

# Automatisme et régulation des équipements thermiques

par **Jean-François BOURGEOIS**

*Ingénieur-Chercheur à la Direction des Études et Recherches d'Électricité de France  
(Groupe Effet Joule)*

<b>1. Représentation d'un procédé et terminologie.....</b>	<b>BE 9 590 - 2</b>
1.1 Boucle ouverte, boucle fermée.....	— 2
1.2 Qualités d'une bonne régulation.....	— 3
1.3 Transmetteurs, capteurs et actionneurs .....	— 4
<b>2. Modulation de puissance.....</b>	<b>— 6</b>
2.1 Régulation par contacteurs.....	— 6
2.2 Modulation par thyristors .....	— 6
2.3 Modulation par relais statiques.....	— 7
<b>3. Régulateurs.....</b>	<b>— 7</b>
3.1 Types de régulateurs .....	— 7
3.2 Fonctionnalités des régulateurs .....	— 7
3.3 Régulateur PID .....	— 8
<b>4. Techniques de régulation .....</b>	<b>— 11</b>
4.1 Régulation multizone .....	— 11
4.2 Régulation programmée.....	— 11
4.3 Régulation avec surindexation.....	— 11
4.4 Régulation double .....	— 11
4.5 Régulation de rapport (ou de proportion ou de ratio).....	— 12
4.6 Régulation à échelle partagée (ou split range) .....	— 12
4.7 Régulation chaud-froid.....	— 13
4.8 Régulation de tendance .....	— 13
4.9 Régulation des systèmes à retard .....	— 14
4.10 Régulation floue.....	— 15
4.11 Régulations avancées.....	— 16
<b>5. Méthodes de réglage.....</b>	<b>— 16</b>
5.1 Méthode de Broïda.....	— 16
5.2 Méthode des oscillations limites.....	— 16
5.3 Méthode des oscillations tout ou rien .....	— 17
<b>6. Gestion et conduite hiérarchisées .....</b>	<b>— 17</b>
<b>Pour en savoir plus.....</b>	<b>Doc. BE 9 590</b>

**L**es techniques de l'automatique ne sont pas seulement un moyen de commander des processus mais aussi un moyen de réduire les pertes de production, d'augmenter la qualité et la quantité des produits, d'augmenter la disponibilité des unités et de diminuer les coûts marginaux de production.

Un automatisme bien pensé, surtout si son étude intervient en amont de la conception des unités de production, aura une implication économique importante. L'automatisme et la régulation des équipements thermiques tels que les fours, étuves, enceintes climatiques, chaudières... s'inscrit bien dans ce cadre.

La régulation des procédés thermiques regroupe l'ensemble des moyens matériels et techniques mis en œuvre pour maintenir une **grandeur physique à régler**, égale à une valeur désirée, appelée **consigne**. Lorsque des perturbations ou des changements de consigne se produisent, la régulation provoque une action correctrice sur une grandeur physique du procédé, appelée **grandeur réglante** (ou **commande**)

Dans cet article, on s'intéressera aux moyens matériels et techniques de mise en œuvre de la régulation. Les techniques décrites sont universelles et peuvent s'appliquer à tout procédé.

Les régulateurs PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé) sont très répandus et conviennent dans environ 80 % des boucles de régulation. Pour les 20 % restant, il est nécessaire d'avoir recours à des régulations de type avancé pour lesquelles une modélisation du procédé est indispensable. Les régulateurs PID se présentent soit sous la forme d'un boîtier autonome (régulateur de tableau) qui se fixe en face avant d'une armoire de contrôle-commande, soit programmés dans un automate ou dans un calculateur industriel. Les régulateurs de type avancé sont en général programmés sur calculateur industriel équipé du nombre d'entrées-sorties nécessaire à la commande de l'installation.

Pour la plupart des applications avec PID où les contraintes sur la grandeur réglée ne sont pas fortes (précision faible, temps de montée non critique, dépassement autorisé, etc.), les réglages du régulateur sont à la portée d'un utilisateur n'ayant pas de connaissances particulières en automatique. Il suffit en général de suivre les recommandations du constructeur.

Pour certaines applications où les contraintes sur la grandeur réglée sont fortes (bonne précision, par exemple  $\pm 0,3$  sur une échelle de 100, temps de montée le plus court possible et sans dépassement, sensibilité faible aux perturbations, par exemple la température d'un fluide chauffé ne doit pas varier de plus de 2 % autour de la consigne en cas de variations de débit de  $\pm 30\%$  autour du débit nominal), on utilise plusieurs PID en cascade ou en tendance. Mais cette architecture, très souvent onéreuse, engendre généralement une mise en service longue et nécessite l'assistance d'un spécialiste de l'automatique.

Pour les cas que l'on pourrait qualifier de pointus (temps mort important, supérieur à la moitié de la constante de temps principale du procédé, constantes de temps et gain statique variables en fonction des conditions de fonctionnement), une **modélisation du procédé** s'impose avec régulation de type avancé.

Cette solution est longue et onéreuse car elle nécessite une étude spécifique par un spécialiste de l'automatique, avec développement sur calculateur ou automate ou plus rarement sur des régulateurs de tableau de très haut de gamme.

## 1. Représentation d'un procédé et terminologie

Pour décrire les techniques de régulation, nous prendrons souvent l'exemple d'un four qui servira de fil conducteur, sachant que ces techniques restent valables quelle que soit l'application.

### 1.1 Boucle ouverte, boucle fermée

Considérons un four représenté schématiquement par les figures 1 et 2.

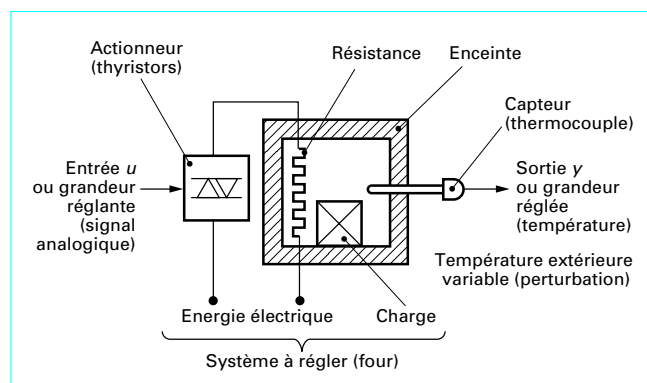


Figure 1 – Système en boucle ouverte

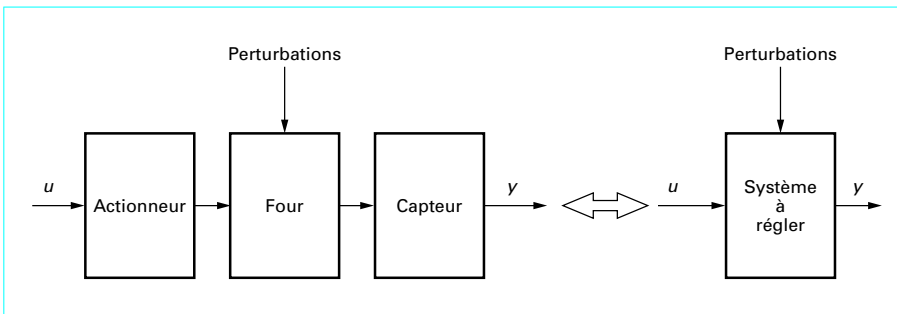


Figure 2 – Schéma fonctionnel équivalent de la figure 1

Un tel système est en boucle ouverte. La sortie  $y$  peut être réglée en agissant sur l'entrée  $u$ . Cette situation présente deux inconvénients majeurs :

- on ne sait pas a priori à quelle valeur va se stabiliser  $y$  et en combien de temps ;
- $y$  va varier en fonction des perturbations extérieures (par exemple variation de la température externe).

Ce mode de fonctionnement est obtenu, sur les régulateurs PID du commerce, en position manuelle. Ce mode présente un intérêt lorsque la régulation est déficiente ou lorsque l'utilisateur veut piloter le système dans des cas particuliers.

Nous n'avons plus ces inconvénients en **refermant la boucle** par un régulateur, ce qui conduit au schéma de la figure 3, représentant la boucle de régulation de base.

On cherche à maintenir la **grandeur à régler  $y$**  à une **valeur de consigne  $y_c$**  en agissant sur la **commande  $u$**  par la loi de commande (ou correcteur) (figure 4).

Analysons le fonctionnement de cette boucle (figure 3).

Le système bouclé a pour entrée  $y_c$  et pour sortie  $y$ . Le régulateur possède 2 entrées ( $y_c$  et  $y$ ) et une sortie  $u$ . Il se compose de la loi de commande et d'un comparateur qui élabore l'**erreur de régulation  $\epsilon = y_c - y$** .

La loi de commande a pour entrée  $\epsilon$  et pour sortie  $u$ .

**Exemple :** Le capteur mesure la température ( $y$ ) de l'enceinte thermique. Cette mesure est comparée à la consigne ( $y_c$ ) pour élaborer un **signal d'écart**. Suivant le signe et l'amplitude de ce dernier, la loi de commande dosera l'alimentation ( $u$ ) de la résistance afin que la température dans le four reste la plus proche possible de la consigne.

Dans toutes les boucles de régulation, on retrouvera les éléments suivants :

- un capteur ;
- une consigne (fixe ou variable dans le temps) ;
- un comparateur délivrant un signal d'écart ;
- une loi de commande qui calcule le signal à envoyer sur l'actionneur ;
- un actionneur ;
- le système physique à commander et soumis à des perturbations.

Il est bon de faire la distinction entre **boucle d'asservissement** et **boucle de régulation**. Toutes les deux fonctionnent sur le même principe, mais leur finalité diffère sensiblement :

- l'asservissement consiste à maintenir une grandeur de sortie identique ou proportionnelle à une grandeur d'entrée (ex : poursuite de trajectoire  $\Leftrightarrow$  consigne variable) ;
- la régulation impose à la grandeur de sortie d'atteindre une valeur de consigne et d'y rester quelles que soient les perturbations éventuelles (ex : régulation de pression, de température  $\Leftrightarrow$  consigne fixe).

La distinction est importante car les réglages optimaux ne sont en général pas les mêmes dans les deux cas. En asservissement, les réglages dépendent de la dynamique propre du système (constante de temps, gain statique), alors qu'en régulation, ils dépendent surtout de la dynamique des perturbations (ouverture de porte, variation de la tension réseau, température extérieure variable, etc.).

## 1.2 Qualités d'une bonne régulation

Les qualités exigées d'une régulation industrielle sont définies par les critères suivants (figure 5) :

- stabilité : elle doit toujours converger vers un point d'équilibre stable, et ne doit pas osciller autour du point de consigne ;
- précision : en régime établi, la grandeur réglée doit être maintenue en permanence au plus près de la consigne ;
- rapidité : on cherchera à atteindre le point d'équilibre en prenant le moins de temps possible.

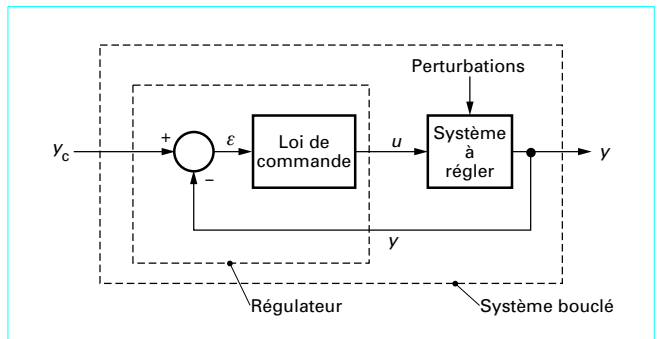


Figure 3 – Système en boucle fermée

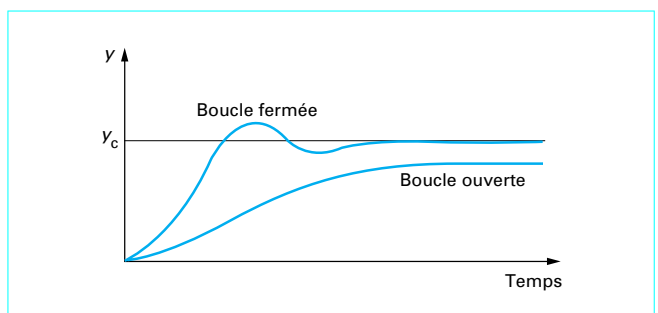


Figure 4 – Réponse du système en boucle ouverte et en boucle fermée

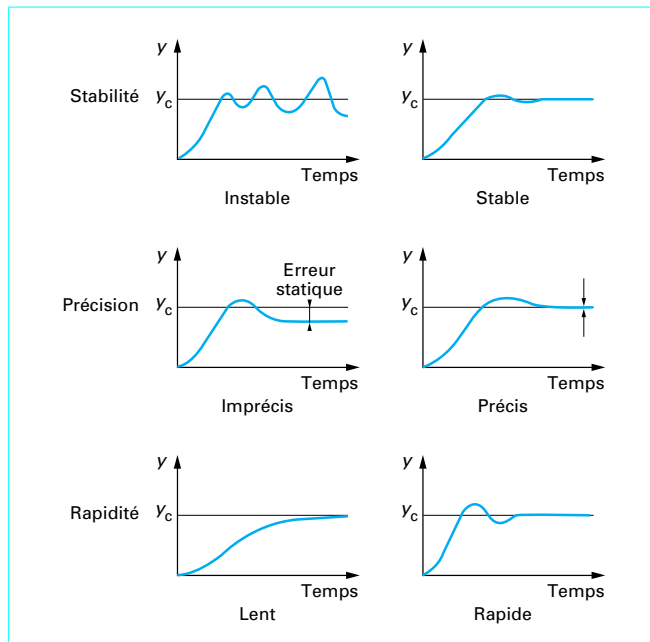


Figure 5 – Qualités d’une bonne régulation

Nous verrons dans le paragraphe 3.3, comment on peut influencer sur la qualité de la régulation.

