REGULATION

4è Année

Option ÉLECTRONIQUE

EDITION 2025



CONFORME AU PROGRAMME NATIONAL

Préliminaires

1. Objectifs Généraux du Cours

L'objectif fondamental de ce cours est d'initier l'élève à la science de la **régulation automatique**, une discipline transversale qui constitue le cerveau des systèmes industriels modernes. Située au carrefour de l'électronique de puissance, de l'électrotechnique et de l'informatique industrielle, la régulation est le langage qui permet de donner des ordres à un processus, de mesurer sa réponse et de corriger intelligemment son comportement pour atteindre un objectif précis. Ce cours vise à faire de l'élève un "polyglotte" technique, capable de dialoguer avec n'importe quel système asservi, qu'il s'agisse de maintenir la température d'un four, la vitesse d'un moteur ou le niveau d'un réservoir.

- **De la Boucle Ouverte à l'Intelligence de la Boucle Fermée**

Ce manuel établit une distinction capitale, fondement de toute la discipline : la différence entre la commande en boucle ouverte et la commande en boucle fermée (ou rétroaction).

- **La commande en boucle ouverte** est une commande "aveugle", qui exécute une consigne sans se soucier du résultat. C'est l'interrupteur simple : on appuie, la lampe s'allume, mais rien ne garantit l'intensité lumineuse souhaitée.
- **La commande en boucle fermée**, ou **système asservi**, est une commande "intelligente". Elle mesure en permanence la grandeur de sortie (la variable régulée) et la compare à la valeur désirée (la consigne). L'écart entre les deux, appelé l'erreur $e(t) = y_{consigne}(t) - y_{mesure}(t)$, est utilisé pour ajuster l'action de commande.

L'ambition de ce cours est de faire de l'élève un architecte de ces boucles de rétroaction, le cœur battant de l'automatisation, qui garantissent la précision et l'adaptation des processus face aux perturbations.

- **Modéliser pour Prédire : L'Art de la Représentation Systémique**

On ne peut commander efficacement ce que l'on ne comprend pas. Un objectif majeur est donc de former l'élève à l'art de la **modélisation**. Il apprendra à traduire un processus physique complexe – un moteur, un système de chauffage, un convertisseur de puissance – en un modèle mathématique simplifié mais représentatif. L'outil privilégié sera le **schéma-bloc**, un langage

graphique universel qui permet de visualiser les interactions entre les différents composants d'un système. Chaque bloc sera caractérisé par sa **fonction de transfert**, notée $G(p)$, qui lie la sortie à l'entrée dans le domaine de Laplace :

$$G(p) = \frac{Y(p)}{U(p)}$$

Cette compétence de modélisation est cruciale : elle permet de simuler, de prédire et d'analyser le comportement d'un système avant même de construire ou de modifier le moindre circuit.

- **Analyser pour Stabiliser : La Quête de la Performance et de la Sécurité**

Une fois le système modélisé, l'objectif suivant est d'en **analyser le comportement dynamique**. L'élève apprendra à répondre à des questions essentielles :

- **Stabilité** : Le système va-t-il converger vers un état stable ou ses oscillations vont-elles augmenter jusqu'à la destruction ? L'étude des pôles de la fonction de transfert en boucle fermée sera ici centrale.
- **Précision** : Le système atteint-il précisément la consigne en régime permanent ? Quelle est l'erreur statique ?
- **Rapidité et Amortissement** : En combien de temps le système atteint-il sa cible ? Le fait-il en douceur ou avec des dépassements (overshoot) potentiellement dangereux ?

La maîtrise de ces critères d'analyse est la condition sine qua non pour concevoir des boucles de régulation qui assurent non seulement la performance des processus de production, mais aussi et surtout la **sécurité** des équipements et des opérateurs.

- **Former un Technicien-Régleur, Acteur de la Production Industrielle**

La finalité de ce parcours d'apprentissage est éminemment pratique. Il ne s'agit pas de former un théoricien, mais un **technicien supérieur immédiatement opérationnel**. À l'issue de ce cours, l'élève doit être capable de :

- **Lire et interpréter** un schéma de régulation (P&ID - Piping and Instrumentation Diagram).

- **Identifier** les composants d'une boucle : capteur, comparateur, correcteur, actionneur.
- **Comprendre** le rôle et l'effet des actions d'un correcteur PID (Proportionnelle, Intégrale, Dérivée).
- **Mettre en œuvre** des méthodes de réglage empiriques sur site pour optimiser une boucle de régulation.
- **Diagnostiquer** les dysfonctionnements courants d'un système asservi.

En somme, ce cours a pour ambition de forger un technicien capable de comprendre, d'analyser et de "régler" les systèmes qui pilotent l'industrie congolaise, contribuant ainsi directement à l'amélioration de la productivité, de la qualité et de la sécurité.

2. Compétences Visées

Au terme de cette formation, l'élève sera capable de "lire" un système automatisé complexe, non plus comme une boîte noire, mais comme un ensemble logique et interdépendant de fonctions. Il acquerra le langage et les outils pour traduire une réalité physique en un modèle mathématique exploitable.

- ***Analyse Fonctionnelle des Systèmes Asservis***

L'élève maîtrisera la décomposition de tout processus régulé en ses éléments constitutifs. Face à un système industriel, qu'il s'agisse d'un contrôle de température, de niveau ou de vitesse, il sera en mesure de :

- **Identifier la boucle de régulation** : Isoler la chaîne d'action (directe) et la chaîne de retour (mesure).
- **Définir le rôle de chaque bloc fonctionnel** :
- La **consigne** : la valeur désirée pour la grandeur à réguler.
- Le **capteur** : l'œil du système, qui mesure la grandeur de sortie réelle.
- Le **comparateur** : le cerveau initial, qui calcule l'écart (l'erreur) entre la consigne et la mesure.
- Le **correcteur (ou régulateur)** : l'intelligence du système, qui élabore un signal de commande à partir de l'erreur.
- L'**actionneur** : le bras du système, qui convertit le signal de commande en une action physique (vanne, moteur, résistance chauffante).

- Le **processus (ou système)** : l'environnement sur lequel on agit, caractérisé par ses propres dynamiques et perturbations.
- **Traduire le système en schéma-blocs** : Représenter graphiquement les interactions et les flux de signaux, créant ainsi une carte universelle et intelligible du système.

- ***Modélisation et Caractérisation Dynamique***

L'élève apprendra à anticiper le comportement d'un système avant même de le mettre en service. Cette compétence prédictive est cruciale pour le dimensionnement et la prévention des instabilités. Il pourra :

- **Établir la fonction de transfert** de systèmes simples, notamment les systèmes du premier et du second ordre, qui constituent les briques de base de la plupart des processus industriels.
- **Caractériser la réponse temporelle** d'un système à une sollicitation type (un échelon) :
- Pour un système du premier ordre, identifier le gain statique K et la constante de temps τ, qui définit sa "vitesse" de réaction.
- Pour un système du second ordre, déterminer le gain statique K, la pulsation propre non amortie ω_n et, de manière cruciale, le coefficient d'amortissement ζ. Il saura interpréter la valeur de ζ pour prédire si la réponse sera apériodique, critique ou oscillatoire.
- **Quantifier les performances** à partir d'une courbe de réponse : mesurer le temps de réponse à 5%, le temps de montée, le premier dépassement ($D_1\%$) et la pseudo-période des oscillations.

- **Maîtrise des Actions de Correction et des Régulateurs**

Cette compétence est le cœur du métier de régulation. L'élève ne se contentera plus de subir le comportement d'un système ; il apprendra à le sculpter, à le corriger et à l'optimiser en agissant sur le "cerveau" de la boucle : le régulateur.

