



# Régulation Industrielle

BTS CIRA 1 - Lycée Rouvière

<http://cira83.com>



# SOMMAIRE

1. Généralités .....	5
1.1. Définitions .....	5
1.2. Influence de la régulation .....	5
1.2.1. Baisse du coût de la transformation.....	5
1.2.2. Baisse du coût de l'installation et gain de temps.....	5
1.2.3. Exemple industriel .....	6
1.3. Régulation ou Asservissement .....	6
1.4. Les servomécanismes.....	6
1.5. Principe de fonctionnement.....	7
1.6. Fonctionnement en boucle ouverte (Manuel) .....	7
1.7. Fonctionnement en boucle fermée (Automatique) .....	7
2. Schémas de représentation .....	8
2.1. Schéma TI .....	8
2.1.1. Principe.....	8
2.1.2. Exemple .....	8
2.1.3. Signification des lettres .....	9
2.1.4. Les symboles .....	10
2.2. Schéma fonctionnel .....	11
2.3. Représentation fonctionnelle d'une boucle de régulation .....	11
3. Caractéristiques statiques et dynamiques d'un procédé.....	13
3.1. Stabilité .....	13
3.1.1. Procédés stables .....	13
3.1.2. Procédé instable.....	13
3.1.3. Procédé intégrateur.....	13
3.2. Régime transitoire - Régime permanent.....	13
3.3. Caractéristiques statiques d'un procédé.....	14
3.3.1. Courbe caractéristique.....	14
3.3.2. Gain statique .....	14
3.3.3. Erreur statique .....	14
3.3.4. Linéarité .....	14
3.4. Caractéristiques dynamiques .....	14
3.4.1. Temps de réponse .....	14
3.4.2. Dépassement .....	15
4. Les régulateurs.....	15
4.1. Structure de principe d'un régulateur .....	15
4.2. Choix du sens d'action d'un régulateur .....	16
4.2.1. Définition .....	16
4.2.2. Règle de stabilité.....	16
4.2.3. Mise en œuvre pratique.....	16
4.3. Raccordements électriques.....	17
4.3.1. Le transmetteur .....	17
4.3.2. Schéma de principe d'une boucle de courant .....	17
4.3.3. Générateur ou récepteur ?.....	17
4.3.4. Mise en œuvre pratique.....	17
4.3.5. Schéma de câblage d'une boucle de régulation de débit.....	18
4.3.6. Astuce de calcul .....	18
5. Régulation Tout Ou Rien.....	19

5.1.	Action continue - Action discontinue.....	19
5.2.	Présentation.....	19
5.3.	Fonctionnement.....	19
5.4.	Influence du paramètre seuil.....	19
6.	Action Proportionnelle.....	20
6.1.	Rappel.....	20
6.2.	Présentation.....	20
6.3.	Bande proportionnelle.....	20
6.4.	En fonctionnement.....	20
6.5.	Détermination du point de fonctionnement.....	21
6.6.	Influence de la bande proportionnelle.....	21
6.6.1.	Comportement statique.....	21
6.6.2.	Comportement dynamique.....	22
6.7.	Décalage de bande - Talon - Intégrale manuelle.....	22
6.8.	Influence du décalage de bande.....	23
6.8.1.	Statique.....	23
6.8.2.	Dynamique.....	23
6.9.	Représentation fonctionnelle d'une régulation proportionnelle.....	23
7.	Action intégrale.....	24
7.1.	Comparaison avec intégrale manuelle.....	24
7.2.	Qu'est-ce qu'une action intégrale ?.....	24
7.3.	Fonctionnement.....	24
7.4.	Actions conjuguées PI.....	25
7.5.	Réponses indicielles.....	25
7.6.	Influence du paramètre temps intégral.....	26
7.6.1.	Comportement statique en boucle fermée.....	26
7.6.2.	Comportement dynamique en boucle fermée.....	26
8.	Action Dérivée.....	26
8.1.	Qu'est-ce qu'une action dérivée ?.....	26
8.2.	Fonctionnement.....	26
8.3.	Actions conjuguées PD.....	27
8.4.	Influence du paramètre temps dérivé en boucle fermée.....	28
8.4.1.	Comportement statique.....	28
8.4.2.	Comportement dynamique.....	28
9.	Correcteur PID.....	29
9.1.	Structures des correcteurs PID.....	29
9.2.	Réponse indicielle.....	29
9.3.	Déterminer la structure interne d'un correcteur.....	30
9.4.	Mise en œuvre pratique.....	30
9.5.	Influence des actions P, I et D.....	30
9.5.1.	Quand $X_p$ augmente.....	30
9.5.2.	Quand $T_i$ augmente.....	30
9.5.3.	Quand $T_d$ augmente.....	30
10.	Transformée de Laplace.....	31
10.1.	Les transformées mathématiques.....	31
10.2.	Propriétés de la transformée de Laplace.....	31
10.3.	Structures des régulateurs PID.....	31
10.4.	Table des transformées de Laplace.....	32
11.	Identification et Réglages.....	33
11.1.	Mise en œuvre.....	33

11.2.	Procédé stable.....	33
11.3.	Procédé instable .....	33
11.4.	Réglages avec modèle.....	34
11.5.	Réglage en chaîne fermée.....	35
11.5.1.	Ziegler & Nichols.....	35
11.5.2.	Méthode du Régleur .....	36
12.	Se souvenir.....	37
12.1.	Les schémas TI de base.....	37
12.2.	L'instrumentation de base.....	37
12.3.	Les nombres complexes .....	38
12.3.1.	Présentation.....	38
12.3.2.	Plan complexe.....	38
12.3.3.	Module et argument.....	38
12.3.4.	Propriétés .....	38
12.4.	De la boucle ouverte à la boucle fermée.....	38
12.4.1.	Notations.....	38
12.4.2.	Calcul de $T(p)$ .....	38
12.4.3.	Calcul de $F(p)$ .....	39
12.4.4.	Calcul de $\varepsilon(p)$ .....	39
12.4.5.	Formules à connaître .....	39
12.4.6.	Rappel des objectifs de la régulation .....	39

# 1. Généralités

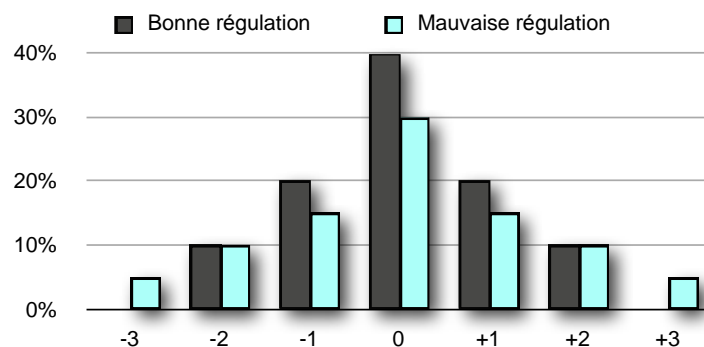
## 1.1. Définitions

- La **régulation** regroupe l'ensemble des techniques utilisées visant à contrôler une grandeur physique. Exemples de grandeur physique : Pression, température, débit, niveau etc...
- La **grandeur réglée**, c'est la grandeur physique que l'on désire contrôler. Elle donne son nom à la régulation. Exemple : une régulation de température.
- La **consigne** : C'est la valeur que doit prendre la grandeur réglée.
- La **grandeur réglante** est la grandeur physique 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 sont généralement pas de même nature que la grandeur réglée.
- **L'organe de réglage** est l'élément qui agit sur la grandeur réglante.

## 1.2. Influence de la régulation

### 1.2.1. Baisse du coût de la transformation

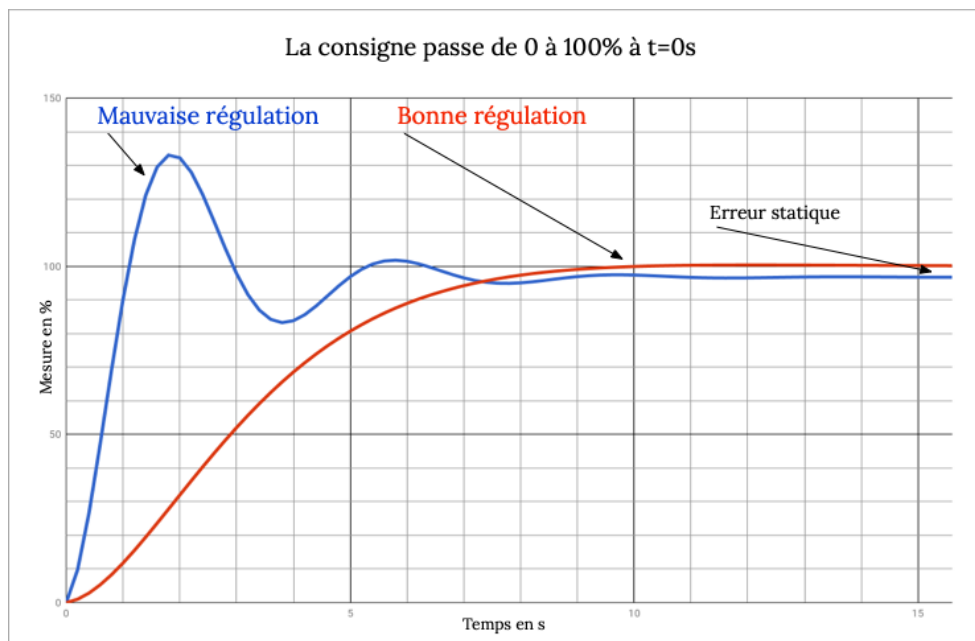
La bonne régulation amène une plus grande précision sur la grandeur réglée, permettant une diminution de la consigne pour un fonctionnement à la limite.



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  $\mu\text{m}$  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

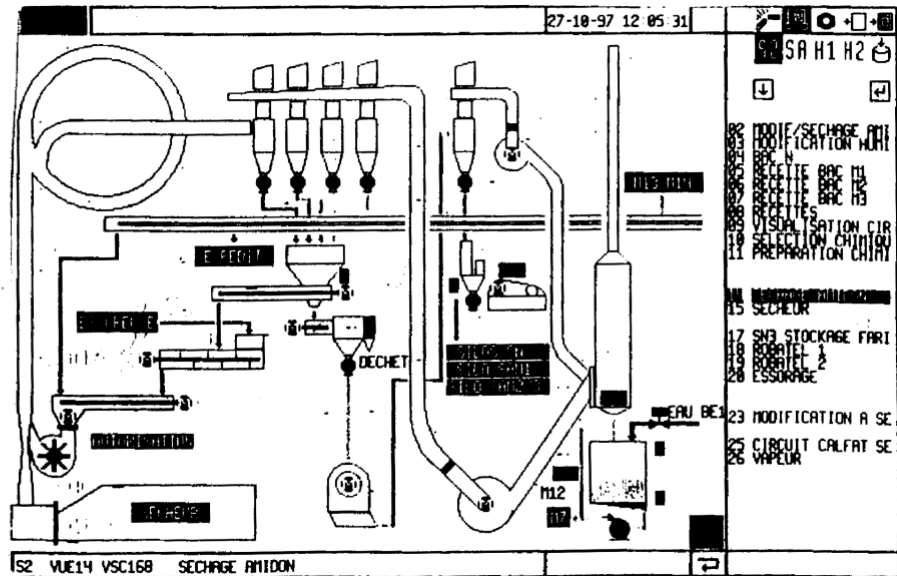
Le sécheur reçoit l'amidon sous forme d'une pâte qui est projetée dans une boucle de séchage. En sortie l'amidon est sous forme de poudre.

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.

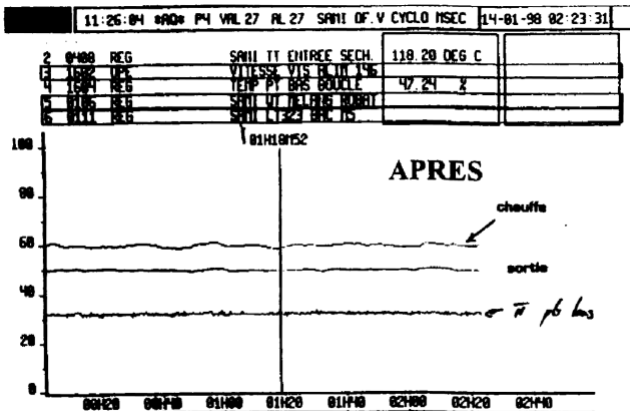
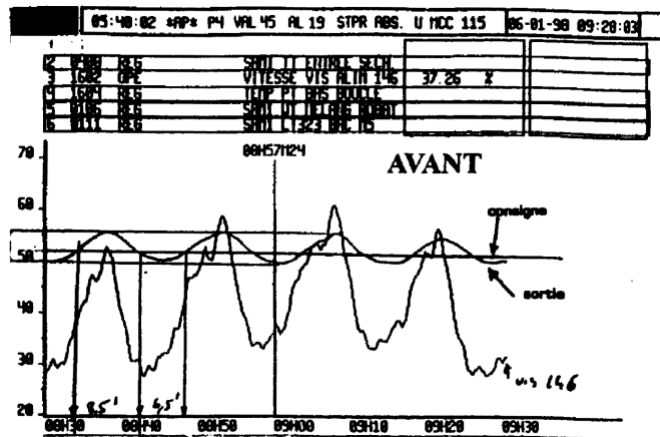


La régulation de la vitesse de la vis pour tenir la température posait de gros problèmes :

- 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.

