

- Que la caractéristique totale est différente de celle que l'on obtiendrait avec une seule vanne.

La caractéristique totale peut être modifiée (meilleure linéarité) par les réglages des positionneurs. Les nouvelles valeurs de réglage peuvent être obtenues graphiquement.

On joint par une droite les valeurs de CV 0,02 et 5. A la valeur CV = 1 on trace une horizontale qui coupe la droite déterminée précédemment en un point. La verticale abaissée de ce point détermine les nouveaux réglages qui sont :

Pour FCV 1A : 4 à 7,2 mA.  
Pour FCV 1B : 7,2 à 20 mA.

Ces réglages ne sont pas réalisables sur tous les positionneurs. Les systèmes numériques comportent des blocs logiciels (générateurs de fonctions) qui permettent d'obtenir le résultat précédent en modifiant le signal de commande des deux vannes.

- Que si le CV de FCV 1A est choisi, pour des raisons économiques, trop petit, ceci conduit à utiliser un débitmètre ayant une dynamique de mesure élevée.
- Que la caractéristique installée totale est presque linéaire avec les choix faits précédemment.

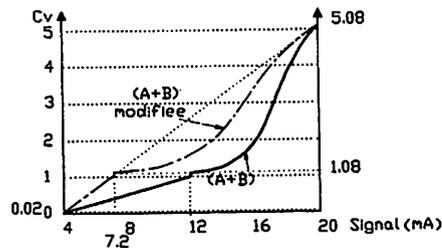


Fig. 4.85 : Caractéristique installée totale.

*Intruse que -*

### Application 2

La figure 4.83 représente une régulation de pression d'un réservoir par admission et évacuation. Il y a deux grandeurs réglantes, donc deux vannes de réglage agissant en sens inverse en régulation. Lorsque la pression dans le réservoir est inférieure à la consigne, on admet du gaz et on évacue le gaz dans le cas inverse.

Le choix des caractéristiques est le même pour PCV 1A et 1B. Il dépend de la caractéristique statique du procédé en admission, la régulation en évacuation ayant une importance moindre.

Les positionneurs sont réglés avec une zone de non recouvrement, par exemple, 4 à 12 mA pour PCV 1A et 12,2 à 20 mA pour PCV 1B.

## Régulateur et régulation discontinus

5.1 Régulation par tout ou rien avec régulateur et organe de réglage à deux positions.....	140
5.2 Régulation avec régulateur discontinu modulé PID associé à un organe de réglage à deux positions.....	146
5.3 Régulation chaud-froid avec régulateur discontinu modulé PID.....	158
5.4 Régulation avec régulateur discontinu modulé PID et organe de réglage motorisé.....	160

## NOTATIONS UTILISÉES DANS LE CHAPITRE 5

BP	: Bande proportionnelle.
C	: Consigne locale.
Cy	: Cycle.
d	: Course.
$\Delta, S_e$	: Écart entre seuils.
$G_r$	: Gain.
h	: Hystérésis.
H	: Seuil.
M	: Mesure.
$n_i$	: Nombre d'impulsions.
R, RI	: Résistance.
S	: Sortie, état.
t	: Temps.
$t_c$	: Temps de conduction.
$t_i$	: Durée d'impulsion.
T, $T_f$	: Période.
$T_i$	: Période d'intégrale.
$T_d$	: Période de dérivée.
$t_{co}$	: Temps de conduction pour $M = C$ .
TT	: Temps de course.
TP	: Période des impulsions.
v	: Vitesse.

La régulation discontinue trouve sa place dans la régulation en boucle fermée de procédés utilisant des organes de réglage tels que contacteur électrique, unité de commande à thyristors, électrovanne, résistance électrique, vanne motorisée...

La discontinuité se situe au niveau du signal de sortie du régulateur. Ce signal de sortie peut prendre deux positions ou deux états 0 % et 100 %.

Les régulateurs discontinus, associés aux organes de réglage cités précédemment, constituent des ensembles généralement meilleur marché qu'en continu.

En général le régulateur est monobloc mais peut être incorporé dans un système numérique.

Contrairement à la régulation continue, la technologie de l'organe de réglage en discontinu impose un régulateur spécifique. Ceci conduit à une étude de la régulation propre au type d'organe de réglage.

De ce fait, nous développons les cas typiques de régulation discontinue suivants :

- Par tout ou rien et tout ou peu.
- Modulée PID associée à un organe de réglage à deux positions.
- Modulée PID associée à un organe de réglage motorisé.

Le tableau 5.1 donne une classification des régulations discontinues étudiées.

Tableau 5.1 : Classification des régulations discontinues.

Types de régulation	Régulateur utilisé		Organe de réglage
	Appellation	Signaux	
Tout ou rien (TOR) ou Deux états (On - Off control)	- Pressostat - Thermostat - Relais TOR - Régulateur TOR : - à 2 positions - à 2 états - à 2 places (Two steps controller)		Relais agissant sur résistance, électrovanne
Tout ou peu (T.O.P.)	Identique		Identique + charge de base
Modulée PID (3 terms incremental control)	- A temps de cycle fixé. • A largeur d'impulsion variable • A fréquence d'impulsion variable.		1 relais agissant sur résistance, électrovanne, pompe doseuse
	- Pour organe motorisé.		2 relais agissant sur un moteur à 2 sens de marche

Dans ce chapitre, on traite également le cas particulier des régulateurs chaud/froid.

### 5.1 RÉGULATION PAR TOUT OU RIEN AVEC RÉGULATEUR ET ORGANE DE RÉGLAGE A DEUX POSITIONS

Elle est utilisée sur les procédés à très grande inertie et à faible temps mort, où l'on n'a pas besoin d'une régulation précise.

La régulation de température du four électrique de la figure 5.1 est un exemple d'utilisation.

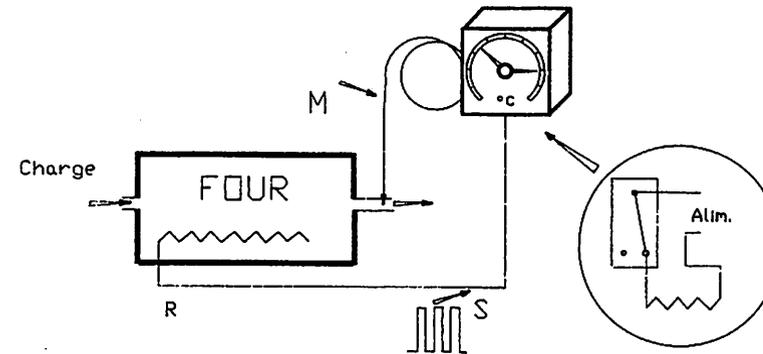


Fig. 5.1 : Régulation de température d'un four.

Le chauffage de la charge est assuré par une résistance électrique. Lorsque la température de la charge est inférieure à la consigne, la régulation met en service la résistance électrique, la température croit et lorsqu'elle atteint la consigne, le régulateur met hors service la résistance. Le cycle se répète ainsi en permanence.

### 5.11 ÉTUDE DU RÉGULATEUR

#### 5.111 Constitution générale

Le régulateur souvent appelé régulateur tout ou rien est électromécanique ou électronique. Monté localement, il est parfois aveugle ou avec indication de la mesure et la consigne (fig. 5.1 et 5.2). Le capteur de mesure vient en général directement sur le régulateur.

La sortie du régulateur commande un relais électromécanique à contact inverseur libre de potentiel ou un relais statique. Dans les deux cas le pouvoir de coupure est limité. En général il n'y a pas de commande manuelle sur ce régulateur. Les pressostats et les thermostats utilisés dans les systèmes d'alarme sont également employés comme régulateurs tout ou rien.

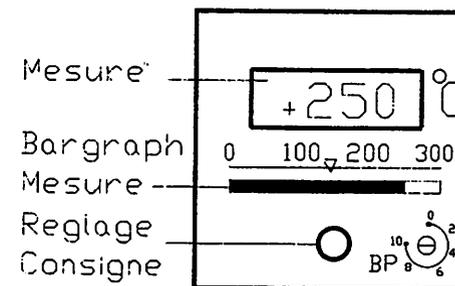


Fig. 5.2 : Face avant d'un régulateur TOR numérique.

