



ECOLE
POLYTECHNIQUE
DE BRUXELLES

UNIVERSITÉ LIBRE DE BRUXELLES

SYNTHÈSE

Instrumentation et électronique analogique ELEC-H314

Auteur :
Cédric HANNOTIER

Professeur :
Antoine NONCLERCQ

Année 2015 - 2016

Appel à contribution

Synthèse Open Source



Ce document est grandement inspiré de l'excellent cours donné par Antoine Nonclercq à l'EPB (École Polytechnique de Bruxelles), faculté de l'ULB (Université Libre de Bruxelles). Il est écrit par les auteurs susnommés avec l'aide de tous les autres étudiants et votre aide est la bienvenue! En effet, il y a toujours moyen de l'améliorer surtout que si le cours change, la synthèse doit être changée en conséquence. On peut retrouver le code source à l'adresse suivante

<https://github.com/nenglebert/Syntheses>

Pour contribuer à cette synthèse, il vous suffira de créer un compte sur *Github.com*. De légères modifications (petites coquilles, orthographe, ...) peuvent directement être faites sur le site! Vous avez vu une petite faute? Si oui, la corriger de cette façon ne prendra que quelques secondes, une bonne raison de le faire!

Pour de plus longues modifications, il est intéressant de disposer des fichiers : il vous faudra pour cela installer \LaTeX , mais aussi *git*. Si cela pose problème, nous sommes évidemment ouverts à des contributeurs envoyant leur changement par mail ou n'importe quel autre moyen.

Le lien donné ci-dessus contient aussi le README contient de plus amples informations, vous êtes invités à le lire si vous voulez faire avancer ce projet!

Licence Creative Commons

Le contenu de ce document est sous la licence Creative Commons : *Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)*. Celle-ci vous autorise à l'exploiter pleinement, compte- tenu de trois choses :



1. *Attribution* ; si vous utilisez/modifiez ce document vous devez signaler le(s) nom(s) de(s) auteur(s).
2. *Non Commercial* ; interdiction de tirer un profit commercial de l'œuvre sans autorisation de l'auteur
3. *Share alike* ; partage de l'œuvre, avec obligation de rediffuser selon la même licence ou une licence similaire

Si vous voulez en savoir plus sur cette licence :

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Merci !

Table des matières

I	Blocs et dimensionnement d'une chaîne d'acquisition	1
1	Introduction	2
1.1	Chaîne d'acquisition	2
1.1.1	Que peut-on mesurer ?	2
1.1.2	Composition	2
1.1.3	Transducteur et capteur	3
1.1.4	Conditionneur	3
1.1.5	Organe de traitement	3
1.2	Rappels d'électricité et d'électronique	4
2	Propriétés génériques d'un capteur	5
2.1	Capteur idéal (erreur nulle)	5
2.1.1	Loi du capteur	5
2.2	Capteur réel (erreur non nulle)	6
2.2.1	Principe d'une mesure : erreurs et précision	6
2.2.2	Sources d'erreurs	7
2.3	Propriétés dynamiques	10
2.3.1	Principales propriétés	10
2.3.2	Système du premier ordre (ex. circuit RC)	10
2.3.3	Système du second ordre (ex. circuit RLC)	11
2.3.4	Temps de réponse	12
2.4	Autres propriétés	12
2.4.1	Transducteur actif >< passif	13
2.4.2	Reproductibilité et finesse	13
2.4.3	fiabilité/maintenance	13
2.4.4	fonctions de haut niveau	13
3	Bruits et parasites	14
4	Conditionnement du signal	15
5	Conversion A/N	16
6	Dimensionner et analyser	17
II	Filtrage numérique, analyse du signal de sortie, capteurs	18
III	Les capteurs	19

Première partie

Blocs et dimensionnement d'une chaîne d'acquisition

Chapitre 1

Introduction

Instrumentation technique visant à créer un système d'acquisition de données ou de commande à base de capteurs, conditionneurs, régulateurs et actionneurs.

