

1

Optimisation et contrôle des procédés alimentaires



L'optimisation des procédés alimentaires

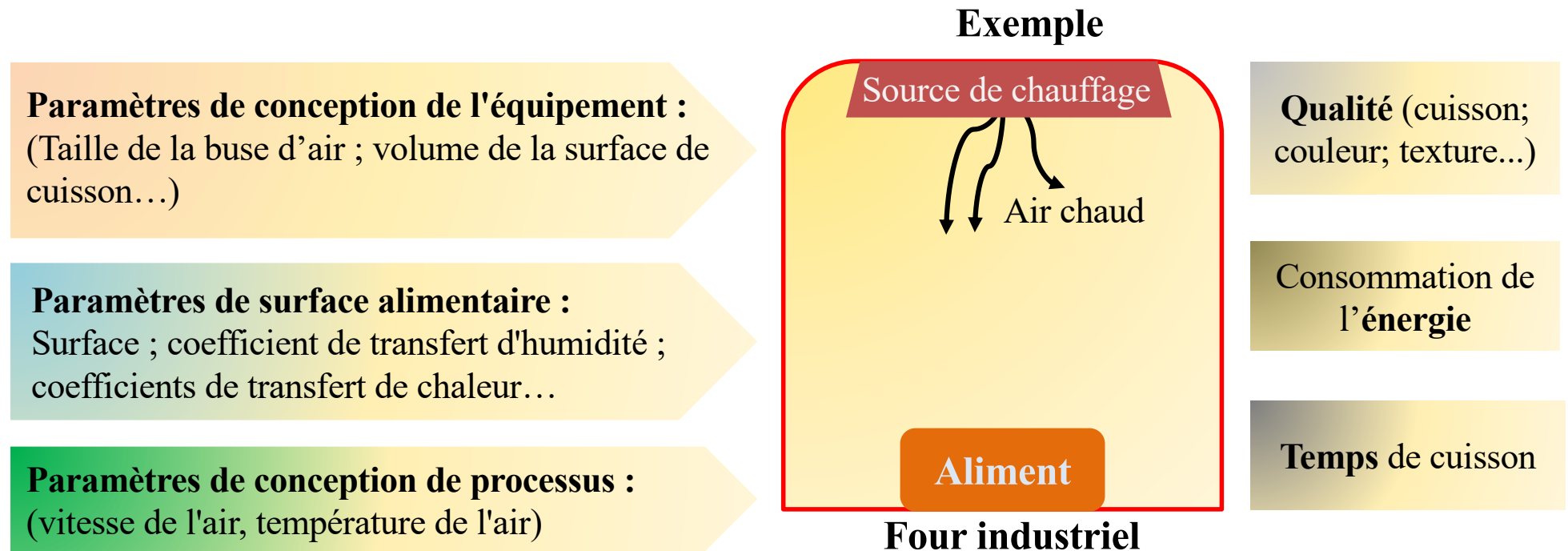
Que signifie ?

Optimiser consiste (au sens large) à trouver les valeurs que doivent prendre les variables pour minimiser/maximiser une fonction, nommée critère d'optimisation, tout en satisfaisant les contraintes du système. Les contraintes sont les conditions ou les restrictions qui délimitent les valeurs acceptables que les variables peuvent prendre.

Objectifs

- ✓ L'optimisation d'un procédé concerne toute amélioration économique, technologique et/ou de la qualité du produit traité.
- ✓ L'optimisation vise l'obtention, de manière *systematique et efficiente*, de la **solution** donnant le *meilleur compromis* entre divers critères, parmi un ensemble de solutions candidates.
- ✓ L'optimisation est utilisée lors de *l'automatisation*, de la *conception* (procédé, produits...) et de la modélisation des *systemes*.

- ❑ Les paramètres de l'optimisation entrent à **différents niveaux**



 Les paramètres doivent être mesurés parfois dans différentes **conditions rigoureuses** : pression et température élevées, conditions gazeuses nocives, chocs et vibrations de grande ampleur, environnements corrosifs, etc.

- ➡ Dans de telles conditions il est important de développer des **capteurs spéciaux** ou de sélectionner le **bon équipement** pour une mesure sans erreur des paramètres.

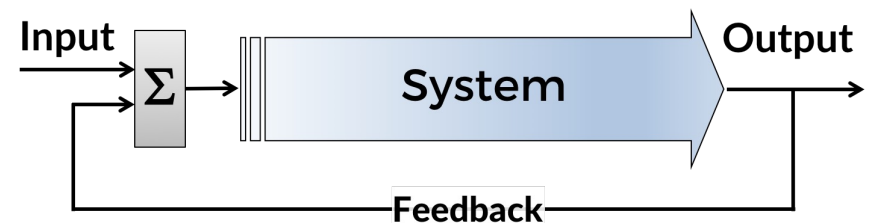
☞ Une *variable manipulée* est un *paramètre qui est modifié* par le contrôleur pour **ajuster** la sortie à la quantité souhaitée.

☞ Le **contrôle** consiste à définir *les sorties* en cas de déviation du niveau souhaité; les *variables d'entrée* manipulées sont ajustées pour minimiser l'écart.

☞ Les *causes* de la **dévi**ation des variables de sortie peuvent être *internes* ou *externes* au processus

☞ Certaines *perturbations* sont de nature **régulière** (déterministes) et peuvent être prédites et compensées, mais d'autres ne peuvent pas être prédites (stochastiques).

☞ Les effets de perturbations imprévisibles peuvent être compensés un système « *feedback control* ».



☞ Dans un *système en bouclefermé*, l'**erreur** est la différence entre la valeur de sortie du système et le point de consigne ; utilisée pour *ajuster* la variable d'entrée contrôlable.

