

Régulation

Principes fondamentaux et astuces
pour le praticien



Régulation

Principes fondamentaux et astuces
pour le praticien



Manfred Schleicher



JUMO-REGULATION

7 rue des Drapiers

57075 METZ Cedex 3

Tél. : 03 87 37 53 00

E-mail : info.fr@jumo.net

Internet : www.jumo.fr

Reproduction autorisée avec mention de la source !

Référence du guide : FAS 525

Date d'impression : 2022

Avant-propos

La régulation est un des composants élémentaires des techniques d'automatisation modernes et constitue un composant clé de l'industrie. Malgré tout elle a souvent la réputation d'être très théorique et tournée vers les mathématiques. C'est pourquoi cet ouvrage technique se concentre très fortement sur des aspects pratiques de la régulation.

Cet ouvrage ne veut pas être un livre de cours scientifique mais il se veut adapté au lecteur et délibérément débarrassé des passages théoriques inutiles ; il se concentre sur : comment définir les systèmes asservis, comment déterminer les paramètres de régulation et comment optimiser les régulateurs. Cet ouvrage technique repose sur une expérience de plus de vingt ans de l'auteur en tant que formateur en mesure et régulation. Dans ses descriptions, l'auteur donne des trucs et astuces toujours pratiques, issus de cas de mise en service concrets.

L'utilisation des appareils JUMO est au cœur de cet ouvrage technique, même si son contenu est universel. L'entreprise dispose d'une expérience de plusieurs dizaines d'années dans la conception et la production d'appareils de régulation. Sa vaste gamme de produits s'étend des régulateurs à une voie jusqu'aux solutions complètes d'automatisation. Ces appareils sont présents tout autour du globe dans de nombreuses applications.

L'ouvrage technique "Régulation – Principes fondamentaux et astuces pour le praticien" jouit, depuis des années, d'une grande popularité auprès des utilisateurs de diverses branches et des étudiants de cette spécialité.

JUMO propose des séminaires sur la régulation où l'accent est mis sur la pratique (<http://seminare.jumo.info>).

Nous espérons que vous aurez du plaisir à lire cet ouvrage technique et que vous en tirerez profit. N'hésitez pas à nous envoyer vos suggestions pour la prochaine édition.

Fulda, janvier 2022

Manfred Schleicher

Remarques :

Cet ouvrage technique a été écrit en notre âme et conscience. Nous n'assumons pas la responsabilité d'éventuelles erreurs. Dans tous les cas, les notices de mise en service des appareils concernés prévalent.

1	Notions fondamentales et vue d'ensemble	11
1.1	Boucle de régulation fermée	11
1.2	Commander – mode manuel.....	12
1.3	Comportement d'une régulation.....	12
1.4	Acquisition de la valeur réelle	14
1.4.1	Cadence de scrutation	14
1.4.2	Entrées universelles des régulateurs compacts JUMO	14
1.4.3	Raccordement de capteurs pour l'analyse de liquides	17
1.5	Types de sortie des régulateurs compacts JUMO.....	17
1.5.1	Sortie continue	17
1.5.2	Sorties binaires.....	18
1.6	Vue d'ensemble des types de régulateurs	20
2	Système asservi.....	23
2.1	Généralités sur le système asservi	23
2.2	Systèmes avec ou sans compensation	24
2.2.1	Systèmes avec compensation	24
2.2.2	Systèmes sans compensation	25
2.3	Systèmes (ou fractions de systèmes) avec comportement de type proportionnel, temps mort et retard	26
2.3.1	Système avec comportement de type proportionnel	26
2.3.2	Systèmes avec temps mort	27
2.3.3	Systèmes avec retards	29
2.4	Analyse de la réponse à un échelon pour des systèmes asservis	32
3	Composantes PID et paramètres de régulation	35
3.1	Régulateur P	35
3.1.1	Bande proportionnelle.....	36
3.2	Régulateur I	41
3.3	Régulateur PI	44
3.4	Régulateur PD.....	47
3.4.1	Composante D pratique – élément DT_1	51
3.5	Régulateur PID.....	53
3.5.1	Synoptique du régulateur PID	54

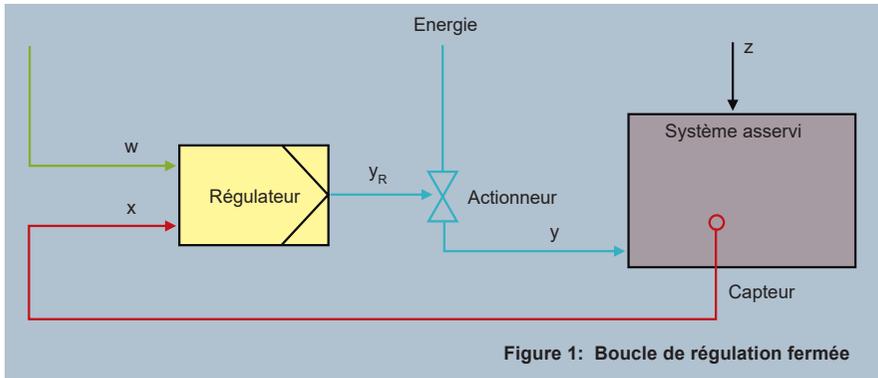
4	Optimisation des régulateurs et choix de la structure de régulation	55
4.1	Informations générales	55
4.2	Comportement pilote/Comportement en cas de perturbation	55
4.3	Procédure d'optimisation	56
4.3.1	Méthode des oscillations suivant Ziegler et Nichols.....	56
4.3.2	Méthode d'après la réponse à un échelon du système suivant Chien, Hrones et Reswick	57
4.3.3	Méthode d'après la vitesse de montée.....	60
4.3.4	Méthode empirique pour déterminer les paramètres de régulation	62
4.4	Auto-optimisation dans les régulateurs compacts JUMO	63
4.4.1	Procédure suivant la méthode des oscillations.....	63
4.4.2	Procédure suivant la réponse à un échelon	64
4.4.3	Informations complémentaires sur l'auto-optimisation.....	66
4.5	Post-optimisation manuelle d'un régulateur PID	68
4.6	Guide de sélection des structures de régulation pour les différentes grandeurs réglées	70
5	Régulateurs avec des sorties binaires	71
5.1	Régulateur à deux plages	71
5.1.1	Régulateur à deux plages avec sortie à impulsions modulées en longueur... 71	
5.1.2	Régulateur à deux plages avec sortie à impulsions modulées en fréquence	73
5.1.3	Durée d'activation minimale pour régulateur à deux plages à sortie à impulsions modulées en longueur ou fréquence.....	74
5.1.4	Cas particulier des régulateurs à deux plages à sortie discontinue.....	75
5.2	Régulateur à trois plages	78
5.2.1	Ecart entre les contacts.....	79
5.3	Régulateurs pour piloter des actionneurs à moteur	81
5.3.1	Positionneur	82
5.3.2	Régulateur à trois plages pas à pas.....	83
5.3.3	Informations complémentaires sur les positionneurs et les régulateurs à trois plages pas à pas	85

6	Circuits de régulation spéciaux.....	87
6.1	Charge de base.....	87
6.2	Commande à deux étages d'actionneurs	88
6.3	Mode "split range".....	90
6.4	Maintenir constantes les grandeurs perturbatrices	91
6.5	Verrouillage de la grandeur perturbatrice	92
6.5.1	Activation additive de la grandeur perturbatrice.....	92
6.5.2	Activation multiplicative de la grandeur perturbatrice	94
6.6	Régulation en cascade	96
6.6.1	Raisons d'introduire la régulation en cascade	97
6.6.2	Structures de régulation et optimisation des régulateurs maître et esclave ...	99
6.7	Régulation de rapport.....	99
7	Fonction de régulation et autres fonctions des régulateurs JUMO.....	101
7.1	Configuration de la fonction de régulation	101
7.2	Fonction Rampe	102
7.3	Fonction Programmeur	103
7.4	Surveillance de la valeur limite.....	104
7.5	Fonctions binaires.....	106
7.6	Startup et fonction de diagnostic	107
7.7	Enregistrement	108
7.8	Fonction mathématique et logique.....	109
8	Abréviations utilisées.....	111

1 Notions fondamentales et vue d'ensemble

1.1 Boucle de régulation fermée

La boucle de régulation fermée est composée d'un système asservi, d'un régulateur et d'un actionneur :



Le système asservi est la partie de l'installation dans laquelle la **grandeur réglée (x)** doit être maintenue constante. Nous prenons comme exemple un four chauffé au gaz (figure 1). La grandeur réglée, ou valeur réelle, est la température à l'intérieur du four. Dans les process industriels, on la mesure généralement avec une sonde à résistance ou un thermocouple. Les thermomètres électriques peuvent être raccordés directement au régulateur et le régulateur détermine la température à partir de la résistance ou la tension mesurée. La valeur réelle est influencée par le **taux de modulation (y)**. Dans notre exemple, il s'agit du flux de gaz.

Actionneur

Dans la plupart des cas, le régulateur ne peut pas influencer directement le taux de modulation, c'est pour cette raison qu'on utilise un actionneur. L'actionneur est piloté avec le taux de modulation du régulateur, qui varie normalement entre 0 et 100 %. Dans notre exemple (figure 1), on utilise une vanne proportionnelle comme actionneur. Si le régulateur délivre un taux de modulation de 100 %, la quantité maximale de gaz arrive dans le système asservi. Si le taux de modulation du régulateur est de 50 %, environ la moitié de cette quantité de gaz est introduite dans le système. Le taux de modulation du régulateur y_R donne grosso modo un pourcentage de la puissance maximale possible et représente pour le technicien régleur une grandeur plus importante que le taux de modulation y .

Régulateur

Grâce à son taux de modulation, le régulateur amène la valeur réelle à la **consigne (w)** réglée sur le régulateur. La différence entre consigne et valeur réelle ($w - x$) est appelée **écart de réglage e**. Si une des **grandeurs perturbatrices z** varie, la grandeur réglée est influencée de manière indésirable.

Pour en savoir plus sur les grandeurs perturbatrices, voir le chapitre 2.

La figure 2 montre l'écran d'un régulateur JUMO DICON touch avec la valeur réelle, la consigne et le taux de modulation du régulateur.



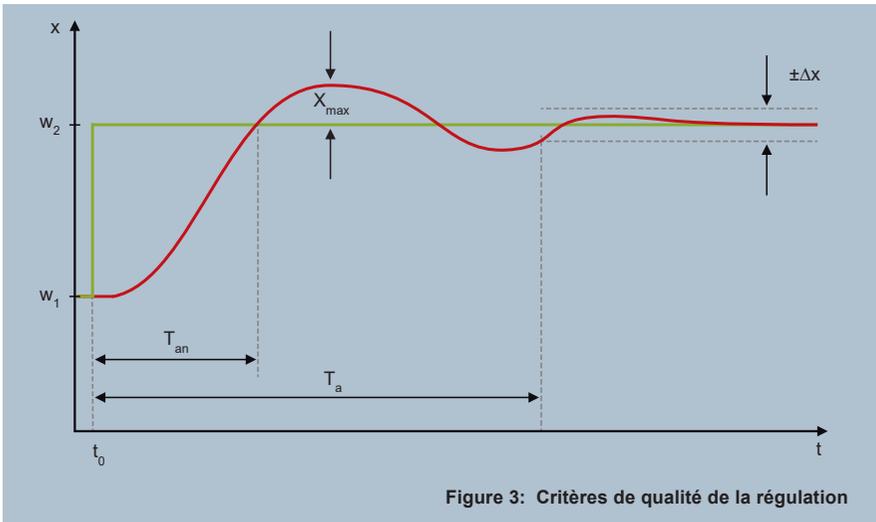
Figure 2: Ecran du régulateur JUMO DICON touch

1.2 Commander – mode manuel

En mode dit automatique, le régulateur régule la valeur réelle en fonction de la consigne, de la manière décrite. Les régulateurs compacts modernes permettent en plus la commande manuelle de l'actionneur : en mode dit manuel, le taux de modulation du régulateur défini est appliqué manuellement. Le taux de modulation du régulateur agit sur la puissance mise à disposition par l'actionneur et finalement sur une certaine valeur réelle qui dépend de l'installation. En mode manuel, l'actionneur – et donc également la valeur réelle – sont commandés, la régulation est sans effet.

1.3 Comportement d'une régulation

Dans la plupart des applications, les régulateurs compacts travaillent en régulateur PID. L'intensité des composantes est adaptée à chaque système asservi. C'est possible en modifiant les paramètres de régulation : X_p (bande proportionnelle), T_n (temps d'intégrale) et T_v (temps de dérivée).



La figure 3 montre le comportement possible d'une régulation suite à une variation de la consigne sous forme d'un échelon. Pour mesurer la qualité de la régulation, on peut recourir aux grandeurs suivantes : le temps de montée (T_{an}) qui désigne le temps qui s'écoule jusqu'à ce que la valeur réelle atteigne pour la première fois la consigne après application de l'échelon. Autour de la consigne, on peut définir une bande ($\pm\Delta x$) dont la largeur dépend des exigences de régulation. La durée pendant laquelle la valeur réelle se trouve en permanence dans cette bande est appelée temps d'établissement (T_a).

Si l'application d'une nouvelle consigne provoque des oscillations, on appelle dépassement (X_{max}) l'écart maximal entre la valeur réelle et la consigne.

La qualité de la régulation est d'autant plus élevée que les valeurs de T_{an} , T_a et X_{max} sont petites.

1.4 Acquisition de la valeur réelle

1.4.1 Cadence de scrutation

Les régulateurs compacts modernes contiennent des microprocesseurs qui ont besoin de temps pour calculer. La valeur mesurée est acquise par un capteur et traitée en interne, ensuite le taux de modulation est délivré. Après la mise à jour de la sortie, le signal d'entrée est à nouveau lu. La durée entre deux lectures du signal d'entrée est appelée cadence de scrutation.

Les cadences de scrutation typiques des régulateurs JUMO se situent entre 50 et 250 ms. Pour la plupart des régulations de process, 250 ms suffisent. Les process très rapides (par ex. la régulation de pression de presses) imposent une cadence de scrutation plus soutenue.

1.4.2 Entrées universelles des régulateurs compacts JUMO

Dans la plupart des cas, les régulateurs compacts JUMO disposent d'entrées analogiques universelles. Le capteur d'acquisition de la valeur réelle entre autres est raccordé à l'une de ces entrées.

Pour la mesure et la régulation, les **signaux** dits **normalisés** servent à transmettre la mesure. On utilise en priorité le signal en courant de 4 à 20 mA, il y a également les signaux de 0 à 20 mA, de 2 à 10 V et de 0 à 10 V. Les entrées universelles peuvent traiter les signaux normalisés, comme le montre la figure 4 pour un convertisseur de pression.

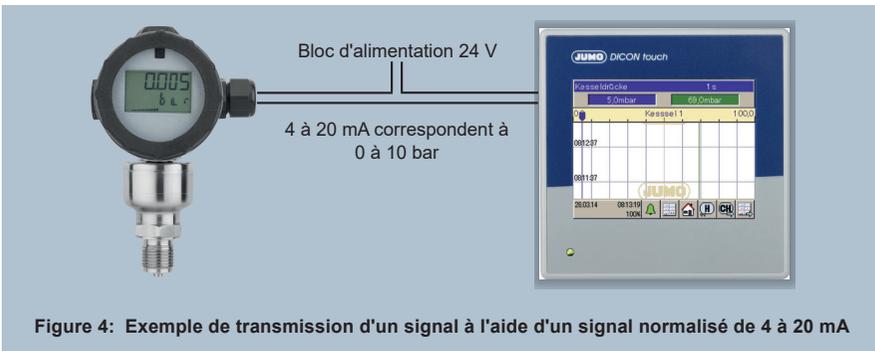
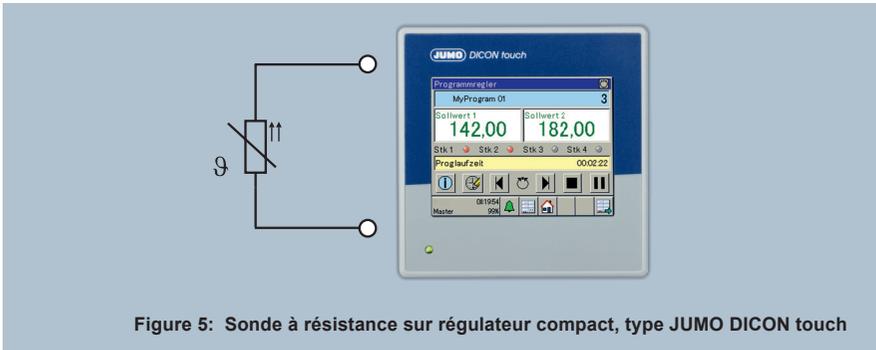


Figure 4: Exemple de transmission d'un signal à l'aide d'un signal normalisé de 4 à 20 mA

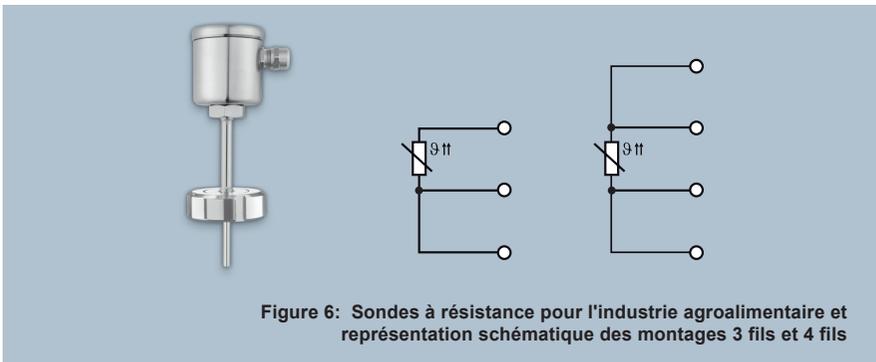
Le convertisseur de pression représenté mesure une pression relative comprise entre 0 et 10 bar et la délivre via un signal analogique compris entre 4 et 20 mA. L'entrée universelle du régulateur est réglée sur 4 à 20 mA et son échelle sur 0 à 10 bar. La mesure de pression est disponible dans le régulateur et tous les réglages se rapportent à l'unité (bar) et son échelle. Le bloc d'alimentation fournit la tension d'alimentation du convertisseur de pression.

Les régulateurs compacts JUMO sont très répandus dans le domaine de la régulation de température, ces appareils permettent le raccordement direct de **sondes à résistance**.



Il faut régler l'entrée universelle du régulateur sur sonde à résistance (en montage 2 fils) et indiquer la linéarisation correspondante (Pt100, Pt1000, etc.). A l'aide de la linéarisation, le régulateur détermine à partir de la valeur de résistance mesurée la température présente sur la sonde à résistance.

Le montage 3 fils est un standard dans l'industrie ; dans de nombreux cas, il est également possible de raccorder des sondes à résistance en montage 4 fils.



La principale raison qui pousse à utiliser des thermocouples est une température relativement élevée (typiquement supérieure à 600 °C). L'entrée universelle des régulateurs compacts JUMO offre également la possibilité de raccorder ce type de thermomètre, voir figure 7.

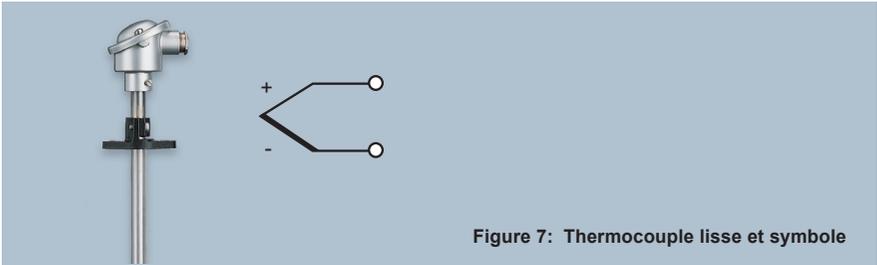


Figure 7: Thermocouple lisse et symbole

Il faut régler l'entrée universelle du régulateur sur thermocouple et indiquer la linéarisation correspondante (par ex. NiCr-Ni (type K)). A partir de la tension thermoélectrique mesurée, le régulateur détermine à l'aide de la linéarisation la température présente sur le thermocouple.

Le retour d'information sur la position des actionneurs comme les vannes, les clapets etc. peut passer par ce qu'on appelle un potentiomètre. Les éléments sont intégrés à l'actionneur et le curseur est déplacé en fonction de la position :

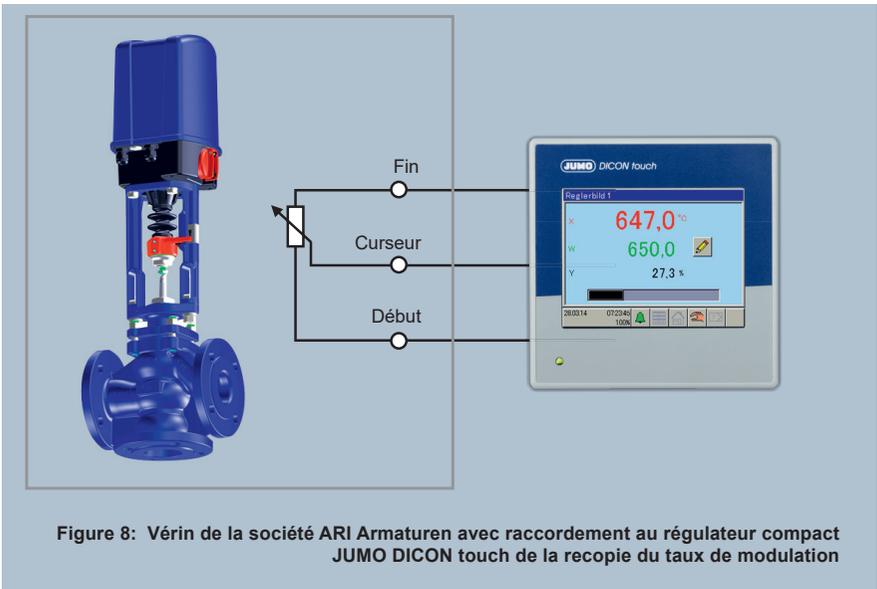


Figure 8: Vérin de la société ARI Armaturen avec raccordement au régulateur compact JUMO DICON touch de la recopie du taux de modulation

Il faut régler l'entrée universelle du régulateur sur "potentiomètre" et indiquer les valeurs affichées pour "curseur = position début" et "curseur = position fin", généralement 0 à 100 (%).

1.4.3 Raccordement de capteurs pour l'analyse de liquides

JUMO dispose d'une expérience sur des dizaines d'année dans la production de capteurs pour l'analyse de liquides. Les capteurs de pH, potentiel redox, conductivité par conduction et induction, etc. peuvent être raccordés directement aux convertisseurs de mesure et régulateurs JUMO pour les analyses physicochimiques.

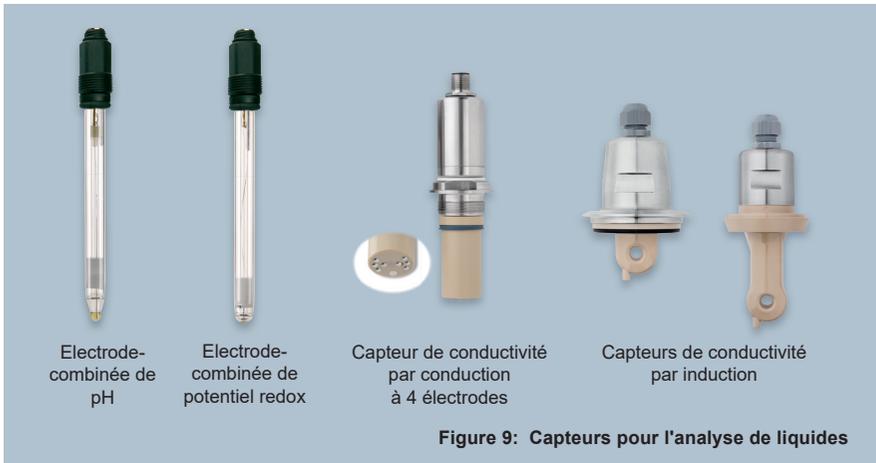


Figure 9: Capteurs pour l'analyse de liquides

1.5 Types de sortie des régulateurs compacts JUMO

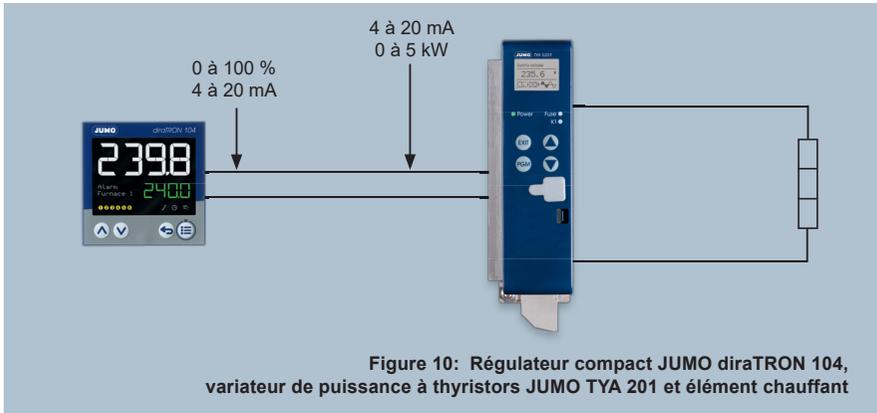
Le choix de l'actionneur adapté est effectué en fonction du système asservi présent, de la qualité de régulation et de la disponibilité nécessaires. L'actionneur à son tour nécessite un certain signal de commande délivré par le régulateur. Les régulateurs JUMO proposent en matière de sorties les possibilités suivantes :

1.5.1 Sortie continue

Les actionneurs continus font varier le taux de modulation de manière continue en fonction du taux de modulation du régulateur. Voici des exemples :

- Convertisseur de fréquence pour commander la vitesse de rotation d'un moteur asynchrone
- Vanne proportionnelle pour faire varier un débit
- Variateur de puissance à thyristors pour piloter la puissance électrique

La commande des actionneurs est effectuée à l'aide de signaux normalisés (chapitre 1.4.2) via une sortie continue.

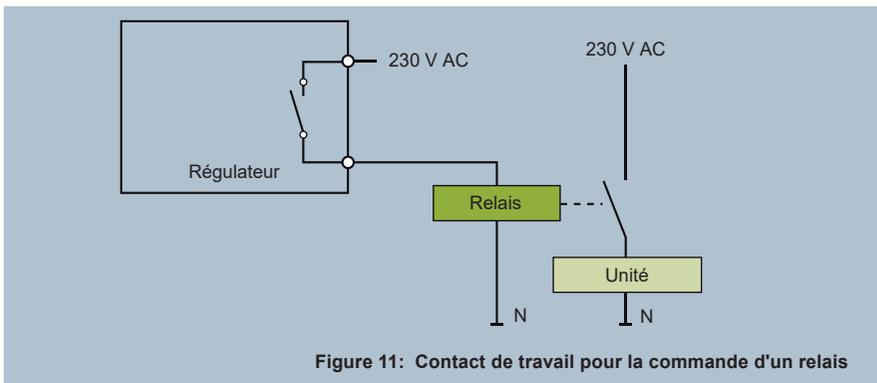


Le régulateur (figure 10) délivre le taux de modulation du régulateur sous forme d'un signal 4 à 20 mA. Le variateur de puissance à thyristors fait varier la puissance délivrée à l'élément de chauffage, proportionnellement au signal en courant.

1.5.2 Sorties binaires

Les régulateurs compacts JUMO sont très bien adaptés à la régulation des grandeurs physiques les plus diverses. Ces appareils sont particulièrement répandus dans le domaine de la régulation de température. Pour réguler cette grandeur, on utilise souvent des sorties binaires. On peut utiliser ce type de sortie partout où le système asservi lisse, grâce à son inertie, l'énergie appliquée par à-coup.

Parmi les sorties binaires, la sortie à relais est un classique. Elle est proposée en contact de travail ou contact inverseur. La sortie mécanique est utilisée pour commander à une fréquence de commutation faible (contacteur de puissance, électrovanne etc).



L'utilisation des sorties à relais impose de prendre en compte la durée de vie des contacts. Par exemple, il faut extraire des caractéristiques techniques d'un régulateur compact les informations suivantes sur le contact de commutation : *durée de vie du contact 350.000 commutations à la charge nominale* ou *750.000 commutations à 1 A*. La fréquence de commutation nécessaire est d'autant plus élevée que le comportement dans le temps d'un process est rapide.

Pour une fréquence de commutation plus élevée et la commutation d'une tension alternative (!), on utilise des **relais statiques** ou des **triacs**, voir figure 12.

Les éléments sont composés de deux thyristors à montage anti-parallèle et commutent les tensions alternatives quasiment sans usure.

Les sorties numériques (par ex. 0 V ou 12 V) sont utilisées pour piloter des actionneurs avec une tension continue et un besoin de courant faible. L'utilisation typique est le pilotage de sectionneurs de puissance à thyristors pour alimenter des éléments chauffants avec de l'énergie électrique :

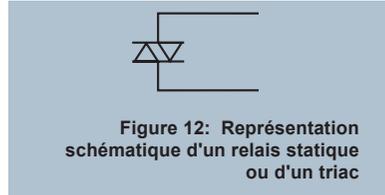


Figure 12: Représentation schématique d'un relais statique ou d'un triac

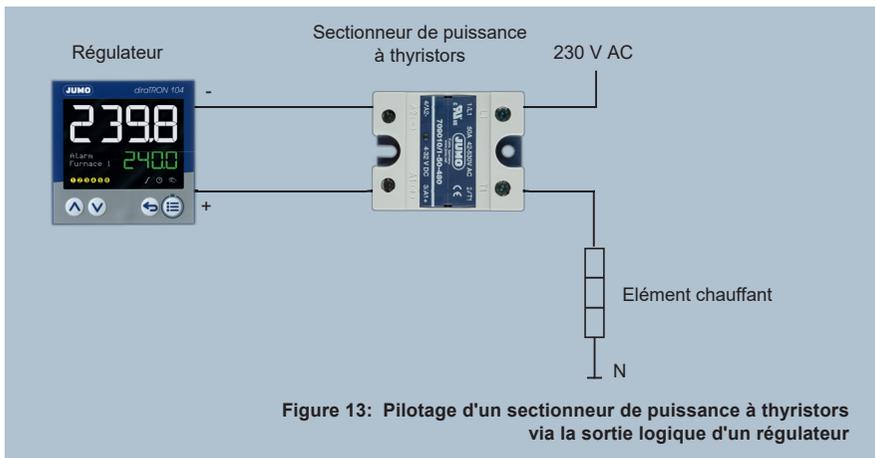


Figure 13: Pilotage d'un sectionneur de puissance à thyristors via la sortie logique d'un régulateur

Pour ajouter un acide, une base ou du chlore par ex., on utilise des pompes de dosage. Les actionneurs disposent souvent d'une entrée de type impulsion qu'il est généralement possible de piloter avec une sortie à relais. Comme la fréquence de commutation est généralement élevée, on utilise des relais PhotoMOS®, voir figure 14.

Les relais PhotoMOS® permettent de commuter sans usure et à potentiel flottant des tensions continues et alternatives (séparation des potentiels entre le régulateur et les pompes de dosage).

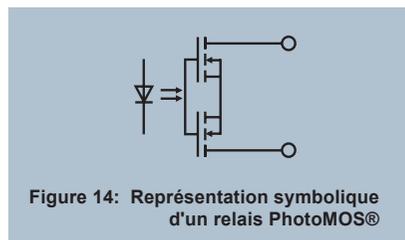
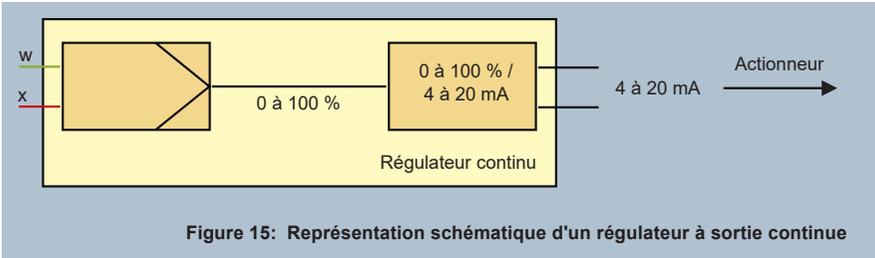


Figure 14: Représentation symbolique d'un relais PhotoMOS®

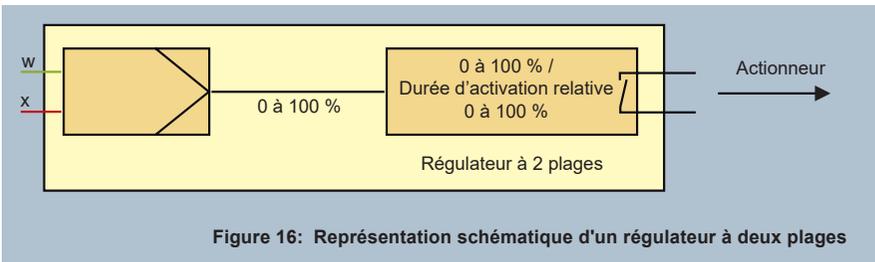
1.6 Vue d'ensemble des types de régulateurs

Les régulateurs JUMO permettent de réaliser les types de régulateurs suivants :

Les **régulateurs à sortie continue** pilotent des actionneurs continus via une sortie continue. Les régulateurs font varier leur signal de sortie (généralement 4 à 20 mA) proportionnellement au taux de modulation.

