# Les S.L.C.I

Définitions

Equation différentielle et fonction de transfert

Stabilité

Réponses temporelles Réponses fréquentielles de filtres

# Système linéaire

On associe à un système physique  $\Sigma$  un opérateur qui, à un signal d'entrée temporel e (t) associe s (t).

$$e(t) \xrightarrow{\Sigma} s(t)$$

Un système est linéaire si la réponse à une combinaison linéaire d'entrées est la combinaison linéaire des sorties (les entrées étant prises séparément).

$$\begin{array}{l} e_1(t) \xrightarrow{\Sigma} s_1(t) \\ e_2(t) \xrightarrow{\Sigma} s_2(t) \end{array} \quad \text{alors } \alpha_1 e_1(t) + \alpha_2 e_2(t) \xrightarrow{\Sigma} \alpha_1 s_1(t) + \alpha_2 s_2(t) \end{array}$$

# Exemples de non-linéarités



Exemples de non-linéarités



## Système continu

# Un système est continu si toutes les grandeurs qui définissent son état sont des grandeurs continues.

<u>Attention !</u> : Cela concerne les paramètres caractérisant le comportement du système et **non a priori les signaux** d'entrée et de sortie.

Par exemple, il ne peut y avoir de divergence ou de bifurcation de comportement autour d'une valeur d'amplitude d'entrée donnée ou à un instant donné. <u>Ainsi des signaux légèrement</u> <u>différents en forme et amplitude en entrée donneront des sorties de forme et d'amplitude voisine.</u>

En pratique, ce sont des systèmes destinés à recevoir et traiter des signaux définis à tout instant (fonctions d'une échelle de temps continue) et qui restitueront en sortie des signaux ayant cette même propriété. (par opposition aux systèmes traitant des données numérisées intrinsèquement discontinues : listes)

Conséquence intéressante : Cette qualité induit la propriété de **convergence :** si une suite de signaux d'entrée converge vers un signal limite alors la réponse du système à ce signal limite est nécessairement la limite de la suite des signaux réponses aux entrées de cette suite. Ce qui s'écrit sous la forme mathématique :

si 
$$\forall p \ e_p(t) \xrightarrow{\Sigma} s_p(t)$$
 alors  $e(t) \equiv \lim_{p \to \infty} e_p(t) \xrightarrow{\Sigma} s(t) \equiv \lim_{p \to \infty} s_p(t)$ 

## Système invariant dans le temps

Un système est invariant si une translation dans le temps de la grandeur d'entrée induit la même translation dans le temps de la grandeur de sortie.

$$e(t) \xrightarrow{\Sigma} s(t) \Rightarrow e(t+\tau) \xrightarrow{\Sigma} s(t+\tau)$$



# Application à l'écriture complexe d'un signal

## Système stable

#### Définition (trop) générale

(ou définition BIBO : Bonded Input=> Bounded Output)

*Un système est <u>stable</u> si sa réponse à une excitation bornée reste également bornée à tout instant.* 

Une définition équivalente est qu'un système est stable si la réponse libre du système tend vers zéro lorsque t tend vers l'infini.

(la réponse (ou régime) libre est l'évolution temporelle de la sortie lorsque l'entrée est nulle à chaque instant : l'évolution ultérieure dépend de l'état initial de la sortie et de la fonction de transfert du système)



## Système régi par une EDL

$$a_0 \cdot e(t) + \sum_{i=1}^n a_i \cdot \frac{\partial^i e}{\partial t^i} = b_0 \cdot s(t) + \sum_{i=1}^n b_i \cdot \frac{\partial^i s}{\partial t^i}$$

L'opérateur (appliqué à l'entrée) associé à cette équation différentielle est une combinaison linéaire d'opérateurs linéaires (la dérivation est un opérateur linéaire).

Les signaux sinusoïdaux sont appelés <u>fonctions isomorphes</u> des systèmes linéaires : une entrée purement sinusoïdale donne au travers un système linéaire un signal de sortie de lui-même purement sinusoïdal.

## Fonction de transfert

$$\underline{H}(j.\omega) \equiv \frac{\underline{s}(t)}{\underline{e}(t)} = \frac{\underline{S}}{\underline{E}} \quad \text{avec } \underline{s}(t) = \underline{S}.e^{j\omega t} \text{ et } \underline{e}(t) = \underline{E}.e^{j\omega t}$$
Cas de l'équation différentielle précédente : 
$$\underline{H}(j\omega) = \frac{\sum_{i=0}^{n} a_i.(j.\omega)^i}{\sum_{i=0}^{n} b_i.(j.\omega)^i}$$

Décomposition en Gain (module) et Phase (argument) :

$$\underline{H}(j\omega) = G(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)} \qquad G(\omega) \equiv \frac{S}{E} = |\underline{H}(\omega)|$$
$$\varphi(\omega) \equiv \varphi_s - \varphi_e = \arg(\underline{H}(\omega))$$

## Notation de Laplace

$$\underline{H}(p) \equiv \frac{\underline{s}(t)}{\underline{e}(t)} = \frac{\underline{S}(p)}{\underline{E}(p)}$$

On assimilera par commodité le p de Laplace au  $j\omega$  de Fourier, pourtant, pour des raisons de nécessaire convergence des intégrales de Laplace, p doit généralement avoir une partie réelle :  $p = a + j\omega$ 

En électronique nous ne rencontrerons quasiment que des fonctions de transfert dont le degré du numérateur est inférieur au degré du dénominateur et l'on pourra ainsi dans la plupart des cas décomposer la fonction de transfert en éléments simples. Ce qui donnera une forme de type :

$$\underline{H}(p) = A + \frac{B}{Cp+D} + \frac{Ep+F}{Ip^2 + Jp + K}$$

## Critère de stabilité d'un S.L.C.I

### Critère de ROUTH

Un S.L.I de fonction de transfert  $\underline{H}(p) \equiv \frac{\underline{s}(t)}{\underline{e}(t)} = \frac{\underline{S}(p)}{\underline{E}(p)} = \frac{N(p)}{D(p)}$ est stable si :

- on a deg(N(p))  $\leq$  deg(D(p)),

- les pôles de D(p) sont à partie réelle négative.