Il existe deux types d’erreur pour les processus non intégrateurs :  
 — l’erreur statique : pour une entrée de type échelon (ex : consigne  $y_c$  fixe) ;  
 — l’erreur dynamique (ou erreur de traînage) : pour une entrée de type rampe (ex : consigne  $y_c$  variable en fonction du temps).

Pour éliminer ces erreurs, le régulateur doit comporter un ou plusieurs intégrateurs (action intégrale).

**Nota** : un processus est dit **intégrateur** lorsque la sortie varie linéairement en fonction du temps quand l’entrée ou la consigne est constante, ex : vanne motorisée, vérin.

### 1.3 Transmetteurs, capteurs et actionneurs

Une chaîne de régulation est formée d’une cascade d’appareils qui doivent être compatibles entre eux, tant du point de vue électrique que du point de vue précision et échelle de mesure.

Reprenons l’exemple type d’une chaîne de régulation, en le complétant (figure 6).

#### 1.3.1 Transmetteur

Le transmetteur est utilisé lorsque la mesure est éloignée du régulateur (par exemple distance supérieure à 10 m). Son rôle est de transformer la mesure physique en un courant (ex : 4-20 mA) ou une tension (ex : 0-10 V) moins sensibles aux parasites. Le transmetteur peut faire partie intégrante du capteur. Il peut également conditionner le signal (par exemple, filtrage, compensation de soudure froide pour un thermocouple).

#### 1.3.2 Capteur

Dans les équipements thermiques, le capteur de température est le plus répandu.

Pour les basses températures (– 200 à + 800 °C environ, valeurs extrêmes à moduler en fonction de la tenue en température du support), la **sonde platine** 100 Ω à 0 °C est la plus utilisée (ex : enceinte climatique, étuve, réchauffeur).

Pour les cas simples, le thermostat basé sur le principe du **bilame** est également très répandu (ex : chaudière domestique).

Dans les fours, on utilise en général soit :

— des **lunettes infrarouges** (mono ou bichromatiques) utilisées pour les mesures sans contact ; elles restent une solution chère et pas toujours utilisable ; leur domaine d’utilisation est généralement supérieure à 600 °C ;

— des **thermocouples** ; il en existe plusieurs types selon la gamme de température balayée par le four. Les plus courants sont les types :

- **T** : cuivre-constantan : –185 à +300 °C,
- **J** : fer-constantan : +20 à +700 °C,
- **K** : chromel-alumel : 0 à +1 100 °C,
- **S** : platine-platine rhodié 10 % : 0 à +1 550 °C,
- **R** : platine-platine rhodié 13 % : 0 à +1 600 °C,
- **B** : platine rhodié 30 % - platine rhodié 6 % : +100 à +1 600 °C,
- **W** : tungstène-tungstène rhénium 26 % : +20 à +2 300 °C.

Les thermocouples nécessitent une jonction de référence ou soudure froide qui permet à la f.é.m. mesurée d’être uniquement fonction de la température de la soudure chaude du capteur. De plus la mesure délivrée par le thermocouple doit être linéarisée, dans le transmetteur, ou dans le régulateur.

Comme autres capteurs, on peut citer les capteurs de débit, de pression, de déplacement, de masse, d’humidité, etc. Ces capteurs fournissent en général un signal analogique, image de la grandeur physique mesurée.

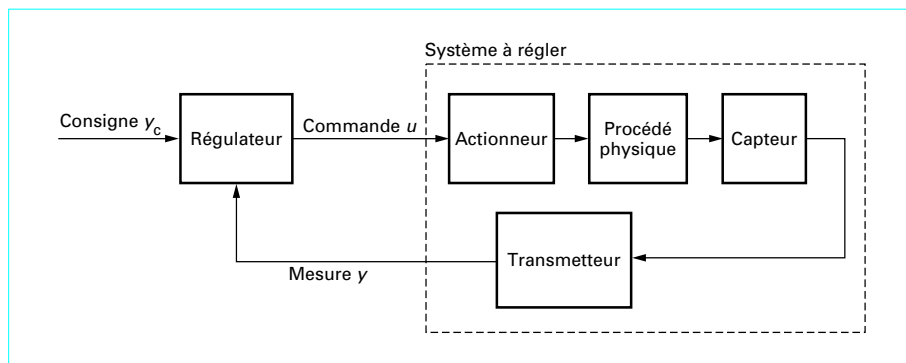


Figure 6 – Chaîne de régulation type

### 1.3.3 Actionneurs

#### 1.3.3.1 Modulateurs de puissance

Pour moduler la **puissance électrique d'un four**, sont généralement utilisés :

- des contacteurs (solution bon marché) ;
- des modulateurs à thyristors (de plus en plus utilisés) ;
- des transformateurs variables (solution chère) ;
- des selfs à saturation variable (solution chère qui n'est plus préconisée).

■ Les **contacteurs** ne donnent pas une très bonne qualité de régulation : la température oscille, mais c'est suffisant pour certaines applications.

■ Les **transformateurs variables** permettent d'ajuster la tension d'alimentation des résistances en fonction de la température. La tension varie en amplitude et reste sinusoïdale. Ces transformateurs nécessitent une motorisation et des curseurs qui demandent un entretien régulier.

■ Pour **les modulateurs à thyristors** (ou gradateurs de puissance), on distingue deux modes de fonctionnement :

- l'angle de phase ;
- le train d'ondes.

Certains modulateurs associent les deux modes.

● **Angle de phase**

Les thyristors ne sont passants que pendant une portion de l'alternance (figure 7).

La commande d'un régulateur appliquée au bloc à thyristors fait varier l'angle  $\alpha$  d'amorçage et donc la puissance.

Il faut noter que la puissance ne varie pas linéairement de  $\alpha$ .

● **Train d'ondes**

Les thyristors sont passants pendant un temps  $t_1$ , puis bloqués pendant un temps  $t_2$  (figure 8).

Le rapport cyclique  $\frac{t_1}{t_1 + t_2}$  permet de faire varier la puissance.

Ce rapport est proportionnel à la commande issue du régulateur.

Si l'emploi des gradateurs semble très attrayant, il faut toutefois prendre garde aux inconvénients qu'ils peuvent induire et notamment sur :

- le facteur de puissance de l'installation ;
- l'énergie réactive de l'installation ;
- les parasites ;
- les harmoniques ;
- le flicker (chute brutale de la tension due à un fort appel de courant).

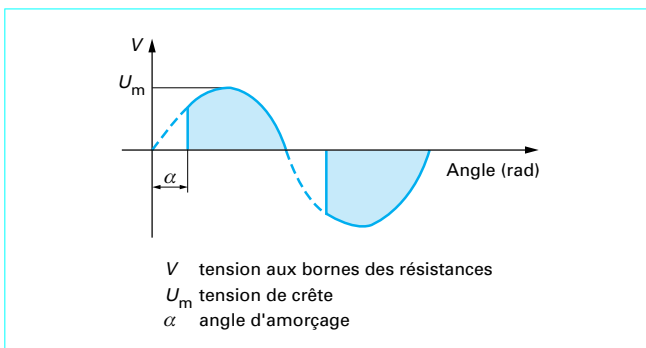


Figure 7 – Commande en angle de phase

■ Quelques **autres actionneurs** peuvent être cités :

- la vanne d'admission de gaz ou de liquide ;
- le variateur de vitesse (ex : commande de débit d'une pompe), etc.

Ces actionneurs sont commandables en général par un signal analogique ou logique (par ex : 0-10 V, 4-20 mA).

#### 1.3.3.2 Vannes réglantes

Ce sont des actionneurs couramment utilisés dans l'industrie pour **régler le débit d'un fluide**.

Leur utilisation en régulation impose de connaître, en particulier, certaines de leurs caractéristiques.

■ **Caractéristique intrinsèque de débit**

C'est la loi qui relie le débit  $Q$  au signal de commande de vanne  $u$ , à pression différentielle constante aux bornes de la vanne.

Les vannes les plus courantes sont à caractéristique intrinsèque linéaire et à égal pourcentage (figure 9).

■ **Caractéristique installée**

La vanne étant dans le circuit hydraulique, c'est la loi de variation du débit en fonction du signal de commande. Cette caractéristique est fonction de l'installation, ou encore du rapport  $d$  et de la vanne, c'est-à-dire de sa caractéristique intrinsèque. Le rapport  $d$  est défini au débit maximal par :

$$d = \frac{\Delta p_v}{\Delta p_v + \Delta p_c}$$

avec  $\Delta p_v$  perte de charge de la vanne,  
 et  $\Delta p_c$  perte de charge du circuit sans la vanne.

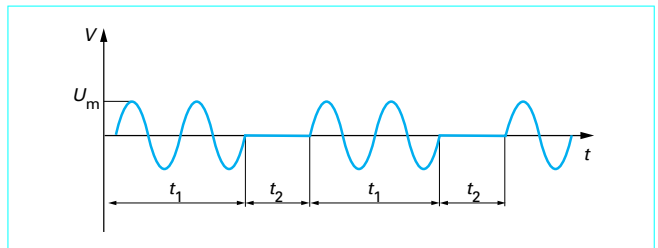


Figure 8 – Commande en train d'ondes

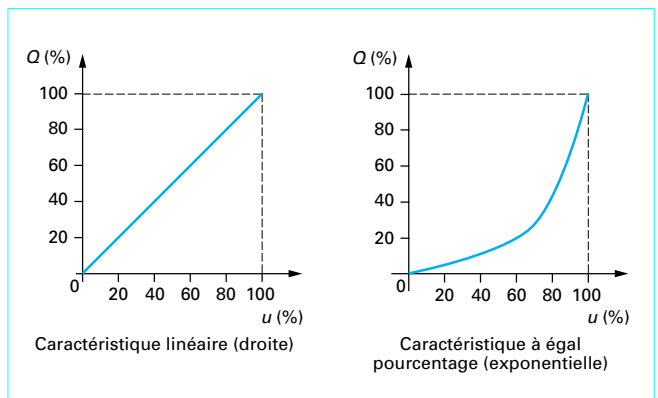


Figure 9 – Caractéristiques intrinsèques de débit

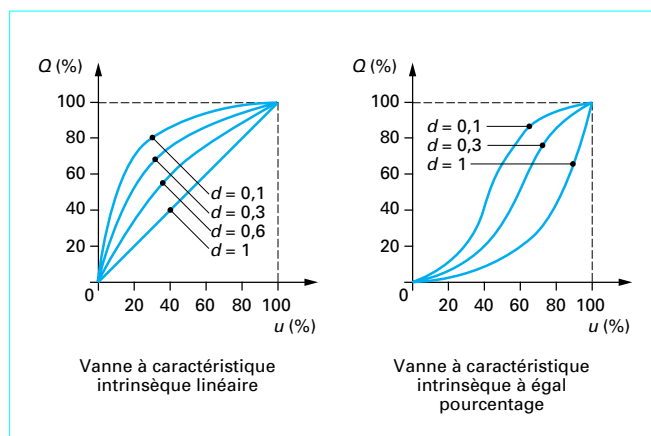


Figure 10 – Caractéristique installée pour des vannes à caractéristique intrinsèque linéaire et égal pourcentage

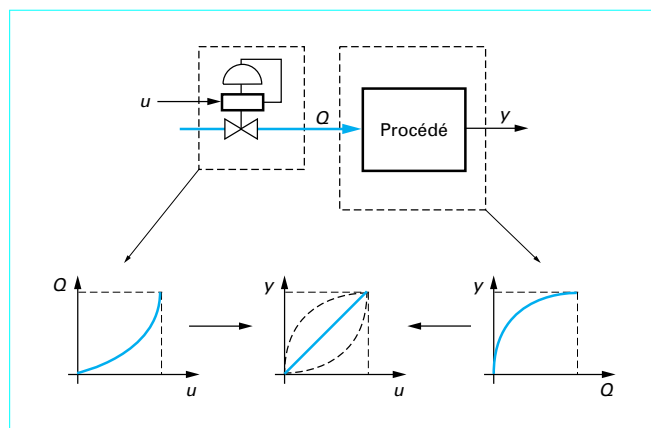


Figure 11 – Linéarisation de la caractéristique statique du procédé

La figure 10 donne un exemple de caractéristique installée en fonction de  $d$ .