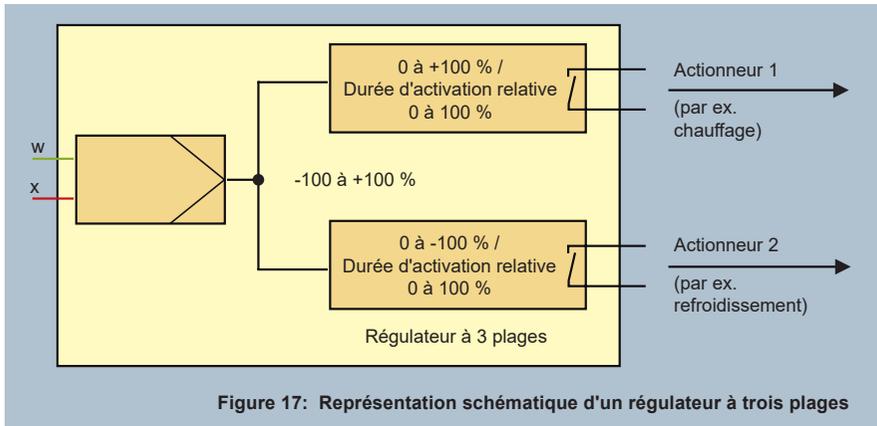


Les **régulateurs à deux plages** possèdent une sortie binaire pour commander l'actionneur. Outre une sortie à relais, il peut y avoir les sorties binaires décrites dans le chapitre 1.5.2. Les régulateurs font varier la durée d'activation proportionnellement au taux de modulation calculé.



Pour commander des pompes de dosage, les régulateurs pour les analyses physico-chimiques peuvent en outre être exploités avec une sortie modulée en fréquence : la sortie binaire est pilotée avec une fréquence qui augmente proportionnellement au taux de modulation.

Les **régulateurs à 3 plages** permettent d'influencer la grandeur réglée dans deux directions différentes. On peut citer par exemple le chauffage et le refroidissement, l'humidification et la déshumidification ou encore la neutralisation avec une base ou un acide. Les régulateurs calculent un taux de modulation compris entre -100 % et +100 %. Si le taux de modulation est positif, la durée d'activation relative pour l'actionneur 1 est augmentée proportionnellement à ce taux. Si les régulateurs travaillent avec un taux de modulation négatif, la durée relative d'activation de l'actionneur 2 est augmentée en conséquence :



Pour les régulateurs à 3 plages aussi, toutes les sorties binaires décrites dans le chapitre 1.5.2 sont possibles. Si on utilise des régulateurs JUMO pour les analyses physico-chimiques, les deux sorties peuvent être exploitées en sorties modulées en fréquence.

Au lieu de délivrer le taux de modulation avec des sorties binaires, il est également possible de le faire avec des sorties continues.

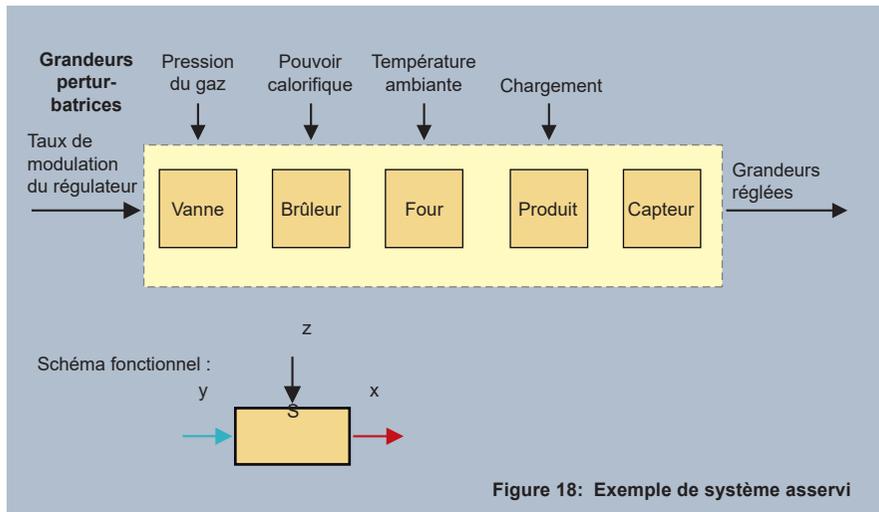
Les **régulateurs à trois plages** et les **régulateurs de position** conviennent pour commander des actionneurs à moteur. Les deux sorties du régulateur commandent respectivement l'ouverture et la fermeture de l'actionneur via un servomoteur. Le régulateur de position (ou positionneur) a besoin d'un retour d'information sur la position de l'actionneur. Le régulateur à trois plages se passe de cette copie du taux de modulation.

2 Système asservi

2.1 Généralités sur le système asservi

Le système asservi est la partie de l'installation dans laquelle la grandeur réglée doit être amenée à la valeur de consigne. Si on range l'actionneur dans le système asservi, le système asservi commence là où le régulateur applique son taux de modulation. Le système asservi prend fin là où la valeur réelle est mesurée – au niveau du capteur. Des grandeurs perturbatrices agissent sur le système asservi, elles ont une influence sur la grandeur réglée quand leur valeur varie.

La figure 18 montre un exemple de système asservi : un four chauffé au gaz.



Le taux de modulation du régulateur est appliqué sur la vanne. Il faut réguler la température du produit enfourné. Un capteur de température se trouve dans le produit et donc au bout du système asservi.

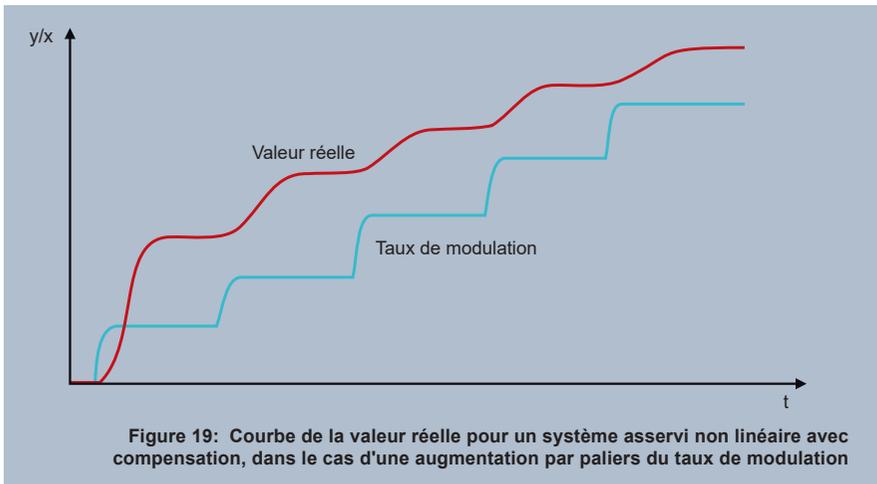
Dans le système asservi, il y a des systèmes de temporisation et des accumulateurs d'énergie qui ralentissent la propagation de l'énergie : si le taux de modulation du régulateur varie, la vanne prend relativement rapidement la nouvelle position. Rapidement le débit du gaz change dans le brûleur. L'intérieur du four chauffe lentement et au bout d'un certain temps la température du produit augmente.

Les variations des grandeurs perturbatrices ont une influence sur la valeur réelle. Une des grandeurs perturbatrices de ce système est la pression de l'alimentation en gaz. Si le système se trouve en régime établi, la variation de la pression du gaz provoquera des écarts de réglage dynamiques. Le régulateur s'y oppose en modifiant le taux de modulation et compense l'influence de la grandeur perturbatrice.

2.2 Systèmes avec ou sans compensation

2.2.1 Systèmes avec compensation

Le système asservi de la figure 18 est un système avec compensation. Il y a proportionnalité entre le taux de modulation défini et la valeur réelle qui se règle. La figure 19 montre la courbe de la valeur réelle pour un système avec compensation, après des augmentations brusques du taux de modulation :



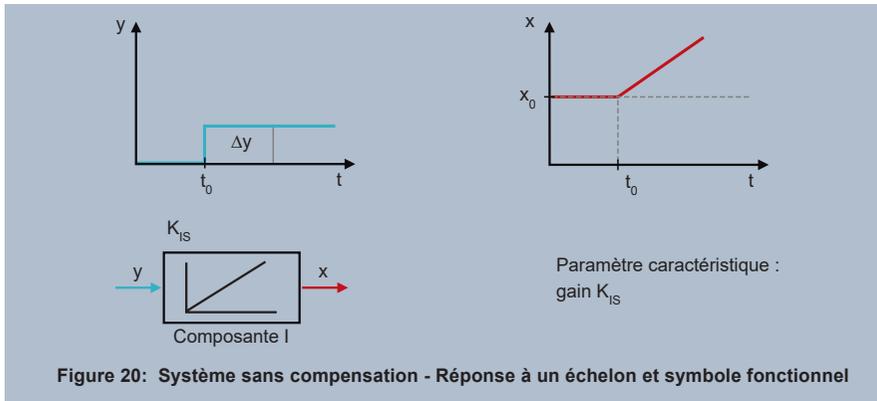
Dans cet exemple, le taux de modulation augmente par échelon toujours de la même amplitude, la variation de la valeur réelle qui en résulte est toujours plus faible. Le système asservi avec compensation présente un comportement non linéaire.

Le gain du système asservi décrit le rapport entre la variation de la valeur réelle et la variation du taux de modulation. Les systèmes asservis non linéaires modifient le gain suivant le point de fonctionnement. C'est pourquoi il peut être nécessaire de modifier les paramètres de régulation s'il y a différentes consignes.

2.2.2 Systèmes sans compensation

Les systèmes sans compensation réagissent à un échelon du taux de modulation avec une variation continue de la valeur réelle. La pente de la valeur réelle dépend des caractéristiques du système et elle est également proportionnelle au taux de modulation défini.

La figure 20 montre le comportement d'un système sans compensation, ce système donné à titre d'exemple ne présente pas de retards ou de temps morts :



Si le taux de modulation est de 0 % pour le système (figure 20), la valeur réelle ne change pas. Si le taux de modulation augmente (échelon), la valeur réelle varie sous forme d'une rampe jusqu'à ce qu'elle atteigne une limite. La pente de la rampe est proportionnelle au taux de modulation défini. Le qualificatif de "composante I" résulte de l'action de type intégration.

Si le taux de modulation varie sous forme d'un échelon, on applique :

$$\Delta x = K_{IS} \times \Delta y \times t \quad (1)$$

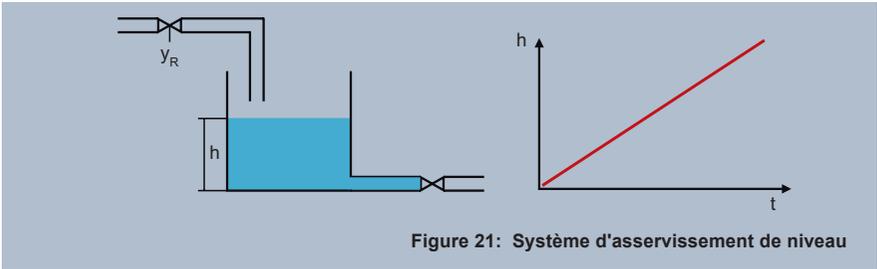
K_{IS} : gain d'un système asservi sans compensation

Si le taux de modulation n'est pas constant, on applique :

$$\Delta x = K_{IS} \int_{t_0}^t y \times dt \quad (2)$$

Les exemples de systèmes sans compensation sont :

- Régulation de niveau (figure 21)
- Actionneur linéaire pour positionner des pièces



La figure 21 montre un exemple classique de système sans compensation : dans un réservoir de liquide, on effectue une régulation du niveau avec une vanne d'arrivée et les capteurs adéquats. Le réservoir dispose en outre d'une vanne d'évacuation, nous considérons qu'elle est fermée. Lorsqu'on ouvre la vanne d'arrivée, le niveau augmente de façon continue.

Plus la vanne est ouverte, plus le niveau augmente vite. Le niveau monte jusqu'à ce que le réservoir déborde, aucune auto-stabilisation n'est prévue.

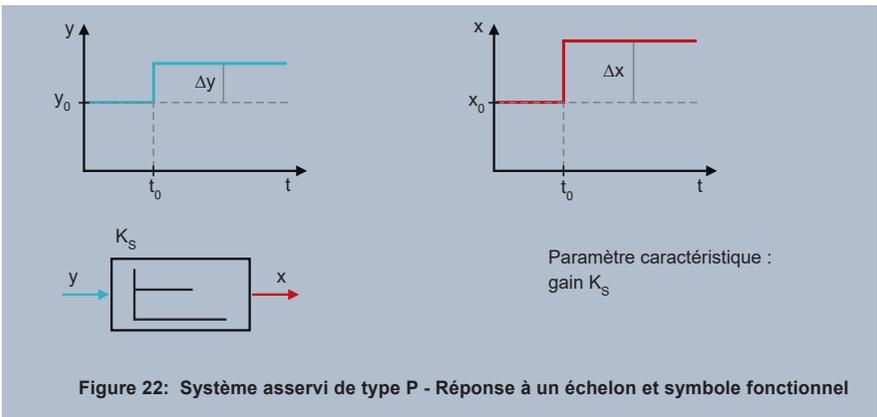
Contrairement au système avec compensation, aucun nouvel état d'équilibre ne s'établit lorsque le taux de modulation varie (sauf si arrivée = évacuation).

2.3 Systèmes (ou fractions de systèmes) avec comportement de type proportionnel, temps mort et retard

Toutes les considérations qui suivent s'appliquent aux systèmes avec compensation.

2.3.1 Système avec comportement de type proportionnel

Les systèmes asservis proportionnels amplifient le taux de modulation défini, sans retard et avec le gain K_S :



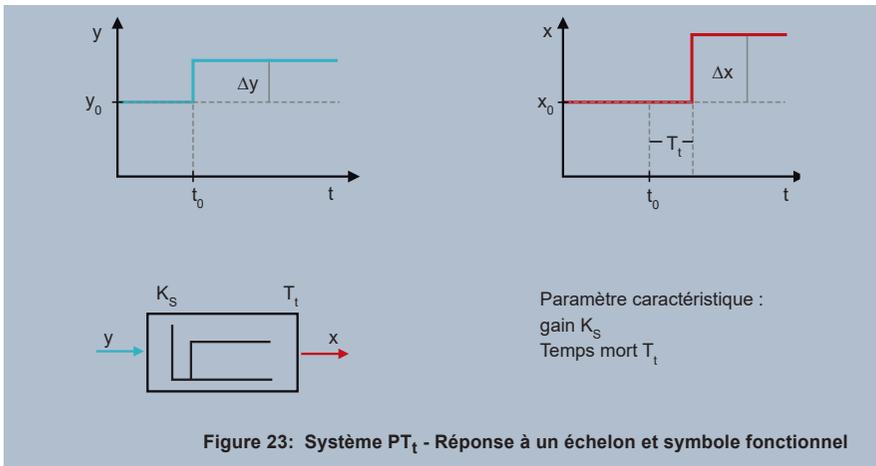
Lorsque le taux de modulation augmente sous forme d'un échelon, la valeur réelle augmente proportionnellement. La relation entre la variation de la grandeur réglée Δx et la variation du taux de modulation Δy obéit à la formule déjà décrite :

$$\Delta x = K_S \times \Delta y \quad (3)$$

En règle générale, le comportement de type proportionnel décrit se présente combiné à des éléments de temporisation.

2.3.2 Systèmes avec temps mort

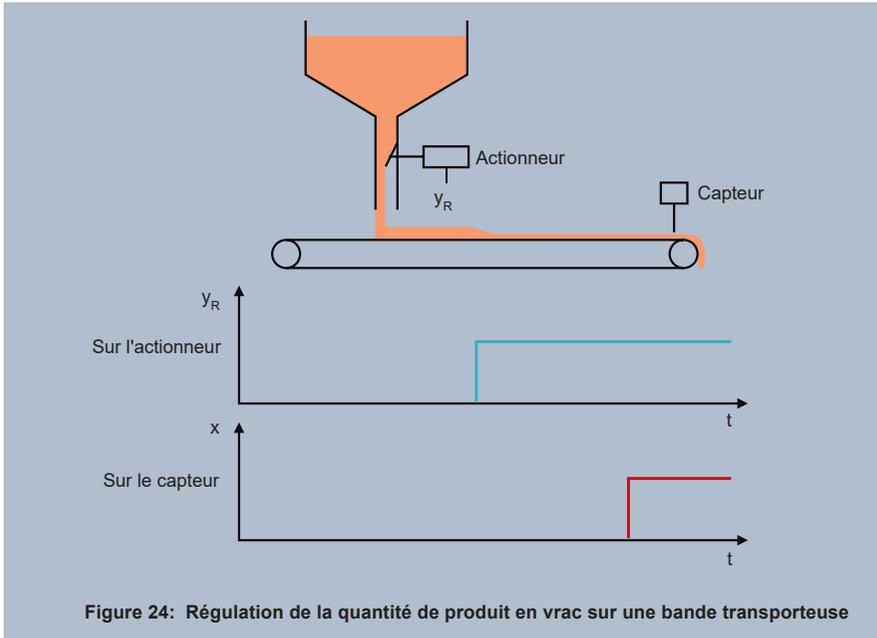
Les systèmes de type P apparaissent souvent combinés à des éléments de type temps mort. Ces systèmes dits PT_t sont définis par le gain et le temps mort :



Le système se comporte comme un système asservi de type P, toutefois la valeur réelle ne varie qu'après écoulement d'un temps mort lorsqu'il y a un échelon du taux de modulation. La relation entre la variation de la valeur réelle et celle du taux de modulation est la suivante :

$$\Delta x = K_S \times \Delta y, \text{ mais retardé du temps mort } T_t \quad (4)$$

Un exemple de système PT_1 est une bande transporteuse sur laquelle il faut régler une quantité constante de produit en vrac :



Un régulateur commande avec son taux de modulation un clapet. Si le taux de modulation augmente par échelon sur le régulateur, le clapet s'ouvre sans délai (supposition). Une certaine quantité (produit en vrac/unité de temps) tombe sur la bande transporteuse. Toutefois, la bande transporteuse a besoin de ce que l'on appelle le temps mort pour transporter le produit en vrac jusqu'au capteur.

Exemple chiffré pour déterminer les grandeurs caractéristiques :

si le taux de modulation est réglé sur 50 %, la grandeur réglée est de 100 t/h. Si le taux de modulation augmente pour atteindre 75 % (échelon), au bout de 10 s la quantité de produit en vrac passe à 150 t/h (échelon).

Calcul du gain :

$$K_s = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{150 \frac{\text{t}}{\text{h}} - 100 \frac{\text{t}}{\text{h}}}{75\% - 50\%} = \frac{50 \frac{\text{t}}{\text{h}}}{25\%} = 2 \frac{\text{t}}{\text{h} \times \%} \quad (5)$$

Un gain de $2 \frac{t}{h \times \%}$ signifie qu'une augmentation du taux de modulation de 1 % provoque une augmentation de la quantité de produit en vrac de $2 \frac{t}{h}$. Outre le gain, le système est défini par le temps mort de 10 s.

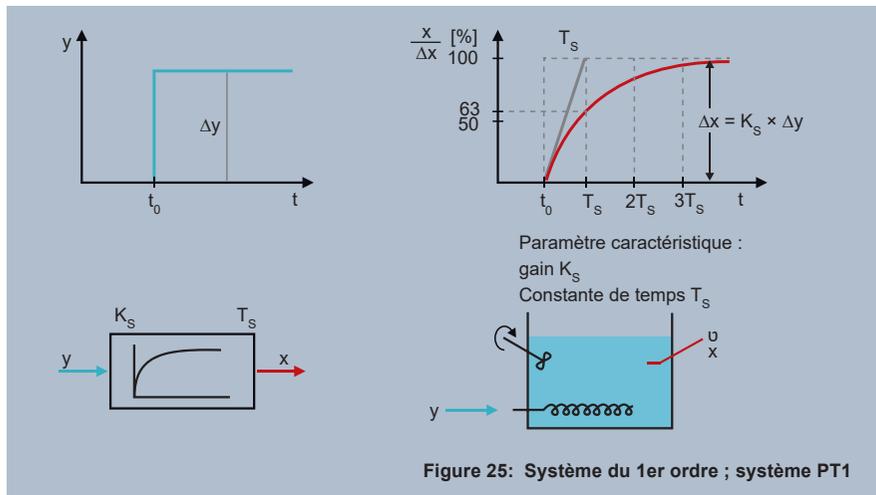
Plus le temps mort est élevé, plus l'optimisation du régulateur utilisé est difficile à réaliser. Là où c'est possible, il est préférable de minimiser les temps morts dès la conception.

2.3.3 Systèmes avec retards

Dans les systèmes avec retards, la nouvelle valeur réelle s'établit avec retard après une variation du taux de modulation. Le retard résulte du fait que des accumulateurs d'énergie doivent être chargés. Ce processus est comparable au chargement de condensateurs.

Mathématiquement de tels systèmes peuvent être décrits avec une équation qui possède un terme (exponentiel) pour chaque accumulateur d'énergie. À cause de cette relation, ces systèmes sont dits du premier, deuxième, troisième... ordre.

Dans les **systèmes asservis avec un retard**, ou un **accumulateur d'énergie**, la grandeur réglée varie sans délai après un échelon du taux de modulation. Immédiatement après l'application de l'échelon, la variation présente la vitesse la plus élevée. Ensuite la valeur réelle tend toujours plus lentement vers la valeur finale (figure 25).



La figure 25 montre, en bas à droite, un exemple de système du 1er ordre :

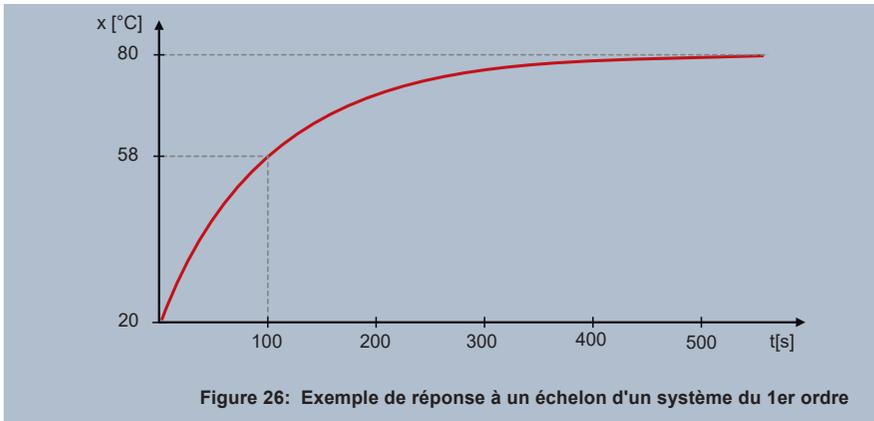
un bain-marie est chauffé électriquement par un filament. Le filament n'est pas en mesure de stocker de l'énergie, il s'échauffe dès que le taux de modulation est appliqué sous forme de puissance électrique. L'énergie thermique atteint sans délai l'eau dont la température augmente immédiatement. Le capteur utilisé possède une très faible masse et mesure sans délai la température de l'eau. Dans le système, seule l'eau est en mesure de stocker de l'énergie.

Si on augmente le taux de modulation sous forme d'un échelon, la température de l'eau varie suivant l'équation suivante :

$$\Delta x = K_s \times \Delta y \times \left(1 - e^{-\frac{t}{T_s}}\right) \quad (6)$$

Les grandeurs caractéristiques d'un système du 1er ordre sont le gain K_s et la constante de temps du système T_s . Ces deux grandeurs peuvent être déterminées à partir de la réponse du système à un échelon. Pour cela, on applique par exemple une puissance électrique de 5 kW au filament et on enregistre la valeur réelle (la température de l'eau).

La figure suivante montre la courbe de la valeur réelle après un échelon du taux de modulation :



La valeur réelle est de 20 °C et atteint la valeur finale de 80 °C après application de l'échelon, la variation de la valeur réelle est donc égale à 60 K.

Le gain du système asservi découle de la formule suivante :

$$K_s = \frac{\text{modification de la grandeur réglée}}{\text{modification du taux de modulation}} = \frac{60 \text{ K}}{5 \text{ kW}} = 12 \frac{\text{K}}{\text{kW}} \quad (7)$$

Le système asservi amplifie le taux de modulation avec ce gain. Si nous supposons que le comportement est linéaire, la température augmente de 12 K lorsque la puissance augmente de 1 kW.

La **constante de temps du système T_s** correspond au temps au bout duquel la valeur réelle atteint 63 % de sa variation totale.

$$20\text{ °C} + 60\text{ K} \times 63\% \approx 58\text{ °C} \quad (8)$$

Dans cet exemple, il s'agit de 58 °C après écoulement de 100 s.

Avec les deux grandeurs caractéristiques d'un système du 1er ordre (K_s et T_s), la formule pour la réponse du système à un échelon est la suivante :

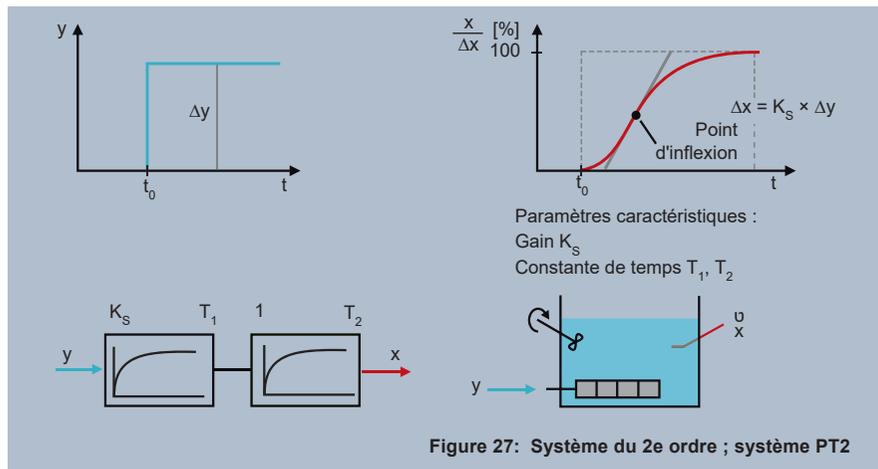
$$x = 12 \frac{\text{K}}{\text{kW}} \times 5\text{ kW} \times \left(1 - e^{-\frac{t}{100\text{ s}}}\right) + 20\text{ °C} \quad (9)$$

Ou bien :

$$x = 60\text{ K} \times \left(1 - e^{-\frac{t}{100\text{ s}}}\right) + 20\text{ °C} \quad (10)$$

Systèmes avec deux retards

Les systèmes avec deux retards (2e ordre) contiennent deux accumulateurs d'énergie.



Pour chauffer le bain-marie, on utilise une cartouche chauffante avec une masse relativement grande. La cartouche chauffante constitue le deuxième accumulateur d'énergie. Si la puissance de chauffage augmente sous forme d'un échelon, cette puissance est d'abord utilisée pour chauffer la cartouche chauffante. Ce n'est que lorsque la température de la cartouche

chauffante est sensiblement supérieure à celle de l'eau qu'un flux d'énergie appréciable s'établit. La valeur réelle augmente avec retard après application de l'échelon (figure 27) et suit par conséquent une courbe toujours plus raide. Au bout d'un certain temps, la pente de la valeur réelle est de plus en plus plate et la valeur réelle atteint enfin sa valeur finale. Sur la figure 27, on trace la tangente dans la zone avec la pente la plus forte.

Le système PT_2 est défini par les deux constantes de temps et le gain. La réponse à un échelon est donnée par la formule suivante :

$$\Delta x = K_s \times \Delta y \times \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} \right) \text{ équation valable pour } T_1 \neq T_2 \quad (11)$$

Il n'est pas possible de déterminer les deux constantes de temps du système à partir de la réponse à un échelon. Le comportement dans le temps d'un système du 2e ordre ou d'ordre supérieur est caractérisé dans la pratique par des grandeurs de remplacement.

Systèmes d'ordre supérieur

Dans la pratique, les systèmes asservis possèdent généralement plus de deux accumulateurs d'énergie. Toutefois la réponse à un échelon de tels systèmes présente les mêmes caractéristiques que celles traitées pour les systèmes du 2e ordre.

2.4 Analyse de la réponse à un échelon pour des systèmes asservis

Généralement les systèmes asservis sont composés de plusieurs éléments avec des retards et un temps mort :

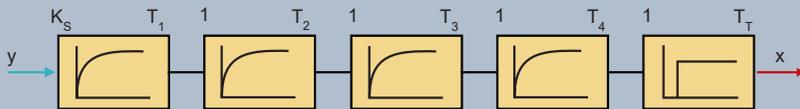


Figure 28: Synoptique d'un système asservi avec plusieurs retards et un temps mort

Le synoptique de la figure 28 montre quatre accumulateurs d'énergie et un élément de type temps mort. Dans un système réel, le praticien ne connaît pas l'ordre du système et ses constantes de temps. En plus il ne sait pas combien d'éléments de type temps mort le système contient.

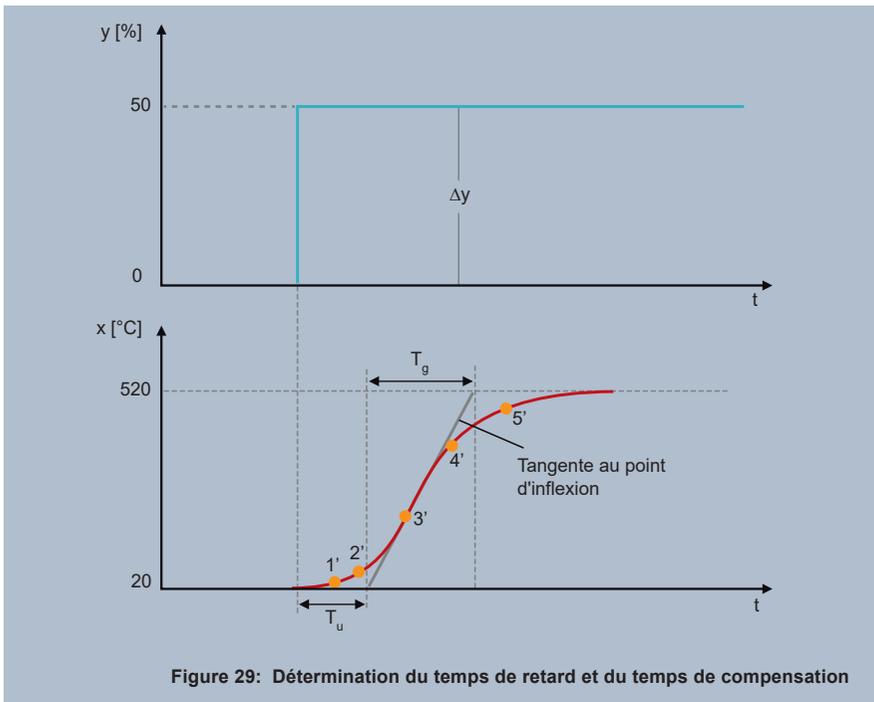
Les systèmes du 2e ordre ou supérieur (y compris les éléments de type temps mort) sont caractérisés par des grandeurs de remplacement. Grâce aux grandeurs de remplacement et aux règles empiriques, il est possible de déterminer par la suite des paramètres de régulation adéquats. Les grandeurs de remplacement sont le gain (K_S) déjà connu, le temps de retard (T_u) et le temps de compensation (T_g).

