

Chapitre I. Introduction aux systèmes asservis

I.1. Introduction

De nos jours, l'automatique s'est introduite dans quasiment tous les domaines qui affectent notre vie quotidienne à savoir : l'électroménager (machine à laver, réfrigérateur,...), les distributeurs de boisson, les ascenseurs, le transport, la robotique, l'aéronautique, l'économétrie...etc.

L'industrie a fait très largement appel à l'automatique : depuis l'introduction de robots dans les chaînes de montage dans le domaine de l'automobile remplaçant certaines interventions humaines jusqu'à la présence de ceux-ci dans des milieux trop hostiles pour l'homme (domaine nucléaire par exemple).

L'automatique communément qualifié de science des automatismes signifie systèmes qui peuvent réaliser un certain nombre d'opérations sans intervention humaine. Comme nous pouvons le constater dans certains cas, le but est de remplacer l'homme pour des raisons économiques voire sécuritaires.

En effet, un système automatique consiste à substituer les organes humains d'effort, d'observation, de mémoire et de décision par des éléments technologiques (calculateur, automates, circuits électroniques...) et ce, dans le but de :

- ✓ décharger l'homme des tâches répétitives, pénibles et parfois dangereuses;
- ✓ améliorer le rendement et la qualité de la production ;
- ✓ améliorer la précision et la qualité des tâches à effectuer ;
- ✓ augmenter la sécurité des personnes et des équipements...etc.

En fait, par l'automatisation nous souhaitons maîtriser le contrôle d'un certain nombre de grandeurs issues de processus industriels. Ces grandeurs, peuvent être électrique (tension, courant, puissance,...), mécanique (force, vitesse, couple, position,...), hydraulique (débit, pression, niveau,...), thermique (température, gradient) ou autres : humidité, viscosité,...etc.

- Le courant ou la tension de sortie d'une source.
- La vitesse de rotation d'un moteur.
- La température d'un local...etc.

Ainsi, comme le montre le schéma ci-dessous (figure 1.1), on peut distinguer trois grandes catégories de systèmes automatiques :

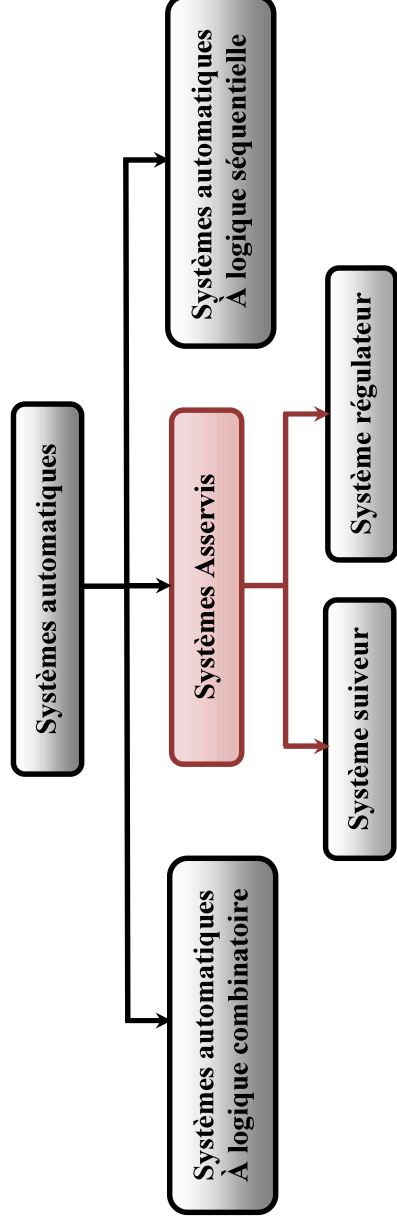


Figure 1.1 Classification des systèmes automatiques

Dans les systèmes automatiques à logique combinatoire (figure 1.2), l'état des variables de sortie à un instant donné ne dépend que du système et des états des variables d'entrée à cet instant. Alors que, dans les systèmes automatiques à logique séquentielle (figure 1.3) l'état des variables de sortie à un instant donné ne dépend pas seulement des états des variables d'entrée à cet instant mais aussi de la valeur de la sortie aux instants antérieurs (i.e. état précédent du système).

Exemples : - Afficheur sept segments, distributeur de boissons ;

- Ascenseur et machine à laver...etc.

En revanche, un système asservi (ou asservissement) est un système qui prend en compte, durant son fonctionnement, l'évolution de ses sorties pour les modifier et les maintenir conforme à une entrée donnée (consigne) voir figure 1.4. A titre d'exemples on peut citer: le pilotage automatique d'un avion, le contrôle de la position ou de la vitesse d'un moteur électrique...etc.