A notre grande surprise, nous nous sommes retrouvés face à un banal système du 1<sup>er</sup> 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 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 Automatismes Régulation  
**Erwan MAILLY (CHAMTOR)**  
Automaticien

### 1.3. Régulation ou Asservissement

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

### 1.4. Les servomécanismes

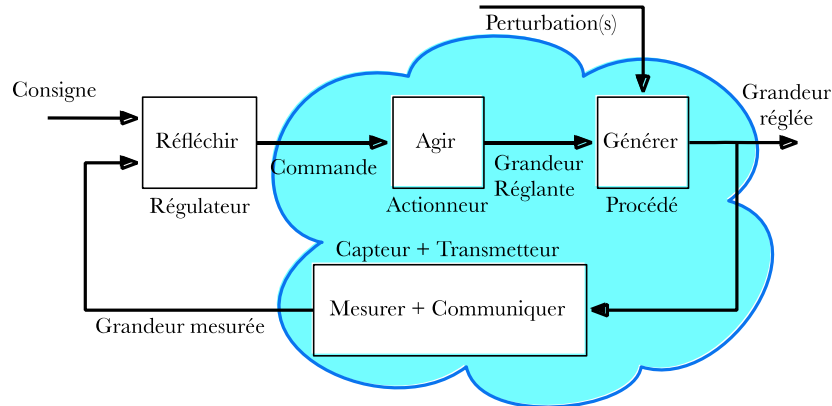
On appelle **servomécanisme**, un système asservi dont le rôle consiste à amplifier la puissance et dont la grandeur réglée est une grandeur mécanique tel qu'un effort, un couple, la position ou l'une de ses dérivées par rapport au temps, comme la vitesse et l'accélération.

## 1.5. Principe de fonctionnement

Pour réguler un système physique, il faut :

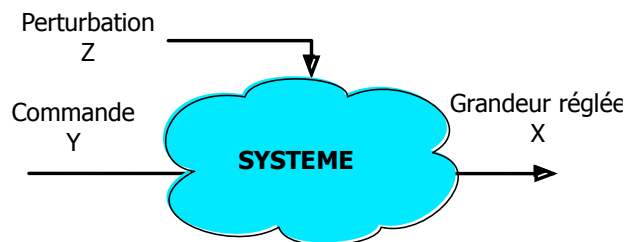
- **Mesurer** la grandeur réglée avec un capteur.
- **Réfléchir** sur l'attitude à suivre : c'est la fonction du régulateur. Le régulateur compare la grandeur réglée avec la consigne et élabore le signal de commande.
- **Agir** sur la grandeur réglante par l'intermédiaire d'un organe de réglage.

On peut représenter une régulation de la manière suivante :



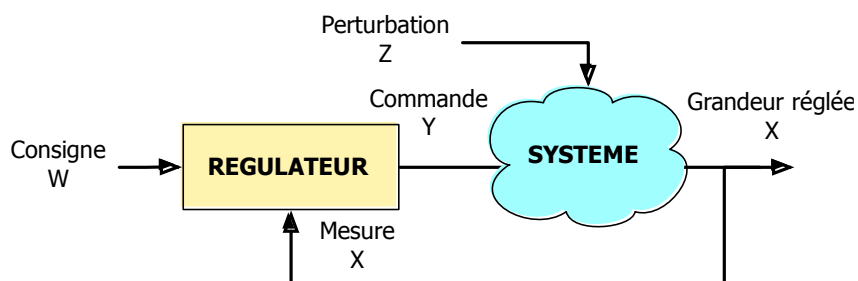
## 1.6. Fonctionnement en boucle ouverte (Manuel)

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.

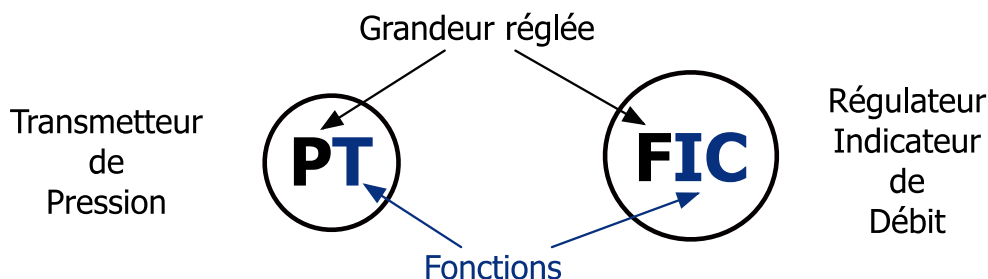


## 2. Schémas de représentation

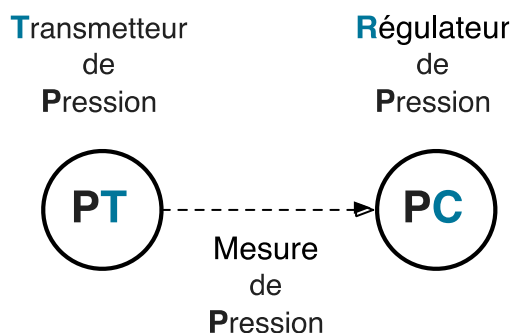
### 2.1. Schéma TI

#### 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.

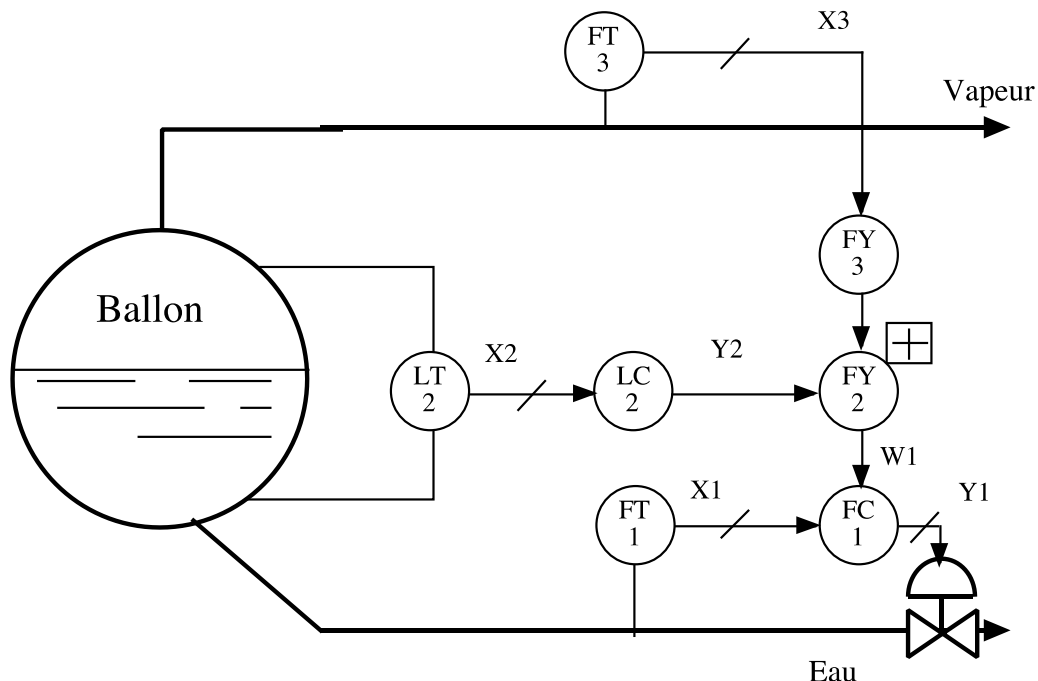


Les parcours de l'information est matérialisé par une flèche dont l'allure dépend du support de l'information.



#### 2.1.2. Exemple

Schéma TI d'une régulation de niveau dans le ballon avec correction de tendance :





### 2.1.3. Signification des lettres

	Grandeur physique	Affichage	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	Élément 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	

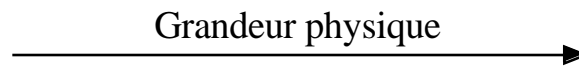
	Pompe	
	Pompe volumétrique	
	Electrovanne	

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

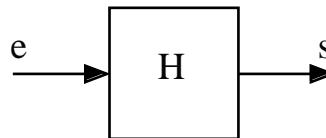
## 2.2. Schéma fonctionnel

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

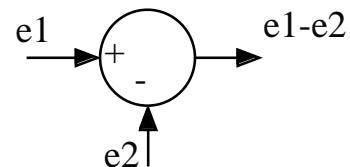
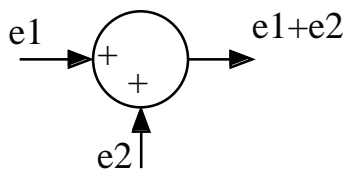
- Des lignes de parcours d'une grandeur physique. Ces ligne représente le parcours d'une grandeur physique de la boucle de régulation :



- Des 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 :  $s = H \times e$

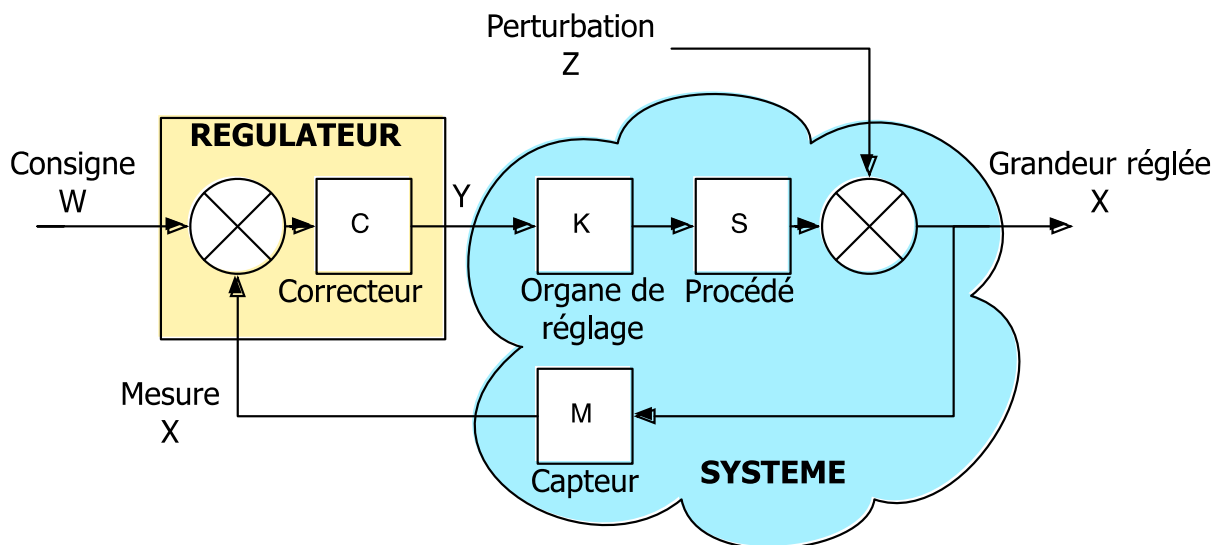


- Les sommateurs ou comparateurs, qui permettent l'addition ou la soustraction de grandeurs physiques :



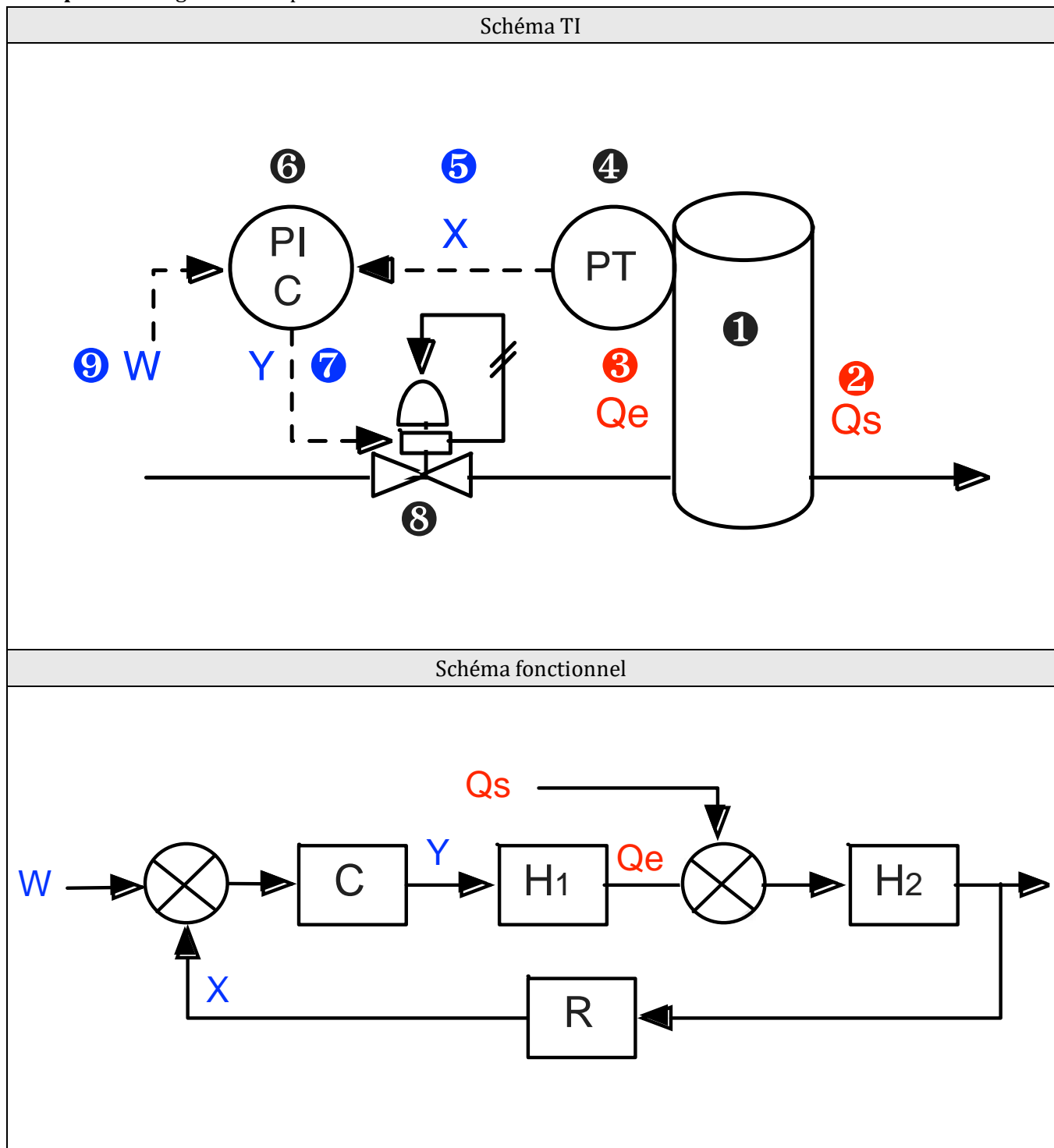
## 2.3. Représentation fonctionnelle d'une boucle de régulation

