

# Régulation des systèmes de chauffage et de climatisation des bâtiments

par **Gérard LAURENT**

Docteur-Ingénieur

Directeur Technique à la Société Française d'Études Énergétiques

<b>1. Rappels sur la commande d'un processus</b> .....	B 2 330 - 2
1.1 Régulation en boucle ouverte.....	— 2
1.2 Régulation en boucle fermée.....	— 3
1.3 Différents modes de régulation.....	— 4
<b>2. Éléments constituant une chaîne de régulation</b> .....	— 8
2.1 Capteurs .....	— 8
2.2 Régulateurs .....	— 8
2.3 Actionneurs.....	— 9
2.4 Dispositifs de sécurité .....	— 14
<b>3. Architecture d'un ensemble de régulation</b> .....	— 15
3.1 Avec des régulateurs « indépendants ».....	— 15
3.2 Avec des régulateurs optimiseurs.....	— 15
3.3 Avec des régulateurs adressables.....	— 16
3.4 Avec des automates programmables .....	— 16
3.5 Systèmes de gestion technique centralisée .....	— 16
3.6 Critères de choix .....	— 16
<b>4. Régulation des systèmes de chauffage</b> .....	— 18
4.1 Aspects réglementaires.....	— 18
4.2 Systèmes de production (chaudière et brûleur) .....	— 19
4.3 Systèmes de distribution .....	— 20
4.4 Exemples d'applications .....	— 21
<b>5. Régulation des systèmes de climatisation</b> .....	— 27
5.1 Systèmes de traitement d'air.....	— 27
5.2 Systèmes de distribution .....	— 29
<b>6. Annexe 1 : critères d'évaluation d'un actionneur</b> .....	— 32
6.1 Puissance.....	— 32
6.2 Rapidité.....	— 33
6.3 Autonomie.....	— 33
6.4 Comportement en cas de perte d'énergie motrice.....	— 33
6.5 Position de repli .....	— 33
6.6 Précision de positionnement. Hystérésis .....	— 34
6.7 Facilité d'interfaçage régulateur-actionneur .....	— 34
6.8 Entretien et maintenance .....	— 34
6.9 Longévité .....	— 34
6.10 Coût d'installation.....	— 34
<b>7. Annexe 2 : principes généraux de régulation d'une pompe à chaleur</b> .....	— 35
<b>Pour en savoir plus.....</b>	Doc. B 2 330

**L**e maintien de conditions thermiques déterminées à l'intérieur d'un local relève d'une double motivation :

— assurer la conservation des bâtiments en évitant une dégradation par la présence d'humidité. En effet, le chauffage de l'air intérieur d'un local modifie son degré hygrométrique et réduit ainsi les risques de condensation (article **Air humide** [B 2 230] dans ce traité). Le maintien du local à une température minimale évitera le gel des équipements intérieurs et déplacera l'isotherme  $0^{\circ}\text{C}$  ;

— satisfaire les exigences de confort d'occupation. Cette notion (article **Confort physiologique** [B 2 180] de ce traité) a fait l'objet de plusieurs définitions parmi lesquelles nous pouvons citer l'ASHRAE [1] qui définit la neutralité thermique d'un local comme l'ambiance qui procure à un sujet la satisfaction thermique. Selon d'autres sources [2], le « plaisir thermique » n'existe que dans les états dynamiques où le sujet passe d'un état déséquilibré (hypo- ou hyperthermie) à un état équilibré, l'ambiance thermique statique n'engendrant aucune impression agréable. La multiplicité et le caractère subjectif des critères de confort conduiront le concepteur des systèmes de régulation à laisser à l'utilisateur la gestion des conflits issus des occupants en lui donnant accès aux réglages des points de consigne de la température ambiante.

Un bâtiment est soumis en permanence à des sollicitations extérieures (température, ensoleillement, vent) qui viennent perturber son état thermique.

Le système de régulation, dont l'objectif est de rendre insensible aux occupants les variations climatiques externes, prendra partiellement ou totalement en compte les phénomènes météorologiques et les caractéristiques thermiques des locaux.

En outre, le comportement dynamique des locaux et des systèmes de traitement d'air, les exigences de confort, ainsi qu'une meilleure maîtrise des coûts impliquant une gestion rigoureuse des installations font de la régulation des systèmes de chauffage et de climatisation une discipline qui requiert les connaissances de spécialités aussi différentes que l'automatique, l'informatique, la thermique et la métrologie.

L'ère primaire du thermostat est révolue. Les régulateurs à actions proportionnelle, intégrale et dérivée dédiés aux applications de génie climatique se développent. Les systèmes de régulation s'intègrent dans des architectures de gestion technique centralisée englobant les fonctions de télécommande-télésurveillance, de contrôle et autocontrôle ou de télésuivi et comptabilité énergétique.

Avant de développer tous ces concepts, les notions concernant les principes généraux de la régulation seront rappelées, les différents capteurs et actionneurs rencontrés en chauffage et en climatisation seront mentionnés. Au-delà du simple catalogue de solutions types, la méthodologie générale de conception d'un ensemble de régulation, les solutions en matériels et logiciels seront traitées, de la simple régulation de la température d'un local à un système complexe piloté par une installation de gestion technique de bâtiment.

## 1. Rappels sur la commande d'un processus

Le lecteur se reportera utilement aux articles généraux *Principes des chaînes de régulation* [R 7 090] et *Chaînes de régulation types* [R 7 100], dans la rubrique Automatique du traité Informatique industrielle.

### 1.1 Régulation en boucle ouverte

La régulation d'un système consiste à trouver un moyen pour maintenir la grandeur réglée  $y(t)$  aussi voisine que possible de la valeur de consigne  $y_c$ .

Une première solution consiste à régler une fois pour toutes les commandes. Le réglage de la température de l'eau de la douche est un exemple de boucle ouverte (figure 1). Toutes variations externes (perturbations) comme la pression ou la température, sur l'une des arrivées d'eau, modifient la valeur de la grandeur réglée (température du mélange dans cet exemple), ce qui est douloureusement ressenti par l'usager.

Un autre exemple de régulation en boucle ouverte est représenté sur la figure 2. Le régulateur R règle la température du circuit d'eau à une valeur qui est fonction de la température extérieure en agissant sur la puissance du brûleur. Des variations de température intérieure seront observées si des perturbations viennent modifier l'équilibre du système : ensoleillement, apports internes, infiltration d'air, etc.

Dans une régulation en boucle ouverte, le signal de sortie ne réagit pas sur le signal d'entrée. C'est une régulation rapide, imprécise dans les systèmes subissant de fortes perturbations, mais stable.

## 1.2 Régulation en boucle fermée

Le seul moyen d'être sûr que la grandeur réglée rejoigne ou soit égale à la valeur de consigne est de la mesurer en permanence et de s'en servir pour le réglage. C'est pourquoi, dans une régulation en boucle fermée, la mesure directrice est la grandeur réglée (figure 3).

La prise en compte des facteurs perturbateurs (apports internes et externes ou déperditions) peut être réalisée à l'aide d'une réaction qui agit constamment sur la commande  $u(t)$  en fonction de l'écart  $e(t)$  qui existe entre le point de consigne et la valeur mesurée.

La régulation en boucle fermée applique donc au système un signal de commande de la forme :

$$u(t) = f[e(t), t]$$

avec  $e(t) = y_c - y(t)$ .

Dans l'exemple de la figure 3,  $y_c = \theta_c$  et  $y(t) = \theta_{int}(t)$ .

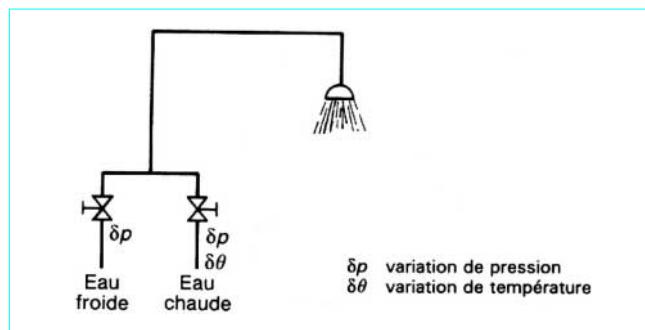


Figure 1 – Exemple de réglage d'organes de commandes (vannes) : système en boucle ouverte

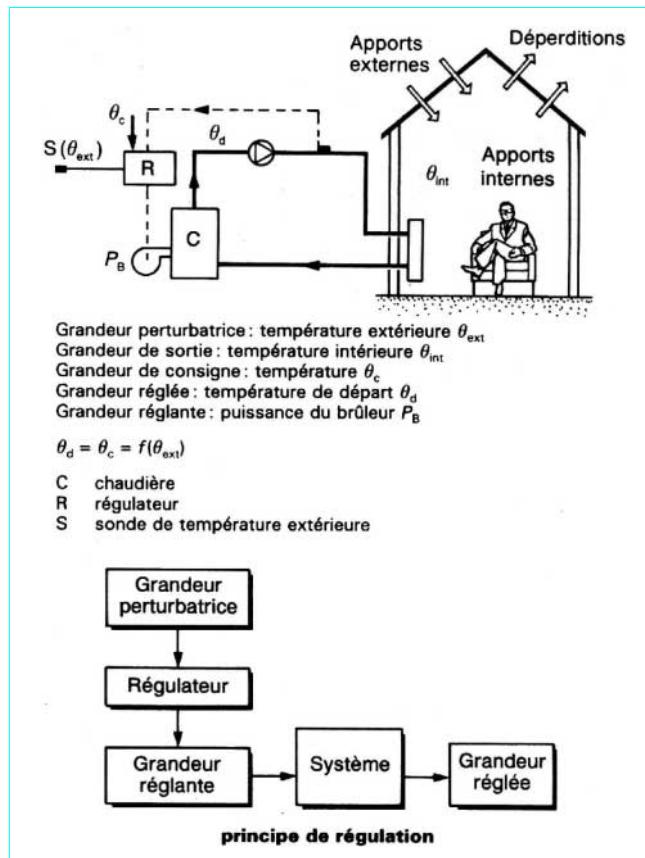


Figure 2 – Exemple de régulation en boucle ouverte

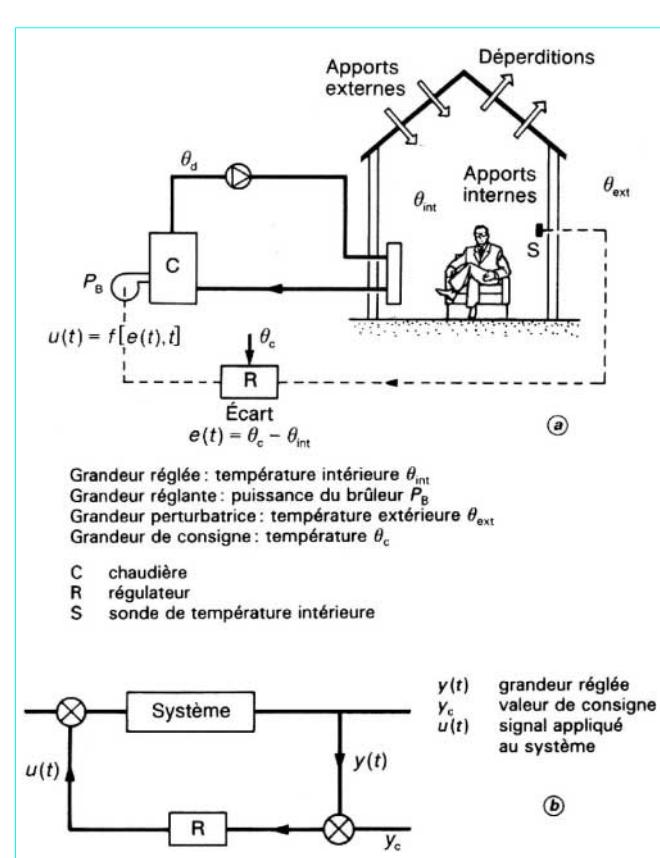


Figure 3 – Régulation en boucle fermée

Ce concept, le plus important en automatique, sera utilisé tout au long des paragraphes suivants.

Une représentation symbolique peut être faite pour tout système de régulation ; celle de la boucle fermée est donnée sur la figure 3b.

## 1.3 Différents modes de régulation

### 1.3.1 Régulation par tout ou rien

L'organe de commande ne peut occuper que deux positions : position ouverte ou position fermée. Le passage de l'une à l'autre est réalisé lors du franchissement du point de consigne. Pour éviter des phénomènes d'oscillations (appelés *pompage*), on introduit une plage neutre appelée aussi **différentiel** : le changement de position n'intervient qu'après un dépassement (en plus ou en moins) du point de consigne supérieur au demi-différentiel (figure 4).

### 1.3.2 Commande d'un processus

Un bâtiment ne réagit pas instantanément à une sollicitation qui peut être une variation des conditions climatiques extérieures ou un arrêt du système de chauffage. Les systèmes que l'ingénieur climaticien doit réguler présentent donc des **retards** (temps de réponse, délais).

Trois exemples de retard pouvant exister sur les installations, individuellement ou combinés entre eux, sont donnés ci-après.

■ **Retard introduit par l'inertie du bâtiment** : considérons, à titre d'exemple, un module de bâtiment (figure 5a) constitué d'une paroi échangeant et stockant de la chaleur. L'équation simplifiée du bilan thermique est donnée par la relation :

$$E(t) = GV[\theta_{int}(t) - \theta_{ext}(t)] dt + Mc_p d\theta$$

avec  $E$  énergie dissipée dans le système,

$GV$  paramètre caractéristique des déperditions,

$Mc_p$  paramètre caractérisant l'accumulation de chaleur dans la paroi.

Si l'on applique un échelon de puissance à l'intérieur du local, l'expression de la température intérieure s'écrit (les autres paramètres restant constants) :

$$\theta_{int}(t) = \theta_{int0} + \frac{E}{GV} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{GV}{Mc_p} t \right) \right]$$

avec  $\theta_{int0}$  température intérieure avant application de l'échelon de puissance.

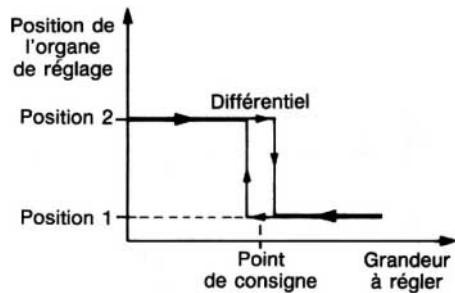


Figure 4 – Régulation par tout ou rien

Dans le cas d'une variation de température extérieure (de  $\theta_{ext0}$  à  $\theta_{ext1}$ ) sous forme d'un échelon, la température intérieure est donnée par la relation :

$$\theta_{int}(t) = \theta_{ext0} + (\theta_{ext1} - \theta_{ext0}) \exp \left( -\frac{GV}{Mc_p} t \right)$$

Dans les deux cas, la constante de temps  $GV/Mc_p$  est une caractéristique du bâtiment.

Des modélisations plus complètes permettent de connaître les flux thermiques en fonction des différentes excitations (température, flux solaire) et d'accéder ainsi à tous les calculs habituels en thermique des bâtiments.

La figure 5b montre l'évolution de la température intérieure d'un local à occupation intermittente pour une hypothèse de sollicitations extérieures constantes.

La température à l'intérieur du local est maintenue constante entre 8 et 18 h. À partir de 18 h, l'arrêt des émetteurs de chaleur conduit à un abaissement de la température intérieure que l'on peut distinguer selon deux phases :

— la *première phase* correspond à la décharge thermique des masses légères (air, mobilier, etc.) ; elle se traduit par une variation brusque de la température intérieure ;

— dans la *seconde phase*, les masses lourdes se déchargent, ce qui se traduit par une décroissance plus lente de la température intérieure ; le phénomène inverse s'observe à partir de 23 h, heure de la remise en service de l'installation (scénario 1) ; une seconde relance de puissance s'effectue à partir de 7 h pour obtenir la température souhaitée à l'arrivée des occupants (8 h). Un second scénario peut être imaginé en réduisant au maximum la température intérieure et en opérant une seule relance de puissance importante à partir de 5 h 30.

Le choix entre les deux scénarios dépend du coût des énergies qui peut être variable au cours de la journée. Le scénario 1 doit être utilisé lorsque l'énergie de nuit est moins coûteuse (énergie électrique), le scénario 2 doit être préféré lorsque le système fonctionne avec une énergie dont le coût est constant au cours de la journée car il minimise la consommation d'énergie.

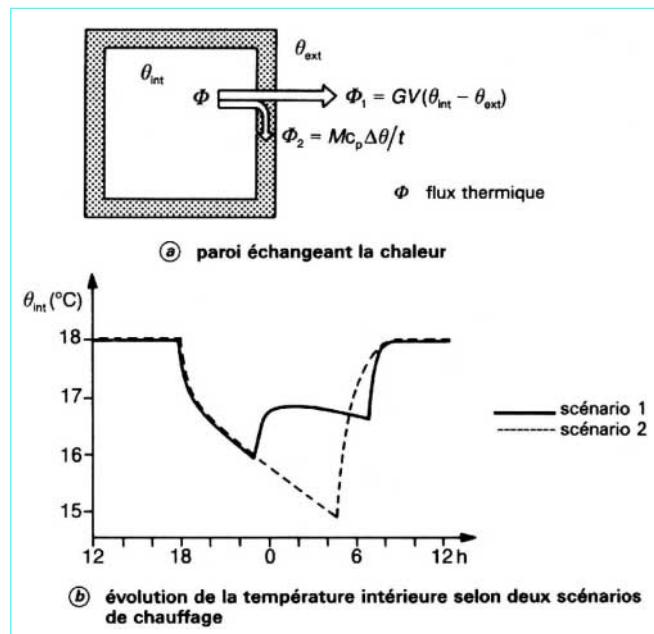


Figure 5 – Retard provoqué par l'inertie du bâtiment

■ **Retard dû à la distance sonde-actionneur** : la vitesse de circulation d'un liquide à l'intérieur d'une canalisation varie entre 0,5 et 2 m/s. L'effet de l'actionneur n'est donc pas détectée instantanément par le capteur, mais au bout d'un temps que l'on peut estimer à environ 1 seconde par mètre linéaire de canalisation (figure 6a).

Ce retard, qui rend la régulation *flottante*, car le régulateur ne mesure pas instantanément son effet, peut être utilisé pour amortir la commande de systèmes à échelon de puissance. Les pompes à chaleur sont parfois commandées à partir de la température de retour du réseau.

■ **Retard introduit par l'inertie de la sonde de température** : une sonde de température se comporte comme un système du premier ordre possédant une résistance et une capacité. Lorsque la sonde est soumise à une variation brusque de température (figure 6b), la réponse du détecteur évolue selon une loi exponentielle. Une sonde placée dans un liquide réagit plus vite que la même sonde placée dans un gaz. En effet, le coefficient de convection d'un gaz est environ 1 000 fois plus faible que celui d'un liquide.

### 1.3.2.1 Commande proportionnelle P

Pour réguler le système de la figure 3a, examinons les effets d'une contre-réaction agissant en sens inverse et proportionnelle à l'écart constaté, contre-réaction telle que :

$$u(t) = u_m + K e(t)$$

avec  $K$  constante, appelée *gain du régulateur*,

$e(t) = y_c - y(t)$  écart fonction du temps entre la valeur de consigne et la valeur mesurée,

$u_m$  constante de « décalage », appelée aussi *biais* du régulateur.

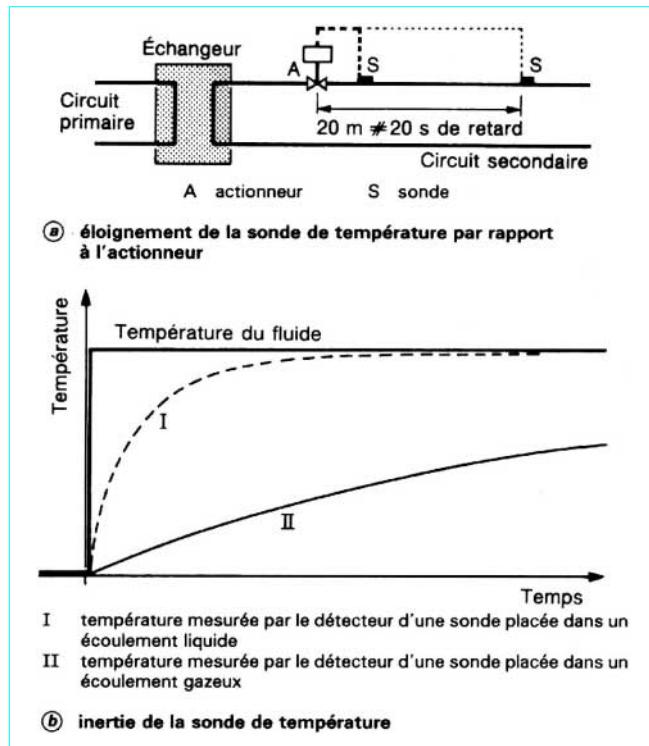


Figure 6 – Retard dû à la sonde de température

L'équation du système bouclé avec retard (figure 7) s'écrit :

$$y(t) = u(t - T) = u_m + K y_c - K y(t - T)$$

avec  $T$  constante de temps du système à réguler, ou encore en portant cette valeur dans la relation définissant l'écart :

$$e(t) + K e(t - T) = y_c - u_m$$

Le régime d'oscillations entretenues est obtenu pour un écart évoluant selon une fonction de la forme :

$$e(t) = \sin(\omega t + \varphi)$$

Une solution est obtenue pour les valeurs suivantes :

$$y_c - u_m = 0, \quad K = 1 \quad \text{et} \quad \omega T = \pi$$

La période des oscillations entretenues est de  $2T$ .

En reprenant l'**exemple** de la figure 6, le système ayant un retard de 20 s présentera une période d'oscillations de 40 s.

Les oscillations sont amorties pour  $K < 1$  ; en effet :

$$e(t) = K^{t/T} \sin(\pi t/T - \varphi)$$

est solution de l'équation du système bouclé.

Dans le cas où  $K > 1$ , les oscillations croissent exponentiellement. La figure 8 montre l'évolution de l'écart  $e(t)$  en fonction du temps pour différentes valeurs de  $K$ .

Dans ce qui précède, nous avions par hypothèse  $y_c = u_m$ .

Si le point de consigne  $y_c$  est modifié en  $(y_c + \delta y_c)$  sans que le biais du régulateur  $u_m$  soit changé, la valeur asymptotique de la grandeur réglée s'écrit :

$$y(t \rightarrow \infty) = u_m + K(y_c + \delta y_c) - Ky(t \rightarrow \infty)$$

L'écart imposé par le système de régulation se traduira par une *erreur* sur le système régulé. On conservera ce terme d'erreur dans la suite de l'article.

