

Modélisation des systèmes asservis

N. Mesnier

Lycée international Jean Perrin, Lyon

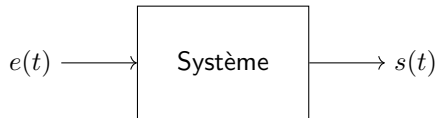
2026–2027



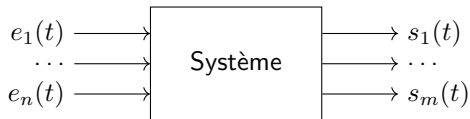
- 1 Introduction
- 2 Modélisation du comportement dynamique
- 3 Résolution par la transformée de Laplace
- 4 Représentation par schéma-blocs



Introduction



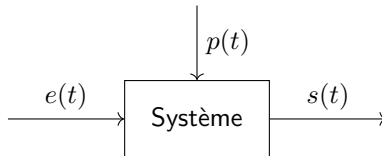
Système mono-variable



Système multi-variables

Système

Entrées & sorties



- $e(t)$: commande (E)
- $p(t)$: perturbation (E)
- $s(t)$: réponse du système (S)

Système automatisé

Définitions

Définition (Système automatisé)

Un système automatisé est un système réalisant des opérations et pour lequel l'intervention humaine est limitée à la programmation du système et à son réglage préalable.

Définition (Système de commande)

Un système de commande est un système dont la vocation est de piloter un processus.

Système automatisé

Définitions

Définition (Système automatisé)

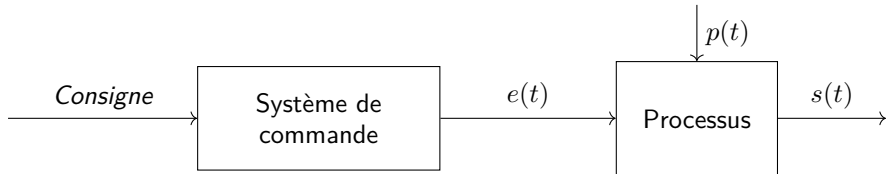
Un système automatisé est un système réalisant des opérations et pour lequel l'intervention humaine est limitée à la programmation du système et à son réglage préalable.

Définition (Système de commande)

Un système de commande est un système dont la vocation est de piloter un processus.

Système automatisé

Structure de commande en boucle ouverte

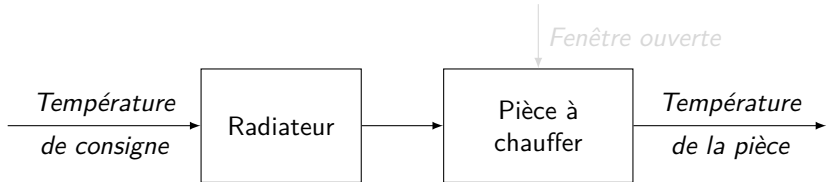


Système automatisé

Structure de commande en boucle ouverte

Exemple

Chauffage d'une pièce à 20°C

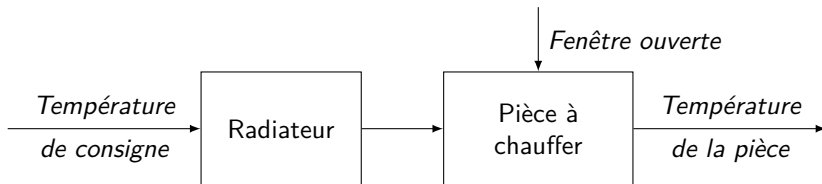


Système automatisé

Structure de commande en boucle ouverte

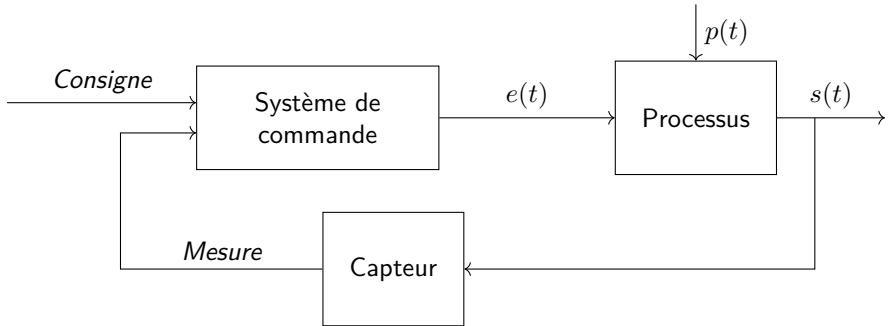
Exemple

Chauffage d'une pièce à 20°C



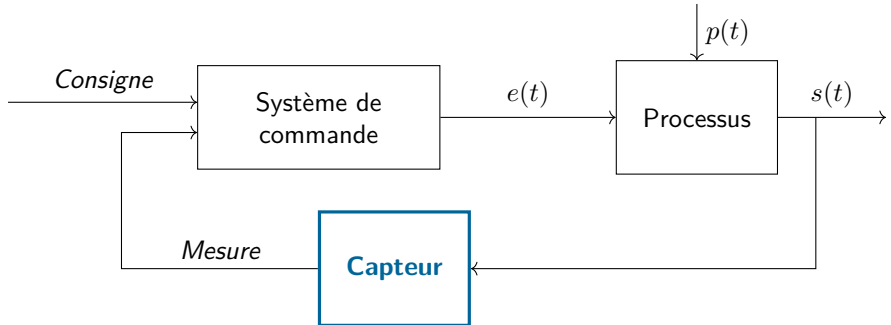
Système automatisé

Structure de commande en boucle fermée



Système automatisé

Structure de commande en boucle fermée

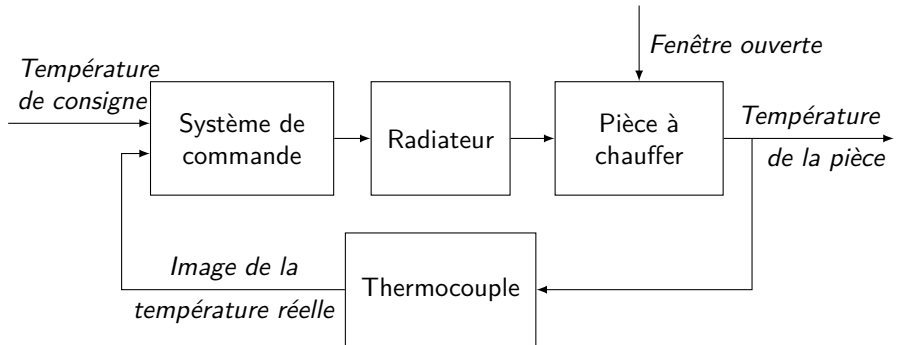


Système automatisé

Structure de commande en boucle fermée

Exemple

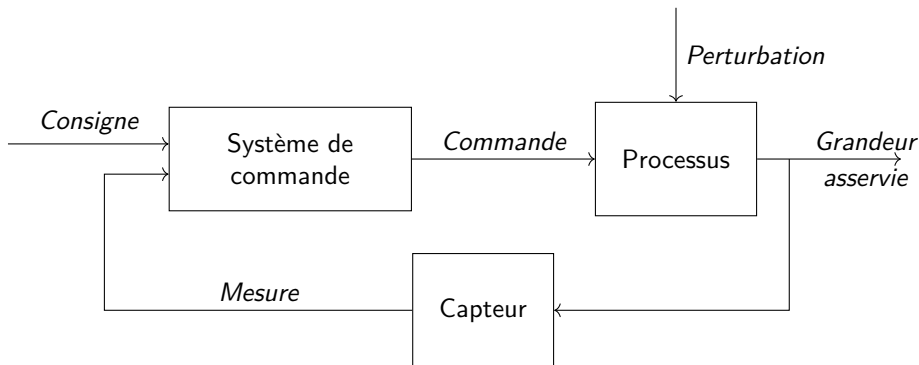
Chauffage d'une pièce à 20°C



Système asservi

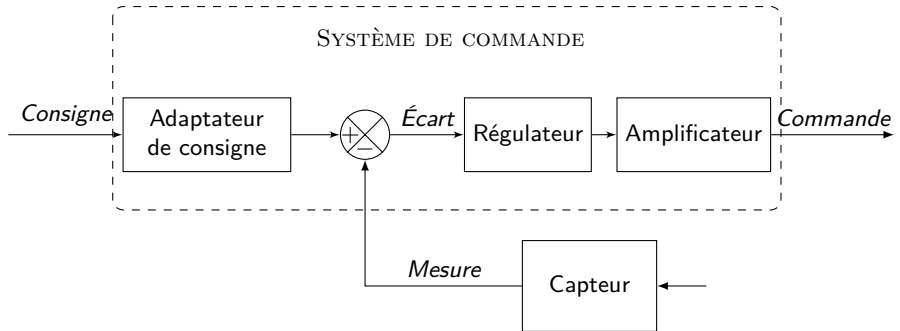
Définition (Système asservi)

Un système asservi est l'association d'un processus, de capteurs et d'un système de commande permettant, à partir des consignes, de piloter une ou plusieurs grandeurs physiques du processus.



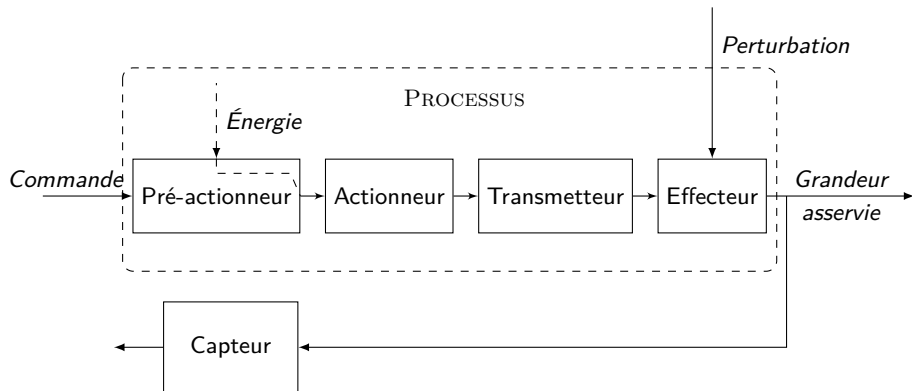
Système asservi

Structure du système de commande



Système asservi

Structure du processus



Performances de la commande d'un système

Définition (Système causal)

Un système est dit causal si sa réponse à un instant donné ne dépend que des entrées précédant cet instant.