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 :

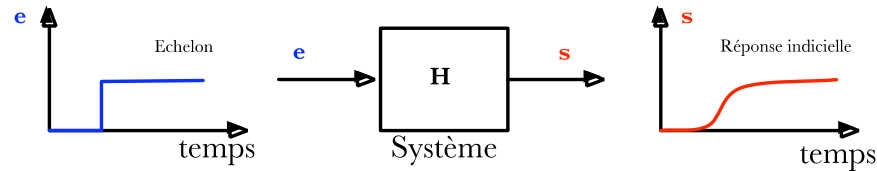


### 3. Caractéristiques statiques et dynamiques d'un procédé

#### 3.1. Stabilité

##### 3.1.1. Procédés stables

Un procédé est dit naturellement stable si à une variation finie de la grandeur réglante  $E$  correspond une variation finie de la grandeur réglée  $S$ .

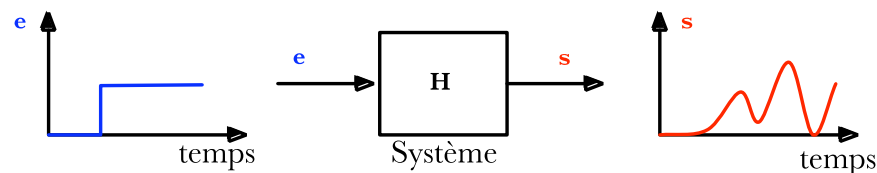


Exemple :

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

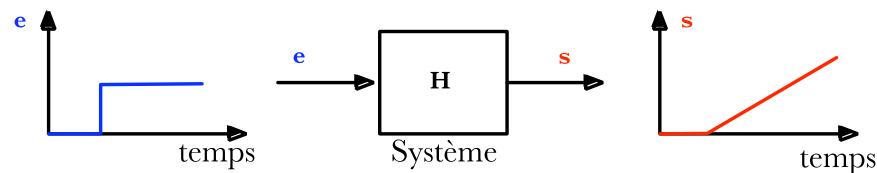
##### 3.1.2. Procédé instable

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. Procédé intégrateur

On dit qu'un procédé est intégrateur, si pour une entrée  $e$  constante, la sortie  $s$  est une droite croissante. Un procédé est intégrateur est instable.

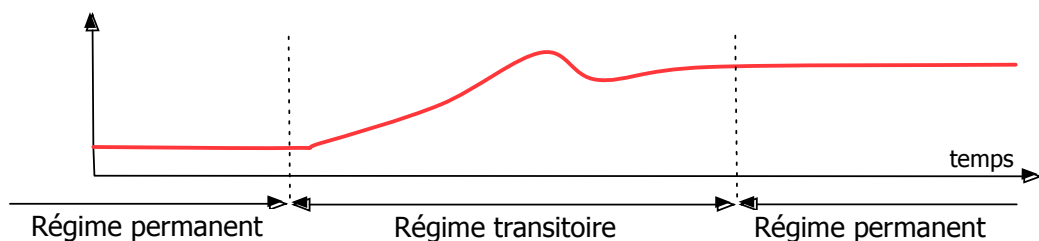


Exemple :

- 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.

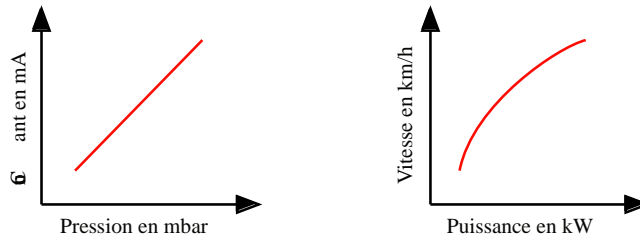


Pour passer d'un régime permanent à un autre, le système passe par un régime transitoire.

### 3.3. Caractéristiques statiques d'un procédé

#### 3.3.1. Courbe caractéristique

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



**Remarque :** On ne peut tracer la caractéristique statique que d'un système stable.

#### 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  $\Delta s$  et la variation de la grandeur d'entrée  $\Delta e$ .

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

#### 3.3.3. Erreur statique

Si le système est stable, l'erreur statique  $\epsilon_s$  est la différence entre la consigne **w** et la mesure **x** en régime permanent.

$$\epsilon_s = w - x$$

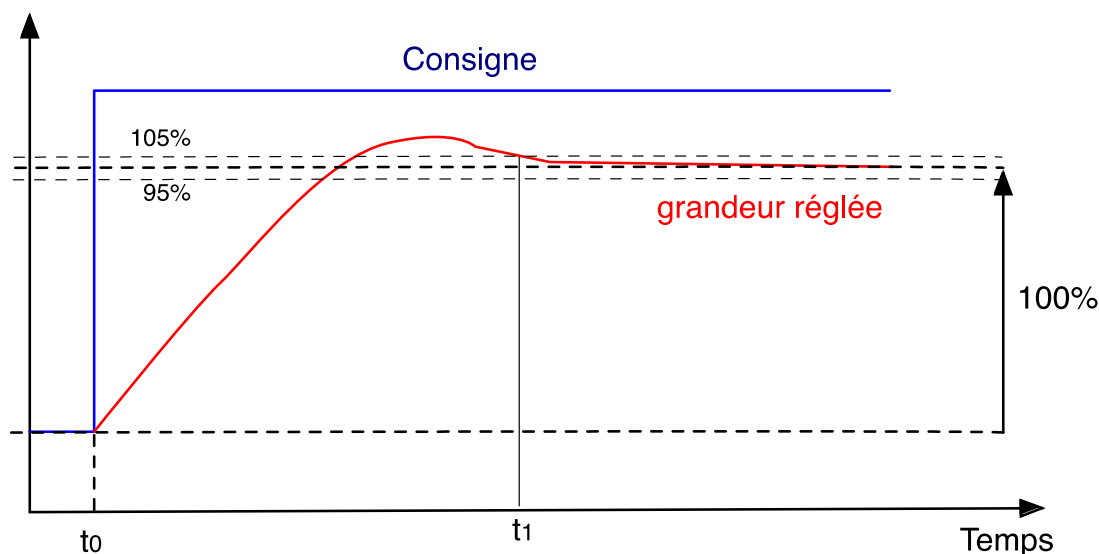
#### 3.3.4. Linéarité

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

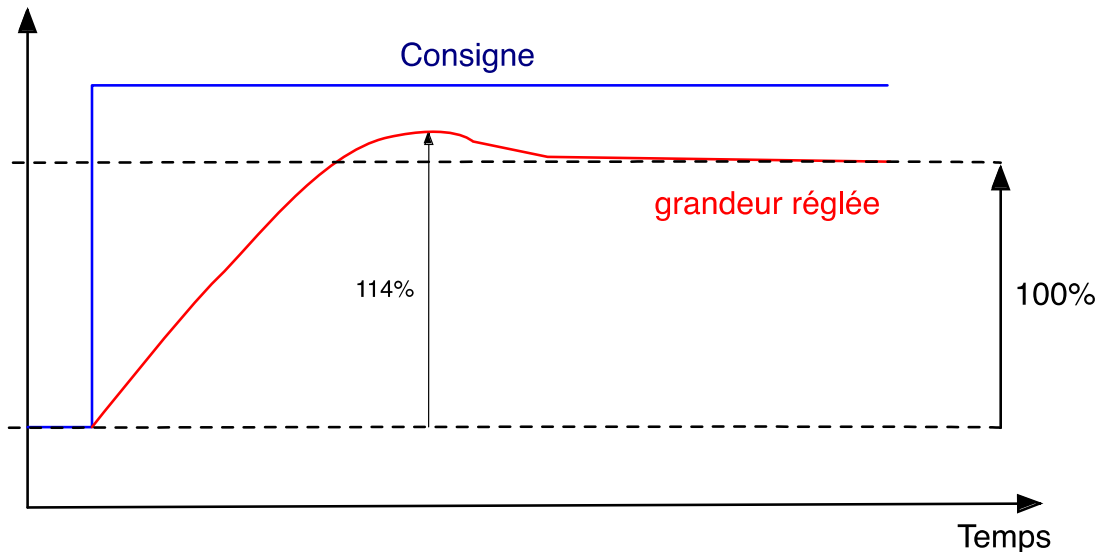
C'est l'aptitude du système à suivre les variations de la consigne. Dans le cas d'un échelon de la consigne, la croissance de la grandeur réglée définit les différents temps de réponse. Dans l'exemple ci-dessous, on mesure le temps de réponse à  $\pm 5\%$  qui est égal à  $t_1 - t_0$ .



### 3.4.2. Dépassement

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

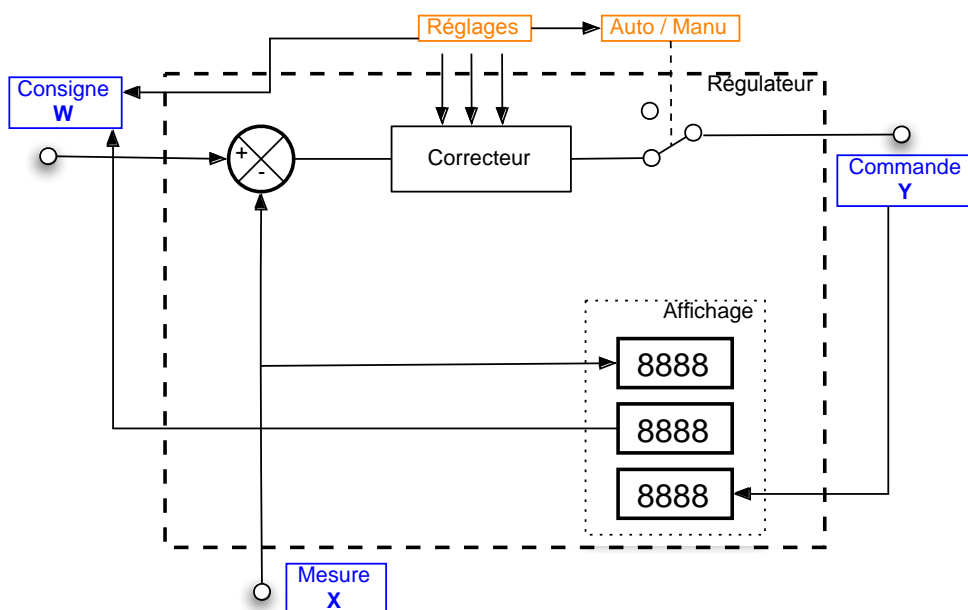
Dans la réponse indicielle ci-dessous, le premier dépassement est de 14%.



## 4. Les régulateurs

### 4.1. Structure de principe d'un régulateur

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

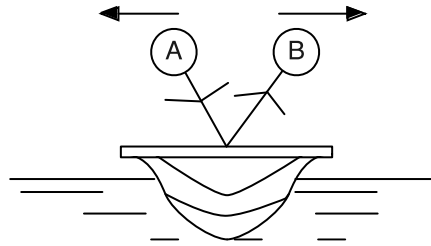


## 4.2. Choix du sens d'action d'un régulateur

### 4.2.1. Définition

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

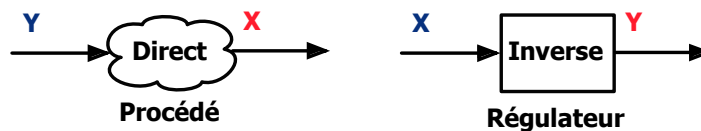
### 4.2.2. Règle de stabilité



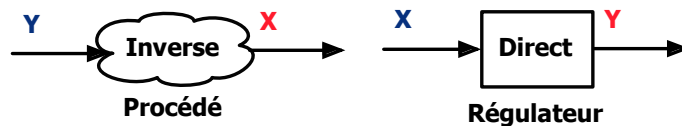
Dans la barque représentée ci-dessus, si A se penche trop vers la gauche, B est obligé de se pencher sur la droite pour maintenir la barque en équilibre et ne pas finir dans l'eau. Dans une boucle de régulation c'est la même chose, le régulateur doit agir pour limiter les variations du procédé.

