



# Fiche de synthèse n° 3

## Système de régulation

### 1. Boucle de régulation

#### 1.1. Schéma de principe d'un procédé

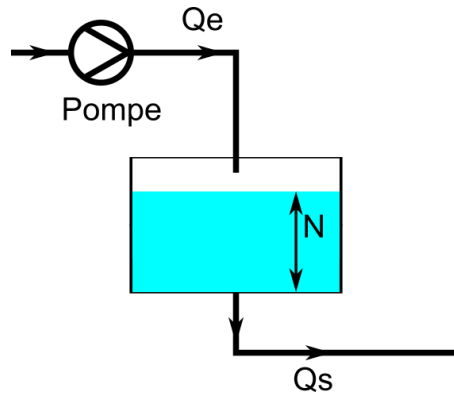
Dans l'exemple ci-dessous, la pompe permet de faire circuler un liquide avec un débit  $Q_e$  pour le stocker dans la cuve. Ce liquide stocké est disponible pour des utilisateurs qui peuvent le prélever par le fond de la cuve.

Le **procédé** est constitué des éléments suivants :

- Une cuve de stockage d'un liquide
- Une pompe
- Des tuyauteries

Les grandeurs physiques mises en jeu sont :

- $Q_e$  = débit d'entrée du liquide
- $Q_s$  = débit de sortie du liquide
- $N$  = niveau du liquide dans la cuve.

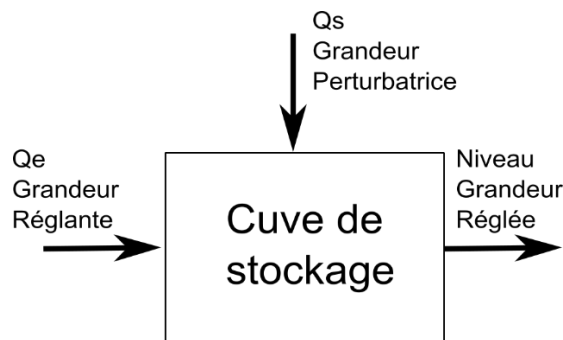


#### 1.2. Grandeurs d'une régulation

Dans le **procédé** précédent, la mise en œuvre d'une régulation vise à maintenir dans la cuve, le niveau  $N$  du liquide à une valeur donnée (**consigne**).

Le débit de sortie  $Q_s$  (vidage du bac) variant de manière aléatoire suivant l'utilisation du liquide en aval du bac de stockage, il faut commander le débit d'entrée  $Q_e$  (remplissage du bac) en agissant sur la pompe.

- Le niveau  $N$  du liquide dans la cuve est la **Grandeur Réglée** (celle dont on veut maintenir la valeur)
- Le débit d'entrée  $Q_e$  est la **Grandeur Réglante** (celle qui va permettre le réglage)
- Le débit de sortie  $Q_s$  est la **Grandeur Perturbatrice**



Le niveau  $N$  du liquide dans le bac de stockage dépend du débit d'entrée  $Q_e$  et du débit de sortie  $Q_s$