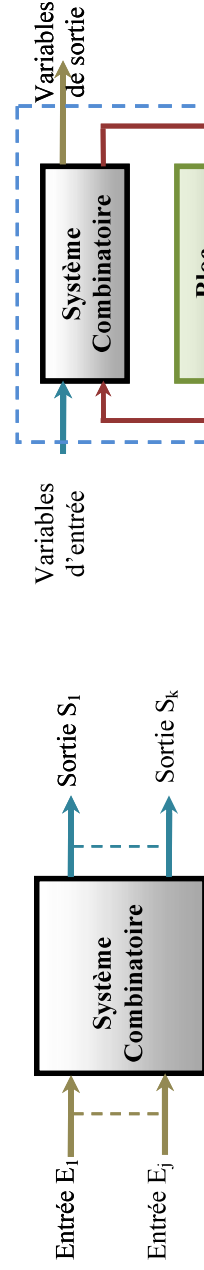


Figure 1.2 Système automatique combinatoire

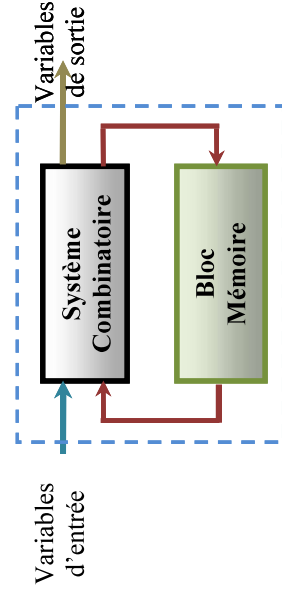


Figure 1.3 Système automatique séquentiel

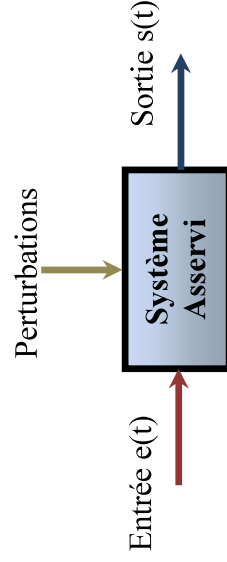


Figure 1.4 Système asservi

Dans ce qui suit, on s'intéressera uniquement aux **systèmes asservis linéaires continus et invariants** qui feront l'objet principal de ce fascicule.

I.2. Historique des systèmes asservis

Le fait que la technique de régulation ait précédé la science de l'automatique s'inscrit dans un processus historique fréquent en science. L'origine de cette technique remonte à l'antiquité (les anciens Grecs), mais le moment déterminant de son histoire est l'invention du régulateur de Watt à la fin du XVIII^e Siècle. A sa suite, de nouveaux régulateurs sont inventés, souvent inspirés de celui-ci, pour aboutir au début du XX^e siècle à l'élaboration du régulateur à effets proportionnel, intégral et dérivé (régulateur PID).

Parmi les premiers travaux importants, classés selon l'ordre chronologiques, on peut citer :

- ~ 250 av JC, premières réalisations d'automatismes par les grecs dans l'irrigation et le comptage du temps (clepsydre de Ktesybios). Le principe est fondé sur l'utilisation d'un flotteur régulant le niveau d'un premier bac permettant ainsi de fournir un débit constant dans un second bac dont le niveau établit ainsi la durée écoulée (voir figure 1.5).
- 1785 : L'invention du régulateur à boules par James watt pour la machine à vapeur a permis l'adaptation de la vitesse de rotation d'un arbre à la variation de la charge.
- 1873 : Joseph Farcot (ingénieur français), invente le servomoteur (régulateur de vitesse).
- 1922, Nicolas Minorsky: Étude de la stabilité selon les équations différentielles.
- 1932, Nyquist (Ingénieur américain), étude de la stabilité dans le domaine fréquentiel.
- 1934, Harold Huzen : Mathématisation de la théorie de la régulation avec le premier traité théorique sur les servomécanismes.
- 1940-1950 : Étude théorique des servomécanismes par l'analyse fréquentielle et introduction des notions de marge par Hendrik Bode.
- 1942 : Perfectionnement du régulateur PID en technologie pneumatique et notamment énoncé des règles de réglage du PID par J.G. Ziegler et N.B. Nichols (réglage optimum du régulateur PID).
- 1950 : Naissance de l'automatique (prise en compte de la boucle d'asservissement).
- 1960 : Étude des représentations d'état, de la commande optimale, des systèmes échantillonnés et des systèmes non linéaires.
- 1975 Création en France de l'AFCET, groupe de normalisation, qui proposa le GRAFCET comme méthode d'étude des systèmes automatiques séquentiels et qui devint en 1987 norme internationale. Essor des Automates Programmables Industriels (API).
- 1980 : Régulateur de vitesse automobile ; un capteur renseigne directement le calculateur qui pilote l'injecteur pour maintenir la vitesse désirée (consigne du conducteur),...etc.

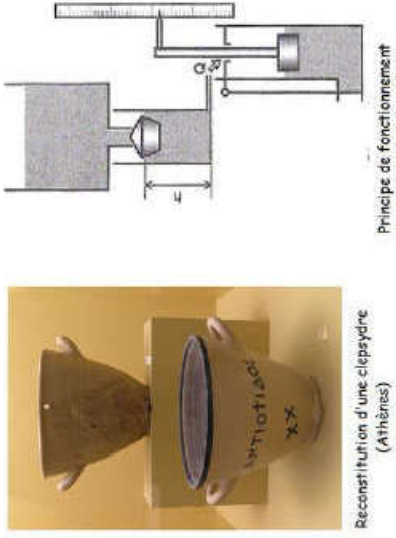


Figure 1.5 Comptage du temps Clepsydre de Ktesybios (~ 250 av. JC)

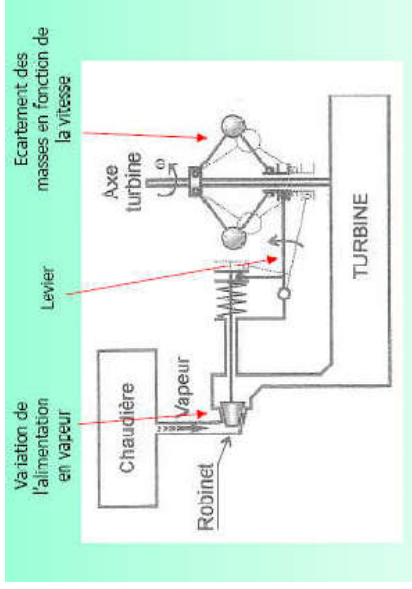


Figure 1.6 Régulateur à boules de James Watt (1785)