**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 X augmente, le couple régulateur + procédé doit tendre à le 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 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

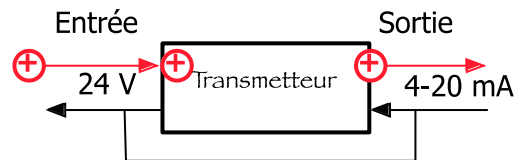
### 4.3.1. Le transmetteur

On peut séparer trois types de transmetteur :

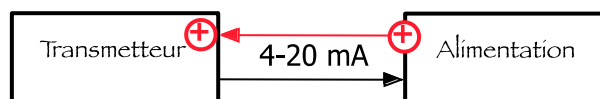
- Les transmetteurs 4 fils (actifs) qui disposent d'une alimentation et qui fournissent le courant I. Leur schéma de câblage est identique à celui des régulateurs.



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



- Les transmetteurs 2 fils (passif) qui ne disposent pas d'une alimentation et qui contrôlent le courant I fournie 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 ;
- D'un ou plusieurs 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
Mesure du régulateur	Transmetteur 3 fils
Organe de réglage	Alimentation
Enregistreur	Commande régulateur

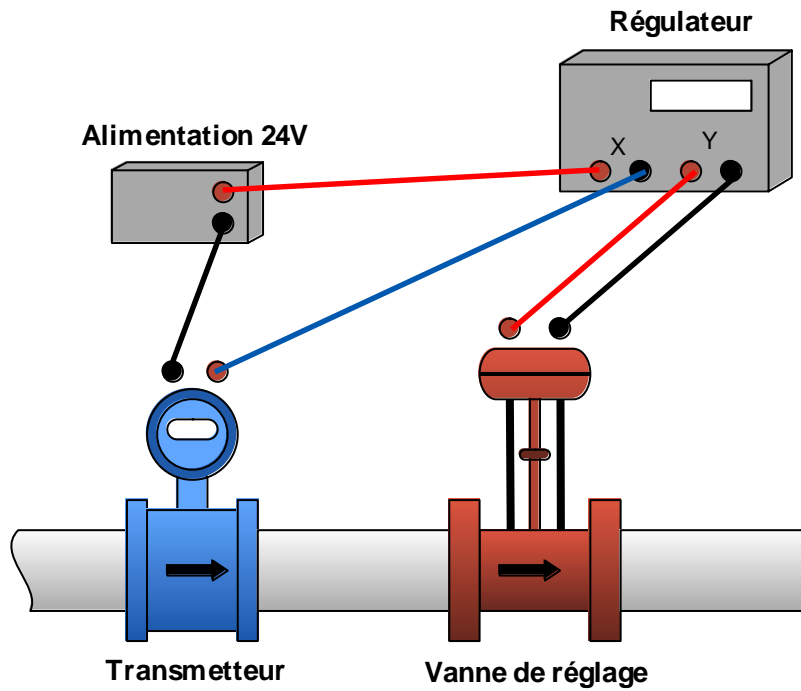
### 4.3.4. Mise en œuvre pratique

Chercher le nombre de boucle de courant. Il y a deux fois plus de boucles de courant que de boucles de régulation.

- Pour chaque boucle, 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.

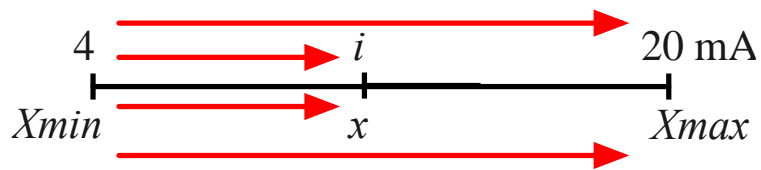
**Remarque :** Dans chaque boucle de courant, il y a autant de fils de liaison que d'éléments.

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



#### 4.3.6. 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 :

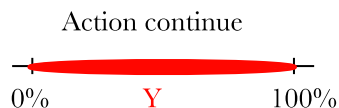
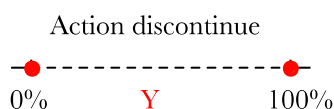
$$\frac{i - 4}{x - X_{min}} = \frac{20 - 4}{X_{max} - X_{min}}$$

## 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.

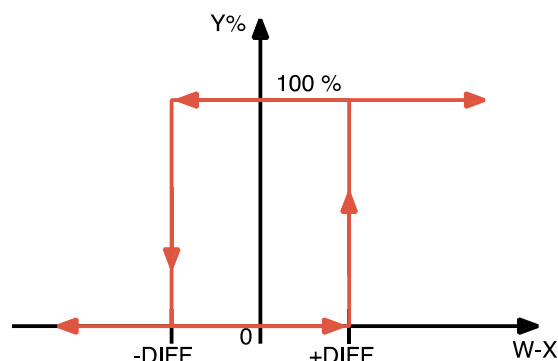


### 5.2. Présentation

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 :

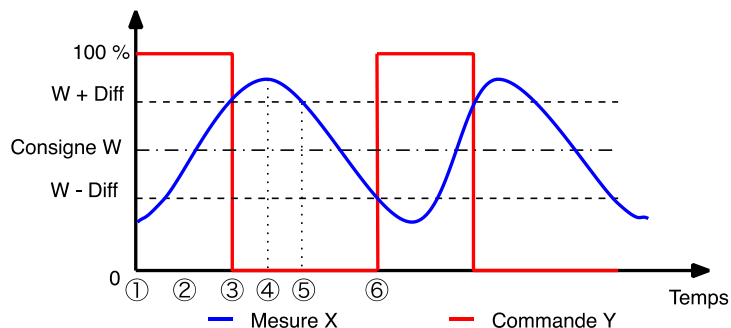
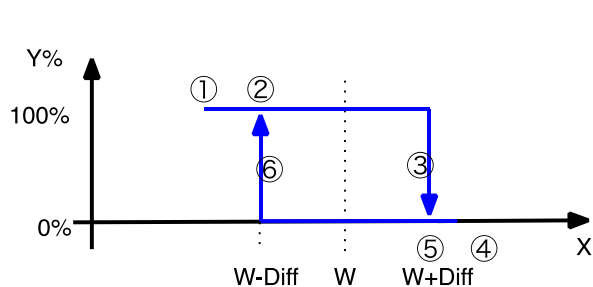
- La consigne W, fournie en unité de mesure ;
- Le seuil DIFF, donné généralement en % de la consigne.



### 5.3. Fonctionnement

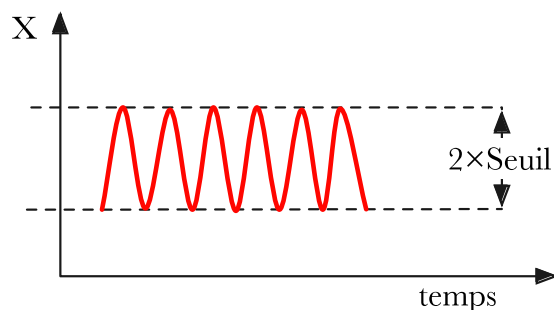
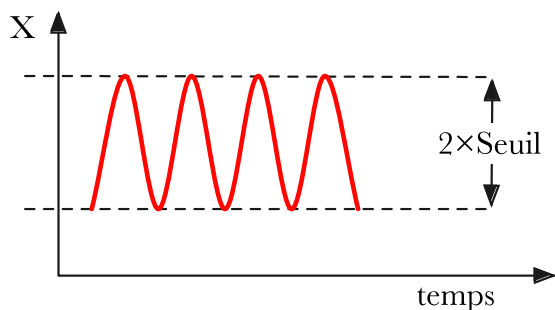
La grandeur réglée oscille autour du point de fonctionnement. À chaque dépassement des seuils de commutation, la sortie du régulateur change d'état. Compte tenu de l'inertie du système, la valeur absolue de l'erreur  $\varepsilon$  peut dépasser le seuil DIFF.

**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).

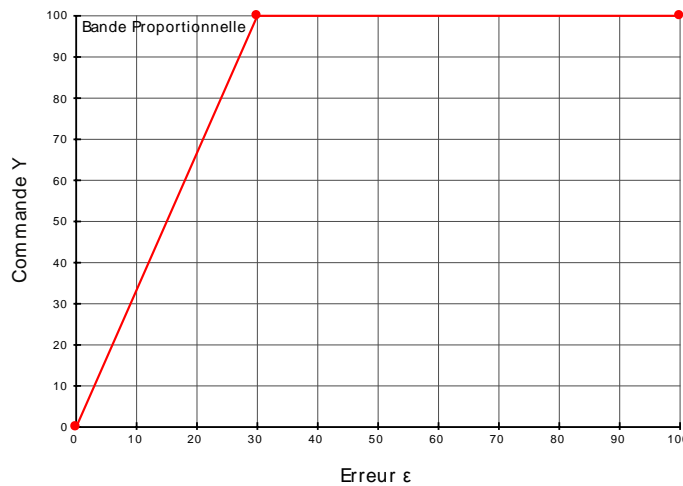
Pour un régulateur inverse, on a :

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

avec A, le gain proportionnel.

### 6.3. Bande proportionnelle

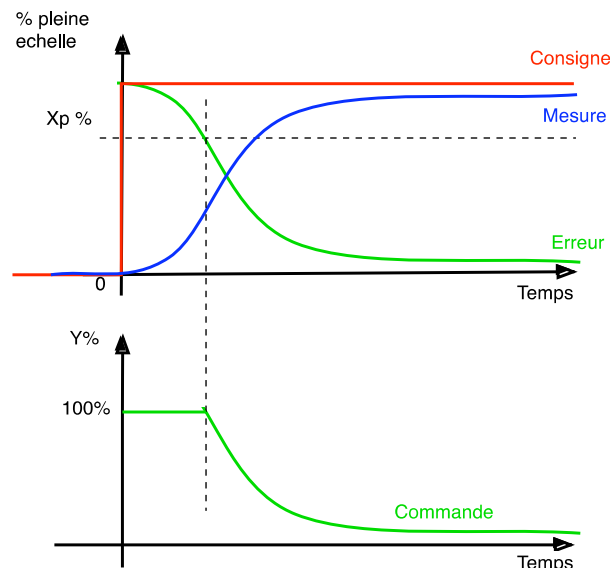
Si on représente la relation entre la commande et l'erreur, la bande proportionnelle  $X_p$  est la partie où la commande est proportionnelle à l'erreur.



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

### 6.4. En fonctionnement

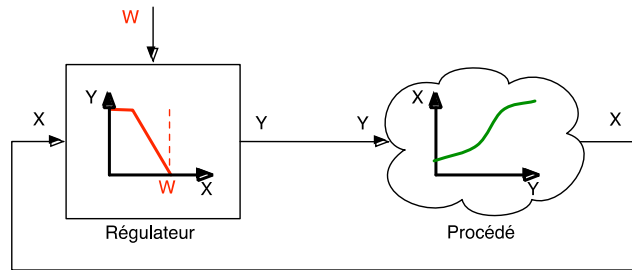
Lors d'une variation en échelon de la consigne, le système a une réponse ressemblant à celle représentée sur la figure ci-dessous.



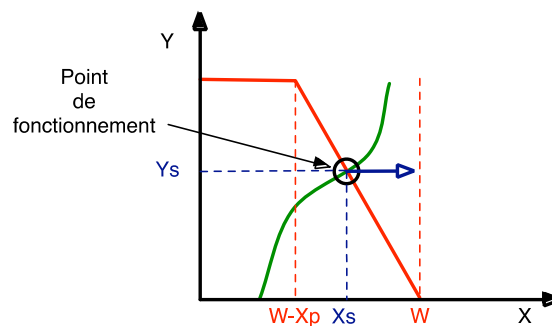
La mesure évolue pour se rapprocher de la consigne, sans jamais l'atteindre.