Pour déterminer les grandeurs caractéristiques, on analyse la réponse à un échelon :

pour cela on applique au système asservi un échelon de taux de modulation et on enregistre la courbe de valeur réelle (voir la figure 29). L'enregistrement s'arrête quand la valeur réelle a atteint sa valeur finale. Au niveau de la valeur réelle finale, on trace une ligne parallèle à l'axe du temps. En traçant des tangentes sur la courbe de la valeur réelle, on détermine le point où la courbe présente la pente est la plus raide. La tangente avec la pente la plus raide est conservée (tangente au point d'inflexion). Le segment de temps compris entre l'application de l'échelon de taux de modulation et le point d'intersection de cette tangente avec l'axe du temps est appelé temps de retard (T_u) ; le segment de temps compris entre le point d'intersection de la tangente avec l'axe du temps et le point d'intersection de la tangente avec la valeur réelle maximale correspond au temps de compensation (T_g). Le gain du système est égal à la variation de valeur réelle divisée par l'échelon de taux de modulation.

Exemple :

nous déterminerons K_S , T_u et T_g pour un four industriel. Le four a refroidi, la température à l'intérieur du four est de 20 °C . Le régulateur en mode manuel permet d'augmenter le taux de modulation de 0 à 50% (échelon) et la valeur réelle est enregistrée. La figure 29 montre la courbe de valeur réelle :



Au niveau de la valeur réelle maximale (520 °C), on trace une ligne parallèle à l'axe du temps. On peut ainsi déterminer le gain du système. Pour déterminer la tangente au point d'inflexion, on trace des tangentes en différents points sur la courbe de la valeur réelle (de gauche à droite, points 1', 2', etc.). On commence au point 1', on trace la première tangente, elle est relativement plate. Les tangentes sur les points 2' et 3' ont une pente plus raide. Les tangentes sur les points 4' et 5' ont une pente à nouveau plus faible. Cette méthode permet de déterminer la zone où la pente est maximale. Sur la figure 29, la tangente sur le point 3' présente la pente maximale. La tangente au point d'inflexion permet de déterminer les temps caractéristiques.

Le rapport T_g/T_u peut servir à quantifier la possibilité d'asservir un système :

$T_g/T_u > 10$ facile à asservir

$T_g/T_u = 10 \text{ à } 3$ encore possible d'asservir

$T_g/T_u < 3$ difficile à asservir

Plus un système asservi contient d'accumulateurs d'énergie, plus le rapport T_g/T_u est petit et plus la régulation sera difficile. En fait les gros accumulateurs d'énergie marquent de manière significative ce rapport.

Exemple :

un système d'ordre élevé contient plusieurs accumulateurs d'énergie. Deux des accumulateurs d'énergie présentent des constantes de temps relativement élevées. Le comportement du système correspond à celui d'un système du 2e ordre et le rapport T_g/T_u sera relativement élevé.

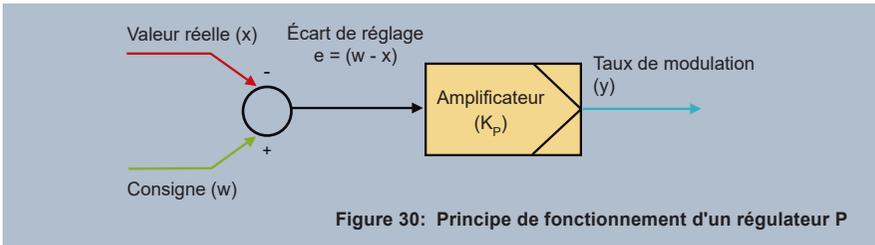
Si les grandeurs caractéristiques sont utilisées dans les formules empiriques (chapitre 4.3.2), en règle générale il en résultera des paramètres de régulation adaptés à un régulateur PID par exemple.

3 Composantes PID et paramètres de régulation

Ce chapitre explique les composantes de régulation P, I et D ainsi que les paramètres de régulation K_P (X_P), T_n et T_v à l'aide d'un régulateur à sortie continue (signal de sortie 0/2 à 10 V, 0/4 à 20 mA).

3.1 Régulateur P

Un régulateur P (régulateur à action proportionnelle) établit l'écart de réglage à partir de la consigne et la valeur réelle, il l'amplifie avec ce qu'on appelle le facteur de proportionnalité K_P . Le résultat est délivré sous forme du taux de modulation (figure 30).



Le facteur de proportionnalité est défini sur le régulateur par l'utilisateur.

$$y = K_p \times (w - x) \quad (12)$$

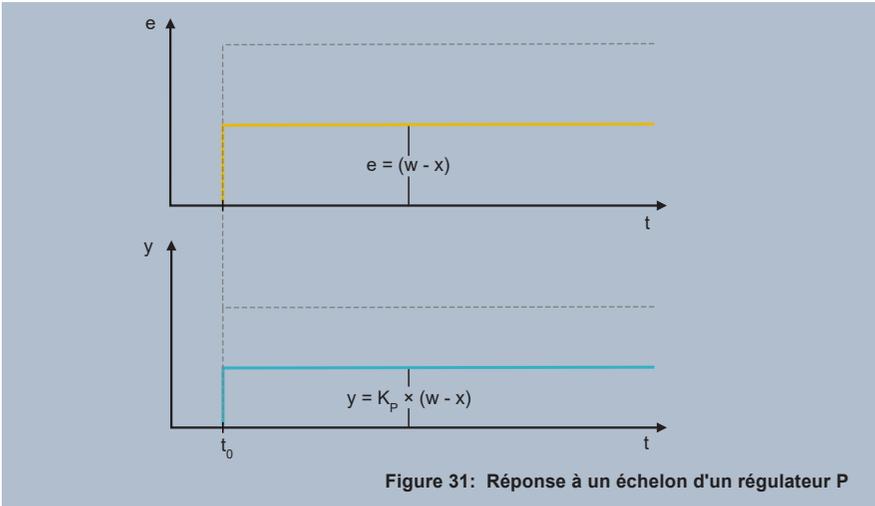
Le régulateur travaille avec la valeur numérique, sans dimension, de l'écart de réglage.

Généralement l'unité de K_P est "%" divisé par l'unité de la grandeur réglée : %/Kelvin, %/bar, %/(U/min) etc.

Exemples :

soit un régulateur P pour asservir une température, avec un K_P réglé sur 10 %/K ; si l'écart de réglage est de 5 K, le taux de modulation sera de 50 %.

Soit un régulateur P pour réguler une pression avec K_P réglé sur 4 %/bar ; pour un écart de réglage de 20 bar, le taux de modulation calculé par le régulateur sera de 80 %.

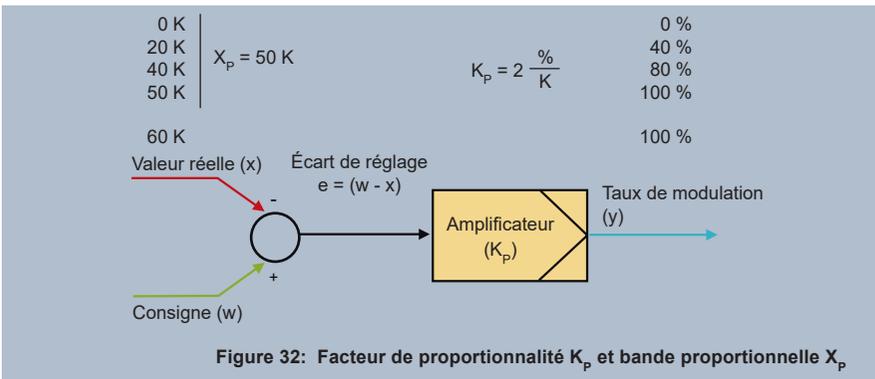


La figure 31 montre la réponse à un échelon d'un régulateur P : pour cela on fait varier l'écart de réglage (échelon) et on observe la réaction du taux de modulation. Le régulateur P modifie son signal de sortie proportionnellement à l'écart de réglage, sans retard.

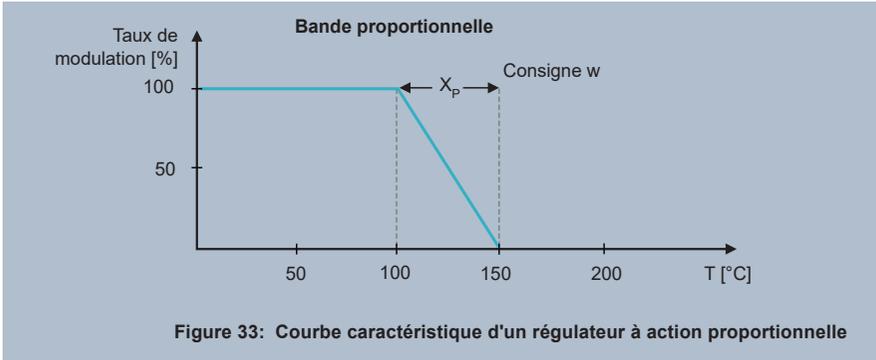
Sur les régulateurs JUMO, la composante P est définie par la bande proportionnelle et non par le facteur de proportionnalité. Les explications sur la bande proportionnelle suivent.

3.1.1 Bande proportionnelle

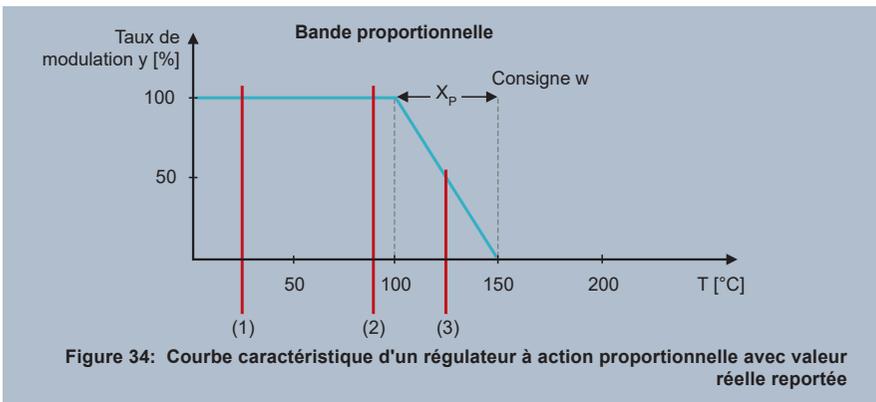
Un régulateur P avec un facteur de proportionnalité K_P réglé sur 2 %/K pour cet exemple amplifie l'écart de réglage de manière linéaire jusqu'à ce qu'il atteigne 50 K (figure 32).



La bande proportionnelle (X_P) s'étend du point à partir duquel le régulateur délivre un taux de modulation de 100 % et le diminue à mesure que l'écart de réglage diminue. La bande proportionnelle se trouve en dessous de la consigne pour un régulateur de chauffage :



La courbe de la figure 33 montre le comportement d'un régulateur P. Le taux de modulation est reporté sur l'axe des Y. Sur l'axe des X se trouve la consigne (la courbe caractéristique coupe l'axe des X, dans l'exemple à 150 °C). La valeur réelle est représentée en plus sur la figure 34.



Sur la figure 34, la bande proportionnelle est de 50 K : si les écarts de réglage sont > 50 K, le taux de modulation est de 100 %. Si l'écart de réglage est inférieur à la bande proportionnelle, le taux de modulation est réduit proportionnellement à l'écart de réglage.

Si la valeur réelle est d'environ 25 °C (1), le point d'intersection avec la courbe caractéristique montre que dans ce cas, le régulateur délivre un taux de modulation de 100 %. A cause du taux de modulation élevé, la valeur réelle augmente et atteint au bout d'un certain temps environ 90 °C (2). Le taux de modulation est toujours de 100 % et ne sera réduit qu'à partir de la température de 100 °C. A partir de 100 °C, la valeur réelle se trouve dans la bande proportionnelle (X_p). Si la valeur réelle se trouve par ex. au milieu de la bande proportionnelle (125 °C), le taux de modulation s'élève encore à 50 % (3). Si la valeur réelle est égale à 150 °C ou plus, le taux de modulation est égal à 0 %.

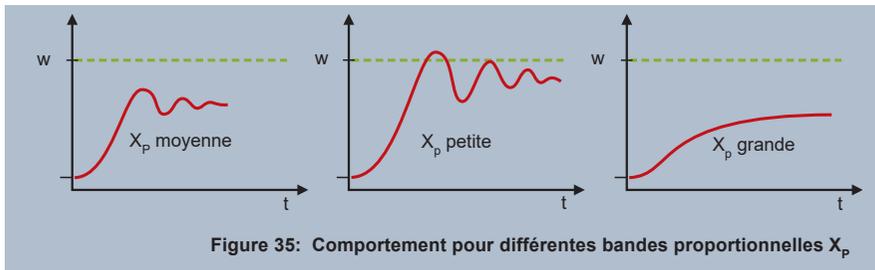
Ecart de réglage résiduel

Si la valeur réelle est supérieure à la consigne, plus aucune puissance de chauffage n'est appliquée au système. Dans le cas d'un four, celui-ci n'est plus chauffé. Lorsque la température est inférieure à 150 °C, le taux de modulation augmente. Le process trouvera son équilibre (ici c'est pour une valeur réelle de 125 °C et un taux de modulation de 50 %).

L'inconvénient du régulateur P est l'écart de réglage qui apparaît. C'est pour cette raison qu'il est extrêmement rarement utilisé. La composante P est combinée généralement avec une composante I et de surcroît, également fréquemment, avec une composante D.

Il est possible de réduire l'écart de réglage résiduel en diminuant X_p . Pour cet exemple, on a supposé que la valeur réelle stagnait à 125 °C, parce qu'un taux de modulation de 50 % est nécessaire pour cette température. Si on réduit la bande proportionnelle à 25 K, le taux de modulation augmente d'abord à 100 % et la valeur réelle s'approche plus de la consigne.

Toutefois plus X_p est petite, plus la valeur réelle aura tendance à osciller :

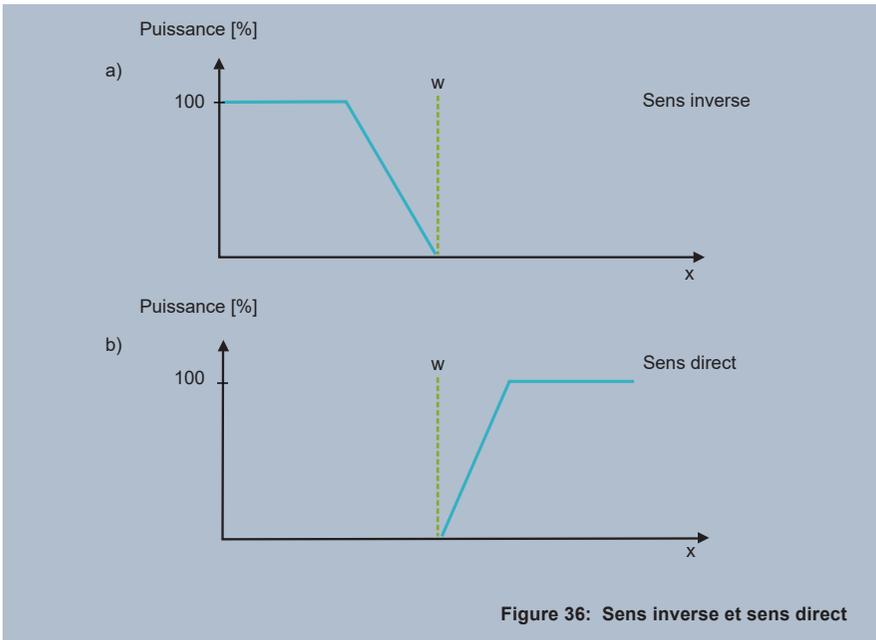


Les grosses oscillations pour une bande proportionnelle petite (X_p) ont la cause suivante : lorsque la valeur réelle entre dans la bande proportionnelle, la puissance est diminuée extrêmement rapidement, c'est pourquoi l'état d'équilibre ne peut pas être atteint immédiatement.

Relation entre bande proportionnelle et facteur de proportionnalité

$$X_p = \frac{1}{K_p} \times 100 \% \quad \text{ou} \quad K_p = \frac{1}{X_p} \times 100 \% \quad (13)$$

Une bande XP de 50 K (figure 33) correspond donc à un facteur KP de 2 %/K.

Sens de l'action : inverse et direct

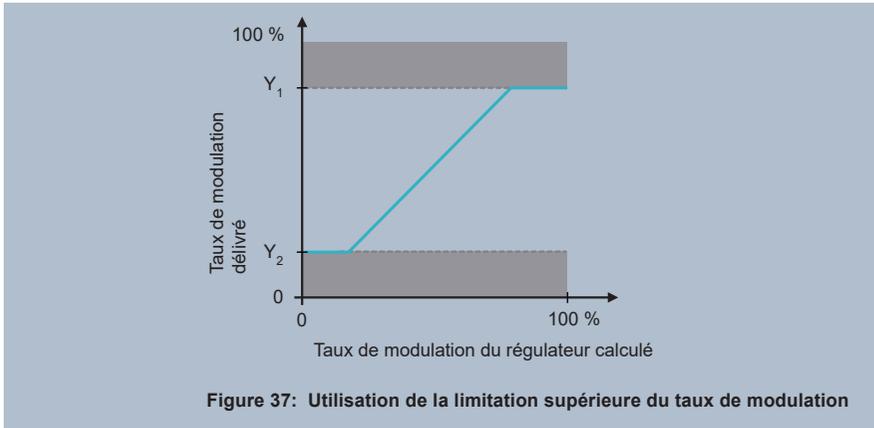
Sur le régulateur, on définit le sens de l'action en fonction de l'effet de l'actionneur sur la valeur réelle (diminution ou augmentation de la valeur réelle).

Pour le sens inverse a), le taux de modulation pour une valeur réelle croissante est réduit lorsque la bande proportionnelle est atteinte. Si valeur réelle = consigne, la puissance est égale à 0 % (le sens inverse est nécessaire pour chauffer, humidifier, augmenter une pression etc.).

Lorsqu'on règle le sens direct b), le taux de modulation pour une valeur réelle croissante augmente en partant de 0 %, lorsque la consigne est dépassée. Si la valeur réelle se trouve sur la limite supérieure de la bande proportionnelle ou au-dessus, le taux de modulation est de 100 % (le sens direct est nécessaire pour refroidir, déshumidifier, diminuer une pression etc.).

Limitation du taux de modulation

Généralement les régulateurs avec une sortie de régulation délivrent le taux de modulation sur la plage de 0 à 100 %. Pour les actionneurs surdimensionnés, il est possible de limiter le taux de modulation vers le haut :



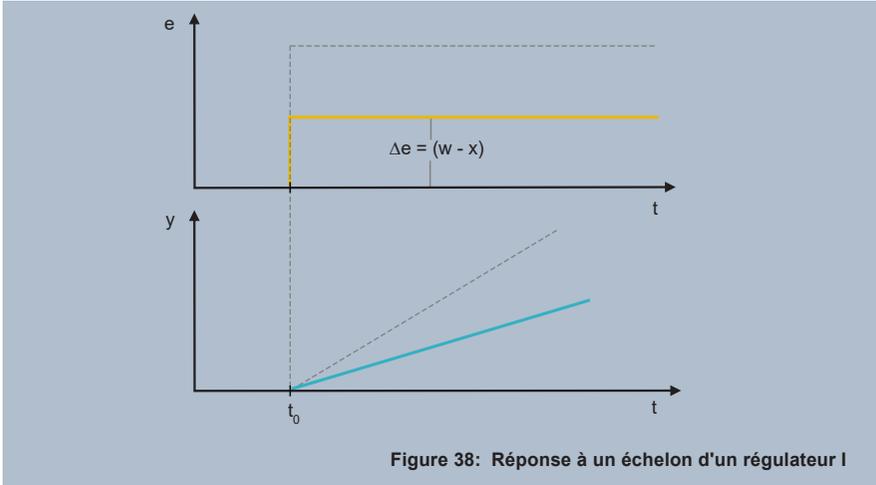
La limite supérieure du taux de modulation est réglée sur les régulateurs JUMO avec le paramètre Y_1 et le taux de modulation est limité à cette valeur maximale.

Si on utilise un régulateur à sortie continue, Y_2 permet de définir un taux de modulation minimal (figure 37). Ce taux de modulation minimal sera délivré indépendamment de l'écart de réglage.

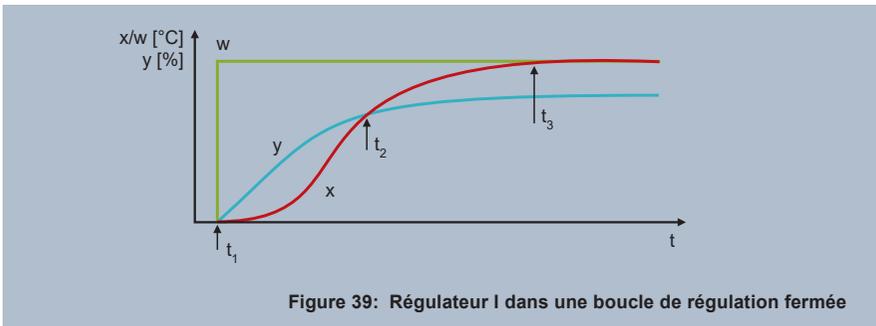
Le régulateur à trois plages décrit plus loin influence la grandeur réglée dans deux directions. Le taux de modulation total varie de -100 % à +100 %. Le taux de modulation maximal possible pour la deuxième sortie de régulation peut également être limité avec la limite inférieure du taux de modulation (Y_2) (par ex. 50 % si Y_2 est réglée sur -50 %).

3.2 Régulateur I

Le régulateur I (régulateur à action par intégration) "construit" les surfaces comprises, au cours du temps, entre l'écart de réglage et l'axe du temps :



La figure 38 montre la réponse à un échelon d'un régulateur I : avant l'échelon, l'écart de réglage est égal à 0, dans ce cas, le régulateur I conserve son taux de modulation actuel. Si le taux de modulation était au préalable de 0 %, il reste à cette valeur. Si l'écart de réglage est réglé sur une valeur positive (échelon), le régulateur crée les surfaces mentionnées et les délivre avec son taux de modulation. En d'autres mots, le régulateur augmente son taux de modulation dès qu'il y a un écart de réglage positif. Si l'écart de réglage est constant, le taux de modulation prend la forme d'une rampe jusqu'à 100 % et reste à cette valeur. Si l'écart de réglage double, le régulateur double aussi rapidement le taux de modulation (voir ligne en pointillés de la figure 38). Si la valeur réelle est supérieure à la consigne (écart de réglage négatif), le taux de modulation est réduit en conséquence.



La figure 39 montre la consigne, la valeur réelle et la courbe du taux de modulation pour un régulateur I dans une boucle de régulation fermée :

- t_1 Une nouvelle consigne est appliquée (échelon), le régulateur I augmente immédiatement le taux de modulation, la variation de la valeur réelle n'a lieu qu'au bout d'un certain temps.
- t_2 La valeur réelle est de plus en plus élevée, ainsi l'écart de réglage est de plus en plus faible.
Le régulateur établit son taux de modulation toujours plus lentement et la valeur réelle augmente pour atteindre la consigne réglée, à une vitesse moindre.
- t_3 Le régulateur a réglé, l'écart de réglage est égal à 0. Le régulateur I maintient le taux de modulation qu'il a établi.

En général le régulateur I présente un avantage : il supprime l'écart de réglage. Son inertie est un inconvénient.

Temps d'intégration (TI)

Le temps d'intégration permet de modifier la vitesse du régulateur I. Si l'écart de réglage est constant, l'équation du régulateur est :

$$y = \frac{1}{T_I} \times \Delta e \times t + y_{t_0} \quad (14)$$

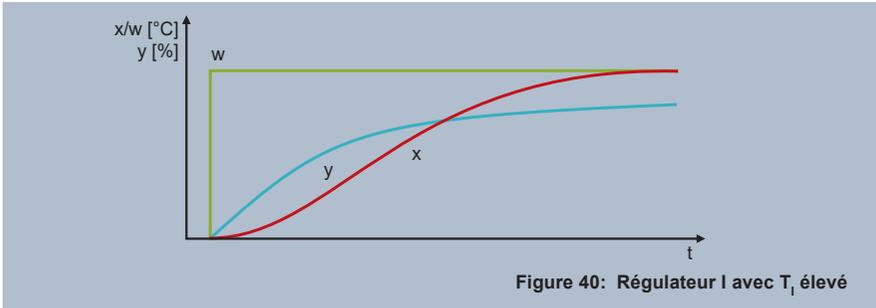
y_{t_0} taux de modulation pour commencer l'examen

Plus T_I est faible, plus le régulateur I est rapide à établir son taux de modulation. Il ressort de cette formule que la durée T_I est exactement le temps nécessaire au régulateur pour augmenter son taux de modulation de l'amplitude de l'écart de réglage présent (sans considération de la dimension).

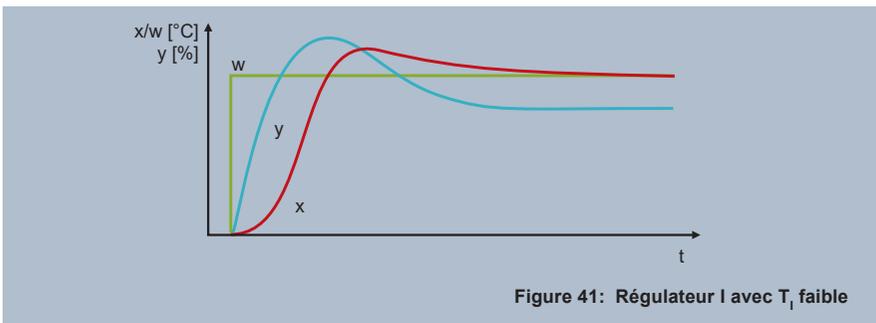
Exemple :

si le temps T_I est réglé sur 60 s et que l'écart de réglage est de 2 K, le taux de modulation augmente de 2 K sur 60 s. Si l'écart de réglage varie, le taux de modulation est établi conformément à l'équation suivante :

$$y = \frac{1}{T_I} \times \int_{t_0}^t e \times dt + y_{t_0} \quad (15)$$



Un régulateur I avec un temps d'intégration réglé sur une valeur relativement élevée par rapport au process présente un comportement "mou" (figure 40). Le régulateur établit le taux de modulation lentement. La valeur réelle converge très lentement vers la consigne.



Un régulateur I avec un temps d'intégration réglé sur une valeur relativement faible par rapport au process (figure 41) établit le taux de modulation trop rapidement. Lorsque la valeur réelle arrive au niveau de la consigne, le régulateur délivre un taux de modulation trop élevé. La puissance amenée dans le process est trop élevée et la valeur réelle dépasse la consigne.

Utilisation des régulateurs I

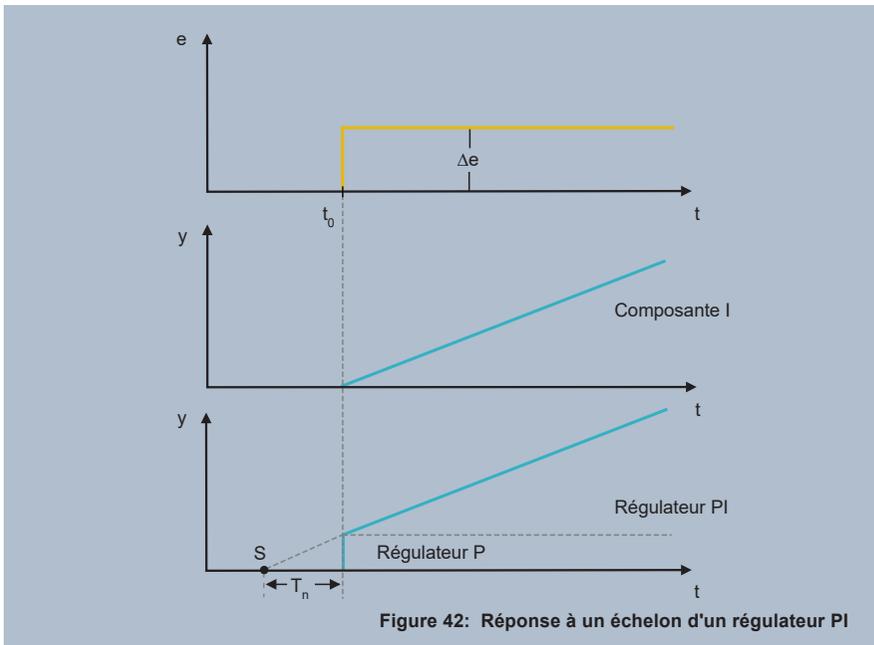
Les régulateurs I sont relativement rarement utilisés : ils sont utilisés pour des grandeurs pulsées (régulation de pression). En outre ils sont utilisés dans les systèmes asservis avec temps mort et les systèmes qui possèdent un temps de compensation faible par rapport au temps de retard ($T_g/T_u < 3$).

3.3 Régulateur PI

Le régulateur PI réunit les avantages des deux composantes : rapidité (P) et aucun écart de réglage (I). Avec un régulateur PI, si un écart de réglage apparaît, la composante P l'amplifie et délivre un taux de modulation relativement élevé. À l'apparition d'un écart de réglage positif, la composante I augmente son taux de modulation et veille à ce que l'écart de réglage revienne à 0.

Dans le cas de la combinaison de la composante I avec une composante P, on parle du temps d'intégrale (T_n) en ce qui concerne le paramètre pour l'action par intégration. Pour le régulateur I, ce temps a été qualifié de temps d'intégration (T_i). Pour la composante I, on utilise un seul paramètre sur les régulateurs I, PI ou PID. C'est pour cette raison que l'action par intégration des régulateurs JUMO avec une structure I est également définie à l'aide du paramètre "temps d'intégrale" (T_n).

La figure 42 montre la réponse à un échelon d'un régulateur PI :



Sur le régulateur PI, on utilise les deux paramètres X_p et T_n : plus la bande proportionnelle X_p réglée est petite, plus la composante P travaille fortement. Plus T_n est faible, plus la composante I travaille rapidement.

A partir de la réponse à un échelon du régulateur PI (figure 42), il est possible de déterminer le temps T_n réglé sur le régulateur : la rampe du taux de modulation est prolongée vers la gauche. Le segment entre le point d'intersection avec l'axe du temps et l'instant d'application de l'échelon correspond au temps d'intégrale. Si l'écart de réglage est constant, le taux de modulation est donné par la formule suivante :

$$\Delta y = \frac{1}{X_p} \times 100 \% \times (\Delta e + \frac{1}{T_n} \times \Delta e \times t) \quad (16)$$

ou encore :

$$\Delta y = \underbrace{\frac{100 \%}{X_p} \times \Delta e}_{\text{composante P}} + \underbrace{\frac{100 \%}{X_p} \times \frac{1}{T_n} \times \Delta e \times t}_{\text{composante I}} \quad (17)$$

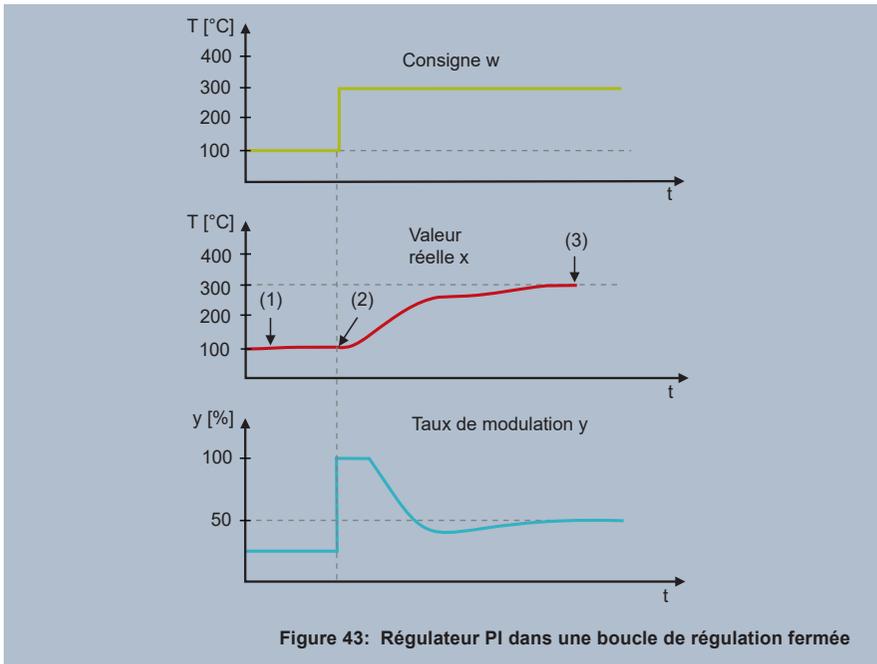
Comme on peut le voir sur la formule, la bande proportionnelle réglée X_p entre également dans l'action par intégration : par ex. si on diminue X_p , la composante I travaille plus vite.

