

AUTOMATIQUE

Contrôle et régulation

Cours et exercices corrigés

Patrick Prouvost

Professeur au Lycée Val de Murigny de Reims

2^e édition

DUNOD

Illustration de couverture : *digitalvision®*

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage. Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements	d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).
--	--



© Dunod, Paris, 2004, 2010

© Nathan, Paris, pour la précédente édition

ISBN 978-2-10-055569-7

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^e et 3^e a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

TABLE DES MATIÈRES

Chapitre 1 • Objectif de la régulation	3
1.1 Régulation d'un procédé	3
1.1.1 Procédé	3
1.1.2 Chaîne d'une régulation	5
1.1.3 Constitution d'une régulation	7
1.1.4 Asservissement et régulation	10
1.2 Qualités attendues d'une régulation	11
1.2.1 Stabilité	11
1.2.2 Précision	13
1.2.3 Rapidité	14
1.2.4 Compromis précision-rapidité	15
Chapitre 2 • Étude des systèmes linéaires	17
2.1 Systèmes linéaires	17
2.1.1 Système linéaire	17
2.1.2 Système non linéaire	18
2.1.3 Mise en équation d'un système	18
2.2 Transformation de Laplace*	20
2.2.1 Objectif	20
2.2.2 Transformée de Laplace d'une fonction	21
2.3 Fonction de transfert isomorphe	24
2.3.1 Définition	24
2.3.2 Classification d'une fonction de transfert	25
2.3.3 Fonctions de transfert et schéma fonctionnel	26
2.4 Fonction de transfert isochrone	28
2.4.1 Limitation de la fonction de transfert isomorphe	28
2.4.2 Définition	28
2.4.3 Analyse harmonique ou analyse fréquentielle	29
2.5 Courbes représentatives des fonctions de transfert	29
2.5.1 Diagramme de Bode	29
2.5.2 Courbe de Nyquist	30
2.5.3 Courbe dans le plan de Black	30
Chapitre 3 • Étude de systèmes primordiaux	35
3.1 Système du premier ordre	35
3.1.1 Équation différentielle et mise en équation	35

Table des matières

3.1.2 Réponse temporelle	37
3.1.3 Réponse fréquentielle	40
3.2 Système du second ordre	43
3.2.1 Équation différentielle et mise en équation	43
3.2.2 Réponse temporelle	44
3.2.3 Réponse fréquentielle	47
3.2.4 Influence du coefficient d'amortissement	51
Chapitre 4 • Identification	53
4.1 Identification	53
4.1.1 Le but de l'identification	53
4.1.2 Les méthodes générales	53
4.1.3 Les méthodes proposées	53
4.1.4 Le choix du modèle	54
4.2 Identification en chaîne ouverte	54
4.2.1 Méthodologie	54
4.2.2 Courbe en « S »	58
4.2.3 Courbe « intégratrice »	61
4.2.4 Courbe « avec oscillations »	63
4.3 Identification en chaîne fermée	64
4.3.1 La méthode des oscillations limites	64
4.3.2 Premier essai	65
4.3.3 Deuxième essai	65
Chapitre 5 • Régulateur industriel	91
5.1 Le régulateur industriel : technique	91
5.1.1 Appellation « régulateur industriel »	91
5.1.2 Constitution de l'appareil	91
5.2 Algorithme du régulateur	93
5.2.1 Composition de la fonction du régulateur	93
5.2.2 Actions élémentaires	95
5.2.3 Différentes structures du régulateur PID	98
Chapitre 6 • Notions de stabilité	127
6.1 Stabilité	127
6.1.1 Définition	127
6.1.2 Condition de stabilité	127
6.1.3 Point critique de stabilité	128
6.2 Critères de stabilité	129
6.2.1 Critères algébriques	129
6.2.2 Critère graphique	131
6.3 Degré de stabilité	133
6.3.1 Définition	133
6.3.2 Lecture graphique des marges de stabilité (fig. 6.5)	133

