

## 1. Introduction :

Un **régulateur** est l'appareil dont la fonction est d'assurer une régulation. Par exemple : les régulateurs de tension dans les circuits électroniques ou les régulateurs de pression appelés aussi détendeurs. Ces régulateurs sont des composants destinés à des applications spécifiques et leurs fonctions de régulation sont définies par des relations entre l'entrée et la sortie dont les coefficients sont fixés définitivement par fabrication.

Par contre, un **régulateur Industriel** est un appareil dont leurs paramètres sont réglables et adaptables au système à contrôler.

Généralement, les systèmes de régulation peuvent présenter des insuffisances, tels que : une **précision** insuffisante, une mauvaise **stabilité**, un temps de **réponse** trop lent, un **dépassement** trop important. Il est donc souvent nécessaire d'intégrer dans le système à régler des régulateurs, dont l'objectif est **d'améliorer** un ou plusieurs de ces différentes **performances**.

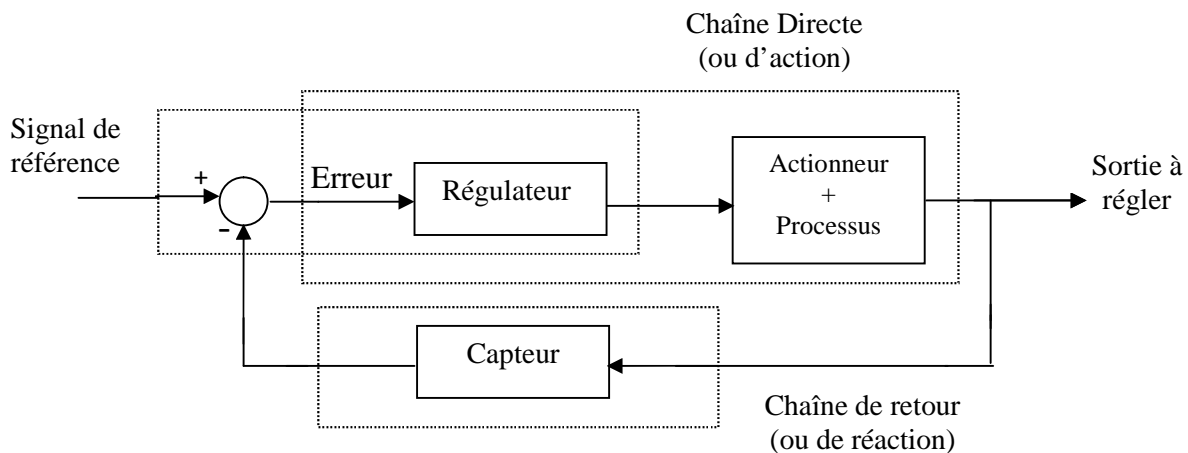
Le régulateur (correcteur) permet alors **d'améliorer** les caractéristiques de précision, de stabilité et de rapidité du système et il est nécessaire de l'introduire dans la boucle de commande.

### 1.1. Système en boucle ouverte (open loop system) :

C'est un système de commande où le signal d'entrée est indépendant du signal de sortie. La grandeur d'entrée contrôle directement la grandeur de sortie. Ce système a l'avantage d'être simple, il est très stable. En revanche, ses performances sont médiocres, car il n'existe pas de circuit de retour permettant de comparer la grandeur de sortie à la grandeur de référence.

### 1.2. Système en boucle fermée (closed loop system) :

Une correction continue est déterminée par une mesure continue ; ceci est le résultat d'une structure en boucle fermée. Par conséquent, la grandeur de sortie est comparée à chaque instant à la grandeur d'entrée la différence joue le rôle d'un signal de correction ces systèmes possèdent l'avantage d'être plus précis et limitent l'influence des perturbations. En général, on considère qu'un système de commande en boucle fermée est un système où le signal de commande dépend d'une façon ou d'une autre du signal de sortie.