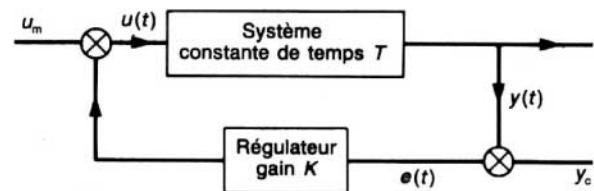


Figure 7 – Régulation à commande proportionnelle

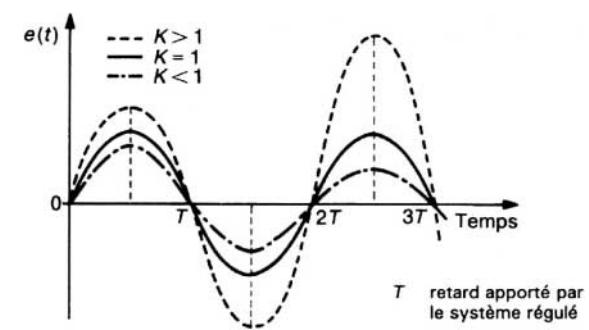


Figure 8 – Évolution de l'écart pour différentes valeurs du gain  $K$

L'erreur asymptotique qui en résulte se déduit immédiatement :

$$e(t \rightarrow \infty) = (y_c + \delta y_c) - y(t \rightarrow \infty) = y_c/(1 + K)$$

On se trouve donc confronté au dilemme suivant :

- un comportement du système régulé stable et bien amorti conduit à choisir  $K$  le plus petit possible et inférieur à 1 ;
  - une bonne précision implique de choisir  $K$  le plus grand possible pour minorer le facteur d'erreur asymptotique  $1/(1 + K)$  ;
- un bon compromis consiste à prendre  $K = 0,5$ .

Un moyen de réduire l'erreur de réglage consiste à introduire des fonctions complémentaires de type intégral et dérivée (§ 1.3.2.2 et 1.3.2.4).

À titre d'**exemple**, prenons la régulation d'une chaudière produisant de la vapeur. La variation de puissance s'effectue en fonction de la pression au départ du réseau (figure 9).

La figure 10a montre l'évolution du signal à la sortie du régulateur et la position de l'organe de réglage en fonction de la valeur de la grandeur réglée (la pression).

La régulation proportionnelle ne conduit à la valeur de consigne que pour une seule valeur de la grandeur réglée. Pour toutes les autres valeurs, elle maintient un écart permanent qui peut être réduit en agissant sur la bande proportionnelle (constante  $K$ , figure 10b).

La valeur de consigne peut être ajustée pour les besoins du processus en agissant sur le biais du régulateur  $u_m$ .

### 1.3.2.2 Commande intégrale

Contrairement au régulateur proportionnel qui réagit instantanément à une sollicitation, le régulateur intégral (figure 11) engendre un signal de commande de la forme :

$$u(t) = u_m + \frac{1}{\tau_r} \int_0^t e(t) dt$$

avec  $e(t) = y_c - y(t)$ ,

$\tau_r$  temps d'intégration (représentant un temps de recalage).

L'équation du système bouclé avec retard s'écrit :

$$y(t+T) = u(t) = u_m + \frac{1}{\tau_r} \int_0^t [y_c - y(t)] dt$$

ou encore :

$$\frac{d}{dt} e(t+T) + \frac{1}{\tau_r} e(t) = 0$$

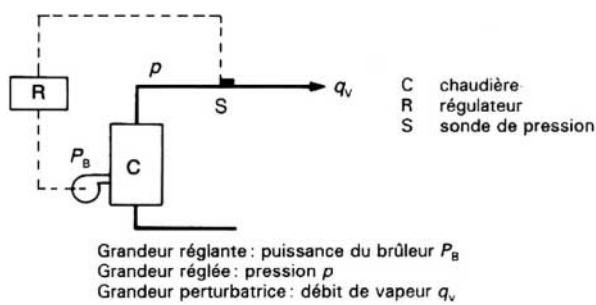


Figure 9 – Exemple de régulation d'une chaudière à vapeur

Le régime d'oscillations entretenues sera obtenu pour un écart ayant une expression de la forme :

$$e(t) = \sin(\omega t + \varphi)$$

La solution est obtenue pour les valeurs suivantes :

$$\omega = \frac{1}{\tau_r}$$

$$\omega T = \frac{\pi}{2} \text{ soit } 1/\omega = \frac{2T}{\pi}$$

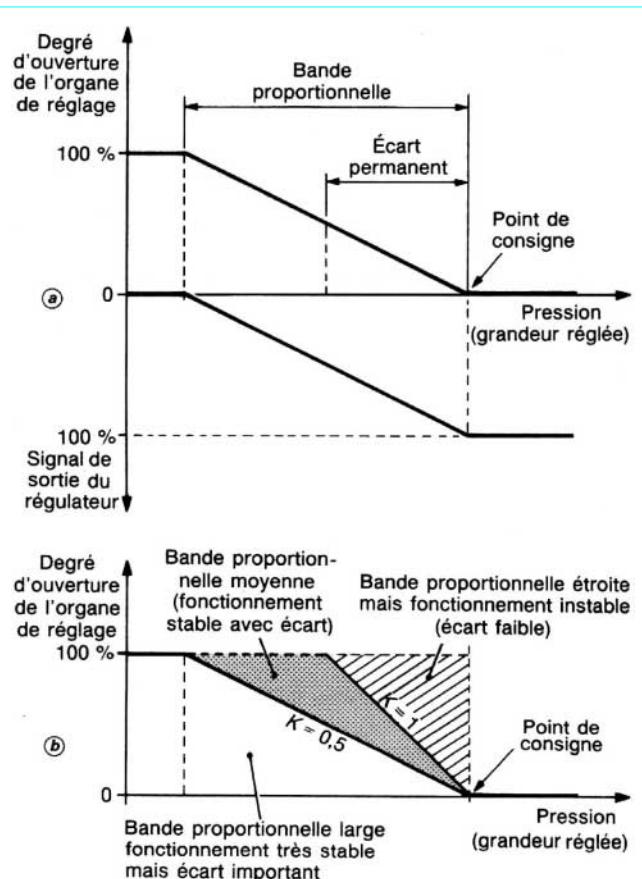


Figure 10 – Commande proportionnelle : évolution du signal à la sortie du régulateur et position de l'organe de réglage en fonction de la pression

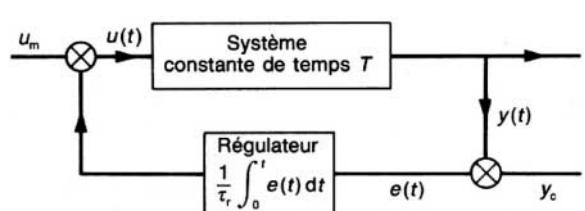


Figure 11 – Régulation à commande intégrale

La période des oscillations est de  $4T$ .

**Exemple :** ainsi, si le système commandé présente un retard  $T$  de 20 s (figure 6), ce qui correspond par exemple à un éloignement d'une sonde de température de 20 m environ, on obtient des oscillations entretenues d'une période de 80 s si le temps d'intégration  $\tau_r$  du régulateur est égal à  $27/\pi$ , soit dans l'exemple  $\tau_r = 12,7$  s.

Les oscillations seront amorties en augmentant le temps d'intégration  $\tau_r$ .

Dans le cas d'un régulateur intégral, l'erreur asymptotique  $e(t \rightarrow \infty)$  est nulle, donc  $y(t \rightarrow \infty) = y_c$ .

La régulation intégrale est peu sensible aux perturbations ; par contre, elle est plus lente dans sa réponse comparée à celle d'une régulation proportionnelle,  $4T$  au lieu de  $2T$ .

### 1.3.2.3 Commande proportionnelle et intégrale PI

Les qualités intrinsèques des régulations proportionnelles et intégrales conduisent à les coupler pour obtenir une régulation proportionnelle et intégrale PI.

Le signal de commande est alors de la forme :

$$u(t) = u_m + Ke(t) + \frac{1}{\tau_r} \int_0^t e(t) dt$$

La périodicité est comprise entre  $2T$  et  $4T$  et dépend du choix de  $K$  et de  $\tau_r$ .

L'action intégrale d'un régulateur est relativement lente. Lorsqu'elle est associée à une action proportionnelle, elle permet un réglage précis sans écart permanent par rapport au point de consigne ; la persistance d'un écart est corrigée par l'action intégrale (erreur asymptotique nulle).

La figure 12 illustre la réponse à une sollicitation. Lorsque l'état d'équilibre est modifié sous l'effet d'une perturbation à l'instant  $t_0$ , la position de l'organe de réglage est modifiée immédiatement par l'action proportionnelle. L'écart permanent dû à l'action proportionnelle P est ensuite réduit par l'action intégrale qui ajuste la grandeur réglée au point de consigne.

### 1.3.2.4 Commande dérivée

L'action dérivée d'un régulateur engendre un signal de commande de la forme :

$$u(t) = \frac{dy(t)}{dt} \text{ ou encore } y(t) = \int_0^t u(t) dt$$

Le signal de sortie est donc l'intégrale du signal d'entrée.

Cette régulation est adaptée pour la commande des systèmes à stockage (ou capacitifs).

L'équation du système bouclé régulant une capacité par une commande proportionnelle s'écrit :

$$\frac{de(t)}{dt} + Ke(t) = 0$$

soit  $e(t) = \exp(-Kt) + e(t=0)$ .

Le bouclage proportionnel autour d'un système capacitif est réglé par une équation différentielle à coefficients constants.

L'action dérivée d'un régulateur est proportionnelle à la vitesse de variation de l'écart. Si l'écart est constant, elle est nulle. Ce type de régulation ne peut donc pas être utilisé seul. En revanche, la commande proportionnelle et intégrale peut devenir instable lorsque l'action intégrale est trop importante. Cet inconvénient est évité en ajoutant une action dérivée (figure 13). L'action dérivée permet de « lutter » efficacement contre les perturbations brutales.

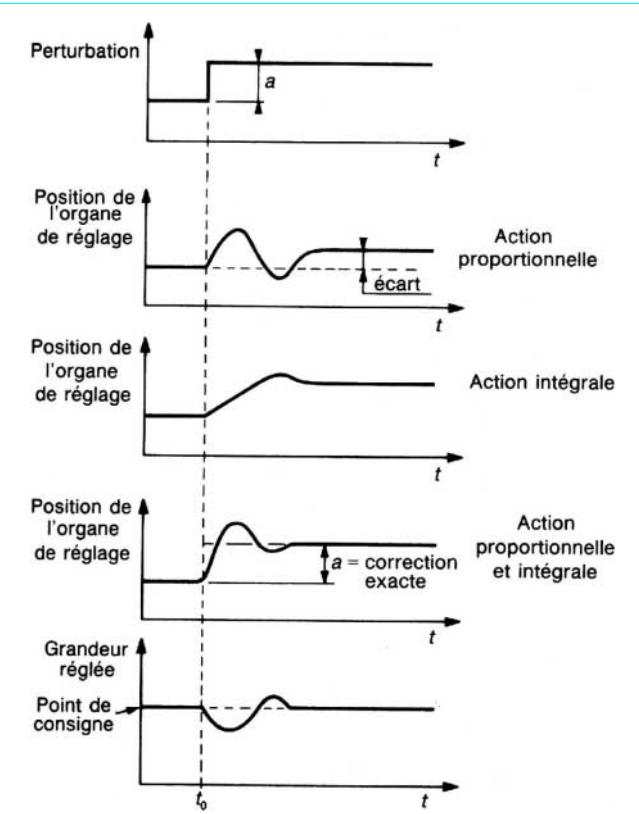


Figure 12 – Régulation proportionnelle et intégrale PI : évolution des paramètres de réglage

### 1.3.2.5 Commande proportionnelle, intégrale et dérivée PID

Un régulateur PID engendre un signal de commande de la forme :

$$u(t) = u_m + Ke(t) + \frac{1}{\tau_r} \int_0^t e(t) dt + \tau_d \frac{de(t)}{dt}$$

avec  $K = 100/B$ ,  $B$  étant la bande proportionnelle exprimée en pour-cent (figure 10),

$\tau_r$  temps d'intégration (ou de recalage),

$\tau_d$  temps de dérivation.

Ce type de régulation, courant dans l'industrie, commence à être utilisé dans les systèmes de chauffage des locaux.

Lorsqu'un système est soumis à une perturbation brutale à l'instant  $t_0$ , l'action dérivée fournit immédiatement le principal de la correction. Cette dernière est beaucoup plus importante que celle apportée par l'action proportionnelle, mais est très brève et s'annule rapidement. À partir de ce moment, l'action proportionnelle se substitue à l'action dérivée et il en résulte un écart permanent qui sera ensuite annulé par l'action intégrale (figure 13).

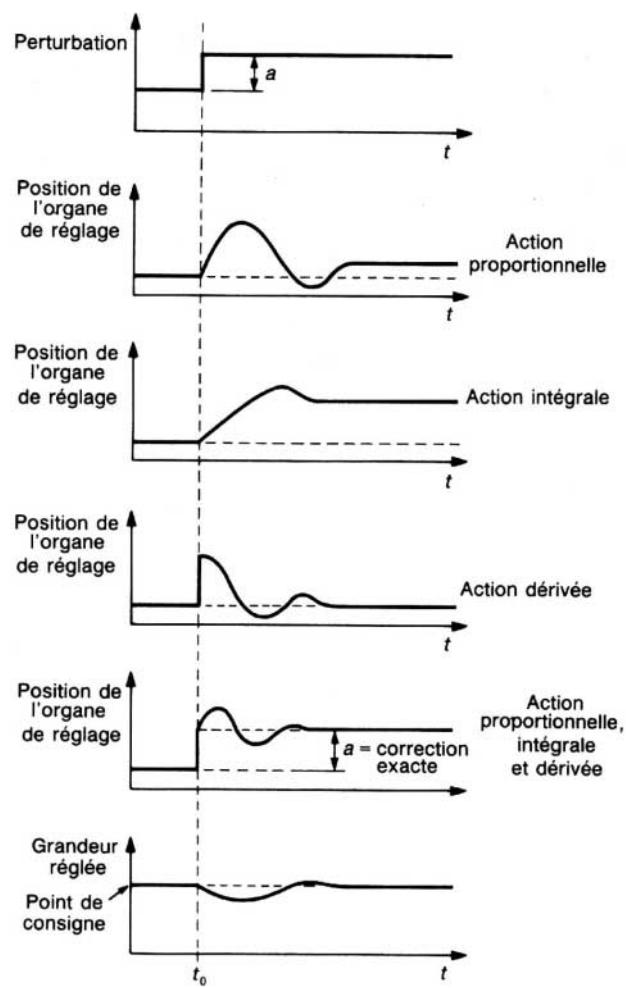


Figure 13 – Régulation proportionnelle, intégrale et dérivée PID : évolution des paramètres de réglage

## 2. Éléments constituant une chaîne de régulation

Une chaîne de régulation est composée de trois types d'organes :

- les organes de détection ou **capteurs** ;
- les organes de commande ou **régulateurs** ;
- les organes de réglage ou **actionneurs**.

### 2.1 Capteurs

Les **capteurs**, appelés parfois **sondes** ou **détecteurs**, convertissent une grandeur physique (pression, température, etc.) en une grandeur utilisable par des appareils de traitement et de conditionnement du signal.

Les signaux délivrés peuvent être électriques (tension, courant), pneumatiques ou de déplacement (dilatation).

#### 2.1.1 Capteurs de température

La température est une grandeur physique très utilisée par le thermicien. Son repérage s'effectue par des capteurs à variation de résistance, de dilatation de solide ou de liquide, de tension de vapeur, ou encore par des couples thermoélectriques ou des semi-conducteurs.

■ **Résistances** : la résistivité électrique  $\rho$  des corps solides varie en fonction de la température  $\theta$  selon la loi :

$$\rho_\theta = \rho_{\theta_0}(1 + \alpha_1 \theta + \alpha_2 \theta^2)$$

avec  $\alpha_1, \alpha_2$  constantes caractérisant l'évolution de la résistivité des solides,

$\theta_0$  température de référence.

$\alpha_2 \approx 10^{-6} \text{ K}^{-2}$  montre la faible influence du terme du second degré, on peut donc écrire :

$$\theta \approx \frac{\rho_\theta - \rho_{\theta_0}}{\alpha_1 \rho_{\theta_0}}$$

Cette propriété est utilisée pour convertir la température en une grandeur électrique.

Les éléments les plus fréquemment rencontrés sont les résistances métalliques à fils de platine et, dans quelques cas, à fils de nickel (figure 14). Les résistances métalliques seront préférées aux thermistances pour les applications nécessitant une meilleure précision de mesure (article *Thermomètres à résistance métallique* [R 2 570] dans le traité Mesures et Contrôle).

■ **Dilatation de solide ou de liquide et variation de tension de vapeur** : la dilatation de solide est réservée à la commande des organes de commutation (thermostats ou aquastats) ; les systèmes à bilames (figure 15a) sont les plus répandus.

La dilatation de liquide ou la variation de tension de vapeur sont utilisées pour commander des organes de commutation ou de déplacement de tige, en agissant, par exemple, sur les axes des sièges de vannes comme dans les robinets thermostatiques (figure 15b).

#### 2.1.2 Capteurs de pression

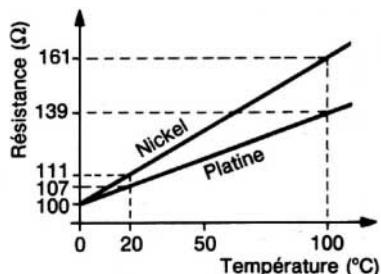
La pression, à l'intérieur d'un circuit, est généralement détectée par une membrane ou un soufflet déformable qui agit sur une transmission mécanique dans le cas d'une commande par tout ou rien (**pressostat**), ou sur un organe électronique (**capacité ou jauge de contrainte**) lorsque le déplacement de la membrane est transformé en signal électrique.

Le lecteur se reportera utilement à l'article *Pressions rapidement variables* [R 2 090] dans le traité Mesures et Contrôle.

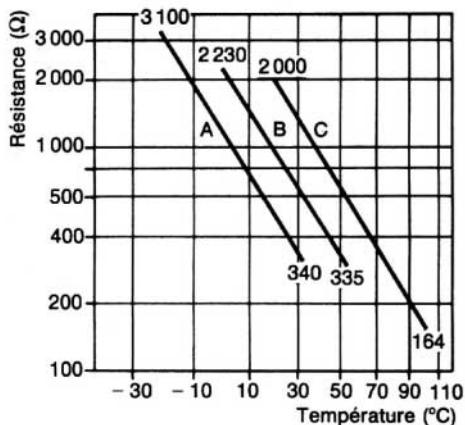
### 2.2 Régulateurs

Un régulateur est un appareil qui commande un actionneur à partir des informations issues des organes de détection. Pour ce faire :

— il compare une information (signal) fournie par un capteur (sonde ou thermostat) à une valeur de référence (consigne) ; cette comparaison peut être réalisée par une balance mécanique (forces), électrique (pont de Wheatstone) ou par un comparateur électronique ;



(a) résistance à fils de platine ou de nickel



(b) résistance de trois thermistances

Figure 14 – Capteurs de température : résistances à fils de platine (ou nickel) et thermistances : caractéristiques

- il amplifie et traite le signal en fonction de l'écart constaté (fonctions proportionnelles, intégrales et dérivées, § 1.3.2) ;
- il transforme le signal en ordre de commande (électrique ou mécanique) utilisable par l'actionneur.

Un exemple de régulateur est donné dans la figure 16.

## 2.3 Actionneurs

L'ordre de commande issu du régulateur agit sur un actionneur composé de deux parties : l'**organe de commande (servomoteur)** et l'**organe de réglage (vannes ou volets)** qui agit sur le vecteur énergétique.

Les différents types d'actionneurs existants sont présentés dans ce paragraphe, mais leurs critères d'évaluation sont renvoyés au paragraphe 6.

### 2.3.1 Actionneurs destinés à la commande d'un fluide

Les servomoteurs peuvent être commandés par une énergie externe issue du régulateur (électrique, pneumatique ou hydraulique) ou par un fluide automoteur comme dans, par exemple :

- le régulateur de température avec vanne de réglage et thermostat incorporés (robinet thermostatique, figure 17a) ;
- le régulateur de pression différentielle (figure 17b) ;
- le régulateur de débit ;
- le thermostat de sécurité.

Les développements suivants sont consacrés aux actionneurs à commande externe.

#### 2.3.1.1 Organes de commande

■ **Servomoteurs électriques** : ils sont généralement à deux sens de marche (rotation), ce qui permet une action directe et inverse (figure 16). Dans certaines applications tout ou rien, une des actions peut être obtenue par un ressort de rappel.

La bobine d'une vanne électromagnétique constitue un exemple de moteur à simple action (figure 18).

Certains servomoteurs sont équipés d'un système de retour à zéro par commande électrique ou mécanique (ressort, § 6). Cette fonction est utilisée pour des raisons de sécurité.

■ **Servomoteurs commandés par un fluide (air, eau, huile)** : ils fournissent un mouvement de translation obtenu par l'action du fluide. Sur un système à membrane, le mouvement inverse est obtenu par l'action d'un ressort (figure 19).

La simplicité de ces servomoteurs et l'absence de contact électrique permet une utilisation en atmosphère difficile (déflagrante ou poussiéreuse). La nécessité de disposer d'une station de conditionnement du fluide implique un nombre minimal de servomoteurs à raccorder (de l'ordre de 20 à 50 selon les applications rencontrées dans les systèmes de chauffage et de climatisation).

#### 2.3.1.2 Organes de réglage

Les organes de réglage rencontrés sont les vannes, les registres et les clapets.

##### 2.3.1.2.1 Vannes

**Nota** : le lecteur se reportera utilement à l'article *Robinetterie industrielle* [BM 6 900] dans le traité Génie mécanique.

■ **Vannes tout ou rien** : elles sont destinées à ouvrir ou fermer des circuits. Leurs pertes de charge sont relativement faibles en position ouverte car elles sont généralement à passage direct.

La sélection de ces vannes s'effectue sur le critère de l'étanchéité demandée en position fermée.

On distingue :

- les **vannes à opercules**, constituées essentiellement d'un opercule (simple ou double) coulissant entre deux sièges parallèles ou obliques. Elles peuvent, dans certains cas, être motorisées et équipées de contact fin de course. Leur usage en automatisme reste limité ;

- les **vannes « papillon »** : elles comportent un corps dont l'orifice de passage est dégagé par la rotation d'un quart de tour d'un papillon usiné (figure 20). Leur emploi était généralement limité aux applications d'obturation ne nécessitant pas de manœuvres trop fréquentes. Cependant, la technologie de ces vannes a considérablement évolué et la conception de nouveaux sièges permet d'assurer une étanchéité bidirectionnelle pour toutes les classes de pression rencontrées en chauffage et en climatisation. La motorisation de ces vannes est envisageable ; des contacts de fin de course et des potentiomètres de recopie permettent de connaître la position du papillon ;

- les **vannes à tournant sphérique** : le papillon est remplacé par une sphère en acier inoxydable ou en laiton chromé. La portée entre la vanne et la sphère est plus importante que dans le cas des vannes papillon, ce qui leur confère une meilleure étanchéité.

