

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAID, TLEMCEM  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE TELECOMMUNICATIONS



Polycopié de cours

# Capteurs et Mesures en Télécommunications

Destiné aux étudiants de la 3<sup>ème</sup> Licence en Télécommunications

**Elaboré Par :**

M<sup>me</sup> Benosman Hayet

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2020-2021

# Table des matières

<b>Avant propos</b>	<b>5</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>6</b>
<b>1 Caractéristiques d'un système de mesure</b>	<b>9</b>
1.1 Introduction . . . . .	9
1.2 Définitions de base . . . . .	9
1.2.1 La grandeur- mesurande . . . . .	9
1.2.2 La mesure . . . . .	10
1.2.3 Le mesurage . . . . .	10
1.2.4 l'incertitude (dx) . . . . .	11
1.2.5 Erreur absolue, Erreur relative . . . . .	11
1.3 Types de mesures . . . . .	11
1.4 Unités de mesure . . . . .	12
1.4.1 Unités de base du Systeme International SI . . . . .	12
1.4.2 Unités dérivées . . . . .	13
1.4.3 Unités hors du SI . . . . .	14
1.4.4 Multiples et sous-multiples . . . . .	15
1.5 Differentes erreurs possibles . . . . .	15
1.5.1 Erreurs systématiques . . . . .	16
1.5.2 Erreur aléatoire . . . . .	16
1.5.3 Erreurs accidentelles . . . . .	16
1.6 Capteur-chaîne de mesure . . . . .	16

1.7	Les caractéristiques métrologiques . . . . .	18
1.7.1	Sensibilité . . . . .	19
1.7.2	Les domaines de fonctionnement . . . . .	20
1.7.3	La précision . . . . .	21
1.7.4	La résolution . . . . .	24
1.7.5	La finesse . . . . .	24
1.7.6	Classe de précision . . . . .	25
1.7.7	Courbe d'étalonnage . . . . .	25
1.7.8	La linéarité . . . . .	25
1.7.9	Bande passante . . . . .	26
1.7.10	La dérive . . . . .	27
1.7.11	Hystérisis . . . . .	29
1.7.12	Grandeurs d'influence . . . . .	29
1.8	Conclusion . . . . .	30
<b>2</b>	<b>Classification des capteurs en télécommunications</b>	<b>32</b>
2.1	Introduction . . . . .	32
2.1.1	Signal logique . . . . .	33
2.1.2	Signal analogique . . . . .	33
2.1.3	Signal numérique . . . . .	34
2.1.4	convertisseur analogique-numérique . . . . .	34
2.1.5	Les différents types de capteurs . . . . .	35
2.2	Classification . . . . .	35
2.2.1	Capteurs actifs . . . . .	37
2.2.2	Capteurs passifs . . . . .	40
2.2.3	Corps d'épreuve-Capteurs composites . . . . .	40
2.2.4	Grandeurs d'influences . . . . .	43
2.2.5	Capteurs intégrés . . . . .	44
2.2.6	Capteurs intelligents . . . . .	44

2.3	Classification des conditionneurs . . . . .	45
2.3.1	Conditionnement des capteurs actifs . . . . .	46
2.3.2	Conditionnement des capteurs passifs . . . . .	48
2.4	Conclusion . . . . .	53
<b>3</b>	<b>Exemples de capteurs</b>	<b>55</b>
3.1	Introduction . . . . .	55
3.2	Les capteurs de forces . . . . .	56
3.3	Les capteurs de son (Les microphones) . . . . .	57
3.3.1	Définitions . . . . .	57
3.3.2	Classification des microphones . . . . .	59
3.3.3	Les microphones numériques . . . . .	60
3.3.4	Définitions . . . . .	61
3.4	Capteurs CCD (charges coupled devices) . . . . .	63
3.4.1	Généralités . . . . .	63
3.4.2	Structure d'un capteur CCD . . . . .	64
3.4.3	Principe de fonctionnement . . . . .	65
3.4.4	Qualités, limitations du capteur CCD et domaines d'applications .	68
3.5	Conclusion . . . . .	69
<b>4</b>	<b>Mesures statiques et dynamiques en télécommunications</b>	<b>71</b>
4.1	Introduction . . . . .	71
4.2	Présentation des appareils de mesure . . . . .	71
4.2.1	Mesure avec un multimètre (recherche de continuités) . . . . .	72
4.2.2	Testeurs de fibre optique . . . . .	74
4.2.3	Mesure avec un réflectomètre optique . . . . .	76
4.2.4	Domaines d'interventions . . . . .	78
4.2.5	Documentation . . . . .	78
4.2.6	Mesure avec analyseur de spectre . . . . .	79

4.3	Mesures dynamiques en télécommunications . . . . .	83
4.3.1	Testeurs de câbles . . . . .	83
4.3.2	Analyseurs de protocoles . . . . .	84
4.3.3	Analyseurs de trames (sniffers) . . . . .	87
4.3.4	Exemple d'analyseur de réseau . . . . .	87
4.4	Conclusion . . . . .	89
	<b>Conclusion générale</b>	<b>90</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>91</b>

# Avant propos

Ce polycopié constitue un support de cours du module capteurs et mesures en télécommunications destiné aux étudiants de la formation LMD, licence télécommunications. Le programme proposé sous forme de points dans le canevas a été suivi après une légère restructuration en quatre chapitres. Le volume horaire hebdomadaire fixé par le cahier de charge est : un cours. L'objectif de ce cours est de comprendre les fondements de base sur les systèmes de mesure utilisés dans le domaine des télécoms, ainsi que la connaissance des différents capteurs utilisés et leurs caractéristiques. Le lecteur de ce document doit avoir des connaissances particulières préalables en télécommunications fondamentales et en électroniques. Donc, il s'agit d'un document bien dédié à celui qui a fait un parcours en électronique et en télécommunication. Je souhaite que ce support soit profitable et servira comme référence, à toute personne, intéressée par l'étude du capteur et instrumentation. Les avis et les remarques des lecteurs sont les bienvenus.

# Introduction générale

La connaissance scientifique s'est développée par un double effort :

\* d'une part, la réflexion sur les mécanismes c'est à dire sur la nature des interactions entre grandeurs physiques liées aux phénomènes ; cette réflexion se concrétise grâce à l'outil mathématique par les lois de la physiques, relations abstraites entre grandeurs physiques ;

\* d'autre part, l'expérimentation qui repose sur la mesure des grandeurs physiques et qui, en leur associant une valeur numérique permet de définir quantitativement les propriétés des objets, de vérifier numériquement les lois physiques ou d'en établir empiriquement la forme.

Dans les laboratoires de recherche scientifique comme dans les installations industrielles l'une des tâches principales du chercheur comme du technicien est donc d'effectuer les mesures des grandeurs physiques variées qui déterminent leurs expériences ou conditionnent le déroulement correct de leurs fabrications.

Afin d'être menée à bien, l'opération de mesure nécessite généralement que l'information qu'elle délivre soit transmise à distance du point où elle est saisie, protégée contre l'altération par des phénomènes parasites, amplifiée, avant d'être exploitée de diverses manières : affichée, enregistrée, traitée par ordinateur. L'électronique offre à cet égard des moyens divers et puissants : pour en tirer le meilleur parti et qu'en bénéficient les mesures de tous types de grandeurs physiques, comme leur traitement et leur exploitation, il est très souhaitable de transposer immédiatement sous la forme d'un signal électrique chacune des grandeurs physiques intéressantes.

C'est le rôle du capteur que d'assurer cette duplication de l'information en la transférant, au point même où se fait la mesure, de la grandeur physique (non électrique) qui lui est propre, sur une grandeur électrique : courant, tension, charge ou impédance. L'objectif de ce support est de regrouper des notions permettant de comprendre les fondements de base sur les systèmes de mesure surtout utilisés dans le domaine des télécommunications

et la connaissance des différents capteurs utilisés ainsi que leurs caractéristiques.

Le premier chapitre présente des généralités sur la mesure et la chaîne de mesure. L'action a été particulièrement mise sur les différents constituants ainsi que les caractéristiques métrologiques spécifiant cette chaîne. Le deuxième chapitre donne une classification des capteurs suivant leurs principe de fonctionnement à savoir actifs ou passifs suivie d'une classification des circuits de conditionnement du signal. Le troisième chapitre quant à lui, présente quelques exemples de capteurs en spécifiant leurs principe de fonctionnement ainsi que leurs domaines d'applications. Le quatrième chapitre expose l'importance des mesures en télécommunications en indiquant les deux types de mesures à savoir les mesures statiques et dynamiques, ainsi que les appareils utilisés pour ces mesures. Enfin, le rapport s'achève par une conclusion.

# Chapitre I

## Caractéristiques d'un système de mesure

# Chapitre 1

## Caractéristiques d'un système de mesure

### 1.1 Introduction

Il n'y a pas d'ingénieur, pas de scientifique sans mesure. La mesure permet de connaître le monde, elle aide à expliquer et à prévoir les phénomènes. Mesurer et interpréter les résultats permet de modéliser, dégager les lois de comportement pour comprendre, prévoir et innover.

Le terme de mesure permettra d'introduire :

la notion de grandeur mesurable.

Les dimensions et les unités SI pour exprimer le résultat de la mesure.

La distinction entre erreur et incertitude de mesure.

### 1.2 Définitions de base

#### 1.2.1 La grandeur- mesurande

C'est toute propriété d'un objet, susceptible de varier. C'est la grandeur physique en générale non électrique qu'on veut mesurer (température-déplacement-pression).

### 1.2.2 La mesure

Le terme « mesure » présente de nombreuses acceptions dans la langue française ; il est donc préférable d'utiliser en métrologie le terme « mesurage » qui est l'action de quantifier ce qui n'était que qualifié. Cela sous-entend la capacité de pouvoir faire correspondre grâce à une échelle absolue ou relative, un ou plusieurs nombres à une situation ou un phénomène donné. Cette correspondance doit être facilement reproductible, transmissible et, pour avoir un sens, associée à une estimation du degré de certitude que l'on peut attacher au résultat.