Nous reviendrons plus en détail sur ce sujet dans le chapitre 3.5.1.

Si l'écart de réglage ne reste pas constant, le régulateur travaille conformément à l'équation suivante :

$$\Delta y = \frac{100 \%}{X_p} \times \left(e + \frac{1}{T_n} \times \int_{t_0}^t e \times dt \right) \quad (18)$$

Régulateur PI dans une boucle de régulation fermée



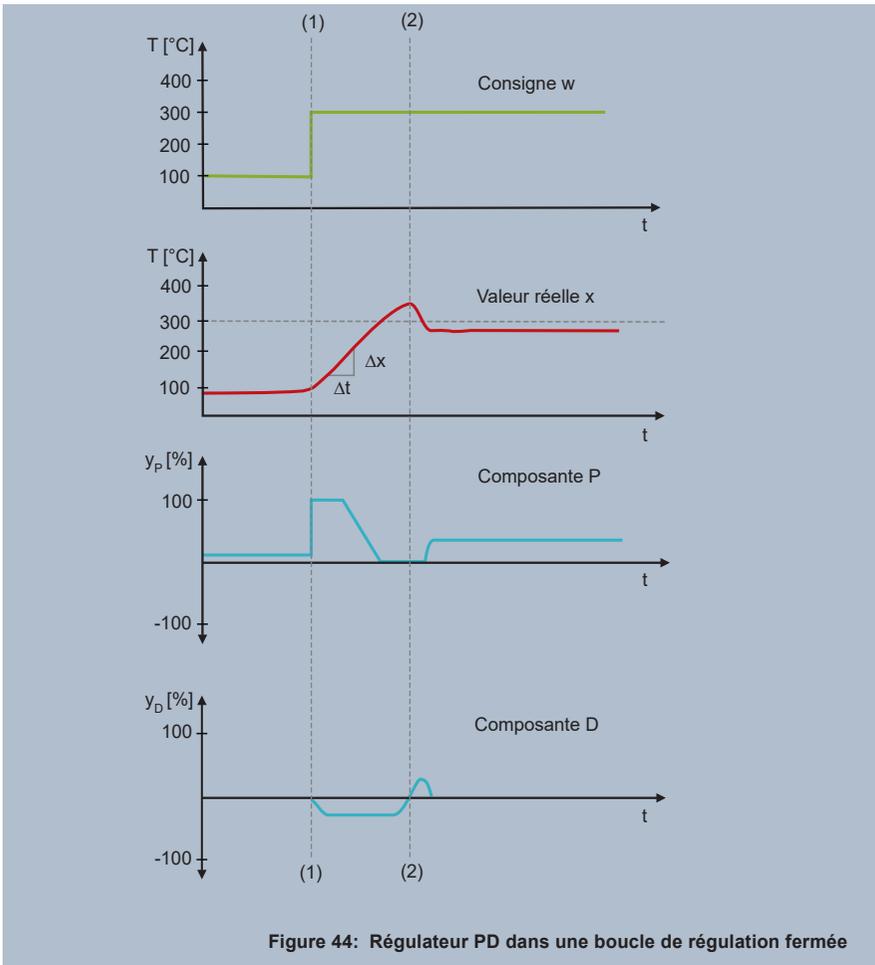
La figure 43 montre le comportement d'un régulateur PI dans une boucle de régulation fermée : la consigne, la valeur réelle et le taux de modulation sont représentés avant et après la variation de consigne.

- (1) La consigne est de 100 $^{\circ}\text{C}$, le régulateur a régulé et le taux de modulation est de 25 %. Lorsque l'écart de réglage est égal à 0, la composante P ne délivre pas de taux de modulation, le signal de sortie n'est délivré que par la composante I.
- (2) Après la modification de la consigne sur 300 $^{\circ}\text{C}$, la valeur réelle se trouve hors de la bande proportionnelle. Le taux de modulation du régulateur P est de 100 %. A cause de cette modification, le taux de modulation de la composante I est mis à 0 %. Comme le taux de modulation est élevé, la valeur réelle revient dans la bande proportionnelle. La composante P devient inférieure à 100 % et la composante I établit un taux de modulation. Comme l'écart de réglage est de plus en plus petit, le taux de modulation de la composante P diminue. La composante I augmente et régule la valeur réelle pour atteindre la consigne.
- (3) En régime établi, la composante I délivre à nouveau la totalité du taux de modulation (par exemple 50 %).

3.4 Régulateur PD

La composante D (composante à action par différenciation) réagit à des modifications de la grandeur réglée et s'y oppose : la composante D d'un régulateur à sens d'action inverse délivre un taux de modulation négatif pour une valeur réelle croissante. Par conséquent lorsque la valeur réelle décroît, le taux de modulation délivré est positif.

La figure 44 montre le comportement d'un régulateur PD après une augmentation de la consigne :



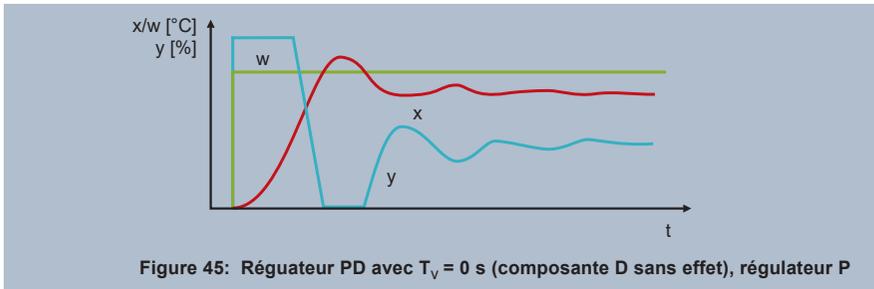
Composante P

Au début, la consigne est de 100 °C, la valeur réelle est légèrement inférieure à 100 °C. Comme il n'y a pas de composante I, cela provoque un écart de réglage, seul le taux de modulation proportionnel à l'écart de réglage est délivré. Ensuite la consigne est réglée sur 300 °C (1), l'écart de réglage est supérieur à la bande proportionnelle et la composante P délivre un taux de modulation de 100 %. L'écart de réglage diminue et lorsque la valeur réelle entre dans la bande proportionnelle, le taux de modulation délivré est réduit. Lorsque la valeur réelle dépasse la consigne, la composante P est à 0 %. Au bout d'un certain temps, lorsque la valeur réelle est inférieure à la consigne, la composante P est à nouveau supérieure à 0 %.

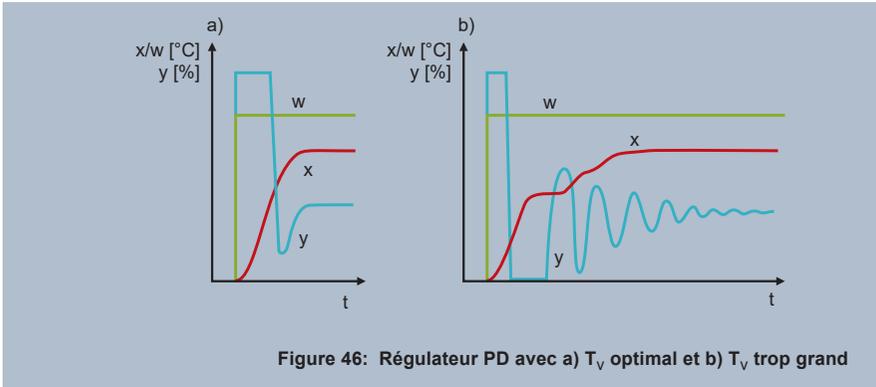
Composante D

Au début, la valeur réelle stagne et la composante D ne délivre aucun taux de modulation. La valeur réelle augmente (1) et la composante D délivre un taux de modulation négatif proportionnel à la pente de la valeur réelle. Ce taux de modulation réduit le taux de modulation global, l'augmentation de la valeur réelle est ralentie. Lorsque la courbe de la valeur réelle s'aplatit, le taux de modulation de la composante D diminue de plus en plus. Lorsque la valeur réelle ne présente plus de pente, le taux de modulation de la composante D est de 0 % (2). Lorsque la valeur réelle chute "après (2)", la composante D s'oppose au mouvement de la valeur réelle par un taux de modulation positif.

L'utilisateur peut régler l'intensité de composante D à l'aide du temps de dérivée T_v . Plus le temps de dérivée est élevé, plus l'effet décrit est intense.



La figure 45 montre le comportement d'un régulateur PD avec un temps de dérivée $T_v = 0$ s – la composante D est sans effet. A cause de la bande proportionnelle relativement étroite, la valeur réelle atteint la valeur finale avec une tendance à osciller.



La figure 46 a) montre le comportement d'un régulateur pour T_v réglé de manière favorable : la composante D réduit le taux de modulation total lorsque la valeur réelle croît et l'augmente lorsque la valeur réelle décroît.

Grâce à cette atténuation, le régulateur peut être exploité avec une bande proportionnelle relativement étroite : la composante D supprime la tendance à osciller due à la forte amplification.

Si T_v est trop grand, cela provoque le comportement du régulateur représenté sur la figure 46 b) : après une modification de la consigne, la composante P délivre un taux de modulation de 100 %. Comme la valeur réelle croît et que T_v est trop grand, la composante D abaisse le taux de modulation total jusqu'à 0 % et la courbe de la valeur réelle devient plus plate. Comme la pente de la valeur réelle est plus faible, la composante D délivre à nouveau son taux de modulation négatif, ce qui provoque à nouveau une croissance rapide de la valeur réelle. Comme la valeur réelle croît rapidement, la composante D réduit à nouveau le taux de modulation total etc.

Dans une boucle de régulation fermée, la valeur réelle est influencée par la variation des grandeurs perturbatrices et s'éloigne de la valeur de consigne. La composante D s'oppose au mouvement de la valeur réelle (figure 47) et réduit ainsi l'écart de réglage maximal qui peut survenir en cas de variation des grandeurs perturbatrices.

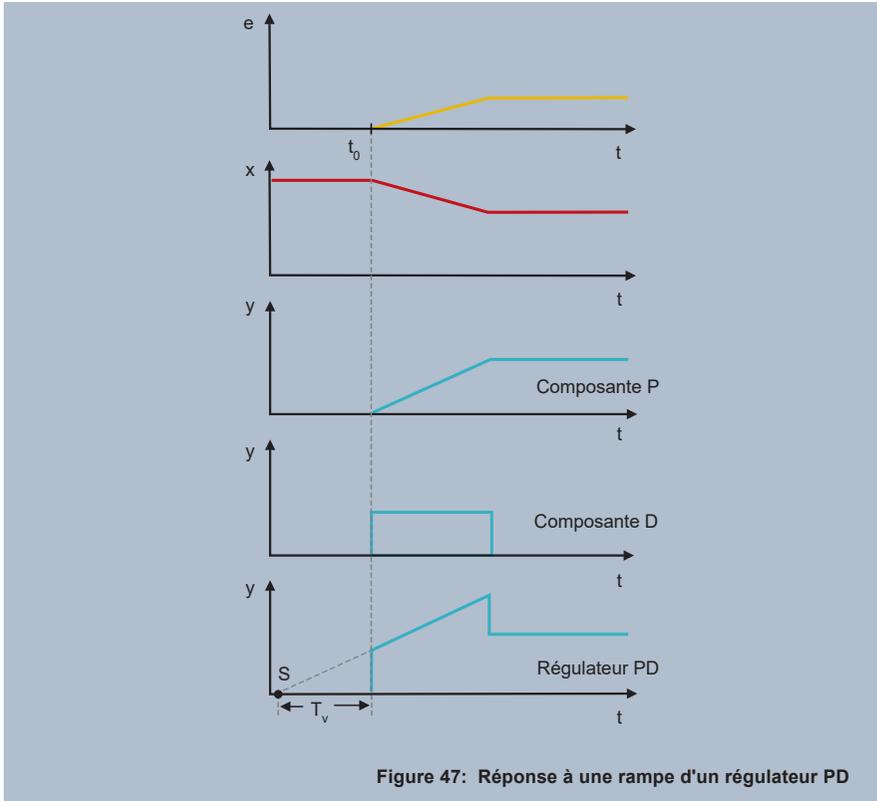


Figure 47: Réponse à une rampe d'un régulateur PD

Sur la figure 47, la valeur réelle diminue parce qu'une grandeur perturbatrice varie. L'écart de réglage augmente et la composante P établit son taux de modulation proportionnellement à cet écart. Pour les petits écarts de réglage, ce taux de modulation est très faible et a l'effet correspondant sur la valeur réelle. La composante D agit à partir du moment où la valeur réelle varie. Son intensité est proportionnelle à la vitesse de variation.

Le régulateur PD à sens d'action inverse établit le taux de modulation, lorsque la pente de la valeur réelle est constante, conformément à l'équation suivante :

$$y = \frac{1}{X_p} \times 100 \% \times \left(e - T_v \times \frac{\Delta x}{\Delta t} \right) \quad (19)$$

Si la pente de la valeur réelle varie, la formule suivante donne le taux de modulation :

$$y = \frac{1}{X_p} \times 100 \% \times \left(e - T_v \times \frac{dx}{dt} \right) \quad (20)$$

$\frac{dx}{dt}$ Pente de la valeur réelle (pour une régulation de température par ex. en K/s)

3.4.1 Composante D pratique – élément DT_1

En principe on peut aussi étudier la réponse à un échelon d'un régulateur PD. Toutefois pour un échelon, la vitesse de variation est infiniment grande. Le taux de modulation de la composante D dû à l'échelon serait une valeur infiniment grande pendant un intervalle de temps infiniment petit (figure 48 - "en théorie").

Dans la pratique, les variations de la valeur réelle sous forme d'un échelon sont plutôt exceptionnelles. Toutefois même si un signal varie de manière continue, la cadence de scrutation du régulateur peut mener à des variations sous forme d'un échelon de la valeur enregistrée.

Dans la pratique, le signal de la composante D est atténué en utilisant un élément T_1 .

La figure 48 montre la réponse à un échelon de la composante D "dans la pratique". T_1 est la constante de temps de l'élément T_1 . Dans la pratique, la constante de temps est automatiquement fixée à $T_v/4$ et ne peut pas être réglée par l'utilisateur. La réponse à un échelon de la composante D "dans la pratique" permet de déterminer le temps de dérivée T_v à partir de T_1 , sur la base du rapport $T_1 = T_v/4$.

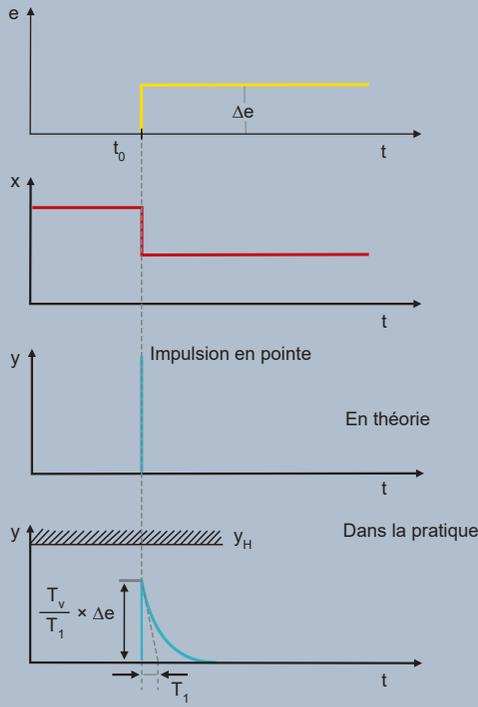
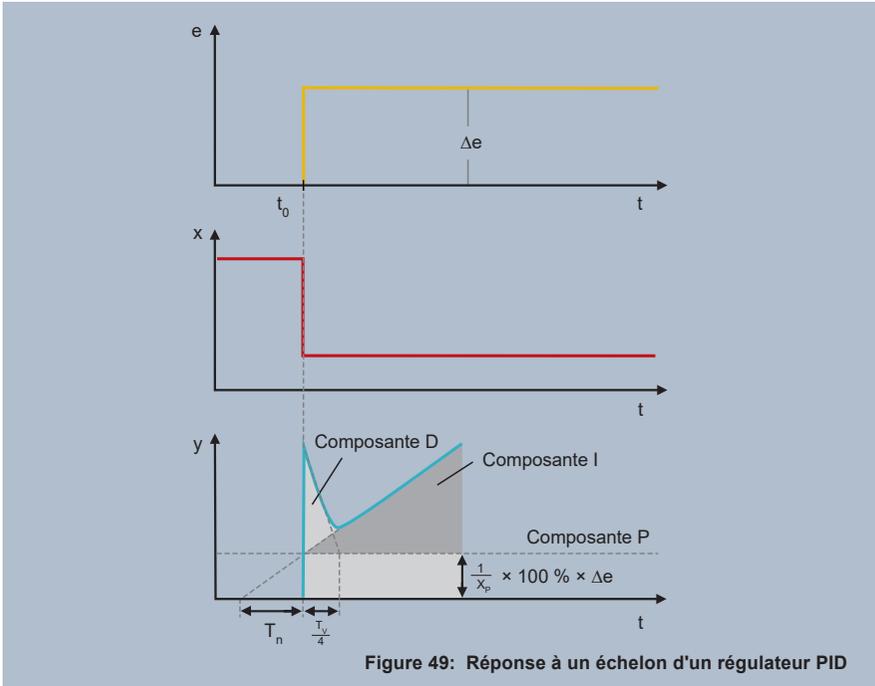


Figure 48: Réponse à un échelon d'un élément DT_1

3.5 Régulateur PID

Le régulateur le plus utilisé est le régulateur PID. Sur ce régulateur, les paramètres à régler sont X_P , T_n et T_v . Il est également possible de les déterminer à partir de la réponse à un échelon (figure 49).



La composante D réagit exclusivement à la variation de la valeur réelle ; c'est pourquoi une variation de la valeur réelle provoque une modification de l'écart de réglage, voir figure 49.

En cas de diminution de la valeur réelle, sous forme d'un échelon, la composante D délivre immédiatement un taux de modulation positif et s'oppose à la variation de la valeur réelle. En outre, à cause de l'écart de réglage, la composante P établit un taux de modulation positif, proportionnel à la différence de réglage. Enfin la composante I augmente son taux de modulation, toutefois la rampe de la composante I n'est visible que lorsque la composante D se trouve au niveau de la composante P.

L'équation applicable au régulateur PID est la suivante :

$$\Delta y = \frac{1}{X_p} \times 100 \% \times \left(e + \frac{1}{T_n} \times \int e \times dt - T_v \times \frac{dx}{dt} \right) \quad (21)$$

Une modification des paramètres de régulation a les effets déjà décrits :

X_P plus grande -> composante P plus petite

Gain plus faible : comportement plus stable mais plus lent.

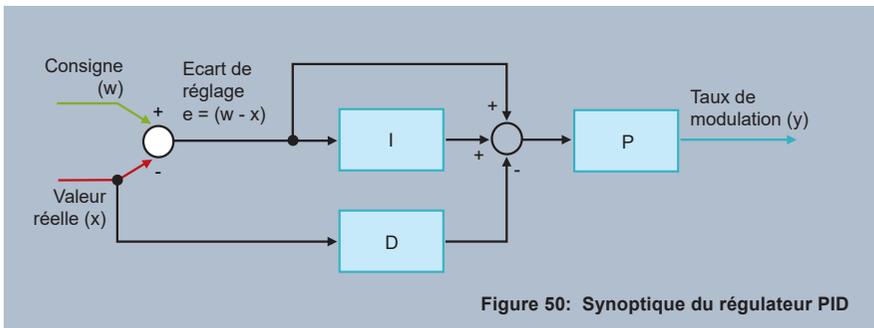
T_n plus grand -> composante I plus petite

La composante I intègre plus lentement : comportement plus stable mais plus lent.

T_v plus grand -> composante D plus grande

Opposition plus forte à la variation de la valeur réelle : comportement plus stable ; ne pas choisir T_v trop élevé.

3.5.1 Synoptique du régulateur PID



Comme le montre l'équation applicable au régulateur PID, la composante P influence également les comportements I et D. La figure 50 montre cette configuration en série.

Lorsque le facteur de proportionnalité double (suite à la division par deux de X_P), les composantes I et D travaillent également avec deux fois plus d'intensité.

Exemple :

le régulateur PID représenté sur la figure 50 a les réglages suivants : $T_n = 10$ s et $X_P = 100$ K (dans cet exemple la composante D n'est pas prise en compte). L'écart de réglage est de 2.

La composante P a un gain de 1 ($K_P = 1/X_P \times 100$ %), il s'agit d'une grandeur sans dimension.

La composante I a juste besoin du temps T_n pour reproduire, sans dimension, le signal d'entrée à sa sortie. Le taux de modulation augmente de 2 % en 10 s. Lorsque la bande proportionnelle est doublée ou que le gain est divisé par deux, la composante I est également réduite de moitié.

Si la composante I est ralentie par une augmentation de la bande proportionnelle par ex. et que la composante D est moins intense, les deux composantes sont "emmenées dans la bonne direction". Pour l'optimisation par la suite, dans de nombreux cas il suffit donc de modifier la bande proportionnelle, la correction des autres paramètres de régulation est inutile.

Pour un régulateur PID, la modification de la bande proportionnelle influence également les comportements I et D.

4 Optimisation des régulateurs et choix de la structure de régulation

4.1 Informations générales

Ce chapitre décrit différentes méthodes d'optimisation et l'auto-optimisation disponible dans les régulateurs JUMO. A la fin du chapitre, vous trouverez un guide de sélection de la structure de régulation pour différentes grandeurs réglées.

4.2 Comportement pilote/Comportement en cas de perturbation

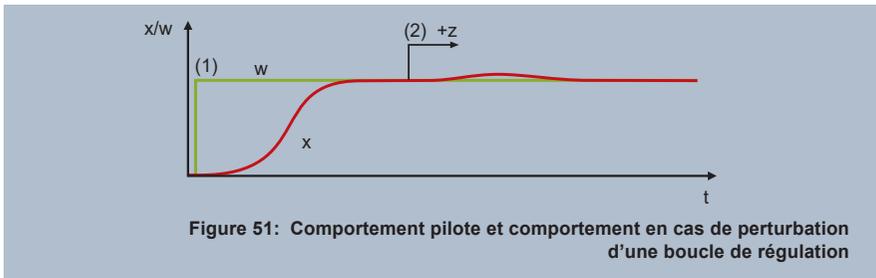


Figure 51: Comportement pilote et comportement en cas de perturbation d'une boucle de régulation

Généralement, l'optimisation d'un régulateur est effectuée sur le comportement pilote (1), pour cela on examine le comportement du régulateur quand on définit une nouvelle consigne.

Les grandeurs perturbatrices qui varient provoquent un écart de réglage temporaire. Le comportement en cas de perturbation montre comment l'écart de réglage est supprimé après une variation des grandeurs perturbatrices (2).

L'optimisation du régulateur se fait généralement sur le comportement pilote et le comportement en cas de perturbation est accepté. Avec l'optimisation sur des valeurs de consigne qui varient, on a tendance à obtenir des valeurs plutôt grandes pour les paramètres de régulation (X_P , T_n et T_v). L'optimisation du comportement en cas de perturbation peut être effectuée en diminuant les paramètres de régulation. Toutefois, si une nouvelle consigne est définie avec ces paramètres, un dépassement est très probable.

Jeux de paramètres et commutation du jeu de paramètres

Dans les régulateurs JUMO, les paramètres de régulation peuvent être stockés en plusieurs exemplaires, dans différents jeux de paramètres. Dans le premier jeu de paramètres, on peut stocker par ex. les paramètres pour un comportement pilote optimal ; dans le deuxième jeu, ceux pour un bon comportement en cas de perturbation. La commutation entre les jeux de paramètres peut par exemple avoir lieu en fonction de l'écart de réglage. S'il y a un grand écart de réglage, le jeu de paramètres 1 (bon comportement pilote) est activé par exemple. Si l'écart de réglage défini n'est pas atteint, le régulateur passe au jeu de paramètres 2 (bon comportement en cas de perturbation).

4.3 Procédure d'optimisation

Pour optimiser un régulateur, nous recommandons les procédures suivantes :

Il existe des installations/boucles de régulation comparables, les paramètres de régulation des régulateurs utilisés dans ces systèmes peuvent être utilisés à titre expérimental. Comme alternative, on peut recourir à l'auto-optimisation disponible sur les régulateurs JUMO. Les deux méthodes d'auto-optimisation sont décrites dans le chapitre 4.4.

Si aucune des méthodes proposées n'aboutit, on peut utiliser une des méthodes d'optimisation décrites dans ce chapitre.

Le comportement des systèmes asservis dépend du point de fonctionnement. Avant l'optimisation, l'installation doit être placée dans un état de fonctionnement pour lequel on s'attend par la suite à des paramètres de régulation corrects. Par exemple, charger un four ou produire une baisse pour un chauffe-eau. S'il faut définir une consigne pour l'optimisation, elle se situe dans la plage de travail ultérieure.

4.3.1 Méthode des oscillations suivant Ziegler et Nichols

Cette méthode est utilisable avec des systèmes asservis relativement rapides. Pour la préparer, il faut paramétrer une structure P et régler une bande proportionnelle X_p relativement grande. Il faut définir une consigne qui se trouve dans la plage de travail ultérieure (figure 52).

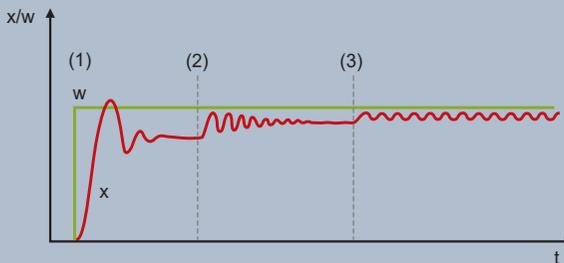


Figure 52: Consigne et valeur réelle pour appliquer la méthode des oscillations

Avec une bande proportionnelle réglée sur une valeur relativement grande, la valeur réelle converge vers la valeur finale avec une faible tendance à osciller [figure 52 (1)]. Comme la structure I est absente, un écart de réglage persiste.

La bande XP est réduite [figure 52 (2)] : la valeur réelle augmente et converge vers la valeur finale avec une plus grande tendance à osciller. La bande proportionnelle est éventuellement réduite plusieurs fois jusqu'à ce que la valeur réelle oscille de manière permanente [figure 52 (3)]. La bande proportionnelle qui provoque ce comportement est appelée XPk (XP critique), il faut la déterminer aussi précisément que possible (ne pas diminuer XP par pas trop grands).

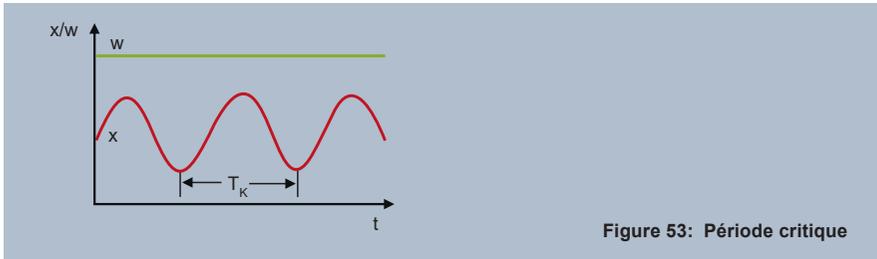


Figure 53: Période critique

A partir de l'oscillation entretenue de la valeur réelle (figure 53), on détermine la deuxième grandeur caractéristique pour cette méthode : la période critique T_K . La période critique T_K (en secondes) correspond par ex. à la durée entre deux valeurs minimales.

Les valeurs X_{PK} et T_K sont utilisées dans le tableau suivant pour la structure de régulation choisie :

Structure de régulation	Paramètre de régulation
P	$X_P = X_{PK} / 0,5$
PI	$X_P = X_{PK} / 0,45$ $T_n = 0,83 \times T_K$
PID	$X_P = X_{PK} / 0,6$ $T_n = 0,5 \times T_K$ $T_v = 0,125 \times T_K$

Tableau: 1: Formules pour effectuer un réglage suivant la méthode des oscillations

4.3.2 Méthode d'après la réponse à un échelon du système suivant Chien, Hrones et Reswick

Cette méthode permet de déterminer relativement rapidement les paramètres de régulation de systèmes asservis lents. Elle est utilisée avec des systèmes du 2e ordre et plus ; la particularité de cette méthode est qu'il y a une distinction entre la formule pour le comportement pilote et celle pour le comportement en cas de perturbation.

Pour les formules empiriques, le gain du système asservi, le temps de retard et le temps de compensation sont déterminés à partir de la réponse à un échelon. Le chapitre 2.4 décrit en détail la procédure.

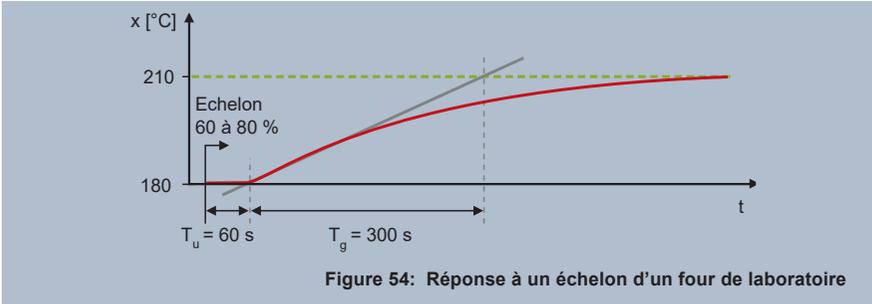
Structure de régulation	Pilote	Perturbation
P	$X_P = 3,3 \times K_S \times (T_u / T_g) \times 100 \%$	$X_P = 3,3 \times K_S \times (T_u / T_g) \times 100 \%$
PI	$X_P = 2,86 \times K_S \times (T_u / T_g) \times 100 \%$ $T_n = 1,2 \times T_g$	$X_P = 1,66 \times K_S \times (T_u / T_g) \times 100 \%$ $T_n = 4 \times T_u$
PID	$X_P = 1,66 \times K_S \times (T_u / T_g) \times 100 \%$ $T_n = 1 \times T_g$ $T_V = 0,5 \times T_u$	$X_P = 1,05 \times K_S \times (T_u / T_g) \times 100 \%$ $T_n = 2,4 \times T_u$ $T_V = 0,42 \times T_u$

Tableau 2: Formules pour effectuer un réglage suivant la réponse à un échelon du système

Exemple :

pour un four de laboratoire, on utilise un régulateur avec une structure PID. Le but est d'obtenir un bon comportement en cas de perturbation – la consigne typique est de 200 °C.

En mode manuel, on augmente le taux de modulation pas à pas, jusqu'à ce qu'on atteigne une valeur réelle en dessous de la future consigne (il faut attendre la fin des processus de compensation). On applique par exemple un taux de modulation de 60 % pour atteindre une température de 180 °C. À partir de 60 %, on augmente le taux de modulation à 80 % (échelon) et on enregistre la valeur réelle.



Grâce à la tangente au point d'inflexion sur la réponse à l'échelon (figure 54), on détermine : temps de retard $T_u = 60$ s, temps de compensation $T_g = 300$ s.

Le gain du système asservi est égal à la variation de la valeur réelle divisée par l'échelon de taux de modulation :

$$K_s = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{210 \text{ °C} - 180 \text{ °C}}{80 \% - 60 \%} = \frac{30 \text{ K}}{20 \%} = 1,5 \text{ K} / \% \quad (22)$$

A l'aide des formules empiriques, on obtient les paramètres suivants pour le comportement en cas de perturbation :

$$X_p = 1,05 \times K_s \times \frac{T_u}{T_g} \times 100 \% = 1,05 \times 1,5 \frac{\text{K}}{\%} \times \frac{60 \text{ s}}{300 \text{ s}} \times 100 \% = 31,5 \text{ K} \quad (23)$$

$$T_n = 2,4 \times T_u = 2,4 \times 60 \text{ s} = 144 \text{ s} \quad (24)$$

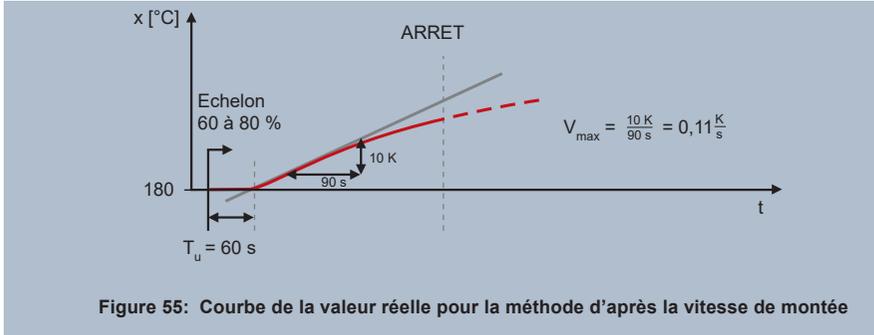
$$T_v = 0,42 \times T_u = 0,42 \times 60 \text{ s} \approx 25 \text{ s} \quad (25)$$

Il faut appliquer l'échelon de taux de modulation dans la zone du point de fonctionnement ultérieur. L'amplitude de l'échelon doit être choisie assez grande pour que la courbe de la valeur réelle puisse être exploitée.