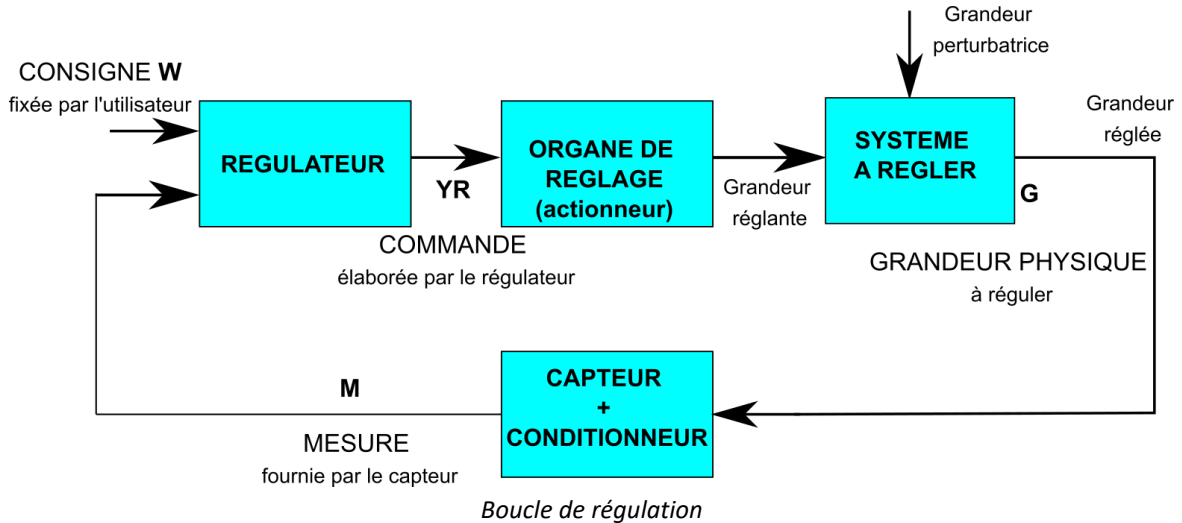


### 1.3. Eléments d'une boucle de régulation

Pour mettre en place la régulation du niveau d'eau dans la cuve, il faut :

ACTION	ELEMENT MIS EN JEU
Mesurer le niveau d'eau	Capteur : Capteur de niveau
Comparer le niveau réel au niveau souhaité (W)	Régulateur ou comparateur : Régulateur de niveau
Agir sur le niveau	Actionneur : Pompe

La boucle de régulation a pour rôle de maintenir automatiquement, sans intervention manuelle, le niveau (mesure) à la valeur de consigne souhaitée par l'utilisateur.



## 2. Régulation Tout Ou Rien (TOR)

### 2.1. Régulation à un seuil

Dans une régulation Tout Ou Rien, l'organe de réglage ne peut avoir que deux états :

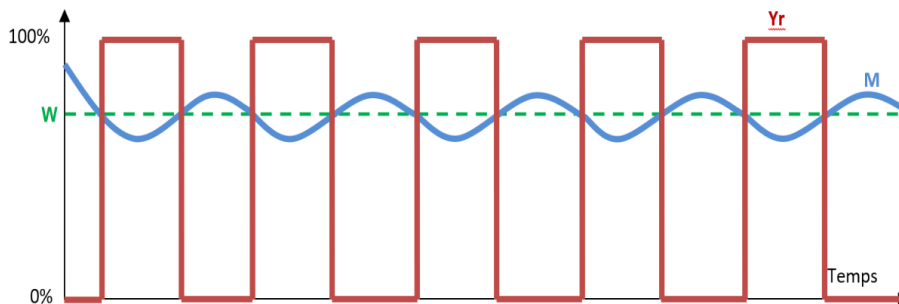
Marche / Arrêt, Ouvert/Fermé...

Dans l'exemple de la régulation de niveau, la pompe peut être en marche ou arrêtée. L'état de la pompe est fixé par la commande Yr

Yr = 0%	Pompe à l'arrêt complet
Yr = 100%	Pompe en marche au maximum

L'algorithme de régulation TOR à un seuil est :

Si $M > W$ alors Yr = 0%	Pompe à l'arrêt
Si $M < W$ alors Yr = 100%	Pompe en marche



Evolution possible des grandeurs M et Yr



Inconvénients :

- Dès qu'il y a une perturbation, la pompe est toujours en train de se mettre en marche et de s'arrêter. Il y a un risque d'usure prématurée ;
- La mesure n'est jamais égale à la consigne.

## 2.2. Régulation à deux seuils

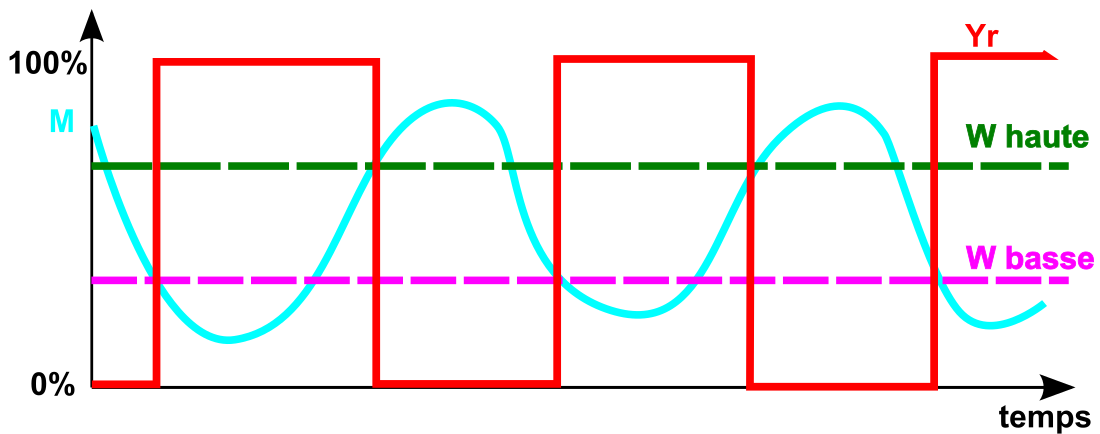
Pour une régulation à deux seuils, l'utilisateur fixe deux valeurs de consigne :

