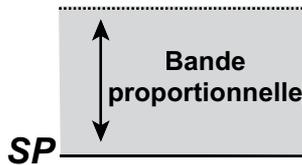
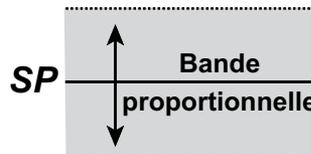


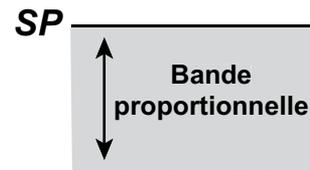
Réglage d'un régulateur P : procédé autorégulateur



$MR = 0 \%$
(Soutien)



$MR = 50 \%$
(Soutien)



$MR = 100 \%$
(Soutien)

8.1 Introduction

Pour certains procédés, par exemple de chauffage ou de refroidissement, la constante de temps du procédé global τ est longue par rapport au retard t_d qui est relativement inexistant. La méthode de Ziegler et Nichols en boucle ouverte permet de calculer une valeur de K_p pour un régulateur P.

$$K_p = \frac{1}{G_p} \times \frac{\tau}{t_d} \quad (8.1)$$

Si la constante de temps τ est beaucoup plus grande que le retard t_d , le gain K_p du régulateur peut prendre des valeurs élevées sans que le système devienne instable. Or, si la valeur du gain K_p du régulateur est élevée, il arrive souvent qu'un bloc I ne soit plus requis pour réduire suffisamment l'écart entre le PV et le SP puisque la bande proportionnelle devient si étroite que l'écart maximum possible est acceptable avec un bloc P seul.

Le présent chapitre traite de ces procédés répandus pour lesquels le rapport τ/t_d est très élevé.

8.2 Rappel : bande proportionnelle

La relation entre la bande proportionnelle d'un régulateur P et le gain K_p du régulateur est :

$$BP = \frac{100 \%}{K_p} \quad (8.2)$$

La valeur BP de la bande proportionnelle est l'inverse du gain K_p du régulateur. Elle se mesure toujours en **pour cent** alors que le gain K_p du régulateur se mesure toujours en unité réduite (*per unit*) d'où le facteur 100 % dans l'équation. Par exemple, un gain K_p de 2 a une bande proportionnelle de 50 %.

Si $K_p = 10$, la bande proportionnelle vaut 10 %, ce qui veut dire que l'écart maximum entre le SP et le PV est de 10 % du *Span* de mesure. Un écart maximal de cet ordre de grandeur est souvent acceptable pour plusieurs procédés, dont les systèmes de confort humain.

Comme on a toujours avantage à simplifier le réglage d'un régulateur, si l'on n'a pas besoin des blocs I et D pour atteindre les objectifs de performance, on ne les utilise pas.

8.3 Rappel : action directe et action inverse

Un régulateur est à action directe si, lorsque le PV augmente, le CO doit augmenter.

Un régulateur est à action inverse si, lorsque le PV augmente, le CO doit diminuer.

Action directe sans valeur de soutien

Le système de la figure 8.1 conserve le lait pasteurisé à une température froide.

Si la température tend à augmenter, PV augmente.

Si PV augmente, la vanne de refroidissement doit ouvrir davantage afin de faire passer plus d'eau de refroidissement dans l'échangeur de chaleur.

La vanne TV est FC (*Fail Closed*). Elle est donc fermée lorsque $CO = 0\%$. Il faudra donc que la valeur du CO augmente pour que le débit d'eau froide augmente.