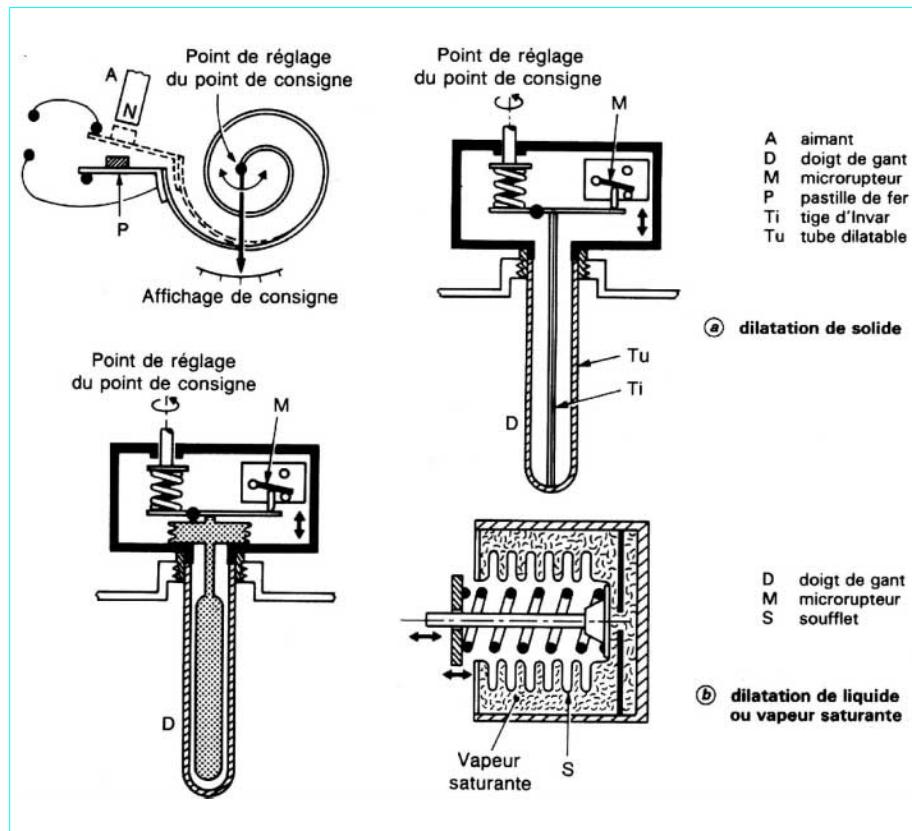


Figure 15 – Capteurs de température : dilatation de solide ou de liquide, ou vapeur saturante

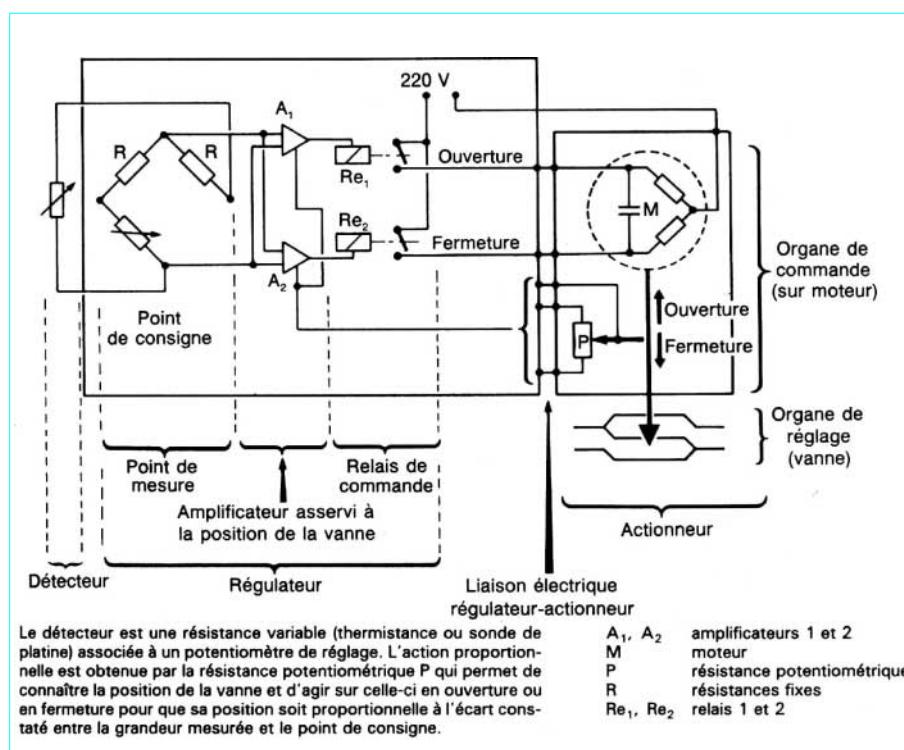


Figure 16 – Régulateur électrique à action proportionnelle

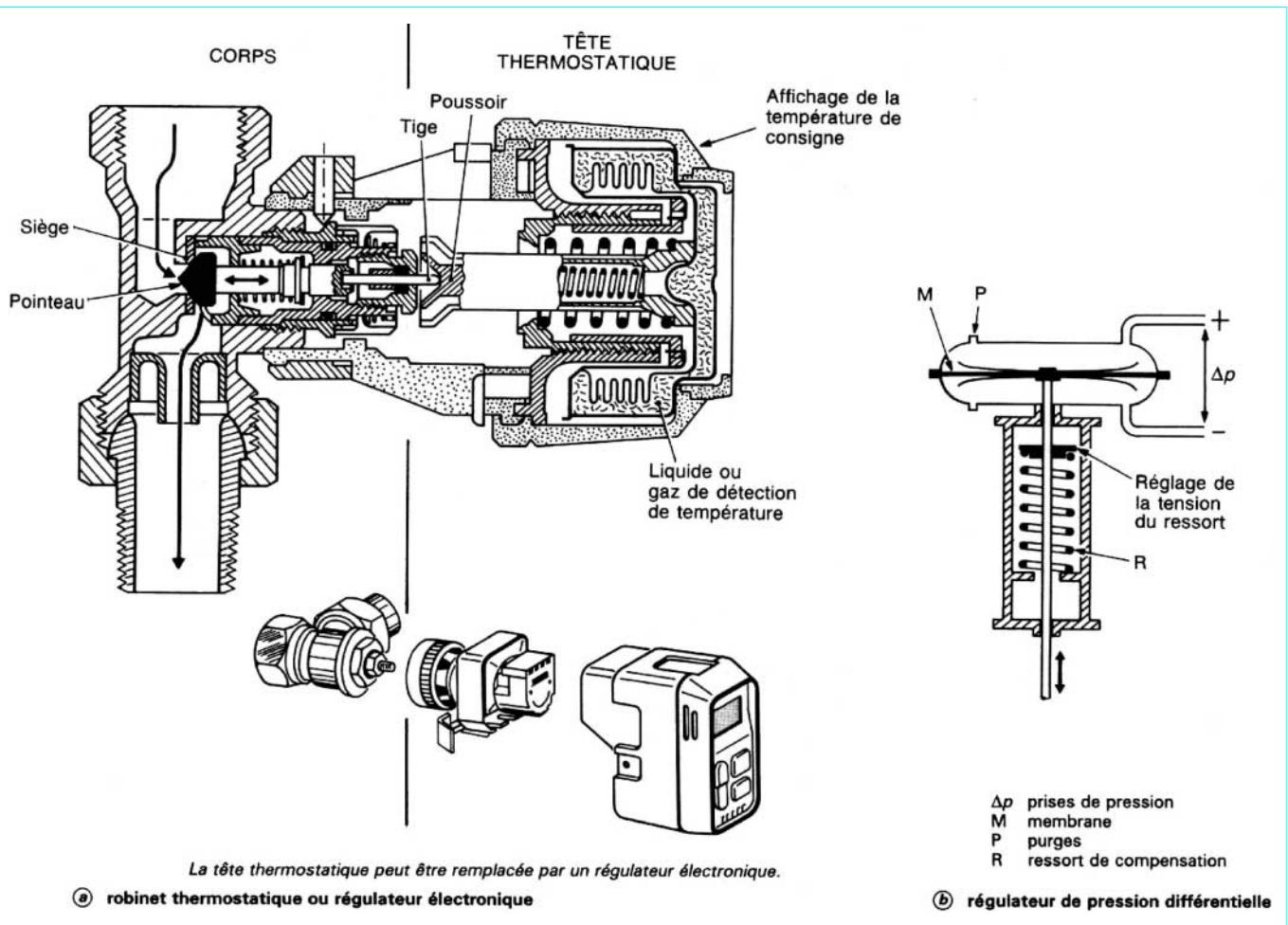


Figure 17 – Régulateurs commandés par un fluide automoteur

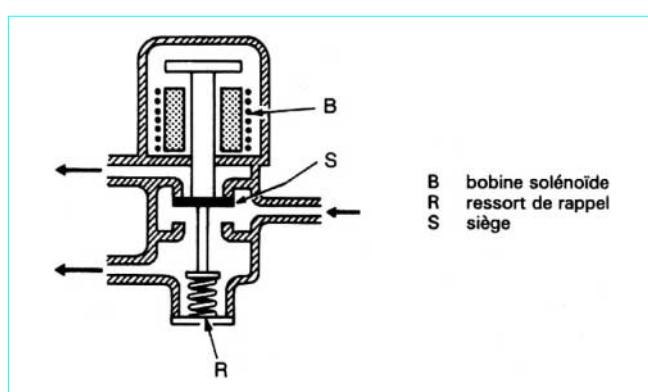


Figure 18 – Servomoteurs électriques : schéma de principe d'une vanne électromagnétique

■ **Vannes modulantes** : elles agissent sur l'écoulement du fluide et modifient son débit en créant une chute de pression selon la relation :

$$\Delta p = K \frac{\rho v^2}{2}$$

avec  $\Delta p$  (Pa) chute de pression,  
 $v$  (m/s) vitesse d'écoulement du fluide à travers la vanne,  
 $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) masse volumique du fluide.

Le dimensionnement de ces vannes s'effectue au moyen du coefficient de débit  $K_v$ , représentant la quantité d'eau qui s'écoule, vanne ouverte, pour une pression différentielle de 1 bar. Les constructeurs de vannes fournissent les valeurs des coefficients de débit, chaque coefficient étant associé à un diamètre nominal. Des abaques (figure 21) permettant leur détermination à partir du débit maximal circulant dans la vanne et de la chute de pression admissible sont souvent proposées. La valeur du coefficient  $K_v$  est donnée par la relation :

$$K_v = \frac{Q_{\max}}{p_{\text{amont}} - p_{\text{aval}}}$$

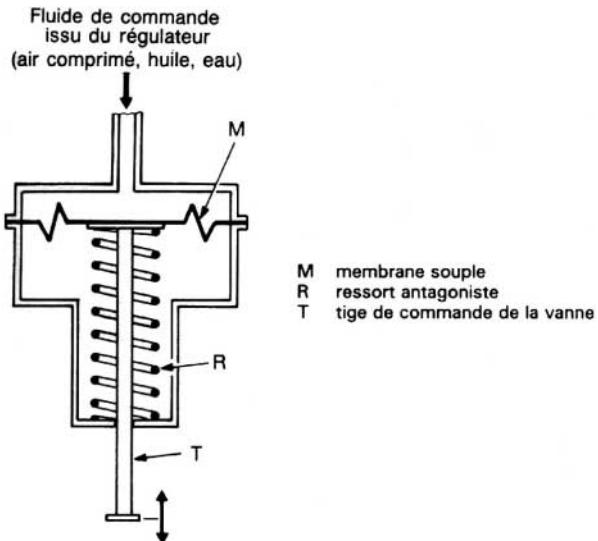


Figure 19 – Servomoteurs commandés par un fluide externe

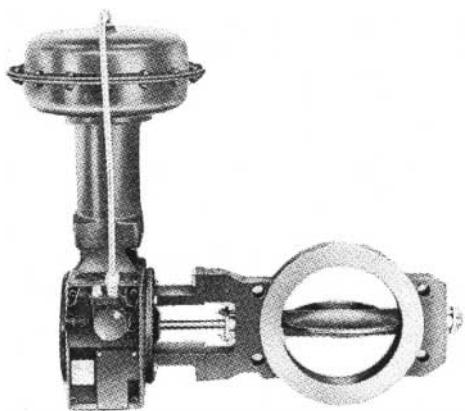


Figure 20 – Vanne papillon (doc. Fisher Controls)

Lorsque le coefficient  $K_v$  est déterminé, le diamètre nominal de la vanne présentant un coefficient constructeur  $K_{vc}$  immédiatement inférieur doit être sélectionné.

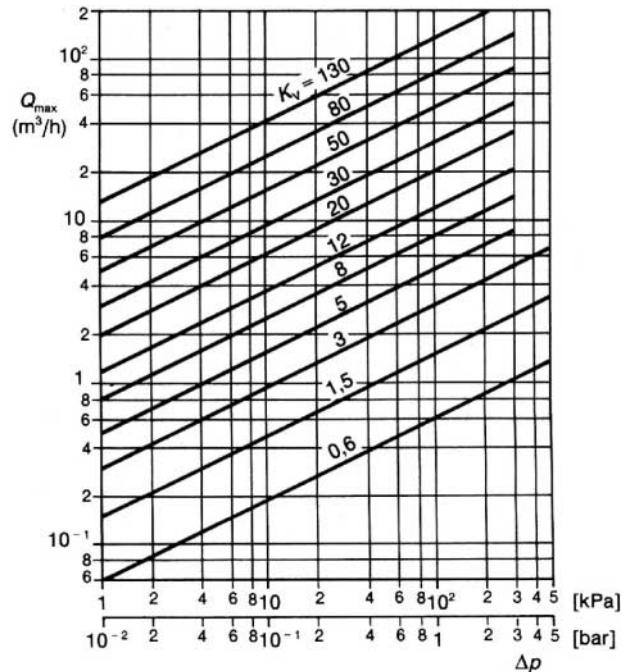
Une vanne de réglage doit pouvoir imposer ses caractéristiques au circuit à réguler ; cet effet « d'autorité » peut être caractérisé par le facteur  $F_a$ , rapport entre la chute de pression due à la vanne et celle existante dans le circuit, vanne incluse :

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

avec  $\Delta p_v$  pertes de charge par la vanne ( $p_{\text{amont}} - p_{\text{aval}}$ ),

$\Delta p_c$  pertes de charge du circuit.

Pour assurer une bonne « autorité », le facteur  $F_a$  doit être compris entre 0,3 et 0,5.



A chaque valeur du coefficient de débit  $K_v$ , un diamètre de vanne est associé.

Figure 21 – Abaques de coefficients de débit  $K_v$  permettant le choix de vannes modulantes 3 voies  
(d'après doc. Stäfa Control System)

Le coefficient de débit peut être exprimé en fonction du débit, de la chute de pression dans le circuit et du facteur d'autorité, soit :

$$K_v = \frac{Q_{\text{max}}}{\frac{F_a}{1 - F_a} \Delta p_c}$$

Les types de vannes modulantes les plus couramment utilisés (figure 22) sont :

— les *vannes à soupape*, qui comportent un clapet s'appuyant sur un siège ; elles sont adaptées à tout fluide à condition que la nature des matériaux soit compatible avec le fluide. Elles présentent une bonne étanchéité en positions extrêmes (l'une des voies étant totalement fermée) ;

— les *vannes à secteur*, qui n'assurent pas une bonne étanchéité en position fermée ; elles conviennent cependant dans des applications de régulation par répartition : par exemple, une régulation de température de départ d'eau d'un réseau de chauffage par mélange des départs et retours.

Les vannes 3 voies peuvent être montées soit en mélange, soit en répartition (figure 23). Les vannes 2 voies sont souvent issues des mêmes fabrications que les vannes 3 voies en obturant une des 3 voies.

### 2.3.1.2.2 Registres et clapets

Les registres sont utilisés pour régler des débits de fluide à l'état gazeux. Ils s'insèrent dans des réseaux de gaines ou dans des caissons de traitement d'air.

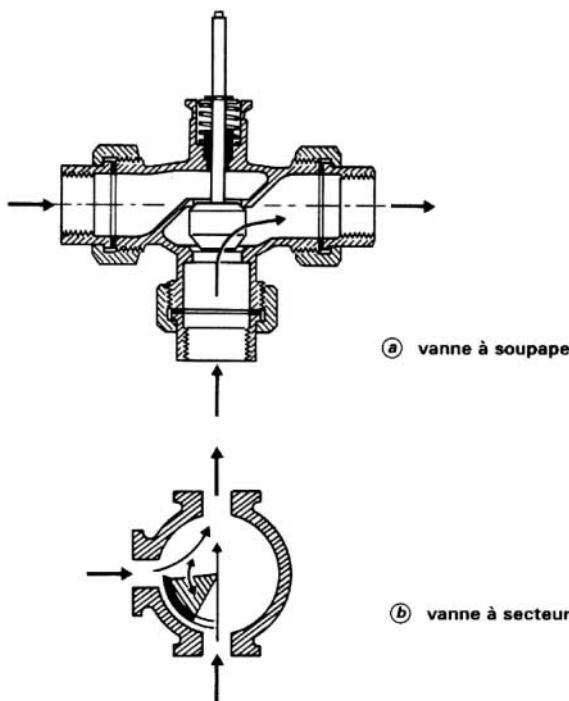


Figure 22 – Vannes modulantes 3 voies

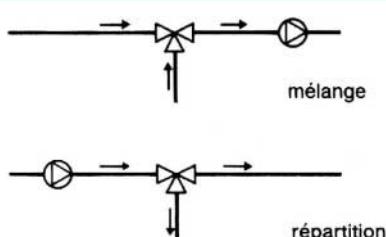


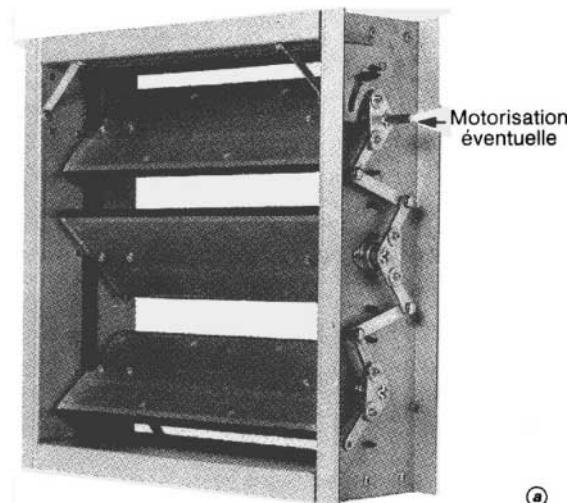
Figure 23 – Vannes 3 voies montées soit en mélange, soit en répartition

Dans ces registres, les volets sont montés généralement en opposition (figure 24a) et reliés entre eux par l'intermédiaire d'un système d'emballement qui peut être motorisé. Un exemple de caractéristique aérodynamique d'un registre de réglage en fonction de l'inclinaison des volets est présenté sur la figure 24b.

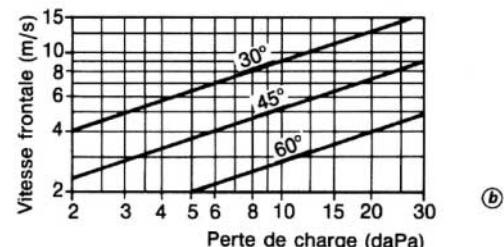
Les clapets sont utilisés pour des fonctions tout ou rien de pleine ouverture ou de pleine fermeture.

### 2.3.2 Actionneurs destinés à la commande d'un courant électrique

Lorsque l'électricité est utilisée comme vecteur énergétique, différents actionneurs sont employés. Ils agissent généralement en tout ou rien (vannes de courant) sur le circuit électrique, avec une vitesse de commutation plus ou moins grande.



Volets: profilés à déplacement opposé  
Températures d'utilisation possibles: - 20°C à + 120 °C  
Fuites: environ 10 m³/h pour un registre de 1 m² soumis à une pression de 100 Pa



coefficient de perte de charge singulière pour registre ouvert installé sur un réseau et raccordé en amont et en aval ( $\zeta = 0,2$ )

Figure 24 – Exemple de registre à étanchéité renforcée type RE  
(doc. La Tôlerie Industrielle)

On distingue les actionneurs à commande mécanique : **contacteurs relais** et les actionneurs à commande électronique : **thyristors, triacs et transistors** (figure 25).

#### 2.3.2.1 Contacteurs

Les contacteurs sont des appareils électriques capables de couper, d'établir et de supporter le courant nominal parcourant un circuit, y compris lors de surcharges de service. Ils sont constitués d'un jeu de contacts et d'une bobine de commande.

Des catégories d'emploi normalisées fixent les valeurs de courant que le contacteur peut établir ou couper. Elles dépendent :

- de la nature du récepteur contrôlé : moteur à cage ou à bagues, résistances, bobines d'induction ;
- des conditions de fonctionnement et d'environnement.

#### 2.3.2.2 Thyristors et triacs

Le thyristor est un semi-conducteur agissant comme un interrupteur unidirectionnel dont la fermeture est commandable.

En l'absence d'ordre de fermeture, le thyristor est bloqué et est équivalent à un interrupteur ouvert. Il peut être rendu passant au moyen d'une impulsion électrique au niveau de sa gâchette.

Pour contrôler l'alimentation électrique alternative d'une charge, on peut utiliser deux thyristors montés en parallèle et inversés ; on appelle communément cette association *montage « tête-bêche » ou triac* qui permet de contrôler le passage du courant dans les deux sens.

La vitesse de commutation élevée des thyristors provoque, lorsqu'ils sont commutés pour des valeurs non nulles de la tension, des parasites électromagnétiques qui peuvent perturber le réseau d'alimentation électrique. Pour éviter cet inconvénient, on utilise un circuit électronique qui assure la commutation des thyristors seulement au passage à zéro de la tension d'alimentation (régulation par train d'ondes). On réalise ainsi une unité de puissance à thyristors appelée parfois *gradateur de puissance*.

*Fonctionnement par train d'ondes* : cette régulation consiste à délivrer une série d'alternances complètes sur la charge (thermoplongeurs par exemple) pendant la durée d'un cycle donné (figure 26).

Ainsi, pour faire fonctionner un thermoplongeur à 25 % de sa puissance, il suffit de commander la fermeture des thyristors pendant un quart de la durée du cycle qui est généralement comprise entre 0,6 et 5 s.

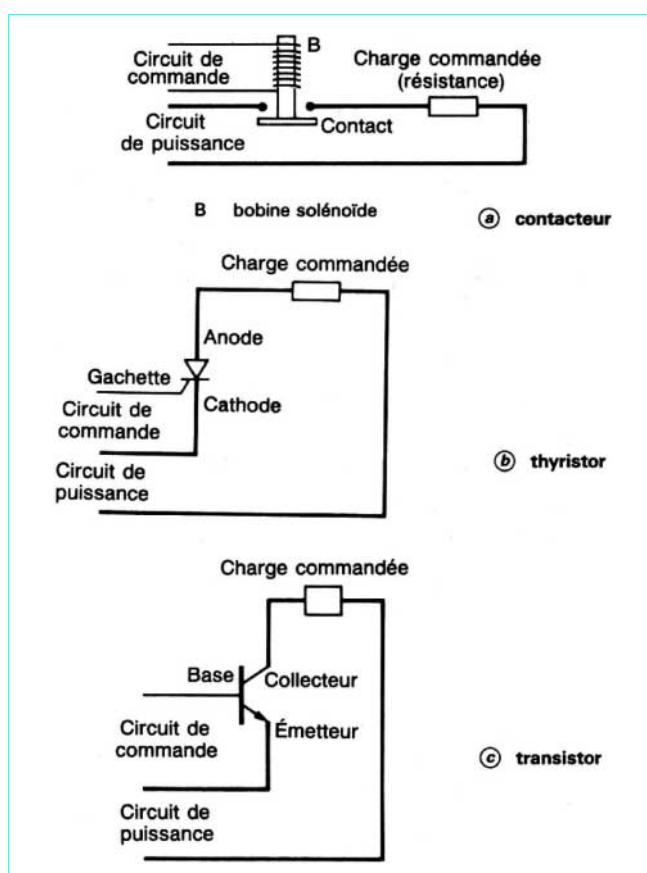


Figure 25 – Actionneurs à commande mécanique ou électronique : schémas de principe

Les unités de puissance à thyristors peuvent contrôler des courants de 1 000 A et plus. Au-delà d'environ 300 A, ces unités doivent être refroidies. On utilise alors une ventilation mécanique forcée ou encore un refroidissement par eau glacée pour les unités les plus puissantes.

