
Notions de régulation et d'asservissement

1. Régulation ou asservissement d'un système industriel

1.1. Avant propos

L'objectif d'une **régulation** ou d'un **asservissement** est d'assurer le fonctionnement d'un **système** selon des critères prédéfinis par un **cahier des charges**.

Le cahier des charges définit des critères **qualitatifs** à imposer qui sont traduits le plus souvent par des critères quantitatifs, comme par exemple, de **stabilité**, de **précision**, de **rapidité**.

Voici quelques exemples d'objectifs qualitatifs :

- obtenir une combustion air - gaz correcte dans un brûleur
- maintenir une qualité constante d'un mélange de produits
- obtenir un débit de fluide constant dans une conduite en fonction des besoins
- faire évoluer une température d'un four selon un profil déterminé
- ...

Remarque : Les aspects de sécurité du personnel et des installations doivent être pris en compte ainsi que ceux concernant l'énergie et le respect de l'environnement.

L'évolution du système dépend d'une ou plusieurs grandeurs **incidentes**. Le système est caractérisé à l'aide d'une ou plusieurs grandeurs physiques **à maîtriser** qui vont permettre de contrôler l'objectif fixé (*figure 1*).

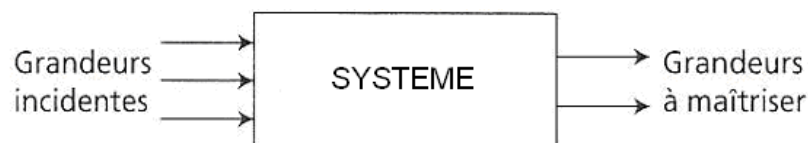


Figure 1 : Système

Exemple 1 : Aérotherme

Exemple 2 : Mélangeur de lait et de chocolat

1.2. Chaîne de régulation

Afin d'obtenir le fonctionnement désiré, la régulation doit agir en continu sur le système.

Pour cela, il faut observer une grandeur (**observation**), comparer cette grandeur à celle désirée et déterminer l'action à entreprendre (**réflexion**) puis agir sur une ou plusieurs grandeurs incidentes du système (**action**).

On obtient alors une **chaîne** de régulation (figure 2).

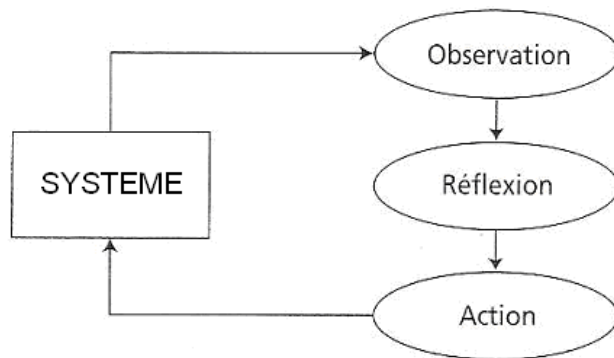
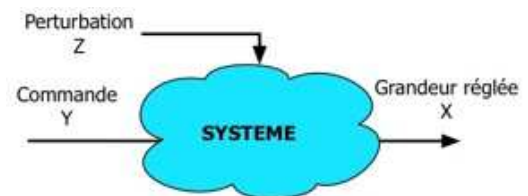


Figure 2 : Chaîne de régulation

a) Chaîne ouverte de régulation



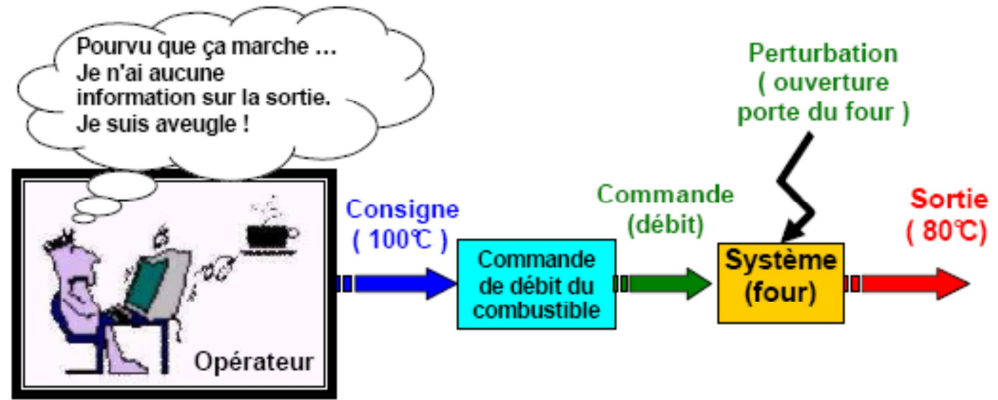
- L'observation n'est pas celle de la grandeur **à maîtriser** (à régler) mais celle d'une grandeur incidente.
- La réflexion est l'étape où la commande prend en compte une relation préétablie entre la grandeur incidente **observée** et la grandeur incidente sur laquelle on agit, appelée grandeur **incidente réglante**.
- L'action modifie alors la grandeur à maîtriser.

• Exemple de chaîne ouverte de régulation

Prenons l'exemple du réglage de la température d'un four en agissant sur le débit du combustible assurant la production de chaleur (figure 3) :

- Observation : **débit du combustible** (grandeur incidente) mais pas la **température du four** (grandeur à maîtriser)
- Réflexion : prise en compte du débit du combustible, grandeur incidente sur laquelle on agit (grandeur incidente réglante).
- Action : modification de la température du four (grandeur à maîtriser)

Figure 3 : Four
régulé en chaîne
ouverte



Remarque :

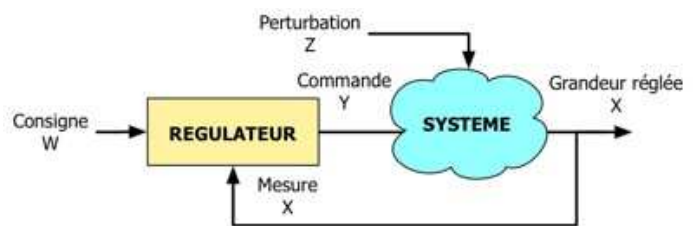
En admettant que la sortie soit conforme à la valeur souhaitée (*consigne*), une *perturbation* (exemple : *ouverture de la porte du four*) peut à un moment donné affecter la sortie (*grandeur à maîtriser*). N'ayant aucune information sur cette sortie, l'opérateur ne peut élaborer de stratégie d'ajustement pour obtenir la sortie désirée (*température du four*). L'opérateur "aveugle" ne pourra corriger cette situation.