## 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  $E_s = W - X_s$ .

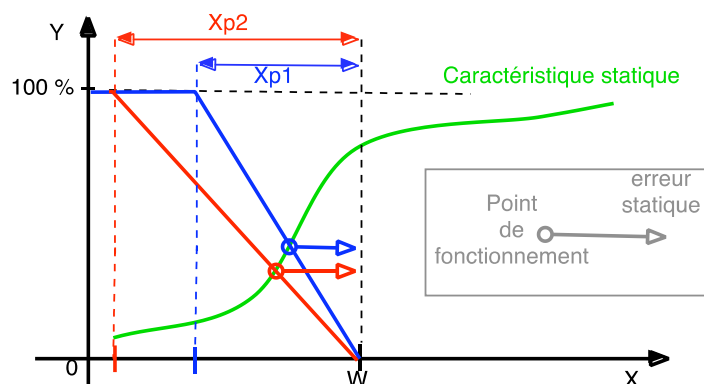


## 6.6. Influence de la bande proportionnelle

### 6.6.1. Comportement statique

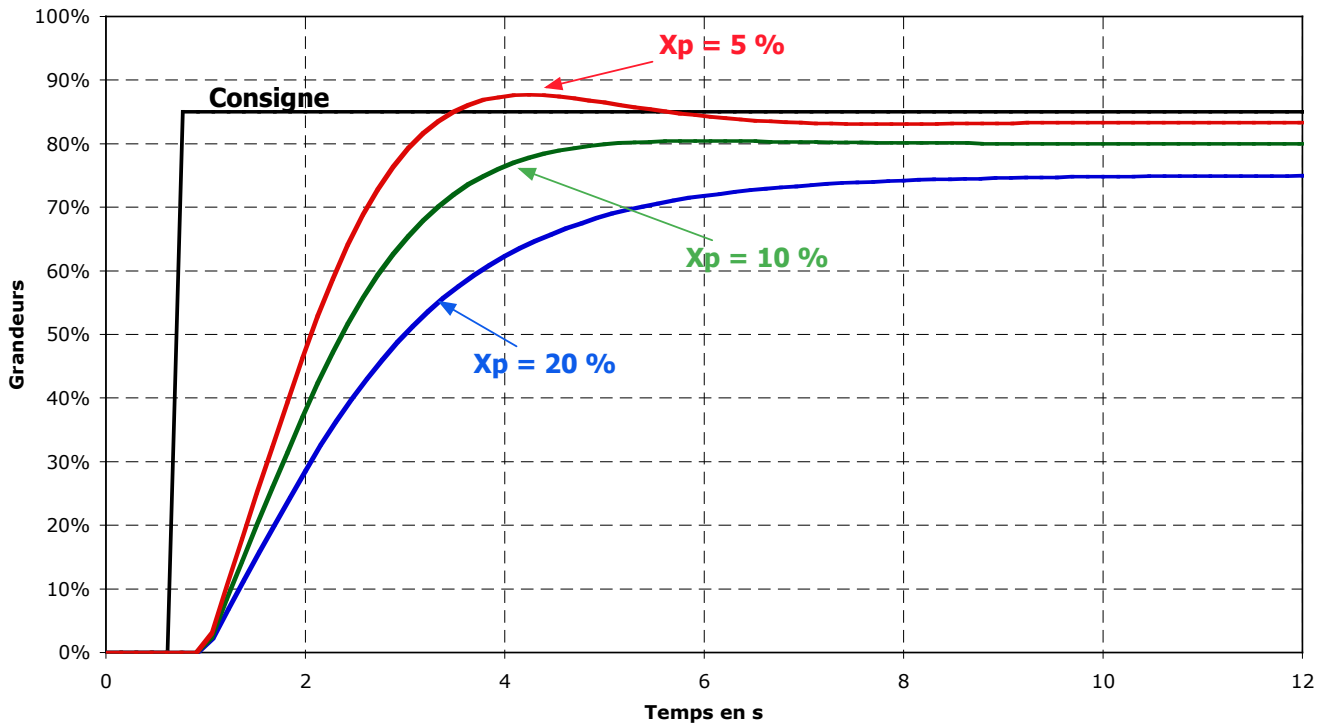
On s'aperçoit graphiquement que plus la bande proportionnelle est petite, plus l'erreur en régime permanent est petite.

Sur la figure ci-contre  $X_{p1} < X_{p2}$ .



## 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.



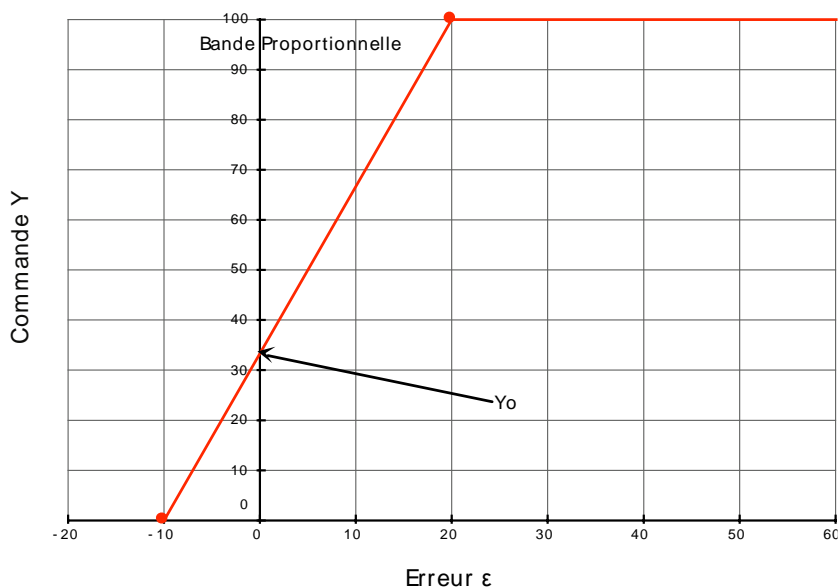
Le fonctionnement TOR correspond à une bande proportionnelle nulle.

## 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 la consigne est :

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

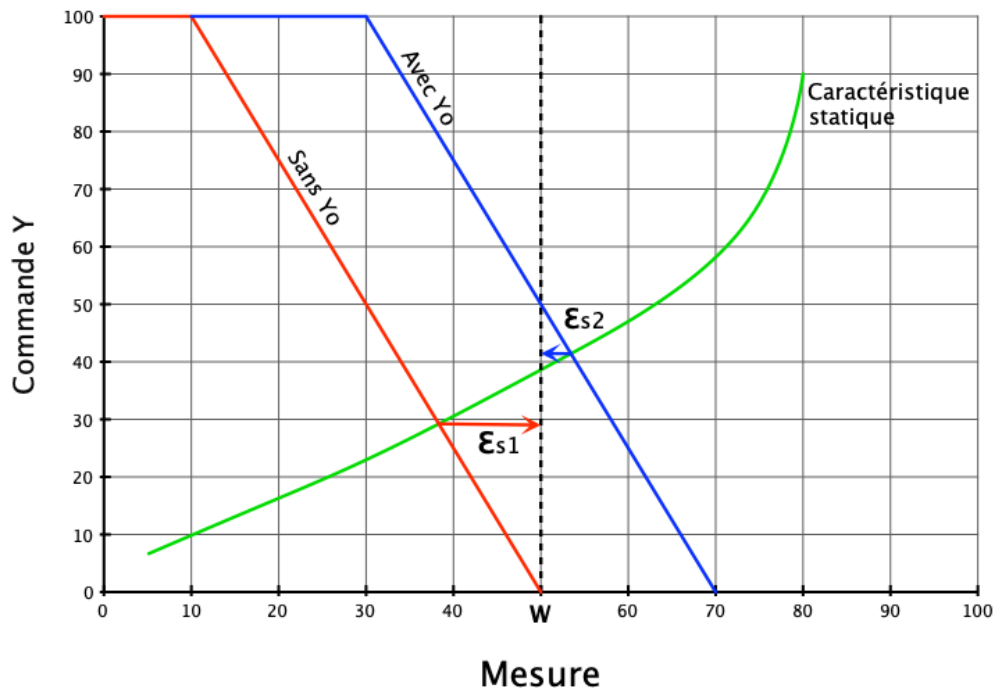
Avec  $Y_0$ , le décalage de bande à régler sur le régulateur. Ainsi, pour un régulateur à action inverse on a la caractéristique ci-contre.



## 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.

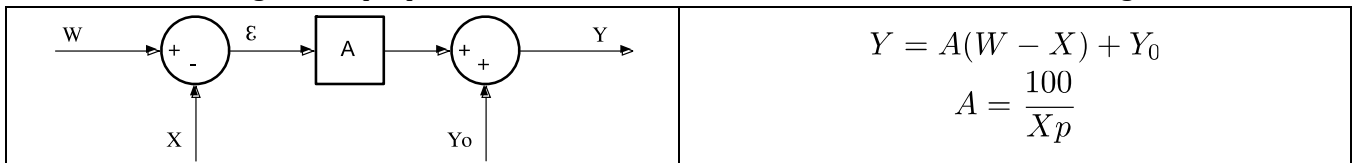


### 6.8.2. Dynamique

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

## 6.9. Représentation fonctionnelle d'une régulation proportionnelle

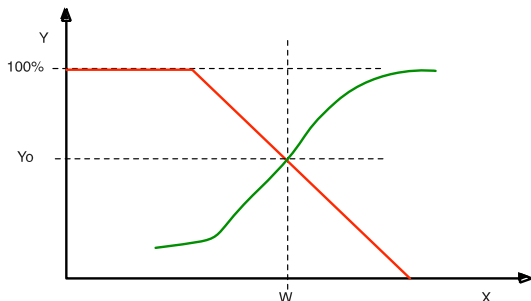
Dans le cas d'une régulation proportionnelle à action inverse, le schéma fonctionnel du régulateur devient :



## 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 :

<p>La caractéristique statique se déplace sous l'effet d'une grandeur perturbatrice</p>	<p>La valeur de la consigne W change</p>

### 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.

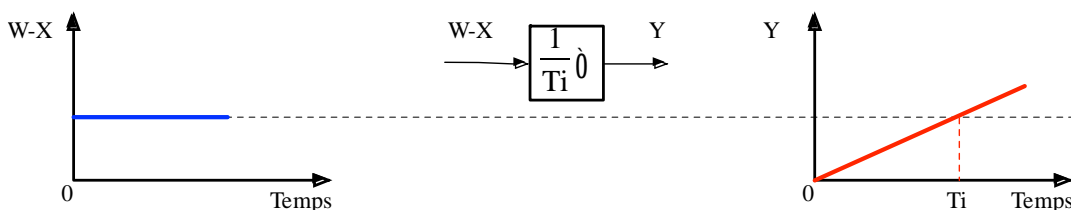
Cette fonction est remplie par l'opérateur mathématique : 'intégration de l'erreur par rapport au temps'. Ainsi, dans un régulateur, on définit l'action intégrale à partir d'un paramètre  $T_i$  avec :

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

$T_i$  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

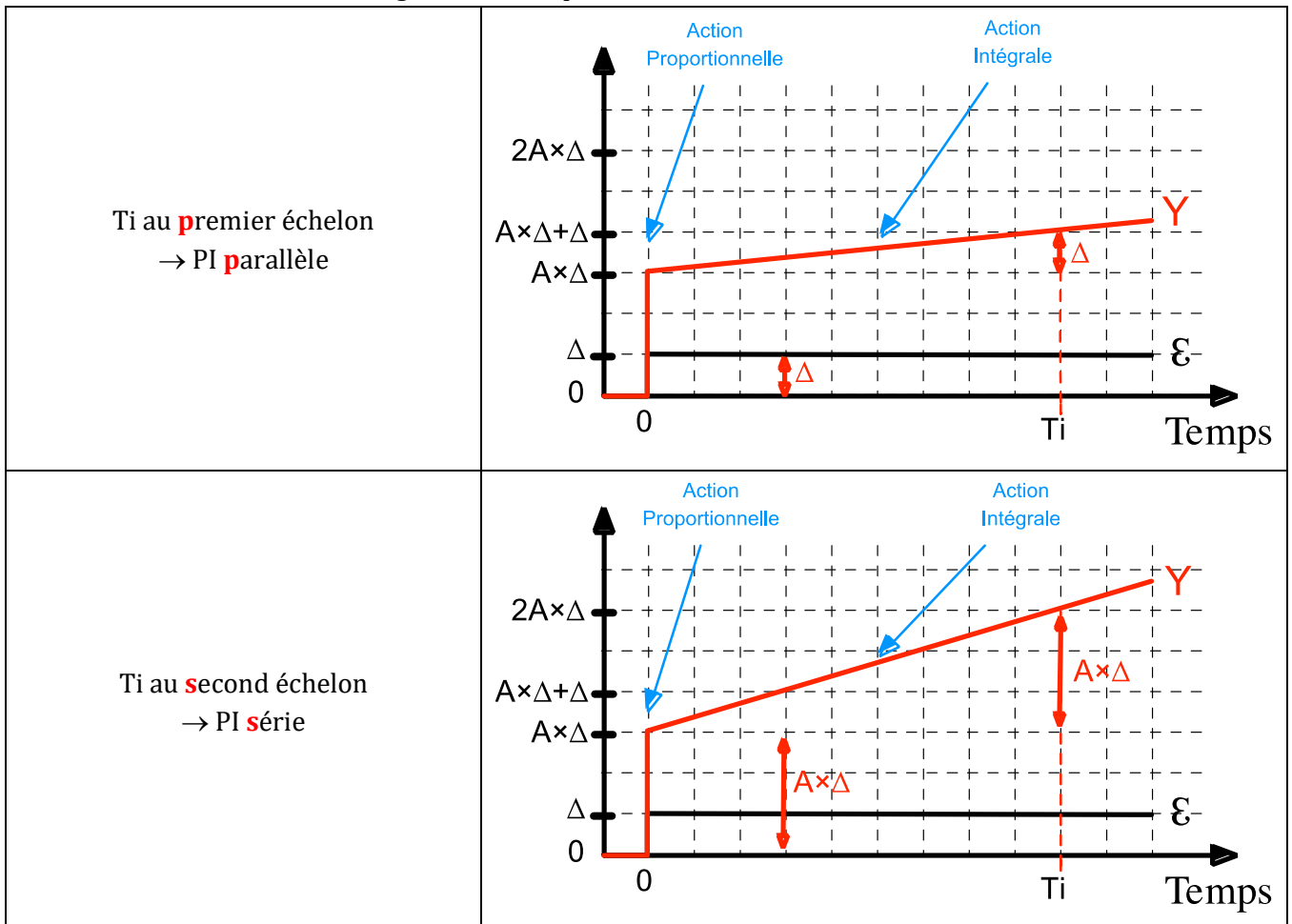
En général, le régulateur ne fonctionne pas en action intégrale pure (trop instable). Il fonctionne en correcteur Proportionnel Intégral (PI). Le couple, Bande Proportionnelle - Temps Intégral, définit deux types de fonctionnement qui sont représentés dans le tableau suivant.