Difficulté

L'optimisation des **procédés** alimentaires est fréquemment confrontée à deux problèmes :

1

Modèle utilisé (prédiction, validité...)

Transferts de matière et d'énergie
surviennent au même temps que
Réactions et/ou transformations physiques.



Détermine, à
chaque **instant**



Leurs **mécanismes** d'action sont souvent **méconnus** ➡ **Difficulté** de modéliser (**modèles rigoureux**)

SOLUTION

Etablissement des **modèles empiriques** simples (type boîte noire).

On obtient alors, des résultats modestes aux prix de grands efforts expérimentaux
(données sous-exploitées).

2

Construction
du problème d'optimisation

+

Choix
de la méthode de résolution

Bien construire

signifie établir clairement les *variables* de commande, les *critères* et les *contraintes* afin de limiter l'espace des **solutions admissibles**.

Une méthode adéquate

la plus adaptée aux *caractéristiques du problème d'optimisation*, dans certains cas il est convenable de **combiner des méthodes** pour un meilleur résultat.

Une bonne stratégie d'optimisation consiste à utiliser le *modèle robuste*, poser *convenablement le problème* d'optimisation et choisir la *méthode de solution* la plus adaptée aux besoins.

❑ Remarques

Variables



D'état
(liées au **produit**)

De commande
(liés au **procédé**)



Optimisation des procédés

Optimisation **multicritères** :

- Optimiser simultanément (t , E , $Q...$)
- On obtient un ensemble de solutions

Optimisation **monocritère** :

- Minimisation du temps ou de l'énergie
- Maximisation d'un critère de qualité

❑ **Donc** l'optimisation des conditions opératoires des procédés alimentaires :

1. Complexe
2. Type non linéaire sous contraintes
3. Souvent multicritères

❑ Le modèle utilisé peut être vu comme une **contrainte additionnelle**

❑ De **variables perturbatrices**, pas considérées dans les modèles :

- variabilité de la matière première,
- conditions environnementales
- pannes des équipements
- fluctuation du prix de l'énergie



👉 **agissent**
sur le système d'optimisation.

✓ Peuvent être regroupés sous un **terme d'incertitude**

Approches d'optimisation

1 Sans modèle mathématique

Elle est basée sur la connaissance experte des procédés

Un système peut être amélioré/optimisé grâce à l'action d'experts qui sélectionnent l'optimum sur la base de l'information théorique et expérimentale du procédé.

Essai-erreur : une méthode de résolution de problèmes ; caractérisée par des **essais** en continue jusqu'au succès (*conditions optimales*).

Utilisation de conditions optimales proposées par un expert qui sélectionne les *points de fonctionnement candidats* qui sont **testés expérimentalement**.

Déterminés par la méthode essai-erreur ou à travers un plan d'expériences



**Donc cette
approche**

- Simple, lente et coûteuse
- Peu robuste (dépend de l'erreur de mesure des variables)
- Non applicable aux systèmes multivariables (nombre fini d'expérience)

2 Avec modèle mathématique

Les modèles utilisés peuvent être classés en trois catégories :

Modèles de connaissance (mécanistiques)

- Connaître des mécanismes qui gouvernent le comportement du procédé.
- Modèles composés par des bilans d'énergie, de masse et de mouvement, etc.
- Modèles appréciés grâce à leurs propriétés d'extrapolation

$$Fh_f + \phi_B = Wh_w + Vh_v$$

h : enthalpies ; ϕ : puissance de chauffe

Modèles de représentation (empiriques)

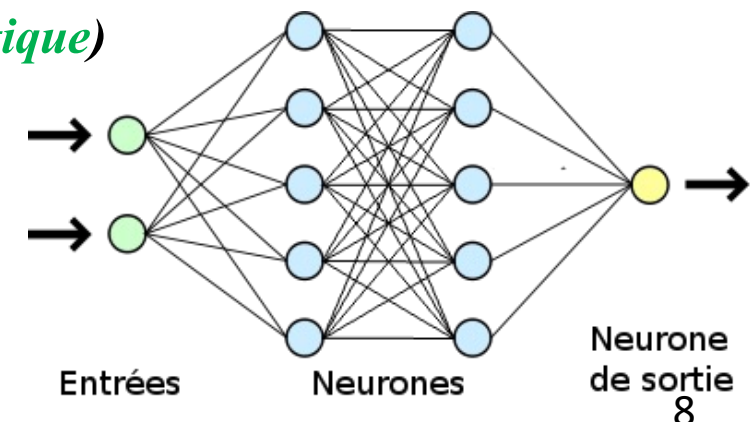
- Etablis par des corrélations empiriques qui relient les variables d'entrée et de sortie du procédé.
- Méthodologie des surfaces de réponses est la plus utilisée (corrélations polynomiales)

$$y = f_{\beta}(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon$$

y : réponse ; x : facteurs

Modèles hybrides (phénoménologique)

- Un type intermédiaire entre le mécanistique et l'empirique
- Ces types de modèles sont capables de reproduire la dynamique du système avec un temps de calcul assez court.
- On peut citer la logique floue et les réseaux de neurones.

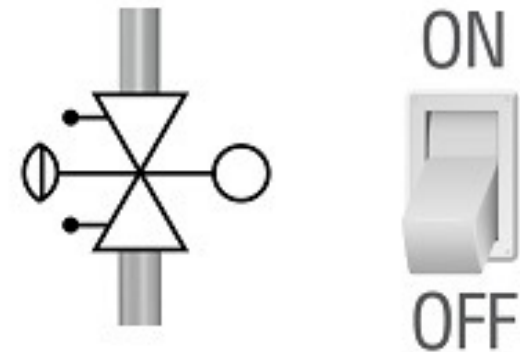


Régulation des procédés alimentaires

 **La régulation** (contrôle en ang.) regroupe l'ensemble des techniques utilisées visant à maintenir constante une **GRANDEUR REGLÉE** à une valeur **CONSIGNE** soumise à des **PERTURBATIONS**, en agissant sur une **GRANDEUR RÉGLANTE** pour un minimum d'écart possible et le plus **RAPIDEMENT** possible (énergie) sans **DESTABILISÉE** la réponse (qualité).