Performances :

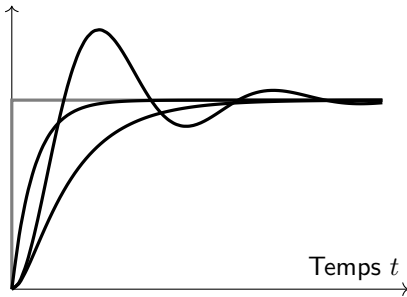
- **stabilité** : la réponse du système converge-t-elle pour une entrée constante ?
- **précision** : le système asservi atteint-il la valeur de consigne ?
- **rapidité** : le combien de temps faut-il au système pour se stabiliser ?
- **dépassements** : la grandeur de sortie a-t-elle tendance à dépasser la valeur à convergence et osciller autour avant de se stabiliser ?
- **sensibilité aux perturbations** : les perturbations agissant sur le système modifient-elles la valeur à convergence de la grandeur asservie ?

Performances de la commande d'un système

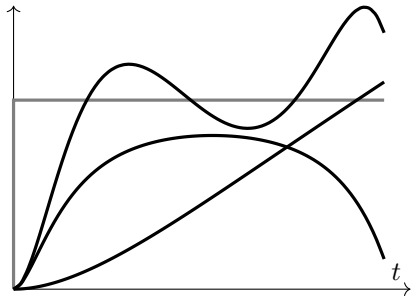
Stabilité

Définition (Stabilité)

Un système est stable si pour toute entrée bornée, la sortie est bornée.



Systèmes stables



Systèmes instables

Vidéo : [hélicoptère](#)

Performances de la commande d'un système

Rapidité

Définition (Rapidité)

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

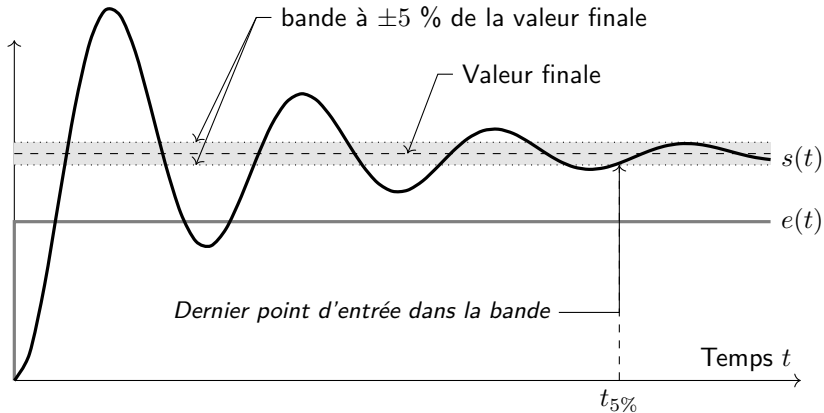
Définition (Temps de réponse à 5 %)

Le temps de réponse à 5 % d'un système, noté $t_{5\%}$, correspond au temps mis par la réponse de ce système soumis à un échelon pour entrer définitivement dans une bande à $\pm 5\%$ de sa valeur finale.

Performances de la commande d'un système

Rapidité

Temps de réponse à 5 %



Performances de la commande d'un système

Précision

Définition (Précision)

La précision qualifie l'aptitude d'un système à respecter la consigne.

Définition (Erreur)

L'erreur $\varepsilon(t)$ est la différence entre la consigne $e(t)$ et la sortie $s(t)$:

$$\varepsilon(t) = e(t) - s(t) .$$

Elle n'est définie que si la consigne et la sortie sont de même nature.

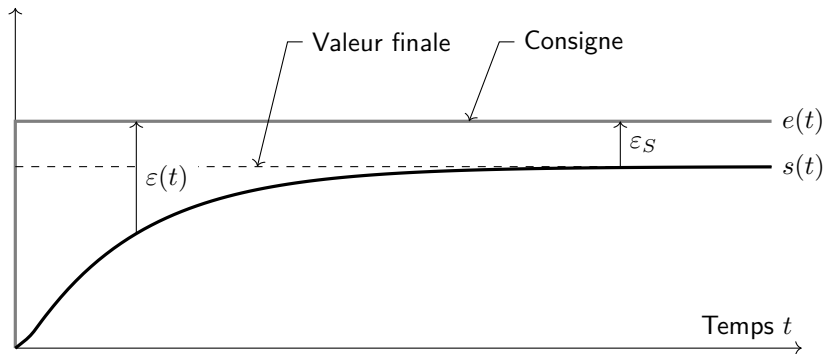
Définition (Erreur statique)

L'erreur statique ε_S est la limite au temps long de l'erreur associée à la réponse d'un système soumis à un échelon :

$$\varepsilon_S = \lim_{t \rightarrow +\infty} \varepsilon(t) .$$

Performances de la commande d'un système

Précision

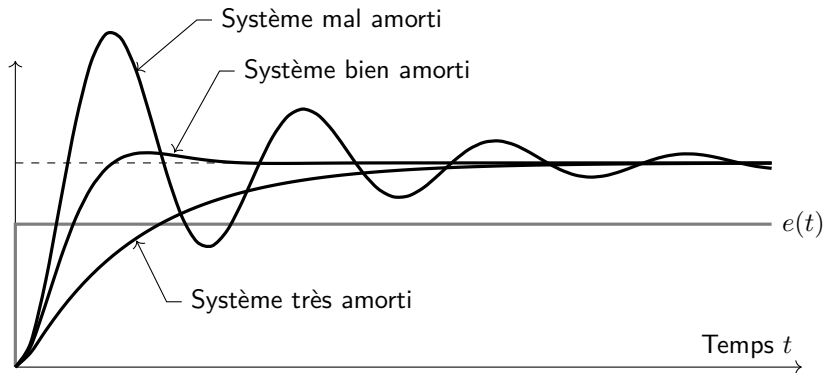


Performances de la commande d'un système

Dépassements

Définition (Dépassements)

Un système stable présente des dépassements si sa réponse oscille de façon transitoire autour de la valeur finale avant de l'atteindre.



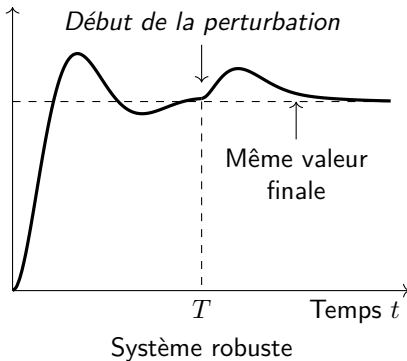
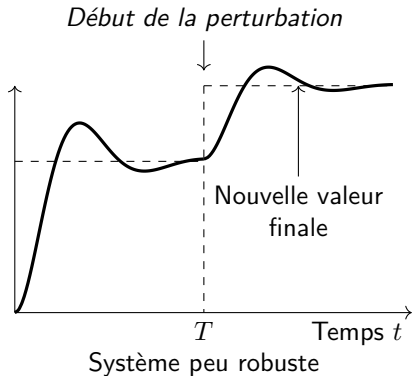
Vidéo : [sans](#) et [avec](#) dépassements

Performances de la commande d'un système

Sensibilité aux perturbations

Définition (Sensibilité aux perturbations)

Un système est sensible aux perturbations s'il ne converge pas vers les mêmes valeurs finales selon qu'une perturbation s'applique ou non.





Modélisation du comportement dynamique

Modélisation du comportement dynamique

Notion de modèle

Définition (Modèle mathématique d'un système)

Le modèle mathématique d'un système dynamique correspond à l'ensemble des lois mathématiques régissant la causalité entre ses entrées et ses sorties.

Types de modèles :

- les **modèles de connaissance**
construits de façon analytique à partir des lois de la physique régissant le comportement des constituants d'un système.
- les **modèles de comportement**
construits par identification à partir de résultats expérimentaux obtenus avec les systèmes réels.

Objectifs de la modélisation

Modélisation = étape préliminaire de l'**analyse** d'un système

Finalité :

**simuler et prédire
le comportement dynamique d'un système**

Pour cela, il faut :

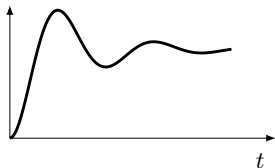
- proposer une modélisation des variables d'entrée (consignes, perturbations, etc.) ;
- modéliser le système global ;
- simuler le comportement du système (à la main ou par ordinateur) ;
- analyser la réponse de la simulation du comportement du système, c'est-à-dire analyser l'évolution de la sortie du modèle du système.

Hypothèses de modélisation

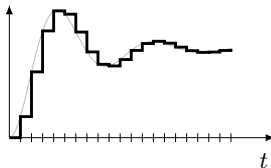
Systèmes continus

Définition (Système continu)

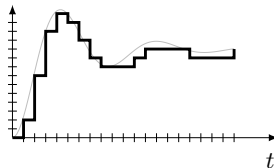
Un système est dit continu si les fonctions définissant ses entrées et sorties sont continues, c'est-à-dire définies pour tout instant.



(a) Représentation continue



(b) Échantillonnage (en temps)



(c) Échantillonnage & quantification (valeur)

Définition (Système linéaire)

Un système linéaire est un système continu décrit par des équations différentielles linéaires.

Un système linéaire vérifie :

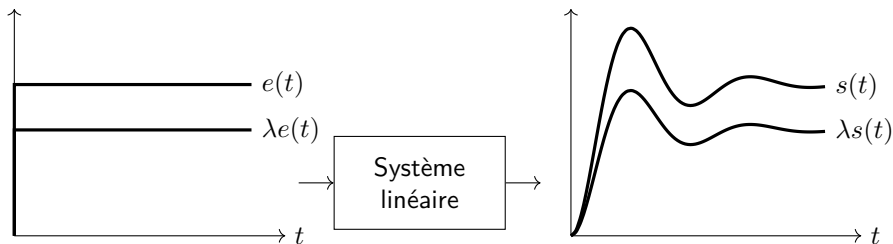
- le principe de proportionnalité ;
- le principe de superposition.

Hypothèses de modélisation

Systèmes linéaires

Définition (Principe de proportionnalité)

Un système vérifie le principe de proportionnalité (ou d'homogénéité) si à un multiple d'une entrée quelconque correspond le même multiple de la sortie correspondante.

