

### 6.11 SCHÉMA FONCTIONNEL D'UNE BOUCLE DE RÉGULATION

Reprenons le schéma fonctionnel de l'échangeur figure 6.38, ajoutons le régulateur que nous considérons de sens inverse. On obtient ainsi le schéma fonctionnel (fig. 6.43) de la régulation en boucle fermée.

Procédé

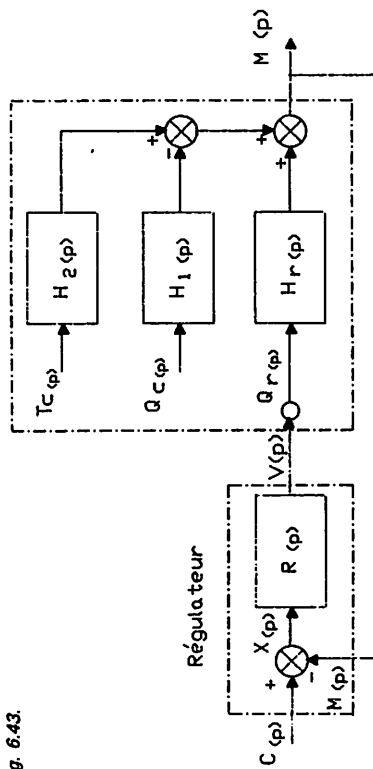


Fig. 6.43.

Le schéma équivalent (fig. 6.44) permet d'écrire :

$$M(p) = X(p) \cdot R(p) \cdot H_1(p) + (T_c(p) \cdot H_2(p) - Q_c(p) \cdot H_1(p))$$

En remplaçant  $X(p)$  par  $C(p) - M(p)$  :

$$M(p) = (C(p) - M(p)) \cdot R(p) \cdot H_1(p) + T_c(p) \cdot H_2(p) - Q_c(p) \cdot H_1(p)$$

$$M(p) = C(p) \cdot R(p) \cdot H_1(p) - M(p) \cdot R(p) \cdot H_1(p) - Q_c(p) \cdot H_1(p) + T_c(p) \cdot H_2(p)$$

$$M(p) = \underbrace{C(p) \cdot \frac{R(p) \cdot H_1(p)}{1 + R(p) \cdot H_1(p)} - Q_c(p) \cdot \frac{H_1(p)}{1 + R(p) \cdot H_1(p)} + T_c(p) \cdot \frac{H_2(p)}{1 + R(p) \cdot H_1(p)}}_{\text{terme de régulation}}$$

terme d'asservissement

terme de régulation

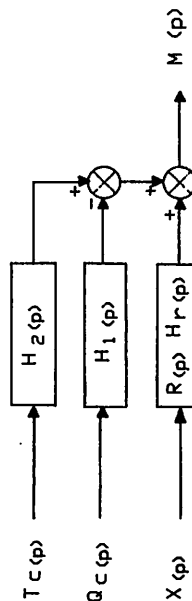


Fig. 6.44.

### Identification des procédés

7.1 Identification des procédés naturellement stables	197
7.2 Identification des procédés naturellement instables	206

## NOTATIONS UTILISÉES DANS LE CHAPITRE 7

a	: Pente.
$\varepsilon$	: Écart M - C en automatique. (epsilon)
$\Delta C$	: Variation de consigne.
$\Delta M$	: Variation de mesure.
$\Delta V$	: Variation du signal de vanne.
$\Delta M_1$	: Variation du signal mesure au temps $t_1$ .
$\Delta M_2$	: Variation du signal mesure au temps $t_2$ .
$\Delta t$	: Variation de temps.
$G_{rc}$	: Gain du régulateur critique.
$G_s$	: Gain statique du procédé.
k	: Coefficient d'intégration du procédé.
M	: Signal de mesure.
$M_0$	: Signal de mesure à $t_0$ .
p	: Opérateur de Laplace.
t	: Variable temps.
$T_{osc}$	: Période d'oscillation.
$\tau$	: Temps mort ou retard du procédé.
$\theta$	: Constante de temps du procédé.
V	: Signal de vanne.
$V_0$	: Signal de vanne à $t_0$ .

La fonction de transfert réelle d'un procédé industriel est pratiquement impossible à déterminer. Il est alors nécessaire d'utiliser un modèle qui soit le plus représentatif possible de ce procédé. Identifier un procédé, c'est rechercher à partir d'enregistrements, les paramètres qui caractérisent son modèle.