5.112 Fonctionnement du régulateur

Régulateur TOR sans hystérésis

La figure 5.3 montre l'allure de la mesure M de température et la sortie du régulateur du four de la figure 5.1. La sortie S est observée à l'aide d'un voltmètre connecté entre le commun et le contact travail. On observe que lorsque :

$$\begin{aligned} M > C & \quad S = \text{état 0} \\ M < C & \quad S = \text{état 1} \end{aligned}$$

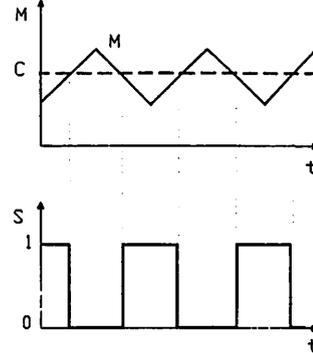


Fig. 5.3.

Régulateur TOR avec hystérésis

L'hystérésis h est un phénomène que l'on constate sur certains appareils : elle est équivalente à un écart sur la consigne.

La figure 5.4 montre par rapport à la figure 5.3 que l'amplitude de la mesure de température et la période de commutation de la sortie augmentent.

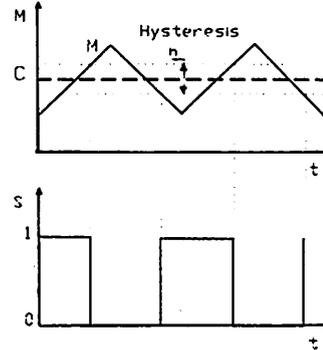


Fig. 5.4.

5.12 ÉTUDE DE LA RÉGULATION TOUT OU RIEN

Considérons la régulation de température de la charge du four (fig. 5.1) en utilisant un régulateur TOR. La régulation introduit une oscillation permanente de la grandeur réglée autour de la consigne. Cette oscillation est caractérisée par sa période et son amplitude en fonction de la position de la consigne (fig. 5.5).

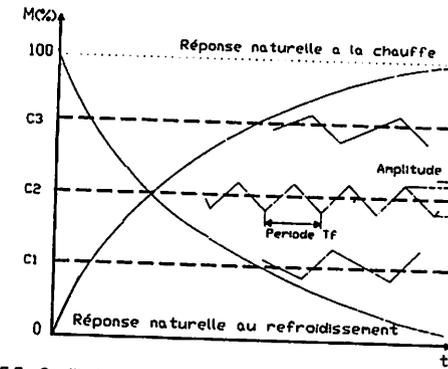


Fig. 5.5 : Oscillation de la mesure suivant la position de la consigne.

5.121 Relations entre la grandeur réglée et le procédé

Avec un régulateur TOR (fig. 5.6)

En assimilant le procédé à un premier ordre avec retard et avec des amplitudes faibles de la grandeur réglée, il est possible de remplacer les exponentielles par leur tangente au point de fonctionnement.

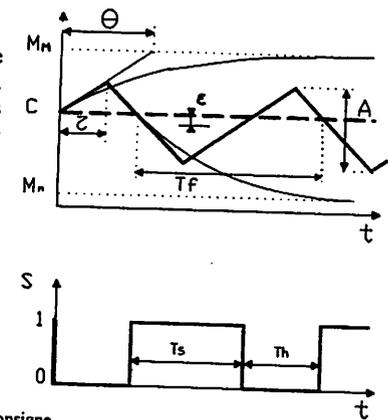


Fig. 5.6.

- Avec :
- A : amplitude crête à crête des oscillations.
  - $\tau$  : temps mort du procédé.
  - $\theta$  : constante de temps du procédé.
  - MM : valeur maxi de la grandeur réglée sans régulation.
  - Mm : valeur mini de la grandeur réglée sans régulation.
  - $\epsilon$  : écart de statisme entre la mesure moyenne et la consigne.
  - $T_s$  : temps de mise sous tension de l'organe de réglage.
  - $T_h$  : temps de mise hors tension de l'organe de réglage.
  - $T_f$  : période de fonctionnement.

Lorsque la consigne se trouve à 50% de  $(MM - Mm)$  et si les caractéristiques du procédé sont identiques à la chauffe et au refroidissement, on démontre que :

$$\boxed{A = \frac{\tau}{\theta} (MM - Mm)} \quad \boxed{T_f = 4\tau} \quad \boxed{\epsilon = 0}$$

$$\boxed{\frac{T_s}{T_h} = \frac{C}{(MM - Mm) - C}}$$

**Avec un régulateur TOR à seuil réglable**

L'hystérésis naturelle de commutation h est assimilable à un seuil non réglable. Δ est l'écart entre les seuils de basculement.

Note : L'écart, parfois appelé fourchette, différentiel ou sensibilité est réglable. Le fonctionnement de la régulation reste identique (fig. 5.7), mais les résultats sont différents.

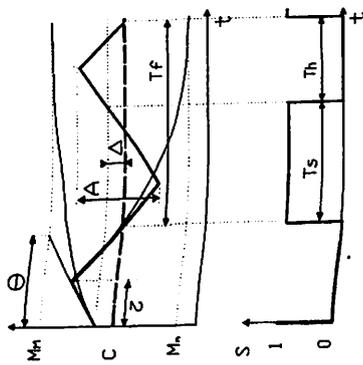


Fig. 5.7.

En faisant les mêmes assimilations que dans le cas d'utilisation d'un régulateur sans seuil, on démontre que :

$$A = \frac{\tau}{\theta} (Mm - Mm) + \Delta$$

$$Tr = 4 \left( \tau + \theta \frac{\Delta}{Mm - Mm} \right)$$

L'intérêt du seuil est d'augmenter la période Tr, au détriment de l'amplitude des oscillations A, ce qui a pour conséquence d'allonger la durée de vie de la sortie du régulateur.

**5.122 Régulation Tout ou Peu**

Pour obtenir des conditions de fonctionnement plus favorables on ajoute une résistance R, une résistance R1 toujours en service (fig. 5.8). Bien que l'on utilise soit un TOR, la régulation s'appelle tout ou peu.

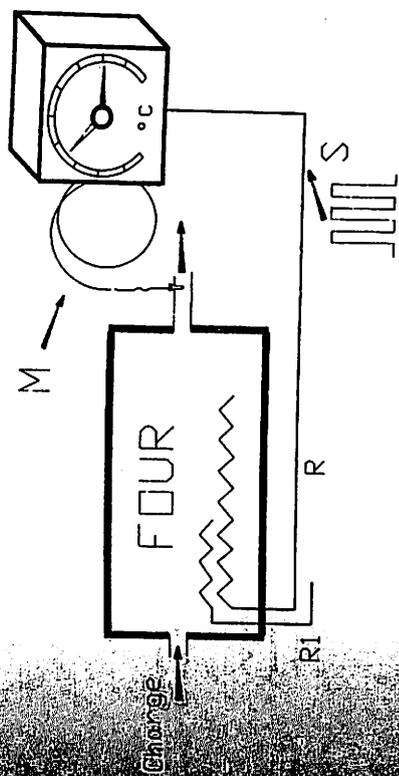


Fig. 5.8 : Régulation de température TOR.

Ce montage permet d'augmenter la valeur Mm, donc de réduire l'amplitude de la grandeur réglée et d'augmenter sa période.

**5.123 MISE AU POINT DE LA RÉGULATION TOR AVEC SEUIL**

On fixe la consigne au point de fonctionnement. On observe la période Tr et l'amplitude A de la grandeur réglée.

Les fonctionnements objectifs :

- Pour augmenter la période, il faut augmenter le seuil.
- Pour diminuer l'amplitude, il faut diminuer le seuil.

**5.124 PRINCIPES D'UTILISATION DE LA RÉGULATION TOR**

La régulation TOR est utilisable lorsque :  
 - l'amplitude des oscillations n'est pas trop importante.  
 - la période de fonctionnement n'est pas trop faible.  
 Cette dernière doit être supérieure à 20 s pour un relais électromécanique et à 1 s pour un relais statique.  
 Les limites d'utilisation du TOR sont :

$$\frac{\theta}{\tau} > 20 \text{ et } \tau > 5 \text{ s.}$$

On se limite entre 20 % et 80 %.