Exemple 3 : Aérotherme (suite)

- Utilisation de la chaîne ouverte de régulation

La chaîne ouverte est tout de même utilisée pour des systèmes industriels n'ayant qu'*une seule* grandeur incidente ou dans des cas *simples* de systèmes nécessitant une moindre exigence sur la sortie.

b) Chaîne fermée de régulation



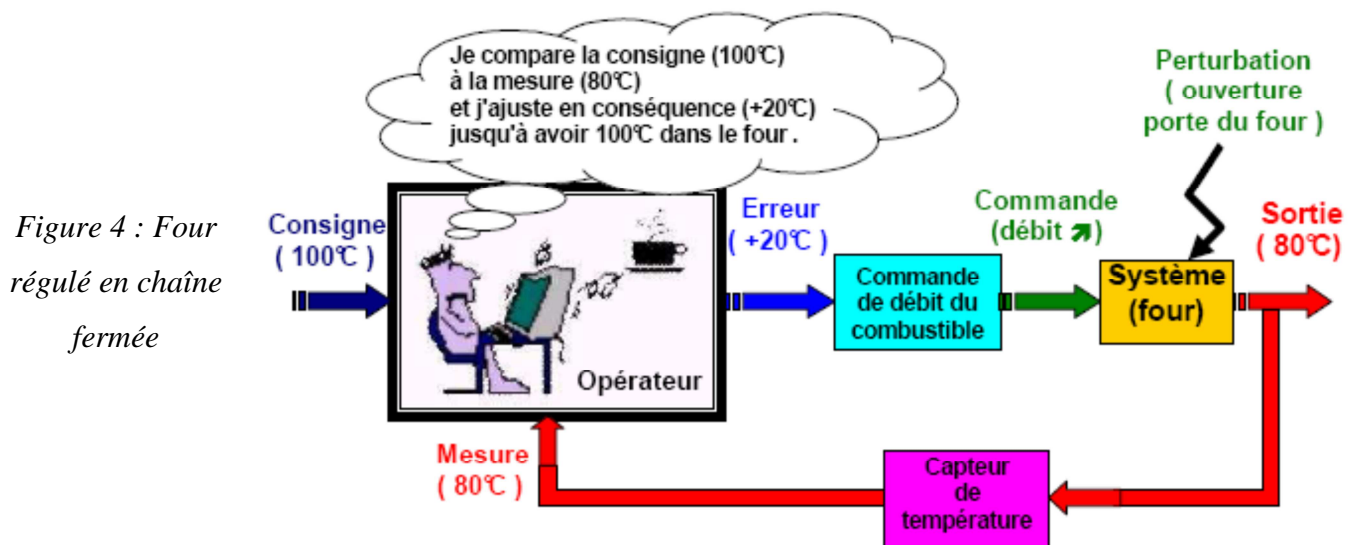
- L'observation se porte sur la grandeur *à maîtriser* (à régler).
- L'étape de réflexion détermine l'*écart* entre la grandeur *observée* et la grandeur *souhaitée* (*consigne*). En fonction de cet écart et des règles d'évolution, on en déduit l'action à entreprendre.
- L'action modifie la grandeur *incidente réglante* et donc la grandeur à maîtriser.

L'avantage d'une chaîne fermée est qu'une variation de la grandeur à maîtriser entraîne une variation de l'action. L'objectif fixé peut alors être atteint.

- Exemple de chaîne fermée de régulation

Reprenons l'exemple du réglage de la température d'un four (figure 4).

- Observation : **température du four** (grandeur à maîtriser)
- Réflexion : comparaison de la température **réelle** (mesure, grandeur observée) avec la température **désirée** (consigne, valeur souhaitée pour la grandeur à maîtriser) pour évaluer l'**écart** (erreur) afin d'ajuster en conséquence (commande, action à entreprendre)
- Action : modification de la température du four (grandeur à maîtriser)



Exemple 4 : Aérotherme (suite)

Les systèmes industriels ont souvent plusieurs grandeurs incidentes. Il est donc plus intéressant de concevoir des chaînes fermées de régulation puisqu'elles sont plus performantes que les chaînes ouvertes. C'est pourquoi, dans la suite de ce chapitre, seules les chaînes fermées de régulation seront étudiées.

1.3. Constitution d'une régulation

Pour réaliser la fonction d'observation, on implante sur le système un organe de mesure appelé **capteur**.

La fonction de réflexion comprenant le calcul de l'écart entre les grandeurs **mesurée** et **désirée**, ainsi que l'action à entreprendre est assurée par le **régulateur**.

L'**actionneur** installé sur le système permet d'agir sur la grandeur **incidente** choisie du système.

La chaîne fermée de régulation ainsi constituée se représente par un schéma appelé **schéma fonctionnel** (figure 5).