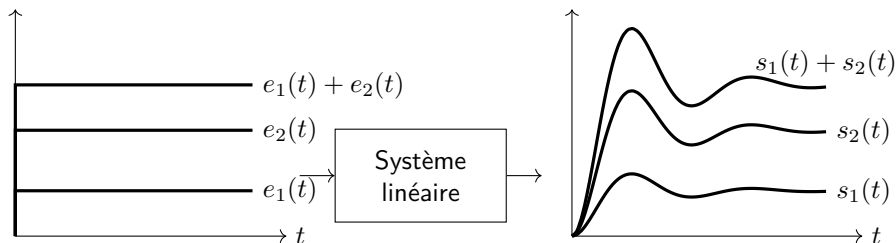


Hypothèses de modélisation

Systèmes linéaires

Définition (Principe de superposition)

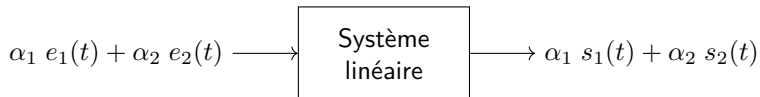
Un système vérifie le principe de superposition si à la somme de deux entrées quelconques correspond la somme des deux sorties correspondantes.



Hypothèses de modélisation

Systèmes linéaires

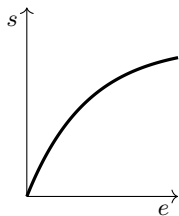
Un système linéaire vérifie $\forall (\alpha_1, \alpha_2) \in \mathbb{R}^2$:



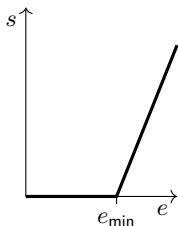
Problème :

tous les systèmes n'ont pas une caractéristique linéaire !

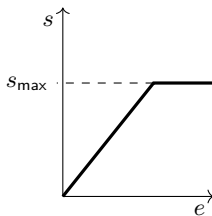
Exemples de non-linéarités :



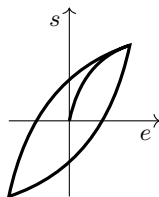
(a) Courbure



(b) Seuil



(c) Saturation

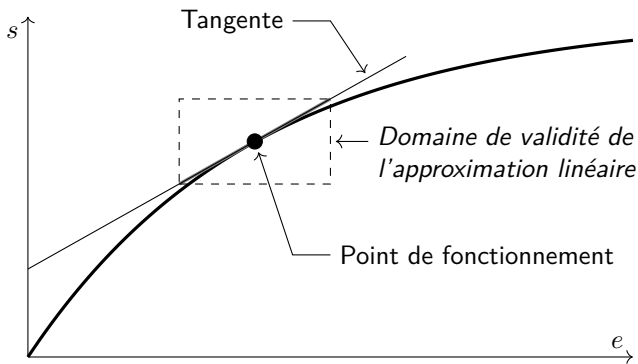


(d) Hystérésis

Hypothèses de modélisation

Systèmes linéaires

Si non linéaire,
linéarisation autour d'un point de fonctionnement :

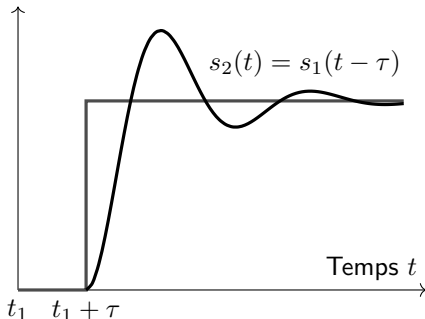
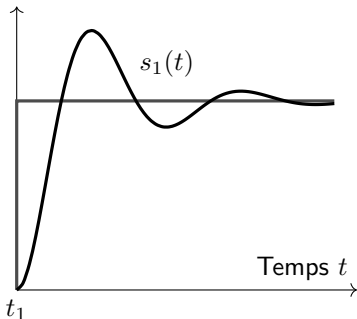


Hypothèses de modélisation

Systèmes invariants

Définition (Système invariant)

Un système est dit invariant si ses caractéristiques et propriétés régissant son comportement sont invariables dans le temps.



Hypothèses de modélisation

Systèmes linéaires continus invariants

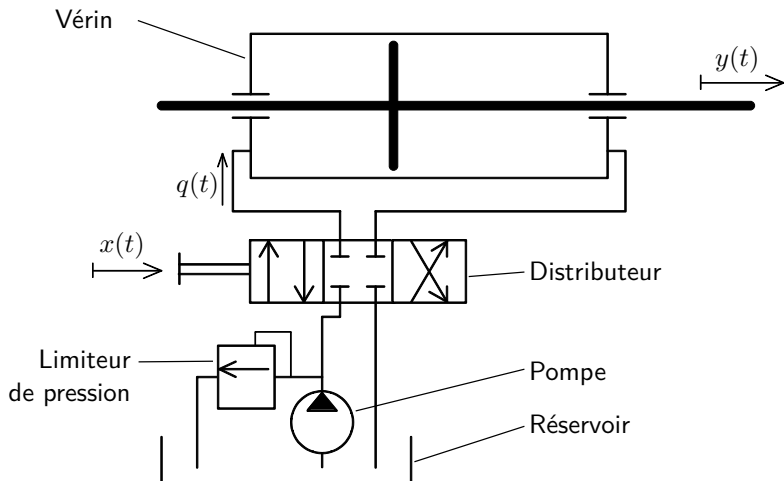
SLCI = Systèmes Linéaires Continus Invariants

Si h représente le modèle mathématique d'un système *qui relie la sortie $s(t)$ et l'entrée $e(t)$* alors :

- un système est linéaire : $h(\alpha_1 e_1 + \alpha_2 e_2) = \alpha_1 h(e_1) + \alpha_2 h(e_2)$
- un système est continu : la fonction h est une fonction continue du temps t ;
- un système est invariant : la réponse du système est indépendant du temps, c'est-à-dire si $e(t)$ induit $s(t)$ alors $e(t + \tau)$ induit $s(t + \tau)$.

Hypothèses de modélisation

Exemple de modélisation



Hypothèses de modélisation

Description par des équations différentielles

Équation différentielle linéaire à coefficients constants de la forme :

$$a_0 e(t) + a_1 \frac{de}{dt}(t) + \cdots + a_m \frac{d^m e}{dt^m}(t) = b_0 s(t) + b_1 \frac{ds}{dt}(t) + \cdots + b_n \frac{d^n s}{dt^n}(t)$$

où $a_0, a_1, \dots, a_m$ et $b_0, b_1, \dots, b_n$ sont des constantes réelles.

Principe de causalité : $n \geq m$

Notations :

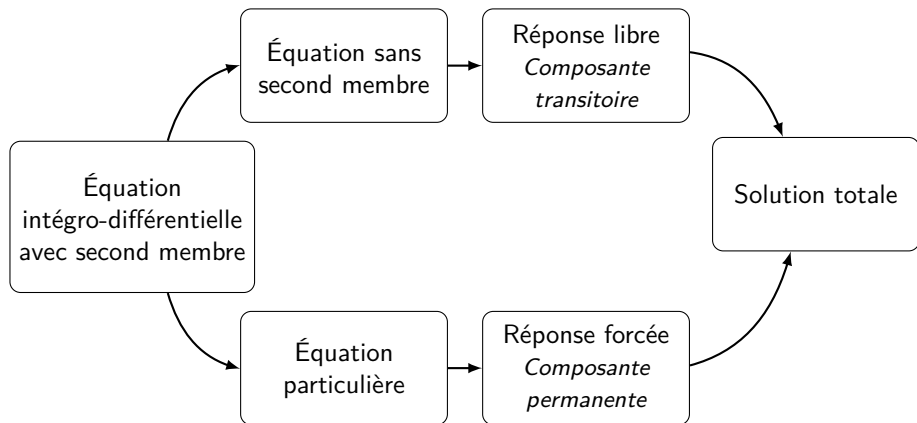
$$\dot{y}(t) = \frac{dy}{dt}(t) \quad \text{dérivée 1^{re} de } y \text{ par rapport au temps}$$

$$\ddot{y}(t) = \frac{d^2 y}{dt^2}(t) \quad \text{dérivée 2^{de} de } y \text{ par rapport au temps}$$

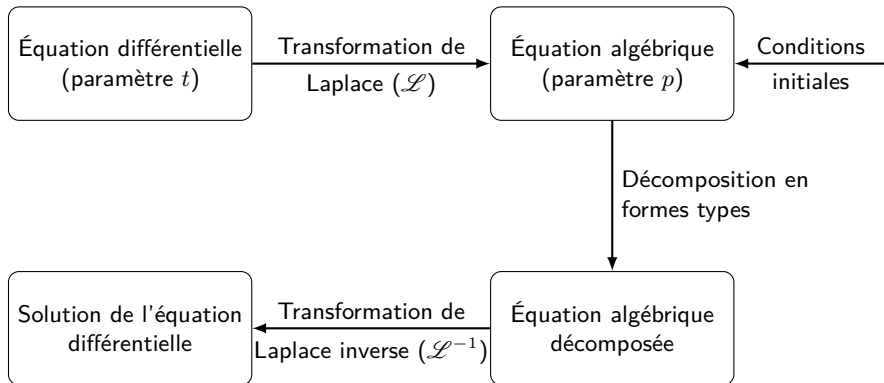


Résolution par la transformée de Laplace

Résolution des équations intégro-différentielles



Intérêt de la transformée de Laplace



Définition de la transformée de Laplace

Définition (Transformée de Laplace)

Soit f une fonction continue par morceaux sur $\mathbb{R}$. On appelle transformée de Laplace de f la fonction $F = \mathcal{L}[f]$ de la variable complexe p définie par la relation intégrale :

$$F(p) = \lim_{\tau \rightarrow +\infty} \int_0^{\tau} e^{-pt} f(t) dt = \int_0^{+\infty} e^{-pt} f(t) dt$$

pour toutes les valeurs de $p \in \mathbb{C}$ pour laquelle cette intégrale impropre converge.

$f(t)$ est appelée *originale* et sa transformée $F(p)$ est appelée *image*.

La variable complexe p (fréquence) est la variable conjuguée de t (temps).

Existence de la transformée de Laplace

En notant $p = \sigma + j\omega$ avec j un complexe tel que $j^2 = -1$, il vient :

$$F(p) = \int_0^{+\infty} e^{-pt} f(t) dt = \int_0^{+\infty} e^{-j\omega} e^{-\sigma t} f(t) dt$$

où $e^{-j\omega}$ est un complexe de module 1.

■ Convergence/Existence

Cette intégrale converge si f est à croissance exponentielle d'ordre $\alpha < \operatorname{Re}(p) = \sigma$, c'est-à-dire s'il existe $t_0, M > 0$ tels que :

$$\forall t \geq t_0, \quad |f(t)| \leq M e^{\alpha t} \implies e^{-\sigma t} |f(t)| \leq M e^{(\alpha - \sigma)t} \xrightarrow{t \rightarrow +\infty} 0$$

α est appelée l'abscisse de convergence.

■ Unicité

À une fonction f correspond une seule transformée de Laplace $F = \mathcal{L}[f]$.