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

**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  $\Delta$  d'erreur  $\epsilon$ .



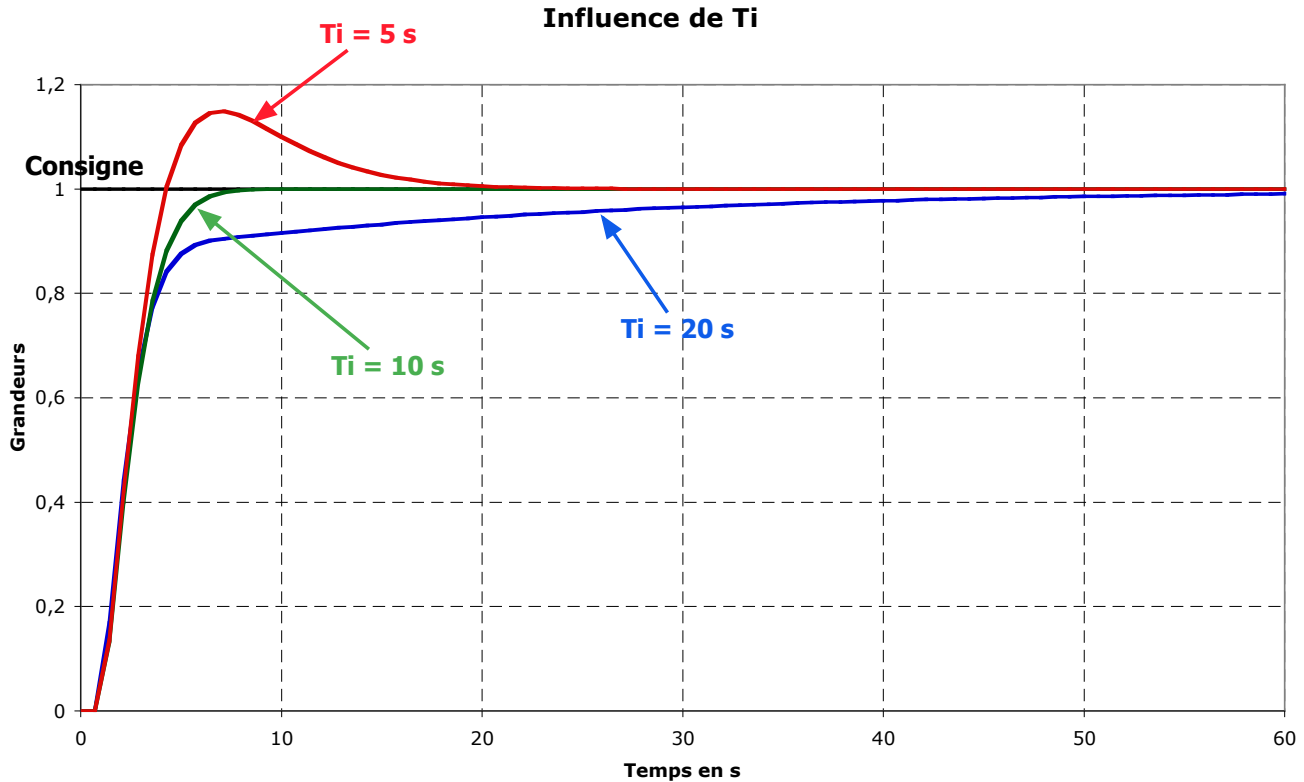
## 7.6. Influence du paramètre temps intégral

### 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 ?

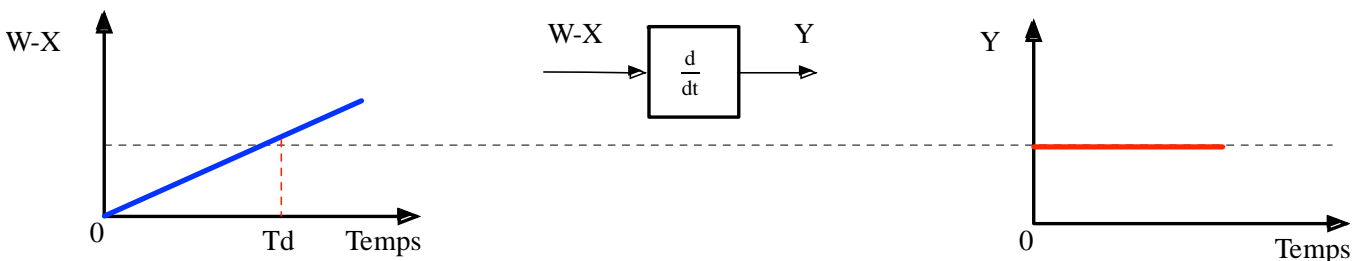
C'est une action qui amplifie les variations brusques de la consigne. Elle a une action opposée à l'action intégrale. Cette fonction est remplie par l'opérateur mathématique : 'dériver par rapport au temps'.

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

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 pure (trop instable). Il fonctionne en correcteur Proportionnel Dérivé (PD). Le doublet, Bande Proportionnelle - Temps dérivé, définit deux structures qui sont représentés sur les figures suivantes.

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

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.

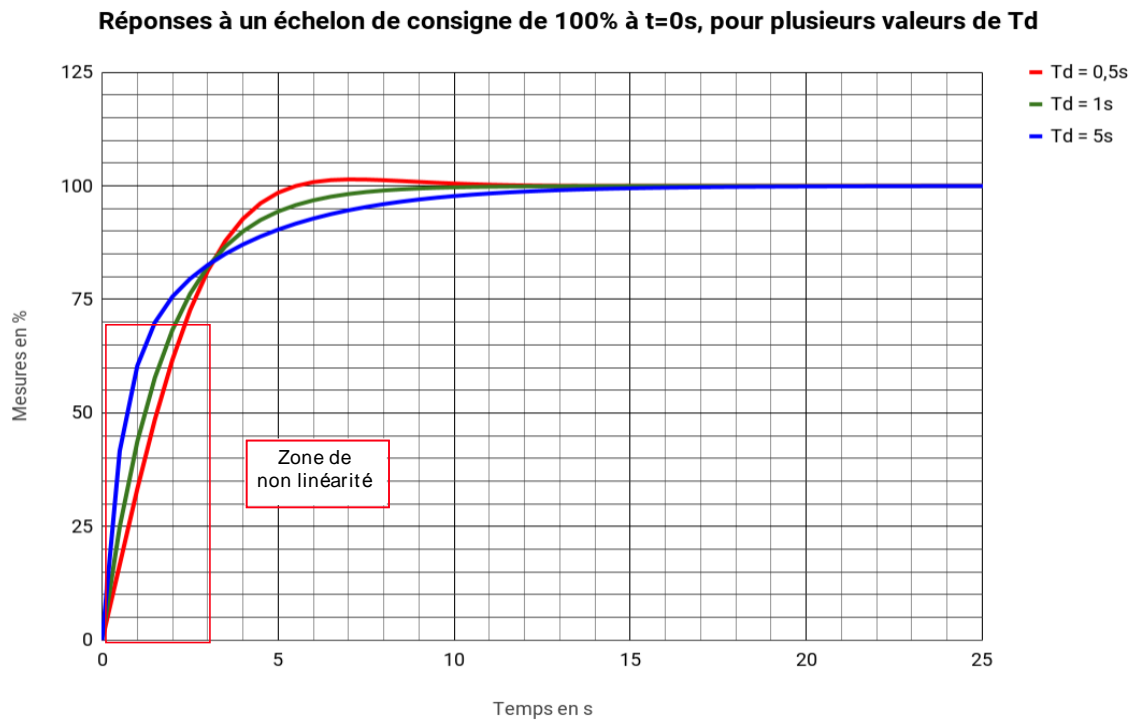
## 8.4. Influence du paramètre temps dérivé en boucle fermée

### 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.



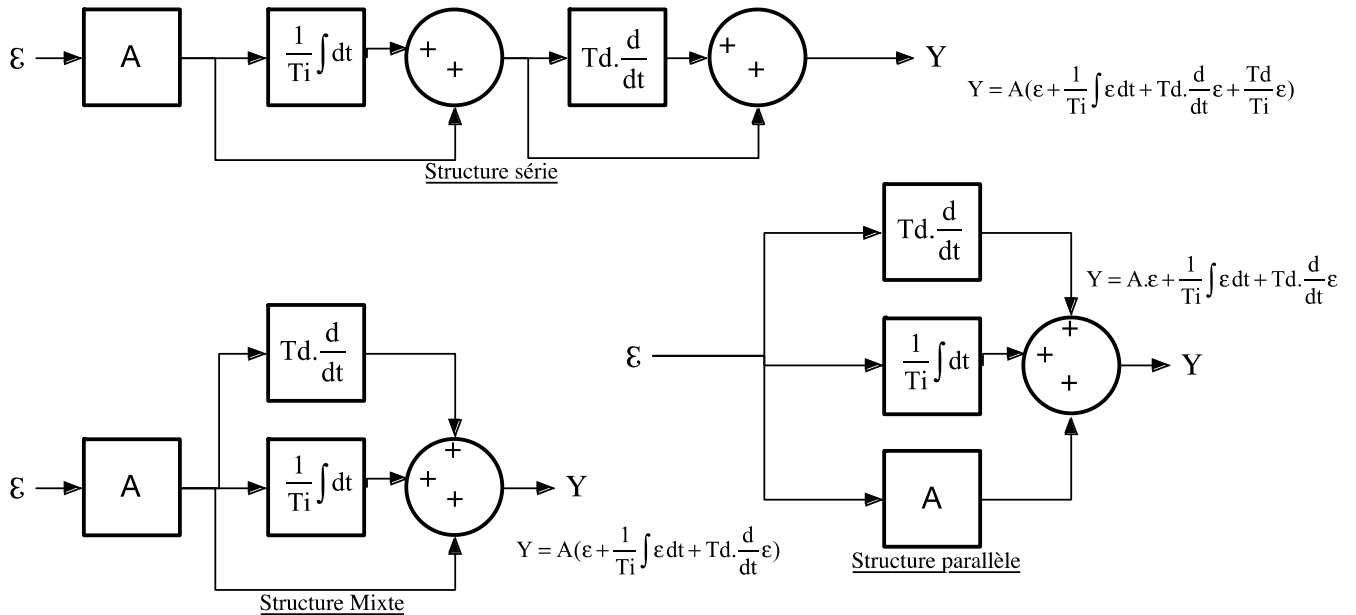
#### Remarque :

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 dépasse pas 100%).

## 9. Correcteur PID

### 9.1. Structures des correcteurs PID

Les trois corrections, proportionnelle, intégrale et dérivée, permettent de définir trois structures de régulateur différentes.

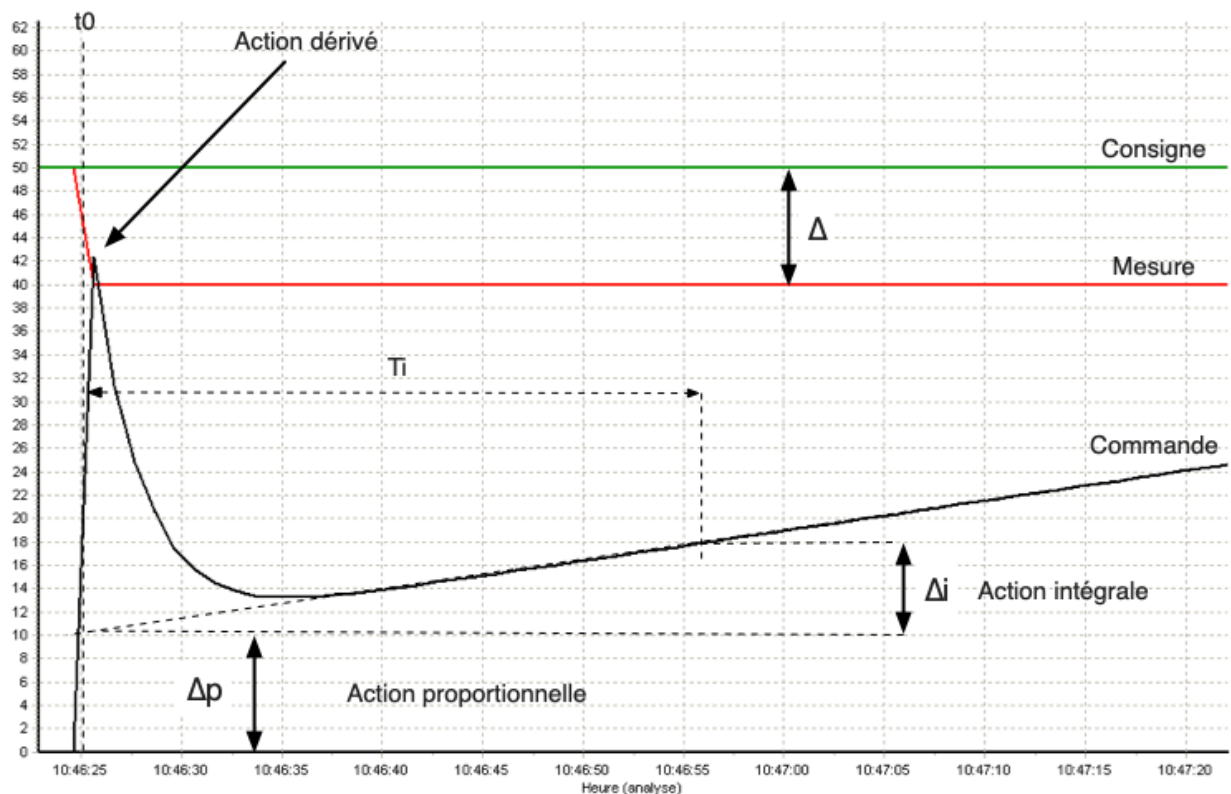


**Remarque :** Les régulateurs électroniques (tous ceux de la salle de travaux pratiques) ont une structure mixte.

### 9.2. Réponse indicielle

On observe la commande d'un régulateur en réponse à un échelon  $\Delta$  d'erreur. La réponse  $Y$  est alors composée de trois parties distincts :

- 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  $\Delta$ ,  $\Delta_p$  et  $\Delta_i$ , permettant de déterminer la structure du régulateur. Le tableau suivant permet de connaître la valeur de ces deux  $\Delta$  en fonction de la structure du régulateur.