❑ Les modes d'action de régulation traditionnels :

- ✓ Tout Ou Rien, appelée « On-Off Control »
- ✓ Proportionnelle (P)
- ✓ Proportionnelle intégrale (PI)
- ✓ Proportionnelle intégrale-dérivée (PID)



Les schémas de régulation traditionnels ne réussissent pas toujours dans les **systèmes complexes** non linéaires où des lois de régulation **avancées** et **intelligentes** s'avèrent plus pratiques.

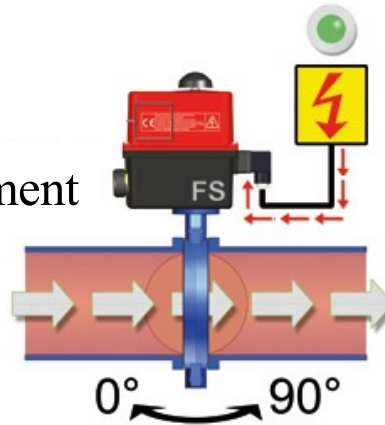
❑ Tout Ou Rien, appelée « On-Off Control »

- Un régulateur avec une action discontinue qui prend deux positions 0 et 1 (ou 0 et 100%).
- Le plus simple et le moins coûteux

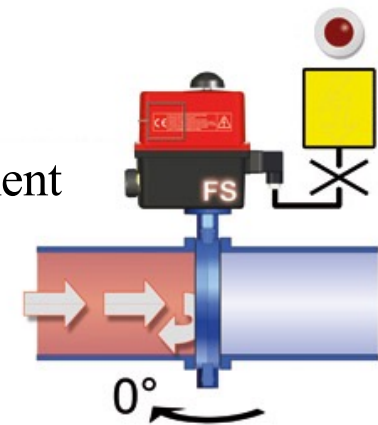
▪ Exemple :

Une vanne sur un tuyau d'écoulement

Vanne complètement ouverte



Vanne complètement fermée



- Utilisés pour la commande des systèmes ayant une grande inertie où la précision de régulation n'est pas importante.

La plage de variation de la grandeur réglée (ex. température...) et le taux de « switching » sont deux caractéristiques très importantes d'un régulateur **On-Off**. Ils dépendent de la réponse du processus et ses caractéristiques.