- ***Compréhension des Actions Élémentaires (P, I, D)***

L'élève sera capable d'expliquer avec précision le principe, l'utilité et les limites de chaque action de régulation fondamentale :

- **L'action Proportionnelle (P)** : Comprendre qu'elle fournit une correction instantanée et proportionnelle à l'erreur $u(t) = K_p \cdot \epsilon(t)$. Il

saura qu'elle accélère la réponse mais laisse subsister une erreur statique en régime permanent.

- **L'action Intégrale (I)** : Expliquer son rôle de "mémoire" du système. Il comprendra que son action est proportionnelle à l'accumulation de l'erreur dans le temps $u(t) = K_i \int \epsilon(t)dt$, ce qui lui permet d'annuler l'erreur statique, garantissant ainsi la précision du système. Il en identifiera aussi l'inconvénient : un risque accru d'oscillations et d'instabilité.
- **L'action Dérivée (D)** : Saisir son rôle "d'anticipation". Il expliquera que son action est proportionnelle à la vitesse de variation de l'erreur $u(t) = K_d \frac{d\epsilon(t)}{dt}$, ce qui lui permet d'amortir les oscillations et de stabiliser les systèmes rapides, en agissant avant que l'erreur ne devienne trop grande.

- ***Analyse des Régulateurs Industriels Standards***

Fort de sa compréhension des actions élémentaires, l'élève pourra analyser et justifier le choix d'un régulateur industriel en fonction de l'application :

- **Régulateur Proportionnel (P)** : Pour les processus rapides ne nécessitant pas une grande précision.
- **Régulateur Proportionnel-Intégral (PI)** : Le cheval de bataille de l'industrie. Il saura que cette combinaison offre le meilleur compromis pour la majorité des applications (bonne rapidité, pas d'erreur statique).
- **Régulateur Proportionnel-Intégral-Dérivé (PID)** : Pour les processus complexes, rapides et exigeant à la fois précision et stabilité. Il comprendra que le PID offre le contrôle le plus complet et le plus performant.

- **Compétences Pratiques et Mise en Œuvre**

Le but ultime de cette formation est de rendre l'élève opérationnel. Les connaissances théoriques sont consolidées par des compétences pratiques, faisant de lui un technicien capable de passer du schéma à l'atelier.

- ***Implémentation Électronique des Correcteurs***

L'élève saura traduire les équations mathématiques des correcteurs en circuits électroniques fonctionnels. Il sera capable de :

- **Concevoir et réaliser des correcteurs analogiques** (P, PI, PID) à l'aide d'amplificateurs opérationnels (AOP), de résistances et de condensateurs.
- **Justifier le choix des composants** pour obtenir les gains K_p, K_i et K_d désirés.
- **Tester et valider** le fonctionnement de ses montages en laboratoire.
- ***Réglage Empirique et Optimisation***

L'élève acquerra la compétence la plus valorisée sur le terrain : la capacité à "régler" un processus réel. Il apprendra à dialoguer avec le système pour en obtenir les meilleures performances. Pour cela, il sera capable de :

- **Appliquer des méthodes de réglage empiriques** reconnues, comme les méthodes de Ziegler-Nichols (en boucle ouverte et en boucle fermée).
- **Interpréter la réaction du système** lors des essais (pompage, réponse indicielle) pour en déduire les paramètres du régulateur.
- **Ajuster manuellement et de manière itérative** les paramètres P, I et D pour atteindre un compromis optimal entre rapidité, précision et stabilité, en fonction du cahier des charges du processus.

3. Approche Pédagogique

L'ensemble du cours est articulé autour du concept fondamental et universel de la **boucle de rétroaction (ou boucle fermée)**. Cette structure est le socle de tout système automatisé moderne, qu'il soit industriel, électronique ou mécanique. La démarche pédagogique consiste à faire de ce concept, non pas une notion abstraite, mais un outil d'analyse concret. L'élève apprendra à identifier systématiquement les composantes de cette boucle dans n'importe quel système asservi :

- La **consigne (w)** : la valeur désirée pour la grandeur à réguler.
- La **mesure (y_m)** : la valeur réelle de la grandeur, captée par un capteur.
- Le **comparateur** : l'élément qui calcule l'écart, ou **erreur ($ = w - y_m $)**, entre la consigne et la mesure.
- Le **correcteur (ou régulateur)** : le "cerveau" du système, qui élabore une loi de commande à partir de l'erreur.

- La **commande (u)** : le signal de sortie du correcteur.
- L'**actionneur et le processus** : les éléments qui agissent sur le système pour modifier la grandeur réglée.

Cette décomposition systématique est le premier pas vers la maîtrise de la discipline.

- **3.2. Une Progression Logique : de la Description à la Synthèse**

La complexité de la régulation est abordée par paliers successifs et logiques, conçus pour construire une compréhension solide et durable.

- ***3.2.1. De la Description Qualitative à la Modélisation Mathématique***

Dans un premier temps, l'élève apprend à décrire qualitativement le fonctionnement d'un système asservi. Cette étape est immédiatement suivie par l'apprentissage de la modélisation, qui traduit le comportement physique en langage mathématique. L'outil privilégié est le **schéma-bloc**, qui permet de représenter visuellement les interactions entre les différentes composantes du système. Chaque bloc est associé à sa **fonction de transfert** dans le domaine de Laplace, un outil puissant pour l'analyse des systèmes linéaires. Par exemple, un processus du premier ordre sera modélisé par :

$$G(p) = \frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{K}{1 + \tau p}$$

Où K représente le gain statique du système et τ sa constante de temps.

- ***3.2.2. L'Analyse Comparative des Performances***

Une fois le système modélisé, l'enjeu est d'évaluer sa performance selon trois critères cardinaux, qui seront systématiquement étudiés pour chaque configuration : 1. **La Précision** : C'est la capacité du système à atteindre la consigne en régime permanent. Elle est quantifiée par l'erreur statique $ *{ss}* .Unebonnerégulationviseuneerreurstatiquenulleoulaplusfaiblepossible.2.** LaRapidité ** :Ellecaractériselavitessederéactiondusystèmefaceàunchangementdeconsigneouàuneperturb t_m)ouletempsderéponseà5t{r5%}).3.** LaStabilité ** :C'estlacapacitédusystèmeàretourneràunétatd'équilibreaprèsunesollicitation,sansoscillatio D%$) est un indicateur clé de la stabilité relative.

- ***3.2.3. La Synthèse des Correcteurs : Le Savoir-Faire du Technicien***

La partie la plus opérationnelle du cours est consacrée à la synthèse des correcteurs. L'élève ne se contente plus d'analyser un système existant, il apprend à le modifier pour qu'il réponde à un cahier des charges précis. L'étude comparative des actions de correction est au cœur de cette compétence :

- **L'action Proportionnelle (P)** : Agit sur le présent. Rapide, mais laisse subsister une erreur statique.
- **L'action Intégrale (I)** : Agit sur le passé. Annule l'erreur statique, mais peut dégrader la stabilité et ralentir le système.
- **L'action Dérivée (D)** : Agit sur le futur. Anticipe les variations, améliore la stabilité et la rapidité, mais est sensible au bruit de mesure.

La combinaison de ces actions mène au régulateur industriel par excellence, le **PID (Proportionnel - Intégral - Dérivé)**, dont la loi de commande est :

$$u(t) = K_p\epsilon(t) + K_i\int_0^t \epsilon\,(\tau)d\tau + K_d\frac{d\epsilon(t)}{dt}$$

Le cours aboutit sur les méthodes de réglage pratiques de ces coefficients, préparant l'élève à intervenir concrètement sur un système industriel.