Pôles et Zéros : 
$$\underline{H}(p) = A \cdot \frac{(p - z_1) \cdot (p - z_2) \dots (p - z_m)}{(p - p_1) \cdot (p - p_2) \dots (p - p_n)}$$

## Transmittances d'ordre 1

• <u>Transmittance fondamentale d'ordre 1</u> : $\underline{H}(p) = \frac{H_0 + b\tau p}{1 + \tau p}$ , avec $\underline{\tau > 0}$ et $\underline{\sigma > 0}$ .					
Passe – bas du 1er ordre	Passe – haut du 1er ordre	Déphaseur passe tout			
$b = 0$ et $H_0 = 1$	$b = 1$ et $H_0 = 0$	$H_0 = -b = 1$			
$\underline{H}(p) = \frac{1}{1 + \tau p}$	$\underline{H}(p) = \frac{\tau p}{1 + \tau p}$	$\underline{H}(p) = \frac{1-\tau p}{1+\tau p};  \underline{H}  = 1.$			
$g_{dB}$ $0$ $-3$ $-3$ $-3$ $-3$ $-3$ $-3$ $-3$ $-3$	$\begin{array}{c} g_{dB} \\ 0 \\ -3 \end{array} \begin{array}{c} \log_{10}(\omega_0) \\ \log_{10}\omega \\ 0 \\ \log_{10}\omega $	$ \begin{array}{c}       \phi \ (rad) \\       0 \\       -\pi/2 \\       -\pi \end{array} $			
$\phi = -\arctan\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right), \ \omega_0 = \frac{1}{\tau}$	$\phi = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)$	$\phi = -2 \arctan\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)$			

# Critère de stabilité d'un S.L.C.I

• Systèmes d'ordre 1 :

Dénominateur  $1 + \tau p$ 

⇒ équa diff régime libre : 
$$s(t) + \tau \frac{ds}{dt} = 0$$
  
⇒ solution de type :  $s(t) = s(0^+) e^{-\frac{t}{\tau}}$ 

système stable si  $\tau > 0$ : convergence vers 0 par exponentielle décroissante  $\forall t \ge 0$ système instable si  $\tau < 0$ : divergence par exponentielle croissante  $\forall t \ge 0$ 

Rq : On aurait pu présenter le dénominateur sous la forme : -1- au'.p

On retiendra donc la règle de stabilité d'un premier ordre par des coefficients de même signe dans une présentation polynômiale du dénominateur de Laplace :

 $D(p) = b_0 + b_1 \cdot p$ : stable si  $b_0$  et  $b_1$  de même signes

	Transmittance	<u>fondamentale d</u>	<u>l'ordre 2</u> :
--	---------------	-----------------------	--------------------

 $\underline{H}(p) = \frac{\overline{H_0 + 2a\tau p + b\tau^2 p^2}}{1 + 2\sigma\tau p + \tau^2 p^2}, \text{ avec } \tau > 0 \text{ et } \sigma > 0.$ 

Passe – bas du 2 <sup>ème</sup> ordre	Passe – bande du 2 <sup>ème</sup> ordre	Passe – haut du 2 <sup>ème</sup> ordre
$H_0 = 1$ ; $a = b = 0$	$H_0 = 0 \ ; \ a = \sigma \ ; \ b = 0$	$H_0 = 0$ ; $a = 0$ ; $b = 1$
$\underline{H}(p) = \frac{1}{1 + 2\sigma\tau p + \tau^2 p^2}$	$\underline{H}(p) = \frac{2\sigma\tau p}{1 + 2\sigma\tau p + \tau^2 p^2}$	$\underline{H}(p) = \frac{\tau^2 p^2}{1 + 2\sigma\tau p + \tau^2 p^2}$
Asymptote haute fréquence à – 40 dB/décade.	Asymptote haute fréquence à – 20 dB/décade.	Asymptote haute fréquence horizontale.
Asymptote basse fréquence horizontale.	Asymptote basse fréquence à + 20 dB/décade.	Asymptote basse fréquence à + 40 dB/décade.

<i>Réjecteur de bande du 2<sup>ème</sup> ordre</i>	Déphaseur passe tout du 2 <sup>ème</sup> ordre	
$H_0 = 1 ; a = 0 ; b = 1$	$H_0 = 1$ ; $a = -\sigma$ ; $b = 1$	
$\underline{H}(p) = \frac{1 + \tau^2 p^2}{1 + 2\sigma\tau p + \tau^2 p^2}$	$\underline{H}(p) = \frac{1 - 2\sigma\tau p + \tau^2 p^2}{1 + 2\sigma\tau p + \tau^2 p^2}$	
Asymptotes basse et haute fréquence horizontales.	La rotation totale de phase, lorsque $\omega$ varie de 0 à l'infini est $\Delta \phi = -2\pi$	

# Critère de stabilité d'un S.L.C.I

• Systèmes d'ordre 2 :

