

C. SERMONDADE
A. TOUSSAINT
sous la direction de
R. MÉRAT & R. MOREAU

BTS

CONIL JEAN-PIERRE
18 LES NVX HORIZONS
78990 ELANCOURT
JP.CONIL@FREESURF.FR

Régulation

Tome 3

Boucles complexes,
régulation discontinue,
études techniques

NATHAN

Sommaire

| | |
|--|-----|
| Avant-propos | 3 |
| 1. Limites de la monoboucle PID | 4 |
| 2. Influence d'un temps mort | 8 |
| 3. Influence des non-linéarités 1 | 14 |
| 4. Influence des non-linéarités 2 | 20 |
| 5. Contrôle des perturbations 1. Correction en chaîne ouverte | 26 |
| 6. Contrôle des perturbations 2 . Correction de tendance 1 | 32 |
| 7. Contrôle des perturbations 3 . Correction de tendance 2 | 38 |
| 8. Régulation en cascade 1. Cascade sur la grandeur réglante | 44 |
| 9. Régulation en cascade 2. Cascade sur une grandeur intermédiaire | 50 |
| 10. Régulation à trois éléments | 56 |
| 11. Régulation de rapport | 62 |
| 12. Régulation à deux grandeurs réglantes | 68 |
| 13. Régulation discontinue 1 | 74 |
| 14. Régulation discontinue 2 | 80 |
| 15. Régulation modulée | 86 |
| 16. Boucles diverses | 92 |
| 17. Études techniques 1. Méthodologie | 98 |
| 18. Études techniques 2. Chaudière 1 | 102 |
| 19. Études techniques 3. Chaudière 2 | 108 |
| 20. Études techniques 4. Colonne à distiller 1 | 112 |
| 21. Études techniques 5. Colonne à distiller 2 | 118 |

Annexes

| | |
|--|-----|
| Bibliothèque d'opérateurs algorithmiques | 122 |
| Documents techniques sur la régulation modulée | 124 |
| Principaux symboles utilisés | 126 |
| Principaux résultats des tomes 1 et 2 | 127 |

Ce livre s'adresse aux techniciens de la régulation qui ont besoin de disposer rapidement d'informations théoriques ou pratiques. Il est plus généralement destiné à tous ceux qui souhaitent se familiariser avec la régulation, sans se limiter aux asservissements. Ce livre est le troisième d'une série qui présente l'ensemble de la régulation et du contrôle-commande des installations industrielles.

Utilisant un formalisme mathématique allégé, il regroupe les résultats essentiels de la régulation : à ce titre, il peut constituer un aide-mémoire très utile aux étudiants et aux auditeurs de la formation permanente.

Le technicien ou l'étudiant, qui désire retrouver un résultat ou une explication, est immédiatement dirigé par la table des matières vers le sujet qui l'intéresse. Pour celui qui désire bien maîtriser les lois de la régulation, les difficultés sont réparties entre des chapitres courts, qui constituent une suite d'étapes simples. Après chacune d'elles les connaissances peuvent être contrôlées et confortées avant de passer à la suivante. Cette démarche qui apporte simultanément progressivité et assurance en soi sera certainement appréciée de tous ceux que l'étude des sciences intéresse.

La présentation retenue doit permettre un accès facile à l'information recherchée et un apprentissage aisé. En effet, à chaque notion importante correspond un chapitre. Le lecteur y trouve un thème accompagné d'exemples. Tous les chapitres comportent des exercices avec leurs solutions (proposées pour des échelles de temps réduites pour simplifier).

Le contenu de chaque chapitre reste toujours simple, les auteurs ayant choisi de privilégier l'observation et l'exploitation d'expériences personnelles plutôt que l'exposé de théories et le recours systématique aux mathématiques.

Les connaissances acquises, indépendantes des technologies en perpétuelle évolution, peuvent suffire pour une bonne maîtrise des nombreux équipements de régulation, dans les domaines les plus variés.

Elles peuvent permettre aux techniciens de conception, d'installation, de maintenance et de conduite de compléter des connaissances parfois empiriques, que les contraintes modernes de qualité de production imposent de réactualiser.

La maîtrise des installations industrielles complexes pose un problème stratégique aux responsables d'installations, compte tenu des progrès réalisés dans le domaine des algorithmes de régulation.

Faut-il s'engager dans la voie des correcteurs spécifiques, chaque jour plus nombreux et sophistiqués, au risque d'observer une inadéquation entre le matériel mis en œuvre et le niveau d'intervention des techniciens ?

Faut-il conserver le classique régulateur PID, bien connu des agents de conduite et des techniciens de régulation, au risque de subir ses limitations, au détriment des performances exigées par les productions modernes ?

A partir de l'analyse des insuffisances de la monoboucle PID, ce tome 3 de Régulation va permettre de montrer que dans la majorité des cas, il est possible de mettre en œuvre des stratégies prolongeant le domaine de validité de ce type de régulation.

Ces solutions, au fonctionnement éprouvé et maîtrisé par le technicien, sont bien souvent préférées à l'utilisation des correcteurs spécifiques.

1 Influence d'un temps mort

Indépendamment de la modélisation d'un système physique par un modèle de Bröida ou de Strejc, un temps mort naturel affecte le fonctionnement d'un certain nombre de dispositifs industriels.

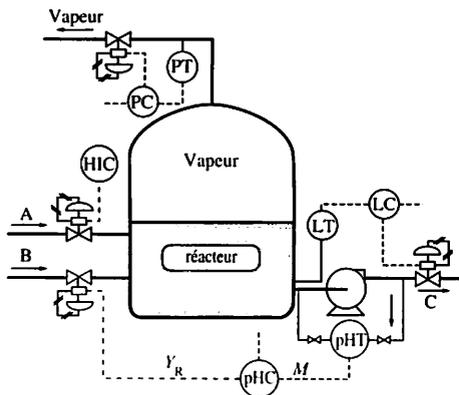


Fig. 1

Cela complique fortement la régulation PID et le technicien de régulation doit être capable d'appréhender cette particularité avec des critères objectifs.

La figure 1 représente un neutraliseur chimique produisant un engrais azoté par neutralisation d'un acide A par une base B. La qualité du produit, fabriqué en continu, est caractérisée par la valeur du pH de la solution, ajustée par l'injection de base B.

On comprend aisément que ce dispositif présente un temps mort important, fonction de la capacité du réacteur, des débits des réactifs, de l'emplacement de la sonde de pH.

A priori, le régulateur pHC ne pourra pas garantir des performances élevées. Pour l'exemple de la figure 1, assimilable en première approximation à un mélange en ligne, on sait étudier l'influence du débit de charge Q_C sur le temps mort T (Régulation 1, chap. 13). Le technicien peut alors adapter les paramètres du régulateur en fonction de Q_C (régulation adaptative).

2 Non-linéarité des systèmes

La modélisation d'une fonction de transfert est toujours réalisée autour d'un point de fonctionnement, dans une hypothèse de linéarité locale. Pour des procédés industriels évoluant en fonction des contraintes variables de fabrication (consigne, débit de charge,...), cette hypothèse n'est plus réaliste. Il est cependant relativement aisé de connaître les variations des paramètres de la fonction de transfert réglante (gain statique, temps mort,...) en fonction des points de fonctionnement envisagés.

On peut alors concevoir que ces variations puissent être prises en compte pour améliorer la stratégie de régulation.

Pour l'exemple de la figure 1, on remédie à la non-linéarité du gain statique de la fonction de transfert réglante en linéarisant le système par un choix judicieux de la caractéristique de la vanne employée.

3 Perturbations de grandes amplitudes

La présence d'un temps mort, l'existence de non-linéarités, conduisent à des réglages PID « mous ». Face à des perturbations importantes, le manque de rapidité de la chaîne fermée aboutit à des écarts transitoires préjudiciables à la qualité exigée. Suivant la nature de la perturbation, il est possible de contrarier son influence sur la grandeur réglée.

Perturbations externes

La chaîne de régulation de pH du réacteur de la figure 1 étant en fonctionnement automatique, une variation du débit Q_A modifie la qualité du produit. Cet écart, perçu après un retard important par le transmetteur pHT, ne permet d'obtenir qu'une réaction a posteriori du régulateur.

Ainsi le réglage « mou » du régulateur ne rend pas possible un retour rapide à la valeur de consigne.

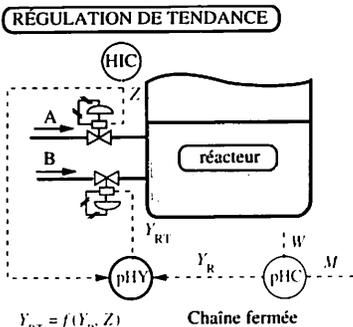


Fig. 2

Pour les variations possibles de Q_A , une régulation en chaîne ouverte du débit Q_B à partir de Q_A permet alors de limiter la durée et l'amplitude du régime transitoire.

L'ébauche de cette stratégie, associant les avantages de deux chaînes (chaîne fermée pour la précision statique, chaîne ouverte pour la rapidité) est représentée figure 2 et appelée *régulation de tendance*. L'analyse du fonctionnement est la suivante.

Une variation du signal de commande de vanne Y_{RA} (signal de perturbation Z) se traduit

immédiatement, par l'intermédiaire du module de calcul pHY, en une variation du signal de commande Y_{RT} du débit Q_B .

Si cette action est bien ajustée, la variation de pH est faible et peut être corrigée par la chaîne fermée.

L'action de la chaîne ouverte s'effectuant avant la répercussion de la perturbation sur la mesure, cette chaîne est souvent appelée chaîne « a priori ». Dans cet ouvrage, on préférera le terme *chaîne ouverte* (conforme à la terminologie du chapitre 1 de Régulation 1).

Une connaissance plus fine des concentrations C_A et C_B en produits actifs, une variation de Q_A sous forme d'une rampe programmable, permettent encore d'améliorer le dispositif de régulation.

Perturbations de grandeurs intermédiaires

Une grandeur intermédiaire est une grandeur interne de la fonction de transfert réglante $H(p)$, ayant une influence directe sur la grandeur réglée. Accessible dans la chaîne d'action d'une boucle de régulation, elle est elle-même obligatoirement liée au signal de commande Y_R et à une perturbation externe.

Dans l'exemple du neutraliseur, le débit Q_B obéit à la loi :

$Q_B = K \cdot Y_R \cdot \sqrt{\Delta P}$, où ΔP représente la différence de pression entre les bornes de la vanne. Si la pression amont d'alimentation varie, une ouverture donnée de la vanne (fonction de Y_R) n'assure pas le débit demandé.

Un asservissement de cette grandeur intermédiaire Q_B , conformément à la demande du régulateur pHC, assure des performances satisfaisantes.

Cette réalisation est représentée figure 3 et est appelée *régulation en cascade*. Elle nécessite un régulateur « esclave » FRC permettant de compenser les variations de ΔP .

Sur cet exemple, on notera que la grandeur intermédiaire est la grandeur réglante mais qu'il peut en être autrement.

L'association d'une régulation de tendance et d'une régulation en cascade est possible et caractérise une régulation à trois éléments.

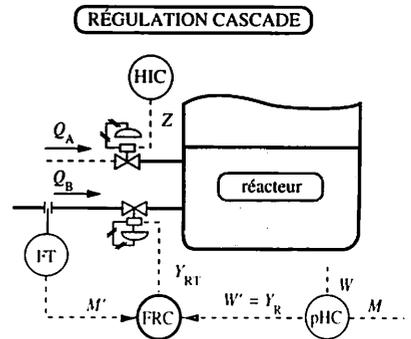


Fig. 3

4 Limites d'action de la grandeur réglante

L'hypothèse simplificatrice de la monoboucle PID conduit à commander une grandeur réglante par grandeur réglée. La puissance mise en jeu, la rapidité de réaction de la grandeur choisie ne sont parfois pas suffisantes pour assurer les objectifs désirés : il convient alors de choisir judicieusement plusieurs grandeurs de réglage associées, pilotées par un même signal réglant que ces grandeurs se partagent. La régulation mise en œuvre s'appelle alors « à partage d'étendue » ou *split range*.

La figure 4 donne un exemple de ce dispositif assurant le maintien de la pression du réacteur par :

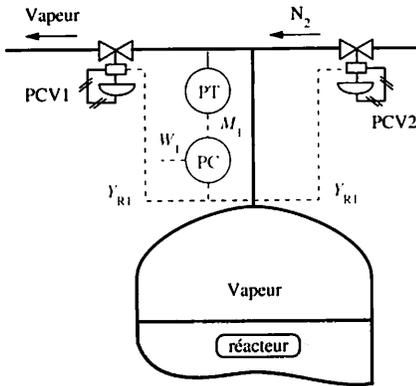


Fig. 4

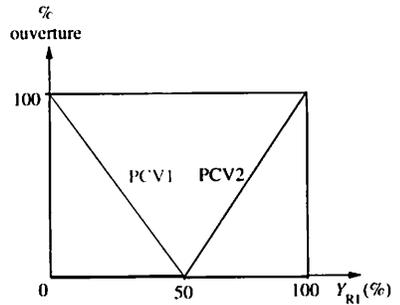


Fig. 5

- un apport d'un gaz inerte (N₂) lors des phases d'arrêt et de démarrage,
- un dégazage en fonctionnement normal.

Le signal de commande unique Y_{R1} commande les deux vannes PCV1 et PCV2, préalablement étalonnées. Le partage de l'échelle de commande 0-100 % de Y_{R1} est représenté figure 5.

Cette sorte de dispositif est fréquemment utilisée industriellement, notamment pour :

- la régulation de température par action chaude et froide,
- la régulation étagée.

5 Conclusion

On retiendra que la régulation industrielle reste attachée à l'emploi des régulateurs PID, mais dans des stratégies complexes comparables aux exemples rapidement évoqués ci-dessus.

Ces boucles complexes sont développées dans les chapitres qui suivent et des études techniques synthétiques compléteront cet ouvrage.

Pour les systèmes industriels admettant un temps mort *naturel*, la régulation PID ne permet généralement pas d'obtenir des performances satisfaisantes, notamment à cause de l'influence du temps mort sur la saturation de l'action intégrale.

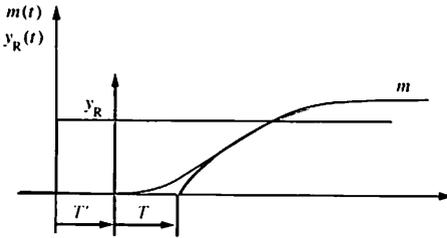


Fig. 1

On a déjà eu l'occasion de souligner l'importance de l'évaluation du temps mort naturel T' (Régulation 2, chap. 2). On le détermine graphiquement avant le point de décollement de la réponse indicielle (fig. 1). On prendra garde de ne pas le confondre avec le temps mort fictif d'identification T défini dans la méthode de Broïda. En particulier pour les critères de réglages, on rappelle que c'est la somme $T' + T$ qui est prise en compte.

1 Origine des temps morts

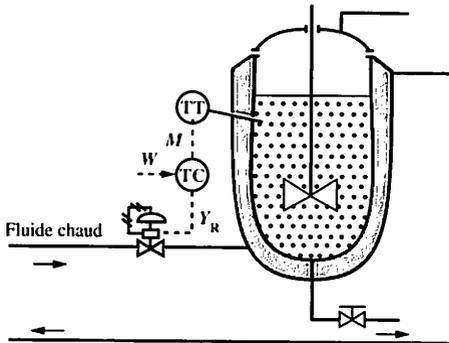


Fig. 2

Du fait de leur conception, de nombreux dispositifs de fabrication introduisent un temps mort préjudiciable à la stratégie de régulation.

Temps mort de propagation d'énergie

La figure 2 représente un réacteur à double enveloppe. Il assure une élévation de température de la masse réactionnelle par circulation d'un fluide chaud, pour obtenir un rendement satisfaisant. L'utilisation d'un tel dispositif permet une répartition de l'échange calorifique sur une surface importante, mais entraîne un temps

mort naturel notable entre une modification de la commande Y_R et sa répercussion sur la mesure M .

Temps mort de propagation de matière

Ce temps mort se rencontre dans le cas du mélange en ligne et pour de nombreuses réactions chimiques, de cinétique lente, qui font appel à des bacs intermédiaires « mûrisseurs » permettant à la réaction de s'achever. Par exemple, c'est le cas des réactions de neutralisation acide/base permettant la fabrication de certains engrais (voir chap. 1 fig. 1). Ainsi dans une telle installation, le critère de fin de réaction est le pH de la solution finale. Il est évident que l'on introduit un temps mort lié à la durée du transit du fluide dans le neutraliseur, puis les bacs tampons.

Un autre cas, très courant, est celui de l'échantillonnage. Les analyseurs industriels, qui sont des capteurs sophistiqués, doivent être installés selon des normes bien précises (milieux AntiDéFlagrants ADF, Sécurité Intrinsèque SI, ...). Afin de garantir la sécurité et faciliter les interventions, ils sont souvent regroupés dans une salle appropriée (sous atmosphère contrôlée et pressurisée) appelée *cellule d'analyse*. Cette disposition nécessite souvent des lignes d'amenée du produit, ou lignes d'échantillonnage, de longueur importante, ce qui introduit des temps morts importants.

2 Modélisation des systèmes à temps mort

On rappelle les résultats du chapitre 2 de Régulation 2 :
La fonction de transfert globale est :

Modèle de Broïda

$$H(p) = K \frac{e^{-(T'+T)p}}{1 + \tau p}$$

Modèle de Strejc

$$H(p) = K \frac{e^{-T'p}}{(1 + \tau p)^n}$$

3 Limites de la régulation PID

Pour un système identifié à l'aide d'un modèle de Broïda, la limite dépend de la valeur du rapport $\frac{T' + T}{\tau}$, qui caractérise la difficulté de réglage. On admet souvent que si sa valeur excède 0,5, aucune méthode de réglage PID n'est satisfaisante. En effet, au-delà de cette limite, la valeur fournie pour la bande proportionnelle X_p est trop importante pour aboutir à des performances satisfaisantes.

Pour un système identifié à l'aide du modèle de Strejc, on ne dispose pas directement d'une expression de la difficulté de réglage. La méthode de réglage de Naslin, bien adaptée à ce modèle polynomial, ne peut plus, en outre, être employée si un temps mort est à prendre en compte.

Dans le cas où le temps mort n'est pas trop important, on montre que l'on peut modifier le modèle de façon à trouver un modèle équivalent sans temps mort.

Modèle de Strejc équivalent sans temps mort

Pour un ordre initial n supérieur ou égal à deux ($n \geq 2$), on montre que l'on peut établir l'équivalence :

$$H(p) = \frac{Ke^{-T'p}}{(1 + \tau p)^n} \simeq \frac{K}{(1 + \tau' p)^n} \quad (1)$$

La justification mathématique peut s'établir à partir des expressions des développements limités au 1^{er} ordre de ces expressions, au voisinage de $p = 0$.

$e^{-T'p} \simeq 1 - T'p + \varepsilon'(p)$ et $\frac{1}{(1 + \tau p)^n} \simeq 1 - n\tau p + \varepsilon(p)$ ou $\varepsilon(p)$ et $\varepsilon'(p)$ sont des infiniment petits.

Par utilisation des deux expressions, on peut écrire :

$$\frac{e^{-T'p}}{(1 + \tau p)^n} \simeq 1 - (T' + n\tau)p + \varepsilon''(p)$$

et :

$$\frac{1}{(1 + \tau'p)^{n'}} \simeq 1 - n'\tau'p + \varepsilon'''(p)$$

L'équivalence : $\boxed{n'\tau' = T' + n\tau}$ permet alors d'égaliser les deux développements et d'écrire l'expression (1).

Pourquoi au voisinage de $p = 0$ et comment choisir n' ?

Le diagramme de Black de la figure 3 permet de répondre aux deux questions. On rappelle que la fonction de transfert isochrone peut être déduite de la fonction de transfert isomorphe en effectuant la substitution de p par $j\omega$. Les valeurs faibles de p correspondent donc aux pulsations faibles, qui donnent la portion intéressante du lieu de Black : celle pour laquelle l'argument d'une fonction de transfert est comprise entre 0 et -180° .

Si l'on se souvient que l'expression (1) est d'autant plus vraie que p est faible, on en déduit qu'il faut des valeurs faibles de la pulsation ω dans cette zone.

Or pour un modèle de Strejc, l'argument de $H(j\omega)$ vaut $\varphi = -n \cdot \arctan(\tau \cdot \omega)$. Pour un argument φ donné, ω est d'autant plus faible que n est élevé.

Les courbes 1, 2 et 3 de la figure 3 montrent que pour un temps mort faible ($T' = 2$ s), si n est supérieur à deux, on peut admettre $n' = n$. En revanche, $n' = n + 1$ permet d'aboutir à une meilleure équivalence.

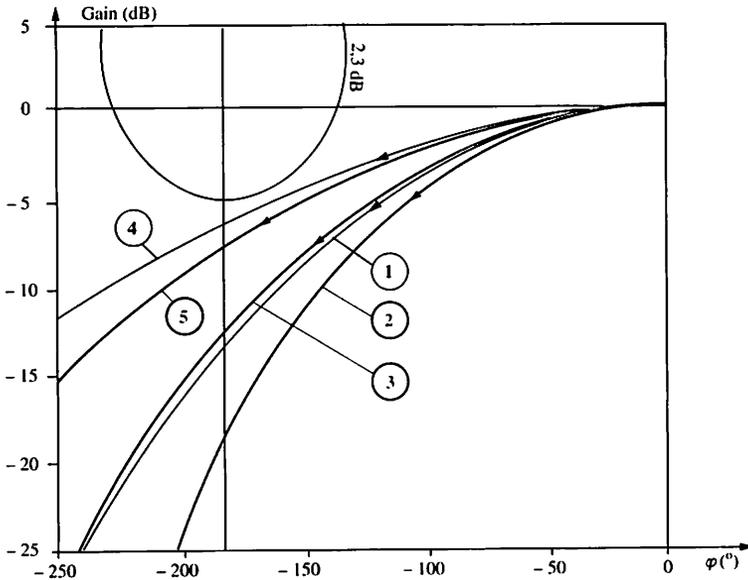
Les courbes 4 et 5 de la figure 3 montrent que, pour un temps mort important ($T' = 10$ s), on obtient une équivalence satisfaisante si $n' \gg n$, mais alors le critère de Naslin devient très compliqué à mettre en œuvre.

Critère empirique de choix de n'

Pour un rapport $\frac{T'}{n\tau}$ déterminé, n' a une valeur donnée par la relation

$$n' = n + \text{INT} \left(\frac{10 T'}{n\tau} \right)$$

où la fonction INT(x) représente la partie entière de x . Cette formule fournit : $n' = n + 1$ pour $\frac{T'}{n\tau} = 0, 125$.



- ① $\frac{e^{-2p}}{(1+7p)^3}$
- ② $\frac{1}{(1+7.66p)^3}$
- ③ $\frac{1}{(1+5.75p)^4}$
- ④ $\frac{e^{-10p}}{(1+7p)^3}$
- ⑤ $\frac{1}{(1+5.16p)^5}$

Fig. 3

Cas particuliers

Pour $n = 2$, il faut impérativement choisir $n' \geq 3$, car pour $n' = 2$ le modèle admet pour asymptote $\varphi = -180^\circ$.

Pour les systèmes intégrateurs (Régulation 2, chap. 3), ce type d'équivalence a été employé : $T = t_0 = n\tau$.

Validité de l'équivalence

L'équivalence : $n'\tau' = T' + n\tau$ permettant d'adopter n' aussi élevé que voulu, il n'y a pas de limite dans le cas d'une élévation de l'ordre n . Par contre, l'emploi de cette formule pour une diminution de n (en vue de simplifier un calcul) doit être conduite avec beaucoup de précaution.

Limites de la régulation PID

Par analogie avec le critère de choix d'un réglage PID pour un modèle

de Broïda : $\frac{T}{\tau} < 0,5$, on définit le critère $\boxed{\frac{T'}{n\tau} < 0,5}$, avec la même

échelle qu'au chapitre 16 de Régulation 2. Lorsque ce critère n'est pas satisfait, il convient d'utiliser d'autres stratégies de régulation (boucles en cascade, régulateurs spécifiques, ...).

Exercice résolu

Un système physique, identifié par la méthode de Strejc, admet pour modèle de sa fonction de transfert réglante :

$$H(p) = 1,2 \frac{e^{-3p}}{(1+12p)^2}$$

On associe ce procédé à un régulateur PI de structure mixte :

$$C(p) = A \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot p} \right)$$

- Établir un modèle polynômial $H'(p)$, équivalent à $H(p)$.
- En utilisant $H'(p)$, étudier la frontière de stabilité à partir du critère de Routh.
- Dans un diagramme de Black, vérifier les lieux pour quelques points de cette frontière ($A = 1,2,3,4,5$).
- Réaliser cette dernière étude pour $H(p)$ afin d'estimer l'erreur introduite par l'usage de la fonction équivalente. Conclusions ?

Solution :

1. Modèle équivalent

Le rapport $\frac{T'}{n\tau}$ valant 0,125, on choisit

$$n' = n + 1 \text{ donc : } \boxed{n' = 3}$$

Le critère $n'\tau' = T' + n\tau = 27$ fournit directement : $\boxed{\tau' = 9 \text{ s}}$

On peut donc écrire :

$$H(p) \simeq H'(p) = \frac{1,2}{(1+9p)^3}$$

2. Critère de Routh

On se reportera utilement au chapitre 8 de Régulation 2. A partir de l'équation caractéristique $1 + T(p) = 0$, on détermine le polynôme caractéristique

$$\mathcal{P}(p) = 729 T_i p^4 + 243 T_i p^3 + 27 T_i p^2 + T_i (1 + 1,2 A)p + 1,2 A$$

Le tableau de Routh est le suivant :

| | | | |
|-------|-----------|-------------------|---------|
| p^4 | $729 T_i$ | $27 T_i$ | $1,2 A$ |
| p^3 | $243 T_i$ | $T_i (1 + 1,2 A)$ | 0 |
| p^2 | a_1 | $1,2 A$ | 0 |
| p^1 | b_1 | 0 | |
| p^0 | $1,2 A$ | | |

La boucle de régulation est stable si :
 $a_1 = T_i (24 - 3,6 A) > 0$

soit : $A < 6,66$ et :

$$b_1 = T_i (1 + 1,2 A) - \frac{291,6 A}{24 - 3,6 A} > 0.$$

La frontière $b_1 = 0$ donne l'équation :

$$T_i = \frac{291,6 A}{(24 - 3,6 A) (1 + 1,2 A)} \text{ dont}$$

le graphe est fourni figure 4.

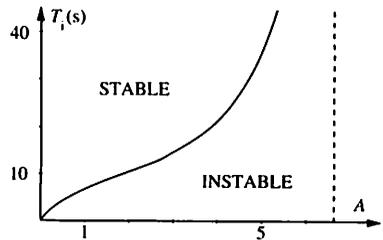


Fig. 4

3. Diagramme de Black pour $H'(p)$

L'étude est réalisée à partir de la fonction de transfert isochrone en chaîne ouverte $T(j\omega) = C(j\omega) H'(j\omega)$.

La figure 5 représente les différents tracés :

| Courbe | A | T_i |
|--------|---|-------|
| 1 | 1 | 6,5 |
| 2 | 2 | 10,2 |
| 3 | 3 | 14,4 |
| 4 | 4 | 21,0 |
| 5 | 5 | 34,7 |

On vérifie que les 5 courbes passent par le point critique ($0 \text{ dB}, -180^\circ$).

4. Diagramme de Black pour $H(p)$

Cette fois, $T(j\omega) = C(j\omega) H(j\omega)$. Les courbes sont fournies figure 6, pour les couples (A, T_i) de la question précédente. On constate, bien sûr, un écart par rapport au point critique. Cet écart intervient cependant dans le « bon sens » dans la mesure où il fournit un supplément de marge de gain de l'ordre de 2 dB.

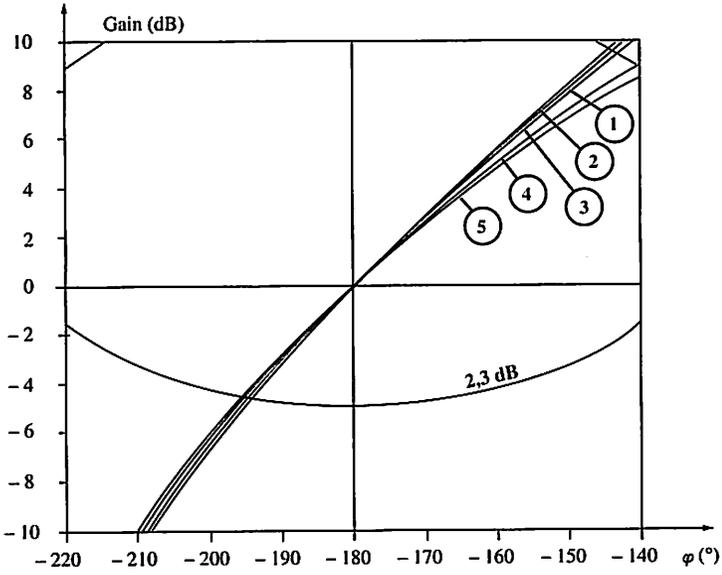


Fig. 5

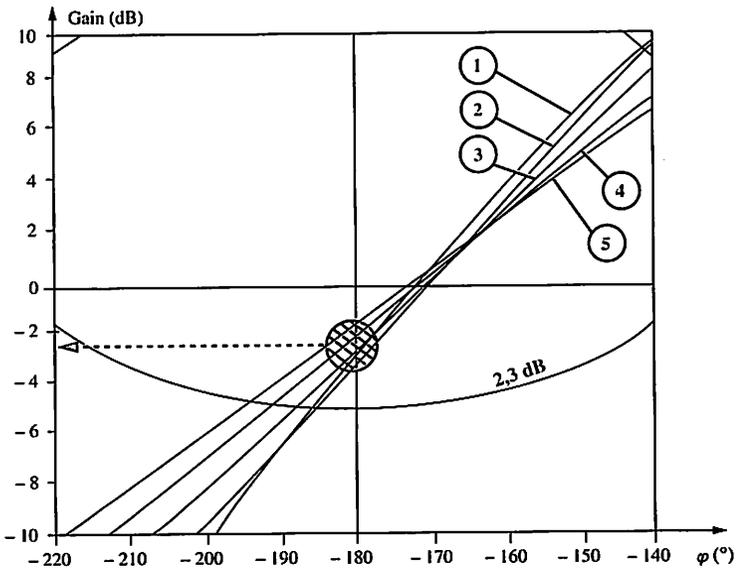


Fig. 6

Si la plupart des dispositifs industriels fonctionnant en régulation de maintien peuvent être considérés comme linéaires autour du point de fonctionnement adopté, cette simplification ne peut plus être envisagée lorsque :

- l'amplitude de la perturbation principale Z varie beaucoup,
- la consigne de fonctionnement W varie.

Le premier cas se rencontre en régulation de maintien : la perturbation principale Z , qui est habituellement la charge de l'installation, modifie la caractéristique du système. L'étude par modèle de connaissance d'un mélange en ligne (fig. 1) montre qu'une variation du débit $Q_B = Z$ déplace le point de fonctionnement. Dans Régulation 1, chapitre 7, on a montré que ce point passe de X_1 à X_3 , ce qui modifie fortement le gain statique de l'installation (fig. 2).

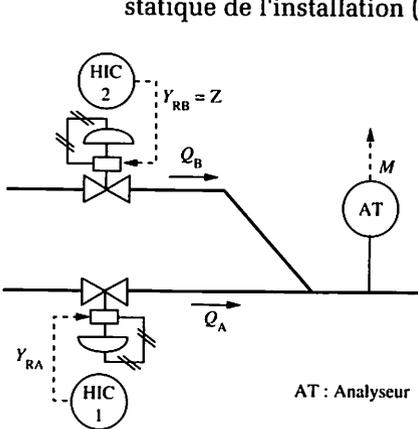
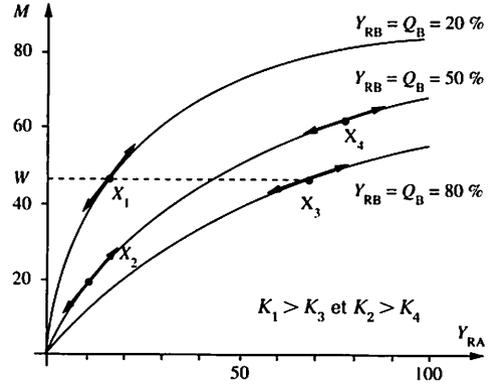


Fig. 1



M représente le pourcentage de produit A dans le mélange.

Fig. 2

Dans l'exemple ci-dessus, le second cas correspond au déplacement du point de fonctionnement de X_2 à X_4 , le débit $Q_B = Z$ restant constant.

Ces deux cas peuvent ne pas être dissociés. En effet, ils correspondent tous deux à une variation du gain statique K en fonction du signal réglant Y_{RA} .

On exclut pour l'instant les non-linéarités dues à des discontinuités (seuils, saturations...).

1 Étude d'une régulation de température par désurchauffe

Le dispositif est représenté figure 3. Un générateur de vapeur (chaudière) fournit de la vapeur surchauffée (débit Q_v), c'est-à-dire à une température θ_2 supérieure à la température θ désirée. Afin de ramener le signal de mesure M à la valeur de consigne W désirée, on injecte de

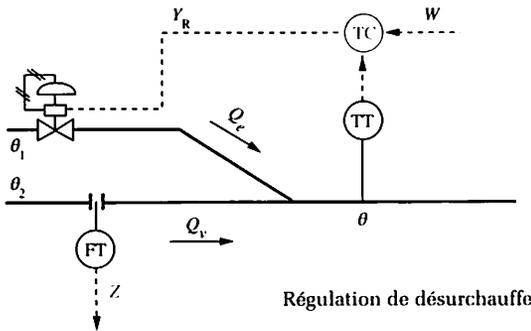


Fig. 3

Régulation de désurchauffe

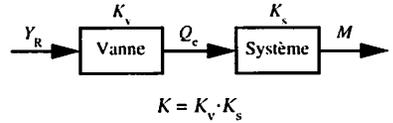


Fig. 4

$$K = K_v \cdot K_s$$

l'eau froide « dite de désurchauffe » (débit Q_e), dont la vaporisation instantanée refroidit la vapeur.

A consigne W constante, la régulation de maintien de température doit assurer des performances constantes, dépendant le moins possible du débit de charge Q_v .

Analyse physique

On obtient un réseau de caractéristiques proche de celui d'un mélange en ligne. Si l'on adopte une vanne linéaire de type normalement fermée (NF), on conçoit aisément qu'une même variation du signal réglant ΔY_R (donc une même variation ΔQ_e) entraîne une variation ΔM de température variable selon la valeur de Q_v . L'étude des variations du gain statique $K = \frac{\Delta M}{\Delta Y_R}$ en fonction de Y_R peut être conduite en décomposant la fonction de transfert réglante en 2 blocs (fig. 4), et en montrant que la non-linéarité de K est due à celle de K_s .

Un bilan thermique simplifié permet de vérifier cette loi. Il suffit d'écrire que, en une durée déterminée, la quantité de chaleur cédée par la vapeur qui se refroidit est égale (en valeur absolue) à celle nécessaire :

- pour échauffer l'eau à la température de vaporisation $\theta_{vap.}$,
- pour réaliser le changement d'état,
- pour échauffer la vapeur obtenue.

On obtient alors :

$Q_e [C_e (\theta_{vap.} - \theta_1) + L_v + C_v (\theta - \theta_{vap.})] = Q_v C_v (\theta_2 - \theta)$, où l'on désigne par C_e et C_v les chaleurs massiques de l'eau et de la vapeur, L_v étant la chaleur latente de vaporisation.

Un calcul différentiel permet alors de montrer que, à débit Q_v constant,

on obtient $\frac{\Delta \theta}{\Delta Q_e} = - \frac{a}{Q_e + Q_v}$. Or la quantité $\Delta \theta / \Delta Q_e$ est proportionnelle

à $|K_S|$ et on voit donc que $|K_S|$ diminue lorsque Q_e (donc Y_R) augmente. Cette étude permet également de montrer que $|\Delta\theta/\Delta Q_e|$ diminue également lorsque Q_v augmente. Or à température θ constante, une augmentation de Q_v induit une augmentation de Q_e et donc de Y_R . Ces résultats sont résumés graphiquement sur la figure 5.

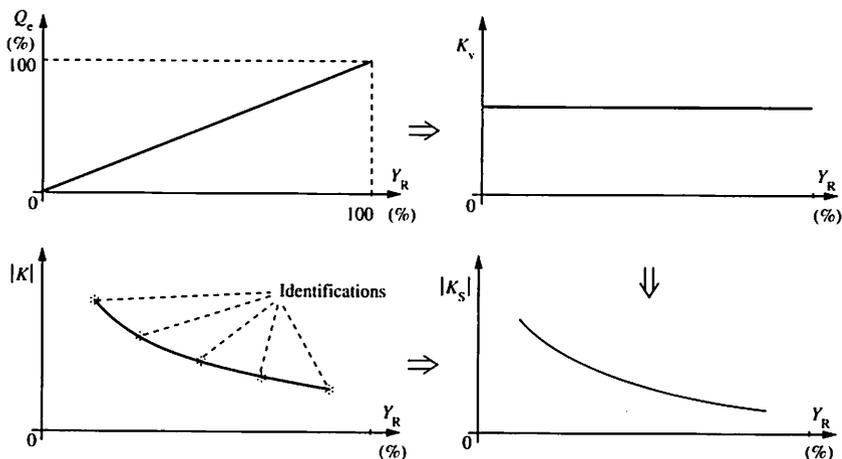


Fig. 5

On constate que la non-linéarité est due uniquement à l'influence du débit Q_v sur la loi de variation de la température θ en fonction du débit Q_e .

Linéarisation de la fonction de transfert réglant

L'objectif étant d'approcher un gain $K = K_v \cdot K_S$ constant, on recherche une caractéristique de vanne adaptée. Cette adaptation s'effectue parfois par le choix de la vanne, mais plus généralement on préfère modifier le positionneur au moyen de cames fournies par le constructeur. Cette méthode est rapide, efficace et n'entraîne pas de modifications lourdes de l'installation.

La figure 6 visualise les conséquences de ce changement de caractéristiques. Sur cet exemple, la vanne se rapproche d'une loi « égal pourcentage ». On notera l'importance de ce choix, nécessitant de la part du technicien de régulation des connaissances solides en instrumentation générale.

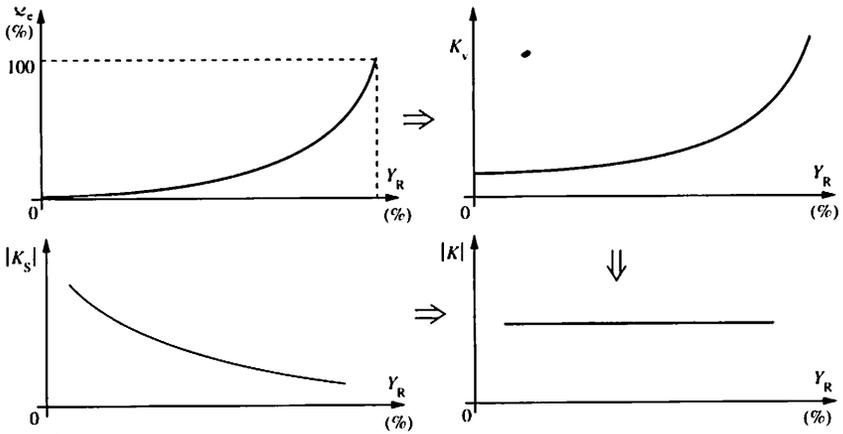


Fig. 6

2 Généralisation

On a vu ci-dessus que le choix de la caractéristique de vanne permet de compenser, soit l'influence de la perturbation Z , soit la non-linéarité dépendant de la consigne W . Sur cet exemple précis, la variation du gain statique K en fonction du signal réglant Y_R a la même allure dans les deux cas ($K_1 > K_3$ et $K_2 > K_4$), mais pas nécessairement les mêmes valeurs. Il convient souvent d'adopter une loi de vanne intermédiaire pour atténuer les deux phénomènes simultanément.

La compensation précise des deux variations concomitantes peut cependant se faire de multiples façons comme on le verra dans des chapitres ultérieurs. Habituellement, on préfère plutôt compenser un gain statique variable en fonction de la consigne W . En effet, la compensation des effets des perturbations peut se faire par régulation adaptative (voir chapitre 4) ou au moyen d'un dispositif de commande en chaîne ouverte. Une solution astucieuse consiste, en particulier, à insérer un module « multiplicateur » dont le coefficient k' dépend de la perturbation Z (fig. 7).

Lorsque la caractéristique de vanne ne peut pas être modifiée facilement, on retiendra qu'il est possible de créer une non-linéarité antagoniste par un module de fonction $Y_{RT} = f(Y_R)$ comme indiqué sur la figure 8.

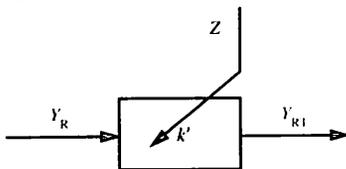


Fig. 7

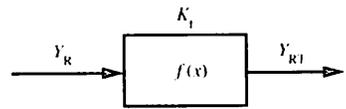


Fig. 8

Exercices résolus

1 On se propose de linéariser la chaîne de régulation de température étudiée au paragraphe 1, autour d'un point de fonction fixe $M = M_0$ (régulation de maintien). Des identifications en chaîne ouverte, réalisées lors de la mise en service du dispositif avec une vanne linéaire, permettent d'obtenir le tableau suivant, la fonction de transfert réglante étant identifiée selon le modèle de Broïda :

| Z | Z ₁ | Z ₂ | Z ₃ |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|
| Q _e (%) | 20 | 50 | 80 |
| K | -4,2 | -1,5 | -0,9 |
| τ (s) | 50 | 48 | 49 |
| T (s) | 11 | 11 | 10 |

On rappelle que Z représente la perturbation correspondant au débit Q_v et que le coefficient de réglage d'une vanne ou rangeabilité (Régulation 1

chap. 3) est le rapport $\frac{Q_{e \text{ maxi}}}{Q_{e \text{ mini}}}$ des débits contrôlables par la vanne.