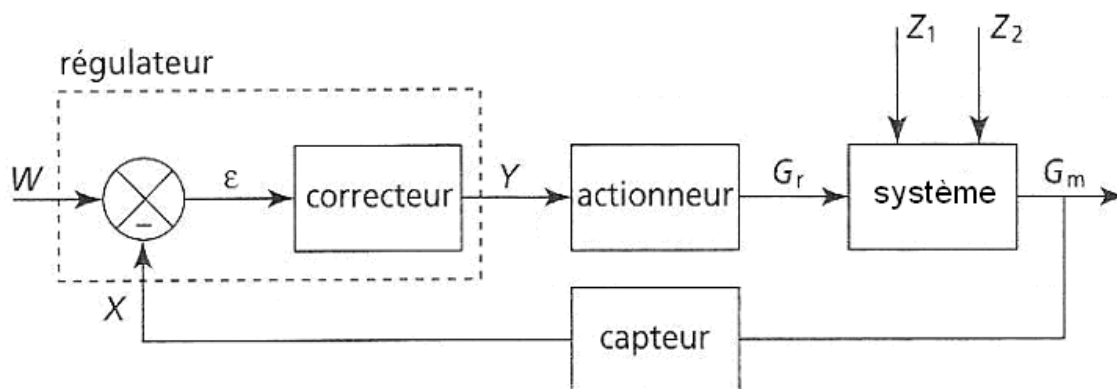


Figure 5 : Schéma fonctionnel - Constitution d'une chaîne fermée de régulation

Les éléments constitutifs d'une chaîne fermée de régulation (figure 5) peuvent être déclinés en **deux** catégories :

➤ Les éléments fonctionnels

Ils sont représentés par des rectangles.

- Le régulateur comprend le **soustracteur** (ou **comparateur**) et le **correcteur**.

Le soustracteur reçoit le signal de **mesure** et la **consigne** dont il effectue la **différence**. Le résultat de cette différence est appelé **écart** (ou **erreur**).

Le correcteur est chargé d'élaborer un signal de **commande** à partir de l'écart constaté afin d'obtenir les **performances** fixées par le cahier des charges (*stabilité, précision, rapidité*).

- L'actionneur est commandé par le signal de **commande** provenant du **régulateur**. C'est l'organe de puissance de la chaîne de régulation. Il agit sur la grandeur réglante du système pour modifier la grandeur physique à maîtriser.
- Le capteur élabore la mesure de la grandeur **à maîtriser** et la transmet au **régulateur**.

➤ Les grandeurs physiques d'informations

Elles sont représentées par des flèches.

- La consigne notée **W** : c'est la valeur **désirée** pour la grandeur à maîtriser.
- La mesure de la grandeur à maîtriser : **X**
- L'écart **ε** ou l'**erreur** entre la consigne et la mesure : **$\epsilon = W - X$**
- Le signal de commande **Y** ou l'ordre correcteur

- La grandeur réglante G_r est la grandeur **incidente** choisie pour ses caractéristiques de rapidité d'action, de souplesse d'utilisation et de son importance d'influence.
- La grandeur à maîtriser est notée G_m .
- Les grandeurs incidentes Z_1 et Z_2 non contrôlées sont les grandeurs perturbatrices appelées **perturbations**.

Remarque :

Le schéma fonctionnel d'une chaîne fermée de régulation contient (*figure 6*) :

- Une **chaîne d'action** ou chaîne directe. Cette chaîne comprend le correcteur, l'actionneur et le système. La chaîne d'action est une chaîne de puissance, elle permet de corriger les effets d'une perturbation sur le système.
- Une **chaîne de réaction**. Cette chaîne surveille en permanence l'état de la grandeur à maîtriser pour informer le régulateur des modifications à apporter sur la chaîne d'action. Elle se compose du capteur de mesure.

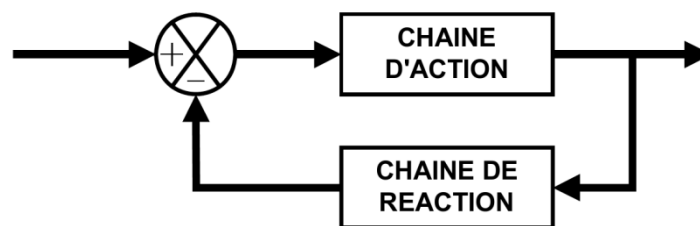


Figure 6 : Schéma fonctionnel simplifié d'une chaîne fermée de régulation

Exemple 5 : Mélangeur de lait et de chocolat (suite)

Exercice 1 : Mélangeur de lait et de chocolat

Exercice 2 : Aérotherme

1.4. Régulation et asservissement

Lorsqu'il y a un retour d'information de la grandeur à maîtriser sur le **régulateur**, on parlera en terme général, d'une **régulation** du système ou d'un **asservissement** du système.

a) Régulation

La consigne, traduisant l'objectif désiré du système industriel, est **constante** et les grandeurs perturbatrices influencent fortement la grandeur à maîtriser.

Exemples de régulation :

Régulation de température dans un local subissant les variations climatiques, régulation de niveau dans un réservoir dépendant de plusieurs débits d'alimentation et de soutirage, ...

b) Asservissement

La consigne, traduisant l'objectif désiré du système industriel, n'est pas **constante** et les grandeurs perturbatrices n'existent pas ou sont très peu influentes sur la grandeur à maîtriser.

Exemples d'asservissement :

Asservissement d'un profil de température en fonction du temps dans un four de traitement thermique, Asservissement de vitesse de la broche d'un tour à commande numérique, ...

Remarque :

En pratique, lorsqu'un changement de consigne est effectué, une régulation devient, de fait, un **asservissement**. Un asservissement maintenant une grandeur constante pendant une durée donnée peut subir une perturbation inopinée et devient alors une **régulation**. Dans beaucoup de cas, il y a à la fois régulation et asservissement. On parle alors parfois de **système asservi**, soit de **maintien** soit de **poursuite**.

2. Qualités attendues d'un système asservi

Pour définir les performances d'une régulation ou d'un asservissement, les critères **qualitatifs** du cahier des charges peuvent être traduits par des critères **quantitatifs**.

Les qualités exigées les plus rencontrées industriellement sont :

- la **stabilité**
- la **précision**
- la **rapidité**

2.1. Stabilité

La qualité essentielle pour un système régulé, et donc exigée à tout prix, est la **stabilité**.