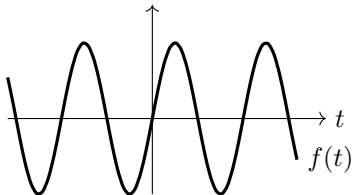
Propriétés de la transformée de Laplace

■ Fonction de Heaviside (ou échelon unité) :

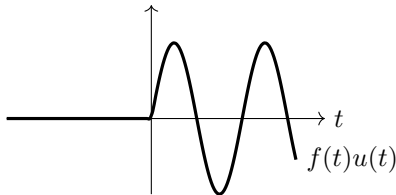
$$u(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } t \geq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}.$$

Définition (Fonction causale)

Une fonction f définie sur $\mathbb{R}$ est dite **causale** si $f(t) = 0$ pour $t < 0$.



Fonction non causale



Fonction causale

Propriétés de la transformée de Laplace

Propriété

Pour toute fonction f , la fonction fu est causale et on a :

$$\mathcal{L}[f] = \mathcal{L}[fu] .$$

Propriété (Injectivité)

La transformée de Laplace est injective, c'est-à-dire que deux fonctions causales distinctes ont des images distinctes. Ce qui se traduit pour tout couple de fonctions causales f et g :

$$\mathcal{L}[f] = \mathcal{L}[g] \implies f = g .$$

La fonction f telle que $\mathcal{L}[f] = F$ est appelée originale de F .

Démonstration...

Propriétés de la transformée de Laplace

Théorème (Linéarité)

La transformée de Laplace d'une combinaison linéaire de deux fonctions f et g (dont la transformée de Laplace existe) est la combinaison linéaire des transformées de Laplace de ces deux fonctions ; doit :

$$\forall (\alpha, \beta) \in \mathbb{R}^2, \quad \mathcal{L} [\alpha f(t) + \beta g(t)] = \alpha F(p) + \beta G(p) .$$

Démonstration...

Propriétés de la transformée de Laplace

Théorème (Dérivation)

Si f est une fonction dérivable dont la transformée de Laplace existe alors la transformée de Laplace de sa dérivée est définie par :

$$\mathcal{L} \left[\frac{df}{dt}(t) \right] = pF(p) - f(0)$$

Démonstration...

Propriétés de la transformée de Laplace

Théorème (Dérivation d'ordre 2)

Si f est une fonction deux fois dérivable et dont la transformée de Laplace existe alors la transformée de Laplace de sa dérivée seconde est définie par :

$$\mathcal{L} \left[\frac{d^2 f}{dt^2}(t) \right] = p^2 F(p) - pf(0) - \dot{f}(0^+)$$

Démonstration...

Propriétés de la transformée de Laplace

Théorème (Dérivation d'ordre n)

Si f est une fonction n fois dérivable et dont la transformée de Laplace existe alors la transformée de Laplace de sa n -ième dérivée est définie par :

$$\mathcal{L} \left[\frac{d^n f}{dt^n}(t) \right] = p^n F(p) - p^{n-1} f(0) - p^{n-2} \dot{f}(0^+) - \dots - \frac{d^{n-1} f}{dt^{n-1}}(0^+)$$

Démonstration...

■ Conditions de Heaviside :

$$f(0) = 0, \quad \dot{f}(0^+) = 0, \quad \ddot{f}(0^+) = 0, \quad \dots \quad \frac{d^n f}{dt^n}(0^+) = 0$$

■ Dérivation et conditions de Heaviside :

Si le système est dans des conditions de Heaviside alors :

$$\begin{aligned}\mathcal{L} \left[\frac{df}{dt}(t) \right] &= p F(p) \\ \mathcal{L} \left[\frac{d^2 f}{dt^2}(t) \right] &= p^2 F(p) \\ &\vdots \\ \mathcal{L} \left[\frac{d^n f}{dt^n}(t) \right] &= p^n F(p)\end{aligned}$$

Propriétés de la transformée de Laplace

Propriété (Intégration d'une fonction causale)

La transformée de Laplace d'une fonction g définie par :

$$g(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau$$

et de valeur initiale nulle est égale à :

$$\mathcal{L} \left[\int_0^t f(\tau) d\tau \right] = \frac{F(p)}{p}$$

Démonstration...

Propriétés de la transformée de Laplace

Théorème (Retard)

Soient f une fonction causale et g sa décalée de $\tau \geq 0$, telle que :

$$\begin{cases} g(t) = 0 & \text{pour } 0 \leq t < \tau \\ g(t) = f(t - \tau) & \text{pour } t \geq \tau \end{cases}$$

alors

$$\mathcal{L}[f(t - \tau)] = e^{-p\tau} \mathcal{L}[f(t)] = e^{-p\tau} F(p) .$$

Démonstration...

Propriétés de la transformée de Laplace

Théorème (Modulation)

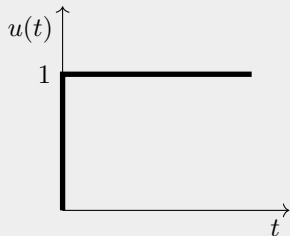
Soient f une fonction et e^{-at} une fonction de modulation avec $a \in \mathbb{C}$. La transformée de Laplace de la fonction modulée $t \mapsto f(t) e^{-at}$ est définie par :

$$\mathcal{L} [f(t) e^{-at}] = F(p + a) .$$

- si $a \in \mathbb{R}^+$: amortissement (théorème d'amortissement) ;
- si $a = j\omega$: déphasage.

Démonstration...

Transformée de Laplace d'un échelon



Échelon unitaire ou fonction de Heaviside :

$$u(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } t \geq 0 \\ u(t) = 0 & \text{sinon} \end{cases}.$$

Théorème

La transformée de Laplace de l'échelon unitaire est égale à

$$\mathcal{L}[u(t)] = \frac{1}{p}$$

Démonstration...

Transformée de Laplace d'une constante

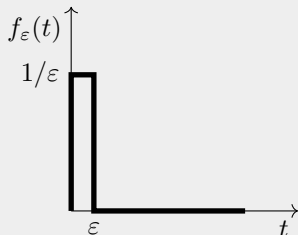
Propriété

La transformée de Laplace d'une fonction constante $t \mapsto C$ est égale à

$$\mathcal{L}[C] = \mathcal{L}[Cu] = C \mathcal{L}[u] = \frac{C}{p} .$$

Transformée de Laplace d'une impulsion

L'impulsion unité est définie par la limite de la fonction



$$f_{\varepsilon}(t) = \begin{cases} \frac{1}{\varepsilon} & \text{si } t \in [0, \varepsilon[\\ 0 & \text{sinon} \end{cases} .$$

quand ε tend vers 0, soit :

$$\delta(t) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} f_{\varepsilon}(t) .$$

Théorème

La transformée de Laplace de l'impulsion unité est égale à

$$\mathcal{L} [\delta(t)] = 1$$

Démonstration...

Définition (Dirac)

Le dirac en $\tau \geq 0$ est une forme linéaire qui à toute fonction $f \in C^0(\mathbb{R}^+)$ associe sa valeur en τ :

$$\delta_\tau : f \mapsto f(\tau) .$$

Propriété

L'impulsion unité $\delta(t)$ correspond au dirac en 0.

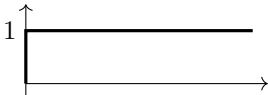
Transformée de Laplace de fonctions usuelles (1/3)

Fonction	Allure	$f(t)$	$F(p)$
Impulsion		$\delta(t)$	1
Échelon		$u(t)$	$\frac{1}{p}$
Rampe		$a t u(t)$	$\frac{a}{p^2}$
Puissance		$t^n u(t)$	$\frac{n!}{p^{n+1}}$

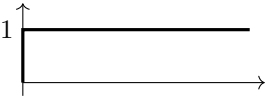
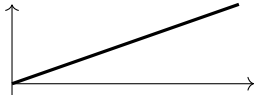
Transformée de Laplace de fonctions usuelles (1/3)

Fonction	Allure	$f(t)$	$F(p)$
Impulsion		$\delta(t)$	1
Échelon		$u(t)$	$\frac{1}{p}$
Rampe		$a t u(t)$	$\frac{a}{p^2}$
Puissance		$t^n u(t)$	$\frac{n!}{p^{n+1}}$

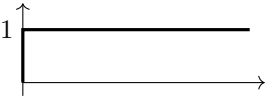
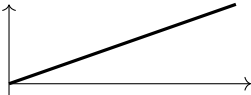
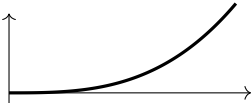
Transformée de Laplace de fonctions usuelles (1/3)

Fonction	Allure	$f(t)$	$F(p)$
Impulsion		$\delta(t)$	1
Échelon		$u(t)$	$\frac{1}{p}$
Rampe		$a t u(t)$	$\frac{a}{p^2}$
Puissance		$t^n u(t)$	$\frac{n!}{p^{n+1}}$

Transformée de Laplace de fonctions usuelles (1/3)

Fonction	Allure	$f(t)$	$F(p)$
Impulsion		$\delta(t)$	1
Échelon		$u(t)$	$\frac{1}{p}$
Rampe		$a t u(t)$	$\frac{a}{p^2}$
Puissance		$t^n u(t)$	$\frac{n!}{p^{n+1}}$

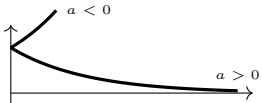
Transformée de Laplace de fonctions usuelles (1/3)

Fonction	Allure	$f(t)$	$F(p)$
Impulsion		$\delta(t)$	1
Échelon		$u(t)$	$\frac{1}{p}$
Rampe		$a t u(t)$	$\frac{a}{p^2}$
Puissance		$t^n u(t)$	$\frac{n!}{p^{n+1}}$

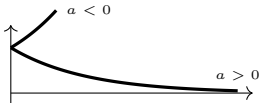
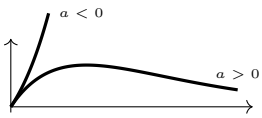
Transformée de Laplace de fonctions usuelles (2/3)

Fonction	Allure	$f(t)$	$F(p)$
Exponentielle		$e^{-at} u(t)$	$\frac{1}{p+a}$
		$t e^{-at} u(t)$	$\frac{1}{(p+a)^2}$
Sinus		$\sin(\omega t) u(t)$	$\frac{\omega}{p^2 + \omega^2}$
Cosinus		$\cos(\omega t) u(t)$	$\frac{p}{p^2 + \omega^2}$

