perturbation z), d'un correcteur PID, d'un additionneur (ADD2) et d'une sortie. La sortie OP du bloc ADD2 sera la somme pondérée de la commande de la boucle simple Correcteur.OP et de la mesure de la perturbation Perturbation.PV. Il ne faudra pas oublier de permettre à la sortie du PID d'avoir une valeur négative afin de pouvoir compenser la perturbation.

13.3.3. Détermination théorique d'un correcteur statique

Le correcteur $G(p) = A_2$ doit permettre l'annulation de l'influence de la perturbation.

On cherche à avoir :

$$\frac{dx}{dz} = 0$$

$$\text{Or } x = H(p)C(p)\varepsilon + H(p)G(p)z - H_z(p)z \Rightarrow H(p)G(p) - H_z(p) = 0$$

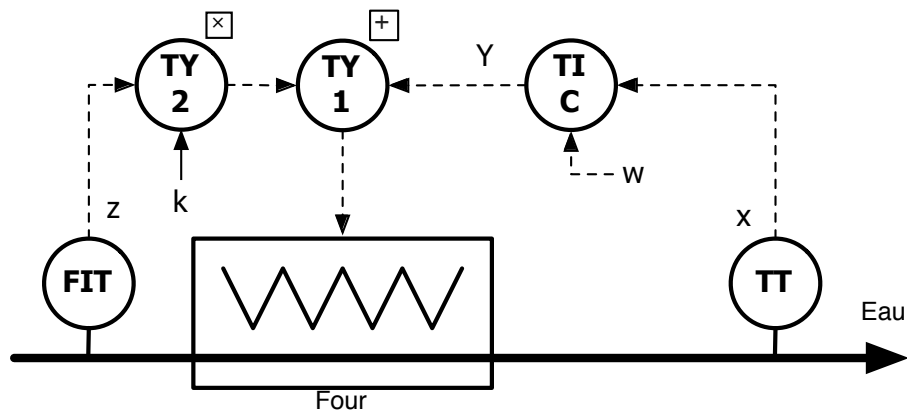
Il faut donc prendre (dans le cas d'un gain statique) : $G(p) = A_2 = \frac{H_z(0)}{H(0)}$

13.3.4. Détermination pratique d'un correcteur statique

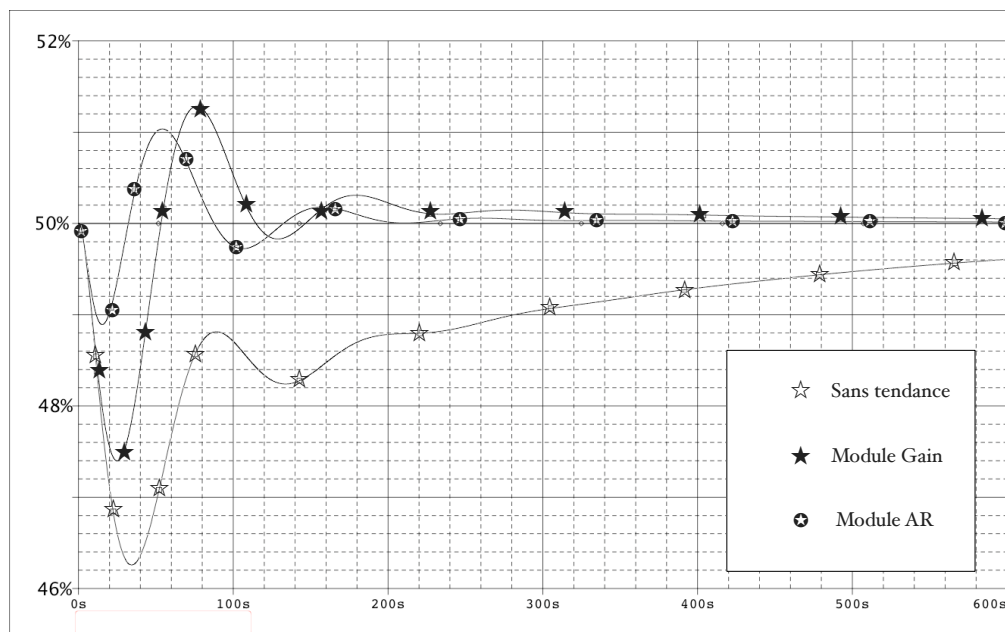
- ④ Choisir un point de fonctionnement et relever les valeurs de la mesure x_1 , la commande y_1 et de la perturbation z_1 .
- ④ Faire varier la perturbation z .
- ④ Faire revenir la mesure à la valeur x_1 .
- ④ Relever les valeurs de la commande y_2 et la perturbation z_2 .
- ④ Le gain du correcteur statique est : $A_2 = \frac{y_2 - y_1}{z_2 - z_1}$

13.3.5. Exemple de régulation mixte

La mesure du débit du liquide chauffé permet d'anticiper la baisse de température engendrée par son augmentation.



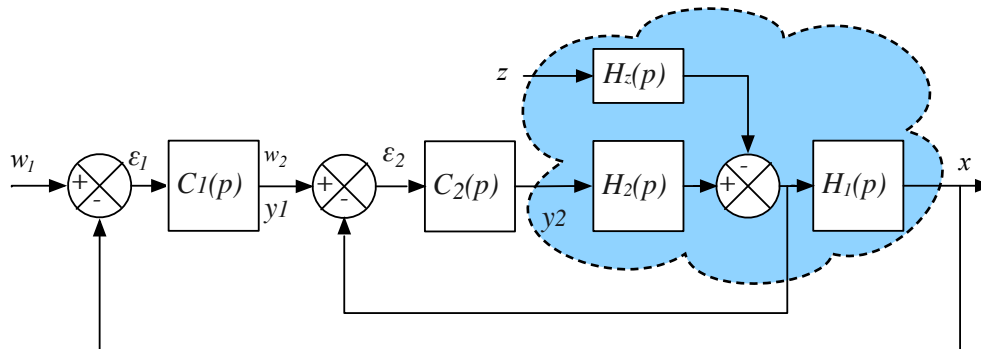
On observe l'évolution de la température pour la même augmentation du débit, avec différentes solutions pour TY2.



13.4. Régulation cascade

13.4.1. Présentation

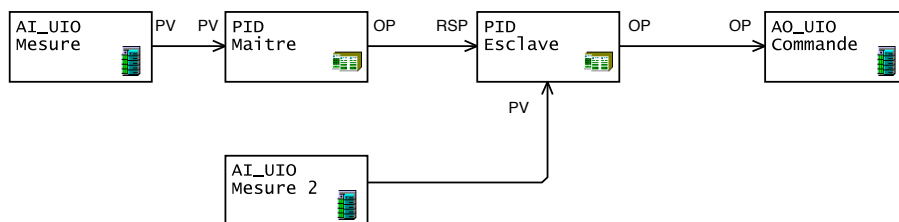
Cette fois la mesure supplémentaire est contrôlée via une boucle dite esclave par l'organe de réglage. La boucle maître (ou externe) contrôle la grandeur réglée de la régulation, sa commande est la consigne de la régulation esclave (ou interne).



Si la mesure supplémentaire est l'image de la grandeur réglante de boucle simple, on parle de cascade sur la grandeur réglante. Dans le cas contraire, on parle de cascade sur une grandeur intermédiaire. Une grandeur intermédiaire est modifiée par la grandeur réglante avant la grandeur réglée. Ce type de régulation se justifie quand on a une grande inertie du système vis-à-vis d'une perturbation sur la grandeur réglante, ou sur une grandeur intermédiaire. Il faut d'abord régler la boucle interne, puis la boucle externe avec le régulateur esclave en fonctionnement automatique.

Important : Le sens d'action du régulateur esclave n'a pas d'incidence sur celui du régulateur maître.

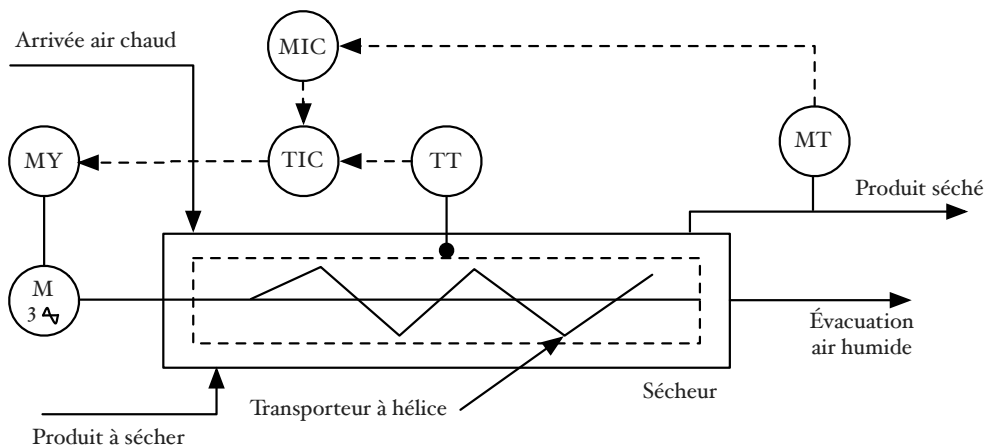
13.4.2. Programmation sur T2550



La boucle est composée de deux mesures (grandeur réglée de la boucle esclave et maître), de deux correcteurs PID et d'une sortie. Ne pas oublier d'activer la consigne à distance (EnaRem) et de la sélectionner (SelRem) dans SelMode de la boucle esclave.