L'International Standardization Organisation (I.S.O), définit la mesure comme un ensemble d'opérations ayant pour objet la détermination de la valeur d'une grandeur. Cette définition est imprécise dans le sens où elle ne fait aucune référence, en particulier, aux moyens mis en oeuvre pour son obtention et nécessite donc un développement pour mieux saisir ce concept et son évolution.

### 1.2.3 Le mesurage

Processus consistant à obtenir expérimentalement une ou plusieurs valeurs que l'on peut raisonnablement attribuer à une grandeur. Lorsque le mesurage utilise des moyens électroniques de traitement de signal, il est nécessaire de produire à partir du mesurande une grandeur électrique qui en soit une représentation aussi exacte que possible : ceci signifie que la grandeur électrique et ses variations apportent toute l'information nécessaire à la connaissance du mesurande. **Le capteur** est le dispositif qui soumis à l'action d'un mesurande non électrique présente une caractéristique de nature électrique (charge, tension, courant ou impédance) désigné par  $s$  et qui est fonction du mesurande  $m$  :

$$s = f(m)$$

$S$  est la grandeur de sortie ou réponse du capteur.  $m$  est la grandeur d'entrée ou excitation.

### 1.2.4 l'incertitude (dx)

Le résultat de la mesure ( $x$ ) d'une grandeur ( $X$ ) n'est pas complètement défini par un seul nombre. Il faut au moins la caractériser par un couple ( $x, dx$ ) et une unité de mesure.  $dx$  est l'incertitude sur  $x$ . Les incertitudes proviennent des différentes erreurs liées à la mesure. Ainsi, on a :  $x - dx < X < x + dx$ .

Exemple :  $3\text{ cm} \mp 10\%$ , ou  $5\text{ m} \pm 1\text{ cm}$

### 1.2.5 Erreur absolue, Erreur relative

L'erreur absolue est le résultat d'un mesurage moins la valeur vraie de la grandeur physique. L'erreur absolue a donc un signe positif ou négatif. Une erreur absolue s'exprime dans l'unité de la mesure. Le rapport entre l'erreur de la mesure et la valeur vraie de la grandeur physique définit l'erreur relative. Elle s'exprime généralement en pourcentage de la grandeur mesurée.

$$e = x - X, \quad e_r = \frac{e}{X} \quad er\% = 100 \times e_r$$

Exemple : Une erreur de 10% sur une mesure de distance (10% de la distance réelle).

## 1.3 Types de mesures

Les mesures peuvent être de trois types qui nécessitent un calcul d'incertitude et une évaluation des erreurs spécifiques.

**Mesure directe.** Une mesure peut être directe sans transformation de la grandeur à mesurer en une autre. la valeur du mesurande est obtenue directement par la lecture d'un appareil. Des exemples de mesures directes sont la mesure d'une grandeur avec un mètre, d'un temps avec chronomètre.

**Mesure indirecte.** La valeur du mesurande est fonction d'autres mesures. On mesure une grandeur intermédiaire pour accéder à la grandeur à mesurer. On peut par exemple mesurer un courant électrique pour accéder à une tension. Ce type de mesure utilise une loi de comportement ou loi physique qui relie ces grandeurs.

## Mesure répétées, mesures multiples

**Mesures répétées :** On répète les mesures dans les mêmes conditions expérimentales de manière à disposer d'un nombre de valeurs de mesurage, on peut alors évaluer les incertitudes liées à la statistique des valeurs de mesure.

**Mesures multiples :** on répète les mesures en faisant varier un paramètre expérimental, de manière à disposer d'un échantillon de situation, avec leurs propres mesures. On peut alors vérifier ou mettre en évidence une loi de comportement et même des erreurs de mesure.

**Exemple :** On mesure la tension aux bornes d'un dipôle électrique résistif et le courant qui le traverse pour des valeurs différentes de la tension d'alimentation. On cherche à mettre en évidence une loi de type  $u = RI$ . on espère obtenir une droite en représentant  $U$  en fonction de  $I$ .

## 1.4 Unités de mesure

Dans un ensemble de grandeurs, l'unité est une grandeur particulière choisie comme référence à laquelle toutes les autres sont comparées. par exemple les longueurs sont mesurées en les comparant au mètre.

### 1.4.1 Unités de base du Systeme International SI

Le Système international d'unité (SI), successeur du système métrique, est officiellement né en 1960. Ce système permet de rapporter toutes les unités de mesure à un petit nombre d'étalons fondamentaux, et de consacrer tous les soins nécessaires à améliorer sans cesse leur définition. Cependant, dans quelques domaines spécialisés, en particulier la physique théorique, il peut exister des raisons sérieuses justifiant l'emploi d'autres systèmes ou d'autres unités. Quelles que soient ces unités, il est important de respecter les symboles et leur représentation conformes aux recommandations internationales en vigueur.

Grandeur	Unité de base	symbole
temps	seconde	$S$
longeur	mètre	$m$
masse	kilogramme	$Kg$
intensité du courant électrique	Ampère	$A$
température	Kelvin	$K$
quantité de matière	mole	$mol$
intensité lumineuse	candela	$cd$

Tableau 1.1 : Unités de base du système international SI.

Après des années de travail patient, la plus part des unités en usage ont été ramenées à des fonctions de 7 unités de base (figure 1.1). Ces unités de base sont indépendantes les unes des autres. Leur notation est fournie dans le tableau 1.1.

**Remarque :** En dehors de la température thermodynamique (symbole :  $T$ ) exprimée en kelvins, on utilise aussi la température Celsius (symbole  $C^\circ$ ) définie par l'expression :  $C = T - T_0$  Avec :  $T_0 = 273,15^\circ K$  par définition.



Figure 1.1 : Les sept unités de base.

## 1.4.2 Unités dérivées

Elles sont formées de manière cohérente à partir des unités de base. Certaines unités dérivées ont reçu un nom spécial qui peut être utilisé à son tour pour former d'autres

noms d'unités. Le tableau ci-dessous donne la liste des unités dérivées (Tableau 1.2).

Grandeur	Unité de dérivée	symbole
Aire	mètre carré	$m^2$
Volume	mètre cube	$m^3$
Vitesse	mètre par seconde	$m/s$
Accélération	mètre par seconde carré	$m/s^2$
Masse volumique	Kilogramme par mètre cube	$Kg/m^3$
Force	Newton	$N$
Travail énergie	Joule	$J$
Puissance	Watt	$W$
Pression	Pascal	$P_a$
Fréquence	Hertz	$Hz$
Tension	Volt	$V$
Quantité d'électricité	Coulomb	$C$
Capacité électrique	Farad	$F$
Induction magnétique	Tesla	$T$
Flux magnétique	Weber	$Wb$

Tableau 1.2 : Liste de quelques unités dérivées.

### 1.4.3 Unités hors du SI

Les unités hors du SI sont utilisés pour des raisons pratique d'ordre de grandeurs (heures, minutes, litres ) et pour des utilisées culturelles. Ces unités pratiques peuvent être distribués en trois catégories :

**Unités compatibles avec le SI** : Unité de temps :  $1\text{min}=60\text{ s}$ , litre :  $1l = 1dm^3$ , tonne :  $1t=10^3kg$ .

**Unités temporairement compatibles avec le SI**

\* Unité de distance : angstrom ( $A^0$ ) =  $10^{-10}m$  (rayon atomique).

\* Unité de surface des terrain : are,  $1\text{ are}=10^2m^2$ , hectare,  $1ha=10^4m^2$ .

## Unités incompatibles avec le SI

\* Unités du système CGS (centimètre-gramme-seconde).

\* Unités anglo-saxonnes : Distance : pouce (inch) : 1 in = 2,54 cm, pied (foot) : 1 ft = 12 in = 30,48 cm, mile (miles) = 5280 ft = 1,609 km.

Volume : pinte (pint) = 0,94 l, 1 m<sup>3</sup> = 1000 l, 1 dm<sup>3</sup> = 1 l.

### 1.4.4 Multiples et sous-multiples

En ingénierie, pour simplifier, on dénomme certaines puissances de 10, en général multiples et sous multiples de 1000 (tableau 1.3).

Facteur	Préfixe	Symbole	Facteur	préfixe	symbole
10 <sup>24</sup>	Yotta	Y	10 <sup>-24</sup>	yocto	y
10 <sup>21</sup>	Zetta	Z	10 <sup>-21</sup>	zepto	z
10 <sup>18</sup>	Exa	E	10 <sup>-18</sup>	atto	a
10 <sup>15</sup>	Péta	P	10 <sup>-15</sup>	femto	f
10 <sup>12</sup>	Téra	T	10 <sup>-12</sup>	pico	p
10 <sup>9</sup>	Giga	G	10 <sup>-9</sup>	nano	n
10 <sup>6</sup>	Méga	M	10 <sup>-6</sup>	micro	μ
10 <sup>3</sup>	Kilo	K	10 <sup>-3</sup>	milli	m
10 <sup>2</sup>	Hecto	h	10 <sup>-2</sup>	centi	c
10 <sup>1</sup>	déca	da	10 <sup>-1</sup>	déci	d

Tableau 1.3 : Liste des multiples et sous multiples.

## 1.5 Différentes erreurs possibles

La mesure est toujours entachée d'erreurs. Connaître les sources d'erreurs et leur propagation permet d'interpréter les mesures, voire de corriger le protocole de mesure. Les erreurs de mesure ont des causes systématiques que l'expérimentateur peut corriger ou non. Ces erreurs ont des causes clairement identifiées et prévisibles. Parmi ces erreurs, on trouve les erreurs systématiques, les erreurs accidentelles et les erreurs aléatoires.