- **3.3. Ancrage Industriel Congolais : Du Concept à la Réalité**

Pour que la théorie ne reste pas lettre morte, elle est systématiquement illustrée par des études de cas issues du tissu industriel congolais. Ces exemples concrets permettent à l'élève de visualiser l'impact direct de la régulation sur la productivité, la qualité et la sécurité des processus nationaux.

- **Étude de cas 1 : Régulation de niveau dans les épaississeurs miniers du Katanga.**
- **Objectif :** Maintenir un niveau de pulpe constant pour garantir une séparation solide/liquide optimale.
- **Grandeurs :** Consigne = niveau cible ; Mesure = capteur de niveau à ultrasons ou radar ; Commande = vitesse de la pompe de soutirage.

- **Enjeu :** Maximiser le rendement de la concentration du minerai, éviter les débordements (pertes de matière) ou les désamorçages de pompe (usure du matériel).
- **Étude de cas 2 : Régulation de température dans les fours de la cimenterie de Lukala.**
- **Objectif :** Suivre un profil de température très précis dans le four rotatif pour assurer la clinkérisation correcte.
- **Grandeurs :** Consigne = température de cuisson (ex: 1450°C) ; Mesure = pyromètre optique ; Commande = débit du combustible (charbon pulvérisé, gaz).
- **Enjeu :** Garantir la qualité et la résistance mécanique du ciment produit, optimiser la consommation énergétique.
- **Étude de cas 3 : Régulation de vitesse d'une turbine hydroélectrique sur le site de Zongo.**
- **Objectif :** Maintenir la vitesse de rotation de l'alternateur rigoureusement constante (ex: 375 tr/min) pour garantir une fréquence du réseau électrique stable à 50 Hz, quelle que soit la demande des consommateurs.
- **Grandeurs :** Consigne = vitesse de référence ; Mesure = tachymètre sur l'arbre de la turbine ; Commande = ouverture des vannes directrices qui admettent l'eau.
- **Enjeu :** Stabilité du réseau électrique national, prévention des pannes et protection des équipements connectés au réseau.

PREMIÈRE PARTIE : INTRODUCTION AUX SYSTÈMES ASSERVIS ET À LA BOUCLE DE RÉGULATION ⛓

Présentation de la partie

Bienvenue au cœur de la régulation. Cette première partie n'est pas une simple introduction ; elle constitue le socle, l'alphabet et la grammaire sur lesquels reposera toute votre compréhension de l'automatique. Avant de pouvoir régler, corriger ou optimiser un système industriel complexe, il est impératif de maîtriser son langage et de comprendre sa logique fondamentale. L'objectif ici est de vous faire passer du statut d'observateur passif à celui d'analyste capable de décoder le comportement d'un processus. Nous allons établir ensemble les concepts qui transforment une machine "aveugle" en un système "intelligent", capable de s'adapter et de maintenir une performance constante face aux aléas de la production.

- ### Boucle Ouverte vs. Boucle Fermée : La Naissance de la Régulation

La distinction entre ces deux modes de commande est le point de départ absolu de notre discipline. Comprendre cette différence, ce n'est pas seulement apprendre une définition, c'est saisir l'essence même de ce qui rend un système autonome et fiable.

- ### *La Commande en Boucle Ouverte : L'Action sans Réflexion*

Imaginez un simple grille-pain. Vous réglez une minuterie (la commande) et l'appareil chauffe pendant la durée définie, que votre tranche de pain soit fine, épaisse, fraîche ou congelée. Le résultat est incertain. C'est le principe de la **boucle ouverte** : le système exécute une consigne sans jamais vérifier si l'objectif (le degré de grillage souhaité) est atteint.

- **Principe :** L'action de commande est indépendante de la sortie du système.
- **Avantages :** Simplicité, faible coût.
- **Inconvénients :** Aucune adaptation aux perturbations (variations de la tension électrique, nature du pain, etc.), manque de précision.

Ce type de commande est inacceptable pour les processus industriels critiques où la précision est non négociable.

- ***La Commande en Boucle Fermée : L'Art de l'Adaptation Continue***

Reprenons notre exemple et imaginons maintenant un four industriel de cimenterie. La température doit être maintenue à 1450°C avec une précision extrême. On ne peut pas se contenter d'envoyer une quantité fixe de gaz et espérer que tout se passe bien. C'est ici qu'intervient la **boucle fermée**, ou **système asservi**.

Le système mesure en permanence la température réelle à l'intérieur du four grâce à un capteur (un thermocouple). Cette mesure est ensuite comparée à la température désirée (la consigne). S'il y a un écart, le système ajuste automatiquement le débit de gaz pour corriger la température. C'est cette **rétroaction** (feedback) – le retour d'information de la sortie vers l'entrée – qui est la pierre angulaire de toute régulation. Le système ne se contente plus d'agir, il **réagit** et s'adapte.

- **Anatomie d'une Boucle de Régulation**

Pour mettre en œuvre cette intelligence, une boucle de régulation est toujours constituée des mêmes éléments fonctionnels, quel que soit le domaine d'application (électronique, mécanique, chimique…). Votre rôle de technicien sera de savoir identifier, comprendre et interfacer chacun de ces composants.

1. **La Consigne ($W(p)$ ou SP) :** C'est la valeur que l'on souhaite atteindre et maintenir. C'est l'objectif fixé par l'opérateur (ex: 50 Hz pour la fréquence d'un groupe électrogène, 20°C pour une climatisation).
2. **Le Comparateur :** C'est le premier maillon de l'intelligence du système. Il calcule en temps réel l'**écart** (ou l'erreur) $ (p) $ entre la consigne $W(p)$ et la valeur réellement mesurée $Y_m(p)$. Son opération est une simple soustraction : $ (p) = W(p) - Y_m(p) $.
3. **Le Correcteur (ou Régulateur) :** C'est le cerveau de la boucle. À partir de l'erreur calculée, il élabore l'ordre de commande $U(p)$ à envoyer pour annuler cette erreur. C'est lui qui implémente les fameuses actions P, I, et D que nous étudierons en détail.
4. **L'Actionneur (ou Organe de réglage) :** C'est le muscle du système. Il convertit l'ordre de commande (souvent un signal électrique de faible puissance) en une action physique capable d'influencer le processus (ex: une vanne qui s'ouvre, un moteur qui accélère, une résistance qui chauffe).

5. **Le Procédé :** C'est le système physique que l'on cherche à maîtriser (le four, le moteur, le niveau d'eau dans un barrage hydroélectrique comme celui d'Inga). Il est caractérisé par sa propre dynamique et est soumis à des perturbations.
6. **Le Capteur :** Ce sont les yeux et les oreilles de la boucle. Il mesure la grandeur physique à réguler (la sortie du procédé, $Y(p)$) et la transforme en un signal (généralement électrique) exploitable par le comparateur, $Y_m(p)$. La qualité du capteur conditionne la qualité de toute la régulation.

- **Le Schéma Fonctionnel : La Carte d'Identité d'un Système**

Représenter un système complet avec tous ses composants électriques, mécaniques et fluidiques serait rapidement illisible et inutilisable pour l'analyse. L'automatique utilise donc un langage graphique universel : le **schéma fonctionnel** (ou schéma-blocs).

Dans cette représentation, chaque élément de la boucle de régulation (correcteur, actionneur, procédé, capteur) est modélisé par un bloc rectangulaire, caractérisé par sa **fonction de transfert**, notée par exemple $G(p)$. Les signaux (consigne, erreur, commande, mesure…) sont représentés par des flèches qui lient ces blocs.