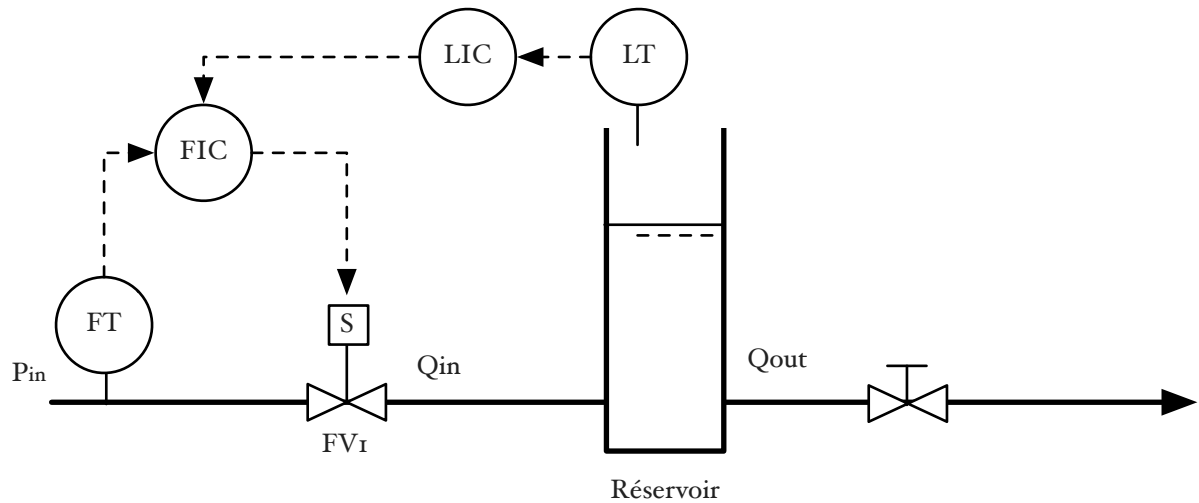
13.4.3. Cascade sur une grandeur intermédiaire

Un produit à sécher est soumis à de l'air chaud pour faire baisser son taux d'humidité. Plus le temps passé dans le sécheur par le produit à sécher sera grand, plus le taux d'humidité relative du produit séché sera bas. On contrôle ce taux d'humidité en agissant sur la vitesse de la vis d'Archimède. La température du produit est la grandeur réglée par la boucle esclave.

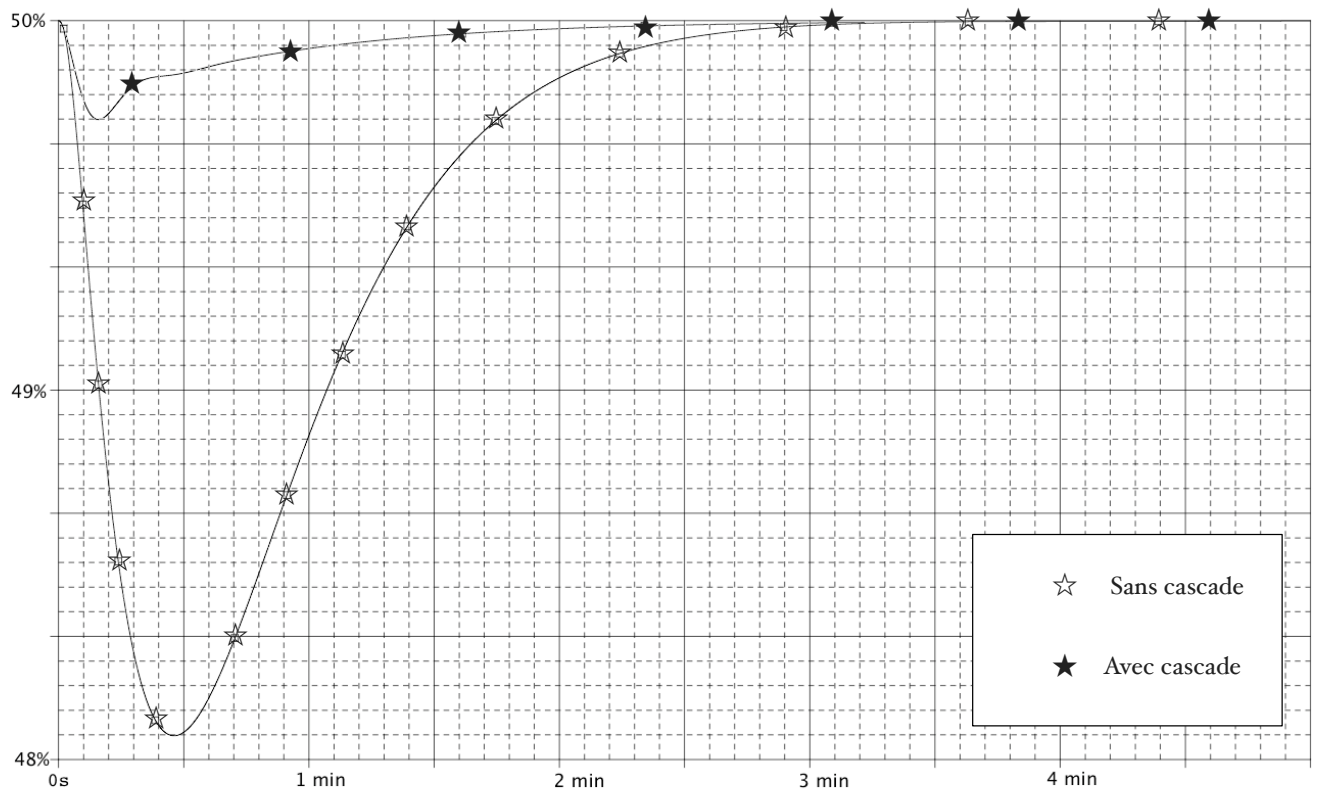


13.4.4. Cascade sur la grandeur réglante

On peut utiliser une régulation cascade dans une régulation de niveau. Le niveau dans le réservoir est la grandeur réglée par la boucle maître. Le débit d'alimentation est la grandeur réglante de la boucle maître et la grandeur réglée de la boucle esclave. La pression P_{in} est la principale perturbation de la boucle esclave. Q_{out} est la principale perturbation de la boucle maître.



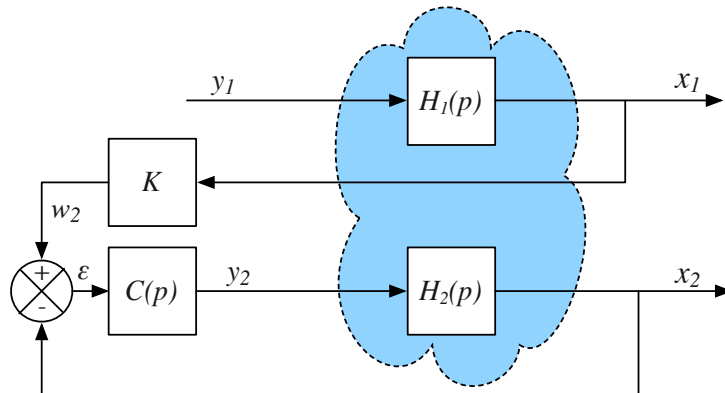
On observe ci-après l'évolution du niveau en réponse à une variation de la pression P_{in} . L'influence de cette même perturbation a été observée pour une boucle simple et une boucle cascade. L'apport de la cascade est sans équivoque.



13.5. Régulation de rapport (ou de proportion)

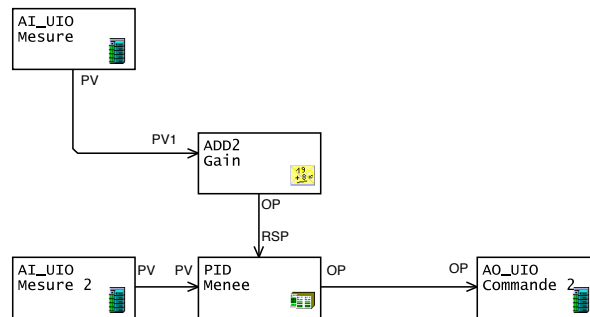
13.5.1. Présentation

On utilise une régulation de rapport quand on veut un rapport constant entre deux grandeurs x_1 et x_2 (avec $x_2/x_1 = \text{constant}$). Dans l'exemple ci-dessous, la grandeur pilote x_1 est utilisée pour calculer la consigne de la boucle de régulation de la grandeur x_2 .



13.5.2. Programmation sur T2550

La régulation utilise deux mesures, la grandeur menée qui est la grandeur réglée de la boucle et la grandeur menante qui permet de définir la valeur de la consigne de la même boucle.



La mesure de la menante servan au calcul de la consigne de la boucle menée, il ne faut pas oublier d'activer la consigne à distance (EnaRem) et de la sélectionner (SelRem) dans SelMode de la boucle menée.

13.5.3. Exemple de boucle de proportion

On peut utiliser une régulation de rapport pour établir le rapport air/combustible d'une régulation de combustion.

13.5.4. Calcul du gain k

Dans l'exemple ci-contre, on suppose que pour avoir une combustion complète, on doit avoir un débit d'air cinq fois supérieur au débit de gaz soit : $Q_{\text{air}} = 5 \times Q_{\text{gaz}}$.

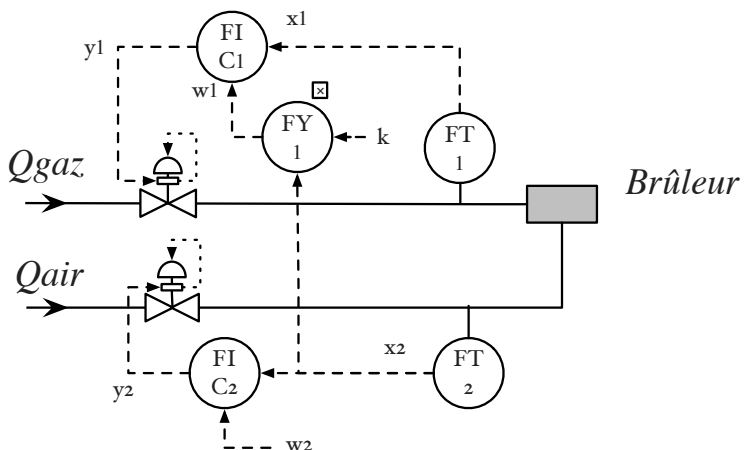
L'étendue de mesure du transmetteur de débit d'air est réglée sur 0-10 kg/h. Celui du débit de gaz sur 0-3 kg/h.

La méthode la plus rapide pour calculer k est de prendre un exemple, sans tenir compte de la saturation des transmetteurs.

Ainsi, si $Q_{\text{gaz}} = 1,5 \text{ kg/h}$ (50%), $Q_{\text{air}} = 7,5 \text{ kg/h}$ (75%). Or $k = Q_{\text{gaz}}(\%) / Q_{\text{air}}(\%) = 50/75 = 0,667$.

Remarque 1 : Le choix de l'étendue de mesure de chaque transmetteur n'est pas très judicieux dans cet exemple (c'est fait exprès...). On s'attachera dans la pratique à choisir un réglage des transmetteurs entraînant la suppression de l'opérateur FY1 ($\times 1$).