Parmi les nombreuses méthodes d'identification existantes, nous utilisons des méthodes simples applicables sans matériel spécial et sans connaissances théoriques particulières.

La connaissance des paramètres caractéristiques d'un procédé peut-être utile en particulier dans les domaines suivants :

- Réglage des actions dans les boucles de régulation (paragraphe 4.1).
- Modélisation des procédés pour des correcteurs numériques, afin de réaliser des régulations par modèle interne de référence (chapitre 9).

## 7.1 IDENTIFICATION DES PROCÉDÉS NATURELLEMENT STABLES

Quelle que soit la méthode employée, les paramètres du modèle du procédé à identifier sont ceux d'un premier ordre avec retard :  $G_s$ ,  $\theta$  et  $\tau$ .

La fonction de transfert de ce modèle est la suivante :

$$H_{r(p)} = \frac{G_s \cdot e^{-\tau \cdot p}}{1 + \theta \cdot p}$$

### 7.11 MÉTHODE D'IDENTIFICATION EN BOUCLE OUVERTE

Le régulateur est en manuel, ce qui provoque l'ouverture de la boucle, d'où le nom d'identification en boucle ouverte.

Notons que le modèle du procédé recherché correspond à l'ensemble vanne, procédé et transmetteur (fig. : 7.1).

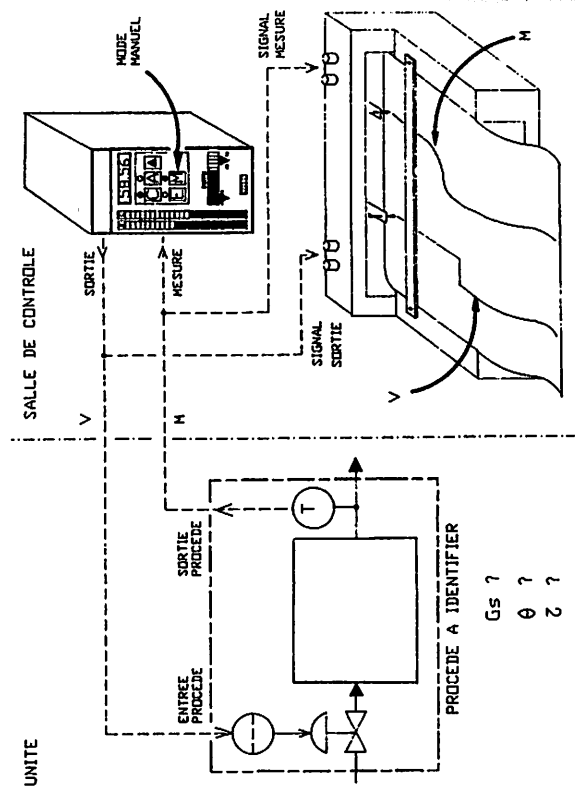


Fig. 7.1 : Identification en boucle ouverte d'un procédé stable.

7.111 Procédure

- Enregistrer les signaux de commande de vanne V et de mesure M sur un enregistreur à déroulement rapide.
- Mettre le régulateur en manuel et stabiliser la mesure au point de fonctionnement ( $M_0$ ).
- Provoquer un échelon  $\Delta V$  sur le signal de commande de vanne. La valeur de cet échelon doit-être limitée, mais suffisante pour obtenir une variation de la mesure  $\Delta M$  exploitable pour l'identification.

7.112 Recherche des paramètres

La figure suivante montre la construction graphique à réaliser, cette construction est basée sur la méthode mise au point par V. BROÏDA : recherche des temps  $t_1$  et  $t_2$  correspondants à 28 % et 40 % de la variation  $\Delta M$ .

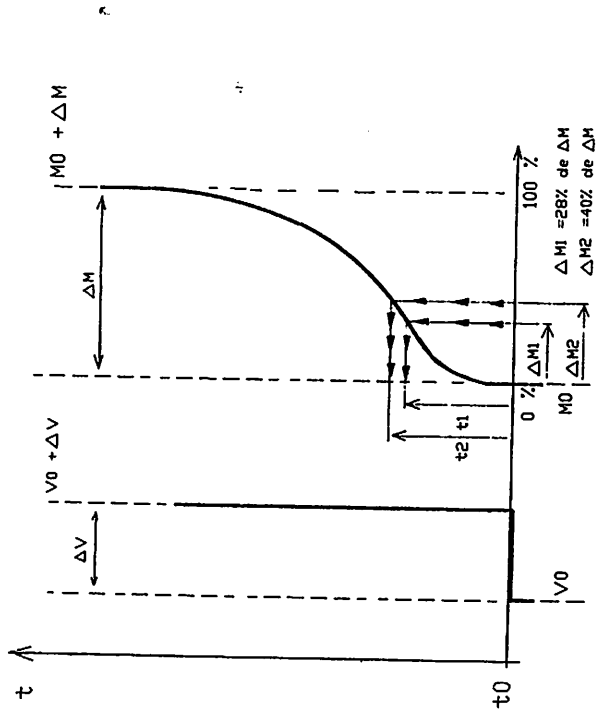


Fig. 7.2 : Analyse de l'enregistrement.