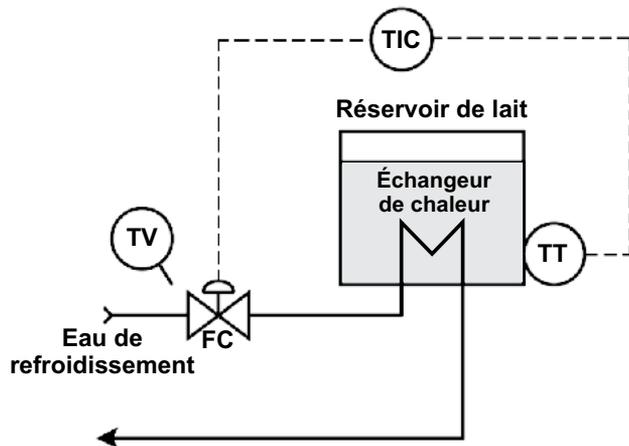


Figure 8.1 Système avec un régulateur à action directe

Ce raisonnement s'écrit symboliquement comme suit :

PV↑	vanne ↑	CO↑	Action directe
-----	---------	-----	----------------

Si la charge du procédé (les gains de chaleur) est nulle, la vanne de contrôle ferme complètement afin de garder le PV au SP de température.

Dès que les gains de chaleur augmentent, soit par l'arrivée d'une quantité de lait plus chaud ou par les gains de chaleur par les parois du réservoir, la vanne de contrôle ouvre pour compenser ces gains.

Donc, CO augmente, mais comme on a un régulateur P, la valeur du PV ne peut pas être retourné à celle du SP. Il reste toujours un écart E entre le PV et le SP.

Si la charge continue à augmenter, la température augmente aussi jusqu'à la limite de la bande proportionnelle, c'est-à-dire jusqu'à la température pour laquelle $CO = 100\%$ et le refroidissement est maximal. Un système correctement conçu a un débit de refroidissement qui permet de compenser une charge de 100% . En d'autres mots, lorsque la charge est de 100% , la vanne de contrôle doit être ouverte au plus à 100% . Cela signifie en pratique que $CO \leq 100\%$ pour un système correctement conçu. On opère donc toujours à l'intérieur de la bande proportionnelle.

On appelle « **charge contrôlable** » la charge maximale que le système peut contrôler lorsque $CO = 100\%$, c'est-à-dire à 100% de refroidissement.

À mesure que la charge augmente, la température s'écarte du point de consigne (figure 8.2).

À la charge maximale contrôlable, $PV \leq SP + BP$.

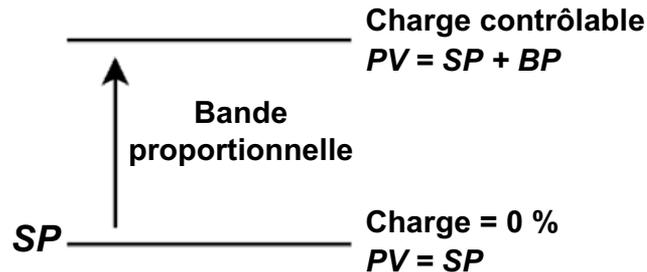


Figure 8.2 Bande proportionnelle en mode d'action directe sans valeur de soutien

Par exemple, la température d'un local climatisé est contrôlée par un régulateur P. Le thermostat est ajusté à 23 °C et la bande proportionnelle correspond à 2 °C. Cela signifie que si la température est à 23 °C et qu'il n'y a donc pas de gains de chaleur, $CO = 0 \%$ et l'on ne refroidit pas le local.

Dès que les gains de chaleur sont présents, le PV s'éloigne du SP. Lorsque les gains de chaleur sont au maximum, si le système est bien conçu, la température ne dépasse pas 25 °C, soit la température correspondant au SP (23 °C) plus l'écart de température correspondant à la bande proportionnelle BP (2 °C) qui fait opérer le refroidissement à 100 %.

Pour un système avec un régulateur à action directe, la bande proportionnelle BP est au-dessus du SP si la valeur de soutien MR du régulateur est nulle (figure 8.2).

Action inverse sans valeur de soutien

Le système de chauffage de la figure 8.3 régule la température dans un hangar.

Si la température intérieure diminue, le PV diminue.

Si le PV diminue, la vanne de chauffage doit ouvrir afin de laisser passer plus d'eau chaude dans l'aérotherme.