### 5.15 APPLICATION PRATIQUE

Les caractéristiques d'un procédé sont :

- Gain statique :  $G_s = 1$
- Retard pur :  $\tau = 10$  s
- Constante de temps :  $\theta = 1000$  s

Le régulateur utilisé est un TOR sans hystérésis. La régulation est mise en service avec :  $C = 50\%$  et on relève (fig. 5.9) :

- Amplitude :  $A = 1\%$
- Période :  $T_f = 40$  s

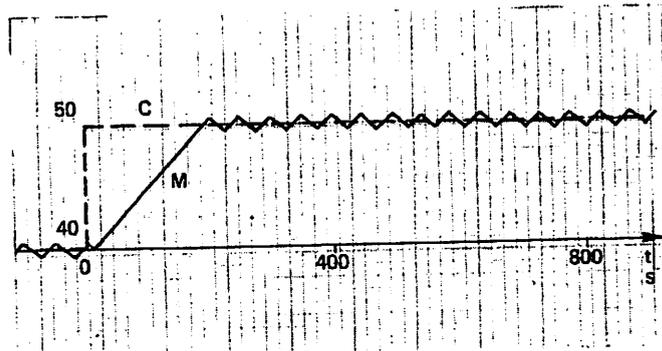


Fig. 5.9 : Réponse à un échelon de consigne.

Les relevés confirment les relations du paragraphe 5.121.

$$A = \frac{100.10}{1000} = 1\% \quad \text{et} \quad T_f = 4.10 = 40 \text{ s}$$

### 5.2 RÉGULATION AVEC RÉGULATEUR DISCONTINU MODULÉ PID ASSOCIÉ A UN ORGANE DE RÉGLAGE A DEUX POSITIONS

Cette régulation est installée sur des procédés utilisant un organe de réglage à 2 positions, où l'on souhaite obtenir une régulation de bonne qualité.

On peut à titre d'application utiliser le même procédé que dans le cas de la régulation TOR, mais avec un régulateur modulé PID (fig. 5.10).

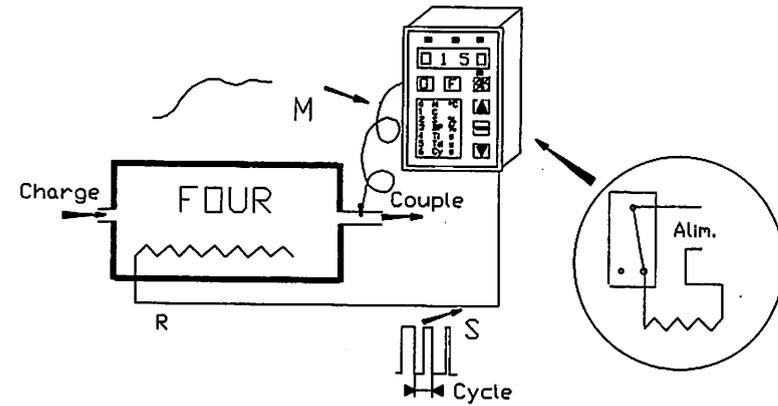


Fig. 5.10 : Régulation de la température d'un four.

Le régulateur met en service la résistance électrique à intervalles réguliers successifs appelés cycles.

### 5.21 ÉTUDES DU RÉGULATEUR

Parmi les régulateurs discontinus modulés PID on distingue les régulateurs à temps de cycle réglable :

- A largeur d'impulsion variable.
- A fréquence d'impulsion variable.

Les régulateurs à largeur d'impulsion variable couvrent un domaine d'application plus grand que les autres et font l'objet de notre étude.

#### 5.211 Présentation générale

Le régulateur représenté à la figure 5.11 est à base de microprocesseur.

La sortie du régulateur se fait sous deux formes :

- Un relais inverseur avec un commun, un contact travail, un contact repos.
- Une sortie logique avec état 0 et état 1.

Par rapport aux régulateurs continus ces régulateurs possèdent en plus un réglage de temps de cycle  $Cy$  et en général un réglage permettant d'annuler l'écart résiduel subsistant en P seul.

*Remarque :* Les régulateurs numériques actuels peuvent souvent être transformés de discontinus en continus par simple configuration.

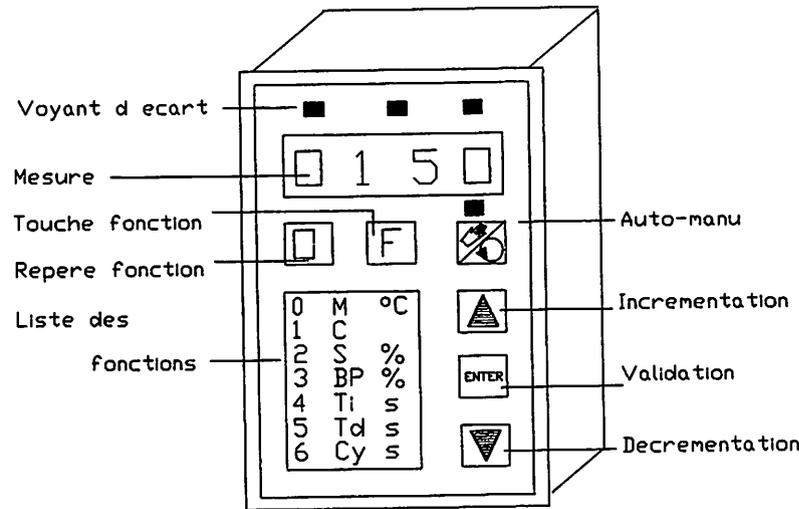


Fig. 5.11 : Régulateur numérique modulé PID.

5.212 Comportement en manuel

Le régulateur discontinu émet une impulsion par cycle  $Cy$ . La durée de l'impulsion correspond à un pourcentage de la durée du cycle. Le signal de sortie est assimilable à la sortie d'un régulateur continu.

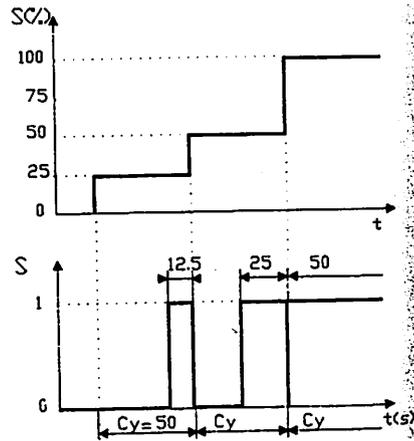


Fig. 5.12 : Sorties comparées en continu et en discontinu  $CY = 50$  s.

5.213 Étude du comportement en automatique

Pour l'étude des réponses en boucle ouverte, on utilise le montage de la figure 5.13.

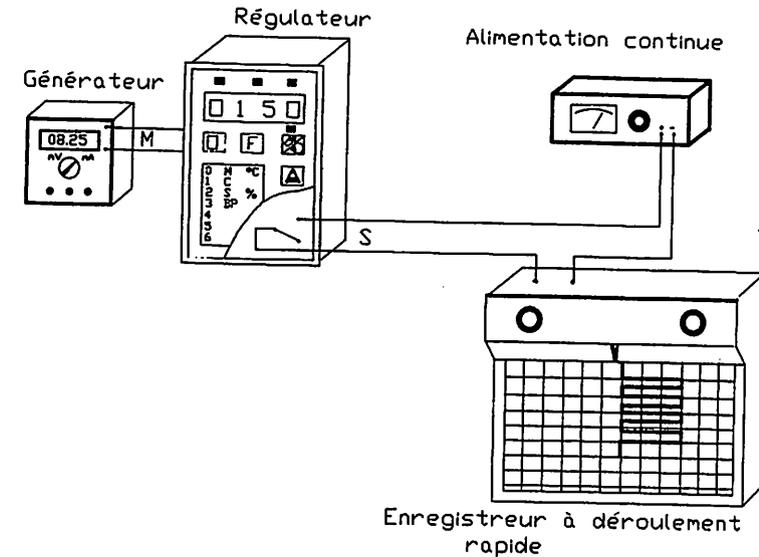


Fig. 5.13 : Montage pour étude des réponses en boucle ouverte.

Le choix du générateur et de la liaison de mesure dépendent du type d'entrée du régulateur.

La sortie du régulateur peut-être vérifiée à l'aide d'un enregistreur de tension à déroulement rapide, branché directement sur les contacts de sortie du régulateur.