Dénominateur de Laplace :  $1 + 2\sigma\tau p + \tau^2 p^2$ 

Plaçons-nous alors dans un cas général ne préjugeant pas des signes des coefficients (si ce n'est le caractère non nul de b2) :

Forme généralisée du dénominateur :  $b_0 + b_1 p + b_2 p^2$ 

ou 
$$\frac{b_0 + b_1 p + b_2 p^2}{b_2} = \left(\frac{b_0}{b_2}\right) + \left(\frac{b_1}{b_2}\right) p + p^2 = p^2 + \alpha p + \beta$$

 $\Rightarrow \text{ équa diff régime libre }: \frac{d^2 s(t)}{dt^2} + \alpha . \frac{ds(t)}{dt} + \beta . s(t) = 0$ 

 $\Rightarrow$  équa caractéristique :  $r^2 + \alpha r + \beta = 0$ 

discriminant :  $\Delta = \alpha^2 - 4\beta$  avec  $\alpha$  et  $\beta$  réels

## Critère de stabilité d'un S.L.C.I

• Systèmes d'ordre 2 :

Dénominateur de Laplace :

$$\beta + \alpha p + p^2$$

#### 1<sup>er</sup> cas :

 $\beta < 0 \Rightarrow \Delta = \alpha^2 - 4\beta > 0 \Rightarrow 2$  racines réelles dont une positive !

$$r_2 = \frac{-\alpha + \sqrt{(\alpha^2 - 4\beta)}}{2} > 0$$

La sortie solution  $s(t) = \lambda_1 e^{r_1 t} + \lambda_2 e^{r_2 t}$  divergera nécessairement pour  $t \to \infty$  ! Dans ce cas le système est INSTABLE

(ce cas ne nous arrivera quasiment jamais car :  $\beta = \frac{b_0}{b_2} = \frac{1}{\tau^2} > 0$  car  $\tau$  réel)

## Critère de stabilité d'un S.L.C.I

• Systèmes d'ordre 2 :

2<sup>eme</sup> cas :

$$\beta > 0 \Rightarrow \begin{cases} \alpha^2 > 4\beta & \Delta = \alpha^2 - 4\beta > 0 \quad (2.1) \\ \alpha^2 = 4\beta & \Delta = 0 \quad (2.2) \\ \alpha^2 < 4\beta & \Delta < 0 \quad (2.3) \end{cases}$$

$$r_{\frac{1}{2}} = \frac{-\alpha \pm \sqrt{(\alpha^2 - 4\beta)}}{2} < 0 \text{ deux racines réelles pour le } (2.1) \quad \substack{\text{négatives si } \alpha > 0 \Rightarrow STABLE \\ \text{positives si } \alpha < 0 \Rightarrow INSTABLE} \\ r_{double} = \frac{-\alpha}{2} < 0 \text{ une racine double pour le } (2.2) \quad \substack{\text{négative si } \alpha > 0 \Rightarrow STABLE \\ \text{positive si } \alpha < 0 \Rightarrow INSTABLE} \end{cases}$$

$$r_{\frac{3}{4}} = \frac{-\alpha \pm j\sqrt{(4\beta - \alpha^2)}}{2} \text{ deux racines complexes pour le } (2.3) \quad \substack{\text{dont la partie réelle est négative si } \alpha < 0 \Rightarrow INSTABLE \\ \text{dont la partie réelle est positive si } \alpha < 0 \Rightarrow INSTABLE \end{cases}$$

## Critère de stabilité d'un S.L.C.I

• Systèmes d'ordre 2 :

Conclusion

Un SLCI du second ordre et de dénominateur de Laplace  $\beta + \alpha p + p^2$ est stable si et seulement si les coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  sont positifs

On retiendra donc la règle de stabilité d'un second ordre par des coefficients de même signe dans une présentation polynômiale du dénominateur de Laplace :

 $D(p) = b_0 + b_1 \cdot p + b_2 \cdot p^2$ : stable si  $b_0 \cdot b_1$  et  $b_2$  de même signes

### Interprétation énergétique de la stabilité

Appliquée au signal de sortie consécutif à un régime libre, nous pouvons associer la condition de stabilité d'un système d'ordre 2 à la déperdition progressive « d'énergie »  $E_{\Sigma}(s(t))$  du système  $\Sigma$  qui n'est plus alimenté et siège d'un signal s(t). On peut définir cette forme générale d' « énergie » à une constante multiplicative près :

$$E_{\Sigma}(s(t)) \equiv K \cdot \left(\frac{1}{2}\dot{s}(t)^2 + \frac{\omega_0^2}{2}s(t)^2\right)$$

(Montrez que dans le cas particulier d'un circuit RLC cette expression correspond bien à l'énergie électrique du système complet (si s(t) est la tension aux bornes du condensateur alors K=LC<sup>2</sup>))

Le dénominateur de Laplace  $1 + 2\sigma\tau p + \tau^2 p^2$  correspond à l'équation différentielle :

$$\frac{d^{2}s}{dt^{2}} + \frac{2\sigma}{\tau}\dot{s}(t) + \frac{1}{\tau^{2}}s(t) = 0 \quad \text{que l'on multiplie par } \dot{s(t)} \neq 0$$
Pour faire apparaître : 
$$\frac{d^{2}s}{dt^{2}}\dot{s}(t) + \frac{1}{\tau^{2}}s(t)\dot{s}(t) = -\frac{2\sigma}{\tau}(\dot{s}(t))^{2}$$

$$\frac{d\left(\frac{E_{\Sigma}(s(t))}{K}\right)}{dt} = -\frac{2\sigma}{\tau}(\dot{s}(t))^{2}$$

### Interprétation énergétique de la stabilité



En revenant aux notations de la démonstration précédente :  $\alpha = \frac{2\sigma}{\tau}$  et  $\beta = \frac{1}{\tau^2} > 0$ 

On comprend que le cas  $\alpha > 0$  donnerait une énergie décroissante lors d'un régime libre

Alors que  $\alpha < 0$  donnerait une énergie croissante lors de ce régime libre.