Après application de l'échelon du taux de modulation, il faut attendre que la valeur réelle atteigne sa valeur finale ; la méthode d'après la vitesse de montée est une alternative qui permet de gagner du temps.

4.3.3 Méthode d'après la vitesse de montée

En ce qui concerne l'application de l'échelon, la procédure est la même que pour la méthode d'après la réponse à un échelon du système : avant l'échelon, le taux de modulation délivré est tel que la valeur réelle se trouve en dessous de la future consigne.



L'échelon est appliqué au four de laboratoire du chapitre 4.3.2, le point de fonctionnement ultérieur se trouve également à 200 °C. En appliquant un taux de modulation de 60 % en mode manuel, la valeur réelle atteint 180 °C. On augmente le taux de modulation à 80 % (échelon).

Après application de l'échelon, la valeur réelle augmente au bout d'un certain temps. On enregistre jusqu'à ce que la valeur réelle présente sa pente maximale. Cette procédure permet également de dessiner la tangente au point d'inflexion et de déterminer le temps de retard. La deuxième grandeur caractéristique est la vitesse de montée maximale, elle correspond à la pente de la tangente au point d'inflexion. Dessiner un triangle au point d'inflexion permet de déterminer la pente, donc la vitesse de montée maximale :

$$V_{\max} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (26)$$

Les valeurs déterminées, V_{\max} (0,11 K/s) et T_u (60 s), sont utilisées dans les formules suivantes :

Structure de régulation	Paramètre de régulation	
P	$X_P = V_{\max} \times T_u \times y_H / \Delta y$	y_H = Plage de réglage maximale (généralement 100 %) Δy = Echelon de taux de modulation appliqué (ici 20 %)
PI	$X_P = 1,2 \times V_{\max} \times T_u \times y_H / \Delta y$ $T_n = 3,3 \times T_u$	
PD	$X_P = 0,83 \times V_{\max} \times T_u \times y_H / \Delta y$ $T_v = 0,25 \times T_u$	
PID	$X_P = 0,83 \times V_{\max} \times T_u \times y_H / \Delta y$ $T_n = 2 \times T_u$ $T_v = 0,5 \times T_u$	

Tableau 3: Formules pour effectuer un réglage d'après la vitesse de montée

Dans le cas d'un régulateur PID, on obtient les valeurs suivantes :

$$X_P = 0,83 \times V_{\max} \times T_u \times \frac{y_H}{\Delta y} = 0,83 \times 0,11 \frac{\text{K}}{\text{S}} \times 60 \text{ s} \times \frac{100 \%}{20 \%} \approx 27,4 \text{ K} \quad (27)$$

$$T_n = 2 \times T_u = 2 \times 60 \text{ s} = 120 \text{ s} \quad (28)$$

$$T_v = 0,5 \times T_u = 0,5 \times 60 \text{ s} = 30 \text{ s} \quad (29)$$

4.3.4 Méthode empirique pour déterminer les paramètres de régulation

Avec cette méthode, on détermine des réglages adéquats pour les composantes P, D et I l'une après l'autre. À partir de l'état initial (taux de modulation de 0 %), on applique toujours la consigne typique ; c'est pourquoi cette procédure n'est utilisable qu'avec des systèmes asservis relativement rapides (par ex. des systèmes d'asservissement de température rapides ou des grandeurs réglées comme une vitesse de rotation ou un débit).

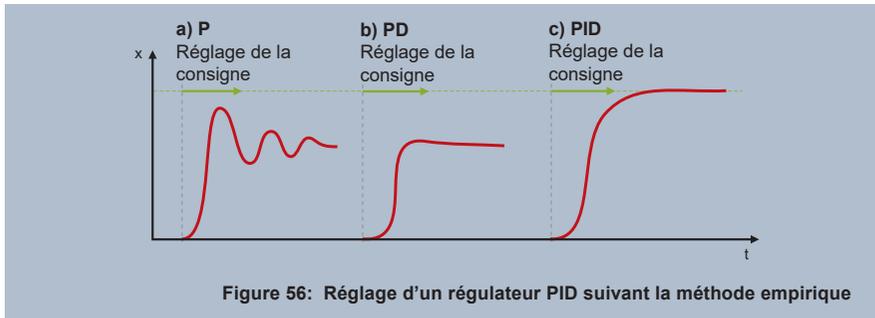


Figure 56: Réglage d'un régulateur PID suivant la méthode empirique

La structure P est activée sur le régulateur. La bande proportionnelle est réglée relativement grande (le dimensionnement dépend du système de régulation) et la consigne est définie dans la plage de travail ultérieure. La valeur réelle atteint lentement sa valeur finale et il en résulte un gros écart de réglage. Ensuite, la consigne est définie avec une bande proportionnelle XP de plus en plus petite. L'objectif est d'obtenir une bande XP pour laquelle la valeur réelle atteint sa valeur finale stable après deux ou trois oscillations complètes (figure 56 a).

Pour amortir le démarrage, on passe de la structure P à PD. On commence par régler le temps de dérivée (T_v) sur une petite valeur, ensuite on l'augmente progressivement tout en appliquant la consigne. Le réglage de T_v est adéquat lorsque la valeur réelle atteint sa valeur finale avec une oscillation aussi petite que possible [figure 56 b].

Remarque : si le régulateur met le taux de modulation une seule fois à 0 % au démarrage, c'est que le temps T_v réglé est trop grand.

En commutant sur la structure PID, on active la composante I. En règle générale, le temps d'intégrale T_n est réglé correctement si sa valeur est égale à quatre fois la valeur T_v préalablement déterminée. La figure 56 c montre le comportement pour le réglage $T_n = 4 \times T_v$.

Pour certains systèmes, il n'est pas possible d'activer toutes les composantes. Si on constate qu'avec la structure P, le comportement n'est pas stable même avec une bande proportionnelle XP large, on ne pourra utiliser ni la structure P, ni la D. Il faut un régulateur I.

Si l'optimisation du régulateur P a réussi mais que l'introduction de la composante D a rendu le système asservi instable, il faut utiliser une structure PI.

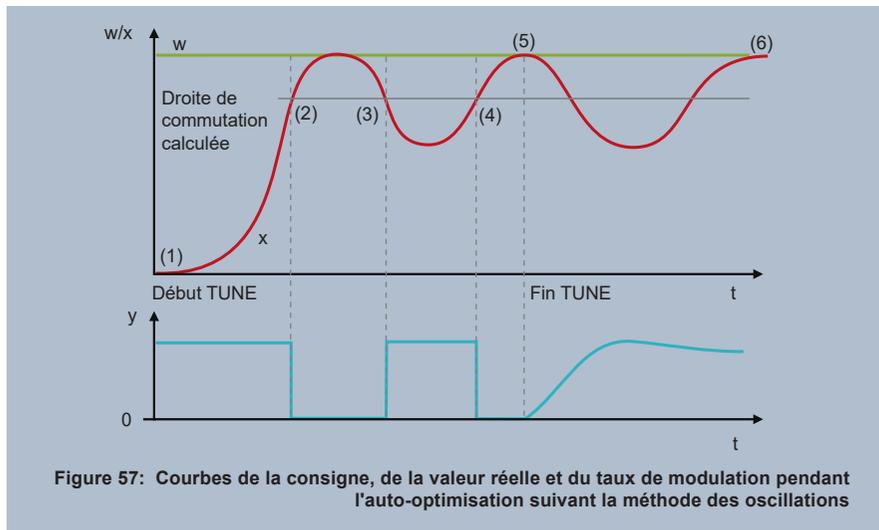
4.4 Auto-optimisation dans les régulateurs compacts JUMO

L'auto-optimisation trouve des paramètres de régulation corrects (XP, Tn et Tv) pour de nombreuses applications. Comme pour les méthodes d'optimisation précédentes, il faut créer les conditions de fonctionnement ultérieures de l'installation (par ex. charger un four ou produire une baisse pour un chauffe-eau).

La procédure standard est la méthode des oscillations :

4.4.1 Procédure suivant la méthode des oscillations

Pendant l'auto-optimisation, le régulateur calcule une droite de commutation. Si la valeur réelle atteint cette droite, cela provoque une variation du taux de modulation de 100 % à 0 % (ou inversement). A partir de la courbe de la valeur réelle, le régulateur calcule les paramètres de régulation :



Dans cet exemple (figure 57), l'auto-optimisation est démarrée après l'application de la consigne (1). Le régulateur règle son signal de sortie sur 100 % et la valeur réelle augmente. Pendant le démarrage, le régulateur calcule la droite de commutation mentionnée. Si la valeur réelle atteint cette droite, le régulateur règle son signal de sortie sur 0 % (2). Pour les systèmes avec des retards, la valeur réelle continue d'augmenter même lorsque le signal de sortie est à 0 %. Dans le cas idéal, la valeur réelle atteint la consigne avant que cette dernière ne change de sens. La valeur réelle décroît ; lorsqu'elle atteint à nouveau la droite de commutation (3), la puissance repasse à 100 %. A cause des retards présents, la valeur réelle ne change de sens également qu'au bout d'un certain temps. Après la désactivation de la sortie de régulation (4), la valeur réelle atteint son maximum (5) pour la deuxième fois. A ce moment, le régulateur a déterminé ses paramètres de régulation et règle sur la consigne réglée avec ces paramètres (6).

Généralement la procédure peut être démarrée pour n'importe quelle valeur réelle.

Comme on peut le voir sur la figure 57, le régulateur délivre en alternance un taux de modulation de 0 % et un taux de 100 %. Pour une optimisation pendant le démarrage, le taux de modulation maximal est appliqué pendant une durée plus longue. Ce comportement peut provoquer, dans certains cas, des dégradations du produit à traiter, voire de l'installation. Les machines de transformation de matières plastiques ou les gros fours industriels en sont des exemples. En outre la procédure suivant la méthode des oscillations est difficilement utilisable avec des systèmes asservis à refroidissement lent. Ces systèmes ne peuvent guère être amenés à osciller.

Dans ces types d'installations, on utilise une autre solution, la procédure suivant la réponse à un échelon.

4.4.2 Procédure suivant la réponse à un échelon

Quand on utilise cette méthode, le régulateur délivre le taux de modulation de repos au démarrage de l'auto-optimisation (valeur par défaut = 0 %) et attend que la valeur réelle se stabilise (figure 58) ; ensuite le régulateur augmente fortement le taux de modulation (échelon) et la valeur réelle augmente avec une pente de plus en plus forte. Lorsque la valeur réelle atteint sa pente maximale, les paramètres de régulation sont déterminés et l'auto-optimisation est terminée :

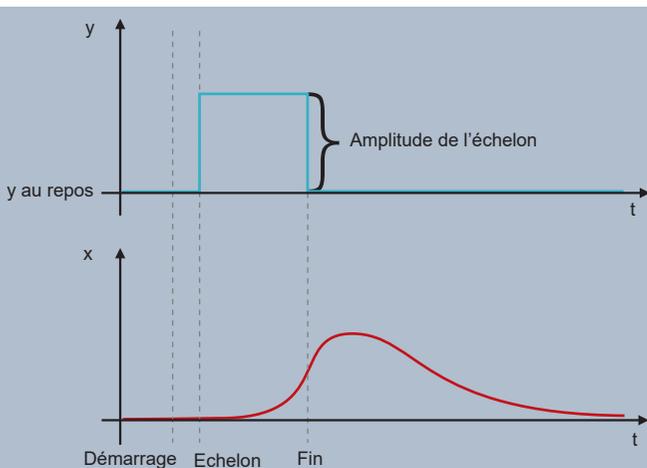


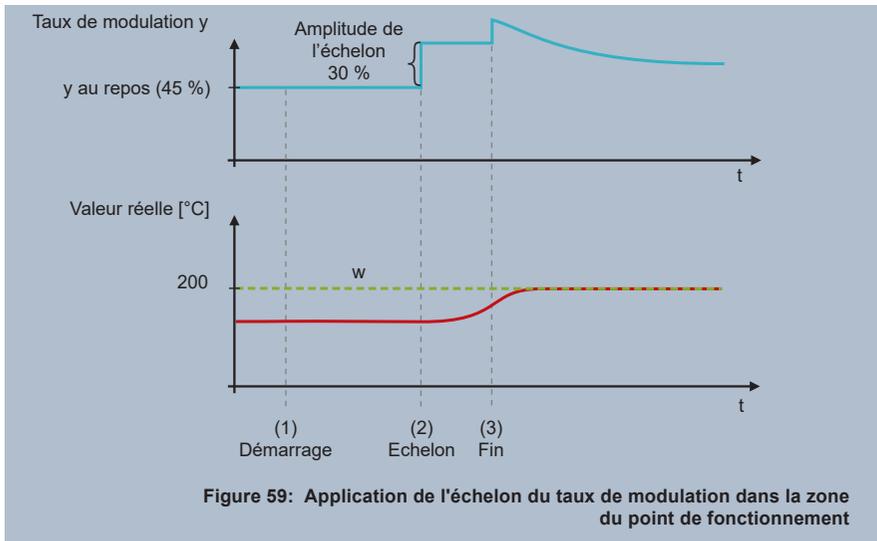
Figure 58: Courbes de la valeur réelle et du taux de modulation pendant l'auto-optimisation suivant la réponse à un échelon

Lorsque l'auto-optimisation est terminée, la consigne est réglée par l'utilisateur et la régulation est effectuée sur cette consigne avec les paramètres trouvés.

Conseils d'utilisation de cette procédure : avant d'exécuter l'auto-optimisation, il faut régler sur le régulateur une bande proportionnelle > 0 . En outre le régulateur a recours au temps d'intégrale pour calculer la durée entre le démarrage de l'auto-optimisation et l'application de l'échelon. Si la durée jusqu'à l'application de l'échelon est trop longue parce que le système asservi est relativement rapide, il est possible d'interrompre l'auto-optimisation, de régler un temps d'intégrale plus petit (par ex. 40 s) et de redémarrer l'auto-optimisation.

Si on utilise un régulateur à 2 ou 3 plages, avant l'auto-optimisation il faut régler ce qu'on appelle la durée du cycle de commutation (somme de la durée d'activation et de la durée de désactivation) sur une valeur suffisamment faible pour que, si le taux de modulation est constant, la valeur réelle n'oscille pas même si l'énergie est fournie de manière intermittente.

Les systèmes asservis modifient leur comportement en fonction du point de fonctionnement. C'est pourquoi l'échelon du taux de modulation est effectué dans la zone du point de fonctionnement ultérieur :



Prenons un exemple : une application avec un point de fonctionnement typique de 200 °C. Pour utiliser la procédure, il faut que le taux de modulation pour le point de fonctionnement soit connu grosso modo. Dans cet exemple, les 200 °C sont atteints avec un taux de modulation de 60 % ; il est possible d'appliquer ce taux de modulation en mode manuel. Le taux de modulation au repos est fixé de telle sorte qu'avec celui-ci, la valeur réelle se situe en dessous du point de fonctionnement ultérieur. Au démarrage de l'auto-optimisation (1), le taux de mo-

dulation au repos est délivré (dans l'exemple, il a été défini à 45 %). Dès que la valeur réelle est stable, le taux de modulation est augmenté sous forme d'un échelon (2) (par ex. 30 %). La valeur réelle augmente ; lorsque la pente la plus raide est atteinte (3), les paramètres de régulation sont déterminés et le régulateur régule sur la consigne réglée avec ces paramètres.

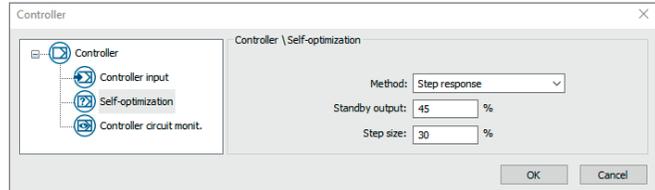


Figure 60: Réglages pour l'auto-optimisation dans le programme de configuration d'un régulateur JUMO

Pour appliquer la méthode, on règle sous "Méthode" (figure 60) "Réponse à un échelon", le réglage d'usine étant "Oscillation". Le taux de modulation au repos et l'amplitude de l'échelon sont paramétrés dans le même menu.

4.4.3 Informations complémentaires sur l'auto-optimisation

Les deux procédures ne peuvent être utilisées qu'avec des systèmes à compensation.

La méthode des oscillations peut être appliquée à tous les régulateurs configurables (à sortie continue, à 2 plages, à 3 plages, à 3 plages pas à pas et de position).

Idem pour la méthode de la réponse à un échelon, toutefois pour un régulateur à 3 plages pas à pas c'est possible uniquement avec un taux de modulation au repos de 0 % et une amplitude de l'échelon de 100 %. Cela est lié au fait que le régulateur à 3 plages pas à pas ne connaît pas la position réelle de l'actionneur, voir chapitre 5.3.2.

Pour les deux procédures, la structure est automatiquement réglée sur PID après l'auto-optimisation et les paramètres X_P , T_n et T_v sont déterminés. Il existe deux exceptions :

Pour divers systèmes asservis, l'utilisation de la composante D provoque un comportement instable. C'est le cas par exemple pour les systèmes d'asservissement de pression ou de débit. Pour ces cas, il faut régler la structure PI avant d'utiliser l'auto-optimisation. L'optimisation est alors effectuée pour un régulateur PI, il n'y a pas de changement de structure après l'auto-optimisation.

Pendant l'auto-optimisation, si un système du 1er ordre est détecté, cela provoque la commutation sur la structure PI.

Outre les paramètres de régulation pour le comportement PID, le régulateur calcule la durée du cycle de commutation des sorties binaires (somme de la durée d'activation et de la durée de désactivation) s'il s'agit d'un régulateur à 2 ou 3 plages.

Pour réussir à déterminer la durée du cycle de commutation, il faut régler le type de la sortie :

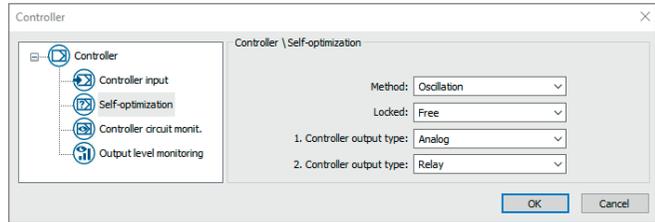


Figure 61: Type des sorties pour l'auto-optimisation

Dans le cas d'un régulateur à sortie continue, il faut régler "Analogique" pour la sortie 1 du régulateur.

Pour un régulateur à 2 plages, les réglages possibles pour "Sortie 1 du régulateur" sont "Relais" ou "Relais statique + Logique".

Pour un régulateur à 3 plages, il faut régler le type de sortie pour la sortie 1 et la sortie 2 du régulateur. Les options possibles sont Relais ou "Relais statique + Logique", mais également "Analogique".

Différence entre les réglages "relais" et "relais statique + logique"

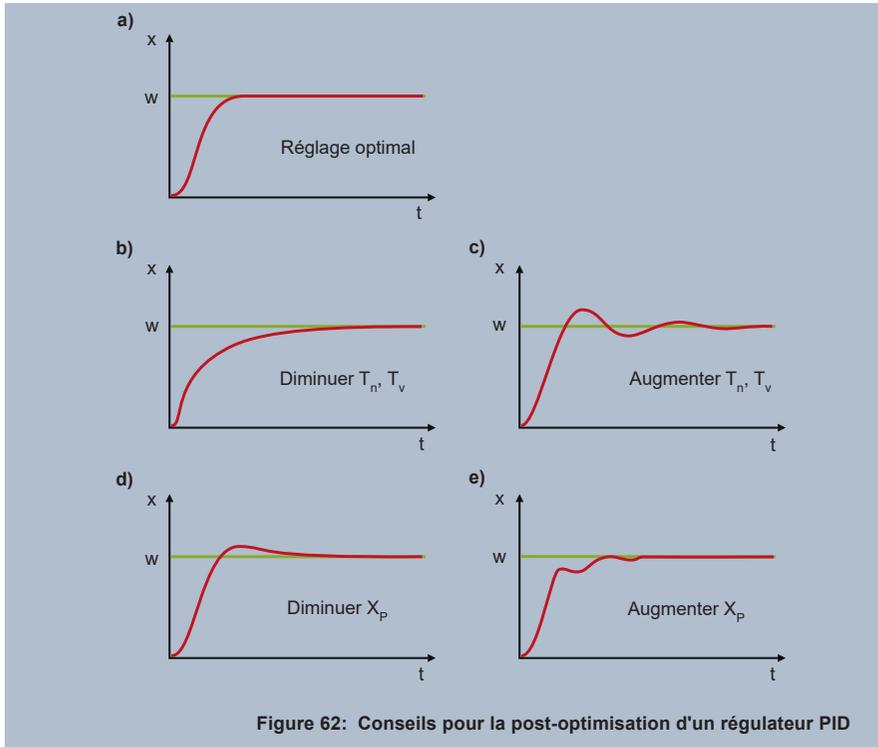
Avec le réglage "relais", l'auto-optimisation calcule une durée du cycle de commutation aussi courte que nécessaire. Le relais et la mécanique qui le suit sont ménagés autant que possible.

Avec le réglage "relais statique + logique", la durée du cycle de commutation est calculée aussi petite que possible (la sortie commutera plus souvent).

4.5 Post-optimisation manuelle d'un régulateur PID

L'utilisation de l'une des méthodes d'optimisation présentées dans ce chapitre entraînera très probablement un comportement de la régulation stable, mais pas optimal.

Une post-optimisation manuelle permet d'améliorer encore le résultat de la régulation. Si le comportement d'un régulateur PID correspond à l'une des courbes 62b à 62e, on trouvera dans ce chapitre des indications pour une optimisation plus poussée.



- a) Le diagramme montre le comportement optimal d'un régulateur PID.
- b) Après application de la consigne, la valeur réelle augmente, avec une pente relativement raide, pour atteindre la bande proportionnelle. Lorsque la valeur réelle atteint la bande proportionnelle, la composante D est réduite et la composante I veille à ce que la valeur réelle s'approche de la consigne. L'augmentation de la composante I est lente parce que T_n est réglé sur une valeur relativement grande, l'écart de réglage est supprimé lentement. Pour une intégration plus rapide, il faut diminuer T_n ; pour conserver le rapport $T_v/T_n = 1/4$, T_v est également réduit.
- c) Lorsque la valeur réelle entre dans la bande proportionnelle, la composante I augmente le taux de modulation. L'augmentation continue jusqu'à ce que la valeur réelle atteigne la consigne. Dans le cas représenté, la composante I délivre trop de taux de modulation pour s'opposer à l'écart de réglage, la valeur réelle dépasse la consigne. Lorsque l'écart de réglage devient négatif, le taux de modulation est réduit trop rapidement, la valeur réelle repasse en dessous de la consigne etc. L'oscillation symétrique de la valeur réelle autour de la consigne permet de conclure que T_n est réglé sur une valeur trop petite. Il faut augmenter T_n ; pour conserver le rapport $T_v/T_n = 1/4$, T_v augmente également.
- d) Lorsque la valeur réelle entre dans la bande proportionnelle, la composante I entre en action jusqu'à ce que l'écart de réglage soit supprimé. Comme la bande XP est réglée sur une valeur élevée, la composante I délivre un taux de modulation même lorsque l'écart de réglage est encore grand. Comme l'écart de réglage est grand au début, la composante I délivre son taux de modulation assez rapidement. Lorsque l'écart de réglage est supprimé, la composante I reste trop élevée, la valeur réelle dépasse la consigne. Si on diminue la bande XP, la composante I ne commence à délivrer son taux de modulation que pour des écarts de réglage plus faibles et donc plus lentement. Le seul dépassement que l'on voit sur la figure a moins de probabilité de se produire.
- e) Si la bande XP est réglée sur une valeur trop petite, le taux de modulation de la composante P est réduit juste avant d'atteindre la consigne. Lorsque la valeur réelle entre dans la bande proportionnelle, la composante P est fortement réduite et la valeur réelle diminue. Comme l'écart de réglage est plus grand, le taux de modulation est plus élevé et la valeur réelle augmente. Dans la bande proportionnelle, de petites variations de la valeur réelle entraînent de grandes variations du taux de modulation, ce qui se traduit par une forte tendance aux oscillations. Une augmentation de la bande proportionnelle permet d'atténuer les oscillations.

4.6 Guide de sélection des structures de régulation pour les différentes grandeurs réglées

Pour la plupart des applications, la structure PID présente le meilleur comportement. Toutefois il existe des grandeurs réglées qui nécessitent la désactivation de certaines composantes :

Les systèmes avec un rapport T_g/T_u faible sont instables si on utilise la composante D, la structure PI est recommandée.

Si le rapport T_g/T_u est très petit, même la composante P provoque des instabilités, il faut utiliser le régulateur I. L'exemple extrême est un système asservi avec uniquement un temps mort et le rapport $T_g/T_u = 0$.

Généralement la composante D est gênante pour les grandeurs réglées pulsées puisqu'elle s'oppose de manière continue à la variation de la valeur réelle.

Les systèmes sans compensation nécessitent l'utilisation de la structure P ou PD. Si on tient compte des grandeurs perturbatrices, on peut également avoir recours à une structure PID.

Grandeurs réglées	Structure de régulation recommandée
Température	PID
Pression	I
Valeur de pH	Régulation d'écoulement PID, régulation dans liquide immobile P ou PD
Vitesse de rotation	PI
Débit	I
Niveau	P ou PD (éventuellement PID)
Transport (produit en vrac)	I
Positionnement	P ou PD

Tableau: 4: Choix de la structure de régulation en fonction des grandeurs réglées les plus importantes

5 Régulateurs avec des sorties binaires

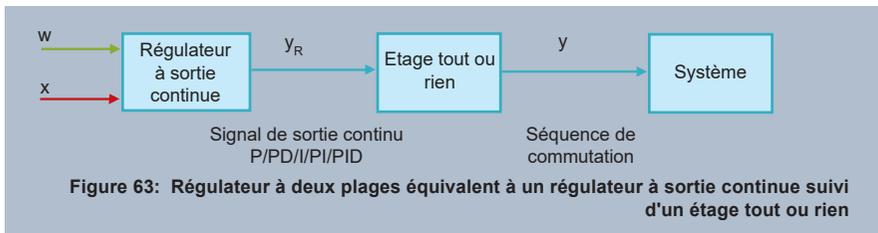
Ce chapitre traite des régulateurs à 2 plages, à 3 plages, à 3 plages pas à pas et de position. À l'exception d'un cas particulier pour le régulateur à trois plages, ces régulateurs disposent exclusivement de sorties binaires. Les sorties peuvent être des sorties à relais, des sorties logiques, des sorties à relais statique ou des sorties PhotoMOS®.

Ces régulateurs sont utilisés pour piloter des actionneurs binaires comme des relais, des sectionneurs de puissance à thyristors, des électrovannes etc.

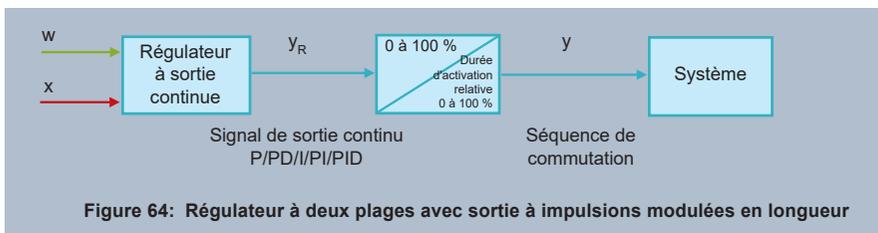
5.1 Régulateur à deux plages

Un régulateur à deux plages délivre deux états : 1 et 0 ou ON et OFF. Il permet de piloter un actionneur binaire dans des process lents.

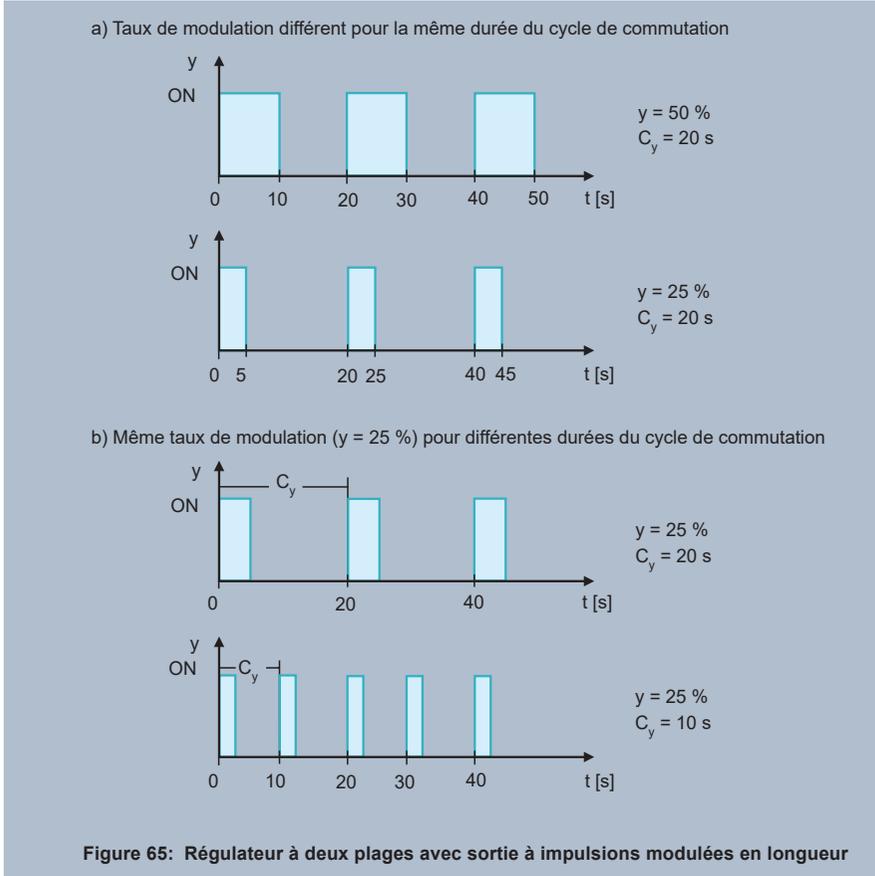
Le régulateur peut être vu comme un régulateur à sortie continue suivi d'un étage tout ou rien. L'étage tout ou rien réalise une modulation des impulsions en longueur ou fréquence :



5.1.1 Régulateur à deux plages avec sortie à impulsions modulées en longueur



Le régulateur à deux plages avec sortie à impulsions modulées en longueur modifie la durée d'activation relative de la sortie, proportionnellement au taux de modulation continu du régulateur yR :



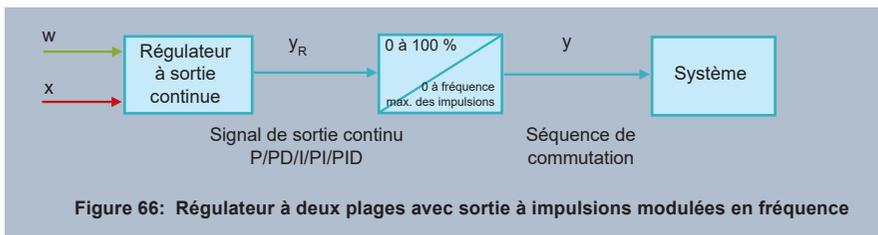
La figure 64 a montre le signal de sortie du régulateur pour des taux de modulation de 50 % et de 25 %. Le régulateur active sa sortie respectivement 50 % et 25 % du temps, le taux de modulation correspond à la durée d'activation relative.