Structure	$\Delta_p$	$\Delta_i$
Mixte	$A \times \Delta$	$A \times \Delta$
Série	$A(1+T_d/T_i) \times \Delta$	$A \times \Delta$
Parallèle	$A \times \Delta$	$\Delta$

### 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  $\Delta$  de 25% et on relève  $\Delta_p$  et  $\Delta_i$  à l'aide de constructions graphique.

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

Structure	$\Delta_p$ en %	$\Delta_i$ 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×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

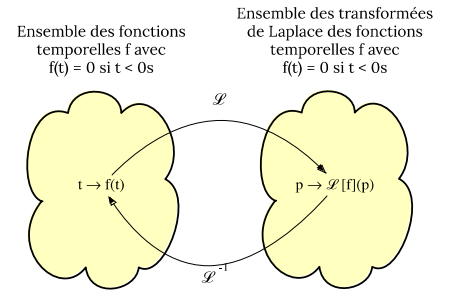
En régulation, partant du fait qu'au 'début' toutes les grandeurs physiques sont à 0 (ou presque), on utilise la transformée de Laplace.

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

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

**Unicité :**

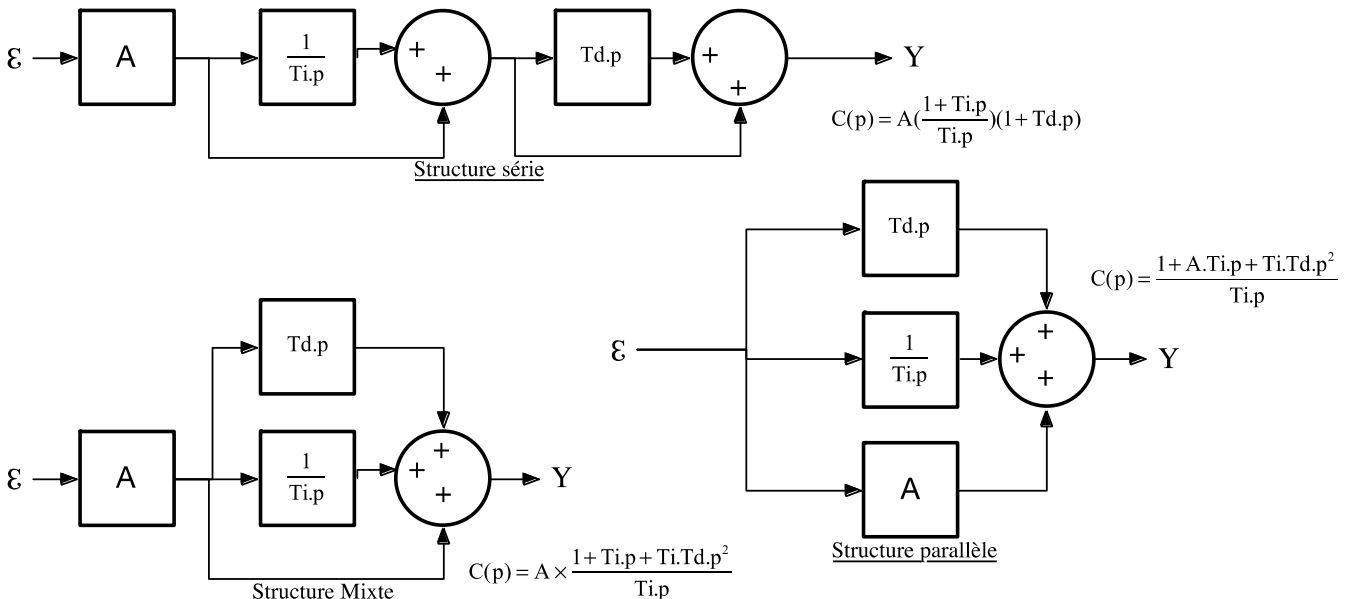
À f(t) correspond une et une seule fonction F(p) et inversement ;




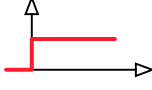
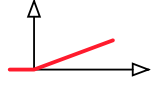
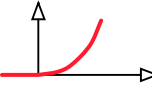
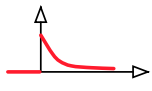
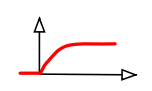
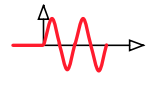
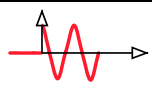
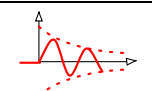
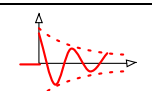
$f() : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} ; g() : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} ; a \in \mathbb{R}$	
$\mathcal{L}[f() + g()] = \mathcal{L}[f()] + \mathcal{L}[g()]$	$\mathcal{L}[a \times f()] = a \times \mathcal{L}[f()]$
$\mathcal{L}[f'()] = p \times \mathcal{L}[f()] - f(0)$	$\mathcal{L}\left[\int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

## 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

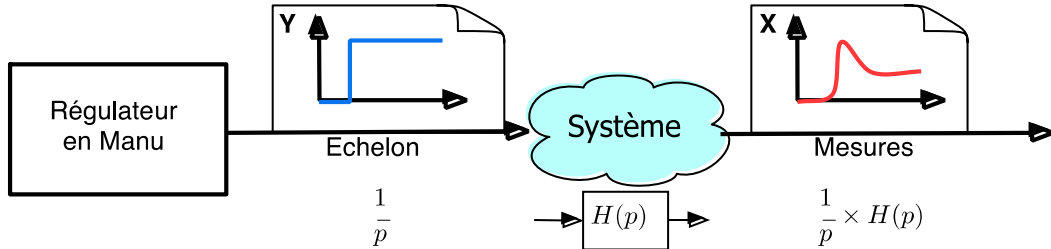
Fonction	Allure	$f() : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$ $a \in \mathbb{R}, n \in \mathbb{N}$	$\mathcal{L}[f()]$ $\mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$
Dirac		$t \rightarrow \delta(t)$	$p \rightarrow 1$
Échelon		$t \rightarrow 1$	$p \rightarrow \frac{1}{p}$
Rampe		$t \rightarrow t$	$p \rightarrow \frac{1}{p^2}$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



# 11. Identification et Réglages

## 11.1. Mise en œuvre

Autour du point du fonctionnement, on relève la réponse du système, à un petit échelon du signal de sortie Y du régulateur. Attention à ne pas saturer la mesure X.



## 11.2. Procédé stable

Allure des signaux	Modèle de Laplace
	$H(p) = \frac{K.e^{-T p}}{1 + \tau p}$ <p>À partir des constructions, on calcule :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Le gain statique : <math>K = \Delta X / \Delta Y</math> ;</li> <li>➤ Le retard : <math>T = t_1 - t_0</math> ;</li> <li>➤ La constante de temps : <math>\tau = t_2 - t_1</math>.</li> </ul>

Ou avec une autre méthode, dite méthode de Broïda (on privilégie cette méthode si T est proche de 0) :

Allure des signaux	Modèle de Laplace
	$H(p) = \frac{K.e^{-T p}}{1 + \tau p}$ <p>À partir des constructions, on calcule :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Le gain statique : <math>K = \Delta X / \Delta Y</math> ;</li> <li>➤ Le retard : <math>T = 2,8(t_1 - t_0) - 1,8(t_2 - t_0)</math>. <b>Attention !!</b> T doit être positif ;</li> <li>➤ La constante de temps : <math>\tau = 5,5(t_2 - t_1)</math>.</li> </ul>

## 11.3. Procédé instable

Allure des signaux	Modèle de Laplace
	$H(p) = \frac{e^{-T p}}{\tau p}$ <p>À partir des constructions, on calcule :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Le retard : <math>T = t_1 - t_0</math> ;</li> <li>➤ Le temps d'intégration <math>\tau = t_2 - t_1</math> ;</li> </ul>

## 11.4. Réglages avec modèle

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

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 rapport  $T/\tau$  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
$A = \frac{100}{Xp}$	$\frac{0,8}{K.k_r}$			$\frac{0,83}{K.k_r}$	$\frac{0,83}{K} \times (0,4 + \frac{1}{k_r})$	
$T_i$	$\infty$	$\tau$	$1,25K.T$	$\tau$	$\frac{K.T}{0,75}$	$\tau + 0,4T$
$T_d$				$0,4T'$	$\frac{0,35\tau}{K}$	$\frac{T}{k_r + 2,5}$

### Modèle instable

	P	PI série	PI //	PID série	PID //	PID mixte
$A = \frac{100}{Xp}$	$\frac{0,8}{k_r}$			$\frac{0,85}{k_r}$	$\frac{0,9}{k_r}$	
$T_i$	$\infty$	$5T$	$\frac{k_r.T}{0,15}$	$4,8T'$	$\frac{k_r.T}{0,15}$	$5,2T'$
$T_d$	0			$0,4T'$	$\frac{0,35}{k_r}$	$0,4T'$

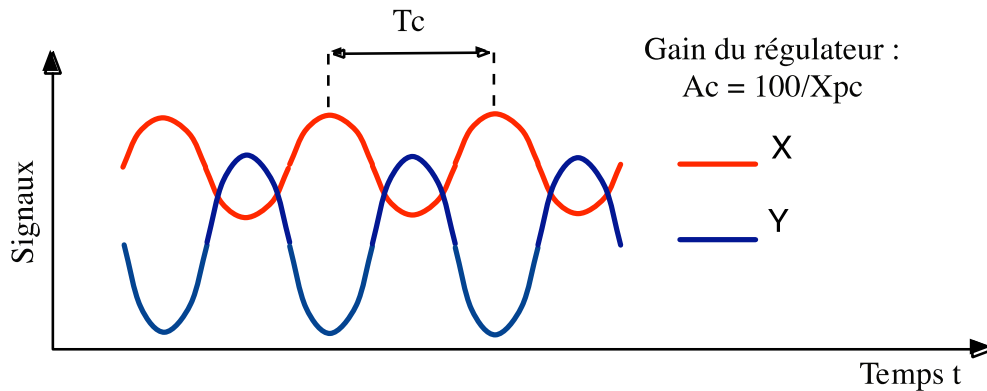
**Note :** On rappelle que le correcteur PI série est un correcteur PID mixte avec  $T_d = 0$ .

## 11.5. Réglage en chaîne fermée

### 11.5.1. 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. Elle ne nous donne pas à proprement parlé 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, le signal de mesure  $X$  et la sortie du régulateur  $Y$  sont périodiques, sans saturation.



On relève alors la valeur du gain critique  $A_c$  réglé, ainsi que la période des oscillations  $T_c$ .

Les valeurs de  $T_c$  et de  $A_c$  permettent de calculer les actions PID du régulateur à l'aide du tableau fourni ci-après.

	P	PI série	PID mixte
$A = \frac{100}{X_p}$	$\frac{A_c}{2}$	$\frac{A_c}{2, 2}$	$\frac{A_c}{1, 7}$
$T_i$	$\infty$	$\frac{T_c}{1, 2}$	$\frac{T_c}{2}$
$T_d$	0	0	$\frac{T_c}{8}$

#### Remarques :

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

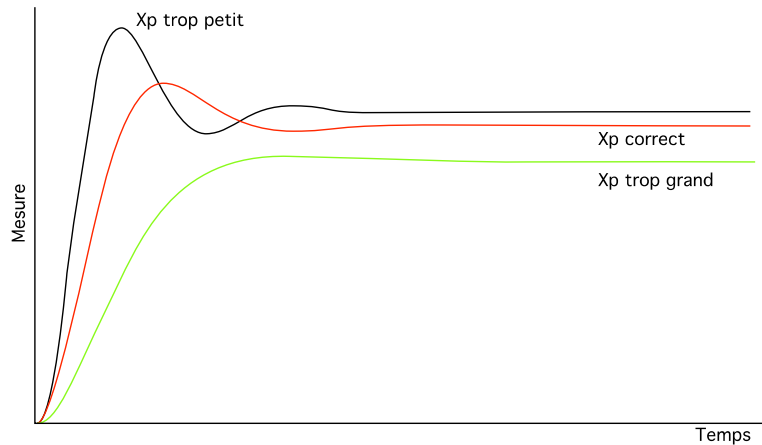
Le principal intérêt de cette méthode est sa grande simplicité: il n'est pas nécessaire de déterminer la fonction de transfert  $H(p)$  du système pour en réaliser la correction.