### 2.3.2.3 Transistors

Ces composants sont parfois utilisés pour la commutation de petites puissances (inférieures à 1 kW), ils génèrent moins de parasites électriques.

### 2.3.2.4 Choix de ces différents actionneurs

Il se fait en fonction des coûts admissibles, des puissances à réguler et de la précision à obtenir. Pour les projets à faible coût ne nécessitant pas une précision importante, les contacteurs sont préférés aux thyristors. Lorsque la précision est un paramètre dominant, le thyristor, grâce à sa vitesse de commutation élevée, apporte une solution au problème.

Des montages mixtes contacteurs-thyristors, montés sur le dernier étage de puissance, sont de bons compromis technico-économiques.

**Exemple** de ce type de montage : la puissance totale d'une batterie électrique est fractionnée en quatre étages identiques ; trois sont commandés par des contacteurs et le dernier est piloté par un triac.

La séquence de régulation est la suivante :

— lorsque la puissance nécessaire est inférieure au quart de la puissance nominale  $P_n$ , seule la résistance commandée par le triac fonctionne ;

— si  $P_n/4 < P < P_n/2$ , le premier étage de contacteur est enclenché ;

— si  $P_n/2 < P < 3 P_n/4$ , le deuxième étage est enclenché ;

— si  $3 P_n/4 < P$ , le troisième étage est enclenché ;

dans tous les cas, la modulation de la puissance est assurée par le triac.

## 2.4 Dispositifs de sécurité

Les dispositifs de sécurité exigés par la réglementation ne sont pas en général directement liés à la régulation, ils ne font donc pas l'objet d'une présentation détaillée dans cet article.

Pour information, les dispositifs de sécurité utilisés sur les générateurs de vapeur ou d'eau surchauffée sont les suivants.

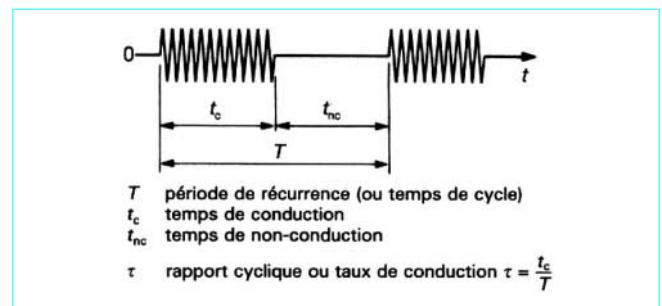


Figure 26 – Régulation par train d'ondes

■ Pour les générateurs de vapeur, il y a au moins :

- deux soupapes de sûreté ;
- un manomètre avec indication de la pression ;
- un clapet antiretour sur la canalisation d'alimentation en eau ;
- une vanne sur la tuyauterie de départ de la vapeur ;
- une bride d'essai pour la fixation d'un manomètre vérificateur ;
- deux niveaux ;
- un clapet antiretour sur la canalisation de départ de la vapeur, si au moins deux chaudières débiteront en parallèle sur un même collecteur de vapeur ou un même récipient.

■ Pour les générateurs d'eau surchauffée, il y a :

- deux soupapes de sûreté ;
- un manomètre avec indication de la pression du « timbre » ;
- un contrôleur de remplissage disposé au point haut de l'installation ;
- un thermostat de réglage ;
- un thermostat limiteur de sécurité ;
- un clapet antiretour sur la canalisation d'appoint au réseau ;
- un contrôleur de débit interrompant l'apport d'énergie en cas de débit insuffisant.

### 3. Architecture d'un ensemble de régulation

Ce paragraphe traite de la mise en œuvre des ensembles de régulation dont les fonctions des différents composants ont été présentées dans les paragraphes précédents.

Les différents modules d'une chaîne de régulation sont donnés dans la figure 27.

#### 3.1 Avec des régulateurs « indépendants »

Les régulateurs, les plus répandus, installés localement et *indépendants* d'un réseau de communication, traitent des informations issues des capteurs et délivrent un signal de sortie qui est une

fonction de l'information d'entrée (proportionnelle, intégrale et dérivée).

Les points de consigne sont modifiables à partir d'un potentiomètre placé sur la face avant du boîtier (figure 28a) ou d'un clavier pour les régulateurs numériques (figure 28b).

Les constructeurs ont développé des régulateurs destinés aux installations de chauffage et de climatisation, les potentiomètres de réglage ou le clavier numérique étant « dédiés » aux grandeurs à régler (température, pression, etc.).

#### 3.2 Avec des régulateurs optimiseurs

Le régulateur optimiseur met en jeu des **fonctions d'auto-apprentissage** (ou **autoadaptatives**), qui lui permettent d'approcher avec une précision croissante la température à l'intérieur des locaux en fonction d'un scénario prédéterminé de chauffage et de la température extérieure. Durant les premiers jours qui suivent sa mise en service, la température obtenue à l'intérieur des locaux est généralement différente de la température souhaitée, des corrections par ajustements manuels peuvent être réalisées au cours de cette période. Ces ajustements ne sont plus nécessaires par la suite, car les valeurs « apprises » sont remises à jour et évoluent avec les modifications de la température extérieure et du scénario de chauffage.

La programmation des températures de consigne peut être modifiée à tout instant sans que cela ne remette en cause les valeurs résultant de l'autoapprentissage (inertie, besoin thermique du bâtiment et système de chauffage).

La fonction première du régulateur optimiseur est de déterminer la **durée de transition** pour passer de la température réduite à la température de confort. Cette durée, qui n'est pas constante, peut s'écrire :

$$t = Kf(\theta_{int}, \theta_{ext})$$

avec  $K$  coefficient d'anticipation déterminé par auto-apprentissage,  
 $f(\theta_{int}, \theta_{ext})$  fonction caractérisant la réponse dynamique du bâtiment.

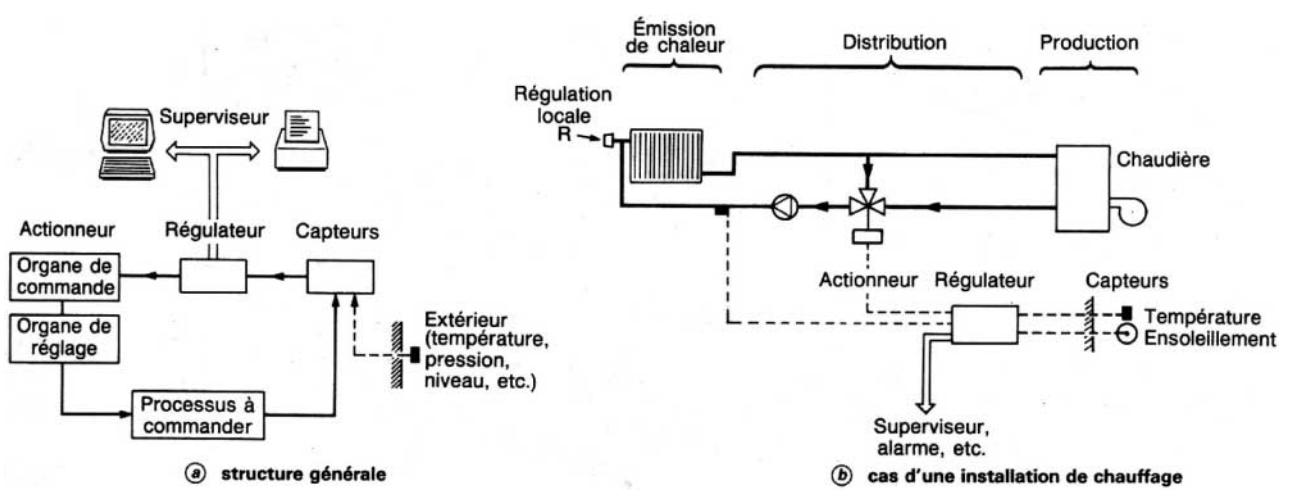


Figure 27 – Architecture d'un ensemble de régulation

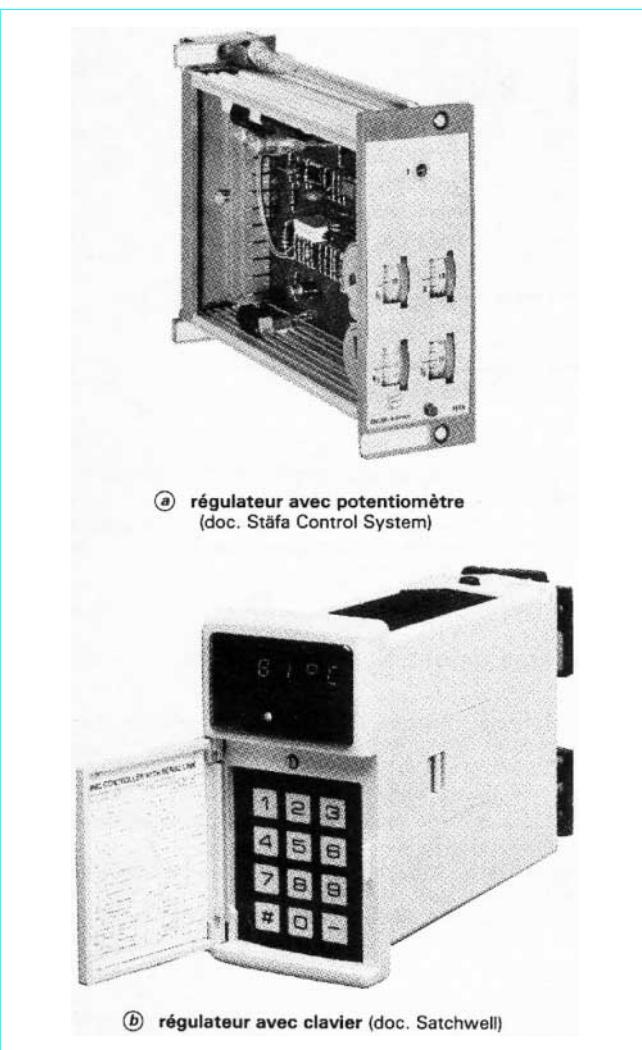


Figure 28 – Exemples de régulateurs classiques

### 3.3 Avec des régulateurs adressables

Ces régulateurs comportent toutes les fonctionnalités des régulateurs classiques et, de plus, peuvent être reliés entre eux et raccordés à un superviseur par une liaison numérique bidirectionnelle (figure 29). Cela permet une intervention sur les régulateurs à partir d'un poste central pour :

- modifier un point de consigne ou une programmation horaire à partir d'un poste central ;
- recevoir des informations sur l'état du régulateur, la valeur de la grandeur réglée, etc. ;
- surveiller en temps réel des informations de décalage entre les points de consigne et les valeurs constituées, pour assurer des fonctions de commande optimale par exemple.

Lorsque l'unité centrale est dotée de logiciels de modélisation des bâtiments et des systèmes de chauffage, ce type de régulateur permet une meilleure gestion des installations.

### 3.4 Avec des automates programmables

L'automate programmable assure les fonctions du régulateur et du superviseur ou l'une d'entre elles selon les cas. Son installation permet de s'affranchir des contraintes ou de certaines insuffisances des régulateurs dédiés (loi linéaire de température, scénarios de chauffage différents, etc.) au prix d'un développement de logiciels qui peut, dans certains cas, être coûteux.

L'automate programmable peut prendre en charge plusieurs boucles de régulation.

**Nota :** le lecteur se reporterà utilement à l'article *API et PC : solutions concurrentes ou complémentaires ?* [R 8 022] dans le traité Informatique industrielle.

### 3.5 Systèmes de gestion technique centralisée

Ces systèmes assurent les fonctions d'acquisition de données issues des capteurs et des régulateurs, permettant de contrôler à tout instant l'état de l'installation et éventuellement de déclencher des alarmes si des écarts trop importants apparaissent par rapport au point de consigne. Ils peuvent être une aide efficace à la conduite, à la maintenance et à la gestion d'une installation, mais ils ne doivent pas se substituer aux organes de régulation.

Les principales fonctionnalités d'une gestion technique centralisée sont :

- la surveillance des points de consignes et l'état des équipements : marche-arrêt, ouvert-fermé, marche normale ou secours, etc. ;
- la gestion des énergies : comptage et surveillance des puissances souscrites ;
- la schématique des installations ;
- la gestion des alarmes et la télécommande des installations ;
- la maintenance préventive et la gestion des pièces détachées.

La figure 30 donne le schéma de principe d'une gestion technique centralisée.

Le système peut s'intégrer dans un ensemble de gestion technique de bâtiment qui intègre d'autres fonctions telles que les centrales d'accès, les occupations de locaux, etc.

### 3.6 Critères de choix

Le choix d'une architecture de régulation est guidé par des considérations techniques et économiques. En effet, les systèmes décrits précédemment peuvent être mis en place sur la plupart des installations de chauffage, sans pour autant trouver de justifications économiques.

Les critères dominants dans le choix d'un équipement de régulation sont rassemblés dans le tableau 1.

En ce qui concerne les installations de climatisation, un tableau semblable n'est pas possible car le choix ne se fait pas en fonction de critères dominants mais dépend du système même de climatisation (§ 5).

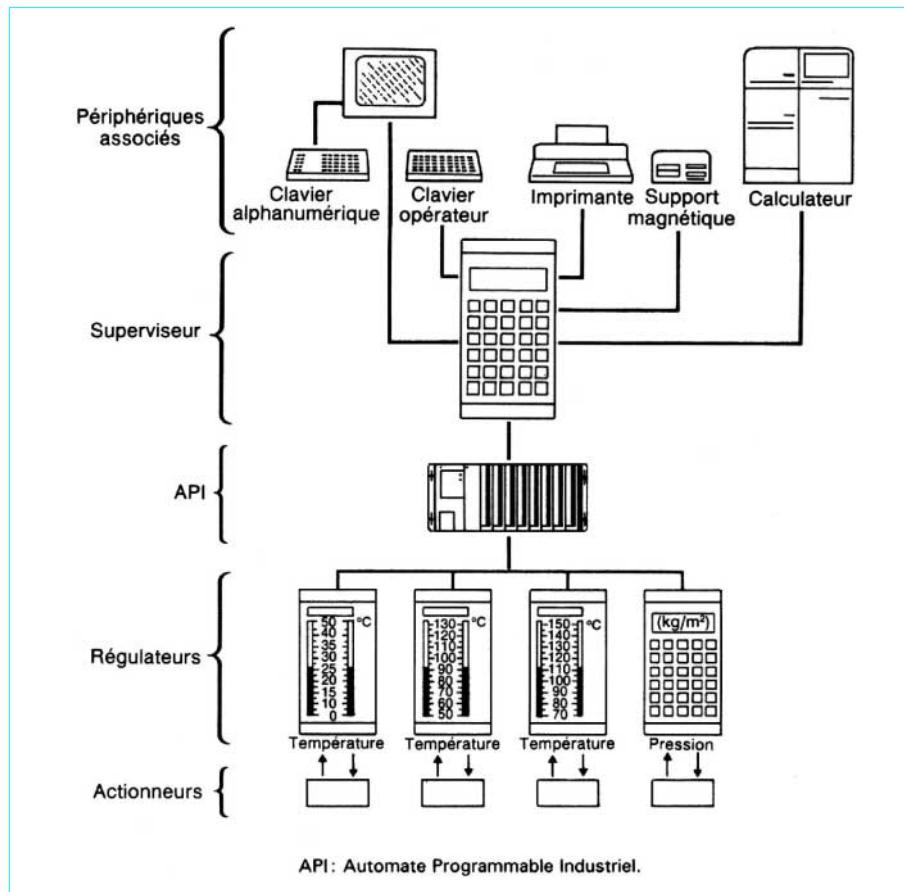


Figure 29 – Exemple d'architecture d'un système de régulation basé sur des régulateurs adressables (doc. Fischer et Porter)

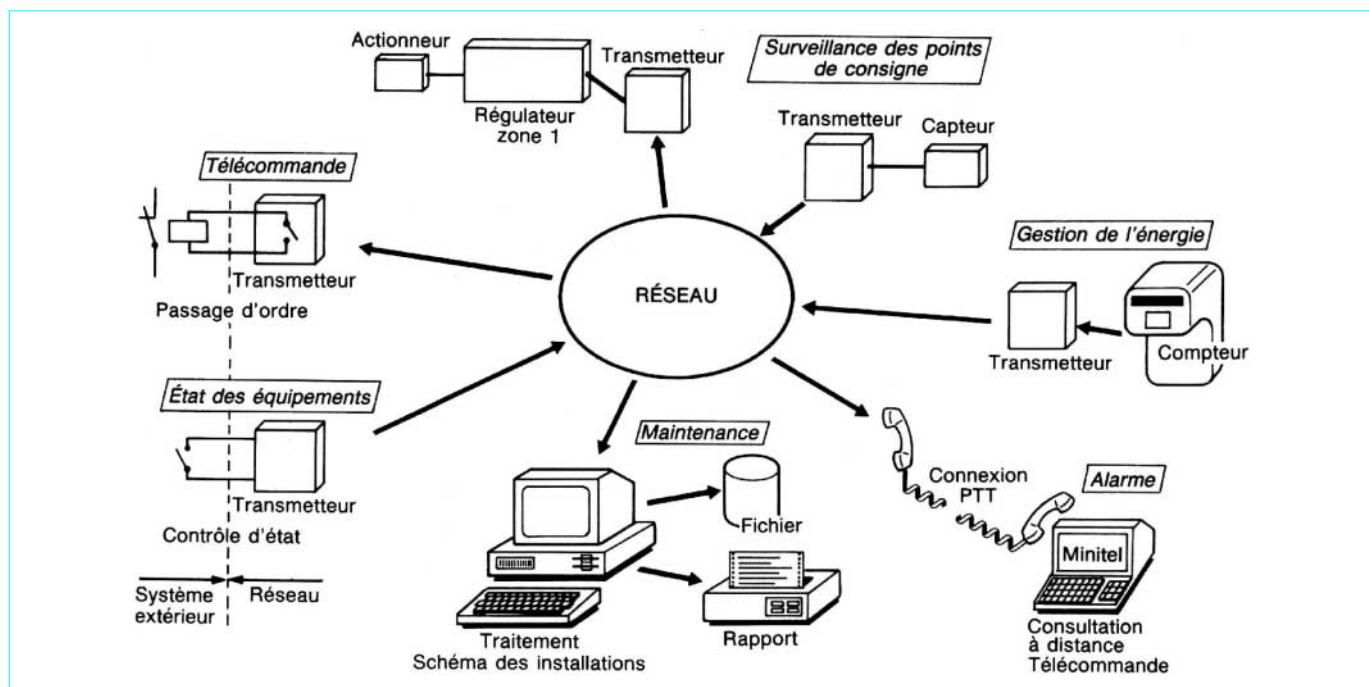


Figure 30 – Exemple d'architecture d'une gestion technique centralisée

Tableau 1 – Domaines d'application des différents systèmes de régulation des installations de chauffage

Critères	Robinet thermostatique		Thermostat		Régulateur indépendant en fonction de la température extérieure				Régulateur optimiseur	Régulateur adressable	Automate programmable	Gestion technique centralisée
	simple	programmable	sans horloge	avec horloge	sans horloge	avec horloge	avec correction du vent	avec correction solaire				
Volume $V$ chauffé :												
$V < 300 \text{ m}^3$	×	×	×	×	×	×						
$300 \leq V \leq 6\,000 \text{ m}^3$	×	×			×	×	×	×				
$V > 6\,000 \text{ m}^3$	×	×			×	×	×	×	×			
Exposition :												
simple					×	×						
multiple	×	×					×	×				
Utilisation des bâtiments :												
continue					×							
discontinue	×	×				×			×			
Inertie :												
faible					×	×						
moyenne					×	×						
forte									×			
Gestion technique du bâtiment										×	×	×
Chauffage multiénergie : (Pompes à chaleur, électricité - fuel, etc.)									×	×	×	×

## 4. Régulation des systèmes de chauffage

### 4.1 Aspects réglementaires

#### 4.1.1 Systèmes de production

Les installations de production d'eau chaude à basse température (inférieure à 109 °C) doivent être équipées d'une double sécurité thermostatique constituée par deux circuits électriques distincts agissant sur des organes de commande différents.

Les installations de production de vapeur ou d'eau surchauffée sous pression sont soumises à la réglementation du 2 avril 1926 modifiée. Depuis le 2 novembre 1982 (décision ministérielle DM/T n° 18331), la réglementation qui exigeait une présence humaine continue s'est assouplie et admet les modes de conduite suivants : présence intermittente en chaufferie, exploitation en télécontrôle ou exploitation en autocontrôle.

■ **Présence intermittente en chaufferie** : des agents compétents sont présents dans l'établissement et prêts à intervenir à tout moment en cas de défaut de fonctionnement de la chaufferie. Ils y exécutent périodiquement des visites pour constater son état de fonctionnement.

Ce mode de surveillance nécessite l'installation d'appareillages de sécurité complémentaires installés en chaufferie. Selon leur nombre et leurs caractéristiques, l'intervalle de temps entre deux visites peut être soit de 4 h, soit de 8 h, après l'aval d'un organisme de contrôle reconnu. Lorsque l'intervalle de temps entre deux visites est supérieur à 4 ou 8 h, l'installation s'arrête en position de sécurité. Les appareillages de sécurité complémentaires doivent être testés au moins une fois par jour. Le résultat de ces tests, les comptes rendus des visites et de tous les événements apparus en chaufferie doivent figurer sur le journal de bord de la chaufferie.

■ **Installation télécontrôlée** : le télécontrôle correspond à une exploitation sans présence humaine en chaufferie. Les informations, dérivées ou anomalies, sont transmises à un poste de télésurveillance par des lignes spécialisées.

Dans ce centre, un agent d'astreinte intervient à distance pour mettre tout ou partie de la chaufferie hors service en cas de danger grave ; il peut alerter un technicien spécialiste qui se trouve à proximité de la chaufferie (trajet inférieur à une demi-heure) en cas de danger grave.

■ **Installation autocontrôlée** : l'exploitation d'installations autocontrôlées correspond à une exploitation sans agent en chaufferie et sans poste central de surveillance.

Les agents d'astreinte sont alertés directement depuis la chaufferie en cas d'anomalies et doivent intervenir dans un délai maximal d'une demi-heure ; à défaut, les équipements concernés s'arrêtent en position de sécurité. L'équipement comporte ici deux chaînes de sécurité disposant de capteurs indépendants et distincts.

L'ensemble des dispositions sont décrites dans l'article 13.3 des recommandations du SNEC-GAPAVE.

#### 4.1.2 Systèmes de distribution

La régulation des installations de chauffage des locaux est réglementée par le décret du 30 mars 1978 qui impose notamment :

- une régulation pour les installations d'une puissance supérieure à 30 kW ;
- une régulation fonction de la température extérieure pour les installations d'une puissance supérieure à 250 kW ;
- une régulation par bâtiment ou ensemble de bâtiments pour les installations d'une puissance supérieure à 1 500 kW.

L'arrêté du 25 juillet 1977 impose de réduire la température intérieure des locaux en fonction de la durée de l'inoccupation.