En effet un système **instable** se caractérise soit par des **oscillations** d'amplitude de plus en plus importante de la grandeur observée (courbe 1 - *figure 7*), soit par une **croissance** irréversible négative ou positive de la grandeur observée (courbe 2 - *figure 7*).

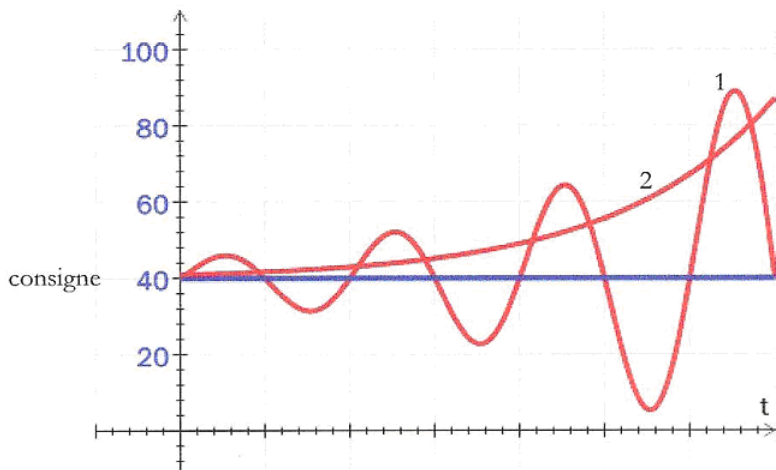


Figure 7 : Évolution de deux systèmes régulés instables

Dans les deux cas, l'objectif de la régulation n'est bien entendu pas atteint, mais surtout il y a risque de détérioration physique du système et donc d'insécurité.

⇒ Dans une approche simplifiée, un système est considéré comme **stable** si, pour une variation d'amplitude **finie** de la consigne ou d'une perturbation, la mesure de la grandeur à maîtriser se stabilise à une valeur **finie**.

Plus le régime **transitoire** d'un système soumis à une variation est **amorti** plus il est **stable** (figure 8). Le degré de stabilité est alors caractérisé par l'**amortissement** de ce régime transitoire (figure 9 et figure 10).

Figure 8 : Réponses transitoires d'un système naturellement stable régulé avec deux réglages différents de régulateurs. La réponse 1 est moins stable que la réponse 2.

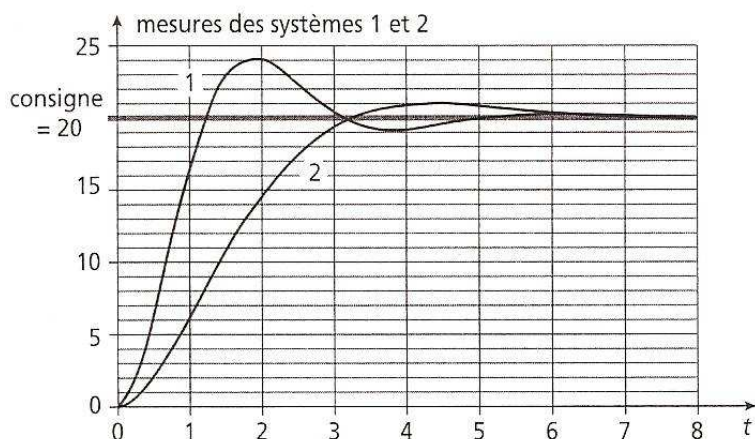
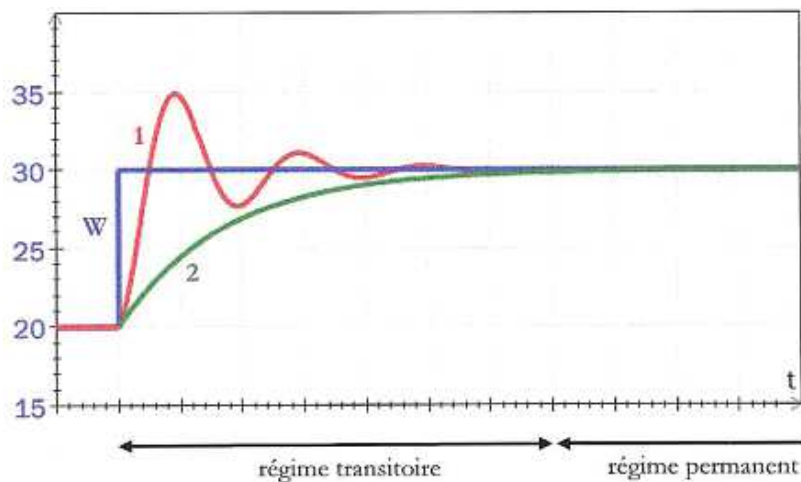


Figure 9 : Systèmes régulés stables avec amortissement acceptable. La courbe 2 est plus amortie que la courbe 1. Le système 2 est plus stable que le système 1.

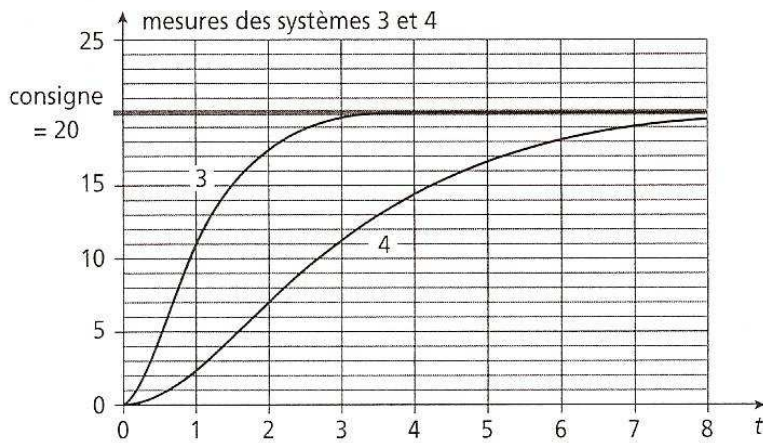


Figure 10 : Systèmes régulés stables très amortis. La courbe 4 est plus amortie que la courbe 3 : le système 4 est plus stable que le système 3. Ces systèmes sont plus stables que les systèmes 1 et 2 de la figure 8.