**Figure 2.1:** Boucle de régulation.

- Dans une **régulation**, on s'attachera à maintenir constante la grandeur réglée d'un système soumis à des perturbations.
- **Asservissement:**

Dans un **asservissement**, la grandeur réglée devra suivre au plus près les variations de la consigne (entrée de référence).

## 2. Eléments d'un régulateur Industriel:

Le régulateur Industriel a pour rôle essentiel de contrôler de système. C'est-à-dire de garantir les comportements dynamiques et statiques du système conformes au cahier des charges défini. Généralement un régulateur a deux aspects:

- sa fonction mathématique.
- leurs fonctions pratiques d'utilisation.

La fonction mathématique est définie par l'algorithme du régulateur. C'est l'aspect fondamental pour un automaticien. L'utilisation pratique d'un tel appareil nécessite des fonctions spécifiques mises au service des techniciens ou des opérateurs.

### 2.1. L'aspect matériel d'un régulateur.

Un régulateur industriel peut être mis dans un appareil individuel, généralement implanté localement sur le système, appelé régulateur local qui contrôle une ou plusieurs boucles de régulation. La fonction de régulation peut être effectuée par un logiciel implanté dans un Automate Programmable Industriel (API) ou dans un Système Numérique de Contrôle Commande (SNCC).

#### 2.1.1. Fonctions de service

Pour contrôler un système, le technicien ou l'opérateur agissent sur le régulateur qui centralise les informations essentielles. C'est pourquoi le régulateur quelle que soit sa technologie, comporte au moins les fonctions suivantes :

- Un signal normalisé en entrée de mesure ( $Y$ ) eu un signal normalisé en sortie de commande ( $U$ ) observables.

- Une consigne ( $W$ ) réglable et observable.
- Un réglage des paramètres de l'algorithme de calcul et du sens d'action.
- Des sélecteurs de commande automatique- manuelle. De consigne interne- externe.
- Des réglages d'alarme basse et d'alarme haute de la mesure ou de l'erreur (écart mesure- consigne).
- Des limiteurs des valeurs ou de vitesses de variation de la consigne et de la commande.

### Exemple :

Les signaux de mesures issus des transmetteurs sont des signaux électriques normalisés comme par exemple un courant variable de 4 à 20 mA ou une tension de 0 à 10 V (ou de 0 à 5v). Ils représentent les pourcentages des variations des grandeurs physiques mesurées. Le réglage de l'échelle de mesure d'un régulateur consiste à définir le minimum et maximum désirés. L'étendue d'échelle de la consigne est identique à celle réglée pour la mesure. Par exemple, un transmetteur de niveau installé sur un réservoir, délivre 4 mA pour un niveau de 1.5 m et 20 mA pour un niveau de 3m. On définit donc pour la mesure du régulateur : 1.5 m pour 0% d'échelle de mesure et 3 m pour 100% d'échelle de mesure. La consigne doit être réglée de 1.5 m à 3 m directement en unité physique. Une consigne de 50% correspondant à 2.25 m.

#### 2.1.2. Limiteur de variation de vitesse de commande

### Exemple :

Afin de commander l'ouverture d'une vanne sans avoir d'un coup de pression dans la tuyauterie. On fixe la valeur maximale de la variation de vitesse de commande, par exemple à 1% par seconde. Ainsi, le régulateur demande une variation brusque de 40 % d'amplitude de commande. Alors l'ouverture sera progressive et dura 40 secondes.

### 2.2. Structure du Régulateur:

Le **régulateur** représenté sur la figure (**Fig 2.2**) est constitué d'un **comparateur** comparant la consigne et la grandeur mesurée, généralement, un régulateur élabore un signal de commande en fonction de l'erreur constatée par le comparateur afin de corriger l'évolution de la grandeur à contrôler du système. La fonction de transfert du régulateur est notée  $K(s)$ .