1. Tracer la courbe représentant la variation du gain statique en fonction du signal Y_R.

2. Pour linéariser le système, le technicien choisit un positionneur permettant d'obtenir une caractéristique « égal pourcentage » d'équation :

$Q_e = a \cdot e^{b \cdot Y_R}$ (avec Q_e exprimé en pourcentage de Q_{e max} : Q_e = 100 % si Q_e = Q_{e max}) avec un coefficient de réglage r = 50. Déterminer a et b.

3. Tracer la caractéristique statique de cette vanne et estimer la valeur du gain K_v. En déduire la valeur du gain K obtenu.

4. Que dire du dimensionnement de la vanne si Y_{R3} correspond à Q_v = 90 % de son échelle de variation ?

Solution :

1. Courbe |K| en fonction de Y_R

Voir figure 9. On rappelle qu'un gain K négatif traduit le sens d'action du pro-

cédu. Compte tenu de la normalisation des schémas fonctionnels (Régulation 2, chap. 4 exercice résolu), on s'intéresse uniquement à |K|.

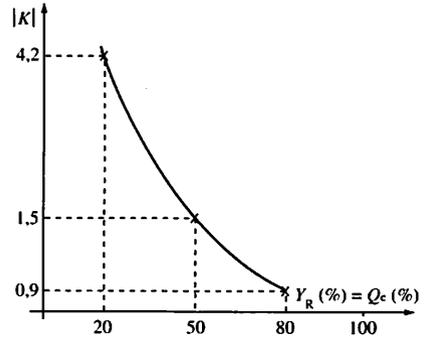


Fig. 9

2. Choix de la vanne

On exprime le débit Q_e en fonction de Y_R.

$$Y_{R \text{ mini}} = 0 \% \Rightarrow a = Q_{e \text{ mini}};$$

$$Y_{R \text{ maxi}} = 100 \% \Rightarrow b = \ln \left(\frac{Q_{e \text{ maxi}}}{Q_{e \text{ mini}}} \right) \cdot \frac{1}{Y_{R \text{ maxi}}}.$$

Or $r = Q_{e \text{ maxi}} / Q_{e \text{ mini}} = 50$ donc on obtient : $a = 2$ et $b = 0,03912$.

3. Caractéristique de la vanne

C'est la courbe 2 de la figure 10, les courbes 1 et 2 correspondant respectivement à une vanne linéaire et une vanne parabolique.

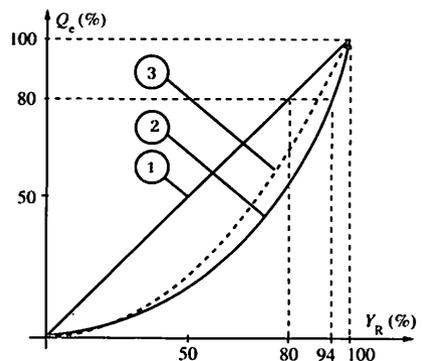


Fig. 10

Par dérivation, on tire :

$$K_V = \frac{dQ_c}{dY_R} = 0,07824 e^{0,03912 Y_R}. \text{ On}$$

obtient donc le tableau suivant :

| | | | |
|-----------|------|------|------|
| Q_c (%) | 20 | 50 | 80 |
| Y_R (%) | 58,8 | 82,3 | 94,3 |
| $ K_S $ | 4,2 | 1,5 | 0,9 |
| K_V | 0,78 | 1,95 | 3,1 |
| $ K $ | 3,3 | 2,9 | 2,8 |

Le gain statique est bien approximativement constant.

On prendra toujours bien garde de raisonner sur les débits, puis d'en déduire Y_R , lorsqu'on utilise une vanne non linéaire.

4. Conclusions

On rappelle que ce type de vanne n'assure pas l'étanchéité à la fermeture ($Q_{c\text{ mini}} = 2 \%$).

Pour la vanne linéaire d'essai, $Y_{R3} = 80 \%$ correspond à $Q_c = 80 \%$. Pour obtenir ce même débit avec la vanne choisie, il faut $Y_R = 94 \%$. Il devient évident que si le débit perturbateur Q_v augmente, la vanne est « au taquet » à 100 % et ne joue plus son rôle de régulation. Indépendamment de son type, la vanne est donc sous-dimensionnée.

2 Sur les installations modernes, les responsables de production n'aiment pas que l'on modifie la caractéristique d'une vanne en « bricolant » le positionneur. Ils préfèrent conserver les cames d'origine du constructeur, pour des raisons de standardisation. En

effet, les positionneurs utilisés n'autorisent pas toujours la mise en œuvre d'une caractéristique de type « égal pourcentage ». La solution consiste alors à employer une vanne linéaire et à utiliser un bloc de calcul pour linéariser le gain de boucle (fig. 11).

1. Déterminer l'équation du bloc de calcul.
2. Déterminer quelques points.

Solution :

1. Équation du bloc de calcul

Puisque la vanne est linéaire, l'égalité Q_c (%) = Y_{RT} (%) implique $K_V = 1$. Dans ce cas, la loi de commande du bloc $f(x)$ doit correspondre à la loi « égal pourcentage » définie précédemment, soit :

$$Y_{RT} = 2 \cdot e^{0,03912 \cdot Y_R}$$

Le gain K_C introduit par le bloc est donc :

$$K_C = 0,07824 e^{0,03912 Y_R}$$

2. Calculs de quelques points

Les schémas de la figure 12 réalisent des valeurs conformes à celles du tableau de l'exercice 1.

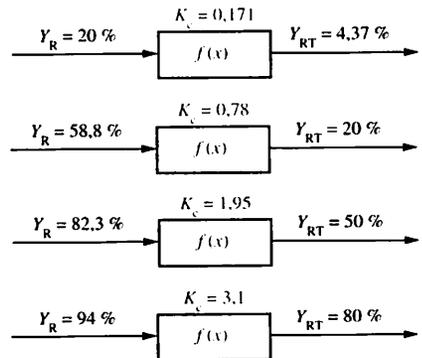


Fig. 12

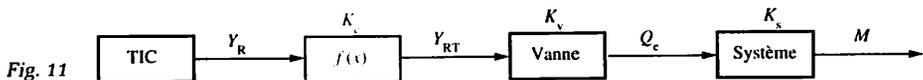


Fig. 11

Dans le chapitre précédent, on a vu qu'il était possible de combattre une non-linéarité par une autre, généralement introduite au niveau de l'actionneur. Cette méthode reste employée, mais elle ne permet de compenser qu'une seule cause de non-linéarité et nécessite une bonne connaissance de l'instrumentation.

Or pour la plupart des dispositifs, plusieurs paramètres sont la cause de non-linéarités, en même temps que l'influence d'un changement de consigne W .

Les possibilités des régulateurs modernes, et plus particulièrement des blocs algorithmiques des systèmes numériques de contrôle-commande (SNCC), permettent de s'adapter aux influences de multiples paramètres. Dans ce cas, on parle de *régulation adaptative*.

Les possibilités étant nombreuses, on se limite pour l'instant à l'adaptation du réglage d'un régulateur classique PID.

1 Étude d'un mélange en ligne

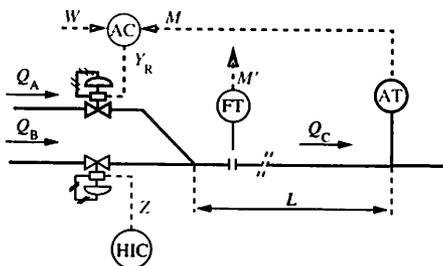


Fig. 1

Analyse physique

Le dispositif représenté figure 1 se prête bien à une étude par modèle de connaissance (voir Régulation 1, chapitre 13, exercice résolu). On rappelle le cahier des charges de l'installation : cette installation doit assurer une qualité de mélange correspondant à 50 % de produit A dans le mélange, lorsque le débit de charge Q_C varie de 20 à 100 %. On précise que celui-ci est défini par :

$$Q_C \% = \frac{Q_A (\%) + Q_B (\%)}{2}$$

Le procédé est défini par les données suivantes :

- Les deux vannes sont identiques, à caractéristique supposée linéaire. Elles ont une fonction de transfert modélisée par :

$$H_1(p) = \frac{Q_A(p)}{Y_R(p)} = \frac{1}{1 + 50p}$$

On exprime les durées en secondes et

les autres grandeurs sont des pourcentages de valeurs maximales.

- Le débit maximal de ces vannes à 100 % d'ouverture est de 500 L/h.
- La conduite a une longueur $L = 10$ m, un diamètre intérieur $d = 20$ mm. On appelle S sa section.
- L'analyseur est supposé n'introduire aucun retard.
- Le point de fonctionnement désiré en régulation de maintien est défini par :

$M = 50$ %, ce qui correspond à $Q_A = Y_R = Q_B = Z = 50$ % (1). On rap-

pelle que la relation liant la mesure M et le signal de commande Y_R est :

$$M = \frac{Y_R}{Y_R + Z} \times 100.$$

- Le gain statique peut être calculé par $K = \frac{\Delta M}{\Delta Y_R}$. En fonction des

valeurs (1), il vient : $K = \frac{25}{Q_C}$

- L'installation introduit un temps mort qui correspond à un temps de transit dans la canalisation : $T = \frac{L}{v}$.

Par définition, la vitesse d'écoulement en mètres par seconde est donnée par la relation : $v = Q'_C / S$ où Q'_C est le débit en mètres cubes par seconde et S la surface en mètres carrés ($S = \frac{\pi d^2}{4} = 3,14 \cdot 10^{-4} m^2$).

Un débit Q_C de 100 % correspond à 1000 l/h = 1 m³/h. La relation entre Q_C et Q'_C est donc :

$$Q'_C = \frac{0,01 Q_C}{3600} \text{ d'où : } v = \frac{0,01 Q_C}{1,13}. \text{ On en déduit donc que :}$$

$$T = \frac{1130}{Q_C} \text{ avec } T \text{ en secondes et } Q_C \text{ en pourcentage.}$$

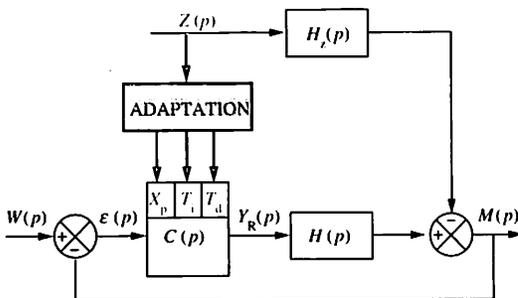


Fig. 2

Les paramètres K et T sont variables selon le point de fonctionnement. Or les méthodes de réglage des régulateurs aboutissent à des coefficients de réglage calculés à partir des coefficients du modèle. On comprend donc qu'un réglage satisfaisant pour un point de fonctionnement risque d'être inadapté pour un autre.

La solution la plus élégante est d'utiliser un régulateur adaptatif, c'est-à-dire dont on peut modifier les coefficients

de réglage, en fonction du débit de charge Q_C dans le cas présent.

Le schéma fonctionnel est alors celui de la figure 2.

Détermination des réglages

Pour un réglage de Broida, et pour un régulateur de structure mixte, le tableau de réglage (Régulation 2 chap.16) fournit les résultats suivants :

$$X_p = 120 K \frac{T}{\tau} = 120 \frac{25}{Q_C} \cdot \frac{1130}{Q_C} \cdot \frac{1}{\tau} = \frac{67\,800}{Q_C^2}$$

$$T_i = \tau = 50 \text{ s}$$

$$T_d = 0,42 T = \frac{475}{Q_C}$$

Ces calculs théoriques doivent être évidemment aménagés afin de tenir compte des réalités industrielles.

Le fonctionnement à faible débit de charge ($Q_C < 15\%$) est normalement exclu, mais il doit être envisagé dans le cas d'un repli en sécurité. Dans ce cadre, les variations de la bande proportionnelle et du temps d'action dérivée sont corrigées au voisinage du débit de charge minimal. Les courbes sont fournies aux figures 3 et 4.

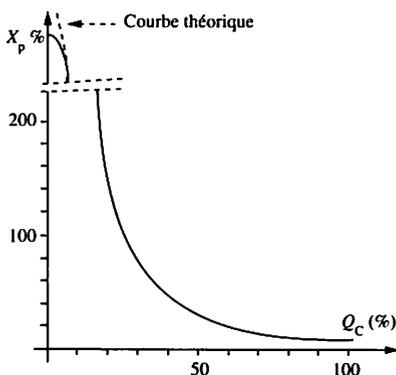


Fig. 3

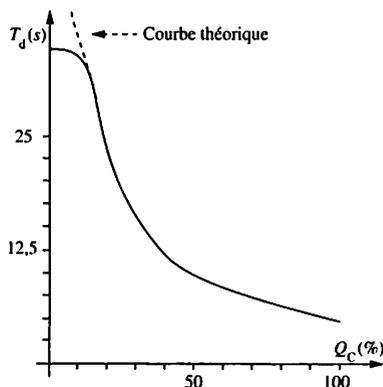


Fig. 4

Réalisation

La réalisation du schéma de la figure 2 nécessite uniquement que la perturbation $Z' = M' = Q_C$ soit mesurable. Dans notre exemple, il est évident que seules X_p et T_d sont des paramètres adaptatifs en fonction du signal $Z' = M'$, signal plus intéressant que Z . On obtient alors le schéma de la figure 5.

En fonction du matériel utilisé, le technicien de régulation dispose de plusieurs moyens :

- écriture de la relation mathématique sous forme $s = f(e)$,
- approximation de la courbe $s = f(e)$ par segments successifs.

Tous les SNCC possédant cette dernière fonction, la figure 6 représente la configuration du module d'adaptation de T_d sous forme de 8 segments.

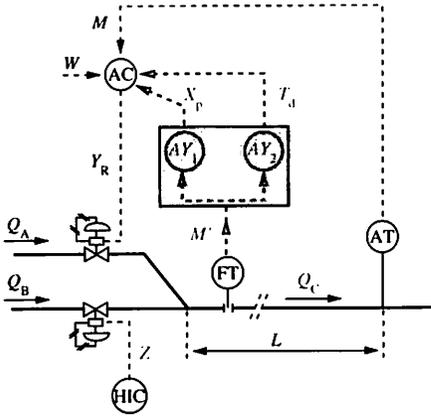


Fig. 5

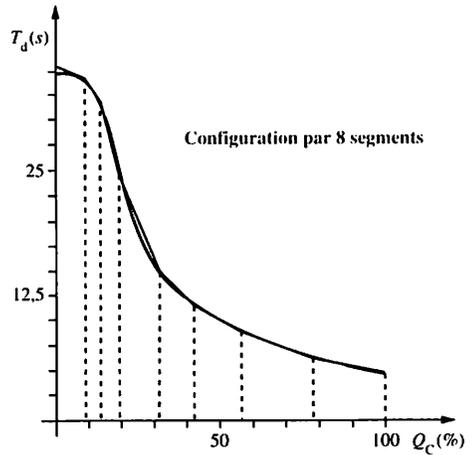


Fig. 6

2 Généralisation

Le dispositif précédent peut être généralisé, aboutissant à une commande de type « cartographique », couramment utilisée pour le réglage de la carburation d'un moteur de compétition par exemple.

Le technicien peut, en outre, mettre en mémoire différentes « recettes » qu'il peut appliquer au procédé en cours de fabrication. Ces méthodes modernes de contrôle-commande ont l'avantage définitif de ne pas nécessiter de modification matérielle et de pouvoir s'adapter à des fabrications polyvalentes, qui se généralisent compte tenu du coût des installations.

Il faut signaler une approche : actuellement, on envisage des régulateurs *auto-adaptatifs* qui modifient eux-mêmes leur réglage en fonction d'informations provenant du procédé. Ils permettent théoriquement de s'adapter à des perturbations non mesurables, en fonction d'algorithmes d'intelligence artificielle. Ils seront étudiés ultérieurement.

On retiendra que la régulation adaptative peut être également employée à partir d'informations provenant du régulateur lui-même tels que M , W , Y_R ou ε . Il est, par exemple, astucieux d'augmenter T_i lorsque ε augmente, de façon à ne pas saturer l'action intégrale. Certains régulateurs ont ainsi plusieurs valeurs de X_p disponibles, en fonction de ε .

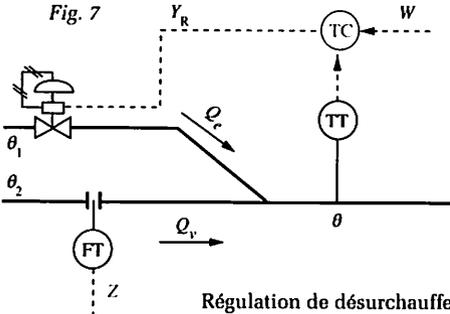
Exercice résolu

On se propose de reprendre l'exercice corrigé du chapitre précédent, dont le schéma TI est rappelée figure 7.

Des identifications en chaîne ouverte (autour d'un point de fonctionnement fixe $M = M_0$), réalisées lors de la mise en service du dispositif avec une vanne linéaire, permettent d'obtenir le tableau suivant, la fonction de transfert réglante étant identifiée selon le modèle de Broïda :

| Z | 25 | 50 | 75 |
|------------|----|------|------|
| $Y_R(\%)$ | 23 | 48 | 78 |
| K | -3 | -1,3 | -0,8 |
| τ (s) | 50 | 48 | 51 |
| T (s) | 10 | 11 | 10 |

Fig. 7



1. Choisir le type de régulation (P, PI, PID).
2. Déterminer le réglage de Broïda.
3. Pour une variation de $Z = Q_v$ de 0 à 100 %, déterminer puis tracer la ou les courbes d'adaptation pour une structure série du régulateur.
4. Même question pour une structure parallèle du régulateur.
5. Le régulateur disponible, de structure mixte, ne permet pas de courbes d'adaptation par segments mais par paliers. Les valeurs des 5 paliers pour X_p peuvent être choisies en fonction de la sortie Y_R du régulateur. Déterminer puis représenter graphiquement les paliers permettant de travailler approximativement à gain de boucle constant.
6. Conclusions.

Solution :

1. Choix du type de régulation

Le rapport $\frac{T}{\tau} = 0,2$, image de la difficulté de réglage, permet d'opter pour une régulation PI (Régulation 2, chap. 16).

2. Réglages de Broïda

Ce même chapitre fournit le tableau de réglage suivant :

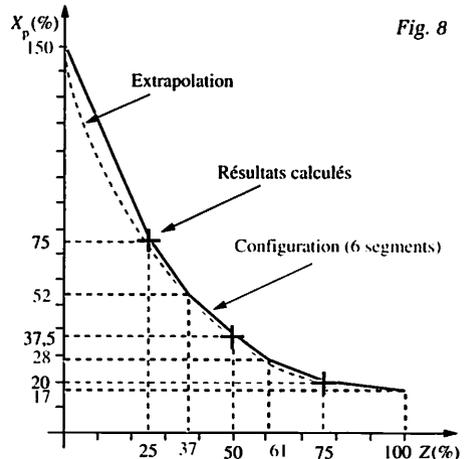
| Paramètres | Structures | | |
|------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | P | PI parallèle | PI série/mixte |
| X_p | $125 K \frac{T}{\tau}$ | $125 K \frac{T}{\tau}$ | $125 K \frac{T}{\tau}$ |
| T_i | | $\frac{KT}{0,8}$ | τ |

3. Régulateur série

Seule la bande proportionnelle est à adapter, l'application du réglage fournissant le tableau suivant :

| Z | 25 | 50 | 75 |
|-----------|----|------|----|
| $X_p(\%)$ | 75 | 37,5 | 20 |
| T_i (s) | 50 | 50 | 50 |

La courbe figure 8 permet d'approcher la loi d'adaptation en 6 segments de droite.



4. Régulateur parallèle

La bande proportionnelle est à adapter comme précédemment, mais la structure impose également une adaptation de T_i selon le tableau suivant :

| Z | 25 | 50 | 75 |
|-----------|------|------|----|
| X_p (%) | 75 | 37,5 | 20 |
| T_i (s) | 37,5 | 17,8 | 10 |

La courbe figure 9 permet d'approcher la loi d'adaptation en 6 segments de droite.

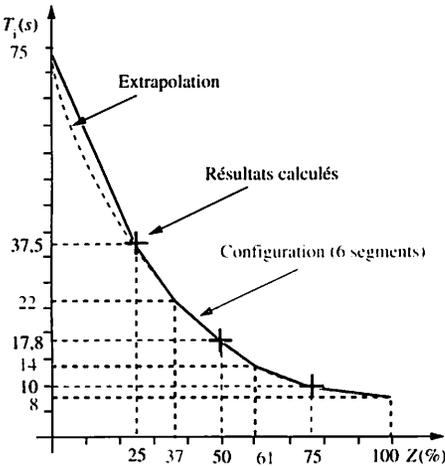


Fig. 9

5. Adaptation par paliers

La figure 10 propose une adaptation conforme aux contraintes matérielles. Par souci de sécurité, les valeurs de X_p adoptées sont choisies par excès, par rapport à la courbe théorique extrapolée. La largeur des paliers est choisie de façon à privilégier la zone de travail normale du régulateur, à savoir entre 20 % et 100 % du signal de commande Y_R .

Bien évidemment l'adaptation est discontinue et donc moins performante que dans les cas précédents.

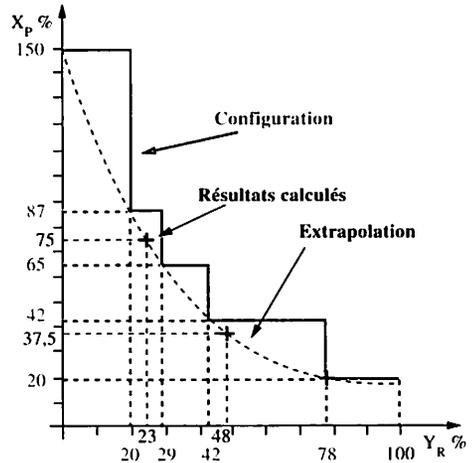


Fig. 10

6. Conclusions

On vérifie une nouvelle fois que :

- la connaissance de la structure du régulateur est indispensable avant toute intervention sur celui-ci,
- la structure série (ou mixte) est mieux adaptée pour la régulation des procédés industriels.

Les possibilités des SNCC permettent de compléter la philosophie de l'adaptativité, en prenant en compte plusieurs paramètres. Un exemple précis est celui d'une perturbation de grande amplitude, provoquant un écart ϵ important.

Une régulation adaptative X_p en fonction de ϵ peut être envisagée, permettant par exemple de diminuer X_p , si ϵ augmente trop.

Un module sélecteur de plus bas permet ensuite de conserver la plus petite valeur X_p proposée.

Pour obtenir la stabilité d'une régulation en chaîne fermée avec un régulateur PID, il est nécessaire que la difficulté de réglage ne soit pas trop grande. Le niveau de difficulté peut être apprécié par le rapport $\frac{T}{\tau}$, correspondant à une identification selon le modèle de Broïda.

Lorsque ce rapport $\frac{T}{\tau}$ est supérieur à 0,5, une telle régulation ne peut plus être employée sous sa forme élémentaire.

Afin d'obtenir des performances satisfaisantes, tout en conservant le concept de la chaîne fermée, il convient de mettre en œuvre des moyens complémentaires.

Le but recherché est alors de minimiser l'influence de la perturbation principale Z sur la mesure M . La mesure ne subissant plus que des variations lentes et de faibles amplitudes, l'emploi d'une stratégie en chaîne fermée peut être prolongé. Selon que la perturbation Z est mesurable et commandable, ou seulement mesurable, deux possibilités sont mises en œuvre industriellement.

1 Perturbation mesurable et commandable

Stabilisation par boucle auxiliaire

Si la perturbation Z est mesurable et commandable, il devient possible de stabiliser ses variations par une boucle auxiliaire de régulation de maintien. Cette solution, matériellement onéreuse autrefois, se généralise maintenant avec l'emploi des systèmes numériques de contrôle-commande (SNCC).

Il faut noter que l'installation d'un simple manomètre-détendeur pour contrôler l'alimentation d'un dispositif sous une pression constante correspond à cette philosophie. Il en est de même de l'emploi d'une alimentation stabilisée pour un montage électronique.

Contrôle de la vitesse de variation

D'une façon plus générale, la perturbation Z est variable au cours du temps ; elle correspond souvent à la charge de l'installation.

Le dispositif représenté figure 1 est un échangeur de chaleur, associé à une régulation de température permettant de maintenir la température du produit de débit Q_a , par action sur le débit Q_v de vapeur.

La fonction de transfert réglante $H(p) = \frac{M(p)}{Y_R(p)} = K \frac{e^{-Tp}}{1 + \tau p}$ est

caractérisée par un rapport $\frac{T}{\tau} = 0,5$.

Le régulateur PID utilise un réglage de Broïda (Régulation 2, chap. 16).

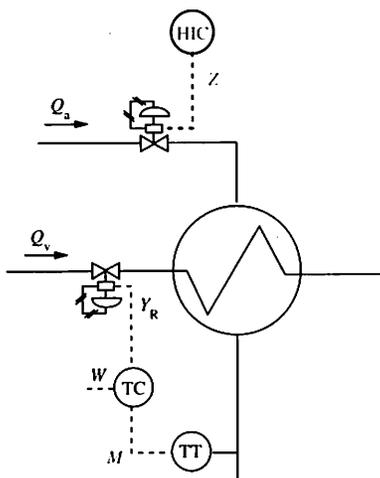


Fig. 1

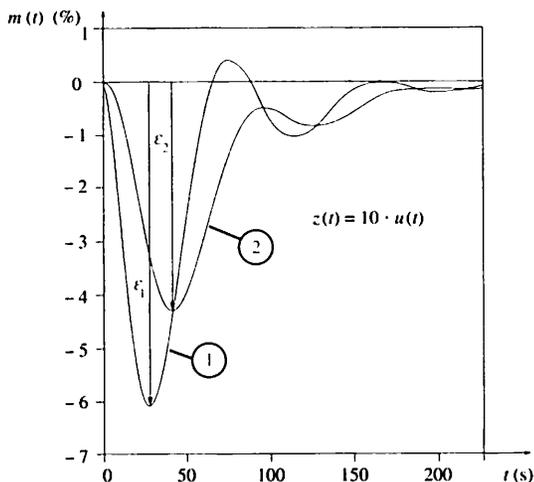


Fig. 2

Pour une modification de la charge de l'installation $z(t) = 10 \cdot u(t)$ réalisée par le conducteur de l'installation, on enregistre les variations $m(t)$ de la mesure (figure 2, courbe 1).

On constate une stabilité satisfaisante, mais un écart transitoire ε_1 important, conséquence du réglage « mou » imposé par le rapport $\frac{T}{\tau}$.

Un réglage plus « dur » conduirait au « pompage » de la boucle.

L'écart transitoire ε étant fonction de la vitesse de variation de M , un ralentissement de Z (lorsque le procédé le permet) entraîne une amplitude plus faible de ε .

La courbe 2 de la figure 2 a été obtenue en intercalant un filtre du 1^{er} ordre ($\tau = 20s$) dans la commande de la vanne de contrôle de Q_a (fig. 3).

Pour une variation importante de Z , on utilise habituellement un générateur de rampe permettant d'obtenir une vitesse de variation $\frac{dZ(t)}{dt}$ constante.

Un cas fréquent est celui où la perturbation Z d'une chaîne fermée n° 1 est la grandeur réglante d'une autre chaîne n° 2. Il convient, dans ce cas de couplage de boucles, de ne pas rechercher des réglages trop « durs » mais au contraire de limiter la vitesse de variation du signal Y_{R2} (« slew rate ») à l'aide d'un dispositif, disponible sur de nombreux régulateurs. La figure 4 représente ce type de montage : le débit Q_a est la grandeur de réglage pour la régulation de niveau du fond d'une colonne de distillation.

L'objectif de production n'imposant pas un maintien strict du niveau, on peut adopter un réglage « mou » pour le régulateur LC.

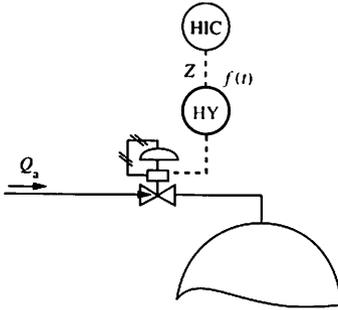


Fig. 3

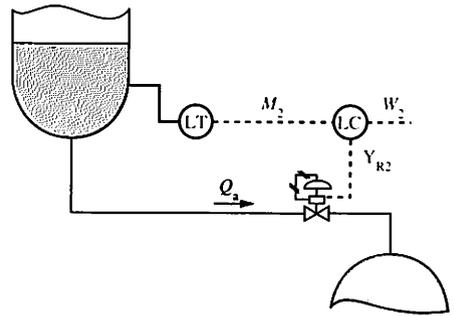


Fig 4

2 Perturbation uniquement mesurable

L'atténuation des effets de la perturbation Z sur la mesure M passe par une régulation en chaîne ouverte. On rappelle que ce terme est employé lorsque l'action sur le signal de commande Y_R ne modifie pas la grandeur observée (Régulation 1, chap. 1).

Correcteur statique

Si l'on reprend l'exemple de la figure 1, les caractéristiques statiques $M = f(Y_R)$ en fonction de Z ont l'allure du réseau de la figure 5. Le maintien de M à la valeur de consigne W nécessite d'élaborer un signal de commande Y_R à partir de la valeur de Z . Ainsi, un débit $Z_1 = Q_{a1} = 20\%$ impose une valeur de commande Y_{R1} .

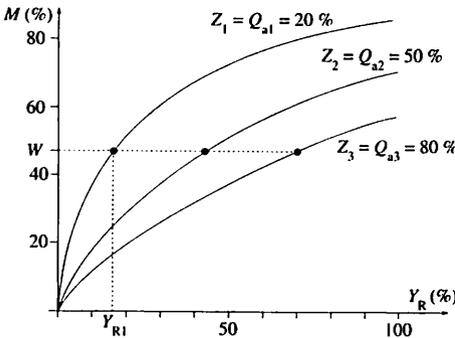


Fig. 5

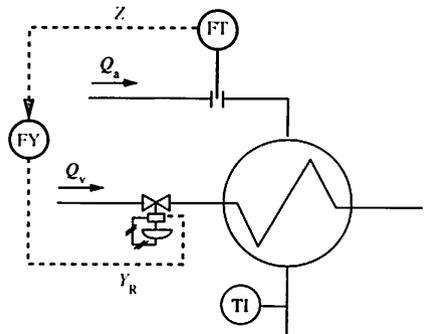


Fig. 6

La loi de commande est généralement non linéaire, mais parfaitement réalisable par un générateur de fonction. Le schéma TI est fourni figure 6.

En régime permanent, un tel dispositif garantit une valeur de M proche de W . En revanche, pendant les régimes transitoires, l'écart $\varepsilon = W - M$ peut être important.

Correcteur dynamique

Lorsque la minimisation de ε est désirée, pendant les régimes transitoires, il convient d'employer un correcteur dynamique, de fonction de transfert isomorphe $G(p)$. Le schéma fonctionnel est alors celui fourni figure 7, applicable dans une hypothèse linéaire autour d'un point de fonctionnement.

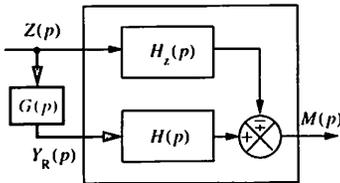


Fig. 7

est que $H(p)$ et $H_z(p)$ puissent être assimilées à des fonctions de transfert du 1^{er} ordre. L'équation aboutit alors à adopter pour $G(p)$ la fonction de transfert d'un module avance-retard (*Lead/Lag* en anglais) :

$$H(p) \cdot G(p) = \pm H_z(p) \quad (\pm \text{ selon le sens d'action de la perturbation}).$$

$$G(p) = K_C \frac{1 + \tau_A p}{1 + \tau_R p}$$

avec : K_C = coefficient de correction statique ;
 τ_A = constante de temps d'avance ;
 τ_R = constante de temps de retard.

L'usage d'un tel module est abordé dans l'exercice résolu. Le réglage de $G(p)$ s'effectue en fonction de la rapidité des deux fonctions de transfert $H(p)$ et $H_z(p)$.

3 Conclusions

Le principal avantage de la chaîne ouverte est la rapidité puisque l'action sur Y_R s'effectue dès l'apparition de la perturbation, sans attendre son effet sur la grandeur à maîtriser. Pour cette raison, elle est parfois désignée sous l'appellation de « chaîne a priori » par opposition à la commande en chaîne fermée (a posteriori).

L'utilisation d'un module avance-retard, disponible dans toutes les bibliothèques algorithmiques des SNCC, ne permet pas d'assurer une compensation totale des perturbations (perturbations non mesurables, non-linéarités, etc.). Pour ces raisons, on associe industriellement une chaîne ouverte à une chaîne fermée, de façon à obtenir les avantages conjugués de chacune d'elles.

Exercice résolu

On considère une installation industrielle pouvant être modélisée selon le schéma fonctionnel de la figure 8.

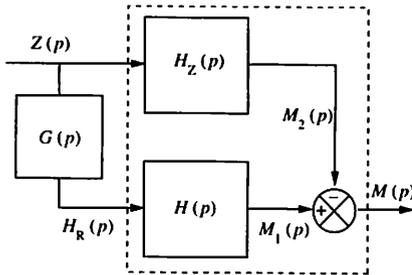


Fig. 8

Autour d'un point de fonctionnement, une identification aboutit aux fonctions de transfert :

$$H(p) = \frac{1,25}{(1 + 12p)^4}$$

et
$$H_z(p) = \frac{1}{(1 + 10p)^2}$$

On désire employer un module avance-retard, de fonction de transfert $G(p)$, pour minimiser l'influence d'une perturbation $z(t)$.

- Déterminer la réponse indicielle $s(t)$ du module pour un signal d'entrée $e(t) = 10 \cdot u(t)$.
- Tracer $s(t)$ pour les trois réglages suivants ($K_c = 1$) :

a) $\tau_{A1} = 0 \text{ s} ; \tau_{R1} = 20 \text{ s} ;$

b) $\tau_{A2} = 10 \text{ s} ; \tau_{R2} = 20 \text{ s} ;$

c) $\tau_{A3} = 20 \text{ s} ; \tau_{R3} = 10 \text{ s} .$

3. Déterminer littéralement le correcteur idéal $G'(p)$.

4. En déduire une expression approchée sous forme d'un module avance-retard.

5. Pour une perturbation telle que $Z(p) = \frac{40}{p(1 + 10p)}$, déterminer au simulateur les courbes $m_1(t)$, $m_2(t)$ et $m(t)$, pour le correcteur approché de la question 4.

6. Même question pour un réglage empirique plus « mou ».

7. Conclusions

Solution :

1. Réponse indicielle d'un module avance-retard

Pour une entrée en échelon on obtient :

$$S(p) = G(p) \cdot E(p)$$

$$= K_C \frac{1 + \tau_A p}{1 + \tau_R p} \cdot \frac{10}{p}$$

Par décomposition en éléments simples, on établit :

$$s(t) = 10 \left[\left(\frac{\tau_A}{\tau_R} - 1 \right) e^{-\frac{t}{\tau_R}} + 1 \right] \cdot u(t)$$

2. Courbes $s(t)$

Pour les trois réglages proposés, elles correspondent aux courbes 1 à 3 de la figure 9.

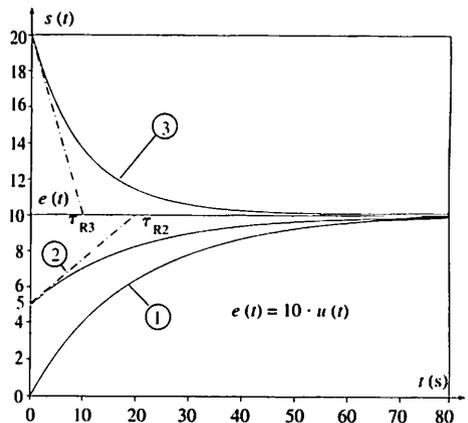


Fig. 9

La courbe 2 permet de noter l'influence d'un terme d'avance inférieur au terme de retard ($\tau_A < \tau_R$). La courbe 3 dégage l'intérêt d'avoir : $\tau_A > \tau_R$.

Il faut remarquer qu'une avance seule n'est pas réalisable et que $G(p)$ comporte alors toujours une constante de temps de filtrage $\tau_R = \frac{\tau_A}{N}$ avec N entier grand.

3. Correcteur idéal $G'(p)$

L'application directe de la relation $H(p) \cdot G'(p) = H_z(p)$ permet d'établir :

$$G'(p) = 0,8 \frac{(1 + 12p)^4}{(1 + 10p)^2}$$

4. Module avance-retard équivalent

L'utilisation de l'approximation $n \cdot \tau = n' \cdot \tau'$ permet d'estimer $(1 + 12p)^4 \approx (1 + 10p)^{4,8}$.

Dans ces conditions, $G'(p)$ devient, après simplification :

$$G'(p) = 0,8 (1 + 10p)^{2,8}$$

En utilisant une nouvelle fois l'approximation, mais dans des conditions limites, il vient :

$$G(p) = 0,8 (1 + 28p)$$

correspondant à : $K_C = 0,8$; $\tau_A = 28$ s et τ_R réglée à sa valeur minimale.

5. Correcteur optimal

Pour le réglage $K_C = 0,8$; $\tau_A = 28$ s, $\tau_R = 0,5$ s, les réponses $m_1(t)$, $m_2(t)$ et $m(t)$ sont regroupées figure 10.

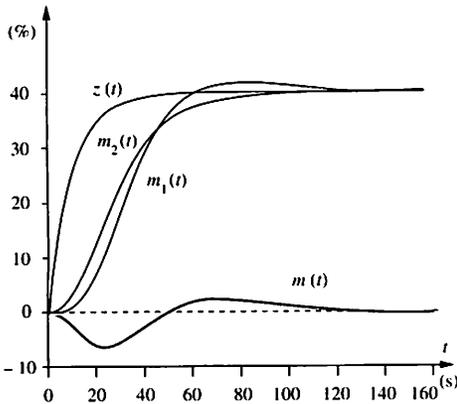


Fig. 10

6. réglage empirique

Pour le réglage $K_C = 0,5$; $\tau_A = 18$ s, $\tau_R = 0,5$ s, les réponses sont maintenant regroupées figure 11. La compensation n'est pas totale, mais l'amplitude de la variation de $M(t)$ est réduite.

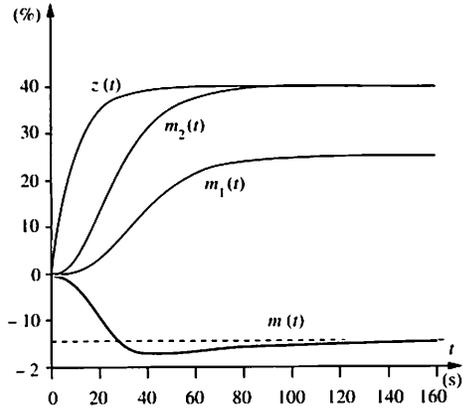


Fig. 11

7. Conclusions

Les courbes de la figure 12 représentant les variations $y_R(t)$ du signal réglant, montrent que le réglage optimal est obtenu au prix d'une variation brutale et de grande amplitude de Y_R . Un réglage plus « mou » nécessite par contre un dispositif complémentaire pour compenser l'écart statique permanent.

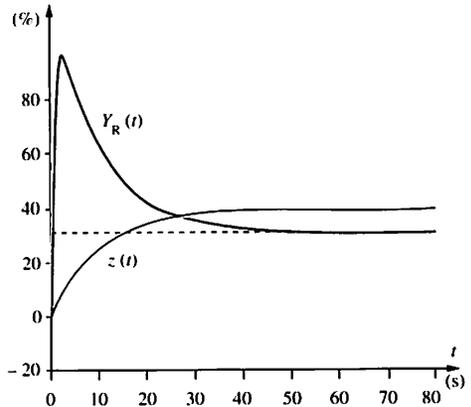


Fig. 12

Courbe obtenue avec le réglage :

$$K_C = 0,8$$

$$\tau_A = 28 \text{ s}$$

$$\tau_R = 0,5 \text{ s}$$

Au chapitre 5, on a dégagé les avantages et les inconvénients d'une compensation en chaîne ouverte des perturbations :

- bonne compensation pendant les régimes transitoires, surtout si l'on utilise un correcteur dynamique, même sous une forme approchée,
- précision statique médiocre, lors du retour au régime permanent.

Aussi associe-t-on le plus souvent une régulation en chaîne fermée au dispositif en chaîne ouverte, afin d'assurer la précision statique nécessaire. La présence d'un régulateur permet en outre de disposer des fonctionnalités nécessaires aux agents de conduite.

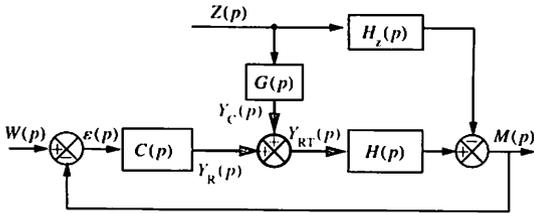


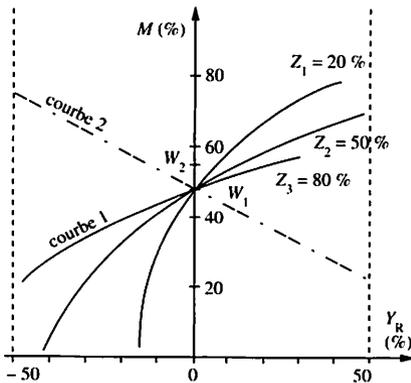
Fig. 1

$$Y_{RT} = Y_R \pm Y_C, \text{ (+ ou - selon le sens d'action de la perturbation sur } M).$$

Si le régulateur est en position automatique, le schéma fonctionnel de la stratégie est celui de la figure 1. Le correcteur de fonction de transfert $G(p)$ est appelé *correcteur de tendance*, l'association chaîne ouverte-chaîne fermée étant appelée *régulation mixte*.