Ces courbes permettent de choisir la caractéristique intrinsèque d’une vanne de façon à obtenir une caractéristique statique linéaire du procédé dans son ensemble, comme l’illustre la figure 11.

Les vannes réglantes sont pilotées par des signaux standards :

- électriques : 4-20 mA, 0-10 V ;
- pneumatiques : 3-15 psi (standard américain), 200-1 000 mbar.

## 2. Modulation de puissance

Le signal de commande calculé par le régulateur doit être transformé en une puissance électrique (pour les fours), image de cette commande. Parmi les moyens, nous avons déjà évoqué (§ 1.3.3.1) le contacteur, le transformateur à tension variable qui nécessite un servomoteur commandé en fonction du signal de sortie du régulateur, la self à saturation variable, le modulateur à thyristors. Dans ce paragraphe, nous étudions la modulation de cette puissance [1].

## 2.1 Régulation par contacteurs

### 2.1.1 Régulation tout ou rien (ou à deux plages)

Un exemple de mise en œuvre est illustré par la figure 12.

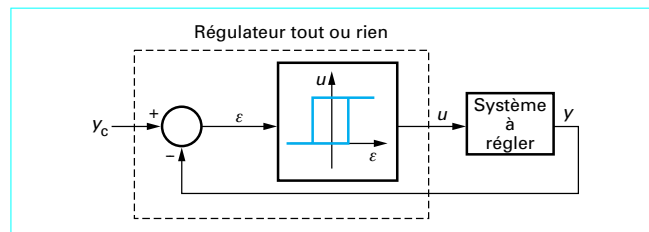


Figure 12 – Répartition tout ou rien avec hystérésis

**Principe :** la commande  $u$  est maximale lorsque la mesure  $y$  est inférieure à la consigne  $y_c$ . Elle est minimale lorsque la mesure est supérieure à la consigne.

C’est la solution la moins chère et la plus simple, mais qui ne va pas sans quelques inconvénients :

- un risque de collage des contacteurs ;
- la nécessité d’avoir une hystérésis pour éviter un battement trop rapide des contacteurs (la coupure ne se fait pas à la même température que le réenclenchement) ;
- l’oscillation de la mesure  $y$  en permanence autour de la consigne ; l’amplitude de cette oscillation, dépend du réglage de l’hystérésis et de l’inertie thermique du système.

Des variantes existent :

- la régulation avec seuil (bande morte) ;
- la régulation avec seuil et hystérésis.

### 2.1.2 Régulation à trois plages

La qualité de la régulation est améliorée (amplitude des oscillations plus petite) en combinant trois allures de chauffe : grand chauffage, petit chauffage, arrêt.

Pour un système triphasé, on utilise le couplage étoile-triangle : la puissance « petit chauffage » est égale au tiers de la puissance nominale ou « grand chauffage ».

Dans d’autres cas, le couplage série-parallèle est utilisé. Le « petit chauffage » sert au maintien en température du four où les pertes sont normalement inférieures à cette puissance réduite.

L’inconvénient est une augmentation du coût du câblage.

### 2.1.3 Régulation continue par contacteur

Dans ce cas, un régulateur PID à sortie logique modulée est nécessaire (ou régulateur à Modulation de Largeur d’Impulsion (MLI)). Le signal de commande est une suite de créneaux dont le rapport cyclique est fonction de la puissance demandée. Ce procédé est de moins en moins utilisé à cause de l’usure des contacteurs qu’il entraîne.

## 2.2 Modulation par thyristors

Un thyristor joue le rôle d’un interrupteur à ceci près que la fréquence des interruptions peut être aussi grande que l’on veut (limitée par la fréquence du secteur). Un très faible courant de commande peut moduler une forte puissance.

Nous avons vu (§ 1.3.3.1) deux modes de fonctionnement : l'angle de phase et le train d'ondes.

En général (pour les systèmes thermiques), l'angle de phase est à éviter, surtout au primaire d'un transformateur, à cause des parasites qui perturbent les équipements électroniques. Toutefois, ce mode s'impose en particulier lors de la mise sous tension des résistances à très fort coefficient de température, tels que les éléments en bisiliciure de molybdène. Cependant, passée la période de démarrage, lorsque la température des résistances est proche de la température de régime, le modulateur peut passer en trains d'ondes (mode mixte).

Le fonctionnement par trains d'ondes est moins perturbant : le déclenchement se fait à tension nulle. La durée totale d'un train d'ondes ( $t_1 + t_2$ ) peut varier de 0,2s à 10 ou 20s environ, selon la finesse de modulation désirée.

## 2.3 Modulation par relais statiques

Pour les petites puissances (quelques dizaines de kilowatts maximum), des relais statiques à triacs sont souvent utilisés. Ils peuvent être commandés par un signal logique. Par exemple, sortie logique modulée d'un PID. Cette solution est moins chère qu'un gradateur à commande analogique.

# 3. Régulateurs

## 3.1 Types de régulateurs

### 3.1.1 Régulateurs purement analogiques

Ce sont les régulateurs mécaniques, pneumatiques, électroniques à base d'amplis opérationnels. Ces techniques, encore très répandues dans l'industrie, tendent à disparaître au profit des techniques numériques.

### 3.1.2 Régulateurs numériques de type analogique

Ce sont la plupart des régulateurs de tableau. Ils fonctionnent à fréquence d'échantillonnage élevée (période de 100 à 200 ms) quel que soit le processus. Les algorithmes sont simples (essentiellement des PID) et n'utilisent pas les potentialités des algorithmes avancés de l'automatique. Leur comportement est calqué sur celui des régulateurs analogiques. Cependant, grâce aux microprocesseurs, des fonctions additionnelles (autoréglage, autoadaptatif, autocalibration, autotest, etc.) ont pu être rajoutées par rapport aux régulateurs analogiques.

### 3.1.3 Régulateurs purement numériques

Ces régulateurs sont en général mis en œuvre sur calculateur industriel, automate ou régulateur de tableau haut de gamme. La fréquence d'échantillonnage est choisie en fonction de la bande passante du procédé continu. La capacité de calcul permet d'implémenter des algorithmes plus complexes qu'un PID. Le régulateur est évolutif. Changer de stratégie ou le traitement des mesures, revient à modifier le programme contenu en mémoire sans changer le matériel.

## 3.2 Fonctionnalités des régulateurs [2]

La fonction principale est évidemment la régulation. On trouve sur la plupart des régulateurs du commerce, en plus de la régula-

tion, des fonctions qui aident l'utilisateur à mettre en œuvre l'appareil, qui facilitent l'exploitation et la maintenance, qui permettent de communiquer avec un poste central.

Les fonctions les plus courantes sont l'autoréglage, l'autoadaptatif, l'autocalibration, l'autotest, la programmation de la consigne, les sécurités et alarmes et les communications.

### 3.2.1 Autoréglage

En l'absence de cette fonction, l'utilisateur se contente en général d'un réglage expérimental en faisant appel à son expérience et à ses connaissances de la machine. Cette façon d'opérer conduit très rarement aux réglages optimaux. L'autoréglage automatise cette démarche. C'est le microprocesseur qui conduit l'essai et propose à l'opérateur une valeur pour les actions proportionnelle, intégrale et dérivée. Ce dernier peut éventuellement les modifier.

**Principe :** le régulateur analyse l'allure de la réponse à un échelon de consigne en mesurant certains paramètres, tels que le retard, le dépassement ou la période d'oscillation, et en déduit les réglages P, I et D par calcul.

### 3.2.2 Autoadaptatif

Pour un régulateur à réglages fixes, si les paramètres du procédé varient au cours du temps, les performances du système bouclé se dégradent à mesure que l'écart entre les valeurs réelles des paramètres du procédé et celles pour lesquelles le régulateur avait été ajusté augmente. Pour éviter cette détérioration, il faut réajuster le régulateur en fonction des nouvelles valeurs des paramètres du procédé : c'est ainsi qu'apparaît le concept de système adaptatif.

**Principe :** le régulateur autoadaptatif identifie en permanence le comportement dynamique du processus et calcule en conséquence les valeurs des paramètres de régulation de sorte que les performances de la boucle fermée demeurent acceptables.

En général, le régulateur recalcule les réglages lorsqu'il mesure une détérioration significative de la grandeur réglée, par exemple le dépassement avec oscillation amortie. Le régulateur mesure alors le dépassement, la période d'oscillation et modifie par calcul, un ou plusieurs des paramètres de réglage.

### 3.2.3 Autocalibration

Tout régulateur a besoin de mesurer la grandeur physique à régler. Pour cette opération, il utilise un capteur, dont il existe deux types :

- les capteurs numériques qui, en général, délivrent des impulsions que l'on compte ;
- les capteurs analogiques qui fournissent une tension ou un courant variant de façon continue avec la grandeur mesurée.

Pour obtenir une mesure précise il est nécessaire de conditionner le signal par une amplification, un filtrage, une conversion analogique-numérique ou un comptage. Ce conditionnement est intégré dans les cartes d'entrée du régulateur.

La fonction d'autocalibration permet à l'appareil de recalibrer sa mesure sur un signal généré en interne ou par une source extérieure remplaçant le capteur.

### 3.2.4 Autotest

Afin de simplifier la maintenance de l'appareil, des tests automatiques vérifient les principaux organes du régulateur. C'est ainsi que certains défauts pourront être affichés comme par exemple :

- le manque d'alimentation des capteurs ;
- la rupture d'un capteur ;
- les défauts sur le convertisseur ;
- la rupture de la liaison informatique ;
- le problème d'affichage, etc.

### 3.2.5 Programmation de la consigne

Certains régulateurs intègrent la programmation de la consigne avec :

- des réglages différents du régulateur ;
- des consignes croissantes ou décroissantes ;
- des temps de montée variables ;
- des alarmes différentes, etc.

### 3.2.6 Sécurités-Alarmes

Les alarmes surveillent les mesures et/ou l'écart entre consigne et mesure.

Le seuil de déclenchement est programmable. Les alarmes sont associées à des relais en sortie de l'appareil ou à des sorties logiques opto-isolées. Ces sorties peuvent par exemple démarrer des séquences particulières de contrôle ou activer certaines entrées logiques d'un automate programmable.

### 3.2.7 Communication

Tout régulateur possède une communication locale qui permet grâce à un clavier et un afficheur, de visualiser des grandeurs (paramètres et mesures). De plus en plus, les régulateurs sont équipés d'une communication informatisée :

- par liaison type RS 232 ;
- par liaison type RS 422 ou RS 485 ;

ce qui permet le pilotage à distance par un ordinateur central de conduite de processus.

## 3.3 Régulateur PID [3] [4]

C'est le plus couramment utilisé des régulateurs de tableau du commerce. Il peut être de structure parallèle, série ou série parallèle. Le constructeur impose la structure. Dans un but pédagogique nous allons détailler le fonctionnement d'un PID série parallèle.

### 3.3.1 Mise en équation du régulateur

Supposons  $u$  et  $y$  exprimés en valeurs réduites, c'est-à-dire sans unité :

$$u = \frac{u \text{ (en unité physique)}}{\text{étendue d'échelle de } u \text{ (en unité physique)}}$$

$$y = \frac{y \text{ (en unité physique)}}{\text{étendue d'échelle } y \text{ (en unité physique)}}$$

L'équation temporelle reliant la commande  $u$  à l'erreur de régulation  $\varepsilon$  est la suivante :

$$u = K \left( \varepsilon + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon dt + T_d \frac{d\varepsilon}{dt} \right) \quad (1)$$

avec	$K$	gain statique du régulateur (sans unité si $u$ et $y$ exprimés en valeur réduite),
	$T_i$ (s)	constante de temps d'intégration,
	$T_d$ (s)	constante de temps de dérivée.