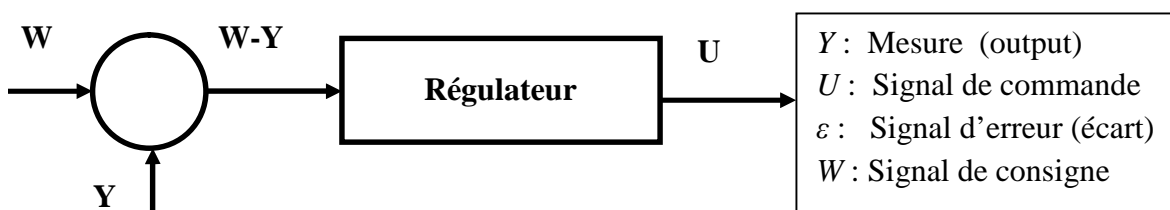


Figure 2.2 : Structure d'un régulateur.

Le régulateur délivre un signal de commande en fonction de l'erreur (mesure - consigne) selon une loi bien déterminée. Cette loi de commande dépend de la structure interne du régulateur. C'est-à-dire de sa fonction de transfert.

### 2.3. Choix du sens d'action du régulateur :

Les régulateur est à action directe si  $U$  augmente lorsque  $\varepsilon$  augmente

Le régulateur est à action inverse si  $U$  augmente lorsque  $\varepsilon$  diminue

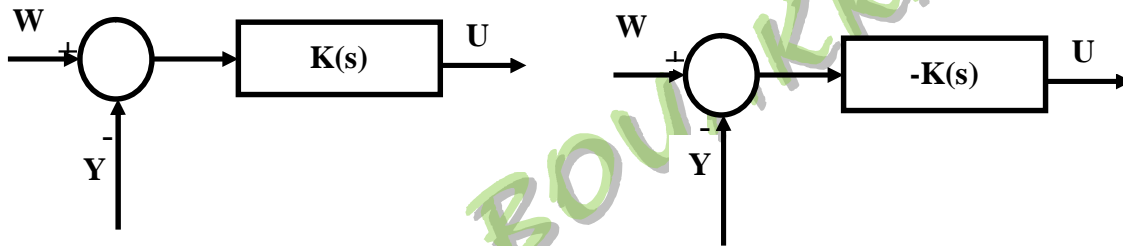


Figure 2.3 : Sens d'action d'un régulateur.

Le choix du sens d'action du régulateur est en fonction du sens d'action de l'ensemble vanne positionneur et du sens de variation de la grandeur réglée par rapport à la grandeur réglante.

Le sens d'action du régulateur doit être opposé au sens d'évolution du système

Pour déterminer le sens d'action du régulateur. Il suffit donc de savoir le sens d'évolution du système, donc on observe l'évolution du système sans régulateur sous l'influence d'une augmentation du signal de commande (grandeur réglante). Si le signal de mesure augmente, alors cela correspond un sens d'évolution direct du système, et si celui-ci diminue alors le système est en sens d'évolution inverse.

En générale, les convertisseurs et les transmetteurs sont en sens direct d'action

#### Exemple :

Dans une régulation de débit dans une conduite, commandé par une vanne automatique électrique (électrovanne) normalement fermée, l'augmentation du signal de commande  $U$  provoque l'augmentation de l'ouverture de la vanne et donc le débit, et comme le débitmètre est en sens direct d'action, il délivre ainsi une augmentation du signal du mesure  $Y$ . Donc le système est en sens d'évolution direct, et le régulateur doit être en sens inverse d'action.

### 3. Régulation Tout Ou Rien (ON-OFF)

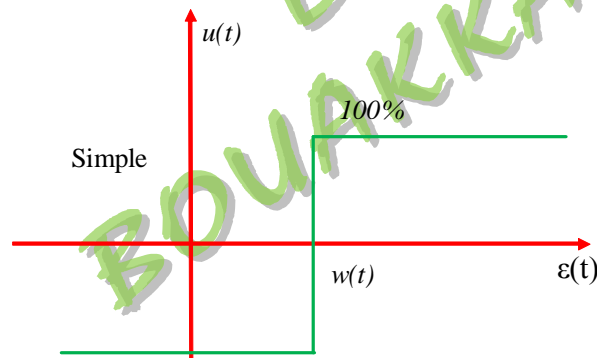
#### 3.1. Action continue - Action discontinue

On sépare le fonctionnement d'un régulateur en deux types d'actions distincts:

➤ Une action continue avec une sortie du régulateur peut prendre toutes les valeurs comprises entre 0 et 100%.