Dans ce cas le signal de commande de l'actionneur est :

1 Analyse du fonctionnement



Courbes 1 : caractéristiques pour un correcteur statique idéal.
Courbe 2 : caractéristique d'un régulateur.

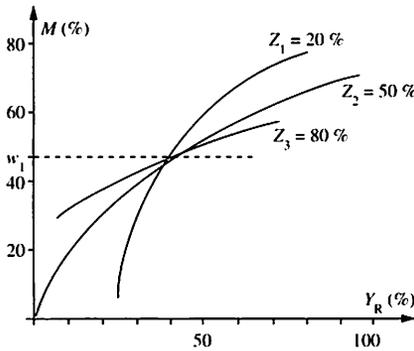
Fig. 2

Pour bien comprendre le fonctionnement de l'association, on adopte le correcteur statique idéal, déterminé pour les caractéristiques de la figure 5 du chapitre 5. Calculé pour maintenir M à la valeur W_1 , le correcteur élabore un décalage de caractéristiques. Le réseau de caractéristiques devient celui de la figure 2, permettant bien $M = W_1$, quel que soit Z , avec un signal de sortie du régulateur valant $Y_R = 0$.

Si la consigne varie et passe à la valeur W_2 , ou si les caractéristiques évoluent sous l'influence d'une autre perturbation, on conçoit qu'une commande Y_R différente de zéro soit néces-

saire. Le régulateur intervient donc comme un décaleur, dont la valeur s'ajuste en fonction de l'écart $\varepsilon = W - M$ observé. Les caractéristiques de la figure 2 montrent que ce décalage peut être positif ou négatif, ce qui est possible avec un régulateur à sortie symétrique (ex : $-5 \text{ V}/+5 \text{ V}$) et bande proportionnelle centrée (courbe 2, figure 2). On conçoit également que l'action du régulateur soit faible, les caractéristiques s'éloignant peu du point ($Y_R = 0$; $M = W_1$). Pour certaines applications dans le domaine thermique, on se contente d'ailleurs d'une simple régulation proportionnelle.

2 Réalisation pratique



Caractéristiques obtenues avec $Y_{RT} = Y_R + (Z - 50)$

Fig. 3

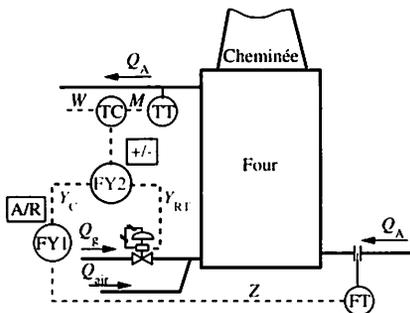


Fig. 4

La perturbation $Z = Q_A$ étant fréquente et d'amplitude importante, on adopte une régulation mixte, comprenant :

- la chaîne fermée TT, TC,
- la chaîne ouverte FT, FY₁.

Les contraintes de sécurité des installations industrielles imposent que le conducteur d'installation puisse, à tout instant, maîtriser le signal de commande Y_{RT} de l'actionneur, pour passer en position de repli (par exemple $Y_{RT} = 0$ % pour un arrêt).

Cet impératif impose que le régulateur assure l'essentiel de la correction, le correcteur de tendance intervenant comme un dispositif capable de « resserrer » les caractéristiques, comme indiqué figure 3.

Étude d'un four de réchauffage à charge variable

Le schéma TI est fourni figure 4. Autour d'un point de fonctionnement (Y_{RT0} , M_0), une identification a fourni les fonctions de transfert suivantes :

$$H(p) = \frac{M(p)}{Y_{RT}(p)} = 1,2 \frac{e^{-21 p}}{1 + 25 p}$$

dont la difficulté de réglage PID est grande,

$$H_Z(p) = \frac{M(p)}{Z(p)} = \frac{e^{-15 p}}{1 + 22 p}$$

Choix des réglages

- un réglage de Broïda aboutit au correcteur : $C(p) = 1,1 + \frac{1}{34 p} + 7 p$,
 - le correcteur dynamique de tendance peut être calculé à partir des expressions $n \tau + T$ des deux fonctions $H(p)$ et $H_z(p)$. Globalement : $(n \tau + T)_z < (n \tau + T)_R$, ce qui impose un correcteur de type « avance » avec $\tau_A = (n \tau + T)_R - (n \tau + T)_z$ et τ_R au minimum ($\tau_R = \tau_A / 20$).
- On adopte $K_C = 0,83$ pour la correction statique.

Courbes $m(t)$ et y_{RT}

A la mise en service, le technicien procède à une série d'essais donnant les tracés des courbes $m(t)$ et $y_R(t)$, dont les enregistrements sont regroupés figure 5 et 6, pour un échelon de perturbation :

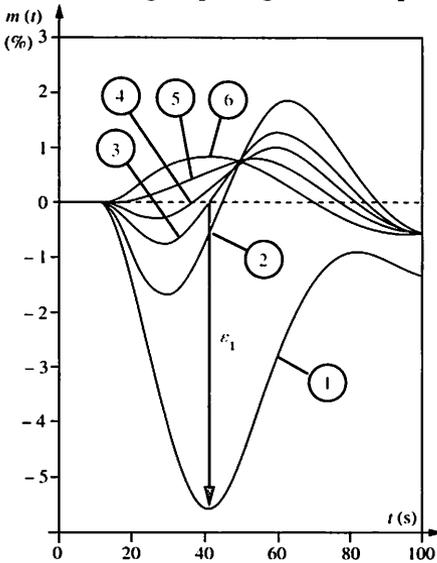


Fig. 5

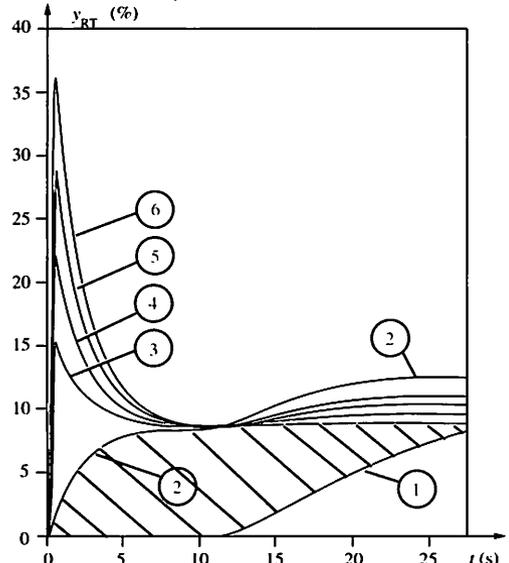


Fig. 6

Courbe 1 : chaîne fermée seule, courbe 2 : chaîne fermée et correcteur statique de tendance, courbes 3, 4, 5, 6 : chaîne fermée et correcteur dynamique de tendance ($\tau_A = 4, 6, 8, 10$ s).

Interprétation

Le correcteur statique démontre son utilité. L'amélioration des performances est décisive, essentiellement due à la rapidité d'action sur l'organe d'action. La partie hachurée de la figure 6 représente ce gain. L'analyse du comportement du correcteur dynamique valide la méthode de calcul du correcteur $G(p)$.

On note cependant que le correcteur statique semble suffisant, la correcteur dynamique risquant d'introduire des saturations sur Y_{RT} .

3 Réalisation à régulation adaptative

L'analyse des caractéristiques statiques de la figure 2 montre que la variation de la valeur de Z entraîne une variation de la pente de la caractéristique, donc du gain statique K . Cette variation est préjudiciable à la stabilité de la chaîne fermée. Aussi cherche-t-on industriellement à travailler à gain de boucle K_B constant.

Une première réalisation consiste à remplacer le sommateur par un multiplicateur, dont l'amplification K_C est fonction de la perturbation Z . Il est alors possible d'obtenir que le gain $K_B = A \cdot K_C \cdot K$ soit constant. Une telle réalisation est étudiée dans l'exercice résolu.

Une seconde réalisation (fig. 7), toute aussi utilisée, consiste à adapter la contribution de la chaîne ouverte, en essayant d'obtenir $K_C \cdot K = K_Z$ quelle que soit la valeur de Z . Cette stratégie est adoptée pour les régulations de combustion, le dosage des mélanges,...

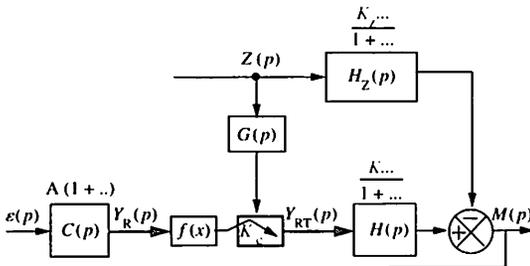


Fig. 7

4 Conclusions

Le choix d'installer une régulation mixte est l'occasion de rappeler qu'il est impossible d'améliorer une régulation sans investir un minimum de temps et d'argent dans l'analyse et la modélisation du système, soit par modèle de connaissance, soit par modèle comportemental.

En particulier, il est impératif de conduire un certain nombre d'essais en vue de l'identification de la fonction de transfert perturbatrice $H_Z(p)$. Bien sûr, un correcteur de tendance statique peut être réglé de façon empirique, mais le bénéfice obtenu sera rarement celui escompté.

La littérature est abondante sur l'utilisation d'un module de type « avance-retard », en régulation de tendance « additive ».

Il est important de signaler que ce dispositif n'est intéressant que dans le cas d'une régulation de maintien, lorsque les perturbations sont de faibles amplitudes, ce qui permet de conserver l'hypothèse linéaire autour d'un point de fonctionnement.

Dans la plupart des cas, on doit constater qu'un correcteur statique est suffisant et qu'on peut améliorer ses performances par une solution adaptative.

Il faut également retenir qu'une tendance « multiplicative » doit être utilisée systématiquement lorsque l'analyse du procédé la préconise (voir exercice corrigé).

5. Stratégie de commande

Afin d'assurer un gain de boucle constant, on adopte la stratégie de la figure 10, qui permet d'assurer $K_C \cdot K = C = \text{Cte}$. On peut donc écrire : $K_C = \frac{C}{K} = \frac{Z \cdot C}{46,7}$. Cela permet de constater qu'une régulation de tendance « multiplicative » utilise ici un

coefficient multiplicateur K_C directement proportionnel à Z .

6. Conclusion

Un module « avance-retard » peut éventuellement être utilisé pour optimiser les régimes transitoires.

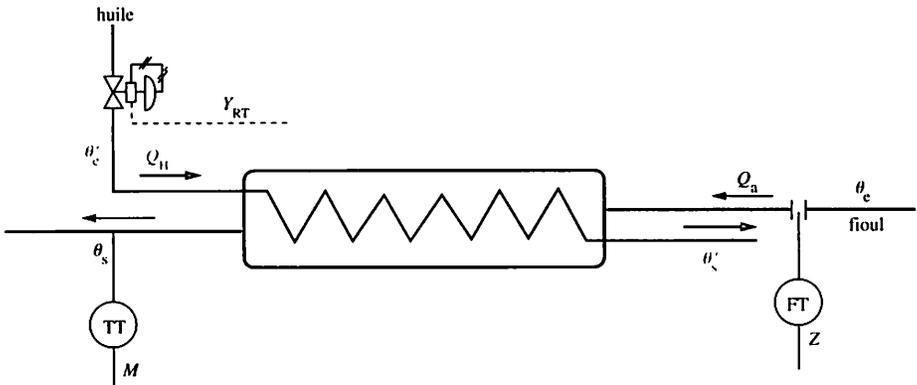


Fig. 9

On suppose l'échangeur de longueur suffisante pour permettre à l'huile de céder toute son énergie calorifique au fioul. On obtient alors $\theta'_s = \theta_e$.

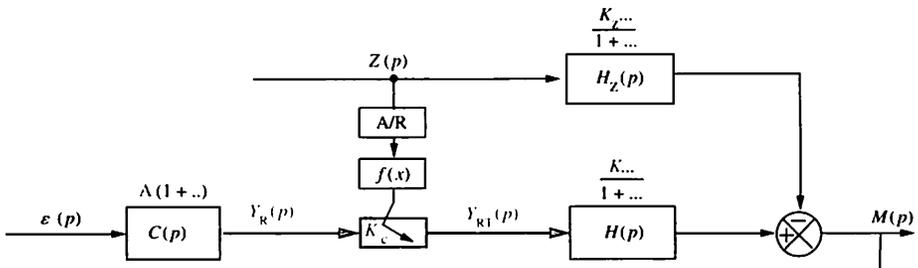


Fig. 10

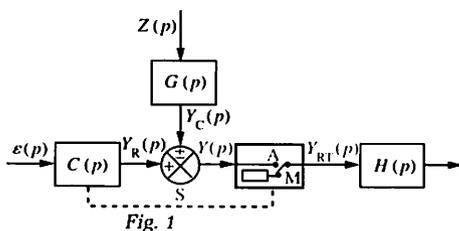
Les schémas de stratégie de correction de tendance présentés au chapitre précédent correspondent au fonctionnement d'une installation en mode automatique. Les contraintes industrielles concernant la sécurité des personnes et des installations compliquent la réalisation et expliquent une certaine réticence à généraliser ce mode de contrôle. On va voir comment elle peut être mise en œuvre pratiquement, comment le réglage des correcteurs de tendance doit être effectué, ainsi que les possibilités qu'ils offrent pour résoudre certaines difficultés inhérentes aux installations multivariables. L'utilisation de systèmes numériques de contrôle-commande facilite l'élaboration des stratégies :

- en régulation classique, tous les signaux intermédiaires étaient soumis à la contrainte d'échelle des liaisons physiques en signaux normalisés (0-10 V ou 4-20 mA) ;
- en régulation numérique, les signaux intermédiaires peuvent évoluer algébriquement sans limitation.

1 Contrôle du signal réglant Y_{RT}

La maîtrise d'une installation industrielle impose la possibilité suivante : le technicien de conduite doit pouvoir replacer l'installation en mode conduite MANUELLE, c'est-à-dire pouvoir imposer une valeur entre 0 % et 100 %, pour Y_{RT} . Cet impératif correspond souvent aux phases de démarrage ou de repli de sécurité, en cas d'incident.

Cette contrainte impose de prévoir un module de commande manuelle, placé entre l'actionneur et le sommateur délivrant le signal Y résultant de la combinaison de Y_R et Y_C (fig. 1).



Lors de la commutation dans le sens MANUEL → AUTOMATIQUE une difficulté apparaît. En effet, elle doit s'effectuer sans à-coup, pour ne pas déstabiliser le système.

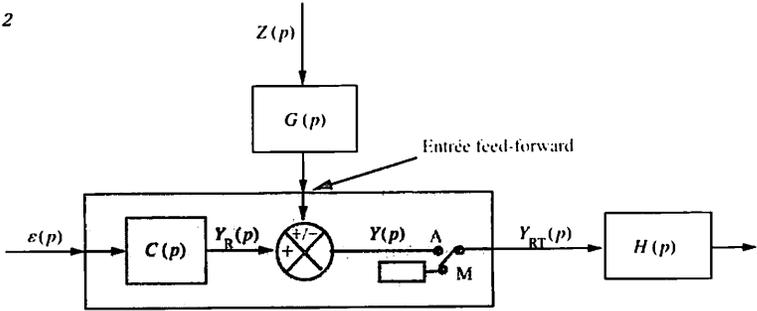
En technologie classique, cette contrainte impose de coupler la station de commande Automatique-Manuel à celle du régulateur, par un signal logique (signal S sur la figure 1). Par action

sur cette dernière, le conducteur modifie Y_R de façon à rendre égaux les signaux $Y = Y_R + Y_C$ et le signal Y_{RT} à l'instant du transfert. L'équilibrage ayant été effectué, la commutation des deux stations peut être réalisée. On conçoit aisément que cette manipulation soit source de difficultés et donc de réticences.

Une solution moderne consiste à utiliser des régulateurs dits *feed-forward*, comportant une entrée de signal extérieur, prévu pour la correction de tendance (fig. 2). Le module sommateur (ou multiplieur) est

intégré dans le régulateur et l'équilibrage entre Y et Y_{RT} est automatique, dans les deux sens de la commutation manuel-automatique.

Fig. 2



2 Réalisation et réglages

L'exemple de la figure 3 en page 33 montre que, bien souvent, on choisit un signal de correction Y_C quasi nul, pour un point de fonctionnement déterminé (exemple $Z_2 = 50\%$). Ce désir correspond à la volonté d'obtenir la plus grande amplitude possible en sortie de commande Y_R , en cas de modification de Z . La stratégie la plus courante est donc de réaliser la relation : $Z' = K_C(Z - Z_0)$, Z' étant le signal d'entrée du module avance / retard et Z_0 représentant la valeur nominale de Z . On rappelle qu'alors Y_C peut devenir positif ou négatif, selon la variation de Z .

Réglage

Il n'est souvent pas possible d'identifier la fonction de transfert perturbatrice $H_Z(p)$ et cet argument est souvent avancé pour exclure la correction de tendance. Les deux chapitres précédents ont cependant montré qu'une simple correction statique est souvent suffisante, celle-ci n'imposant que le réglage du coefficient K_C .

La recherche de cette valeur peut être conduite selon le protocole suivant :

- établir une stratégie de régulation mixte, avec $K_C = 0$, donc $Y_C = 0$,
- placer le régulateur en mode automatique,
- pour un état nominal de Z , soit $Z_1\%$, relever la valeur $Y_{R1}(\%)$ à l'équilibre statique,
- pour un état perturbé amenant Z à la valeur $Z_2\%$, relever la nouvelle valeur $Y_{R2}\%$ d'équilibre,
- adopter $Z_0 = Z_1$ comme talon de décalage,

- adopter la valeur : $K_C = \frac{Y_{R2} - Y_{R1}}{Z_2 - Z_1}$.

L'analyse des réponses dynamiques du procédé permet alors d'estimer si une correction dynamique doit être envisagée.

3 Régulation d'un procédé multivariable

Au chapitre 5, on a évoqué le cas où la perturbation Z d'une chaîne fermée n° 1 est la grandeur réglante d'une autre chaîne n° 2. Il convient alors souvent d'adopter sur cette chaîne n° 2 un réglage « mou », au détriment des performances dynamiques. L'usage d'une correction de tendance permet cependant de rendre la mesure n° 1 largement indépendante du signal Y_{R2} .

On parle de procédé multivariable lorsque ce dernier présente un couplage réciproque entre les mesures et les grandeurs de réglages adoptées pour chacune d'elles, le cas le plus fréquent étant celui du couplage de deux grandeurs que l'on désire régler indépendamment l'une de l'autre (fig. 3).

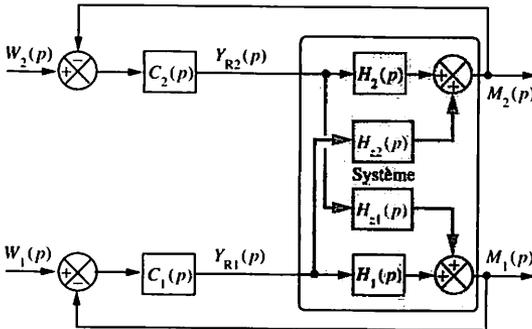


Fig. 3

L'utilisation de deux régulateurs indépendants (fig. 3), fonctionnant en parallèle, constitue une solution non satisfaisante. Toute variation de l'un des signaux de commande Y_R entraîne une évolution de la mesure sur l'autre boucle, conduisant à perturber la première boucle.

Exemples

- Mélange en ligne : la composition du mélange (commandée par le débit d'un des constituants) est couplée avec le débit de charge (commandé par le débit de l'autre constituant).

- Colonne à distiller : la composition du fond de colonne (commandée par le débit du fluide de chauffage) est couplée avec la composition en tête de colonne (commandée par le débit de reflux).

- Machine à papier : le grammage, le taux d'humidité et la vitesse de défilement sont des grandeurs couplées.

Solutions

Lorsqu'une des boucles apparaît comme prioritaire, une solution consiste à faire en sorte qu'elle asservisse l'autre (voir Régulation 2, exercice résolu du chapitre 14).

Si l'une des fonctions de transfert réglante est plus rapide que l'autre, on peut envisager une correction de tendance sur la chaîne la plus lente. Dans le cas général, il convient de supprimer l'interdépendance des deux chaînes fermées, par l'emploi d'un système de découplage.

Découpleur

Pour obtenir un correcteur de tendance idéal qui permette de rendre une mesure indépendante d'une perturbation, il suffit d'employer deux correcteurs, comme indiqué figure 5 (voir exercice résolu).

Le découpleur idéal utilise donc deux fonctions de transfert :

$$G_1(p) = \pm \frac{H_{Z1}(p)}{H_1(p)} \text{ et } G_2(p) = \pm \frac{H_{Z2}(p)}{H_2(p)}$$

les signes plus et moins sont utilisés pour tenir compte du sens d'action des perturbations.

En réalité, les contraintes de réalisation et les *non-linéarités* font que le découplage n'est pas parfait. Cependant, les interactions sont minimisées et l'abaissement de la classe de la perturbation permet d'adopter des réglages durs sur chaque régulateur. Le technicien de réglage doit pour cela identifier à nouveau chaque fonction de transfert, le découpleur étant en fonctionnement, car celui-ci modifie notablement la fonction de transfert réglante (voir exercice résolu).

4 Conclusions

Par conception, un grand nombre de procédés industriels sont multivariables. L'hypothèse simplificatrice qui consiste à les décomposer en plusieurs systèmes élémentaires indépendants montre ses limites, notamment en terme de performances temporelles. Tout l'art du technicien de régulation est alors de pouvoir repérer les grandeurs fondamentales à maîtriser, de conduire un certain nombre d'essais pour pondérer les couplages et de réaliser les découplages.

Les colonnes à distiller, les chaudières, les réacteurs chimiques sont les sujets d'étude les plus courants.

Il faut signaler que les limites d'emploi des découpleurs sont celles évoquées en conclusion du chapitre 6 et qu'il ne faut donc pas en attendre des performances miraculeuses.

En fait, tout l'art du génie des procédés consiste à imaginer des dispositifs de production ne comportant pas ou peu de couplages, même au prix d'une complexité plus grande de l'installation.

Un exemple est évoqué dans l'exercice résolu.

Exercice résolu

La fabrication continue d'un produit industriel nécessite une mise à disposition suffisante d'un mélange binaire de concentration précise, obtenu dans un bac de préparation.

La réalisation comporte un bac de mélange de dimension réduite, représenté figure 4. Une régulation de niveau permet d'assurer la réserve de disponibilité en mélange.

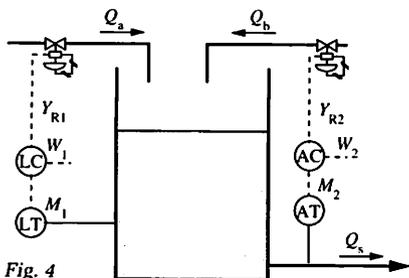


Fig. 4

Une analyse du produit d'extraction fixe la qualité du mélange.

Les deux vannes sont de type NF, pour des raisons de sécurité.

Lors des essais de réglage, il s'avère qu'une variation du débit de soutirage Q_s perturbe les deux chaînes de régulation, induisant des temps de stabilisation incompatibles avec le cahier des charges.

Les identifications conduites autour du point de fonctionnement nominal aboutissent aux fonctions de transferts suivantes :

$$H_1(p) = \frac{M_1(p)}{Y_{R1}(p)} = \frac{0,05}{p(1+20p)^2}$$

$$H_{Z1}(p) = \frac{M_1(p)}{Y_{R2}(p)} = \frac{0,1}{p(1+20p)^2}$$

$$H_2(p) = \frac{M_2(p)}{Y_{R2}(p)} = 1,5 \frac{e^{-20p}}{1+100p}$$

$$H_{Z2}(p) = \frac{M_2(p)}{Y_{R1}(p)} = -\frac{1,2e^{-20p}}{1+100p}$$

1. Analyser le fonctionnement de l'installation, à partir du schéma TI.

2. Proposer une solution.

3. Estimer les paramètres de pré-réglage des modules additionnels.

4. En déduire les nouvelles fonctions de transfert réglantes découplées

$$H_{Ri}(p) = \frac{M_i(p)}{Y_{Ri}(p)} \text{ intervenant pour}$$

le réglage.

5. Conclusions.

Solution :

1. Analyse

A partir d'un état d'équilibre, une modification du débit Q_s entraîne une variation de la mesure de niveau M_1 . Le régulateur LC réagit par action sur le débit Q_a , ce qui induit une modification de la concentration. Le régulateur AC provoque alors une variation du débit Q_b , ce qui perturbe la régulation de niveau, et ainsi de suite.

2. Solution adoptée

Le couplage réciproque des deux boucles de régulation incite à utiliser un découpleur (fig. 5).

3. Pré-réglage

L'application des résultats du paragraphe 3 permet d'établir :

$$G_1(p) = -\frac{H_{Z1}(p)}{H_1(p)} = -2$$

$$\text{et } G_2(p) = -\frac{H_{Z2}(p)}{H_2(p)} = 0,8.$$

On aboutit à deux correcteurs statiques, parfaitement réalisables.

4. Fonctions de transfert

L'usage d'un découpleur idéal rend M_1 indépendant des variations de Y_{R2} mais fait intervenir Y_{R1} par l'intermédiaire des blocs G_2 et H_{Z1} . L'analyse des contributions croisées permet d'écrire :

$$M_1(p) =$$

$$[H_1(p) + H_{Z1}(p) \cdot G_2(p)] \cdot Y_{R1}(p)$$

soit :

$$H_{R1}(p) = H_1(p) + H_{Z1}(p) \cdot G_2(p)$$

De même :

$$M_2(p) =$$

$$[H_2(p) + H_{z2}(p) \cdot G_1(p)] \cdot Y_{R2}(p)$$

soit :

$$H_{R2}(p) = H_2(p) + H_{z2}(p) \cdot G_1(p)$$

Compte tenu des expressions des diverses fonctions de transfert, on obtient :

$$H_{R1}(p) = \frac{0,13}{p(1+20p)^2}$$

et

$$H_{R2}(p) = 3,9 \frac{e^{-20p}}{1+100p}$$

5. Conclusions

Bien que les fonctions aient été choisies pour faciliter les calculs, cet exemple montre que l'existence d'un couplage parallèle augmente le poids de Y_{R1} sur M_1 . On retiendra que l'introduction d'un découpleur modifie forte-

ment le gain statique et qu'il est impératif d'identifier à nouveau les fonctions de transfert réglantes.

On note également que le problème du contrôle du signal réglant Y_{RT} résultant doit être résolu (voir paragraphe 1) et que la disponibilité du signal Y_R interne n'est possible que lors de l'emploi d'un SNCC.

Il est intéressant de signaler qu'il est souvent possible de réaliser un dispositif de mélange avec un seul couplage. Dans l'hypothèse où le produit b peut être obtenu sous forme d'extrait sec (et non plus de solution), il est facile de modifier le procédé.

On remplace la vanne n° 2 par une vis motorisée permettant d'injecter le produit b sous forme pondéreuse, ce qui ne modifie pas le niveau dans le bac.

On supprime ainsi un couplage, au prix d'une installation plus complexe puisqu'il faut obtenir le produit b sous forme de poudre, avant son emploi.

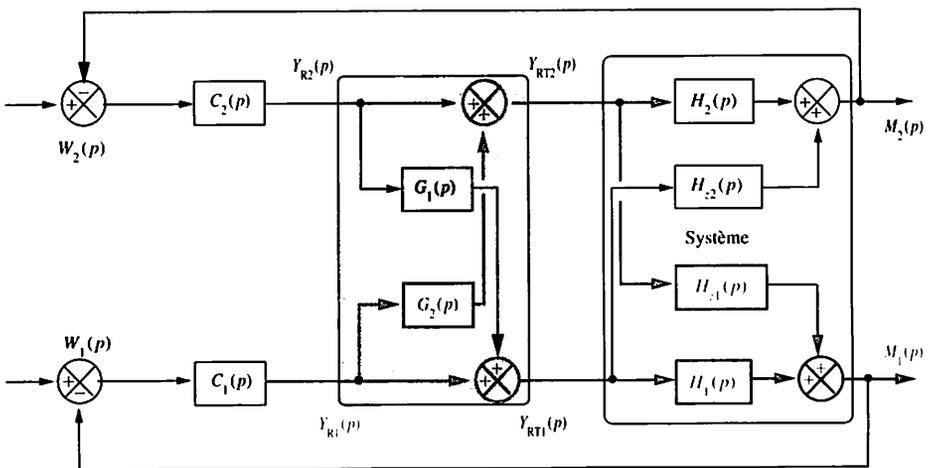


Fig. 5

RÉGULATION EN CASCADE 1

Les schémas de stratégie de régulation évoqués aux chapitres précédents correspondent aux cas où une perturbation est mesurable et commandable, ou seulement mesurable. Malheureusement, de nombreuses perturbations ne sont pas mesurables, telle l'exothermicité d'une réaction chimique qui perturbe la température ou la pression du réacteur.

Si une perturbation n'est pas mesurable, le bon sens conduit à se poser la question : ne peut-on pas tenter d'en percevoir les effets le plus tôt possible, tout au moins avant sa répercussion sur la grandeur réglée ? La question peut être formulée sous la forme suivante : est-il possible d'observer, au sein du système, une grandeur mesurable (et commandable par Y_R) image de l'influence de la perturbation sur l'évolution future de la grandeur réglée ?

Si la réponse est oui, on peut mettre en oeuvre une *régulation en cascade*.

Cette stratégie peut s'étudier sous une forme très complète, notamment à partir de la notion d'état d'un système, de grandeur d'état et de régulation par retour d'état.

Ce chapitre se propose plus modestement de dégager l'intérêt pratique de la régulation en cascade et plus particulièrement lorsque la perturbation influe sur la grandeur réglante choisie pour une régulation en chaîne fermée.

1 Exemple simple

Pour l'échangeur représenté figure 1, la régulation de la température de sortie conduit à choisir comme grandeur réglante le débit Q_v de vapeur. Cette grandeur est susceptible d'être fortement perturbée si la pression amont d'alimentation en vapeur n'est pas très stable. Cette pression est donc un signal de perturbation Z' .

Puisque cette perturbation est mesurable, on peut envisager de la réguler, ou de l'utiliser en signal de tendance. Industriellement, ces solutions ne sont pas employées.

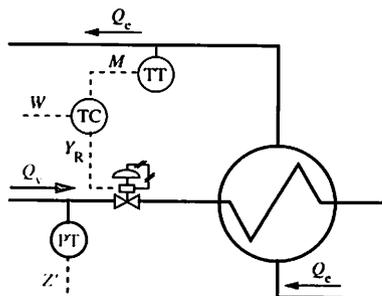


Fig. 1

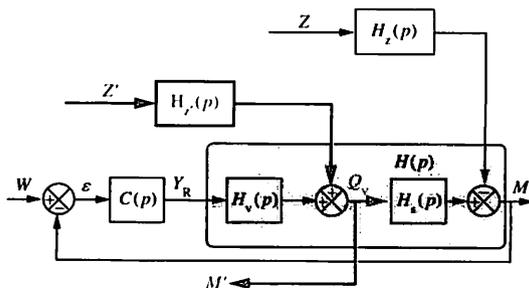


Fig. 2

Par contre, on peut envisager de mesurer la *grandeur réglante*, c'est-à-dire le débit Q_v . Le schéma fonctionnel de la chaîne de régulation est alors celui représenté figure 2. On constate que le signal M' constitue bien une information sensible à Z' .

Cette représentation conduit à scinder la fonction de transfert réglante

$$H(p) = \frac{M(p)}{Y_R(p)} \text{ en deux fonctions } H_V(p) \text{ et } H_S(p) \text{ telles que :}$$

$H(p) = H_V(p) \cdot H_S(p)$. La fonction de transfert $H_V(p)$ est celle de la vanne et est assimilable à un 1^{er} ordre de constante de temps τ_v . La fonction de transfert $H_S(p)$ correspond au reste du système et peut être

$$\text{représentée par son modèle de Broïda } H_S(p) = K \frac{e^{-t_p}}{1 + \tau_S p} .$$

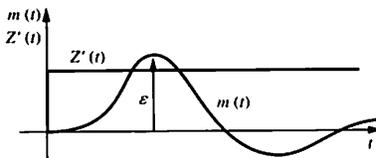


Fig. 3

Il faut donc adopter un réglage très mou pour conserver des marges de stabilité satisfaisantes.

Performances en chaîne fermée

Si l'on adopte le schéma de régulation de la figure 2, la régulation PID à un seul régulateur conduit à des performances médiocres, en particulier du point de vue de l'écart transitoire (fig. 3) lors d'un échelon de perturbation Z' . En effet, les non-linéarités du système conduisent

à adopter un réglage très mou pour conserver des marges de stabilité satisfaisantes.

2 Régulation en cascade

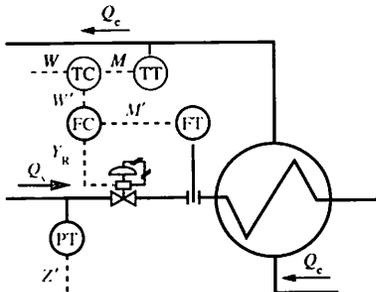


Fig. 4

L'idée de base consiste à asservir le débit de vapeur Q_v au moyen d'un second régulateur de débit, comme indiqué sur le schéma TI figure 4.

Le régulateur TC est appelé le régulateur « maître » car il demande un certain débit de vapeur. Le régulateur FC est dit régulateur « esclave » car il réalise cette demande, compensant par la même occasion toutes les perturbations agissant sur ce débit, dont Z' .

Performances en chaîne fermée

En cas de perturbation Z' , la boucle « courte » étouffe celle-ci, sa répercussion sur la grandeur réglée principale (la température) étant amoindrie. La figure 5 permet de mieux apprécier le bénéfice de cette

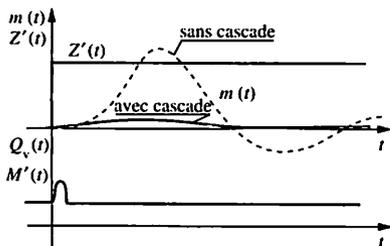


Fig. 5

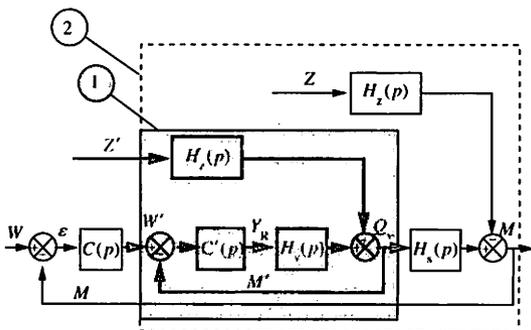


Fig. 6

stratégie. On constate que ce dernier est important, à condition que la chaîne interne soit rapide, grâce à un réglage dur. Bien évidemment, le régulateur de température reste nécessaire pour assurer la précision ($M = W$) et pour compenser la perturbation Z , constituée par le débit de charge de l'échangeur (fig. 6).

Réalisation pratique

Le régulateur esclave FC travaille en mode consigne externe W_e . Celle-ci étant le signal de sortie du régulateur maître TC (0 à 100 %), il convient d'utiliser intermédiairement un module de multiplication permettant d'ajuster les échelles de variations :

$$Y_{R\text{ maître}} = 100 \% \leftrightarrow Q_{V\text{ maxi}}$$

Cette contrainte est réalisée par un module rapport placé sur l'entrée de consigne extérieure ou bien elle est obtenue automatiquement sur certains matériels (voir chapitre 9).

3 Réglages

Le réglage des deux régulateurs montés en cascade ne pose pas de difficultés particulières, mais impose une méthodologie adaptée au chaînage.

L'analyse du schéma fonctionnel de la figure 6 montre qu'il est impératif de régler la boucle interne (1) avant la boucle principale (2).

La fonction de transfert $H_v(p)$ est habituellement identifiée par la méthode de l'échelon de commande sur $Y_{R\text{ esclave}}$. Dans la majorité des cas, on aboutit à un 1^{er} ordre dont la constante de temps τ_v est celle de la vanne. Pour une vanne pneumatique, τ_v est en général de quelques secondes. Le meilleur réglage est alors de type PI, avec (pour une structure mixte ou série) les valeurs suivantes : $T_i \geq \tau_v$ et pour le gain de

boucle : $A \cdot K_v = 4$, K_v représentant le gain statique de la vanne et valant théoriquement 1 pour une vanne linéaire. Compte tenu des non-linéarités des vannes, il convient de ne pas adopter un gain de boucle trop grand, pour ne pas risquer une réponse pseudo-oscillante de la vanne.

La boucle de régulation courte étant réglée et en mode de fonctionnement automatique, le réglage du régulateur maître s'effectue en considérant la boucle interne comme faisant partie du système vu par le régulateur maître. Compte tenu du poids non prépondérant de $H_v(p)$ sur $H(p)$, beaucoup de techniciens adoptent pour le maître l'ancien réglage du régulateur fonctionnant en monoboucle, en durcissant l'action proportionnelle.

4 Conclusions

En principe, l'emploi d'un montage en cascade sur une grandeur de réglage se justifie pour des perturbations suffisamment importantes, agissant sur cette dernière. L'analyse des schémas TI des installations industrielles montre que leur emploi se généralise, même en l'absence de perturbations notables sur la grandeur réglante.

Plusieurs raisons expliquent cette généralisation :

- un second régulateur ne coûte matériellement rien lors de l'emploi d'un SNCC ;
- lors d'une commutation du régulateur maître en position « manuel », le régulateur esclave assure encore la sécurité vis-à-vis de la grandeur réglante ;
- le système « vu » par le régulateur maître d'une régulation en cascade est plus intéressant que celui « vu » par le régulateur de la figure 2. En effet, vis-à-vis de ce dernier, le système est généralement non linéaire, en grande partie à cause de l'actionneur employé. La conséquence est bien souvent un réglage mou, car il est nécessaire de conserver des marges de stabilité suffisantes pour tous les points de fonctionnement. L'emploi du régulateur esclave permet de considérer que l'asservissement réalise :

$$Q_{V\%}(t) \approx Y_{R\text{maître}\%}(t)$$

Pour le régulateur, tout se passe comme si le système comportait un actionneur quasi linéaire, ce qui permet d'employer un réglage plus dur, sans se préoccuper des non-linéarités éventuelles de l'actionneur. Cet argument justifie un grand nombre de cascades industrielles (voir exercices résolus).

Exercices résolus

1 Un technicien est chargé de réaliser la régulation de la température de sortie d'un échangeur. Dans un premier temps, il décide de réaliser une monoboucle PID, conforme aux schémas des figures 1 et 2. Afin d'obtenir un réglage, il identifie la fonction de transfert $H(p) = \frac{M(p)}{Y_R(p)}$ lors d'essais

« à l'eau ». A partir d'une réponse indicielle, il obtient le modèle suivant :

$$H(p) = \frac{1,4e^{-17,5p}}{1 + 29p} \text{ valable autour du}$$

point de fonctionnement Y_{R1} , Z_1 , Z'_1 , M_0 .

Il évalue le temps de réponse de la vanne à 30 secondes, celle-ci étant à caractéristique intrinsèque linéaire. On rappelle que le débit volumique d'une telle vanne est de la forme :

$$Q_V = K' \cdot Y_R \cdot \sqrt{P_{\text{amont}} - P_{\text{aval}}} = K_V \cdot Y_R$$

où $(P_{\text{amont}} - P_{\text{aval}})$ est la différence de pression entre les bornes de la vanne.

1. Déterminer un réglage PID d'un régulateur de température à structure parallèle.

2. Tester ce réglage vis-à-vis d'une variation z' , d'amplitude 10 %, de la pression en amont.

3. Réaliser ces mêmes essais de réglage pour deux autres points de fonctionnement, caractérisés par les pressions en amont : $Z'_0 < Z'_1 < Z'_2$.

4. Analyser les réponses obtenues.

Solution :

1. Réglage

On adopte un réglage de Broïda (Régulation 2, chap. 16) :

$$X_p \% = 120K \frac{T}{\tau + 0,4T} = 81 \%$$

$$T_i = K \frac{T}{0,75} = 32 \text{ s}$$

$$T_d = 0,35 \frac{T}{K} = 7 \text{ s}$$

2. Test du réglage

Pour une augmentation de 10 % de la pression en amont de la vanne, les courbes 1 des figures 7 et 8 confirment

qu'un rapport $\frac{T}{\tau}$ supérieur à 0,5 ne permet pas de minimiser suffisamment l'écart transitoire.

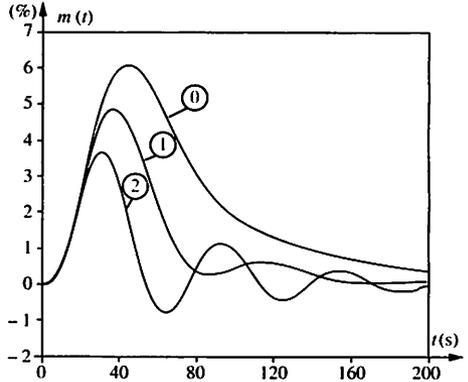
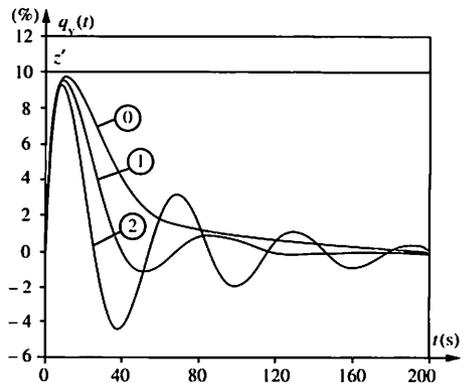


Fig. 7



Courbe ① $Z' = Z'_0$
Courbe ② $Z' = Z'_2$

Fig. 8

3. Influence de la pression d'alimentation en vapeur

Les courbes 0 et 2 des figures 7 et 8 confirment qu'une augmentation de la pression en amont augmente le gain statique de la vanne et déstabilise la chaîne de régulation.

