



INTRODUCTION ET MODÉLISATION DES SLCI

Cours 1

Professeur: Y. FARTOUH

v1.1

CPGE - MARRAKECH

L'objectif principal de la modélisation est de permettre de prédire le comportement d'un système.

Pour cela, il est nécessaire de :

- proposer une modélisation des variables d'entrée (consignes, perturbations...)
- modéliser le système global.
- simuler et analyser correctement la réponse (l'évolution de la sortie) du système, pour cela il faut :
 - ◊ comparer les résultats obtenus à des résultats expérimentaux
 - ◊ valider les performances obtenues par rapport aux exigences du cahier des charges.

1 Les systèmes automatisés : Définitions

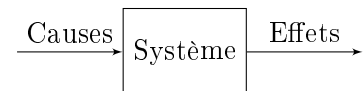
1.1 Système automatisé - Automatique



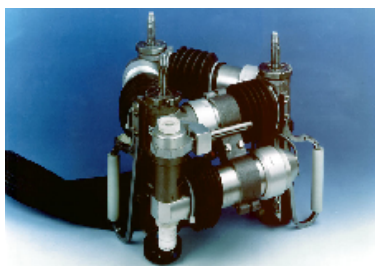
Définition *Système automatisé*

Un système technique **automatique** ou **automatisé** est un système assurant des opérations avec peu ou sans intervention humaine (programmation et/ou réglage du système).

Les entrées, appelées **causes**, sont des grandeurs issues du milieu extérieur. Les sorties, appelées **effets**, fournissent la réponse du système à la ou les causes.



Un système automatique est généralement constitué d'une **partie commande** (appelé aussi système de commande) et d'une **partie opérative**.



(a) Robot Tribar



(b) Robot Flexpicker



(c) Robot chirurgical

FIGURE 1 – Exemple de systèmes automatisés



Définition Automatique

L'**automatique** est la discipline scientifique traitant, d'une part, de la **description des systèmes automatisés** et, d'autre part, de la **conception** et de la **réalisation des systèmes de commande**.

1.2 Classification des systèmes automatisés

il est possible de classer les systèmes asservis en deux grandes familles :

Systèmes régulateurs

Ils sont destinés à maintenir une **sortie constante** pour une **consigne d'entrée constante** en luttant contre les **perturbations**.



FIGURE 2 – Régulation du niveau d'eau

Systèmes suiveurs ou en poursuite

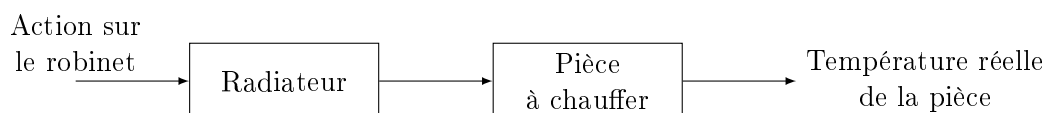
Ils sont destinés à ajuster en permanence le **signal de sortie** au **signal d'entrée** qui varie en permanence.



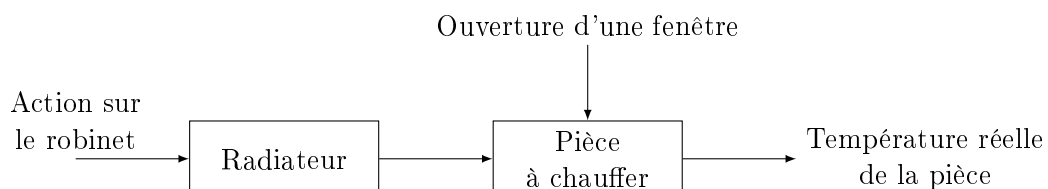
FIGURE 3 – Missile à tête chercheuse

1.3 Commande directe vs asservi

L'utilisateur qui commande directement le système en fonction de son ressenti (le système n'est donc pas **automatisé**). On dit alors que la commande est en **boucle ouverte** ou en **commande directe**.

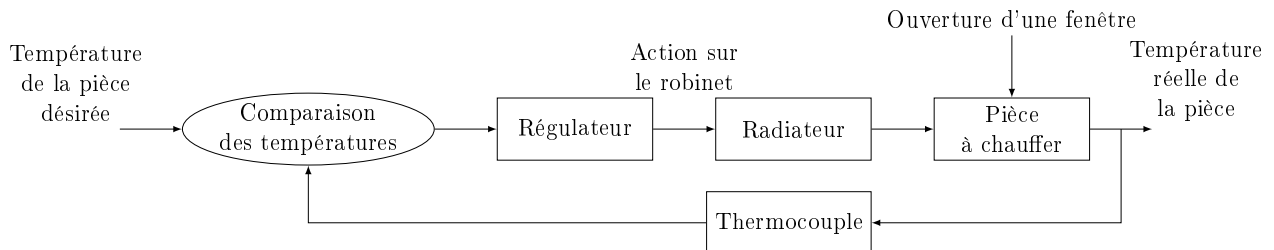


Cependant lorsque le système est **perturbé** par un événement extérieur (appelé **perturbation**), la valeur de la sortie ne correspond pas à la valeur attendue et peut être très éloignée de cette valeur.



Pour automatiser le système sans intervention humaine (sans action permanente sur le robinet dans l'exemple), on introduit une **boucle de retour** (ou **rétroaction**). Le système est alors dit en **boucle fermée**.