- une consigne haute ( $W_{haute}$ )
- une consigne basse ( $W_{basse}$ )

L'algorithme de régulation TOR à deux seuils est :

Si $M > W_{haute}$ alors $Y_r = 0\%$	Pompe à l'arrêt
Si $M < W_{basse}$ alors $Y_r = 100\%$	Pompe en marche

Intérêt : La pompe n'est pas toujours en train de se mettre en marche ou de s'arrêter mais il y a une variation plus importante de la mesure M



Evolution possible des grandeurs M et Yr

## 3. Correction proportionnelle (P)

### 3.1. Algorithme P

Dans une **régulation proportionnelle** (P), l'organe de réglage peut avoir plus que deux états. Il peut prendre tous les états depuis l'arrêt total jusqu'à un fonctionnement au maximum de ses capacités.

Dans l'exemple de la régulation de niveau, l'état de la pompe est fixé par la commande Yr :

$Y_r = 0\%$	Pompe à l'arrêt
$Y_r$ entre 0 et 100%	Pompe en régime intermédiaire
$Y_r = 100\%$	Pompe en marche au maximum

L'algorithme de régulation P est alors :

$$Y_r = K \times (W - M) \text{ avec } Y_r \in [0 ; 100\%] \quad \text{ou} \quad Y_r = K \times (M - W) \text{ avec } Y_r \in [0 ; 100\%]$$

K est appelé **gain** du régulateur, il permet de régler l'action P. Le coefficient K est positif.

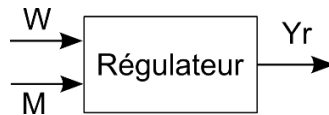


Remarques :

- L'unité de K dépend des unités prises pour la mesure M et la consigne W. Si on choisit d'exprimer M et W en % de l'étendue de mesure, K n'a pas d'unité. C'est le choix qui est fait par la suite.
- le choix de l'un des deux algorithmes dépend du procédé. Par exemple si l'on souhaite maintenir une température constante dans une pièce, l'organe de réglage peut actionner un système de chauffage en hiver (action si  $M < W$ ) ou au contraire un système de refroidissement en été (action si  $M > W$ ).

### 3.2. Caractéristique du régulateur

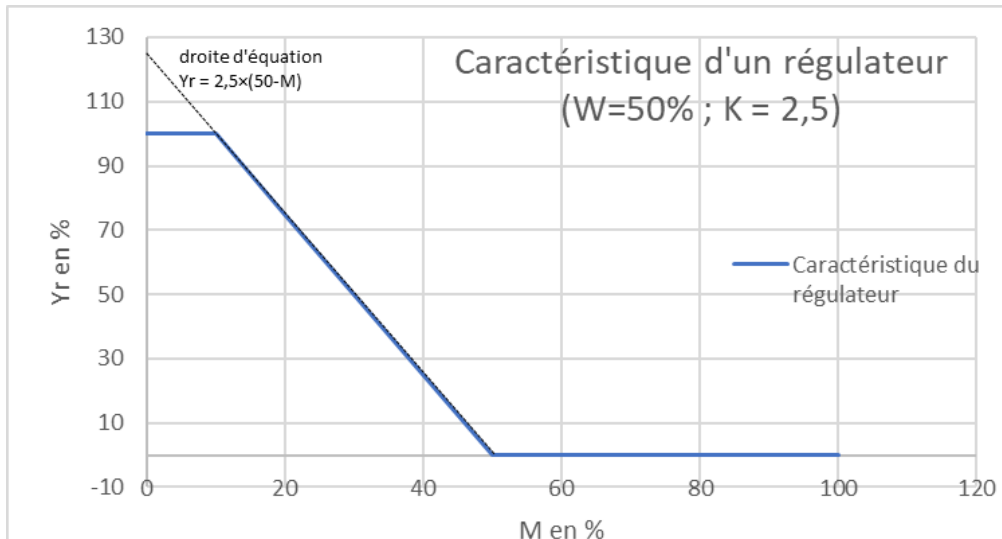
La caractéristique du régulateur est la représentation graphique de l'évolution de la commande  $Y_r$  calculée par le régulateur en fonction de la valeur prise par la mesure M



Prenons le cas où  $Y_r = K \times (W - M)$ .