1.1 Chaîne d'acquisition

Une chaîne d'acquisition est « un système électronique permettant d'exploiter une grandeur physique »¹

1.1.1 Que peut-on mesurer ?

Les grandeurs mesurables sont très diversifiées. Il y a donc de nombreuses solutions pour les mesurer. On préférera donc utiliser leurs points communs pour pouvoir formaliser un problème générique et sa solution.

L'instrumentation consistera donc à créer une chaîne d'acquisition afin d'extraire les données pertinentes du processus, afin de les traiter.

1.1.2 Composition

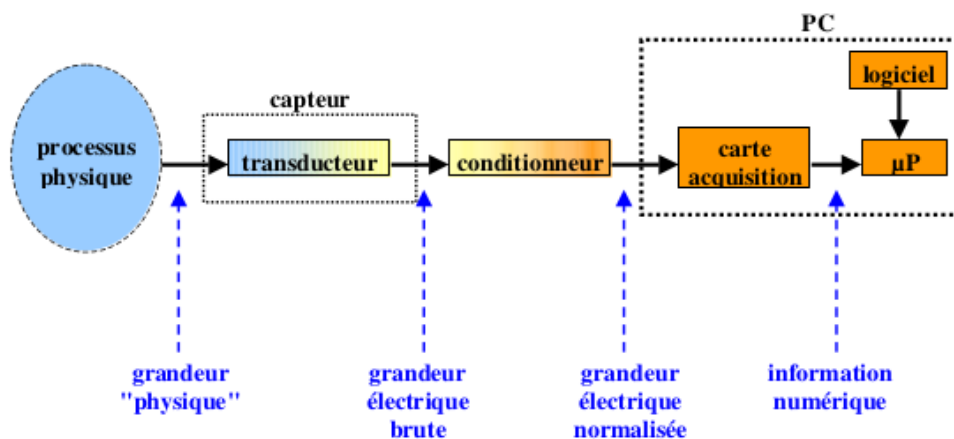


FIGURE 1.1 – Vue « fonctionnelle » (cas standard)

1. https://fr.wikipedia.org/wiki/Cha%C3%A9ne_d%27acquisition

1.1.3 Transducteur et capteur

Transducteur dispositif qui réalise intrinsèquement la conversion de la grandeur à mesurer en une grandeur électrique « brute » (plus facile à exploiter).

Capteur protection mécanique du transducteur (+ parfois une partie du conditionnement).

Un transducteur utilise des phénomènes multi-physiques comme la thermoélectricité et la magnétorésistance. Il sera donc constitué la plupart du temps d'un matériau particulier

⚠ Abus de langage entre transducteur et capteur ⚠

1.1.4 Conditionneur

Conditionneur dispositif assurant la conversion de la grandeur électrique de sortie du transducteur (brute) en une grandeur électrique exploitable par l'organe de traitement.

Ce sera donc un montage électronique. Il pourra néanmoins assurer d'autres fonctions comme l'amplification ou le multiplexage.

Multiplexage

Il arrivera souvent de n'avoir qu'un seul organe de traitement pour plusieurs capteurs. Il faudra donc multiplexer² les signaux dans le temps.

La fonction de multiplexage peut être assurée par le conditionneur, la carte d'acquisition ou un organe spécifique

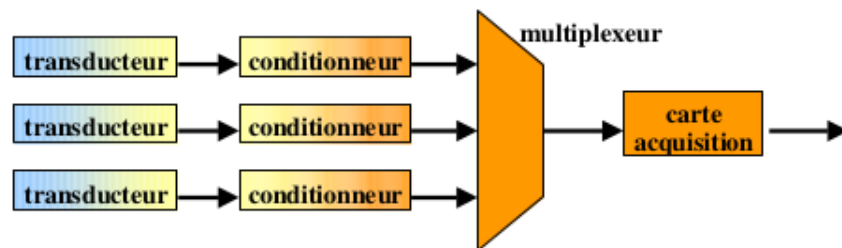


FIGURE 1.2 – Multiplexage

1.1.5 Organe de traitement

L'organe de traitement est dans le langage courant un appareil de mesure ou un assemblage type « ordinateur + carte d'acquisition + logiciel » dont les principales fonctions sont :

- la lecture par l'utilisateur de la grandeur à mesurer
- le traitement du signal
- l'utilisation dans une régulation/commande d'actionneurs