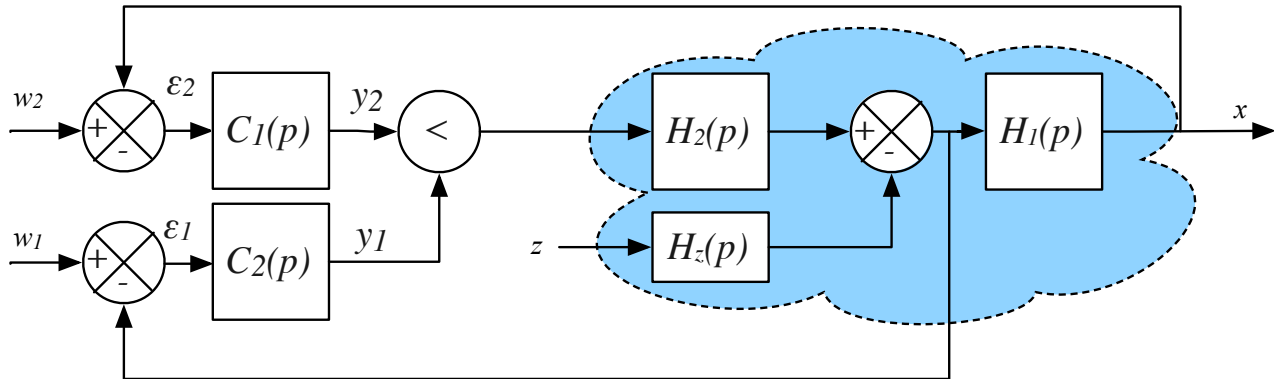
Remarque 2 : On peut éviter le calcul de k, en paramétrant les entrées en unités physiques.



13.6. Régulation parallèle (override ou de limitation)

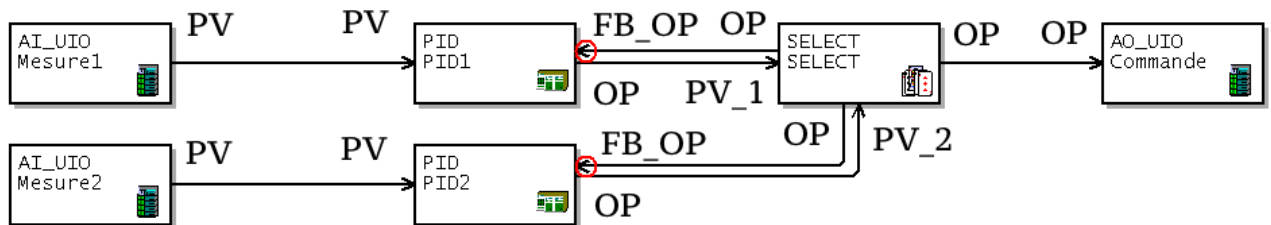
13.6.1. Présentation

Dans certains procédés, il apparaît nécessaire quelquefois de surveiller deux grandeurs, pour des raisons de sécurité ou pour assurer le fonctionnement du procédé. Dans ce cas, on utilise une régulation dite parallèle. Elle utilise deux grandeurs réglées, deux correcteurs différents et un seul organe de réglage. Un sélecteur choisi la commande la plus adaptée.



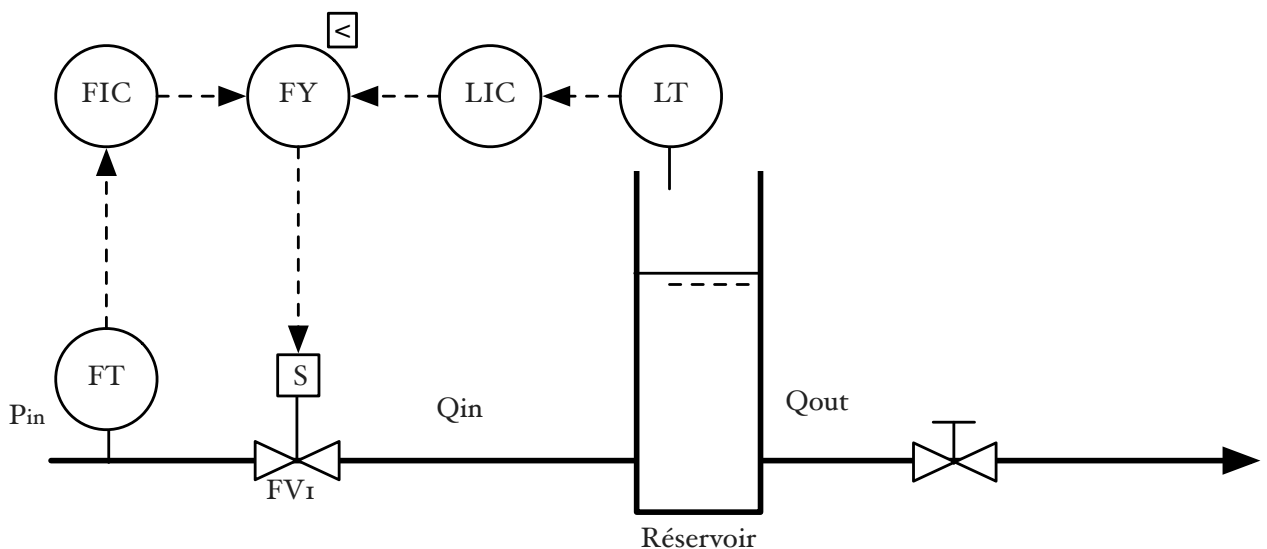
On règle les deux boucles indépendamment. On s'assurera de la mise hors service du sélecteur lors du réglage de chacune des boucles.

13.6.2. Programmation sur T2550



La régulation est composée de deux boucles. Le sélecteur sélectionne la commande la plus petite (ou la plus grande) pour l'envoyer vers la sortie commande. Le retour sur les entrées FB_OP, empêche le régulateur de trop dériver quand il n'est pas sélectionné.

13.6.3. Exemple de régulation parallèle

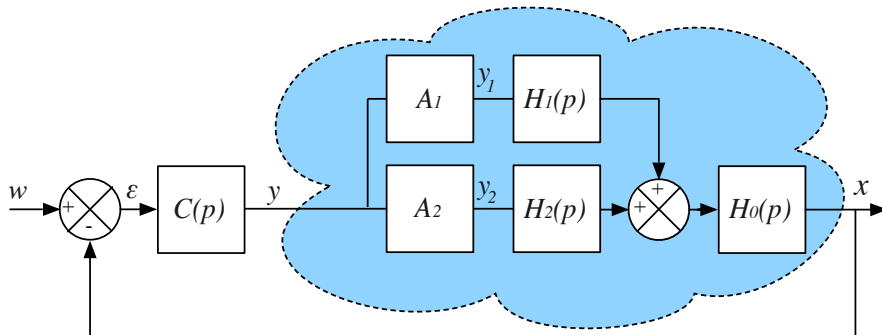


Dans la régulation de débit ci-dessus, il est nécessaire de surveiller le niveau pour éviter le débordement du liquide. Un sélecteur minimum assure le fonctionnement de la régulation de débit sans débordement de liquide.

13.7. Régulation à échelle partagée (split range)

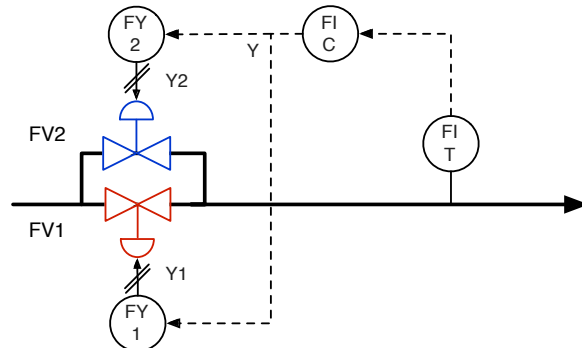
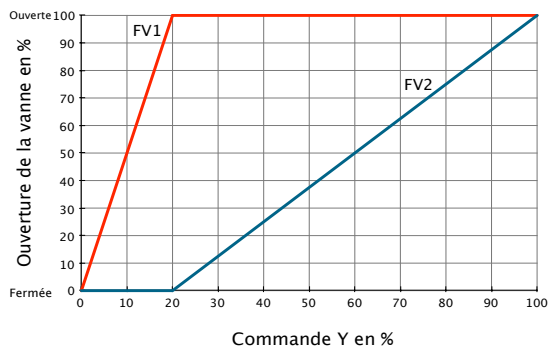
13.7.1. Présentation

On utilise une régulation à partage d'étendue lorsque l'on désire contrôler le système à l'aide de deux organes de réglage différents. Ces deux organes de réglage peuvent avoir des effets alliés ou antagonistes de type chaud-froid.



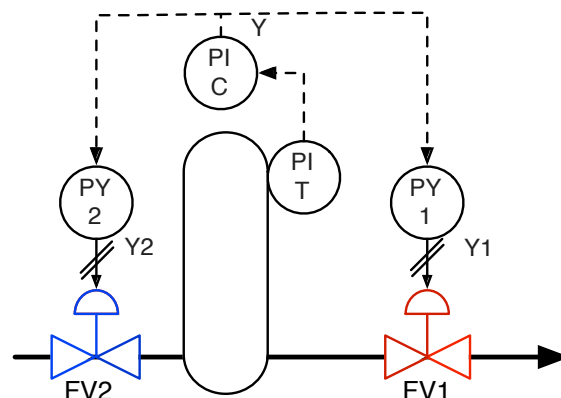
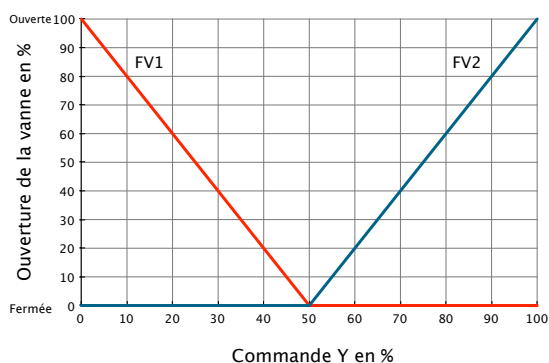
13.7.2. Régulation à deux grandeurs à effets complémentaires

Pour éviter les problèmes de cavitation, on utilise deux vannes de régulation avec des capacités de débit différents (C_v). Une vanne sera utilisée pour contrôler les débits importants, l'autre pour les débits faibles.