L'immense avantage de cet outil est qu'il permet de :

- **Visualiser** clairement le flux d'information et les interactions au sein du système.
- **Simplifier** des systèmes complexes en manipulant les blocs selon des règles algébriques précises.
- **Analyser** mathématiquement le comportement global du système (stabilité, rapidité, précision) en combinant les fonctions de transfert de chaque bloc.

La maîtrise de la lecture, de la construction et de la simplification des schémas fonctionnels est la compétence fondamentale que vous développerez dans cette première partie. Elle est la clé qui vous ouvrira les portes de l'analyse et du réglage de n'importe quel système asservi.

CHAPITRE 1 : CONCEPTS FONDAMENTAUX DES SYSTÈMES AUTOMATISÉS

1.1. L'automatisme et la commande

Imaginez un instant le barrage hydroélectrique d'Inga. Pour maintenir une production d'électricité stable, il faut réguler le débit de l'eau qui s'engouffre dans les turbines. Autrefois, un opérateur, les yeux rivés sur des cadrans, aurait dû manœuvrer manuellement une vanne gigantesque. Une tâche répétitive, épuisante et sujette à l'erreur humaine. Aujourd'hui, cette tâche est confiée à un système qui opère seul, 24 heures sur 24, avec une précision infaillible.

Ce passage du geste humain à l'action autonome d'une machine est au cœur de notre première étude. Nous entrons dans le monde de l'**automatisme**.

L'automatisme est la science et l'ensemble des techniques qui permettent de concevoir et de réaliser des dispositifs capables d'accomplir une série d'opérations sans aucune intervention humaine. Un système automatisé est, par essence, une machine qui a été rendue "autonome" pour une tâche spécifique.

Pour fonctionner, un système automatisé doit être capable de trois choses fondamentales : 1. **Percevoir** son environnement (mesurer une température, détecter une position, lire un niveau d'eau). 2. **Décider** de l'action à entreprendre en fonction des perceptions et d'un objectif préétabli. 3. **Agir** sur son environnement pour atteindre cet objectif (chauffer, déplacer, ouvrir une vanne).

- **La Commande : Le Cerveau de l'Automate**

Si l'automatisme est la science globale, la **commande** en est le cœur intelligent, le chef d'orchestre. La commande est l'art d'appliquer des signaux d'entrée à un système (appelé **procédé**) afin que ses sorties se comportent d'une manière souhaitée.

Reprenons notre barrage.

- Le **procédé** est l'ensemble {Vanne + Turbine + Alternateur}.
- La **sortie** que l'on veut maîtriser est la fréquence du courant électrique produit (qui doit être de 50 Hz en RDC).
- L'**objectif** est donc de maintenir cette fréquence à sa valeur de consigne : 50 Hz.

- La **commande** est l'action calculée par le système de régulation pour ajuster l'ouverture de la vanne. Si la fréquence baisse, la commande va ordonner d'ouvrir davantage la vanne pour accélérer la turbine. Si la fréquence augmente, elle la fermera légèrement.

La commande consiste donc à élaborer la "loi" ou la "stratégie" qui va piloter le procédé pour qu'il atteigne et maintienne un objectif fixé, que l'on nomme la **consigne**. 🎯

- ***Automatisme vs. Commande : Quelle différence ?***

Il est crucial de bien distinguer ces deux termes qui sont souvent, à tort, utilisés de manière interchangeable.

- **L'automatisme** est le concept général. Il englobe tout : les capteurs qui mesurent, les actionneurs qui agissent, le câblage, l'alimentation électrique, et bien sûr, le système de commande. Un automate programmable industriel (API) est un composant typique des systèmes d'automatisme.
- **La commande** est une discipline plus théorique et mathématique au sein de l'automatisme. Elle se concentre sur l'élaboration de l'algorithme, de la logique de décision. C'est le "software" ou le "cerveau" 🧠 qui analyse les mesures et calcule les ordres à envoyer aux actionneurs. La régulation PID, que nous étudierons en détail, est une stratégie de commande.

En résumé : > L'**automatisme** construit le corps du robot (les bras, les yeux, les muscles). La **commande** programme son cerveau pour qu'il sache quoi faire de son corps.

Dans ce cours, nous allons apprendre à programmer ce cerveau. Nous allons découvrir les principes qui permettent à une machine non seulement d'exécuter une tâche, mais de s'adapter, de se corriger et de maintenir une performance optimale face aux perturbations du monde réel. Maîtriser la commande, c'est acquérir le pouvoir de donner de l'intelligence aux systèmes électriques et industriels qui construisent l'avenir de notre pays.

1.2. La commande en boucle ouverte

La commande en boucle ouverte, également appelée commande directe ou "en chaîne ouverte", représente l'approche la plus fondamentale et la plus simple de l'automatisme. Son principe repose sur une confiance absolue dans le modèle du système à commander. L'action de commande est calculée et

appliquée une seule fois, en se basant uniquement sur la consigne (l'objectif à atteindre), sans jamais vérifier si le résultat obtenu est conforme à ce qui était attendu.

Imaginez un grille-pain domestique simple. L'utilisateur règle une minuterie (la consigne) pour, par exemple, 3 minutes. Le grille-pain applique de la chaleur pendant exactement 3 minutes, puis s'arrête. Il ne mesure à aucun moment la couleur ou le "degré de grillage" de la tranche de pain (la sortie du système). L'action de commande (chauffer pendant 3 minutes) est prédéterminée et totalement indépendante du résultat réel. Si la tranche de pain était déjà à moitié grillée ou si la tension du réseau électrique était plus faible que la normale, le résultat final serait soit trop cuit, soit pas assez, mais le contrôleur n'en saurait rien.

- ***Schéma fonctionnel et définition***

Dans une structure en boucle ouverte, la chaîne d'information est unidirectionnelle. Elle part de la consigne pour aboutir à la sortie du processus, sans aucun retour d'information.

Le schéma-bloc est d'une simplicité limpide :

Consigne (W) → [Correcteur / Commande (C)] → Commande (U) → [Processus / Système (G)] → Sortie / Grandeur réglée (Y)

L'information circule dans un seul sens, de l'entrée vers la sortie. Le "Correcteur" (ou contrôleur) est calibré en amont, en supposant que le comportement du "Processus" est parfaitement connu et immuable.

Mathématiquement, en utilisant la transformée de Laplace, la relation entre la sortie $Y(s)$ et la consigne $W(s)$ est directe. Si $C(s)$ est la fonction de transfert du correcteur et $G(s)$ celle du processus, la commande est $U(s) = C(s) \cdot W(s)$. La sortie du système est alors :

$$Y(s) = G(s) \cdot U(s) = G(s) \cdot C(s) \cdot W(s)$$

La fonction de transfert globale du système en boucle ouverte, notée $F_{BO}(s)$, est donc simplement le produit des fonctions de transfert en cascade :

$$F_{BO}(s) = \frac{Y(s)}{W(s)} = C(s) \cdot G(s)$$

- ***Avantages : simplicité et stabilité intrinsèque***

Malgré ses limitations, la commande en boucle ouverte présente des avantages non négligeables qui justifient son utilisation dans certaines applications : 1. **Simplicité de conception et de mise en œuvre :**

L'absence de capteur pour mesurer la sortie et de boucle de retour simplifie considérablement le matériel et le logiciel. 2. **Coût réduit :** Moins de composants (pas de capteur, électronique de traitement du retour moins complexe) signifie un coût de fabrication et de maintenance plus faible. 3. **Stabilité garantie :** Le système ne peut pas devenir instable par nature. Les problèmes d'instabilité dans les systèmes asservis sont presque toujours liés aux effets de la boucle de rétroaction (retards, gains excessifs). En l'absence de boucle, ce risque est éliminé.