Carte d'acquisition

Une carte d'acquisition est un périphérique informatique assurant l'acquisition, par un PC, de la grandeur de sortie du conditionneur dont les principales fonctions sont :

- la communication avec le processeur (driver)
- la conversion analogique/numérique (résolution et fréquence d'échantillonnage)
- d'autres fonctions comme le multiplexage et les I/O numériques

2. « Assembler des signaux indépendants en un seul signal composite à partir duquel ils peuvent être restitués. » (<https://fr.wiktionary.org/wiki/multiplexer>)

1.2 Rappels d'électricité et d'électronique

Tout ceci n'est qu'un n^{ème} rappel, je vous invite donc à lire cette partie du paquet de slides n°1 (Introduction) à partir de la p.22 (page pdf) si vous n'êtes pas à l'aise avec ces principes (adaptation d'impédance, équivalent de Thévenin, AOP, semi-conducteurs).

Chapitre 2

Propriétés génériques d'un capteur

2.1 Capteur idéal (erreur nulle)

2.1.1 Loi du capteur

Notons :

X la grandeur physique à mesurer (entrée du transducteur).

S la grandeur électrique après conversion (sortie du transducteur).

Ainsi, la loi $S = \text{fct}(X)$ est appelée *caractéristique*. En supposant cette caractéristique connue, nous pouvons retrouver l'entrée X à partir de la valeur de sortie du transducteur.

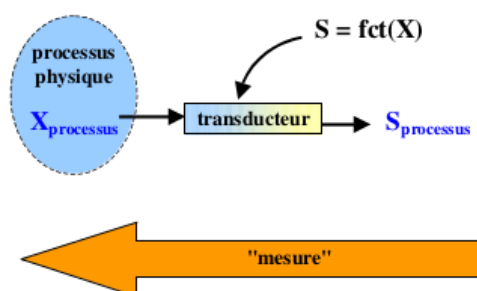


FIGURE 2.1 – Principe d'une mesure : cas idéal

Cette caractéristique s'appelle plus exactement la *loi du capteur*. Elle peut se représenter schématiquement ou mathématiquement.

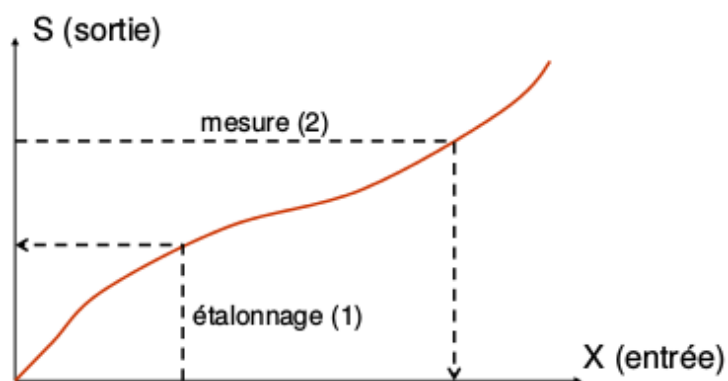


FIGURE 2.2 – Loi du capteur

Remarquons que même si l'on dispose de l'expression mathématique, on obtient cette loi toujours sur base d'un *étalonnage* (ou calibration) en imposant des valeurs d'entrée (connues) et relevant les valeurs de sortie correspondantes. Il y a néanmoins une subtilité, l'étalonnage ne peut s'effectuer qu'avec des *valeurs de référence* stables et connues.

De l'étalonnage découle 2 propriétés fondamentales :

gamme de mesure la gamme de valeurs de X acceptée par le capteur, c-à-d la gamme pour laquelle le capteur fonctionne avec une erreur < erreur de précision nominale. Cette gamme se trouve sur chaque datasheet.

sensibilité rapport entre la variation de S et la variation correspondante de X , c-à-d $s(X) = \left. \frac{\Delta S}{\Delta X} \right|_X$, la pente de la loi du capteur. De manière générale, s varie en fonction de X . Si $s = cste$, alors le capteur est *linéaire* (une variation de X à différents endroits de l'étendue de mesure donne la même variation de S en amplitude).