#### Rappel sur la transformée de Laplace

La transformée de Laplace  $\mathcal{L}$  définit une correspondance entre deux fonctions  $f(t)$  et  $F(p)$  :

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

avec	$p$	opérateur de Laplace,
	$f(t)$	fonction temporelle,
	$u(t)$	échelon unitaire ( $u(t) = 0$ pour $t < 0$ , $u(t) = 1$ pour $t \geq 0$ ),
	$F(p)$	transformée de Laplace de $f(t)$ .

Quelques transformées sont utilisées dans la suite du texte. Soit :

$$\theta \frac{dy}{dt} + y = ku$$

une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants. Avec l'opérateur de Laplace, l'équation devient :

$$\theta p y(p) + y(p) = ku(p)$$

L'opérateur dérivée  $\left(\frac{d}{dt}\right)$  est remplacé par  $p$  ; de même l'opérateur intégrale  $\left(\int_0^t dt\right)$  est remplacé par  $\frac{1}{p}$ .

$F(p) = \frac{y(p)}{u(p)} = \frac{k}{1 + \theta p}$  est appelée fonction de transfert du premier ordre.

Retarder la fonction  $F(p)$  du temps  $\tau$ , revient à écrire  $e^{-\tau p} F(p)$ .

L'équation du PID dans le domaine opérationnel de Laplace est :

$$u = K\varepsilon \left( 1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p \right) \quad (2)$$

L'action dérivée est souvent filtrée par un filtre du premier ordre, nécessaire pour la réalisabilité physique et pour éliminer les bruits préjudiciables à son efficacité.

Ce filtre est de la forme :

$$\frac{1}{1 + \frac{T_d}{N} p}$$

avec  $\frac{T_d}{N}$  constante de temps de filtrage.

L'entier  $N$  est parfois réglable par l'utilisateur. En général :  $2 < N < 10$ . Le PID prend alors la forme :

$$\frac{u}{\varepsilon} = K \left( 1 + \frac{1}{T_i p} + \frac{T_d p}{1 + \frac{T_d p}{N}} \right) \quad (3)$$

La contribution de chaque action peut être séparée :

$$u = u_p + u_i + u_d \quad (4)$$



avec  $u_p$  contribution de l'action proportionnelle,  
 $u_i$  contribution de l'intégrale,  
 $u_d$  contribution de la dérivée.

### 3.3.2 Action proportionnelle

$$u_p = K\varepsilon = \frac{100}{BP}\varepsilon \quad (5)$$

avec  $BP$  (%) bande proportionnelle (exemples de réglages sur la figure 13).

$K = \frac{100}{BP}$  avec  $BP$  exprimée en %. Sur la figure 13,  $BP$  est exprimée en pourcentage de la consigne. Elle peut également être exprimée en pourcentage de la pleine échelle du régulateur ou en degrés.

En pratique, la commande  $u_p$  est saturée à 0 et à 1, ce qui conduit aux représentations de la figure 13.

La commande reste saturée tant que la mesure reste en dehors de la bande proportionnelle. Le régime tout ou rien est obtenu pour  $BP = 0$  (ce qui équivaut à un gain  $K$  infini).

### 3.3.3 Action intégrale (reset)

L'action proportionnelle seule, laisse subsister une erreur statique (sur les systèmes non intégrateurs) d'autant plus grande que le gain  $K$  est faible et que les pertes thermiques sont importantes. L'action intégrale va permettre d'annuler cette erreur :

$$u_i = \frac{K}{T_i p} \varepsilon \quad (6)$$

Représentons cette commande en fonction de l'évolution de l'erreur (figure 14).

Lorsque l'erreur s'annule, la commande due à l'action intégrale n'évolue plus. L'action intégrale est d'autant plus forte que  $T_i$  est petit et  $K$  est grand.

Elle a un effet déstabilisateur. S'il y en a trop, on aura dépassement et éventuellement instabilité (figure 15).

Pour éviter ces inconvénients, certains constructeurs inhibent l'action intégrale jusqu'au moment où le système entre dans la  $BP$ . On évite également l'emballement de la commande par l'action intégrale en limitant  $u_i$  à 100 % de commande.

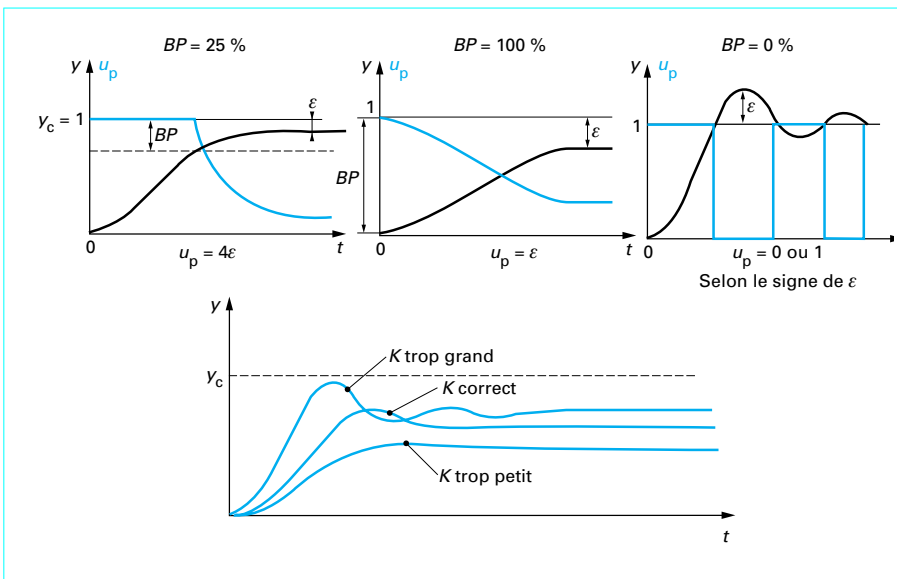


Figure 13 – Influence de l'action proportionnelle

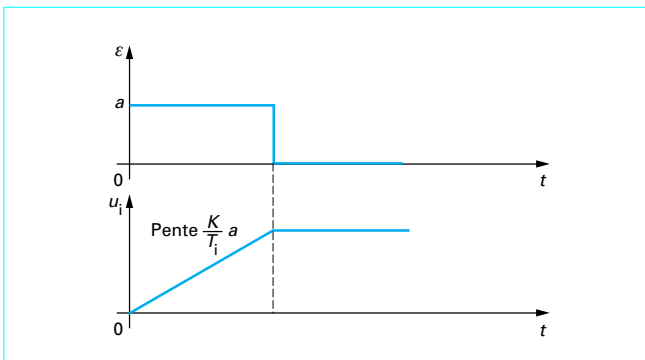


Figure 14 – Action intégrale

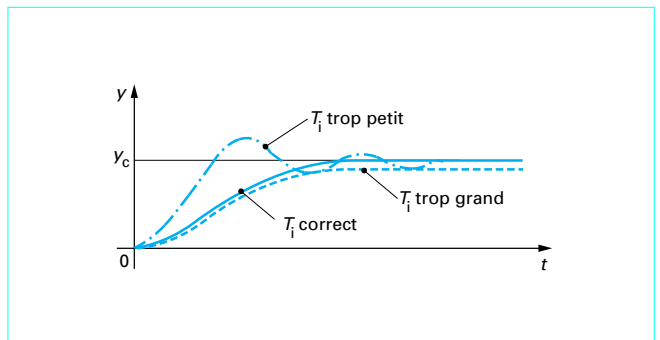


Figure 15 – Influence de l'action intégrale d'un régulateur PID sur la grandeur réglée

Tableau 1 – Différentes utilisations du PID				
Loi	Valeur de $\frac{\theta}{\tau}$ $\left( \frac{y}{u} = \frac{ke^{-\tau p}}{1 + \theta p} \right)$	Avantages	Inconvénients	Indication
Tout ou rien (TOR)	$\frac{\theta}{\tau} > 20$	Simplicité Montée rapide	Dépassement de la consigne Oscillations	Lorsque la précision n'est pas importante Systèmes à faible inertie
Proportionnelle (P) et Proportionnelle dérivée (PD)	$20 > \frac{\theta}{\tau} > 10$	Plus de dépassement de la consigne	Écart de statisme (sur un four)	Systèmes naturellement intégrateurs
Proportionnelle intégrale (PI)	$10 > \frac{\theta}{\tau} > 5$	Erreur statique annulée	Instabilité si intégrale mal réglée	Pas d'erreur statique tolérée Systèmes sans retard pur
Proportionnelle intégrale dérivée (PID)	$5 > \frac{\theta}{\tau} > 2$	Limitation du dépassement Opposition de la dérivée aux fluctuations de la mesure	Réglage délicat Sensible au bruit si filtrage insuffisant	Retard pur significatif mais $\leq \frac{\theta}{2}$

### 3.3.4 Action dérivée (rate)

Elle a une fonction anticipatrice qui va permettre d'éviter les dépassements et de stabiliser la boucle :

$$u_d = K T_d p \varepsilon \tag{7}$$

Représentons cette commande en fonction de l'évolution de l'erreur (figure 16).

Lorsque l'erreur ne varie plus, la commande due à l'action dérivée s'annule. L'action dérivée est d'autant plus forte que  $T_d$  et  $K$  sont grands.

La limitation de la commande est d'autant plus élevée que la variation de l'erreur est grande, ce qui est le cas pendant la montée en température d'un four (figure 17).

Les actions intégrale et dérivée ne sont jamais employées seules mais associées à l'action proportionnelle (PI, PD).

### 3.3.5 Réponse indicielle du régulateur PID

La figure 18 donne l'allure de la réponse pour une entrée  $\varepsilon$  du type échelon. On a alors la contribution des trois actions simultanément. La figure 18a donne la réponse théorique sans filtrage de l'action dérivée ni saturation de la commande  $u$ . La figure 18b donne la réponse réelle.

### 3.3.6 Différentes utilisations du PID

Le tableau 1 résume les différents cas d'utilisation du régulateur PID. Dans ce tableau, l'expression :

$$\frac{y}{u} = \frac{ke^{-\tau p}}{1 + \theta p} \tag{8}$$

avec  $k$  gain statique du système (sans dimension si  $y$  et  $u$  exprimés en valeur réduite),  
 $\tau(s)$  retard pur,  
 $\theta(s)$  constante de temps

représente la fonction de transfert d'un système du premier ordre avec retard pur.

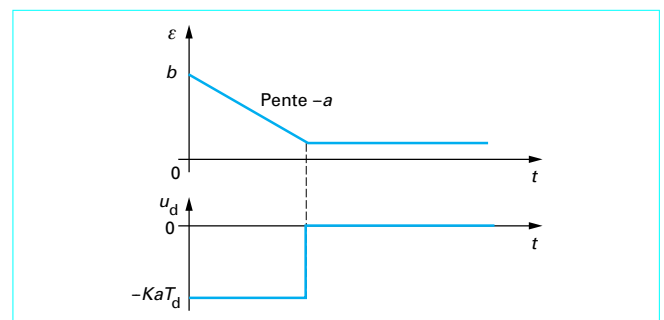


Figure 16 – Action dérivée

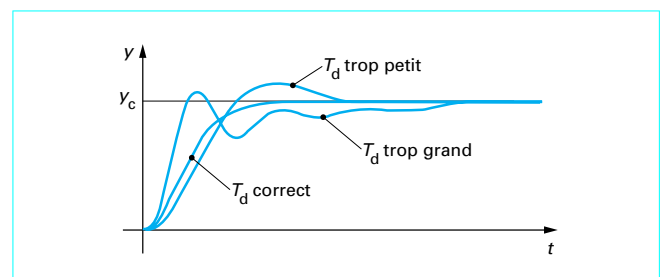


Figure 17 – Influence de l'action dérivée d'un régulateur PID sur la grandeur réglée

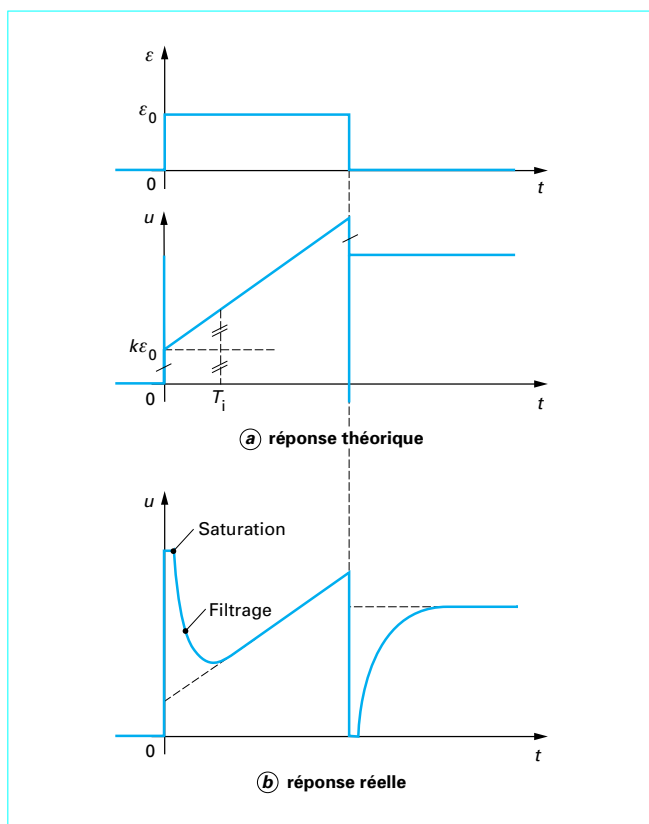


Figure 18 – Réponse d'un régulateur PID

## 4. Techniques de régulation

Selon les cas d'application qui vont être traités maintenant, le schéma de régulation le plus adapté sera proposé [5] [6].