2.2. Précision

Il est naturel d'évaluer la **précision** d'un système régulé en comparant l'objectif **atteint** par rapport à celui **désiré**.

⇒ La précision d'un système régulé se mesure donc à l'**écart** entre la consigne et la mesure en régime **permanent**. On parle alors de précision **statique**. Plus l'écart est petit, plus le système est **précis**.

L'évaluation de la précision statique s'effectue en réalisant une variation rapide de consigne en amplitude et en mesurant la variation d'amplitude finalement obtenue de la mesure (figure 11).

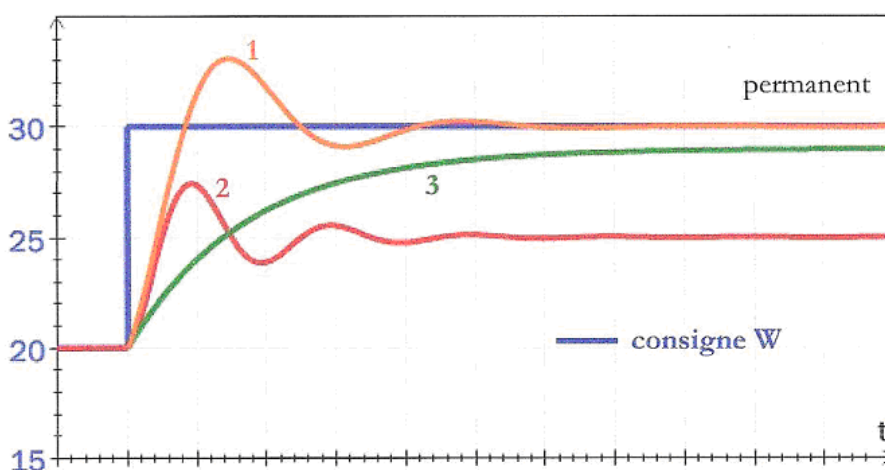


Figure 11 : Réponses obtenues pour un même système mais régulé avec trois réglages différents de régulateurs. La précision statique n'est pas la même selon les réglages du régulateur.

Pour la réponse 1, la précision statique est parfaite, l'écart est nul.

Pour les réponses 2 et 3, la précision n'est pas parfaite.

Exemple 6 : Précision statique

La précision statique est une qualité importante à respecter pour bien des systèmes asservis. Cependant, il ne faut pas oublier qu'un écart trop important entre la consigne et la mesure en régime *transitoire* peut s'avérer néfaste pour le système ou l'installation.

Exemple :

Dans l'industrie alimentaire, une température montée trop haut détruira les qualités gustatives d'une confiture et une pression instantanée trop élevée peut détruire un réservoir sous pression.

La précision *dynamique* est donc à prendre en compte. Elle s'évaluera par le *dépassement* maximal que peut prendre la *mesure* par rapport à la *consigne* (figure 12).

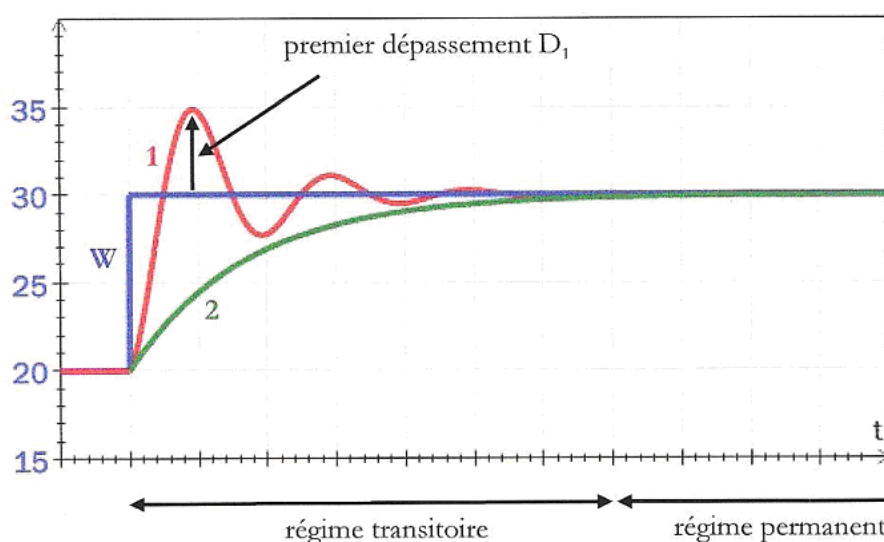


Figure 12 : Réponses transitoires d'un système naturellement stable régulé avec deux réglages différents de régulateurs. La réponse 1 montre un dépassement de la mesure par rapport à la consigne.

Exemple 7 : Précision dynamique

2.3. Rapidité

⇒ La rapidité d'un système régulé s'évalue par le temps que met la mesure à entrer dans une zone à $\pm 5\%$ de sa variation *finale* (soit entre 95 % et 105 %).
Ce temps s'appelle le temps de *réponse* à 5 % (figure 13).

Le système régulé est d'autant plus rapide que le temps de réponse à 5 % est *court* (figure 14).