On en conclut donc qu'il est préférable d'avoir une sensibilité *élevée* et *constante*.

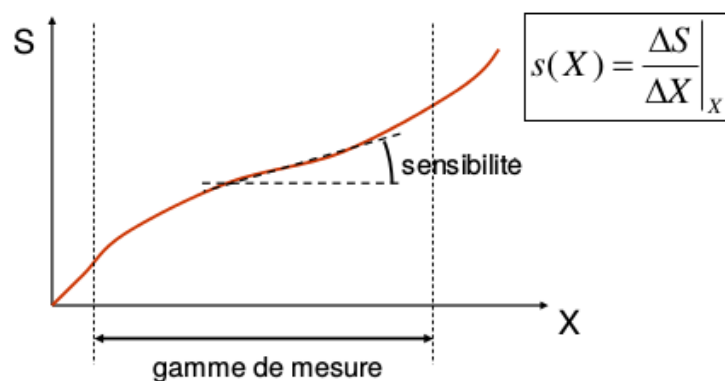


FIGURE 2.3 – Loi du capteur : propriétés

2.2 Capteur réel (erreur non nulle)

2.2.1 Principe d'une mesure : erreurs et précision

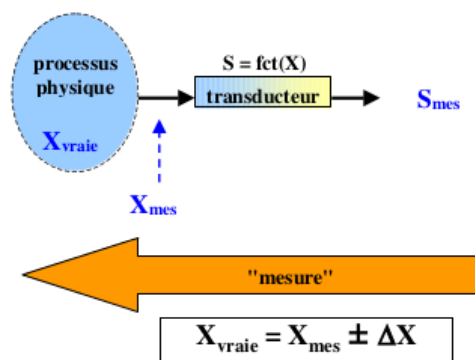


FIGURE 2.4 – Principe de mesure : cas réel

Évidemment, dans le cas réel, la grandeur X déduite de la mesure est \neq valeur exacte de X (dû à plein de raisons que l'on verra plus tard). On distingue donc 3 valeurs :

valeur vraie (X_{vraie}) valeur exacte de la grandeur à mesurer. Grandeur que l'on aimerait connaître mais qui en pratique est inaccessible car se trouvant avant le capteur (non idéal).

valeur mesurée à la sortie du capteur (S_{mes}) valeur de la grandeur S délivrée en pratique par le capteur.

valeur mesurée à l'entrée du capteur (X_{mes}) la traduction de S_{mes} connaissant la loi du capteur.

X_{mes} n'est autre qu'une *approximation* de X_{vraie} . Il devient donc important de connaître la qualité de l'approximation.

La qualité de l'approximation est définie par :

précision (du capteur) aptitude à donner une valeur mesurée proche de la valeur vraie (notion qualitative).

erreur de précision ΔX écart maximal entre la valeur vraie et la valeur mesurée (notion quantitative). Ceci est communément appelée « erreur ».

2.2.2 Sources d'erreurs

Les causes des différences entre X_{vraie} et X_{mes} sont des erreurs classées selon 3 types :

- les erreurs accidentelles (ou conditionnelles)
- les erreurs stochastiques
- les erreurs systématique

On distingue 2 propriétés :

fidélité (ou répétabilité) aptitude à donner des valeurs mesurées concordantes entre elles pour une même valeur de la valeur vraie, c-à-d ayant une faible dispersion des mesures (notion qualitative). Elle est caractérisée quantitativement par l'*erreur de fidélité*.

justesse aptitude à donner une valeur mesurée proche de la valeur vraie (notion qualitative). Elle est caractérisée quantitativement par l'*erreur de justesse*.

On en déduit donc que la justesse est liée aux erreurs systématiques (un système dont l'erreur systématique est faible est "juste") alors que la fidélité est liée aux erreurs accidentelles (un système a faible erreur accidentelles est "fidèle").

L'erreur de précision est donc la \sum erreurs de justesse et fidélité.