Supposons que  $W = 50\%$  et  $K = 2.5$

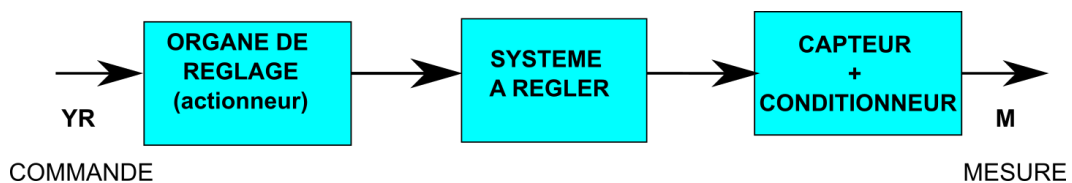
On a donc une droite d'équation  $Y_r = 2,5 \times (50 - M)$  avec des valeurs bornées à 0 et 100% pour  $Y_r$ .



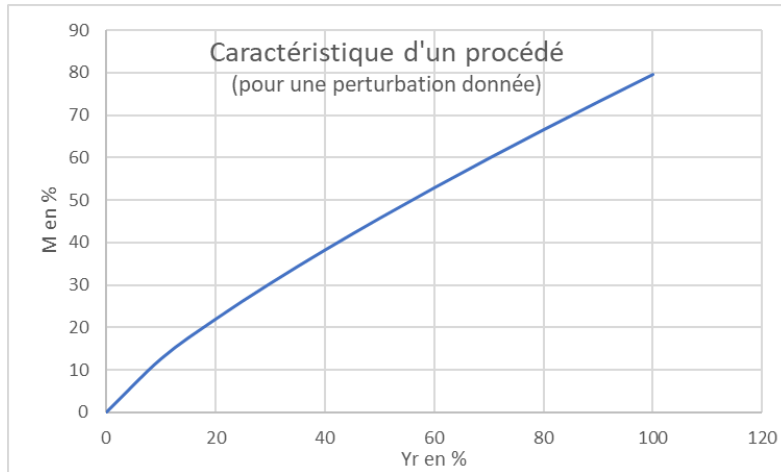
Cette courbe est la **caractéristique du régulateur** pour une **consigne** et un **gain** donnés.