### 1.5.1 Erreurs systématiques

Ce sont des erreurs reproductibles reliées à leur cause par une loi physique, elles sont généralement liées à l'appareil de mesure et qui se reproduisent à l'identique d'une mesure à l'autre. Si elles sont identifiées, elles peuvent être éliminées en effectuant la correction adaptée.

### 1.5.2 Erreur aléatoire

C'est une erreur dont la valeur dépend des erreurs expérimentales. Cette valeur est inconnue. Il est donc impossible de corriger ces erreurs aléatoires. Ces erreurs obéissent à des lois statistiques et nécessitent de prendre en compte une valeur moyenne sur plusieurs mesures. Ce type d'erreurs intervient lorsque l'expérimentateur effectue  $N$  mesures exactement dans les mêmes conditions du mesurande et ne trouve pas à chaque fois la même valeur.

Si on effectue  $N$  mesures dans des conditions de répétabilité, le meilleur estimateur de la valeur du mesurande est la valeur moyenne  $\langle m \rangle$  des  $N$  mesures.

Une mesure  $m_i$  parmi les  $N$  mesures est généralement différente de  $\langle m \rangle$ .

La différence  $E_{Ra} = m_i - \langle m \rangle$  est appelée erreur aléatoire ou erreur de répétabilité.

#### Exemples d'erreurs aléatoires

- Erreurs dues aux appareils de mesure (seuil de mesure, résolution...), erreurs dues aux conditions extérieures (température, pression, ...). erreurs de lecture, et Parasites.

### 1.5.3 Erreurs accidentelles

Les erreurs accidentelles résultent d'une fausse manoeuvre, d'un mauvais emploi ou de dysfonctionnement de l'appareil. Elles ne sont généralement pas prises en compte dans la détermination de la mesure.

## 1.6 Capteur-chaîne de mesure

Dans les systèmes techniques, de nombreuses grandeurs physiques (température, pression, intensité lumineuse, position, déplacement,...) doivent être mesurées et relevées. Il

a fallu développer des organes techniques permettant l'acquisition de ces grandeurs physiques, la transformation et la transmission d'informations exploitables aux unités de traitement. La chaîne de mesure ou système de mesure est alors constituée de l'ensemble des dispositifs, y compris le capteur (figure 1.2), rendant possible dans les meilleures conditions la détermination précise de la valeur du mesurande. Le traitement et la restitution de la mesure avec les caractéristiques nécessaires à l'application : résolution, précision, rapidité et immunité aux parasites.

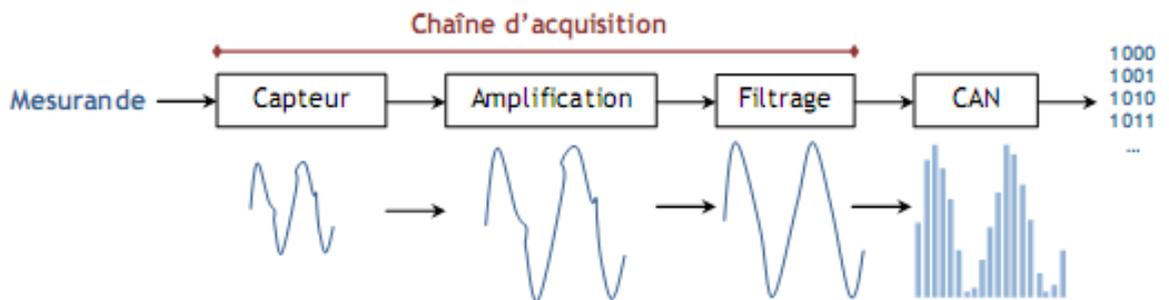


Figure1.2 : Principe de fonctionnement d'une chaîne de mesure

\* A l'entrée de la chaîne, le capteur soumis à l'action du mesurande permet directement s'il est actif ou par le moyen de son conditionneur s'il est passif, d'injecter dans la chaîne de mesure le signal électrique, support de l'information liée au mesurande.

\* A la sortie de la chaîne, le signal électrique qu'elle a traité est converti sous une forme qui rend possible la lecture directe de la valeur cherchée du mesurande : déviation d'un appareil à cadre mobile ; -affichage ou impression d'un nombre.

Un capteur n'est jamais parfait, il convient de connaître avec la plus grande précision possible son état d'imperfection. De plus, il faut prendre en compte la perturbation apportée au système par la mesure. Le concepteur d'une chaîne instrumentale aura donc des choix à opérer.

Sous sa forme la plus simple, la chaîne de mesure peut se réduire au minimum à trois éléments :

- Un capteur sensible aux variations d'une grandeur physique et qui, à partir de ces

variations, délivre une autre grandeur physique.

- Un conditionneur de signaux dont le rôle principal est l'amplification du signal délivré par le capteur pour lui donner un niveau compatible avec l'unité de visualisation ou d'utilisation. Cet étage peut parfois intégrer un filtre qui réduit les perturbations présentes sur le signal.

- Une unité de visualisation et/ou d'utilisation qui permet de lire la valeur de la grandeur et/ou de l'exploiter dans le cas d'un asservissement, par exemple.

Cette structure de base se rencontre dans toutes les chaînes de mesure quelle que soit leur complexité et leur nature. De nos jours, compte tenu des possibilités offertes par l'électronique et l'informatique, les capteurs délivrent un signal électrique et la quasi-totalité des chaînes de mesure sont des chaînes électroniques.

### Exemples de systèmes de mesures

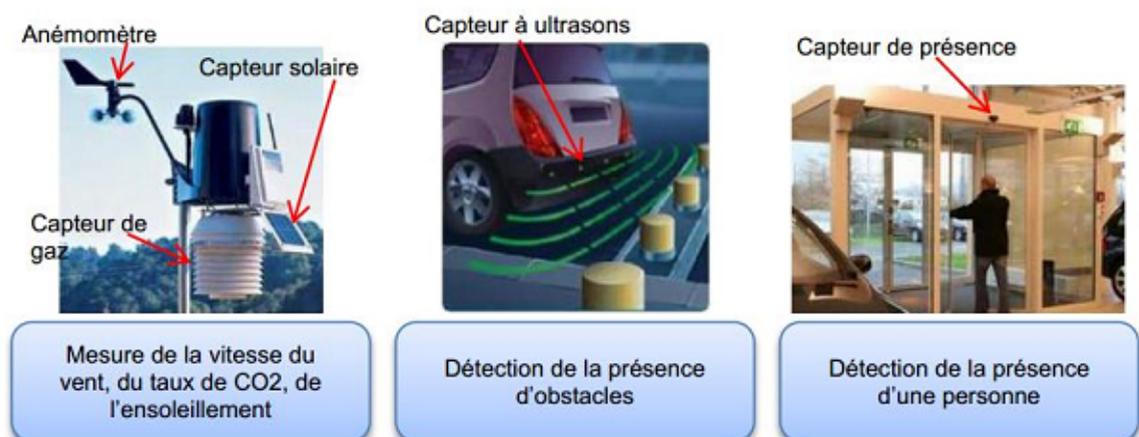


Figure1.3 : Exemples de systèmes de mesures.

## 1.7 Les caractéristiques métrologiques

Pour juger des performances d'un système de mesure, on étudie certaines de ses caractéristiques qui contribuent à la précision de la mesure. Pour ce faire, on utilise une terminologie qui est définie par une norme (*JCGM200 : 2008*) c'est à dire quels termes on emploie pour caractériser les performances du système de mesure.

### 1.7.1 Sensibilité

Soit  $m$  la quantité que l'on cherche à mesurer. Le but assigné au capteur est de convertir  $m$  en une grandeur électrique que l'on appellera  $s$ . La mesure  $s$  peut être une impédance, une charge électrique, un courant ou une différence de potentiel. La relation qui lie  $s$  à  $m$ , soit  $s = F(m)$ , dépend :

- \* de la loi physique régissant le capteur,
- \* de la construction pratique du capteur et de son environnement.

L'expression  $F(m)$  est établie par une opération que l'on appelle l'étalonnage : on connaît (à l'aide par exemple d'un étalon) différentes valeurs de  $m$ , on relève pour ces valeurs de  $m(m_1, m_2 \dots m_i \dots)$  les signaux électriques délivrés par le capteur ( $s_1, s_2 \dots s_i \dots$ ) et on trace la courbe  $s(m)$  qui est appelée courbe d'étalonnage du capteur (figure 1.4). L'utilisation du capteur consiste à lire la valeur du signal électrique  $s$  lorsque est appliqué un mesurande  $m$  inconnu. La courbe d'étalonnage permet alors d'en déduire  $m$ .

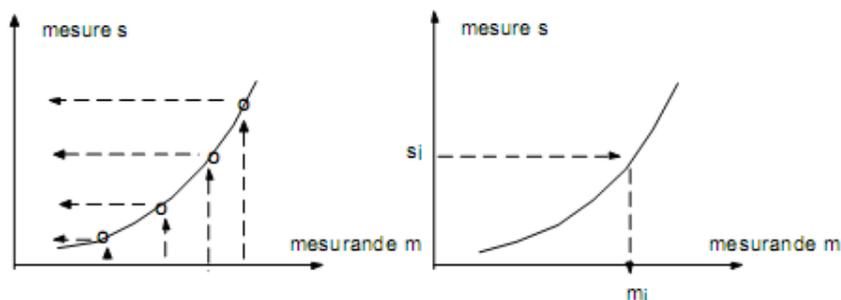


Figure 1.4 : Etalonnage puis lecture d'un capteur

On appelle sensibilité  $S$  la dérivée  $dS/dm = F'(m)$ . Pour que la sensibilité soit indépendante de la valeur  $m$ , il faut que le capteur soit linéaire :

$$F'(m) = \text{constante} = S = \frac{\Delta s}{\Delta m} = \frac{\Delta \text{sortie}}{\Delta \text{entrée}}. \quad (1.1)$$

C'est la pente de la droite qui caractérise la linéarité du capteur. Par exemple, un capteur de déplacement présente une sensibilité  $S = 1v/50cm$ . Pour chaque 50 cm de déplacement, la sortie varie d'une amplitude de 1v.