La vanne TV est FC. Elle est donc fermée lorsque $CO = 0 \%$. Il faudra donc que le CO augmente pour que le débit d'eau chaude augmente.

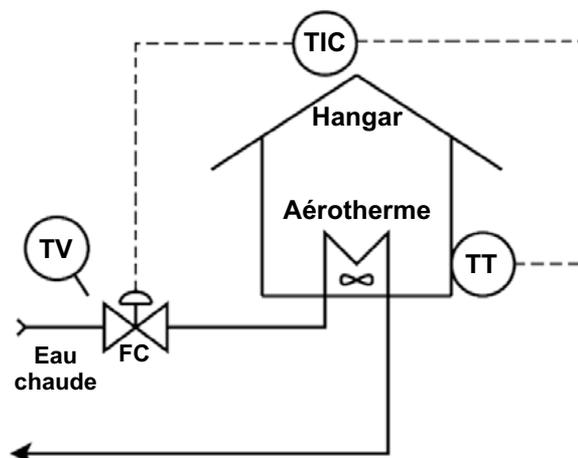


Figure 8.3 Bande proportionnelle en mode d'action inverse

Ce raisonnement s'écrit symboliquement comme suit :

$PV \downarrow$ vanne \uparrow $CO \uparrow$ **Action inverse**

Si la charge du procédé (les pertes de chaleur) est nulle, la vanne de contrôle ferme complètement afin de garder le PV au SP de température.

Dès que les pertes de chaleur sont présentes à cause de la température extérieure, la vanne de contrôle ouvre pour compenser ces pertes.

La valeur du CO augmente, mais comme on a un régulateur P, le PV ne peut pas être ramené au SP. Il reste toujours un écart E entre le PV et le SP.

Si la charge continue à augmenter, le PV baisse jusqu'à la limite de la bande proportionnelle, c'est-à-dire jusqu'à la valeur du PV pour laquelle $CO = 100\%$. Un système correctement conçu a un débit de chauffage qui permet de compenser une charge de 100% . En d'autres mots, lorsque la charge est de 100% , la vanne de contrôle doit être ouverte au plus à 100% . On opère donc toujours à l'intérieur de la bande proportionnelle.

À mesure que la charge augmente, le PV s'écarte du SP (figure 8.4).

À la charge maximale contrôlable, $PV \geq SP - BP$.

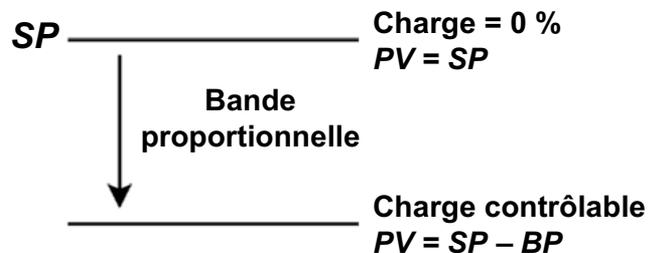


Figure 8.4 Bande proportionnelle en mode d'action inverse sans valeur de soutien

Par exemple, la température d'un local chauffé est contrôlée par un régulateur P. Le thermostat est ajusté à 23 °C et la bande proportionnelle correspond à 2 °C . Cela signifie que si la température est à 23 °C et qu'il n'y a donc pas de pertes de chaleur, $CO = 0\%$ et l'on ne chauffe pas le local.

Dès que les pertes de chaleur se présentent, le PV s'écarte du SP. Lorsque les pertes de chaleur sont au maximum, si le système est bien conçu, la température ne descend pas sous 21 °C , soit la température correspondant au SP (23 °C) moins l'écart de température correspondant à la bande proportionnelle BP (2 °C) qui fait opérer le chauffage à 100% .

Pour un système avec un régulateur à action inverse, la bande proportionnelle BP est au-dessous du SP si la valeur de soutien MR du régulateur est nulle (figure 8.4).

8.4 Déplacement de la bande proportionnelle et valeur de soutien MR

La valeur de soutien MR du régulateur P permet de déplacer la bande proportionnelle afin d'obtenir une opération différente du système de contrôle (figure 8.5).