Chapitre 7 • Précision	147
7.1 Précisions	147
7.2 Précision statique	148
7.2.1 Écart de position	149
7.2.2 Écart de vitesse	149
7.2.3 Écart d'accélération	150
7.2.4 Calcul de l'écart	150
Chapitre 8 • Réglage	165
8.1 Réglage	165
8.2 Choix du type de régulation	165
8.3 Réglage par critère temporel	166
8.3.1 Principe	166
8.3.2 Réglage PID par modèle de référence	166
8.3.3 Réglage pratique de Ziegler et Nichols en chaîne fermée ou méthode du pompage	168
8.4 Réglage dans le domaine fréquentiel	169
8.4.1 Principe	169
8.4.2 Détermination algébrique du réglage	169
8.4.3 Détermination graphique du réglage	172
8.5 Stratégies de régulation PID	175
8.5.1 Besoins industriels et solutions envisageables	175
8.5.2 Régulation en cascade	176
8.5.3 Régulation mixte	178
8.5.4 Régulation adaptative	179
8.5.5 Régulation à partage d'échelle	180
Chapitre 9 • Problèmes simple boucle	185
Chapitre 10 • Problèmes : boucles imbriquées ou boucles particulières	227
Chapitre 11 • Boîte à outils	283
11.1 Tables de transformées de Laplace	283
11.2 Nomogrammes pour l'identification	285
11.3 Modèle de Strejc en chaîne fermée : relation entre K et n	287
11.4 Abaque de Black	288
11.5 Réglages des paramètres PID par la méthode de Broïda	289
11.6 Réglages des paramètres PID par la méthode de Ziegler & Nichols	289
11.7 Correspondance entre structures PID	290
Index	293

GRANDEURS ET SYMBOLES

PROCÉDÉ

G_s : gain statique d'un procédé autoréglant

k : gain dynamique d'un procédé intégrateur

Q : débit (par exemples Q_a débit d'alimentation, Q_s débit de sortie)

θ : constante de temps

τ : temps mort ou retard pur

n : ordre d'un système

RÉGULATEUR

W : signal de consigne

$\Delta W = w$: petite variation de consigne

X : signal de mesure

$\Delta X = x$: petite variation de mesure

ε : signal d'écart mesure/consigne

Y : signal réglant (de sortie) d'un régulateur

$\Delta Y = y$: petite variation du signal réglant

G_r : gain d'un régulateur

B_p : bande proportionnelle ($B_p = 100/G_r$)

T_i : constante de temps d'action intégrale

T_d : constante de temps d'action dérivée

FONCTION DE TRANSFERT

$H(p)$: fonction de transfert isomorphe du procédé

$C(p)$: fonction de transfert du régulateur

$F(p)$: fonction de transfert en chaîne fermée

$A(p) = C(p)H(p)$: fonction de transfert en chaîne ouverte

$H(j\omega)$: fonction de transfert isochrone du procédé

ω : pulsation ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ou $\text{rad} \cdot \text{min}^{-1}$)

G_{db} : gain logarithmique (décibels)

φ : phase ou déphasage (degrés ou radians)

SECOND ORDRE

λ : coefficient d'amortissement

ω_0 : pulsation propre non amortie

ω_r : pulsation de résonance

D_1 : premier dépassement

t_r : temps de réponse à $\pm 5\%$

Q : facteur de résonance

Les désignations des grandeurs et les symboles utilisés pour les représenter sont répertoriés dans le tableau ci-dessus. Une remarque s'impose en ce qui concerne la notion de *gain*. Suivant la norme, un gain est le logarithme décimal d'un rapport de deux nombres de même nature (deux amplifications en tension ou en puissance par exemple). Un gain s'exprime en décibels (symbole : dB). De ce fait on peut dire que certains résultats sont abusivement appelés *gains* en contrôle et régulation. Ainsi le gain d'un régulateur n'est qu'une amplification d'action proportionnelle et un gain statique est un rapport de deux nombres, deux pourcentages souvent. L'utilisation très fréquente de ces expressions nous a conduit à les conserver mais il est évidemment exclu d'exprimer en décibels les résultats correspondants.