La boucle de retour, constituée de **capteur**, permet d'évaluer la situation à chaque instant et fournit un état de la sortie (grandeur qui nous intéresse) à la **partie commande**. Cette information est analysée par la partie commande et **comparée à la consigne**. Cette dernière élabore alors un **signal** qui permet de commander la **partie opérative**.



Dans cet exemple, la température désirée, appelée **consigne** (*température souhaitée et fixée par un thermostat*), est **comparée** à la température **réelle** de la pièce mesurée par le **thermocouple** (*Capteur*). Le **régulateur** déclenche alors une action correctrice, dont le sens de variation et l'amplitude de l'action sur le robinet dépendent de l'écart entre la température souhaitée et la température de la pièce.

Le schéma FIGURE 4 synthétise la structure d'un système asservi.

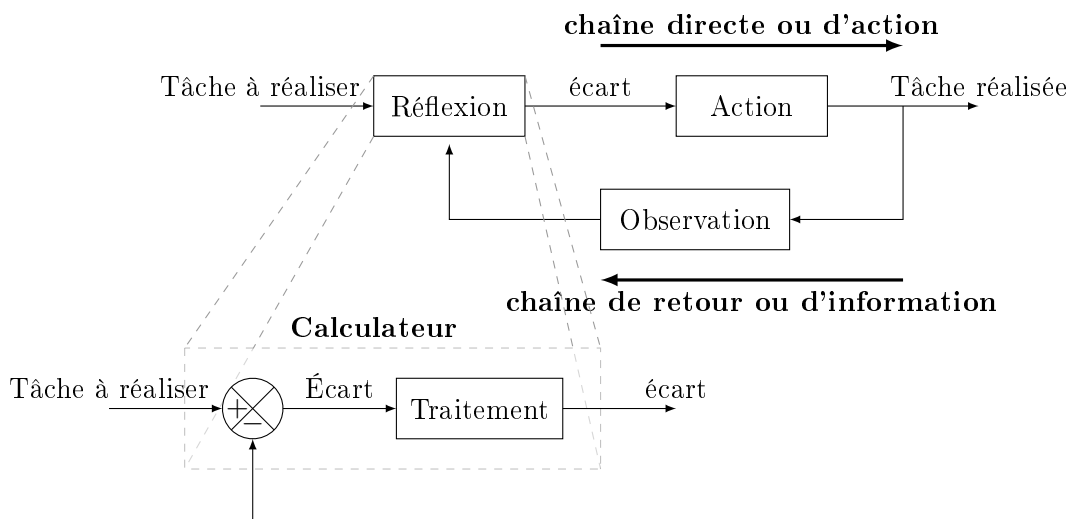


FIGURE 4 – Représentation schématique d'un système asservi

2 Hypothèses : Systèmes Linéaires, Continus et Invariants (SLCI)

2.1 Système Linéaire



Définition *Système linéaire*

Un système est dit linéaire si la fonction qui le décrit est elle même linéaire. Cette fonction vérifie alors le principe de proportionnalité et de superposition.

2.1.1 Principe de Proportionnalité



Définition *Principe de proportionnalité (FIGURE 5)*

Si $s(t)$ est la réponse à l'entrée $e(t)$, alors $\lambda s(t)$ est la réponse à l'entrée $\lambda e(t)$.



FIGURE 5 – Principe de proportionnalité

2.1.2 Principe de Superposition



Définition *Principe de Superposition (FIGURE 6)*

Si $s_1(t)$ et $s_2(t)$ sont les réponses respectives des entrées $e_1(t)$ et $e_2(t)$, alors $s_1(t) + s_2(t)$ est la réponse à l'entrée $e_1(t) + e_2(t)$.

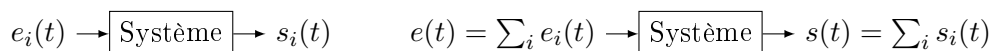


FIGURE 6 – Principe de superposition

2.1.3 Non-linéarités

La plupart des systèmes physiques ne sont pas linéaires sur toute la totalité de leur domaine d'utilisation. Ci-après des exemples de non-linéarités avec leur courbe caractéristique $S = f(E)$.

	Saturation	Seuil	Hystérésis
Courbe caractéristique			
Exemple	Butée mécanique, alimentation, moteur électrique...	Frottement dans un moteur	Jeux mécaniques, matériaux (élastomères), cycles magnétiques,

Cependant, lorsque le système est utilisé dans une zone réduite du domaine d'application, il est possible de « linéariser » la réponse du système dans cette zone (FIGURE 7) autour d'un point de fonctionnement de la caractéristique entrée/sortie.



FIGURE 7 – Linéarisation d'un système non linéaire au voisinage d'un point

2.2 Système Continu



Définition *Système Continu*

Un système est continu, par opposition à un système discret, lorsque les variations de ses grandeurs physiques sont définies à chaque instant (elles sont caractérisées par des fonctions continues). On parle aussi de systèmes analogiques.