## 4. Caractéristique statique et point de fonctionnement

### 4.1. Caractéristique statique d'un procédé

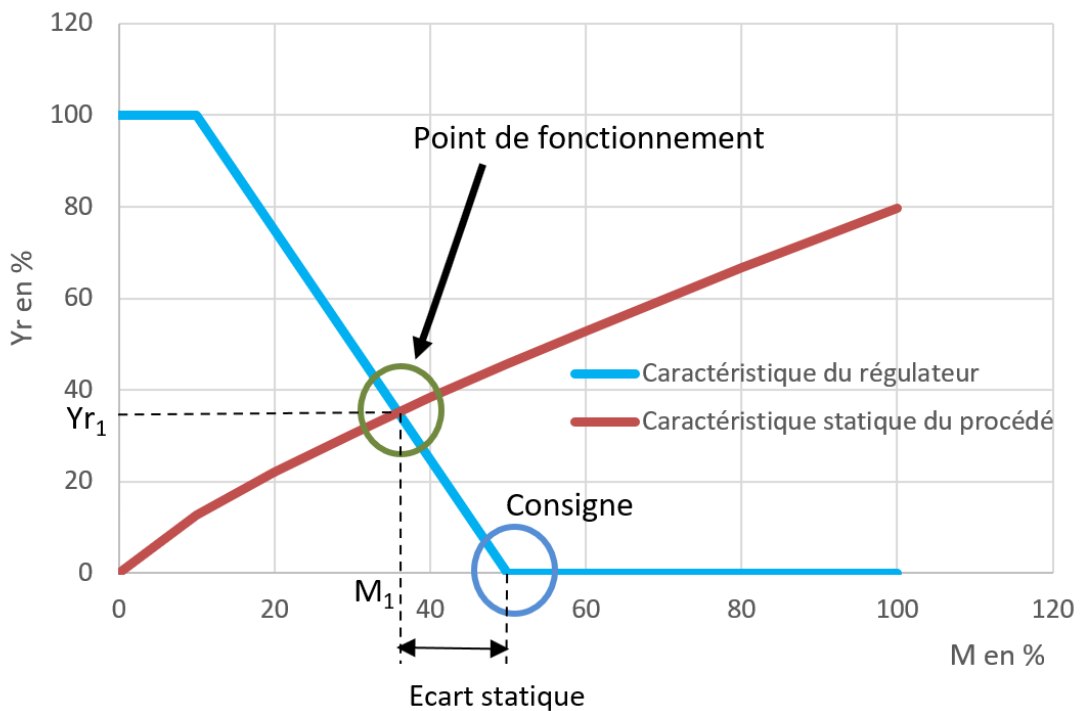


La **caractéristique statique** d'un procédé stable est la représentation graphique des valeurs prises par la grandeur de sortie (M) en fonction des valeurs de la grandeur d'entrée ( $Y_r$ ) pour une **perturbation donnée**. Cette caractéristique s'obtient expérimentalement.



### 4.2. Point de fonctionnement

Dans une boucle de régulation, avec une consigne donnée  $W$  et un gain  $K$  fixé, pour une perturbation particulière, le **point de fonctionnement** est l'intersection de la caractéristique statique du procédé et de la caractéristique du régulateur.



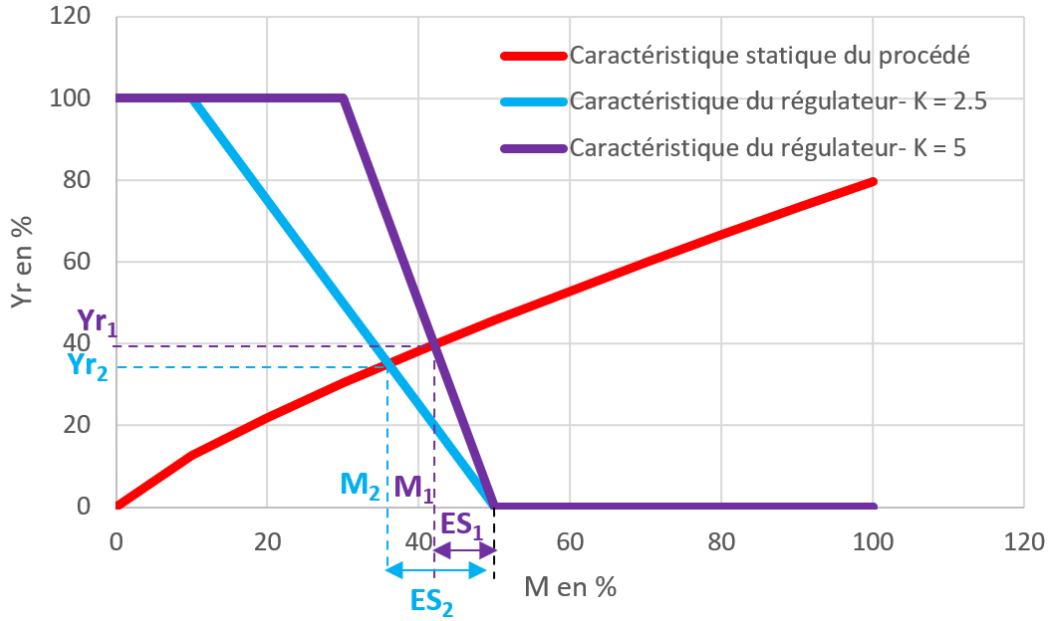
La boucle de régulation impose la mesure à une valeur  $M_1$  et fixe la commande à une valeur  $Y_{r1}$

La mesure est différente de la consigne. Il existe un **écart statique** égal à  $W - M_1$ .

Cet écart statique dépend du gain du régulateur et de la perturbation.