Pour la sortie à impulsions modulées en longueur, on définit ce qu'on appelle la durée du cycle de commutation C_y . La sortie est activée et désactivée une fois sur la durée du cycle de commutation, dans l'exemple la durée C_y est égale à 20 s.

Si la durée du cycle de commutation est réglée sur une valeur trop grande pour le process, cela provoque des variations de la valeur réelle même lorsque le taux de modulation ne varie pas. Sur la figure 65 b, le taux de modulation reste le même (25 %) pour différentes durées du cycle de commutation. Dans le deuxième cas, la durée du cycle de commutation est réglée sur une valeur plus faible (10 s). L'énergie est dosée plus finement, cela conduit à de plus petites variations de la valeur réelle. La durée du cycle de commutation doit être réglée sur une valeur assez faible pour que la valeur réelle n'oscille pas ou bien que les oscillations soient acceptables.

Pour piloter un système mécanique, il est conseillé de ne régler la durée du cycle de commutation C_y que sur la valeur aussi petite que nécessaire. Une petite valeur pour C_y porte préjudice à la durée de vie des relais et des contacteurs par exemple. Pour les sorties électroniques (logique, relais statique ou PhotoMOS), on peut régler C_y sur une valeur aussi petite que possible et donc atteindre la qualité de régulation la plus élevée.

5.1.2 Régulateur à deux plages avec sortie à impulsions modulées en fréquence

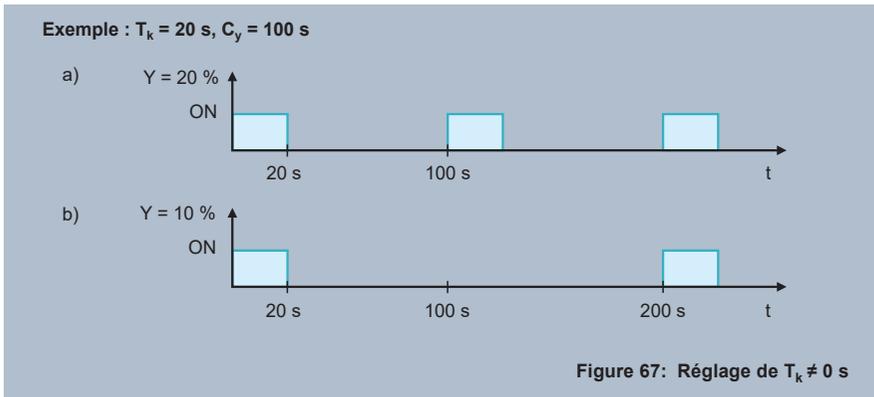


Le régulateur à deux plages avec sortie à impulsions modulées en fréquence modifie la fréquence des impulsions de la sortie, proportionnellement au taux de modulation continu du régulateur y_R . Pour l'étage tout ou rien, on définit sur le régulateur la fréquence maximale des impulsions. La fréquence sur la sortie binaire (0 à fréquence maximale des impulsions) varie proportionnellement au taux de modulation du régulateur (0 à 100 %). Les régulateur à deux plages avec sortie à impulsions modulées en fréquence sont utilisés pour piloter des pompes de dosage.

5.1.3 Durée d'activation minimale pour régulateur à deux plages à sortie à impulsions modulées en longueur ou fréquence

Certains actionneurs – pilotés avec des impulsions modulées en longueur – doivent être activés ou désactivés pendant une durée minimale. C'est pourquoi nombre de régulateurs JUMO permettent de régler non seulement la durée du cycle de commutation (C_y) mais aussi la durée minimale d'activation ou de désactivation (T_k).

La figure 67 montre l'état de la sortie binaire pour un régulateur à deux plages avec une sortie à impulsions modulées en longueur. La durée minimale d'activation est de 20 s et la durée du cycle de commutation est de 100 s.



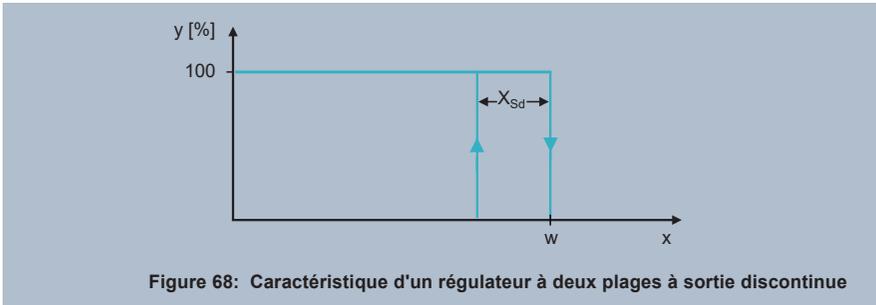
Sur la figure 67 a, le régulateur délivre un taux de modulation de 20 % : il ferme sa sortie pendant 20 s et l'ouvre pendant 80 s (avec ce taux de modulation, la durée du cycle de commutation conserve sa valeur de 100 s).

Sur la figure 67 b, le régulateur délivre un taux de modulation de 10 % : ici aussi, la sortie est activée pendant 20 s. Pour 10 % de la puissance maximale, la sortie doit être désactivée neuf fois plus longtemps. Pour le taux de modulation indiqué, le régulateur prolonge la durée effective du cycle de commutation à 200 s.

Si une pompe de dosage a besoin d'une durée minimale de commande (pilotage avec une sortie à impulsions modulées en fréquence), il faut également régler cette durée sous T_k .

5.1.4 Cas particulier des régulateurs à deux plages à sortie discontinue

Si la bande proportionnelle (XP) d'un régulateur à deux plages est réglée sur 0, le comportement du régulateur est discontinu. Avec ce réglage, le différentiel de coupure X_{Sd} s'applique et le taux de modulation est exclusivement de 0 ou 100 % :



Le régulateur délivre un taux de modulation de 100 % jusqu'à ce que la valeur réelle croissante atteigne la consigne. Lorsque la valeur réelle dépasse la consigne, le taux de modulation est de 0 %. Si la valeur réelle revient à une valeur égale à la consigne moins le différentiel de coupure X_{Sd} , le taux de modulation est à nouveau de 100 %.

Lorsque le taux de modulation est de 100 %, le régulateur avec sortie à impulsions modulées en longueur ferme de manière permanente la sortie binaire ; le régulateur avec sortie à impulsions modulées en fréquence applique la fréquence maximale à la sortie. Pour le taux de modulation de 0 %, les sorties des deux régulateurs restent désactivées.

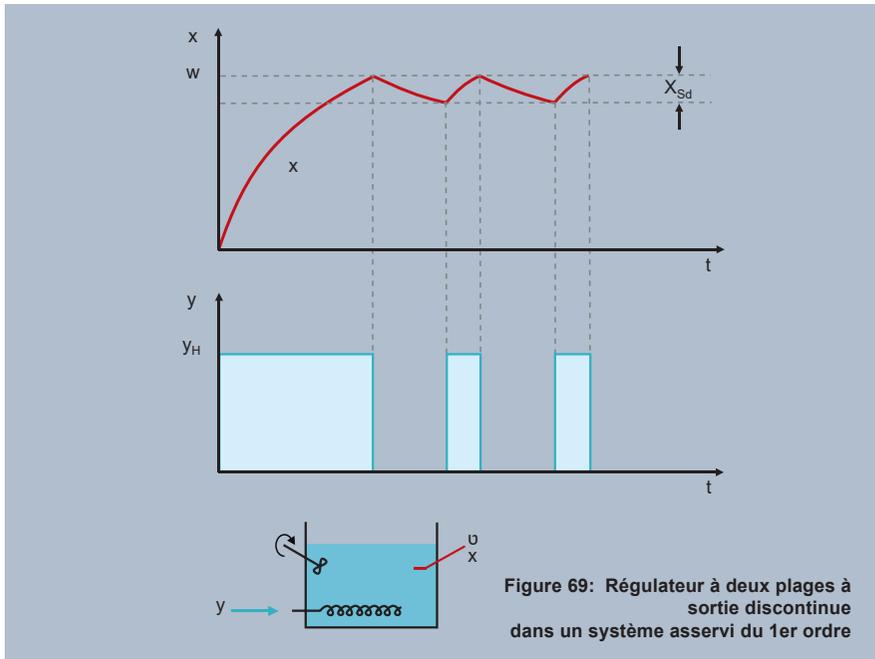
Pour obtenir le comportement discontinu avec la prise en compte du différentiel de commutation, on règle la bande proportionnelle sur 0.

Les régulateurs à deux plages à sortie discontinue tels que les thermostats et les pressostats sont peu coûteux à l'achat et remplissent leur fonction de régulation dans de nombreuses applications. Ces dispositifs doivent être affectés aux régulateurs avec sortie à impulsions modulées en longueur, le taux de modulation étant de 0 ou 100 %. Il peut arriver que l'ampli-

tude de variation de la valeur réelle soit supérieure au différentiel de coupure dans certains systèmes asservis – cela vaut pour les systèmes d'ordre supérieur à un. C'est le cas pour les installations thermiques comme nous allons le voir :

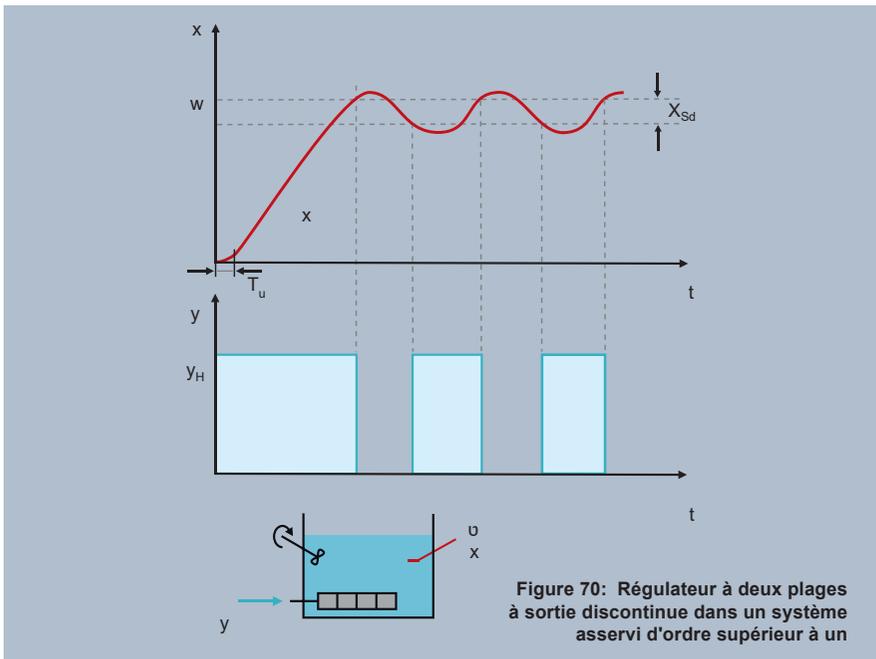
La figure 69 montre le comportement d'un **système asservi du 1er ordre**. Comme exemple, reprenons le bain-marie du chapitre 2.3.3, chauffé par un filament.

A la mise en marche de l'installation refroidie, le chauffage est activé immédiatement. Comme il n'y a qu'un seul accumulateur d'énergie (le filament ne peut pas stocker d'énergie), la température augmente immédiatement. Lorsque la consigne est atteinte, la puissance est ramenée à 0 % et la valeur réelle ne dépasse pas la consigne. En théorie, la valeur réelle chute immédiatement et atteint au bout d'un certain temps le point de commutation inférieur (consigne - différentiel de coupure). Le chauffage est à nouveau activé et la valeur réelle augmente à nouveau. Avec un système du 1er ordre, la valeur réelle zigzague dans la bande du différentiel de coupure. Plus la fréquence de commutation est élevée, plus le différentiel de coupure est petit et plus le système asservi est rapide.



La figure 70 montre le comportement d'un **système asservi du 2e ordre**. Le filament chauffant a été remplacé par une cartouche chauffante avec une capacité d'accumulation.

A la mise en marche de l'installation refroidie, le chauffage est également immédiatement activé. Comme il y a un deuxième accumulateur d'énergie, la grandeur réglée n'augmente qu'au bout d'un certain temps (il faut d'abord réchauffer la cartouche chauffante). Lorsque la consigne est atteinte, la puissance est ramenée à 0 %. À cause du temps de retard T_u , la valeur réelle dépasse la consigne (au moment de l'arrêt, la cartouche chauffante est plus chaude que l'eau – l'énergie thermique est dissipée). Au bout d'un certain temps, la valeur réelle chute et atteint le point de commutation inférieur. Le chauffage s'allume, mais tant que la température de la cartouche chauffante n'aura pas augmenté de manière significative, la température de l'eau continuera de baisser. Ensuite la valeur réelle augmente à nouveau.



Dans un système d'ordre supérieur à un, les oscillations de la valeur réelle sont supérieures au différentiel de coupure. Avec un thermostat, si le différentiel de coupure est de 5 K par exemple, il est possible que la valeur réelle oscille sur une plage de 10 K.

Résumé sur les régulateurs à sortie discontinue et les régulateurs continus :

Les régulations à sortie discontinue sont raisonnables si les variations de la valeur réelle qui en résultent ne sont pas gênantes.

Les régulations à sortie discontinue sont réalisées avec des dispositifs peu coûteux tels que des thermostats et des pressostats.

Si des régulateurs à deux plages sont réalisés avec des régulateurs compacts, leur fonctionnement est en général celui d'un régulateur continu : pour obtenir un comportement continu, il faut régler la bande proportionnelle sur une valeur supérieure à 0. La sortie est alors synchronisée avec la durée du cycle de commutation réglée et la durée d'activation relative correspond au taux de modulation.

Le résultat de la régulation par des régulateurs continus qui commandent un actionneur binaire correspond à celui des régulateurs à sortie continue et d'un actionneur analogique, pour des systèmes asservis relativement lents et une durée du cycle de commutation réglée sur une valeur suffisamment petite.



Figure 71: Thermostat pour montage en saillie heatTHERM-AT comme régulateur

5.2 Régulateur à trois plages

Un régulateur à trois plages influence la valeur réelle dans deux directions. Le chauffage / le refroidissement, l'humidification / la déshumidification ou l'augmentation / la diminution du pH sont des exemples typiques. Généralement, un régulateur à trois plages peut être représenté comme la combinaison de deux régulateurs à sortie continue suivis d'étages tout ou rien.

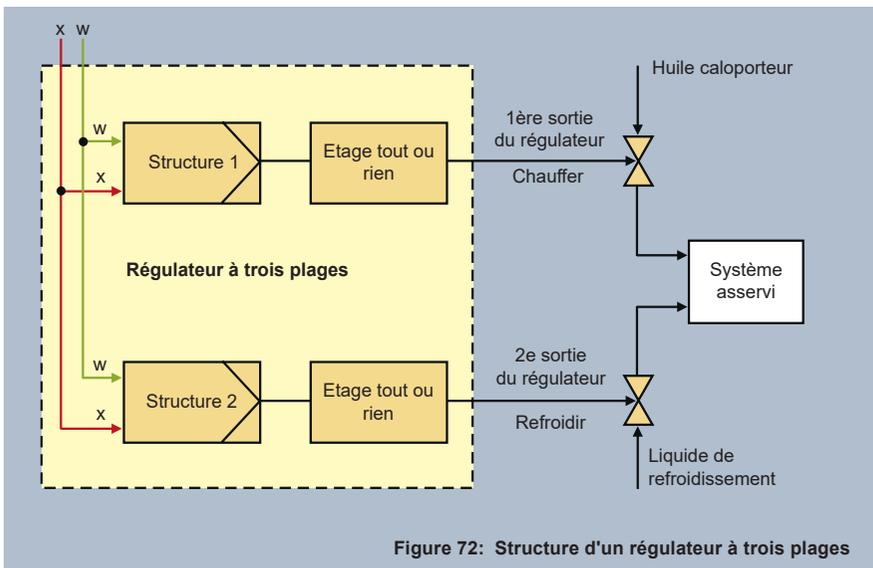


Figure 72: Structure d'un régulateur à trois plages

Pour le régulateur à trois plages, au lieu de deux régulateurs, on parle de deux structures de régulation. Ainsi, pour un process thermique, la structure 1 délivre par ex. un taux de modulation positif sur la plage de 0 à 100 %. Le taux de modulation est appliqué à un étage tout ou rien (sortie à impulsions modulées en longueur ou fréquence) ou délivré directement avec une sortie continue.

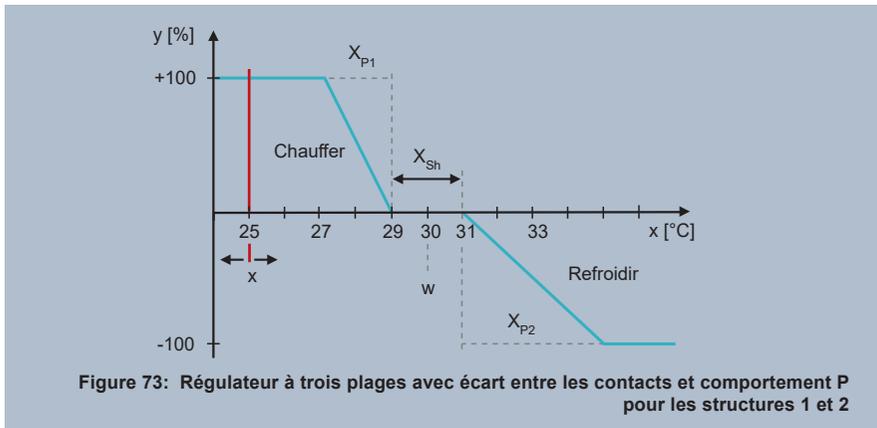
S'il faut refroidir, la structure 2 délivre un taux de modulation compris entre 0 et -100 %. En ce qui concerne la sortie, les possibilités sont les mêmes que pour la structure 1.

Les sorties des deux structures sont appelées sorties de régulation 1 et 2.

Les deux structures peuvent être réglées indépendamment l'une de l'autre (P, PD, I, PI ou PID). L'indice permet d'indiquer à quelle structure appartiennent les paramètres de régulation : structure 1 (X_{P1} , T_{n1} , T_{v1} etc.) ou structure 2 (X_{P2} , T_{n2} , T_{v2} etc.).

5.2.1 Ecart entre les contacts

Sur le régulateur à trois plages, il peut arriver qu'il y ait commutation entre les sorties de régulation 1 et 2 alors que ce n'est pas souhaité (par ex. chauffer et refroidir). Il y a éventuellement besoin de chauffer et la valeur réelle oscille autour de la consigne. La commande instable des sorties pour chauffer et refroidir a pour conséquence que le fonctionnement de l'installation n'est pas efficace. Dans ce cas, l'écart entre les contacts (X_{Sh}) peut être utile :



La figure 73 montre le diagramme pour un régulateur à trois plages. Pour les deux structures, le comportement est de type P. La bande X_{P1} s'élève à 2 K, X_{P2} à 4 K. L'écart entre les contacts est réglé sur 2 K.

A la mise en chauffe (la valeur réelle est par ex. de 25 °C), le taux de modulation est de 100 % et la sortie 1 du régulateur délivre la puissance maximale possible. Lorsque la valeur réelle atteint 27 °C, le taux de modulation est réduit jusqu'à ce qu'il soit finalement de 0 % à 29 °C. Pour les systèmes d'ordre supérieur à un, il est possible que la valeur réelle dépasse 29 °C et que la valeur réelle se trouve dans ce que l'on appelle l'écart entre les contacts (X_{Sh}). Dans la zone de l'écart entre les contacts, aucune des deux sorties du régulateur n'est active. L'écart

entre les contacts "pousse" les bandes proportionnelles des deux structures de régulation à s'écarter l'une de l'autre. Sans écart entre les contacts, la valeur réelle passerait immédiatement dans la bande proportionnelle XP2 en cas de dépassement de la consigne et il y aurait refroidissement.

Avec une structure P, il s'avère que l'écart de réglage résiduel est fixe : la valeur réelle se trouve finalement dans bande proportionnelle X_{P1} . Si on passe d'une structure P à une PI, la composante I intègre l'écart de réglage existant et amène la valeur réelle à la valeur de consigne. Idem pour le refroidissement.

En résumé :

un écart entre les contacts réglé de manière appropriée empêche de commander en alternance et de manière indésirable les deux actionneurs (par ex. chauffer et refroidir). Si on augmente ce paramètre, cela ralentit le comportement du régulateur mais cela n'a aucune influence sur la précision de la régulation.

Sens d'action

En ce qui concerne le sens d'action, on considère le taux de modulation total du régulateur. Lorsque la valeur réelle est croissante, le régulateur de la figure 73 réduit le taux de modulation de 100 % (sortie 1 du régulateur excitée à 100 %) à -100 % (sortie 2 du régulateur excitée à 100 %). Le sens d'action est inversé.

En outre, les deux structures fonctionnent de manière discontinue avec le réglage X_{P1} ou $X_{P2} = 0$:

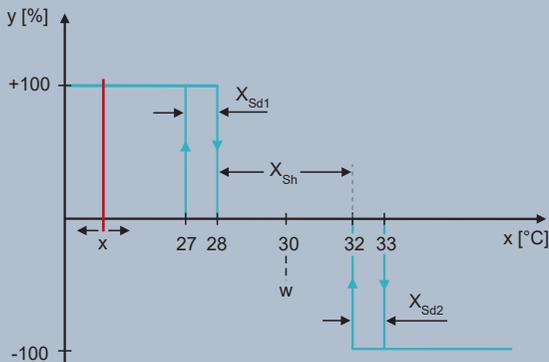


Figure 74: Régulateur à trois plages avec $X_{P1} = X_{P2} = 0$, $X_{Sd1} = X_{Sd2} = 1$ et $X_{Sh} = 4$

5.3 Régulateurs pour piloter des actionneurs à moteur

Les actionneurs à moteur sont composés d'un servomoteur et d'un actionneur. Les actionneurs sont souvent des vannes (gaz, eau) ou des clapets (air etc.). Deux lignes permettent de faire tourner le moteur vers la gauche ou la droite et donc d'ouvrir ou fermer l'actionneur.

La tension d'alimentation est généralement amenée sur les lignes mentionnées, via deux contacts de travail (relais) :

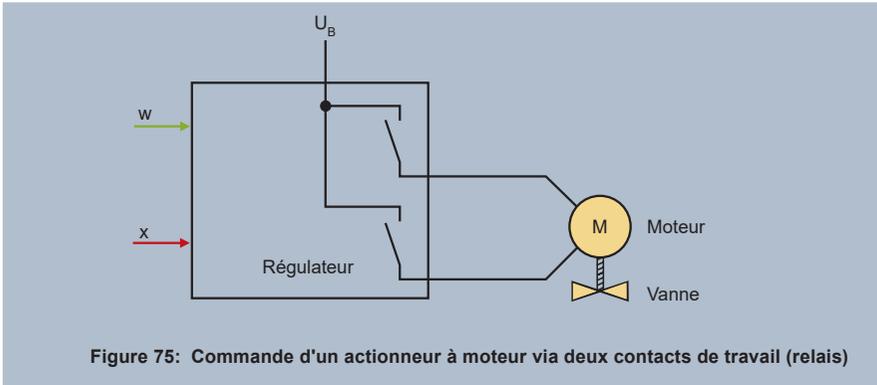
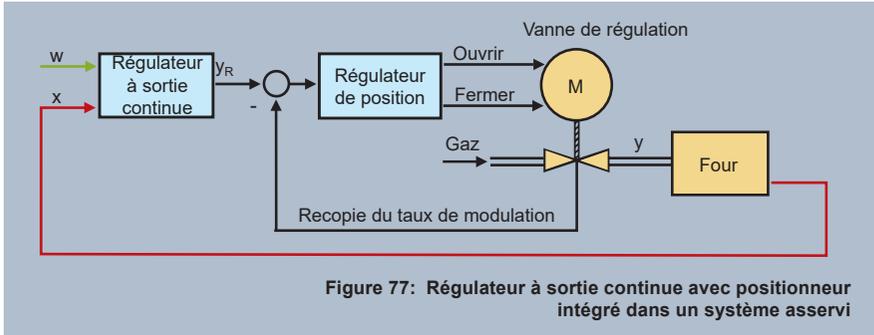


Figure 76: Actionneur à moteur et vérin de la société ARI-Armaturen

Pour commander des actionneurs à moteur, on utilise des positionneurs et des régulateurs à trois plages pas à pas.

5.3.1 Positionneur

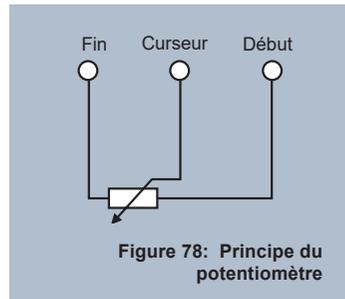
La désignation complète du positionneur est "régulateur à sortie continue avec régulateur de position intégré" :



En fonction des paramètres de régulation, de la consigne et de la valeur réelle, le régulateur (figure 77) délivre un taux de modulation compris entre 0 et 100 %. Le régulateur de position monté derrière le régulateur à sortie continue règle la position de l'actionneur, proportionnellement au taux de modulation. Pour le positionnement, il faut effectuer une recopie du taux de modulation vers le régulateur. Cela se fait par ex. via le potentiomètre qui se trouve dans l'actionneur.

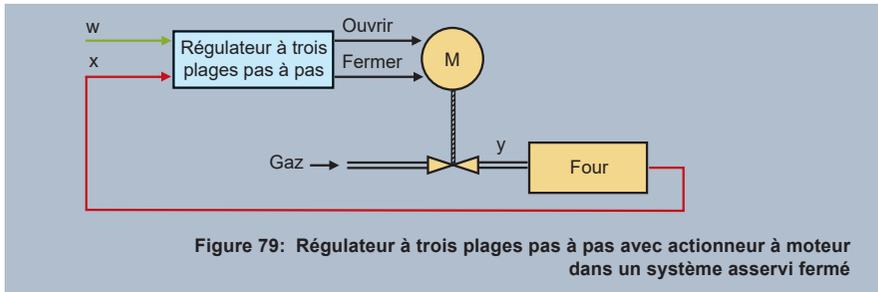
Généralement la recopie du taux de modulation est affectée à l'entrée analogique 2 du régulateur. La valeur réelle (sur la figure 77, la température du four) est appliquée au régulateur via l'entrée analogique 1.

Le régulateur de position monté à la suite du régulateur n'a pas besoin d'une optimisation, il faut uniquement régler le temps de fonctionnement de l'organe de positionnement (TT) sur le régulateur. Durant le temps de fonctionnement de l'organe de positionnement, l'actionneur passe de l'état totalement ouvert à l'état fermé (et inversement). 30 s ou 60 s sont des valeurs typiques pour TT.



5.3.2 Régulateur à trois plages pas à pas

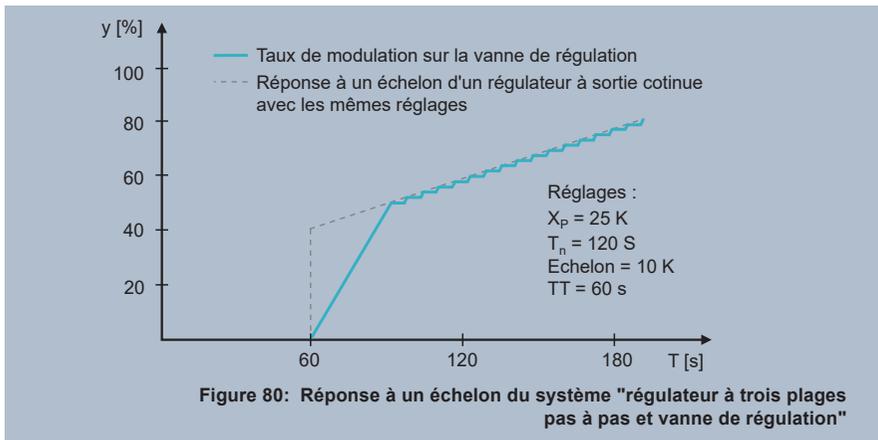
Contrairement au régulateur de position, le régulateur à trois plages pas à pas se passe de la copie du taux de modulation. Le régulateur ne peut pas amener l'actionneur à une position définie mais il se limite à le faire avancer et reculer (ou l'ouvrir et le fermer) :



Comme il n'y a pas de copie du taux de modulation, même en mode manuel il n'est pas possible d'appliquer un taux de modulation défini, on ne peut qu'ouvrir ou fermer manuellement. En outre seules les structures de régulation avec composante I sont possibles (PI et PID).

Exemple :

Pour un régulateur à trois plages pas à pas avec une structure PI ($X_p = 25$ K, $T_n = 120$ s) et un temps de marche de l'organe de positionnement (TT) de 60 s, valeur réelle = consigne = 0 °C. Après une augmentation de la consigne, l'écart de réglage est de 10 K (figure 80).



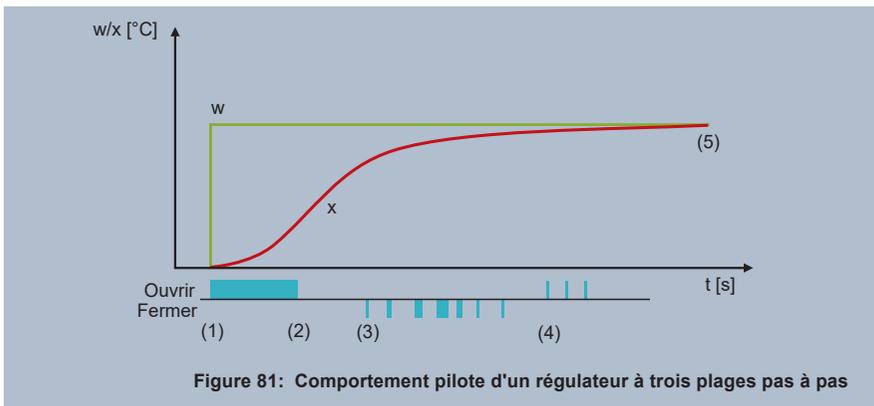
Comme XP est réglée sur 25 K et que l'écart de réglage apparu soudainement est de 10 K, il en résulte une composante P de 40 % après l'échelon. Le régulateur à trois plages pas à pas excite le relais pendant 24 s et provoque ainsi une augmentation du taux de modulation de 40 % :

$$\frac{40\%}{100\%} \times \text{Temps de marche de l'organe de positionnement} = 24 \text{ s} \quad (30)$$

A cause de l'écart de réglage de 10 K et le dimensionnement de XP = 25 K et de Tn = 120 s, la composante I augmente à la vitesse de 1 % par 3 s.

L'augmentation du taux de modulation sur l'actionneur pendant 60 s est réalisée via une commande synchrone du relais.

Tant qu'il y a un écart de réglage, le régulateur continue de commander l'actionneur. Dans le cas du régulateur à trois plages pas à pas, il peut arriver que l'actionneur soit déjà ouvert, mais que le régulateur continue d'ouvrir (par ex. lorsque l'alimentation en gaz est coupée). Cette situation impose des interrupteurs de fin de course dans les actionneurs.



La figure 81 montre la consigne, la valeur réelle et les deux sorties de régulation du régulateur à trois plages pas à pas : en (1), une nouvelle consigne est définie. La valeur réelle se trouve hors de la bande proportionnelle et le régulateur commande la vanne avec sa sortie 1 au moins pendant le temps de fonctionnement de l'organe de positionnement – jusqu'à (2). Lorsque la valeur réelle entre dans la bande proportionnelle, la composante P diminue et simultanément la composante I augmente. A partir de (3), la baisse de la composante P prédomine, l'actionneur est fermé. A partir de (4), la hausse de la composante I prédomine et le taux de modulation total augmente. A partir de (5), on est en régime établi, les sorties de régulation ne sont plus excitées et la vanne conserve sa position.

Mode manuel

Le régulateur à trois plages pas à pas ne connaît pas la position réelle de l'actionneur, il ne peut pas piloter l'actionneur avec un taux de modulation défini en mode manuel. Après l'activation du mode manuel, on peut déplacer manuellement l'actionneur (marche par à-coups).

5.3.3 Informations complémentaires sur les positionneurs et les régulateurs à trois plages pas à pas

Écart entre les contacts

Les régulateurs pilotent toujours leurs sorties au minimum pour la cadence de scrutation ; celle-ci se situe entre 50 et 250 ms pour les régulateurs JUMO. Cette caractéristique ne permet pas de modifier le taux de modulation aussi finement que l'on veut.