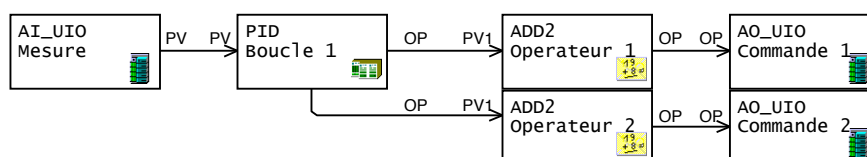


13.7.3. Régulation à deux grandeurs à effets antagonistes

Pour remplir ou vider un réservoir, on utilise deux vannes de régulation. Une vanne alimente le réservoir, une autre vanne vide le réservoir. On parle aussi de régulation chaud-froid.



13.7.4. Programmation sur T2550



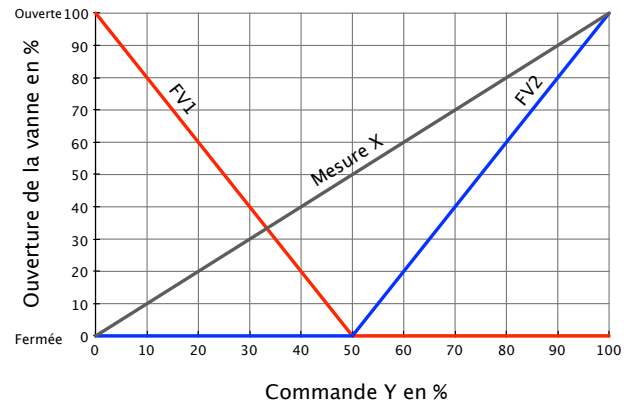
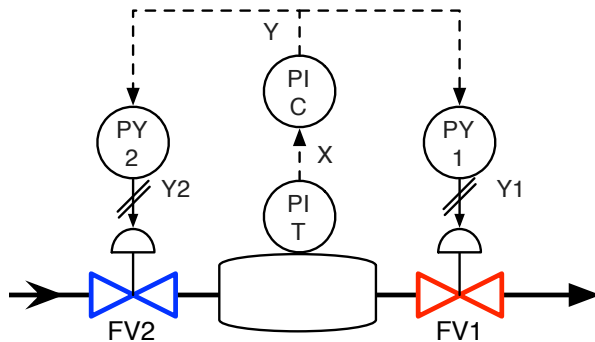
La régulation est composée d'une boucle, deux opérateurs calculent deux commandes différentes.

13.7.5. Détermination du sens d'action du régulateur

Pour déterminer le sens d'action du régulateur, on cherche le sens d'action du procédé. Pour cela, on reprend le graphe de partage, puis ;

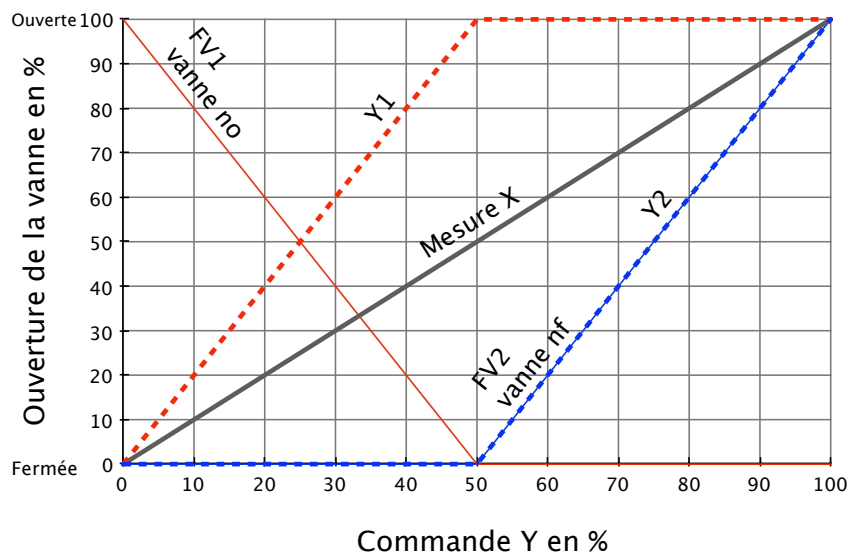
- À partir du plan de partage et du schéma TI, déduire le sens d'action du procédé.
- Si la commande Y et la mesure X varient dans le même sens, le procédé est direct, donc on doit régler le régulateur avec une action inverse. Si la commande Y et la mesure X varient dans deux sens différents, le procédé est inverse, donc on doit régler le régulateur avec une action directe.

Dans le cas ci-dessous, le procédé est direct, on doit régler le régulateur avec une action inverse :



13.7.6. Détermination des équations de sortie

Sur le graphe de partage, on trace l'évolution de Y1 et Y2 en fonction du sens d'action des vannes (NO ou NF). Pour déterminer les équations liant les commandes Y1 et Y2 à la commande Y, il suffit de représenter les relations entre ces grandeurs, puis d'appliquer la formule de proportionnalité. Ne pas oublier de limiter les signaux Y1 et Y2 entre 0 et 100 %.



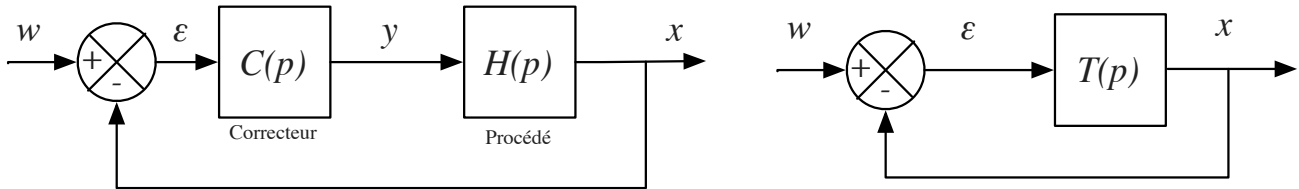
$\begin{array}{ccc} 0 & Y1 & 100\% \\ & & \\ 0 & Y & 50\% \end{array}$		$\begin{array}{ccc} 0 & Y2 & 100\% \\ & & \\ 50 & Y & 100\% \end{array}$	
$\frac{0 - Y1}{0 - Y} = \frac{0 - 100}{0 - 50} = \frac{Y1}{Y} = \frac{100}{50} = 2$ $Y1 = 2 \times Y$		$\frac{0 - Y2}{50 - Y} = \frac{0 - 100}{50 - 100} = \frac{-Y2}{50 - Y} = \frac{100}{50} = 2$ $Y2 = -2 \times (50 - Y) = 2 \times Y - 100$	
Paramètres Bloc ADD2		Paramètres Bloc ADD2	
PV_1 = PID.OP	PV_2 = 1	PV_1 = PID.OP	PV_2 = 1
K_1 = 2	K_2 = 0	K_1 = 2	K_2 = -100
LL_OP = 0	HL_OP = 100	LL_OP = 0	HL_OP = 100

14. Stabilité et précision

14.1. Stabilité d'un système bouclé

14.1.1. Notation

Dans la suite on représentera une boucle de régulation par le schéma bloc simplifié ci-dessous.



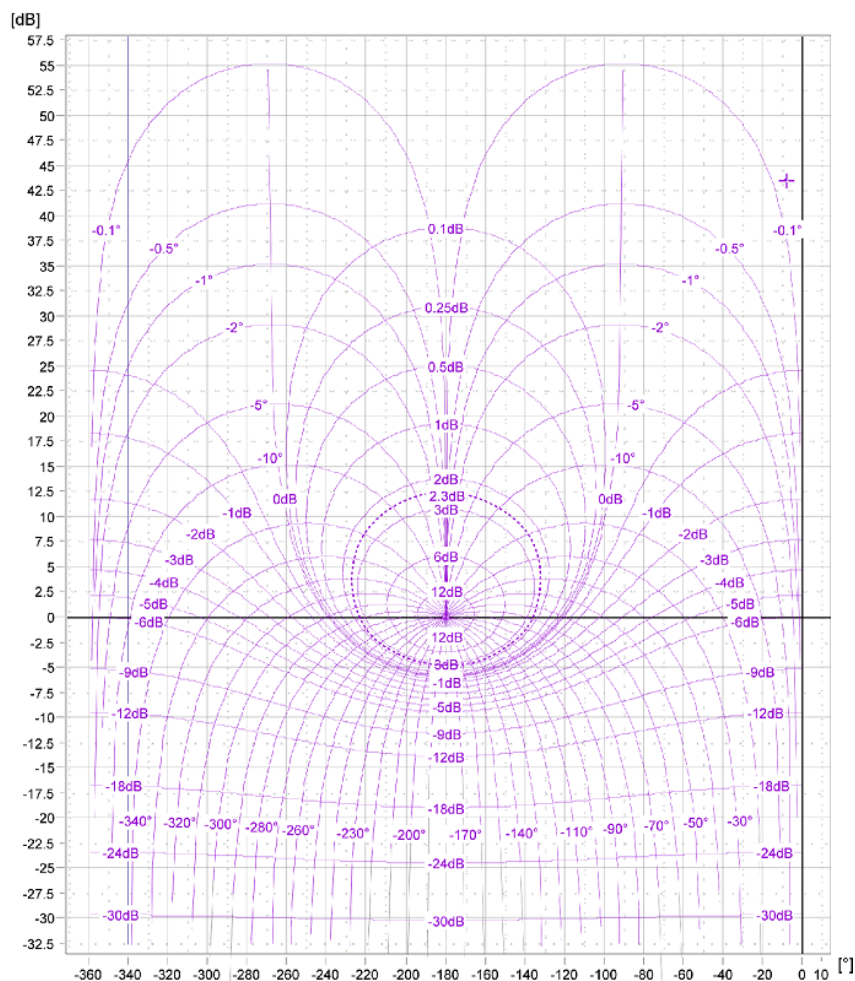
On trouve :

- La mesure x ;
- La consigne w ;
- La commande y ;
- L'erreur ε ;
- La fonction de transfert du correcteur du régulateur C ;
- La fonction de transfert du procédé $H(p)$;
- La fonction de transfert en boucle ouverte $T(p)$.