- **La Vulnérabilité aux Perturbations : Le Talon d'Achille**

La faiblesse majeure et rédhibitoire de la commande en boucle ouverte est son **incapacité totale à réagir aux perturbations**. Une perturbation est toute grandeur non sollicitée qui vient modifier le comportement du système et donc altérer sa sortie, la faisant dévier de la valeur souhaitée.

Imaginons un convoyeur dans une usine de traitement de cuivre à Lubumbashi, dont la vitesse est réglée en boucle ouverte pour transporter une quantité fixe de minerai par heure. Le moteur reçoit une tension de commande fixe pour tourner à, disons, 1 mètre par seconde.

- **Perturbation :** Une charge soudaine de roches beaucoup plus lourdes est déversée sur le tapis.
- **Effet :** Le poids supplémentaire va freiner le tapis, sa vitesse réelle va chuter à, par exemple, 0.8 m/s.
- **Conséquence :** Le système de commande, "aveugle" à cette baisse de vitesse, ne fera rien pour compenser. Il continuera d'envoyer la même tension de commande, et le débit de minerai sera inférieur à celui prévu, affectant toute la chaîne de production.

De même, la commande en boucle ouverte est sensible aux variations des caractéristiques internes du système (usure, vieillissement, changement de température). Un moteur dont les roulements s'usent aura plus de frictions et tournera moins vite pour la même tension de commande. La boucle ouverte ne compensera jamais cette dérive.

- ***Modélisation de l'effet d'une perturbation***

Reprenons notre schéma-bloc et introduisons une perturbation $P(s)$ qui s'ajoute à la sortie du processus.

Consigne (W) → [C(s)] → U(s) → [G(s)] → (+) → Sortie (Y) ↑ Perturbation (P)

L'équation de la sortie $Y(s)$ devient :

$$Y(s) = G(s) \cdot U(s) + P(s)$$

En remplaçant $U(s)$ par son expression en fonction de la consigne, $U(s) = C(s) \cdot W(s)$, nous obtenons :

$$Y(s) = G(s) \cdot C(s) \cdot W(s) + \underbrace{\quad}_{\text{Réponse à la consigne}} \quad \underbrace{P(s)}_{\text{Effet direct de la perturbation}}$$

Cette équation est cruciale. Elle montre que la sortie $Y(s)$ est la somme de deux termes : la réponse désirée à la consigne et un terme d'erreur qui est **égal à la perturbation elle-même**. Le système de commande n'a absolument aucun moyen de rejeter ou même d'atténuer l'effet de $P(s)$. Si une perturbation survient, elle se répercute intégralement sur la sortie, compromettant la précision et la fiabilité du système.

En conclusion, la commande en boucle ouverte n'est viable que pour des processus parfaitement connus, dont les caractéristiques ne varient pas dans le temps, et qui opèrent dans un environnement exempt de toute perturbation significative. Ces conditions étant extrêmement rares dans le monde industriel réel, cette approche montre rapidement ses limites. Cette limitation fondamentale nous conduit naturellement vers la nécessité d'un contrôle plus "intelligent", capable d'observer le résultat de ses actions et de les corriger en temps réel : c'est l'objet de la commande en boucle fermée.

1.3. La commande en boucle fermée (asservissement)

Si la commande en boucle ouverte (Chapitre 1.2) s'apparente à donner un ordre unique et aveugle à un système, la commande en boucle fermée, ou **asservissement**, lui confère des yeux, des sens et une forme d'intelligence. C'est le passage fondamental d'un automate rigide à un système réactif et autonome, capable de s'adapter aux imprévus.

Une machine en boucle ouverte est une esclave qui exécute une tâche sans jamais vérifier si le résultat est atteint. Si on lui demande de chauffer un four à 200°C pendant 10 minutes, elle chauffera 10 minutes, que la température finale soit de 180°C ou 220°C à cause d'une porte mal fermée ou d'une variation de tension du réseau de la SNEL.

L'asservissement, lui, transforme cette esclave en un artisan consciencieux. Il va non seulement exécuter la tâche, mais aussi **surveiller en permanence** son travail, **comparer** le résultat à l'objectif fixé et **corriger** ses propres actions pour atteindre la perfection. C'est le principe même qui nous permet

de conduire une voiture en ligne droite, de remplir un verre d'eau sans déborder ou de maintenir notre équilibre.

- **Le cœur du réacteur : Anatomie d'une boucle de régulation**

Le génie de la boucle fermée réside dans un cycle d'information perpétuel, une conversation ininterrompue entre la commande et le système. Ce dialogue s'articule autour de plusieurs éléments clés, formant une boucle de **rétroaction** (ou *feedback*).

1. **La Consigne (w)** : C'est l'objectif à atteindre, la valeur désirée. Exemples : la température de 24°C réglée sur un climatiseur, la vitesse de 90 km/h sur un régulateur de vitesse, le niveau d'eau cible dans un réservoir.
2. **Le Capteur** : C'est l'œil du système. Il **mesure** la grandeur physique de sortie du procédé (la température réelle de la pièce, la vitesse réelle du véhicule, le niveau d'eau actuel). Cette mesure (y_m) est l'image de la réalité.
3. **Le Comparateur** : C'est le point de jugement. Il reçoit en permanence la **consigne** et la **mesure** du capteur. Son unique rôle est de calculer la différence entre les deux. Cette différence est appelée l'**erreur** ou l'**écart** (ϵ). C'est le signal le plus important de toute la boucle.

La formule fondamentale qui régit tout système asservi est celle de l'erreur :

$$\epsilon(t) = w(t) - y_m(t)$$

Où :

- $ (t) $ est l'erreur à l'instant t.
- $ w(t) $ est la consigne (valeur voulue) à l'instant t.
- $ y_m(t) $ est la mesure de la sortie (valeur réelle) à l'instant t.

Si l'erreur est nulle, le système est parfait ! Si elle est positive ou négative, cela signifie qu'une action corrective est nécessaire.

4. **Le Correcteur (ou Régulateur)** : C'est le cerveau. Il analyse l'erreur (ϵ) et décide de l'action à entreprendre. C'est lui qui contient l'« intelligence » de la régulation (logique Proportionnelle, Intégrale, Dérivée - PID, que nous étudierons en détail). Sa décision se traduit par un signal de commande (u).

5. **L'Actionneur et le Procédé** : L'actionneur est le muscle (un moteur, une vanne, une résistance chauffante) qui reçoit la commande (u) du correcteur et agit sur le procédé (le système physique à contrôler). Le procédé réagit à cette action, ce qui modifie sa sortie (y), laquelle est à nouveau mesurée par le capteur, et la boucle recommence.

- ***Le schéma-bloc : La carte d'identité d'un système asservi***

Cette boucle est universellement représentée par un schéma-bloc. Savoir lire ce schéma, c'est comme savoir lire le plan d'un bâtiment pour un ingénieur en construction. Il montre le flux d'information et les interactions entre les composants. La sortie du procédé est "rebouclée" vers l'entrée (le comparateur) via le capteur, fermant ainsi la boucle.

- **L'asservissement au service du Congo : Exemples concrets**

Pour que ces concepts ne restent pas abstraits, projetons-les dans notre réalité industrielle.

- ***Cas d'école : La régulation de tension d'un groupe électrogène***

Sur un chantier à l'intérieur du pays, un groupe électrogène alimente les bétonnières et les soudeuses.