Par exemple, pour un temps de marche de l'organe de positionnement de 60 s et pour une commande sur 250 ms, on obtient une variation théorique du taux de modulation d'environ 0,4 %. Il résulte de la modification du taux de modulation une variation de la valeur réelle qui peut être de quelques Kelvin. La valeur réelle va fluctuer autour de la valeur de consigne et l'actionneur va s'ouvrir et se fermer. Le paramètre "Écart entre les contacts" (X_{Sh}) définit une bande autour de la consigne dans laquelle il n'y a pas de commande des sorties du régulateur. La précision de la régulation s'établira sur une plage de $w \pm 1/2 X_{Sh}$.

Réglage pratique de l'écart entre les contacts

Après l'optimisation de la régulation, si l'actionneur n'arrête pas de s'ouvrir et se fermer dans la zone de la consigne, il faut régler un écart entre les contacts supérieur à 0. Il faut augmenter ce paramètre jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'ouvertures/fermetures dans la zone de la consigne. Ainsi l'actionneur n'est plus sollicité inutilement. Il est particulièrement important de dimensionner correctement l'écart entre les contacts pour les actionneurs qui ne sont pas conçus pour un fonctionnement continu.

Comparaison Positionneur – Régulateur à trois plages pas à pas

Le **positionneur** applique le taux de modulation fourni par un régulateur à sortie continue en mode automatique ou manuel. Il en résulte une qualité de la régulation un peu supérieure et des avantages pour le SAV.

Comme la régulation est indépendante de la copie du taux de modulation, le **régulateur à trois plages pas à pas** offre une meilleure sécurité de fonctionnement. La régulation avec un régulateur à trois plages pas à pas est peu coûteuse à installer (pas de potentiomètre pour l'actionneur à moteur, pas de câblage) et suffisante pour de nombreuses applications.

6 Circuits de régulation spéciaux

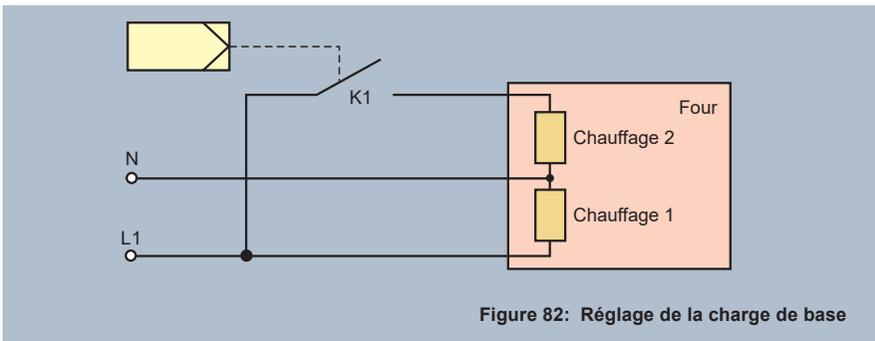
Jusqu'à présent, nous n'avons considéré dans cet ouvrage que les boucles de régulation à une seule boucle : un régulateur commande un actionneur sur la base de ses paramètres de régulation ainsi que de la valeur réelle et de la consigne présentes.

Les circuits de régulation différents peuvent avoir les objectifs suivants :

- montage au coût optimisé
- facilité à asservir
- fonctionnement avec un coût et des ressources optimisés
- aucune influence de grandeurs perturbatrices
- réduction de l'influence des grandeurs perturbatrices
- limitation du flux d'énergie

6.1 Charge de base

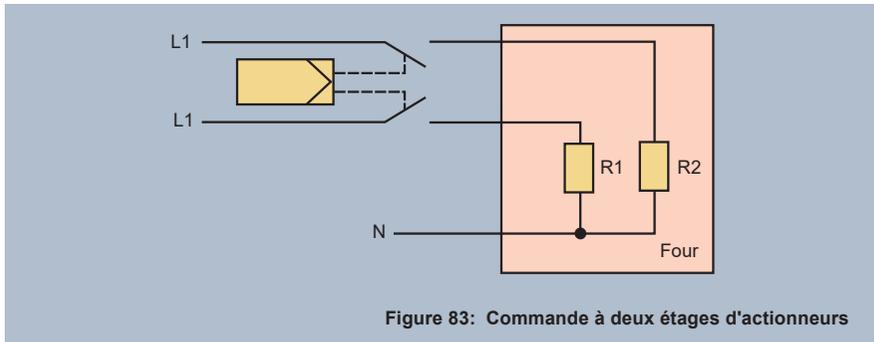
Si on exploite une installation avec réglage de la charge de base, en principe une partie de la puissance est appliquée à l'installation. Le régulateur ne pilote qu'une partie de la puissance totale.



Dans cet exemple (figure 82), le chauffage 1 est allumé en permanence, le régulateur ne commande que le chauffage 2. Le réglage de la charge de base permet de commander un actionneur de très petite dimension. En outre, si le chauffage est électrique et qu'on utilise des

régulateurs à deux plages, la charge variable du réseau est plus faible. Si le régulateur tombe en panne, le process continue de fonctionner avec la charge de base, il en résulte une plus grande sécurité du process.

6.2 Commande à deux étages d'actionneurs



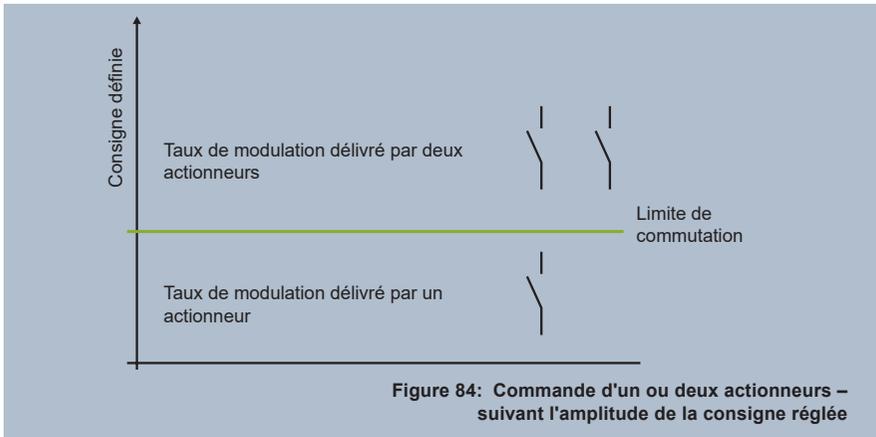
L'exemple (figure 83) montre la commande à deux étages d'actionneurs : pour le four représenté schématiquement, les chauffages 1 et 2 sont utilisés pour la mise en chauffe. Si la température du four se rapproche de la consigne définie, le chauffage 1 est éteint et la température est régulée en fonction de la consigne avec le chauffage 2. En règle générale, seule une commande discontinue est prévue pour l'actionneur 1 (coupure lorsque l'écart de réglage est inférieur à une valeur définie). Pour l'actionneur 2, on utilise des actionneurs continus (par ex. des variateurs de puissance à thyristors) ou des actionneurs binaires (comme des sectionneurs de puissance à thyristors). Pour les installations de chauffage au gaz, on peut aussi utiliser des actionneurs à moteur.

On peut utiliser cette structure lorsque l'actionneur 2 délivre suffisamment de puissance de chauffage pour atteindre le régime établi et que l'actionneur 1 ne sert qu'à la mise en chauffe. L'actionneur pour le régime établi peut être plus petit et les changements de charge en régime établi sont moins intenses.

Les installations thermiques peuvent fonctionner sur une large plage de températures : des températures très élevées, mais aussi très basses, peuvent être définies comme consignes. Avec les consignes de faible valeur, seule une fraction de la puissance disponible est nécessaire, il y a un fort excédent de puissance. Toutefois les actionneurs binaires ne peuvent délivrer instantanément que la pleine puissance ou aucune puissance. Après définition d'une consigne de faible valeur, une courte commande de l'actionneur (avec sa puissance nominale élevée) peut déjà provoquer un dépassement.

Il est possible de trouver une solution en délivrant la puissance via deux actionneurs. Pour les consignes de faible valeur, un seul actionneur est commandé ; à partir d'une certaine consigne, il y en a deux.

Lorsque les consignes sont de faible valeur, la puissance maximale délivrée est plus faible et un dépassement est moins probable.



Pour réaliser cette commande, le régulateur surveille la consigne réglée (sur les régulateurs JUMO, c'est possible avec la surveillance de valeur limite). Si la consigne est supérieure à une limite prédéfinie, le deuxième actionneur est activé (sur les régulateurs JUMO, c'est possible avec la fonction dite logique).

Les systèmes de régulation thermique présentent dans la plage de température supérieure un gain plus faible que pour les valeurs réelles faibles. Pour obtenir une bonne dynamique de régulation, le gain peut souvent être relativement élevé pour les températures élevées (la bande proportionnelle est réglée en conséquence sur une valeur faible).

Cependant, pour les valeurs réelles plus petites, le gain élevé du régulateur peut être trop grand et la boucle de régulation peut devenir instable. Le gain total trop élevé provoque de l'instabilité. Le gain total est égal au gain du régulateur multiplié par le gain du système asservi.

Comme la puissance est réduite pour les consignes de faible valeur (voir figure 84), le gain du système asservi est plus faible et le gain de la boucle est similaire à celui de la plage de travail supérieure. Globalement, la régulation restera stable même avec les consignes de faible valeur.

6.3 Mode "split range"

Avec le mode "split range" (littéralement "plage segmentée"), le taux de modulation du régulateur (en règle générale 0 à 100 %) est réparti sur plusieurs actionneurs. La répartition peut être nécessaire par exemple à cause d'un gros besoin en énergie, réparti sur plusieurs actionneurs. Dans le schéma représenté, le mode "split range" permet un fonctionnement efficace du point de vue énergétique d'une installation frigorifique :

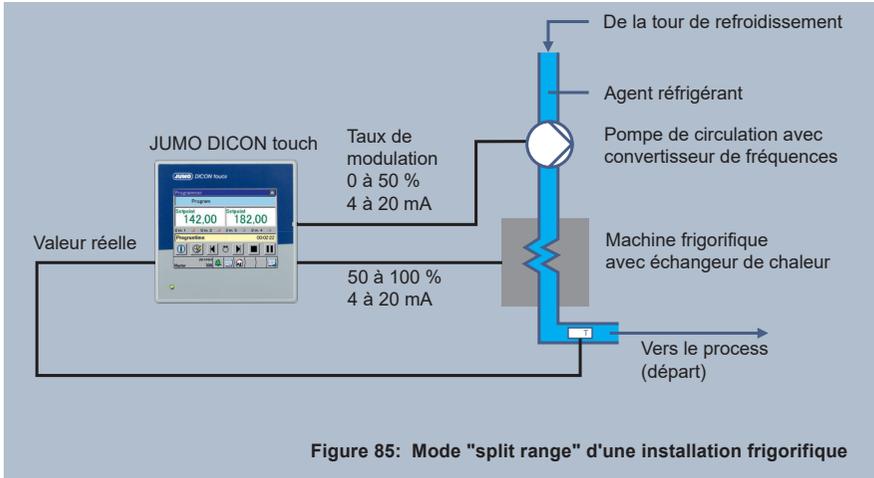


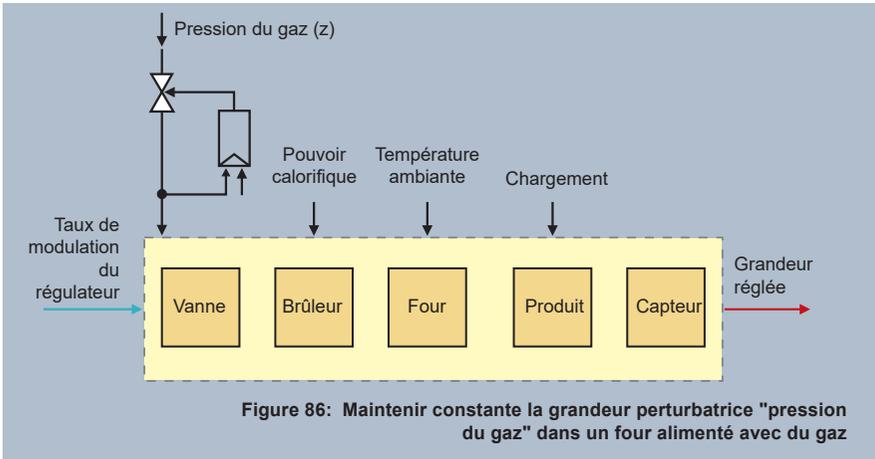
Figure 85: Mode "split range" d'une installation frigorifique

L'installation frigorifique fournit du liquide de refroidissement à la température de départ requise pour le process. Lorsque la température extérieure est basse, le refroidissement s'effectue à l'aide d'une tour de refroidissement, ce qui permet d'économiser les ressources et de réduire les coûts. Jusqu'à un taux de modulation du régulateur de 50 %, la pompe d'alimentation augmente la quantité d'agent réfrigérant. Si le refroidissement par la tour de refroidissement ne suffit plus, le régulateur augmente automatiquement le taux de modulation à plus de 50 %. A partir de ce taux de modulation, il y a refroidissement complémentaire de l'agent réfrigérant. La puissance de la machine frigorifique augmente avec le taux de modulation. Avec un taux de modulation de 100 %, la puissance de refroidissement maximale est atteinte avec le débit maximal.

Dans cet exemple, on utilise un régulateur à sortie continue, le mode "split range" est également possible avec des régulateurs à deux plages.

6.4 Maintenir constantes les grandeurs perturbatrices

Dans un système asservi si les grandeurs perturbatrices varient, elles modifient la grandeur réglée, il en résulte un écart de réglage provisoire. A chaque variation d'une grandeur perturbatrice, le régulateur modifie son taux de modulation et ramène la valeur réelle sur la consigne. Lorsque les variations des grandeurs perturbatrices sont fréquentes, la situation décrite peut mener à un résultat de régulation insatisfaisant.



Comme décrit dans le chapitre 2.1, si un four est alimenté avec du gaz, la pression du gaz est une des grandeurs perturbatrices (figure 86). Si le système se trouve en régime établi, il y aura un écart de température si la pression du gaz varie. Le régulateur modifiera son taux de modulation et ainsi supprimera l'écart de réglage. Dans cet exemple, la pression du gaz est maintenue constante, ce qui évite qu'elle ait une influence sur la grandeur réglée. Un réducteur de pression permet de réaliser cela (représenté sur la figure 86 sous forme d'un régulateur avec une vanne).

6.5 Verrouillage de la grandeur perturbatrice

En fonction des grandeurs perturbatrices, le taux de modulation du régulateur peut être modifié de manière à ce que, dans le meilleur des cas, l'influence sur la valeur réelle soit complètement compensée.

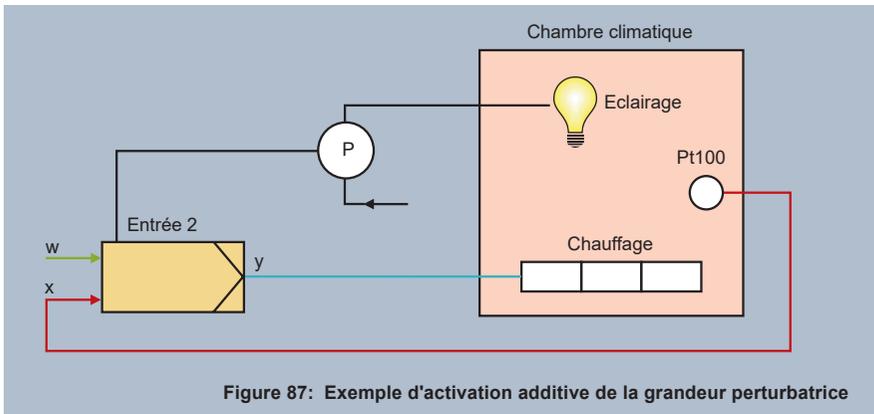
Dans les régulateurs JUMO, il est possible d'ajouter un taux de modulation supplémentaire en cas de grandeur perturbatrice (activation de la grandeur perturbatrice additive) ou de modifier le taux de modulation proportionnellement à la grandeur perturbatrice (activation de la grandeur perturbatrice multiplicative).

Le taux de modulation du régulateur est influencé en fonction de la grandeur perturbatrice. Cette variation du taux de modulation du régulateur diminue l'écart de réglage qui apparaît en cas de variation de la grandeur perturbatrice. Ce qu'on appelle le "verrouillage de la grandeur perturbatrice" est possible lorsque la grandeur perturbatrice est techniquement mesurable et que l'influence des variations de la grandeur perturbatrice sur la grandeur réelle peut être évaluée.

6.5.1 Activation additive de la grandeur perturbatrice

L'activation additive de la grandeur perturbatrice est utilisée lorsque il faut délivrer un taux de modulation supplémentaire quand il y a variation de la grandeur perturbatrice.

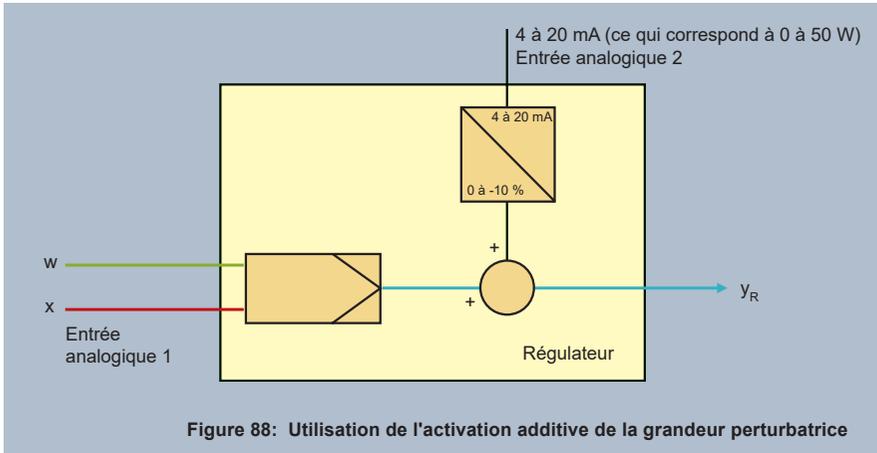
Exemple d'activation additive de la grandeur perturbatrice :



Dans un incubateur (figure 87) se trouvent des capteurs très sensibles. Un régulateur est utilisé pour réguler de manière très précise la température. Lorsqu'on allume la lumière, il y a un apport de chaleur supplémentaire et la température augmente. Le régulateur réagit à l'écart de réglage avec une réduction du taux de modulation et ramène la valeur réelle sur la consigne. Dès que l'intensité de la lumière change à nouveau, un nouvel écart de réglage apparaît.

L'apport de chaleur par l'éclairage est la grandeur perturbatrice, une mesure de cette grandeur perturbatrice est la puissance électrique consommée par l'éclairage.

Le signal de mesure de la puissance électrique est appliqué au régulateur, par ex. via la deuxième entrée analogique : il s'agit de l'activation additive de la grandeur perturbatrice. Pour une puissance maximale de 50 W, il faut réduire le taux de modulation de 10 % :



Dans cet exemple (figure 88), la valeur réelle est appliquée au régulateur via l'entrée analogique 1. Le signal de puissance est utilisé pour l'activation additive de la grandeur perturbatrice, via l'entrée analogique 2 ; 4 à 20 mA correspondent à la plage de 0 à 50 W.

Avec la mise à l'échelle, 4 à 20 mA (0 à 50 W) correspond à la plage de 0 à -10 % ; si la puissance est de 50 W par exemple, le taux de modulation du régulateur diminue de 10 %.

Lorsque l'intensité de la lumière augmente, l'augmentation de la valeur réelle est contrecarrée. L'activation additive de la grandeur perturbatrice apporte un taux de modulation supplémentaire en fonction de la grandeur perturbatrice.

6.5.2 Activation multiplicative de la grandeur perturbatrice

L'activation multiplicative de la grandeur perturbatrice modifie le taux de modulation du régulateur proportionnellement à la grandeur perturbatrice.

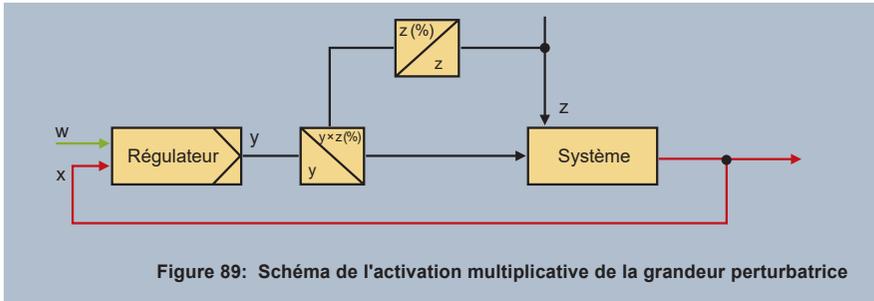


Figure 89: Schéma de l'activation multiplicative de la grandeur perturbatrice

Un pourcentage $[z (\%)]$ est établi à partir de la grandeur perturbatrice (z), voir figure 89. Le taux de modulation du régulateur est multiplié par ce pourcentage.

Cette procédure est utilisée lorsque, dans un process, il faut modifier le taux de modulation proportionnellement à la grandeur perturbatrice.

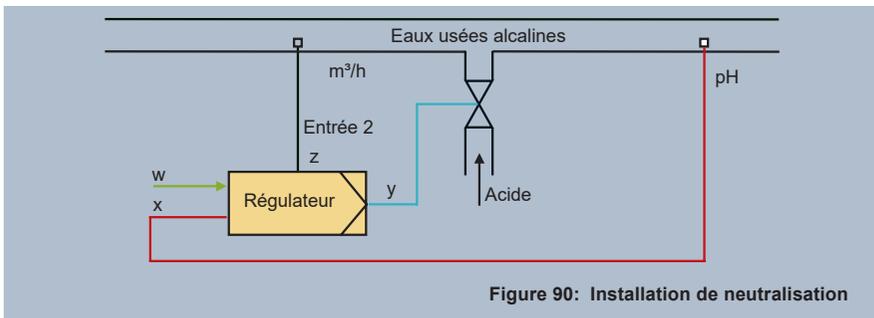


Figure 90: Installation de neutralisation

Prenons comme exemple une installation de neutralisation (figure 90) dans laquelle on ajoute de l'acide aux eaux usées alcalines pour les neutraliser. Le but est d'atteindre la consigne de pH 7 pour les eaux usées.

La grandeur perturbatrice est le débit ; si le débit est doublé, la quantité d'acide nécessaire est doublée. Le débit est pris en compte sur l'entrée 2 sous forme d'un facteur de multiplication. Le débit se présente sous la forme d'un signal de 4 à 20 mA, ce qui correspond à un débit de 0 à "débit maximal". La mise à l'échelle du signal en courant sur l'entrée 2 permet par ex. d'établir une valeur entre 0 et 100 % pour un signal de 4 à 20 mA. Le taux de modulation déterminé par le régulateur est multiplié par la grandeur perturbatrice en %. Par exemple, si le débit double, le taux de modulation du régulateur est également doublé avant d'être délivré. Le verrouillage de la grandeur perturbatrice supprime les écarts de réglage dynamiques après une variation du débit.

Le système asservi présente un gain faible lorsque le débit est élevé – la modification du dosage de l'acide n'a que peu d'influence sur le pH.

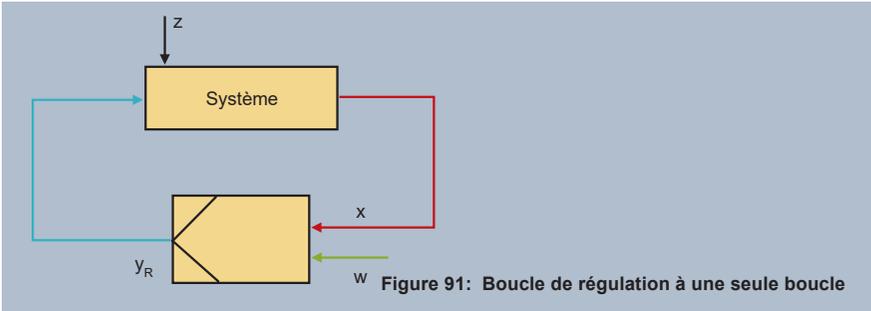
En revanche, le gain est plus élevé lorsque le débit est faible – la modification du dosage de l'acide a une plus grande influence sur le pH.

Sans verrouillage de la grandeur perturbatrice, il est donc tout à fait possible que l'installation présente un bon comportement de régulation pour un débit élevé, mais qu'elle ait tendance à osciller pour un débit faible à cause du gain élevé.

Grâce au verrouillage de la grandeur perturbatrice, le gain du régulateur est réduit lorsque le débit est faible et la grandeur réglée a tendance à rester plutôt stable, même dans cette plage. C'est un effet secondaire positif.

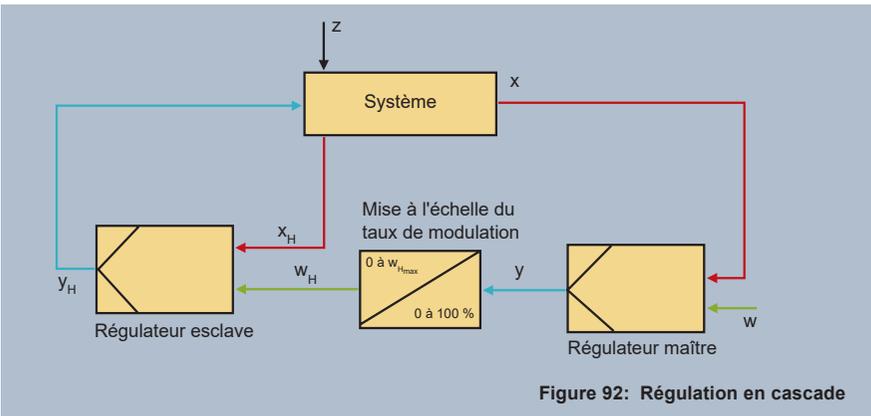
6.6 Régulation en cascade

Les boucles de régulation présentées dans cet ouvrage étaient jusqu'à présent à une seule boucle :



La consigne est donnée au régulateur et il mesure la valeur réelle. Le taux de modulation du régulateur est calculé à l'aide des paramètres de régulation disponibles et l'actionneur est directement commandé avec ce taux.

Dans le cas de la **régulation en cascade**, au moins deux boucles de régulation sont imbriquées ou mises en cascade (figure 92). Grâce à cette structure, le système asservi est divisé en deux parties au moins. La consigne de l'installation est définie sur ce qu'on appelle le régulateur maître, qui de son côté régule la valeur réelle en fonction de cette valeur :

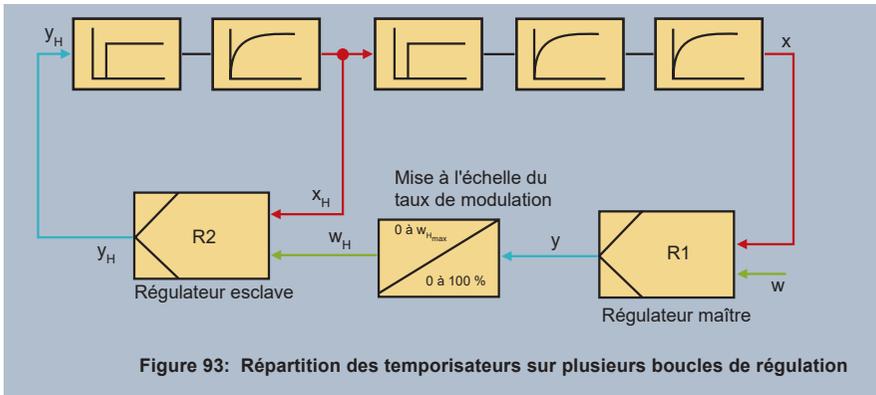


Le régulateur esclave régule sur une valeur réelle auxiliaire proportionnellement au taux de modulation du régulateur maître. La mise à l'échelle du taux de modulation détermine la valeur réelle auxiliaire pour un taux de modulation de 0% ou 100% du régulateur maître. Généralement la structure peut être introduite lorsque, dans un système asservi, une valeur réelle auxiliaire (x_H) est techniquement mesurable et qu'il faut la réguler proportionnellement au taux de modulation du régulateur.

6.6.1 Raisons d'introduire la régulation en cascade

Les raisons d'introduire la régulation en cascade sont diverses et sont illustrées par des exemples dans ce chapitre.

Répartition des temporisateurs sur plusieurs boucles de régulation



Grâce à la répartition des temporisateurs, le temps de retard total ne défile plus jusqu'à ce que le régulateur puisse réagir à une perturbation sur l'entrée du système. Après modification de la grandeur perturbatrice dans la boucle de régulation intérieure, le régulateur esclave réagit dès que le temps de retard de ce sous-système de régulation est écoulé. Les perturbations sont compensées plus rapidement.

Chaque rapport T_g/T_u des deux sous-systèmes est supérieur à celui du système asservi total. Les sous-systèmes et donc tout le process également sont mieux maîtrisables grâce à la structure en cascade. La qualité de la régulation est plus élevée et certaines boucles de régulation ne sont maîtrisables qu'avec l'introduction de la régulation en cascade.

Limitier la puissance dans le système asservi ou la valeur réelle auxiliaire

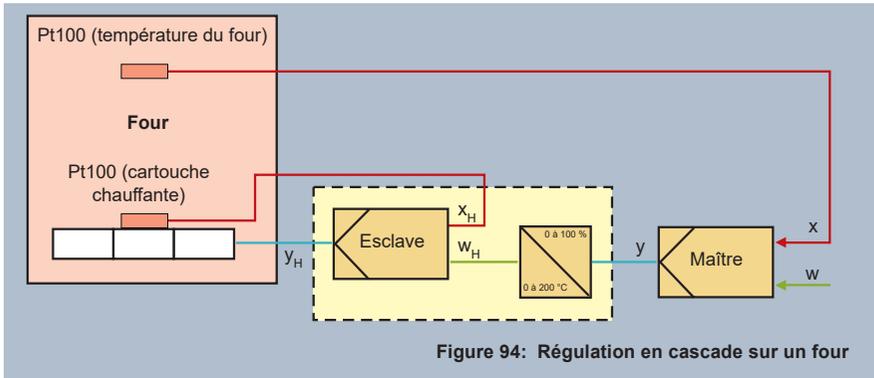


Figure 94: Régulation en cascade sur un four

Dans cet exemple (figure 94), la température de la cartouche chauffante est limitée à 200 °C. La consigne et la valeur réelle pour le four sont disponibles sur le régulateur maître. Le régulateur maître détermine un taux de modulation compris entre 0 et 100 %. Grâce à la mise à l'échelle du taux de modulation, il y a une conversion vers la plage de 0 à 200 °C. Le régulateur esclave régule la température de la cartouche chauffante sur la plage de 0 à 200 °C, proportionnellement au taux de modulation compris entre 0 et 100 %.

Compenser les grandeurs perturbatrices

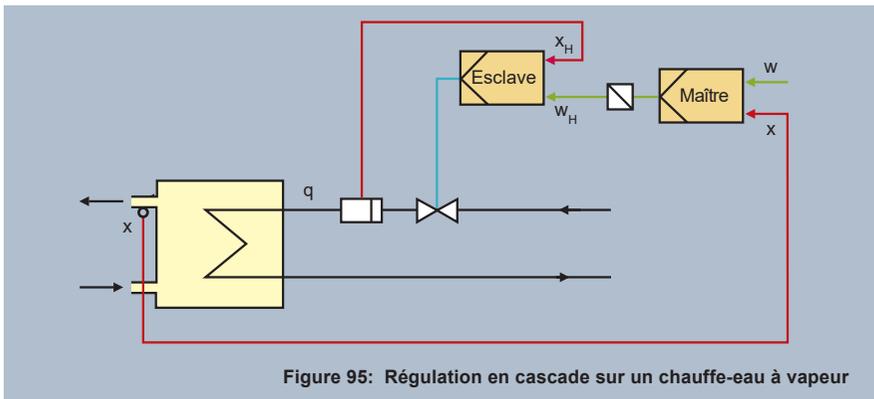


Figure 95: Régulation en cascade sur un chauffe-eau à vapeur

Dans un chauffe-eau (figure 95), la température d'un liquide est amenée à une température de départ prédéfinie (w), à l'aide de vapeur. Le régulateur maître se charge de la régulation de la température. Le régulateur esclave régule le débit de vapeur pour le chauffe-eau, proportionnellement au taux de modulation du régulateur maître. La mise à l'échelle du taux de modulation établit la relation entre le "taux de modulation du régulateur maître" et le "débit de vapeur". Lorsque la pression de la vapeur varie dans l'alimentation, le régulateur esclave continue de maintenir constant le débit de la vapeur. La variation de la grandeur perturbatrice "pression de la vapeur" n'a ainsi aucune influence sur la température de départ du liquide.