14.1.2. Représentations harmoniques

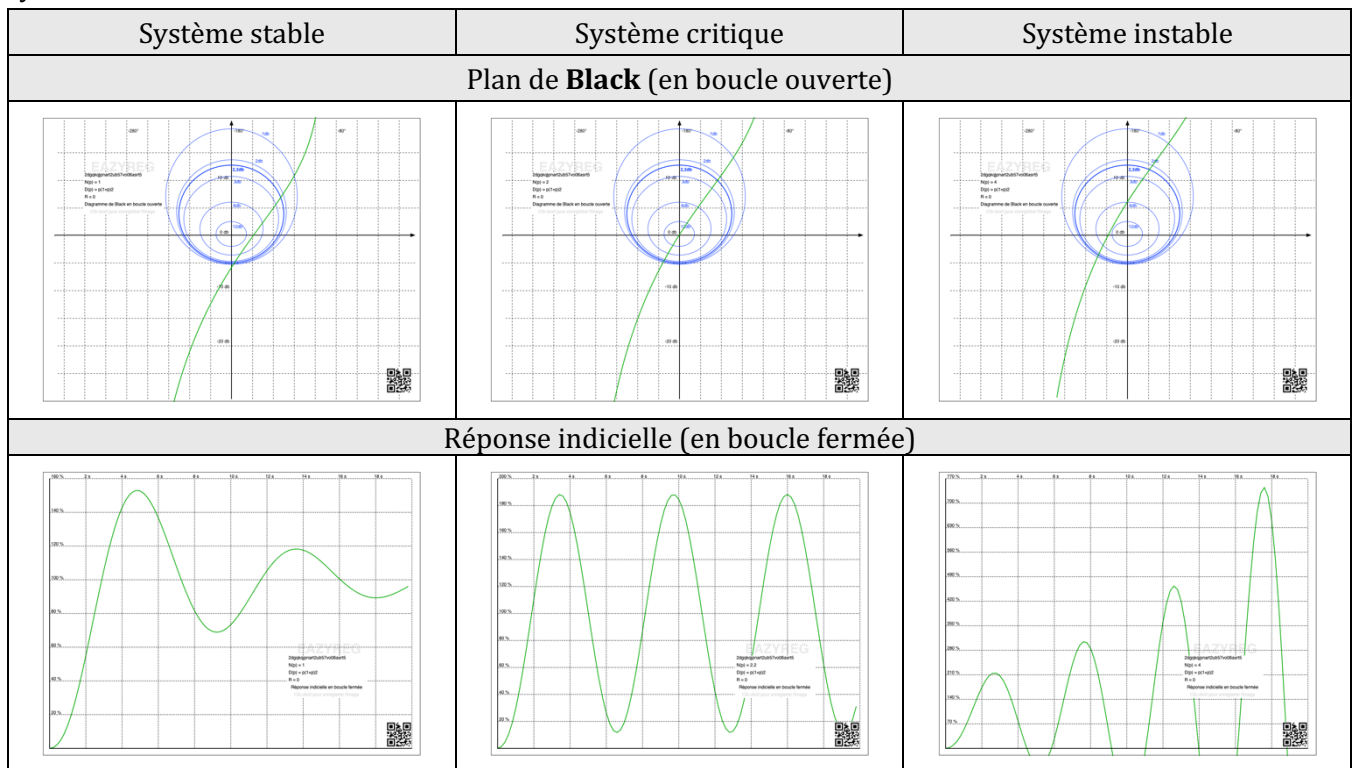
Pour avoir une représentation harmonique d'une fonction de transfert $T(p)$, il suffit de remplacer p , par $j\omega$ et de représenter sur un plan les valeurs de $T(j\omega)$ pour $\omega \in [0, +\infty[$.

Le plan de Black a la préférence des automaticiens alors que le plan de Bode, celle des physiciens. Dans le plan de Black on trouve en abscisse la valeur de l'argument et en ordonnée celle du module en dB.



14.1.3. Critère simplifié du revers

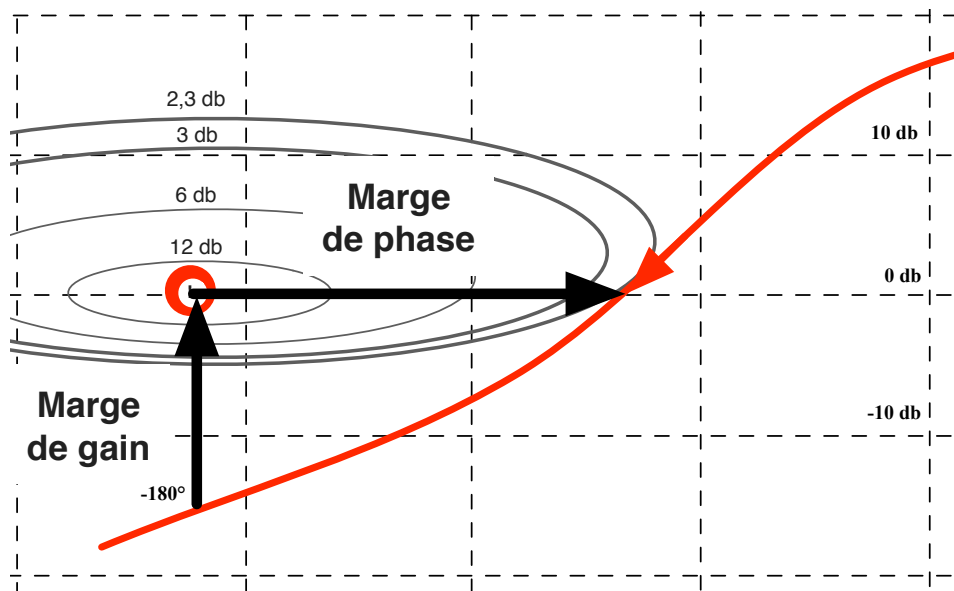
La position relative de la courbe $T(j\omega)$ par rapport au point critique -1 , permet de déterminer la stabilité du système.



14.1.4. Marges de stabilité

La distance qui sépare le lieu des points de $T(j\omega)$ avec le point critique permet de juger du degré de stabilité du système. Plus ce lieu est éloigné du point critique, plus le système retrouvera rapidement le régime permanent. Cette marge peut être mesurée de deux manières différentes ;

- Sur l'axe des gains, on parle alors de marge de gain ;
- Sur l'axe des phases, on parle alors de marge de phase.



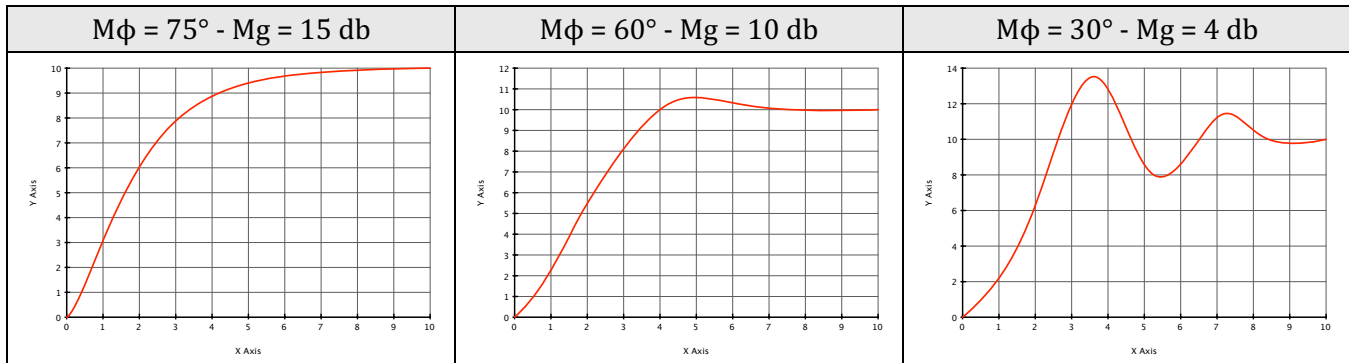
14.1.5. Calcul des marges

Calcul de la marge de gain M_g	Calcul de la marge de phase M_ϕ
ω_0 vérifie : $\text{Arg}(T(j\omega_0)) = -\pi$	ω_0 vérifie : $ T(j\omega_0) = 1$
$M_g = -20 \times \log(T(j\omega_0))$	$M_\phi = \pi + \text{Arg}(T(j\omega_0))$

14.1.6. Calcul du gain A du correcteur

Si on donne la marge de gain Mg	Si on donne la marge de phase Mφ
ω_o vérifie : $Arg(T(j\omega_o)) = -\pi$	ω_o vérifie : $M\phi = \pi + Arg(T(j\omega_o))$
A vérifie : $-20 \times \log(T(j\omega_o)) = Mg$	A vérifie : $ T(j\omega_o) = 1$

14.1.7. Influence des marges



14.2. Dilemme stabilité-précision

14.2.1. Précision statique

La précision statique d'un système bouclé est mesurée à l'aide de la valeur de l'erreur $\varepsilon(t)$ en régime permanent, pour une consigne constante.

$$\varepsilon_s = \lim_{t \rightarrow +\infty} \varepsilon(t)$$

Ainsi, grâce au théorème de la valeur finale :

$$\varepsilon_s = \lim_{p \rightarrow 0} p \times \varepsilon(p)$$

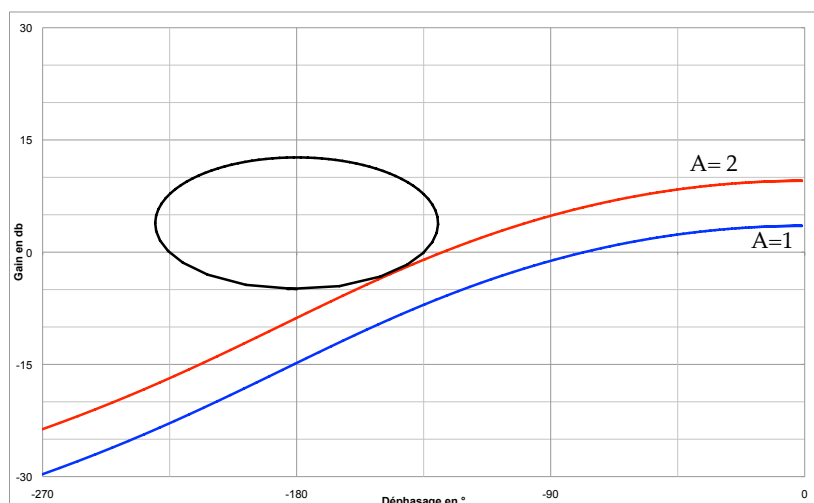
Dans la mesure où $w(t)=a$, avec a une constante réelle, on a aussi :

$$\varepsilon_s = \lim_{p \rightarrow 0} p \times \frac{a}{p} \times \frac{1}{1 + T(p)} = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{a}{1 + T(p)}$$

Pour avoir une erreur statique nulle il suffit d'avoir : $\lim_{p \rightarrow 0} T(p) = +\infty$

14.2.2. Action proportionnelle

Pour se rapprocher de $T(p)=+\infty$, il suffit de multiplier $H(p)$ par une constante A 'très grande'. C'est le correcteur proportionnel : $C(p)=A$. Influence de A sur le plan de Black :



Remarque :

L'action proportionnelle a des limites, car sur le plan de Black on s'aperçoit qu'elle rapproche le lieu de transfert de $T(j\omega)$ du point critique et donc de l'instabilité.