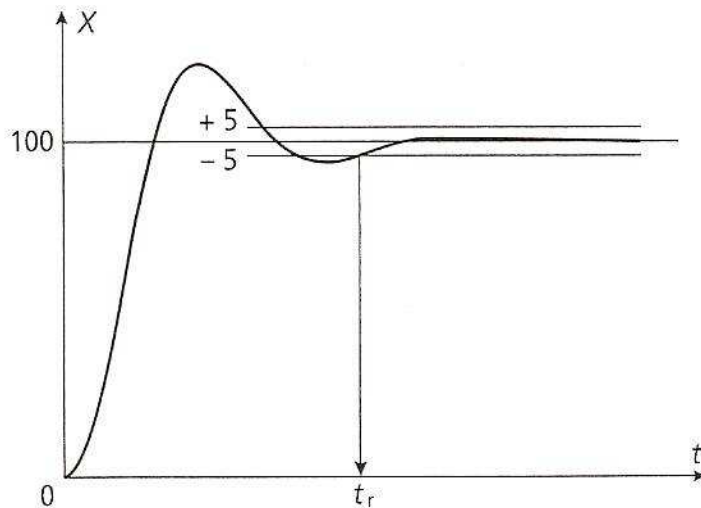


Figure 13 : Mesure du temps de réponse à 5 %

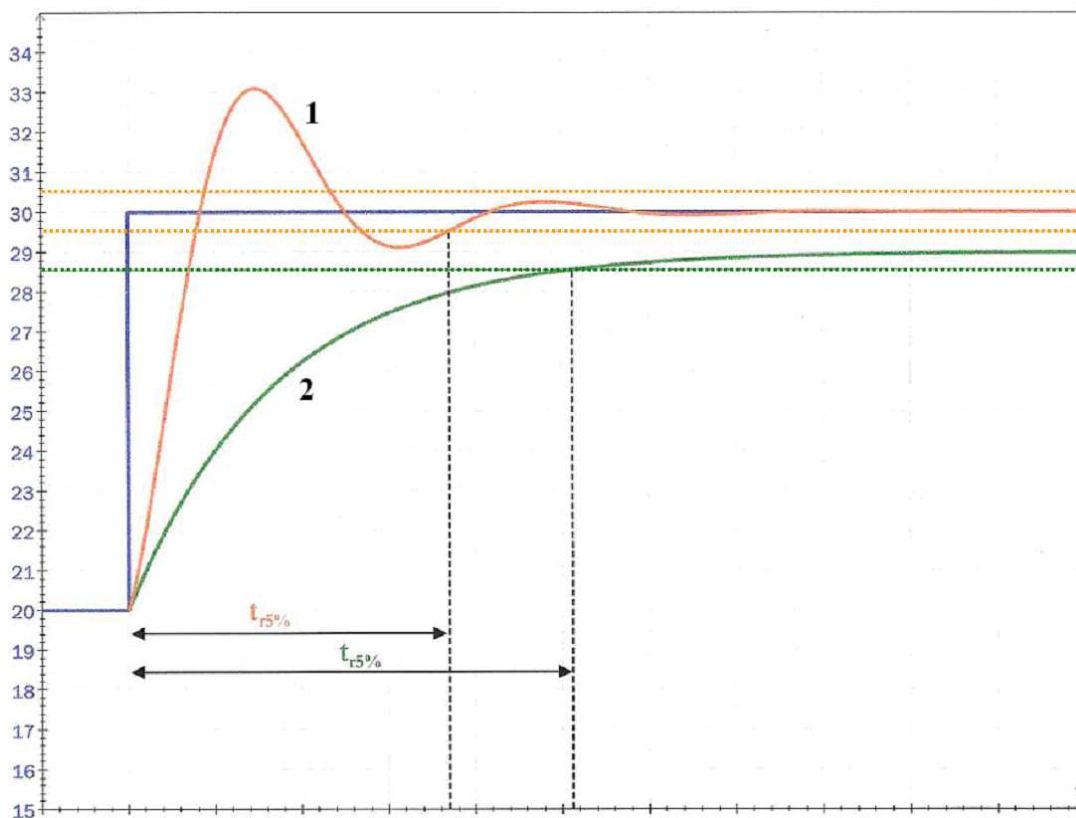


Figure 14 : Réponses obtenues pour un même système mais réglé avec deux réglages différents de régulateurs. La réponse 1 est plus rapide que la réponse 2.

Exemple 8 : Rapidité

2.4. Dilemme et compromis

Le cahier des charges d'une régulation comporte plusieurs objectifs qui sont parfois **contradictoires** comme, par exemple, la précision et la rapidité. En effet, il est souvent difficile voire impossible, d'obtenir une très bonne précision dynamique avec une très grande rapidité. Lors du réglage et du paramétrage d'une régulation ou d'un asservissement, toute l'habileté de l'automaticien sera alors de trouver le meilleur **compromis** entre les qualités attendues (stabilité, précision, rapidité).

⇒ Le réglage optimal d'une régulation ou d'un asservissement sera toujours le fruit d'une recherche "meilleur compromis" entre les performances attendues (stabilité, précision, rapidité).

3. Le régulateur industriel

3.1. Appellation "régulateur industriel"

Dans l'industrie, nombreux sont les appareils dont la fonction est d'assurer une **régulation**.

Certains **régulateurs** (*exemple* : Les régulateurs de tension dans les circuits électroniques ou les régulateurs de pression appelés aussi détendeurs) sont des composants destinés à des applications spécifiques et leurs fonctions de régulation sont définies par des relations entre l'**entrée** et la **sortie** dont les coefficients sont fixés **définitivement** par fabrication.

Par contre, un **régulateur industriel** est un appareil dont les paramètres sont **réglables** et **adaptables** au système à contrôler.

3.2. Constitution de l'appareil

Le régulateur industriel a pour rôle essentiel de **contrôler** le système, c'est-à-dire de garantir les comportements dynamique et statique du système conformes au **cahier des charges** défini.

Pour cela il faut distinguer deux aspects du régulateur industriel :

- ses fonctions de **services** :

L'utilisation pratique d'un tel appareil nécessite des fonctions spécifiques mises au service des techniciens ou des opérateurs.