Comme la bande proportionnelle, la valeur de soutien se donne toujours en pour cent.

Par exemple, en chauffage, on peut vouloir que le SP corresponde à 22 °C avec une bande proportionnelle qui corresponde à 2 °C, soit ± 1 °C autour de 22 °C. Cela revient à dire que si la température atteint 23 °C, le chauffage est à 0 %. Si la température atteint 21 °C, le chauffage est à 100 %.

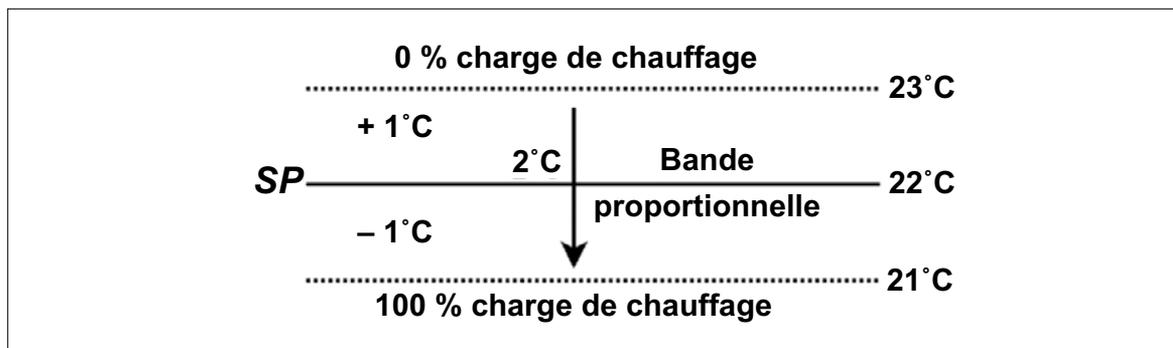


Figure 8.5 Bande proportionnelle déplacée en mode d'action inverse

Normalement, si le SP correspond à 22 °C et la bande proportionnelle correspond à 2 °C, on a 0 % de chauffage à 22 °C, et 100 % de chauffage à 20 °C (figure 8.6).

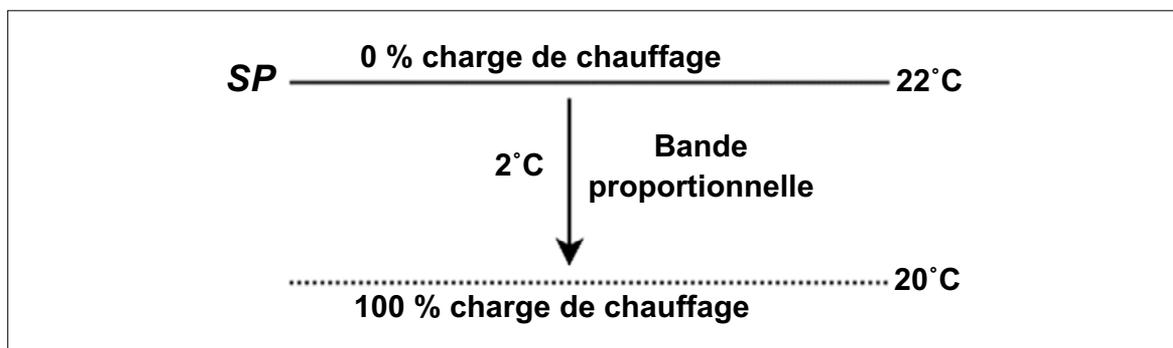


Figure 8.6 Bande proportionnelle non déplacée en mode d'action inverse

Pour un SP qui correspond à 22 °C si l'on veut que la bande proportionnelle corresponde à une plage de 21 °C à 23 °C, il faut déplacer la BP vers le haut par rapport au SP. Cette opération se fait au moyen de la valeur de soutien MR ajoutée à la sortie du régulateur.