➤ Une action discontinue, dans laquelle la sortie  $Y$  du régulateur ne prend que deux valeurs. On appelle aussi le fonctionnement discontinu fonctionnement **Tout Ou Rien**.

Le fonctionnement **TOR** se caractérise par deux états possibles pour la commande. Celui qui correspond à la commande maximale (100 %) et celui qui correspond à la commande minimale (0 %).



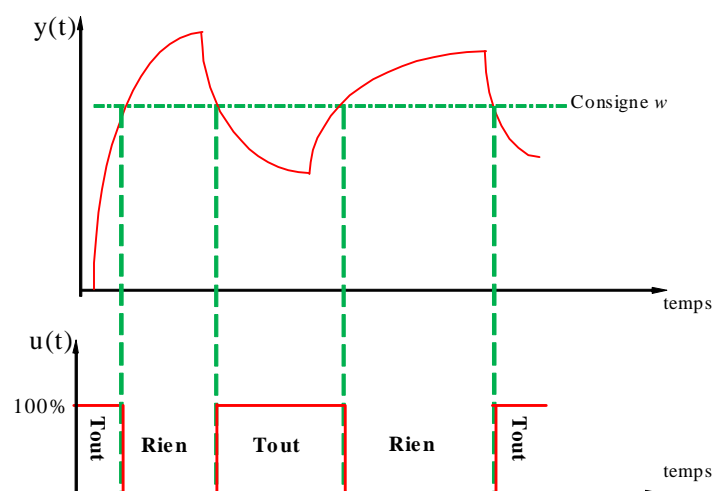
**Figure 2.4 :** sortie d'un régulateur TOR à un seul seuil.

Un seuil limite la fréquence de commutation du système pour éviter une fatigue prématurée des organes de réglages. La Sortie régulation ne prendra aucune valeur intermédiaire.

La réponse du système présentera, autour du point de consigne, des oscillations entretenues dues au temps mort du système (inertie).

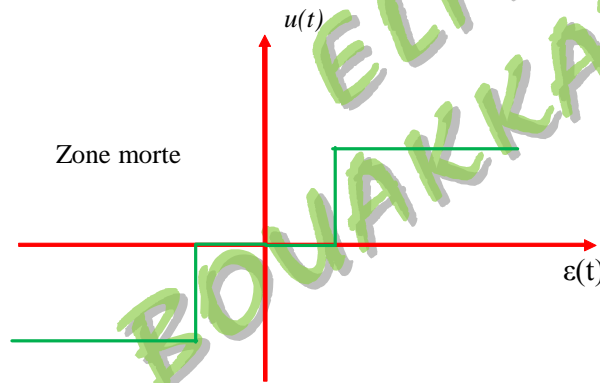
La figure (**Fig 2.5**) représente la sortie d'un régulateur TOR à un seuil, tant que la valeur de la mesure  $Y$  est inférieure à la consigne  $W$ , la commande  $U$  est de 100 % (TOUT).

Dès que la mesure  $Y$  atteint et dépasse la consigne  $W$ , la commande  $U$  est de 0 % (RIEN).



**Figure 2.5 :** Réponse d'un système avec un régulateur TOR à un seul seuil.

**Remarque :** La mesure ne peut pas être constante dans ce type de régulation, le système est en régime d'instabilité entretenue. Plus on augmente la sensibilité du régulateur aux variations de la grandeur réglée, plus les commutations seront fréquentes; l'usure sera plus importante et la durée de vie plus courte. Pour limiter les commutations, deux propriétés sont introduites: la **zone morte** et **l'hystérèse**.