4. Conclusion

Il faut adopter une stratégie compensant les variations dynamiques de la pression et la non-linéarité introduite par cette pression.

2 Le technicien décide d'implanter une régulation en cascade, conforme aux schémas des figures 4 et 6.

1. Justifier l'utilité de cette stratégie.
2. Proposer un réglage pour le régulateur esclave, à structure parallèle.
3. Réaliser les essais de réglage, pour les mêmes conditions que l'exercice 1.
4. Conclusion.

Solution :

1. Justification

Seule une régulation en cascade permet de répondre aux critères de la question 4 de l'exercice 1.

2. Réglage du régulateur esclave

La vanne étant assimilable dynamiquement à un 1^{er} ordre, on adopte le réglage mixte $T_i = \tau = \frac{T_R}{3} = 10$ s et

un gain de boucle $AK = 4$. La vanne linéaire ayant globalement un gain statique valant 1, on choisit $A = 4$. Par transformation de structure (mixte → parallèle). On obtient :

$$C(p) = 4 + \frac{1}{2.5 \cdot p}$$

Le réglage du régulateur maître est celui établi à l'exercice 1.

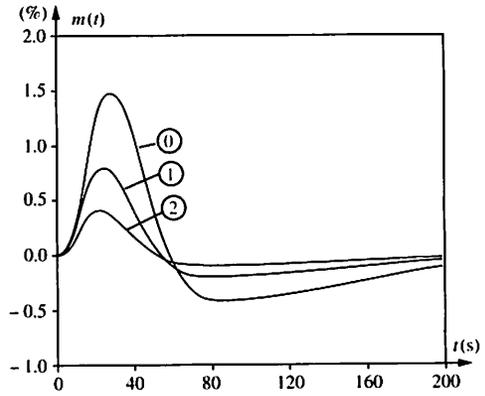
3. Tests de la stratégie

Les figures 9 et 10 correspondent aux mêmes conditions que dans l'exercice 1.

4. Conclusion

L'utilité de la boucle en cascade se justifie doublement :

- minimisation de l'écart transitoire,
- minimisation de l'influence déstabilisante de la pression en amont, par linéarisation de l'actionneur.



Courbe ① $Z' = Z'_0$
 Courbe ① $Z' = Z'_1$
 Courbe ② $Z' = Z'_2$

Fig. 9

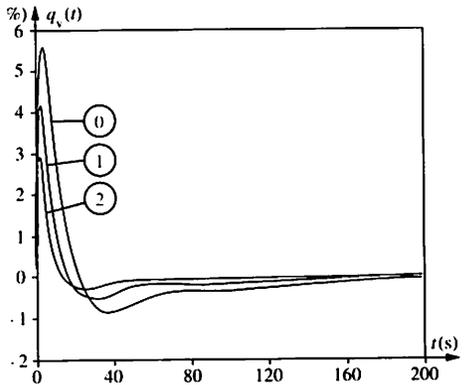


Fig. 10

RÉGULATION EN CASCADE 2

Le précédent chapitre a dégagé l'intérêt d'une régulation en cascade, utilisant la mesure de la grandeur réglante : les perturbations agissant sur cette dernière sont compensées. Cependant, l'une des raisons principales de ce choix est la linéarisation de la caractéristique de l'organe réglant auquel un tel montage aboutit. Pilotant un système dont l'actionneur est considéré comme quasi linéaire, le régulateur peut admettre un réglage un peu plus dur, sans nuire aux marges de stabilité. Dans un grand nombre de cas cependant, la perturbation principale n'agit pas sur la grandeur réglante et il est possible de disposer d'une mesure image de l'influence de la perturbation sur l'évolution future de la grandeur réglée. Les réglages et les modes de fonctionnement étant alors sensiblement différents de ceux abordés au chapitre 8, les techniciens de la régulation ont l'habitude de désigner ces cas sous la dénomination de régulation en cascade sur une grandeur intermédiaire. Le schéma fonctionnel du montage est alors celui représenté figure 1. On scinde la fonction $H_s(p)$ en deux fonctions $H_{s1}(p)$ et $H_{s2}(p)$, toutes deux pouvant être représentées par leur modèle de Broïda.

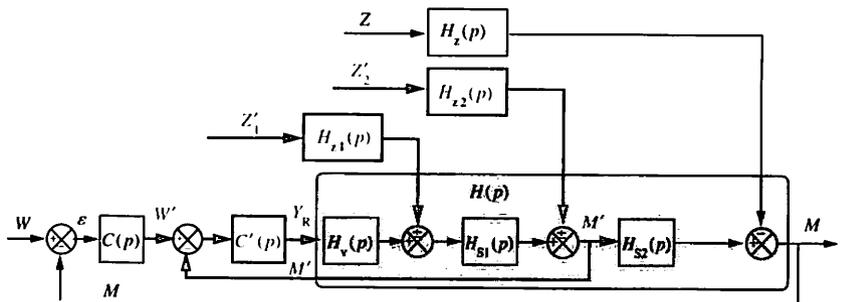


Fig. 1

La perturbation que l'on cherche à combattre est Z'_2 et, dans une moindre mesure, Z'_1 .

1 Exemple simple

La fabrication d'un aliment pour bétail aboutit à une substance hygroscopique que l'on désire commercialiser sous forme de granulés secs. On utilise donc un sécheur industriel fonctionnant selon la technique du lit fluidisé (fig. 2).

L'air ambiant, prélevé extérieurement, est soufflé à pression constante sous une grille dans le but de maintenir en suspension les granulés saturés en eau. Afin d'assurer un séchage efficace, cet air est réchauffé par l'intermédiaire d'un échangeur fonctionnant à la vapeur. La régulation de la température de sortie (ou température d'air repris) permet de garantir la qualité du produit.

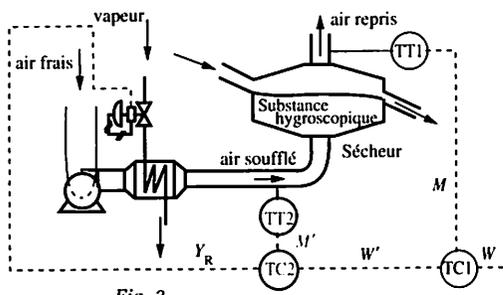


Fig. 2

Le débit du produit entrant dans le sécheur est régulé (chaîne non représentée). Une analyse du procédé montre que les principales perturbations sont :

- la pression et la température de la vapeur,
- la température et le taux d'humidité de l'air frais.

La température de l'air soufflé, mesurée par le transmetteur TT2, constitue une grandeur intermédiaire

sensible à l'ensemble de ces perturbations : on utilise donc une boucle en cascade température-température.

Performances en chaîne fermée

La régulation de la température de l'air soufflé (boucle courte) permet d'étouffer l'essentiel des perturbations. Cependant, le taux de saturation en eau du produit peut varier, son augmentation entraînant une diminution de la température de l'air repris. Le régulateur-maître, fonctionnant en boucle longue, peut alors réajuster la consigne du régulateur-esclave.

La différence essentielle avec une régulation cascade sur une grandeur réglante se situe au niveau de l'amplitude et de la vitesse de variation du signal Y_R du régulateur-maître.

Dans le cas présent, il convient que le réajustement de la consigne de l'air soufflé soit de faible amplitude et de vitesse suffisamment lente.

Pour une régulation en cascade sur la grandeur réglante, la dynamique de variation de $Y_{R \text{ maître}}$ est grande, tant en amplitude qu'en vitesse.

Les réglages d'une boucle en cascade doivent donc prendre en compte ces contraintes.

2 Autre exemple

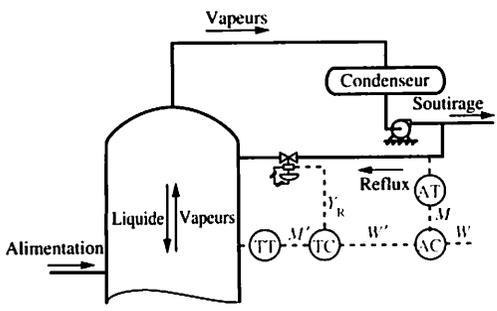


Fig. 3

Une étude technique complète de la distillation d'un mélange binaire est proposée à la fin de cet ouvrage. Cependant, une analyse rapide permet déjà d'établir que la qualité des produits soutirés est directement liée aux caractéristiques de la colonne (nombre de plateaux,...) et aux conditions de fonctionnement (débits de soutirage, température,...).

Par souci de simplification, la stratégie proposée figure 3 ne concerne

que la régulation de la qualité du produit soutiré en tête de colonne. Après refroidissement et condensation de ce dernier, on contrôle sa qualité au moyen d'un analyseur ou d'un densimètre. En fonction de cette qualité, on réinjecte une partie du produit soutiré, au niveau des plateaux supérieurs de la colonne : c'est le principe du *reflux*.

Compte tenu du temps mort important entre une modification du débit de reflux et sa conséquence sur la qualité du produit, il convient de disposer d'une information intermédiaire, image de la qualité future du produit de tête de colonne, afin d'utiliser une boucle en cascade.

On utilise pour cela la température du plateau dit « sensible ». Au niveau de ce plateau, la température du mélange liquide-vapeur permet de disposer d'une information sur la teneur en produit léger. On réalise donc une boucle en cascade qualité-température.

Performances en chaîne fermée

En cas de modification notable de l'équilibre de la colonne, la variation de la température du plateau sensible permet d'agir sur le débit de reflux.

Les principales perturbations sont une variation du débit d'alimentation ou un chauffage trop important en pied de colonne. Dans ce dernier cas, la température du plateau sensible a tendance à augmenter, impliquant une augmentation du pourcentage en produit "lourd" dans les vapeurs. L'augmentation du débit de reflux commandée par le régulateur-esclave permet d'améliorer le pourcentage en produit « léger » dans les plateaux supérieurs, tout en refroidissant la tête de colonne.

3 Réglages

Le réglage des deux régulateurs d'un montage en cascade sur une grandeur intermédiaire est plus délicat que précédemment.

Il est toujours impératif de régler la boucle interne (1) avant la boucle principale (2).

La fonction de transfert $H_v(p) \cdot H_{s1}(p) = K_1 \frac{e^{-T_1 \cdot p}}{1 + \tau_{s1} \cdot p}$, « vue » par le

régulateur-esclave, est habituellement identifiée par la méthode de l'échelon de commande sur $Y_{R \text{ esclave}}$. Dans la majorité des cas, on aboutit à un modèle de Broïda. Afin d'éviter un phénomène de battements entre les deux boucles, le réglage du régulateur-esclave doit conduire à une réponse indicielle *apériodique*, ce qui impose pratiquement une régulation PID avec, pour une structure mixte : $T_i \geq \tau_{s1} + T_1$,

$T_d = 0,4 T_1$, $A \cdot K_1 \approx 2 \text{ à } 3$, pour conserver une largeur de bande proportionnelle suffisante ainsi qu'une bonne robustesse vis-à-vis des non-linéarités du système.

La boucle de régulation courte étant réglée et en mode de fonctionnement automatique, le réglage du régulateur-maître s'effectue en considérant la boucle interne comme faisant partie du système « vu » par le régulateur-maître.

Il convient de refaire obligatoirement une identification, car la fonction de transfert en chaîne fermée de la boucle courte $F_{s1}(p)$ est différente de la fonction de transfert $H_v(p) \cdot H_{s1}(p)$.

Le phénomène de linéarisation évoqué au chapitre précédent est beaucoup moins sensible. La modification principale provient de la diminution de la constante de temps en chaîne fermée, due au gain de boucle qui est supérieur à 1.

En cas d'impossibilité de réaliser une identification de la fonction de transfert vue par le régulateur-maître, on constate que les valeurs

$T_{i \text{ maître}} \approx T_{i \text{ esclave}}$ et $A_{\text{ maître}} \approx A_{\text{ esclave}}$, adoptées sur des structures identiques, constituent un préréglage permettant un démarrage de la boucle.

4 Conclusions

Les avantages inhérents aux boucles en cascade sur une grandeur intermédiaire plaident pour leur généralisation systématique. Le seul obstacle reste la complexité des procédures d'emploi de ces boucles pour les agents d'exploitation. En effet, les démarrages d'installation et les passages en position de repli imposent de travailler en boucle courte : esclave en automatique et maître en manuel.

Le retour en mode cascade doit pouvoir être entièrement automatisé, l'agent de conduite n'ayant qu'à commuter l'esclave en mode cascade (ou consigne externe), puis le maître en mode automatique. Ces commutations doivent être sans à-coup.

Les systèmes numériques de contrôle commande (SNCC) modernes permettent aujourd'hui une automatisation complète du démarrage, du fonctionnement et de l'arrêt d'une boucle cascade.

Disposant des opérateurs booléens (ET, OU...) d'un automate programmable industriel (API), ils permettent une synchronisation totale des divers blocs algorithmiques (voir exercice résolu). De plus, un grand nombre de SNCC dispose d'un véritable langage de programmation appelé langage « BATCH », car destiné à gérer les phases discontinues d'un processus de fabrication.

Ce langage met à la disposition d'un agent de conduite des procédures (ou macro-commandes) réalisant automatiquement une phase de fonctionnement : les interventions humaines sont remplacées par la détection d'événements issus du procédé.

Exercice résolu

La stratégie de régulation concernant l'installation représentée figure 2 est réalisée dans un SNCC, par chaînage de blocs algorithmiques. Un extrait de la bibliothèque est fourni en annexes, pages 122 et 123. Chaque bloc y est détaillé, avec la signification de toutes les entrées-sorties, ainsi que la nature des signaux véhiculés.

Pour des raisons de sécurité, on utilise une station « Auto-Manu » déportée sur le site de production. Le technicien chargé de la configuration a établi les liaisons représentées figure 4. Cette configuration est destinée à libérer l'opérateur des tâches fastidieuses d'équilibrage, permettant tous les transferts sans à-coup lors du démarrage de la cascade. On demande de vérifier que :

1. le mode « Manuel » de la station de commande force l'esclave et le maître en « Manuel » et en mode consigne suiveuse ;
2. le transfert en mode « Automatique » de l'esclave, en consigne interne, conserve le maître en « Manuel », la sortie de ce dernier étant en recopie de la consigne interne de l'esclave ;
3. la commutation de l'esclave en mode consigne externe provoque le basculement en mode cascade, sans à-coup sur la sortie des deux régulateurs ;
4. le retour de l'esclave en mode consigne interne supprime le mode cascade, sans à-coup sur la consigne interne de l'esclave.
5. Conclusions.

Solution :

1. Forçage du maître en « Manuel »

Si la station est en mode « Manuel » alors $S_1 = 1$, ainsi que S_4 : les deux régulateurs sont donc en mode Track (mode sortie forcée, voir Régulation 1, chap. 21), avec $Y_{R \text{ esclave}} = Y_{R \text{ manuel}}$, le maître étant en mode « suiveur » ($W_{i \text{ maître}} = M$) par le signal S_4 .

$S_3 = S_1 = 1$ donc l'esclave est également en mode consigne suiveuse :

$$W_{i \text{ esclave}} = M'.$$

La sortie du maître est, grâce au mode Track, en recopie

$$Y_{R \text{ maître}} = W_{i \text{ esclave}}, \text{ par l'intermédiaire de } S_6.$$

2. Fonctionnement en consigne locale

Le passage de la station en mode automatique ($S_1 = 0$) entraîne le basculement de l'esclave en automatique. La commutation s'effectue sans à-coup sur $Y_{R \text{ esclave}}$, grâce

au mode Track et à l'équilibrage $W_{i \text{ esclave}} = M'$.

Toute modification sur $W_{i \text{ esclave}}$ se répercute sur $Y_{R \text{ maître}}$ et $W_{o \text{ esclave}}$.

3. Passage en mode cascade

La commutation de l'esclave en mode consigne externe provoque le basculement de S_2 à 1, donc le maître passe en automatique sans à-coup sur sa sortie grâce à l'équilibrage $W_{i \text{ maître}} = M$.

L'absence d'à-coup sur la consigne de l'esclave (car juste avant la commutation)

$$W_{o \text{ esclave}} = Y_{R \text{ maître}} = W_{i \text{ esclave}}$$

aboutit à une continuité sur $Y_{R \text{ esclave}}$.

On note que $S_2 = 1$ impose $S_3 = 1$ donc l'esclave repasse en mode suiveur :

$$W_{i \text{ esclave}} = M'.$$

4. Suppression du mode cascade

Le basculement de l'esclave en mode W_i force le maître en mode Track grâce à S_2 complémenté. La condition énoncée ci-dessus ($W_{i \text{ esclave}} = M'$) permet une stabilisation rapide sur la sortie $Y_{R \text{ esclave}}$ et une conduite en boucle courte.

5. Mise en œuvre

La configuration figure 4 implique une bonne connaissance des opérateurs logiques élémentaires et de leur table de vérité.

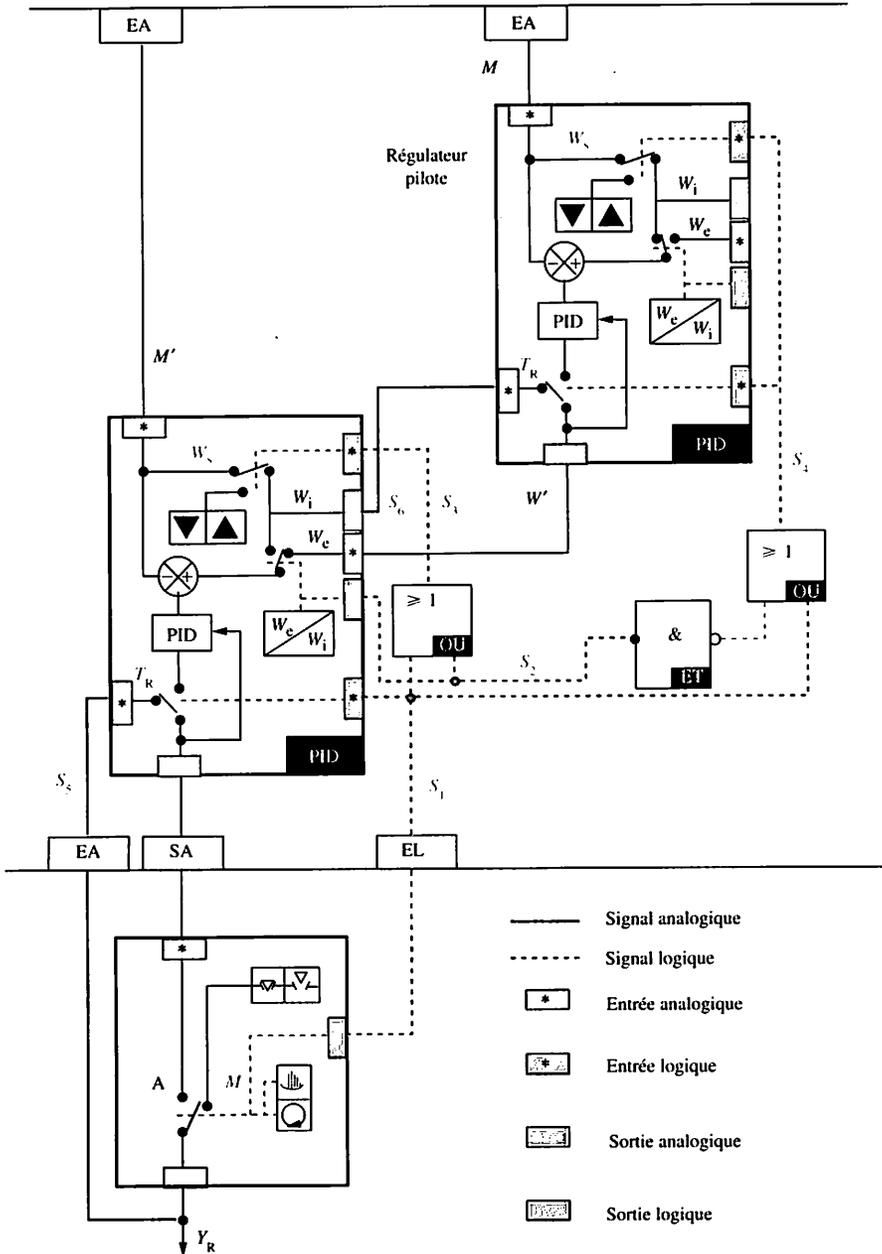
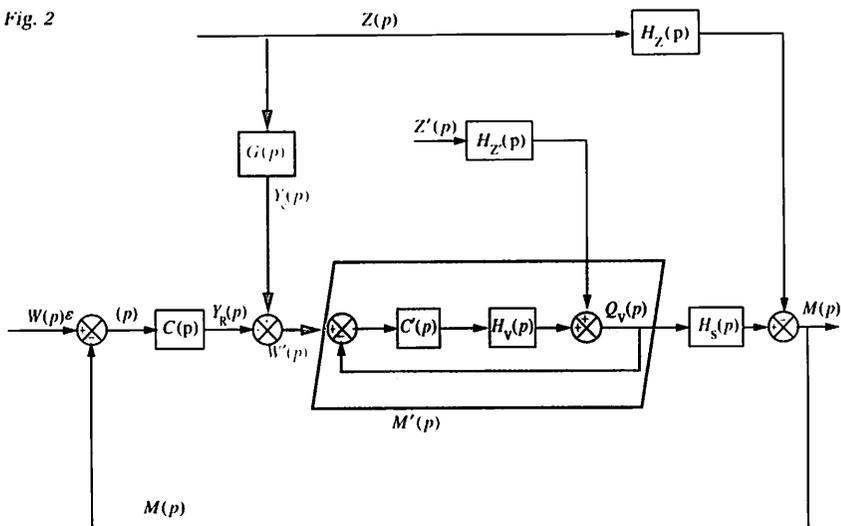


Fig. 4

Le montage apporte une bonne robustesse à la régulation de température, dans de grands intervalles de variation du débit Q_e et de la consigne W de température.

Fig. 2



L'utilisation, les réglages et les performances de chaque élément ayant été vus dans les chapitres précédents, ils ne seront pas développés ici. Le schéma fonctionnel d'une régulation à trois éléments est proposé figure 2. Deux autres exemples industriels sont présentés dans les paragraphes qui suivent.

1 Régulation de température d'un four de préchauffage

La fabrication de nombreux produits industriels nécessite généralement un conditionnement des différents fluides participant à la réaction chimique. Le four industriel, représenté figure 3, doit assurer la mise en température d'un constituant, sur une chaîne de fabrication continue. Ce produit, dont le débit Q_a variable est imposé par la charge de fabrication, doit être maintenu impérativement à une température constante, afin de garantir le rendement de la réaction. Cet objectif est assuré par action sur le débit de fioul, alimentant le brûleur du four.

Performances de la régulation à trois éléments

La boucle interne d'asservissement du débit de fioul permet, d'une part, de s'affranchir des variations de celui-ci, variations dues au fait que la viscosité dépend de la température et, d'autre part, de combattre les non-linéarités de la vanne de réglage.

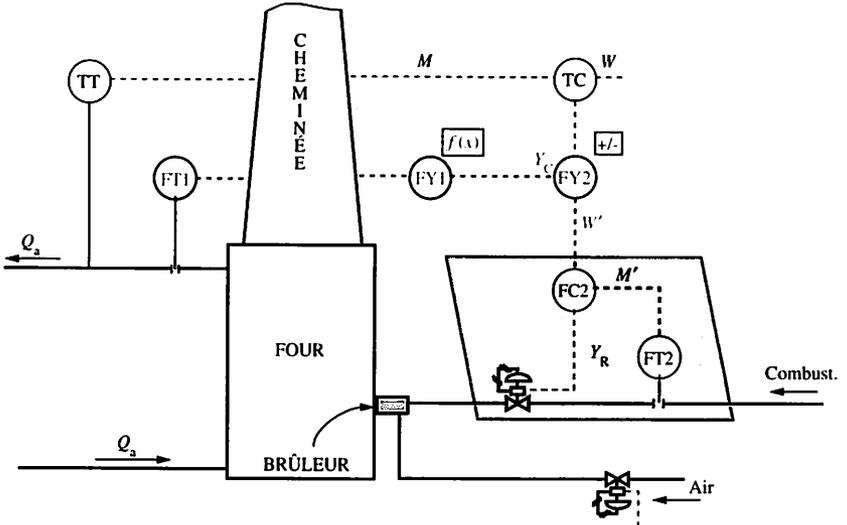


Fig. 3

La régulation de tendance, utilisant un module avance-retard, permet de combattre efficacement les variations importantes du débit Q_a .

Le régulateur-maître de la boucle en cascade apporte la possibilité de corriger les faibles variations résiduelles de température.

Conformément aux études précédentes, le sommateur FY2 pourra être remplacé avantageusement par un module multiplicateur si Q_a varie dans des proportions importantes (voir exercice résolu, chap. 6).

Il reste évident que l'objectif final ne pourra être atteint sans une combustion correcte au niveau du brûleur. Cet impératif nécessite une action adaptée sur le débit d'air, conforme aux contraintes de production et de sécurité.

Cette stratégie sera développée au chapitre 11.

2 Régulation de qualité d'une colonne de distillation

Cet exemple a déjà été évoqué au chapitre précédent. Pour des raisons d'encombrement, en chimie et pétrochimie, l'élaboration de certains produits nécessite la mise en série de plusieurs colonnes de distillation. Cette implantation pose de sérieux problèmes de stabilité, le débit d'alimentation d'une colonne pouvant être une grandeur de réglage de la colonne précédente.

Dans l'exemple de la figure 4, le signal Y_{R2} permet de maintenir le niveau du liquide contenu dans le fond de la colonne située en amont.

Toute action de cette régulation perturbe le débit du produit entrant dans la colonne.

Performances de la régulation à trois éléments

La prise en compte du débit entrant au niveau de la boucle cascade, qui assure la qualité de produit de tête, permet d'améliorer la stabilité de la colonne.

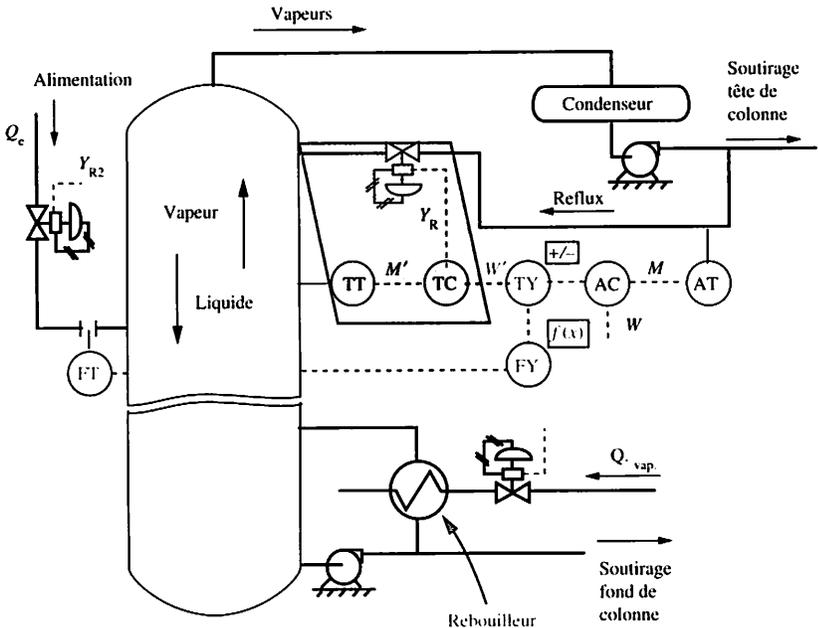


Fig. 4

3 Conclusions

On retiendra qu'une régulation à trois éléments, malgré sa complexité de mise en œuvre, doit être envisagée chaque fois que le procédé présente de fortes non-linéarités ou un temps mort important, et qu'il existe une perturbation principale mesurable.

Une régulation à trois éléments est soumise aux mêmes contraintes d'équilibrage que celles évoquées au chapitre 7 pour les correcteurs de tendance.

La prise en compte du signal de tendance Y_c entre les deux régulateurs facilite la synchronisation de la stratégie globale (voir exercice résolu).

Exercice résolu

Le fonctionnement de la colonne de distillation de la figure 4 impose un apport calorifique régulier par l'intermédiaire d'un échangeur, appelé « rebouilleur », alimenté par de la vapeur. Ce chauffage assure le changement d'état du corps le plus volatil au cours de son ascension dans la colonne tout en laissant liquide le reste des produits. Le fonctionnement correct de la séparation dans les plateaux est assuré par le maintien d'une température fixe pour la phase liquide en fond de colonne.

Compte tenu des retards importants observés entre une variation de Q_0 ou Q_{vap} et leur répercussion sur la température de fond de colonne :

1. proposer une stratégie de régulation performante ;
2. réaliser cette stratégie par évolution de la configuration de l'exercice du chapitre 9.

Solution :

1. Schéma TI

Une régulation à trois éléments est nécessaire. Le schéma TI est donné figure 5. On notera l'intérêt de la boucle d'asservissement, la vapeur utilisée ayant souvent une pression très variable.

2. Configuration avec un SNCC

Pour réaliser une correction de tendance statique, il suffit d'utiliser un sommateur (poids $+K_c$) entre la sortie du régulateur-maître et l'entrée de consigne extérieure de l'esclave. On notera la présence d'un soustracteur « symétrique » (poids $-K_c$) permettant d'assurer un passage en mode cascade sans à-coup (figure 6).

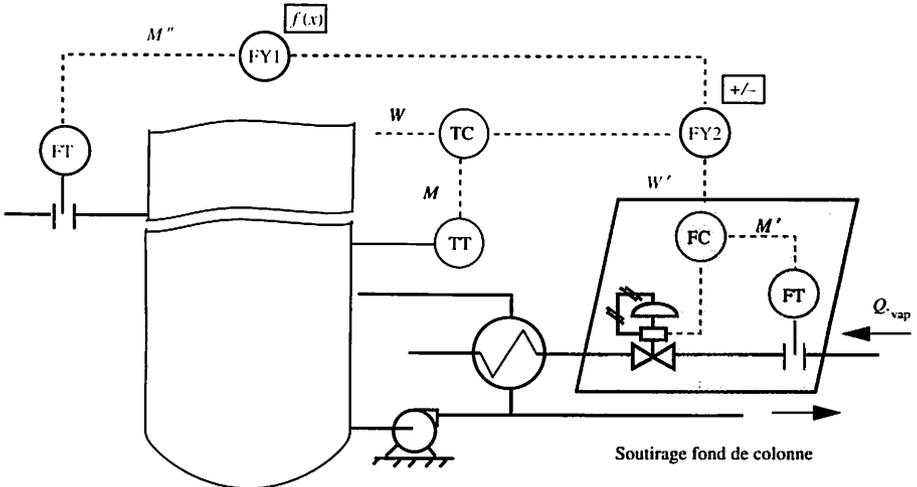


Fig. 5

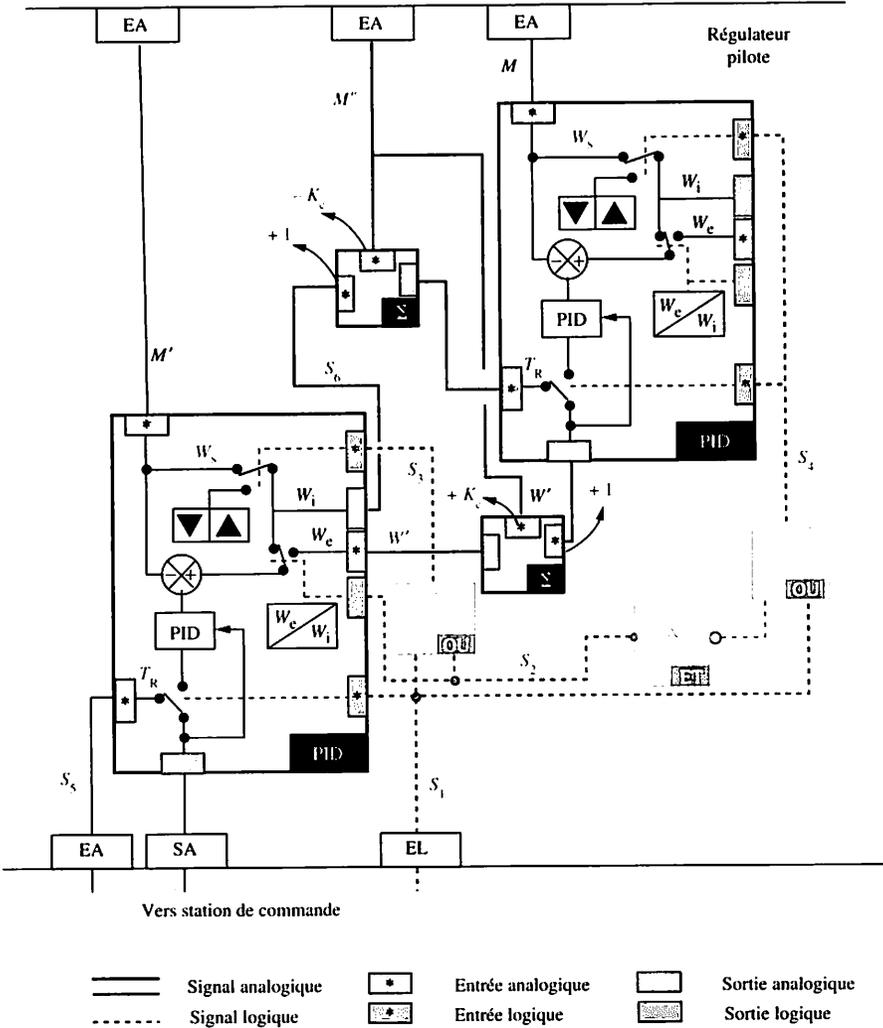


Fig. 6

La souplesse des outils de conception assistée par ordinateur (C.A.O.) disponibles sur les SNCC permet d'obtenir facilement la configuration ci-dessus. Il suffit de « défaire » deux liaisons de la configuration cascade de la page 55 et d'insérer les nouveaux blocs algorithmiques.

Dans l'exemple de la régulation de température du four représenté à la figure 3 du chapitre 10, la grandeur réglante adoptée est le débit de fioul alimentant un brûleur. Pour obtenir un rendement satisfaisant de la combustion, il est évident que le débit d'air (c'est-à-dire l'apport de comburant dioxygène O_2) doit être constamment ajusté de façon à permettre une combustion dans les conditions stœchiométriques. Industriellement, les contraintes de sécurité (nécessité d'éviter la formation de monoxyde de carbone CO) imposent un léger excès d'air par rapport à ces conditions.

D'une façon générale, on appelle *régulation de rapport* tout dispositif permettant d'asservir les variations d'une grandeur, dite *menée*, aux variations aléatoires d'une autre grandeur, dite *menante*.

On notera que de nombreux montages obéissent à cette définition, la plupart réalisant une simple proportion entre deux grandeurs. Par habitude, on conserve le terme de *régulation de rapport* pour de tels montages, bien qu'il faille préférer alors celui de *régulation de proportion*.

Les paragraphes suivants présentent quelques exemples représentatifs.

1 Régulation de combustion

Cette appellation s'applique à une régulation de rapport entre un comburant et un combustible.

Régulation de proportion à air mené

Ce schéma de régulation, représenté figure 1, asservit la consigne d'une régulation de débit d'air à la mesure du débit de combustible. On obtient donc : $W_{\text{air}} = K \cdot M_{\text{comb}}$ où K est le coefficient de proportion.

Le module dit « proportionneur » FY1 réalise en fait :

$$W_1 = K \cdot M' \pm D$$

Le décalage (ou bias) D permet de maintenir un peu d'air de ventilation dans la chambre de combustion, même en l'absence de débit combustible. Cette sécurité permet l'élimination des fumées et des traces résiduelles de gaz.

Les performances de cette stratégie dépendent essentiellement de la rapidité de la boucle d'asservissement, pour laquelle on adopte habituellement un réglage PI dur.

Un montage équivalent est celui de la figure 2. Le régulateur FFC représente un régulateur de « rapport de débit » pour lequel le module proportionneur est intégré sur l'entrée de consigne externe.

Ces 2 montages présentent l'avantage d'être simples à mettre en œuvre. Par contre, ils n'assurent pas la proportion pendant les régimes transitoires. Une stratégie plus performante est présentée au chapitre 19.

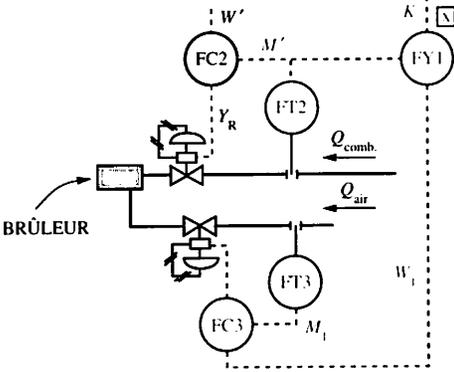


Fig. 1

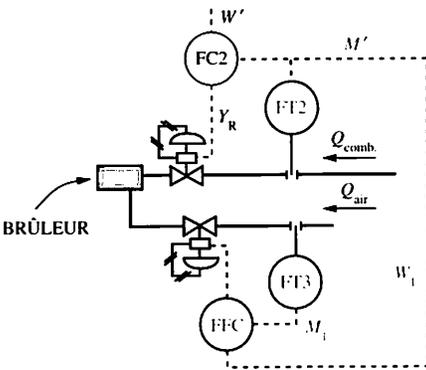


Fig. 2

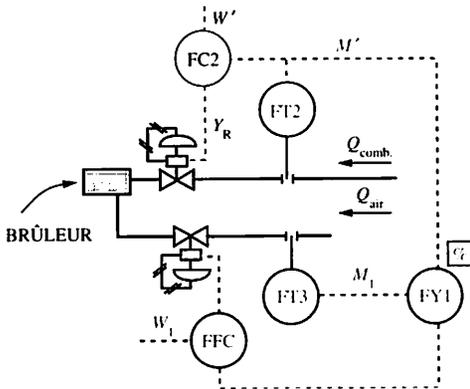


Fig. 3

Régulation de rapport

On réserve théoriquement cette appellation à la réalisation de la figure 3. Le module de FY1 « calcule » le rapport des deux débits, celui-ci servant de mesure à un régulateur dont la consigne représente le rapport à obtenir. Pour les régulateurs modernes, le module FY est intégré et permet le rapport entre deux entrées de mesure.

Ce montage présente l'avantage d'être bien adapté à la combustion de différents combustibles. En fonction du combustible disponible, un système superviseur peut indiquer le rapport stœchiométrique optimal.

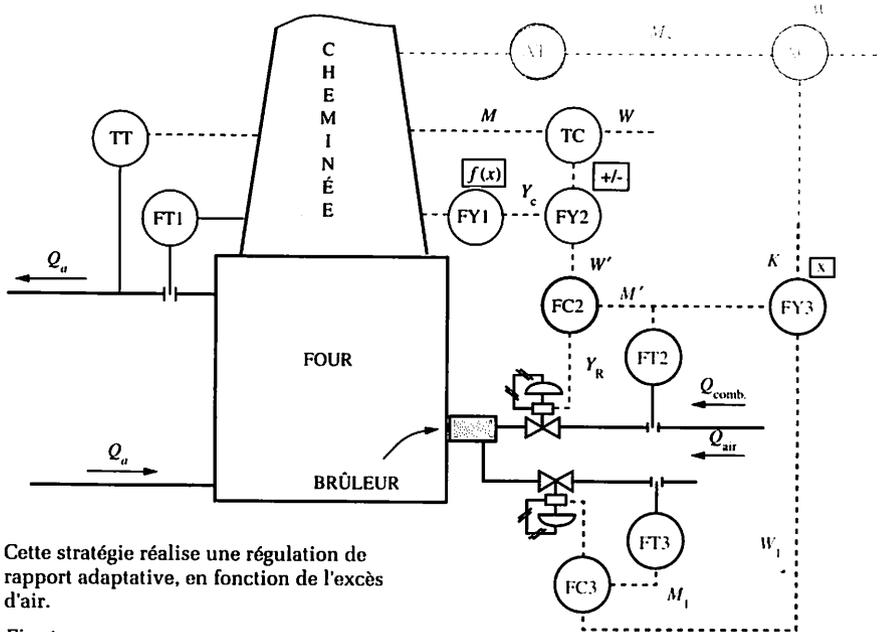
Régulation industrielle de combustion

On réalise la stratégie de la figure 4. On analyse les fumées (sonde à oxygène, opacimètre...) afin de maîtriser précisément la qualité de la combustion. Le régulateur d'excès d'air AC pilote alors les variations du facteur K , par exemple sous la forme : $K = K_0 + Y_{RAC}$.

Le montage réalise une régulation de proportion de type air « mené ». En effet, le débit de combustible est la grandeur réglante d'une boucle cascade température-débit, et ses variations sont donc imposées.

Pour des raisons de sécurités (fiabilité de l'analyseur AT), on limite souvent les variations du facteur K au moyen des limites haute et basse de sortie du régulateur AC.

On notera que l'excès d'air nécessaire est également fonction du débit de combustible. Un débit faible nécessite un excès plus important. On peut donc également prévoir une consigne du régulateur AC adoptée au débit de combustible.



Cette stratégie réalise une régulation de rapport adaptative, en fonction de l'excès d'air.

Fig. 4

2 Régulation de rapport d'un neutraliseur

Le nitrate d'ammonium NH_4NO_3 est un engrais. Sa fabrication, en phase liquide, nécessite la réaction de l'acide nitrique HNO_3 et du gaz ammoniac NH_3 .

