

Chapitre I

La boucle fermée

1 Rôle de la boucle fermée

Imaginons une personne au volant conduisant sur une route droite : *a priori* pour ne pas dévier, il suffit de tenir le volant droit ! La voiture est centrée sur sa voie, est dans l'axe de la chaussée et les roues sont droites. Le conducteur ferme les yeux et tient le volant de manière rigide (Figure I.1). On le sait bien, tout laisse supposer que la voiture s'écartera tôt ou tard de sa trajectoire et que cela aura bientôt des conséquences désastreuses. En effet, le moindre écart dans la position initiale de la voiture ou une rafale de vent qui modifierait, ne serait-ce que très légèrement, la trajectoire du véhicule provoquerait à terme une sortie de route. On peut encore évoquer des irrégularités de la chaussée ou des petits mouvements involontaires de volant.

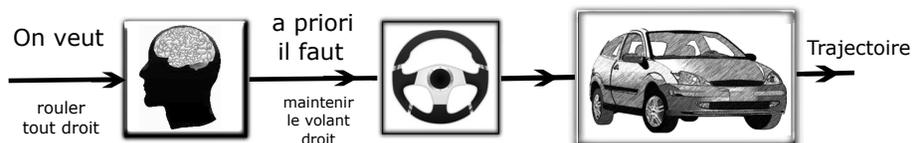


FIGURE I.1 – En boucle ouverte, le conducteur ne tient pas compte de la trajectoire suivie

Aussi, on le sait bien, on ne conduit pas les yeux fermés. Le conducteur, yeux ouverts, est à même de constater un écart entre la trajectoire désirée et la trajectoire attendue et peut réagir en effectuant une action sur le volant pour annuler cet écart : le conducteur pilote en **boucle fermée** (Figure I.2), il limite ainsi l'influence des **perturbations** (rafale de vent, mauvais parallélisme des roues...).

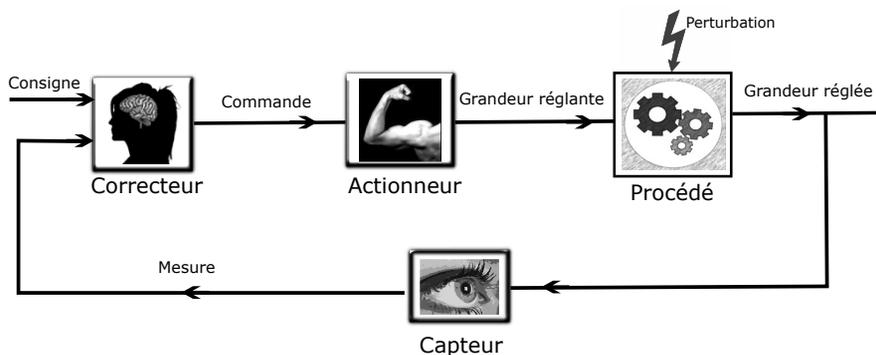


FIGURE I.2 – Schéma de principe de la boucle fermée

Le choix du mouvement (*commande*) de volant (*actionneur*) qui agit sur la trajectoire (*grandeur réglée*) est élaboré par la personne (*correcteur*) en tenant compte de la trajectoire suivie (*mesure*) et de la trajectoire souhaitée (*consigne*). La structure de boucle fermée s'impose dans la conduite automatique de tout système.

La **grandeur réglée** est la grandeur physique (niveau d'une cuve, température d'une pièce, cap d'un navire...) que l'on désire contrôler.

La **consigne** est la valeur souhaitée de la grandeur réglée.

La **grandeur réglante**, que l'on contrôle, agit sur la grandeur réglée. Elle n'est généralement pas de même nature que la grandeur réglée (le débit pour contrôler le niveau, la puissance thermique pour contrôler la température, l'angle de barre pour contrôler le cap d'un navire...).

Les **grandeurs perturbatrices** sont des grandeurs physiques qui agissent sur la grandeur réglée mais que l'on ne contrôle pas (la température extérieure influe sur la température de la pièce, la charge mécanique ralentit le moteur d'entraînement). Une **perturbation** désigne une variation de la grandeur perturbatrice (variation de température extérieure, variation de la charge...)