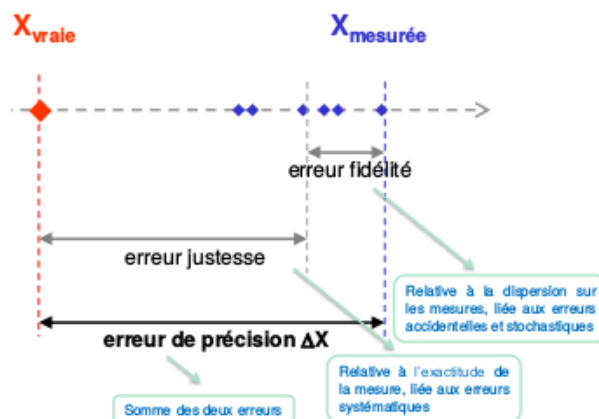


FIGURE 2.5 – Précision, fidélité et justesse

Erreurs accidentelles (ou conditionnelles)

L'erreur accidentelle est d'origine extérieure, pouvant être variable d'une mesure à l'autre. Les exemples typiques sont des erreurs de lecture (maison construite en cm et pas en m) et des parasites (Apas du bruit, le bruit est interne, les parasites externes).

Erreurs stochastiques

L'erreur stochastique est d'origine interne, pouvant être variable d'une mesure à l'autre \Rightarrow Bruit. Contrairement aux erreurs accidentelles, le bruit peut être prédit.

Erreurs systématiques

Il y a tous d'abord des erreurs dues à des distorsions par rapport à la caractéristique supposée du capteur. Il y a deux types de distorsions :

linéarité erreur de linéarité est le plus grand écart entre la courbe d'étalonnage réelle et la meilleure droite obtenue par régression.

réversibilité ou **hystérèse** la réversibilité est l'aptitude à fournir une même valeur de sortie pour une valeur d'entrée obtenue successivement par variation croissante et décroissante. Ainsi, la différence entre ces 2 valeurs est l'erreur d'hystérésis.

Ces erreurs peuvent provenir soit d'une connaissance imparfaite du capteur (caractéristique différente de celle prévue initialement), soit de l'utilisation (consciente) d'un modèle simplifié de la loi du capteur (en utilisant par exemple une loi linéaire alors qu'elle ne l'est rigoureusement pas).

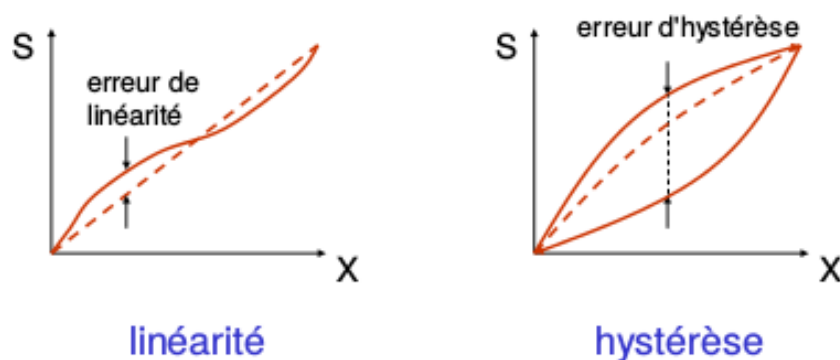


FIGURE 2.6 – Erreurs de linéarité et hystérèse

Ensuite, il y a les erreurs dues à la résolution (milieu numérique), définie comme la plus petite variation de la grandeur d'entrée qui provoque coup sûr une variation de la grandeur de sortie.

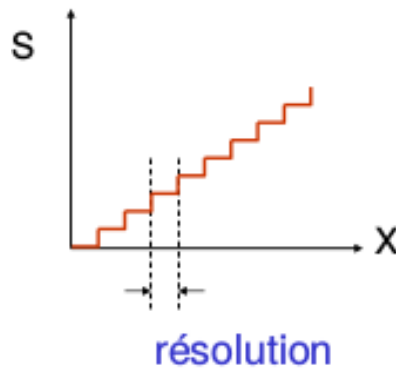


FIGURE 2.7 – Erreur de résolution

Enfin, il y a les erreurs dues aux grandeurs d'influence, c-à-d que la grandeur de sortie S ne va pas varier qu'en fonction de X , mais aussi d'une grandeur physique Z "parasite" ($:=$ grandeur d'influence) comme la température (plus courante), pression, etc. On distingue 2 types d'erreur :