#### 4.2 Systèmes de production (chaudière et brûleur)

Les générateurs à eau chaude sont équipés par les constructeurs d'aquastats de régulation (figure 31) ou plus simplement de sondes de température reliées à un régulateur, qui maintiennent une **température d'eau constante** à la sortie du générateur en agissant sur la chaîne de commande du brûleur (décrise plus loin, figure 32).

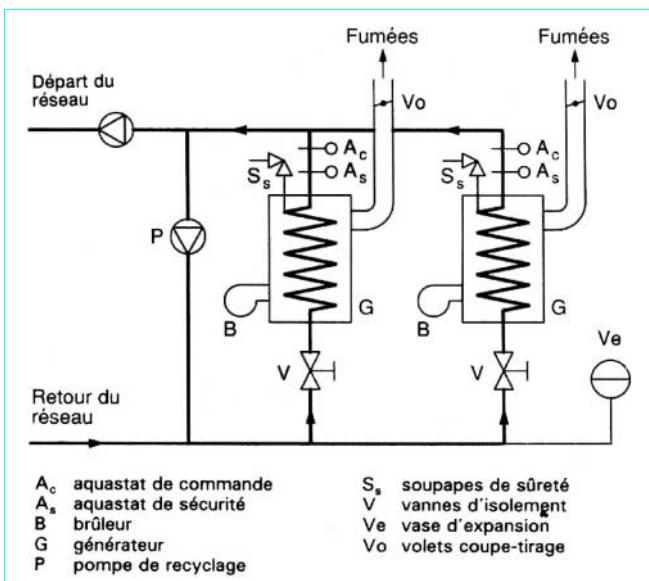


Figure 31 – Système de production d'eau chaude : organes de régulation

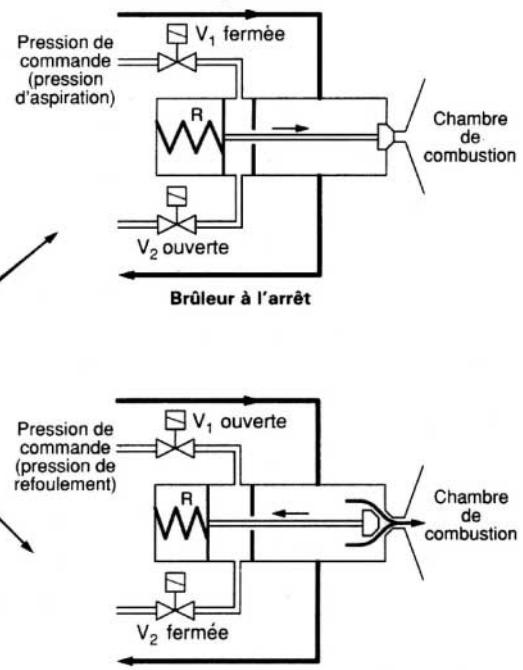
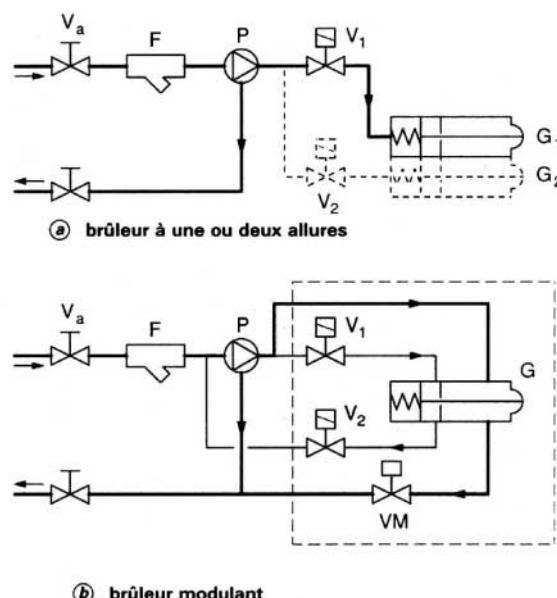


Figure 32 – Régulation d'un brûleur fuel

— La pompe de recyclage permet de maintenir une température d'eau minimale à l'entrée du générateur, réduisant ainsi les risques de condensations corrosives par les imbrûlés des produits de combustion (soufre), qui apparaissent pour des températures inférieures à 60 °C (variable suivant les produits de combustion).

Une interdiction de fonctionnement du brûleur pour des températures de retour inférieures à 60 °C est réalisée sur certaines installations. Un asservissement du fonctionnement du brûleur à la circulation d'eau dans la chaudière est par ailleurs conseillé.

— Les vannes d'isolement des générateurs évitent de maintenir en température les générateurs en attente ; la remise en service du brûleur de ces chaudières s'effectue après un préchauffage des tubulures par l'eau chaude venant des retours de l'installation. Le volet coupe-tirage réduit les pertes thermiques lorsque le générateur est en attente ; il doit être ouvert par manque de tension sur l'actionneur (sécurité positive). Ce volet peut être placé à la sortie du conduit de fumée (figure 31) ou au niveau de l'arrivée d'air du brûleur.

— La pression des réseaux d'eau chaude dont la température est inférieure à 100 °C est maintenue constante par un dispositif d'expansion qui peut être un réservoir équipé d'une membrane et chargé d'un gaz neutre (azote) (figure 31) ou un groupe de maintien de pression pour les installations plus importantes.

■ **Les générateurs à vapeur ou à eau surchauffée** sont équipés de pressostats ou de capteurs de pression reliés à un régulateur, qui maintiennent une **pression constante** dans le réseau en agissant sur la chaîne de commande du brûleur.

Les principes de régulation sont analogues à ceux des générateurs à eau chaude, le capteur de température est simplement remplacé par un capteur de pression.

■ **Régulation du brûleur** : pour les faibles puissances, l'arrivée du combustible est commandée par une électrovanne qui assure une alimentation tout ou rien, à une ou deux allures. Pour des puissances plus importantes (supérieures à environ 1 MW), des brûleurs modulants sont utilisés ; ils possèdent un système de gicleur à retour et un dispositif automatique de positionnement pour le réglage des débits de fuel et d'air commandé par un régulateur progressif. Ces débits sont réglés simultanément afin d'adapter les débits de combustible et d'air comburant aux besoins.

Pour des raisons de sécurité, le démarrage d'un brûleur n'est pas immédiat. Une temporisation de l'ordre de 30 s à 1 min permet de ventiler le foyer avant le déclenchement de la flamme évitant des concentrations en gaz combustible et donc des risques d'explosion.

— **Brûleur fuel à une ou deux allures** (figure 32a) : la pompe de circulation maintient un débit de fuel constant qui, lorsque la vanne magnétique est fermée, renvoie le fuel en cuve. À l'ouverture de la vanne magnétique, le fuel est dirigé vers le gicleur.

Un brûleur deux allures possède une vanne magnétique et un gicleur supplémentaires.

— **Brûleur fuel modulant** (figure 32b) : lorsque le brûleur est à l'arrêt, le ressort de rappel du gicleur ferme l'admission de fuel dans la chambre de combustion et, la vanne modulante VM de régulation étant ouverte, le fuel est renvoyé à la cuve. En fonctionnement, la vanne magnétique  $V_1$  est ouverte, ce qui applique la pression de refoulement de la pompe sur le ressort et ouvre l'admission du fuel ; la vanne modulante VM règle le débit de fuel dans la chambre de combustion.

Dans le cas d'un brûleur au gaz, le circuit de commande comprend un clapet de décharge en plus d'une vanne magnétique d'admission.

## 4.3 Systèmes de distribution

Les systèmes de production assurent une température ou une pression constante au départ des réseaux sans prendre directement en compte les besoins des bâtiments ; il convient donc de réguler les réseaux en fonction des besoins réels des bâtiments en modifiant la puissance thermique des émetteurs de chaleur (radiateurs, convecteurs, etc.). Leurs caractéristiques dépendent des **débits d'eau** ou des **températures à l'entrée de ces émetteurs** (articles *Échangeurs de chaleur* [B 2 345], *Généralités* [B 2 340], *Description des échangeurs* [B 2 341], *Dimensionnement thermiques* [B 2 342], *Intensification des échanges thermiques* [B 2 343] et *Problèmes de fonctionnement* [B 2 344] dans ce traité).

### 4.3.1 Régulation en débit

Ce type de régulation est adapté à un réseau alimentant des aérothermes ou à un réseau de radiateurs équipés de robinets thermostatiques.

Les actionneurs peuvent être des vannes 2 ou 3 voies (figure 33). Le montage avec les vannes 3 voies (figure 33a) permet un débit constant au niveau de la pompe de circulation et évite l'installation d'un conducteur de pompe pressostatique C (figure 33b). Les retours chauds peuvent être défavorables à l'efficacité d'un système à basse température ; on peut alors préférer l'installation de vannes 2 voies.

### 4.3.2 Régulation en température

Ce type de régulation, très courant pour les réseaux de radiateurs, consiste à placer en tête de réseau une vanne 3 voies montée en mélange (figure 34). La température de départ est généralement une fonction linéaire de la température extérieure selon une loi définie pour deux températures extérieures  $\theta_1, \theta_2$ . La puissance émise par les radiateurs n'étant pas proportionnelle à l'écart entre la température du radiateur et la température ambiante, la loi de régulation ne peut être adaptée sur toute la période de chauffage et des corrections devront être alors apportées par les services d'exploitation.

Des modifications de température de départ d'eau peuvent être réalisées par décalage parallèle de la loi de température de l'eau et commandées par une horloge à programme journalier ou hebdomadaire. Cette facilité permet de répondre à la réglementation qui impose un abaissement de la température à l'intérieur des locaux en fonction de la durée d'inoccupation. Des corrections complémentaires pour tenir compte de l'ensoleillement ou du vent peuvent être introduites dans le régulateur.

La séparation des réseaux selon l'orientation des bâtiments est toujours souhaitable ; il faut, dans ce cas, installer une régulation par orientation (figure 34).

La régulation en fonction de la température extérieure peut être complétée par une régulation thermostatique de chaque radiateur. Cette régulation complémentaire permet de corriger des défauts d'équilibrage hydraulique et de prendre en compte les apports thermiques internes et externes de chaque local (ensoleillement, éclairage, occupation) et ainsi d'éviter les surchauffes. De nouveaux robinets à commande électronique autorisent en plus une programmation hebdomadaire (figure 17, § 2.3.1).

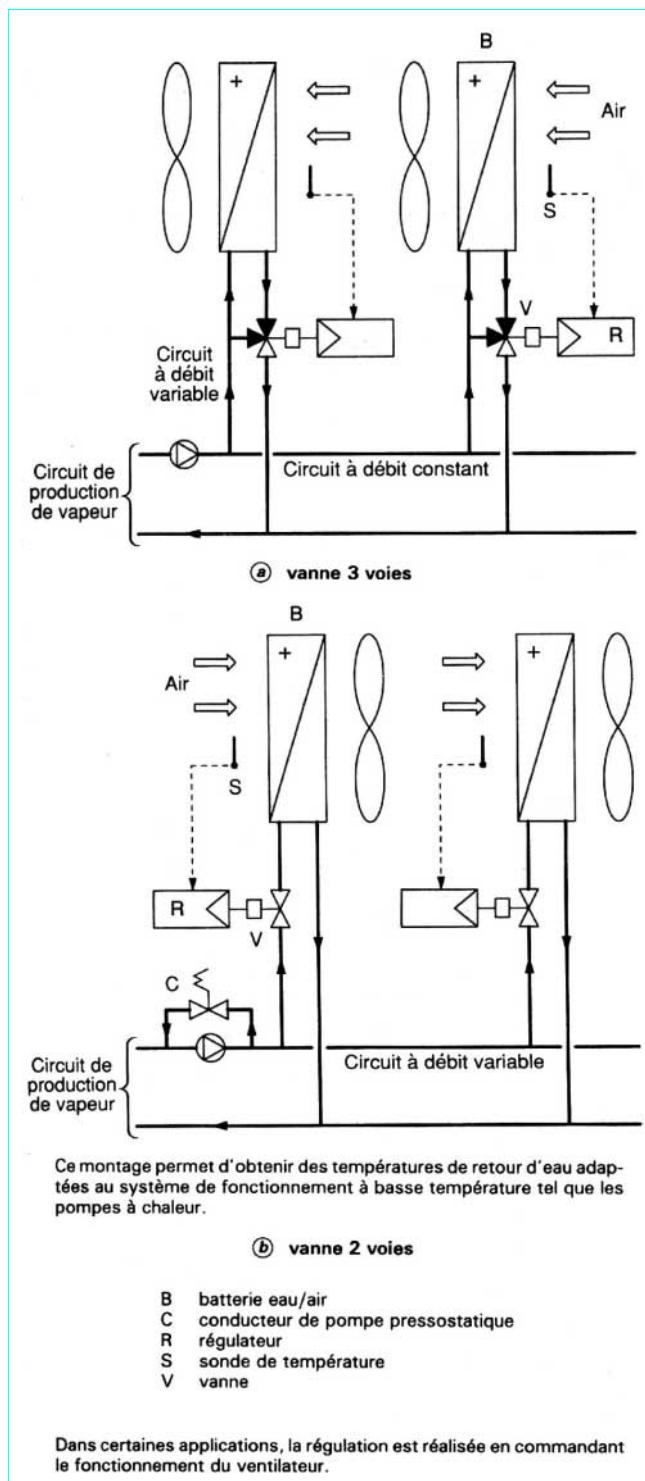


Figure 33 – Principe de régulation en débit sur l'eau d'un aérotherme par vanne 2 ou 3 voies

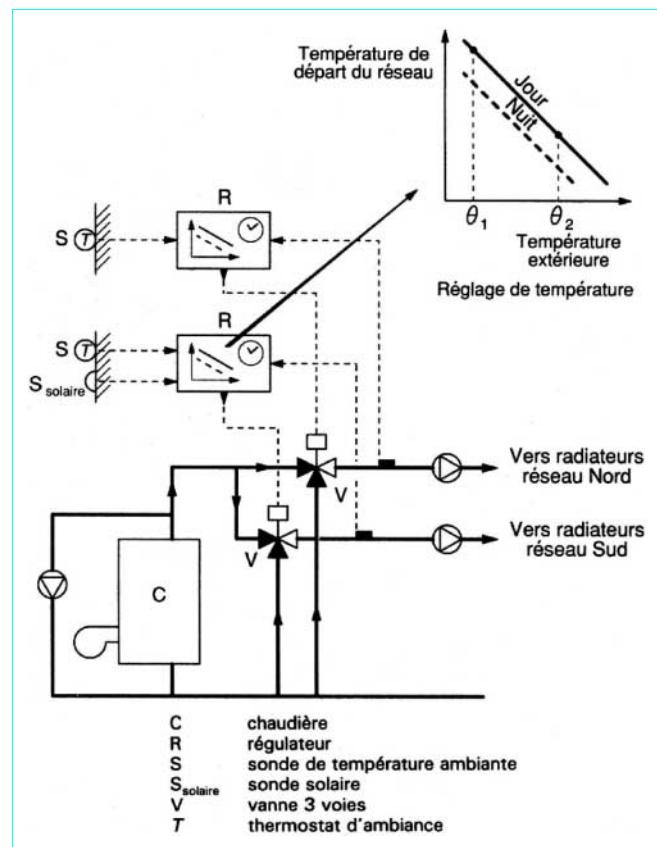


Figure 34 – Principe de régulation en température d'un réseau de radiateurs Nord ou Sud

## 4.4 Exemples d'applications

### 4.4.1 Mise en cascade de chaudières

Lorsque plusieurs générateurs composent une installation et fonctionnent en parallèle, un engagement séquentiel de chacun d'eux permet d'annuler les *pertes de maintien* (ou *d'attente*) des générateurs non strictement nécessaires à la couverture des besoins.

Les chaudières possèdent une sonde de température  $S_2$  (figure 35) et un régulateur  $R_B$  chargé de réaliser la modulation des brûleurs. Ceux-ci sont engagés en fonction de la température extérieure et de la température des retours ( $S_3$ ) par le régulateur  $R$ . Ce régulateur libère le fonctionnement du brûleur sous réserve de la présence d'une circulation d'eau détectée par le contrôleur  $CD$ . La sonde  $S_2$  agit sur la vanne modulante  $VM$  pour maintenir une température minimale de l'eau ( $\approx 60^\circ\text{C}$ ) à l'entrée de la chaudière afin d'éviter des condensations corrosives.

L'enclenchement des chaudières est réalisé séquentiellement en fonction de la température extérieure : en cas de défaut d'une chaudière, il y a arrêt du brûleur, fermeture de la vanne modulante et passage sur la chaudière suivante.

Le thermostat limiteur de température  $S_1$  doit être raccordé à un appareil d'alarme lumineux ou sonore, la remise en marche de l'installation ne pouvant s'effectuer que par une intervention manuelle.

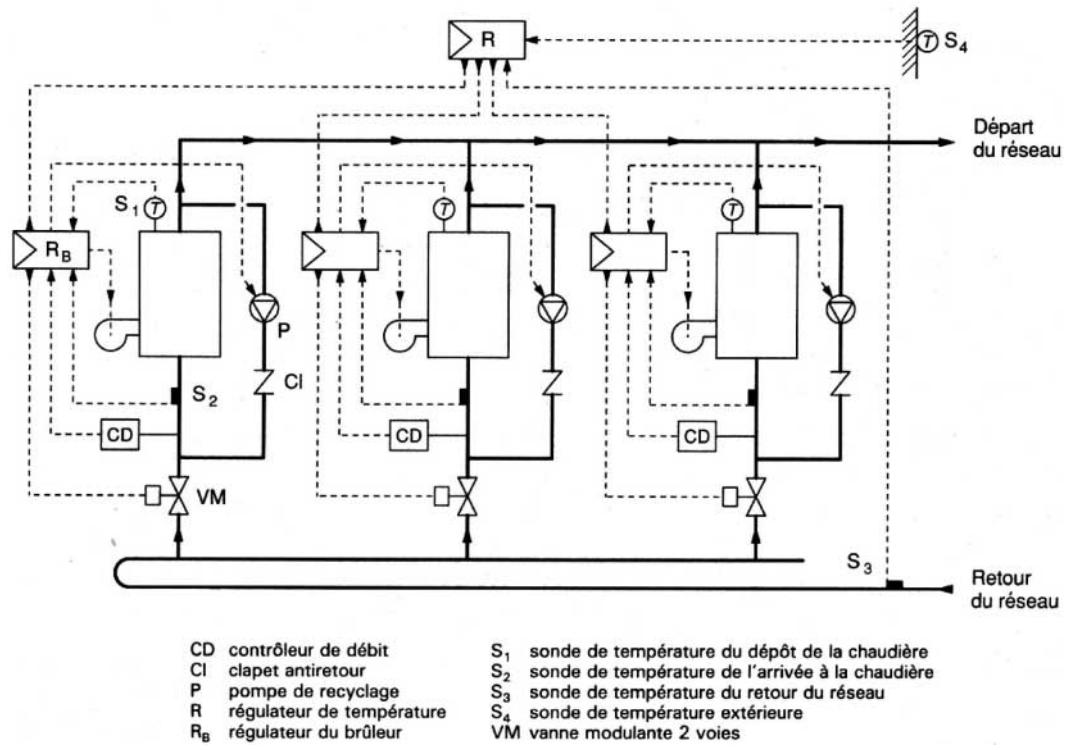


Figure 35 – Exemple de régulation en présence d'une cascade de chaudières

#### 4.4.2 Installations biénergie

##### ■ Pompe à chaleur (PAC) en relève de chaudière à combustible

La pompe à chaleur placée sur le retour du circuit d'utilisation (figure 36) assure la fourniture totale ou partielle de chaleur au réseau de chauffage. Une sonde de température placée sur le départ et une sonde de température extérieure sont reliées à un régulateur sur lequel on affiche une loi de correspondance entre ces deux températures. Ce régulateur à fonction proportionnelle et intégrale commande un relais à étages qui enclenche la ou les pompes à chaleur jusqu'à une température limite (S<sub>7</sub>), le déverrouillage de la vanne 3 voies de régulation et le brûleur de la chaudière (figure 37a).

Un relais de délestage interdit le fonctionnement des pompes à chaleur pendant les heures de pointe du réseau EDF.

##### ■ Chaudière électrique et chaudière à combustible

Les séquences de fonctionnement sont analogues à celles de l'installation précédente ; la température de sortie n'étant pas limitée, le fonctionnement simultané chaudière électrique/chaudière à combustible pourra être réalisé jusqu'à la température extérieure de base (figure 37b). La chaudière à combustible fonctionnera seule pendant les heures de pointe EDF (article *Principes de tarification de l'électricité en France* [D 4 023] dans le traité Génie électrique).

#### 4.4.3 Installations avec chaudière à condensation

L'installation représentée sur la figure 38 comporte trois chaudières, dont deux sont classiques et la troisième à condensation. Chaque circuit est contrôlé par un régulateur qui agit en fonction de la température extérieure et de la température de départ des circuits.

Les retours des réseaux de chauffage dont la température est la plus basse circulent dans l'échangeur condenseur et sont mélangés par la vanne 3 voies V<sub>dr</sub> (montée en mélange) avec l'eau de départ des chaudières.

La chaudière à condensation sera engagée en priorité, les chaudières classiques régulées en cascade assurant la puissance d'appoint.

#### 4.4.4 Installations utilisant une énergie à basse température

La conception générale d'une telle installation doit tenir compte des différents niveaux de température de la ressource ; l'objectif étant de satisfaire la demande en recourant au minimum à l'énergie complémentaire qui lui est associée, l'ensemble de régulation, en plus des points de consigne, contrôlera aussi le sens du transfert de chaleur.

L'exemple de la figure 39 montre une installation utilisant une ressource à basse température (rejets thermiques, géothermie, énergie solaire, etc.) destinée au chauffage des locaux.

Les différents accumulateurs présentent des niveaux de température différents. Le niveau le plus élevé est celui de l'accumulateur A<sub>1</sub> qui est chauffé en premier lieu par la ressource à basse température. Tant que la température de départ  $\theta_{d1}$  de l'échangeur capteur est inférieure à celle de l'accumulateur  $\theta_{b1}$ , la vanne V<sub>s1</sub> commandée par le régulateur R<sub>s1</sub> interdit la circulation d'eau dans l'accumulateur pour éviter son refroidissement. Par contre, si  $\theta_{d1} > \theta_{b1}$  le régulateur R<sub>s1</sub> autorise la circulation dans le ballon par commutation de la vanne V<sub>s1</sub>. Les accumulateurs A<sub>2</sub> et A<sub>3</sub> sont régulés de manière identique.

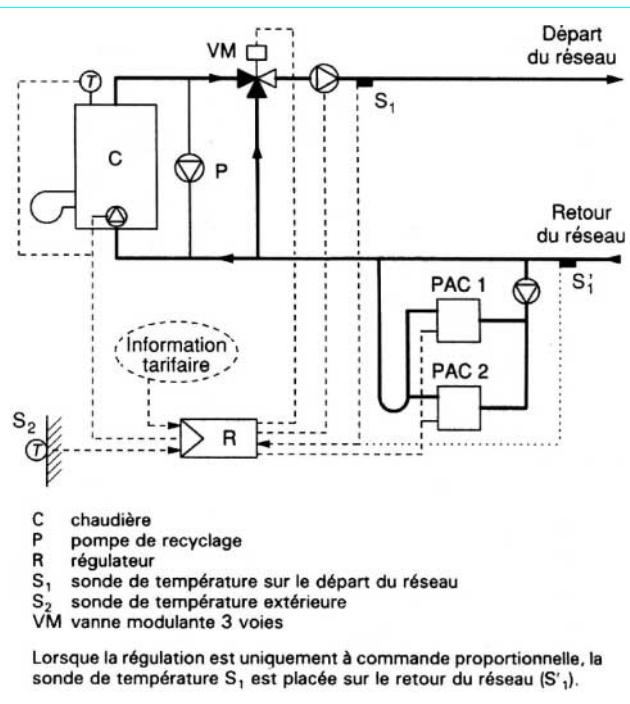


Figure 36 – Exemple de régulation en présence de pompes à chaleur (PAC) en relève de chaudière : cas des bâtiments collectifs ou tertiaires

L'utilisation de la chaleur des accumulateurs doit être prioritaire à celle de la chaudière d'appoint. Si la température de l'accumulateur A<sub>3</sub> est supérieure à la température des retours du réseau, la vanne de commutation V<sub>u3</sub> autorise le passage de l'eau des retours dans le ballon ; le raisonnement s'applique aux accumulateurs A<sub>2</sub> et A<sub>1</sub>.