**Figure 2.6:** sortie d'un régulateur TOR à un seul seuil et zone morte.

### 3.2. Régulateur TOR à deux seuils:

#### 3.3. Fonctionnement

Dans la réalité, afin de diminuer le phénomène de battement à l'approche de la valeur de consigne, on introduit un deuxième seuil.

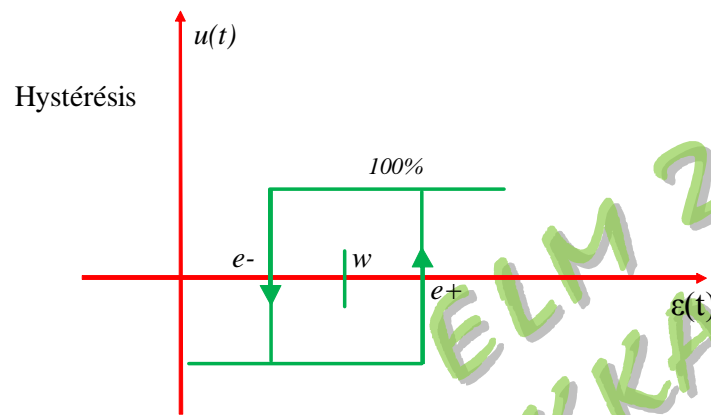
Ce régulateur comme le régulateur TOR simple élabore une fonction de commande discontinue ne prenant que 2 valeurs possibles 0 ou 1. C'est-à-dire qu'il enclenche soit la puissance maximale de soit la puissance nulle. C'est d'ailleurs cette caractéristique qui donne son nom au régulateur « tout ou rien », puisque la grandeur réglée varie de façon non progressive d'une grandeur à l'autre.

La différence entre les 2 régulateurs réside dans la détermination des seuils de basculement d'un régime de fonctionnement à l'autre. Pour le régulateur TOR à hystérésis, on définit la consigne et l'écart entre ses deux seuils appelé **l'hystérésis**. Logiquement, plus l'hystérésis est faible, plus la précision de notre système de régulation est grande, puisque la grandeur réglée varie dans un intervalle de faible amplitude. Pour le régulateur TOR simple, on précise uniquement la valeur de la mesure désirée.

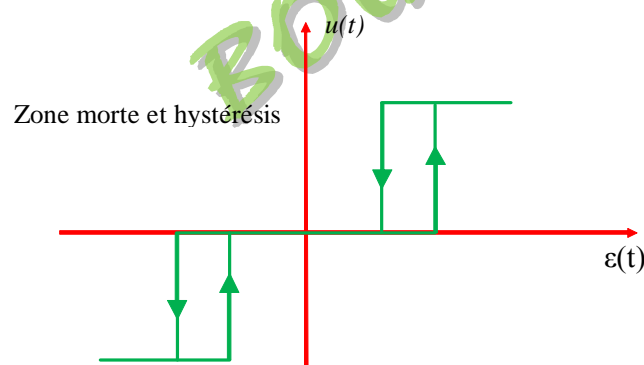
L'organe de commutation est souvent un dispositif électromécanique. Un bouilleur pour l'eau chaude domestique possède un thermostat qui enclenche ou déclenche le corps de chauffe selon la température de l'eau dans la cuve.

La valeur de consigne  $W$  permettant d'arrêter la commande (RIEN:  $Y = 0\%$ ). La valeur du deuxième seuil permettant de remettre en marche la commande (TOUT :  $Y = 100\%$ ). Ceci se repère

sur le schéma de régulation de la figure (**Fig 2.7**) par les flèches montante (enclenchement) et descendante (déclenchement).