- accidentelle : la sortie varie d'une mesure à l'autre à cause des grandeurs d'influence (genre température)
- systématique : la caractéristique varie lentement en fonction d'une grandeur d'influence (genre vieillissement¹). On parle de *dérive* du capteur

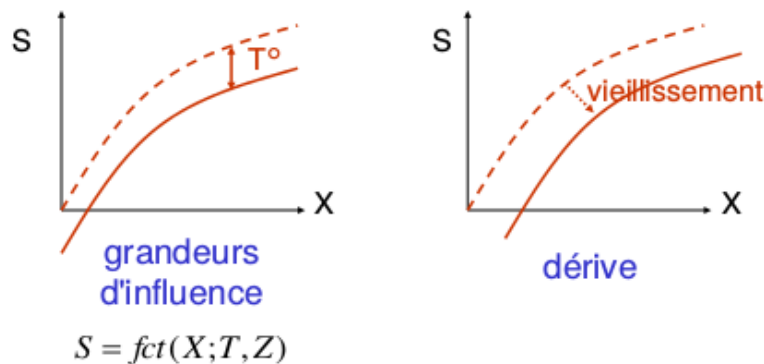


FIGURE 2.8 – Grandeurs d'influence et dérive

Domaines d'utilisation

Il peut arriver que l'entrée sorte de la gamme prévue, pouvant modifier le fonctionnement du capteur. On distingue :

- Le domaine nominal d'utilisation : grandeur d'entrée X et grandeurs d'influence peuvent s'y trouver de manière permanente sans altérer la précision du capteur
- Le domaine de non détérioration : propriétés du capteur altérées (par exemple erreur $>$ erreur nominale), mais de manière réversible \rightarrow le capteur retrouve ses propriétés nominales lorsqu'on retourne dans le domaine nominal
- Le domaine de non destruction : propriétés altérées de manière irréversible mais le capteur continue de fonctionner
- Le domaine de destruction : le capteur ne fonctionne plus

Contrairement à ce qu'on pourrait penser, on utilise parfois le capteur hors de son domaine nominal. Par exemple, la précision d'un thermocouple (capteur de température) n'est garantie

1. Ou aussi la température, dans le cas par exemple d'un transistor dont les propriétés sont différentes "à chaud" et "à froid"

que pour sa première mesure car il vieillit vite, l'utiliser plus d'une fois (quand une grande précision n'est pas requise) revient à l'utiliser hors de son domaine nominal.

2.3 Propriétés dynamiques

Précédemment, les propriétés étaient *statiques*, c-à-d avec l'hypothèse que *les grandeur(s) d'entrée(s) variaient lentement (voir pas du tout) par rapport au temps de réaction du système de mesure*. Les propriétés dynamiques sont les propriétés qui :

- ne satisfont pas l'hypothèse précédente
- portent sur toute variation des grandeurs statiques en fonction de la fréquence
- ont besoin de caractériser la vitesse de réponse du capteur/système

2.3.1 Principales propriétés

On distingue plusieurs propriétés :

Réponse en fréquence $s(f)$

- variation de la sensibilité en fonction de la fréquence
- réponse en fréquence = amplitude + phase
- limite BF et HF

Bande passante

- gamme de fréquence d'utilisation du capteur
- définie par un affaiblissement de 3 dB de la réponse en fréquence

Réponse indicielle $S(t)$

- réponse temporelle à un échelon sur la grandeur d'entrée
- liée à la réponse en fréquence

Ordre du système

- ordre de la dérivée la plus élevée dans l'équation différentielle du système
- grande majorité des capteurs \rightarrow 1^{er} ou 2^{ème} ordre

2.3.2 Système du premier ordre (ex. circuit RC)

Équation différentielle du 1^{er} ordre :

$$a \frac{dS(t)}{dt} + bS(t) = X(t) \quad a, b = \text{cst}$$

La réponse en fréquence (avec f_0 = fréquence de coupure) :

$$|s(f)| = \frac{s(0)}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}} \quad \arg[s(f)] = -\arctan\left(\frac{f}{f_0}\right) \quad f_0 = \frac{b}{2\pi a}$$