A partir des temps  $t_1$  et  $t_2$  et des variations des signaux M et V, les paramètres du procédé stable sont donnés par le tableau suivant :

Tableau 7.1 : Calcul des paramètres d'un procédé stable. unité de  $\Delta M$  et  $\Delta V$  en % (unité de  $t_1$  et  $t_2$  en s).

$G_s = \frac{\Delta M}{\Delta V}$	$\theta = 5,5 \cdot (t_2 - t_1)$	$\tau = 2,8 \cdot t_1 - 1,8 \cdot t_2$
-----------------------------------	----------------------------------	--

Note : Dans le cas où la réponse de M présente un point d'inflexion voisin de  $M_0$ , il est conseillé d'estimer  $\tau$  et de calculer  $\theta$ , comme l'indique la figure 7.3.

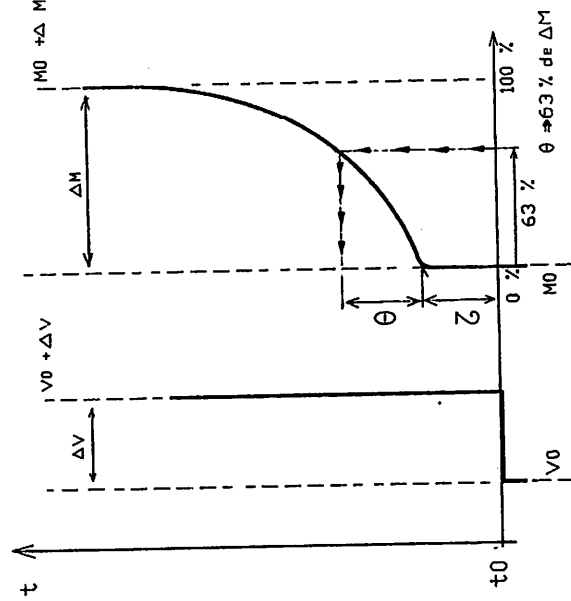


Fig. 7.3.

7.113 Application

La réponse en boucle ouverte d'un système stable est donnée par la figure 7.4. L'origine de la mesure est située à  $t_0$  lors de la variation  $\Delta V$ . En régime permanent, à une variation  $\Delta V = 10\%$  correspond une variation  $\Delta M = 16\%$ , d'où :  $G_s = \frac{\Delta M}{\Delta V} = 1,6$ .

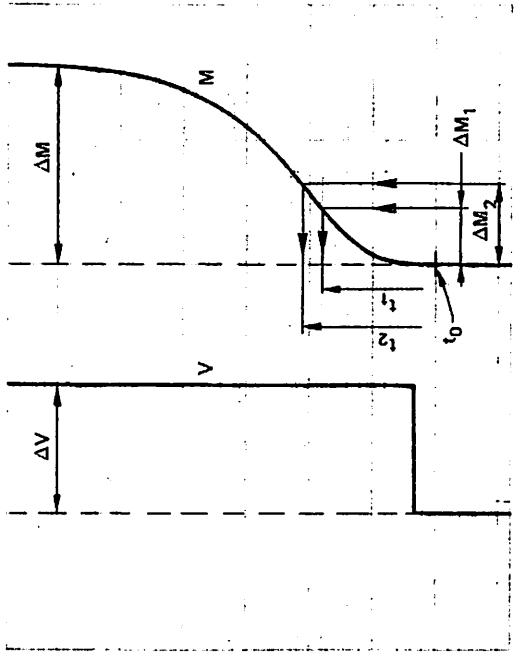
- A 28 % de  $\Delta M$  ( $\Delta M1 = 4,5\%$ ) correspond le temps  $t_1 = 36$  s.
- A 40 % de  $\Delta M$  ( $\Delta M2 = 6,4\%$ ) correspond le temps  $t_2 = 42$  s.