Détermine la **précision** du contrôleur

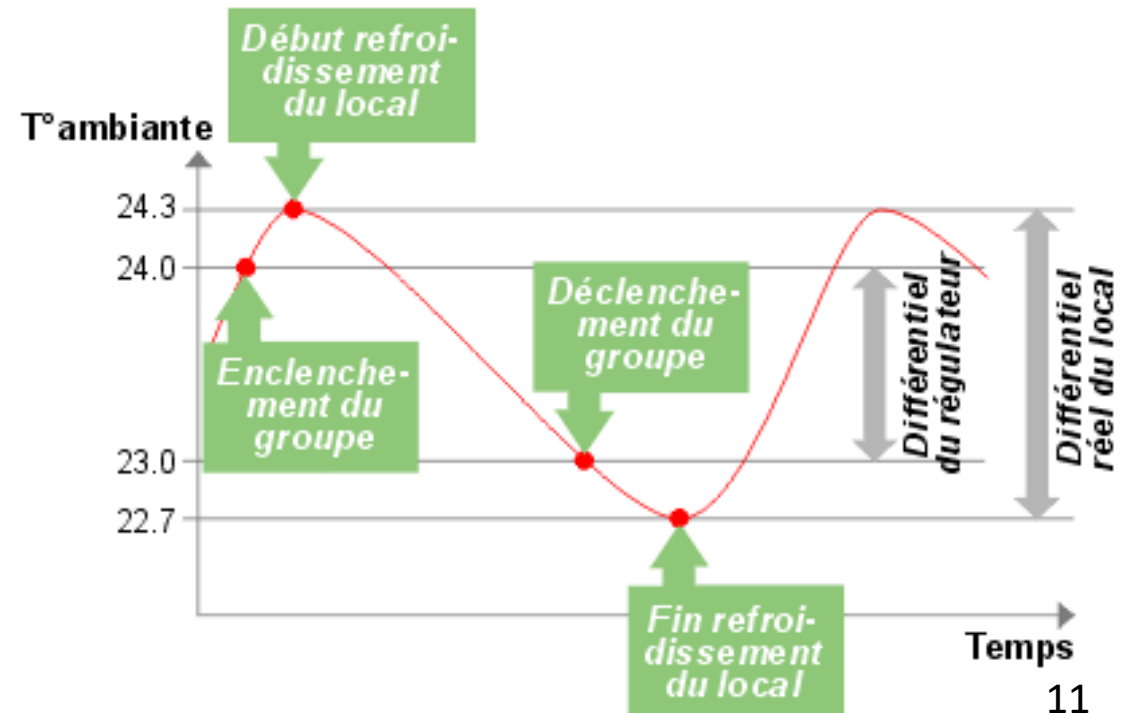
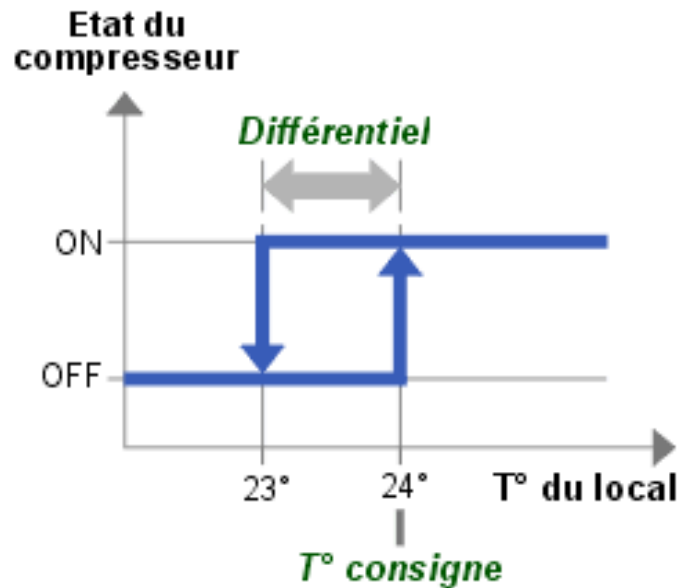
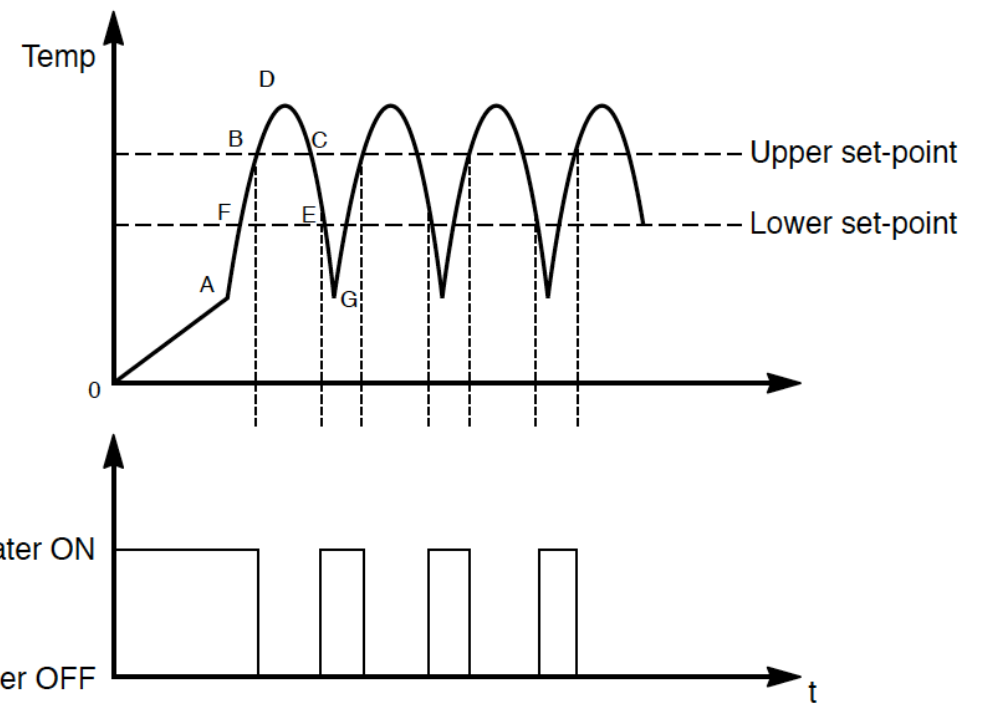
Des **perturbations mécaniques** des éléments de contrôle finaux tels que les actionneurs, les vannes, etc.

Élevé

Provoque

Exemple:

Régulateur de température tout ou rien avec un intervalle différentiel.

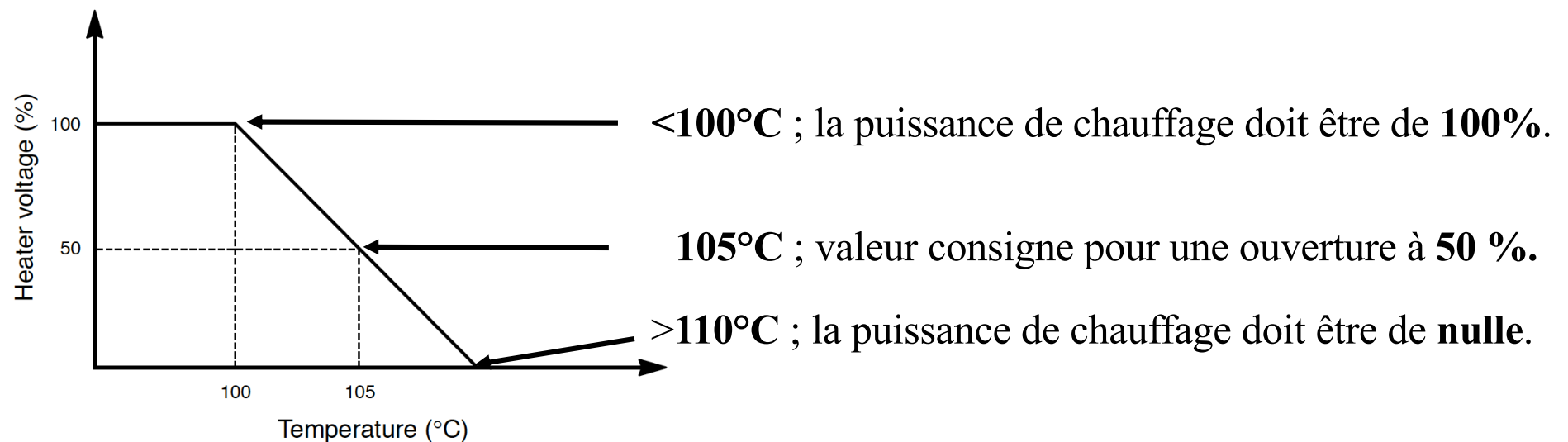


❑ Proportionnelle (P)

Dans un contrôleur proportionnel, la variable manipulée est **ajustée proportionnellement** en fonction de la variation de la sortie réelle par rapport à la sortie souhaitée.