- sa fonction **mathématique** :

La fonction mathématique est définie par l'**algorithme** du régulateur. C'est l'aspect, fondamental pour un automaticien.

a) Fonctions de service

Pour contrôler un système, le technicien ou l'opérateur agit sur le régulateur qui centralise

les informations essentielles. C'est pourquoi le régulateur, quelle que soit sa technologie, comporte au moins les fonctions suivantes (figure 15) :

- une **consigne** (W) réglable et visualisable
- un signal normalisé en **entrée** de mesure (X) et un signal normalisé en **sortie** de commande (Y) visualisables
- un **réglage** des paramètres de l'algorithme de calcul

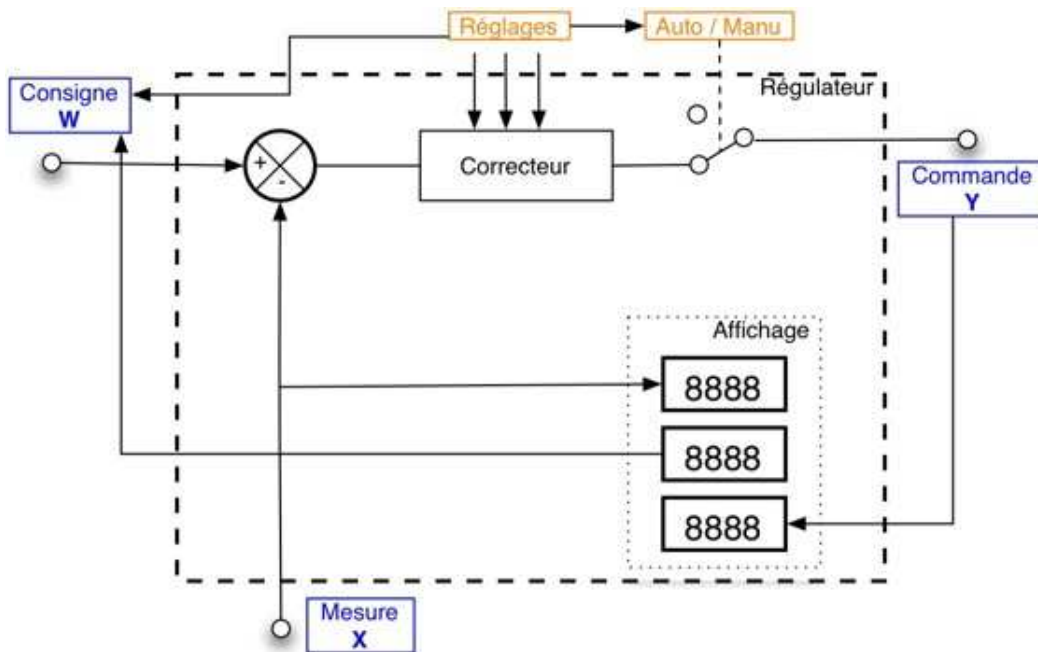


Figure 15 : Structure interne simplifiée d'un régulateur

Généralement, le régulateur dispose aussi :

- de traitements de la mesure comme par exemple un filtrage antibruit
- d'un sélecteur de commande automatique - manuelle
- des réglages d'alarme basse et d'alarme haute de la mesure ou de l'écart mesure - consigne
- des limiteurs des valeurs ou des vitesses de variation de la consigne et de la commande
- ...

Les systèmes industriels étant de plus en plus pointus et complexes, les besoins en surveillance automatique ont conduit à développer de nombreuses possibilités d'utilisation pratique des régulateurs. La liste exposée ci-dessus n'est qu'un court extrait des possibilités offertes par les fabricants.

b) Algorithme du régulateur

Dans les études des systèmes régulés c'est la loi ou la fonction mathématique reliant l'**entrée** et la **sortie** du régulateur qui est utile, c'est-à-dire la connaissance de sa **fonction de transfert**.

Un régulateur est composé d'un élément, qui effectue la **différence** entre la mesure et la consigne, appelé **comparateur** ou **soustracteur** et d'un **correcteur** (figure 16).

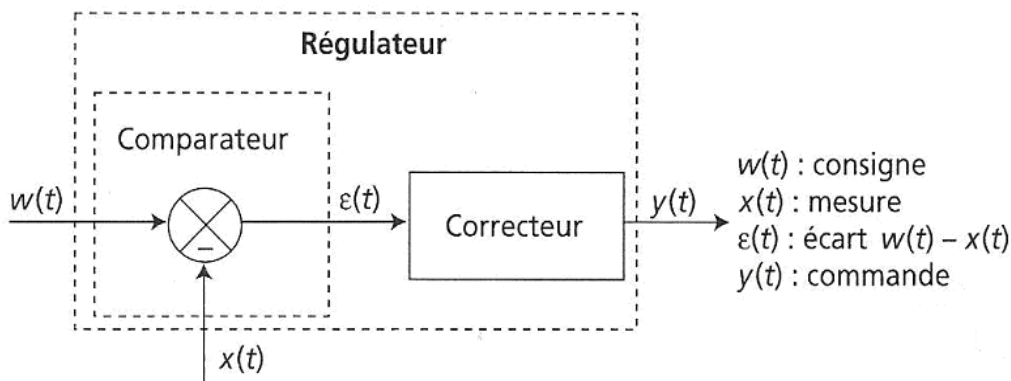


Figure 16 : Composition de la fonction du régulateur

Le correcteur élabore une valeur de sortie fonction de l'**écart** constaté par le comparateur afin de corriger l'évolution de la grandeur **à maîtriser** du système.