### 4.3. Evolution du point de fonctionnement avec le gain du régulateur

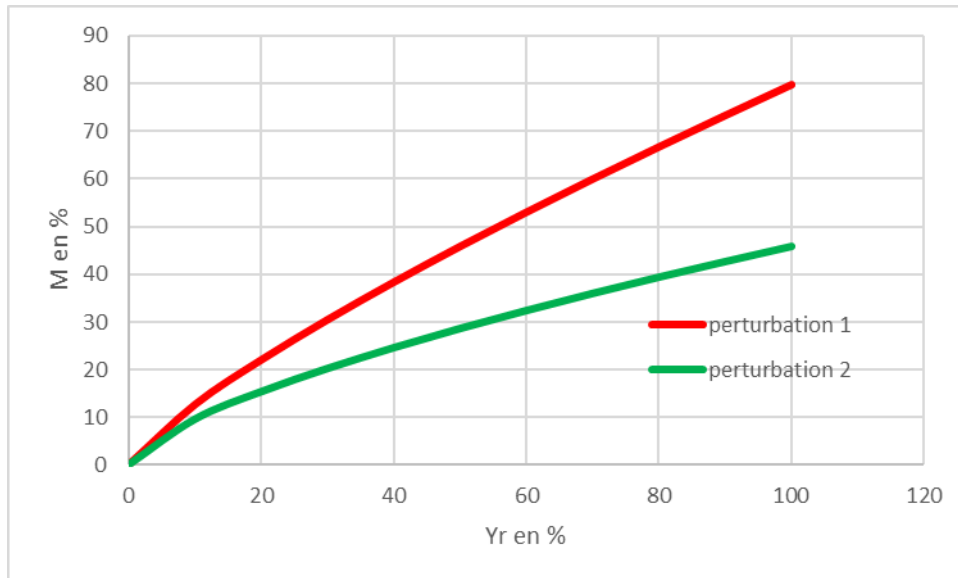
Le graphique ci-dessous permet de montrer l'influence du gain du régulateur sur le point de fonctionnement et donc sur l'écart statique. On a une courbe correspondant à  $K = 2.5$  et une autre avec  $K = 5$



Plus le gain est important, plus l'écart statique est faible.

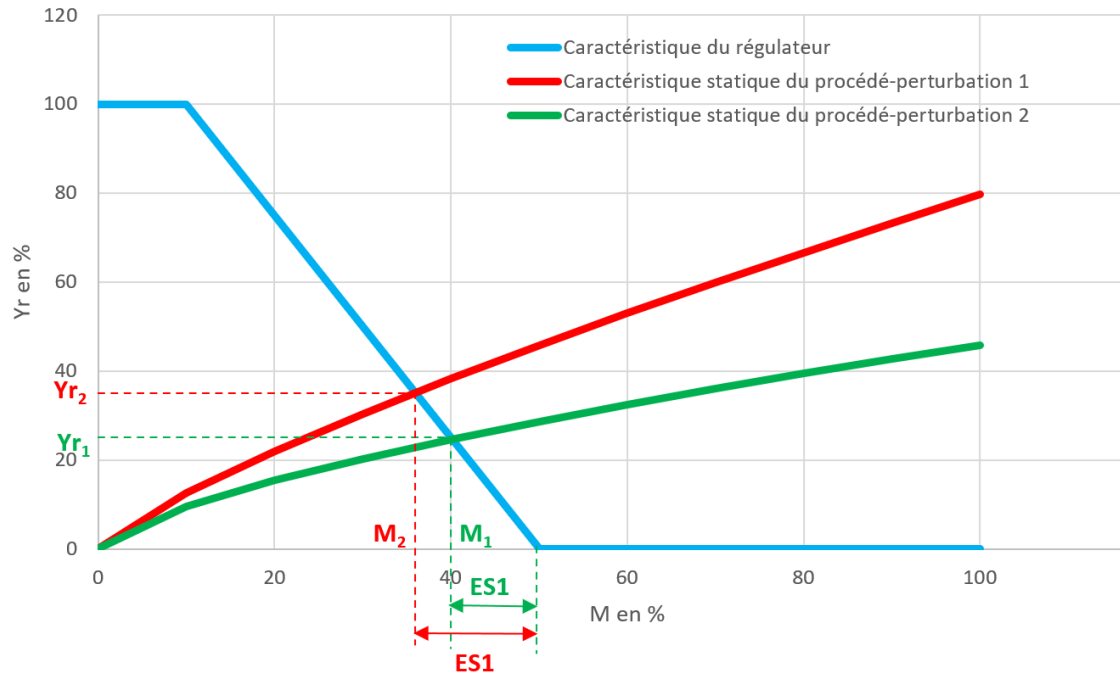
#### 4.4. Evolution du point de fonctionnement avec la perturbation

Le comportement d'un procédé dépend de la ou des perturbations auxquelles il est soumis. Pour chaque valeur de perturbation, on peut tracer une caractéristique statique. En regroupant ces différentes courbes, on obtient **un réseau de caractéristiques statiques**.