Vérification de l'action proportionnelle

En automatique la valeur du temps de conduction pour  $M = C$  est appelée  $t_c$ .

Dans ce qui va suivre, afin de faciliter l'interprétation des résultats, on fixe  $t_c = 0$ .

En action P le temps de conduction est égal à :

$$t_c = G_r \frac{x}{100} Cy$$

- $t_c$  : temps de conduction en s
- $x$  : écart  $(M - C)$  en %
- $Cy$  : durée du cycle en s
- $G_r$  : gain de régulateur

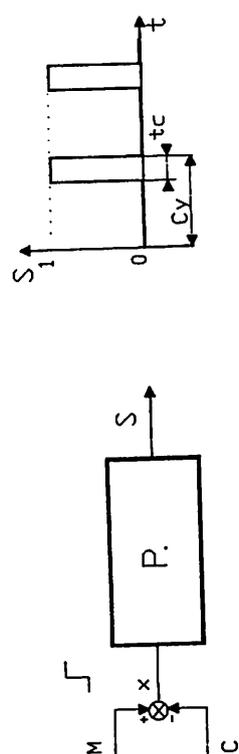


Fig. 5.14.

Exemple : Les valeurs des paramètres affichés sur le régulateur sont :

- $G_r = 1$
- $T_i = 0$
- $T_d = 0$
- $Cy = 20$  s

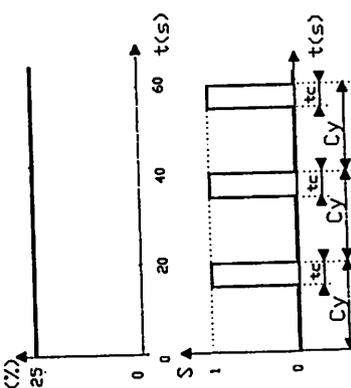


Fig. 5.15 : Vérification de l'action P.

Pour une entrée échelon la figure 5.15 montre que :

- à  $t = Cy$  on a  $t_c = 1 \cdot \frac{25}{100} \cdot 20 = 5$  s
- à  $t = 2 \cdot Cy$  on a  $t_c = 1 \cdot \frac{25}{100} \cdot 20 = 5$  s
- etc...

Vérification des actions proportionnelle et intégrale (structure série)

Dans chaque cycle le temps de conduction est égal à :

$$t_c = G_r \frac{x}{100} Cy + \frac{G_r}{T_i} Cy \int_0^{t_c} \frac{dx}{100} dt$$

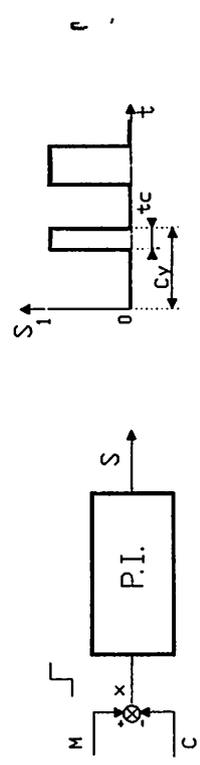


Fig. 5.16.

Exemple : Les valeurs des paramètres affichés sur le régulateur sont :

- $G_r = 1$
- $T_i = 1$  mn = 60 s
- $T_d = 0$
- $Cy = 20$  s

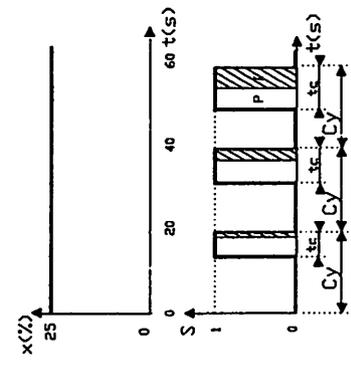


Fig. 5.17 : Vérification des actions P et I.

Pour une entrée échelon la figure 5.17 montre que :

- à  $t = Cy$  on a  $t_c = 1 \cdot \frac{25}{100} \cdot 20 + \frac{1}{60} \cdot 25 \cdot \frac{25}{100} \cdot 20$   $t_c = 5 + 1,6 = 6,6$  s
- à  $t = 2 \cdot Cy$  on a  $t_c = 1 \cdot \frac{25}{100} \cdot 20 + \frac{1}{60} \cdot 25 \cdot \frac{25}{100} \cdot 40$   $t_c = 5 + 3,3 = 8,3$  s

Vérification des actions proportionnelle et dérivée (structure série)

Dans chaque cycle le temps de conduction est égal à :

$$t_c = G_r \frac{x}{100} Cy + G_r \cdot T_d \cdot Cy \cdot \frac{1}{100} \frac{dx}{dt}$$

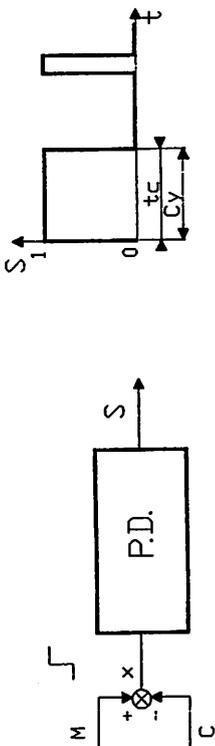


Fig. 5.18.

Exemple : Les valeurs des paramètres affichés sur le régulateur sont :

- $G_r = 1$
- $T_i = 0$
- $T_d = 60$  s
- $Cy = 20$  s

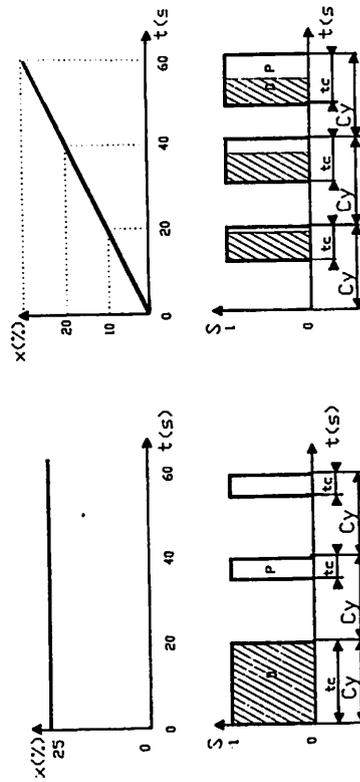


Fig. 5.19 : Vérification des actions P et D.

Pour une entrée échelon la figure 5.19 montre que :

$$\begin{aligned} \text{à } t &= Cy & \text{on a } t_c &= 20 \text{ s (durée du cycle)} \\ \text{à } t &= 2 \cdot Cy & \text{on a } t_c &= 1 \cdot \frac{25}{100} \cdot 20 + 0 = 5 \text{ s} \end{aligned}$$

Pour une entrée rampe la figure 5.20 montre que :

$$\begin{aligned} \text{à } t &= Cy & \text{on a } t_c &= 1 \cdot \frac{10}{100} \cdot 20 + 1.60.20 \frac{10}{100.20} \\ & & t_c &= 2 + 6 = 8 \text{ s} \\ \text{à } t &= 2 \cdot Cy & \text{on a } t_c &= 1 \cdot \frac{20}{100} \cdot 20 + 1.60.20 \frac{10}{100.20} \\ & & t_c &= 4 + 6 = 10 \text{ s} \end{aligned}$$

Remarque : L'étude des actions PID peut-être conduite de la même manière que PI et PD. Pour l'étude en boucle ouverte, il est à noter que les signaux de sortie des régulateurs discontinus et continus sont analogues, si l'on considère les surfaces de travail S.t. La figure 5.21 montre la similitude entre le continu et le discontinu.

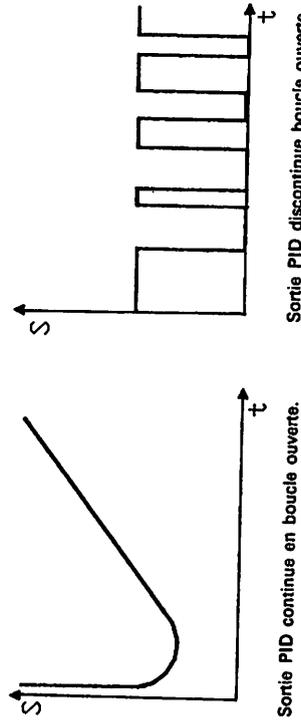


Fig. 5.21.