Les calculs de  $\theta$  et de  $\tau$  donnent alors :

$$\theta = 5,5 \cdot (t_2 - t_1) = 5,5 \cdot (42 - 36) = 33 \text{ s}$$

$$\tau = 2,8 \cdot t_1 - 1,8 \cdot t_2 = 2,8 \cdot 36 - 1,8 \cdot 42 = 25,2 \text{ s}$$

et



Un petit carré = 4 secondes.

Fig. 7.4.

La fonction de transfert réglante du procédé est :

$$H_{T(p)} = \frac{1,6 \cdot e^{-25,p}}{1 + 33,p}$$

7.12 MÉTHODE D'IDENTIFICATION EN BOUCLE FERMÉE

Le régulateur est en automatique. La méthode nécessite la mise en oscillations entretenues de la boucle de régulation (fig. 7.5). Cette méthode doit être pratiquée avec prudence. Deux essais sont nécessaires pour identifier les paramètres du procédé :

- Un premier essai pour le calcul du gain statique  $G_s$ .
- Un deuxième essai pour le calcul des paramètres  $\theta$  et  $\tau$ .

7.121 Procédure

- Régulateur en manuel, stabiliser la mesure au point de fonctionnement.
- Mettre le régulateur en proportionnelle seule avec un gain  $G_r$  de l'ordre de 1 (action intégrale minimale et action dérivée annulée).
- Mettre la consigne à la valeur de la mesure et passer le régulateur en automatique.
- Provoquer un échelon de consigne  $\Delta C$  de l'ordre de  $\pm 10\%$ .
- Relever l'écart résiduel  $\varepsilon$ .

Remarque 1 :

- Dans le cas d'une réponse de M trop oscillante, ou d'un écart  $\epsilon$  trop important ( $\epsilon > \frac{2}{3} \Delta C$ ), reprendre la procédure précédente avec un nouveau gain de régulateur.
- Augmenter ensuite progressivement le gain du régulateur, jusqu'à obtenir des oscillations régulières du signal M. Le gain de régulateur qui entraîne les oscillations régulières est appelé gain critique  $G_{rc}$ , noter cette valeur et relever la période des oscillations  $T_{osc}$  (fig. 7.6).

Remarque 2 :

- Rechercher une amplitude des oscillations la plus faible possible et s'assurer au cours des essais que le signal de vanne ne sature pas.
- Réduire le gain et repasser le régulateur en auto.

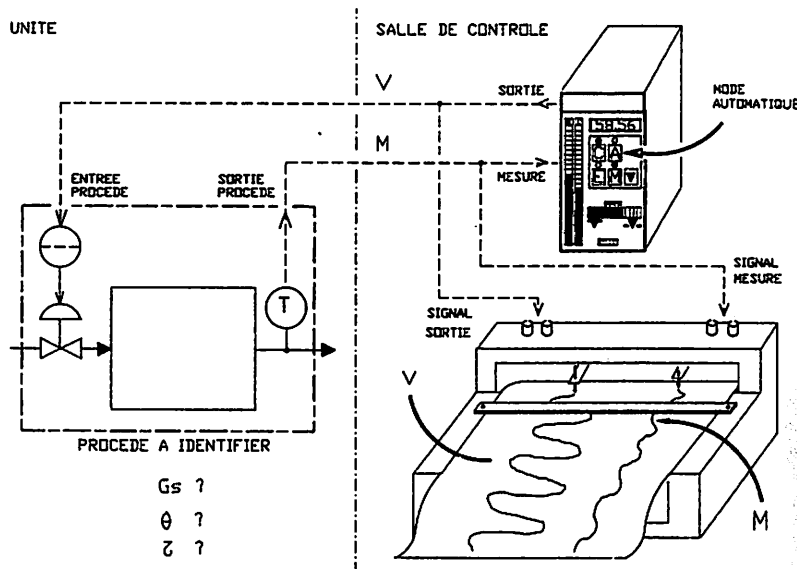


Fig. 7.5 : Identification en boucle fermée d'un procédé stable.

$G_s ?$   
 $\theta ?$   
 $\tau ?$

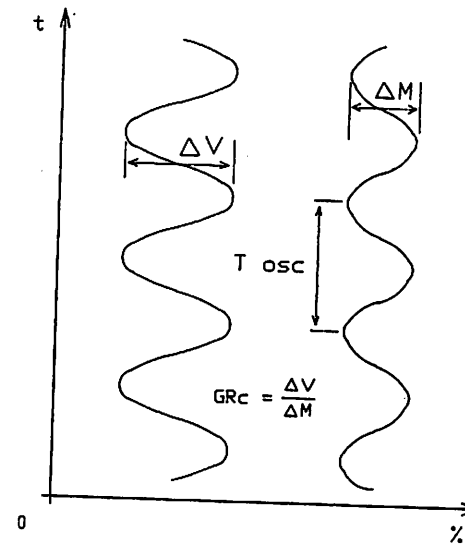


Fig. 7.6.