Réseau de caractéristiques statiques tracées pour deux valeurs différentes de la perturbation

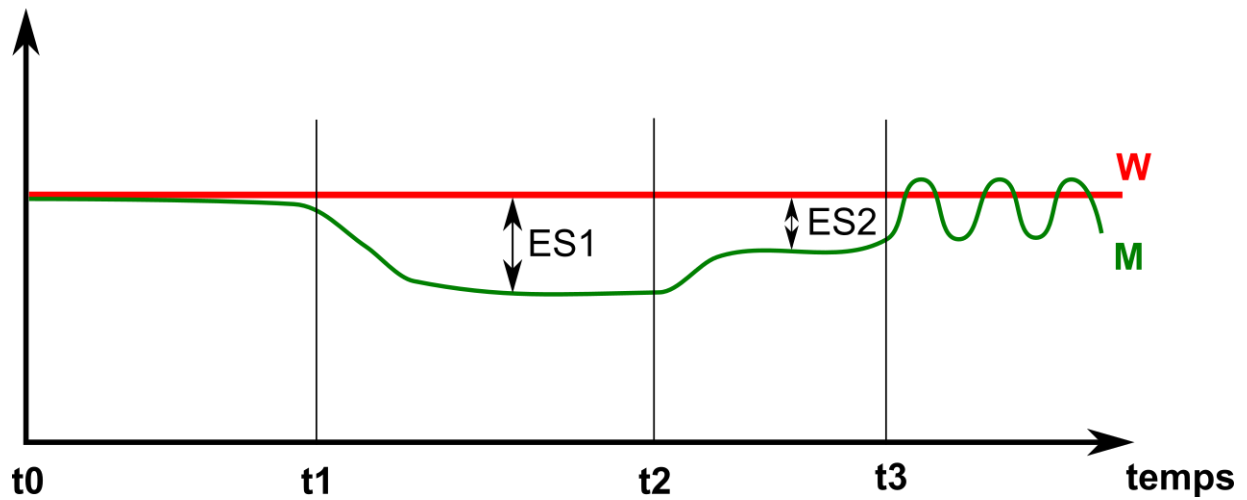
En superposant la caractéristique du régulateur au réseau de caractéristiques statiques, on constate que le point de fonctionnement et ainsi l'écart statique (ES) évolue avec la valeur de la perturbation :





## 5. Correction proportionnelle

Observons l'évolution de la mesure d'un procédé soumis à une correction proportionnelle dans l'exemple ci-dessous.



- De  $t_0$  à  $t_1$ , pas de régulation, la valeur de la mesure  $M$  est maintenue manuellement à la valeur de la consigne  $W$
- De  $t_1$  à  $t_2$ , correction proportionnelle avec un gain  $K_1$ . La mesure est stable et l'écart statique est égal à  $ES_1$
- De  $t_2$  à  $t_3$ , correction proportionnelle avec un gain  $K_2$  supérieur à  $K_1$ . La mesure est stable et l'écart statique  $ES_2$  est inférieur à  $ES_1$
- Après  $t_3$ , correction proportionnelle avec un gain  $K_3$  très supérieur à  $K_2$ . La mesure n'est plus stable, le gain est trop grand.

On constate qu'avec des valeurs de  $K$  pas trop grandes ( $K_1$  et  $K_2$ ) :

- La mesure est stable
- La mesure n'est pas égale à la consigne. Il y a un écart statique

La correction proportionnelle permet la stabilité de la mesure mais ne permet pas que la mesure soit égale à la consigne (précision). Pour diminuer l'écart statique, on peut augmenter le gain du régulateur MAIS si le gain augmente trop, la mesure n'est plus stable, on retrouve des oscillations comparables à celles observées avec la régulation TOR