OBJECTIF DE LA RÉGULATION

1

1.1 RÉGULATION D'UN PROCÉDÉ

L'objectif d'une régulation ou d'un asservissement est d'assurer le fonctionnement d'un procédé selon des critères prédéfinis par un cahier des charges. Les aspects de sécurité du personnel et des installations sont à prendre en compte comme ceux concernant l'énergie et le respect de l'environnement. 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 ou de lois d'évolution. 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, ou faire évoluer une température d'un four selon un profil déterminé.

1.1.1 Procédé

Le procédé est un terme général qui désigne un ensemble d'appareils destiné à obtenir un produit déterminé. L'évolution du procédé dépend d'une ou plusieurs grandeurs incidentes. Le procédé est caractérisé à l'aide d'une ou plusieurs grandeurs physiques mesurables à maîtriser qui vont permettre de contrôler l'objectif fixé (fig. 1.1).



Figure 1.1 – Procédé.

Exemple 1.1 *Aérotherme*

(fig. 1.2). Un débit d'air Q est réchauffé à une température T par l'intermédiaire d'une résistance électrique sur laquelle est appliquée une puissance électrique P . Le ventilateur à deux vitesses permet d'avoir le débit d'air désiré.

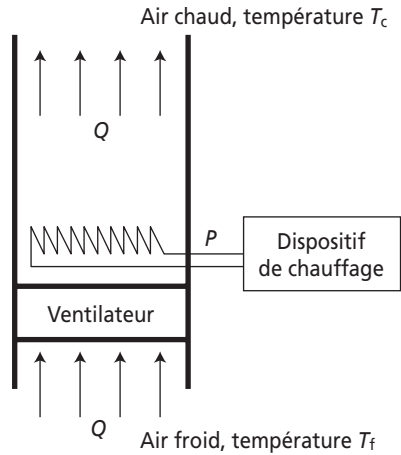


Figure 1.2 - Aérotherme.

La grandeur à maîtriser est la température T_c . Les grandeurs incidentes sur la température sont le débit de l'air Q , la température T_f et la puissance électrique P . Le procédé « aérotherme » peut alors se représenter selon la figure 1.3.



Figure 1.3 - Représentation de l'aérotherme.

Afin de rendre compte du sens de l'influence des grandeurs incidentes, le schéma représentant le procédé peut être détaillé. Si le débit Q augmente (ou diminue) alors la température T_c a tendance à diminuer (ou à augmenter). La variation de la température T_f a également un effet opposé à la variation de la température T_c . Par contre la variation de puissance électrique P provoque une variation de la température T_c dans un même sens. Le schéma de la figure 1.4 prend en compte cela.

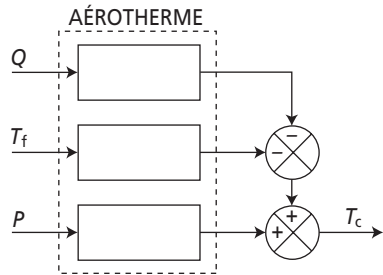


Figure 1.4 - Représentation détaillée de l'aérotherme.

Exemple 1.2 Mélangeur de lait et de chocolat
(fig. 1.5). Afin de fabriquer industriellement du lait chocolaté, on mélange du chocolat à du lait. On souhaite contrôler la qualité du mélange obtenu à partir

d'une analyse donnant la concentration en chocolat. Le niveau permet de connaître le volume dans le mélangeur.