Ex. La tension électrique d'un l'appareil de chauffage est diminuée proportionnellement à la température à laquelle elle dépasse le niveau défini.

❑ La caractéristique de transfert d'un régulateur proportionnel



La tension à appliquer au dispositif de chauffage peut donc être déterminée graphiquement à partir de la caractéristique.

Voir les diapositives pour compléter cette partie du cours

1. Operator Generic Fundamentals

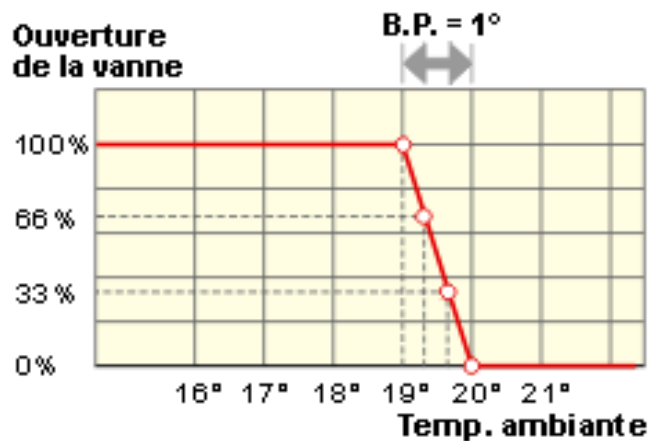
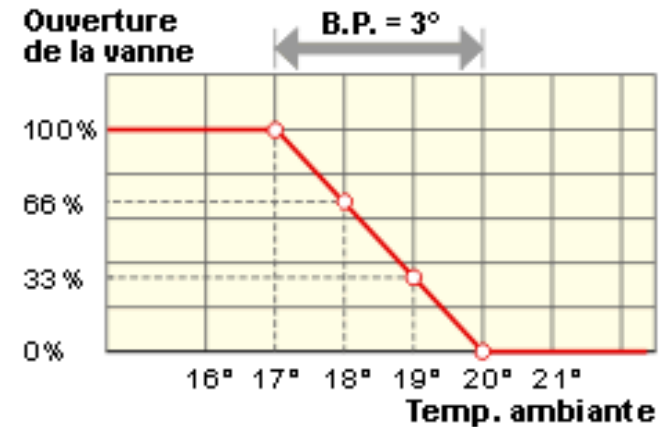
Planification d'expériences en formulation : optimisation

Planification d'expériences en formulation : criblage

Évaluation sensorielle et formulation

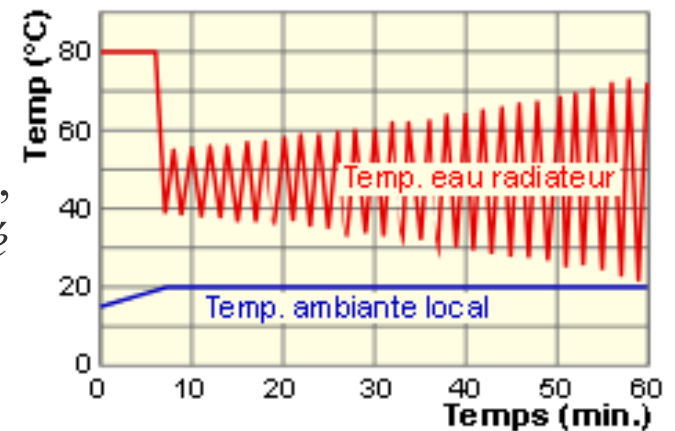
❑ Diminuer la plage de température qui génère l'ouverture d'une vanne de chauffe ?

Si la vanne de chauffe était à 100 % ouverte en *dessous* de 17°C ; écart de 3° par rapport à la consigne (20°C).



Si la vanne était 100 % ouverte en *dessous* de 19°C, elle se stabiliserait à 33 % de sa valeur pour une température ambiante de 19,66°C.

Avec une bande proportionnelle trop courte, le système passe de *trop ouvert* à *trop fermé* (osciller), parfois sans pouvoir se stabiliser.



les constructeurs de vannes thermostatiques n'indiquent pas la température de consigne mais bien des chiffres 1-2-3.....

❑ Proportionnelle intégrale (PI)

En agissant avec une force **proportionnelle (P)**
à *l'écart* entre l'ambiance et la consigne

Mais !
➔

Un écart
subsiste en permanence.

Solution !
➔

Renforcer l'intervention

On aura deux composantes

1 ➔

**La force proportionnelle
à l'écart**

2 ➔

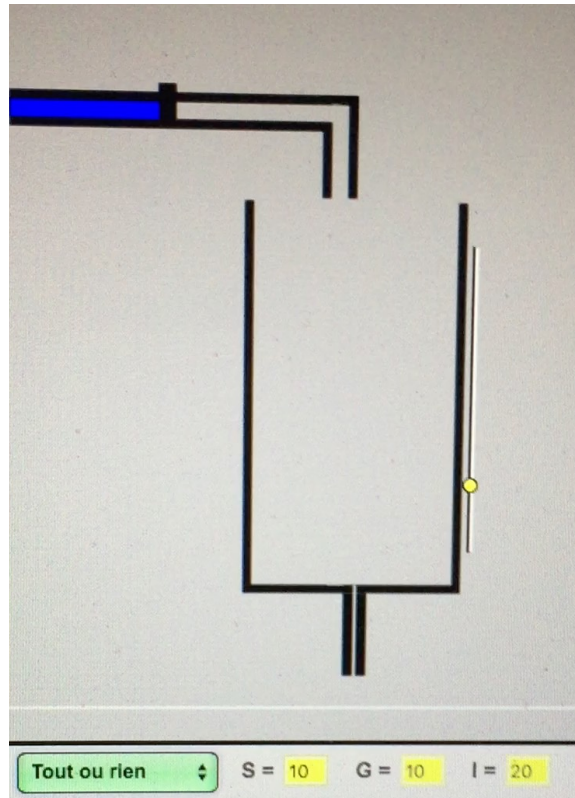
**La force proportionnelle
à l'intégration de l'écart dans le temps**