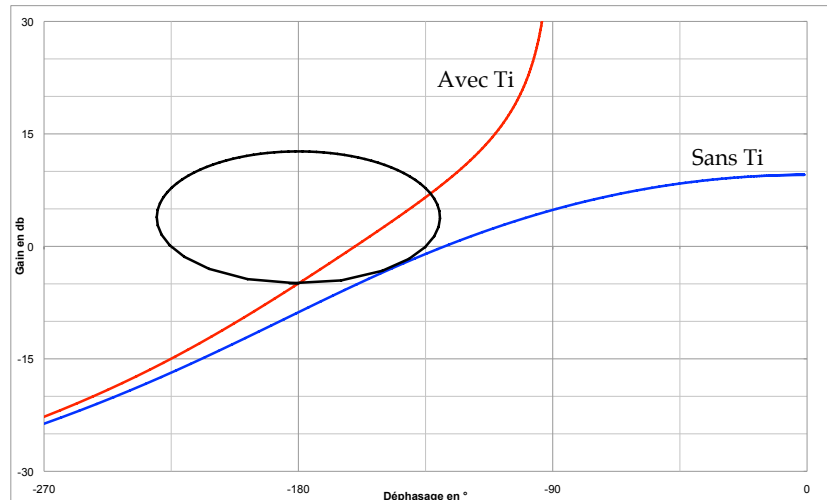
14.2.3. Action intégrale

Cette action permet d'avoir une erreur statique nulle, en ajoutant un pôle à $H(p)$. Comme l'action intégrale n'est jamais utilisée seule, on aura comme fonction de transfert d'une correction PI série :

$$C(p) = A \frac{1 + Ti \times p}{Ti \times p}$$

Remarques :

- ④ En choisissant Ti égal à la valeur de la constante de temps d'un premier ordre, on éliminera un pôle de $T(p)$.
- ④ L'action intégrale rapproche la courbe du point critique. Elle déstabilise la boucle fermée.



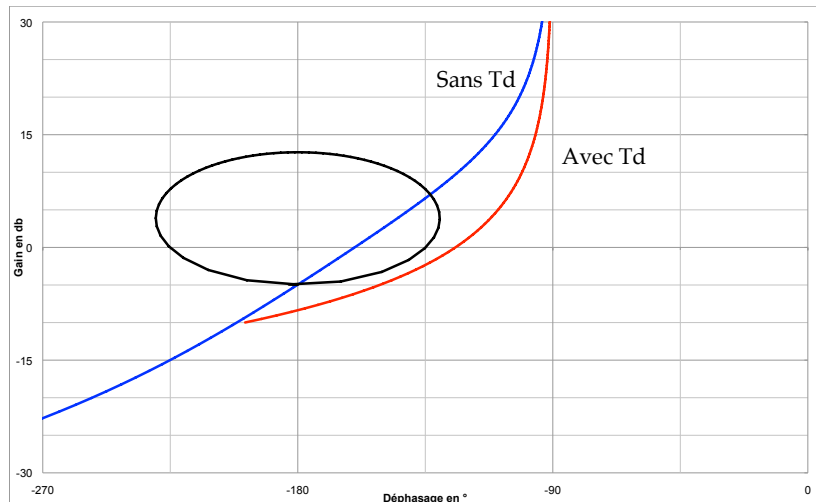
14.2.4. Action dérivée

L'action dérivée va nous permettre d'augmenter la valeur du gain pour les hautes fréquences. Avec les actions P, I et D, le correcteur devient, pour un régulateur série :

$$C(p) = A \frac{1 + Ti \times p}{Ti \times p} (1 + Td \times p)$$

L'action dérivée va nous permettre d'augmenter la valeur du gain pour les hautes fréquences.

Avec les actions P, I et D, le correcteur devient, pour un régulateur série :



Remarque : En choisissant bien la valeur de Td , on pourra éliminer un pôle de $H(p)$.

15. Régulation en temps discret

15.1. Classification des signaux

On peut modéliser les signaux utilisés dans l'industrie de deux manières différentes :

- Un signal S à temps continu (dit analogique) est une fonction $S()$ telle que :

$$S() : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$$

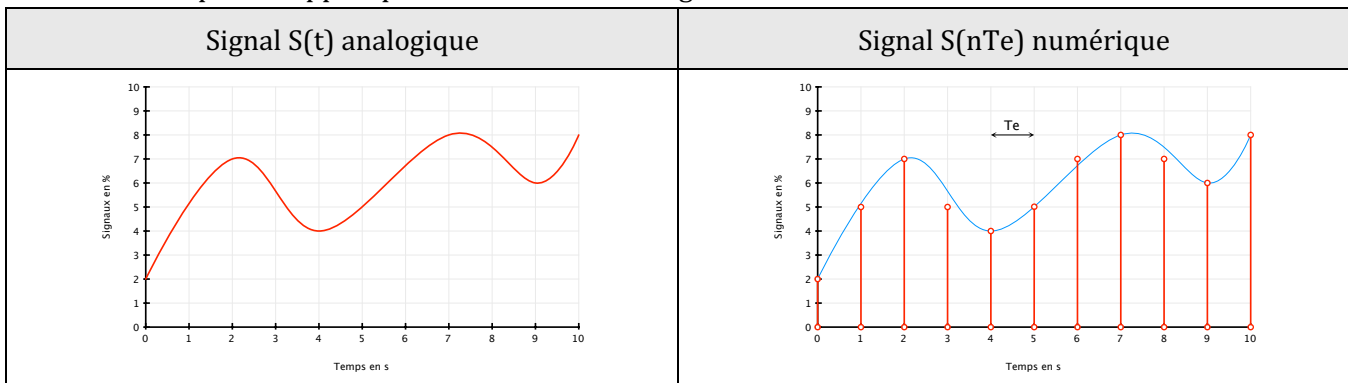
$$t \mapsto S(t)$$

- Un signal S à temps discret (dit numérique) est une suite S_n telle que :

$$S_n : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$$

$$n \mapsto S(n \times Te)$$

Avec Te un temps fixe, appelé période d'échantillonnage.



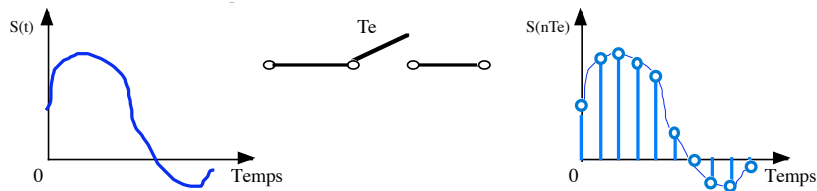
15.2. Conversion d'un signal analogique vers un signal numérique

Les capteurs utilisés dans l'industrie sont généralement tous des capteurs analogiques, la plupart fournissent un signal 4-20 mA.

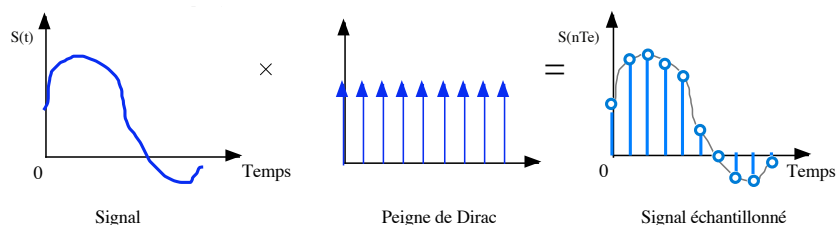
Les régulateurs électroniques modernes utilisent tous des valeurs numériques pour calculer la valeur de la commande. Ils sont équipés de convertisseurs de signaux analogiques vers numériques (CAN) sur chacune de leur entrée.

15.2.1. Processus

Un échantillonneur idéal est un contacteur qui se ferme en un temps nul tous les Te . Le signal de sortie $S(nTe)$ est constitué d'une suite de valeurs discrètes. L'impossibilité physique de prélever le signal de manière instantanée conduit à une variation de l'amplitude du signal pendant l'échantillonnage. On est donc contraint de faire une estimation moyenne de l'amplitude sur un court intervalle de temps.

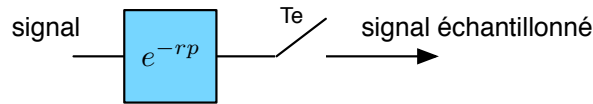


Le modèle mathématique généralement admis est le suivant :



15.2.2. Retard de groupe

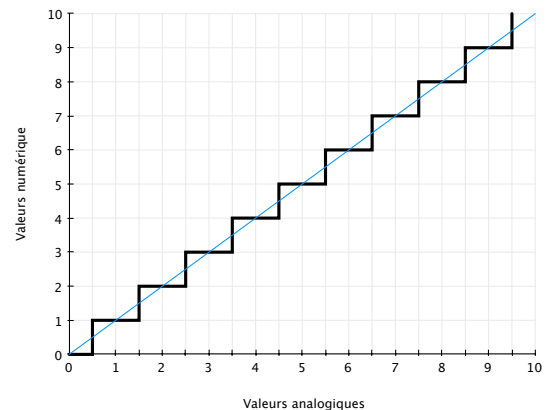
L'échantillonnage n'est jamais instantané. Il faut tenir compte de la durée de conversion du CAN et du temps d'exécution des calculs avant restitution du signal par le CNA. L'ensemble revient à introduire un retard de groupe. L'échantillonneur pourra être représenté dans un schéma fonctionnel par l'élément ci-contre :



Dans la pratique, si l'on choisit une période d'échantillonnage telle que la durée d'acquisition et de traitement soit de quelques % de T_e , on pourra considérer que l'échantillonnage est instantané.