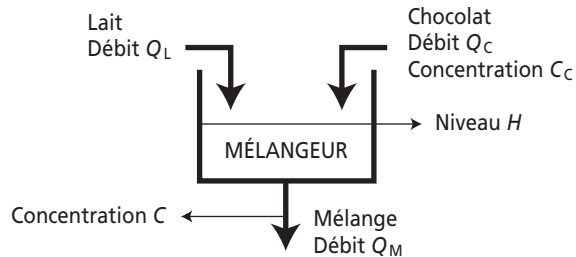


Figure 1.5 - Mélangeur de lait et de chocolat.

Les grandeurs à maîtriser sont le niveau H et la concentration C . Les grandeurs incidentes sur le niveau sont le débit de lait Q_L , le débit de chocolat Q_C , le débit du mélange Q_M .

Les grandeurs incidentes sur la concentration C du mélange sont le débit de lait Q_L , le débit de chocolat Q_C , et la concentration C_C en chocolat. Le procédé « mélangeur » ayant deux grandeurs à maîtriser H et C , on le représente par deux schémas (fig. 1.6).

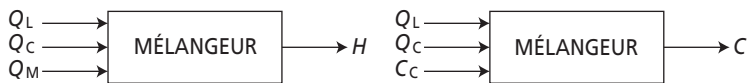


Figure 1.6 - Représentation du procédé mélangeur.

1.1.2 Chaîne d'une régulation

Afin d'obtenir le fonctionnement désiré, la régulation doit agir en continu sur le procédé. Pour cela il faut observer la grandeur à maîtriser (observation), comparer cette grandeur à celle désirée et déterminer l'action à entreprendre (réflexion) puis agir sur une ou plusieurs grandeurs incidentes du procédé (action). On obtient alors une chaîne de régulation (fig. 1.7).

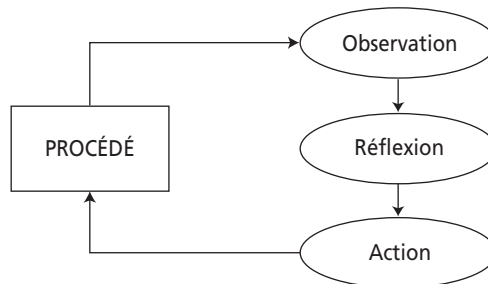


Figure 1.7 - Chaîne de régulation.

a) Chaîne ouverte de régulation

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

Cette chaîne de régulation est dite ouverte car l'action ne modifie pas la grandeur observée.

L'inconvénient majeur est que l'objectif fixé n'est généralement pas atteint complètement. En effet la relation liant la grandeur observée et la grandeur incidente réglante ne prend pas en compte les autres grandeurs incidentes perturbant la grandeur à maîtriser.

Exemple 1.1 (suite) L'aérotherme.

Le but est de maintenir constante la température T_c de l'air chaud. On décide de réguler cette température en chaîne ouverte. La chaîne ouverte de régulation comprend alors l'observation de la température T_f . À cette température T_f on fait correspondre une puissance électrique P comme par exemple $P = k(T_0 - T_f)$. Donc pour une température désirée T_0 , si T_f diminue alors on augmente la puissance électrique. On agit donc sur la résistance électrique délivrant une quantité de chaleur due à l'effet Joule qui modifie la température T_c (fig. 1.8). Lors d'un changement de débit d'air, la température T_c peut être différente de la température désirée T_0 mais l'étape de réflexion n'ayant pas le résultat réel, elle ne peut agir pour y remédier.

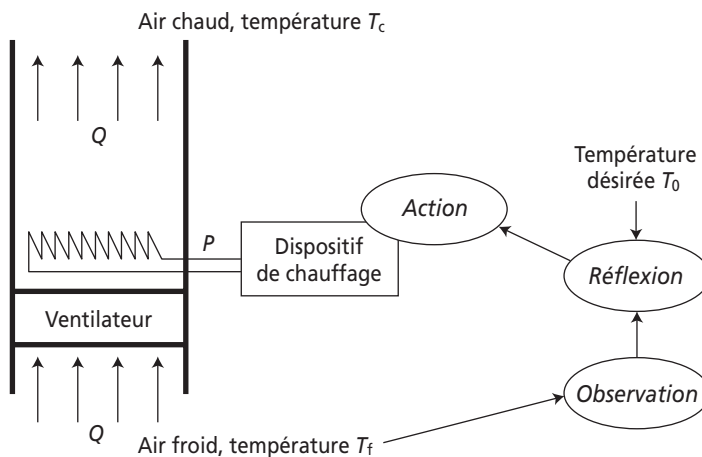


Figure 1.8 – Aérotherme régulé en chaîne ouverte.