Lorsque  $s$  et  $m$  sont de mêmes natures,  $S$  est sans dimension et peut être appelé gain qui s'exprime en dB.

$$gain = 20 \log(S) \quad (1.2)$$

## 1.7.2 Les domaines de fonctionnement

Chaque élément de mesure présente certaines caractéristiques métrologiques qui définissent ses limites d'utilisation et de précision. Ces limites dépendent non seulement du mesurande, mais aussi des grandeurs d'influence qui viennent perturber l'élément de mesure. On peut définir trois domaines de fonctionnement (figure 1.5).

**Le domaine nominal** : c'est la plage de variation du mesurande qu'on veut mesurer. Elle correspond à la zone de fonctionnement normal. On définit l'**étendue de mesure (EM)**, et la **pleine échelle (PE)**.

**Exemple** : Un capteur de température où le domaine nominal est  $[0 - 250] C^\circ$ . La pleine échelle PE correspond à la valeur maximale de cet intervalle.

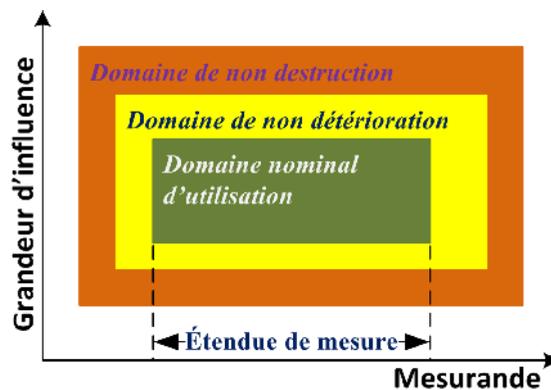


Figure 1.5 : Les trois domaines de fonctionnement d'un capteur

### Le domaine de non-détérioration

Le capteur entre dans ce domaine si le mesurande et/ou les grandeurs physiques d'influence excèdent les valeurs minimales et/ou maximales définissant le domaine nominal.

### Exemple

Un capteur de distance ayant un EM de 0 à 10m doit être utilisé dans une plage de température de 0 à 55C°, donc son bon fonctionnement est garanti dans cette plage de

température. Au delà de cette plage, il se produit des altérations sur le capteur, ce qui augmente l'imprécision de la mesure. La précision indiquée par le fabricant n'est plus valide tant que nous sommes dans ce domaine.

### **Le domaine de non-déstruction**

c'est une zone que l'on doit éviter d'atteindre à tout prix (figure 1.4). En effet, si la valeur de surcharge admissible est dépassée, les altérations qui se produisent sur le capteur deviennent irréversibles. La conséquence de ces altérations, c'est que les spécifications du fabricant ne tiennent plus. Il faudra donc procéder à un nouvel étalonnage du capteur pour connaître ses nouvelles caractéristiques.

Si le capteur sort du domaine de non-déstruction, il est alors détruit et il n'est plus apte à mesurer quoique ce soit. Si cela se produit, il faut sérieusement étudier les raisons qui ont entraîné la destruction du capteur.

### **1.7.3 La précision**

La précision est un des paramètres les plus importants d'un système de mesure. Elle désigne l'aptitude de l'appareillage de mesure de donner des résultats qui sont proches de la valeur vraie du mesurande. Elle permet donc d'évaluer la qualité de mesure en donnant l'idée de l'ampleur de l'erreur affectant la mesure. La précision fait appel à la notion de fidélité et justesse.

Remarque : l'erreur de précision = erreur de justesse + erreur de fidélité.

#### **Rappel**

Soit  $n$  mesures :  $m_1, m_2, \dots, m_i$ , effectuées sur un mesurande. La dispersion de ces  $n$  mesures est quantifiée par un certain nombre de paramètres :

\* La valeur moyenne qui est la valeur vers laquelle convergent les mesures. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\bar{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i$$

Comment ces valeurs se dispersent autour de la moyenne ? On définit alors :

\* L'écart type  $\sigma$  qui mesure la dispersion d'une série de mesures autour de leur valeur

moyenne (Les résultats de mesures répétées d'une même valeur de mesurande restent groupés autour d'une valeur moyenne) :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2}$$

\* La variance :

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2$$

Avec les  $n$  mesures effectuées, on peut tracer la courbe qui indique que pour certaines valeurs de mesurande, j'ai une certaine probabilité de trouver la valeur  $m$  d'une mesure. Cette courbe présente une allure Gaussienne (figure 1.6), et la probabilité d'occurrence d'une erreur aléatoire est exprimée, en fonction de la moyenne et de l'écart type par :

$$p(m) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(m_i - \bar{m})^2}{2\sigma^2}\right)$$

Dans ce cas :

- La valeur la plus probable est la valeur moyenne des mesures.
- En général on prend une incertitude égale à 3 fois l' écart-type.

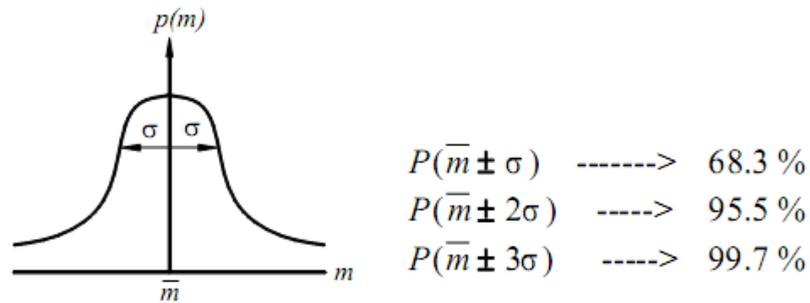


Figure 1.6 : Courbe de Gauss.

### Quantifier la dispersion en terme normalisés pour les capteurs : fidélité, justesse et précision

**La fidélité** est la qualité d'un appareillage de mesure dont les erreurs aléatoires sont faibles. Elle correspond à l'écart type (souvent considéré comme l'erreur de fidélité) obtenu sur une série de mesures correspondant à une valeur constante du mesurande. (les

résultats de mesures répétées d'une même valeur de mesurande restent groupés autour d'une valeur moyenne). Un capteur est d'autant plus fidèle que son écart type est faible. **La justesse** est la qualité d'un appareillage de mesure dont les erreurs systématiques sont réduites. Elle est liée à la valeur moyenne de l'ensemble des mesures faites par rapport à la valeur réelle. Un instrument est d'autant plus juste que la valeur moyenne est proche de la valeur vraie.

La figure (1.7), illustre la justesse, la fidélité, et la précision. Un capteur précis aura à la fois une bonne fidélité et une bonne justesse.

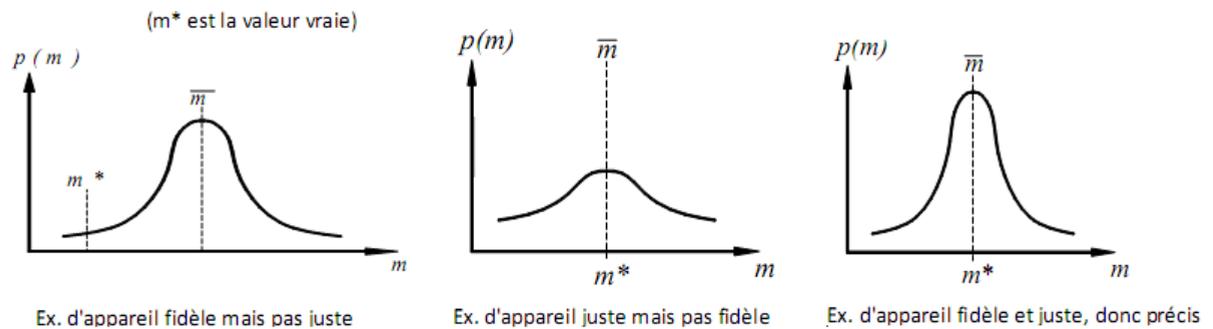


Figure 1.7 : Illustration des notions de fidélité et justesse.

La précision est spécifiée par l'erreur de précision qui délimite un intervalle autour de la valeur mesurée, à l'intérieur duquel on est assuré de trouver la valeur vraie du mesurande. Cette erreur de précision peut être représentée de trois façons :

- \* Par l'erreur absolue  $e_a$  qui exprime l'erreur de précision dans l'unité de mesure du mesurande ;

- \* Par l'erreur relative  $e_r$  qui exprime l'erreur de précision en pourcentage par rapport à la valeur mesurée  $M$  :

$$e_r = \frac{e_a}{M} \times 100\%;$$

Par la classe de précision  $C_P$ , qui exprime l'erreur de précision en pourcentage par rapport à l'étendue de mesure  $EM$ .

$$C_p = \frac{e_a}{EM} \times 100\%$$

### 1.7.4 La résolution

C'est la valeur du pas de quantification dans la gamme. Elle correspond à la plus petite variation de la valeur de la grandeur que l'appareil peut détecter dans une gamme. Lorsque l'appareil de mesure est un appareil numérique, on définit la résolution par :

$$\text{Résolution} = \frac{\text{Etendue de mesure}}{\text{nombre de points de mesure } N}$$

Le nombre de points  $N$  correspond au nombre de valeurs différentes que peut afficher l'appareil dans une gamme de mesure (exemple : pour un appareil à 4 afficheurs, le nombre de points de mesure est  $N = 10^4$ )

Le Pas de quantification ( $q$ ) est la plus petite valeur différente de 0 dans la gamme de mesure (exemple : pour un appareil de mesure à 4 afficheurs, utilisé dans la gamme de 10V, le pas de quantification est  $q = 10/N = 1mV$ ).