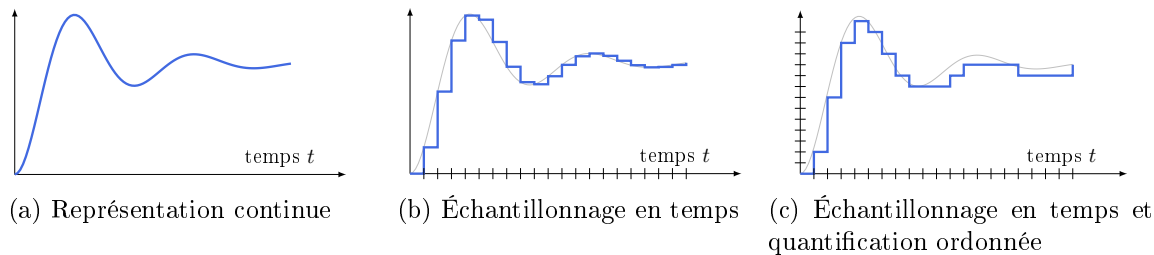


FIGURE 8 – Représentation numérique des données

2.3 Système invariant



Définition *Système invariant*

Un système invariant est un système dont le comportement est indépendant du temps.

Si une même entrée se produit à deux instants distincts (t_1 et $t_2 = t_1 + \tau$), alors les deux sorties temporelles ($s_1(t)$ et $s_2(t)$) seront identiques (voir FIGURE 9).

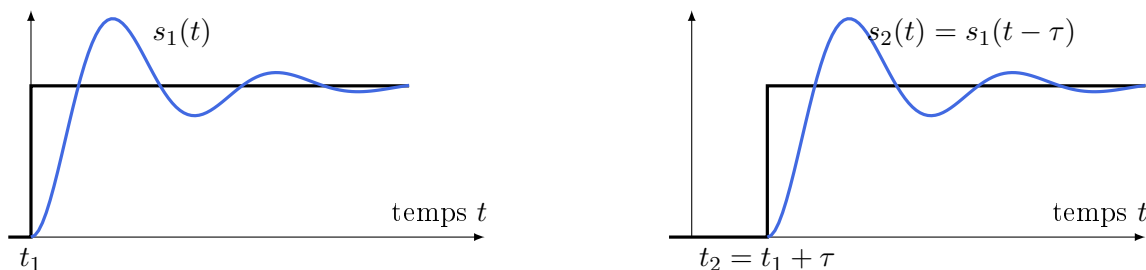


FIGURE 9 – Invariance dans le temps du comportement d'un système.

3 Les signaux testes

Pour étudier le comportement d'un système, il n'est pas toujours simple de traduire sous forme d'équations les lois de la physique qui régissent son comportement. Il est souvent plus efficace de le soumettre à des **signaux testes** et d'observer sa sortie.

3.1 Impulsion de Dirac $\delta(t)$



Définition *Impulsion de Dirac*

Si $t \neq 0$, $\delta(t) = 0$ et $\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1$.

La réponse temporelle à un dirac est appelée **réponse impulsionnelle** (FIGURE 10).

Exemple : coup de marteau sur une plaque métallique, frappe piquée sur une corde de piano...

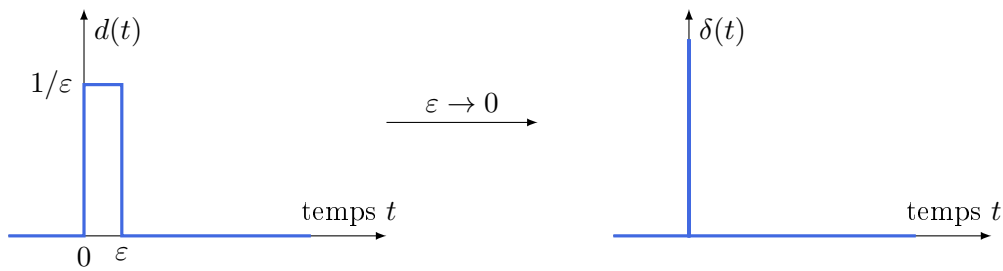


FIGURE 10 – Illustration de l'impulsion de Dirac.

3.2 Fonction échelon unité $u(t)$



Définition *Fonction échelon unité* (FIGURE 11a)

$u(t)$: si $t < 0$, $u(t) = 0$ et si $t \geq 0$, $u(t) = 1$.

La réponse temporelle à un échelon est appelée **réponse indicielle**.

Exemple : fermeture d'un interrupteur électrique

3.3 Fonction rampe unitaire $r(t)$



Définition *Fonction rampe unitaire $r(t)$* (FIGURE 11b)

Si $t < 0$, $r(t) = 0$ et si $t \geq 0$, $r(t) = t$.

La fonction rampe peut s'exprimer à l'aide de la fonction échelon unitaire :

$$r(t) = t u(t)$$

Exemple : Cette fonction modélise par exemple un déplacement imposé à vitesse constante.

3.4 Fonction sinus causale $s(t)$



Définition *Fonction sinus causale $s(t)$* (FIGURE 11c)

Si $t < 0$, $s(t) = 0$ et si $t \geq 0$, $s(t) = \sin(\omega t)$.

Cette définition peut être simplifiée en utilisant la fonction échelon unitaire :

$$s(t) = \sin(\omega t) u(t)$$

$\omega = \frac{2\pi}{T}$ est appelée **pulsation** du sinus et T **période**.



Remarque

Toute fonction mathématique simple, nulle pour les temps négatifs, peut s'écrire à l'aide d'un échelon unitaire.