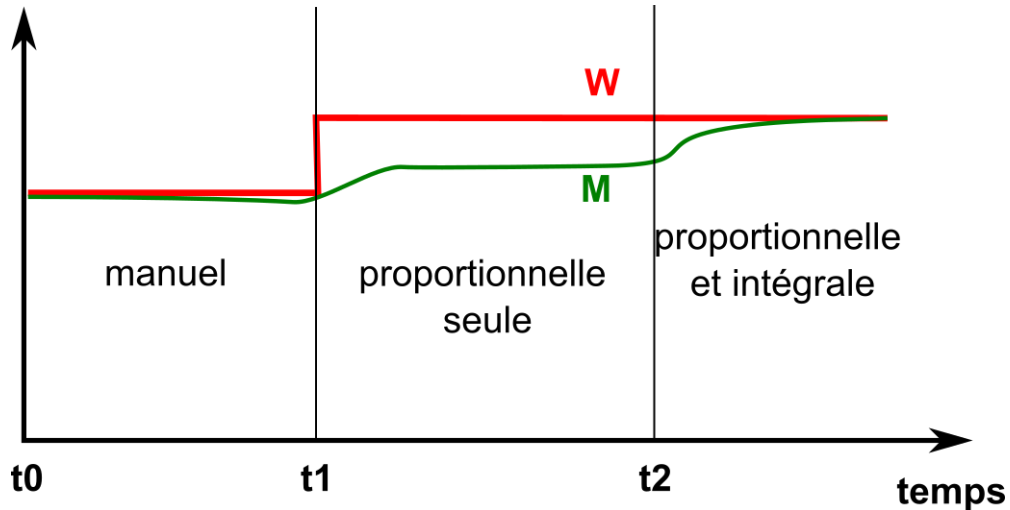


## 6. Correction Proportionnelle et Intégrale

On a vu que la correction proportionnelle permet l'obtenir une mesure stable au voisinage de la consigne. Mais cette correction ne permet pas à la mesure d'être égale à la consigne (précision). Pour cela, il faut compléter la correction proportionnelle par une correction intégrale.

Avec un réglage approprié de la correction intégrale, la mesure peut être égale à la consigne.

L'enregistrement ci-dessous montre l'effet d'une correction Proportionnelle et Intégrale (PI)



- De  $t_0$  à  $t_1$ , pas de régulation, la valeur de la mesure  $M$  est maintenue manuellement à la valeur de la consigne  $W$
- De  $t_1$  à  $t_2$ , correction proportionnelle seule et échelon de consigne. La mesure est stable mais différente de la consigne. Il y a un écart statique.
- De  $t_2$  à  $t_3$ , correction proportionnelle et intégrale. Après un certain temps la mesure est stable et égale à la consigne.

La correction intégrale associée à la correction proportionnelle permet à la mesure d'être égale à la consigne.



## 7. Performance d'une régulation

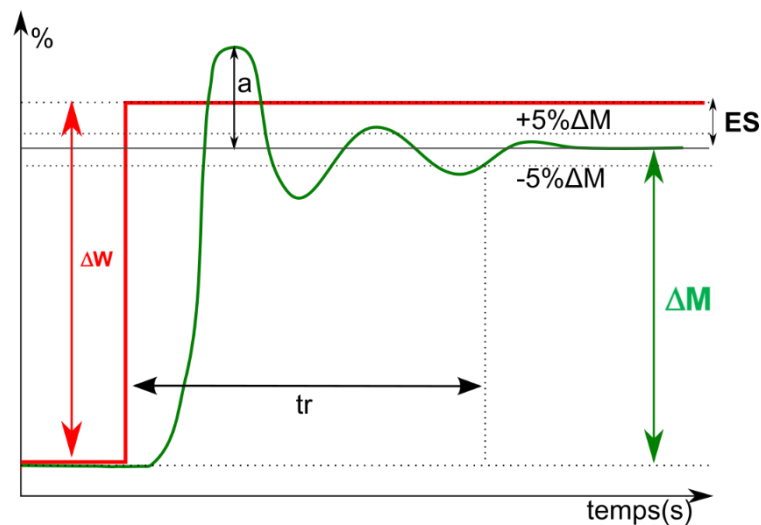
### 7.1. Critères de performance d'une régulation

Une régulation est performante si elle répond à trois critères après un changement de consigne ou après un changement de perturbation.

- **Précision** : la valeur de la mesure est égale à la valeur de la consigne.
- **Rapidité** : la valeur de la mesure retrouve rapidement un état de stabilité
- **Stabilité** : la valeur de la mesure subit des variations limitées

### 7.2. Evaluation expérimentale des performances d'une régulation

Pour améliorer les réglages d'une régulation (correction P et I), on fait subir à un procédé régulé, un échelon, de consigne et on détermine alors des grandeurs qui permettent d'évaluer la qualité de la régulation. Cet essai est présenté ci-dessous :



La consigne subit un échelon  $\Delta W$ . La mesure évolue et se stabilise après un certain temps. La mesure a varié de  $\Delta M$ .

- La précision de la régulation est déterminée par la valeur de l'écart statique  $ES$  lorsque la mesure n'évolue plus. On cherche à obtenir un écart statique le plus faible possible.
- La rapidité de la régulation est déterminée par le temps de réponse à 5% ( $t_r$ ). C'est la durée nécessaire pour que la mesure reste dans un intervalle de  $\pm 5\%$  de  $\Delta M$  autour de la valeur de  $M$  stabilisée.
- La stabilité de la régulation est déterminée par la valeur relative du dépassement  $D = \frac{a}{\Delta M}$ . La valeur de  $D$  doit être inférieure à 15%

On peut modifier les actions proportionnelle et intégrale pour améliorer les critères précédents et optimiser la régulation.