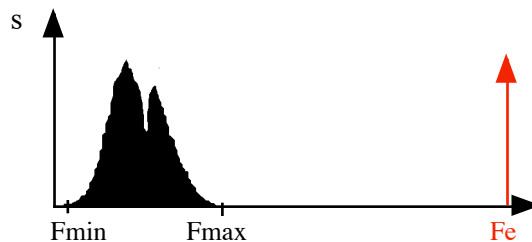
15.2.3. Quantification

L'opération de quantification consiste à associer à chaque valeur discrète un nombre entier représentant l'amplitude. L'effet de cette quantification peut être représenté par une fonction non linéaire en escalier. Les conséquences de la quantification peuvent être modélisées par une source de bruit blanc $[-q/2 ; q/2]$, avec q le quantum qui représente la plus petite variation du signal d'entrée qui entraîne le changement d'état du bit de poids le plus faible. Pour des signaux plus grands que $100q$, on peut considérer que ce bruit est négligeable.

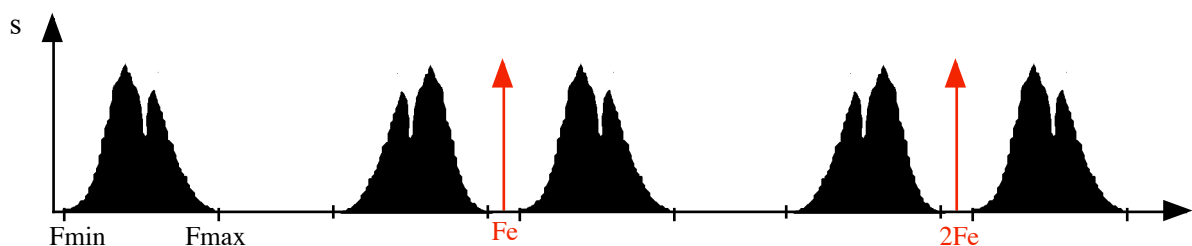


15.2.4. Conséquence de l'échantillonnage

Soit un signal $S(t)$, dont le spectre fréquentiel est représenté ci-dessous :



Le spectre du signal échantillonné $S(nT_e)$ devient (avec $F_e = T_e^{-1}$) :

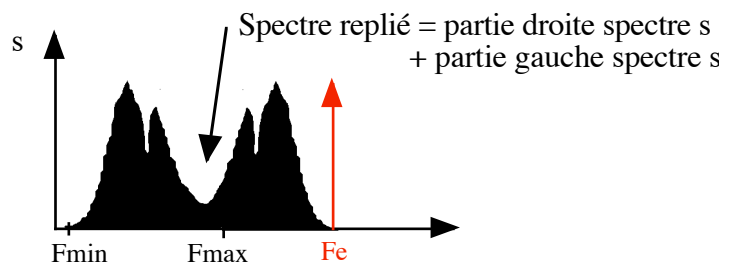


Théorème de Shannon :

On ne perd pas d'informations en échantillonnant un signal, si la fréquence d'échantillonnage est supérieure à deux fois la fréquence la plus grande contenue dans le spectre du signal.

Dans le cas contraire, si le signal échantillonné comporte des fréquences supérieures à $F_e/2$, chaque période du spectre déborde sur la suivante.

Tout se passe comme si le spectre était replié à la fréquence $F/2$.



15.2.5. Choix de la fréquence d'échantillonnage

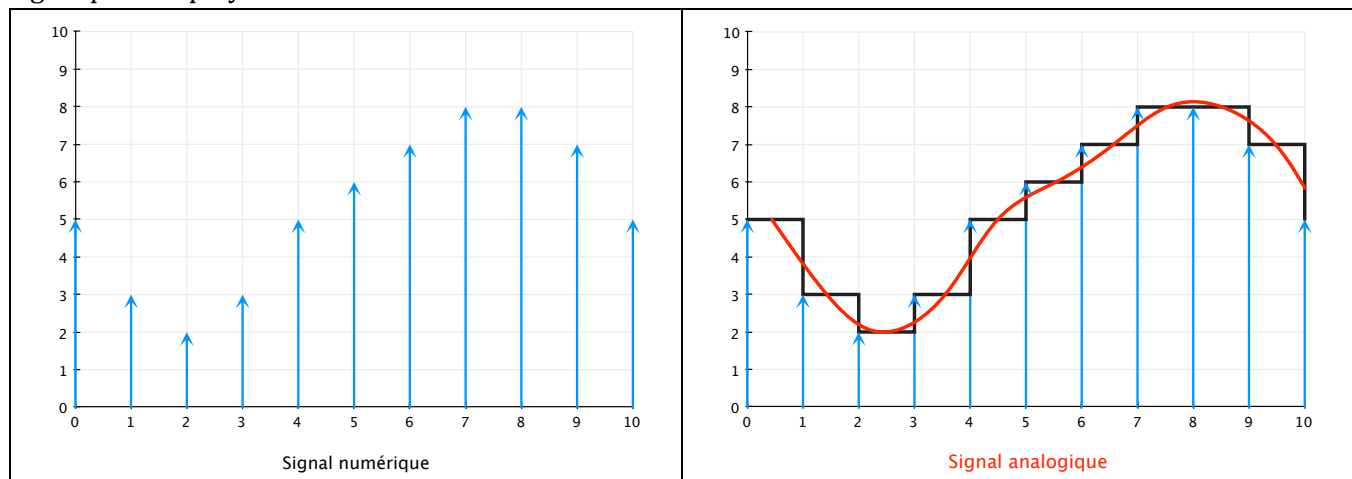
Dans la réalité, on ne peut pas être sûr de la présence de fréquences en dehors d'une bande définie. Dans la mesure du possible, on placera avant l'échantillonneur un filtre passe-bas appelé filtre anti-repliement, permettant de limiter l'apparition de fréquences fantômes. Une fréquence d'échantillonnage égale à quinze fois la bande passante du signal est généralement utilisée. Ainsi, pour les processus suivants on peut choisir T_e tel que :

Processus	Période d'échantillonnage en s
Régulation de pression	5 à 10
Régulation de débit	1 à 3
Régulation de niveau	5 à 10
Régulation de température	10 à 45
Séchage	20 à 45
Distillation	10 à 180
Réactions catalytiques	10 à 50
Fabrication de ciment	20 à 50
Asservissement électrique	10^{-3} à 10^{-1}

15.3. Conversion d'un signal numérique vers un signal analogique

Le rôle du CNA est de reconstituer un signal analogique à partir d'échantillons de celui-ci. Il doit permettre de fournir une valeur du signal entre deux échantillons. Cette fonction peut être réalisée à l'aide du bloqueur d'ordre zéro.

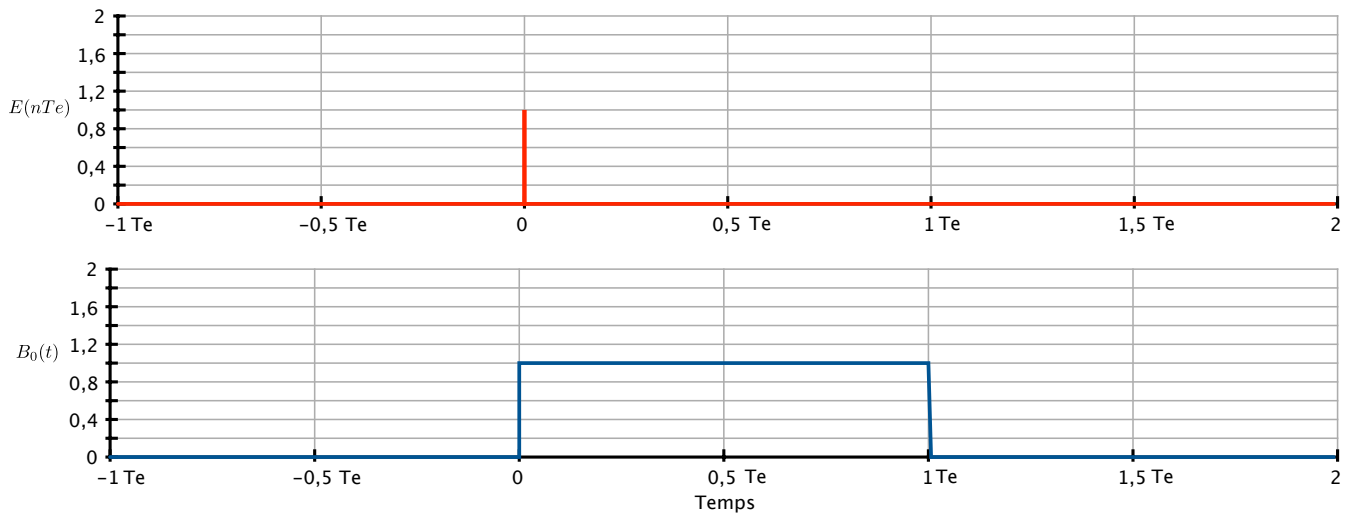
Le bloqueur d'ordre zéro maintient constant le signal réglant pendant l'intervalle de temps T_e par mémorisation de la valeur de l'échantillon précédent. On l'appelle bloqueur d'ordre zéro, car il interpole le signal par des polynômes d'ordre zéro.



15.3.1. Fonction de transfert du bloqueur d'ordre 0

Pour le calcul de cette fonction de transfert, on observe la valeur de la sortie du bloqueur $B_0(t)$ en réponse à une impulsion unitaire de son entrée E_n . $E_n = \{1,0,0,0,\dots\}$

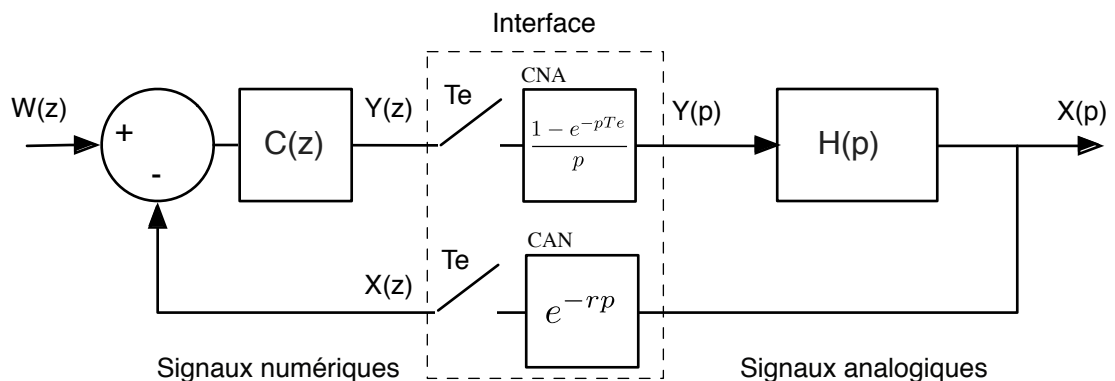
On a alors : $B_0(p) = \mathcal{L}[B_0(t)]$



$$B_0(p) = \frac{1}{p} - \frac{e^{-pTe}}{p} = \frac{1 - e^{-pTe}}{p}$$

15.3.2. Schéma complet de la régulation numérique

Si on tient compte de tous les éléments vus avant, une régulation numérique peut être modélisée par le schéma fonctionnel suivant :



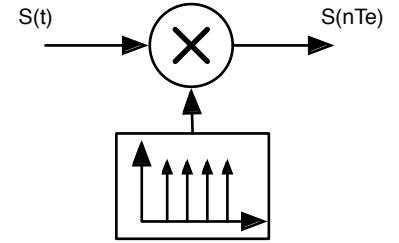
Dans tous les exercices de CIRA, on peut considérer que le retard de groupe est très faible, donc que $e^{-rp} = 1$.