7.122 Recherche des paramètres

Le calcul du gain statique  $G_s$  est donné par la relation suivante :

$$G_s = \frac{\Delta C - \epsilon}{\epsilon \cdot G_r}$$

A partir de  $T_{osc}$ ,  $G_{rc}$  et  $G_s$ , les paramètres du procédé stable sont donnés par le tableau suivant :

Tableau 7.2 : Calcul des paramètres d'un procédé stable (arc tg exprimé en radian et  $T_{osc}$  en s).

$\theta = \frac{T_{osc}}{6,28} \cdot \sqrt{(G_{rc} \cdot G_s)^2 - 1}$	$\tau = \frac{T_{osc}}{2} \cdot \left(1 - \frac{\text{arc tg} \sqrt{(G_{rc} \cdot G_s)^2 - 1}}{\pi}\right)$
---	---

Note : Avec  $G_{rc} \cdot G_s \gg 1$ , on peut appliquer  $\tau = \frac{T_{osc}}{4}$

7.123 Application

Les courbes de réponse d'une analyse en boucle fermée d'un système stable sont données par les figures 7.7 et 7.8. La figure 7.7 permet de déterminer le gain statique  $G_s$ .

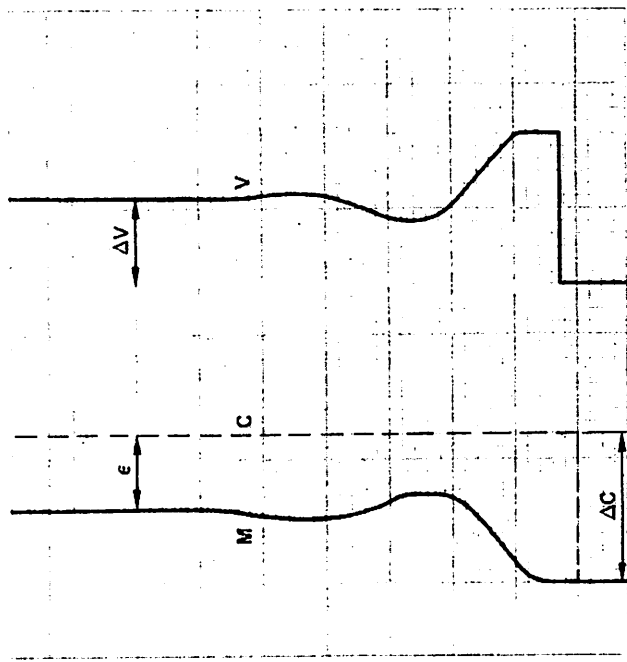


Fig. 7.7 : Courbes relevées pour  $G_r = 1$ .

A partir de  $\Delta C = 12\%$  et de  $\epsilon = 6,5\%$ , la valeur de  $G_s$  calculée est :

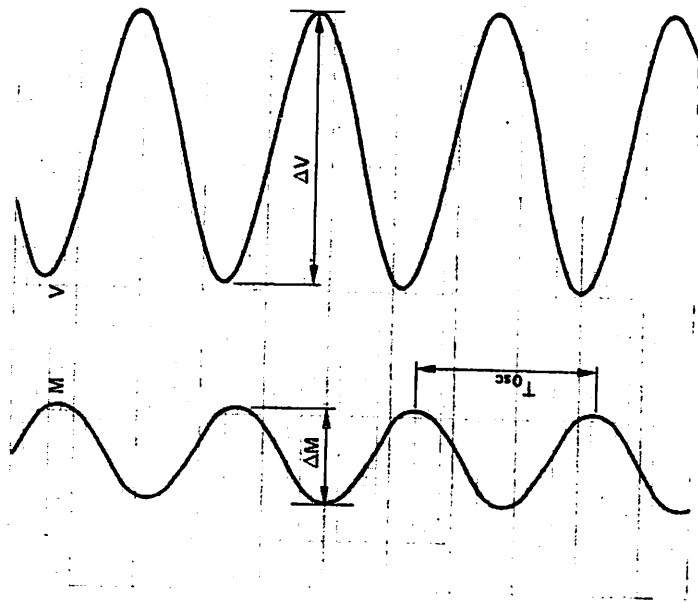
$$G_s = \frac{\Delta C - \epsilon}{\epsilon \cdot G_r} = \frac{12 - 6,5}{6,5 \cdot 1} = 0,85$$

La figure 7.8 permet de déterminer les paramètres  $\theta$  et  $\tau$ . Les oscillations entretenues sont obtenues à partir d'un gain de régulateur critique  $G_{rc} \left( \frac{\Delta V}{\Delta M} \right)$  égal à 2,9.