### 4.1 Régulation multizone

#### 4.1.1 Cas d'un four continu

Un four continu (alimenté en continu) comporte en général plusieurs zones de régulation avec un point de consigne propre à chaque zone. Il est possible de considérer que chaque zone se comporte comme un four en tenant compte toutefois de l'interaction entre les zones, ce qui peut conduire à des réglages très différents d'une zone à l'autre. Dans un tel four, le profil de température est spatial.

#### 4.1.2 Cas d'un four discontinu

La division en plusieurs zones d'un four discontinu (ou four batch ou four à chambre) s'impose principalement dans deux cas, lorsque :

- par construction, le four présente une hétérogénéité en température (par exemple, un four isolé en fibre céramique avec une sole en réfractaire lourd) ;

- par nature, la charge présente des hétérogénéités de forme et de matière (par exemple, un four de grande dimension chargé de pièces variées).

Le réglage des paramètres de régulation peut être problématique en cas d'interaction forte entre zones.

#### 4.1.3 Méthode de la zone pilote

Lorsqu'une montée en température homogène est imposée dans tout le four, la technique de la zone pilote est utilisée. Elle consiste à choisir la zone dont, a priori, la montée en température est la plus lente (zone la plus chargée) comme « zone pilote ». Cette dernière est équipée d'une régulation monoboucle classique (figure 6). Par contre pour les autres zones, la grandeur mesurée n'est plus la température de la zone considérée, mais la différence (ou écart) entre cette température et la température de la zone pilote. Cette utilisation particulière des régulateurs s'appelle régulation de zéro avec faible largeur d'échelle.

### 4.2 Régulation programmée

Dans les fours discontinus, le profil de température est souvent imposé variable dans le temps. La solution la plus courante consiste à utiliser un régulateur programmeur permettant l'affichage de plusieurs pentes, rampes ou paliers de température.

Certains traitements thermiques nécessitent une certaine homogénéité en température dans la charge. La méthode du « programme suspendu » peut alors être utilisée. Elle nécessite la mise en place de deux thermocouples dans la charge : un au point susceptible de monter en température le plus rapidement, et un au point susceptible de monter en température le plus lentement. Lorsque l'écart entre les températures ainsi obtenues est supérieur à la tolérance imposée, le déroulement du programme est interrompu : la température du four suit un palier qui dure tant que l'écart ne retrouve pas une valeur inférieure à la tolérance. Cela revient à un allongement du programme.

**Remarque :** En général au cours d'un cycle de traitement, la gamme de température est assez étendue et les paramètres de régulation ne sont pas à leur valeur optimale tout le long du cycle. Une régulation autoadaptative (§ 3.2.2) présente alors un intérêt.

### 4.3 Régulation avec surindexation

La surindexation consiste à utiliser pendant une partie de la montée en température, une consigne supérieure à la consigne finale. Cette méthode nécessite un régulateur à deux index. Le passage de la première consigne à la deuxième se fait soit en fonction de la température de la charge, soit en fonction du temps. Cette méthode ne peut être utilisée qu'avec un four dont l'inertie thermique est faible devant celle de la charge.

**Remarque :** Cette méthode peut être remplacée avantageusement par une régulation cascade ou parallèle (§ 4.4).

### 4.4 Régulation double

Cette régulation est encore appelée régulation de substitution ou override.

Deux régulateurs peuvent être associés pour réaliser des schémas cascades ou parallèles.

Ces schémas trouvent leur utilité quand il est nécessaire par exemple de piloter deux grandeurs physiques avec un seul actionneur, une des grandeurs étant prioritaire sur l'autre. Dans l'exemple de la figure 19, la température des résistances est limitée à sa valeur maximale, tant que la régulation sur la charge n'intervient pas.

La figure 19 illustre l'intérêt d'un tel schéma. Dans la simple régulation, il y a risque de surchauffe des résistances car leur température n'est pas pilotée.

La figure 20 présente un montage cascade dont le schéma fonctionnel est représenté figure 21. Les deux régulateurs sont montés en série, la sortie du premier (maître) entre sur l'entrée consigne externe du deuxième (esclave). La sortie de l'esclave commande le modulateur de puissance.

La figure 22 présente un montage parallèle. Les deux régulateurs commandent en parallèle le modulateur de puissance. Dans ce cas le régulateur de charge est à action inverse et entre sur l'entrée principale (la puissance est proportionnelle au signal de commande) du modulateur, le régulateur de résistance est à action directe et entre sur l'entrée limitation (la limitation de la puissance est proportionnelle au signal de commande) du modulateur.

**Nota :** Un régulateur est à action inverse lorsque la commande agit en sens inverse de la mesure (par exemple la commande décroît quand la mesure croît). Il est à action directe lorsque la commande agit dans le même sens que la mesure.

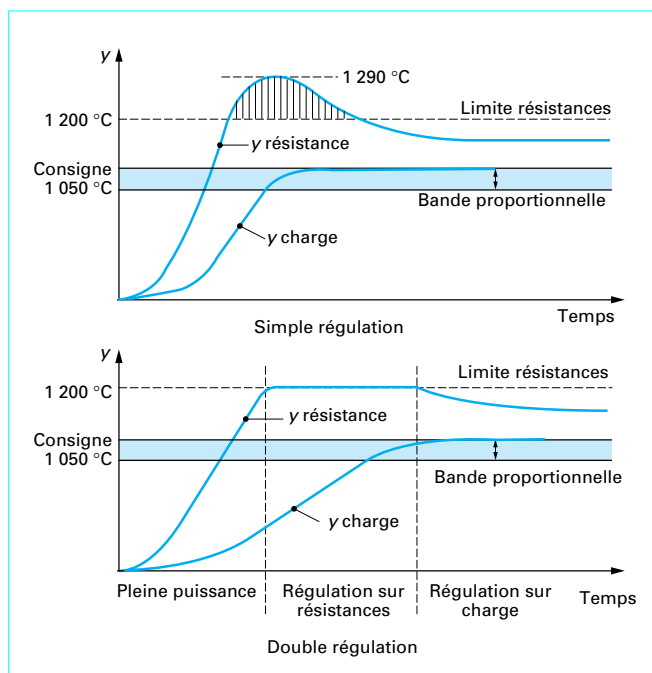


Figure 19 – Intérêt de la double régulation

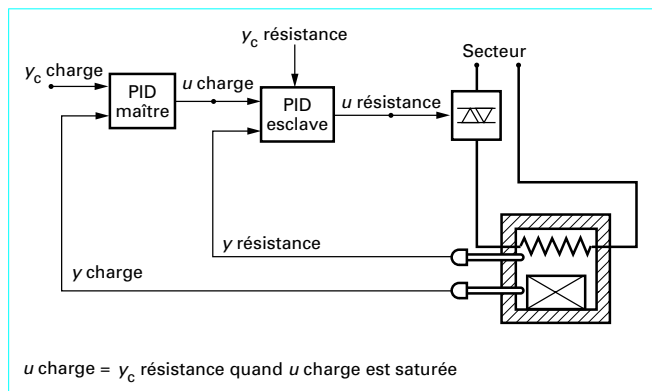


Figure 20 – Exemple de régulation cascade

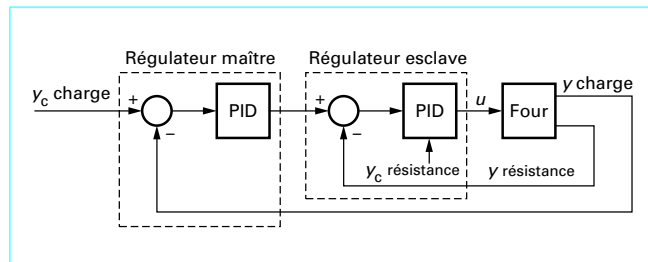


Figure 21 – Schéma fonctionnel d'une régulation cascade

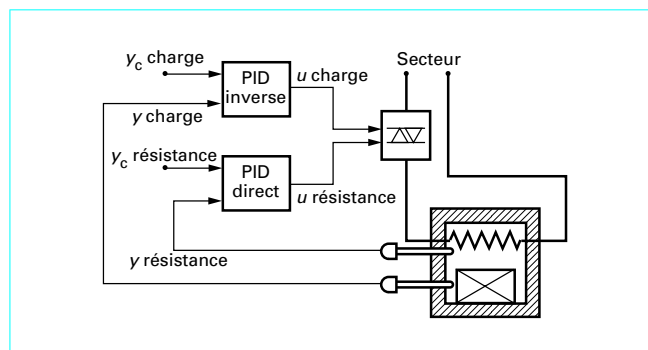


Figure 22 – Premier exemple de régulation parallèle

Sur la figure 23, le régulateur est double et possède une seule sortie qui est le minimum des commandes des deux correcteurs.

### 4.5 Régulation de rapport (ou de proportion ou de ratio)

Traisons cette technique par un exemple de régulation de rapport air/gaz d'un four.

Cette régulation consiste à asservir le débit d'air  $Q_{air}$  au débit du gaz combustible  $Q_{gaz}$  (encore appelé débit libre ou pilote).

La consigne de débit d'air doit répondre à l'équation :

$$C = kQ_{gaz} + d \tag{9}$$

- avec  $C$  consigne de débit d'air,
- $d$  décalage éventuel (ou bias),
- $k$  rapport à respecter.

$Q_{gaz}$  peut être piloté par le régulateur de température du four,  $k$  peut être fonction du pouvoir calorifique du gaz combustible (figure 24).

### 4.6 Régulation à échelle partagée (ou split range)

Cette technique consiste à réaliser un actionneur particulier par un assemblage de plusieurs actionneurs commandés par un seul signal, de manière à obtenir la caractéristique voulue.

Ce montage s'utilise principalement dans deux cas :

- lorsque la variation totale de la commande ne peut être atteinte avec un seul actionneur : exemple d'un réglage de débit à

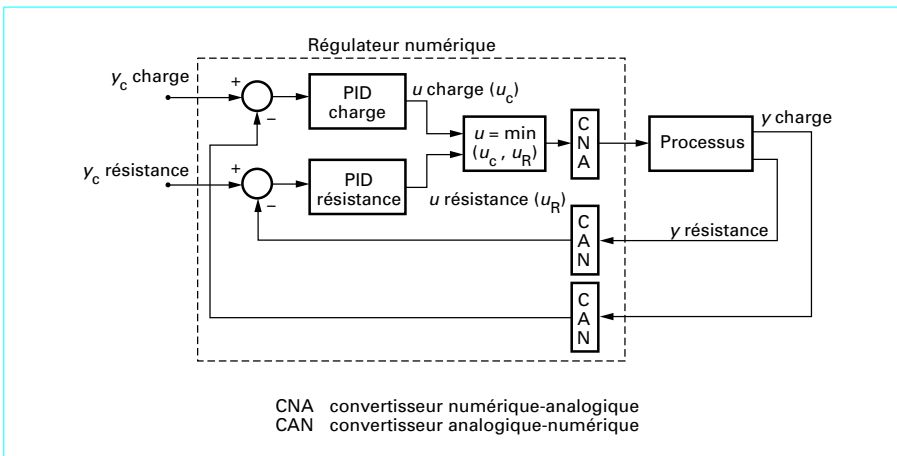


Figure 23 – Deuxième exemple de régulation parallèle

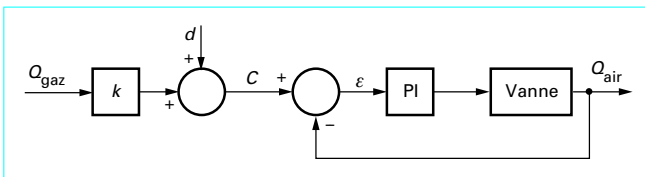


Figure 24 – Exemple de régulation de rapport

l'aide de deux vannes (figure 25) ; la vanne A est utilisée pour les débits faibles et la vanne B pour les débits forts ;

— lorsque deux actions complémentaires ou antagonistes sont nécessaires.