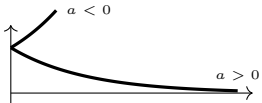
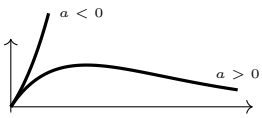
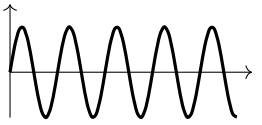
Transformée de Laplace de fonctions usuelles (2/3)

Fonction	Allure	$f(t)$	$F(p)$
Exponentielle		$e^{-at} u(t)$	$\frac{1}{p+a}$
		$t e^{-at} u(t)$	$\frac{1}{(p+a)^2}$
Sinus		$\sin(\omega t) u(t)$	$\frac{\omega}{p^2 + \omega^2}$
Cosinus		$\cos(\omega t) u(t)$	$\frac{p}{p^2 + \omega^2}$

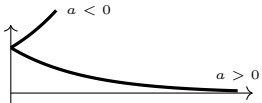
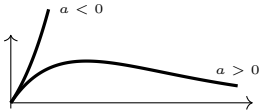
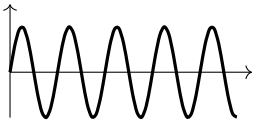
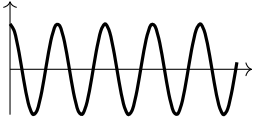
Transformée de Laplace de fonctions usuelles (2/3)

Fonction	Allure	$f(t)$	$F(p)$
Exponentielle		$e^{-at} u(t)$	$\frac{1}{p+a}$
		$t e^{-at} u(t)$	$\frac{1}{(p+a)^2}$
Sinus		$\sin(\omega t) u(t)$	$\frac{\omega}{p^2 + \omega^2}$
Cosinus		$\cos(\omega t) u(t)$	$\frac{p}{p^2 + \omega^2}$

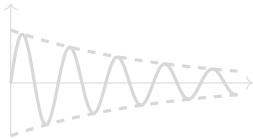
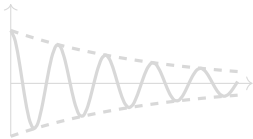
Transformée de Laplace de fonctions usuelles (2/3)

Fonction	Allure	$f(t)$	$F(p)$
Exponentielle		$e^{-at} u(t)$	$\frac{1}{p+a}$
		$t e^{-at} u(t)$	$\frac{1}{(p+a)^2}$
Sinus		$\sin(\omega t) u(t)$	$\frac{\omega}{p^2 + \omega^2}$
Cosinus		$\cos(\omega t) u(t)$	$\frac{p}{p^2 + \omega^2}$

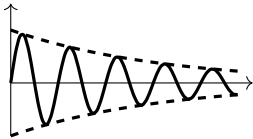
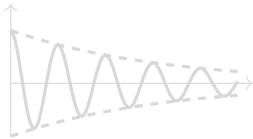
Transformée de Laplace de fonctions usuelles (2/3)

Fonction	Allure	$f(t)$	$F(p)$
Exponentielle		$e^{-at} u(t)$	$\frac{1}{p+a}$
		$t e^{-at} u(t)$	$\frac{1}{(p+a)^2}$
Sinus		$\sin(\omega t) u(t)$	$\frac{\omega}{p^2 + \omega^2}$
Cosinus		$\cos(\omega t) u(t)$	$\frac{p}{p^2 + \omega^2}$

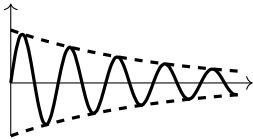
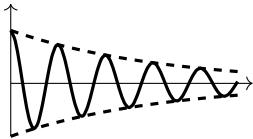
Transformée de Laplace de fonctions usuelles (3/3)

Fonction	Allure	$f(t)$	$F(p)$
Sinus amorti		$\sin(\omega t) e^{-at} u(t)$	$\frac{\omega}{(p+a)^2 + \omega^2}$
Cosinus amorti		$\cos(\omega t) e^{-at} u(t)$	$\frac{p+a}{(p+a)^2 + \omega^2}$

Transformée de Laplace de fonctions usuelles (3/3)

Fonction	Allure	$f(t)$	$F(p)$
Sinus amorti		$\sin(\omega t) e^{-at} u(t)$	$\frac{\omega}{(p+a)^2 + \omega^2}$
Cosinus amorti		$\cos(\omega t) e^{-at} u(t)$	$\frac{p+a}{(p+a)^2 + \omega^2}$

Transformée de Laplace de fonctions usuelles (3/3)

Fonction	Allure	$f(t)$	$F(p)$
Sinus amorti		$\sin(\omega t) e^{-at} u(t)$	$\frac{\omega}{(p+a)^2 + \omega^2}$
Cosinus amorti		$\cos(\omega t) e^{-at} u(t)$	$\frac{p+a}{(p+a)^2 + \omega^2}$

Exemple : commande de vérin hydraulique

Équation régissant le déplacement de la tige du vérin :

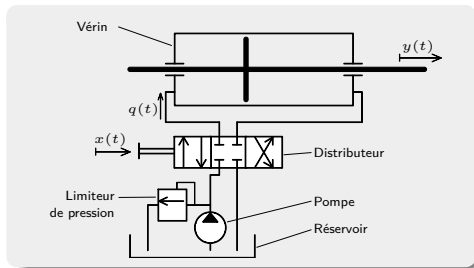
$$\dot{y}(t) = \frac{K}{S} x(t)$$

Transformées de Laplace :

$$\mathcal{L} [\dot{y}(t)] = pY(p) - y(0)$$

$$\mathcal{L} \left[\frac{K}{S} x(t) \right] = \frac{K}{S} X(p)$$

$$\dot{y}(t) = \frac{K}{S} x(t) \quad \xrightarrow{\mathcal{L}} \quad Y(p) = \frac{1}{p} \left(\frac{K}{S} X(p) + y(0) \right)$$



Exemple : commande de vérin hydraulique

Équation régissant le déplacement de la tige du vérin :

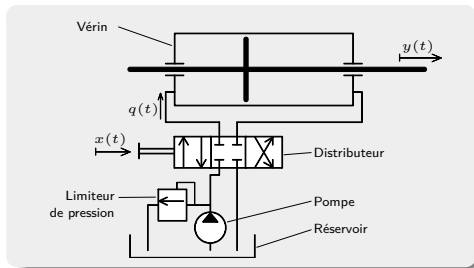
$$\dot{y}(t) = \frac{K}{S} x(t)$$

Transformées de Laplace :

$$\mathcal{L} [\dot{y}(t)] = pY(p) - y(0)$$

$$\mathcal{L} \left[\frac{K}{S} x(t) \right] = \frac{K}{S} X(p)$$

$$\dot{y}(t) = \frac{K}{S} x(t) \quad \xrightarrow{\mathcal{L}} \quad Y(p) = \frac{1}{p} \left(\frac{K}{S} X(p) + y(0) \right)$$



Exemple : commande de vérin hydraulique

Équation régissant le déplacement de la tige du vérin :

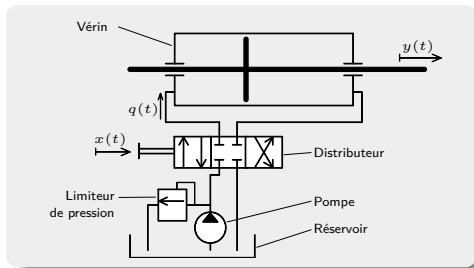
$$\dot{y}(t) = \frac{K}{S} x(t)$$

Transformées de Laplace :

$$\mathcal{L} [\dot{y}(t)] = pY(p) - y(0)$$

$$\mathcal{L} \left[\frac{K}{S} x(t) \right] = \frac{K}{S} X(p)$$

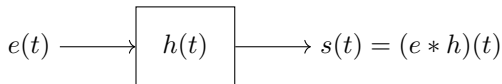
$$\dot{y}(t) = \frac{K}{S} x(t) \quad \xrightarrow{\mathcal{L}} \quad Y(p) = \frac{1}{p} \left(\frac{K}{S} X(p) + y(0) \right)$$



Produit de convolution

Définition (Produit de convolution)

$$(f * g)(t) = \int_0^t f(\tau) g(t - \tau) d\tau$$



Théorème (Convolution)

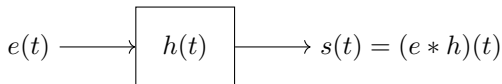
La transformée de Laplace du produit de convolution de deux fonctions f et g (dont les transformées existent) est définie par :

$$\mathcal{L} [(f * g)(t)] = F(p) G(p)$$

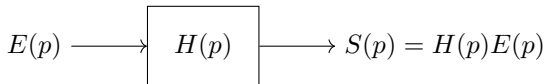
Démonstration...

Fonction de transfert

Domaine temporel



Domaine de Laplace



Définition (Fonction de transfert)

On appelle fonction de transfert ou transmittance le rapport entre la transformée de Laplace du signal d'entrée $e(t)$ et celle du signal de sortie $s(t)$:

$$H(p) = \frac{S(p)}{E(p)}$$

Fonction de transfert

■ Fonction de transfert = fraction rationnelle :

$$H(p) = \frac{a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \cdots + a_m p^m}{b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + \cdots + b_n p^n} = \frac{N(p)}{D(p)}$$

Définition (Forme canonique)

On appelle forme canonique d'une fonction de transfert la représentation qui consiste à imposer une constante unitaire aux polynômes

$$H(p) = \frac{K}{p^\alpha} \times \frac{1 + a_{1'} p + a_{2'} p^2 + \cdots + a_{m'} p^m}{1 + b_{1'} p + b_{2'} p^2 + \cdots + b_{r'} p^r}$$

de façon à faire apparaître le gain K et la classe α du système d'ordre n .

On appelle :

- **pôles** = racines du dénominateur $D(p)$
- **zéros** = racines du numérateur $N(p)$



Ne concerne que les systèmes stables !

Théorème (Valeur initiale)

Si une fonction f est causale et que la transformée de Laplace de sa dérivée existe alors sa valeur initiale peut être obtenue à partir de sa transformée de Laplace selon :

$$\lim_{t \rightarrow 0} f(t) = \lim_{p \rightarrow \infty} p F(p)$$

Démonstration...



Ne concerne que les systèmes stables !