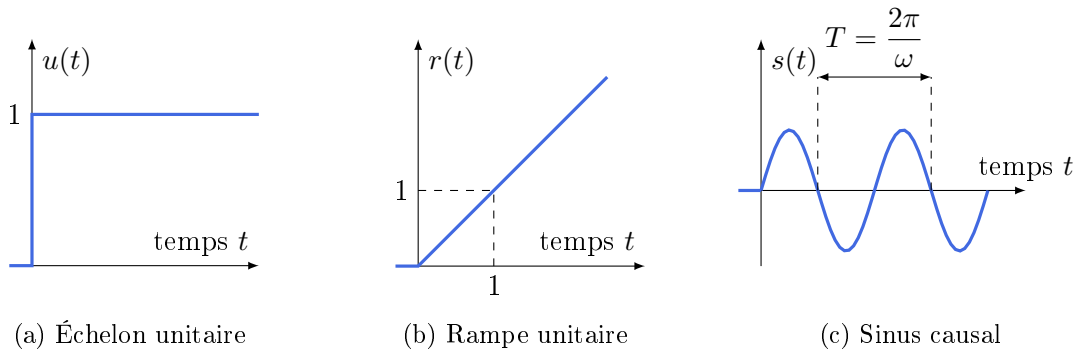


FIGURE 11 – Fonctions élémentaires

4 Performances d'un système asservi



Définition Performances d'un système asservi

Le comportement d'un système asservi est évalué suivant différents critères de performance :

- **Stabilité** : la réponse du système converge-t-elle pour une entrée constante ? Certains systèmes peuvent être instables, dans ce cas, leurs réponses divergent ou oscillent sans jamais se stabiliser.
- **Précision** : le système asservi atteint-il la valeur de consigne en l'absence de perturbation(s) ?
- **Rapidité** : combien de temps faut-il au système pour se stabiliser ?

Sachant que la réponse dépend évidemment du signal d'entrée, les niveaux de ces performances sont généralement évalués à partir de la réponse à une entrée standard : une entrée constante nommée échelon.

4.1 Stabilité



Définition Stabilité

Un système est stable si à une entrée **bornée** correspond une sortie **bornée**.

Exemples de réponse de systèmes stables :



Exemples de réponse de systèmes instables :



4.2 Rapidité



Définition *Rapidité*

Un système est dit rapide s'il converge en un temps court au regard de son contexte d'utilisation.



Définition *Temps de réponse à 5%*

Dans la pratique, c'est le temps de réponse à 5% (noté $t_{5\%}$ ou $t_{r5\%}$) qui est le plus souvent utilisé. Il correspond au temps mis par le système pour atteindre la valeur à convergence appelée aussi valeur finale (donc en régime permanent) à $\pm 5\%$ près et à y rester (FIGURE 12).

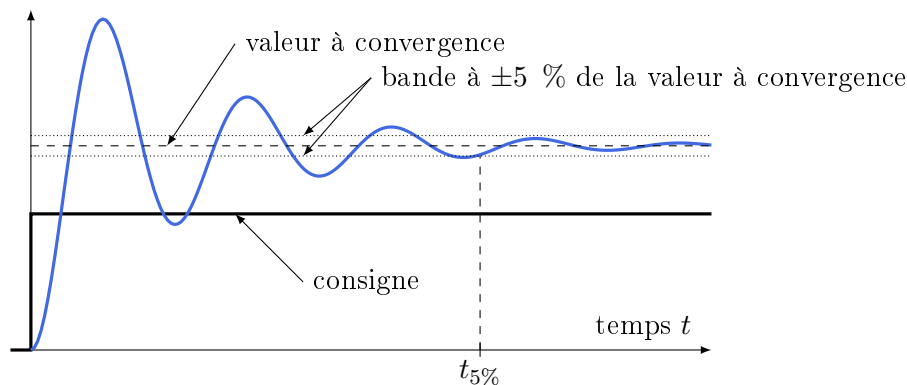


FIGURE 12 – Caractérisation de la rapidité d'un système sur le critère du temps de réponse à 5 %.

4.3 Précision



Définition *Précision*

La précision d'un système qualifie son aptitude à atteindre la valeur visée (consigne), indépendamment des éventuelles perturbations. Elle est caractérisée par l'**erreur en régime permanent** qui correspond à l'écart entre la valeur de la **consigne visée** et la valeur **réellement atteinte** par la grandeur de sortie :

$$\mu(t) = e(t) - s(t)$$

Erreur statique

notée μ_s pour une entrée constante (en échelon).

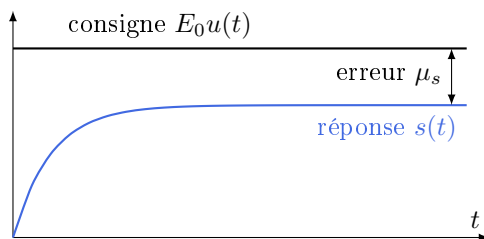


Définition Erreur statique

L'erreur statique μ_s est la différence entre la consigne constante E_0 et la réponse $s(t)$ en régime permanent.

$$\mu_s = \lim_{t \rightarrow \infty} E_0 u(t) - s(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} E_0 - s(t)$$

Un système est précis si l'erreur statique est nulle.



Erreur de trainage ou de poursuite

notée μ_v pour une entrée non constante (affine le plus souvent).