Dans le cas d'un circuit ne contenant que des éléments passifs, le système est nécessairement stable  $\alpha > 0$ . La seule exception serait le cas  $\alpha = 0$  (circuit LC par exemple) mais ce n'est qu'une frontière ne correspondant jamais à une situation physique réelle.

Nous ne rencontrerons finalement des situations d'instabilité en électronique qu'en incorporant un composant actif apportant une énergie supérieure aux pertes (cas de l'ALI traité dans le chapitre suivant (réalisant par exemple une « résistance négative » ))

## Réponses temporelles des S.L.C.I.

## **Réponse Indicielle**

On appelle échelon unité ou fonction de Heaviside, notée u(t), la fonction définie par :



### **Réponse Indicielle**

Exemple d'un filtre passe-haut du premier ordre :

 $\underline{H(p)} = \frac{\tau \cdot p}{1 + \tau \cdot p} \Leftrightarrow s(t) + \tau \cdot \frac{ds(t)}{dt} = \tau \cdot \frac{de(t)}{dt}$ 

avec  $e(t) = E_0 . u(t)$  soit  $\frac{de(t)}{dt} = 0$  pour t < 0 et t > 0

so it pour t>0 : 
$$s(t) + \tau \cdot \frac{ds(t)}{dt} = 0 \Leftrightarrow s(t) = s(0^+) \cdot \exp(-\frac{t}{\tau})$$

Réponses temporelles des S.L.C.I.

### **Réponse Indicielle**

#### Exemple d'un filtre passe-haut du premier ordre :

Signaux finis => relation entre les discontinuités de e(t) et s(t)

$$s(t) + \tau \cdot \frac{ds(t)}{dt} = \tau \cdot \frac{de(t)}{dt}$$
$$\Rightarrow \int_{0^{-}}^{0^{+}} s(t) dt + \tau \cdot \left[ s(0^{+}) - s(0^{-}) \right] = \tau \cdot \left[ e(0^{+}) - e(0^{-}) \right]$$

Ainsi si s(t) est finie, les discontinuités de e(t) et s(t) sont égales Soit, si  $s(0^-)=0$ ,  $s(0^+)=E_0$  et donc  $s(t) = E_0 \cdot \exp(-\frac{t}{\tau})$  pour t>0



Réponses temporelles des S.L.C.I.

## Réponse à un signal d'énergie finie

#### Transformée de Laplace d'un signal

 $\underline{E}(p) = TL[\underline{e}(t)](p) \equiv \int_{0^{-}}^{+\infty} \underline{e}(t) \cdot e^{-pt} dt \text{ avec } p = \alpha + j\omega$ 

On obtient donc la réponse filtrée par la transformée de Laplace inverse :

$$\underline{s}(t) = TL^{-1}[\underline{S}(p)](t) \equiv \frac{1}{2j\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \underline{H}(p) \underline{E}(p) \underline{e}^{pt} dp$$

## Réponse à un signal d'énergie finie

Propriétés de la transformée de Laplace  $L_{I}[af(t)+bg(t)] = aF(p)+bG(p)$  (linéarité)

$$\begin{split} &L_{I}\left[\frac{df(t)}{dt}\right] = pF(p) - f(0_{-}) \quad \text{(dérivée)} \\ &L_{I}\left[\int_{0}^{t} f(t)dt\right] = \frac{F(p)}{p} \quad \text{(intégrale)} \\ &L_{I}\left[f(t-\tau)\right] = e^{-p\tau}F(p) \quad \text{(retard temporel)} \\ &L_{I}\left[e^{-\sigma t}f(t)\right] = F(p+\sigma) \quad \text{(translation de la transformée)} \end{split}$$

## Réponses temporelles des S.L.C.I. **Réponse à un signal d'énergie finie**

Transformées de Laplace de signaux fondamentaux

$$L_{I}[\delta(t)] = \int_{0_{-}}^{\infty} \delta(t)e^{-pt}dt = 1$$

$$L_{I}[\varepsilon(t)] = \int_{0_{-}}^{\infty} e^{-pt}dt = \frac{-1}{p}\left[e^{-pt}\right]_{0_{-}}^{\infty} = \frac{1}{p}$$

$$L_{I}\left[e^{-at}\varepsilon(t)\right] = \int_{0_{-}}^{\infty} e^{-at}e^{-pt}dt = \frac{-1}{p+a}\left[e^{-(p+a)t}\right]_{0_{-}}^{\infty} = \frac{1}{p+a}$$