8.5 Déplacement de la bande proportionnelle en mode d'action directe

Pour un régulateur à action directe avec une valeur de soutien à 0 %, la bande proportionnelle se trouve au-dessus du SP. Si l'on veut déplacer cette bande proportionnelle par rapport au SP, on ne peut raisonnablement que descendre la bande proportionnelle d'une valeur maximale de *BP* puisque le SP doit toujours être à l'intérieur de la bande proportionnelle.

Un tel déplacement de la bande proportionnelle permet, par exemple, pour un système de climatisation (figure 8.7) :

- de fixer au moyen du SP la température **minimale** à ne pas dépasser (pas de déplacement de la BP) ;
- de fixer au moyen du SP la température **maximale** à ne pas dépasser (déplacement de 100 % de la BP) ;
- de fixer la bande proportionnelle à **cheval** sur le SP (déplacement de 50 % de la BP).

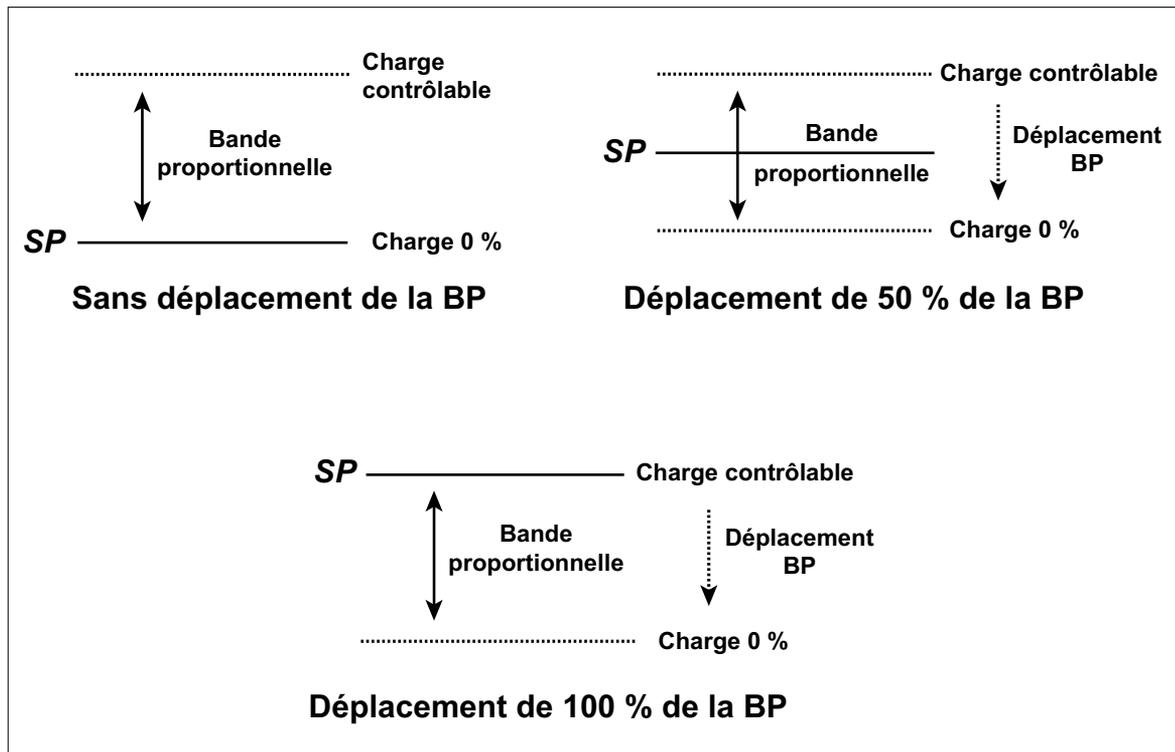


Figure 8.7 Déplacement de la bande proportionnelle en mode d'action directe

Examinons le schéma fonctionnel d'un régulateur à action directe avec valeur de soutien (figure 8.8).