C'est-à-dire proportionnelle à la somme de
tous les écarts mesurés en permanence

- ➔ Si la température se stabilise à 19°C par la composante proportionnelle
- ➔ Un écart de 1°C subsiste.
- ➔ Le régulateur va mesurer cet écart et l'additionner à la valeur d'une case "mémoire" sur tous les "pas de temps"
- ➔ L'ouverture de la vanne sera donnée par la somme des 2 composantes
- ➔ Tant que la consigne ne sera pas atteinte, la *composante Intégrale augmentera*
- ➔ La vanne s'ouvrira un peu plus, jusqu'à atteindre la consigne (écart nul)

Remarques

- Si la consigne est dépassée, l'écart sera négatif et la composante intégrale diminuera
- Travail de la composante intégrale **I** seule n'est pas efficace pour les variations de la demande thermique, car elle est trop lente pour réagir efficacement
- La composante **P** fait le gros du travail, puis la composante **I** affine dans le temps
- Pour simplifier



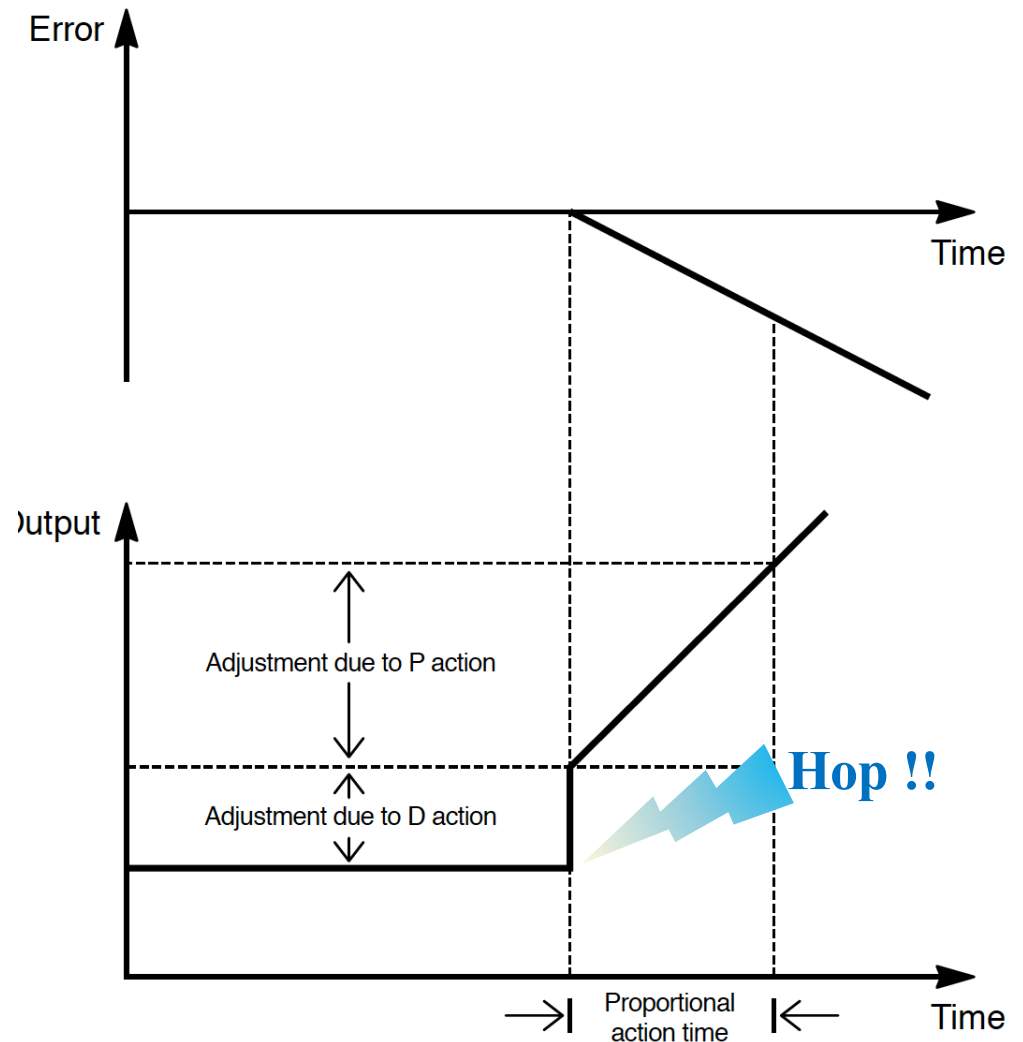
❑ Proportionnelle intégrale-dérivée (PID)

La combinaison de ces trois modes de contrôle (PID) convient mieux :

- ✓ Régulation des processus complexes
- ✓ Les cas où les fluctuations de sortie sont importantes et soudaines.