Le **capteur** associé à un **transmetteur** permet de délivrer une **mesure** dans un format standard (4-20 mA, 0-10V ...) image de la grandeur physique que l'on souhaite piloter (la grandeur réglée). Le capteur est le dispositif dont les caractéristiques dépendent d'une grandeur physique. Par exemple la *capacité* entre deux électrodes dépendra de la hauteur d'eau dans laquelle elles sont immergées, la *résistance* d'une sonde Pt100 varie avec la température, la *résistance* d'une jauge de contrainte varie avec sa déformation mécanique. Le transmetteur est le dispositif qui transforme la variation de caractéristique du capteur en un signal électrique image de la grandeur physique.

Le **correcteur** élabore la **commande**. Usuellement, le correcteur calcule la commande à partir de l'**erreur** (notée ε) représentant l'écart entre la consigne et la mesure : on dit que le correcteur possède un degré de liberté¹.

L'**actionneur** est l'organe de puissance qui permet d'agir sur la grandeur réglante. C'est par exemple une vanne réglant un débit, un gradateur associé à une résistance chauffante qui apporte une puissance thermique, un variateur associé à un moteur qui développe un couple...

Le **système** désigne généralement l'ensemble formé par l'actionneur, le procédé et le capteur.

En automatique on définit deux problématiques :

- l'**asservissement** aussi appelé **poursuite**, où la grandeur réglée doit suivre, le plus fidèlement possible, la consigne qui varie (*la voiture doit suivre une route sinueuse*);
- la **régulation**, où l'on s'attache à éliminer l'effet des perturbations lorsque la consigne est constante (*la trajectoire de la voiture ne doit pas dévier sur une route droite malgré des rafales de vent*).

1. D'autres correcteurs utilisent la somme de deux commandes : une calculée à partir de la consigne et une calculée à partir de la mesure. On dit qu'ils possèdent deux degrés de liberté. On rencontre également des correcteurs qui utilisent la connaissance de la perturbatrice. Ils peuvent alors avoir trois degrés de liberté. Ces types de correcteurs font l'objet de la troisième partie du présent ouvrage.

2 Qualités d'une boucle fermée

Le comportement de la boucle fermée en asservissement ainsi qu'en régulation dépendra du réglage du correcteur. Un bon réglage devra permettre à la boucle fermée de satisfaire un cahier des charges qui se traduit qualitativement par quatre critères : la **stabilité**, la **précision**, la **rapidité** et la **robustesse**.

2.1 Stabilité

La stabilité est la qualité essentielle à toute boucle fermée. On parle d'un système stable en boucle fermée si, lors d'une variation de consigne d'amplitude finie, ou lors de l'apparition d'une perturbation d'amplitude finie, la **sortie** du système (la grandeur réglée observée par sa mesure) varie d'une quantité finie.

On quantifie le degré de stabilité d'un système en boucle fermée par les oscillations que présentent sa sortie. Moins la sortie présente d'oscillations, plus la boucle fermée est stable.

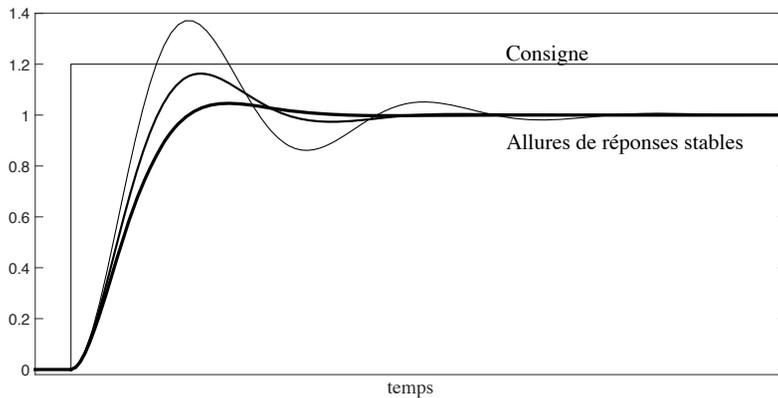


FIGURE I.3 – Degré de stabilité d'une boucle fermée

L'instabilité est caractérisée soit par une sortie qui augmente exponentiellement, soit par des oscillations de plus en plus grandes. Le système à piloter est alors très fortement sollicité au risque d'un accident si l'on ne réagit pas assez vite (il faut rapidement reprendre la main sur la commande en passant en pilotage manuel, ou utiliser l'arrêt d'urgence qui coupe l'alimentation en énergie).