La grandeur physique caractérisant l'objectif final est le pH de la solution, image de la qualité de la neutralisation. Sa mesure au niveau du réacteur se heurte à des difficultés techniques ($T \approx 160^\circ \text{C}$).

Dans ces conditions d'exploitation, il est nécessaire d'assurer l'objectif par une stratégie respectant « a priori » une proportion des débits telle que la neutralisation soit complète.

La figure 5 représente une possibilité de régulation de l'installation.

Afin de garantir les conditions stœchiométriques, on réalise une mesure du débit d'ammoniac, corrigée en pression et température (voir exercice résolu, Régulation 1, chap. 4).

La mesure précise du débit d'acide nécessite la prise en compte de la concentration de cet acide.

On notera que le débit de charge de l'installation est commandée par la consigne W_2 , le régulateur de rapport FFC1 recevant en mesure le rapport $\frac{Q_{\text{NH}_3}}{Q_{\text{HNO}_3}}$, issu du module FY5.

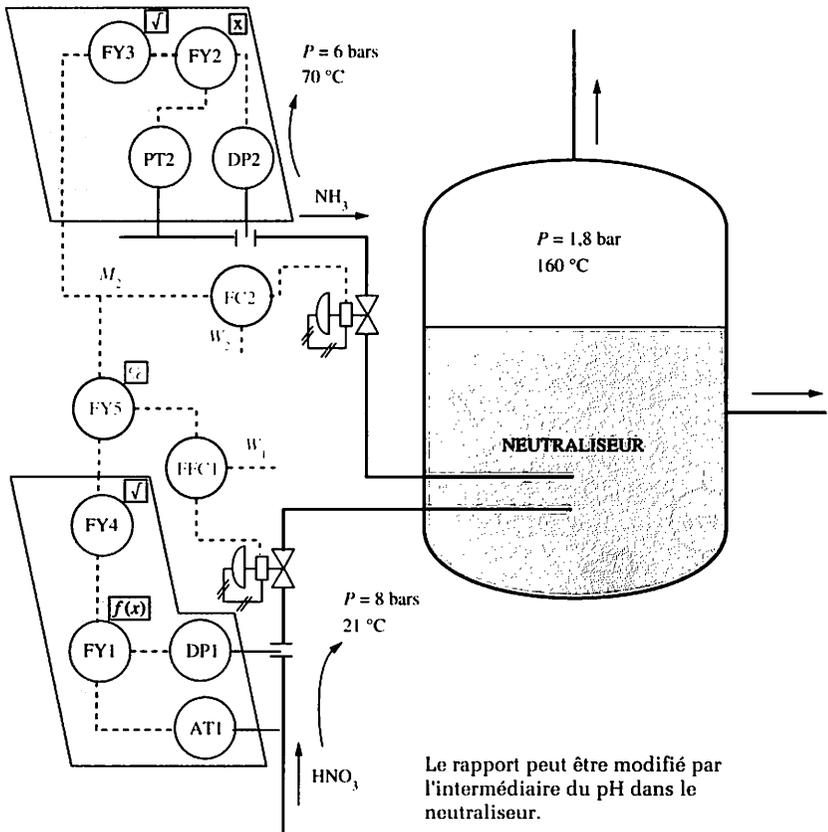


Fig. 5

3 Conclusion

Dans les secteurs pétrochimiques, chimiques et agro-alimentaires, la qualité des produits finis nécessite l'adjonction de un ou plusieurs additifs, réalisée par l'intermédiaire de régulation de proportion.

Exercice résolu

Une unité de fabrication d'huiles silicones de viscosité variable est représentée à la figure 6.

MP_1 constitue la matière première principale.

MP_2 est un inhibiteur de polymérisation dont la consommation est fonction de la viscosité désirée : une consommation élevée aboutit à des huiles de faible viscosité.

Après traitement, la part non utilisée du mélange est recyclée (débit Q_3).

Le produit à recycler contient essentiellement de l'inhibiteur MP_2 avec un pourcentage résiduel en MP_1 .

Le fonctionnement satisfaisant de la polymérisation nécessite de réguler le

niveau du mélange réactionnel dans le réacteur.

Les dispositifs pour l'agitation et le contrôle de la température ne sont pas représentés.

1. Justifier et représenter la stratégie de régulation permettant d'assurer le contrôle du niveau.

2. Justifier et représenter celle permettant d'assurer une proportion constante ajustable entre les produits MP_1 et MP_2 à l'introduction dans le réacteur.

3. Le produit à recycler ayant une teneur variable en inhibiteur MP_2 , comment peut-on améliorer la qualité du mélange ?

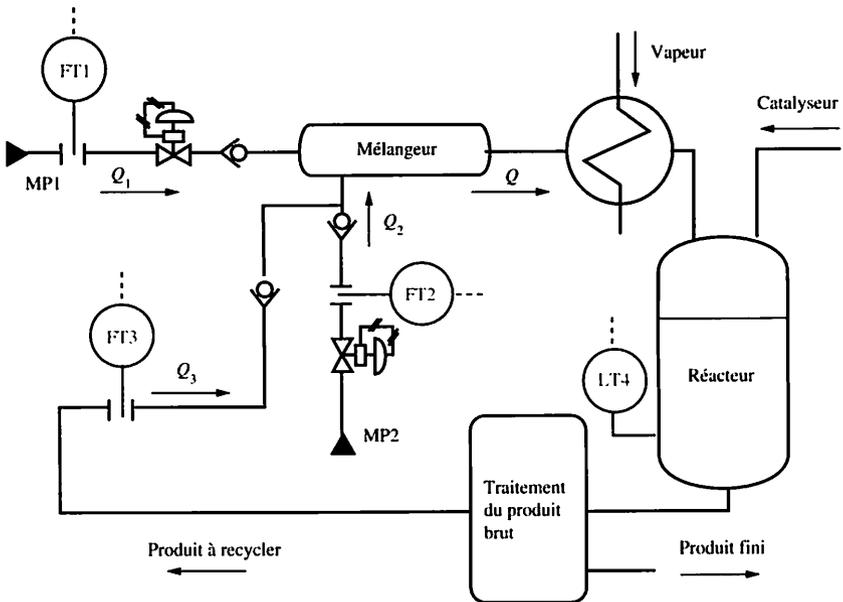


Fig. 6

Solution :

1. Régulation du niveau

On réalise une boucle en cascade sur grandeur niveau/débit, de type cascade sur grandeur réglante : le régulateur maître LC4 pilote la consigne extérieure du régulateur FC1 (fig. 7).

2. Régulation de proportion

Le débit Q_1 étant la grandeur réglante d'une autre boucle, le débit Q_2 doit donc être la grandeur menée d'une régulation de rapport. La nécessité de pouvoir ajuster la viscosité justifie l'opérateur FY1. La comptabilisation du débit Q_3 de recyclage impose de le soustraire à la consigne externe du régulateur FC2, au moyen de l'opérateur FY2 (fig. 7).

3. Amélioration

Un analyseur (appareil onéreux !) de qualité, agissant sur le poids de l'entrée du soustracteur FY2, permet d'améliorer la valeur du rapport entre les débits.

Le schéma simplifié de la figure 8 montre que l'introduction en inhibiteur MP_2 recyclé est prioritaire par rapport à l'injection en produit MP_2 « neuf ». Dans la pratique, un bac de stockage en MP_3 est installé. Un automate complexe réalise le débit Q_3 , de façon à maintenir un minimum d'introduction de produit « neuf », pour assurer une qualité constante du produit fini.

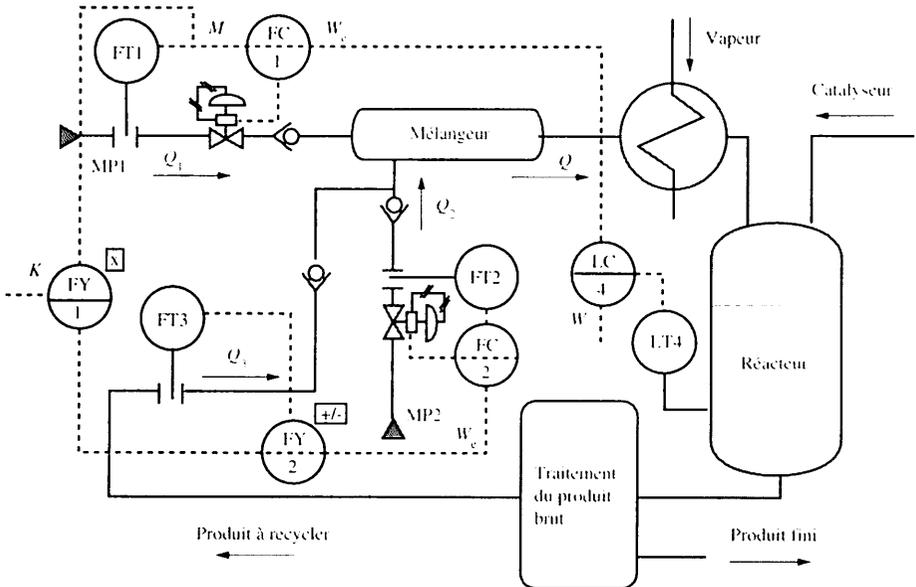


Fig. 7

L'hypothèse de la monoboucle de régulation (Régulation 1, chap. 5) consiste à commander une seule grandeur incidente par grandeur à maîtriser. Cette solution est simple à mettre en œuvre : la sortie réglante d'un régulateur pilote un actionneur agissant sur la grandeur réglante, celle-ci étant choisie de façon à permettre d'atteindre chaque point de fonctionnement choisi.

Malheureusement, cet objectif peut ne pas être atteint dans les cas suivants :

- sous-dimensionnement de l'actionneur (rangeabilité inadaptée de l'actionneur, voir Régulation 1, chap. 3) ;
- modification des caractéristiques statiques, selon les phases de fonctionnement du procédé industriel, etc.

Un exemple élémentaire est celui d'un réacteur chimique prévu pour une réaction chimique exothermique mais qui nécessite une action de chauffe pour être amorcée. Après l'amorçage, la réaction exothermique peut entraîner un dégagement de chaleur excessif. Malgré la suppression de la chauffe externe, le respect des contraintes de sécurité en température impose d'enclencher un refroidissement important. Si ce refroidissement permanent est supérieur à l'exothermicité de la réaction, on retrouve un système dont la température peut être réglée par une action de chauffage.

La régulation à deux grandeurs réglantes est alors une solution élégante, permettant d'agir de façon progressive sur une action de chauffe et sur une action de refroidissement.

1 Régulation chaud-froid à partage d'échelle

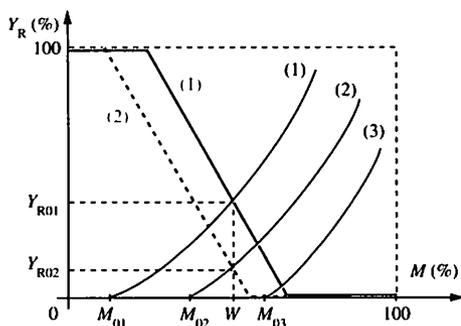


Fig. 1

Le contrôle de la température du réacteur évoqué ci-dessus peut être étudié à partir du réseau de caractéristiques statiques de la figure 1 (vanne TCV2 de type NF). Dans la phase de chauffage préalable, la caractéristique du système est la courbe 1. Le point de consigne W est obtenu par l'intersection de la caractéristique du système et celle du régulateur PI. Lors de la phase exothermique (caractéristique 2 du système), il faut une action de chauffe Y_{R02} plus faible pour maintenir la température à la valeur de consigne. Si l'exothermicité augmente, on voit que la caractéristique 3 du système ne permet plus le contrôle de la température.

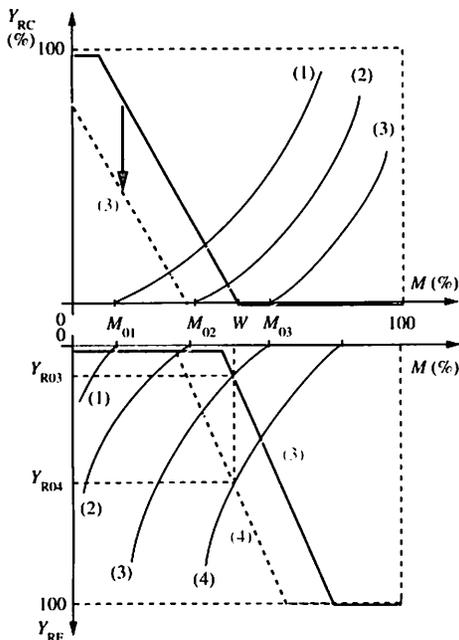
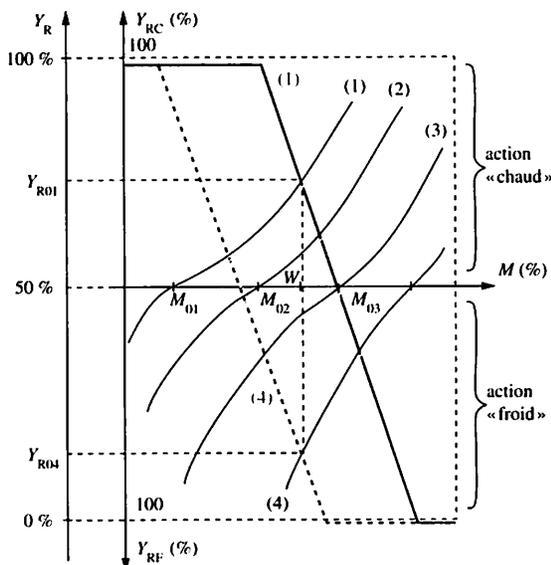


Fig. 2



Y_{RC} et Y_{RF} sont pilotés par la sortie Y_R d'un seul régulateur.

Fig. 3

On peut alors imaginer un deuxième régulateur (figure 2), dont l'action de refroidissement peut être étudié par le réseau $Y_{RFroid} = f(M)$ volontairement représenté à l'envers (vanne TCV1 de type NF).

Compte tenu de l'allure des caractéristiques du système, le régulateur « d'action froide » doit être de sens direct. L'action de ce régulateur permet alors l'obtention de la consigne W .

La difficulté essentielle de ce montage à deux régulateurs est la quasi-impossibilité de synchroniser leur fonctionnement alterné.

L'idée est alors de n'utiliser qu'un seul régulateur (figure 3) dont le signal réglant Y_R pilote simultanément les actions « chaude » et « froide », avec un sens d'action inverse.

Le partage d'échelle de variation de Y_R (montage *split-range* en anglais) est le suivant :

| | |
|-------|---|
| 0 % | vanne de refroidissement ouverte à 100 % |
| 50 % | vanne de refroidissement ouverte à 0 % (fermée) |
| 50 % | vanne de chauffe ouverte à 0 % (fermée) |
| 100 % | vanne de chauffe ouverte à 100 % |

Ce partage d'échelle (ou d'étendue) est souvent caractérisé par le diagramme de partage de la figure 4. On constate que la vanne TCV1 doit donc être désormais de type NO, et que l'on doit décaler les zones de fonctionnement des vannes, ce qui est obtenu habituellement par un étalonnage approprié des positionneurs de vannes.

Problème du point de jonction

Le point $Y_R = 50\%$ nécessite une attention particulière, en fonction des objectifs recherchés. Les deux possibilités sont évoquées figure 5. Le montage avec recouvrement permet d'améliorer la rapidité des régimes transitoires, car on commence à chauffer alors même que le refroidissement n'est pas terminé. Cette amélioration des performances se traduit par un rendement énergétique plus faible.

Le montage avec bande morte privilégie au contraire les économies d'énergie au détriment de la précision.

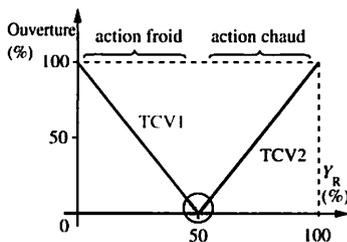


Fig. 4 : Split-range classique

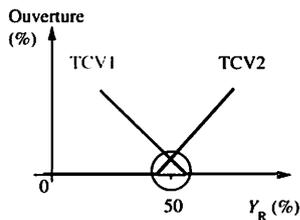


Fig. 5a : Split-range avec recouvrement

Non-linéarité

Le réseau de caractéristiques de la figure 3 montre que les deux procédés jumelés offrent des caractéristiques non linéaires. Les non-linéarités les plus cruciales sont celles induites par un dimensionnement différent des deux actionneurs qui introduit une rupture de pente pour $Y_R = 50\%$. Les variations brutales du gain statique K qui en découlent entraînent alors des difficultés pour le maintien de la stabilité. Les régulateurs modernes offrent souvent la possibilité d'avoir deux réglages distincts, selon la valeur du signal de commande : $0\% < Y_R < 50\%$ ou $50\% < Y_R < 100\%$. Ils réalisent également souvent le partage de façon interne, en disposant de deux sorties normalisées (4-20 mA par exemple).

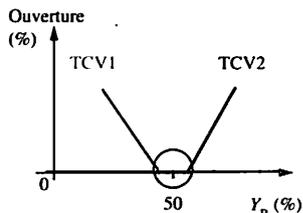


Fig. 5b : Split-range avec bande morte

2 Généralisation : régulation à deux grandeurs réglantes antagonistes

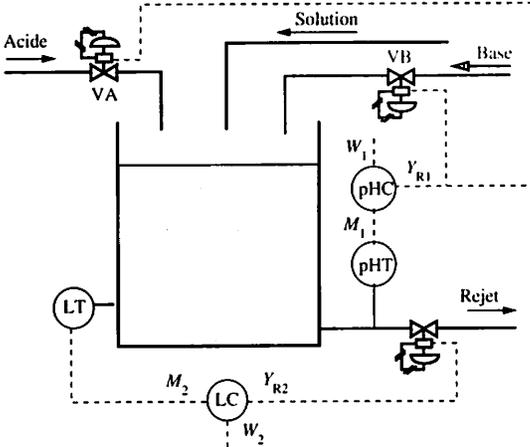
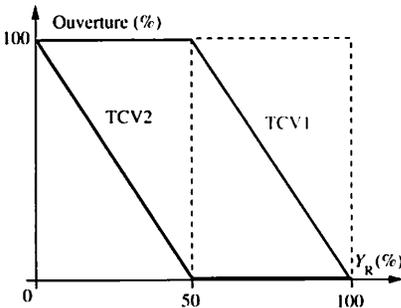


Fig. 6

De nombreuses régulations sont réalisées en utilisant cette technique :

- régulation de pH par débit d'acide ou de base (figure 6) ;
- régulation de pression dans un réacteur en agissant sur une vanne d'alimentation en diazote N_2 et sur une vanne de dégazage. Cette réalisation est évoquée page 7. La vanne PCV1 est de type NO pour dégager le réacteur en cas d'incident. Le régulateur de pression est à action inverse.

3 Régulation à deux grandeurs réglantes complémentaires



Le type NO des vannes est choisi pour des contraintes de sécurité.

Le régulateur est à sens d'action inverse.

Fig. 7

Le principe du partage d'échelle peut être utilisé également pour commander une même grandeur réglée par deux grandeurs réglantes ayant le même sens d'action, mais utilisées dans des plages différentes.

Un exemple est la régulation de pression des vapeurs en tête de colonne à distiller (voir fig. 4, chap. 10). Le condenseur réalisant un changement d'état, la pression partielle en vapeur est liée à la température du condensat : en augmentant le débit de refroidissement (vanne TCV1,

type NO), on peut diminuer la pression des vapeurs de tête. Par contre ces dernières peuvent comporter un partie incondensable (diazote N_2). Le refroidissement étant maximal, on peut commencer à ouvrir une vanne d'éjection des gaz incondensables (TCV2, type NO). Le diagramme de partage est fourni figure 7.

Exercice résolu

Avant transformation, un fluide de débit Q_a variable doit être maintenu à la température constante $\theta = 20^\circ\text{C}$ (signal M_1 , échelle 0-50 °C). La température initiale θ_0 (signal M_2 , échelle 0-50 °C) de celui-ci variant entre 10°C et 35°C , deux grandeurs réglantes sont prévues (fig. 8) :

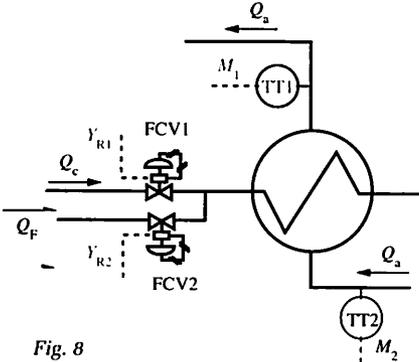


Fig. 8

- un débit Q_F d'eau froide à 6°C ,
 - un débit Q_C d'eau chaude à 45°C .
- Pour des raisons de sécurité, les vannes de réglages sont de type :
- normalement fermée (NF) pour FCV1,
 - normalement ouverte (NO) pour FCV2.

Un choix judicieux de ces vannes permet de considérer les caractéristiques statiques des deux systèmes (chaud et froid) comme approximativement linéaires.

Compte tenu de la complexité du montage, seuls deux essais statiques ont été réalisés, avec un étalonnage normal de chaque vanne (0 - 100 %).

Essai 1 : pour $M_2 = 30\%$ (15°C), on obtient $M_1 = 40\%$ (20°C) avec une commande $Y_{R1} = 6,7\%$;

essai 2 : pour $M_2 = 50\%$ (25°C), on obtient $M_1 = 40\%$ (20°C) avec une commande $Y_{R2} = 9,1\%$.

1. Proposer le schéma TI d'une stratégie de régulation en échelle partagée.
2. Choisir le point de jonction de façon à obtenir le même gain statique pour les deux actions.

3. Proposer une stratégie permettant de compenser de fortes variations de Q_a et de θ_0 .

4. Les vannes disponibles ne sont pas munies de positionneurs. Le technicien décide donc d'utiliser un régulateur à sortie de type « chaud-froid », conforme à la structure de la figure 9. L'étage de sortie de cette sorte de régulateur permet un partage « centré » réalisé par le bloc 1, conformément au diagramme de la figure 10.

Déterminer le diagramme de partage.

5. Le point de fonction étant situé à 50 %, le technicien équilibre les gains statiques par un coefficient d'adaptation introduit au niveau du bloc 2. Déterminer la valeur de ce gain.

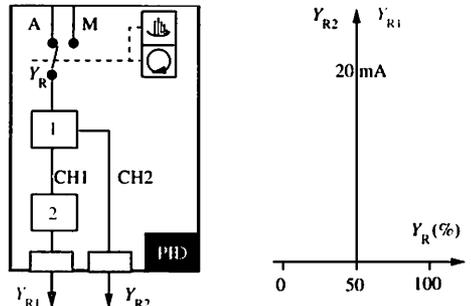


Fig. 9 Y_{R1} sortie « chaude »
 Y_{R2} sortie « froide »

Fig. 10

Solution :

1. Schéma TI

Ce schéma est fourni figure 11.

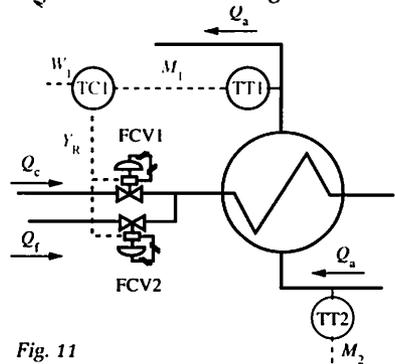


Fig. 11

2. Préréglages des positionneurs de vannes

Les essais montrent clairement que les deux gains statiques sont différents puisqu'une même variation de température $\Delta M = 10\%$ nécessite deux variations ΔY_R différentes.

Un point de jonction situé à 50% donnerait :

• pour l'action « chaude » :

$$K_1 = \frac{\Delta M}{\Delta Y_R} = \frac{10\%}{6,7\%} \cdot 2 \approx \boxed{3}$$

• pour l'action « froide » :

$$K_2 = \frac{\Delta M}{\Delta Y_R} = \frac{10\%}{9,1\%} \cdot 2 \approx \boxed{2,2}$$

La multiplication par 2 provient du rapport des variations de Y_R (100% en action « chaude » ou « froide » seule, 50% en montage à échelle partagée centrée). Le fait que K_1 soit supérieur à K_2 impose que l'égalité $K_1 = K_2$ soit obtenue avec x inférieur à 50%.

Pour un point de jonction situé à $x\%$, K_1 et K_2 s'expriment par :

$$K_1 = \frac{10\%}{6,7\%} \cdot \frac{100}{100-x}$$

$$K_2 = \frac{10\%}{9,1\%} \cdot \frac{100}{x}$$

L'égalité $K_1 = K_2$ impose :

$$6,7(100-x) = 9,1 \cdot x \text{ soit :}$$

$$\boxed{x = 42,4\%}$$

La valeur commune du gain statique est donc : $\boxed{K = 2,6}$

Le diagramme de partage concernant les pourcentages d'ouverture est celui de la figure 12.

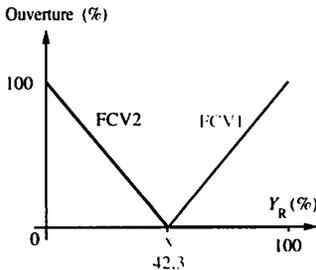


Fig. 12

3. Améliorations des performances

Une correction en chaîne ouverte peut être envisagée à condition d'élaborer un signal de tendance *algébrique*, fonction de l'écart $W_1 - M_2$. La stratégie de la figure 13 réalise cette contrainte, avec un signal de correction :

$$\boxed{Y_C = K' \cdot M_3 \cdot (W_1 - M_2)}$$

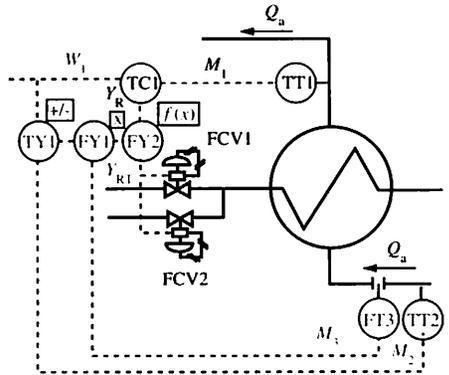


Fig. 13

4. Diagramme de partage du régulateur « chaud-froid ». Il est fourni figure 14. On constate que ce diagramme tient compte du sens d'action des vannes et qu'il ne faut pas le confondre avec celui concernant les pourcentages d'ouverture.

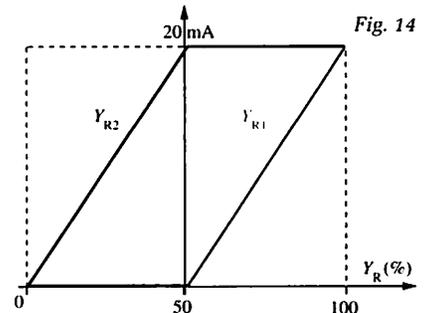


Fig. 14

5. Équilibrage des gains statiques.

Compte tenu du rapport $K_c/K_f \approx 1,36$, un coefficient valant 0,73 sur la sortie « chaude » permet cet équilibrage.

Habituellement, en régulation, le signal réglant issu du régulateur est un signal continu, au sens mathématique du terme, c'est-à-dire qu'il peut prendre toute valeur intermédiaire entre deux valeurs limites, généralement 0 et 100 %.

L'appellation « régulation discontinue » est utilisée chaque fois que le dispositif de commande ne nécessite que des valeurs discrètes en nombre fini, appelées « plages ».

Une régulation à deux plages peut, par exemple, n'utiliser que les deux valeurs 100 et 0 %. Dans ce cas, on parle de régulation « tout ou rien » ou TOR en abrégé.

Une telle régulation présente de nombreux avantages :

- elle nécessite des actionneurs fiables, mais de *coût faible* et de grande durée de vie, tels que : relais, électrovannes, pompes, etc. ;
- elle n'impose pas de réglage et la maintenance est aisée.

Les inconvénients sont souvent mineurs :

- oscillations limitées mais permanentes de la mesure,
- nécessité de disposer d'une grandeur de réglage facilement interruptible.

Les régulations discontinues peuvent être réalisées à partir des régulateurs PID classiques mais, industriellement, on préfère de plus en plus utiliser des automates programmables industriels (API) pour diminuer encore le coût unitaire de chaque boucle.

1 Régulation tout ou rien

Elle constitue la régulation discontinue la plus élémentaire et son étude détaillée est fondamentale pour comprendre les nombreuses variantes qui en découlent.

Les applications les plus nombreuses se rencontrent dans le domaine du chauffage électrique, car un courant électrique est facilement interruptible par un relais, particulièrement si la charge est purement résistive.

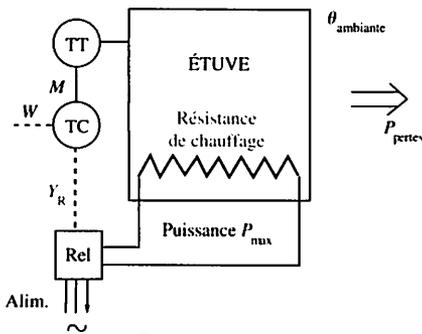


Fig. 1

Principe

Le schéma TI d'une régulation TOR de température est fournie figure 1. La consigne de température W étant supérieure à la température extérieure θ_{ambiante} , il faut chauffer pour compenser les déperditions thermiques de l'étuve. On choisit alors de chauffer en apportant une puissance P_{max} bien supérieure à la puissance dite « de perte » P_{pertes} , qui dépend de la température désirée W , de la température ambiante et de l'installation.

La puissance P_{pertes} est supposée constante pour un régime de fonctionnement donné. La puissance de chauffe P_{max} est apportée par une résistance électrique commandée par un relais, lui-même piloté par la sortie du régulateur.

Celle-ci utilise les deux plages 0 et 100 %, facilement codées 0 et 1 sur un API :

- $M < W \Rightarrow Y_R = 100\%$ (1) \Rightarrow relais fermé
 \Rightarrow chauffe maximale à $P_{\text{max}} - P_{\text{pertes}}$;
- $M > W \Rightarrow Y_R = 0\%$ (0) \Rightarrow relais ouvert
 \Rightarrow chauffe arrêtée et refroidissement à P_{pertes} .

Caractéristique statique du régulateur

Elle est fournie figure 2, courbe 1. L'allure de la caractéristique obtenue est utilisée dans un schéma fonctionnel pour représenter un régulateur discontinu (voir figure 3).

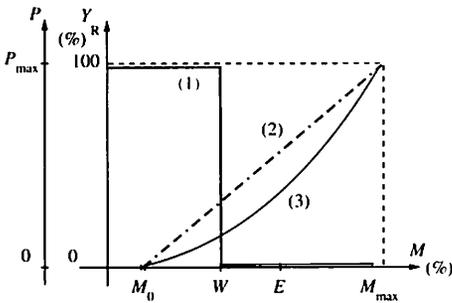


Fig. 2

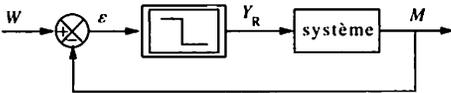
Évolution de la mesure M

Compte tenu des successions de chauffe et de refroidissement, la mesure oscille autour de la valeur de consigne W (fig. 4).

La régulation TOR est intéressante si l'amplitude crête à crête O_{cc} des oscillations reste limitée et si la période T_0 de celles-ci n'est pas trop courte, pour préserver la durée de vie de l'actionneur.

2 Performances de la régulation TOR

L'étude de celles-ci, en fonction du choix de la puissance P_{max} et d'hypothèses simplificatrices, fournit au technicien de régulation des critères lui permettant de choisir entre une régulation continue onéreuse et une régulation TOR, plus sommaire mais beaucoup plus économique.



La bordure double du correcteur indique une discontinuité ou une non-linéarité.

Fig. 3

Le schéma fonctionnel du système bouclé est celui de la figure 3.

On suppose grossièrement que le système physique est linéaire sur toute la plage de variation de Y_R (fig. 2, courbe 2) alors que la caractéristique typique hors perturbation est la courbe 3, fig. 2.

On suppose également que la fonction de transfert est modélisable sous la forme de Broïda : gain statique K , constante de temps τ , temps mort T .

On appelle « M_{\max} » la valeur de la mesure correspondant à $Y_R = 100\%$, habituellement hors de l'échelle du transmetteur et dangereuse pour le procédé physique.

On appelle « M_0 » la valeur de la mesure pour $Y_R = 0\%$.

Le gain statique « moyen » vaut donc $K = \frac{M_{\max} - M_0}{E}$ si E représente l'étendue de mesure du transmetteur (Régulation 2, chap. 17).

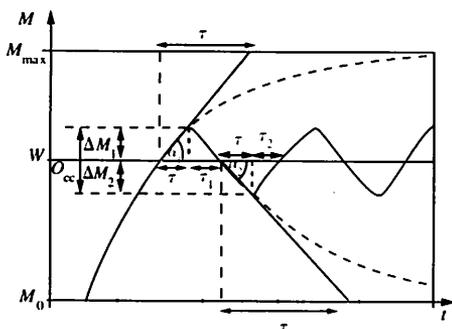


Fig. 4

Étude des oscillations de la mesure (figure 4)

Compte tenu du modèle de Broïda, on considère que le franchissement du point de commutation W se traduit par une évolution exponentielle pendant une durée T , provoquant un dépassement ΔM_1 ou ΔM_2 de part et d'autre de W .

On rappelle que pour un système du 1^{er} ordre, la tangente en un point quelconque ($t = t_1$) coupe l'asymptote horizontale en un point d'abscisse t_2 telle que $t_2 - t_1 = \tau$. Dans ces conditions et en assimilant les portions de courbes exponentielles à leur tangente, l'ondulation O_{cc} vaut :

$$O_{cc} = \Delta M_1 + \Delta M_2 = (M_{\max} - M_0) \cdot \frac{T}{\tau} \quad (1)$$

La période des oscillations est $T_0 = T + T_1 + T + T_2$.

$$\text{On obtient de même : } T_0 = T \cdot 2 + \left(\frac{M_{\max} - W}{W - M_0} + \frac{W - M_0}{M_{\max} - W} \right) \cdot T \quad (2)$$

En posant $x = \frac{M_{\max} - W}{W - M_0}$ on obtient $T_0 = 2 \left(T + x + \frac{1}{x} \right)$. Cette fonction passe par un minimum $T_{0\text{mini}} = 4 T$ lorsque $x = 1$.

Ce résultat est intéressant car il permet d'observer que les oscillations seront trop rapides si le système ne possède pas un temps mort T suffisamment grand.

De plus, la valeur $x = 1$ aboutit à des oscillations *centrées* ($\Delta M_1 = \Delta M_2$). On cherche donc à se placer dans ces conditions de fonctionnement, ce qui correspond à $M_{\max} - W = W - M_0$. On aboutit à une consigne W centrée entre M_{\max} et M_0 .

Sur la caractéristique statique de la figure 5, on constate que la puissance P_{\max} doit valoir le double de la puissance nécessaire pour maintenir W , à savoir la puissance P_{pertes} .

L'inégalité : $P_{\max} > 2 P_{\text{pertes}}$ entraîne $\Delta M_1 > \Delta M_2$ et l'amplitude des oscillations augmente.

Si l'on a : $P_{\max} < 2 P_{\text{pertes}}$, alors on obtient $\Delta M_1 < \Delta M_2$ et l'amplitude des oscillations diminue.

En revanche, si $P_{\max} < P_{\text{pertes}}$, la consigne W ne peut évidemment être atteinte.

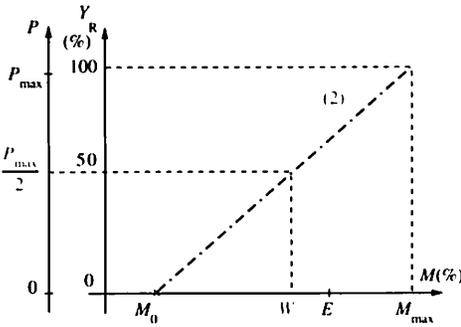


Fig. 5

3 Conclusions

L'étude précédente permet d'envisager une régulation tout ou rien si O_{cc} est suffisamment faible et si T_0 est supérieure à 20 secondes. On retient alors les deux conditions :

$$\boxed{\frac{T}{\tau} < 0,05} \quad \text{et} \quad \boxed{T > 5 \text{ secondes}}$$

La deuxième condition peut être contournée en utilisant une hystérésis de commutation, c'est-à-dire en enclenchant et en déclenchant à des valeurs différentes, séparées de l'hystérésis H .

On peut ainsi régler l'amplitude et la période des oscillations TOR sur un système qui possède un temps mort naturel insuffisant.

On retiendra que la connaissance approximative de la puissance de pertes du système, pour la température de fonctionnement désirée, permet de dimensionner la puissance de chauffe.

Des oscillations symétriques nécessitent :

$$\boxed{P_{\max} = 2 P_{\text{pertes}}}$$

Ce dimensionnement ne permettant pas toujours de réagir suffisamment vite à des perturbations, des actions de chauffe à plage décalée ou à plages multiples sont évoquées au chapitre 14.

Exercice résolu

Un four de réchauffage doit porter à la température de 200 °C un produit dont le débit Q_c varie entre 20 et 80 % de son échelle de mesure, le débit nominal correspondant à 50 %.

Compte tenu du fait que le procédé tolère une variation de ± 20 °C de la température, on adopte une régulation de type TOR, dont le schéma TI est fourni figure 6.

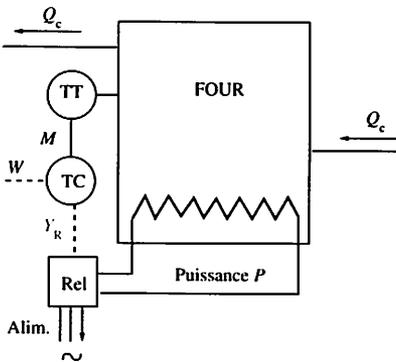


Fig. 6

On admet que le système est caractérisé par un modèle de Broïda et des essais d'identification, pour trois débits de charge différents, ont permis d'établir le tableau suivant :

| Q_c (%) | M_0 (%) | M_{max} (%) | τ (s) | T (s) |
|--------------|--------------|------------------|---------------|------------|
| 20 | 20 | 500 | 200 | 20 |
| 50 | 20 | 380 | 200 | 10 |
| 80 | 20 | 300 | 200 | 4 |

On admet que le système est approximativement linéaire.

1. Analyser les résultats des essais.
2. Tracer le réseau de caractéristiques statiques.
3. Pour chaque débit, calculer les quantités : ΔM_1 , ΔM_2 , T_0 .

4. Exploiter les résultats.
5. Vérifier ceux-ci au simulateur.

Solution :

1. Analyse des essais

On constate tout naturellement que M_{max} et le temps mort T diminuent lorsque Q_c croît.

2. Caractéristiques statiques

La lecture du tableau permet d'établir le graphe de la figure 7.

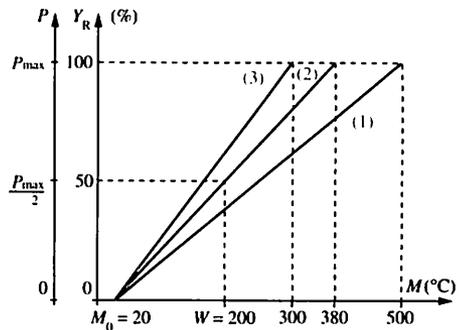


Fig. 7

Pour une consigne fixe $W = 200$ °C, on constate graphiquement que seule la caractéristique $Q_c = 50$ % aboutit à une ordonnée $Y_R = 50$ % et fournit donc des oscillations symétriques.

3. Calculs des paramètres

En appliquant les formules (1) et (2), on aboutit aux résultats suivants :

| Q_c (%) | ΔM_1 (°C) | ΔM_2 (°C) | O_{cc} (°C) | T_0 (s) |
|--------------|----------------------|----------------------|------------------|--------------|
| 20 | 30 | 18 | 48 | 85,3 |
| 50 | 9 | 9 | 18 | 40 |
| 80 | 2 | 3,6 | 5,6 | 17,4 |

4. Exploitation des résultats

On vérifie que le débit $Q_c = 50$ % entraîne des oscillations symétriques. On constate aussi que le débit $Q_c = 20$ % aboutit à des oscillations

dont l'amplitude est hors tolérance. Ce résultat est dû à des valeurs trop fortes de M_{\max} et T . Il convient donc d'adopter une régulation adaptative pour la puissance de chauffe, par exemple en prévoyant, en fonction de la valeur de Q_c , une commutation entre deux résistances de chauffe.

$$Q_c \geq 40\% \Rightarrow P_{\max} = P_0$$

$$Q_c < 40\% \Rightarrow P_{\max} < P_0$$

5. Vérification par simulateur

Enregistrées avec des échelles identiques, les courbes des figures 8 et 9 confirment les résultats précédents.

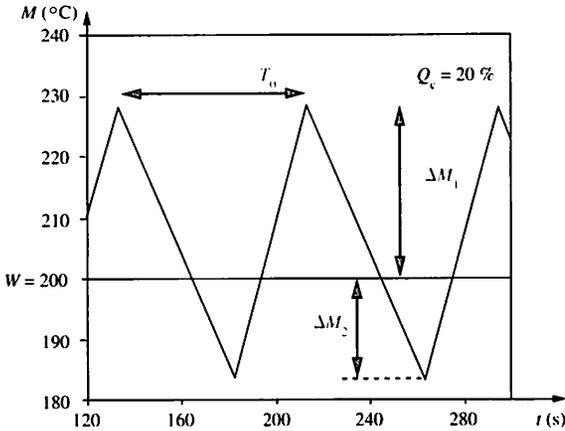


Fig. 8

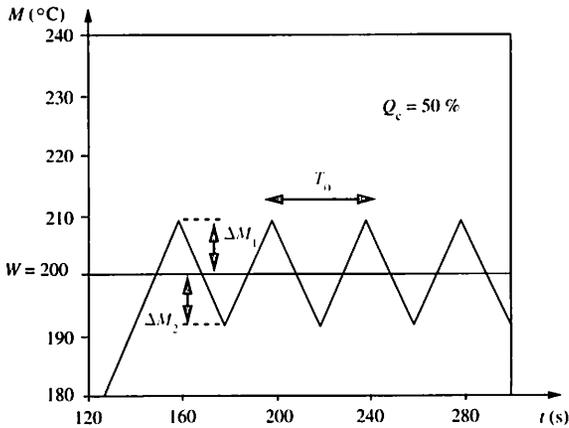


Fig. 9

L'optimisation d'une régulation TOR vis-à-vis des oscillations de la mesure nécessite d'adopter le réglage : $P_{\max} = 2 P_{\text{pertes}}$. Malheureusement, les pertes thermiques d'un système dépendent du point de consigne choisi et d'éventuelles perturbations, plus ou moins importantes. Dans un très grand nombre de cas, cette contrainte ne peut pas être réalisée.