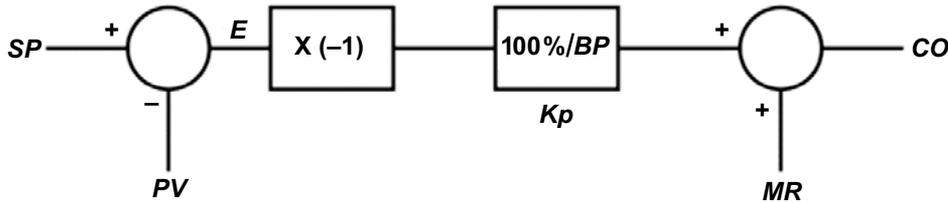


Figure 8.8 Régulateur à action directe avec MR (valeur de soutien)

En mode d'action directe, la valeur $E = SP - PV$ est multipliée par -1 puis par le gain Kp avant d'ajouter la valeur de soutien à la sortie du régulateur.

À partir de ce schéma, on peut écrire l'équation du régulateur.

$$CO = (SP - PV) \times (-1) \times Kp + MR \quad (8.3)$$

$$CO = (PV - SP) \times Kp + MR \quad (8.4)$$

$$PV = \left(SP + \frac{CO}{Kp} \right) - \frac{MR}{Kp} \quad (8.5)$$

$$PV = \left(SP + \frac{CO}{Kp} \right) - \left(\frac{MR}{100\%} \right) \times BP \quad (8.6)$$

L'expression $SP + CO/Kp$ localise la bande proportionnelle pour $MR = 0 \%$. En effet :

$$\text{Si charge} = 0 \% \rightarrow CO = 0 \% \rightarrow PV = SP$$

$$\text{Si charge} = \text{charge contrôlable} \rightarrow CO = 100 \% \rightarrow CO/Kp = BP \rightarrow PV = SP + BP$$

L'expression $-(MR/100 \%) \times BP$ représente le déplacement de la bande proportionnelle par MR. Par exemple, si $MR = 50 \%$, la bande proportionnelle sera déplacée **vers le bas** de 50% de sa valeur.

En mode d'action directe, la valeur de soutien MR déplace la bande proportionnelle BP vers le bas de la valeur de $(MR/100 \%) \times BP$

$$\text{Déplacement}_{\text{action directe}} = - \left(\frac{MR}{100\%} \right) \times BP \quad (8.7)$$

8.6 Déplacement de la bande proportionnelle en mode d'action inverse

Pour un régulateur à action inverse avec une valeur de soutien à 0 %, la bande proportionnelle se trouve sous la valeur du SP. Si l'on veut déplacer cette bande proportionnelle par rapport au SP, on ne peut raisonnablement que monter d'une valeur maximale de BP puisque le SP doit toujours être dans la bande proportionnelle.

Un tel déplacement de la bande proportionnelle permet, par exemple en chauffage (figure 8.9):

- de fixer au moyen du SP la température **maximale** à ne pas dépasser (pas de déplacement de la BP);
- de fixer au moyen du SP la température **minimale** à ne pas dépasser (déplacement de 100 % de la BP);
- de fixer la bande proportionnelle à **cheval** sur le SP (déplacement de 50 % de la BP).