- **Consigne (w)** : Une tension stable de 230 V.
- **Procédé** : Le moteur diesel qui entraîne l'alternateur.
- **Perturbation** : Un ouvrier démarre une puissante soudeuse. La charge augmente brutalement, la vitesse du moteur a tendance à chuter, et la tension de sortie s'effondre.
- **Boucle fermée en action** :

1. **Capteur** : Un diviseur de tension mesure la sortie de l'alternateur. Il voit la tension chuter à 215 V.
2. **Comparateur** : Il calcule l'erreur : $ = 230 V - 215 V = +15 V $.
3. **Correcteur** (le régulateur de tension) : Il voit une erreur positive et ordonne d'augmenter la puissance.
4. **Actionneur** : Une électrovanne ou un servomoteur augmente l'injection de carburant dans le moteur diesel.

5. **Résultat** : Le moteur accélère, la tension de l'alternateur remonte vers 230 V, l'erreur diminue, et le système se stabilise.

Sans cette boucle, la tension resterait basse, endommageant les équipements et provoquant des soudures de mauvaise qualité. L'asservissement garantit la **robustesse** et la **qualité** de l'énergie fournie, malgré les perturbations.

- **Les super-pouvoirs de la boucle fermée**

En résumé, l'asservissement confère trois avantages décisifs par rapport à la boucle ouverte :

1. **La Précision** : Le système lutte en permanence pour annuler l'erreur, ce qui lui permet d'atteindre la consigne avec une grande exactitude, chose quasi impossible en boucle ouverte.
2. **Le Rejet des Perturbations** : Qu'il s'agisse d'une rafale de vent sur une antenne satellite, d'une porte ouverte dans une chambre froide ou d'une variation de charge sur un moteur, la boucle de régulation détecte l'effet de la perturbation sur la sortie et agit pour le compenser. Elle rend le système insensible à son environnement.
3. **La Robustesse face aux incertitudes du modèle** : Les composants d'un système vieillissent, s'usent, leurs caractéristiques changent. La boucle fermée s'adapte à ces changements lents, car elle se concentre sur le résultat final (la mesure) et non sur un modèle théorique parfait du système.

Maîtriser le concept de la boucle fermée, c'est détenir la clé de tous les systèmes automatisés modernes. Les chapitres suivants nous apprendront à analyser, régler et concevoir le cœur de cette boucle : le correcteur.

1.4. L'utilité et le schéma bloc général d'une boucle de régulation

Jusqu'à présent, nous avons exploré les composants des systèmes automatisés. Mais un assemblage de pièces, aussi sophistiqué soit-il, ne forme pas un système intelligent. L'intelligence, en automatisme, naît d'un concept fondamental : la **régulation**.

Pourquoi un système a-t-il besoin d'être "régulé" ? Ne suffit-il pas de lui donner un ordre et de s'attendre à ce qu'il l'exécute ? La réponse est non, car le monde réel n'est pas un laboratoire parfait. La régulation est la stratégie que nous mettons en place pour forcer un système à se comporter comme nous le

souhaitons, malgré les aléas, les imprévus et sa propre nature parfois capricieuse. C'est l'art de piloter un processus en regardant constamment dans le rétroviseur pour ajuster sa trajectoire.

L'utilité de la régulation se résume en trois missions capitales.

- ***Atteindre la cible avec une précision chirurgicale : l'amélioration de la précision***

Imaginez que vous devez maintenir la température d'un four de cimenterie à Lukala à exactement $1450\,^{\circ}\text{C}$. Vous pourriez calculer la quantité de gaz à injecter pour atteindre cette température et laisser le système fonctionner "en boucle ouverte". Mais que se passe-t-il si la composition du gaz change légèrement ? Si la température extérieure chute ? La température du four dérivera inévitablement de sa valeur idéale.

La régulation, par son principe de **rétroaction** (ou feedback), résout ce problème. Elle mesure en permanence la température réelle (Y) et la compare à la température désirée, la **consigne** (W). Si un écart (ϵ) apparaît, le système corrige immédiatement l'injection de gaz pour annuler cet écart. La régulation garantit donc que la sortie du système colle à la consigne avec la plus grande précision possible, bien au-delà de ce qu'un simple contrôle "à l'aveugle" pourrait accomplir.

- ***Rester stable face à la tempête : le rejet des perturbations***

Un système industriel n'opère jamais dans une bulle. Il est constamment soumis à des influences externes non désirées : les **perturbations**. Pour une turbine hydroélectrique à Zongo, une perturbation peut être une variation soudaine de la demande en électricité sur le réseau. Pour un tank de flottation dans une usine de traitement de cuivre au Katanga, ce peut être une modification de la concentration du minerai brut qui y entre.

Sans régulation, ces perturbations provoqueraient des variations importantes et indésirables de la grandeur de sortie (la vitesse de la turbine, le niveau du tank…). Le système deviendrait erratique et inefficace. La régulation a pour mission de détecter l'effet de ces perturbations sur la sortie et de générer une action de commande qui vient les **compenser**, les "rejeter". Un bon système de régulation rend le processus quasi-insensible aux agressions de son environnement, garantissant une production stable et de qualité.

- ***Dompter l'instabilité naturelle des systèmes : la stabilisation***

Certains systèmes sont, par nature, instables. L'exemple le plus simple est celui d'un balai que l'on essaie de faire tenir en équilibre sur un doigt. Sans une action corrective constante de votre part, il tombe. Il est "naturellement instable". De nombreux processus industriels ou aéronautiques partagent cette caractéristique. Un réacteur chimique peut avoir une réaction qui s'emballe, un avion de chasse moderne peut être aérodynamiquement instable pour être plus maniable.

Dans ces cas, la régulation n'est pas une simple amélioration ; elle est une **condition sine qua non** du fonctionnement. Le régulateur agit comme le cerveau qui empêche le système de diverger et de s'autodétruire. Il le force à rester dans une zone de fonctionnement stable et sûre.

- **La carte de notre voyage : Le Schéma Bloc Général**

Pour analyser, concevoir et comprendre tous ces phénomènes, l'automaticien dispose d'un langage universel : le **schéma-bloc**. Le schéma ci-dessous est le plus important de tout ce cours. Il représente l'anatomie de n'importe quelle boucle de régulation. Mémorisez-le, dessinez-le, appropriez-vous-le : il sera notre guide et notre référence constante.

$$ \Huge \begin{array}{ccccccc} & & & & \color{red}{P(p)} & & \\ & & & & \color{red}{\downarrow} & & \\ W(p) & \longrightarrow & \bigoplus & \longrightarrow & C(p) & \longrightarrow & U(p) & \longrightarrow & \overbrace{\box{G(p)}}^{\text{Processus}} & \longrightarrow & Y(p) \\ \text{Consigne} & & \text{Comparateur} & & \text{Correcteur} & & \text{Commande} & & & & \text{Sortie} \\ & & \ominus & & & & & & & & \downarrow \\ & & \uparrow & & & & & & & & | \\ Y_m(p) & \longleftarrow & \underbrace{\box{H(p)}}_{\text{Capteur}} & \longleftarrow & & & & & & & | \\ \text{Mesure} & & & & & & & & & \longleftarrow \end{array} $$

Chaque élément de ce schéma a un rôle précis que nous allons décortiquer tout au long de l'année :

- **La Consigne ($W(p)$)** : C'est la valeur que l'on souhaite atteindre. C'est l'ordre donné au système (ex: $22\,°C$ pour une climatisation, 1000 tours/minute pour un moteur).
- **Le Comparateur ($\oplus$)** : Son rôle est simple mais crucial. Il calcule en permanence la différence entre la consigne et la valeur réellement mesurée.