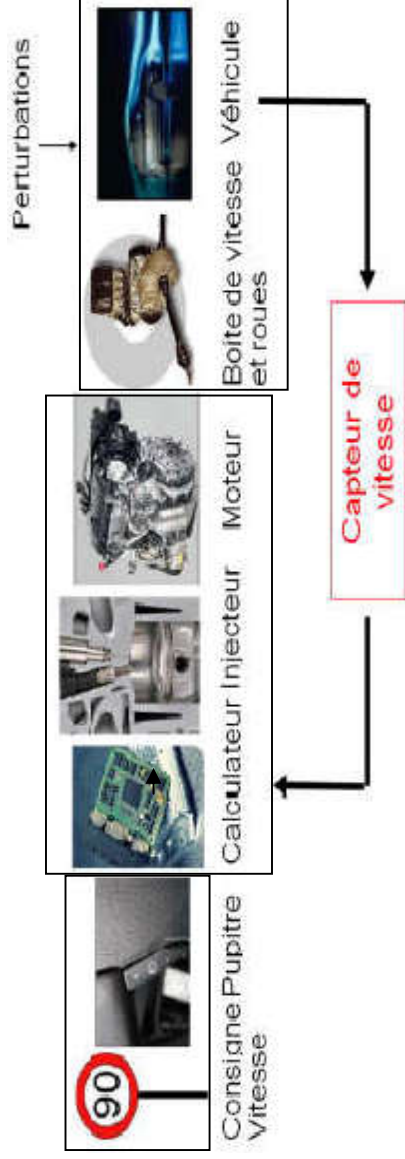


Figure 1.7 Régulateur de vitesse automobile (1980)

I.3. Généralités sur les systèmes asservis

I.3.1. Définition d'un système de commande

Un système de commande peut être défini comme une combinaison d'éléments physiques, chimiques, biologiques, ...etc., associés les uns aux autres de façon à former une entité unique, et agissant comme telle, dans le but de s'auto-commander, s'auto-régler et s'auto-diriger ou bien commander, régler, diriger un autre système.

Pour l'automaticien un système de commande ou processus correspond à un ensemble de relations causales entre des grandeurs d'entrées (causes) et des grandeurs de sortie (effets). D'une manière générale, un système peut être représenté par le schéma bloc suivant (figure 1.8):

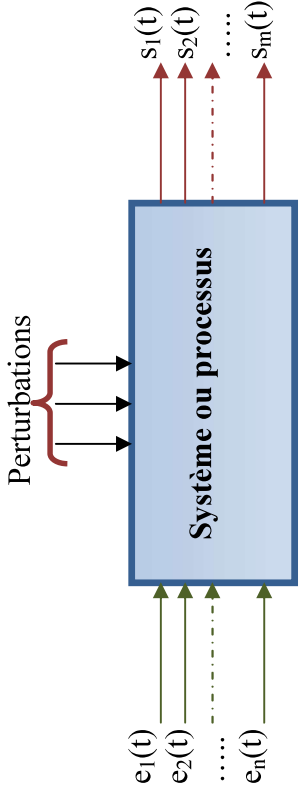


Figure 1.8 Schéma bloc élémentaire d'un système multi-variable

Remarque:

- En général les grandeurs d'entrées et de sortie ne sont pas de même nature. De plus le nombre (m) peut être différent de (n).
- Le nombre (m) est toujours inférieur ou égale à (n) cela veut dire que le système est causal : à chaque entrée il faut au moins une sortie (principe de cause à effet).
- Nous pouvons distinguer les systèmes multi-variables suivants : SIMO, MISO et MIMO. (En anglais les lettres S, M, I et O signifient : S: Single, I: Input, M: Multiple; O : Output).
- Le système à une entrée principale (n=1) et une seule sortie (m=1) est appelé système mono-variable (SISO en anglais).

Un système uni-variable peut être représenté par le schéma suivant (figure 1.9) :

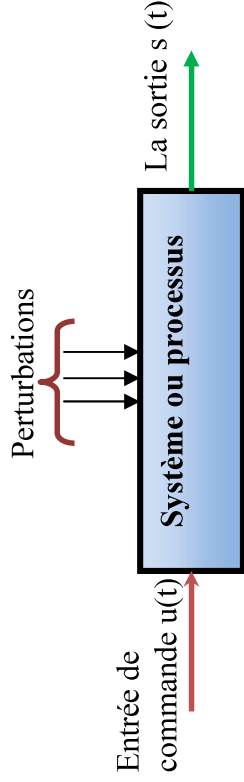


Figure 1.9 Schéma bloc élémentaire d'un système mono-variable

Exemples:

- Un moteur à courant continu est un système (électromécanique) de commande simple.
- Figure 1.10** Un moteur à courant continu
- Un thermomètre qui contrôle la température d'une pièce est un système de commande ou de contrôle simple.

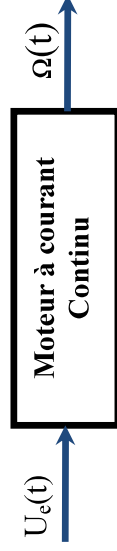


Figure 1.10 Un moteur à courant continu



Figure 1.11 Contrôle de la température d'une pièce par un thermomètre

Un système de commande qu'il soit **multi-variable** ou **mono-variable** communique souvent avec son milieu extérieur par des grandeurs physiques appelées : signaux. Ces derniers peuvent être classés comme suit :

1. **Signaux d'entrée** : Ce sont des grandeurs indépendantes du système (solllicitations externes) mais ayant une action sur son état. Ces grandeurs peuvent être de deux types :
 - **Grandeurs contrôlables** : Elles sont appliquées, à partir d'une source d'énergie extérieure, afin de provoquer une réponse spécifique du système.
 - **Grandeurs non contrôlables** : Ce sont des grandeurs d'entrée parasites ou perturbations agissant sur le système et qui sont susceptibles de nuire ou modifier la relation fonctionnelle entrée-sortie.
2. **Signal de sortie** : C'est la réponse effective élaborée par le système évoluant à partir de son état initial, sous l'action des signaux d'entrée. Elle peut être coïncidé ou non avec la réponse que doit normalement provoquer le signal d'entrée.
3. **Signal de commande** : Quantité donnant au système l'impulsion nécessaire à la formation du signal de sortie (réponse du système).