**Remarque :** lorsqu'on passe du mode analogique au mode numérique, des erreurs peuvent être provoquées ce qui permet de définir l'erreur de résolution  $e_r$ . Elle dépend de deux paramètres :

- 1) du nombre de bits de la conversion : pour  $n$  bits, on a  $2^n$  valeurs différentes.
- 2) de l'étendue de mesure EM. on a alors :

$$Q = \frac{EM}{2^n} \implies e_r = \frac{Q}{2}$$

### 1.7.5 La finesse

Elle qualifie l'incidence de l'instrument de mesure sur le phénomène mesuré. C'est la qualité d'un capteur à ne pas venir modifier par sa présence la grandeur à mesurer. Cela permet d'évaluer l'influence du capteur sur la mesure. Moins un capteur influence son environnement, meilleure est sa finesse.

On peut utiliser à titre d'exemple une résistance pour mesurer une température. Toutefois, pour mesurer la valeur de la résistance, il faut qu'un courant électrique y circule.

Or, lorsqu'un courant circule dans une résistance, elle est sujette à l'effet Joule, donc elle chauffe. Si elle chauffe beaucoup, elle peut influencer la température qu'elle doit mesurer.

### 1.7.6 Classe de précision

Elle correspond à la valeur en % du rapport entre l'erreur possible sur EM.

$$C_p = 100 \times \frac{e}{EM} \quad (1.3)$$

### 1.7.7 Courbe d'étalonnage

L'étalonnage comprend l'ensemble des opérations établissant, la relation entre les valeurs indiquées par un appareil de mesure, et les valeurs connues correspondantes d'une grandeur mesurée. Soit sous forme graphique (courbe d'étalonnage) soit sous forme algébrique (équation caractéristique) (figure 1.8). Cette relation peut dépendre non seulement du mesurande mais aussi des grandeurs d'influence. S'il n'y a pas de grandeurs d'influence, l'étalonnage est simple, dans le cas contraire il est multiple.

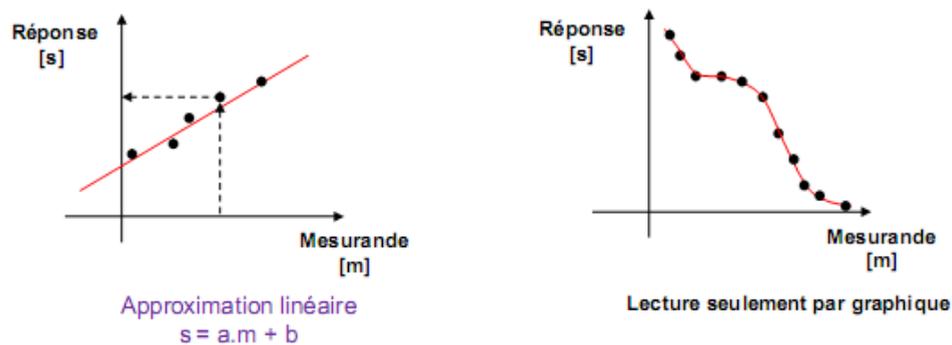


Figure 1.8 : Courbes d'étalonnage du capteur.

### 1.7.8 La linéarité

La linéarité est une caractéristique qui définit la constance de la sensibilité sur toute la plage de mesure. C'est la zone dans laquelle la sensibilité du capteur est indépendante de la valeur du mesurande. Cette zone peut être définie à partir de la définition d'une droite obtenue comme approchant au mieux la caractéristique réelle du capteur, par exemple

par la méthode des moindres carrés.

Le polynôme de l'équation décrivant la relation entre le signal d'entrée  $x$  et le signal de sortie  $y$  doit être de premier degré ( $y = mx + b$ ) pour que le capteur soit considéré comme linéaire.

L'écart de linéarité est exprimé par un pourcentage de l'étendue de mesure. Par exemple, si un capteur de force ayant une étendue de mesure de 0 à 50N et un écart de linéarité de  $\pm 0.5\%EM.$ , cela implique une erreur (due à la non-linéarité) de  $\pm 0.25$  dans le pire des cas.

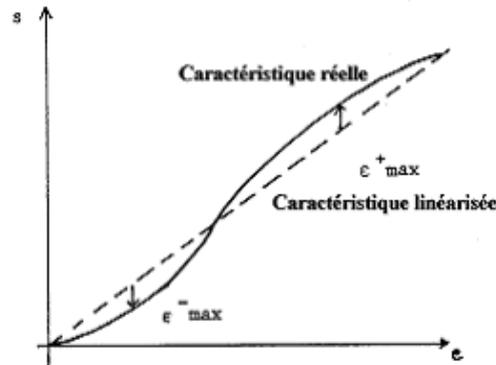


Figure 1.9 : Exemple de linéarisation de caractéristiques.

### 1.7.9 Bande passante

La réponse d'un capteur à un mesurande variant sinusoïdalement dans le temps revêt une importance particulière car elle permet d'en déduire la réponse à tout mesurande variable dans le temps, c'est à dire sa réponse transitoire.

Si on appelle  $S(\omega)$  la sensibilité du capteur soumis à un mesurande sinusoïdal de pulsation  $\omega$  la réponse à une impulsion temporelle est donnée par sa transformée de Fourier :

$$h(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} S(\omega) e^{-j\omega t} d\omega \quad (1.4)$$

Pour l'utilisation des capteurs, la notion de bande passante est intéressante à présenter par l'intermédiaire des phénomènes de distorsion observés sur la mesure. Supposons que le mesurande ait une évolution temporelle périodique décrite par la figure 1.10, que l'on peut représenter par :

$$m(t) = m_0 + \sum_i m_i \cos(\omega_i t + \theta_i) \quad (1.5)$$

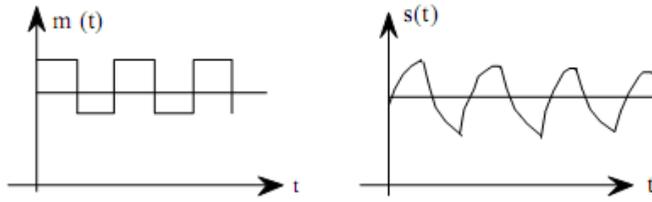


Figure 1.10 : Exemple de distorsion par un filtrage passe-bas du premier ordre.

Le signal électrique délivré  $s(t)$  peut s'écrire, en introduisant les notions de sensibilités statique  $S_0$  et  $S(\omega_i)$  dynamique :

$$s(t) = S_0 m_0 + \sum_i S(\omega_i) m_i \cos(\omega_i t + \Psi_i) \quad (1.6)$$

Si les valeurs  $S(\omega_i)$  sont différentes, ou si  $\Psi_i$  est quelconque par rapport à  $\theta_i$ , on obtient un signal  $s(t)$  dont le contenu fréquentiel est modifié par rapport à celui du mesurande : on dit que le signal subit une distorsion ou que le système est dynamiquement non linéaire.

On appelle bande passante l'intervalle de fréquence dans lequel la valeur de  $S(\omega)$  est constante et où  $\Psi_i$  diffère de  $\theta_i$  par une constante additive que l'on peut écrire  $\omega_i \tau$  avec  $\tau$  indépendant de  $\omega_i$ . Dans la bande passante le système est dynamiquement linéaire.

D'une façon générale, on parle de l'ordre d'un capteur comme étant l'ordre de l'équation différentielle qui régit sa sensibilité dynamique. L'exemple le plus simple est celui pour lequel l'équation qui lie  $s$  à  $m$  en régime dynamique est une équation différentielle du premier ordre :

$$A \frac{ds}{dt} + Bs = m(t) \quad (1.7)$$

dans laquelle A et B sont indépendants du temps.

### 1.7.10 La dérive

C'est la variation lente de la grandeur de sortie indépendante de la valeur de la grandeur d'entrée. Le vieillissement des composants d'un système, les variations de température (dérive thermique) peuvent produire une dérive. Si par exemple un constructeur donne les performances du capteur en température ambiante de  $T = 20C^\circ$ . Si la tempé-

perature change, le capteur donnera alors des valeurs différentes.

**Exemple** : soit un capteur linéaire caractérisé par sa fonction de sortie :

$$y_i = ax_i + b.$$

A partir de cette équation, on peut remarquer qu'il ya deux paramètres qui peuvent dériver. Soit la pente  $a$  qui représente la sensibilité, on définit alors *la dérive de la sensibilité*. Soit  $b$  qui est l'ordonné à l'origine, on définit alors *la dérive du zéro (offset)*. A la température de référence, le capteur obéllira a la droite, et en fonction des variation de la température, le zéro commence à se déplacer produisant un décalage qui est la différence entre la valeur «vraie» de la mesure et celle obtenue à partir de la réponse du capteur comme illustré sur la figure 1.11.

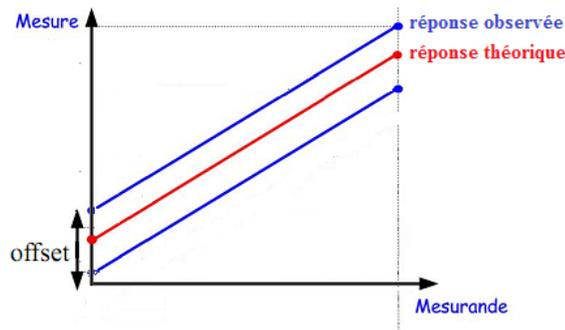


Figure 1.11 : Dérive du zéro.

Il en est de même pour la sensibilité qui est la pente de la courbe caractéristique du capteur ; elle est visible essentiellement pour la borne supérieure de l'étendue de mesure (figure 1.12).

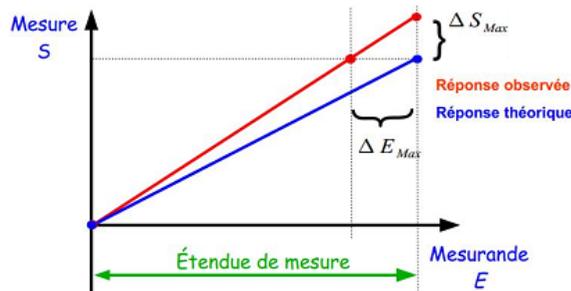


Figure 1.12 : Dérive de sensibilité.