## Réponses temporelles des S.L.C.I. **Réponse à un signal d'énergie finie**

Transformées de Laplace de signaux fondamentaux

$$L_{I}\left[\cos(\omega t)\varepsilon(t)\right] = L_{I}\left[\left(\frac{e^{-j\omega t} + e^{j\omega t}}{2}\right)\varepsilon(t)\right] = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{p+j\omega} + \frac{1}{p-j\omega}\right) = \frac{p}{p^{2} + \omega^{2}}$$
$$L_{I}\left[e^{-\sigma t}\sin(\omega t)\varepsilon(t)\right] = L_{I}\left[\left(\frac{e^{-(\sigma-j\omega t)} - e^{-(\sigma+j\omega t)}}{2j}\right)\varepsilon(t)\right] = \frac{1}{2j}\left(\frac{1}{p+(\sigma-j\omega)} - \frac{1}{p+(\sigma+j\omega)}\right)$$
$$= \frac{1}{2j}\frac{2j\omega}{p^{2} + 2\sigma p + \rho^{2}} \qquad avec \quad \rho^{2} = \sigma^{2} + \omega^{2}$$

## Réponses temporelles des S.L.C.I. **Réponse à un signal d'énergie finie** *Propriétés de la transformée de Laplace*

 $\lim_{p \to \infty} pF(p) = \lim_{t \to 0+} f(t)$  (théorème de la valeur initiale) (à condition que ces limites existent)

 $\lim_{p \to 0} pF(p) = \lim_{t \to \infty} f(t)$  (théorème de la valeur finale) (à condition que ces limites existent)

#### Application de la TL à ce cas élémentaire

Retrouvons la réponse indicielle d'un passe-haut du 1<sup>er</sup> ordre :

$$s(t) + \tau \cdot \frac{ds(t)}{dt} = \tau \cdot \frac{de(t)}{dt} \Leftrightarrow \underline{H(p)} = \frac{\tau \cdot p}{1 + \tau \cdot p}$$

avec l'échelon de tension :  $e(t) = E_0.u(t) \Leftrightarrow \underline{E}(p) = \frac{E_0}{p}$ soit  $\underline{S}(p) = \underline{H}(p)\underline{E}(p) = \frac{E_0}{p} \cdot \frac{\tau p}{1 + \tau p} = E_0 \cdot \frac{1}{\frac{1}{\tau} + p}$ 

dont la transformée de Laplace inverse donne :

$$s(t) = E_0 . e^{-\frac{t}{\tau}} . u(t)$$

### Réponses temporelles des S.L.C.I.



## Réponse à un signal d'énergie finie

Transformée de Fourier d'un signal

$$\underline{E}(\omega) = TF[\underline{e}(t)](\omega) \equiv \int_{-\infty}^{+\infty} \underline{e}(t) \cdot e^{-j\omega t} dt$$

 $\underline{E}(\omega)$  est le spectre (a priori continu) du signal e(t)

On peut alors démontrer la transformée de Fourier inverse :

$$\underline{e}(t) = TF^{-1} \left[ \underline{E}(\omega) \right] (t) \equiv \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \underline{E}(\omega) . e^{j\omega t} d\omega$$

Réponses temporelles des S.L.C.I.

## Réponse à un signal d'énergie finie

#### Transformée de Fourier d'un signal filtré

 $\underline{H}(j\omega)$  est la fonction de transfert du filtre

$$\underline{H}(j\omega) = \frac{\underline{S}(\omega)}{\underline{E}(\omega)}$$

Après avoir déterminé la TF du signal d'entrée:

$$\underline{E}(\omega) = TF[\underline{e}(t)](\omega) \equiv \int_{-\infty}^{+\infty} \underline{e}(t) \cdot e^{-j\omega t} dt$$

On obtient alors le signal filtré par :

$$\underline{s}(t) = TF^{-1} \left[ \underline{S}(\omega) \right] (t) \equiv \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \underline{H}(j\omega) \underline{E}(\omega) . e^{j\omega t} d\omega$$

1.00

### **Réponse Indicielle**

#### Exemple d'un filtre passe-bas du second ordre :

 $\underline{H(p)} = \frac{1}{1 + 2\sigma\tau p + \tau^2 p^2} \Leftrightarrow s(t) + 2\sigma\tau . \frac{ds(t)}{dt} + \tau^2 . \frac{d^2s(t)}{dt^2} = e(t)$  **SGEASM=SPEASM+SGESSM** 

SPEASM (pour t>0) :  $s(t)=E_0$ SGESSM : recherche des racines de l'équation caractéristique :

$$\tau^2 \cdot \frac{d^2 s(t)}{dt^2} + 2\sigma\tau \cdot \frac{ds(t)}{dt} + s(t) = 0$$
$$r^2 + \frac{2\sigma}{\tau} \cdot r + \frac{1}{\tau^2} = 0$$

Réponses temporelles des S.L.C.I.

### **Réponse Indicielle**

#### Exemple d'un filtre passe-bas du second ordre :

$$\underline{r}^2 + \frac{2\sigma}{\tau} \underline{r} + \frac{1}{\tau^2} = 0 \Rightarrow \Delta' = \left(\frac{\sigma}{\tau}\right)^2 - \frac{1}{\tau^2} = \frac{\sigma^2 - 1}{\tau^2}$$
$$\underline{r} = -\frac{\sigma}{\tau} \pm \sqrt{\frac{\sigma^2 - 1}{\tau^2}}$$

 $\sigma$  et  $\tau$  réels positifs :

- si  $\sigma > 1$ :  $\frac{\sigma^2 - 1}{\tau^2} > 0$  et les deux racines sont réelles  $SGESSM(t) = \exp\left(-\frac{\sigma . t}{\tau}\right) \cdot \left(\lambda . \exp\left(+\sqrt{\frac{\sigma^2 - 1}{\tau^2}} . t\right) + \mu . \exp\left(-\sqrt{\frac{\sigma^2 - 1}{\tau^2}} . t\right)\right)$ 