### 5.22 MISE AU POINT DE LA RÉGULATION

Par rapport à la régulation continue la mise au point comporte un réglage supplémentaire qui est le temps de cycle Cy. Ce paramètre influe sur la stabilité de la boucle de régulation. Lorsque cette valeur est faible, le comportement de la régulation est équivalent à celui de la régulation continue et la procédure de mise au point est identique.

#### 5.221 Réglages par approches successives

- Choisir le sens d'action correct du régulateur, au niveau du contact ou de la sortie logique.
- Définir le mode de régulation ; si le procédé a une constante de temps très élevée et un gain faible, l'action intégrale est inutile.
- Mettre un temps de cycle faible. Cette valeur varie de 1s pour un relais statique à 20s environ pour un relais électromécanique.

- Stabiliser le procédé au point de fonctionnement et régler les actions PID comme en régulation continue (chapitre 4.1).
- Augmenter ensuite progressivement le temps de cycle jusqu'à la limite de l'instabilité.

**Remarque :** Si l'on n'utilise pas l'action intégrale, il faut éliminer l'erreur résiduelle laissée par l'action proportionnelle. Pour cela on utilise le réglage approprié qui porte des appellations différentes suivant les constructeurs (correction automatique de statisme CAS chez CORECI). Ce réglage s'effectue en dernier lorsque la grandeur réglée est stable.

### 5.222 Réglage des actions par la méthode des oscillations

Elle n'est utilisable que si le temps de cycle est faible (1 à 2 s). Cette méthode permet, sans faire d'essai préalable sur le procédé, de déterminer à partir de la mise en oscillations entretenues de la mesure, les valeurs de BP %,  $T_i$  et  $T_d$ . La procédure est la suivante :

- Stabiliser en manuel le procédé au point de fonctionnement.
- Afficher : BP % = 0,  $T_i$  = maxi,  $T_d$  = 0, temps de cycle  $Cy = 1$  s, correcteur de statisme = 0.
- Passer en automatique.
- Attendre les oscillations de la mesure (fig. 5.22) et relever l'amplitude A et la période T des oscillations. Cela peut se faire sans enregistreur, en notant les valeurs maximum et minimum de la mesure, et en chronométrant le temps séparant deux valeurs maximum successives.

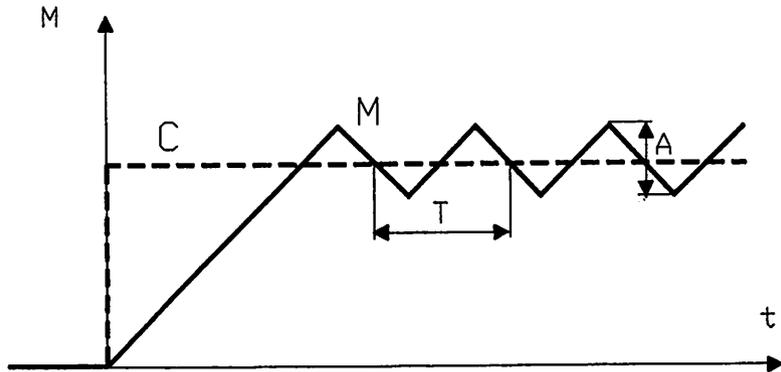


Fig. 5.22.

- Remettre le régulateur en manuel.
- Calculer les actions du régulateur à l'aide du tableau 5.2 (critère de Ziegler et Nichols pour régulateur à structure mixte), où les valeurs des actions PID sont exprimées en fonction de l'amplitude et de la période.

Tableau 5.2 : Réglages par Ziegler et Nichols.

Fonctionnement	BP %	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{A}{E} \cdot 100$	maxi	0
PI	$1,2 \cdot \frac{A}{E} \cdot 100$	$\frac{3}{4} \cdot T$	0
PID	$0,8 \cdot \frac{A}{E} \cdot 100$	$\frac{T}{2}$	$0,1 \cdot T$

E : étendue d'échelle de la mesure en unités physiques, %...

A : amplitude des oscillations en unités physiques. %...

T : période des oscillations.

- Afficher les valeurs calculées sur le régulateur.
- Mettre le régulateur en automatique.
- Augmenter la valeur du cycle jusqu'à obtenir la limite de l'instabilité acceptable. L'expérience montre, que le temps de cycle est correct lorsque  $Cy$  est de l'ordre de  $\frac{T}{20}$ .

**Remarque :** Cette méthode donne une réponse oscillatoire amortie et dans certains cas il faut retoucher les actions (en particulier augmenter BP %).

### 5.23 LIMITE D'UTILISATION

C'est une régulation simple et bon marché qui s'utilise sur des procédés où

$$\frac{\theta}{\tau} \geq 3.$$

### 5.24 APPLICATION

Reprenons la régulation de la température d'un four (fig. 5.1).

Le four utilisé est un procédé où l'on réchauffe de l'air à l'aide d'une résistance électrique. La charge nominale est de 1 200 l/h  $\pm$  25 l/h sous une pression de 150 mbar est une température de 20°C environ. L'échelle d'entrée température du régulateur est 0 à 600°C. La puissance de la résistance de chauffage est de 150 wats. Le réglage des actions est réalisé en utilisant successivement les deux méthodes exposées en 5.22.

#### 5.241 Réglage des actions par approches successives

Les figures 5.23 à 5.27 montrent les résultats du réglage pour différentes valeurs d'actions et de cycle.

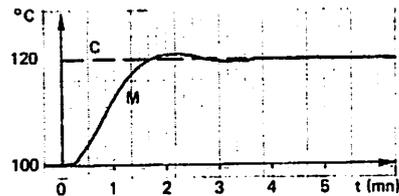


Fig. 5.23 : Variation de consigne :  $CY = 3$  s.  
 $BP \% = 8 \%$ ,  $T_i = 1,5$  mn.

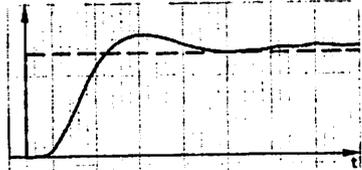


Fig. 5.24 : Variation de consigne :  $CY = 10$  s.  
 $BP \% = 8 \%$ ,  $T_i = 1,5$  mn.

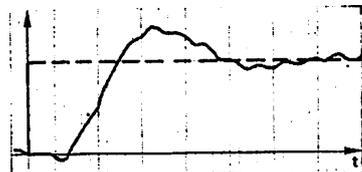


Fig. 5.25 : Variation de consigne :  $CY = 30$  s.  
 $BP \% = 8 \%$ ,  $T_i = 1,5$  mn.

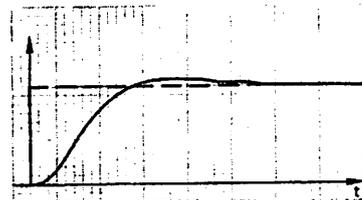


Fig. 5.26 : Variation de consigne :  $CY = 10$  s.  
 $BP \% = 12 \%$ ,  $T_i = 1,5$  mn,  $T_d = 6$  s.

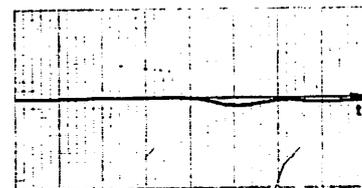


Fig. 5.27 : Variation de charge de 200 l/h  $CY = 3$  s.  
 $BP \% = 8 \%$ ,  
 $T_i = 1,5$  mn.

### 5.242 Réglage des actions par la méthode des oscillations

On détermine la période  $T$  et l'amplitude  $A$  à partir de l'oscillation en tout ou rien de la mesure autour de la consigne, fixée à  $120^\circ\text{C}$  (fig. 5.28). Pour faire osciller la mesure on affiche :

$$BP \% = 0 \%, \quad T_i = \text{maxi}, \quad T_d = 0, \quad Cy = 1 \text{ s.}$$

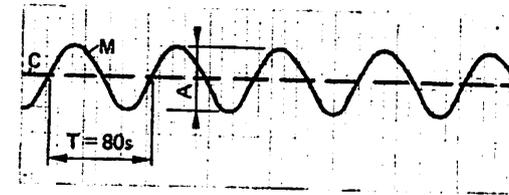


Fig. 5.28.