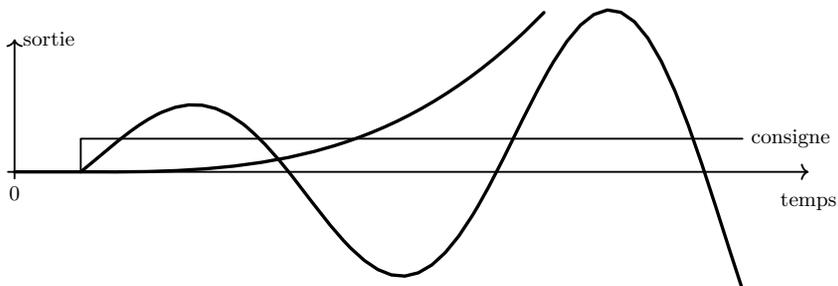


FIGURE I.4 – Réponses instables en boucle fermée

2.2 Précision

On évalue la précision d'un système en boucle fermée en mesurant l'erreur $\varepsilon(t)$, écart entre la consigne $y_c(t)$ et la mesure de la grandeur réglée $y(t)$:

$$\varepsilon(t) = y_c(t) - y(t) \quad (\text{I.1})$$

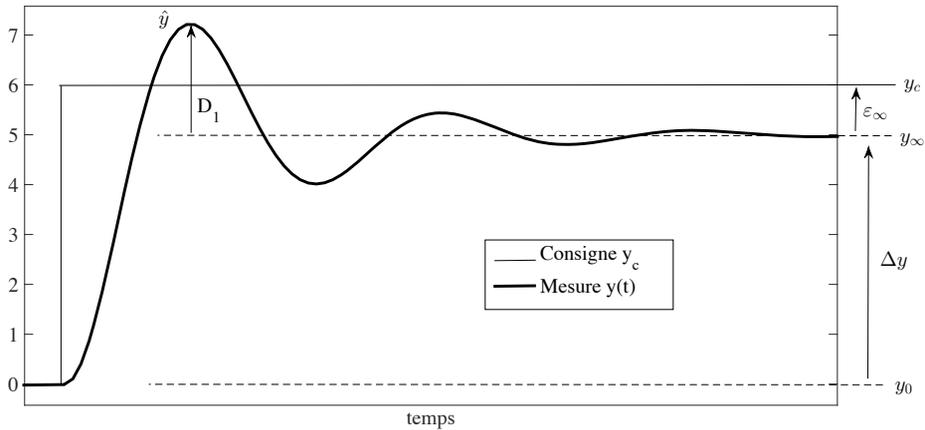


FIGURE I.5 – Précision en boucle fermée

L'**erreur statique** (notée ε_∞) est déterminée par l'écart en **régime établi**².

$$\varepsilon_\infty = y_c - y_\infty \quad (\text{I.2})$$

On définit également l'**erreur statique relative** ($\varepsilon_\infty\%$) comme :

$$\varepsilon_\infty\% = \frac{\varepsilon_\infty}{y_c} = \frac{y_c - y_\infty}{y_c} \quad (\text{I.3})$$

En asservissement, l'**erreur dynamique** est donnée par l'amplitude D_1 du premier **dépassement** (*overshoot*). On calcule le **dépassement relatif** X_1 par rapport à la variation de sortie Δy par :

$$X_1 = \frac{D_1}{\Delta y} = \frac{\hat{y} - y_\infty}{y_\infty - y_0} \quad (\text{I.4})$$

En régulation, l'erreur dynamique est donnée par l'écart maximal à la consigne.

2.3 Rapidité

On donne généralement la rapidité de la boucle fermée par la durée entre le moment où la sortie a varié de 10 % et le moment où elle a varié de 90 % de sa variation finale Δy : c'est le **temps de montée** t_m (*rise time*). Il caractérise la réactivité de la boucle fermée.

Le **temps de réponse à 5%** (noté $t_{5\%}$) est un autre indicateur de la rapidité de la boucle fermée en asservissement. Il reflète la durée du **régime transitoire**³ à la suite d'un changement de consigne à l'instant t_0 . Le temps de réponse à 5% est la durée que met la mesure pour atteindre et se maintenir à sa valeur définitive à $\pm 5\%$ de la variation Δy où $\Delta y = y_\infty - y_0$ soit :

$$y_\infty - 5\% \Delta y \leq y(t_{>t_{5\%}+t_0}) \leq y_\infty + 5\% \Delta y$$

2. lorsque les signaux $y_c(t)$ et $y(t)$ ne varient plus. On note y_c la valeur finale de $y_c(t)$

3. laps de temps pendant lequel les grandeurs évoluent.