Le régulateur R<sub>U1</sub> à deux sorties assure les fonctions suivantes :

— pour ajuster la température  $\theta_2$  à fournir au réseau, le régulateur agit sur la vanne V<sub>dr</sub> (départ réseau) en mélangeant l'eau de circuit des accumulateurs et celle de retour du réseau de chauffage ; la voie 3 de la vanne V<sub>a</sub> d'appoint est fermée (l'appoint n'est pas sollicité) ;

— lorsque la température devient insuffisante, la voie 3 de la vanne V<sub>dr</sub> étant fermée, la vanne V<sub>a</sub> module ; la température du réseau est obtenue par mélange de l'eau du circuit avec celle de la chaudière.

Si le régulateur est à commande proportionnelle, un différentiel de 2 °C environ est observé entre la fermeture de la vanne V<sub>dr</sub> et l'ouverture de la voie 3 de la vanne V<sub>a</sub> pour éviter un fonctionnement instable.

#### 4.4.5 Installations de distribution de chaleur avec production d'eau chaude sanitaire

Une installation de distribution d'eau chaude dans un immeuble collectif comporte généralement plusieurs circuits qui doivent être régulés séparément pour tenir compte des différents critères suivants :

- systèmes d'émission de chaleur (radiateur, convecteur, plancher chauffant, etc.) ;
- structure des bâtiments et usage des locaux, fonction de l'inertie et de l'intermittence d'occupation ;
- orientation et apports internes des locaux.

La figure 40 présente un exemple de circuits de distribution équipés d'une régulation adaptée à l'usage ou aux caractéristiques des locaux chauffés. Les chaudières sont régulées en cascade en fonction de la température extérieure ; le collecteur de départ alimente les différents circuits qui sont régulés indépendamment les uns des autres par des régulateurs maintenant une température constante au départ des circuits, elle-même fonction de la température extérieure et de la programmation horaire. Des robinets thermostatiques installés sur les radiateurs des locaux présentant des apports calorifiques internes évitent des surchauffes. Lorsque des variations importantes de débit sont à craindre, il est conseillé d'installer des régulateurs de pression différentielle. La température du ballon d'eau chaude sanitaire est régulée par l'intermédiaire du thermostat qui agit sur la pompe de circulation. Un mitigeur thermostatique doit être installé sur le départ d'eau chaude sanitaire pour limiter la température de l'eau chaude distribuée.

Pour une installation d'un poste de production d'eau chaude à partir d'un réseau de distribution de vapeur, le lecteur se reportera à l'article Réseaux de chaleur. Chauffage urbain [B 2 172] dans ce traité : schémas de régulation par le débit de condensat (ou de vapeur) dans une sous-station d'échange vapeur.

#### 4.4.6 Installations de chauffage équipées de convecteurs électriques

Les convecteurs électriques sont équipés par les constructeurs de thermostats tout ou rien à contact sec ou de régulateurs à action proportionnelle agissant sur des interrupteurs statiques (triacs). Une pré-régulation centralisée limitant l'énergie distribuée aux émetteurs évite une consommation excessive des convecteurs dont le thermostat est réglé à une valeur anormalement élevée ou placé dans un local dont la fenêtre est ouverte. L'énergie électrique distribuée est régulée en fonction de la température extérieure (figure 41) par un doseur cyclique.

La tarification de l'énergie électrique est basée sur la consommation d'énergie, dont le coût est horosaisonner, et de la puissance souscrite dans les différents postes tarifaires. La réduction de la puissance souscrite peut être obtenue en installant un délesteur dont le rôle est de limiter la puissance électrique atteinte. L'inertie des bâtiments permet en effet de limiter ou d'interrompre momentanément les circuits de chauffage sans altérer le confort des occupants.

#### 4.4.7 Installations de chauffage électrique à accumulation

L'énergie stockée dans l'accumulateur durant les périodes creuses de la tarification doit être égale aux besoins à venir. La prévision de ces besoins est délicate à réaliser. La solution couramment utilisée consiste à stocker une énergie proportionnellement à l'écart entre la température extérieure et la température intérieure (figure 42).

Des solutions plus sophistiquées consistent à enregistrer la température des 48 ou 72 dernières heures, d'en déduire l'énergie à stocker et de corriger cette valeur en fonction de la température constatée pendant le stockage. Des solutions mixtes (accumulation + convecteurs d'appoint) permettent de remédier à des erreurs de prévision.

#### 4.4.8 Installations pilotées par un régulateur optimiseur

Les régulateurs à horloge déclenchent à heure fixe le passage de l'installation du régime normal au régime ralenti et du régime ralenti au régime accéléré. Ce mode de régulation présente l'inconvénient de relancer l'installation prématurément en période de demi-saison.

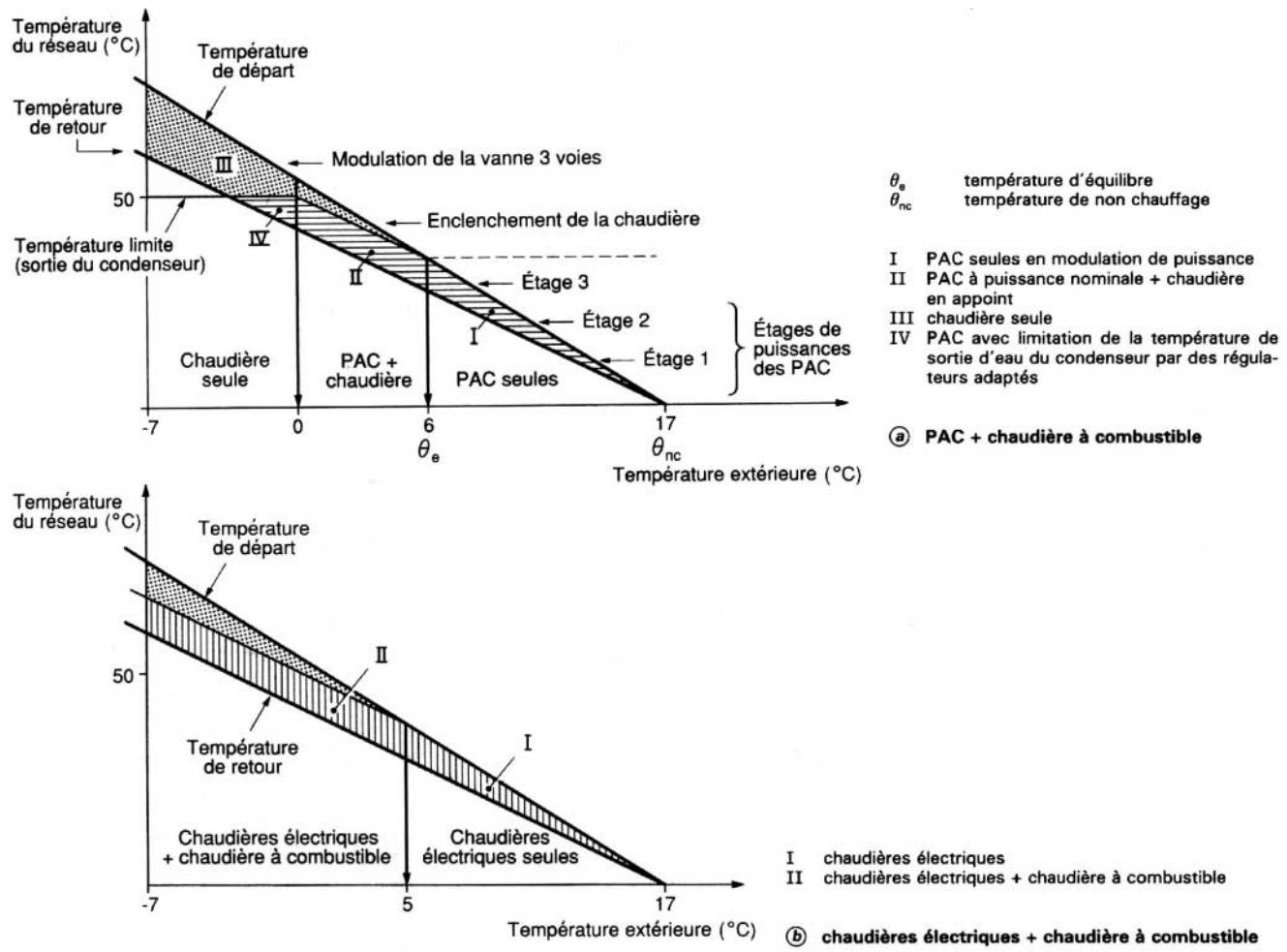


Figure 37 – Diagrammes de fonctionnement d'installation biénergie

Cet inconvénient peut être évité en utilisant des régulateurs optimiseurs qui assurent les fonctions suivantes :

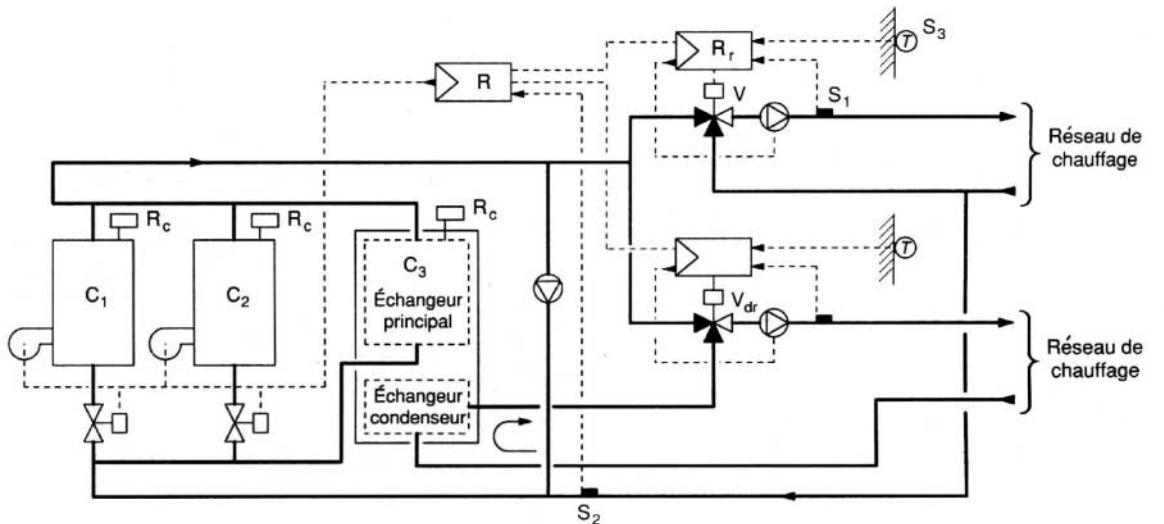
- fonctionnement des installations en régime réduit (température intérieure réduite de  $19$  à  $16^{\circ}\text{C}$ , par exemple) ;
- calcul de l'heure de remise en marche pour que la température intérieure atteigne la valeur souhaitée seulement au moment voulu.

#### 4.4.9 Installations dont le coût de l'énergie est variable sur une courte période (24 h)

Les régulateurs, étudiés dans les paragraphes précédents, permettent de régler des grandeurs physiques (température, hygrométrie) qui traduisent des conditions de confort à l'intérieur d'un local. Les régulateurs optimiseurs minimisent les consommations énergétiques des locaux dont l'occupation est intermittente en imposant au système de chauffage des ralenti et des remises en température des locaux en fonction des conditions climatiques extérieures et des caractéristiques des bâtiments.

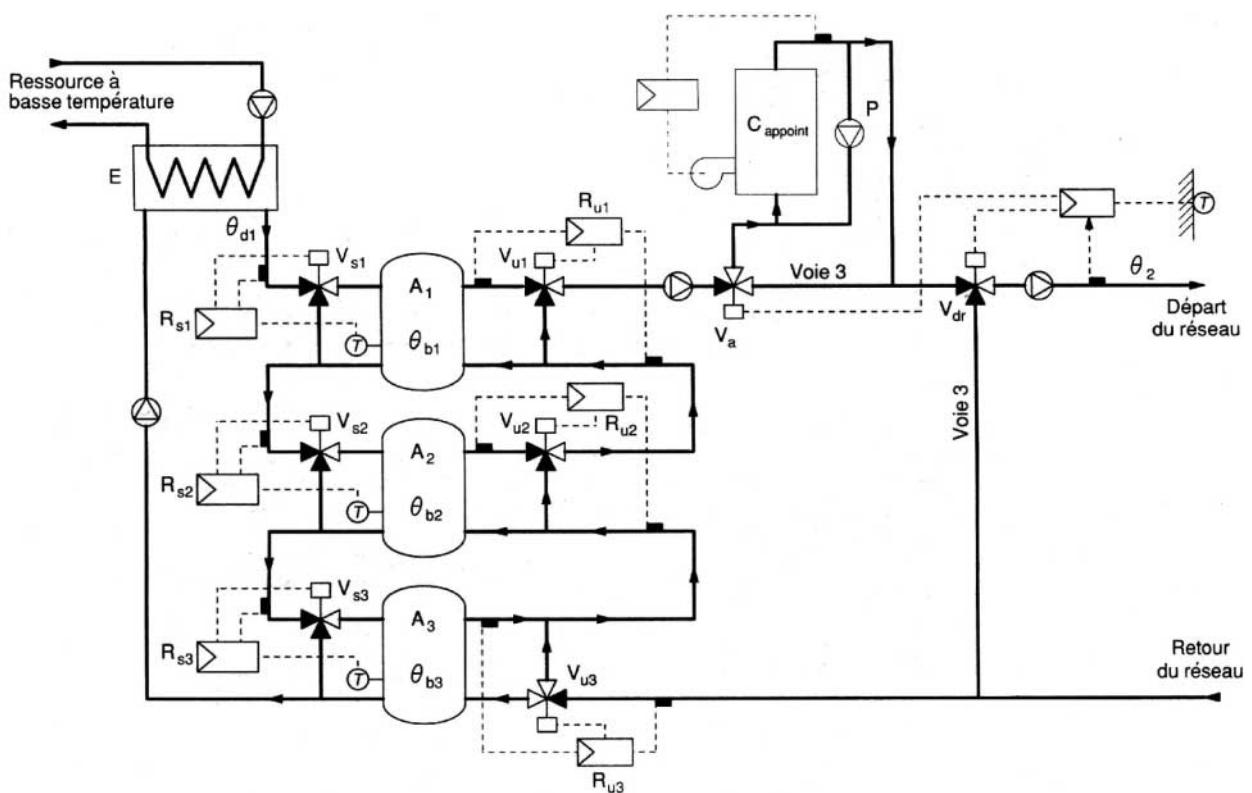
Lorsque le coût de l'énergie est variable au cours de la journée, l'utilisation des régulateurs optimiseurs n'est pas complètement satisfaisante car la consommation énergétique minimale ne conduit pas toujours à un coût minimal d'exploitation. Dans ce cas et pour des installations importantes, il convient de recourir à des principes de régulation basés sur la caractérisation du bâtiment et des systèmes de chauffage qui lui sont associés. La caractérisation est conduite par une méthode d'identification (article *Modélisation et identification des processus* [R 7 140] dans le traité Informatique industrielle) des grandeurs physiques représentatives du système (températures intérieure et extérieure, flux thermique  $\Phi$ , etc.), basée sur une instrumentation du site pendant une courte durée (1 semaine environ).

Dans le cas d'un système complexe où les consignes et les coûts d'énergie sont variables au cours du temps, il est possible de définir et de rechercher une solution optimale minimisant les coûts d'exploitation. La figure 43 montre le principe d'une telle régulation.



C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> chaudières classiques  
 C<sub>3</sub> chaudière à condensation  
 R régulateur de la cascade de chaudières      R<sub>c</sub> régulation interne de chaque chaudière  
 R<sub>r</sub> régulateur de chaque réseau de chauffage      S<sub>1</sub> sonde de température sur le départ du réseau  
 S<sub>2</sub> sonde de température sur le retour du réseau      S<sub>3</sub> sonde de température extérieure  
 V vanne 3 voies

Figure 38 – Exemple de régulation en présence d'une chaudière à condensation



A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> et A<sub>3</sub> accumulateurs  
 E échangeur de chaleur  
 C<sub>appoint</sub> chaudière d'appoint      R régulateur comparateur de température  
 V vanne de commutation  
 avec indice s: réseau de stockage  
 indice u: réseau d'utilisation      V<sub>a</sub> vanne d'appoint  
 V<sub>dr</sub> vanne de départ de réseau

Figure 39 – Exemple de régulation d'une installation utilisant une énergie à basse température (rejets thermiques, géothermie, etc.)

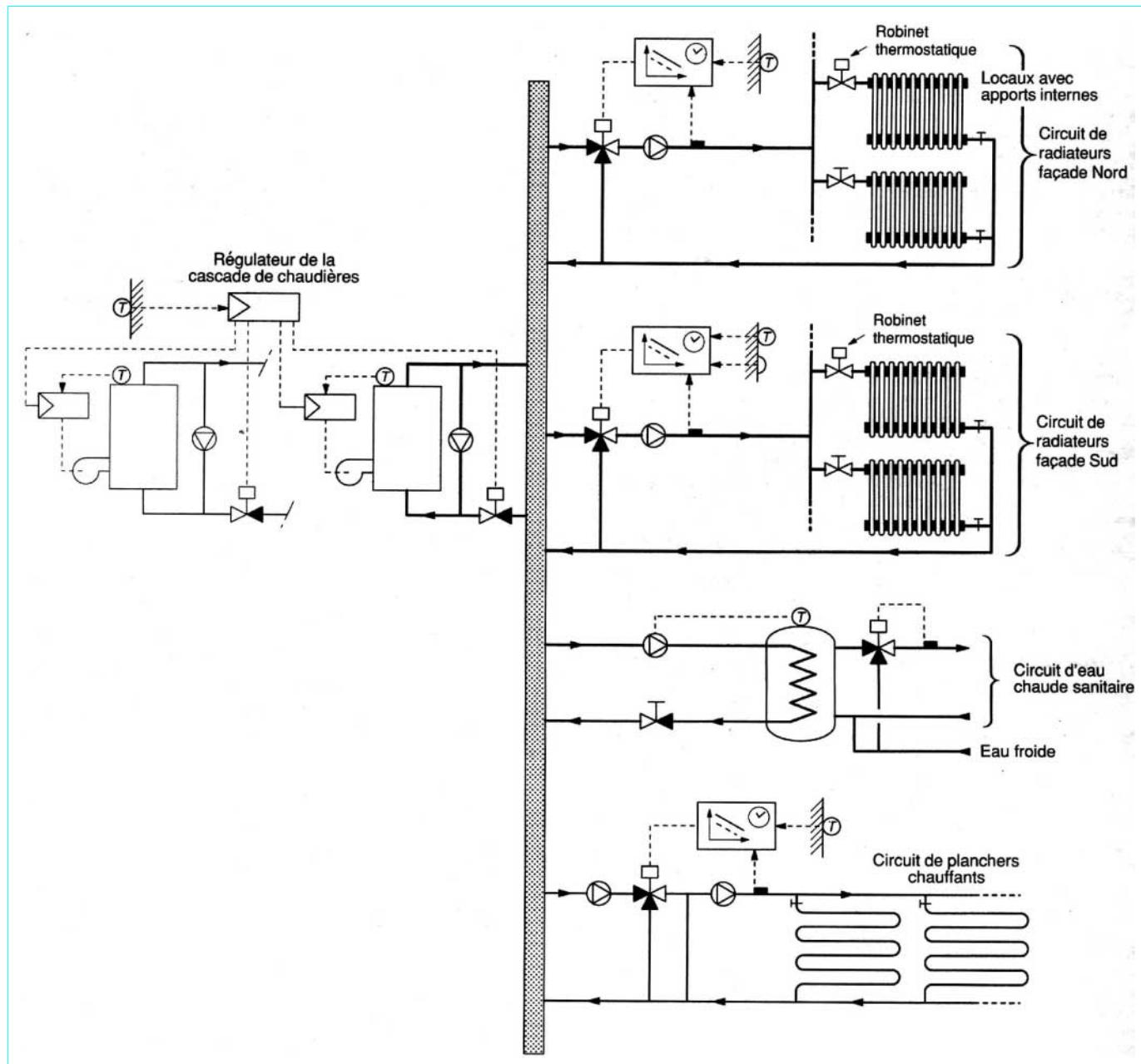


Figure 40 – Exemple de régulation d'une installation de distribution de chaleur avec production d'eau chaude sanitaire

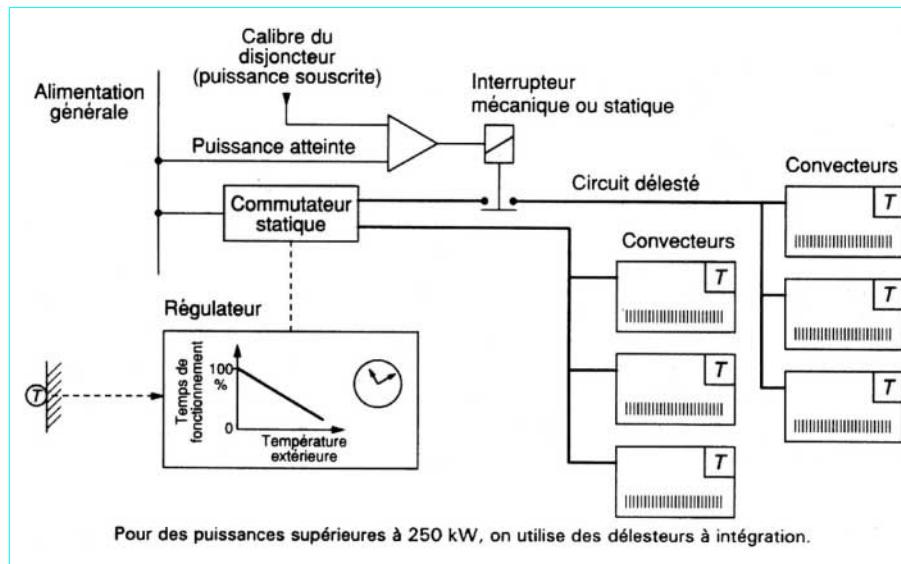


Figure 41 – Exemple d'installation de chauffage équipée d'une régulation centrale (doseur cyclique) et d'un délesteur

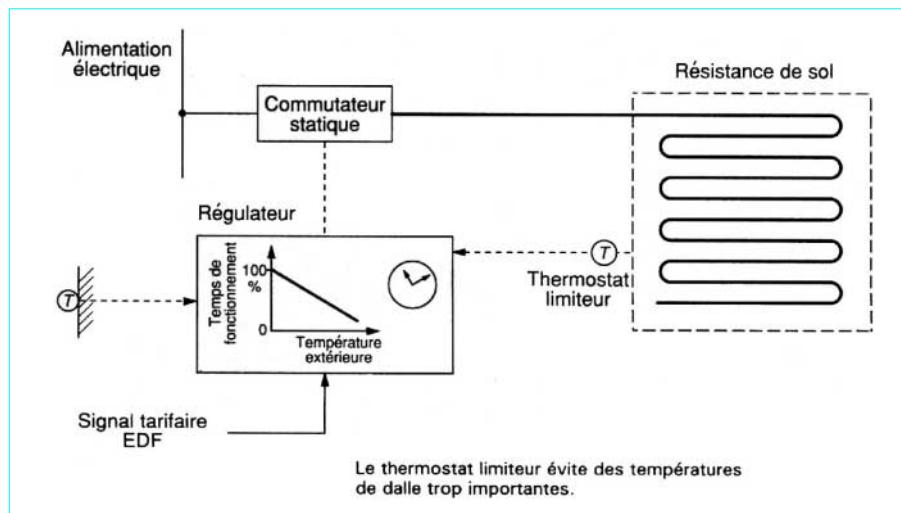


Figure 42 – Exemple d'installation de chauffage électrique à accumulation

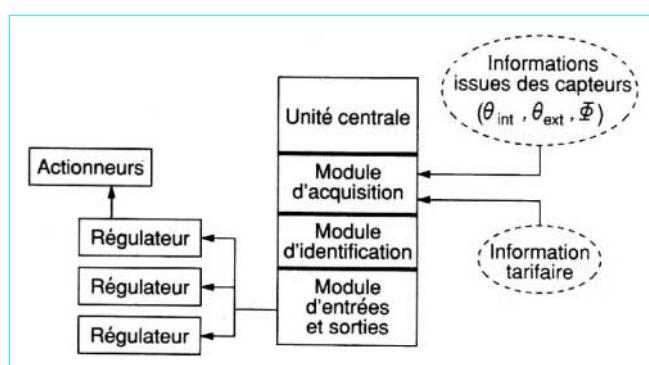


Figure 43 – Schéma bloc d'un système de gestion optimale de l'énergie

## 5. Régulation des systèmes de climatisation

Ce paragraphe est une application des principes décrits au paragraphe 1 ; il s'appuie sur la transformation de l'air décrit dans l'article *Air humide* [B 2 230] de ce traité. Les systèmes décrits par la suite sont ceux que l'ingénieur climaticien rencontrera le plus fréquemment.