Des variantes du montage élémentaire TOR permettent de résoudre trois cas principaux :

- $P_{\max} < 2 P_{\text{pertes}}$ car le procédé ne dispose que d'une puissance maximale limitée,
- $P_{\max} > 2 P_{\text{pertes}}$ car le système est très perturbé et la puissance de pertes P_{pertes} peut devenir très supérieure à la puissance $P_{0 \text{ pertes}}$ nominale ayant servi au dimensionnement ;
- la puissance de pertes peut devenir négative, si le procédé comporte une phase de production exothermique (voir chap. 12).

1 Régulation tout ou peu

C'est une régulation à deux plages utilisant les deux valeurs 100 % et x % non nulle de Y_R . Pour une application de chauffage, les deux puissances sont alors P_{\max} et P_{\min} .

Elle est employée lorsque le procédé est peu perturbé, fonctionne à consigne fixe et ne supporte pas physiquement une puissance maximale double de la puissance de pertes. On se retrouve alors dans le cas défini par : $P_{\max} < 2 P_{\text{pertes}}$.

La caractéristique statique du régulateur est représentée figure 2. On constate que l'usage d'une plage à la puissance permanente P_{\min} revient à décaler M_0 en M'_0 . Le meilleur réglage consiste alors à centrer W entre M_{\max} et M'_0 . Il est obtenu en adoptant pour puissance minimale permanente la valeur :

$$P_{\min} = 2 P_{\text{pertes}} - P_{\max}$$

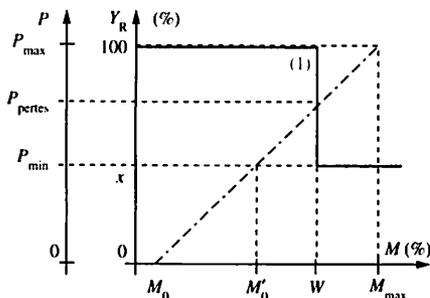


Fig. 1

On constate qu'un tel montage revient à diminuer les pertes initiales P_{pertes} jusqu'à ce que la nouvelle puissance commutée $P_{\max} - P_{\min}$, soit le double des nouvelles pertes P'_{pertes} .

On retrouve alors les résultats de la régulation TOR.

2 Régulation tout-peu-rien

C'est une régulation à trois plages utilisant les trois valeurs 100 %, x % non nulle et 0 % de Y_R , permettant de commuter entre les trois valeurs P_{\max} , P_{\min} et 0. Elle est employée lorsque le procédé est fortement perturbé et nécessite une puissance maximale bien supérieure au double de la puissance de pertes nominale. On se retrouve alors dans le cas correspondant à : $P_{\max} > 2 P_{\text{pertes}}$.

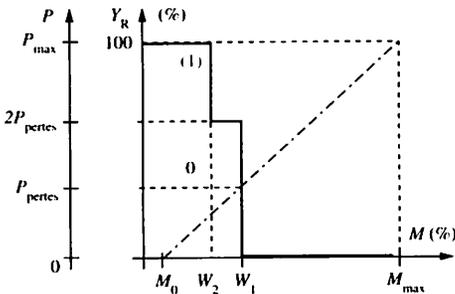


Fig. 2

La caractéristique statique du régulateur est représentée figure 2. Le meilleur réglage consiste à adopter $P_{\min} = 2 P_{\text{pertes}}$, la puissance P_{\max} étant enclenchée lorsque la mesure s'écarte trop de la consigne principale W_1 .

Une application traditionnelle est celle de la régulation d'un chauffage électrique triphasé utilisant un ensemble de relais permettant de commuter trois résistances associées en étoile (puissance P_0) ou en triangle (puissance $3 P_0$).

Si l'on utilise un régulateur classique PID réglé à $X_p = 0$ %, la consigne secondaire W_2 est généralement un seuil d'alarme basse commandant un relais.

Cas de la régulation étagée

Ce terme est employé lorsque le nombre de plages dépasse trois. Pour la climatisation ou le chauffage d'installations importantes, il est plus économique d'utiliser plusieurs petites centrales « chaudes » ou « froides » fonctionnant en tout ou rien à 100 % plutôt qu'une centrale plus importante fonctionnant en régulation continue progressive. Un automate programmable industriel permet de gérer les seuils d'enclenchement ainsi qu'une rotation du fonctionnement pour les centrales, afin d'assurer une durée d'emploi équivalente.

A la limite, on retrouve un régulateur à action proportionnelle si le nombre de plages augmente.

3 Régulation plus ou moins à trois plages

C'est une régulation à trois plages utilisant deux signaux réglants Y_{R1} et Y_{R2} ayant des actions antagonistes vis-à-vis du système. La représentation classique de la caractéristique statique du régulateur est fournie figure 3. La distance entre W_1 et W_2 définit une zone neutre (ou morte) ajustable.

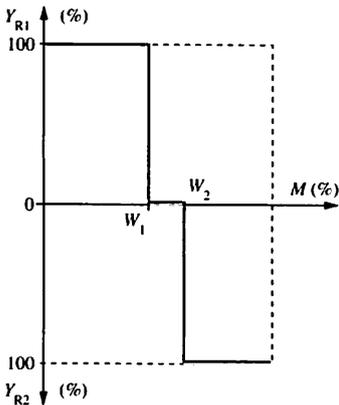


Fig. 3

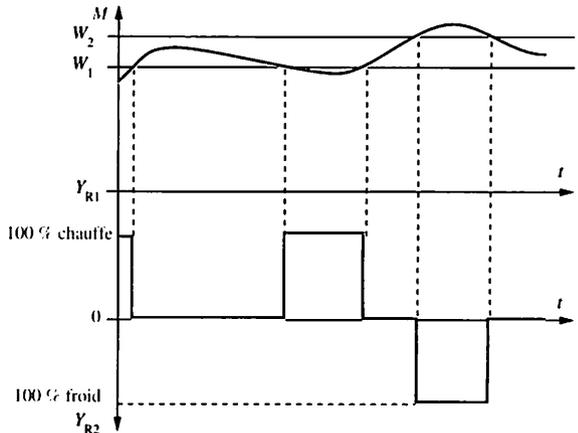


Fig. 4

Régulation chaud-froid

Application traditionnelle de la régulation de type plus ou moins à trois plages, elle constitue une solution efficace lorsque l'emploi d'un montage *split-range* (voir chap. 12) est trop complexe ou trop onéreux. Le signal Y_{R1} pilote le chauffage, le signal Y_{R2} pilotant le refroidissement. Le réglage de la zone neutre permet d'optimiser le compromis entre l'amplitude des oscillations et la durée de fonctionnement des groupes « chaud » et « froid » (figure 4).

Régulation avec organe réglant motorisé

Les vannes progressives habituellement utilisées en régulation sont onéreuses et leur durée de vie est limitée, du fait de leur fonctionnement permanent. Les électrovannes TOR sont fiables et peu chères, mais ne permettent pas la qualité de précision souvent réclamée.

Une vanne motorisée est une vanne actionnée par un moteur électrique monophasé, peu cher et robuste. Celui-ci comporte deux enroulements distincts, permettant les deux sens de rotation.

L'association d'une telle vanne et d'un régulateur plus ou moins à trois plages s'appelle un *montage flottant ou glissant* (figure 5). Il permet une action progressive sur une grandeur réglante tout en assurant une grande durée de vie de la vanne.

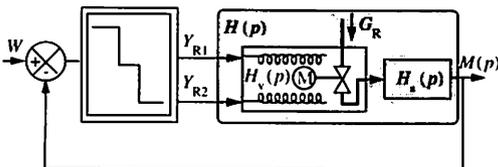


Fig. 5

L'utilisation de ce type de vanne introduit une intégration dans la chaîne de régulation avec :

$$H_v(p) = \frac{1}{\tau_C \cdot p} \text{ si } \tau_C \text{ représente le}$$

temps nécessaire à la vanne pour passer de 0 à 100 % d'ouverture (ou temps de course).

On peut établir les résultats suivants si le reste du système est modélisable sous la forme : $H_s(p) = \frac{K e^{-Tp}}{(1 + \tau p)}$.

La période des oscillations est : $T_o = 2 \pi \sqrt{T \tau}$ si $T / \tau \ll 1$. (1)

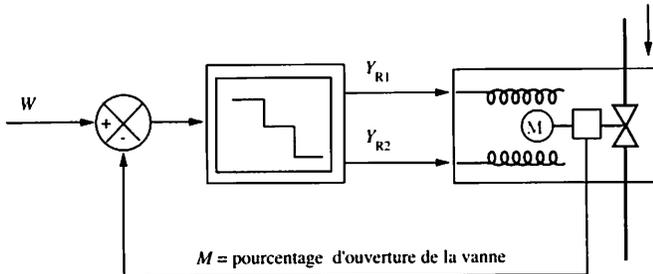
L'amplitude des oscillations dépend du réglage de la zone neutre. Pour une zone neutre $W_2 - W_1$ nulle, on montre que :

$$O_{CC} = \frac{8 \cdot \tau}{\pi \cdot T_C} \cdot (M_{\max} - M_0) \quad (2)$$

Pour une zone neutre $W_2 - W_1 \neq 0$, on améliore la régulation en diminuant l'amplitude des oscillations (voir exercice résolu).

Autres applications

Le montage plus ou moins est couramment utilisé en tant que positionneur de vanne. Un potentiomètre recopiant la position d'ouverture permet de réaliser le montage de la figure 6 qui réalise un asservissement de position de l'ouverture de la vanne. Ce montage est alors utilisé en boucle interne dans une régulation cascade.



Y_{R1} commande l'ouverture de la vanne.
 Y_{R2} commande la fermeture de la vanne.

Fig. 6

4 Conclusions

Les possibilités des automates programmables industriels permettent de réaliser de nombreuses variantes des montages de base abordés dans ce chapitre, en particulier avec des hystérésis de commutation.

On retiendra que la régulation discontinue constitue une solution robuste et fiable, dont le coût peut être réduit en implantant ses stratégies dans les automates programmables industriels de gestion du procédé.

Exercice résolu

Un échangeur de chaleur doit porter de l'eau à la température de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, avec une tolérance de $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. La boucle étant locale et d'accessibilité faible, on décide d'utiliser le montage de la figure 7. Il comporte un thermostat à consigne unique réglable W et à hystérésis H ajustable (figure 8). La vanne motorisée comporte deux sens de rotation (voir fig. 5) et a été réglée avec un temps de course $\tau_c = 60\text{ s}$.

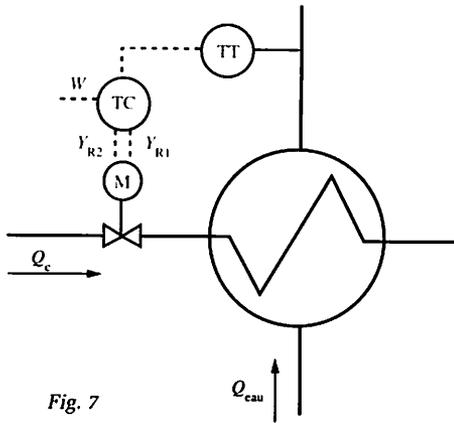
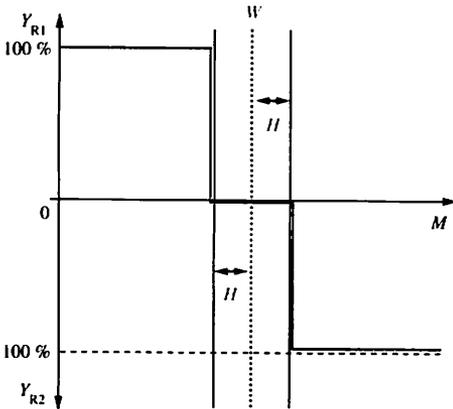


Fig. 7



Y_{R1} commande l'ouverture de la vanne.
 Y_{R2} commande la fermeture de la vanne.

Fig. 8

Des essais ont fourni les résultats suivants : $M_{\max} = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$ à pleine ouverture de la vanne lorsque la bache d'alimentation fournit de l'eau à la température $M_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Autour du point de fonctionnement, on adopte les valeurs suivantes :

$$\tau \approx 50\text{ s et } T \approx 2\text{ s.}$$

1. Pour l'hystérésis $H = 0$ déterminer la période et l'amplitude des oscillations.
2. Vérifier les résultats au simulateur.
3. Pour $H = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, simuler la réponse du système bouclé. Conclure.

Solution :

1. Premier cas : $H = 0$

L'application des formules (1) et (2) avec : $M_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $M_{\max} = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\tau = 50\text{ s}$; $T = 2\text{ s}$ et $\tau_c = 60\text{ s}$ fournit les résultats suivants :

| | |
|-----------------------|---|
| $T_0 = 62,8\text{ s}$ | $O_{cc} = 10,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ |
|-----------------------|---|

2. Vérification au simulateur

Les courbes de la figure 9 confirment ces valeurs mais prouvent qu'une hystérésis nulle entraîne un travail permanent de la vanne, ce qui n'est pas le résultat cherché.

3. Second cas : $H = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Les courbes de la figure 10 montrent que la mesure finit par se stabiliser dans l'intervalle $50\text{--}70\text{ }^{\circ}\text{C}$ avec une immobilité permanente de la vanne qui augmente sa durée de vie.

Le réglage de l'hystérésis H s'effectue le plus souvent de façon empirique. Le technicien de réglage augmente progressivement H à partir de 0, de façon à obtenir des enclenchements de rotation compatibles avec la durée de vie de la vanne.

L'utilisation d'une vanne motorisée à deux sens de rotation, liée à l'emploi d'un régulateur à trois plages et hystérésis, s'impose sur les installations à surveillance non permanente privilégiant la fiabilité aux performances.

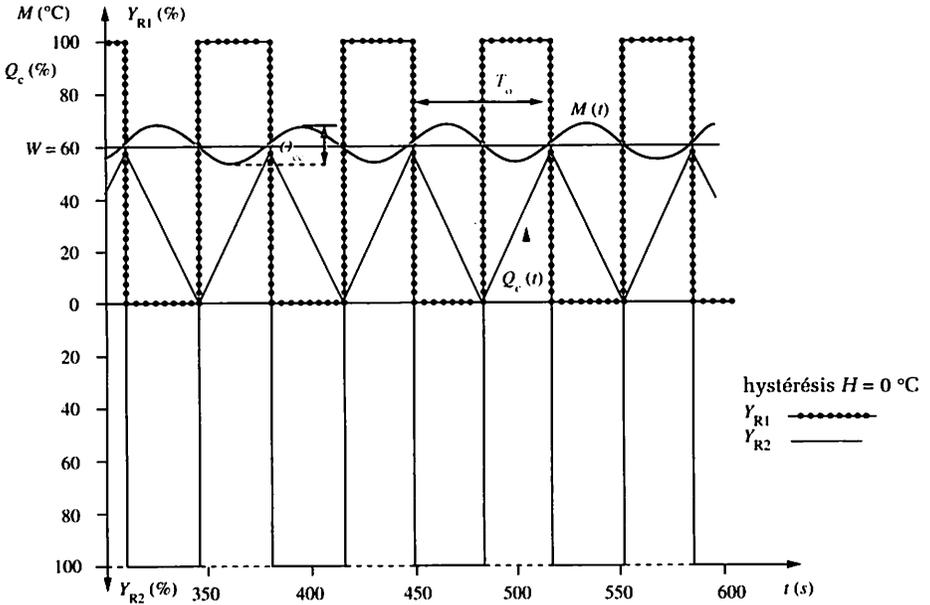


Fig. 9

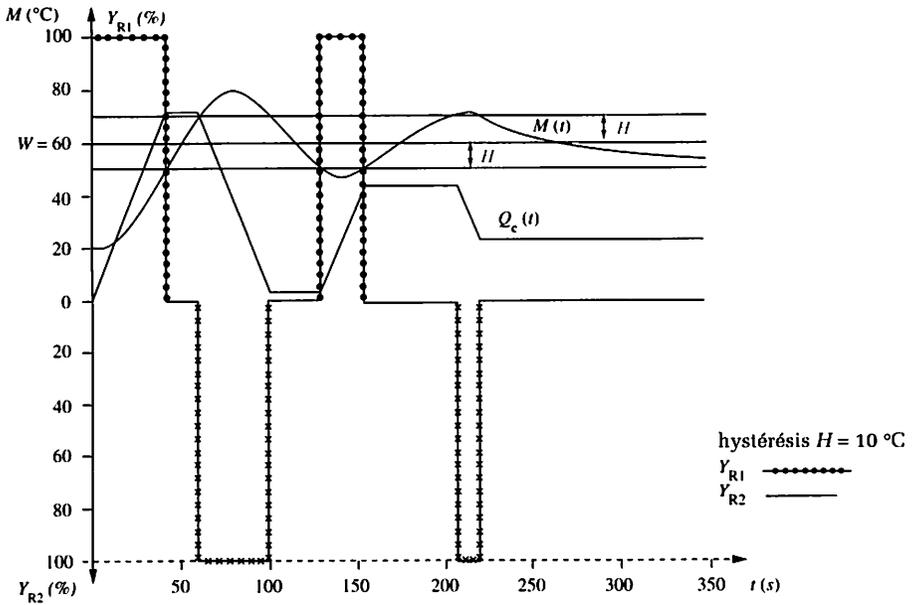


Fig. 10

La régulation discontinue présente l'intérêt d'utiliser des actionneurs robustes et de faible coût, son inconvénient étant une précision moindre. Peut-on réaliser des algorithmes de correction plus sophistiqués comme le PID, tout en conservant la simplicité d'un organe de réglage fonctionnant en « tout ou rien » ?

La réponse est positive : il suffit d'utiliser un correcteur classique, le signal de sortie Y_R étant un signal modulé en durée.

Ce principe de signal de commande, initialement utilisé en climatisation, connaît un développement important qui prend en compte les qualités des interrupteurs statiques modernes (thyristors, triacs, transistors de puissance...).

La modulation de durée nécessitant de disposer d'une base de temps ajustable, les techniques modernes numériques facilitent ce type de réalisation .

1 Principe de la commande modulée

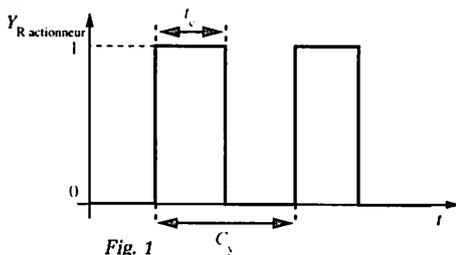


Fig. 1

Le signal Y_R issu du correcteur est un signal continu, variant de 0 à 100 %. Ce signal est transformé en un signal périodique de commande d'actionneur Y_R actionneur à deux plages, que l'on note 0 et 1 comme des variables logiques (fig. 1).

Pendant une période (ou durée de cycle) C_γ , le rapport cyclique α est ajusté en fonction de la valeur Y_R évaluée à l'instant du début de cycle.

La relation est : $Y_R (\%) = 100 \alpha$ avec $\alpha \in [0,1]$.

On rappelle que α est donné par le rapport suivant : $\alpha = t_c / C_\gamma$ si t_c représente la durée de conduction.

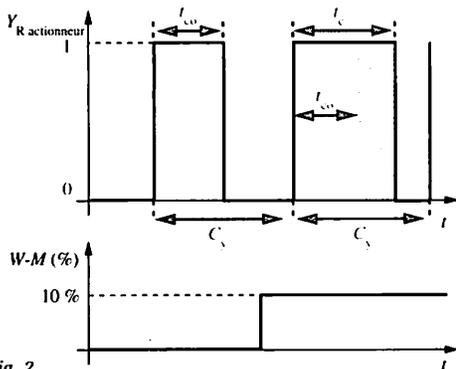
Le seul problème posé par ce type de commande est le choix de la durée de cycle C_γ , en fonction du système et de l'actionneur.

2 Mise en évidence des actions

Régulateur à action proportionnel

Le signal de commande peut s'exprimer par : $Y_R = y_R + Y_{R0}$, où Y_{R0} est le talon permettant d'obtenir une précision statique parfaite $M = W$.

Si l'écart $\varepsilon = W - M$ devient non nul, la variation y_R de Y_R entraîne une variation du temps de conduction t_c .



La figure 2 visualise l'augmentation résultant d'un échelon de ε , réalisé au cours du cycle précédent. On obtient :

$$t_c = t_{c0} + C_Y \cdot \frac{\varepsilon}{X_p}$$

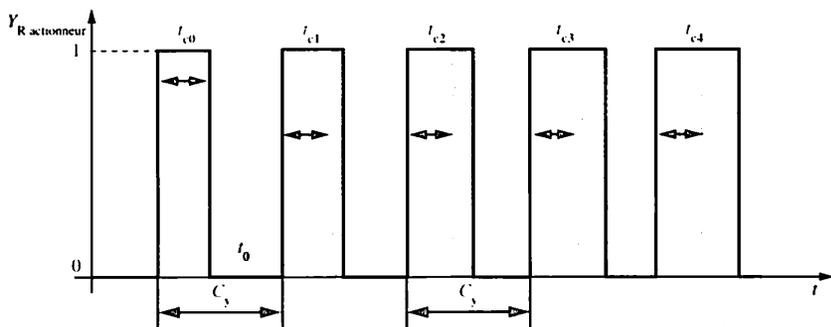
Pour une bande proportionnelle $X_p = 40\%$ et $\varepsilon = 10\%$, on trouve : $t_c = t_{c0} + 0,25 C_Y$.

Régulateur à action intégrale
Son équation temporelle est :

$$Y_R = \frac{1}{T_i} \cdot \int_{-\infty}^t \varepsilon(t) dt = \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t \varepsilon(t) dt + Y_{R0}$$

Un échelon de $\varepsilon(t)$ provoque une augmentation linéaire de t_c au cours du temps (fig. 3), selon la loi de variation suivante :

$$t_c = t_{c0} + C_Y \cdot \frac{1}{100 T_i} \cdot \varepsilon \cdot t$$



à t_0 , $W-M$ passe de 0 % à 20 %

Fig. 3

Pour $T_i = 30$ s, $C_Y = 10$ s et $\varepsilon = 20\%$, on obtient : $t_c = t_{c0} + \frac{2}{30} t$.

On constate alors qu'au bout de 30 s (3 cycles de modulation), le temps de conduction a augmenté de 2 s donc Y_R de 20 %. On retrouve un résultat classique de l'action intégrale : la variation y_R du signal de sortie Y_R « répète » la variation de ε au bout d'une durée égal à T_i .

3 Réglage de la durée de cycle

Le bon fonctionnement d'un régulateur à sortie modulée suppose que, pendant la durée C_Y , le système physique commandé soit sensible à la valeur moyenne de la grandeur réglante.

Ce résultat impose que la durée de cycle soit faible, pour que les variations de $Y_{\text{Ractionneur}}$ ne se répercutent pas sur le signal de mesure. L'ensemble des résultats de la régulation continue reste alors vrai, en particulier toutes les méthodes de réglage.

Si le système est représentable par un modèle de Broïda,

$H(p) = K \frac{e^{-Tp}}{1 + \tau p}$, le choix de C_Y obéit à une double contrainte :

- C_Y doit être faible devant la valeur de τ pour que le système soit sensible à la valeur moyenne de $Y_{\text{R actionneur}}$;
- C_Y doit être supérieure à une valeur minimale, fonction de l'actionneur et de sa durée de vie.

Choix de la valeur minimale de C_Y

Un relais électromécanique aura une durée de vie abrégée si C_Y devient inférieure à 10 s.

En revanche, un relais statique à thyristors supporte des durées C_Y inférieures à 0,1 s.

Choix de la valeur maximale de C_Y

Il est opéré au moyen du résultat suivant : l'utilisation d'une sortie modulée entraîne une ondulation O_{cc} sur la mesure, dont la valeur maximale est :

$$O_{cc} (\%) = 18,5 \cdot \frac{C_Y}{\tau}$$

Pour un fonctionnement quasi continu, les ondulations de la mesure doivent être inférieures à 0,1 % de l'échelle du transmetteur, c'est-à-dire de l'ordre de la classe des régulateurs les plus précis. La contrainte

$$O_{cc} < 0,1 \% \text{ entraîne : } C_Y < \tau/200$$

4 Unités de puissance mixtes (UPM)

La modulation du signal $Y_{\text{R actionneur}}$ est souvent réalisée à l'intérieur du régulateur, au moyen d'un relais supportant un courant d'une intensité maximale voisine de 5 A.

Pour des puissances élevées, il convient d'utiliser un régulateur continu dont le signal Y_R pilote une unité de puissance (Régulation 1, chap. 3) qui assure la modulation de durée à l'extérieur du régulateur .

Exploitant les propriétés des semi-conducteurs, les UPM offrent la possibilité d'obtenir des interrupteurs statiques performants et rapides, susceptibles de fonctionner selon divers modes.

Fonctionnement en train d'ondes (fig. 4)

L'unité fonctionne comme un interrupteur statique, *synchronisé* sur le secteur alternatif.

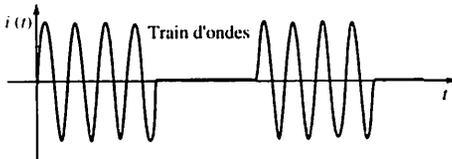


Fig. 4

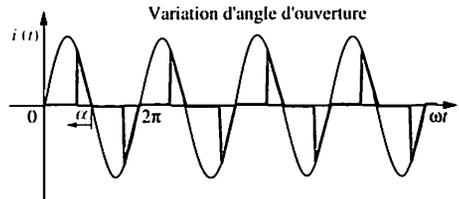


Fig. 5

Fonctionnement en angle de phase (fig. 5)

L'unité fonctionne comme un gradateur de puissance, utilisant deux thyristors associés tête-bêche. Le signal analogique Y_R , issu du régulateur, commande l'angle de conduction α , qui peut varier de 0 à π .

Ce fonctionnement est source de parasites lors des commutations et doit être réservé à des systèmes très rapides, par exemple des groupes tournants, dont la constante de temps est inférieure à 0,1 s.

De plus, l'unité introduit une non-linéarité qui doit être parfaitement corrigée de façon interne.

On trouvera en pages 124 et 125 des extraits de documentation technique, publiée avec l'aimable autorisation de la société EUROTHERM.

5 Conclusions

Les sorties de type « tout ou rien » des automates programmables industriels permettent de réaliser à faible coût des boucles de régulation à modulation de durée.

On évitera alors de confondre une régulation de type TOR et une régulation progressive à modulation de durée, utilisant une sortie TOR de l'automate.

On retiendra que la régulation continue à modulation de durée doit être réservée à des systèmes présentant une difficulté de réglage telle que le

rapport $\frac{T}{\tau}$ soit inférieur à 0,25, valeur qui est pratiquement la frontière d'emploi des régulateurs PI.

Exercice résolu

□ L'élaboration d'un produit pharmaceutique nécessite, avant réaction, la préparation de l'une des solutions composant le mélange désiré. La figure 6 donne le schéma de principe simplifié de l'installation servant à cette préparation. La régulation de niveau n'est pas représentée.

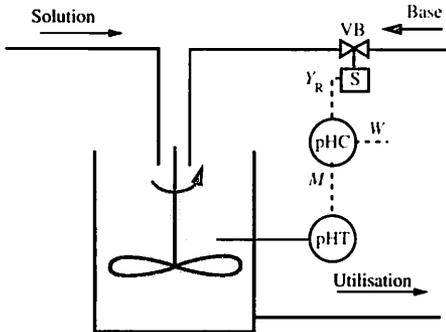


Fig. 6

La solution est initialement acide et l'ajustement de son pH est réalisé par une chaîne de régulation agissant sur le débit d'une base.

La réalisation d'une régulation de pH est un problème industriel délicat. Elle fait très rarement appel à une vanne progressive, compte tenu de la nature des produits utilisés. On préfère habituellement utiliser une électrovanne, pilotée par un régulateur PID à commande modulée.

Cette sorte de neutralisation présente l'intérêt de tenir compte de la cinétique de la réaction de neutralisation : une injection limitée au temps de conduction t_c permet une stabilisation du pH pendant le reste du cycle C_Y .

Pour une durée de vie normale de l'électrovanne, le constructeur déconseille un temps de cycle inférieur à 5 secondes.

Autour du point de fonctionnement choisi, une identification a fourni le modèle suivant :

$$H(p) = \frac{e^{-12p}}{1 + 60p}$$

1. Pour les trois durées de cycle $C_Y = 3$ s, 6 s et 12 s calculer l'ondulation maximale O_{cc} qu'une régulation modulée introduit sur la mesure, le régulateur fonctionnant en mode « Manuel ».

2. Vérifier les résultats au simulateur, pour les deux dernières valeurs.

3. Les tolérances de fabrication autorisent une ondulation de la mesure. Elle ne doit pas dépasser 2 % de l'échelle du transmetteur. En déduire la valeur optimale de C_Y et vérifier si elle est compatible avec les spécifications du constructeur.

Solution :

1. Calculs des ondulations

L'application de la formule :

$$O_{cc} (\%) = 18,5 \cdot \frac{C_Y}{T}, \text{ permet d'obtenir les résultats suivants :}$$

| C_Y | O_{cc} |
|-------|----------|
| 3 s | 0,9 % |
| 6 s | 1,9 % |
| 12 s | 3,7 % |

2. Vérification au simulateur

Les figures 7 et 8 confirment ces résultats.

3. Durée de cycle optimal

Le respect de l'objectif industriel permet d'adopter $C_Y = 6$ s. Cette valeur est conforme aux directives du constructeur.

La valeur élevée de la constante de temps ($T = 6$ s) ne doit pas surprendre. La solution acide à neutraliser est initialement « tamponnée » par passage dans une fosse à castine où le contact avec le calcaire réalise une préneutralisation. De plus, la solution basique est utilisée diluée.

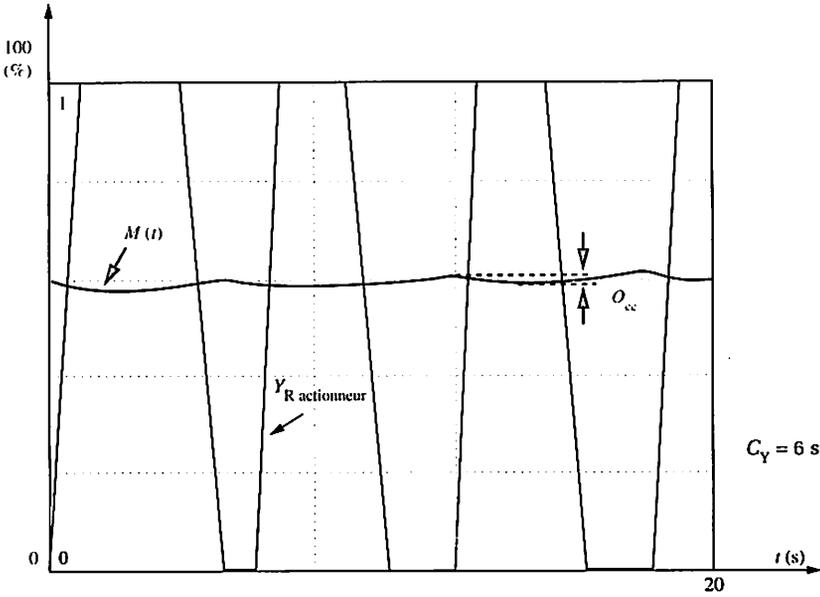


Fig. 7

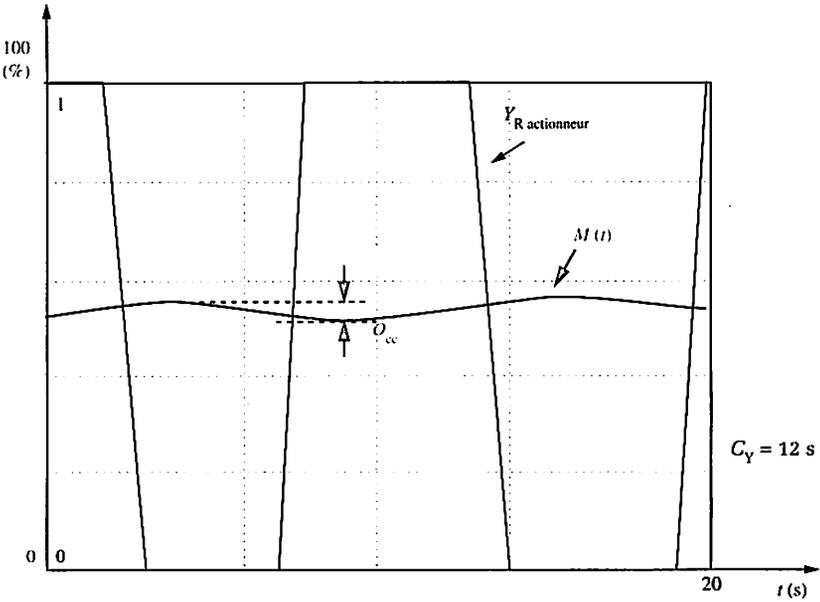


Fig. 8

16 BOUCLES DIVERSES

Certaines chaînes de régulation ne peuvent être directement répertoriées dans la classification élaborée aux chapitres précédents : cascade, tendance...

Parmi toutes ces boucles, on distingue souvent celles où deux stratégies de régulation pilotent un seul organe de puissance, simultanément ou alternativement. On regroupe ces stratégies sous la rubrique *régulation parallèle*.

Elles sont constituées d'une boucle principale, limitée dans son action par la prise en compte d'une grandeur d'influence ou d'une sécurité.

La synchronisation des deux régulateurs peut être plus ou moins complexe. Elle est facilitée par les régulateurs utilisant le mode forçage (Track) disponible sur les SNCC.

1 Régulation de la température d'un four

La réalisation de fours électriques performants nécessite une puissance de chauffe très importante. La dissipation de l'énergie calorifique n'est pas toujours totale lors des régimes transitoires : une augmentation brutale du signal de commande Y_{RT} conduit alors à une température M_R trop élevée au niveau des résistances chauffantes et celles-ci se détériorent.

L'emploi d'une unité de puissance mixte à double entrée permet une régulation parallèle évitant une température excessive de la résistance (fig 1).

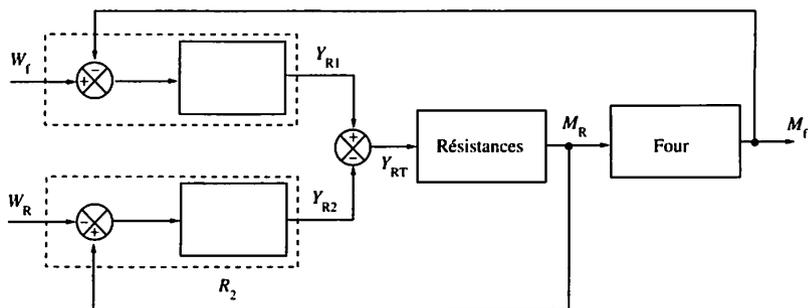


Fig. 1

Une température M_R trop élevée doit entraîner une diminution du signal Y_{RT} . Celle-ci est obtenue à l'aide du régulateur R_2 , à sens d'action direct, souvent utilisé en mode P et à bande proportionnelle décentrée. La caractéristique du régulateur de limitation est choisie analogue à celle donnée figure 2.

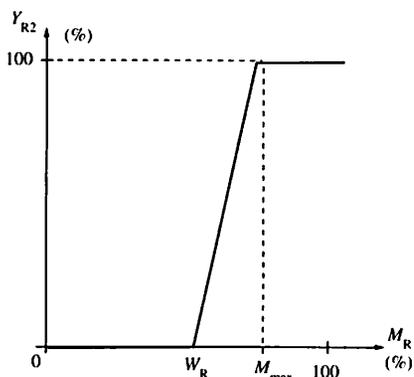


Fig. 2

M_{max} représente la température maximale admissible par la résistance et W_R est placée à la valeur où l'on veut commencer à faire agir la limitation. La saturation de la sortie Y_{R2} entraîne alors une arrêt total de la chauffe.

On notera que le sommateur peut être remplacé par un dispositif fournissant à sa sortie le plus petit de ses deux signaux d'entrée et que l'on nomme sélecteur de plus bas. Le régulateur R_2 doit alors être à sens d'action inverse. L'emploi d'un sélecteur est détaillé au paragraphe 2.

2 Régulation de la température d'un bâtiment

Cet exemple, évoqué au chapitre 1 de Régulation 1, représente un exemple classique de régulation parallèle, rencontré pour le contrôle de la température des locaux industriels.

Le schéma TI est celui de la figure 3. Il regroupe, dans un régulateur spécialisé, une stratégie proche d'une régulation à trois éléments.

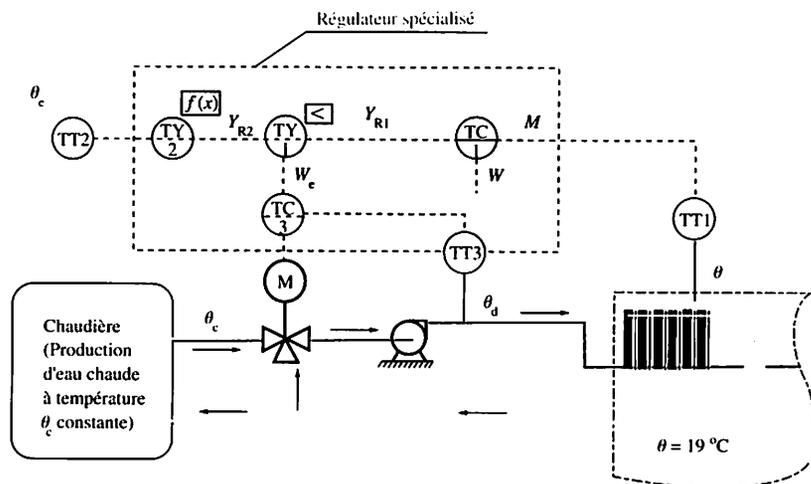


Fig. 3

La température de départ θ_d est asservie par l'élément TC3, agissant sur une vanne mélangeuse à trois voies, du type motorisée à deux sens de rotation. Ce montage assure un débit constant dans la pompe.

Chaîne ouverte

Si on considère cette chaîne seule, la consigne W_e est directement fonction de la température extérieure θ_e , perturbation principale. Le bloc de

fonction TY2 permet d'obtenir cette correspondance sous la forme d'une droite de pente et d'origine ajustables (fig. 4).

Cette correction en chaîne ouverte ne permet pas d'obtenir une précision statique parfaite, mais elle constitue souvent la solution élémentaire adoptée.

En fonction de la température maximale autorisée et des déperditions thermiques du local, l'utilisateur règle la pente du bloc TY2.

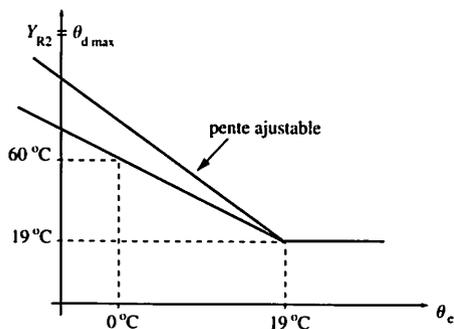


Fig. 4

Chaîne fermée

Si on désire obtenir un meilleur contrôle de la température θ , les éléments TC1 et TC3 réalisent une régulation en cascade, sur la grandeur réglante.

Si la précision devient garantie, une utilisation anormale du local (portes ouvertes ...) contraint le régulateur à augmenter exagérément son signal de sortie Y_{R1} , donc la consigne du régulateur-esclave.

Rôle du sélecteur de plus bas TY1

La chaîne ouverte détermine, pour une valeur θ_e donnée, la température θ_d maximale admissible : $Y_{R2} = \theta_d \text{ max}$. La chaîne principale est normalement la chaîne fermée et $W_e = Y_{R1}$.

En cas d'utilisation anormale entraînant Y_{R1} supérieure à Y_{R2} , le sélecteur conserve la valeur Y_{R2} et limite un échauffement inutile.

Le régulateur maître TC1 est souvent de type P avec bias, pour éviter des saturations pendant les sélections de Y_{R2} .

Les solutions les plus modernes utilisent l'état du sélecteur pour forcer la sortie de TC1 à la valeur Y_{R2} , à l'aide du mode forçage sur la sortie réglante ou mode « Track ».

3 Régulation de la température d'un échangeur

L'objectif étant le maintien de la température en sortie de l'échangeur, on agit normalement sur le débit de fluide chauffant Q_c , comme indiqué figure 5.

La réaction du système physique pouvant être lente, on agit transitoirement sur le débit de charge Q_a . On suppose la vanne TCV1 de type normalement fermée (NF). Le régulateur TC est donc de sens d'action inverse. Une augmentation très forte de Y_{R1} , signe d'une chute de M_1 , entraîne une fermeture partielle de la vanne TCV2, de type normalement fermée (NF).

Cette action transitoire est obtenue par le régulateur ZC de type P avec talon, dont la caractéristique statique est indiquée figure 6.

Le technicien de régulation doit prendre garde de ne pas fermer complètement la vanne TCV2. Pour maintenir une ouverture minimale de 20 %, il adopte une consigne $W_2 = 100$ %, avec un talon $Y_{R0} = 20$ %.