I.3.2. Classification des systèmes de commande

I.3.2.a. Systèmes linéaires et non linéaires

Un système physique est dit linéaire si la relation entre les grandeurs d'entrée et de sortie est une équation(s) différentielle(s) linéaire(s) et s'il obéit au principe de superposition linéaire. Dans le cas contraire le système est dit non linéaire.

Principe de superposition linéaire:

- Homogénéité: il y a proportionnalité de l'effet à la cause :
si $e(t) \rightarrow s(t)$ alors $a.e(t) \rightarrow a.s(t)$ où a est une constante.
- Additivité : les causes ajoutent leurs effets : si $e_1(t) \rightarrow s_1(t)$ et si $e_2(t) \rightarrow s_2(t)$ alors $e_1(t) + e_2(t) \rightarrow s_1(t) + s_2(t)$.

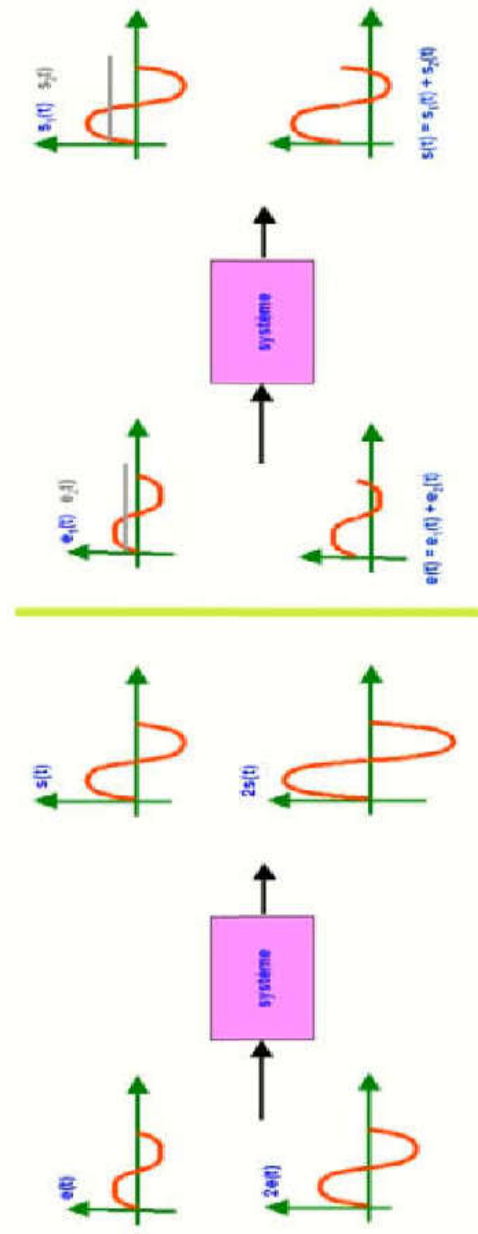


Figure 1.12 Illustration du principe de superposition linéaire

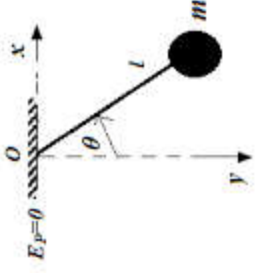
Exemple : Cas d'un pendule simple (sans frottements)

D'après la deuxième loi de Newton on a :

$$\sum M_f = J\ddot{\theta} \quad \text{avec} \quad J = m.l^2$$

$$\Rightarrow -mgl \sin \theta = ml^2 \ddot{\theta}$$

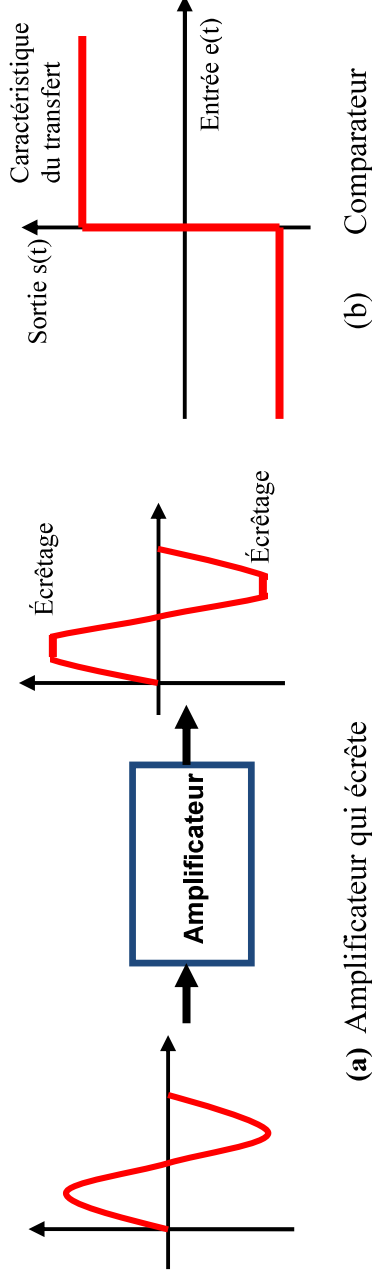
d'où $\ddot{\theta} + \frac{g}{l} \sin \theta = 0 \Rightarrow$ Equation différentielle non linéaire