## **Réponse Indicielle**

Exemple d'un filtre passe-bas du second ordre :

$$\underline{r}^{2} + \frac{2\sigma}{\tau} \underline{r} + \frac{1}{\tau^{2}} = 0 \Rightarrow \Delta' = \left(\frac{\sigma}{\tau}\right)^{2} - \frac{1}{\tau^{2}} = \frac{\sigma^{2} - 1}{\tau^{2}}$$
$$\underline{r} = -\frac{\sigma}{\tau} \pm \sqrt{\frac{\sigma^{2} - 1}{\tau^{2}}}$$

 $\sigma$  et  $\tau$  réels positifs : - si  $\sigma = 1$  : racine double  $SGESSM(t) = (\alpha + \beta . t) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$ 

## Réponses temporelles des S.L.C.I.

### **Réponse Indicielle**

#### Exemple d'un filtre passe-bas du second ordre :

$$\underline{r}^2 + \frac{2\sigma}{\tau} \underline{r} + \frac{1}{\tau^2} = 0 \Rightarrow \Delta' = \left(\frac{\sigma}{\tau}\right)^2 - \frac{1}{\tau^2} = \frac{\sigma^2 - 1}{\tau^2}$$
$$\underline{r} = -\frac{\sigma}{\tau} \pm \sqrt{\frac{\sigma^2 - 1}{\tau^2}}$$

 $\sigma$  et  $\tau$  réels positifs :

 $\begin{aligned} -\sin \sigma < 1: \text{ les racines sont complexes} \\ SGESSM(t) &= \exp\left(-\frac{\sigma t}{\tau}\right) \cdot \left[A \cdot \exp\left(j \cdot \sqrt{\frac{1-\sigma^2}{\tau^2}} \cdot t\right) + B \cdot \exp\left(-j \cdot \sqrt{\frac{1-\sigma^2}{\tau^2}} \cdot t\right)\right] \\ \text{ou } SGESSM(t) &= S_0 \exp\left(-\frac{\sigma t}{\tau}\right) \cdot \left[\sin\left(\Omega \cdot t + \varphi\right)\right] \text{ avec } \Omega = \frac{\sqrt{1-\sigma^2}}{\tau} = \omega_0 \cdot \left(\sqrt{1-\sigma^2}\right) \end{aligned}$ 









Comment distinguer un système du second ordre en régime apériodique d'un système du premier ordre ?



La tangente à l'origine de la réponse d'un système du second ordre est horizontale. Ce n'est pas le cas pour la réponse d'un système du premier ordre.

### Paramètres caractéristiques de la réponse

• <u>**Temps de réponse à 5%**</u> : C'est le temps nécessaire pour que la sortie du système évolue jusqu'à ce que son écart à la valeur finale soit définitivement inférieur à 5 % de l'écart entre la valeur initiale et la valeur finale.



## Paramètres caractéristiques de la réponse

• <u>**Dépassement :**</u> C'est le pourcentage maximum d'écart à la valeur finale hors intervalle [ valeur initiale-valeur finale].



Relevés graphiques.



On estime que le régime permanent est établi lorsque le signal ne dépasse plus  $\pm$  5% de sa valeur finale.





Pseudo-période et décrément logarithmique

$$T_p \equiv \frac{2.\pi}{\Omega} \equiv \frac{2.\pi}{\omega_0 \sqrt{1 - \sigma^2}} \qquad \delta \equiv \frac{1}{n} Ln \left( \frac{s(t) - E_0}{s(t + nT_p) - E_0} \right) = \frac{\sigma T_p}{\tau}$$



#### Application de la TL à un cas plus complexe

Réponse d'un passe-bande à un démarrage de GBF en signal cosinusoïdal démarrant à l'instant zéro



### Réponses temporelles des S.L.C.I.

#### Application de la TL à un cas plus complexe

Réponse d'un passe-bande à un démarrage de GBF en signal cosinusoïdal



En superposant l'excitation et la réponse (x10), on peut observer le régime transitoire puis le régime permanent (qui sera généralement le seul auquel nous nous intéresserons).



# Réponse fréquentielle des filtres fondamentaux à un signal périodique



Soit f une fonction T-périodique et continue par morceaux.

Soit 
$$\omega \equiv \frac{2\pi}{T}$$
 sa pulsation fondamentale

On peut décomposer cette fonction de la manière suivante :

$$f(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n .\cos(n\omega t) + b_n .\sin(n\omega t))$$



#### Coefficients de Fourier.

**Coefficients réels.** Soit f une fonction T-périodique et continue par morceaux;  $\omega = 2\pi/T$  la pulsation associée. Les coefficients de Fourier de f sont définies par

$$c_0 = c_0(f) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt,$$

et pour tout entier  $n \ge 1$ ,

$$a_n = a_n(f) = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(n\omega t) dt,$$
  
$$b_n = b_n(f) = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(n\omega t) dt.$$



C0 est la composante continue (ou moyenne temporelle) du signal

 $a_1 .\cos(\omega t) + b_1 .\sin(\omega t)$  est la composante (ou le mode) fondamental(e)  $a_n .\cos(n\omega t) + b_n .\sin(n\omega t)$  est l'harmonique de rang n



▶ composante continue ?