La figure 26 donne l'exemple d'un réglage de pression à l'aide d'une vanne d'admission A et d'une vanne d'échappement B.

### 4.7 Régulation chaud-froid

Cette technique est surtout utilisée sur des procédés qui nécessitent deux actions correctrices antagonistes.

L'exemple le plus courant est celui de la régulation de température d'une enceinte climatique où le régulateur possède deux sorties distinctes (figure 27). Une sortie commande une résistance chauffante et l'autre actionne un circuit réfrigérant.

Le régulateur comporte deux fonctions PID indépendantes car en général les réglages pour le chauffage sont différents de ceux pour le refroidissement.

Les entrées mesure et consigne sont communes aux deux PID.

Lorsque la mesure est comprise entre  $y_c + H$  et  $y_c - H$ , les deux commandes sont à zéro (bande morte). Lorsque  $y > y_c + H$ , seul le refroidissement agit et lorsque  $y < y_c - H$ , seul le chauffage agit.

### 4.8 Régulation de tendance

Cette régulation est encore appelée :

- régulation prédictive ;
- feed forward control ;
- régulation a priori ;
- régulation mixte.

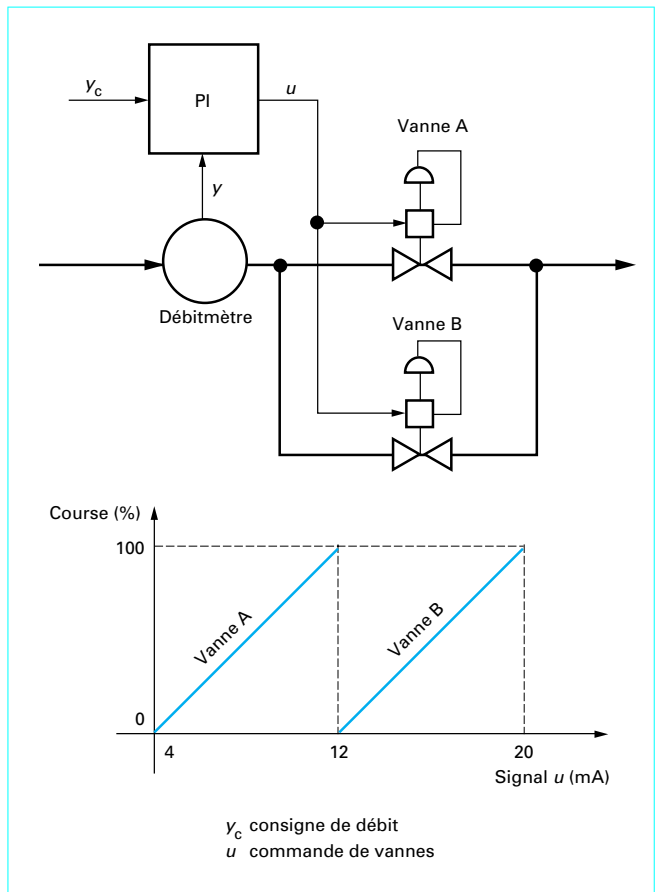


Figure 25 – Régulation de débit

Cette technique est très utile pour améliorer les performances d'un système réglé par une boucle fermée simple. En effet, dans une telle boucle, le régulateur ne réagit que lorsque la grandeur de sortie varie suite à une perturbation ou une variation de consigne. Si la perturbation est mesurable, son effet sur la sortie peut être anticipé par un correcteur à action prédictive, c'est-à-dire qui agit avant la

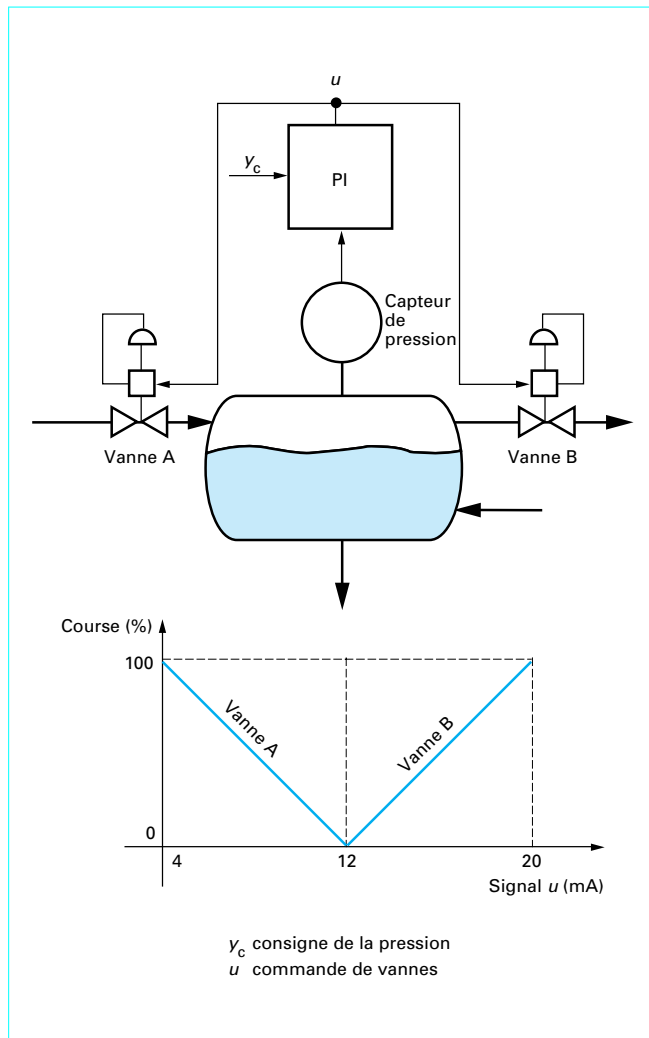


Figure 26 – Régulation de pression

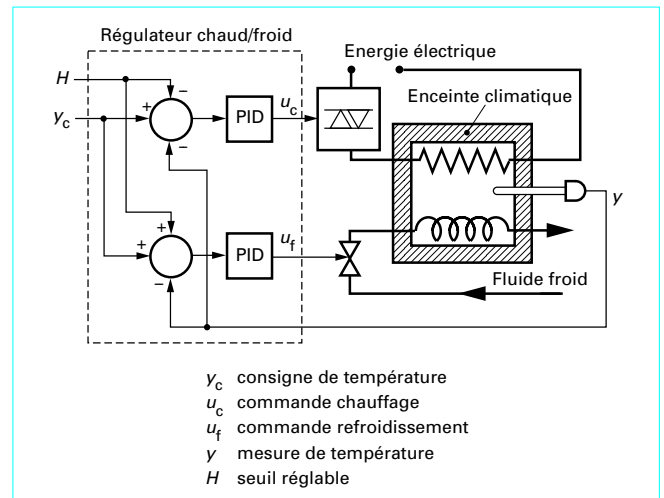


Figure 27 – Régulation d'une enceinte climatique

boucle fermée principale. La figure 28 donne l'exemple d'un réchauffeur d'air avec débit ou consigne variable.

C1 et C2 sont des correcteurs rajoutés sur la boucle principale. Les paramètres de C1 et C2 devront être réglés de telle manière qu'une variation du débit d'air  $D$  ou de la consigne de la température de l'air  $y_c$  ait l'influence la plus faible possible sur  $y$ . Dans le cas du réchauffeur, C1 peut être un correcteur à avance de phase et C2 un simple gain.

#### 4.9 Régulation des systèmes à retard

Il s'agit ici des systèmes stables à retard pur important. Pratiquement dès que le retard pur  $\tau$  dépasse la moitié de la valeur de la constante de temps principale  $\theta$  du procédé à régler, les performances d'un régulateur classique PID sont nettement limitées (la dynamique en boucle fermée devient plus lente que la dynamique en boucle ouverte). Pour pallier ce problème, on utilise un prédicteur de Smith dont le schéma fonctionnel est le suivant, en considérant un modèle du procédé du premier ordre avec retard pur (modèle de Broïda, § 5.1) et un correcteur PI (figure 29).

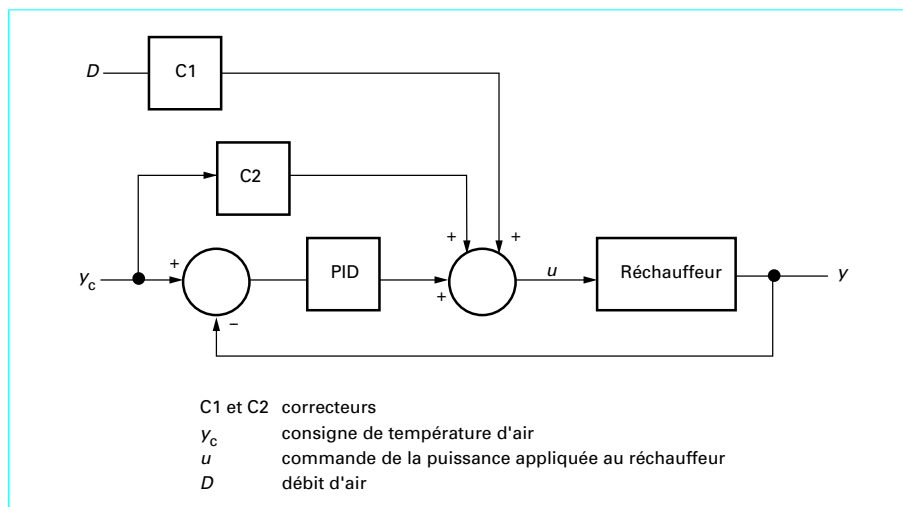


Figure 28 – Régulation d'un réchauffeur d'air

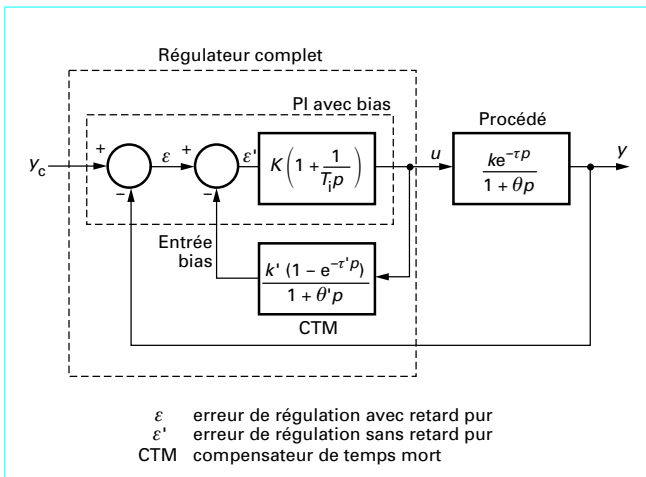


Figure 29 – Régulation avec compensateur de temps mort

Le régulateur se compose d'un correcteur PI avec une entrée sur l'écart (bias) et d'un compensateur de temps mort (CTM).

Pour que le régulateur PI « voit » le procédé comme un système de premier ordre sans retard, il faut choisir  $k' = k$ ,  $\tau' = \tau$ ,  $\theta' = \theta$ , ce

qui nécessite une identification préalable du procédé pour déterminer  $k$ ,  $\tau$  et  $\theta$ .

Pour les réglages du PI, on peut prendre :

$$T_i = \theta \text{ et } K \geq 0,7 \frac{\theta}{\tau k}$$

**Remarque :** en pratique, le procédé est rarement identifiable exactement à un premier ordre, il ne faut donc pas augmenter exagérément la valeur de  $K$  sous peine de rencontrer des problèmes de stabilité.