### 1.7.11 Hystérésis

Lorsque les courbes de transfert du capteur pour une variation croissante et décroissante de la grandeur physique ne sont pas identiques, on parle d'une erreur due à l'hystérésis du capteur. Cette erreur est exprimée en pourcentage par rapport à l'étendue de mesure. Sur la courbe représentée par la figure 1.13, on remarque qu'on a deux séries de mesure :

- \* une série qui est obtenue lorsque la valeur du mesurande est croissante.
- \* l'autre est obtenue lorsque la valeur du mesurande est décroissante. Donc pour un point de mesure  $x_i$  donné, lui correspond deux valeurs  $y_{i1}$  et  $y_{i2}$  qui est l'écart de mesure possible pour la même valeur du mesurande.

On peut estimer l'erreur d'hystérésis de cette manière :

$$e_H = \text{Max}_{i=1}^n e_{Hi}$$

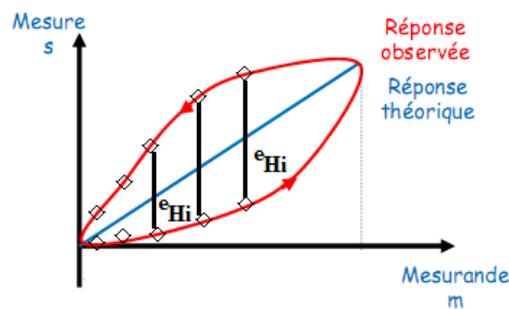


Figure 1.13 : cycle d'hystérésis.

### 1.7.12 Grandeurs d'influence

Le système de mesure, de par ses conditions d'emploi, peut se trouver soumis non seulement au mesurande mais à d'autres grandeurs physiques dont les variations sont susceptibles d'entraîner un changement de la grandeur électrique de sortie qu'il n'est pas possible de distinguer de l'action du mesurande. Ces grandeurs physiques «parasites» aux quelles la réponse du capteur peut être sensible sont les grandeurs d'influence.

Les principales grandeurs d'influence sont :

- \* la température, qui modifie les caractéristiques électriques, mécaniques et dimensionnelles des composants du système de mesure ;
- \* la pression, l'accélération et les vibrations susceptibles de créer dans certains éléments constitutifs du capteur des déformations et des contraintes qui altèrent la réponse ;
- \* l'humidité à laquelle certaines propriétés électriques comme la constante diélectrique ou la résistivité peuvent être sensibles et qui risque de dégrader l'isolation électrique entre composants du capteur ou entre le capteur et son environnement ;
- \* les champs magnétiques variables ou statiques ; les premiers créent des f.e.m d'induction qui se superposent au signal utile, les seconds peuvent modifier une propriété électrique, comme la résistivité lorsque le capteur utilise un matériau magnéto-résistant

## 1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, une introduction aux systèmes de mesures a été présentée. L'objectif était double, d'une part pour rappeler des notions de base sur la mesure et la chaîne de mesure et d'autre part pour déterminer la portée des futures notions qui seront présentées dans les chapitres suivants.

## **Chapitre II**

### **Classification des capteurs en télécommunications**

# Chapitre 2

## Classification des capteurs en télécommunications

### 2.1 Introduction

Les capteurs sont des dispositifs miniaturisés possédants des ressources énergétiques limités et autonomes, capables de traiter des informations et de les transmettre via des ondes radio. Parmi ces phénomènes récoltés nous pouvons citer ceux ayant trait à la température, l'humidité, la pression, capture d'image, etc.

Le capteur est au minimum composé d'un transducteur permettant de convertir cette grandeur physique en une grandeur manipulable par son utilisateur (une tension électrique ou intensité lumineuse, par exemple). Un moyen de transporter cette information est souvent couplé à ce transducteur (comme un câble électrique, une fibre optique ou par télécommunications radiofréquences). Les informations issues de ce capteur seront ensuite analysées par l'interrogateur et utilisées par les outils informatiques du gestionnaire de l'infrastructure.

Les capteurs font partie de la famille des transducteurs. Ils sont souvent intégrés à des chaînes d'acquisitions permettant à la grandeur mesurée d'être conditionnée afin que la mesure (signal de sortie) donne une estimation optimisée du mesurande. La grandeur de

sortie est un signal électrique normalisé selon l'information à transmettre (figure 2.1). Le capteur peut signaler la présence ou l'absence d'un objet (binaire) ou si une valeur mesurée est atteinte (analogique ou numérique).

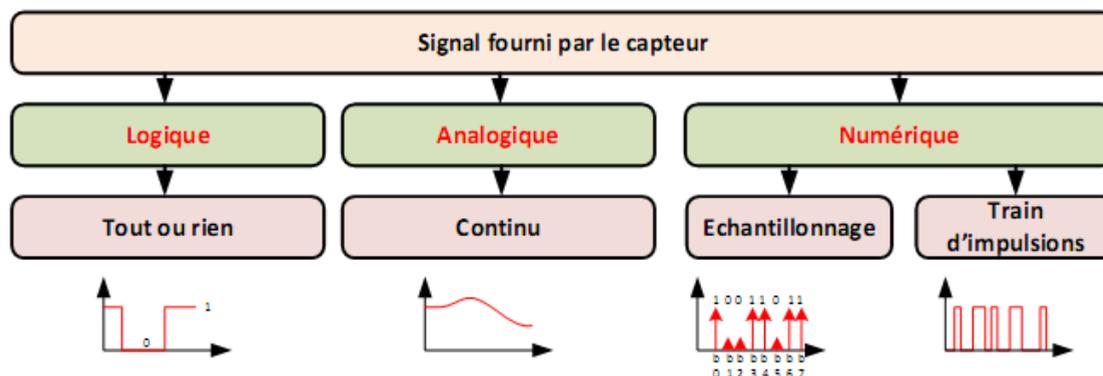


Figure 2.1 : les types de signaux.

### 2.1.1 Signal logique

Le signal logique ou Tout ou Rien peut prendre deux valeurs qui correspondent à deux états logiques. Par exemple, la sortie logique d'un thermostat transmet deux informations : la température est supérieure à la consigne (à la valeur attendue) ou la température est inférieure à la consigne.

### 2.1.2 Signal analogique

Un signal analogique varie de façon continue dans le temps (figure 2.2). Il peut prendre une infinité de valeurs dans une plage donnée.

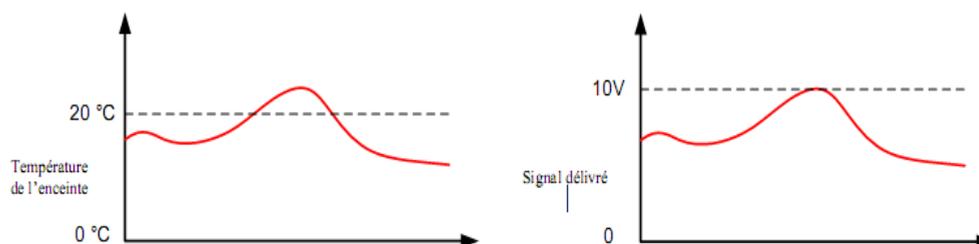


Figure 2.2 : Signal analogique

Exemple : la sortie (0/10V) d'un thermostat transmet l'image de la température de l'enceinte. Les signaux analogiques sont normalisés afin de faciliter l'échange des informations entre les différents constituants. Ces signaux peuvent être modulés en tension ou en courant.

### 2.1.3 Signal numérique

Un signal numérique est une suite d'informations logiques qui peuvent être transmises de deux manières différentes.

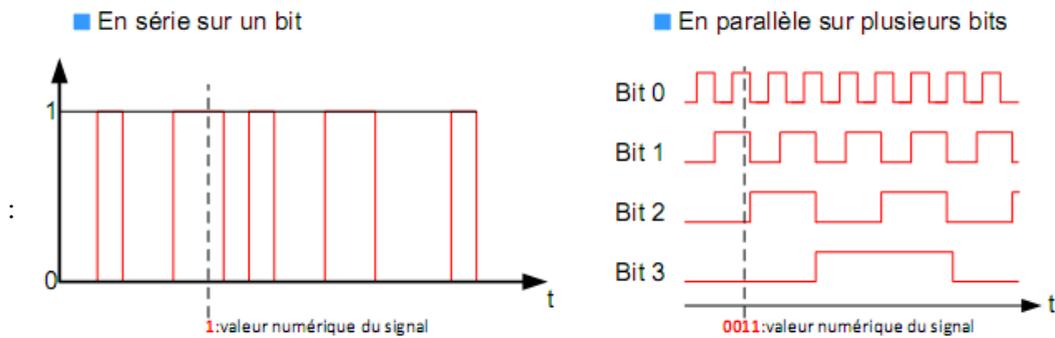


Figure 2.3 : les types de signaux numériques.

### 2.1.4 convertisseur analogique-numérique

Les appareils de mesure numériques sont de plus en plus utilisés du fait de leur fiabilité, leur précision, leur robustesse et leur facilité de lecture. Ils sont aussi de moins en moins onéreux et deviennent même compétitifs avec les appareils analogiques de bas de gamme.

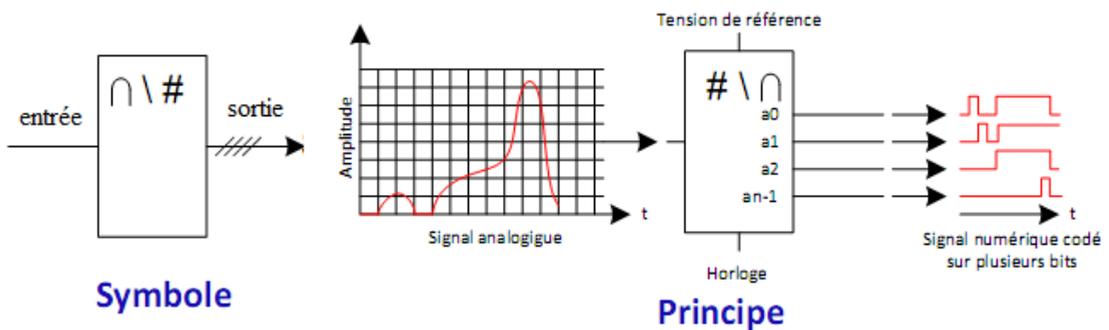


Figure 2.4 : Convertisseur analogique-numérique.