▶ calcul des coefficients de Fourier par Maple et synthèse de Fourier

▶ calcul littéral des coefficients non-nuls

Calculons  $b_n$ .

$$b_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} \sin(n\omega t) \, dt = \frac{4}{T} \left[ -\frac{\cos(n\omega t)}{n\omega} \right]_0^{T/2} = \frac{4}{n\omega T} \left( 1 - \cos(n\omega T/2) \right).$$

Comme  $\omega T = 2\pi$  et  $\cos(n\pi) = (-1)^n$ , on obtient

$$b_n = \frac{2}{n\pi} \left( 1 - (-1)^n \right) = \begin{cases} \frac{4}{n\pi}, & \text{si } n \text{ est impair,} \\ 0, & \text{si } n \text{ est pair.} \end{cases}$$



#### ▶ composante continue ?

▶ calcul littéral des coefficients non-nuls

Pour tout  $n \ge 1$ ,

$$a_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} (1 - 2t/T) \cos(n\omega t) \, dt = \frac{4}{T} \left[ \frac{\sin(n\omega t)}{n\omega} \right]_0^{T/2} - \frac{8}{T^2} \int_0^{T/2} t \cos(n\omega t) \, dt$$

Comme  $\omega T = 2\pi$  et  $\sin(n\pi) = 0$ , on a

$$a_n = -\frac{8}{T^2} \int_0^{T/2} t \cos(n\omega t) dt.$$

Faisons une intégration par parties en posant u(t) = t et  $v'(t) = \cos(n\omega t) : u'(t) = 1$  et  $v(t) = \sin(n\omega t)/(n\omega)$ . Il vient  $(\sin(n\pi) = 0)$ 

$$-\frac{T^2}{8}a_n = \left[t\sin(n\omega t)/(n\omega)\right]_0^T - \int_0^{T/2}\sin(n\omega t)/(n\omega)\,dt = 0 - \left[-\frac{\cos(n\omega t)}{(n\omega)^2}\right]_0^{T/2}$$

c'est à dire, comme  $\cos(n\pi) = (-1)^n$ ,

$$a_n = \frac{8}{(nT\omega)^2} \left( 1 - (-1)^n \right) = \frac{2}{n^2 \pi^2} \left( 1 - (-1)^n \right) = \begin{cases} \frac{4}{n^2 \pi^2}, & \text{si n est impair,} \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases}$$



▶Les coefficients

$$c_0 = 0$$
$$a_n = 0$$
$$b_n = \frac{2(-1)^{n+1}}{n \cdot \pi}$$

Synthèse sous Maple

# Parité

Remarque. Si f est une fonction paire – pour tout réel t, f(-t) = f(t) –, pour tout  $n \ge 1$ ,  $b_n(f) = 0$  et

$$a_n(f) = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \cos(n\omega t) dt, \qquad c_0(f) = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} f(t) dt$$

Si f est une fonction impaire – pour tout réel t, f(-t) = -f(t) –,  $c_0(f) = 0$ , pour tout  $n \ge 1$ ,  $a_n(f) = 0$ , et

$$b_n(f) = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \sin(n\omega t) dt.$$

Ici le choix de l'origine des temps n'a pas de signification physique !

## Parité au «quart de période»

Un signal alternatif (moyenne temporelle nulle) présentant autour de T/4 la parité inverse de celle observée autour de 0 ne contiendra que des harmoniques d'entiers impairs (n=1,3,5,7...)



# Théorème de Parseval

Soit f une fonction T-périodique et continue par morceaux de DSF :

$$f(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n .\cos(n\omega t) + b_n .\sin(n\omega t))$$

On montre que la moyenne quadratique de cette fonction périodique s'écrit :

$$\left\langle f^{2} \right\rangle \equiv \frac{1}{T} \int_{0}^{T} f(t)^{2} dt = c_{0}^{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_{n}^{2} + b_{n}^{2}}{2}$$

Cette grandeur est proportionnelle à la puissance moyenne en physique (si f(t) représente l'amplitude du phénomène variable)

Ainsi on peut interpréter cette égalité comme la propriété (non-intuitive car les termes sont quadratiques)

### <u>de l'additivité des puissances moyennes</u> <u>de toutes les composantes de Fourier d'un signal</u> <u>périodique</u>

## Spectre fréquentiel

On donne plus volontiers une représentation de chaque composante harmonique d'un signal périodique par son amplitude  $A_n$  et sa phase  $\varphi_n$ 

**Spectre.** Écrivons différemment le terme d'ordre n de la série de Fourier de f.

$$a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t) = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \left( \frac{a_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \cos(n\omega t) + \frac{b_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \sin(n\omega t) \right)$$

c'est à dire, notant  $A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ 

$$a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t) = A_n \left(\frac{a_n}{A_n} \cos(n\omega t) + \frac{b_n}{A_n} \sin(n\omega t)\right)$$

Puisque  $(a_n/A_n)^2 + (b_n/A_n)^2 = 1$ , il existe un réel  $\varphi_n$  tel que  $\cos \varphi_n = a_n/A_n$  et  $\sin \varphi_n = b_n/A_n$ . On a alors

 $a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t) = A_n (\cos\varphi_n \cos(n\omega t) + \sin\varphi_n \sin(n\omega t)) = A_n \cos(n\omega t - \varphi_n).$ 

On voit donc apparaître l'amplitude  $A_n$ , la pulsation  $n\omega$  et le déphasage  $\varphi_n$ .

Malgré l'absence critique de l'information sur la phase  $\varphi_n$  de chaque harmonique, on appelle SPECTRE fréquentiel du signal, la liste des amplitudes  $A_n(n\omega)$ 

## Spectre fréquentiel

Lecture du spectre complet du signal «dents de scie»



## Spectre fréquentiel

Ce qu'il faut savoir sur les deux signaux périodiques principaux



#### Signal carré

• L'amplitude du fondamental d'un signal carré est supérieur d'un facteur  $4/\pi$  à celle du signal lui-même.