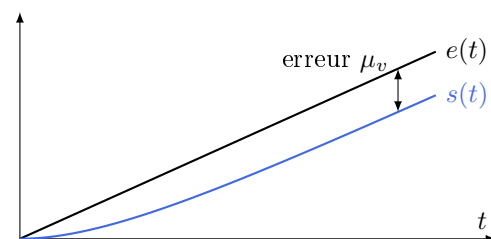


Définition Erreur de poursuite

L'erreur de poursuite μ_v est la différence entre la consigne variable et la réponse en régime permanent.

$$\mu_v = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) - s(t)$$

Un système suiveur est précis si l'erreur de traînage est constante et la plus faible possible.



Remarque

l'entrée retenue pour tester la précision est généralement de la forme : $e(t) = at$ avec $a = cte$.

5 Modélisation des SLCI : Les principaux modèles de comportement

Pour les systèmes automatisés réels, on se ramène au cas des SLCI en faisant des hypothèses simplificatrices. La comparaison du modèle avec la réalité permettra de valider ou non les hypothèses proposées et d'affiner celui-ci si nécessaire.

Pour modéliser un SLCI, il est nécessaire de déterminer **une équation reliant l'entrée $e(t)$ (ou les entrées) et la sortie $s(t)$** . Dans toute la suite, l'entrée e et la sortie s sont quelconques : elles peuvent être des tensions, des vitesses, des positions, des forces. Elles ne sont pas non plus nécessairement de même dimension.



Définition

Sous les hypothèses de continuité, de linéarité et d'invariance dans le temps, la relation de comportement d'un système peut se mettre sous la forme d'une **équation différentielle linéaire à coefficients constants**.

Pour obtenir cette équation, deux types de modélisation sont envisageables :

- Un **modèle de connaissance** établi à partir de lois physiques permet d'aboutir généralement à une telle équation.

- À l'inverse, à partir d'un résultat expérimental sur une partie du système, il est possible de proposer un modèle simple dit **modèle de comportement** d'un constituant qui sera ensuite utilisé dans le modèle global du système.

L'objectif de la partie qui suit est de présenter les modèles de comportement usuels.

5.1 Systèmes modélisable par un gain pur

La grande majorité des systèmes peuvent être modélisés par une constante, c'est à dire une relation de proportionnalité directe entre l'entrée et la sortie :

$$s(t) = Ke(t)$$

La constante de proportionnalité est alors appelée **le gain du système**.



Remarque

Dans ce type de système, l'entrée et la sortie peuvent être inversées, il n'y a pas de notion de causalité.

On peut ainsi modéliser par une constante la majorité des composants (FIGURE 13) :

- ceux qui transmettent l'énergie sans changer sa nature : les transmetteurs (réducteur à roue et vis sans fin, à engrenages, système vis-écrou...),
- les composants qui distribuent l'énergie : préactionneurs (variateur),
- les capteurs (potentiomètre, génératrice tachymétrique...).

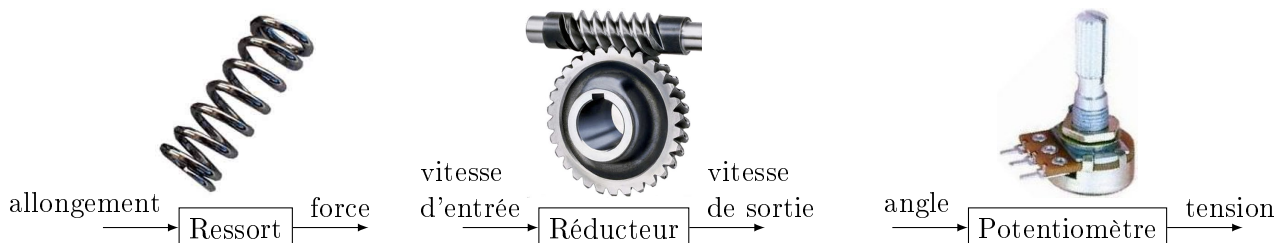


FIGURE 13 – Exemples de systèmes modélisables par un gain pur

Exemple : Gain d'un ressort

La relation reliant la force exercée sur le ressort $F(t)$ (sortie) à l'allongement Δx (entrée) est donnée par la relation : $F = k\Delta x$ où k est la raideur du ressort.

Ainsi le gain K du système est alors égal à k .

5.2 Systèmes modélisés par un intégrateur

Une relation fondamentale lors de la modélisation des systèmes mécaniques est la relation permettant de passer de la **vitesse** $v(t)$ à la **position** $x(t)$ (ou de l'**accélération** $a(t)$ à la **vitesse** $v(t)$) :

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} = \dot{x}(t)$$

Ainsi la position $x(t)$ est donnée par la relation : $x(t) = \int_0^t v(\tau) d\tau$

La FIGURE 14 donne la réponse temporelle à une entrée en **échelon** (FIGURE 14a) et en **rampe** (FIGURE 14b). En supposant que les conditions initiales sont nulles, quand la vitesse est constante, la position est une droite et quand la vitesse est une droite, la position est une parabole. On notera que pour $t \leq 0$, la position est nulle.