On relève :  $T = 1,4$  mn et  $A = 10^\circ\text{C}$ .

On calcule les actions d'après le tableau 5.2, ce qui donne en mode PI :

$$BP \% = 2 \% \quad \text{et} \quad T_i \approx 60 \text{ s}$$

La figure 5.29 montre le résultat avec un  $Cy = 3$  s.

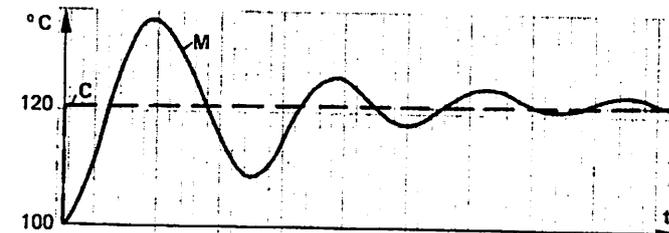


Fig. 5.29.

**Remarques :** Les méthodes de réglage par calcul permettent d'approcher des réglages optimums avec un gain de temps par rapport aux réglages par approches successives.

Il existe des régulateurs autorégulants, autoadaptatifs permettant le calcul des actions et du cycle.

### 5.3 RÉGULATION CHAUD-FROID AVEC RÉGULATEUR DISCONTINU MODULÉ PID

Cette régulation discontinue est utilisée sur des procédés qui nécessitent deux actions correctrices antagonistes, avec des organes de réglage fonctionnant en tout ou rien. La régulation chaud-froid peut également être continue avec des organes de réglage continus, ou mixte avec un organe de réglage continu et un organe de réglage tout ou rien. L'exemple de la figure 5.30 représente la régulation de température d'un caisson, utilisée pour tester la tenue en température de cartes électroniques. Le régulateur comprend deux fonctions de régulation distinctes. Une sortie commande une résistance chauffante et l'autre actionne un circuit réfrigérant.

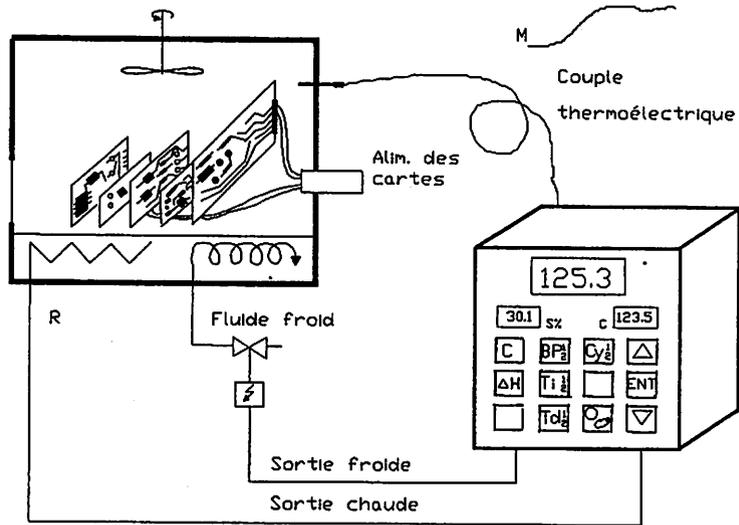


Fig. 5.30 : Régulation de température d'un caisson.

#### 5.31 ÉTUDE DU RÉGULATEUR

Le régulateur de la figure 5.31 est monobloc et numérique, il comprend deux fonctions PID dont les paramètres de réglage et le signaux de sortie sont indépendants. Les entrées mesure et consigne sont communes aux deux PID. Les consignes sont  $(C + \frac{\Delta H}{2})$  pour le régulateur froid et  $(C - \frac{\Delta H}{2})$  pour le régulateur chaud ( $\Delta H$  définissant une zone neutre réglable).

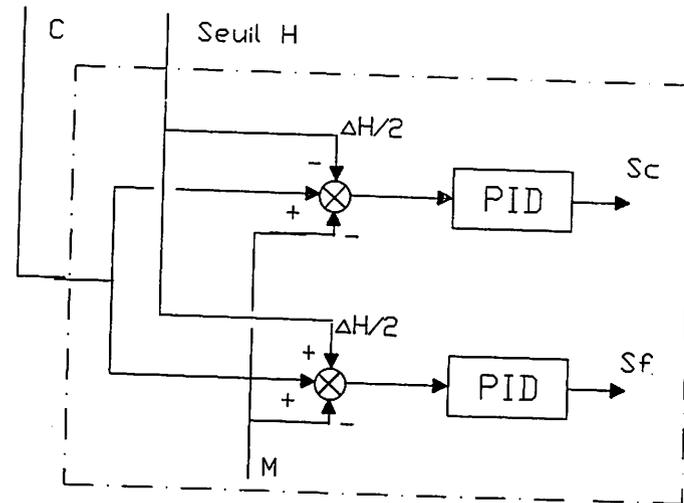


Fig. 5.31 : Schéma synoptique du régulateur chaud-froid.

#### 5.32 FONCTIONNEMENT DE LA RÉGULATION (fig. 5.32)

Lorsque  $M$  est inférieur à  $(C - \frac{\Delta H}{2})$ , le régulateur chaud met en service la résistance chauffante.

Lorsque  $M$  est compris entre  $(C + \frac{\Delta H}{2})$  et  $(C - \frac{\Delta H}{2})$  les deux régulateurs ont leur sortie à 0, car la mesure est à l'intérieur de la zone neutre  $\Delta H$ .

Lorsque  $M$  est supérieur à  $(C + \frac{\Delta H}{2})$  (les cartes électroniques à tester dans le caisson étant sous tension, elles dégagent de l'énergie calorifique) c'est le régulateur froid qui met en marche un circuit réfrigérant.

La conduction est totale dans le cycle lorsque :

$$C - M \geq x_1 \quad \text{ou} \quad M - C \geq x_2 \quad \text{avec} \quad x_1 = BP_1 \% \quad \text{et} \quad x_2 = BP_2 \%$$

#### 5.33 MISE AU POINT DE LA RÉGULATION

La mise au point doit se faire pour chaque voie autour des points de fonctionnement, à cause des comportements différents du procédé à la chauffe et au refroidissement. Cela permet d'obtenir de bonnes performances de régulation dans les deux cas puisque les réglages des actions sont adaptés à chaque circuit.

Les méthodes de réglage sont les mêmes que celles exposées dans le chapitre 5.2. Le choix de la valeur  $\Delta H$  dépend de la précision de régulation et des critères économiques souhaités.

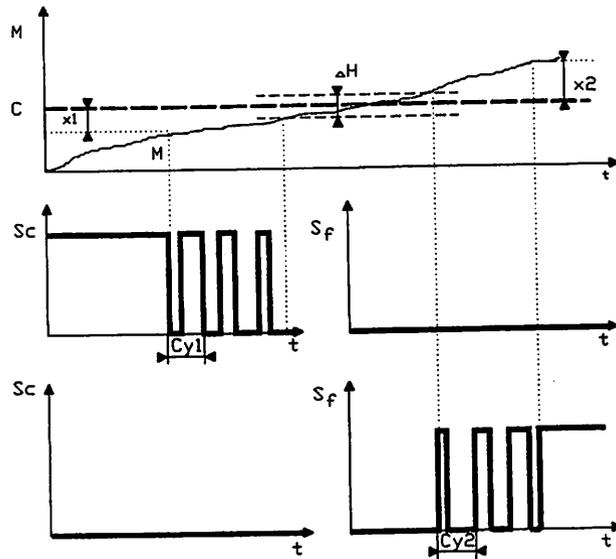


Fig. 5.32 : Evolution des sorties  $S_c$  et  $S_f$  avec régulateurs en proportionnelle seule.

## 5.4 RÉGULATION AVEC RÉGULATEUR DISCONTINU MODULÉ PID ET ORGANE DE RÉGLAGE MOTORISÉ

Elle est utilisée sur les procédés où l'organe de réglage est une vanne motorisée. La figure 5.33 illustre une régulation de chauffe avec vanne motorisée sur le combustible, le réglage de l'air n'étant pas pris en compte.

### 5.41 ÉTUDE DU RÉGULATEUR

#### 5.411 Présentation

Le régulateur est à base de microprocesseur, sa présentation est identique à celle d'un régulateur continu. En plus des réglages d'actions PID, il comporte un paramètre à afficher qui est le temps de course de l'organe de réglage TT et parfois un réglage de la période des impulsions TP.