- **L'Écart ($\epsilon(p)$)** : C'est le résultat de cette comparaison, le signal d'erreur.

$$\epsilon(p) = W(p) - Y_m(p)$$

Si l'écart est nul, le système est parfait. S'il n'est pas nul, c'est le signal qui va déclencher une action.

- **Le Correcteur ou Régulateur ($C(p)$)** : C'est le cerveau de la boucle. Il reçoit le signal d'erreur $\epsilon(p)$ et, sur base de ses algorithmes (que nous étudierons en détail : P, PI, PID), il calcule et génère l'ordre à appliquer.
- **La Commande ($U(p)$)** : C'est l'action physique calculée par le régulateur (ex: la tension à appliquer au moteur, le degré d'ouverture d'une vanne).
- **Le Processus ($G(p)$)** : C'est le système physique que l'on cherche à commander (le moteur, le four, le tank…). Il reçoit la commande $U(p)$ et produit une sortie.
- **La Perturbation ($P(p)$)** : C'est l'influence externe non désirée qui agit sur le processus et tend à faire dévier sa sortie de la valeur souhaitée.
- **La Grandeur de Sortie ($Y(p)$)** : C'est la grandeur physique que l'on cherche à maîtriser (la vitesse réelle du moteur, la température réelle du four…).
- **Le Capteur ($H(p)$)** : Ce sont les "yeux" de la boucle. Il mesure la grandeur de sortie $Y(p)$ et la transforme en un signal utilisable par le comparateur.
- **La Mesure ($Y_m(p)$)** : C'est l'image de la sortie, renvoyée par le capteur vers le comparateur. Idéalement, un capteur est parfait ($H(p) = 1$) et donc $Y_m(p) = Y(p)$. En réalité, tout capteur a sa propre dynamique.

Cette boucle, où la sortie est "ramenée en arrière" (rétroaction) pour être comparée à l'entrée, est appelée une **boucle fermée**. C'est le fondement de toute la régulation automatique. Maîtriser ce schéma, c'est posséder la clé pour comprendre et agir sur l'infinie majorité des systèmes industriels modernes.

CHAPITRE 2 : LA BOUCLE DE RÉGULATION ET SES COMPOSANTS

2.1. Les grandeurs de la boucle : consigne, mesure, erreur, commande

Pour comprendre une boucle de régulation, il faut d'abord apprendre à parler son langage. Ce langage est universel et se compose de quatre "mots" essentiels, quatre signaux qui circulent en permanence pour maintenir un système en équilibre. Chacun de ces signaux transporte une information vitale. Les ignorer, c'est piloter un processus complexe les yeux bandés et les oreilles bouchées. Nous allons les décortiquer un par un, car ils sont le cœur battant de toute l'automatique.

- **La Consigne (w) : La Volonté du Régulateur**
- ***Définition et Rôle***

La **consigne**, notée $w(t)$ (de l'anglais *wanted value* ou de l'allemand *Wunschwert*), représente l'objectif à atteindre. C'est la valeur désirée, la cible, l'ordre que l'opérateur ou le superviseur donne au système. Elle est l'expression de notre volonté. Dans une boucle de régulation, tout le mécanisme s'articulera autour de cette unique mission : faire en sorte que la réalité rejoigne cette valeur de consigne.

Cette grandeur est externe au processus lui-même ; elle est fournie par l'utilisateur. Elle peut être :

- **Fixe** : On parle alors de **régulation**. L'objectif est de maintenir une grandeur constante malgré les perturbations.
- **Variable dans le temps** : On parle alors de **poursuite** ou d'**asservissement**. Le système doit suivre une trajectoire définie.

- ***Analogie et Contexte Congolais***

Imaginez le four d'une cimenterie comme celle de Lukala. Pour obtenir un clinker de qualité, la température de cuisson doit être maintenue de manière extrêmement précise à, disons, 1450 °C.

- **La consigne w est cette valeur de 1450 °C.** C'est l'objectif fixé par l'ingénieur de production pour garantir la qualité du ciment.

De même, pour une turbine du barrage hydroélectrique d'Inga, la consigne pourrait être une vitesse de rotation de 375 tours par minute pour générer un

courant à la fréquence de 50 Hz. C'est la **volonté** du réseau électrique national.

- **La Mesure (y) : Les Yeux du Système**
- ***Définition et Rôle***

La **mesure**, notée $y(t)$, est la valeur réelle, instantanée, de la grandeur physique que l'on cherche à contrôler. Elle est l'image fidèle de ce qui se passe *réellement* dans le processus. Sans mesure, la boucle de régulation est aveugle ; elle ne peut pas savoir si elle a atteint son objectif ou si elle en est loin. C'est le principe de la **rétroaction** (ou *feedback*) : on "regarde" le résultat de son action pour pouvoir la corriger.

Cette information est fournie par un **capteur** (ou un transmetteur) qui traduit une grandeur physique (température, vitesse, pression, niveau, pH…) en un signal électrique (tension, courant) compréhensible par le régulateur.

- ***Analogie et Contexte Congolais***

Reprenons l'exemple du four de cimenterie :

- **La mesure $y(t)$ est la température effective à l'intérieur du four**, lue en temps réel par un capteur spécialisé, un **thermocouple**. Cette température peut fluctuer à cause de la qualité du combustible ou de l'ouverture d'une trappe. C'est le **regard** que le système porte sur lui-même.

Dans une usine de traitement du cuivre au Katanga, si l'on veut réguler le pH d'une solution de lixiviation, la mesure $y(t)$ sera la valeur de pH donnée par une sonde pH-métrique plongée dans la cuve.

- **L'Erreur (ε) : Le Moteur de l'Action**
- ***Définition et Rôle***

L'**erreur**, notée $\epsilon(t)$ (lettre grecque epsilon), est le cerveau logique de la boucle. C'est elle qui quantifie l'écart entre ce que l'on veut et ce que l'on a. Mathématiquement, elle est la différence entre la consigne et la mesure.

$$\epsilon(t) = w(t) - y(t)$$

Le rôle de l'erreur est fondamental :

- Si $\epsilon(t) = 0$, l'objectif est atteint. Le système est à l'équilibre, aucune action corrective n'est nécessaire.

- Si $\epsilon(t) \neq 0$, il y a un écart. Le système doit agir pour annuler cette erreur.

Le signe de l'erreur est tout aussi crucial : il indique la **direction** de la correction à apporter. Un signe positif signifie généralement que la mesure est trop basse, un signe négatif qu'elle est trop haute.

- ***Analogie concrète***

Dans notre four à 1450 °C :

- Consigne $w = 1450$ °C.
- Le thermocouple mesure une température réelle de $y = 1445$ °C.
- L'erreur est donc $\epsilon = 1450 - 1445 = +5$ °C. Cette erreur positive signale au régulateur qu'il "manque" 5 degrés et qu'il faut donc chauffer davantage.

- **La Commande (u) : Le Bras Armé du Régulateur**
- ***Définition et Rôle***

La **grandeur de commande**, notée $u(t)$, est l'action corrective calculée par le régulateur à partir du signal d'erreur. C'est la décision, l'ordre envoyé à l'**actionneur** (ou organe de réglage) pour modifier le comportement du processus et ainsi réduire l'erreur. La commande est la conséquence directe de l'erreur.

L'actionneur est le "muscle" du système : il peut s'agir d'une vanne, d'un moteur, d'une résistance chauffante, d'une pompe… La commande $u(t)$ est le signal (souvent une tension de 0-10V ou un courant de 4-20mA) qui pilote cet actionneur.