Pendule simple

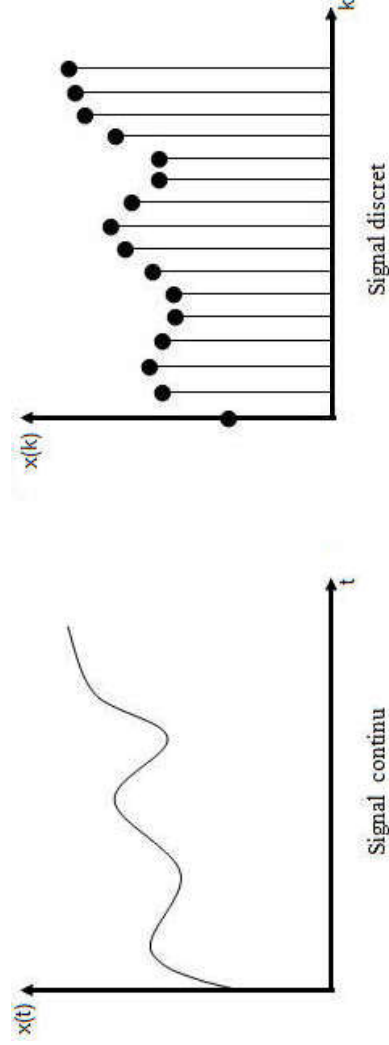
Le pendule est donc un système non linéaire. Mais pour les oscillations réduites ($\theta \ll 1$) $\Rightarrow \sin \theta \approx \theta$, alors l'équation différentielle précédente devient :

$\ddot{\theta} + \frac{g}{l} \theta = 0 \Rightarrow$ Equation différentielle linéaire (ou système linéaire)

**Figure 1.13** Exemples de systèmes non linéaires**I.3.2.b. Systèmes continus et discrets.**

- Un système est dit continu si toutes les grandeurs qu'ils le caractérisent sont de nature continue ou analogiques (disponibles à tout moment, à chaque instant).
- Un système est discret (ou échantillonné) si toutes les grandeurs qu'ils le caractérisent ne sont connues qu'à certaines instants ($t_1, t_2, \dots$), appelés instants d'échantillonnage.

Exemple : - Radar de poursuite (l'objet est détecté à chaque passage du pinceau) où l'information est disponible périodiquement.

**Figure 1.14** Signal continu et signal discret

I.3.2.c. Systèmes invariants et variants.

- Un système est dit **invariant** si la réponse à un signal $e(t)$ différé (retardé) d'un temps τ est la même que la réponse $s(t)$ du système mais retardée de τ . Le système invariant est aussi appelé système à paramètres constants localisés. En d'autres termes, un retard de τ ne change pas la loi du modèle :

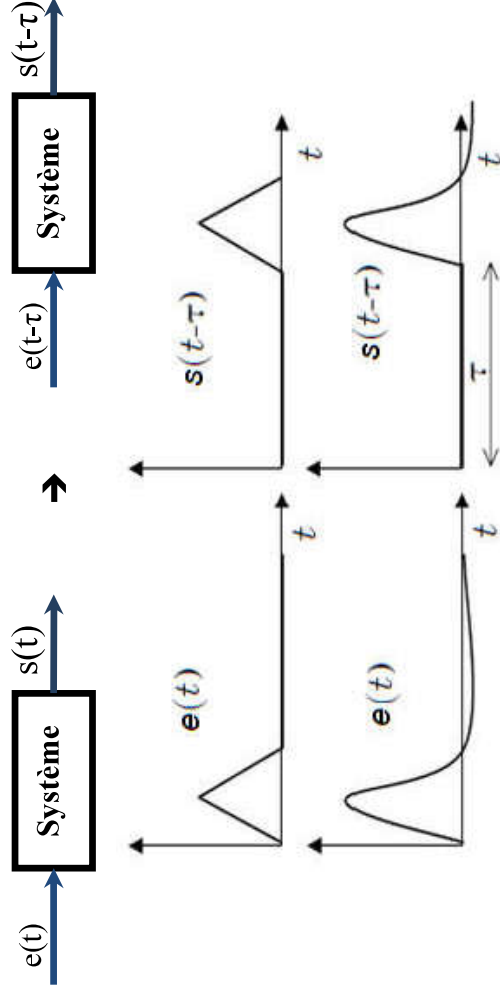


Figure 1.15 Système invariant

Exemple: Moteur électrique

Si on néglige l'usure, le moteur n'évolue pas dans le temps $\Rightarrow$ le système est invariant.



- Un système est dit **variant** si ses paramètres évoluent avec le temps. C'est à dire on tient compte de vieillissement du système.

Exemple: La fusée



La masse de la fusée diminue au cours de son ascension : En effet, pour un même débit de propergols, l'accélération augmente avec le temps $\Rightarrow$ le système est variant.

I.3.2.d. Système causal et déterministe.

- Un système est dit **causal** si la valeur de la sortie $s(t)$ à un instant t_0 ne dépend que des valeurs de l'entrée $e(t)$ pour $t \leq t_0$. C'est le cas de tous les systèmes physiques.
- Un système est **déterministe** si pour chaque valeur d'entrée $e(t)$, il n'existe qu'une seule valeur de sortie $s(t)$ possible. Dans le cas contraire, le système est dit **stochastique** (ou **aléatoire**). Chaque sortie possible est alors affectée d'une probabilité.

La figure 1.16 donne un aperçu sommaire d'une classification des modèles mathématiques associées aux différents types de systèmes. En gras, sont indiquées les classes de modèles qui sont l'objet de ce cours.