La bande proportionnelle $X_{p2} = 25$ % permet de régler la valeur maximale de Y_{R1} à partir de laquelle entre en action la limitation (80 %).

L'intérêt d'utiliser le régulateur ZC plutôt qu'un simple module de fonction est la possibilité de mieux contrôler la vanne TCV2.

ZC en manuel, avec $Y_{R2} = 100$ %, supprime la limitation du débit Q_a .

L'intérêt de cette chaîne secondaire est sa rapidité d'action. Cette sorte de stratégie ne doit pas être confondue avec une régulation à deux grandeurs réglantes de type échelle partagée, car ici il y a deux régulateurs, dont l'un ne fonctionne que par intermittence.

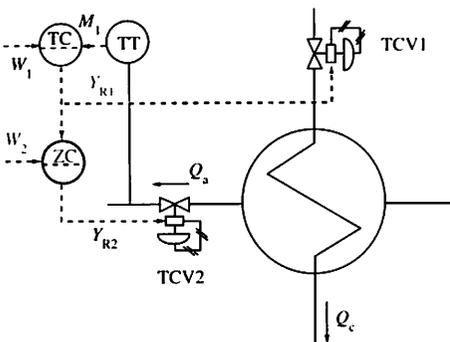


Fig. 5

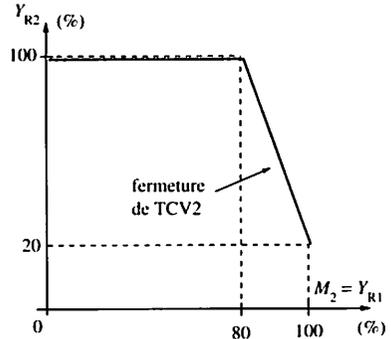


Fig. 6

4 Conclusions

Les quelques exemples de ce chapitre montrent qu'il existe de nombreuses solutions pour résoudre un problème particulier. Dès que les stratégies envisagées se compliquent, il est important de disposer d'un système permettant de simuler et valider la solution étudiée. Il est, par contre, impératif d'envisager l'aspect « conduite » de l'installation, dans le respect des règles de sécurité des personnes et des installations.

L'automatisation d'une installation complexe nécessite l'utilisation d'une méthode rigoureuse pour la mise en place des boucles de régulation.

Dans ce chapitre, on se propose de donner une méthode de recherche de la stratégie de régulation d'un dispositif physique. Cette méthode doit tenir compte des contraintes imposées par le cahier des charges. Pour simplifier, ce dossier d'étude se limite à la marche continue de l'installation : la prise en compte du démarrage, de la marche en mode dégradé, des sécurités, etc, nécessite l'emploi d'un automate programmable ou d'un SNCC disposant d'un langage permettant la gestion d'étapes discontinues.

La méthode mise en œuvre suppose de solides connaissances scientifiques de la part du technicien de conception, en particulier en thermodynamique.

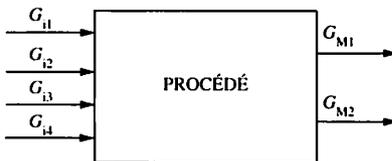
Une installation industrielle met en œuvre des procédés de fabrication. On a eu l'occasion de préciser que pour le technicien de la régulation, un procédé de production au sens large est un ensemble complexe d'appareillages fonctionnant dans un but précis : l'obtention de produits ou de services. Son fonctionnement dépend d'un certain nombre de paramètres qui, avec des poids variables, influent sur le but visé. Le mot « procédé » devient, en régulation, un terme générique utilisé pour tout dispositif.

L'objectif global d'un procédé est généralement caractérisé au moyen d'une ou plusieurs grandeurs dont la maîtrise permet d'atteindre le but recherché : ces grandeurs sont notées G_M . Avant de vouloir réaliser la régulation d'un procédé, il faut donc commencer par en faire l'inventaire.

Le maintien de ces grandeurs à maîtriser G_M à des valeurs déterminées (valeurs nominales) nécessite de pouvoir agir sur le procédé et de connaître toutes les grandeurs incidentes, c'est-à-dire susceptibles de modifier les grandeurs à maîtriser. Il est donc nécessaire d'avoir recherché également quelles sont ces grandeurs incidentes.

La méthode peut être subdivisée en 5 étapes.

1 Étape 1 : hypothèse des systèmes découplés

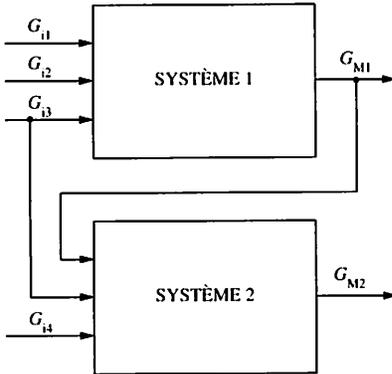


G_i = grandeur incidente
 G_M = grandeur à maîtriser

Fig. 1

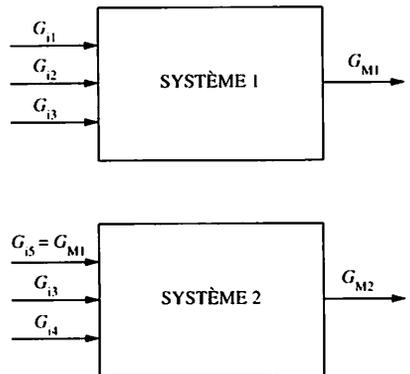
Les liens entre les diverses grandeurs peuvent être résumés au moyen de la figure 1. Cependant cette figure ne fait pas apparaître les couplages entre les grandeurs à maîtriser G_{Mi} . Un schéma plus complet est alors nécessaire. Il est donné figure 2.

L'hypothèse des systèmes découplés consiste à scinder le schéma de la figure 2 en autant de schémas qu'il y a de grandeurs à maîtriser : on peut alors plus facilement faire apparaître l'association d'une grandeur à maîtriser et d'une grandeur réglante, qui constitue un système élémentaire en régulation. Le couplage entre les grandeurs G_{Mi} est explicité en faisant figurer certaines de ces grandeurs comme grandeurs incidentes des autres : on obtient donc les schémas de la figure 3.



Les systèmes sont naturellement couplés par les grandeurs G_i et G_{Mi} .

Fig. 2



Les systèmes peuvent être représentés et étudiés comme apparemment découplés.

Fig. 3

L'étape 1 consiste donc à décomposer un procédé en systèmes élémentaires.

2 Étape 2 : observation de la grandeur à maîtriser d'un système

L'étape 2 concerne donc chaque système défini à l'étape 1. Bien que le mot *observabilité* ait une signification bien précise en théorie de la commande par retour d'état, on l'emploie à ce niveau pour se poser la question : la grandeur à maîtriser du système considéré est-elle mesurable ou non, directement ou indirectement à partir d'autres mesures ?

Si la réponse est **non**, on passe directement à l'étape 4.

Si la réponse est **oui**, on continue à l'étape 3.

L'étape 2 consiste donc à déterminer si la grandeur à maîtriser d'un système élémentaire peut être mesurée.

3 Étape 3 : choix de la grandeur réglante d'un système

La stratégie de régulation la plus simple consiste à commander une seule grandeur incidente par grandeur à maîtriser. Cette grandeur commandée sera appelée *grandeur réglante* (G_R).

Son choix doit être judicieux. Il faut tenir compte notamment :

- des impératifs de sécurité,
- de l'influence de cette grandeur (« son poids ») sur la grandeur à maîtriser,
- de la rapidité d'action,
- de la liberté d'action sur cette grandeur, qui ne peut donc pas être une grandeur à maîtriser d'une autre boucle de régulation.

Compte tenu du rôle particulier de la grandeur réglante, vis-à-vis de l'évolution de la grandeur à maîtriser, on est conduit à représenter la grandeur réglante choisie comme il est indiqué sur le schéma de la figure 4, les autres grandeurs incidentes étant représentées latéralement et étant appelées désormais *perturbations*. En effet, toute variation de ces grandeurs va modifier la grandeur à maîtriser malgré le dispositif de commande.

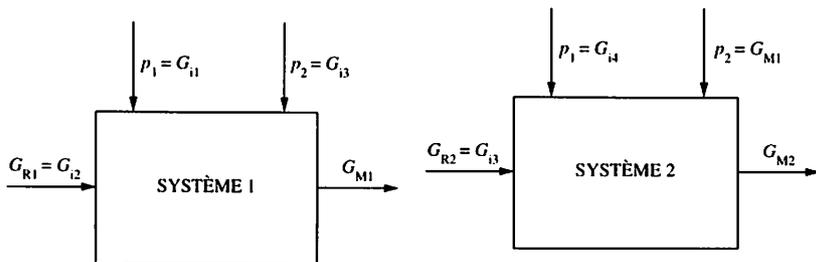


Fig. 4a

Fig. 4b

Pour le technicien de régulation, le choix d'une grandeur réglante est une étape très délicate car fondamentale pour les performances de la régulation mise en œuvre par la suite. Dans le cas d'un réacteur chimique contenant un équilibre liquide-vapeur, il est souvent plus intéressant de contrôler la température du liquide en agissant sur la pression de vapeur plutôt qu'en réglant la puissance de chauffe. Ce choix utilise habilement des notions de thermodynamique, que tout technicien doit connaître.

Bien que le mot *commandabilité* ait également une signification précise en théorie de la commande (Kalman 1960), on l'emploie à ce niveau pour se poser la question : la grandeur à maîtriser du système est-elle commandable ou non, c'est-à-dire peut-on agir suffisamment sur une grandeur incidente ?

Le choix de la grandeur réglante G_R exclut donc qu'elle puisse être la grandeur réglée d'une autre boucle (sauf cas de l'asservissement d'une

boucle cascade) . Le découplage impose également qu'elle ne soit pas la grandeur réglante d'un autre système.

L'étape 3 consiste donc à choisir la grandeur réglante d'un système élémentaire.

4 Étape 4 : choix de grandeurs auxiliaires à maîtriser

Le simple choix d'une seule grandeur de réglage par système ne permet pas souvent un contrôle parfait de la grandeur à maîtriser. Si on laisse évoluer librement les perturbations, les performances dynamiques sont médiocres, surtout si la fonction de transfert réglante présente un grand temps mort.

Il convient donc d'essayer de stabiliser les perturbations les plus importantes, en les transformant en grandeurs à maîtriser. Si elles sont observables, on est ramené à l'étape 2.

En revanche, cette étape est essentielle si une grandeur à maîtriser n'est pas observable : toutes ses grandeurs incidentes doivent devenir des grandeurs à maîtriser auxiliaires.

L'étape 4 consiste donc à maîtriser certaines perturbations d'un système élémentaire.

5 Étape 5 : mise en place des chaînes de régulation

En fonction de la dynamique connue ou supposée de la fonction de transfert réglante, on adopte une boucle simple ou une régulation maillée (tendance, cascade, découpleur...).

L'étape 5 consiste donc à créer une boucle de régulation par système élémentaire.

6 Conclusions

La méthode qui vient d'être exposée est une méthode d'analyse allant du général au particulier ou méthode *descendante*, proche de celles employées par les informaticiens. On constate qu'elle est récursive, c'est-à-dire susceptible de s'appliquer à elle-même, à une de ses étapes.

Un générateur de vapeur (ou chaudière) constitue un sujet d'étude important, car de nombreuses unités de production industrielle comportent ce procédé. L'installation d'une chaufferie obéit à trois impératifs :

- disposer d'un fluide caloporteur industriel pour le chauffage des réacteurs de fabrication,
- être équipé d'un alternateur de secours pour l'alimentation électrique de sécurité,
- pouvoir réaliser un chauffage domestique des locaux à bas prix.

Dans le cadre d'une étude technique, le générateur de vapeur se prête bien à la méthode élaborée au chapitre 17.

1 Étude et compréhension du procédé

A partir d'une alimentation en eau déminéralisée, une chaudière a pour but de produire de la vapeur à pression et température imposées.

La production de la chaleur nécessaire à la vaporisation résulte de la combustion d'un combustible industriel : fioul lourd, méthane, gaz de récupération...

Le dispositif industriel comporte essentiellement :

- une chambre de combustion ou foyer,
- un ventilateur de soufflage de l'air réchauffé de combustion,
- un ventilateur d'extraction des fumées (utile principalement au démarrage),
- un économiseur permettant un préchauffage de l'eau d'alimentation par récupération de la chaleur des fumées,
- des faisceaux de vaporisation (ou écran) parcourus naturellement par l'eau contenue dans les ballons (utilisation du phénomène de thermosiphon),
- un ballon séparateur où se produit le changement d'état.

On rappelle que la pression et la température d'un corps pur lors d'un changement d'état sont liées. Pour la vaporisation de l'eau, la relation

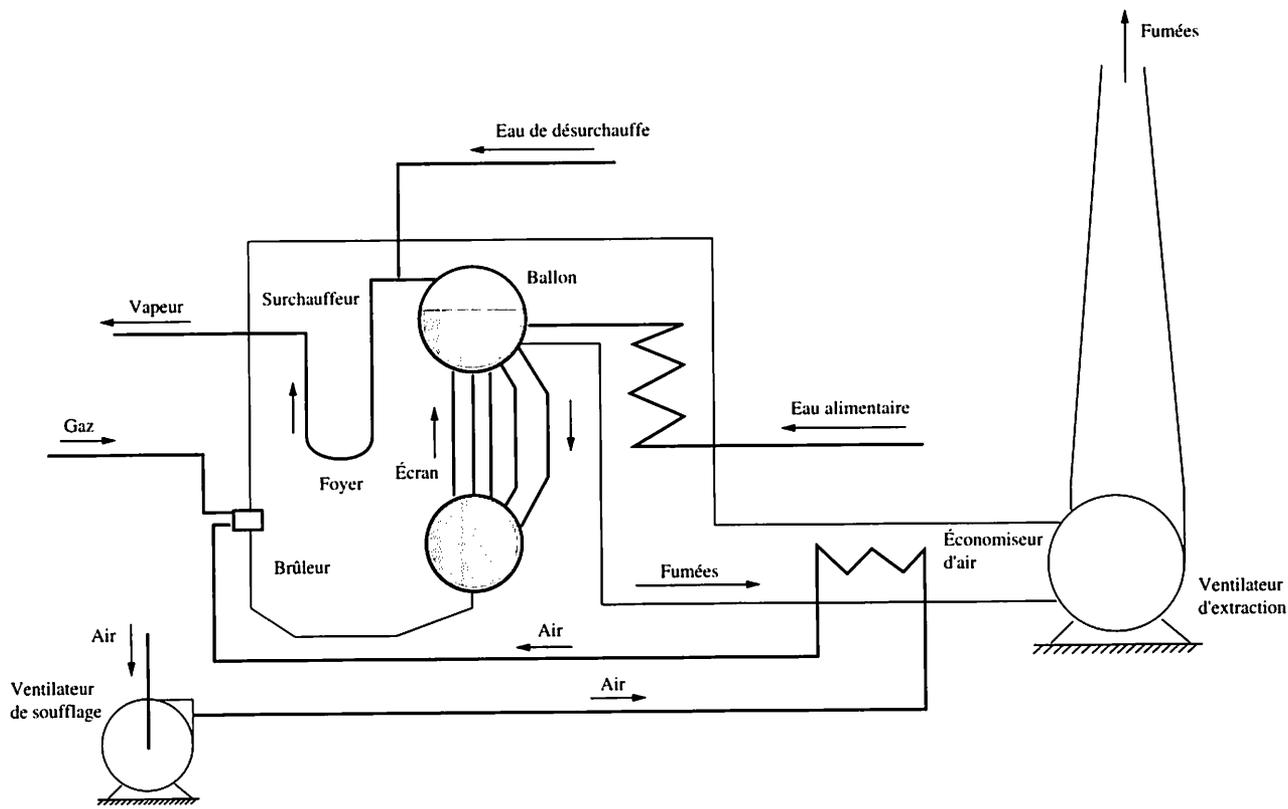
est : $P = \left(\frac{\theta}{100} \right)^4$ où P désigne la pression en bars et θ la température en

degrés Celsius.

• On prend garde de ne pas trop refroidir les fumées. En effet, le fioul de combustion contient du soufre qui, par combustion, peut conduire à de l'acide sulfurique en présence d'eau en phase liquide.

• La pression dans le ballon est approximativement égale à la pression exigée de la vapeur. En revanche, la température est insuffisante : on utilise donc un surchauffeur pour élever la température de la vapeur et obtenir ce que l'on appelle de la *vapeur sèche*. Si la température de la vapeur est trop élevée, on l'abaisse par injection d'eau de désurchauffe. L'ensemble du dispositif est représenté figure 1 (ci-contre).

Fig. 1



2 Étape 1

Inventaire des grandeurs fonctionnelles

Une méthode exhaustive consiste à inventorier, pour chaque fluide utilisé, les grandeurs physiques associées, en notation de schéma TI (Régulation 1, chap. 4) :

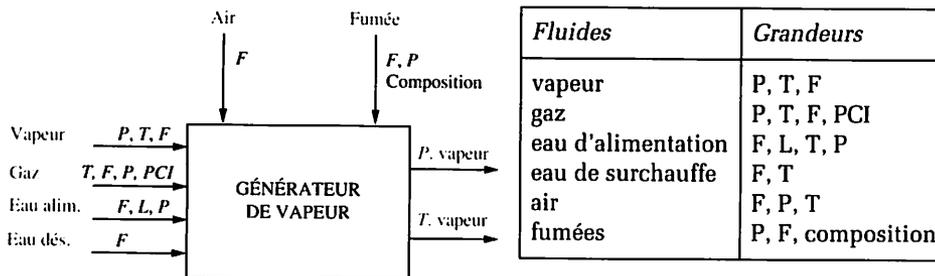


Fig. 2

La qualité énergétique de la vapeur étant imposée, les grandeurs à maîtriser sont la pression et la température de la vapeur, en sortie du dispositif.

L'inventaire permet d'établir le schéma de la figure 2.

Décomposition fonctionnelle

L'existence de deux grandeurs à maîtriser conduit à définir deux systèmes élémentaires, dont les grandeurs incidentes sont celles du procédé complet.

3 Étape 2 : observation de la grandeur à maîtriser de chaque système

La température et la pression d'un gaz sont des grandeurs facilement mesurables. Le transmetteur de température est noté TTO1, celui de pression étant PTO1.

4 Étape 3 : choix de la grandeur réglante de chaque système

Lors d'un changement d'état à volume constant (principe de l'autocuiseur), la pression en vapeur saturante est fonction de la quantité de chaleur reçue. Cette dernière est directement liée à la chaleur de combustion du gaz.

On adopte donc le débit du gaz combustible comme grandeur de réglage du système dont la grandeur à maîtriser est la pression.

Le surchauffeur utilisant une énergie non contrôlée, la vapeur sort généralement à une température trop grande (vapeur surchauffée). Le débit d'injection d'eau de désurchauffe est la grandeur ayant le poids le plus important sur la température.

On adopte donc le débit d'eau de désurchauffe comme grandeur de réglage du système ayant la température comme grandeur à maîtriser. On aboutit aux schémas de la figure 3, où ne figurent plus que les grandeurs ayant un poids non négligeables.

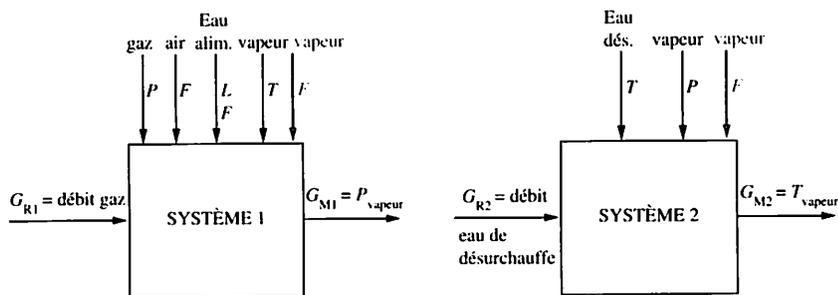


Fig. 3 Le débit vapeur est la perturbation principale des deux systèmes.

On constate des couplages « lâches » entre les deux systèmes. En particulier, le débit de gaz modifie l'apport d'énergie au surchauffeur donc la température de la vapeur sèche.

5 Étape 4 : choix de grandeurs auxiliaires à maîtriser

L'étude de la vaporisation montre que le rendement en vapeur est une fonction croissante de la surface de vaporisation. Le ballon séparateur étant un cylindre horizontal, la surface libre du liquide est donc fonction du niveau d'eau dans celui-ci : le *niveau dans le ballon* doit donc devenir une grandeur auxiliaire à maîtriser, pour assurer un fonctionnement stable de la chaudière (et par sécurité).

La combustion produit des gaz pouvant être toxiques, en particulier du monoxyde de carbone CO si la combustion n'a pas lieu dans des conditions stœchiométriques. La *combustion au foyer* doit donc devenir un phénomène à maîtriser, par l'intermédiaire de l'excès de dioxygène O_2 dans les fumées.

En cas de défaut de cette combustion, les contraintes de sécurité des personnes imposent d'évacuer l'ensemble des gaz par la cheminée. Il faut donc créer une légère dépression au niveau du foyer, par rapport à l'air ambiant. La *pression au foyer* doit devenir une grandeur à maîtriser.

Pour ces trois grandeurs incidentes, devenues des grandeurs à maîtriser, on reprend l'analyse à l'étape 2.

- **Étape 2** : le niveau ballon est mesurable par le transmetteur LTO1. La composition des fumées est accessible par l'analyseur ATO1 (sonde à oxygène). La pression au foyer est mesurée par le transmetteur PTO2.
- **Étape 3** : le niveau dans le ballon est commandable par la vanne d'alimentation en eau. La teneur en dioxygène O_2 dans les fumées est modifiable par la vanne d'admission d'air au brûleur. La pression au foyer est ajustable par des ventelles motorisées agissant sur le débit des fumées.
- **Étape 4** : cette étape peut éventuellement être reprise pour les sous-systèmes. Le coût d'une installation est majoré d'autant. Compte tenu de la simplicité des sous-systèmes concernés, on constate que l'analyse est en général rapide.

6 Étape 5 : mise en place des chaînes de régulation

Une approche élémentaire se contentant de boucles simples permet d'établir le schéma TI de la figure 4 (ci-contre). Une étude plus fine, tenant compte de la dynamique des fonctions de transfert réglantes, est conduite au chapitre 19.

7 Conclusions

L'étude précédente doit être considérée comme une approche élémentaire du fonctionnement et de l'instrumentation d'une installation industrielle.

Elle ne prend en compte que le fonctionnement normal de l'installation, sans se préoccuper pour l'instant des alarmes, des sécurités et de modes de fonctionnement particuliers tels que :

- démarrage
- fonctionnement en mode repli...

L'élaboration du dispositif complet de contrôle-commande d'une installation neuve reste du ressort de spécialistes du génie industriel et plus particulièrement du génie chimique.

Elle ne se fait jamais a posteriori, c'est-à-dire après la construction de l'installation. Au contraire, une installation est de plus en plus conçue en fonction du dispositif de contrôle-commande ou tout au moins en fonction de ses possibilités.

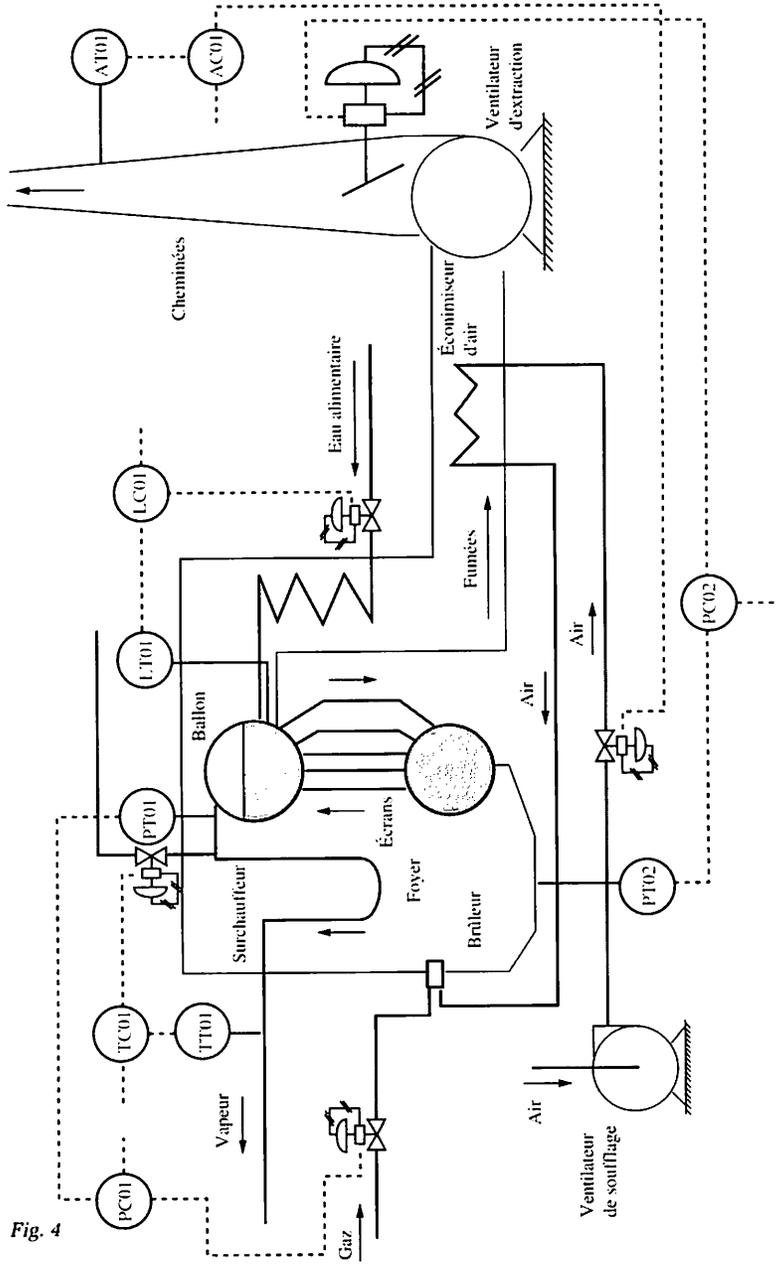


Fig. 4

La mise en œuvre de la méthode d'analyse du chapitre 17 a permis d'élaborer la régulation d'un générateur de vapeur. On se propose désormais d'affiner les stratégies de chaque boucle, en fonction de l'aspect dynamique de chaque système et des contraintes technologiques de réalisation.

Les diverses réalisations font appel aux notions développées dans les chapitres du début de l'ouvrage et on s'y reportera utilement.

1 Régulation de la pression de la vapeur

La fonction de transfert du système est caractérisée par un temps mort important dû aux inerties thermiques. Le système subit également une perturbation importante qui justifie une correction de tendance. Enfin, la vanne de réglage est souvent non linéaire et l'alimentation en gaz de combustion dépend beaucoup des variations de pression du gaz : il faut donc utiliser une régulation cascade sur grandeur réglante.

On adopte une *régulation à trois éléments* (PC01, FT02, FC01), dont la figure 1 fournit le schéma TI.

On remarquera que la mesure du débit volumique du gaz, notée FT01, doit être corrigée en pression. On remplace avantageusement l'ensemble du dispositif par un débitmètre massique, qui donne plus directement une image de la quantité de matière utilisée.

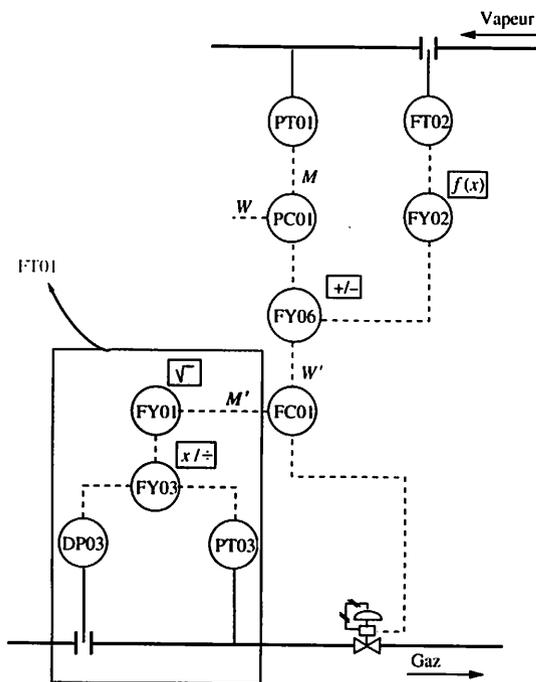


Fig. 1

2 Régulation de la température de la vapeur

Une monoboucle PID (régulateur TC01) se justifie car le système présente une dynamique rapide. Il reste cependant à vérifier si l'amplitude des variations du débit de vapeur n'impose pas une solution adaptative, telle que celles développées aux chapitres 3 et 4.

3 Régulation de la qualité de la combustion

L'emploi d'une boucle simple, préconisé au précédent chapitre, entraîne de sérieuses difficultés. Le régulateur AC01 reçoit une information présentant un retard important par rapport à la date de combustion.

On note cependant que la principale perturbation de cette boucle est le débit de combustible, grandeur de réglage de la boucle de pression. Or il constitue une grandeur parfaitement mesurable.

On peut donc envisager une régulation à trois éléments utilisant le débit de combustible comme information de tendance. On aboutit au schéma TI de la figure 2 qui comporte un multiplieur pour mieux ajuster la proportion entre les débits d'air et de combustible.

Cette stratégie, développée dans les chapitres précédents, permet d'assurer une régulation de proportion de type « gaz menant », le coefficient de proportion étant ajusté par le régulateur AC01.

Cette réalisation présente cependant un inconvénient majeur : une brutale augmentation du débit de combustible peut conduire à une combustion incomplète entraînant la production de monoxyde de carbone CO. On peut compenser cet aléa en prévoyant un excès d'air important, mais alors le rendement thermique de l'installation devient insuffisant.

La solution adéquate consiste à prévoir de passer automatiquement en mode « gaz mené » lors des brusques augmentations de la demande en combustible : on ne brûle alors que la quantité de gaz correspondant au débit actuel d'air, qui doit alors augmenter progressivement sous l'influence de la demande de puissance calorifique.

Cette solution est fournie figure 3. La stratégie, dite à *boucles inter-verrouillées*, utilise deux modules sélecteurs FY04 et FY05.

En cas d'augmentation du signal de charge, le sélecteur FY04 conserve le signal le plus bas entre le débit actuel d'air et le nouveau débit de combustible.

En revanche le sélecteur FY05 conserve le signal le plus élevé entre le débit actuel de combustible et le nouveau débit d'air demandé par une diminution du signal de charge.

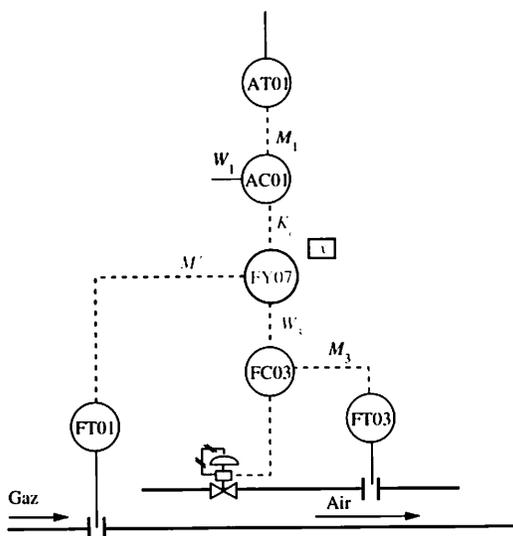


Fig. 2

Bien sûr, la configuration des modules doit prendre en compte les différences d'échelles entre les deux débits. Cette réalisation est systématique sur les installations de puissance importante.

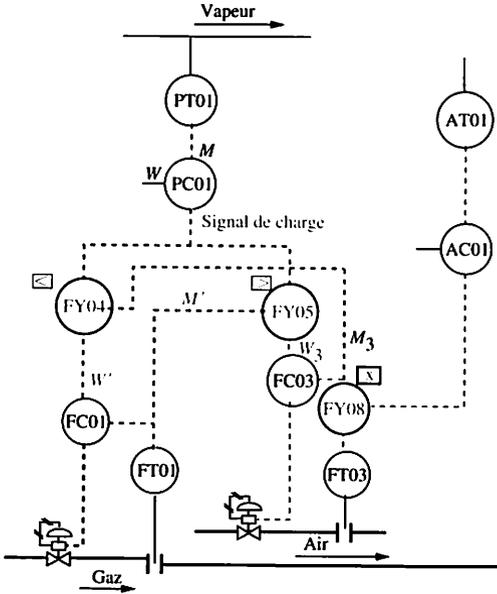


Fig. 3

4 Régulation du niveau dans le ballon

La régulation de ce niveau doit assurer un bon rendement de la vaporisation et garantir une réserve suffisante en eau. Le fonctionnement de cette boucle entraîne des difficultés importantes. L'une d'elles résulte du fait que le contrôle d'un niveau de liquide, avec débit de soutirage fixe, crée un système intégrateur toujours difficile à régler. Cependant, le problème essentiel est dû à deux phénomènes inverses dits « de gonflement et de tassement » (sous-entendu du volume d'eau dans le ballon).

Phénomène de gonflement

Une brutale augmentation de la demande de vapeur entraîne une diminution transitoire de la pression de vapeur dans le ballon. Ceci favorise la vaporisation et des bulles de vapeur se forment dans l'eau. La conséquence est une augmentation artificielle du volume d'eau dans le ballon (gonflement) et du niveau dans celui-ci. L'action du régulateur LC01 va se traduire par une diminution d'admission d'eau au plus mauvais moment.

Une conséquence possible est alors un manque d'eau quelques minutes plus tard et le déclenchement d'une alarme de niveau bas.

Phénomène de tassement

Il se produit lors de l'augmentation de pression consécutive à une diminution de la demande de vapeur : il se forme moins de bulles de vapeur au sein du liquide (tassement du volume d'eau) et l'action du régulateur entraîne une augmentation de l'admission d'eau. Cette injection d'eau froide aggrave le phénomène de diminution apparente du niveau (contraction du volume d'eau liée à la diminution de la température).

La conséquence ultérieure est généralement la présence d'un excès d'eau dans le ballon. Souvent, il ne peut se résorber car le débit de vapeur est insuffisant.

Ce phénomène peut être partiellement limité par un préchauffage de l'eau (voir chapitre 18) et par l'utilisation d'un transmetteur de niveau dont le principe de fonctionnement tient compte de la variation de la masse volumique de l'eau.

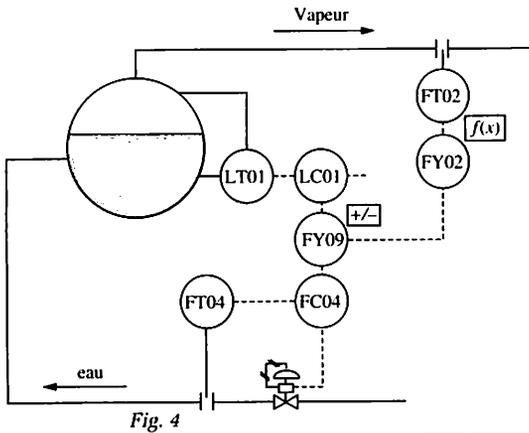


Fig. 4

L'ensemble de ces contraintes conduit à l'adoption d'une *régulation à trois éléments* (LC01, FT02, FC04) représentée figure 4. Le débit de vapeur pilote la demande de débit d'eau, corrigée par l'état actuel du niveau. Le réglage du régulateur « mou », la chaîne directe étant prépondérante pour masquer les phénomènes de gonflement et de tassement.

5 Conclusions

L'installation étudiée peut avoir un cahier des charges plus élaboré :

- possibilité d'utiliser plusieurs combustibles avec priorité de l'un d'eux,
- démarrage automatisé,...

L'étude précédente doit cependant permettre au technicien d'installation de mieux comprendre le rôle des boucles de régulation qu'il rencontrera dans sa vie professionnelle. En fonction de contraintes particulières, il pourra toujours envisager des améliorations en conservant à l'esprit les impératifs suivants :

- la priorité doit être accordée à la sécurité des personnes et des biens,
- la simplicité de mise en œuvre par les agents d'exploitation est essentielle.

Dans les industries chimiques, les colonnes à distiller constituent un dispositif fondamental des processus industriels de fabrication. Lors de la synthèse d'un produit, celui-ci n'est jamais pur, mais habituellement mélangé à un solvant ou à d'autres produits de formule chimique souvent voisine. En fin de chaîne de fabrication, il est impératif de séparer les divers constituants (ou au moins d'extraire le ou les produits recherchés du reste de la solution obtenue).

La distillation permet de réaliser cette séparation lorsqu'une solution comporte des constituants dont les températures d'ébullition sont différentes.

Le principe de cette opération est simple : si on chauffe un mélange, le constituant le plus volatil, c'est-à-dire de température d'ébullition la plus basse, commence par se vaporiser en premier lorsque le mélange atteint cette température.

Si on continue de chauffer, la température s'élevant progressivement, on atteint la température d'ébullition d'un second produit, celui-ci se vaporise et ainsi de suite. En fin de chauffe, reste à l'état liquide le produit le moins volatil.

Principe d'une colonne à distillation continue

Un tel dispositif est représenté figure 1. L'élément essentiel est le dispositif de chauffe au pied de la colonne appelé *rebouilleur*. C'est habituellement un échangeur fonctionnant à la vapeur. Son rôle est de chauffer suffisamment le mélange dans le fond de la colonne pour vaporiser tous les produits volatils que l'on souhaite recueillir : la température est donc élevée à ce niveau.

Les vapeurs montent progressivement dans les étages de la colonne, appelés *plateaux*.

A chaque plateau les vapeurs barbotent dans un mélange liquide (résultat des condensations antérieures), ce qui les refroidit et provoque la condensation des vapeurs dont la température d'ébullition est inférieure à celle du liquide : le liquide s'enrichit en produits les moins volatils, les plus volatils restant sous forme de vapeurs qui continuent leur ascension dans la colonne.

La température diminue progressivement lorsqu'on passe d'un plateau à un autre situé au dessus. La température des derniers plateaux permet de sélectionner le ou les produits que l'on veut récupérer en tête de colonne, sous forme de vapeurs.

Pour une colonne de distillation fonctionnant en continu, le mélange initial, appelé la *charge*, est introduit sur un plateau intermédiaire, si possible à la température d'équilibre de ce plateau.

La partie volatile de la charge monte dans la colonne en s'enrichissant en produits dits *légers* ou *distillats*. La partie la moins volatile descend dans la colonne en s'enrichissant en produits dits *lourds* ou *résidus*. C'est le principe du reflux interne.

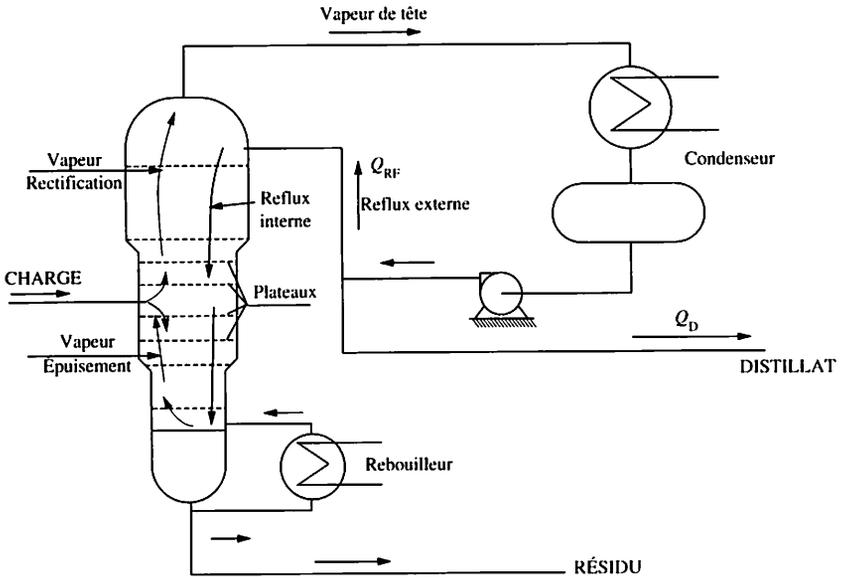


Fig. 1

Soutirage des produits

Les résidus sont soutirés sous forme liquide, au pied de la colonne. Les distillats sont refroidis dans un condenseur fonctionnant à l'eau froide et sont ensuite soutirés sous forme liquide.

Le reflux externe

Une bonne distillation (ou rectification) nécessite un nombre de plateaux incompatibles avec la hauteur des édifices industriels. Afin de diminuer le nombre de plateaux nécessaires, on renvoie des distillats condensés vers la tête de colonne : c'est le *reflux externe*.

Ce reflux permet d'enrichir les plateaux supérieurs en produits légers et, par le refroidissement qui en résulte, d'augmenter le gradient de température entre le haut et le bas de la colonne, ce qui est un gage de l'efficacité de la séparation ou fractionnement.

Le reflux externe est caractérisé par le taux de reflux $T_x = \frac{Q_{RF}}{Q_D}$ où Q_{RF}

et Q_D représentent les débits molaires.

Les coupes

Il est possible de soutirer un mélange, au niveau d'un plateau intermédiaire : un tel soutirage s'appelle *une coupe*. Compte tenu de la diversité des colonnes, il convient d'en choisir un type particulier pour pouvoir poursuivre l'étude.

1 Étude et compréhension d'un débutaniseur

Le raffinage du pétrole brut nécessite l'utilisation de colonnes de distillation pour extraire les divers constituants. Après une première distillation dite *atmosphérique*, différentes coupes sont acheminées vers des colonnes plus spécifiques. La coupe la plus légère est notamment traitée dans une colonne appelée *débutaniseur* avant de poursuivre son raffinage (dépropaniseur, dééthaniseur...).