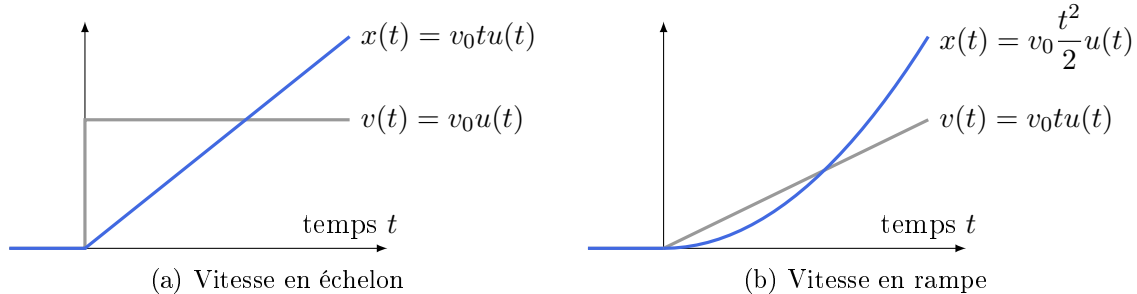
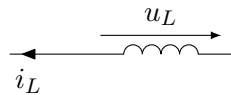


FIGURE 14 – Réponse temporelle de la position pour une entrée en vitesse donnée

Exemple : d'autres systèmes sont représentables par un intégrateur :

- relation entre le courant et la tension dans une bobine : $u_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$ (avec L l'inductance de la bobine).



- relation entre la température et la puissance fournie par un radiateur dans une pièce sans perte : $C \frac{dT(t)}{dt} = P_{recue}(t)$ (avec C la capacité thermique de la pièce, avec $P_{recue}(t) = \frac{U(t)^2}{R}$ où U est la tension d'alimentation du radiateur, R la résistance du radiateur).

5.3 Les systèmes du premier ordre

5.3.1 Forme de l'équation différentielle



Définition Équation différentielle d'un 1^{er} ordre

La forme générale de l'équation différentielle caractéristique d'un système du premier ordre est :

$$\tau \frac{ds(t)}{dt} + s(t) = Ke(t)$$

avec :

- τ la constante de temps du système (unité : seconde)
- K le gain du système (unité : $[s]/[e]$).

Exemple : Sous-marin à ballast

Le principe fondamental de la dynamique appliqué au sous-marin soumis à la poussée d'Archimède, à la pesanteur et aux frottements visqueux de l'eau s'écrit :

$$m \frac{dv(t)}{dt} = -fv(t) + Pa(t) - mg$$

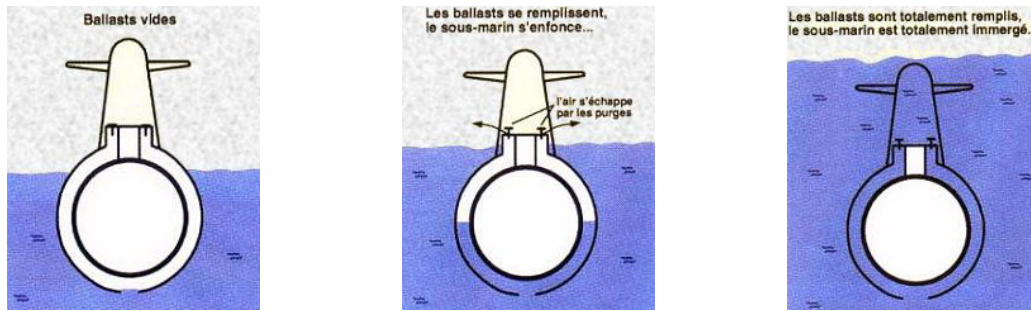


FIGURE 15 – Principe d'immersion d'un sous-marin à ballast

On pose $P(t) = Pa(t) - mg$ la force permettant de gérer la vitesse verticale du sous-marin. On obtient alors une équation différentielle du premier ordre entre l'entrée $P(t)$ et la sortie $v(t)$:

$$\frac{m}{f} \frac{dv(t)}{dt} + v(t) = \frac{P(t)}{f}$$

Nous pouvons ainsi définir la constante de temps du système $\tau = \frac{m}{f}$ et le gain $K = \frac{1}{f}$.

5.4 Les systèmes du deuxième ordre

Le modèle du second ordre est couramment rencontré . Il est aussi utilisé pour améliorer les modèles du premier ordre (prise en compte de frottements visqueux par exemple...)

5.4.1 Équation différentielle



Définition Équation différentielle d'un 2^e ordre

Un système d'entrée $e(t)$ et de sortie $s(t)$ est du 2^e ordre, s'il est régi par une équation différentielle du 2^e ordre à coefficients constants :

$$\frac{1}{\omega_0^2} \frac{d^2 s(t)}{dt^2} + \frac{2\xi}{\omega_0} \frac{ds(t)}{dt} + s(t) = Ke(t)$$

avec :

- K le gain statique du système (unité : $[s]/[e]$) ;
- ω_0 la pulsation propre non amortie¹ (unité : rad.s^{-1}) ;
- ξ le facteur d'amortissement² (sans unité).

¹ Aussi appelée pulsation naturelle, parfois notée ω_n . ω_0 est positive.

² Beaucoup de notations cohabitent pour décrire l'amortissement : ζ , ξ , ε , z ou m . Le choix dépend du contexte disciplinaire et vise avant tout à éviter la confusion avec une autre grandeur qui pourrait avoir la même notation. ξ est positif.