Un convertisseur analogique-numérique (CAN) est donc un dispositif qui transforme le signal analogique en un signal numérique codé sur plusieurs bits comme indiqué sur la figure 2.4.

### 2.1.5 Les différents types de capteurs

Actuellement il existe différents types de capteurs circulant dans le marché, comportant des caractéristiques et des fonctionnalités diverses et variées. Sachant que la plus grande majorité des capteurs sont conçus selon l'application pour laquelle ils sont utilisés cela nous donne une grande variété de capteurs. La figure ci-dessous illustre la diversité des domaines des capteurs.



Figure 2.5 : Quelques types de capteur

## 2.2 Classification

On peut classer les capteurs de plusieurs manières :

- \* Par le mesurande qu'il traduit (capteur de position, de température...).
- \* En fonction du caractère de l'information délivrée : on parle alors de capteurs logiques appelés aussi capteurs tout ou rien (TOR), de capteurs analogiques ou numériques.
- \* Par leurs principe de fonctionnement (actifs ou passifs). En tant qu'un élément de

circuit électrique, le capteur se présente, vu de sa sortie (figure 2.6) ; soit comme un générateur, la sortie étant une charge, une tension ou un courant et il s'agit alors d'un capteur actif, soit comme une impédance, la sortie étant alors une résistance, une inductance ou une capacité : le capteur est alors dit passif.

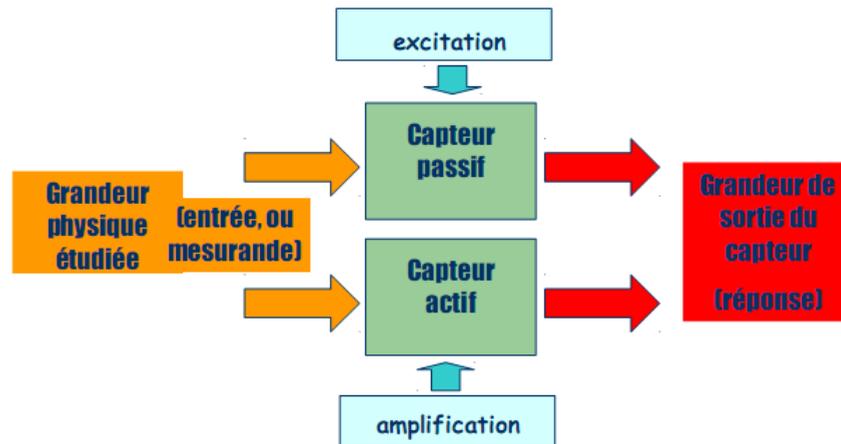


Figure 2.6 : Capteur actif, capteur passif.

Cette distinction entre capteurs actifs et passifs basée sur leur schéma électrique équivalent traduit en réalité une différence fondamentale dans la nature même des phénomènes physiques mis en jeu.

Le signal électrique est la partie variable du courant ou de la tension qui porte l'information liée au mesurande : amplitude et fréquence du signal doivent être liées sans ambiguïté à l'amplitude et à la fréquence du mesurande. Un capteur actif qui est une source, délivre immédiatement un signal électrique ; il n'en est pas de même d'un capteur passif dont les variations d'impédance ne sont mesurables que par les modifications du courant ou de la tension qu'elles entraînent dans un circuit par ailleurs alimenté par une source extérieure. Le circuit électrique nécessairement associé à un capteur passif constitue son conditionneur et c'est l'ensemble du capteur et du conditionneur qui est la source du signal électrique.

## 2.2.1 Capteurs actifs

Fonctionnant en générateur, un capteur actif est généralement fondé dans son principe sur un effet physique qui assure la conversion en énergie électrique de la forme d'énergie propre au mesurande : énergie thermique, mécanique ou de rayonnement. Les plus importants parmi ces effets sont regroupés Tableau 2.1. ; dans la suite du paragraphe on en donne une description sommaire destinée à éclairer leur mode d'application.

Mesurande	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité	Tension
flux de rayonnement optique	Pyroélectricité	Charge
	Photoémission	Courant
	Effet photovoltaïque	Tension
	effet photoélectromagnétique	Tension
Force-pression-Accélération	Piézoélectricité	Charge
Vitesse	Induction électromagnétique	Tension
Position (aimant)	Effet Hall	Tension

Tableau 2.1 : capteurs actifs : principes physiques de base.

**Effet thermoélectrique.** C'est le principe de tout thermocouple. C'est un circuit formé de deux conducteurs de nature chimique différente dont les jonctions sont mises à des températures différentes  $T_1$  et  $T_2$ . Il apparaît aux bornes de ce circuit une tension (force électromotrice : f.e.m) liée à la différence de température ( $\Delta T = T_1 - T_2$ ).

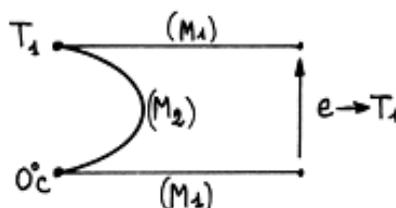


Figure 2.7 : Effet thermoélectrique

**Effet pyroélectrique :** Certains cristaux dits pyroélectriques, le sulfate de triglycine par exemple, ont une polarisation électrique spontanée qui dépend de leur température ; ils portent en surface des charges électriques proportionnelles à cette polarisation et de signes contraires sur les faces opposées.

Application : un flux de rayonnement lumineux absorbé par un cristale pyroélectrique élève sa température ce qui entraîne une modification de sa polarisation qui est mesurable par la variation de tension aux bornes d'un condensateur associé.

**Effet piézoélectrique.** L'application d'une force et plus généralement d'une contrainte mécanique à certains matériaux dits piézoélectriques, le quartz par exemple , entraîne une déformation qui suscite l'apparition de charges électrique égales et de signe contraire sur les faces opposées. Le cristal se déforme lorsqu'on lui applique une tension électrique : c'est l'effet inverse de la piézo-électricité.

Application : mesure de forces ou de grandeur s'y ramenant (préssion, accélération) à partir de la tension que provoquent aux bornes d'un condensateur associé à l'élément piézoélectrique les variations de sa charge (figure 2.9).

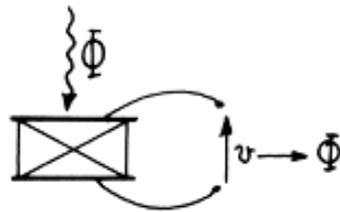


Figure 2.8 : Effet pyroélectrique

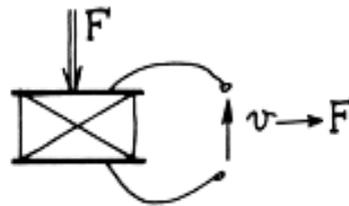


Figure 2.9 : Effet piézoélectrique

**Effet d'induction électromagnétique.** Lorsqu'un un conducteur se déplace dans un champ d'induction fixe, il est le siège d'une force électromotrice proportionnelle au flux coupé par unité de temps donc à sa vitesse de déplacement.

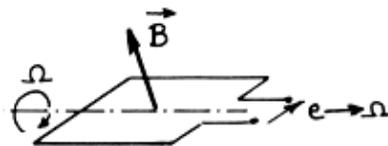


Figure 2.10 : Effet d'induction électromagnétique

Application : La mesure de la f.e.m. d'induction permet de connaître la vitesse de déplacement qui est à son origine.

**Effet photoélectrique.** On en distingue plusieurs, qui diffèrent par leurs manifestations mais qui ont pour origine commune la libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement électromagnétique dont la longueur d'onde est inférieure à une valeur seuil caractéristique du matériau.

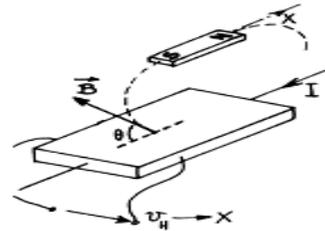
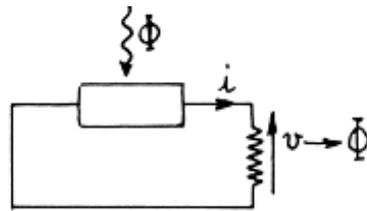


Figure 2.11 : Effet photoélectrique      Figure 2.12 : Effet Hall

**Effet photoémisif.** Les électrons libérés sont émis hors de la cible éclairée et forment un courant collecté par application d'un champ électrique.

**Effet photovoltaïque.** Des électrons et des trous sont libérés au voisinage d'une jonction de semi-conducteurs P et N illuminée ; leur déplacement dans le champ électrique de la jonction modifie la tension à ses bornes.

**Effet photoélectromagnétique.** L'application d'un champ magnétique perpendiculaire au rayonnement provoque dans le matériau éclairé l'apparition d'une tension électrique dans la direction normale au champ et au rayonnement.

**Effet Hall.** Un matériau, généralement semi-conducteur et sous forme de plaquette, est parcouru par un courant  $I$  et soumis à une induction  $B$  faisant un angle  $\theta$  avec le courant. Il apparaît dans une direction perpendiculaire à l'induction et au courant une tension  $V_H$  qui a pour expression :

$$V_H = K_H \cdot I \cdot B \cdot \sin \theta$$

où  $K_H$  dépend du matériau et des dimensions de la plaquette.