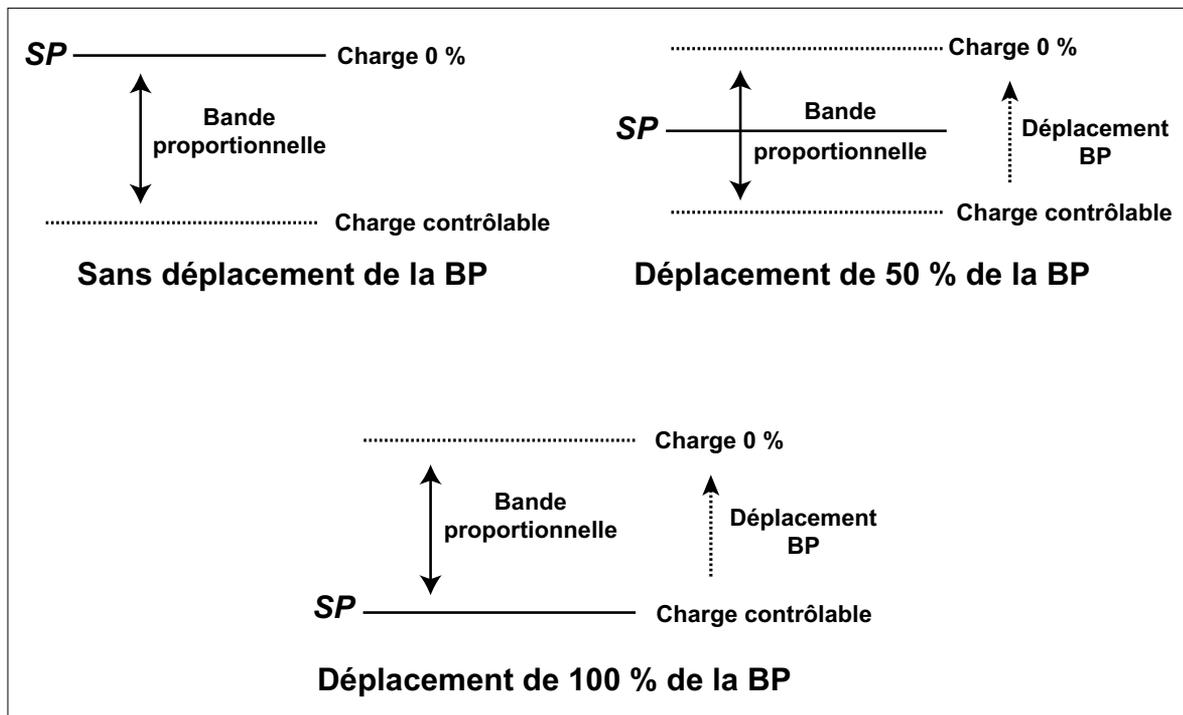


Figure 8.9 Déplacement de la bande proportionnelle en mode d'action inverse

Examinons le schéma fonctionnel d'un régulateur à action inverse avec valeur de soutien (figure 8.10).

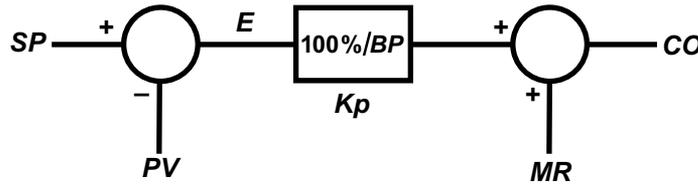


Figure 8.10 Régulateur à action inverse avec MR (valeur de soutien)

En mode d'action inverse, l'écart $E = SP - PV$ est multiplié par le gain Kp avant d'ajouter la valeur de soutien à la sortie du régulateur.

À partir de ce schéma, on peut écrire l'équation du régulateur.

$$CO = (SP - PV) \times Kp + MR \tag{8.8}$$

$$PV = \left(SP - \frac{CO}{Kp} \right) + \left(\frac{MR}{100 \%} \right) \times BP \tag{8.9}$$

L'expression $(SP - CO/Kp)$ localise la bande proportionnelle pour $MR = 0 \%$.

$$\text{Si charge} = 0 \% \rightarrow CO = 0 \% \rightarrow PV = SP$$

$$\text{Si charge} = \text{charge contrôlable} \rightarrow CO = 100 \% \rightarrow CO/Kp = BP \rightarrow PV = SP - BP$$

L'expression $+(MR/100 \%) \times BP$ représente le déplacement de la bande proportionnelle par MR. Par exemple, si $MR = 50 \%$, la bande proportionnelle sera déplacée **vers le haut** de 50 % de sa valeur.

En mode d'action inverse, la valeur de soutien MR déplace la bande proportionnelle BP vers le haut de la valeur de $(MR/100 \%) \times BP$.

$$\text{Déplacement}_{\text{action inverse}} = + \left(\frac{MR}{100 \%} \right) \times BP \tag{8.10}$$