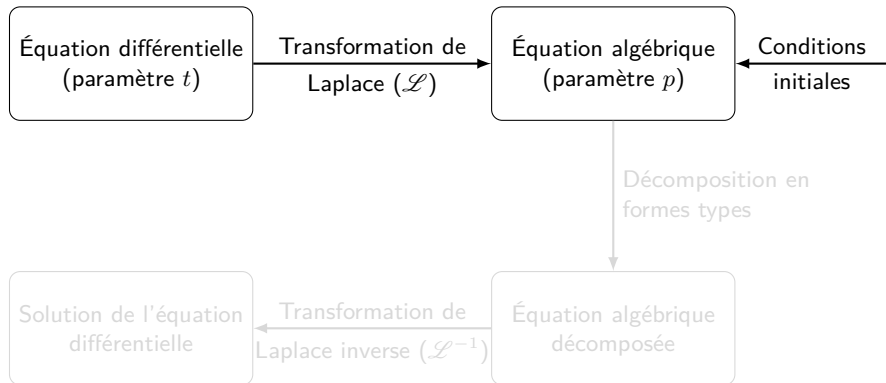
Théorème (Valeur finale)

Si une fonction f admet une limite finie pour $t \rightarrow +\infty$ et que la transformée de Laplace de sa dérivée existe alors sa valeur finale peut être obtenue à partir de sa transformée de Laplace selon :

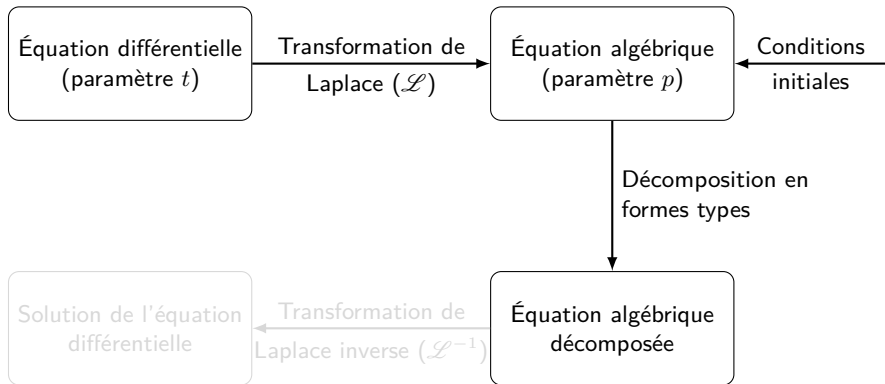
$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p F(p)$$

Démonstration...

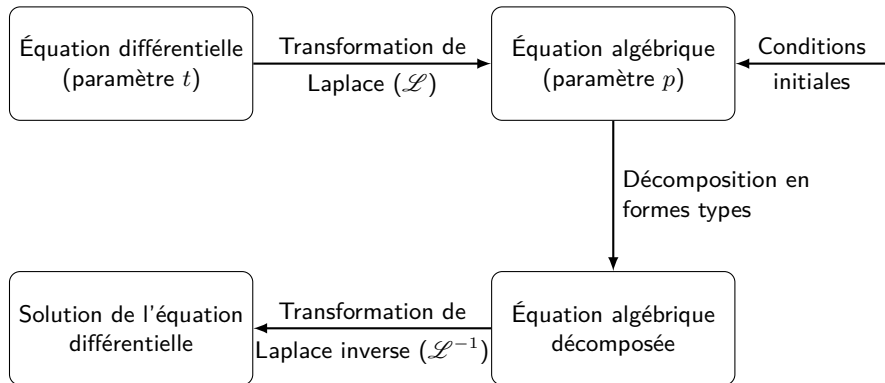
Expression de la réponse temporelle ?



Expression de la réponse temporelle ?



Expression de la réponse temporelle ?



Exemple : commande de vérin hydraulique

Équation régissant le déplacement de la tige du vérin dans le domaine Laplace :

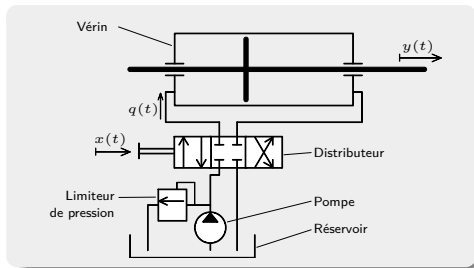
$$Y(p) = \frac{1}{p} \left(\frac{K}{S} X(p) + y(0) \right)$$

Si :

- conditions de Heaviside $\Rightarrow y(0) = 0$
- $x(t) = u(t)$ échelon unitaire tel que $X(p) = 1/p$

alors :

$$Y(p) = \frac{K}{S p^2} \xrightarrow{\mathcal{L}^{-1}} y(t) = \frac{K}{S} t \quad \forall t \geq 0$$



Exemple : commande de vérin hydraulique

Équation régissant le déplacement de la tige du vérin dans le domaine Laplace :

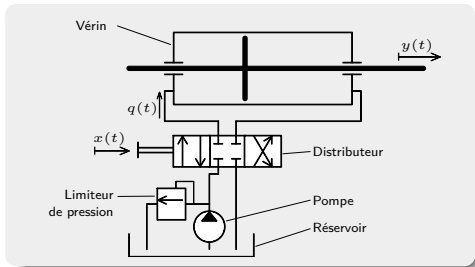
$$Y(p) = \frac{1}{p} \left(\frac{K}{S} X(p) + y(0) \right)$$

Si :

- conditions de Heaviside $\Rightarrow y(0) = 0$
- $x(t) = u(t)$ échelon unitaire tel que $X(p) = 1/p$

alors :

$$Y(p) = \frac{K}{S p^2} \xrightarrow{\mathcal{L}^{-1}} y(t) = \frac{K}{S} t \quad \forall t \geq 0$$



Décomposition en éléments simples

■ Étape 0 : Causalité ?

On se limitera aux fractions $\frac{N(p)}{D(p)}$ vérifiant $\deg N(p) \leq \deg D(p)$.

■ Étape 1 : Factorisation du dénominateur

Calculer les pôles du dénominateur puis le mettre sous forme factorisée :

$$D(p) = \underbrace{(p - a_1)}_{\text{réel simple}} \dots \underbrace{(p - a_2)^K}_{\text{réel multiple}} \dots \underbrace{(p - z_1)(p - \bar{z}_1)}_{\text{complexe conjugué simple}} \dots \underbrace{(p - z_2)^K(p - \bar{z}_2)^K}_{\text{complexe conjugué multiple}}$$

Décomposition en éléments simples

■ Étape 0 : Causalité ?

On se limitera aux fractions $\frac{N(p)}{D(p)}$ vérifiant $\deg N(p) \leq \deg D(p)$.

■ Étape 1 : Factorisation du dénominateur

Calculer les pôles du dénominateur puis le mettre sous forme factorisée :

$$D(p) = \underbrace{(p - a_1)}_{\text{réel simple}} \dots \underbrace{(p - a_2)^K}_{\text{réel multiple}} \dots \underbrace{(p - z_1)(p - \bar{z}_1)}_{\text{complexe conjugué simple}} \dots \underbrace{(p - z_2)^K(p - \bar{z}_2)^K}_{\text{complexe conjugué multiple}}$$

Décomposition en éléments simples

$$D(p) = \underbrace{(p - a_1)}_{\text{réel simple}} \dots \underbrace{(p - a_2)^K}_{\text{réel multiple}} \dots \underbrace{(p - z_1)(p - \bar{z}_1)}_{\text{complexe conjugué simple}} \dots \underbrace{(p - z_2)^K(p - \bar{z}_2)^K}_{\text{complexe conjugué multiple}}$$

■ Étape 2 : Forme de la décomposition

► **Pôle réel** a , de multiplicité $K \geq 1 \Rightarrow$ décomposition :

$$\sum_{\beta=1}^K \frac{A_{\beta}}{(p - a)^{\beta}} = \frac{A_1}{p - a} + \frac{A_2}{(p - a)^2} + \dots + \frac{A_K}{(p - a)^K}$$

$\Rightarrow$ déterminer K coefficients réels $A_1, A_2, \dots, A_K$.

Décomposition en éléments simples

$$D(p) = \underbrace{(p - a_1)}_{\text{réel simple}} \dots \underbrace{(p - a_2)^K}_{\text{réel multiple}} \dots \underbrace{(p - z_1)(p - \bar{z}_1)}_{\text{complexe conjugué simple}} \dots \underbrace{(p - z_2)^K(p - \bar{z}_2)^K}_{\text{complexe conjugué multiple}}$$

■ Étape 2 : Forme de la décomposition

► **Couple de pôles complexes conjugués** $z = \alpha + j\beta$ et $\bar{z} = \alpha - j\beta$, de multiplicité $K \geq 1$, on exploitera la forme polynômiale

$$(p - z)(p - \bar{z}) = p^2 + b p + c$$

avec $b = -2\alpha$ et $c = \alpha^2 + \beta^2$ et on cherchera une décomposition sous la forme :

$$\sum_{\beta=1}^K \frac{B_{\beta} p + C_{\beta}}{(p^2 + b p + c)^{\beta}} = \frac{B_1 p + C_1}{(p^2 + b p + c)} + \frac{B_2 p + C_2}{(p^2 + b p + c)^2} + \dots + \frac{B_K p + C_K}{(p^2 + b p + c)^K}$$

⇒ déterminer $2K$ coefficients réels $B_1, C_1, B_2, C_2, \dots, B_K$ et C_K .

Décomposition en éléments simples

■ Étape 3 : Détermination des coefficients

Pour déterminer n coefficients, il faut établir un système de n équations à partir de n valeurs particulières de p (différentes).

Seules les deux règles sont toujours valables :

- le coefficient de degré le plus élevé A_K associé à un pôle réel a , de multiplicité $K \geq 1$, est égal à :

$$A_K = \lim_{p \rightarrow a} (p - a)^K \frac{N(p)}{D(p)}$$

- les coefficients de degré le plus élevés B_K et C_K associés à un couple de pôles complexes conjugués $z = \alpha + j\beta$ et $\bar{z} = \alpha - j\beta$, de multiplicité $K \geq 1$, sont respectivement égaux à :

$$\begin{cases} B_K = \frac{1}{\beta} \operatorname{Im} \left(\lim_{p \rightarrow \alpha + j\beta} (p^2 + bp + c)^K \frac{N(p)}{D(p)} \right) \\ C_K = \operatorname{Re} \left(\lim_{p \rightarrow \alpha + j\beta} (p^2 + bp + c)^K \frac{N(p)}{D(p)} \right) - \alpha B_K \end{cases}$$

où Re et Im sont respectivement les fonctions partie réelle et partie

Décomposition en éléments simples

■ Étape 3 : Détermination des coefficients

Pour déterminer n coefficients, il faut établir un système de n équations à partir de n valeurs particulières de p (différentes).