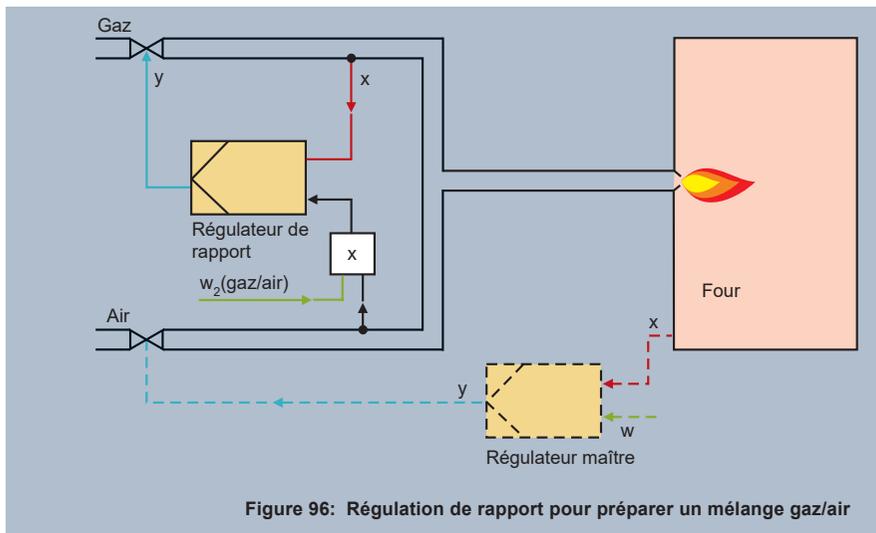
6.6.2 Structures de régulation et optimisation des régulateurs maître et esclave

Si on active la composante I sur les régulateurs maître et esclave, la totalité du système tend à osciller. C'est pour cette raison qu'on utilise une structure PID pour le régulateur maître et une structure PD pour le régulateur esclave. Pour le régulateur esclave, il faut toujours régler un écart de réglage, le régulateur maître s'occupe de la régulation de la valeur réelle.

L'optimisation de la totalité du système est effectuée de l'intérieur vers l'extérieur : le régulateur maître est commuté sur le mode manuel et un taux de modulation typique est défini. Grâce à la mise à l'échelle du taux de modulation, on obtient sur le régulateur esclave une consigne typique et pour le régulateur esclave on peut effectuer une auto-optimisation. Après l'optimisation du régulateur esclave sur une structure PD, il faut remettre le régulateur maître en mode automatique et l'optimiser.

6.7 Régulation de rapport

Les régulateurs de rapport sont utilisés pour commander des brûleurs (régulation du rapport de mélange gaz/air) dans les analyses physico-chimiques (mélange de partenaires de réaction) et dans le génie chimique (fabrication de mélanges).



Dans cet exemple, l'écoulement d'air est mesuré et multiplié par un facteur. Le résultat est la quantité de gaz nécessaire, elle représente la consigne pour le régulateur de rapport. De son côté, le régulateur de rapport règle la quantité de gaz nécessaire pour respecter la consigne. Ce système intérieur incarne la régulation de rapport.

Le régulateur maître de son côté règle la température du four. Il commande le flux d'air ; grâce à la régulation de rapport, le volume de gaz est réglé sur le rapport défini.

La totalité du système représenté est optimisé de l'intérieur vers l'extérieur. Le régulateur maître est commuté sur le mode manuel et le régulateur de rapport est optimisé. Ensuite il faut remettre le régulateur maître en mode automatique et l'optimiser.

7 Fonction de régulation et autres fonctions des régulateurs JUMO

Les régulateurs JUMO peuvent non seulement réguler mais également assumer une multitude de fonctions supplémentaires et offrir ainsi de nombreux avantages à leurs utilisateurs. Ce chapitre donne un aperçu de la fonction de régulation et décrit certaines possibilités.

7.1 Configuration de la fonction de régulation

Les appareils de régulation proposent différents menus de configuration dans leur programme de configuration et, par défaut, sur leur face avant. Il est possible de configurer la fonction de régulation via les menus "Entrées analogiques", "Régulateur" et "Sorties".

Dans le menu "Entrées analogiques", l'entrée est adaptée au capteur utilisé (sonde à résistance, thermocouple, signal 4 à 20 mA etc.).

Dans le menu de configuration "Régulateur", on règle le type de régulateur (régulateur à 2 plages, régulateur à sortie continue etc.) ainsi que le sens d'action (figure 98). Dans le sous-menu "Entrées de régulation" du même menu, on définit la source de la valeur réelle (figure 97) :

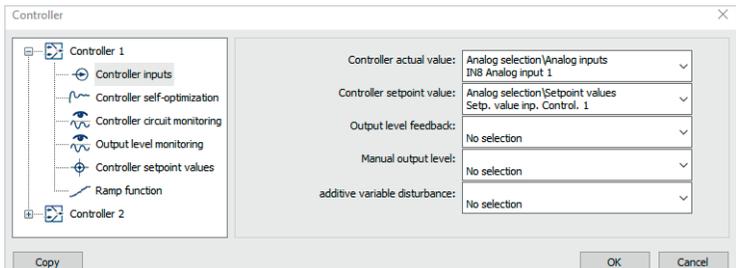


Figure 97: Sources pour la valeur réelle du régulateur et la consigne externe

En règle générale, la consigne est définie sur la face avant de l'appareil ou via une interface. Une autre solution est de définir la consigne à l'aide d'un signal analogique (par ex. entrée analogique 2) (figure 97).

Dans le programme de configuration, sous "Sorties", la première sortie et le cas échéant la deuxième sortie sont chacune affectées à une sortie analogique ou binaire.

Dans le menu de configuration "Régulateur", on peut procéder à d'autres réglages :

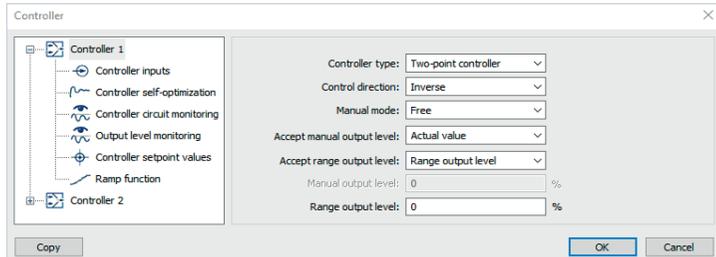


Figure 98: Réglages dans le menu de configuration "Régulateur"

Le réglage "Mode manuel – libre" permet d'activer le mode manuel.

Au moment de la commutation en mode manuel, le régulateur prend le taux de modulation du mode automatique avec le réglage "Y pour manuel = valeur actuelle".

De manière générale, le paramètre "Y pour manuel" permet également de définir un taux de modulation quelconque que le régulateur doit adopter lors de la commutation en mode manuel.

Avec le réglage "Mode manuel = bloqué", on ne peut pas activer le mode manuel.

Le réglage dans "Y si défaut" définit un taux de modulation pour le cas où le signal de la valeur réelle ne serait pas valable (rupture du câble de sonde à résistance, signal < 4 mA si réglage 4 à 20 mA).

7.2 Fonction Rampe

Les régulateurs JUMO travaillent avec leur réglage par défaut en régulateur à valeur fixe. Ils régulent en fonction de la consigne jusqu'à ce qu'elle soit modifiée par l'utilisateur. La modification de la consigne a lieu sous forme d'un échelon. Toutefois certains process ont besoin d'une augmentation de la consigne sous forme d'une rampe. Dans les régulateurs JUMO, il est possible d'activer la fonction de rampe et de définir une pente. Après une redéfinition de la consigne (figure 99), la consigne actuelle varie alors avec la pente définie jusqu'à la consigne saisie.

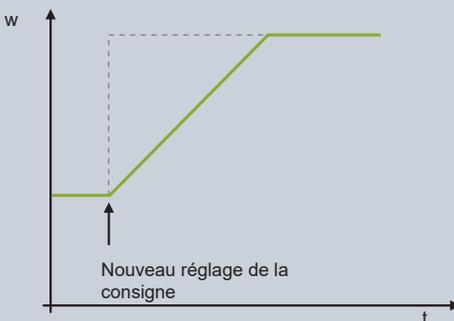
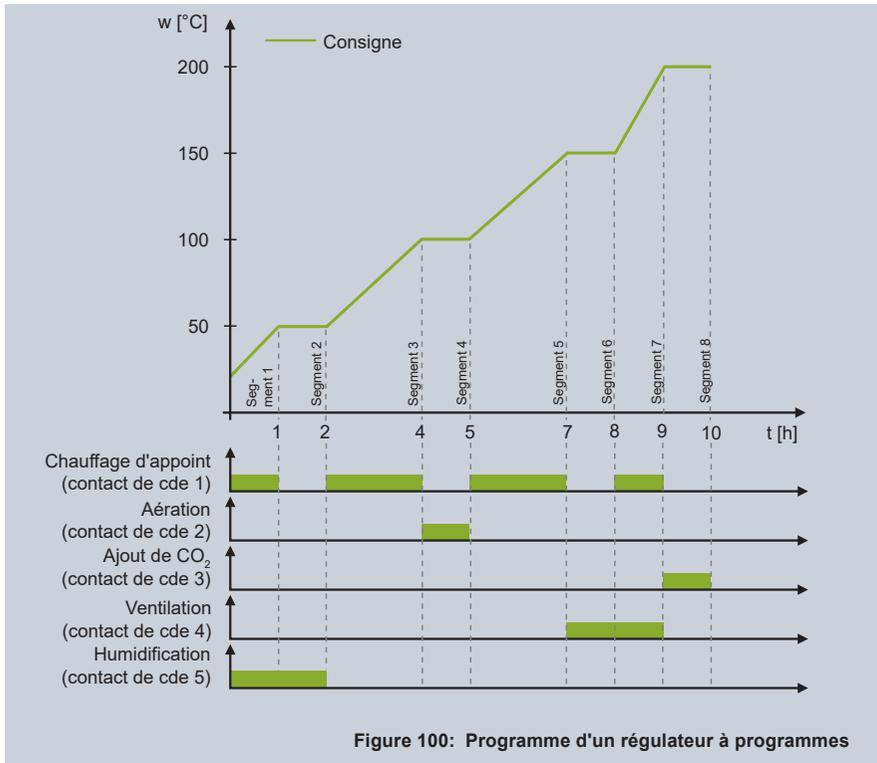


Figure 99: Définition de la consigne sous forme d'une rampe

7.3 Fonction Programmeur

Les programmeurs permettent de prédéfinir des profils de consigne. Ces profils sont appliqués au régulateur qui, de son côté, régule la valeur réelle en fonction de la consigne actuellement valable. Le programmeur et le régulateur forment ce que l'on appelle un régulateur à programmes.

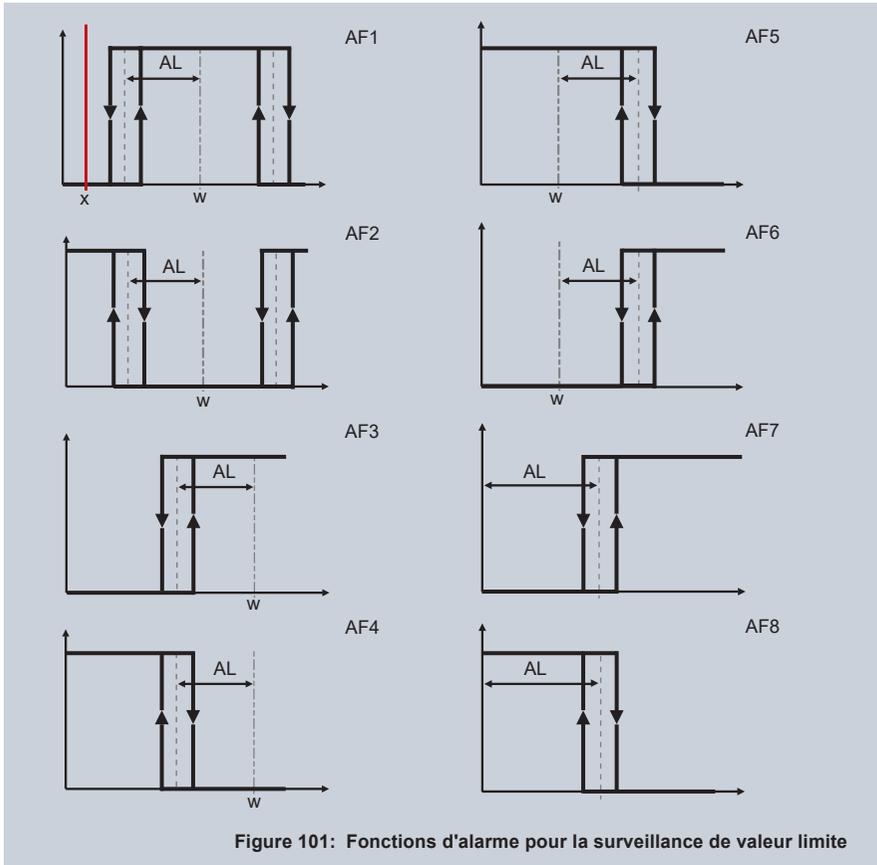
Un profil est défini segment par segment. Dans cet exemple, les segments 1 et 2 durent chacun une heure. Le segment 1 commence à 25 °C, le segment 2 à 50 °C (figure 100).



Dans de nombreux cas, différents contacts sont commandés dans les segments, par ex. pour le chauffage d'appoint ou la ventilation. La définition se fait par ce que l'on appelle des contacts de commande. Ils sont affectés à du matériel (généralement des relais). Les états des contacts de commande constituent, avec le profil de consigne, un programme. Pour un four à recuire, on définit différents programmes par exemple. Après garnissage du four, le programme correspondant est sélectionné et démarré.

7.4 Surveillance de la valeur limite

Cette fonction permet de comparer deux grandeurs de process et de surveiller une grandeur en fonction d'une valeur limite.



Dans les régulateurs JUMO, on peut utiliser plusieurs surveillances de la valeur limite. Pour une surveillance de valeur limite, il est possible de sélectionner l'une des 8 fonctions d'alarme. Il existe quatre fonctions d'alarme générales différentes (AF1, AF3, AF5, AF7), complétées par la fonction inverse de chacune d'elles (AF2, AF4, AF6, AF8).

Les fonctions d'alarme 1 à 6 surveillent chacune 2 grandeurs l'une par rapport à l'autre. Les deux variables sont la consigne (w) et la valeur réelle (x) de la surveillance de valeur limite. Les sources des deux signaux peuvent être choisies librement (par ex. la consigne et la valeur réelle du régulateur ou l'entrée analogique 1 et l'entrée analogique 2).

Par exemple, la fonction d'alarme 1 (AF1) définit une fenêtre autour de la consigne de la surveillance de valeur limite (w). La fenêtre est définie par la valeur limite (AL) et l'hystérésis. La consigne (w) contrôle la position de la fenêtre. La valeur réelle pour la surveillance de valeur limite se trouve sur le même diagramme et parcourt l'axe X. Si la valeur réelle entre dans la fenêtre autour de la consigne, la sortie de la surveillance de valeur limite est activée.

Par exemple, pour une surveillance de l'écart de réglage (détecter si < 10), il faut effectuer les réglages suivants :

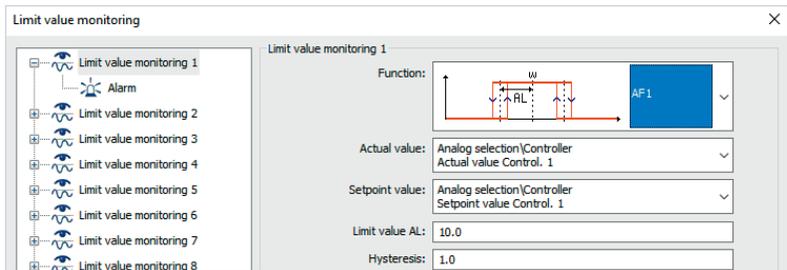


Figure 102: Réglages pour surveiller si écart de réglage < 10 (programme de configuration)

Dans le cas le plus simple, le résultat de la surveillance de valeur limite est délivré via une sortie binaire.

AF2 à AF8 remplissent les fonctions de base suivantes :

AF2 est la fonction inverse d'AF1 (figure 101).

AF3 propose la demi-fenêtre d'AF1 – si la valeur réelle croissante s'approche de la consigne, la surveillance de valeur limite commute. Lorsque la valeur réelle augmente, la fonction reste active.

AF4 est la fonction inverse d'AF3.

AF5 propose la demi-fenêtre droite d'AF1 – si la valeur réelle est supérieure à la consigne d'au moins la valeur AL, la surveillance de valeur limite commute. Si la valeur réelle est inférieure, la fonction est activée.

AF6 est la fonction inverse d'AF5.

AF7 propose la surveillance de la valeur réelle en fonction de la valeur maximale AL.

AF8 est la fonction inverse d'AF7.

7.5 Fonctions binaires

Dans les régulateurs JUMO, il y a nombre de signaux binaires, comme l'état des entrées binaires et le résultat de la surveillance de valeur limite. Le changement d'état de ces différents signaux permet d'activer des fonctions. Le masque de configuration par exemple permet de mettre en œuvre des fonctions pour l'entrée binaire 1 :

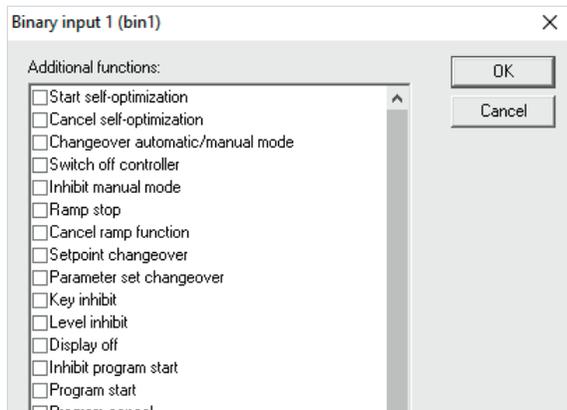


Figure 103: Fonctions binaires pour l'entrée binaire 1 (programme de configuration)

Le choix **Démarrer auto-optimisation** (déclenchement par front) permet dans cet exemple de démarrer l'auto-optimisation via l'entrée binaire 1. **Arrêter auto-optimisation** (déclenchement par front) permet d'y mettre fin prématurément.

Généralement le régulateur se trouve en mode automatique et régule en fonction de la consigne réglée. La fonction **Commutation mode automatique/manuel** permet de commuter en mode manuel lorsqu'un signal binaire est actif. On peut définir un taux de modulation pour le mode manuel, ce taux sera appliqué directement après la commutation.

La fonction **Eteindre régulateur** permet de désactiver le signal de sortie du régulateur lorsqu'un signal binaire est actif.

La fonction **Verrouillage mode manuel** empêche de basculer en mode manuel.

Lorsque la fonction Rampe est active, si la consigne définie n'a pas encore été atteinte, il est possible d'**arrêter** la consigne de **rampe**. La fonction **Annuler rampe** permet également d'appliquer une consigne sous forme d'un échelon si la fonction Rampe est activée.

Les régulateurs JUMO travaillent avec leur réglage par défaut en régulateur à valeur fixe. Les régulateurs régulent en fonction de la consigne numérotée 1. Si nécessaire, il est possible de définir la consigne 2 et de commuter entre la consigne 1 et la consigne 2 à l'aide de la fonction **Commutation de consigne**. La plupart des régulateurs JUMO disposent en outre des consignes 3 et 4. Pour commuter entre les quatre consignes définies, il faut sélectionner la fonction **Commutation de consigne** pour deux entrées binaires (B1 et B2) par exemple. La commutation repose sur un codage en binaire.

Les paramètres de régulation adaptés au process (XP, Tn, Tv etc.) sont stockés dans un jeu de paramètres de régulation. Les régulateurs JUMO disposent de plusieurs jeux de paramètres, mais seul le premier est utilisé avec le réglage d'usine. Les conditions dans le process peuvent varier si fortement que l'on ne peut plus obtenir de résultat de régulation satisfaisant avec les paramètres du jeu 1. Cet état de fonctionnement nécessite donc un autre dimensionnement des paramètres de régulation. Le jeu de paramètres 2 contient la même sélection de paramètres que le jeu de paramètres 1, il est possible d'y régler les paramètres nécessaires pour un autre point de fonctionnement. La fonction **Commutation du jeu de paramètres** permet de commuter entre le jeu de paramètres 1 et le jeu de paramètres 2.

La fonction **Verrouillage du clavier** bloque le clavier quand un signal binaire est activé.

La fonction **Verrouillage des niveaux** permet de verrouiller les niveaux Configuration et Paramétrage.

La fonction **Ecran OFF** éteint l'écran alors que le régulateur continue de fonctionner.

La fonction **Verrouillage du démarrage du programme** empêche le démarrage du programme si la fonction Programmeur est configurée.

Les fonctions **Démarrer programme** et **Annuler programme** (toutes deux déclenchées par front) permettent de démarrer et de stopper un programme.

La fonction **Arrêter programme** arrête le programme quand le signal correspondant est actif.

7.6 Startup et fonction de diagnostic

L'optimisation du régulateur nécessite dans de nombreux cas l'enregistrement des grandeurs de process les plus importantes comme la valeur réelle, la consigne et le taux de modulation.

Le programme de configuration des régulateurs JUMO offre pour cette utilisation le composant logiciel Startup. Il peut enregistrer des signaux analogiques et binaires librement choisis. Pour la période d'enregistrement, il faut établir une liaison avec le régulateur JUMO.



Figure 104: Données d'un régulateur JUMO enregistrées en ligne, avec JUMO Startup

Le résultat de l'enregistrement peut être imprimé ou sauvegardé (même sous forme de tableau).

La **Fonction diagnostic** montre l'état des entrées et sorties, donne des informations importantes sur l'état du régulateur. Cette fonction aide à rechercher des défauts et à effectuer des travaux de maintenance.

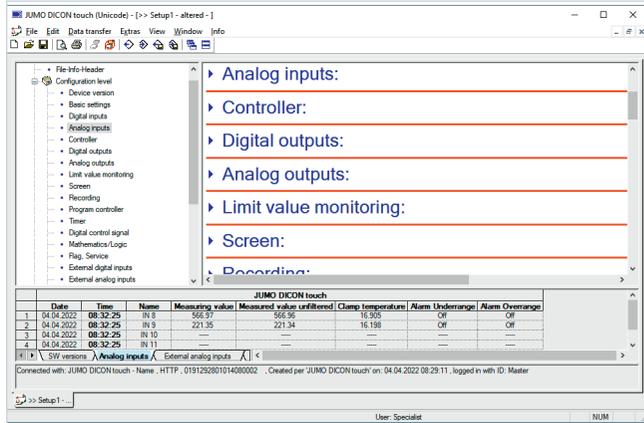


Figure 105: Diagnostic avec un JUMO DICON touch

7.7 Enregistrement

Les régulateurs JUMO permettent d'enregistrer des grandeurs du process dans l'appareil. L'enregistrement est effectué dans les canaux analogiques et binaires, il est possible d'y définir librement les signaux à enregistrer.

Les données sont stockées dans une mémoire circulaire, selon un cycle de mémorisation réglable, et peuvent être consultées sur l'appareil dans la fonction appelée Historique.

Les données peuvent être transférées, conformément à un programme horaire, dans un fichier d'archivage par le logiciel de communication pour PC de JUMO (PCC). Grâce à cette procédure, il est possible d'enregistrer en continu les données. L'analyse des données est effectuée à l'aide du logiciel d'analyse pour PC de JUMO (PCA3000).

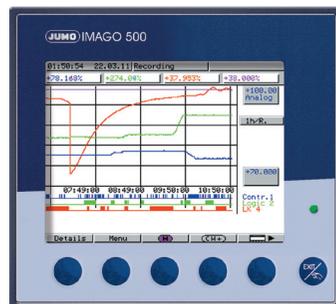


Figure 106: Enregistrement dans un JUMO IMAGO 500

7.8 Fonction mathématique et logique

La fonction mathématique et logique permet d'effectuer des calculs mathématiques et d'utiliser des opérateurs booléens. Les formules sont saisies dans un éditeur de formule.

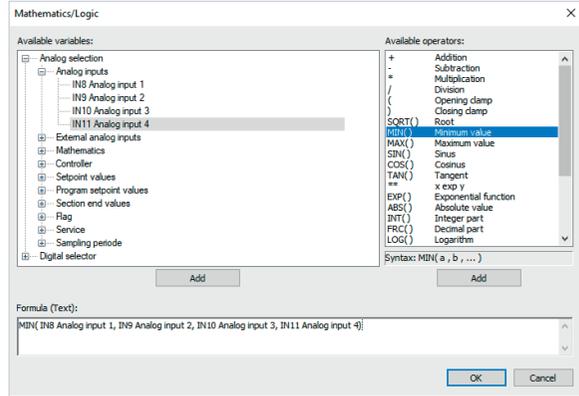


Figure 107: Editeur de formule dans JUMO DICON touch

Dans l'éditeur, les variables utilisables se trouvent sur le côté gauche, les opérateurs autorisés sur le côté droit, avec des conseils sur la syntaxe à utiliser.

A l'aide des deux fenêtres, une formule a été définie pour déterminer la valeur minimale des entrées analogiques 1 à 4. Pour ce qui est des 4 grandeurs de process, il pourrait s'agir de 4 températures d'un four et la fonction mathématique donne la plus petite des 4 valeurs. Dans le four, il faut s'assurer que la température correspond au moins à la consigne à tous les points de mesure. Dans une étape suivante, le résultat de la fonction mathématique est défini dans le régulateur comme source de valeur réelle.

8 Abréviations utilisées

Paramètres du régulateur

Comportement PID

X_{P1}	Bande proportionnelle de la composante P ; en anglais : Pb
T_{n1}	Temps d'intégrale de la composante I ; en anglais : rt
T_{v1}	Temps de dérivée de la composante D ; en anglais : dt
X_{P2}	Bande proportionnelle pour structure de régulation 2 (régulateur à 3 plages)
T_{n2}	Temps d'intégrale pour structure de régulation 2 (régulateur à 3 plages)
T_{v2}	Temps de dérivée pour structure de régulation 2 (régulateur à 3 plages)

Paramètres généraux

Y1	Limite supérieure du taux de modulation du signal de sortie du régulateur (ne pas utiliser sur le régulateur à 3 plages pas à pas)
Y2	Limite inférieure du taux de modulation du signal de sortie du régulateur (ne pas utiliser sur le régulateur à 3 plages pas à pas)
Y0	Correction du point de fonctionnement de la composante P

Paramètres pour régulateurs à deux plages, à trois plages, à trois plages pas à pas et positionneurs

C_{y1}	Durée du cycle de commutation (actif pour régulateurs à 2 plages et à 3 plages, $XP1 > 0$)
C_{y2}	Durée du cycle de commutation pour structure de régulation 2 (actif pour régulateur à 3 plages, $XP2 > 0$)
T_{k1}	Durée d'activation minimale (actif pour régulateurs à 2 plages et à 3 plages, $XP1 > 0$)
T_{k2}	Durée d'activation minimale pour structure de régulation 2 (actif pour régulateur à 3 plages, $XP2 > 0$)
X_{Sd1}	Différentiel de coupure (actif pour régulateurs à 2 plages et à 3 plages, $XP1 = 0$)
X_{Sd2}	Différentiel de coupure pour structure de régulation 2 (actif pour régulateur à 3 plages, $XP2 = 0$)

X_{Sh}	Ecart entre les contacts ; en anglais : db L'écart entre les contacts est symétrique autour de la consigne. Pour les régulateurs à trois plages, les deux bandes proportionnelles sont séparées l'une de l'autre ; pour les régulateurs à trois plages pas à pas et les positionneurs, il n'y a pas de commande de l'actionneur à moteur dans la zone de l'écart entre les contacts.
TT	Temps de fonctionnement de l'actionneur à moteur, réglage pour régulateurs à trois plages pas à pas et positionneurs

Autres abréviations

e	Ecart de réglage (consigne - valeur réelle)
K_{IS}	Gain d'un système asservi sans compensation
K_P	Facteur de proportionnalité du régulateur
K_S	Gain ou amplification du système asservi avec compensation
T_1, T_2	1ère et 2e constantes de temps d'un système du 2e ordre
T_a	Temps d'établissement : il s'agit du temps au bout duquel, dans une boucle de régulation, la valeur réelle parvient (et reste) dans une bande définie autour de la consigne
T_{an}	Temps de montée : il s'agit du temps au bout duquel, dans une boucle de régulation, la valeur réelle atteint pour la première fois la consigne
T_g	Temps de compensation d'un système asservi
T_I	Temps d'intégration d'un régulateur I
T_K	Durée des oscillations de la valeur réelle à X_{Pk} (procédure d'optimisation suivant Ziegler/Nichols)
T_S	Constante de temps d'un système du 1er ordre
T_t	Temps mort d'un système asservi
T_u	Temps de retard d'un système asservi
V_{max}	Vitesse de montée maximale (procédure d'optimisation suivant la vitesse de montée)
w	Consigne, grandeur pilote
x	Valeur réelle, grandeur réglée
X_{max}	Dépassement

Littérature professionnelle de JUMO – Instructif pour débutants et pratiquants

Le savoir-faire est requis non seulement dans la fabrication des produits JUMO, mais aussi dans leur utilisation ultérieure. C'est pourquoi nous proposons à nos utilisateurs nos propres publications sur les thèmes de la mesure et de la régulation.

Ces publications sont destinées à initier les débutants et les pratiquants à une grande variété de domaines d'application. Il s'agit principalement de sujets généraux, mais certaines applications spécifiques à JUMO sont également expliquées.

En plus de la littérature spécialisée, nous vous offrons la possibilité de commander directement en ligne des brochures en plus de nos téléchargements de logiciels.



Techniques de mesure électroniques de la pression
Connaissances techniques pour l'utilisateur
Marcell Bräutigam

FAS 606
Numéro d'article : 00735061
gratuit



Etude des erreurs d'une chaîne de mesure de température avec exemples de calcul
Gerd Scheller
Stefan Krummeck

FAS 625
Numéro d'article : 00429854
gratuit



Mesure électrique de la température avec des thermocouples et des sondes à résistance
Manfred Schleicher

Numéro d'article : FAS 146
gratuit



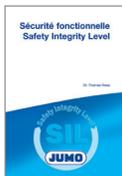
Sectionneur de puissance électronique
Manfred Schleicher,
Winfried Schneider

FAS 620
Référence article : 00413089
gratuit



Régulation
Initiation à la régulation par une approche pratique
Manfred Schleicher

FAS 525
gratuit



Sécurité fonctionnelle
Safety Integrity Level
Dr. Thomas Reus

FAS 630
Numéro d'article : 00467800
gratuit



Protection contre l'explosion en Europe
Matériel électrique Notions fondamentales, directives, normes
Dieter Herrmann

FAS 547
Référence article : 00414315
gratuit



Guide de la mesure ampérométrique du chlore libre, du dioxyde de chlore et de l'ozone dans l'eau
Dr. Jürgen Schleicher

FAS 619
Référence article : 00398145
gratuit



**Guide de la mesure
dans l'eau ultra-pure**
*Reinhard Manns,
Dr. Jürgen Schleicher*

FAS 614
Référence article : 00375624
gratuit



Guide de la mesure du pH
Dr. Jürgen Schleicher

FAS 622
Référence article : 00418858
gratuit



**Guide de la mesure
de la conductivité**
*Reinhard Manns,
Dr. Jürgen Schleicher*

FAS 624
Numéro d'article : 00411340
gratuit



**Guide de la mesure
du potentiel redox**
*Matthias Kremer
Ulrich Braun,
Dr. Jürgen Schleicher*

FAS 615
Référence article : 00398258
gratuit



**Guide de la mesure de l'eau
oxygénée/de l'acide peracétique**
Dr. Jürgen Schleicher

FAS 628
Numéro d'article : 00420699
gratuit



**Guide de la mesure de l'ammoniac
dans l'eau**
Dr. Jürgen Schleicher

FAS 631
Numéro d'article : 00484979
gratuit

Visitez notre site Internet sur www.jumo.fr et laissez-vous convaincre par la vaste gamme de produits pour une grande variété d'applications. Vous y trouverez de plus amples informations et la personne à contacter pour vos souhaits, questions, suggestions et commandes.



MORE THAN SENSORS
AND AUTOMATION



www.jumo.net