### 5.1 Systèmes de traitement d'air

On distingue les *centrales unizones* des *centrales multizones*, sachant que l'on définit une zone comme étant un ensemble de locaux dont le comportement thermique est identique.

## 5.1.1 Centrales unizones

Le schéma général d'une centrale de traitement d'air unizone est donné sur la figure 44. Selon le traitement d'air souhaité, seuls certains composants seront installés.

### 5.1.1.1 Contrôle de la température ambiante seule (sans contrôle d'hygrométrie)

Le régulateur  $R_1$  commande les vannes  $V_{C2}$  et  $V_F$  en fonction de la température d'ambiance détectée par la sonde  $S_1$ , température représentative de la température moyenne ambiante. Cette sonde peut être placée dans l'ambiance ou dans la gaine de reprise. Le signal à la sortie du régulateur  $R_1$  est indiqué sur la figure 45.

La sonde de température de soufflage  $\theta_s$  limite la température de l'air à la sortie du caisson.

La température  $\theta_{ag}$  est contrôlée à la sortie de la batterie chaude  $BC_1$  afin d'assurer une température minimale d'environ 5 °C pour protéger celle-ci contre les risques de gel. Lorsque cette sonde détecte une température inférieure à la température antigel, le régulateur envoie à la vanne  $V_{C1}$  un ordre de pleine ouverture.

L'état de l'air à la sortie de chacun des composants du caisson est indiqué sur la figure 46.

### 5.1.1.2 Contrôle de la température et de l'hygrométrie ambiante

Le contrôle de l'hygrométrie est obtenu en ajoutant un laveur d'air entre la batterie de préchauffage  $BC_1$  et la batterie froide  $BF$ .

Les transformations de l'air sont données sur la figure 47.

La séquence de régulation est la suivante : le point ④, appelé *point de rosée*, est maintenu constant en agissant soit sur le laveur et la batterie de préchauffage  $BC_1$  (cycle hiver, humidification), soit sur la batterie froide (cycle été, déshumidification). Le laveur est commandé par un hygrostat d'ambiance  $H_a$ .

Lorsque le degré hygrométrique est inférieur à celui de la consigne, le laveur fonctionne comme un refroidisseur adiabatique (transformation ② → ③) et la température au point ③ est ajustée en agissant sur la vanne de régulation  $V_{C1}$ .

Lorsque le degré hygrométrique est supérieur à la valeur de consigne (fonctionnement été), la batterie froide amène la température de l'air à la température de rosée en condensant la vapeur d'eau contenue en excédent dans le mélange air neuf - air repris.

La température de l'air à l'intérieur des locaux  $\theta_a$  est régulée par la vanne  $V_{C2}$  commandée par le régulateur  $R_1$  qui agit en fonction de l'information transmise par la sonde d'ambiance.

### 5.1.1.3 Système avec cycle d'air neuf économiseur (free cooling)

Pendant les périodes de demi-saison, les locaux climatisés peuvent être en demande de froid alors que la température extérieure est inférieure à la température ambiante ( $\theta_e < \theta_a$ ). Lorsque cette situation se présente, il est intéressant de moduler le mélange air neuf - air repris en augmentant le débit d'air neuf par une action sur les registres d'air, et cela tout en respectant la contrainte du minimum d'air neuf. L'action sur les volets d'air permet de rapprocher la température du mélange air neuf - air repris de la température de soufflage sans recourir à la batterie froide.

Ce principe de régulation permet difficilement un contrôle strict de l'hygrométrie.

## 5.1.2 Centrales multizones

Les centrales multizones comportent un plenum (caisson) chaud et un plenum froid ; la température de soufflage est obtenue pour chacune des zones par mélange d'air chaud et d'air froid en agissant sur les registres (figure 48) ; la partie de prétraitement de l'air est identique à celle d'un caisson unizone.

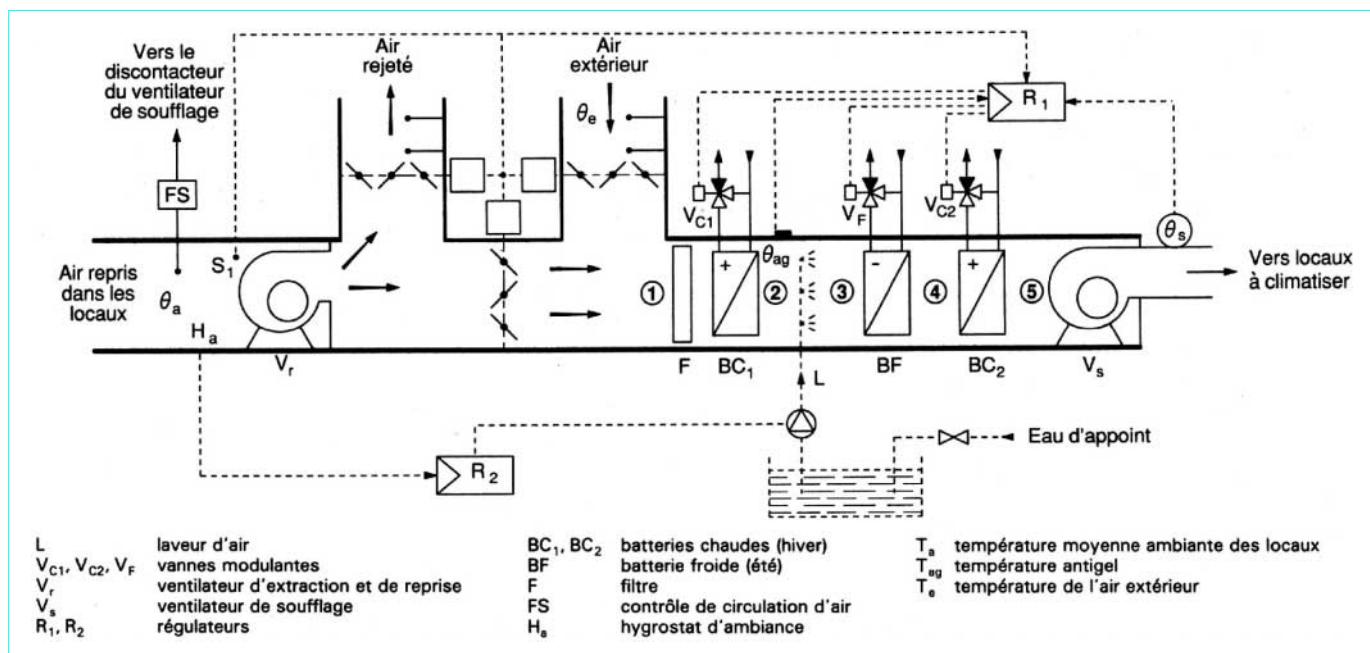


Figure 44 – Schéma général d'une centrale unizone de traitement d'air

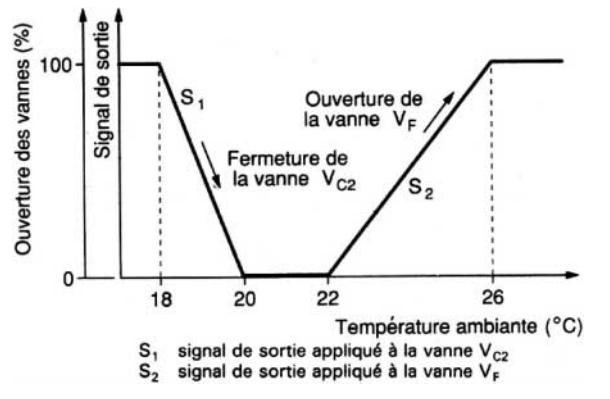
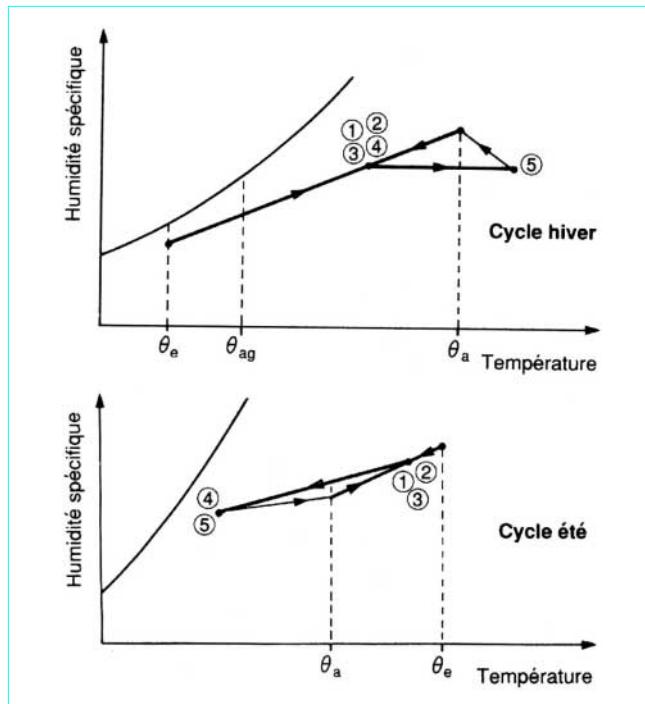
Figure 45 – Signal de sortie du régulateur  $R_1$ 

Figure 46 – Transformations de l'air dans le diagramme de Carrier, avec contrôle de température mais non de l'hygrométrie

La sonde d'ambiance est placée dans un local dont la température est représentative de la température moyenne de la zone.

Le contrôle de l'hygrométrie peut être obtenu en plaçant des humidificateurs à vapeur au niveau de chaque départ de zone.

## 5.2 Systèmes de distribution

### 5.2.1 Systèmes monogaine

#### 5.2.1.1 Systèmes à débit variable

Ces systèmes permettent de traiter différentes zones avec une seule gaine. L'air d'alimentation issu d'une centrale de traitement d'air est maintenu à une température réglée en fonction des

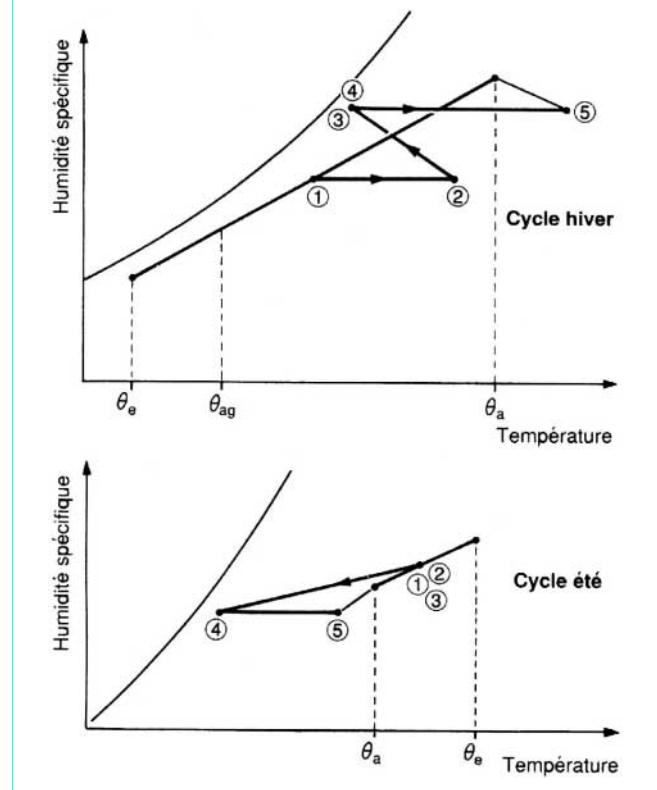


Figure 47 – Transformations de l'air dans le diagramme de Carrier, avec contrôle de température et de l'hygrométrie

conditions climatiques. Le régulateur de zone modifie le débit d'air introduit pour maintenir une température constante à l'intérieur du local à traiter. Ces systèmes sont adaptés si les différentes zones sont thermiquement homogènes. Un débit minimal d'air doit être maintenu afin de ne pas provoquer un mauvais fonctionnement du système de diffusion par la création de « coulée froide » (figure 49).

#### 5.2.1.2 Systèmes à réchauffage

Les systèmes à réchauffage terminal permettent de traiter différentes zones avec une seule gaine.

L'air primaire issu de la centrale de traitement d'air est maintenu à une température qui permet de traiter le local dont les apports sont les plus importants (température minimale). Le réchauffage terminal sera réalisé par une batterie d'eau chaude (ou électrique) réglée en fonction de la température souhaitée à l'intérieur de chaque local (figure 49).

### 5.2.2 Systèmes double gaine

Ces systèmes mélangeant l'air chaud et l'air froid préparés par des centrales et distribués par un réseau double gaine : air chaud et air froid. L'air peut être distribué à haute vitesse ( $> 7 \text{ m/s}$ ) ou basse vitesse ( $< 7 \text{ m/s}$ ). Son mélange s'effectue dans des caissons situés à proximité de la zone à traiter (figure 50) pour adapter la température de soufflage aux besoins de la zone. Il est important de s'assurer que le débit d'air distribué dans la zone est constant. Les besoins thermiques de la zone sont donnés par la relation :

$$B = Q c_p (\theta_s - \theta_a)$$

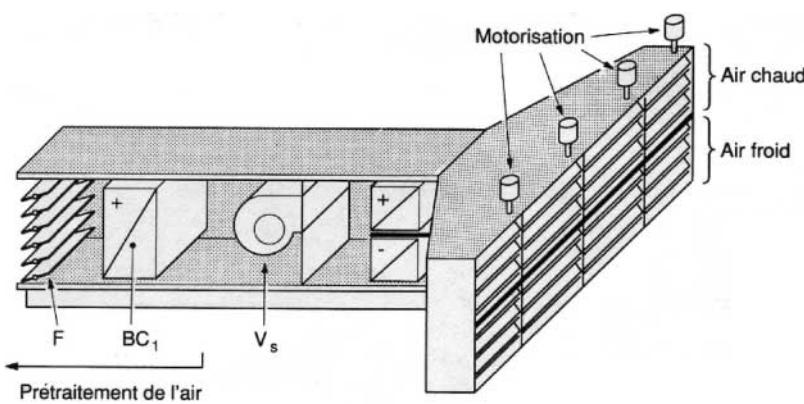
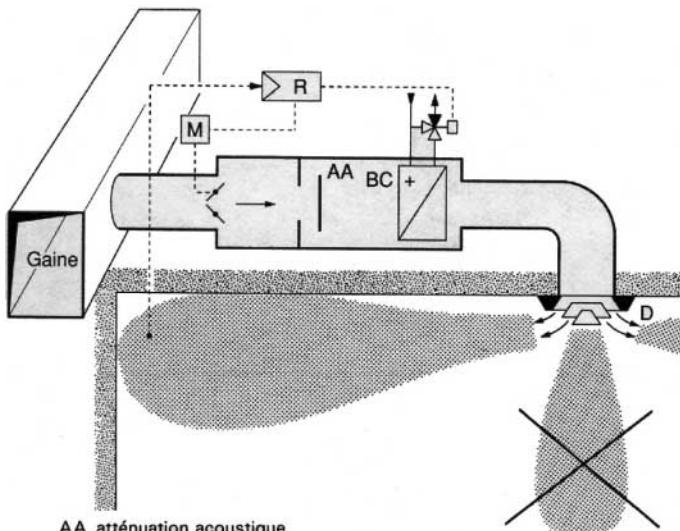


Figure 48 – Schéma général d'une centrale multizone (se reporter à la figure 44 pour le prétraitement de l'air)



AA atténuation acoustique  
BC batterie à eau chaude (en cas de réchauffage terminal uniquement)  
D diffuseur  
R régulateur

Figure 49 – Système monogaine à débit variable

avec  $Q$  débit d'air injecté dans la zone maintenue constante,  
 $c_p$  capacité thermique massique à pression constante de l'air,  
 $\theta_a$  température ambiante de la zone,  
 $\theta_s$  température de soufflage (grandeur réglée).

Les registres motorisés permettent de mélanger l'air chaud et l'air froid pour obtenir une température de soufflage qui maintient la température désirée dans la zone considérée. Le contrôle de la température est réalisé par une sonde d'ambiance. Le maintien d'un débit constant peut être assuré par une membrane autocontrôlée (figure 50a) ou par un capteur de pression différentielle (figure 50b) qui agit, en dérogation de l'information issue de la sonde d'ambiance et par l'intermédiaire du régulateur, sur l'ouverture ou la fermeture des registres d'air chaud et d'air froid en respectant le même rapport de mélange.

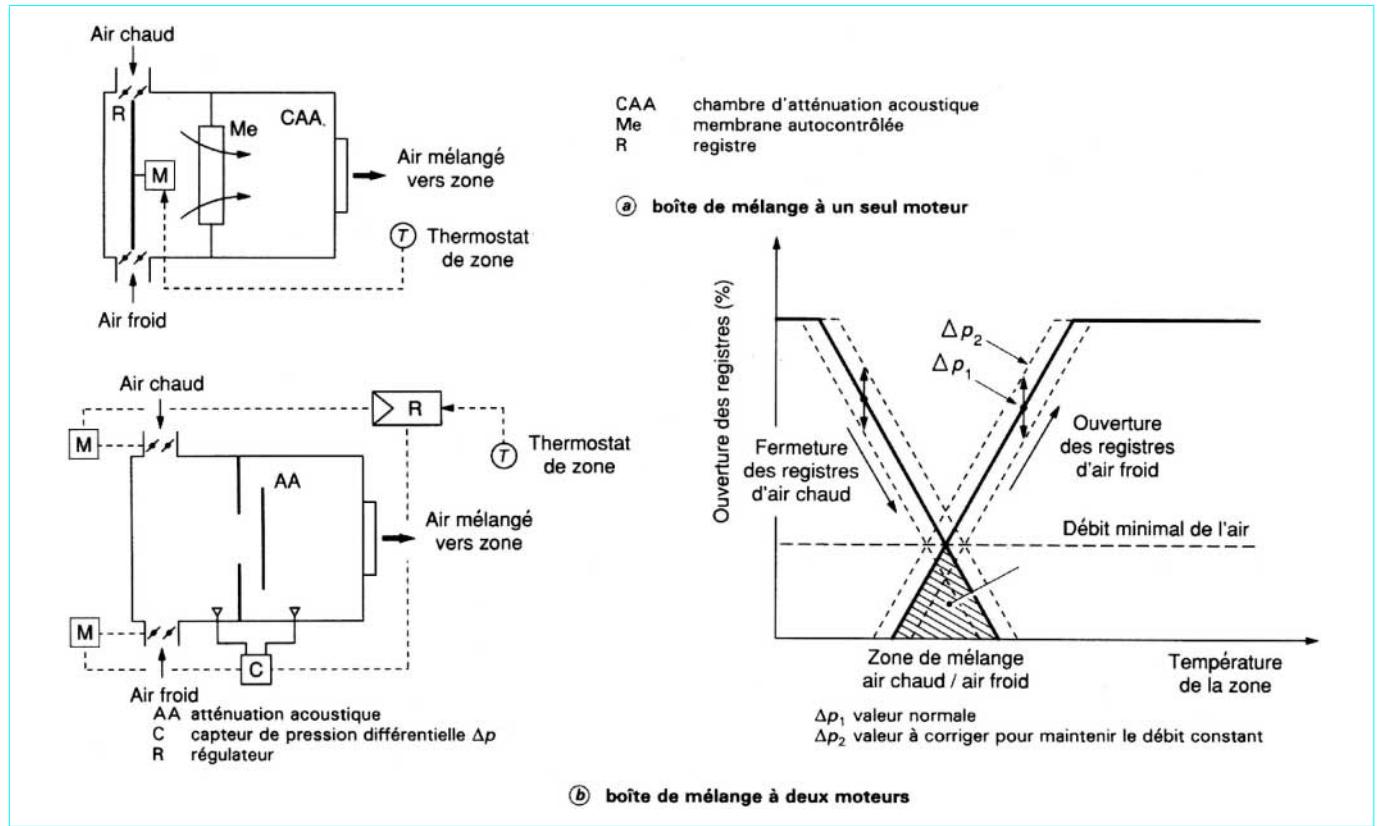
### 5.2.3 Ventiloconvecteur

Un ventiloconvecteur est un appareil équipé d'un ventilateur et de batteries eau/air, alimenté par un réseau à deux, trois ou quatre tuyauteries. Le choix de ces différents systèmes d'alimentation se fera en fonction de la précision de la température à obtenir dans les locaux et sur des critères de coût d'investissement.

La température de l'air à l'intérieur du local est ajustée en agissant sur le débit circulant dans la ou les batteries du ventiloconvecteur.

#### 5.2.3.1 Système à deux tuyauteries

Ce système s'applique au ventiloconvecteur comportant une seule batterie air/eau raccordée à un réseau à deux tuyauteries d'eau chaude ou froide selon les saisons (figure 51a).