Pour la suite, on précise que, dans l'industrie pétrolière, un alcane de formule globale C_nH_{2n+2} est désigné simplement par l'appellation C_n : ainsi le butane est appelé C_4 .

Le débutaniseur a donc pour rôle de séparer, à partir d'une charge constituée essentiellement d'alcane C_1 à C_9 et de gaz incondensables :

- une coupe de tête contenant uniquement les alcanes de C_1 à C_4 et les incondensables,
- une coupe de fond contenant les alcanes C_5 à C_9 .

Plan de circulation des fluides (PCF) (figure 2)

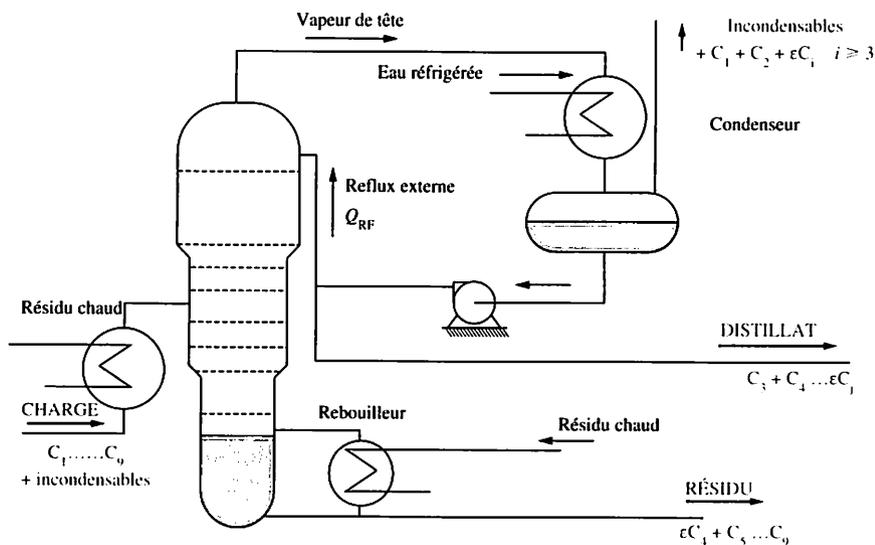


Fig. 2

On donne les caractéristiques essentielles :

- nombre de plateaux : 50, avec alimentation au 24^e plateau ;
- charge : composition et température variables, débit compris entre 3000 t/J et 5000 t/J. Pression dans la tête de colonne : 11 bars ;
- température de tête : 110 °C ;
- température de fond : 210 °C.

La circulation de la phase liquide dans le rebouilleur s'effectue grâce au phénomène naturel de thermosiphon, le fluide chauffant étant un résidu chaud de récupération.

Le fluide de refroidissement utilisé par le condenseur est de l'eau réfrigérée, devant permettre d'obtenir des distillats condensés à 35 °C. A cette température, et pour la pression de 11 bars, le méthane CH_4 et l'éthane C_2H_6 ne sont pas condensés : ils sont utilisés comme combustible d'appoint dans le reste de l'installation

En revanche le propane C_3H_8 et le butane C_4H_{10} , commercialement très intéressants, sont condensés et récupérés.

2 Étape 1

Inventaire des grandeurs fonctionnelles

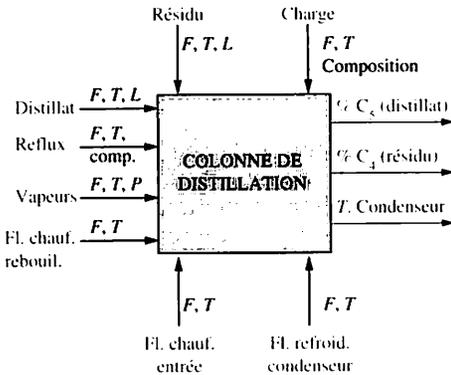


Fig. 3. Schéma fonctionnel de la colonne de distillation

| Fluides | Grandeurs |
|---|----------------------|
| charge | F, T, composition |
| résidu | F, T, L, composition |
| distillat | F, T, L, composition |
| reflux | F, T, composition |
| vapeur dans la zone d'épuisement | F, T, P |
| vapeur dans la zone de rectification | F, T, P |
| vapeur au niveau du condenseur | P, T, composition |
| fluide de chauffage au rebouilleur | F, T |
| fluide de chauffage à l'entrée | F, T |
| fluide de refroidissement au condenseur | F, T |

Pour ce qui concerne les grandeurs à maîtriser, elles sont imposées par le cahier des charges :

- la qualité du distillat, qui doit contenir le minimum de C_5 ,
- la qualité du résidu, qui doit contenir le minimum de C_4 .

Il s'y ajoute la température des vapeurs à la sortie du condenseur. En effet, il faut s'assurer de la condensation du C_3 .

L'inventaire permet d'établir le schéma de la figure 3.

Décomposition fonctionnelle

L'existence de trois grandeurs à maîtriser conduit à définir trois systèmes élémentaires.

3 Étape 2 : observation de la grandeur à maîtriser de chaque système

Les mesures de qualité en tête et en fond de colonne sont réalisées par analyses chromatographiques (AT1, AT2). Ces dispositifs fonctionnent souvent de façon discontinue et introduisent donc des retards.

4 Étape 3 : choix de la grandeur réglante de chaque système

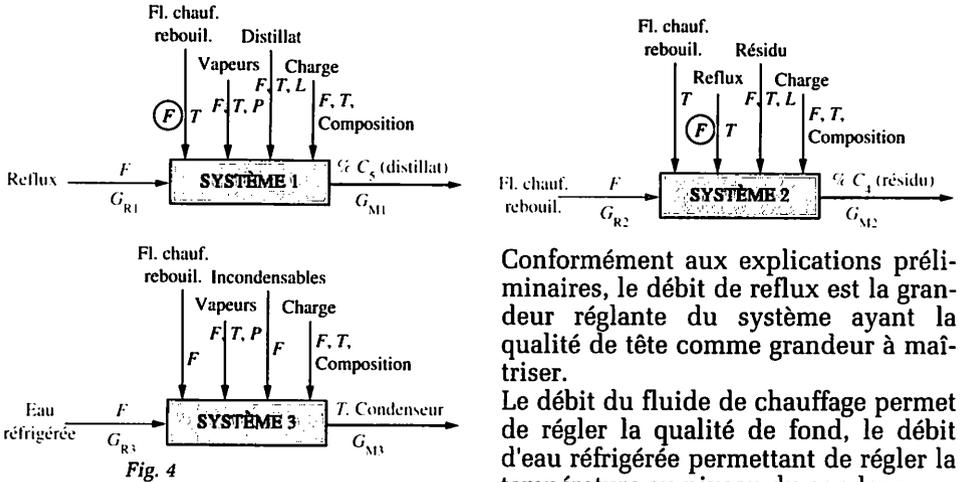


Fig. 4

Conformément aux explications préliminaires, le débit de reflux est la grandeur réglante du système ayant la qualité de tête comme grandeur à maîtriser.

Le débit du fluide de chauffage permet de régler la qualité de fond, le débit d'eau réfrigérée permettant de régler la température au niveau du condenseur.

On aboutit aux trois schémas de la figure 4, où ne figurent plus que les grandeurs ayant un poids suffisant.

5 Étape 4 : choix des grandeurs auxiliaires à maîtriser

Un fonctionnement correct de l'installation nécessite :

- de disposer d'une réserve des produits de tête et de fond,
- de s'assurer de la condensation de C₃ par pression adaptée,
- une alimentation de la colonne à température fixe.

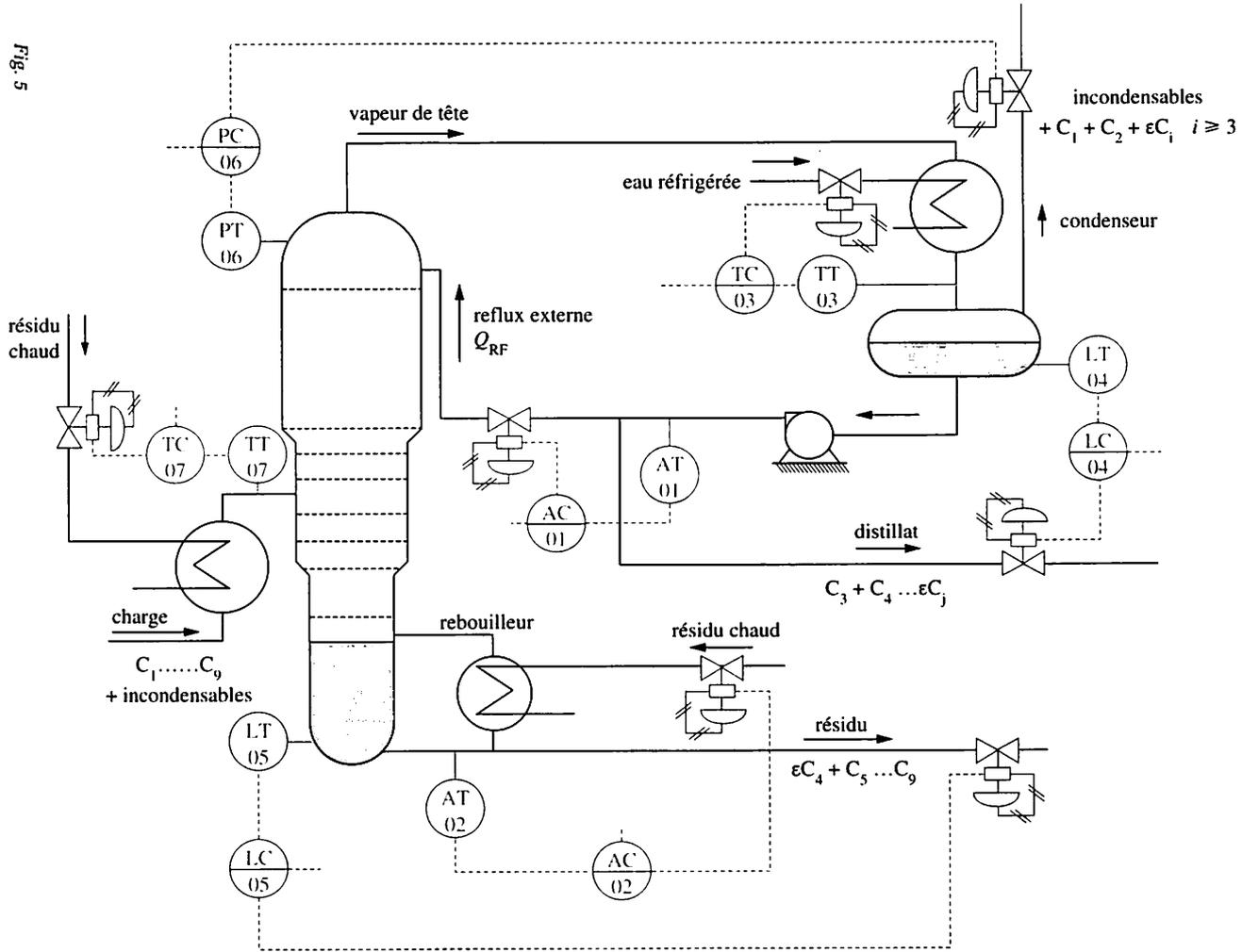
Les boucles de régulation auxiliaires sont donc :

| Grandeur auxiliaire à maîtriser | Grandeur réglante |
|------------------------------------|---------------------------------------|
| niveau du ballon condenseur (LT04) | débit de soutirage du distillat |
| niveau en fond de colonne (LT05) | débit de soutirage du résidu |
| pression en tête de colonne (PT06) | débit de tous les gaz non condensés |
| température d'entrée (TT07) | débit du résidu chaud de récupération |

6 Étape 5 : mise en place des chaînes de régulation

Le schéma TI élémentaire de la figure 5 regroupe l'ensemble des boucles évoquées. Une étude plus élaborée est conduite au chapitre 21.

Fig. 5



A partir de l'étude élémentaire du chapitre 20, il est possible de construire les schémas de boucle définitifs en prenant en compte les contraintes technologiques de réalisation et les impératifs de sécurité.

1 Régulation de la qualité du distillat

L'usage d'une analyse chromatographique impose souvent un analyseur à fonctionnement discontinu, utilisant un échantillon prélevé à intervalles de temps réguliers, ce qui introduit un retard préjudiciable à la régulation.

De plus, ce dispositif est onéreux et sa maintenance est délicate. Il faut donc pouvoir disposer d'une image plus fiable de la qualité du distillat.

Notion de plateau sensible

Pour un plateau déterminé, il existe une relation liant sa température et le pourcentage résiduel en C_5 dans la phase liquide. Parmi tous les plateaux, il en est un pour lequel une variation du pourcentage en C_5 entraîne une variation plus importante de la température : on dit que ce plateau est « le plateau sensible » (sous-entendu à la qualité du distillat).

Pour le débutaniseur précédent, il s'agit du 38^e plateau.

L'intérêt de cette grandeur intermédiaire, image de l'objectif à atteindre, est évident :

- mesure continue et fiable,
- réaction rapide aux perturbations.

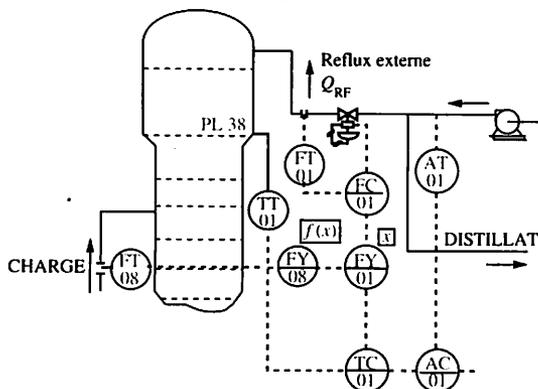


Fig. 1

Dans ces conditions, la stratégie définitive est une régulation à trois éléments fournie figure 1. Elle est constituée d'une double cascade (AC - TC - FC) dont le régulateur maître AC01 intervient uniquement en correction de la consigne de température du plateau sensible, avec un poids faible. Très souvent, les agents de conduite se contentent de faire fonctionner le régulateur TC01 avec une consigne locale, qu'ils corrigent éventuellement en fonction de l'affichage de l'analyseur.

Pour un fonctionnement optimal, il convient d'y ajouter une correction de tendance multiplicative (bloc FY01) permettant d'anticiper une variation du débit de charge FT08 par une variation adéquate du débit de reflux.

2 Régulation de la qualité du résidu

La qualité du résidu est contrôlée par analyse chromatographique du pourcentage en C_4 dans le mélange de fond (les traces doivent être inférieures à 0,4 % en masse).

Comme pour la qualité de tête, il existe un plateau sensible dont la température est représentative de la qualité de fond. On peut donc utiliser une stratégie analogue à la précédente.

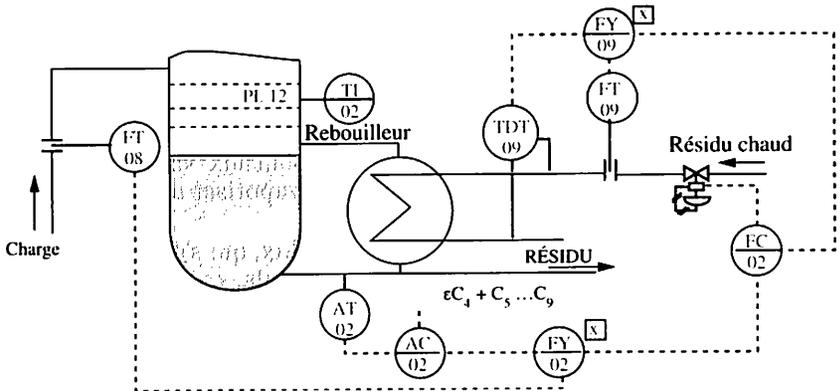


Fig. 2

Cependant, le schéma réalisé industriellement est plutôt celui de la figure 2.

En effet, ce n'est pas une régulation de la température du plateau sensible qui est véritablement recherchée mais une régulation de la puissance de chauffe nécessaire pour évaporer tout le C_4 du mélange de fond, en fonction du débit d'alimentation à l'entrée.

On se contente donc de mesurer la température du plateau sensible.

Pour assurer une puissance de chauffe adaptée au débit du produit entrant, on mesure le gradient de température $\Delta\theta$ aux bornes de l'échangeur et le débit massique Q_m en résidu chaud. A une constante près, le produit $Q_m \cdot \Delta\theta$ représente la puissance de chauffe $P_C = Q_m \cdot C \cdot \Delta\theta$.

Dans ces conditions, le régulateur FC02 est un régulateur de puissance de chauffe, dont la consigne est élaborée par la sortie de l'analyseur AC02.

Le montage pratique prend en compte, par l'intermédiaire du bloc multiplicateur FY02, le débit de charge comme signal de tendance : on retrouve donc une régulation à trois éléments.

En cas de défaillance de l'analyseur AT02, les exploitants utilisent le régulateur AC02 en mode « Manuel ».

3 Optimisation des régulations de qualité

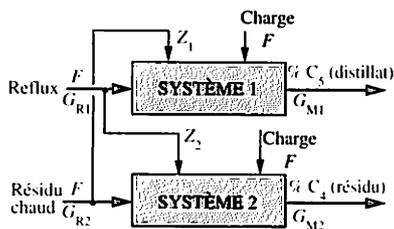


Fig. 3

Les schémas fonctionnels du chapitre précédent ont clairement montré un couplage entre les systèmes 1 et 2. La figure 3 reprend ceux-ci, sous une forme plus synthétique. Une colonne à distiller apparaît comme un système multivariable, avec le couplage le plus défavorable.

La grandeur réglante d'un système constitue une grandeur perturbatrice non négligeable de l'autre système et réciproquement.

- Une augmentation du débit du fluide de chauffage au rebouilleur va conduire à une vaporisation complète du C_4 en fond de colonne, mais l'ensemble des températures des plateaux va augmenter. Une conséquence directe est la possibilité de vaporiser une fraction non négligeable de C_5 au dernier plateau.

- Une augmentation du débit de reflux, qui s'effectue au niveau du dernier plateau dans l'installation présente, conduit à un refroidissement important en tête de colonne : les traces en C_5 deviennent nulles dans les vapeurs, mais l'ensemble des températures diminuent. Il en découle un taux en C_4 important en fond de colonne.

Il est possible de s'affranchir de ce couplage en utilisant un découpleur (voir chapitre 7).

Pour l'installation actuelle, le schéma simplifié est rappelé à la figure 4.

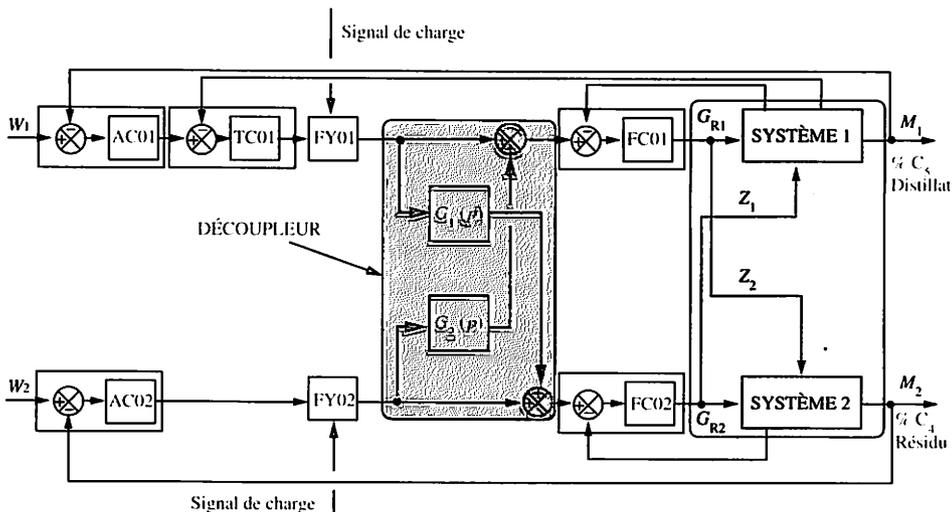


Fig.4

4 Régulation de la pression en tête de colonne

Les gaz incondensables, essentiellement le dihydrogène H_2 , et les gaz C_1 et C_2 sont normalement utilisés pour l'alimentation des brûleurs des fours de la raffinerie. L'utilisation de ce gaz de récupération suppose qu'il soit exempt de liquide. Il convient donc de s'en assurer par une sécurité de niveau très haut qui puisse rediriger le mélange gaz/liquide vers une torche.

Le dispositif de la figure 5 permet d'assurer une continuité dans le fonctionnement de la colonne, tout en préservant la qualité du gaz de récupération.

Des électrovannes à trois voies permettent d'alimenter les servomoteurs des deux vannes PCV6A et 6B, toutes deux étant de type normalement fermée (NF).

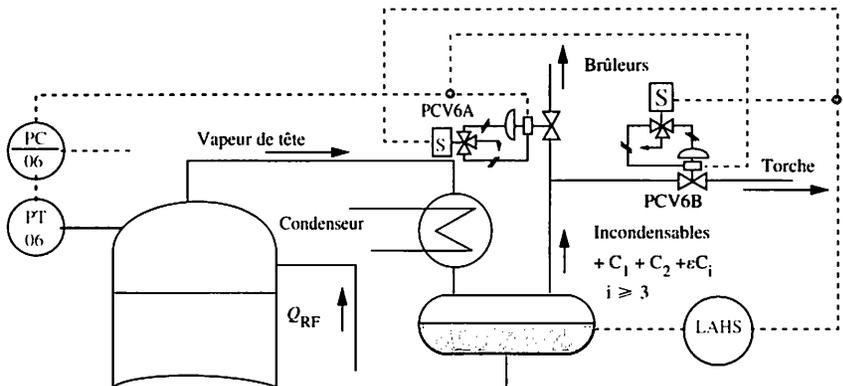


Fig. 5

En marche normale, la régulation de pression s'effectue par action sur la vanne PCV6A, l'électrovanne de la vanne PCV6B étant non passante : le servomoteur de cette dernière est alors à la pression atmosphérique.

Lorsque le niveau haut est atteint, l'alimentation des électrovannes est coupée, provoquant la mise en service de la vanne de régulation PCV6B et fermant la vanne PCV6A par la mise à l'atmosphère de son servomoteur.

5 Conclusions

L'impression d'empirisme que certains associent à la régulation, en particulier en ce qui concerne les méthodes de réglage, doit être éliminée définitivement. A présent, le lecteur doit être convaincu que l'automatisation d'une installation complexe obéit à une démarche rationnelle.

Cette bibliothèque concerne les blocs algorithmiques utilisés aux chapitres 9 et 10.

Module PID (figure 1)

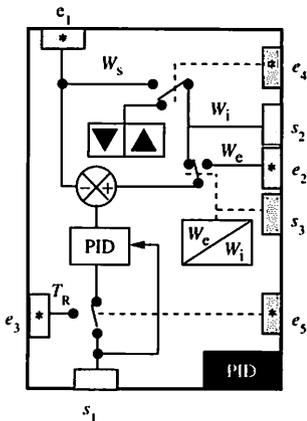


Fig. 1

Entrées analogiques

e_1 : entrée mesure M
 e_2 : entrée consigne extérieure W_0
 e_3 : entrée du signal éventuellement forcé sur la sortie s_1 (mode Track commandé par e_5)

Entrées logiques

e_4 : commutation consigne interne « 0 » \leftrightarrow consigne suivieuse « 1 »
 e_5 : commutation mode automatique « 0 » \leftrightarrow mode forçage « 1 »

Sorties analogiques

s_1 : signal réglant Y_R
 s_2 : signal de recopie de la consigne interne W_i

Sortie logique

s_3 : état consigne interne W_i « 0 » consigne externe W_0 « 1 »

Les interrupteurs sont représentés dans la position logique « 0 ». Toutes les commutations sont actives par passage au niveau logique « 1 ».

Fonctionnement interne

Le mode Track correspond à un fonctionnement manuel forcé. Le signal analogique e_3 de Track est alors forcé

sur la sortie s_1 , l'étage intégrateur du correcteur PID étant prépositionné de façon à assurer un transfert Track \rightarrow Auto sans à-coup sur la sortie s_1 .

En mode Track, le régulateur est automatiquement basculé en mode consigne interne ($s_3 = \text{« 0 »}$).

Les transferts Auto \leftrightarrow Manu sont pilotés par le bloc algorithmique station de consigne CS ou son équivalent, sous forme d'une station matérielle extérieure au système numérique, les contacts étant logiquement ou physiquement réalisés.

Le basculement $W_i \leftrightarrow W_0$ n'est possible que si le régulateur est en mode automatique et si un signal analogique est relié à l'entrée e_2 .

Les fonctionnalités montée-descente de la consigne W_i et les commutations $W_i \leftrightarrow W_0$ du bloc PID sont associées à un élément de visualisation permettant la modification sur un synoptique, par un opérateur de conduite.

Module couplage de sortie CS (figure 2)

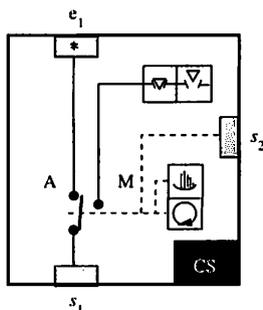
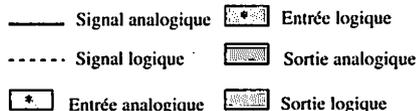


Fig. 2



e_1 : entrée analogique du signal réglant issu du bloc PID

s_1 : sortie analogique du signal réglant Y_{RT}

s_2 : sortie logique de l'état de la station CS, automatique « 0 », manuel « 1 ».
 Pour une boucle de régulation simple, il doit toujours être associé à un module PID, sous forme d'un bloc algorithmique ou sous forme d'une station extérieure.

Le module CS assure l'interface opérateur pour :

- les commutations Auto \leftrightarrow Manu,
- les modifications du signal Y_R en mode manuel.

Les fonctionnalités montée-descente du signal Y_R en manuel et les commutations Auto-Manu du bloc CS sont associées à un élément de visualisation permettant la modification sur un synoptique, par un opérateur de conduite. Pour une station, l'opérateur dispose des boutons nécessaires.

Module sommateur Σ (figure 3)

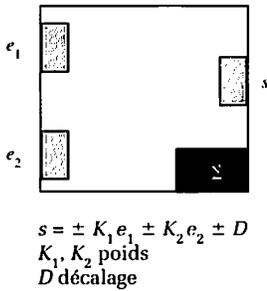


Fig. 3

Il réalise $s = \pm K_1 e_1 \pm K_2 e_2 \pm D$

Mise en œuvre

Les systèmes numériques de contrôle-commande (SNCC) sont constitués d'unités autonomes, reliées par un réseau informatique. Chaque unité dispose de sa bibliothèque d'opérateurs, de façon résidente, souvent en ROM. Une configuration est un chaînage de blocs, réalisé au moyen d'outils de conception assistée par ordinateur (C.A.O.).

Réalisée au moyen d'un logiciel spécifique, la configuration comporte 3 étapes essentielles :

- disposition des blocs sur une feuille de calcul ;
- réalisation des liaisons entre blocs ;
- paramétrage interne de chaque bloc. Cette dernière étape est souvent la plus complexe. Elle nécessite les informations classiques telles que :
 - échelles,
 - niveau d'alarmes,
 - réglage des 3 actions...

Cependant, d'autres informations moins explicites sont souvent nécessaires :

- vitesse de rampe pour la consigne,
- vitesse maximale de sortie, à l'ouverture et à la fermeture...

Après avoir achevé la configuration d'une unité, le technicien utilise sa console de développement pour charger cette configuration dans l'unité concernée, via le réseau informatique. L'interfaçage HOMME \leftrightarrow MACHINE est réalisé par des synoptiques graphiques, disponibles sur des consoles dédiées à la conduite de l'installation. Ces synoptiques comportent une partie fixe (ou trame) et des symboles liés dynamiquement à des points de la configuration. Par action sur ces symboles, un opérateur peut aussi piloter des objets « virtuels », placés dans les unités.

Il est important de ne pas confondre la centralisation des informations nécessaires à la conduite de l'installation avec une centralisation de « l'intelligence » du contrôle-commande.

La distribution de celle-ci sur de nombreuses unités assure une plus grande fiabilité. Le réseau informatique, souvent doublé pour des raisons de sécurité, permet de considérer les unités comme une gigantesque base de donnée dans laquelle les synoptiques puisent leurs informations.

DESCRIPTION

Cette gamme d'unités à thyristors offre de très vastes possibilités qui répondent à la plupart des besoins du marché de la basse et moyenne puissance. La gamme de courant s'étend de 8A à 150A pour des tensions allant jusqu'à 660 V.

Ces séries se divisent en deux principaux groupes : d'une part la série 450 à 454 des contacteurs statiques et d'autre part les séries 455 à 458 et 461 à 464 d'unités à thyristors, disponibles dans une grande variété de modes de commande.

Contacteurs statiques 450 à 454

Ces contacteurs statiques activés par une entrée logique, commandent les thyristors en "tout ou rien", avec un nombre entier de demi-alternances.

Trois sortes d'entrées logiques isolées sont disponibles :

1. L'entrée standard convient à tous les signaux de commande pour contacteurs statiques, générés par les régulateurs Eurotherm.
2. L'entrée TTL, disponible en option, permet une plus grande sensibilité, sans augmenter la consommation de courant, sous des tensions d'entrée supérieures. Cette entrée peut être commandée par une logique TTL standard.
3. L'option entrée "multi-commande" est utilisée lorsque plusieurs unités doivent être pilotées par un même signal logique, et avec une consommation minimale de courant. Les entrées sont connectées soit en série, soit avec une unité à entrée standard, soit avec une résistance équivalente.

Cette série peut être équipée en option d'une détection de rupture partielle de charge.

Unités à thyristors,

séries 455 à 458 (Unités à thyristors configurées à la commande) et 461 à 464 (Unités à thyristors universelles et programmables).

La série 455 à 458 des unités à thyristors, à entrée analogique est disponible dans six types de commandes :

- train d'ondes rapide
- train d'ondes lent
- syncope
- train d'ondes rapide avec démarrage progressif
- train d'ondes lent avec démarrage progressif
- variation d'angle d'ouverture

Il existe sept types d'entrée entièrement isolée qui conviennent à tous les signaux de sortie analogique des régulateurs Eurotherm.

De plus, cette série peut être équipée en option de circuits additionnels (inhibition - détection de rupture partielle de charge - limitation de courant - sortie pour commande d'un bloc esclave - blocage sélectif des impulsions). La limitation de courant se fait soit par seuil en utilisant un potentiomètre extérieur, soit par variation linéaire en agissant sur le potentiomètre de face avant.

La détection de rupture partielle de charge disponible en option, est indiquée en face avant par une diode électro-luminescente et sur le bornier arrière par les contacts d'un relais.

La série 461 à 464 offre une grande souplesse d'utilisation dans le contrôle de la puissance, grâce à la possibilité de sélectionner le type d'entrée et le mode de déclenchement, par un ensemble de mini-interrupteurs situés à l'arrière du module. En outre toutes les options de la série 455 (sauf le blocage sélectif des impulsions) sont disponibles simultanément sur la série 461 à 464.

Les modules de la série 455 à 458 et 461 à 464 possèdent plusieurs caractéristiques communes.

Le contrôle de la puissance sur charge constante notamment, est indépendant des variations secteur. De plus les modules sont entièrement protégés contre les surtensions et possèdent un fusible ultra-rapide pour protéger les thyristors contre les courts-circuits.

Sur la face avant, derrière une porte se trouve un connecteur multibroche, sur lequel une boîte à diagnostics type 260 peut être branchée. Cette boîte à diagnostics facilite la mise en route et la maintenance des unités à thyristors. Un afficheur numérique permet une lecture précise des principaux signaux.

Caractéristiques communes aux 3 séries 450 à 454, 455 à 458 et 461 à 464

- boîtier compact
- montage individuel sur rails DIN ou face aveugle
- version débrochable
- verrouillage système Zeus
- radiateur mis à la terre et électronique entièrement isolée
- séparation des câbles bas niveau et de la puissance
- indication de défaut fusible.

SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES

GÉNÉRALITÉS COMMUNES AUX 3 SÉRIES

- Tension d'alimentation + 10 % - 15 % de la tension nominale
- Courant résiduel de charge à l'état bloqué < 30 mA
- Température d'utilisation : 0°C à 50°C avec radiateur en position verticale.
- Température de stockage : - 10°C à + 70°C
- Borniers :

| | |
|-------------------------|---------------------------|
| | Section du fil |
| — Commande électronique | 0,5 à 2,5 mm ² |
| — Puissance : 8A | 0,5 à 2,5 mm ² |
| 15A à 40A | 6 à 16 mm ² |
| 50A à 100A | 16 à 35 mm ² |
| 125A | 35 à 50 mm ² |
| 150A | 35 à 50 mm ² |

- Rupture partielle de charge (défaut de charge)
 - Principe : comparaison du courant et de la tension de charge pour détecter une augmentation d'impédance.
 - Discrimination : 20 % du courant dans la charge ; n'est pas influencée par les variations de la tension du réseau.
 - Réglage et test : en face avant, par un potentiomètre de 10 à 100 %, et un bouton poussoir.
 - Indication : en face avant, par une diode électroluminescente (LED).

• Dimensions et masse

| Modèle | Hauteur (mm) | Largueur (mm) | Profondeur (mm) | Masse kg (environ) |
|-------------|--------------|---------------|-----------------|--------------------|
| 450 | 183 | 36 | 225 | 2 |
| 451/455/461 | 183 | 72 | 225 | 3 |
| 452/456/462 | 183 | 108 | 225 | 4 |
| 453/457/463 | 183 | 144 | 225 | 5 |
| 454/458/464 | 183 | 152 | 225 | 5 |

Série 450 à 454

• Entrée

Pour assurer la commutation des thyristors :

| | Niveau minimal | Niveau maximal |
|------------------------|-----------------------|------------------------|
| • Entrée standard | 6 mA - 10 V | 25 mA - 28 V |
| • Entrée TTL | 6 mA - 4 V | 28 V |
| • Entrée multicommande | 6 mA - 2,5 V par bloc | 25 mA - 2,5 V par bloc |

Pour assurer la coupure des thyristors :
courant < 150µA - Tension 0,6 V.

• Rupture partielle de charge :

- a) Sortie par optocoupleur pour les 450
courant de fuite < 5µA
courant disponible 1 mA — 0,4 V
1,6 mA — 1 V
Tension maximale à l'état ouvert 25 V
Dissipation maximale 50 mW.
Tension inverse maximale 5 V.
Tension d'isolation > 1 750 V efficace.

- b) Commutation par relais pour les 451 à 454
Contacts 250 mA. 250 V en alternatif
ou 30 V en continu.

Séries 455 à 458 et 461 à 464

• Entrée analogique :

- Entrée tension : 0-5 V
1-5 V
0-10 V
- Entrée courant : 0-5 mA
0-10 mA
0-20 mA
4-20 mA

• Mode de déclenchement :

- train d'ondes rapide
- train d'ondes lent

- syncope
- train d'ondes rapide avec démarrage progressif
- train d'ondes lent avec démarrage progressif
- variation d'angle d'ouverture.

• Autres possibilités

- Inhibition : une tension externe de 10 V permet d'inhiber la sortie puissance au prochain passage à zéro de l'alternance.
- Sortie commande esclave : cette sortie (10 V nominal, 10 mA max.) peut être utilisée pour commander un contacteur statique, en montage 2 blocs sur un système triphasé.
- Sortie mesure de courant de charge : signal représentant la valeur redressée double alternance du courant de charge. (5 V moyen environ pour le courant nominal du bloc thyristors).
- Fonctionnement manuel : branchement d'un potentiomètre externe 10 kΩ ou d'une unité 403.
- Etendue du contrôle : 3 à 100 % de puissance.
- Suppression de la commande de puissance pour une baisse de tension d'alimentation > 30 % de la valeur nominale.
- Limitation de courant
Réglable par un potentiomètre interne de face avant ou par un potentiomètre externe.
- Sortie indication image de la tension de charge : signal représentant la valeur redressée double alternance de la tension de la charge (4,3 V moyen).

- Connecteur face avant pour les tests :
20 signaux disponibles pour les réglages de mise en route et la maintenance.
- Stabilisation de la puissance de sortie sur une résistance constante en fonction des variations secteur.

| Puissance délivrée | Plage de variation de la tension secteur | Régulation de puissance par rapport à la puissance maximale |
|--------------------|--|---|
| 100 % | + 0 % à + 10 % | ± 1 % |
| 95 % | - 2 % à + 10 % | ± 1,5 % |
| 90 % | - 4,5 % à + 10 % | ± 1,5 % |
| 85 % | - 7 % à + 10 % | ± 1,5 % |
| 80 % | - 10 % à + 10 % | ± 2 % |
| 75 % | - 13 % à + 10 % | ± 2 % |
| inférieure à 71 % | - 15 % à + 10 % | ± 2 % |

Note : A titre indicatif un bloc thyristors non équipé du système de stabilisation EUROTHERM aurait des variations de puissance de sortie de + 21 % à - 27,8 % pour des variations du secteur de + 10 % à - 15 %.

- Linéarité du signal d'entrée par rapport à la puissance * de sortie (sur résistance constante) : erreur maximale ± 1 %.

* La puissance de sortie est mesurée sur au moins un cycle de sortie en train d'ondes.

PRINCIPAUX SYMBOLES UTILISÉS

Procédé :

ρ : masse volumique d'un fluide
 S : surface d'un bac.
 Q : débit (ex. : Q_e , débit entrant, Q_v , débit volumique, Q_m , débit massique)

Système :

τ : constante de temps
 n : ordre d'un système
 K : gain statique d'un système stable
 M : signal de mesure
 Z : signal perturbateur principal

Second ordre :

λ : coefficient d'amortissement
 ω : pulsation (ex. : ω_0 , pulsation propre ; ω_r , pulsation de résonance ; ω_c , ou ω_n , pulsation de coupure)

Régulateur :

ε : signal d'écart mesure/consigne
 W : signal consigne (ex. : W_e , consigne externe)
 Y_R : signal réglant (de sortie) d'un régulateur
 A : amplification d'un régulateur
 T_i : constante de temps d'action proportionnelle ($K_p = A$)
 K_p : coefficient d'action intégrale
 K_d : coefficient d'action dérivée (T_d ou $A.T_d$ suivant la structure du régulateur)

Fonction de transfert :

G : gain logarithmique
 $H(p)$: fonction de transfert isomorphe du procédé seul
 $C(p)$: fonction de transfert du régulateur
 $F(p)$: fonction de transfert en chaîne fermée
 $P(p)$: polynôme caractéristique. Numérateur de la fraction rationnelle $1 + T(p)$

Performances :

D_1 : premier dépassement

Signaux :

$u(t)$: échelon d'amplitude unitaire

θ : température

G : grandeur (ex. : G_R , grandeur réglante ; G_i , grandeur incidente)

T : temps mort (ou temps de retard)

k : gain dynamique d'un système intégrateur

$m = \Delta M$: petite variation de mesure

$z = \Delta Z$: petite variation de Z

Q : facteur de résonance

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

$y_R = \Delta Y_R$: petite variation de signal réglant

X_p : bande proportionnelle

($X_p = 100/A$)

T_d : constante de temps d'action dérivée

K_i : coefficient d'action intégrale ($1/T_i$ ou A/T_i suivant la structure du régulateur)

φ : phase ou déphasage (degrés ou radians)

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

$H_z(p)$: fonction de transfert perturbatrice

$T(p) = C(p) \cdot H(p)$: fonction de transfert en chaîne ouverte

T_R : temps de réponse à $\pm 5\%$

$\delta(t)$: dérivée de $u(t)$

Système du 1^{er} ordre normalisé

$$\tau \frac{ds(t)}{dt} + s(t) = K \cdot e(t); \quad H(p) = \frac{K}{1 + \tau p}; \quad T_R = 3\tau$$

Système du 2^e ordre normalisé

$$\frac{1}{\omega_0^2} \frac{d^2s(t)}{dt^2} + \frac{2\lambda}{\omega_0} \frac{ds(t)}{dt} + s(t) = K \cdot e(t); \quad H(p) = \frac{K}{\frac{1}{\omega_0^2} p^2 + \frac{2\lambda}{\omega_0} p + 1}$$

$$T_R \approx 3\tau_p = \frac{3}{\lambda \omega_0} \quad \omega_R = \omega_0 \sqrt{1 - 2\lambda^2}$$

$$Q = \frac{1}{2\lambda \sqrt{1 - \lambda^2}} \quad \lambda^2 = \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{1}{Q^2}}}{2}$$

$$D_1 = 100e^{\frac{-\lambda\pi}{\sqrt{1-\lambda^2}}} \quad \lambda = \frac{\ln\left(\frac{100}{D_1}\right)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2\left(\frac{100}{D_1}\right)}}$$

Autres systèmes

Modèles de Broïda : système stable : $H(p) = K \frac{e^{-Tp}}{1 + \tau p}$

système intégrateur : $H(p) = k \frac{e^{-Tp}}{p}$

Modèles de Strejc : système stable : $H(p) = \frac{K}{(1 + \tau p)^n}$

système intégrateur : $H(p) = \frac{k}{p(1 + \tau p)^n}$

Régulateurs PID

- Structure série : $C(p) = A \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot p}\right) (1 + T_d \cdot p)$

- Structure mixte : $C(p) = A \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot p} + T_d \cdot p\right)$

- Structure parallèle : $C(p) = A + \frac{1}{T_i \cdot p} + T_d \cdot p = K_p + \frac{K_i}{p} + K_d \cdot p$

Fonctions de transfert en chaîne fermée

$$F(p) = \frac{T(p)}{1 + T(p)} \quad F_z(p) = \pm \frac{H_z(p)}{1 + T(p)}$$

Édition : Agnès Fieux
Fabrication : Jacques Lannoy
Maquette : Studio Primart

N° d'Éditeur : 10129871 - Dépôt légal : décembre 2005
Imprimerie Chirat, 42540 Saint-Just-la-Pendue - N° 7816
Imprimé en France