**Figure 2.7 :** sortie d'un régulateur TOR à deux seuils.

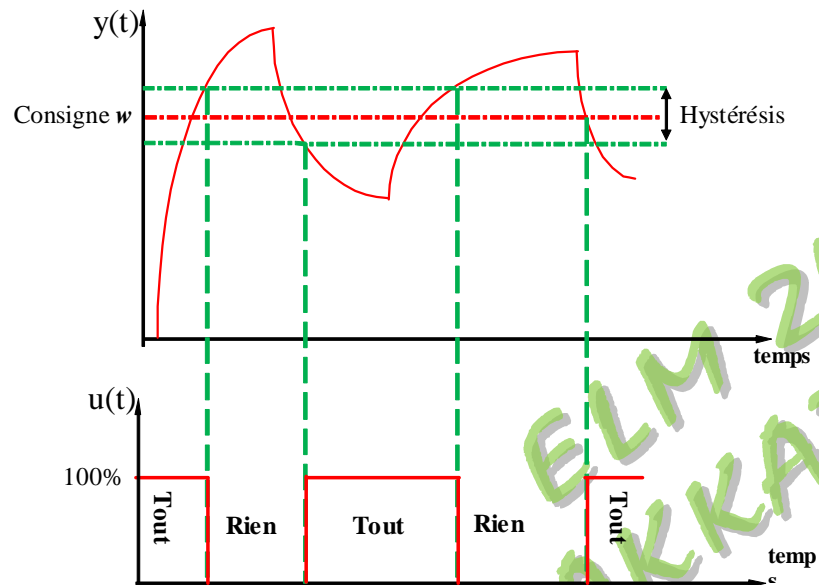


**Figure 2.8:** Sortie d'un régulateur TOR à deux seuils et zone morte.

La figure (**Fig 2.9**) représente la sortie d'un régulateur TOR à deux seuils. La grandeur réglée oscille autour du point de fonctionnement. À chaque dépassement des seuils de commutation, la sortie du régulateur change d'état. Compte tenu de l'inertie du système, la valeur absolue de l'erreur  $\varepsilon$  peut dépasser le seuil ( $e^+$ ). Dès lors que la grandeur à régler devient inférieure à la consigne l'organe de réglage est réenclenché.

Le réglage du régulateur se fait à l'aide de deux paramètres:

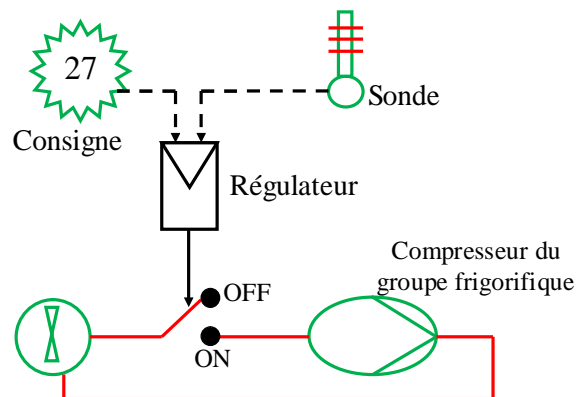
- La consigne  $W$ , fournie en unité de mesure ;
- Le seuil ( $e^+$ ), donné généralement en % de la consigne.



**Figure 2.9 :** Réponse d'un système avec un régulateur TOR à deux seuils.

### 3.4. Exemple:

Prenons un exemple de régulation de la température ambiante par un groupe frigorifique. Supposons une consigne placée à 27°C (**Fig 2. 10**).