La position de l'organe de réglage peut-être visualisée sur le régulateur à l'aide d'une recopie de position vanne.

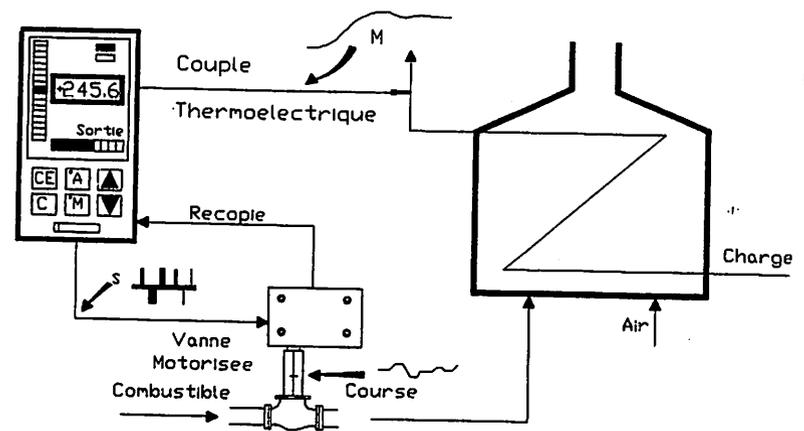


Fig. 5.33 : Régulation avec vanne motorisée.

La sortie du régulateur se fait par des impulsions sur deux relais inverseurs interverrouillés qui commandent la rotation du moteur dans un sens ou dans l'autre. En l'absence d'impulsion, les relais sont désexcités et l'organe de réglage reste dans sa position.

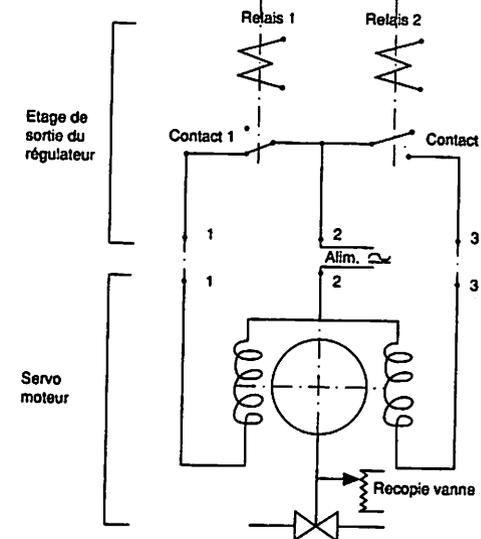


Fig. 5.34 : Liaison régulateur et vanne motorisée.

## 5.412 Comportement du régulateur en manuel

La figure 5.35 montre le montage qui permet d'étudier les impulsions de sortie du régulateur en manuel et en automatique.

Le signal de sortie est enregistré à l'aide d'un enregistreur à déroulement rapide, ainsi qu'une alimentation continue.

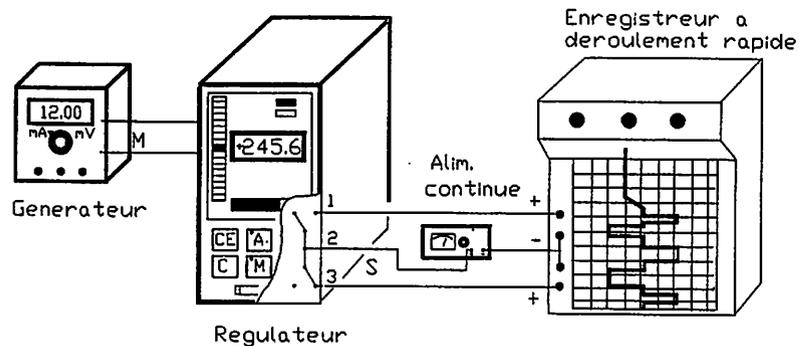


Fig. 5.35 : Montage de vérification.

En manuel le régulateur émet une impulsion en fonction du sens et de la durée de la commande (fig. 5.36 (a)).

La figure 5.36 (b) montre l'évolution de la course de la vanne motorisée correspondant à chaque impulsion. La vitesse de variation de la vanne motorisée est constante.

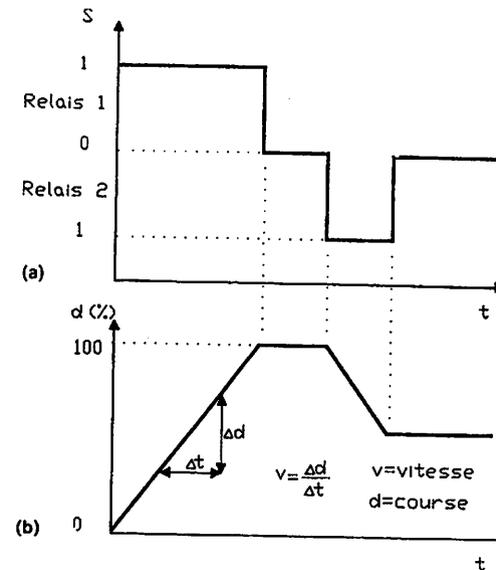


Fig. 5.36 : Sortie du régulateur en manuel et position de l'organe motorisé.

## 5.413 Comportement du régulateur en automatique

L'étude des actions est réalisée en y associant l'organe motorisé. En automatique lorsque  $M = C$ , le temps de conduction de la sortie est nul, néanmoins l'organe peut occuper une position comprise entre 0 et 100 %.

Pour simplifier les développements qui suivent, on suppose la position de la vanne à 0 % pour  $M = C$ .

L'étude est faite en boucle ouverte comme le montre la figure 5.37. Le régulateur a une structure mixte.

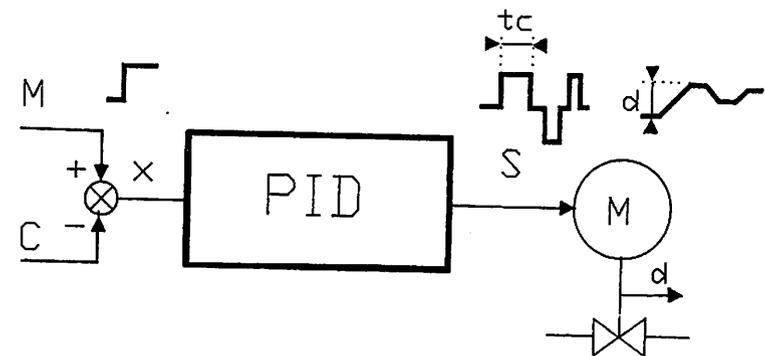


Fig. 5.37.

**Action proportionnelle**

En action P, le temps de conduction est exprimé par :

$$t_c = G_r \frac{x}{100} TT$$

- $t_c$  : temps de conduction en s
- $G_r$  : gain du régulateur
- $x$  : écart (M - C) en %
- TT : temps de course de la vanne en s