### 4.10 Régulation floue [7]

Un certain engouement a lieu pour les régulateurs « flous ». En fait, ces appareils ne prétendent pas remplacer les autres régulateurs mais se présentent comme une solution complémentaire. Quand le processus n'est pas modélisable ou trop coûteux à modéliser, alors le régulateur flou peut être une alternative intéressante.

Analysons le principe à travers un exemple simple de régulation de la température d'un four en agissant sur la vanne d'admission du gaz combustible.

Le fonctionnement est illustré par les figures 30 et 31.

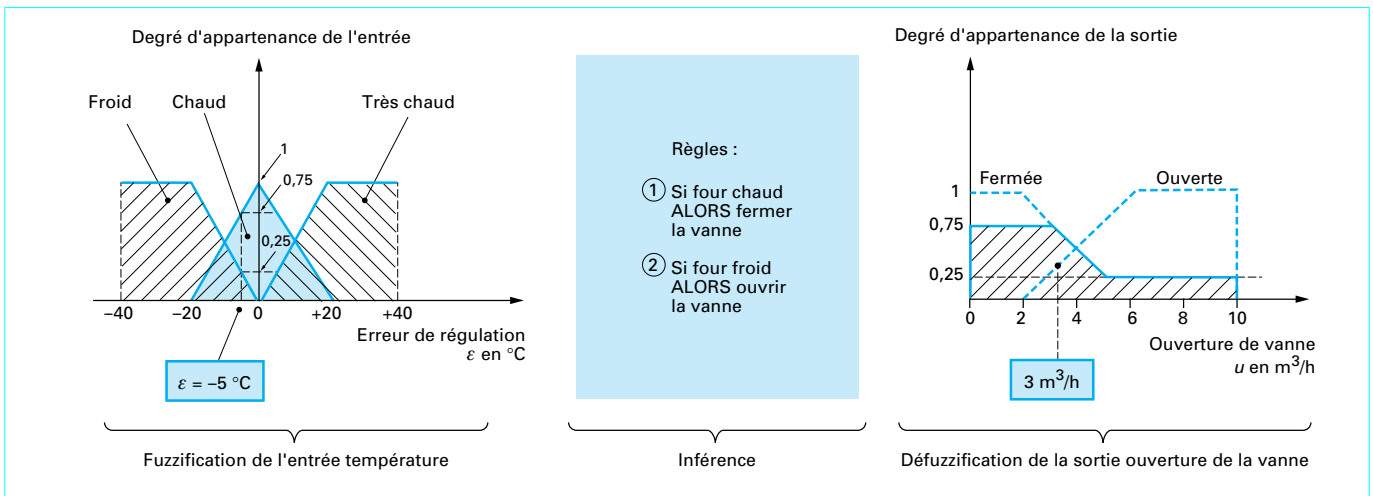


Figure 30 – Principe d'un régulateur flou destiné à piloter une température en agissant sur une vanne

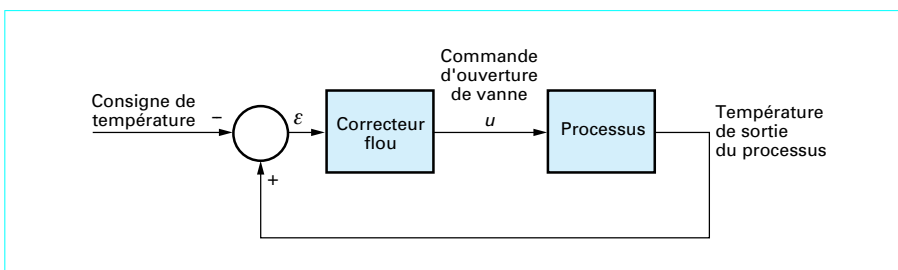


Figure 31 – Schéma fonctionnel de la figure 30

**1<sup>er</sup> étape** : la grandeur à régler (température du four par exemple de 495 °C) est comparée à la consigne (500 °C) pour donner  $\varepsilon = -5$  °C.  $\varepsilon$  est transformée en données floues (fuzzification) à partir des sous-ensembles flous de l'entrée (1 triangle et 2 trapèzes) : le four est chaud à 75 % et froid à 25 %.

**2<sup>e</sup> étape (inférence)** : des règles, déduites de l'analyse qualitative du procédé, sont appliquées aux valeurs floues de l'entrée pour sélectionner les zones d'appartenance aux sous-ensembles flous de la sortie (2 trapèzes), et dont l'intersection avec les valeurs 0,75 et 0,25 donne la zone hachurée.

**3<sup>e</sup> étape (défuzzification)** : elle consiste à générer une valeur numérique utilisable par le système à commander, à partir de l'ensemble flou sélectionné de la sortie (zone hachurée). Dans notre exemple, la valeur de sortie est donnée par le barycentre de la surface hachurée, soit  $u = 3$  m<sup>3</sup>/h.

**■ Intérêt du flou :**

- modèle mathématique non nécessaire ;
- système pouvant être très non linéaire ;
- temps de développement du régulateur réduit ;
- connaissances en automatique réduites.

**■ Inconvénients :**

- analyse qualitative poussée du système nécessaire ;
- pas de certitude d'avoir des réglages optimaux.

Il faut noter que la fuzzification (ou flouification) qui consiste à passer d'une valeur quantitative à une notion qualitative crée une perte d'informations qui a tous les risques d'aller dans le sens d'une réduction des performances.

### 4.11 Régulations avancées

Le recours à ces techniques de régulation, plus onéreuses et plus difficiles à mettre en œuvre qu'un simple PID, se justifie lorsque les autres techniques font échec (manque de précision, manque de robustesse vis-à-vis des erreurs de modèle ou des perturbations).

#### 4.11.1 Régulation par modèle interne [8]

Le principe de base d'une telle structure est donné par la figure 32.

Le modèle  $P_n$  du procédé peut être compliqué et non linéaire puisqu'il n'intervient pas dans le calcul du correcteur  $Q$ .  $Q$  peut être un simple gain (inverse du gain statique du procédé  $P$ ) si l'on désire que la dynamique en boucle fermée soit identique à la dynamique en boucle ouverte.

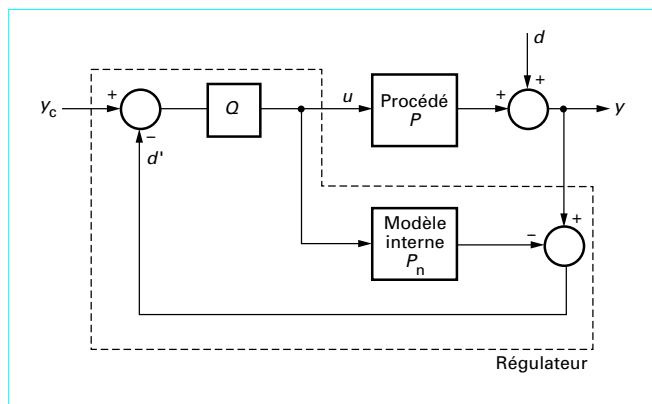


Figure 32 – Régulation par modèle interne

Le signal de retour  $d' = (P - P_n) u + d$  exprime l'incertitude entre le procédé et le modèle et l'effet des perturbations. Si  $P_n$  représente parfaitement le procédé  $P$ , alors l'erreur de comportement  $d' = d$  et le régulateur annule l'effet de la perturbation  $d$ .

D'autres variantes telle que le correcteur CZ proposé par CEGE-LEC YOKOGAWA ou la Régulation Qualitative Optimale (RQO) proposée par Dindeleux permettent de mettre en œuvre cette technique de façon simple.

#### 4.11.2 Autres régulations avancées [9] [10]

Ces régulations sont encore peu utilisées à l'heure actuelle car leur mise en œuvre nécessite des moyens de calcul plus importants et donc d'un coût plus élevé que les autres régulations, ce qui est justifié dans des cas très pointus où une étude spécifique est nécessaire.

On peut citer la commande prédictive, la commande par retour d'état, la commande  $H_2$  optimale. Elles nécessitent toutes une modélisation du système et le choix de la dynamique en boucle fermée.

## 5. Méthodes de réglage

Voici quelques méthodes couramment utilisées et valables pour des régulateurs PID du type :

$$\frac{u}{\varepsilon} = K \left( 1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p \right)$$

### 5.1 Méthode de Broïda

Le système est modélisé par  $\frac{ke^{-\tau p}}{1 + \theta p}$ , identifié à partir d'une réponse indicielle en boucle ouverte (figure 33). La méthode de Broïda consiste à observer cette réponse et à l'assimiler à la réponse d'un système du premier ordre (de constante de temps  $\theta$ ), avec un retard pur  $\tau$ . Les points d'ordonnées 28 % et 40 % (donnant respectivement les temps  $t_1$  et  $t_2$ ) permettent de calculer  $\theta$  et  $\tau$  par les formules :

$$\begin{aligned} \tau &= 2,8 t_1 - 1,8 t_2 \\ \theta &= 5,5 (t_2 - t_1) \\ k &= \frac{\Delta y C}{\Delta u E} \end{aligned}$$

Elle est adaptée aux systèmes stables avec retard pur éventuel. Les réglages sont donnés par les formules :

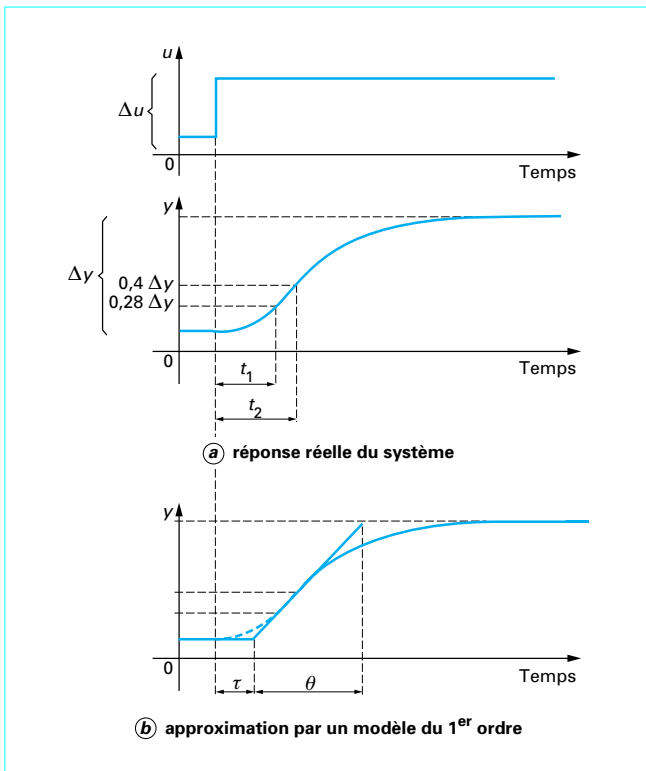
$$\begin{aligned} BP &= 0,8 \frac{\tau}{\theta} \frac{\Delta y}{\Delta u} \frac{C}{E} 100 \\ T_i &= 2 \tau \\ T_d &= 0,4 \tau \end{aligned} \tag{10}$$

avec  $BP$  (%) bande proportionnelle à afficher au régulateur,  
 $\Delta y$  variation de la sortie correspondant à  $\Delta u$ ,  
 $C$  échelle ou étendue de la commande  $u$ ,  
 $E$  échelle ou étendue de la sortie  $y$

### 5.2 Méthode des oscillations limites

Cette méthode, encore appelée méthode de Ziegler et Nichols, s'effectue en boucle fermée et s'impose pour un procédé instable en boucle ouverte. Elle n'est pas adaptée aux processus à retard important.




**Figure 33 – Identification par la méthode de Broïda**

Dans un premier temps, il faut annuler les actions intégrale et dérivée, puis rechercher la limite de stabilité (naissance des oscillations) en agissant sur l'action proportionnelle et noter la bande proportionnelle  $BP_c$  et la période des oscillations  $T_c$ . Les réglages sont alors :

$$\begin{cases} BP(\%) = 1,6 BP_c \\ T_i = 0,5 T_c \\ T_d = 0,12 T_c \end{cases} \quad (11)$$

### 5.3 Méthode des oscillations tout ou rien

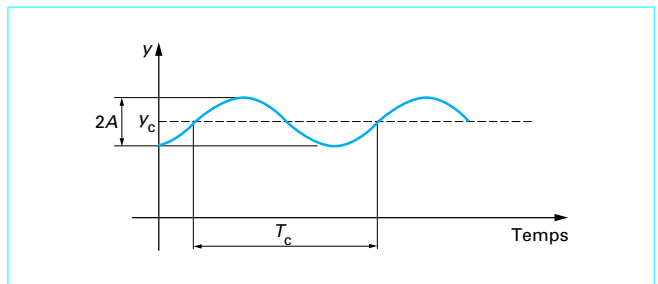
Cette méthode évite la recherche du gain critique précédent, mais reste moins précise et sollicite beaucoup l'actionneur.