La période d'oscillations  $T_{osc}$  relevée est de 58 s.

Les calculs de  $\theta$  et  $\tau$  donnent :

$$\theta = \frac{58}{6,28} \cdot \sqrt{(2,5)^2 - 1} = 21,2 \text{ s.}$$



Un petit carreau = 4 secondes

Fig. 7.8 : Courbes relevées avec  $G_{rc} = 2,9$ .

et

$$\tau = \frac{58}{2} \cdot \left( 1 - \frac{\text{arc tg} \sqrt{(2,5)^2 - 1}}{3,14} \right) = 18,3 \text{ s.}$$

La fonction de transfert réglante du procédé est :

$$H_{(p)} = \frac{0,85 \cdot e^{-18,3p}}{1 + 21,3p}$$



## 7.2 IDENTIFICATION DES PROCÉDÉS NATURELLEMENT INSTABLES

Quelle que soit la méthode employée, les paramètres du modèle du procédé à identifier sont ceux d'un intégrateur pur avec retard :  $k$  et  $\tau$ .

La fonction de transfert de ce modèle est la suivante :

$$H_{r(p)} = \frac{k \cdot e^{-\tau \cdot p}}{p}$$

### 7.2.1 MÉTHODE D'IDENTIFICATION EN BOUCLE OUVERTE

Le régulateur est en manuel, ce qui a pour conséquence d'ouvrir la boucle de régulation. Cette méthode doit être pratiquée avec prudence, compte tenu du caractère naturellement intégrateur du procédé (fig. 7.9).

#### 7.2.1.1 Procédure

- Enregistrer les signaux de commande de vanne  $V$  et de mesure  $M$  sur un enregistreur à déroulement rapide.

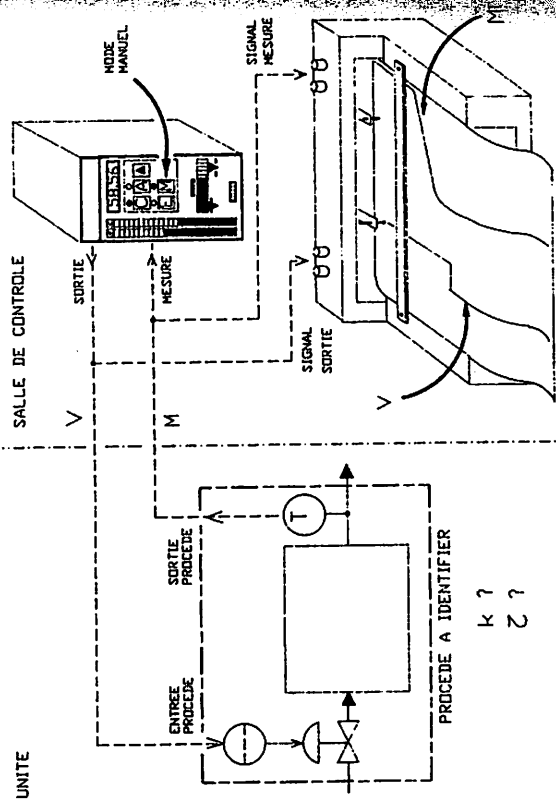


Fig. 7.9 : Identification en boucle ouverte d'un procédé instable.

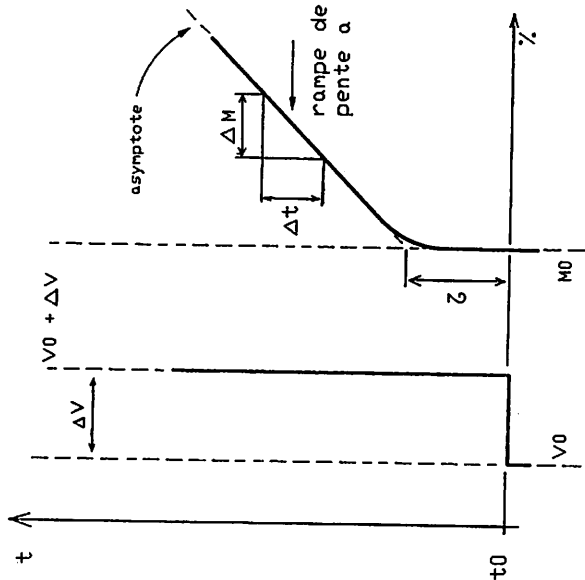


Fig. 7.10 : Analyse de l'enregistrement.