Un temps de montée⁴ court n'est pas synonyme d'un temps de réponse à 5% faible. La Figure I.6 illustre cela avec trois réglages "classiques" de la boucle fermée : plus le temps de montée est court plus le dépassement relatif est important (les passages à 10 % et à 90 % de la variation finale sont indiqués respectivement par le carré et les ronds gris).

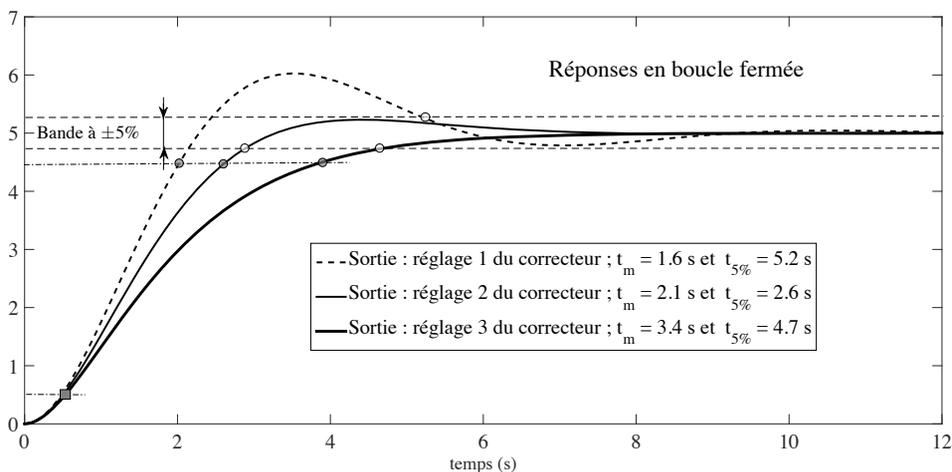


FIGURE I.6 – Rapidité de la boucle fermée ; ici la consigne varie à l'instant $t_0 = 0$ s

- c'est avec le réglage n° 1 que la sortie démarre le plus rapidement mais en contrepartie elle présente un dépassement qui reste néanmoins modéré (de l'ordre de 20 %). L'amortissement des oscillations est assez rapide de sorte que le temps de réponse à 5% est correct.
- Avec le réglage n° 2 (plus stable que le réglage n° 1) la sortie démarre moins rapidement. Il n'y a qu'un seul dépassement (pas d'oscillation) de valeur relative inférieure à 5%. En conséquence le temps de réponse à 5% est très bon.
- C'est avec le réglage n° 3 (le plus stable des trois) que la sortie démarre le moins rapidement. Pour autant, le temps de réponse à 5 % est plus court que celui du réglage n° 1 et le temps de réponse à 2% est comparable à celui du réglage n°2. C'est une sortie qui ne présente pas de dépassement.

2.4 Robustesse

La robustesse assure que le comportement de la boucle fermée reste stable malgré le vieillissement du système, un changement du point de fonctionnement ou des incertitudes de modélisation. Un **compromis** entre la **performance** et la **robustesse** de la boucle fermée est à trouver.

Par exemple une *Formule 1* a de très bonnes performances mais ses réglages sont peu robustes : le circuit doit avoir une route très lisse, il faut changer les pneus en cas de pluie et de nombreux ajustements dépendent du pilote au volant.

Par contre la *voiture de monsieur ou madame tout le monde* peut être conduite par tout un chacun (on ne fait que replacer le siège et les rétroviseurs), on ne change pas les pneus à chaque fois qu'il pleut, et l'on se déplace aussi bien sur une route de campagne que sur une autoroute. Cependant on n'attend pas de ce véhicule les performances de la F1 !

4. lorsque la réponse présente au moins un dépassement, on peut assimiler le temps de montée à la durée comprise entre l'instant t_0 de variation de la consigne et l'instant t_1 où la sortie passe pour la première fois par sa valeur finale : $t_m \simeq t_1 - t_0$