L'action dérivée

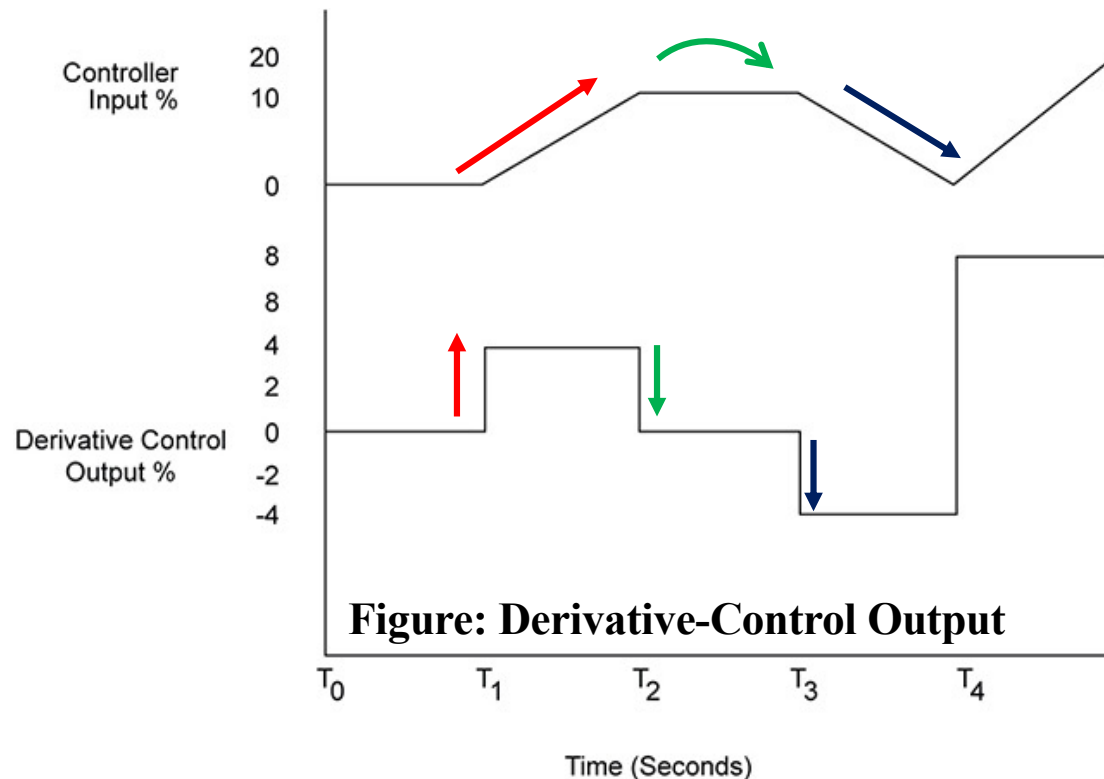
- ✓ Elle répond au taux de changement du **signal d'erreur** (au début) et non à l'**amplitude de l'erreur** (à la fin)
- ✓ Elle incorpore un **terme** dans la loi de commande, qui est la *première dérivée* du signal d'erreur



- ✓ Elle facilite le décalage de la bande proportionnelle (haut/bas) pour **compenser** l'évolution rapide des sorties :

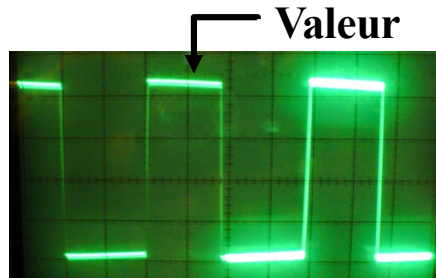
Si la sortie fait un **saut** soudain, l'action dérivée amène immédiatement la sortie au point de consigne.

Si la sortie **change progressivement** à une vitesse constante, la sortie suit le point de consigne à une vitesse similaire à l'action proportionnelle.

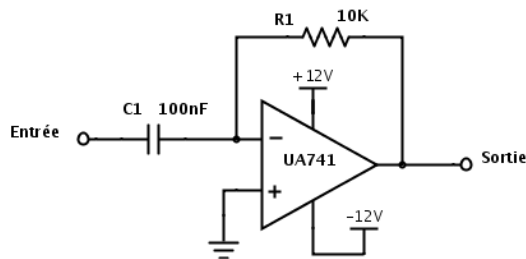


Ce mode permet de **compenser** l'évolution rapide des sorties : la régulation suit **le niveau de la consigne** à une **vitesse proportionnelle** à la vitesse de changement du **signal d'erreur**.

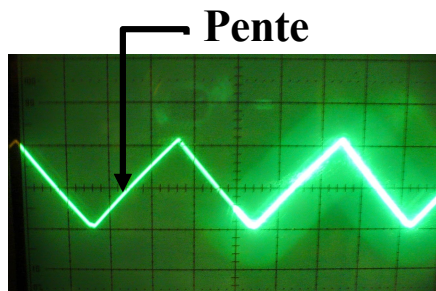
❑ Pour quoi on parle de dérivée du signal



Signal carré



C'est le **différentiateur** qui transforme le signal changeant en signal d'amplitude constante