- Mettre le régulateur en manuel et stabiliser la mesure au point de fonctionnement ( $M_0$ ).
- Provoquer un échelon  $\Delta V$  sur le signal de commande de vanne.
- Après avoir obtenu une portion de courbe suffisante pour effectuer l'identification, passer le régulateur en automatique pour éviter la saturation du signal de mesure. Procéder ensuite à l'analyse de la courbe (fig. 7.10).

### 7.2.1.2 Recherche des paramètres

A partir de la pente  $\alpha$  ( $\frac{\Delta M}{\Delta t}$ ) et de la variation du signal de vanne  $\Delta V$ , les paramètres du procédé instable sont donnés par le tableau 7.3.

Tableau 7.3 : Calcul des paramètres d'un procédé instable ( $\Delta M$  et  $\Delta V$  exprimés en %,  $\Delta t$  en s et  $k$  en  $\frac{1}{s}$ ).

$\tau$ : Lecture directe suivant vitesse d'enregistrement (unité : s)	$k = \frac{\Delta M}{\Delta V \cdot \Delta t}$
---	--

## 7.213 Application

La réponse en boucle ouverte d'un système instable est donnée par la figure 7.11. L'origine de la mesure est située à  $t_0$  lors de la variation  $\Delta V$ .

L'asymptote à la courbe de mesure coupe l'axe des temps, à la valeur :

$$\tau = 28 \text{ s.}$$

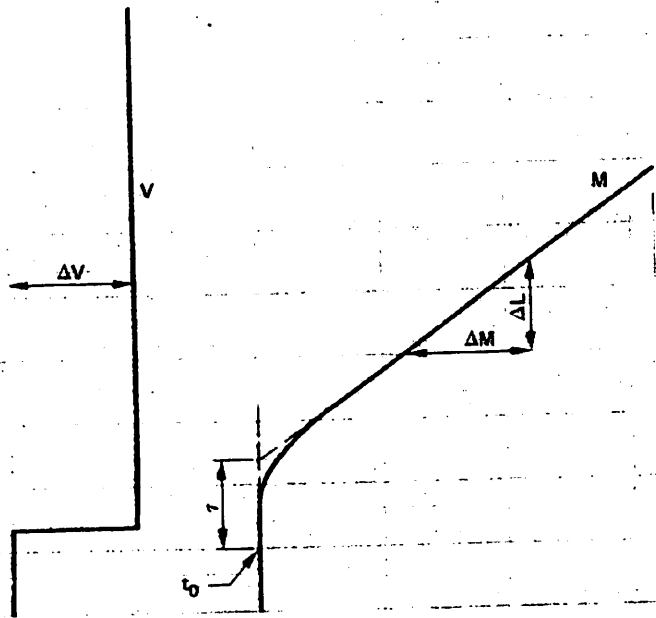
Pour une variation  $\Delta t = 28 \text{ s}$ , le signal de mesure varie de 10 %.

Le paramètre  $k$  est alors égal à :

$$k = \frac{10}{10.28} = 0,035 \text{ 1/s.}$$

La fonction de transfert réglante du procédé est :

$$H_{r(p)} = \frac{0,035 \cdot e^{-28 \cdot p}}{p}$$



Un petit carré = 4 secondes.

Fig. 7.11.

## 7.22 MÉTHODE D'IDENTIFICATION EN BOUCLE FERMÉE

Le régulateur est en automatique. La méthode nécessite la mise en oscillations entretenues de la boucle de régulation (fig. 7.12). Cette méthode doit être pratiquée avec prudence.

## 7.221 Procédure

- Régulateur en manuel, stabiliser la mesure au point de fonctionnement!
- Mettre le régulateur en proportionnelle seule avec un gain  $G_r$  de l'ordre de 1 (action intégrale minimale et action dérivée annulée).
- Mettre la consigne à la valeur de la mesure et passer le régulateur en automatique.
- Augmenter ensuite progressivement le gain du régulateur, jusqu'à obtenir des oscillations régulières du signal  $M$ . Le gain de régulateur qui entraîne les oscillations régulières est appelé gain critique  $G_{rc}$ , noter cette valeur et relever la période des oscillations  $T_{osc}$  (fig. 7.13).