b) Chaîne fermée de régulation

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

Cette chaîne de régulation est dite fermée car l'action modifie la grandeur observée.

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

Exemple 1.1 (suite) L'aérotherme.

Le but est toujours de maintenir constante la température T_c de l'air chaud. On décide de réguler cette température en chaîne fermée. La chaîne fermée de régulation comprend alors l'observation de la température T_c . On détermine l'écart $T_0 - T_c$ et on fait correspondre une puissance électrique P comme par exemple $P = k(T_0 - T_c)$. Donc pour une température désirée T_0 , si T_c diminue on augmente la puissance électrique. On agit donc sur la résistance électrique délivrant une quantité de chaleur due à l'effet Joule qui modifie la température T_c (fig. 1.9). Lors d'un changement de débit d'air, la température T_c s'éloigne de la température désirée T_0 mais l'étape de réflexion prenant en compte cette différence, la puissance délivrée est modifiée et donc la température T_c .

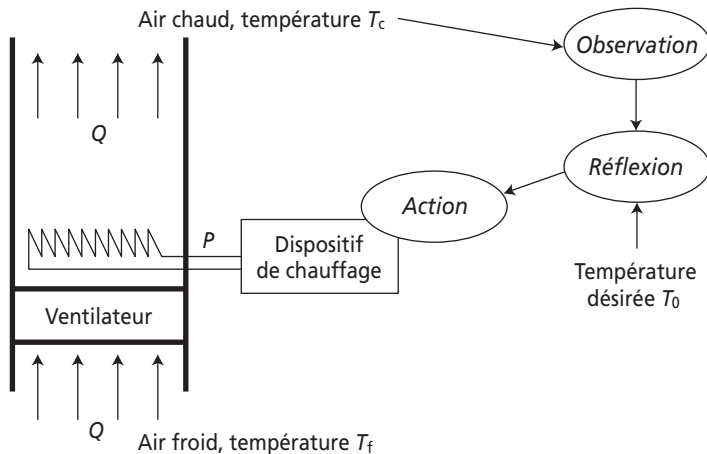


Figure 1.9 – Aérotherme régulé en chaîne fermée.

Les procédés 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 cet ouvrage, seules les chaînes fermées de régulation seront étudiées.

1.1.3 Constitution d'une régulation

Pour réaliser la fonction d'observation on implante sur le procédé un organe de mesure appelé capteur ou transmetteur. La fonction de réflexion comprenant le calcul de l'écart entre les grandeurs désirée et mesurée, et l'action à entreprendre est assurée par le régulateur. L'actionneur installé sur le procédé permet évidemment d'agir sur la grandeur incidente choisie du procédé. Le procédé ainsi équipé sera par la suite appelé

procédé instrumenté ou encore système. La chaîne fermée de régulation ainsi constituée se représente par un schéma appelé schéma fonctionnel (fig. 1.10).

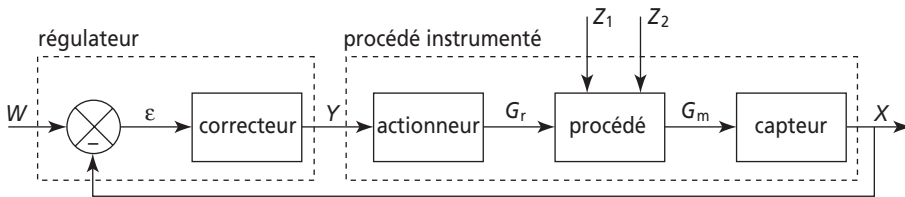


Figure 1.10 – Constitution d'une chaîne fermée de régulation.