### 11.5.2. Méthode du Régleur

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

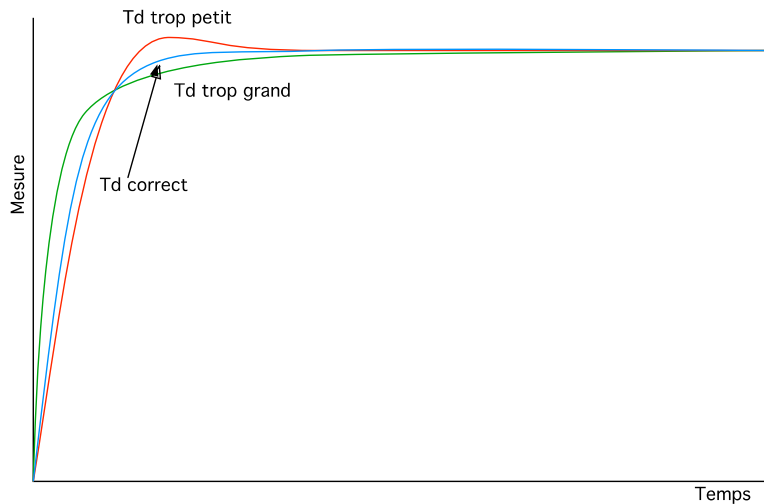
- 1. En régulation proportionnelle, on cherche la bande proportionnelle correcte en observant la réponse du système à un échelon de consigne :

$X_p$  varie  
 $T_d = 0$   
 $T_i = \infty$



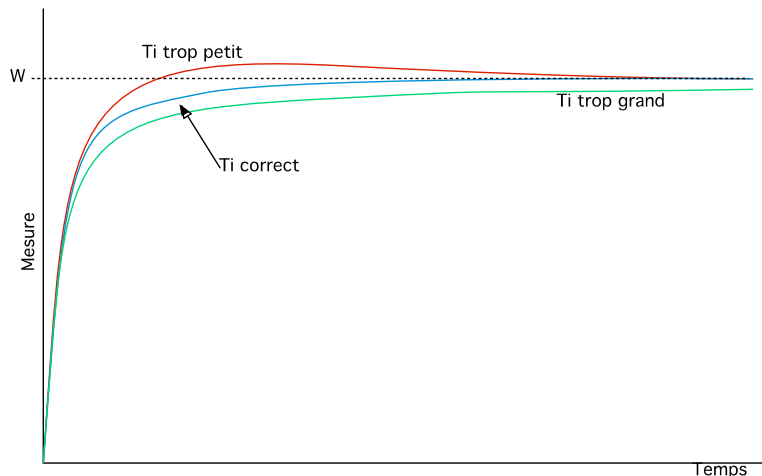
- 2. En régulation proportionnelle dérivée, on cherche le temps dérivé correct en observant la réponse du système à un échelon de consigne :

$X_p$  fixé  
 $T_d$  varie  
 $T_i = \infty$



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

$X_p$  fixé  
 $T_d$  fixé  
 $T_i$  varie

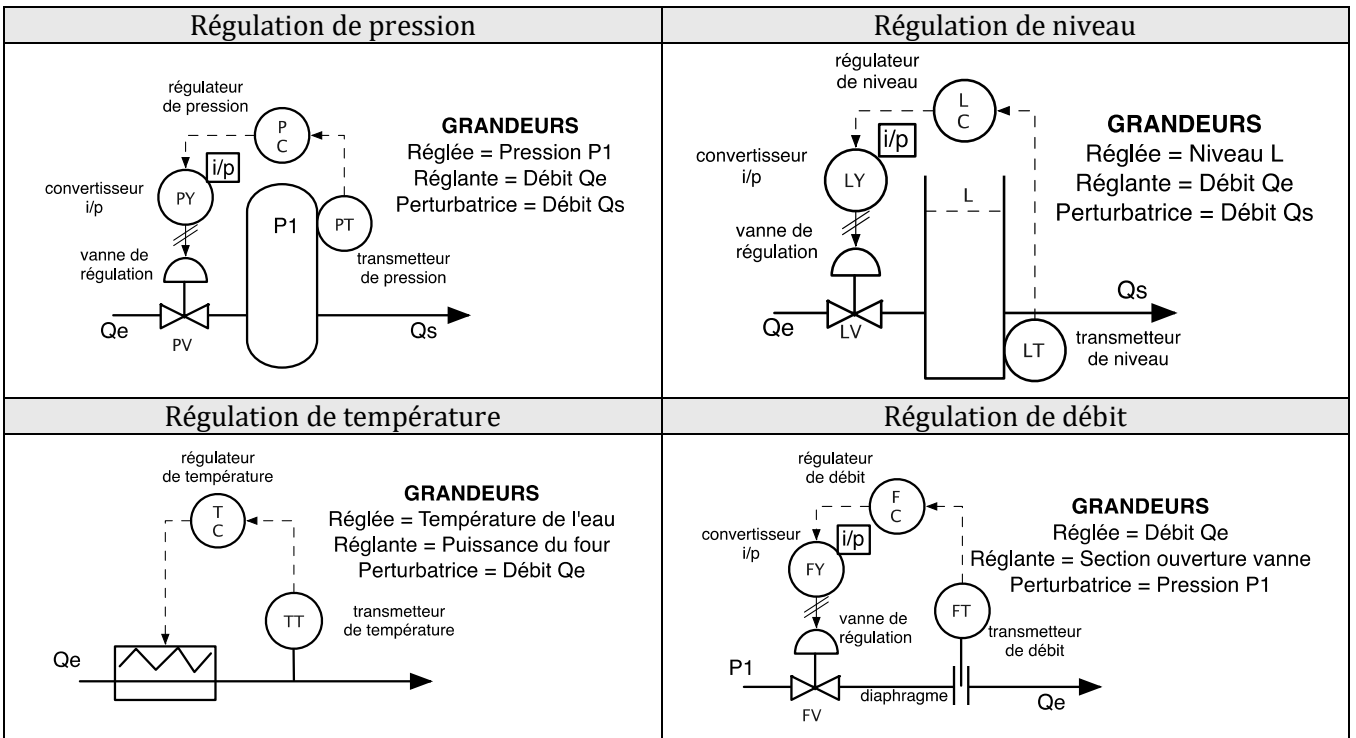


**Remarques :**

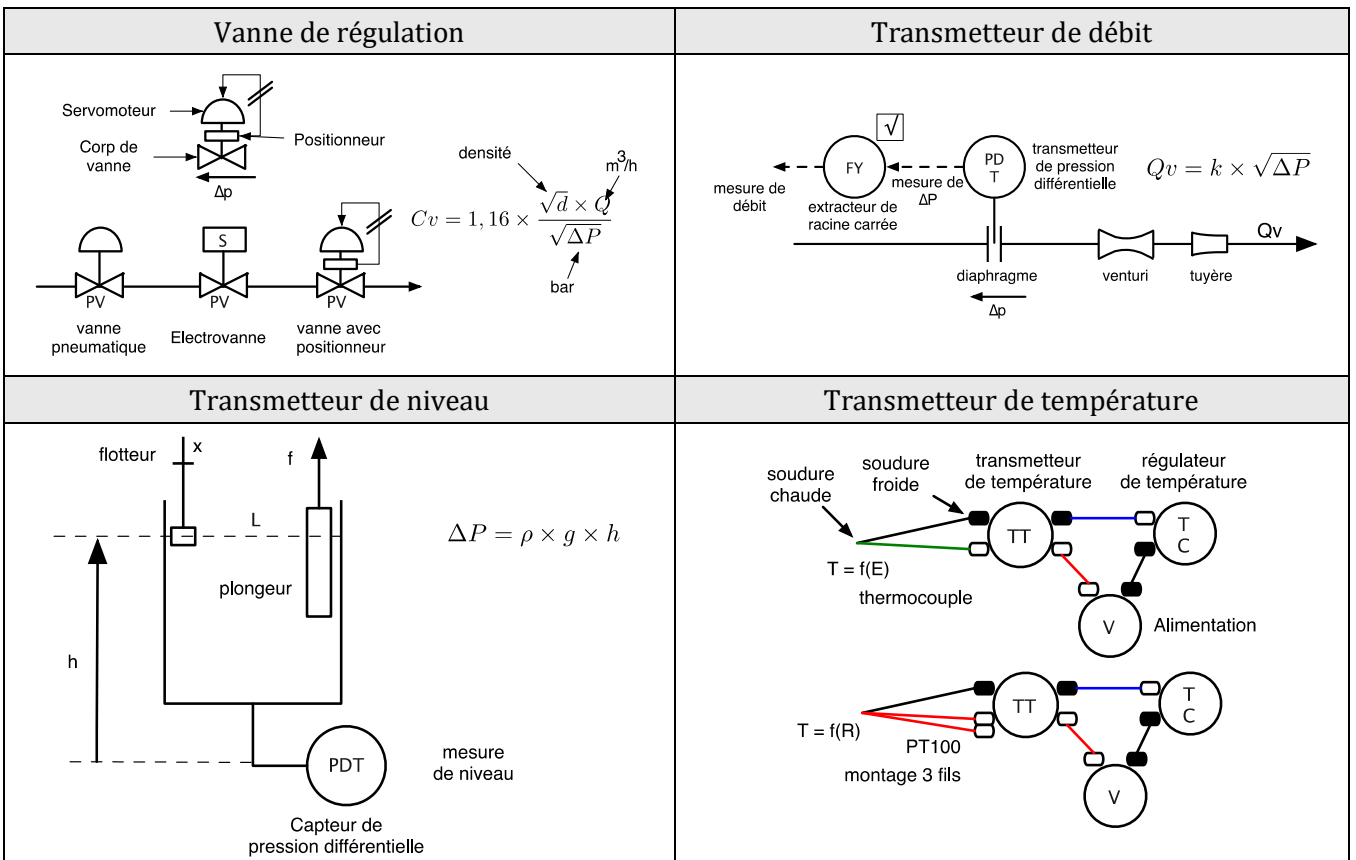
- Si  $T_d$  amène des instabilités pour de petites valeurs, on préférera prendre  $T_d = 0$  ;
- L'ordre  $P \gg D \gg I$  permet un réglage plus fin de l'action D que l'ordre  $P \gg I \gg D$ .

## 12. Se souvenir

### 12.1. Les schémas TI de base



### 12.2. L'instrumentation de base



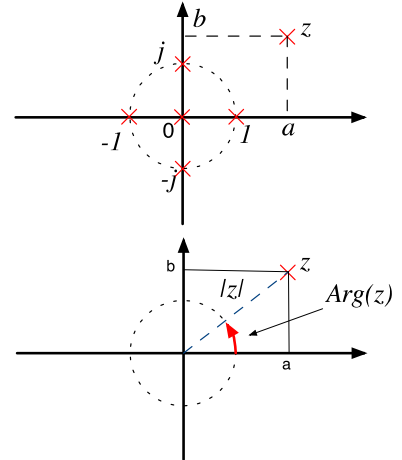
## 12.3. Les nombres complexes

### 12.3.1. 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 nombre réels.

### 12.3.2. 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.



### 12.3.3. 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 :

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

### 12.3.4. Propriétés

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

$$\text{Arg}(a) = 0 ; \text{Arg}(ja) = \frac{\pi}{2} ; \text{Arg}(e^{ja}) = a ; \text{Arg}(zz') = \text{Arg}(z) + \text{Arg}(z') ; \text{Arg}\left(\frac{1}{z}\right) = -\text{Arg}(z) ;$$

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

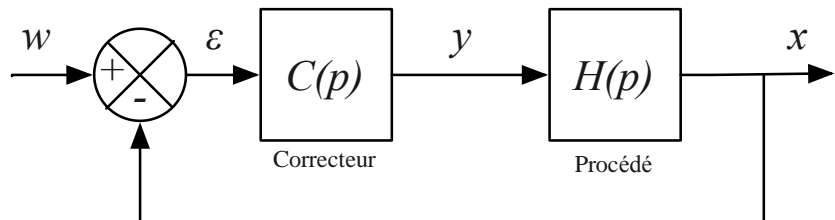
## 12.4. De la boucle ouverte à la boucle fermée

### 12.4.1. 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  $\varepsilon$  ;
- La fonction de transfert du correcteur du régulateur  $C$  ;
- La fonction de transfert du procédé  $H$ .

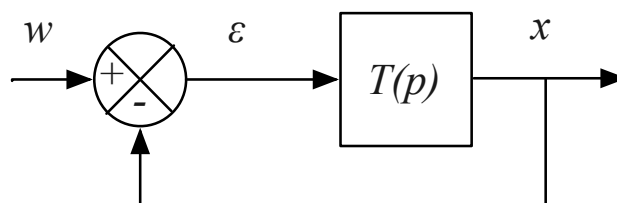


### 12.4.2. Calcul de T(p)

$T(p)$  est la fonction de transfert en boucle ouverte :  $T(p) = \frac{x(p)}{\varepsilon(p)}$ .

$$x(p) = H(p) \times y(p) \text{ et } y(p) = C(p) \times \varepsilon(p) \Rightarrow x(p) = C(p) \times H(p) \Rightarrow T(p) = C(p) \times H(p).$$

Le schéma équivalent devient :



### 12.4.3. Calcul de F(p)

F(p) est la fonction de transfert en boucle fermée :  $F(p) = \frac{x(p)}{w(p)}$ .

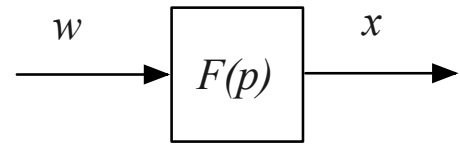
$$x(p) = T(p) \times \varepsilon(p) \text{ et } \varepsilon(p) = w(p) - x(p)$$

$$x(p) = T(p) \times (w(p) - x(p))$$

$$x(p) + T(p) \times x(p) = T(p) \times w(p)$$

$$x(p) \times (1 + T(p)) = T(p) \times w(p)$$

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



### 12.4.4. Calcul de ε(p)

$$\varepsilon(p) = w(p) - x(p)$$

$$\varepsilon(p) = w(p) - T(p) \times \varepsilon(p)$$

$$\varepsilon(p) + T(p) \times \varepsilon(p) = w(p)$$

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

### 12.4.5. Formules à connaître

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

### 12.4.6. Rappel des objectifs de la régulation

Dans une régulation, on veut que la mesure x soit égale à 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 :  $T(p) = +\infty$ .