3 Architecture de la boucle fermée

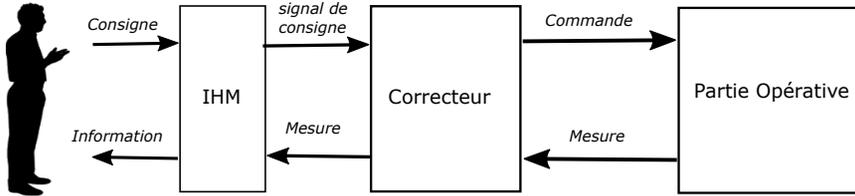


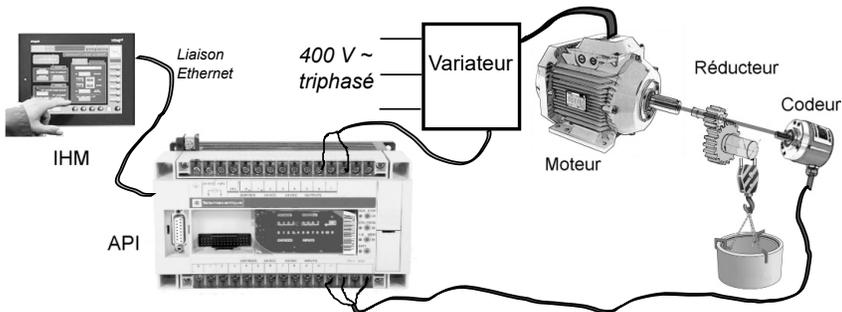
FIGURE I.7 – Architecture d'une installation industrielle

Sur les installations industrielles, on trouve l'architecture de Figure I.7 avec :

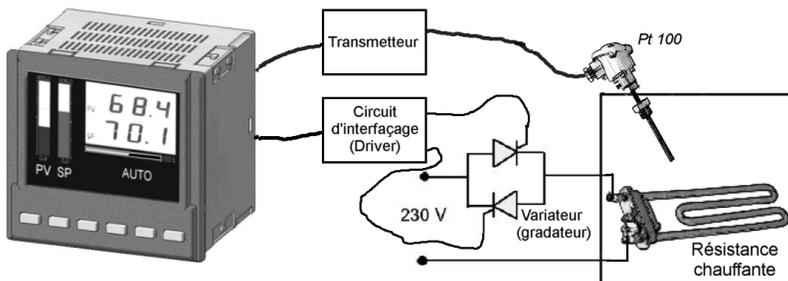
- la *Partie Opérative* encore appelée *système*. On y trouve notamment un variateur qui permet de doser le transfert de puissance entre la source d'énergie et l'actionneur ;
- un *Régulateur Industriel* ou un *Automate Programmable Industriel* (API ou PLC pour *Programmable Logic Controller*) qui assure la fonction de *correcteur*. La commande calculée par le correcteur est envoyée au variateur ;
- l'opérateur qui utilise une *Interface Homme-Machine* (IHM) pour :
 - envoyer l'ordre de consigne au régulateur
 - avoir un aperçu des grandeurs du système (mesure, commande...)

La *mesure* et l'*information* sont deux grandeurs différentes. La mesure est une grandeur électrique dans un format standard (4-20 mA, 0-10 V) qui est difficilement exploitable par l'utilisateur. L'information est la mesure dans l'unité physique du système ($^{\circ}\text{C}$, m, tr/min...). Il en est de même pour la consigne : elle est donnée en unité physique par l'utilisateur mais arrive au correcteur sous la forme d'un signal électrique.

Illustration d'un asservissement de position à l'aide d'un API et d'une IHM.



Régulation de température à l'aide d'un régulateur industriel (l'IHM fait partie du régulateur)



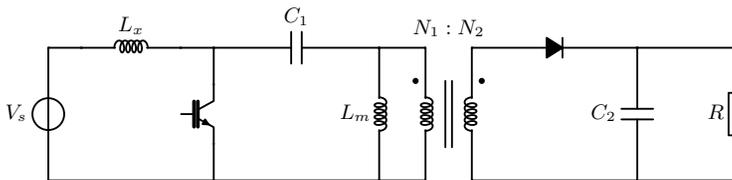
4 Du schéma au schéma bloc

Les schémas des procédés industriels utilisent la symbolique Tuyau Instrumentation (TI). On y représente les actionneurs (vanne, pompe), les instruments utilisés sont représentés par des cercles entourant des lettres. La première lettre du cercle indique la grandeur physique. Les lettres suivantes désignent les fonctions réalisées par ces instruments. Les signaux électriques, la circulation des fluides sont matérialisés par des flèches d'allures différentes.



FIGURE I.8 – Eléments de représentation en norme TI

L'électronique et l'électrotechnique utilisent aussi des schémas avec des symboles normalisés. Ces schémas sont à l'image des circuits électriques qui adoptent intrinsèquement la structure de mailles.



Le schéma bloc donne une autre représentation. Elle est celle dédiée à l'automatique. Chaque bloc représente un **lien de cause à effet** entre la grandeur qui entre dans un bloc et celle qui en sort. Ce lien est décrit par un modèle (cf. §II).