•Il ne contient que des harmoniques impaires n=3,5,7 etc.

•L'amplitude des harmoniques décroit en 1/n

#### Signal triangulaire

• L'amplitude du fondamental d'un signal carré est inférieure d'un facteur  $8/\pi^2$  à celle du signal lui-même.

•Il ne contient que des harmoniques impaires n=3,5,7 etc.

•L'amplitude des harmoniques décroit en 1/n<sup>2</sup>

## Expression complexe de la DSF

Soit f une fonction réelle T-périodique et continue par morceaux, on peut également l'écrire avec des coefficients de Fourier complexes :

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \underline{c_n} \cdot \exp^{+in\omega t}$$

Coefficients complexes. On note, pour tout  $n \in \mathbb{Z}$ ,

$$c_n = c_n(f) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{-in\omega t} dt = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-in\omega t} dt.$$

$$\forall n \ge 1, \qquad c_n(f) = \frac{a_n(f) - ib_n(f)}{2}, \qquad c_{-n}(f) = \frac{a_n(f) + ib_n(f)}{2}$$

soit encore

$$\forall n \ge 1, \qquad a_n(f) = c_n(f) + c_{-n}(f), \qquad b_n(f) = i \left( c_n(f) - c_{-n}(f) \right).$$

## Allure des « spectres » réels d'amplitudes par FFT à l'oscillo numérique



Allure des « spectres » réels d'amplitudes par FFT à l'oscillo numérique



 $u(t) = U_0(1 + m \cos 2\pi f_0 t) \cos 2\pi f_0 t$ 

FIG. 4 – Spectre de la tension sinusoïdale modulée en amplitude

W. MAANU/

## Allure des « spectres » réels d'amplitudes par FFT à l'oscillo numérique



Expression générique d'un signal filtré

Attention au changement de notation !! On garde  $\omega$  pour la variable pulsation et on note  $\omega_0$  la pulsation du fondamental

$$\underline{H}(j.\omega) \equiv \frac{\underline{s}(t)}{\underline{e}(t)} = \frac{\underline{S}}{\underline{E}} = G(\omega).e^{j\varphi(\omega)}$$

ainsi, si  $\underline{e}(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \underline{E}_n \cdot e^{j \cdot n \cdot \omega_0 \cdot t}$ , on aura en sortie du filtre

$$\underline{\mathbf{s}}(\mathbf{t}) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \underline{E}_n \cdot G(n \cdot \boldsymbol{\omega}_0) \cdot e^{j \left(n \cdot \boldsymbol{\omega}_0 \cdot t + \varphi(n \cdot \boldsymbol{\omega}_0)\right)}$$

### Créneau et Triangulaire filtrés par un passe-bas



## Créneau et Triangulaire filtrés par un passe-haut



## Créneau et Triangulaire filtrés par un passe-bande peu sélectif



## Créneau et Triangulaire filtrés par un passe-bande sélectif



### Caractère dérivateur d'un filtre

Les conditions pour qu'un filtre présente un caractère dérivateur sur un si-			
gnal de spectre fréquentiel $[\omega; n\omega]$ (n représente le rang du dernier harmoni-			
que non négligeable) sont donc :			
- un déphasage introduit par le filtre voisin de $\left  +\frac{\pi}{2} \right $ (ou de $-\frac{\pi}{2}$ <u>s'il y a in-</u>			
version du signal),			
- un gain du type : $g_{dB} = +20\log_{10}\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)$ , avec une <u>pente de + 20 dB/décade</u> ,			
dans tout le spectre $[\omega; n\omega]$ .			
Le signal de sortie s'écrit alors : $s(t) = \frac{1}{\omega_c} \frac{de}{dt}$ si le déphasage est $+\frac{\pi}{2}$ et			
$s(t) = -\frac{1}{\omega_c} \frac{de}{dt}$ s'il est de $-\frac{\pi}{2}$			
Cette condition est vérifiée pour les filtres <i>passe-haut d'ordre 1</i> et <i>passe-</i>			
<b><u>bande</u></b> d'ordre 2 si $n\omega \ll \omega_{cB}$ (pulsation de coupure basse). La condition est			
plus contraignante que pour les intégrateurs : typiquement $\omega \ll \frac{\omega_{cB}}{100}$ .			
(Le filtre passe bande doit de plus être <i>peu sélectif</i> ).			

### Caractère intégrateur d'un filtre

Les conditions pour qu'un filtre présente un caractère intégrateur sur un signal de spectre fréquentiel  $[\omega; n\omega]$  (n représente le rang du dernier harmonique non négligeable) sont donc : - un déphasage introduit par le filtre voisin de  $-\frac{\pi}{2}$  (ou de  $+\frac{\pi}{2}$  <u>s'il y a in-</u> <u>version du signal</u>), - un gain du type :  $g_{dB} = -20\log_{10}\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)$ , avec une <u>pente de - 20 dB/décade</u>, dans tout le spectre  $[\omega; n\omega]$ . Le signal de sortie s'écrit alors :  $s(t) = \omega_c \int e(t)dt$  si le déphasage est  $-\frac{\pi}{2}$  et  $s(t) = -\omega_c \int e(t)dt$  s'il est de  $+\frac{\pi}{2}$ Cette condition est vérifiée pour les filtres <u>passe-bas d'ordre 1</u> et <u>passe-</u> <u>bande d'ordre 2</u> si  $\omega \gg \omega_{cH}$  (pulsation de coupure haute). En général  $\omega > 10\omega_{cH}$  suffit.