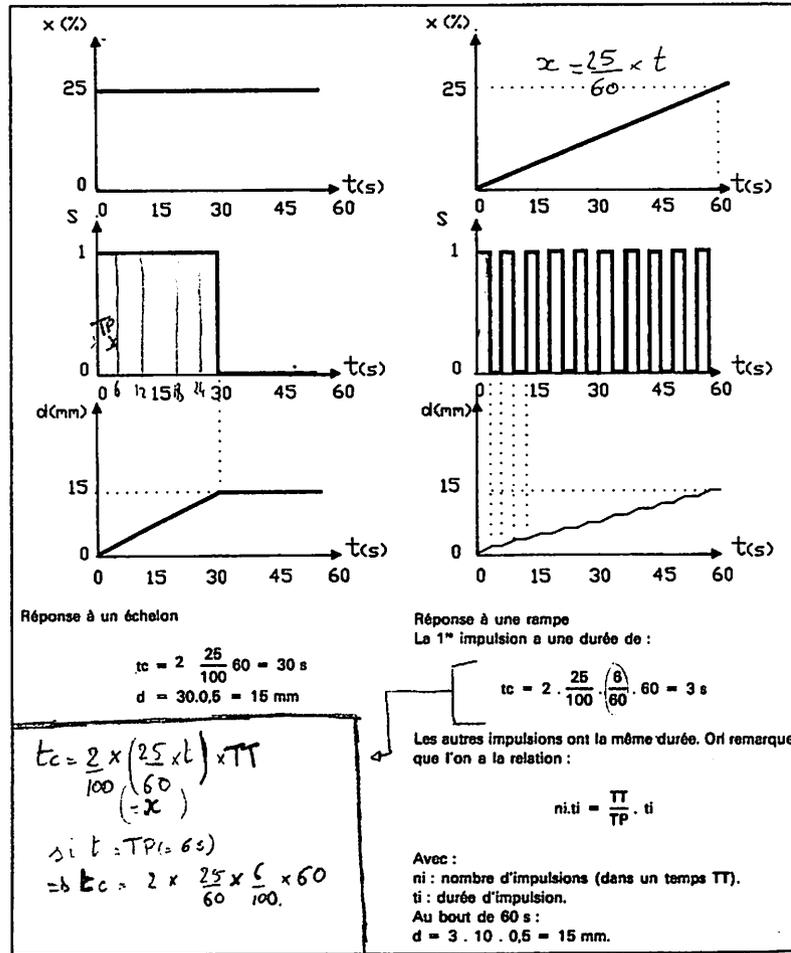


Fig. 5.38.

La course correspondante de l'organe motorisé est exprimée par :

$$d = t_c \cdot v$$

- $d$  : course en mm
- $v$  : vitesse en mm/s

Exemple : Les valeurs de paramètres sont :

- $G_r = 2$
- $T_i = \text{maxi}$   $T_d = 0$
- $TT = 60 \text{ s}$
- $v = 0,5 \text{ mm/s}$
- $TP = 6 \text{ s}$

**Actions proportionnelle et intégrale**

En proportionnelle et intégrale le temps de conduction est exprimé par :

$$t_c = G_r \frac{x}{100} TT + \frac{G_r \cdot TT}{T_i} \int_0^t \frac{x}{100} dt$$

Comme précédemment la course correspondante de l'organe motorisé est exprimée par :

$$d = t_c \cdot v$$

Exemple : Les valeurs de paramètres sont :

- $G_r = 1$
- $T_i = 60 \text{ s}$
- $T_d = 0$
- $TT = 60 \text{ s}$
- $v = 0,5 \text{ mm/s}$
- $TP = 6 \text{ s}$

La figure 5.39 montre que l'on obtient sur la sortie S :

- Une impulsion de durée importante qui comprend P et I.
- Une suite d'impulsions identiques données par l'intégrale I.

L'action proportionnelle est une impulsion qui, seule, serait égale à :

$$t_c = 1 \frac{25}{100} 60 = 15 \text{ s}$$

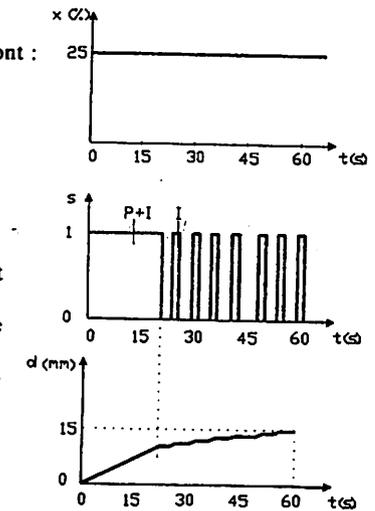


Fig. 5.39.

L'AI est une suite d'impulsions dont le temps de conduction au bout de 60 s est :

$$t_c = 1 \times \frac{60}{100} \times \int_0^{TT} \frac{25}{100} dt = 1 \times \frac{60}{100} \cdot \frac{25}{100} \cdot 60 = 15 \text{ s}$$

Le nombre d'impulsion  $n_i$  est :  
 15 s de temps de conduction à répétition sur 60 s (10 x TP)  $n_i = \frac{60}{6} = 10$

La durée de chaque impulsion est :

$$t_i = \frac{15}{10} = 1,5 \text{ s}$$

Les actions P et I étant confondues, la première impulsion a une durée théorique égale à :

En 15 s d'act. Prop.  $3 \times 1,5 \text{ s} = 4,5 \text{ s}$   
 $15 \text{ s} + (4,1,5 \text{ s}) = 21 \text{ s}$   
 A.P. + A.I. =  $15 + 3 \times 1,5 = 19,5 \text{ s}$   
 Or à  $t = 19,5 \text{ s}$  à A.I. = 1,5 s  
 $\Rightarrow$  1<sup>re</sup> impulsion :  $19,5 \text{ s} + 1,5 \text{ s} = 21 \text{ s}$

Actions proportionnelle et dérivée

En proportionnelle et dérivée le temps de conduction s'exprime par :

$$t_c = G_r \frac{x}{100} TT + G_r TT T_d \frac{dx}{dt} \cdot 100$$

Comme précédemment la course correspondante de l'organe motorisé est exprimée par :  $d = t_c \cdot v$ .

Exemple : Les valeurs des paramètres sont :

- $G_r = 1$
- $T_i = \text{maxi}$
- $T_d = 60 \text{ s}$
- $TT = 60 \text{ s}$
- $v = 0,5 \text{ mm/s}$
- $TP = 6 \text{ s}$

La figure 5.40 montre que l'on obtient sur la sortie S :

- Une impulsion de durée importante qui comprend P et D.
- Une suite d'impulsions identiques données par la proportionnelle P.

L'action dérivée est une impulsion qui, seule, serait égale à :

$$t_c = 1.60.60 \cdot \frac{25}{100.60} = 15 \text{ s}$$

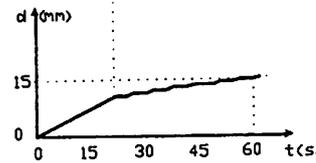
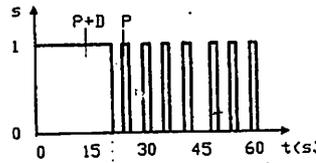
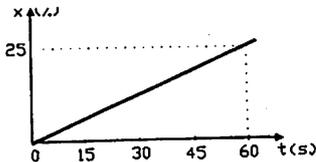
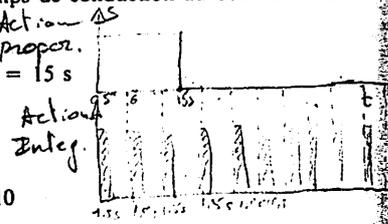


Fig. 5.40.

L'action proportionnelle est une suite d'impulsions dont le temps de conduction au bout de 60 s est :

$$t_c = 1 \frac{25}{100} 60 = 15 \text{ s}$$

$$n_i = 10$$

$$t_i = 1,5 \text{ s}$$

Les actions P et D étant confondues, la première impulsion a une durée théorique égale à :  $15 \text{ s} + (4,1,5 \text{ s}) = 21 \text{ s}$ .

### 5.42 MISE AU POINT DE LA RÉGULATION

Lorsque le temps de course TT de l'organe motorisé est faible devant la constante de temps  $\theta$  du procédé, et si la période TP des impulsions est très inférieure au temps mort  $\tau$  du procédé, la régulation discontinue s'assimile à la régulation continue. Dans ce cas on utilise les méthodes de réglage des actions suivantes :

- Réglage par approches successives.
- Réglage suite à une identification du procédé.

Quelle que soit la méthode de réglage utilisée, il faut afficher sur le régulateur :

- TT = temps de course de l'organe motorisé.
- TP = 1 à 2 s

Remarques :

L'action intégrale est limitée par la vitesse de l'organe motorisé.

Lorsque le réglage est terminé, on peut augmenter TP jusqu'à la limite de l'instabilité. La pratique montre que la valeur limite de TP est égale  $\frac{\tau}{5}$ .

Lorsque le temps de course de l'organe motorisé est supérieur à la constante de temps du procédé (ex. : débit), la régulation ralentit la réponse de la grandeur réglée et seule la méthode de réglage des actions par approches successives est utilisable.

### 5.43 APPLICATIONS

#### 5.431 Application 1

Les paramètres du procédé sont :  $G_s = 1$ ,  $\theta = 4 \text{ s}$  et  $\tau = 0 \text{ s}$ .

Le temps de course de la vanne motorisée est de 20 s.

Le réglage par approches successives donne les résultats de la figure 5.41.