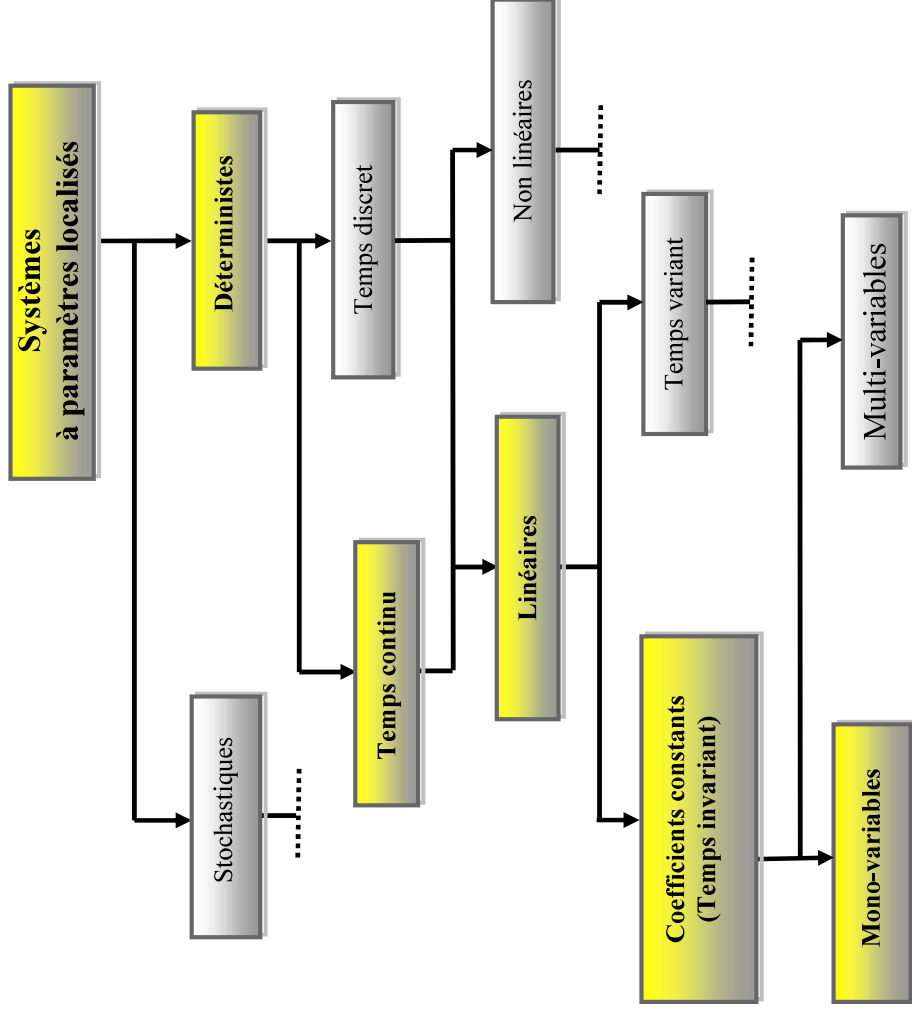


Figure 1.16 Classification des systèmes

Ce cours a pour but l'étude des systèmes décrits par des équations différentielles ordinaires **déterministes continus linéaires à coefficients constants (invariants) et mono-variables.**

I.3.3. Commandes en boucle ouverte et en boucle fermée

Quelle que soit la nature du système à commander (électrique, mécanique, hydraulique...etc.), il est toujours possible de classer les différentes structures de commande en deux grandes familles. Les structures de commande en boucle ouverte et les structures de commande à contre-réaction, appelées également structures de commande en boucle fermée.

I.3.3.a. Commande en boucle ouverte

Dans ce cas, la commande est envoyé en entrée sans contrôle sur la sortie, en d'autres termes le signal de commande est indépendant du signal de sortie.

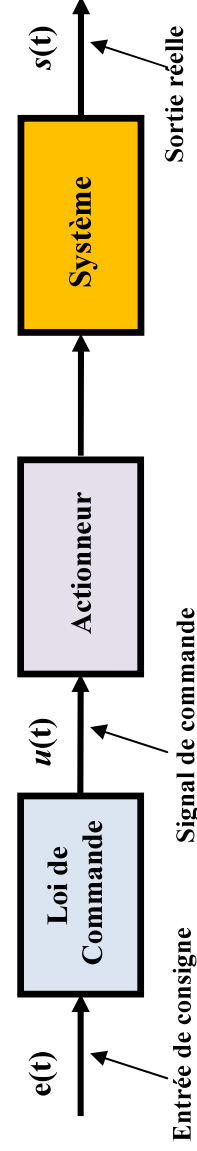


Figure 1.17 Commande en boucle ouverte

Exemples :

- **Machine à laver :** L'exemple typique de ce type de commande est constitué par la machine à laver fonctionnant sur la base de cycles préprogrammés ne possédant pas d'informations mesurées concernant le degré de propreté du linge.

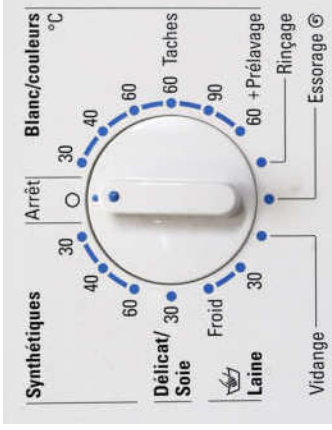


Figure 1.18 Vue externe d'un bouton de commande des cycles de lavage

- **Contrôle du niveau d'eau dans un réservoir**

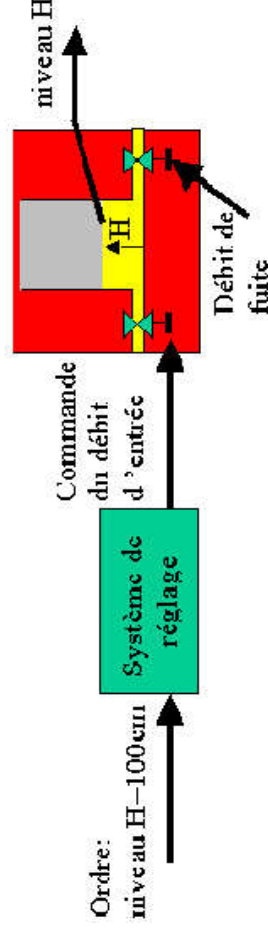


Figure 1.19 Contrôle en boucle ouverte du niveau d'eau dans un réservoir

On peut citer d'autres exemples de commande en boucle ouverte à savoir :

- Interrupteur électrique réglant le passage du courant dans un circuit,
- Chauffage d'une salle par un radiateur électrique commandé par un rhéostat,
- Contrôle de la position d'un lance missile...etc.