On annule toutes les actions sur le PID (le gain  $K$  du régulateur est alors maximal). On a ainsi des oscillations stables dont on relève l'amplitude  $2A$  et la période  $T_c$  (figure 34).

Les réglages sont les suivants :

$$\begin{cases} BP(\%) = 1,6 \frac{A}{E} 100 \\ T_i = 0,5 T_c \\ T_d = 0,1 T_c \end{cases} \quad (12)$$

**Remarque :** ces réglages sont des ordres de grandeur qu'il convient souvent d'affiner sur le processus réel, de façon empirique.


**Figure 34 – Méthode des oscillations tout ou rien**

## 6. Gestion et conduite hiérarchisées

Depuis plusieurs années, l'introduction croissante des micro-processeurs a permis une découpe fonctionnelle du processus à automatiser en sous-ensembles capables de communiquer entre eux. D'où l'émergence de nouvelles architectures de commandes basées sur :

- des capteurs et des actionneurs intelligents ;
- des moyens de communication performants ;
- des automates et des micro-ordinateurs industriels ;
- des logiciels de supervision et de contrôle-commande.

Ces types d'architecture peuvent remplir les fonctions suivantes (figure 35) :

- la régulation des différentes boucles du système réalisée dans l'unité de contrôle local ;
- le contrôle séquentiel de l'installation réalisé au niveau de la supervision ;
- l'exploitation de données (archivage, visualisation, journal d'événements pour la maintenance), également réalisée au niveau de la supervision ;
- l'optimisation de la conduite pour la prise en compte du tarif de l'énergie, des impératifs de production, de la qualité.

On distingue en général 4 niveaux dans une conduite hiérarchisée :

- le niveau 0 : boucle de régulation de base (monovariable) ;
- le niveau 1 : plusieurs boucles de régulation associées (multivariable) ;
- le niveau 2 : optimisation (points de fonctionnement fonctions d'impératifs technico-économiques) ;
- le niveau 3 : optimisation économique (consignes fonctions de critères globaux).

Chaque niveau reçoit les consignes du niveau supérieur.

La figure 36 donne un exemple d'application sur un four de traitement du verre où seuls apparaissent les niveaux 0 et 1.

#### ■ Procédé

C'est un four qui se compose de trois zones de chauffage par résistances, dont la puissance est modulée par gradateurs à thyristors, et d'une zone de refroidissement par ventilation motorisée et modulée par une vanne avec signal de recopie de sa position.

#### ■ Contrôle

La régulation est assurée par un système informatique industriel µMAC 6000 de Analog Devices qui reçoit toutes les informations capteurs et envoie les différentes commandes.

#### ■ Supervision

Elle se compose d'un écran de visualisation des données physiques en temps réel et d'une unité de disquettes qui permet d'archiver les données en vue d'une exploitation future.

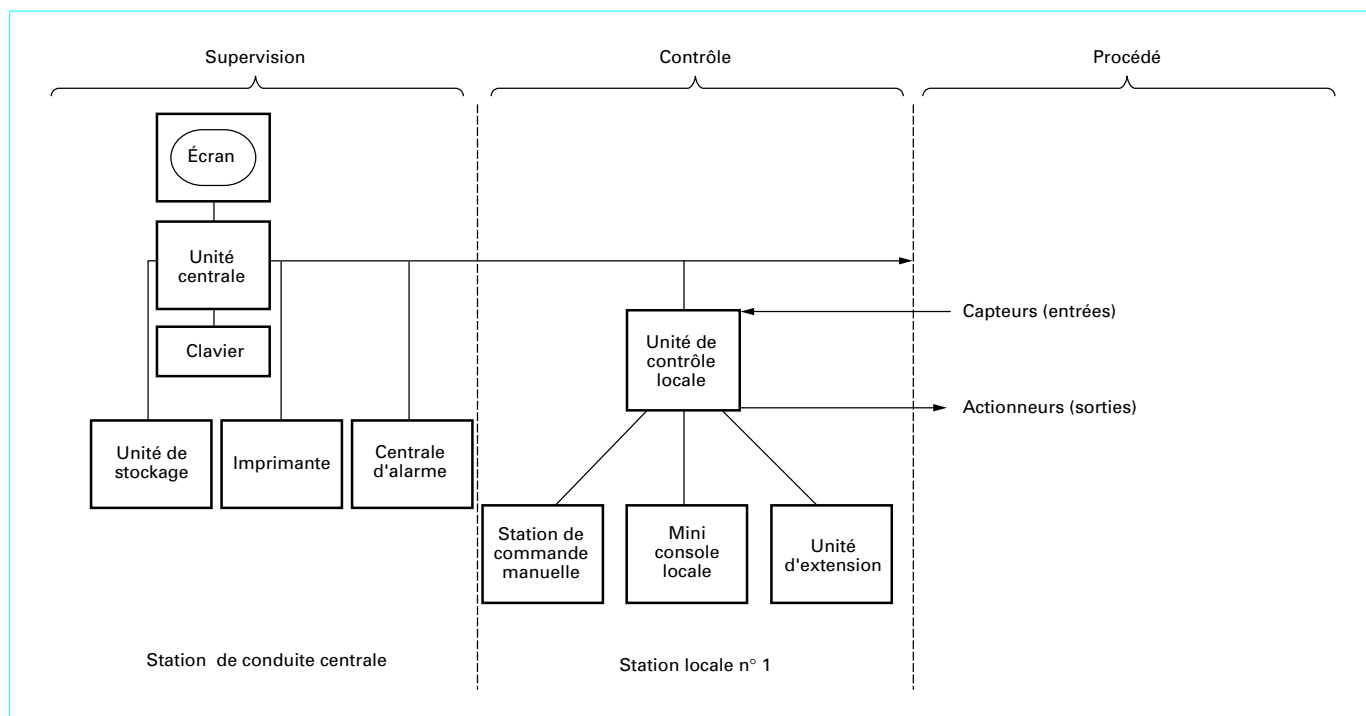


Figure 35 - Exemple d'architecture

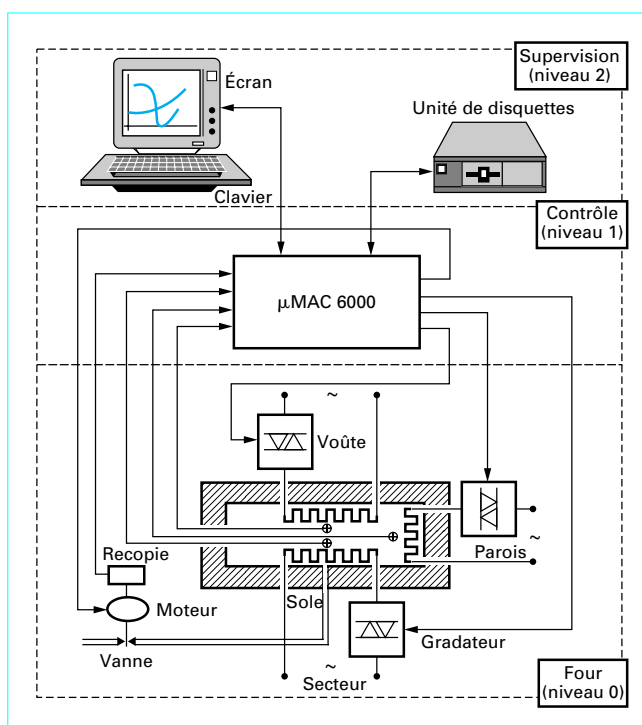


Figure 36 - Schéma de principe de l'installation

# Automatisme et régulation des équipements thermiques

par **Jean-François BOURGEOIS**

*Ingénieur-Chercheur à la Direction des Études et Recherches d'Électricité de France (Groupe Effet Joule)*

Liste de quelques matériels de régulation	
Constructeur	Nom commercial
<b>Régulateurs de tableau</b>	
■ <b>PID fixes</b>	
– <b>analogiques</b>	
Chauvin Arnoux	STATOP
Eurotherm	805
– <b>numériques</b>	
Chauvin Arnoux	PROREG
Contrôle Bailey	
Coréci	MINICOR
Eurotherm	808/847
Foxboro	
Gulton	WEST 2072
Schlumberger	
Matra	MICON P100
Honeywell	UDC 6000
West	West 6500
■ <b>PID autorégulants</b>	
Coréci	MICROCOR III
Schlumberger	PYROMAT 300
Chauvin Arnoux	MULTITOP
■ <b>PID autorégulants et autoadaptatifs</b>	
Bailey-Sereg	PYROMAT 320S
Eurotherm	818, 902/903/904
Foxboro	EXACT
Gulton	WEST 2075
Coréci	MICROCOR V
West	WEST 5010

Liste de quelques matériels de régulation	
Constructeur	Nom commercial
<b>Régulateurs de tableau</b>	
■ <b>PID flous</b>	
Omron	E 5 A F
Yokogawa	UT 14/15/35
West	WEST 4200
■ <b>Numériques haut de gamme</b>	
MCC	RHAPSODIE
SIEMENS	SIPART DR 24
LERIS INDUSTRIE	LS 6004
<b>Systèmes numériques</b>	
Analog Devices	μ MAC 6000
Barber Colman	EDAC
Contrôle Bailey	MICROZ
Leeds & Northrup	MICROMAX
Measurex	
TMA	(Contrôle d'atmosphère)
Omron	C 200 H
Siemens	TELEPERM MAS 215
<b>Logiciels de contrôle-supervision</b>	
Adaptech	PIM, PCREG, EXPERT-AD, GRAP, PROGRAM CC
Keitley	ASYST, ASYSTANT
Sacasa	LABTECHNOTEBOOK, LT CONTROL
Styrel	LABWINDOWS, LABVIEW
TCS	LOOPDRAW, WIZCON

## Bibliographie

### Livres, ouvrages

- [1] *Les fours industriels à résistances électriques, conception-choix et utilisation.* Collection Electra 1989 DOPEE 85 CFE, Service diffusion de la documentation, Espace Elec., CNIT, *Les pompes à chaleur dans l'industrie. Les chaudières électriques.*
- [2] *Les régulateurs industriels Fichier produits fournisseurs.* 1988 CETIM.
- [3] RACHID (A.). – *Systèmes de régulation.* 411 p. 1996 Masson.
- [4] BOURGEOIS (J.F.). – *Panorama sur les techniques actuelles de régulation des fours et des réchauffeurs électriques.* 100 p. 1993, Note EDF HE 25 W 84 Direction des Études et Recherches.
- [5] BHALY. – *Boucles de régulation.* 298 p. 1988 Kirk.

- [6] DINDELEUX (D.). – *Technique de la régulation industrielle.* 175 p. 1981 Eyrolles.
- [7] BÜHLER (H.). – *Réglage par logique floue.* 181 p. 1994 Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- [8] DE LARMINAT (Ph.). – *Automatique, commande des systèmes linéaires.* 321 p. 1993 Hermès.
- [9] RICHALET (J.). – *Pratique de la commande prédictive.* 349 p. 1993 Hermès.
- [10] LANDAU (I.D.). – *Identification et commande des systèmes.* 535 p. 1993 Hermès.
- MARET (L.). – *Régulation automatique.* 423 p. 1987 Presses Polytechniques Romandes.
- Fiches d'applications des régulateurs Visireg.* 81 p. 1991 MCC, Mesure, Contrôle, Commande.
- ZANNE (C.). – *Guide de choix des Systèmes Numériques de Contrôle-Commande.* 1991 Kirk.

### Reuves

- Régulateurs intelligents. Une nouvelle conception autour des boîtes à algorithmes.* Chimie Magazine n° 125 - Août/Septembre 1994 p. 54 à 56.
- Contrôle de processus. À chaque application son mode de régulation.* Mesures n° 660 Décembre 1993 p. 52 à 56.
- Contrôle de processus. Modèle ou pas modèle ?* Mesures n° 683 - Mars 1996 p. 71 à 74.
- Control Systems.* IEEE Control Systems Society.
- European Journal of Control Springer*
- Journal Européen des Systèmes Automatisés.* Rairo - Apii - Jesa - Hermès.
- Le chauffage électrique des liquides et des gaz dans l'industrie. Le tube à passage de courant.* Les cahiers de l'ingénierie Septembre 1994 EDF Industrie. CFE Service diffusion de la documentation Espace Elec., CNIT.