La loi qui permet l'élaboration du signal de commande dépend de la structure interne du correcteur, c'est-à-dire de sa **fonction de transfert**. L'algorithme ou loi de commande du correcteur le plus classique est l'association des trois actions élémentaires P , I et D (**Proportionnelle**, **Intégrale** et **Dérivée**) : c'est le régulateur PID.

c) Actions élémentaires

Action proportionnelle (P)

Equation temporelle : $Y(t) = G_r \varepsilon(t)$

G_r (on emploie aussi K et K_p) : **gain** ou **amplification**

Remarque :

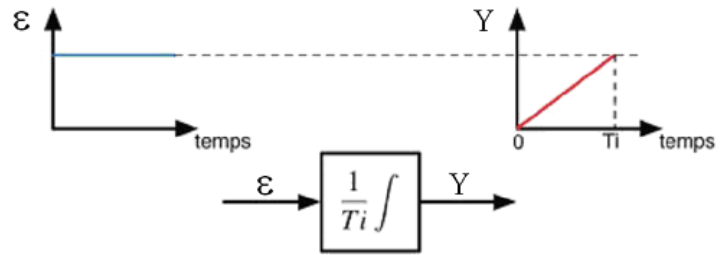
Dans un régulateur industriel, on n'affiche pas toujours le gain d'amplification, mais parfois la **bande proportionnelle** B_p :

$$B_p \% = \frac{1}{G_r} \cdot 100$$

Action intégrale (I)

Équation temporelle :

$$Y(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt = k_i \int_0^t \varepsilon(t) dt$$



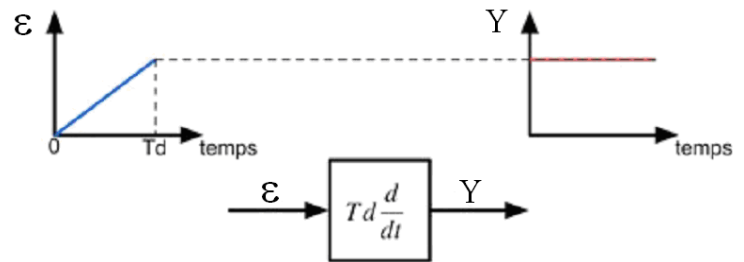
T_i : **constante de temps** d'action intégrale. Cette constante est exprimée en **minutes** ou en **secondes**.

k_i : **coefficient** d'action intégrale ou **taux** d'action intégrale. Inverse de T_i , k_i est exprimé en **min⁻¹** ou en **sec⁻¹**.

Action dérivée (D)

Équation temporelle :

$$Y(t) = T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$$



T_d : **constante de temps** d'action dérivée. Cette constante est exprimée en **minutes** ou en **secondes**.

d) Rôles des actions P, I et D sur les performances d'une régulation

| Quand augmente | Stabilité | Précision | Rapidité |
|---|------------------|------------------|-----------------|
| gain d'action proportionnel G_r | dégrade | améliore | améliore |
| coefficient d'action intégrale k_i | dégrade | améliore | dégrade |
| constante de temps d'action dérivée T_d | améliore | pas d'influence | améliore |

e) Différentes structures du régulateur PID

Les actions élémentaires d'un régulateur peuvent être associées de plusieurs façons : on parle de la **structure** d'algorithme du régulateur (figure 17).

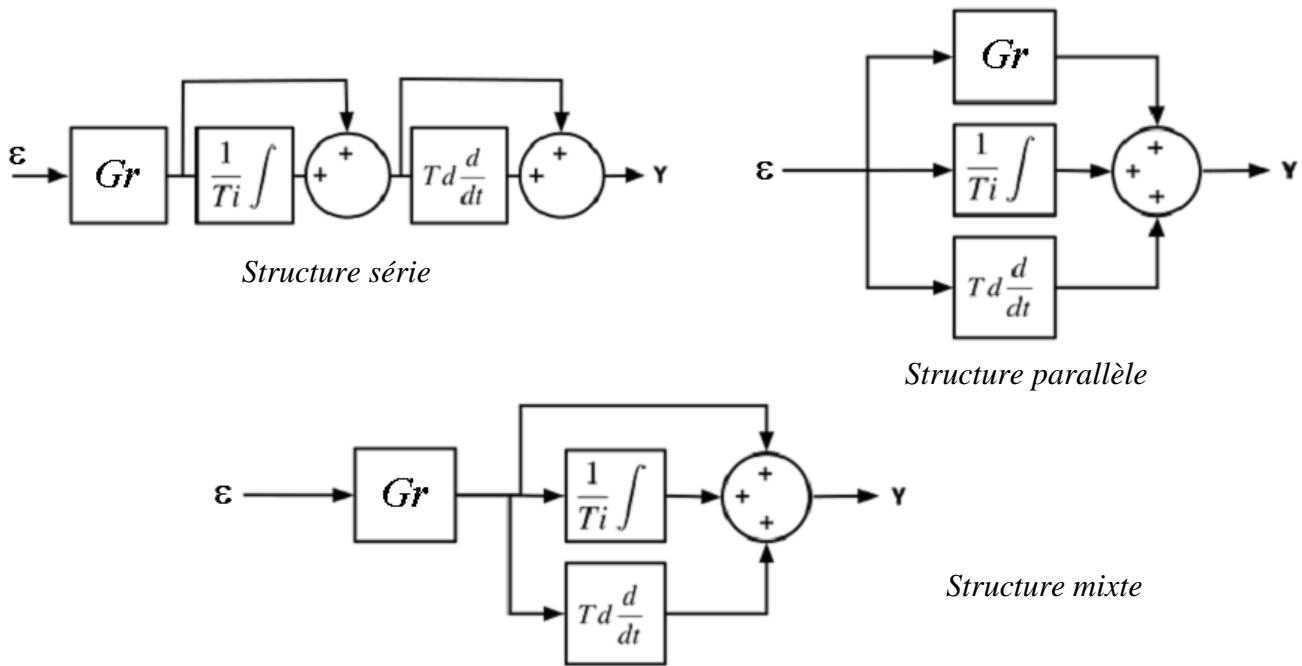


Figure 17 : Régulateurs PID série, parallèle et mixte

Le réglage d'un régulateur à action P , I et D (régulateur **PID**) consiste à déterminer les coefficients G_r (ou B_p), T_i (ou k_i) et T_d afin d'obtenir une réponse adéquate de la régulation.

L'objectif est d'être **stable**, **précis** et **rapide**. Les valeurs des paramètres PID ne donnent pas le même comportement du système selon que la structure est **série**, **parallèle** ou **mixte**. C'est pourquoi, il est primordial que l'automaticien connaisse la structure existante du régulateur.