Les éléments constitutifs d'une chaîne fermée de régulation (fig. 1.10) 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 la consigne et le signal de mesure 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 procédé pour modifier la grandeur physique à maîtriser.

Le capteur (ou transmetteur) élabore la mesure de la grandeur à maîtriser et la transmet au régulateur.

• Les grandeurs et signaux d'informations

Ils sont représentés 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 : $\varepsilon = W - X$.

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.

Exemple 1.2 (suite) Le mélangeur de lait et de chocolat.

Au regard des deux schémas établis (fig. 1.6) on observe que seules deux grandeurs incidentes influent à la fois sur les grandeurs à maîtriser H et C . Le bon

sens guide le choix des grandeurs incidentes ; le débit Q_M est choisi comme la grandeur réglante permettant de modifier la grandeur à maîtriser H et la concentration C_c devient la grandeur réglante contrôlant la grandeur à maîtriser C . Cependant il n'est pas toujours facile, techniquement, de faire varier une grandeur incidente telle que la concentration C_c . La variation d'un débit étant plus facile, le débit Q_c est alors choisi comme grandeur réglante.

Afin d'agir sur le mélangeur on implante une vanne automatique à commande progressive en guise d'actionneur. Un analyseur fournit une mesure représentative de la concentration du mélange effectué. Le mélangeur ainsi instrumenté devient physiquement contrôlable par le régulateur. Le schéma fonctionnel de la régulation de la concentration du mélangeur est alors celui de la figure 1.11.

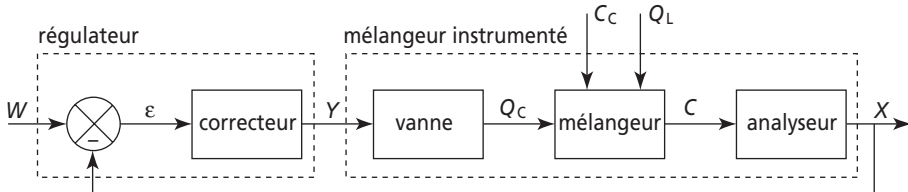


Figure 1.11 - Schéma fonctionnel de la régulation de la concentration du mélangeur.

Exercice 1.1

On implante une vanne automatique à commande progressive sur le débit Q_M . Un capteur de niveau est installé sur le mélangeur et délivre la mesure représentative de H . Réaliser le schéma fonctionnel de la régulation de niveau du mélangeur.

SOLUTION. la figure 1.12 montre cette solution.

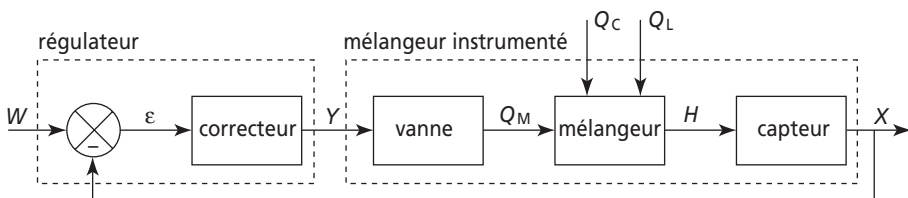


Figure 1.12 - Schéma fonctionnel de la régulation de niveau du mélangeur.

Exercice 1.2

Étudier le procédé Aérotherme vu dans l'exemple 1.1 (fig. 1.4). Faire un choix justifié de la grandeur réglante parmi les trois grandeurs incidentes. Une sonde de température, installée en sortie de l'aérotherme, délivre la mesure représentative de la température T_c de l'air chaud. Réaliser le schéma fonctionnel de la régulation de température de cet aérotherme.