- ***Analogie et Contexte Congolais***

Toujours avec notre four :

- L'erreur est de $\epsilon = +5$ °C.
- Le régulateur (le "cerveau") calcule une **commande** $u(t)$ appropriée. Par exemple, il peut décider d'augmenter le débit de combustible injecté dans le brûleur.
- Cette commande est envoyée à l'actionneur, qui est ici une **vanne motorisée** sur la conduite de combustible. La commande $u(t)$ va provoquer une ouverture plus grande de cette vanne.

Le résultat ? Plus de combustible est brûlé, la température du four augmente, la mesure $y(t)$ va se rapprocher de la consigne w, et l'erreur $\epsilon(t)$ va tendre vers zéro. La boucle est bouclée. Ces quatre grandeurs interagissent en une danse perpétuelle pour garantir la stabilité et la performance des processus industriels les plus critiques de notre pays.

2.2. Les fonctions de la boucle : comparateur, correcteur, actionneur, processus

Avant de disséquer chaque composant, il est essentiel de comprendre la philosophie de la boucle de régulation. Imaginez une équipe de chantier construisant un mur parfaitement vertical. Le chef d'équipe (la **consigne**) a l'objectif en tête : un mur droit. Un ouvrier (le **capteur**) utilise un fil à plomb pour mesurer en permanence la verticalité du mur. Il communique l'écart constaté (l'**erreur**) à un maçon expérimenté (le **correcteur**). Ce dernier ne se contente pas de constater l'écart ; il donne un ordre précis au manœuvre (l'**actionneur**) : "Pousse la brique de 2 millimètres vers la gauche !". Le manœuvre, avec sa force (l'**énergie**), déplace la brique. Le mur lui-même est le **processus** que l'on cherche à maîtriser.

La boucle de régulation fonctionne exactement sur ce principe de collaboration entre différentes fonctions, chacune ayant un rôle vital et irremplaçable. Nous allons maintenant détailler ces quatre fonctions fondamentales qui constituent le squelette de tout système asservi.

- **Le Comparateur : La Conscience du Système**

Le comparateur est le point de départ de toute action de régulation. C'est le gardien vigilant qui, sans cesse, confronte la réalité à l'objectif.

- ***Rôle et Fonction***

Sa fonction est d'une simplicité mathématique mais d'une importance capitale : il calcule en temps réel la différence entre la valeur de consigne $w(t)$ (la grandeur que l'on *souhaite* obtenir) et la valeur de la mesure $y_m(t)$ (l'image de la grandeur de sortie, fournie par le capteur). Le résultat de cette soustraction est un signal appelé **écart** ou **erreur**, noté $\varepsilon(t)$ (epsilon).

$$\varepsilon(t) = w(t) - y_m(t)$$

- Si $\varepsilon(t) > 0$, cela signifie que la mesure est inférieure à la consigne. Le système n'a pas encore atteint son objectif.
- Si $\varepsilon(t) < 0$, la mesure a dépassé la consigne. Le système est allé trop loin.

- Si $\varepsilon(t) = 0$, la situation est parfaite : la sortie est exactement celle désirée. C'est l'état que la régulation cherche à atteindre et à maintenir.

- ***Ancrage Congolais : Le Niveau du Bief d'Inga***

Prenons le cas de la régulation du niveau d'eau du bief amont du barrage d'Inga. La consigne $w(t)$ est le niveau optimal d'eau (par exemple, une altitude de 125 mètres) qui garantit une pression maximale sur les turbines sans risquer de déborder. Un capteur de niveau (un limnimètre) mesure en continu le niveau réel, donnant le signal $y_m(t)$. Le comparateur, un simple programme dans l'automate de supervision du barrage, effectue l'opération $125 - y_m(t)$. Si le résultat est +0.1 mètre, il faut faire monter le niveau ; s'il est -0.2 mètre, il faut l'abaisser. Ce signal d'erreur $\varepsilon(t)$ est la seule information transmise à l'étape suivante. Le comparateur ne sait pas quoi faire, il se contente de signaler l'état de l'erreur.

- **Le Correcteur (ou Régulateur) : Le Cerveau Stratégique**

Si le comparateur est la conscience, le correcteur est l'intelligence. Il reçoit l'information brute de l'erreur $\varepsilon(t)$ et élabore une stratégie pour l'annuler. C'est le composant le plus complexe et le plus "noble" de la boucle.

- ***Rôle et Fonction***

La fonction du correcteur est de générer un signal de commande, noté $u(t)$, à partir du signal d'erreur $\varepsilon(t)$. Contrairement au comparateur, son opération n'est pas une simple soustraction. Il applique un algorithme de calcul, une "loi de commande", qui détermine l'ampleur et la dynamique de la réponse.

$$u(t) = f\big(\varepsilon(t)\big)$$

La fonction f peut être plus ou moins sophistiquée. C'est elle qui contient les fameuses actions **Proportionnelle (P)**, **Intégrale (I)** et **Dérivée (D)** que nous étudierons en détail. Le choix et le réglage de ce correcteur déterminent toute la performance du système : sa rapidité, sa précision et sa stabilité. Un bon correcteur doit commander une action qui va non seulement corriger l'erreur actuelle, mais aussi anticiper son évolution pour éviter les oscillations ou les dépassements.

- ***Ancrage Congolais : Le Four de la Cimenterie de Lukala***

Imaginons la régulation de température d'un four à ciment. Une erreur de +20°C (four trop froid) est transmise au correcteur (le régulateur PID).

- Un correcteur simple (Proportionnel) dirait : "L'erreur est de 20°C, donc j'augmente le débit de carburant d'une quantité proportionnelle, disons 10%".
- Un correcteur plus intelligent (Proportionnel et Intégral) ajouterait : "L'erreur persiste depuis 2 minutes, donc en plus de l'action proportionnelle, j'ajoute progressivement un peu plus de carburant pour vaincre la résistance au changement et garantir que la température finisse par atteindre la consigne". C'est cette "intelligence" qui transforme une simple réaction en une véritable stratégie de régulation. Le signal de commande $u(t)$ qui en sort est un ordre précis (par exemple, une tension de 6.5 Volts) destiné à l'actionneur.

- **L'Actionneur : Le Bras Armé**

L'actionneur est le muscle de la boucle de régulation. Il fait le lien entre le monde "intelligent" des signaux de commande de faible puissance et le monde physique du processus, qui requiert une énergie conséquente.

- ***Rôle et Fonction***

L'actionneur reçoit le signal de commande $u(t)$ du correcteur et le convertit en une action physique capable de modifier le comportement du processus. Il est essentiellement un amplificateur de puissance. Le signal de commande est souvent un signal électrique standardisé (tension 0-10V, courant 4-20mA), tandis que l'action de sortie peut être un débit de fluide, une force mécanique, une quantité de chaleur, une vitesse de rotation, etc.

- ***Ancrage Congolais : La Variété des Muscles Industriels***
- **Régulation de débit :** Pour contrôler le débit d'acide dans les cuves de lixiviation d'une usine de cuivre au Katanga, la commande $u(t)$ est envoyée à une **vanne de régulation motorisée**. L'actionneur est le moteur de la vanne qui, en fonction de la tension reçue, ouvre ou ferme le clapet pour moduler le débit d'acide.
- **Régulation de vitesse :** Pour réguler la vitesse du tapis transportant le minerai à la sortie d'un concasseur, la commande $u(t)$ est envoyée à un **variateur de vitesse**. Cet appareil électronique de puissance module la fréquence et la tension d'alimentation du moteur électrique du tapis, ajustant ainsi sa vitesse avec précision. L'actionneur est ici le couple {variateur + moteur}.