La réponse indicielle (τ = cst de temps) :

$$S(t) = \frac{X_0}{b} \left(1 - e^{-t/\tau}\right) \quad \tau = \frac{a}{b} = \frac{1}{2\pi f_0}$$

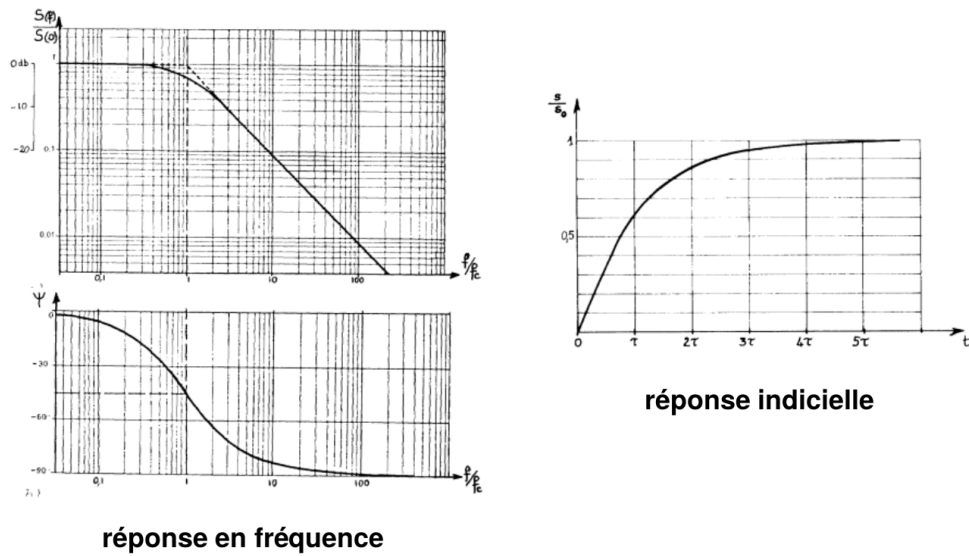


FIGURE 2.9 – Système du 1^{er} ordre

2.3.3 Système du second ordre (ex. circuit RLC)

Équation différentielle du 2^{ème} ordre :

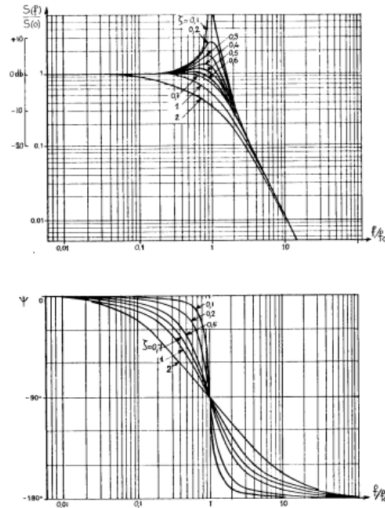
$$a \frac{d^2 S(t)}{dt^2} + b \frac{dS(t)}{dt} + cS(t) = X(t) \quad a, b, c = \text{cst}$$

En définissant f_0 = fréquence propre et ζ = coefficient d'amortissement

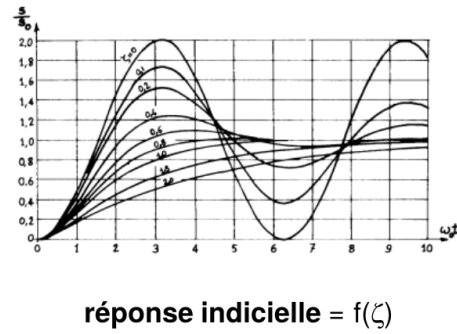
$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{a}} \quad \zeta = \frac{b}{2\sqrt{ca}}$$

nous obtenons la réponse en fréquence :

$$|s(f)| = \frac{s(0)}{\sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}} \quad \arg[s(f)] = -\arctan\left(\frac{2\zeta}{\frac{f_0}{f} \left[1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right]}\right)$$



réponse en fréquence = $f(\zeta)$



réponse indicielle = $f(\zeta)$

FIGURE 2.10 – Système du 2^{ème} ordre

2.3.4 Temps de réponse

Le temps de réponse (ou temps d'établissement) est la *durée minimale d'attente, après application d'un échelon à l'entrée, pour que l'écart relatif de la sortie par rapport à sa valeur finale demeure constamment inférieur à $\epsilon\%$*