Exemple : mouvement d'une roue par rapport au châssis

On s'intéresse ici au mouvement d'une roue par rapport au châssis d'un quad. Cette roue est reliée au châssis par l'intermédiaire d'un amortisseur et d'un ressort montés en parallèle. Ce système peut

être modélisé par une masse (modèle du véhicule) reliée en série à un ressort et un amortisseur montés en parallèle. On note $f(t)$ la force exercée sur la masse m et $y(t)$ la position de cette masse par rapport à la position d'équilibre.

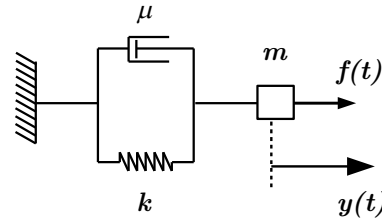


FIGURE 16 – Double amortisseurs de quad

En appliquant le Principe Fondamental de la Dynamique (2^e loi de Newton) sur la masse m soumise à l'action du ressort $(-ky(t))$, de l'amortisseur $(-\mu\dot{y}(t))$ et à la force $f(t)$, on obtient l'équation :

$$m\ddot{y}(t) + \mu\dot{y}(t) + ky(t) = f(t)$$

En posant $\frac{1}{\omega_0^2} = \frac{m}{k}$, $\frac{2\xi}{\omega_0} = \frac{\mu}{k}$ et $K = \frac{1}{k}$, l'équation correspond à celle d'un système du second ordre

de la forme :

$$\frac{1}{\omega_0^2}\ddot{y}(t) + \frac{2\xi}{\omega_0}\dot{y}(t) + y(t) = Kf(t)$$

5.5 Différentes modélisations d'un même système

Le moteur à courant continu est un exemple de composant pour lequel différentes modélisations peuvent être adoptées en fonction de la finesse nécessaire. Étant donné que ce constituant est la base de tous les principes de motorisation et que la très grande majorité des systèmes automatisés utilisent des moteurs, il est important de détailler son principe et sa modélisation.

5.5.1 Description d'une machine à courant continu

Une machine à courant continu est un convertisseur électro-mécanique composée généralement d'aimants permanents sur le stator (puissance faible) ou d'un inducteur bobiné (forte puissance) et d'un bobinage au rotor soumis à une tension continue (figure 17). Un collecteur à balais permet d'alimenter une partie du bobinage du rotor de façon à ce que la force de Laplace exercée sur les conducteurs impose un couple moteur sur le rotor (action mécanique ayant tendance à faire tourner le rotor).

La machine à courant continu est le siège de phénomènes électriques, magnétiques et mécaniques, représentés FIGURE 18. La modélisation des phénomènes conduit au système d'équations :

$$\left\{ \begin{array}{ll} u_m(t) = Ri(t) + L\frac{di(t)}{dt} + E(t) & \text{Loi des mailles} \\ J\frac{d\omega_m(t)}{dt} = C_m(t) - C_r(t) - f\omega_m(t) & \text{Principe fondamental de la dynamique} \\ e(t) = K_e\omega_m(t) & \text{Couplage électro-magnétique} \\ C_m(t) = K_c i(t) & \text{Couplage électro-magnétique} \end{array} \right.$$

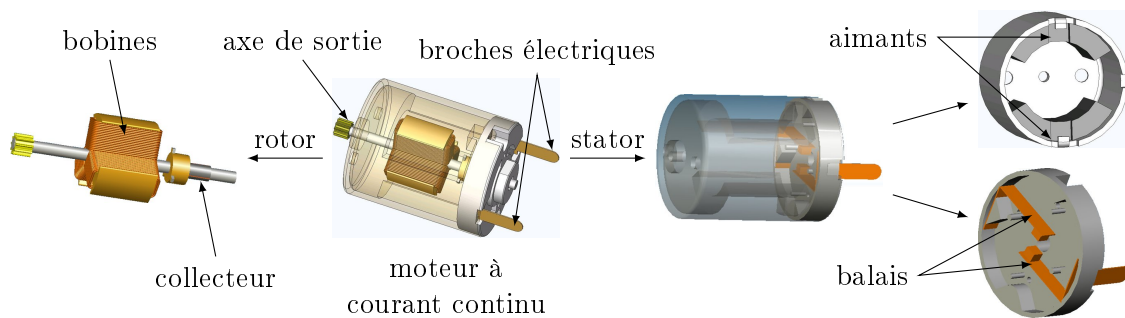


FIGURE 17 – Schéma de principe de l'architecture d'une machine à courant continu.