Note : *Pour utiliser ce type commande, il est nécessaire de connaître le système et les réponses aux commandes envoyées et en particulier de l'influence des perturbations sur le système, ce qui est rarement le cas en pratique. Cette commande ne permet pas de régler précisément la sortie désirée et corriger l'effet des perturbations. Cette solution est donc envisageable dans le cas où le système est parfaitement connu et modélisé et dans le cas où l'obtention d'une mesure de la sortie n'est pas économiquement possible.*

1.3.3.b. Commande en boucle fermée

Pour améliorer les performances de la commande en boucle ouverte et réduire sa sensibilité vis-à-vis aux perturbations, il s'avère alors indispensable de mener cette commande d'un retour (Feedback en anglais) permettant d'observer (ou de mesurer) la sortie réelle du système afin de la comparer à chaque instant à ce que l'on désire obtenir (la consigne). Le résultat de cette comparaison (l'écart ou l'erreur) forme le signal de commande approprié (figure 1.20).

Le principe de commande en boucle fermée est illustré sur la figure suivante :

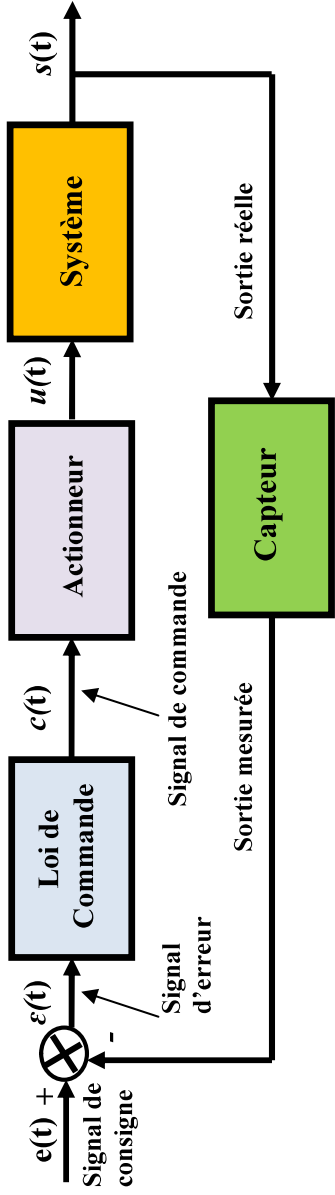


Figure 1.20 Schéma de principe de la commande bouclée

Note : La commande en boucle fermée est ainsi préférable notamment si le système à commander n'est pas parfaitement connu ou si des perturbations non modélisables et/ou des variations imprévisibles des paramètres sont présentes.

Exemples :

Exemple 1- Contrôle de la température d'une enceinte chauffée par un échangeur thermique.

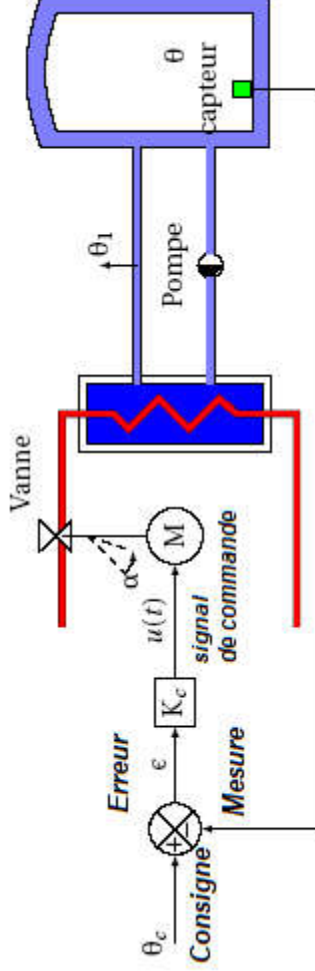


Figure 1.21 Contrôle de la température d'une enceinte

Le système représenté sur la figure 1.21 est chargé de maintenir la température d'une enceinte. Le chauffage est assuré par un échangeur thermique, la vanne v , permet de réguler le débit du fluide calorifique dans l'échangeur, afin de réguler la température θ_1 . On choisit de motoriser la vanne et on installe un capteur dans l'enceinte qui permet de mesurer la température $\theta(t)$. Cette température est comparée à la température de consigne θ_c . Un amplificateur K_c génère la tension de commande $u(t)$ du moteur (M) qui ouvre ou ferme la vanne en fonction de l'écart de température.

Exemple 2- Contrôle en boucle fermée de niveau d'eau dans un réservoir

Le dispositif de la figure 1.22 met en oeuvre le réglage de niveau d'eau dans un réservoir. Le débit de fuite est perçu comme une perturbation et donc le but de la régulation est de maintenir le niveau constant est égal à un niveau désiré $H_c = 100\text{cm}$ quel que soit ce débit de fuite. Pour ce faire, le niveau H est mesuré indirectement par un capteur de niveau. Le débit Q_e est réglé par une vanne électromécanique (actionneur) dont la commande $u(t)$ est proportionnelle à l'écart instantané $e(t)$ entre le niveau de référence et le niveau mesuré. Le schéma fonctionnel de ce dispositif de régulation est représenté par la figure 1.22.