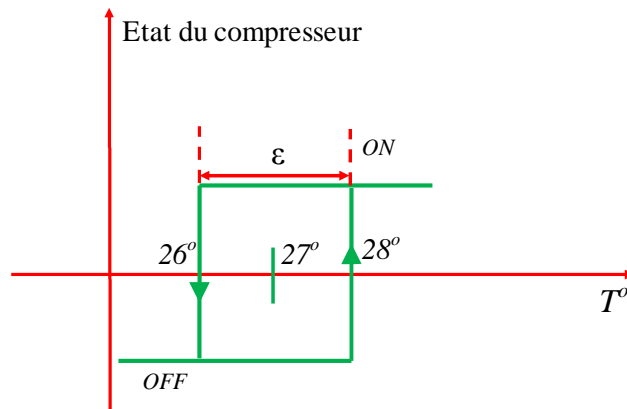


**Figure 2.10 :** Exemple de régulation TOR.

Dans le cas où un régulateur TOR à un seul seuil est utilisé, si la température ambiante dépasse la valeur de consigne (27.10°C), le régulateur le détecte et ferme l'interrupteur. Le compresseur est enclenché à 100 % et la température du local redescend. Une température de 26.90°C suffit pour arrêter le groupe frigorifique, donc, le compresseur passe de « marche » à « arrêt », puis à « marche », ... avec une telle fréquence de commutation, le matériel va souffrir. Ainsi, on peut déduire de ces considérations que le régulateur TOR avec hystérésis est plus adapté, dont la valeur est réglable. Par exemple: le compresseur s'enclenche à 28°C et s'arrête à 26°C (**Fig 2. 11**).



Effectivement, le fait que la température oscille dans un intervalle plus grand implique une augmentation de la stabilité et par la même occasion une limitation du phénomène de pompage (réduction du nombre de commutation).



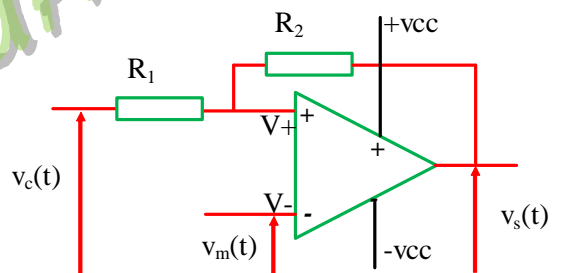
**Figure 2.11 :** Régulateur TOR. « Exemple de Régulation de température »

Plus le différentiel ( $\epsilon$ ) est élevé plus la machine travaille dans de bonnes conditions (longues plages de travail propices à un bon rendement du compresseur), mais plus la température oscillera dans le local ... Ceci diminue le confort.

Le différentiel dépend généralement du type d'application. Ainsi, la régulation d'une résistance chauffante électrique peut se concevoir avec un différentiel beaucoup plus court: une résistance accepte sans dommage une alimentation très « hachée », avec un enclenchement à  $26.9^\circ$  et un déclenchement à  $27.1^\circ$ , par exemple, pour une consigne à  $27^\circ$ .

### 3.5. Réalisation comparateur à hystérésis

Le comparateur à hystérésis présenté utilise un montage de base de l'amplificateur opérationnel communément appelé : « comparateur à deux seuils ou Trigger de Schmitt » inverseur. Ci-dessous le schéma du montage du comparateur (Fig 2. 12).



**Figure 2.12:** Montage du comparateur à hystérésis.

#### Calcul des résistances $R_1$ et $R_2$ :

Nous supposons la précision du régulateur de 0.5, autrement dit, la mesure oscille de façon permanente autour de la valeur consigne avec un écart (hystérésis) de plus ou moins **0.5**.

Etant donné que le facteur 'amplification entre la mesure et la tension est défini tel que  $100 \Leftrightarrow 50v$ , la différence entre la tension consigne  $v_c$  et la tension mesurée  $v_m$  ne doit pas excéder 0.025V. On veut donc  $e \Leftrightarrow v_+ - v_-$  la largeur de la fenêtre du cycle égale à 0.05V.

Où  $v_+$  est la tension de basculement positif faisant passer la tension en sortie  $v_s$  de  $+V_{cc}$  (tension de saturation positive de l'AOP) à  $-V_{cc}$  (tension de saturation négative de l'AOP) et  $v_-$  est la tension de basculement négatif faisant passer  $v_s$  de  $-V_{cc}$  à  $+V_{cc}$ .