Remarque :

- Rechercher une amplitude des oscillations la plus faible possible et s'assurer au cours des essais que le signal de vanne ne sature pas.
- Réduire le gain pour stabiliser la mesure.

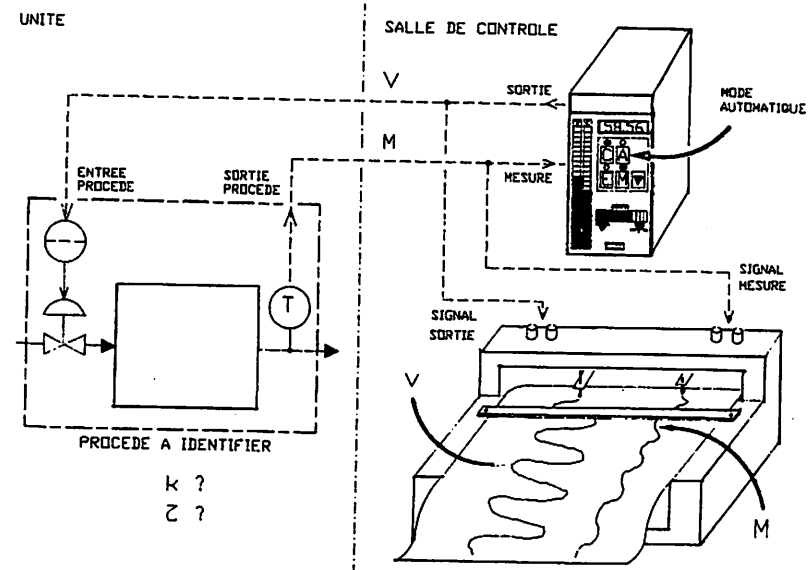


Fig. 7.12 : Identification en boucle fermée d'un procédé instable.



## 7.222 Recherche des paramètres

A partir des valeurs de  $G_{rc}$  et de  $T_{osc}$ , calculer les paramètres du procédé donnés par le tableau 7.4.

Tableau 7.4 : Calcul des paramètres d'un procédé instable  
( $T_{osc}$  et  $\tau$  exprimés en s,  $k$  en  $\frac{1}{s}$ ).

$k = \frac{6,28}{G_{rc} \cdot T_{osc}}$	$\tau = \frac{T_{osc}}{4}$
---	----------------------------

## 7.223 Application

La réponse en boucle fermée d'un système instable est donnée par la figure 7.13.

La période  $T_{osc}$  relevée est égale à 76 s, elle permet de calculer  $k$  et  $\tau$  :

$$k = \frac{6,28}{G_{rc} \cdot T_{osc}} = \frac{6,28}{6,35 \cdot 76} = 0,013 \text{ 1/s.}$$

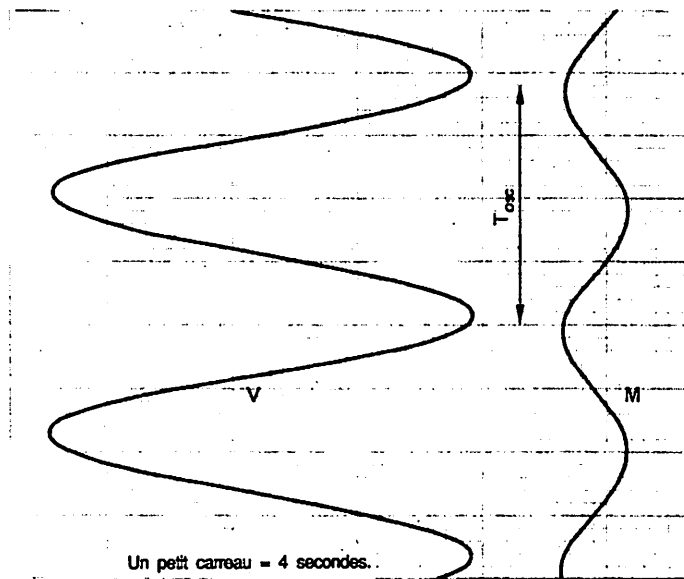


Fig. 7.13 : Courbes relevées avec  $G_{rc} = 6,35$ .

et

$$\tau = \frac{T_{osc}}{4} = \frac{76}{4} = 19 \text{ s.}$$

La fonction de transfert réglante du procédé est :

$$H_{r(p)} = \frac{0,013 \cdot e^{-19 \cdot p}}{p}$$