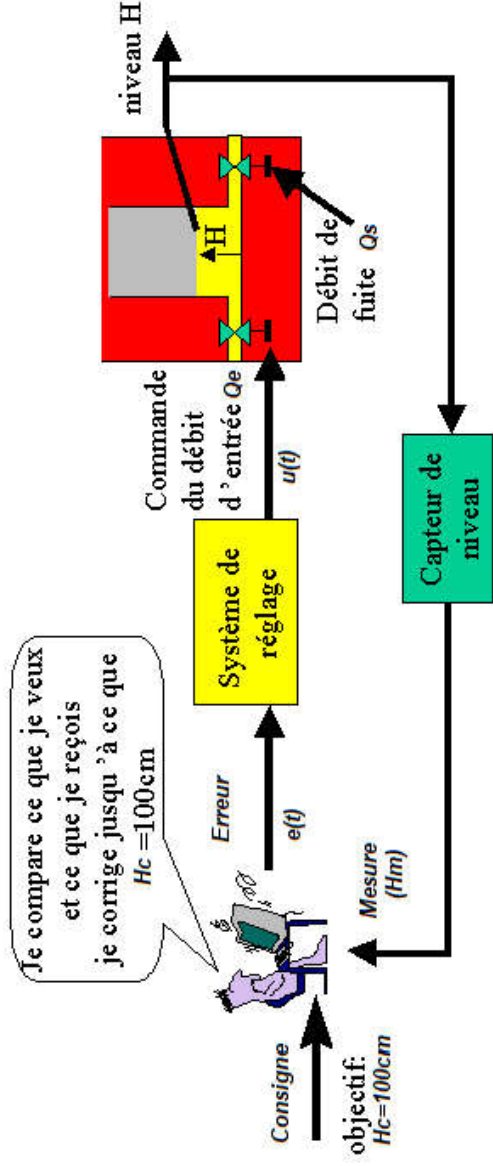


Figure 1.22 Exemple de Régulation de niveau d'eau dans un réservoir

Exemple 3- Le conducteur et son automobile.

Le conducteur doit suivre la direction de la route, pour cela : il observe la route et son environnement et évalue la distance qui sépare son véhicule du bord de la route. Il détermine l'angle qu'il doit donner au volant pour suivre la route. Il agit en conséquence sur le volant, puis il recommence son observation toute la durée du déplacement et ainsi de suite. Le schéma fonctionnel de ce dispositif de régulation est représenté par la figure 1.23.

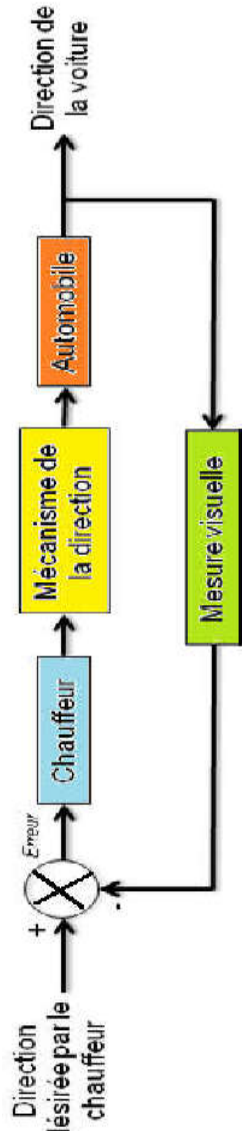


Figure 1.23 Contrôle de la direction de la voiture selon la direction de la route.

I.4. Système asservi (ou asservissement)

I.4.1. Définition :

Un système asservi ou asservissement est un système qui prend en compte, durant son fonctionnement, l'évolution de ses sorties pour les modifier et les maintenir conforme à une consigne. Il peut être défini aussi, comme étant, un système de commande muni d'une chaîne de retour (feedback : en anglais), c'est-à-dire il possède une réaction (rétro-action) de la sortie sur l'entrée.

D'une manière générale, un système asservi copie le comportement de l'homme dans les trois phases essentielles de son travail. Cela peut être schématisé comme suit (figure 1.24):

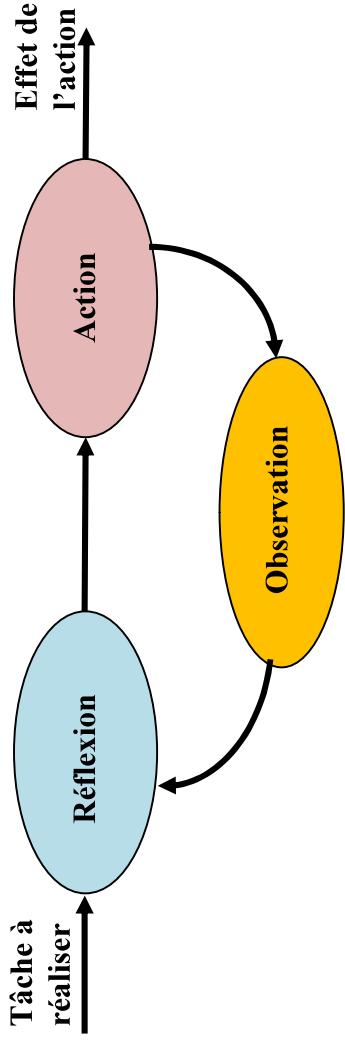


Figure 1.24 Concept d'un système asservi

I.4.2. Régulation et asservissement

I.4.2.a. Régulation

On appelle une régulation un système asservi qui doit maintenir constante la sortie conformément à la consigne indépendamment des perturbations. Cela veut dire, la consigne est constante ou évolue en paliers et le système doit compenser l'effet des perturbations. À titre d'exemples on cite, la régulation de la température dans un four, de la pression dans un réacteur ou du niveau d'eau dans un réservoir.

I.4.2.b. Asservissement

On appelle asservissement un système asservi dont la sortie suivre le plus fidèlement possible la consigne (variable).

Exemples : Suivi de la trajectoire d'un objet mobile (radar de poursuite) ou l'usinage d'une pièce mécanique à partir d'un modèle.



(a) Régulateur de débit



(b) Régulateur de pression



(c) Régulateur de température

Figure 1.25 Quelques types de régulateurs



(a) Radar de poursuite



(b) Usinage d'une pièce mécanique

Figure 1.26 Systèmes de poursuite (asservissement)