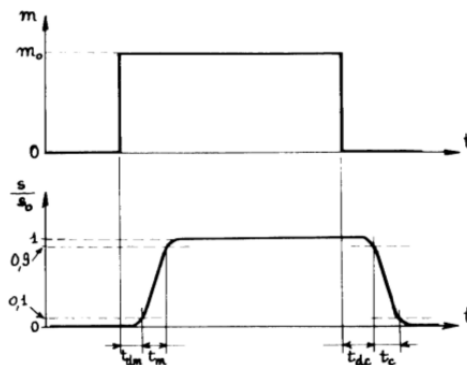


FIGURE 2.11 – Temps d'établissement

Remarque : le temps de réponse \neq temps de montée car cela comprend aussi les éventuels retards de la chaîne ou du capteur. De plus, nous n'arrivons jamais à 1 (Figure 2.11) car $1 - e^{-t/\tau} \neq 1$, on prend donc une caractéristique entre 10 et 90%.

2.4 Autres propriétés

Avant de décrire cette section, rajoutons qu'en plus des propriétés décrites ci-dessous, il existe les propriétés de coût, de dimensions et d'encombrement, d'ambiance supportée (parasite, atmosphère corrosive).

2.4.1 Transducteur actif >< passif

On distingue 2 type de transducteur :

actif peut être assimilé à une source (sens électrique, courant, tension, charge) dont la valeur varie en fonction de la grandeur à mesurer (énergie vient du processus).

passif peut être assimilé à un composant passif (impédance variable) dont la valeur varie en fonction de la grandeur mesurée (énergie vien de la chaîne d'acquisition).

2.4.2 Reproductibilité et finesse

Finesse aptitude d'un capteur à ne pas modifier (par sa présence) la grandeur mesurée. La finesse est exprimée par la valeur d'une grandeur physique déterminant l'inertie du capteur par rapport au mesurande (ex. capacité calorifique d'un capteur thermique ou moment d'inertie d'un potentiomètre mécanique). Varie dans le même sens que la rapidité mais inversement par rapport à la sensibilité.

Reproductibilité (>< fidélité) aptitude à obtenir une même valeur de la grandeur de sortie lorsque la mesure est effectuée au moyen de différents instruments, par différents opérateurs, en des lieux et temps différents.

2.4.3 fiabilité/maintenance

"Reliabilité" probabilité qu'a le système de fonctionner correctement (propriétés non affectées) après une période de temps définie.

MTBF (mean time between failure) durée moyenne de bon fonctionnement entre 2 pannes successives.

Maintenabilité aptitude du capteur à être disponible le plus longtemps possible, c-à-d à donner des informations permettant une maintenance préventive (but : remplacer avant la panne).

Interchangeabilité aptitude du capteur à se substituer à un autre capteur dans altérer les performances de la chaîne de mesure.

Interopérabilité aptitude de différents capteurs et instruments de mesure à être utilisés ensemble et à échanger des données (capteurs intelligents).

2.4.4 fonctions de haut niveau

Les fonctions de haut niveau ont pour but de centraliser la chaîne d'acquisition en 1 endroit. Ceci est plus intelligent car il ne faut plus transmettre toutes les informations et la batterie est moins sollicitée.

capteur intégré conditionneur intégré sur le même silicium que le capteur

capteur à la sortie numérique conversion A/N intégrée au capteur avec différentes interfaces de sorties possibles

capteur intelligent capacité de traitement (microcontrôleur embarqué)

Chapitre 3

Bruits et parasites

Chapitre 4

Conditionnement du signal

Chapitre 5

Conversion A/N

Chapitre 6

Dimensionner et analyser

Deuxième partie

Filtrage numérique, analyse du signal de sortie, capteurs

Troisième partie

Les capteurs