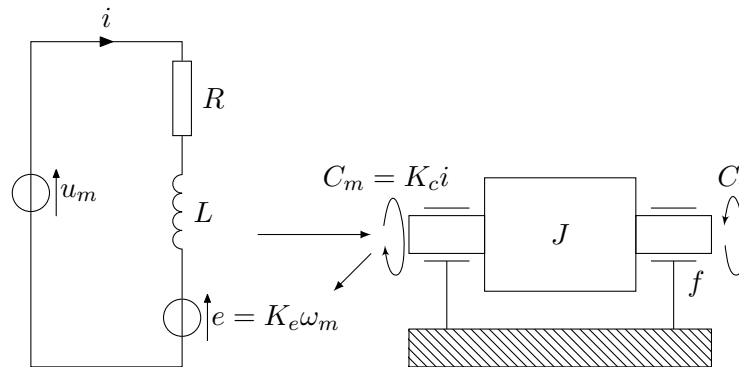


FIGURE 18 – Modélisation électrique et mécanique d'une machine à courant continu.

où R est la résistance du bobinage d'induit, L est l'inductance du bobinage d'induit, U_m est la tension aux bornes de la machine à courant continu, i est l'intensité du courant absorbé par la machine, E est la force contre-électromotrice due à la rotation, J est l'inertie mécanique à vaincre par la machine, f est le frottement visqueux, C_m est le couple électro-magnétique exercé par le stator sur le rotor, C_r est le couple résistant en sortie, ω_m est la vitesse angulaire de rotation, et K_e et K_c sont les constantes de couplage électro-magnétique ($K_c = K_e$ généralement).

5.5.2 Modélisations

- Si L est négligée (ce qui revient à dire que l'établissement du régime permanent dans le circuit électrique est bien plus rapide que l'établissement du régime permanent mécanique), on obtient, en combinant les équations ensemble :

$$u_m(t) = k\omega_m(t) + \frac{R}{k} \left(J \frac{d\omega_m(t)}{dt} \right) \quad (\text{Équa. diff. d'ordre 1})$$

- Si L n'est pas négligée, on obtient la relation suivante :

$$u_m(t) = k\omega_m(t) + \frac{R}{k} \left(J \frac{d\omega_m(t)}{dt} \right) + \frac{L}{k} \left(J \frac{d^2\omega_m(t)}{dt^2} \right) \quad (\text{Équa. diff. d'ordre 2})$$

- D'autre part, si l'on souhaite obtenir l'angle de rotation θ_m en sortie du moteur telle que $\omega_m = \frac{d\theta_m(t)}{dt}$, on obtient :

$$u_m(t) = k \frac{d\theta_m(t)}{dt} + \frac{R}{k} \left(J \frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2} \right) + \frac{L}{k} \left(J \frac{d^3\theta_m(t)}{dt^3} \right) \quad (\text{Équa. diff. d'ordre 3})$$

On constate que l'ordre de l'équation différentielle d'un système dépend du choix de l'entrée et de la sortie mais également de la finesse de la modélisation adoptée. Tout n'est que question de compromis, c'est la comparaison entre le modèle et des résultats expérimentaux qui validera les choix adoptés.

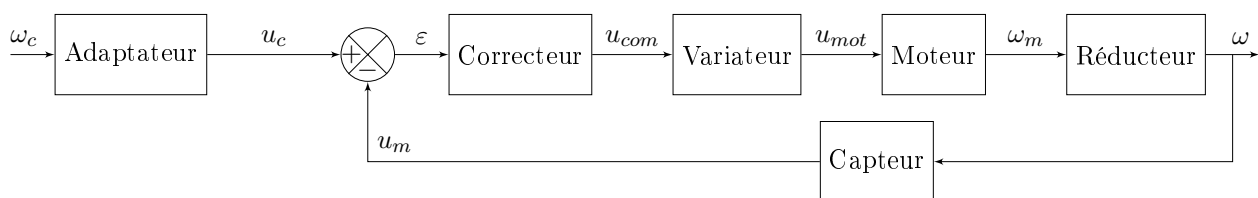
5.6 Bilan

5.6.1 Modélisation d'un système complexe

On constate qu'il est relativement simple de modéliser chaque constituant par une équation différentielle. Si un système complexe peut être décomposé en sous-systèmes modélisables par des équations différentielles, il suffira de combiner ces équations pour obtenir une équation globale caractérisant le comportement du système complexe.

Exemple : Asservissement de vitesse d'un bras robotisé

L'asservissement du bras robotisé est décrit par le schéma-bloc suivant :



Le moteur est modélisé par une équation différentielle du premier ordre de constante de temps τ_m et de gain K_m : $\tau_m \frac{d\omega_m(t)}{dt} + \omega_m(t) = K_m u_{mot}(t)$

Les correcteur, variateur, réducteur, capteur et adaptateur sont modélisés respectivement par des gains purs C , K_v , K_r , K_c et K_a .

On a donc : $\omega(t) = K_r \omega_m(t)$ soit $\tau_m \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) = K_m K_r u_{mot}(t)$

Or $u_{mot}(t) = K_v u_{com}(t) = K_v C \varepsilon(t) = K_v C (u_c(t) - u_m(t)) = K_v C K_c (\omega_c(t) - \omega(t))$

Ainsi $\tau_m \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) = K_m K_r K_v C K_c (\omega_c(t) - \omega(t))$

L'équation différentielle globale régissant l'asservissement est :

$$\tau_m \frac{d\omega(t)}{dt} + (1 + K_m K_r K_v C K_c) \omega(t) = K_m K_r K_v C K_c \omega_c(t)$$

Sous sa forme canonique :

$$\frac{\tau_m}{1 + K_m K_r K_v C K_c} \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) = \frac{K_m K_r K_v C K_c}{1 + K_m K_r K_v C K_c} \omega_c(t)$$

On retrouve une équation différentielle du premier ordre. Connaissant la réponse d'un système du premier ordre à une consigne en échelon, on pourra en déduire le comportement de l'asservissement de vitesse du bras si on demande en consigne un échelon de vitesse.