Seules les deux règles sont toujours valables :

- le coefficient de degré le plus élevé A_K associé à un pôle réel a , de multiplicité $K \geq 1$, est égal à :

$$A_K = \lim_{p \rightarrow a} (p - a)^K \frac{N(p)}{D(p)}$$

- les coefficients de degré le plus élevés B_K et C_K associés à un couple de pôles complexes conjugués $z = \alpha + j\beta$ et $\bar{z} = \alpha - j\beta$, de multiplicité $K \geq 1$, sont respectivement égaux à :

$$\begin{cases} B_K = \frac{1}{\beta} \operatorname{Im} \left(\lim_{p \rightarrow \alpha + j\beta} (p^2 + bp + c)^K \frac{N(p)}{D(p)} \right) \\ C_K = \operatorname{Re} \left(\lim_{p \rightarrow \alpha + j\beta} (p^2 + bp + c)^K \frac{N(p)}{D(p)} \right) - \alpha B_K \end{cases}$$

où Re et Im sont respectivement les fonctions partie réelle et partie

Résolution d'équations différentielles

Exemple (Résolution d'une équation différentielle)

Résoudre l'équation différentielle suivante en utilisant la transformée de Laplace

$$y''(t) + 6y'(t) + 5y(t) = 3 \quad \text{avec } y(0) = 1 \text{ et } y'(0) = 2$$

Résolution d'équations différentielles

Exemple (Résolution d'une équation différentielle)

Résoudre l'équation différentielle suivante en utilisant la transformée de Laplace

$$y''(t) + y'(t) + y(t) = \sin(t) \quad \text{avec } y(0) = 1 \text{ et } y'(0) = -1$$



Représentation par schéma-blocs

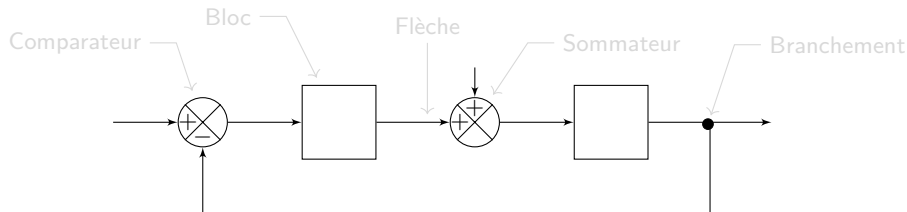


Schéma-blocs, on trouve :

- bloc = élément ou groupe d'éléments du système (COMPOSANT) ;
- flèche = grandeur physique entrant ou sortant d'un élément (SIGNAL) ;
- comparateur : soustrait des grandeurs de même nature physique ;
- sommateur : ajoute des grandeurs de même nature physique ;
- branchement = prélèvement d'information analogue à un capteur idéal.

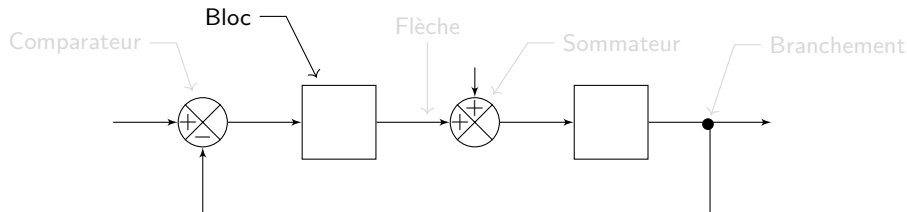


Schéma-blocs, on trouve :

- **bloc** = élément ou groupe d'éléments du système (COMPOSANT) ;
- flèche = grandeur physique entrant ou sortant d'un élément (SIGNAL) ;
- comparateur : soustrait des grandeurs de même nature physique ;
- sommateur : ajoute des grandeurs de même nature physique ;
- branchement = prélèvement d'information analogue à un capteur idéal.

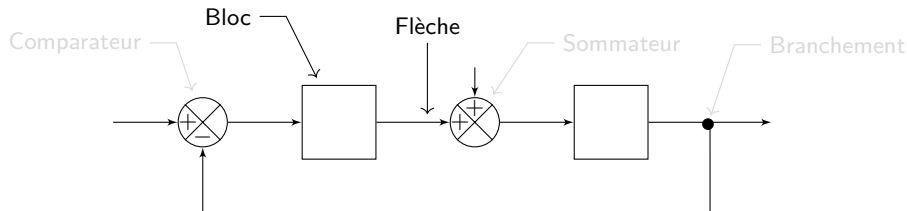


Schéma-blocs, on trouve :

- bloc = élément ou groupe d'éléments du système (COMPOSANT) ;
- flèche = grandeur physique entrant ou sortant d'un élément (SIGNAL) ;
- comparateur : soustrait des grandeurs de même nature physique ;
- sommateur : ajoute des grandeurs de même nature physique ;
- branchement = prélèvement d'information analogue à un capteur idéal.

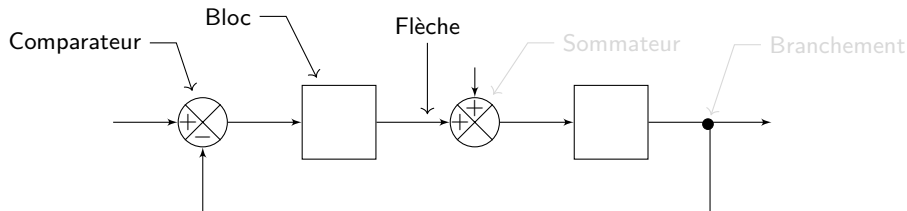


Schéma-blocs, on trouve :

- bloc = élément ou groupe d'éléments du système (COMPOSANT) ;
- flèche = grandeur physique entrant ou sortant d'un élément (SIGNAL) ;
- comparateur : soustrait des grandeurs de même nature physique ;
- sommateur : ajoute des grandeurs de même nature physique ;
- branchement = prélèvement d'information analogue à un capteur idéal.

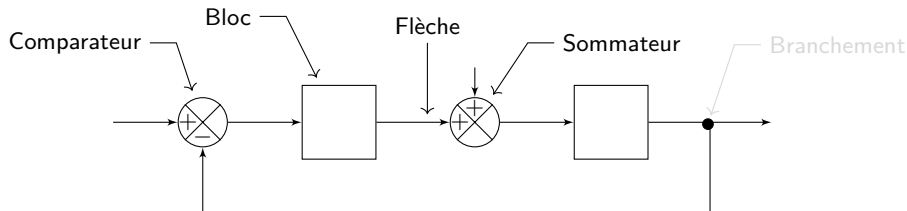


Schéma-blocs, on trouve :

- bloc = élément ou groupe d'éléments du système (COMPOSANT) ;
- flèche = grandeur physique entrant ou sortant d'un élément (SIGNAL) ;
- comparateur : soustrait des grandeurs de même nature physique ;
- sommateur : ajoute des grandeurs de même nature physique ;
- branchement = prélèvement d'information analogue à un capteur idéal.

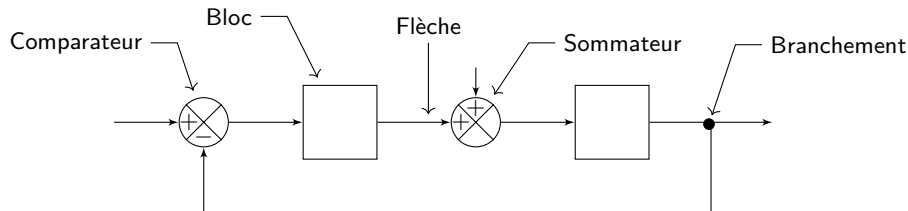
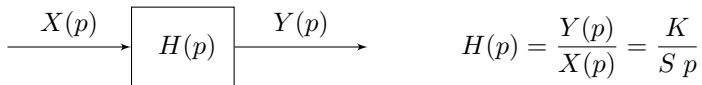


Schéma-blocs, on trouve :

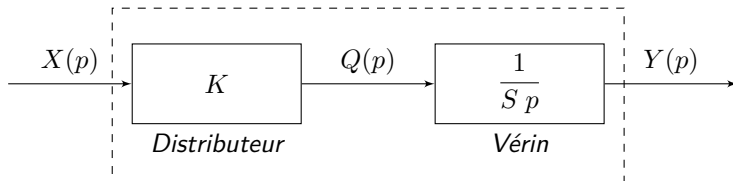
- bloc = élément ou groupe d'éléments du système (COMPOSANT) ;
- flèche = grandeur physique entrant ou sortant d'un élément (SIGNAL) ;
- comparateur : soustrait des grandeurs de même nature physique ;
- sommateur : ajoute des grandeurs de même nature physique ;
- branchement = prélèvement d'information analogue à un capteur idéal.

Exemple : commande de vérin hydraulique

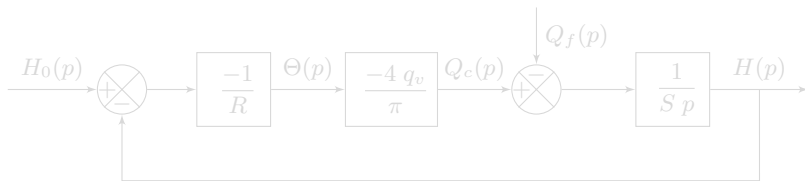
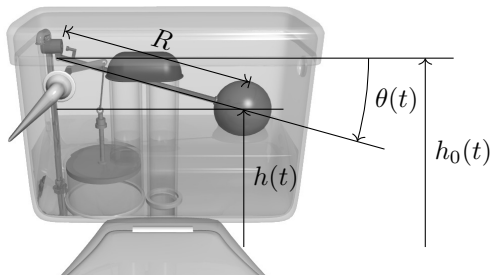
On peut écrire la transmittance du système global {distributeur + vérin}



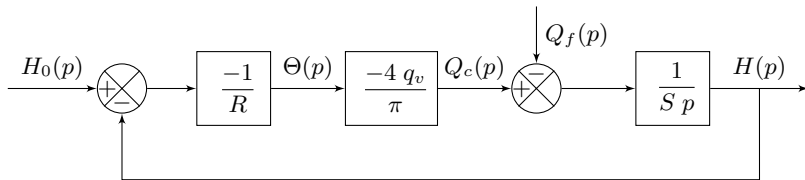
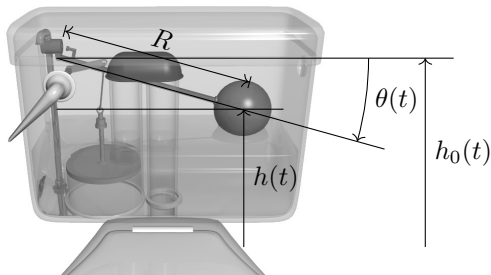
ou décomposer le système structurellement :