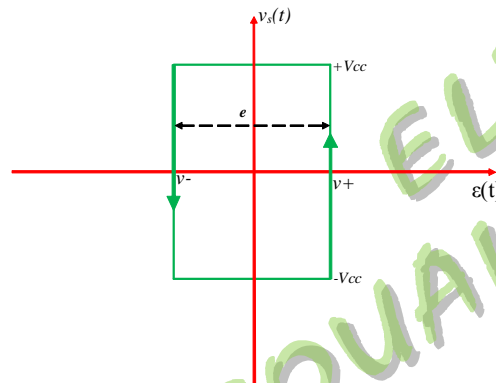


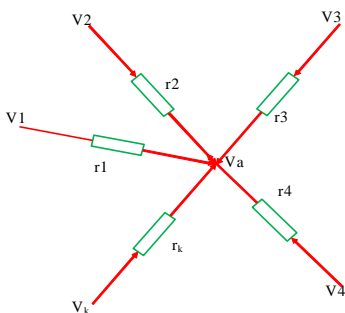
Figure 2.13: Sortie d'un comparateur à hystérésis.

**Détermination de  $v_+$  et  $v_-$ .**

Dans un premier temps, il convient de préciser qu'étant donné l'absence de contre-réaction sur l'entrée inverseuse, ce montage fonctionne en régime non linéaire ou saturé. Ainsi, on a:

$$V_+ \neq V_- \text{ et } v_s = \begin{cases} +V_{cc} \text{ si } V_+ > V_- \\ -V_{cc} \text{ si } V_+ < V_- \end{cases}$$

Néanmoins, le passage d'un état saturé à un autre se fait toujours par un passage en régime linéaire. De fait, l'utilisation des caractéristiques d'un amplificateur opérationnel en mode linéaire est correcte.



**Rappel : théorème de Millman:**

$$\left\{ \begin{aligned} V_a &= \frac{\sum_{i=1}^k V_i \times g_i}{\sum_{i=1}^k g_i} \\ g_i &= \frac{1}{r_i} \end{aligned} \right.$$

L'application ce théorème nous donne:

$$V_+ = \frac{\frac{v_c}{r_1} + \frac{v_s}{r_2}}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}} = \frac{r_2 \times v_c}{r_1 + r_2} + \frac{r_1 \times v_s}{r_1 + r_2} \text{ on a aussi : } v_m = V_-$$

Soit la tension différentielle  $V_+ - V_-$ :

$$V_+ - V_- = \frac{r_2 \times v_c}{r_1 + r_2} + \frac{r_1 \times v_s}{r_1 + r_2} - v_m$$

D'après l'hypothèse de fonctionnement en régime linéaire lors du passage d'un état saturé à un

autre on a :  $V_+ - V_-$  - impédance d'entrée infinie  $\Rightarrow v_m = \frac{r_2 \times v_c}{r_1 + r_2} + \frac{r_1 \times v_s}{r_1 + r_2}$

Suivant le signe de  $v_s$  on peut donc définir la tension de basculement positif  $v_+$  et la tension de basculement négatif  $v_-$  tel que :

$$\begin{cases} v_s = +V_{cc} \Rightarrow v_+ = v_m = \frac{r_2 \times v_c}{r_1 + r_2} + \frac{r_1 \times (+v_{cc})}{r_1 + r_2} \\ v_s = -V_{cc} \Rightarrow v_- = v_m = \frac{r_2 \times v_c}{r_1 + r_2} + \frac{r_1 \times (-v_{cc})}{r_1 + r_2} \end{cases}$$

Ainsi :

$$e = 2 \frac{r_1 \times v_{cc}}{r_1 + r_2}$$

Enfin pour trouver les valeurs des  $r_1$  et  $r_2$ , on fixe l'une des résistances et on calcule l'autre par la

dernière formule. Comme exemple, si  $e=0.05$  et  $V_{cc}=10V \Rightarrow 0.05 = 20 \frac{r_1}{r_1 + r_2}$

$$\text{si } r_1 = 1k\Omega \Rightarrow 0.05 = 20 \frac{1}{r_1 + r_2} \Rightarrow r_2 + 1 = 400 \Rightarrow r_2 = 399k\Omega$$