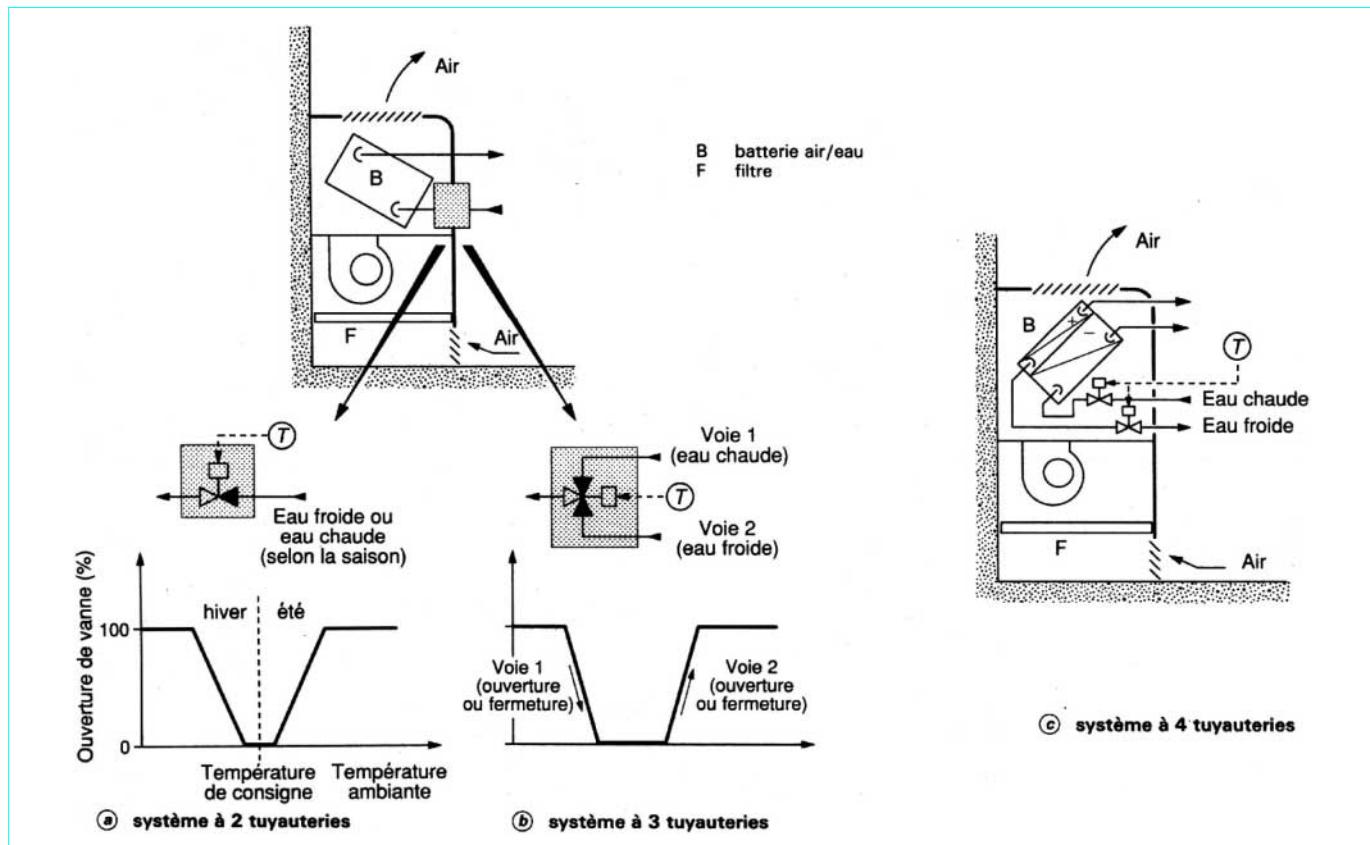


Figure 51 – Systèmes monogaine avec ventiloconvecteur à 2, 3 ou 4 tuyauteries

## 6. Annexe 1 : critères d'évaluation d'un actionneur

Les actionneurs qui agissent sur la régulation d'un vecteur énergétique, de type pneumatique, hydraulique ou électrique peuvent être évalués selon plusieurs critères :

- puissance ;
- rapidité ;
- comportement en cas de perte d'énergie motrice ;
- position de repli ;
- précision du positionnement et hystérésis ;
- facilité d'interfaçage régulateur-actionneur ;
- entretien et maintenance préventive ;
- longévité ;
- coût d'installation.

Après analyse de ces critères, les habitudes professionnelles et les caractéristiques particulières du site (présence de fluide automoteur, par exemple) doivent également être prises en compte.

### 6.1 Puissance

Les **actionneurs à pistons (pneumatiques ou hydrauliques)** offrent une action puissante, le fluide automoteur agissant directement sur l'organe à commander.

En effet, le diamètre de la membrane motrice d'un servomoteur est généralement compris entre 20 et 30 cm. Un fluide moteur d'une pression de 5 bar exercera sur la tige du servomoteur une force de près de 35 kN (3,5 t) ; cette force correspond, pour un siège de 3 cm de diamètre, à une pression de 50 bar.

La pression différentielle entre l'amont et l'aval de la vanne est généralement très inférieure à 50 bar, donc l'actionneur à pistons convient à la plupart des applications de régulation des systèmes de chauffage et de climatisation.

Lorsque le fluide moteur est compressible (air comprimé), des coups de bâlier peuvent prendre naissance à la fermeture du siège. Ce phénomène n'apparaît pas avec des fluides moteurs comme l'huile ou l'eau.

La puissance des **actionneurs électriques** dépend du degré de réduction de la pignonerie. Plus celui-ci est élevé, plus le couple exercé sur l'actionneur sera important.

## 6.2 Rapidité

La rapidité est souvent jugée comme un critère déterminant dans le choix d'un actionneur. Cette caractéristique se traduit par le temps mis pour passer d'une position de pleine ouverture à une position de fermeture totale. Les valeurs généralement rencontrées sont les suivantes :

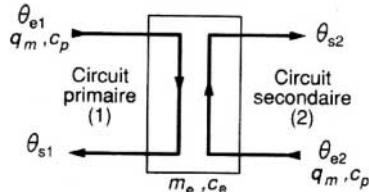
actionneurs hydraulique : 1 s

pneumatique : 5 s

électrique : 10 à 30 s (parfois jusqu'à quelques minutes)

Cependant, si la rapidité d'un actionneur est une caractéristique essentielle pour la commande de certains processus comme le remplissage d'une cuve, elle est généralement secondaire dans la plupart des applications de la thermique industrielle qui présentent de fortes inerties.

L'exemple suivant montre l'importance toute relative de ce paramètre pour les applications de chauffage et de conditionnement d'air. Prenons le cas d'un échangeur de chaleur à contre-courant inséré dans un processus subissant de fortes variations de charge thermique (l'efficacité de l'échangeur est supposée être égale à 1) :



avec  $c_e$  capacité thermique massique de l'échangeur,

$c_p$  capacité thermique massique à pression constante du fluide circulant dans l'échangeur,

$m_e$  masse de l'échangeur,

$q_m$  débit-masse circulant dans l'échangeur (débits égaux dans le primaire et le secondaire),

$\theta$  température.

L'expression de l'évolution de la température de sortie  $\theta_{s1}$  en fonction d'un échelon de température appliquée au fluide secondaire s'écrit :

$$\theta_{s1} = \theta_{e2} - [\theta_{e2} - \theta_{e2}(t=0)] \exp\left(-\frac{q_m c_p}{m_e c_e} t\right)$$

Ainsi, un échangeur d'un débit primaire et secondaire de 1 m<sup>3</sup>/h et d'une capacité thermique totale de 50 L, soumis à une variation brutale de température de 10 °C, verra évoluer la température secondaire de 0,6 °C au bout de 10 s et de 1,7 °C au bout de 30 s (figure 52). Ce système fréquemment rencontré dans les processus thermiques peut être réglé par un actionneur ayant un temps d'ouverture ou de fermeture compris entre 10 et 30 s.

Ces résultats issus de calculs simplifiés sont à rapprocher d'un comportement dynamique d'un capteur de température soumis à une variation brutale de la température du fluide dans lequel il est plongé (figure 6b, § 1.3.2). La position du capteur de température introduit des retards qui sont de même ordre de grandeur (10 s à quelques minutes).

Cet exemple montre que le critère de rapidité d'un actionneur pour la commande de systèmes de chauffage et de climatisation n'est pas déterminant, les retards générés par le système étant supérieurs au temps d'ouverture-fermeture de l'actionneur (généralement compris entre 1 s et quelques minutes).

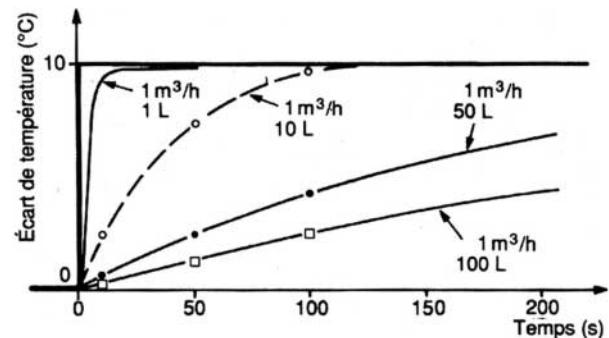


Figure 52 – Variation de température ( primaire et secondaire) en fonction du temps

## 6.3 Autonomie

Tous les actionneurs nécessitent une énergie motrice.

L'énergie électrique étant généralement disponible en tous points de l'usine, les **actionneurs électriques** seront considérés comme autonomes. Par contre, les **actionneurs pneumatiques** imposent une production d'air comprimé et traité qui n'est pas toujours disponible ; ces actionneurs sont donc dépendants de cette source.

Les **actionneurs hydrauliques** nécessitent aussi un groupe hydraulique centralisé ; ce groupe est dans certains cas incorporé au servomoteur, ce qui rend son autonomie comparable à celle d'un servomoteur électrique.

## 6.4 Comportement en cas de perte d'énergie motrice

Le comportement de l'actionneur en cas de défaillance de l'énergie motrice occasionnée par une rupture de l'alimentation électrique ou en fluide est un facteur primordial dont dépend la sécurité de fonctionnement du processus.

L'**actionneur électrique** se bloque en position, ce qui est jugé comme un bon comportement. Il peut être pour certaines applications équipé d'un ressort de rappel ramenant l'organe de réglage en position (ouverture ou fermeture).

Par contre, les **actionneurs pneumatiques et hydrauliques** reviennent toujours en position de pleine ouverture ou de pleine fermeture. Ce comportement peut, selon les cas, présenter des inconvénients ; ainsi, le blocage en position nécessitera l'installation de clapet antiretour.

## 6.5 Position de repli

Certaines applications imposent, pour des raisons de sécurité, une position déterminée en cas de défaillance de la chaîne de régulation ou d'une perte d'énergie motrice. C'est le cas, par exemple, des clapets placés sur les conduits de fumée des chaudières.

Les **actionneurs pneumatiques et hydrauliques** permettent la position de repli en installant une réserve d'air ou un vase d'expansion.

La position de repli avec des **actionneurs électriques** est plus difficile à réaliser ; elle peut être cependant effectuée par des ressorts antagonistes.

## 6.6 Précision de positionnement. Hystérésis

Bien que la précision mécanique du positionnement d'un actionneur soit un paramètre à prendre en compte dans le choix de celui-ci, l'hystérésis et la linéarité de la grandeur réglante en fonction de la position de l'organe de réglage seront également des facteurs déterminants à considérer, car ils peuvent être à l'origine d'instabilité de fonctionnement. Pour éviter ces inconvénients, l'actionneur ayant une évolution de la grandeur réglante aussi linéaire que possible sera préféré dans la plupart des applications (figure 53).

## 6.7 Facilité d'interfaçage régulateur-actionneur

Les actionneurs acceptent deux types de signaux :

- les **signaux analogiques** ; les actionneurs, fonctionnant alors avec des signaux 0-10 V, 0-20 V ou 4-20 mA, nécessitent un potentiomètre d'asservissement qui permettra d'informer le régulateur sur la position de l'organe de commande. Les plages de résistances de ces potentiomètres varient suivant les constructeurs, ce qui pose des problèmes d'interfaçage entre des matériels de marques différentes ;
- les **signaux incrémentaux** ; les actionneurs, moins utilisés en régulation des systèmes de chauffage, ne nécessitent alors pas de potentiomètres d'asservissement.

Le problème de l'interfaçage se pose au niveau de la maintenance ou de l'intégration des systèmes de régulation existants dans un projet de gestion technique d'installation. Dans ces situations, le problème de la communication entre matériels hétérogènes se pose souvent et conduit à la réalisation de carte d'interfaçage afin de rendre compatible le signal de commande du régulateur avec celui accepté par l'actionneur.

## 6.8 Entretien et maintenance

Les actionneurs à commande par fluide ont un entretien pratiquement nul si l'on exclut la centrale de production. Ils sont peu sensibles à l'environnement (température, poussière, etc.).

Les actionneurs à commande électrique à moteur à cage demandent une maintenance tous les deux ans environ.

## 6.9 Longévité

La longévité d'un actionneur dépend de la qualité du fluide commandé :

- un écoulement diphasique de vapeur et de gouttelettes est une cause d'érosion du siège d'une vanne ;
- le choix du clapet est un élément important ; un clapet équilibré fonctionnant sur un fluide à forte pression différentielle évite des oscillations parasites ou des coups de bâlier au moment de la fermeture.

Son implantation à un endroit ou à un autre sur le circuit (figure 54), s'il est identique au niveau hydraulique, permet un fonctionnement avec ou sans contraintes thermiques.

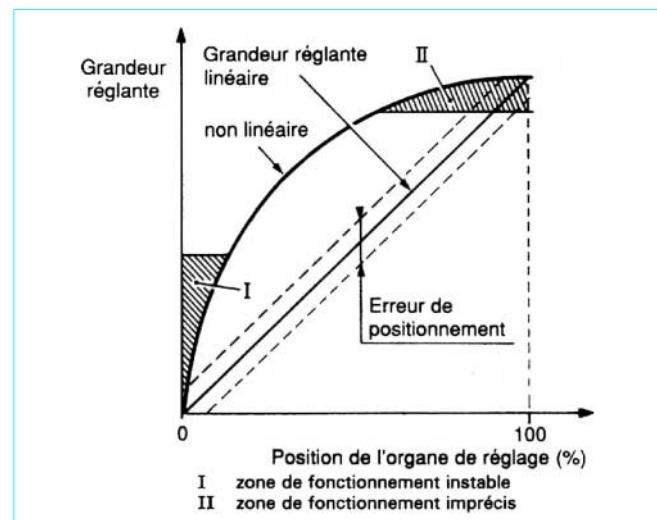
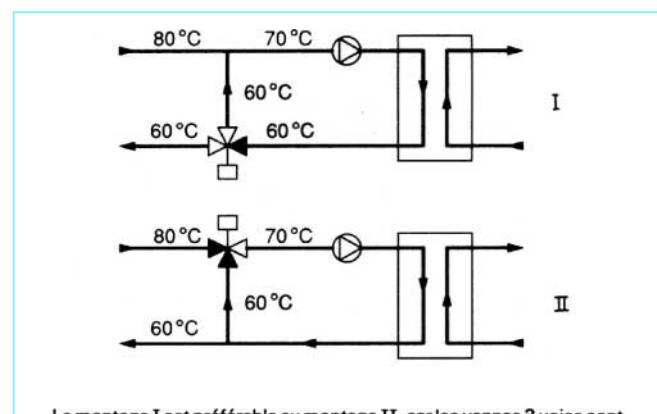


Figure 53 – Évolution de la grandeur réglante en fonction de la position de l'organe de réglage



Le montage I est préférable au montage II, car les vannes 3 voies sont à une température homogène.

Figure 54 – Implantation de l'actionneur, facteur de longévité

## 6.10 Coût d'installation

Si l'on exclut la centrale d'énergie motrice, les actionneurs ont un coût d'installation qui croît dans l'ordre suivant :

- pneumatique ;
- électrique ;
- hydraulique.

Ce classement peut être modifié selon la taille et la quantité d'appareils installés.

## 7. Annexe 2 : principes généraux de régulation d'une pompe à chaleur

L'ambition de ce paragraphe n'est pas de fournir une description exhaustive des principes de régulation des pompes à chaleur (PAC) mais de présenter leurs contraintes de fonctionnement afin d'en déduire quelques règles de conception des systèmes de régulation (figure 55).

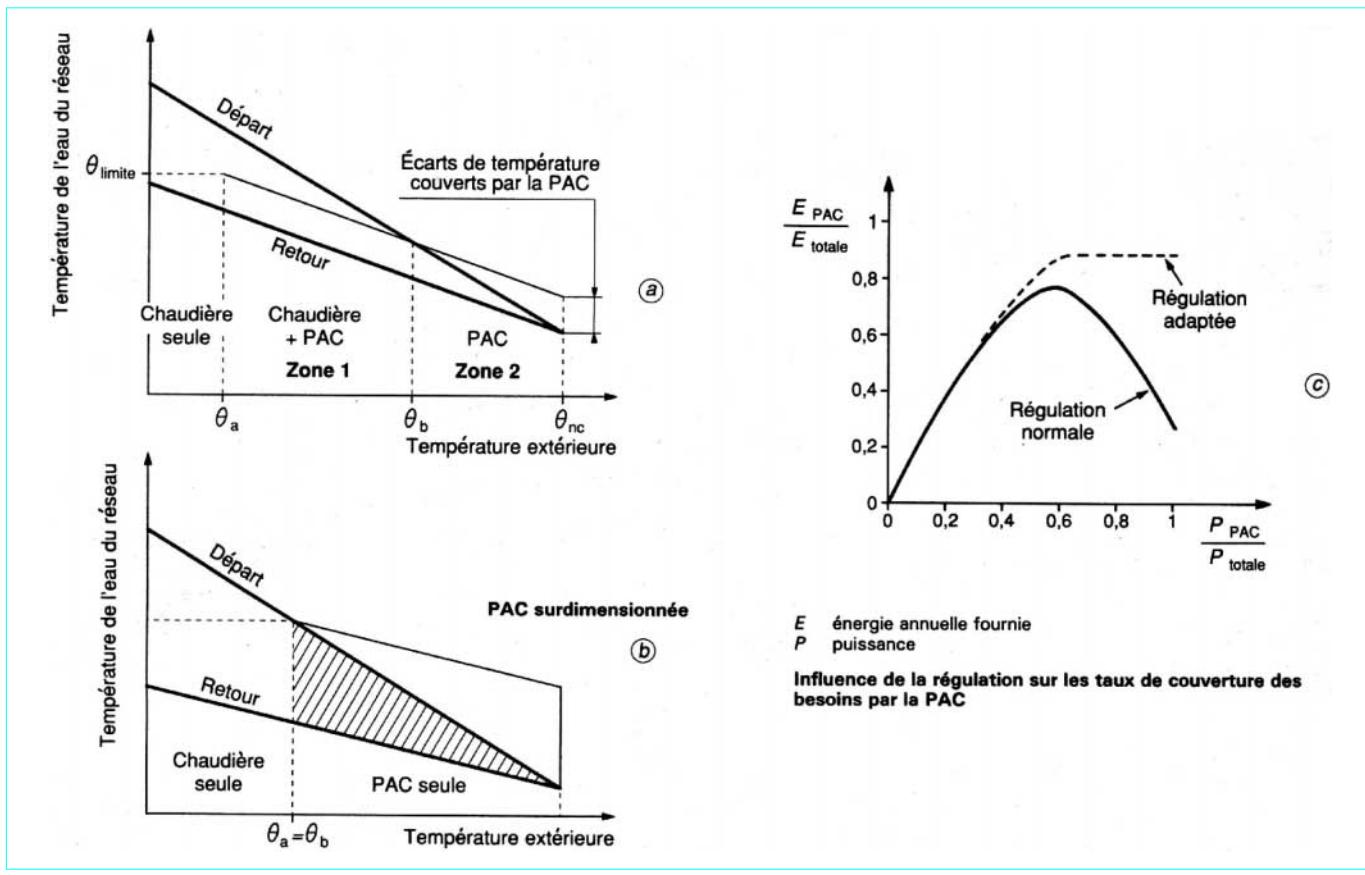
Supposons qu'une PAC ait une puissance constante, c'est-à-dire qu'elle élève toujours la température d'un même nombre de degrés, la courbe de température de sortie au condenseur est parallèle à la droite de température des retours [cas a)]. On distingue alors deux zones de fonctionnement de la PAC : la zone 1 où elle ne couvre pas entièrement les besoins et la zone 2 où elle assure tous les besoins.

Si l'on augmente la puissance de la PAC, la température  $\theta_a$  augmente tandis que  $\theta_b$  diminue : la PAC fonctionne donc moins souvent ; par contre, pendant sa période de fonctionnement, elle couvre une plus grande part des besoins. À la limite ( $\theta_a = \theta_b$ ), la zone 1 disparaît : la PAC couvre tous les besoins quand elle fonctionne [cas b)].

Si l'on augmente encore la puissance de la PAC, la zone 2 diminue à son tour : le taux de couverture ne fait que diminuer. On a donc nécessairement un optimum de dimensionnement de la PAC.

Avec les hypothèses simplificatrices précédentes et en utilisant un fichier de températures horaires, on peut facilement établir par un calcul simple une courbe qui met en évidence le taux de couverture des besoins par la pompe à chaleur. Les résultats sont présentés sur la figure 55 dans le cas de radiateurs dont les températures des réseaux sont de  $70^{\circ}\text{C}/50^{\circ}\text{C}$  pour le climat de Paris. Ces courbes présentent un maximum très net pour une PAC dimensionnée à environ 50 % de la puissance totale. On a ainsi mis en évidence que la limitation de la température de sortie du condenseur à  $55^{\circ}\text{C}$ , en réduisant le temps de fonctionnement de la PAC, altère son taux de couverture pour les dimensionnements importants. Ce phénomène est accentué avec des réseaux à températures plus élevées.

On peut tenter de pallier cet inconvénient en faisant fonctionner la PAC en réduction de puissance pour des températures extérieures inférieures à  $\theta_a$ . Cela exige la conception d'une régulation adéquate. On distinguera pour la régulation une troisième zone où la PAC fonctionne à puissance partielle en maintenant une température d'eau constante à la sortie du condenseur.



# Régulation des systèmes de chauffage et de climatisation des bâtiments

par **Gérard LAURENT**

Docteur-Ingénieur

Directeur Technique à la Société Française d'Études Énergétiques

## Références bibliographiques

- [1] HAINES (W.). – *Techniques de régulation en génie climatique*. Pyc Éditions (1981).
- [2] *Manuel des industries thermiques*. COSTIC-Dunod.
- [3] *Manuel de la régulation et de la gestion de l'énergie*. Association Confort Régulation (1986).
- [4] *Le Recknagel - Manuel pratique du génie climatique*. Pyc Éditions, déc. 1986.
- [5] FAURRE (P.) et ROBIN (M.). – *Éléments d'automatique*. Dunod (1984).
- [6] BÜHLER (H.). – *Électronique de réglage et de commande*. Dunod (1983).

## Organismes

Agence Française pour la Maîtrise de l'Énergie (AFME).

Association Confort Régulation.

Association Parisienne de Propriétaires d'Appareils à Vapeur et Électriques (APPAVE).

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB).

Comité Scientifique et Technique des Industries du Chauffage, de la Ventilation et du Conditionnement de l'Air (COSTIC).

Syndicat National des Entreprises de Gestion d'Équipements Thermiques et de Climatisation (SNEC).

Union Intersyndicale des Constructeurs de Matériel Aéraulique, Thermique, Thermodynamique et Frigorifique (UNICLIMA).