Exemple : commande de chasse d'eau

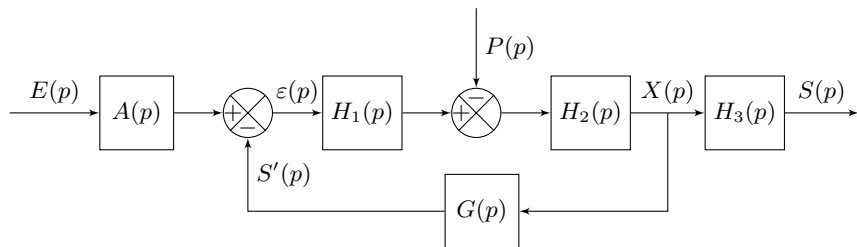


Exemple : commande de chasse d'eau



Chaîne fermée, asservissement

■ Schéma-blocs d'un asservissement



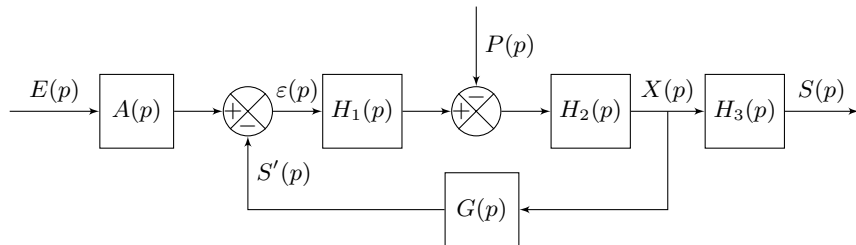
■ Expression du signal de sortie par lecture directe

- ❶ on part de l'entrée jusqu'à la sortie ;
- ❷ on remplace, si besoin, les variables intermédiaires (comme $X(p)$) ;
- ❸ on regroupe les termes associés à la sortie d'un coté pour écrire :

$$S(p) = T_1(p) E(p) + T_2(p) P(p)$$

avec T_1 et T_2 deux fonctions de transferts en boucle fermée.

Chaîne fermée, asservissement



Définition (FTBO)

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) d'un système est définie de l'écart $\varepsilon(p)$ au retour au même comparateur.

Ici :

$$\text{FTBO}(p) = \frac{S'(p)}{\varepsilon(p)} = H_1(p) H_2(p) G(p) .$$

Définition (FTBF)

Dans le cas de problèmes avec n entrées $(E_i(p))_{1 \leq i \leq n}$, on utilise le théorème de superposition. On annule successivement toutes les entrées sauf une. On calcule alors (pour chaque entrée) une fonction de transfert en boucle fermée :

$$\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, \quad H_i(p) = \frac{S(p)}{E_i(p)} \stackrel{\text{déf.}}{=} \frac{S(p)}{E_i(p)} \Big|_{(E_j(p)=0)_{1 \leq j \leq n, j \neq i}}$$

telle que la sortie totale soit égale à :

$$S(p) = \sum_{i=1}^n H_i(p) E_i(p) .$$

Chaîne fermée, asservissement

Définition (Schéma-blocs « simple »)

On qualifie de simple un schéma-blocs qui n'a qu'une seule boucle.

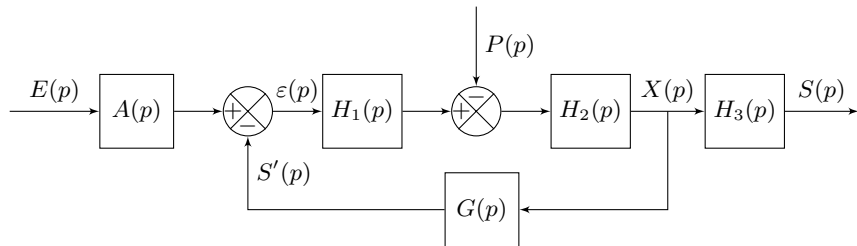
Définition (Formule de Black)

La fonction de transfert en boucle fermée entre une entrée et la sortie d'un système associé à un schéma-blocs « simple » peut être déterminée directement comme :

$$FTBF(p) = \frac{\text{chaîne directe}(p)}{1 + FTBO(p)}$$

où « chaîne directe » correspond au produit des blocs en série de l'entrée à la sortie.

Chaîne fermée, asservissement



Par théorème de superposition + formule de Black :

- cas $P = 0$:

$$T_1(p) = \left. \frac{S(p)}{E(p)} \right|_{P=0} = \frac{A(p) H_1(p) H_2(p) H_3(p)}{1 + \text{FTBO}(p)} = \frac{A(p) H_1(p) H_2(p) H_3(p)}{1 + H_1(p) H_2(p) G(p)}$$

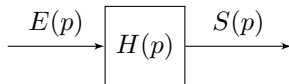
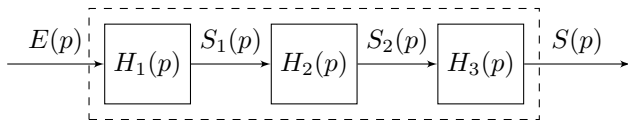
- cas $E = 0$:

$$T_2(p) = \left. \frac{S(p)}{P(p)} \right|_{E=0} = \frac{-H_2(p) H_3(p)}{1 + \text{FTBO}(p)} = \frac{-H_2(p) H_3(p)}{1 + H_1(p) H_2(p) G(p)}$$

Manipulation de schéma-blocs

Propriété (Association série)

La fonction de transfert équivalente à l'association de blocs en série est égale au produit des fonctions de transfert des blocs.

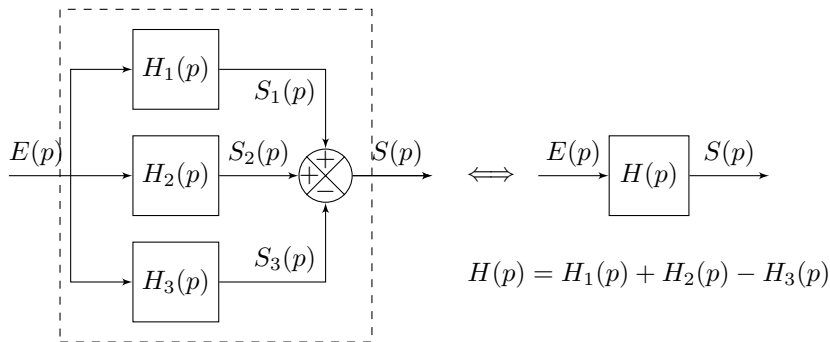


$$H(p) = H_1(p)H_2(p)H_3(p)$$

Manipulation de schéma-blocs

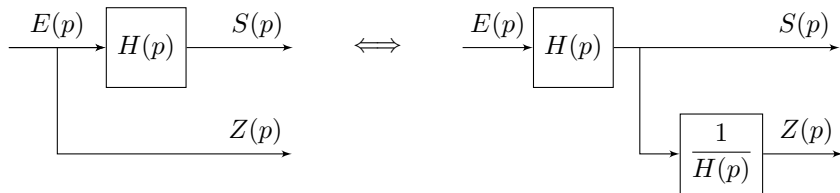
Propriété (Association parallèle)

La fonction de transfert équivalente à l'association de blocs en parallèle est égale à la somme des fonctions de transfert des blocs.

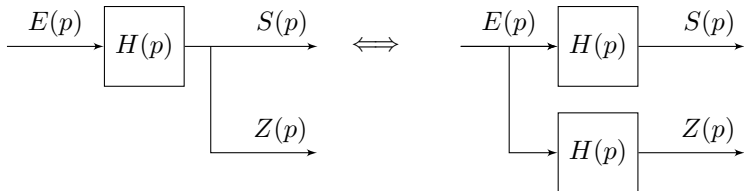


Déplacement d'un point de prélèvement

■ Déplacement aval

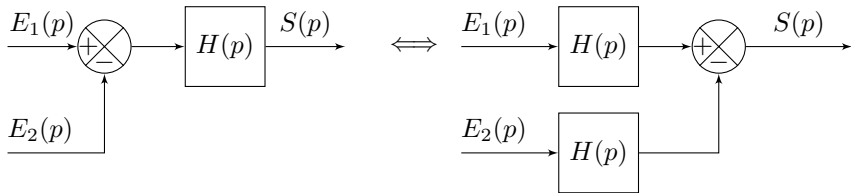


■ Déplacement amont

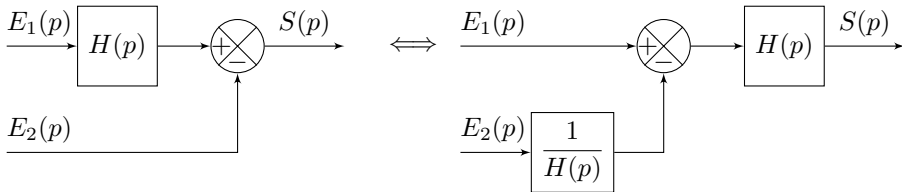


Déplacement d'un comparateur

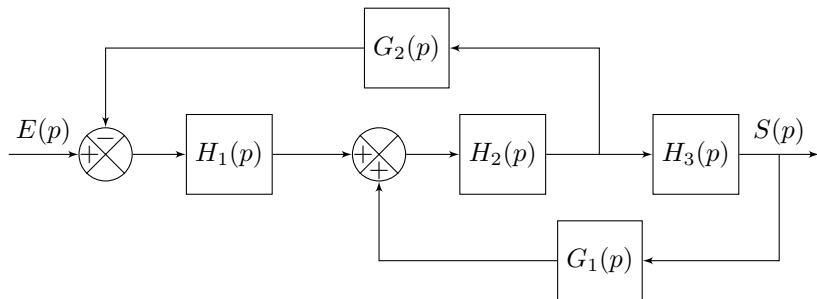
■ Déplacement aval



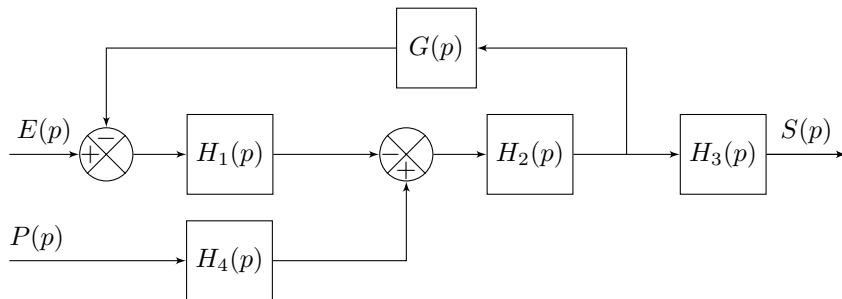
■ Déplacement amont



Simplification de schéma-blocs



Simplification de schéma-blocs





N. Mesnier, lycée international Jean Perrin, Lyon