En plus des blocs on trouve :

- un seul type de lignes fléchées portant les signaux, les grandeurs physiques,
- des sommateurs, des soustracteurs.

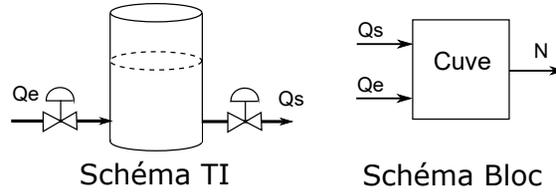


La normalisation passe par des notations usuelles des différentes grandeurs. On trouve ci-dessous les notations rencontrées dans les pages qui suivent.

	Milieu Industriel	pour les démonstrations
La consigne	W ou SP (Set Point)	$y_c(t)$
La mesure	X ou PV (Process Value)	$y(t)$
La commande	Y ou CV (Control Value)	$u(t)$

Sur divers exemples et dans les exercices, on trouve également des notations dédiées : i (courant), θ (température), v (tension), Ω (vitesse angulaire), p (pression)...

Afin de bien saisir la particularité du schéma bloc, l'illustration suivante présente le schéma TI et le schéma bloc d'une cuve.



Sur le schéma TI (qui représente l'installation)	Sur le schéma bloc (qui traduit un lien de cause à effet)
- en entrée le débit Q_e	- Q_e (qui agit sur le niveau) en entrée
- en sortie le débit Q_s	- Q_s (qui agit sur le niveau) en entrée
- le niveau en grandeur implicite	- le niveau (la grandeur qui nous intéresse) en sortie

Le schéma bloc de la régulation de niveau de la Figure I.9 met en évidence le système d'une part et le régulateur d'autre part (rappelant ainsi l'architecture présentée sur la Figure I.7). Le régulateur possède deux entrées (*consigne* et *mesure*) et une sortie (*commande*). Sa structure montre un soustracteur qui calcule l'erreur et sa *loi de commande PID* (Proportionnelle - Intégrale - Dérivée) ; c'est de cette loi de commande qu'il est principalement question dans cet ouvrage. On observe également que le correcteur possède un commutateur qui autorise deux modes de fonctionnement :

- en position **Auto**, l'opérateur règle la valeur de **consigne** ;
- en position **Manu**, l'opérateur règle la valeur de la **commande**.

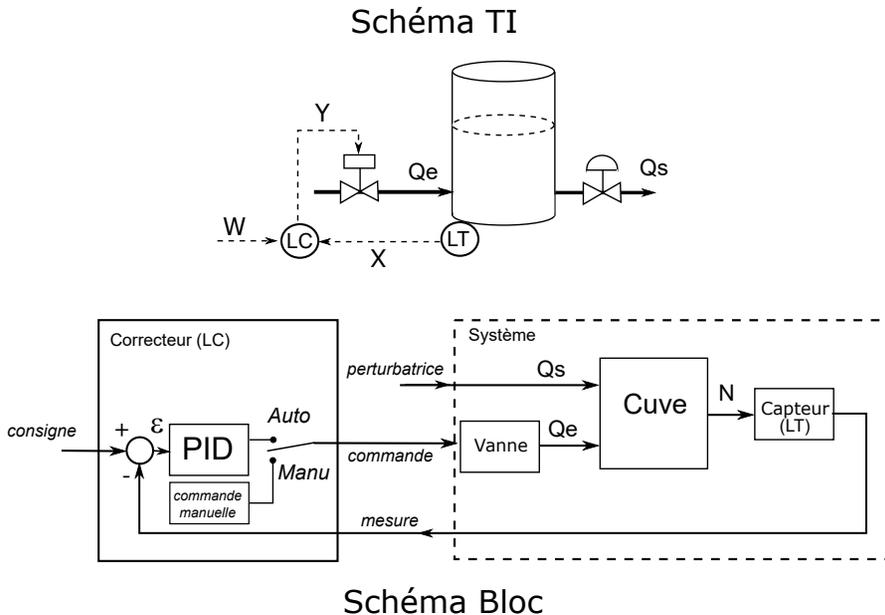


FIGURE I.9 – Schéma TI et schéma bloc d'une boucle fermée ; Q_s est une grandeur perturbatrice.

Ici, la consigne est externe au correcteur. L'opérateur fixe sa valeur à l'aide d'un bouton rotatif comme pour le thermostat d'un four ou celui d'un radiateur.