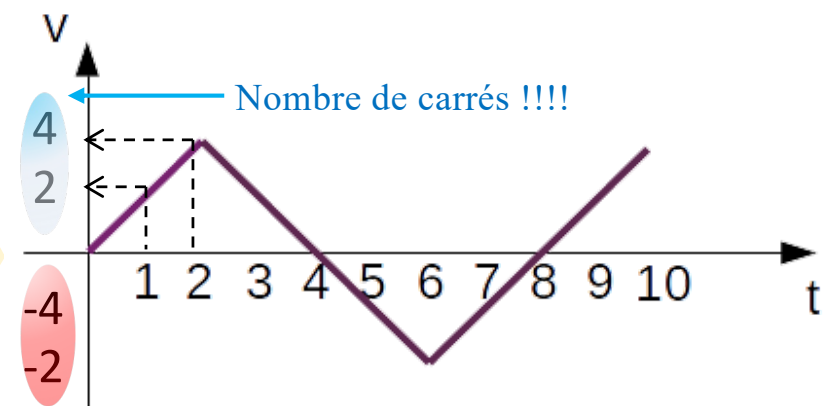
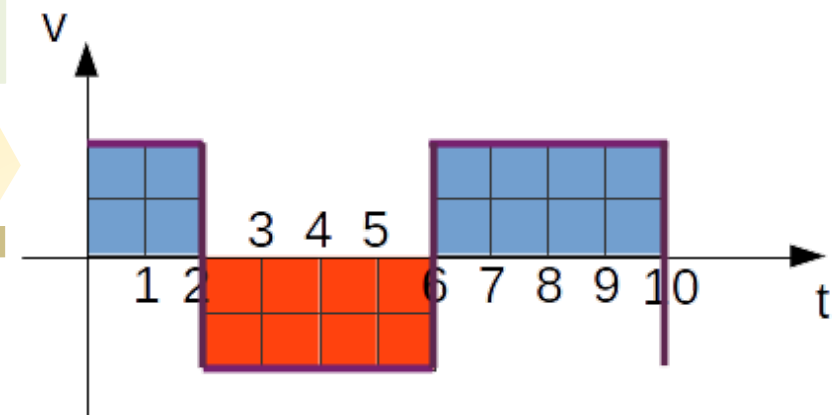
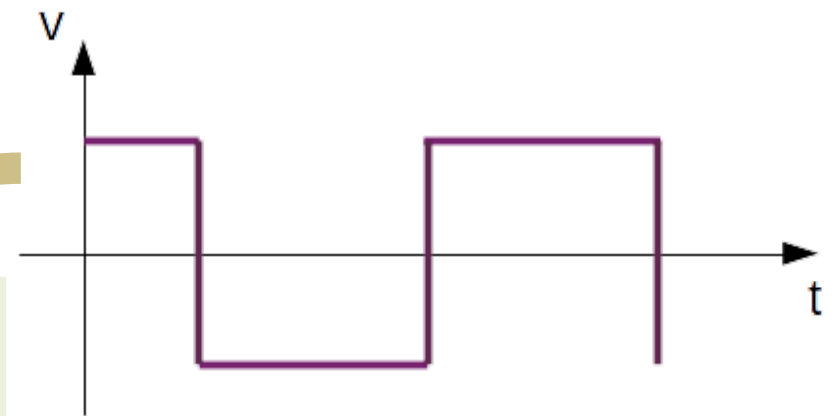


Signal triangulaire

Faire la dérivée !!!

Faire l'intégrale :
Diviser l'air sous la courbe en petits carrés

Tracer l'aire
en fonction du temps



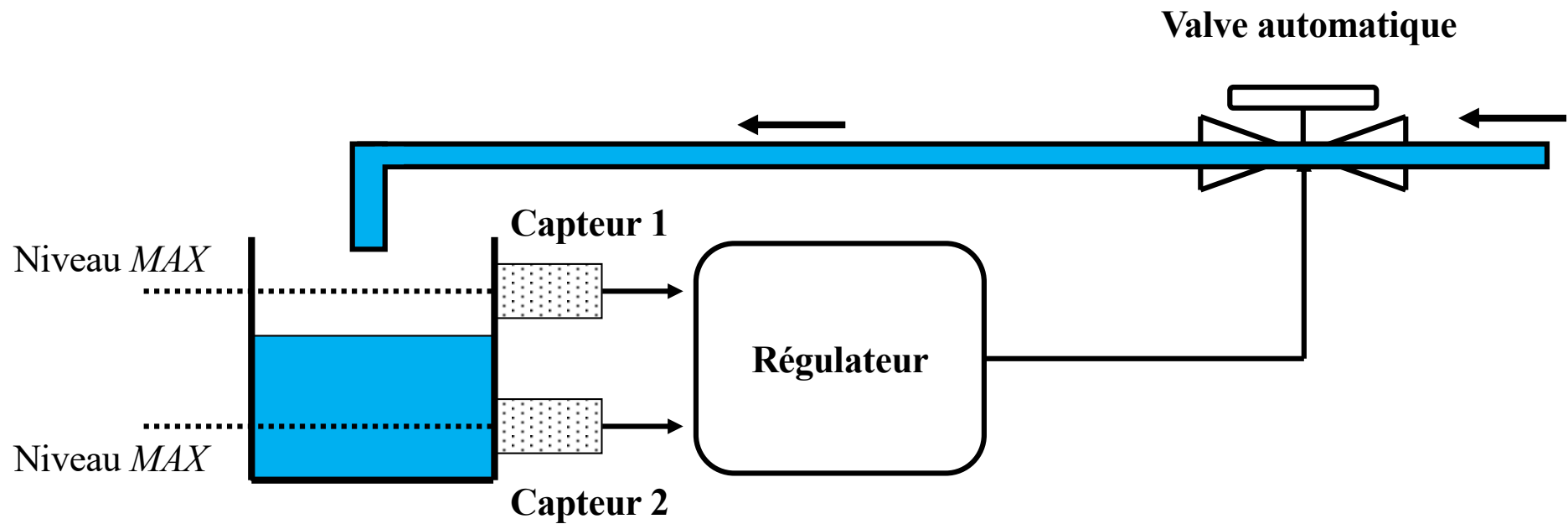


Rappelez vous !

**Le rôle de l'action proportionnelle
Est d'accélérer
La réponse du procédé**

**Le rôle de l'action intégrale
Est d'annuler
L'écart statique**

**Le rôle de l'action dérivée
Est de compenser
Les effets du temps mort du procédé**



Les mesures réalisés par les **capteurs 1 et 2** permettent par le biais du **régulateur** de régler le **niveau d'eau** dans le récipient.