15.4. Transformée en Z

15.4.1. Introduction

La transformée en Z est relative aux signaux numériques. Elle permet le traitement des signaux et systèmes échantillonnés comme la transformée de Laplace pour les signaux et systèmes continus.

Le processus d'échantillonnage revient à multiplier le signal analogique d'entrée par une série d'impulsions unité.



$$S(nTe) = S(t) \times \sum_{n=0}^{\infty} \delta(t - nTe) = \sum_{n=0}^{\infty} S(t) \times \delta(t - nTe) = \sum_{n=0}^{\infty} S(nTe) \times \delta(t - nTe)$$

$$\mathcal{L}[S(nTe)] = \mathcal{L}\left[\sum_{n=0}^{\infty} S(nTe) \times \delta(t - nTe)\right] = \sum_{n=0}^{\infty} \mathcal{L}[S(nTe) \times \delta(t - nTe)] = \sum_{n=0}^{\infty} S(nTe) \times \mathcal{L}[\delta(t - nTe)]$$

$$\mathcal{L}[S(nTe)] = \sum_{n=0}^{\infty} S(nTe) \times e^{-n \times pTe} = \sum_{n=0}^{\infty} S(nTe) \times (e^{pTe})^{-n}$$

En posant :

$S_n = S(nTe)$ et $z = e^{pTe}$

$$\mathcal{Z}[S_n] = \sum_{n=0}^{\infty} S_n \times z^{-n}$$

15.4.2. Table des transformées en z

Fonction	Allure	$S_n : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$ $a \in [0, 1]$	$\mathcal{Z}[S_n] : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$
Dirac		$\begin{cases} 0 \rightarrow 1 \\ n(\neq 0) \rightarrow 0 \end{cases}$	$z \rightarrow 1$
Retard		$\begin{cases} k \rightarrow 1 \\ n(\neq k) \rightarrow 0 \end{cases}$	$z \rightarrow z^{-k}$
Échelon		$n \rightarrow 1$	$z \rightarrow \frac{1}{1 - z^{-1}}$
Rampe		$n \rightarrow n$	$z \rightarrow \frac{z^{-1}}{(1 - z^{-1})^2}$
Exponentielle		$n \rightarrow a^n$	$z \rightarrow \frac{1}{1 - a \cdot z^{-1}}$
Premier ordre		$n \rightarrow 1 - a^n$	$z \rightarrow \frac{(1 - a) \cdot z^{-1}}{(1 - a \cdot z^{-1})(1 - z^{-1})}$

15.4.3. Équations récurrentes

$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^{degN} N_i \cdot z^{-i}}{\sum_{j=0}^{degD} D_j \cdot z^{-j}} = \frac{\sum_{i=0}^{\infty} S_i \cdot z^{-i}}{\sum_{j=0}^{\infty} E_j \cdot z^{-j}}$$

$$\left(\sum_{i=0}^{degN} N_i \cdot z^{-i} \right) \times \left(\sum_{j=0}^{\infty} E_j \cdot z^{-j} \right) = \left(\sum_{j=0}^{degD} D_j \cdot z^{-j} \right) \times \left(\sum_{i=0}^{\infty} S_i \cdot z^{-i} \right)$$

$$\sum_{i=0}^{degN} \sum_{j=0}^{\infty} N_i \cdot z^{-i} \times E_j \cdot z^{-j} = \sum_{j=0}^{degD} \sum_{i=0}^{\infty} D_j \cdot z^{-j} \times S_i \cdot z^{-i}$$

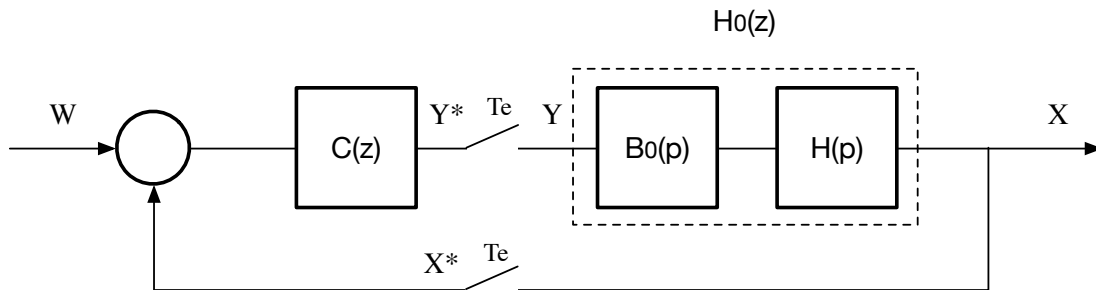
$$\sum_{i=0}^{degN} \sum_{j=0}^{\infty} N_i E_j \cdot z^{-(i+j)} = \sum_{j=0}^{degD} \sum_{i=0}^{\infty} D_j S_i \cdot z^{-(j+i)}$$

$$\sum_{i=0}^{degN} \sum_{k=i}^{\infty} N_i E_{k-i} \cdot z^{-k} = \sum_{j=0}^{degD} \sum_{k=j}^{\infty} D_j S_{k-j} \cdot z^{-k}$$

$$\forall k, \sum_{i=0}^{degN} N_i E_{k-i} = \sum_{j=0}^{degD} D_j S_{k-j} \Rightarrow S_k = \frac{1}{D_0} \left(\sum_{i=0}^{degN} N_i E_{k-i} - \sum_{j=1}^{degD} D_j S_{k-j} \right)$$

La démonstration ci-dessus montre que l'on peut définir la sortie S_k en fonction des valeurs précédentes de S , de la valeur actuelle E_k de l'entrée E et des valeurs précédentes de E . Plus le degré des polynômes en z^{-1} est important, plus il faudra remonter dans le temps.

15.4.4. Discrétisation de la fonction de transfert $H(p)$



On cherche la relation qui relie la fonction de transfert $H_0(z)$ du procédé vu par le correcteur $C(z)$ en fonction de la fonction de transfert $H(p)$ du procédé, quand on utilise un bloqueur d'ordre 0.

$$H_0(z) = Z[B_0(p) \times H(p)] = Z\left[\frac{1 - e^{-Te.p}}{p} \times H(p)\right] = (1 - z^{-1}) \times Z\left[\frac{H(p)}{p}\right]$$

$$H_0(z) = (1 - z^{-1}) Z\left[\frac{H(p)}{p}\right]$$

INDEX

A

action continue.....	21
action dérivée.....	28
action discontinue.....	21
action intégrale.....	26
action proportionnelle.....	22
asservissement.....	8
automatique.....	9, 17

B

bande proportionnelle.....	22
bloqueur d'ordre 0.....	55
boucle de courant.....	19
boucle fermée.....	9
boucle ouverte.....	9
Broïda.....	34

C

caractéristique statique.....	16
commande.....	9, 17
comparateur.....	13
comportement dynamique.....	24
consigne.....	7, 17
consigne externe.....	17
consigne interne.....	17
constante de temps.....	34
correcteur de tendance.....	40
courbe caractéristique.....	16
critère du revers.....	49

D

décalage de bande.....	24
dépassement.....	17

E

échantillonnage.....	53
échelon.....	16, 26
effets antagonistes.....	46
effets complémentaires.....	46
éléments.....	13
équations de sortie.....	47
équations récurrentes.....	57
erreur statique.....	16
étendu de mesure.....	22

F

facteur de réglabilité.....	35
-----------------------------	----

fonction de transfert.....	13
fréquence d'échantillonnage.....	54

G

gain proportionnel.....	22
gain statique.....	16, 33, 34
grandeur perturbatrice.....	7
grandeur physique.....	7, 13
grandeur réglante.....	7
grandeur réglée.....	7

I

identification.....	34
information.....	10
intégrale manuelle.....	24

M

manuel.....	9, 17
marges de stabilité.....	49
mesure.....	17
méthode du régleur.....	37
méthode par approches successives.....	37

O

OP (Output Process).....	17
organe de réglage.....	7, 9

P

paramètre seuil.....	21
PID.....	30
pleine échelle.....	22
point de fonctionnement.....	21, 23
précision.....	16
principe de superposition.....	16
procédé.....	15
procédé direct.....	18
procédé inverse.....	18
PV (Point Value).....	17

R

rapidité.....	16
régime critique.....	36, 49
régime d'instabilité entretenue.....	21
régime permanent.....	15
régime transitoire.....	15
règle de stabilité.....	18
régulation.....	7, 15

régulation à échelle partagée.....	46
régulation à trois éléments.....	10
régulation cascade.....	42
régulation de limitation.....	45
régulation de proportion.....	44
régulation de rapport.....	44
régulation en temps discret.....	52
régulation parallèle.....	45
régulation proportionnelle.....	25
réponse indicielle.....	16, 27
représentations harmoniques.....	48
retard.....	34
retard de groupe.....	53

S

schéma fonctionnel.....	13
schéma TI.....	10
sens d'action.....	18
servomécanisme.....	8
seuil DIFF.....	21
sommeur.....	13
SP (Set Point).....	17
stabilité.....	17
structure interne.....	31
structure mixte.....	30
structure parallèle.....	30
structure série.....	30
système.....	15
système instable.....	15
système intégrateur.....	15
système linéaire.....	16
système stable.....	15

T

talon.....	24
temps de réponse.....	16
temps intégral.....	26
tendance.....	40
théorème de Shannon.....	53
TOR (Tout Ou Rien).....	21
transformée de Laplace.....	32
transformée en Z.....	56
transmetteur.....	19

Z

Ziegler-Nichols.....	36
----------------------	----