Application : un aimant lié à l'objet dont on veut connaître la position détermine les valeurs de  $B$  et  $\theta$  au niveau de la plaquette : la tension  $V_H$  qui par ce biais est fonction de

la position de l'objet en assure donc une traduction électrique (figure 2.12).

**Remarque :** les capteurs basées sur l'effet hall peuvent être classés parmi les capteurs actifs puisque l'information est liée à une f.e.m ; ce ne sont cependant pas des convertisseurs d'énergie car c'est la source du courant  $I$  et non le mesurande qui délivre l'énergie liée au signal.

### 2.2.2 Capteurs passifs

Dans cette famille, le capteur se comporte en sortie comme un dipôle passif qui peut être résistif, capacitif ou inductif. Donc, il s'agit généralement d'impédance dont l'un des paramètres déterminants est sensible à la grandeur mesurée. La variation d'impédance résulte :

Soit d'une variation de dimension du capteur, c'est le principe de fonctionnement d'un grand nombre de capteur de position, potentiomètre, inductance à noyaux mobile, condensateur a armature mobile.

Soit d'une déformation résultant de force ou de grandeur s'y ramenant, pression, accélération (Armature de condensateur soumise à une différence de pression, jauge d'extensomètre liée a une structure déformable).

Le tableau 2.2 donne un aperçu des divers mesurandes susceptibles de modifier les propriétés électriques de matériaux employés pour la réalisation de capteurs passifs ; on y remarque, en particulier, la place importante des capteurs résistifs.

L'impédance d'un capteur passif et ses variations ne sont mesurables qu'en intégrant le capteur dans un circuit électrique, par ailleurs alimenté et qui est son conditionneur.

### 2.2.3 Corps d'épreuve-Capteurs composites

Pour des raisons de coût ou de facilité d'exploitation on peut être amené à utiliser un capteur, non pas sensible au mesurande mais à l'un de ces effets. Le corps d'épreuve est le dispositif qui, soumis au mesurande étudié en assure une première traduction en une autre grandeur physique non-électrique, le mesurande secondaire, qu'un capteur adéquat traduit alors en grandeur électrique (figure 2.13).

Mesurande	caractéristiques électrique sensibles	Types de matériaux utilisés
Température	Résistivité	Métaux : platine, cuivre. Semiconducteurs.
Très basse température	Constante diélectrique	verres.
Flux de rayonnement optique	Résistivité	Semi-conducteurs.
Déformation	Résistivité Perméabilité magnétique	Alliages de nickel, silicium dopé. Alliages ferromagnétiques.
Position (aimant)	Résistivité	Matériaux magnétorésistants.
Humidité	Résistivité Constante diélectrique	Chlorure de lithium. Alumine ; polymères.
Niveau	Constante diélectrique	Liquides isolants

Tableau 2.2 : capteurs passifs : principes physiques et matériaux

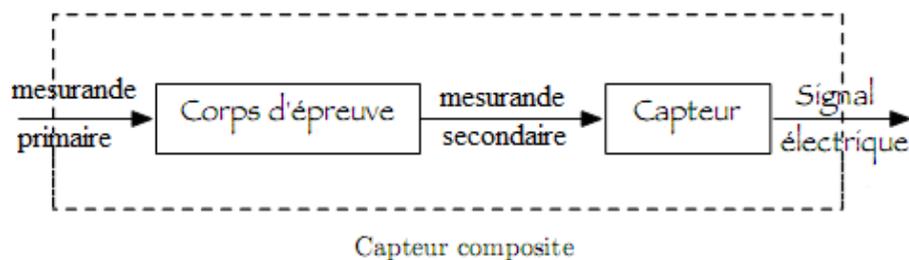


Figure 2.13 : Structure d'un capteur composite

L'ensemble formé par le corps d'épreuve et un capteur actif ou passifs constitue un capteur composite.

Les corps d'épreuves sont très utilisés pour la mesure de grandeurs mécaniques : celles-ci imposent au corps d'épreuve des déformations ou des déplacements auxquels un capteur approprié est sensible. Ainsi, par exemple, une traction  $F$  exercée sur une barre (longueur

$L$ , section  $A$ , module d'young  $Y$ ) entraîne une déformation  $\frac{\Delta L}{L}$  qui est mesurable par la variation  $\frac{\Delta R}{R}$  de la résistance d'une jauge collée sur la barre comme représenté sur la figure 2.14. Connaissant :

\* d'une par l'équation du corps d'épreuve qui lie la traction, mesurande primaire, à la déformation, mesure secondaire :

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{Y} \cdot \frac{F}{A}$$

et d'autre part l'équation du capteur liant sa grandeur d'entrée, ici la déformation, à sa réponse électrique  $\frac{\Delta R}{R}$ .

soit :  $\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \frac{\Delta L}{L}$

$k$  étant le facteur de jauge, on en déduit la relation entre traction et variation de résistance :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{k}{Y} \cdot \frac{F}{A}$$

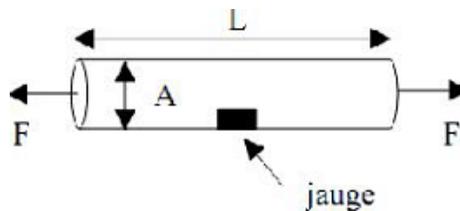


Figure 2.14 : Une traction  $F$  exercée sur une barre.

La relation qu'établit le corps d'épreuve entre le mesurande primaire et le mesurande secondaire est très souvent linéaire : c'est le cas en particulier pour les déplacements et déformations résultant de contraintes mécaniques, à condition que ne soit pas dépassée la limite d'élasticité du corps d'épreuve. Les performances de l'association corps d'épreuve-capteur doivent être déterminées par un étalonnage global de l'ensemble qu'ils constituent afin qu'il soit tenu compte des modifications éventuelles que leur montage et leur liaison apportent à leurs caractéristiques individuelles « à vide ».

## 2.2.4 Grandeurs d'influences

Le capteur, de par ces conditions d'emploi, peut se trouver soumis non seulement au mesurande mais à d'autres grandeurs physiques dont les variations sont susceptibles d'entraîner un changement de la grandeur électrique de sortie qu'il n'est pas possible de distinguer de l'action du mesurande.

Ces grandeurs physiques "parasites" auxquelles la réponse du capteur peut être sensible sont les grandeurs d'influences. les principales grandeurs d'influences sont :

- \* la température qui modifie les caractéristiques électriques, mécanique et dimensionnelles des composants du capteur ;
- \* la pression, l'accélération et les vibrations susceptibles de créer dans certains éléments constitutifs du capteur des déformations et des contraintes qui altèrent la réponse ;
- \* l'humidité à laquelle certaines propriétés électriques comme la constante diélectrique ou la résistivité peuvent être sensibles et qui risque de dégrader l'isolation électrique entre composants du capteur ou entre le capteur et son environnement.

Si l'on désire par  $g_1, g_2...$  les grandeurs d'influence, la relation entre grandeur électrique de sortie  $s$  et mesurande  $m$ , qui dans le cas idéal serait :

$$s = F(m)$$

devient

$$s = F(m, g_1, g_2)$$

Afin de pouvoir déduire de la mesure de  $s$  la valeur de  $m$ , il est donc nécessaire :

- \* soit de réduire l'importance des grandeurs d'influence au niveau du capteur en le protégeant par un isolement adéquat : supports antivibratoires, blindages magnétiques,
- \* soit de stabiliser les grandeurs d'influence à des valeurs parfaitement connues et d'étalonner le capteur dans ces conditions de fonctionnement : enceinte thermostatée ou à hygrosocopie contrôlée, sources d'alimentation régulées.
- \* Soit enfin d'utiliser des montages qui permettent de compenser l'influence des grandeurs parasites : ponts de wheatstone avec un capteur identique placé dans une branche

adjacente au capteur de mesure.

### 2.2.5 Capteurs intégrés

Un capteur intégré est un composant réalisé par les techniques de la micro-électronique et qui regroupe sur un même substrat de silicium commun, le capteur proprement dit, le corps d'épreuve et l'électronique de conditionnement du signal (figure 2.15).

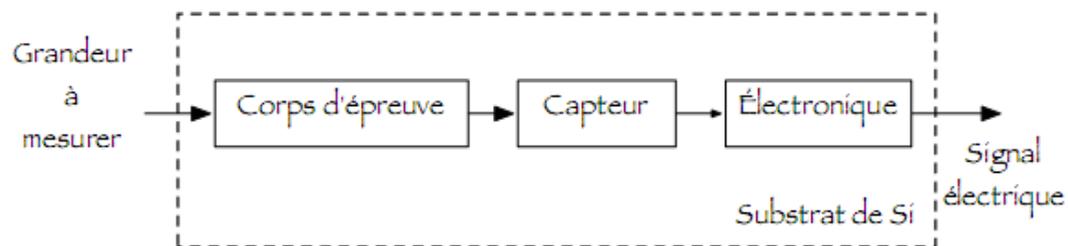


Figure 2.15 : Structure générale d'un capteur intégré.

L'intégration apporte de multiples avantages : miniaturisation, diminution des coûts par la fabrication en grandes séries, accroissement de la fiabilité par suppression de nombreuses connexions soudées, interchangeabilité améliorée, meilleure protection vis à vis des parasites, le signal étant conditionné à sa source.

L'utilisation du silicium impose cependant une limitation de la plage d'emploi de  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  environ.

### 2.2.6 Capteurs intelligents

Le capteur intelligent correspond principalement à l'intégration dans le corps du capteur d'un organe de calcul interne (microprocesseur, micro-contrôleur), d'un système de conditionnement du signal (programmable ou contrôlé) et d'une interface de communication. Plus largement, le concept de capteur intelligent se décompose ainsi ;

un ou plusieurs transducteurs, des conditionneurs spécifiques, d'une mémoire, d'une alimentation, d'un organe intelligent interne permettant un traitement local et l'élaboration, d'un signal numérique, et d'une interface de communication.

Ces composants sont reliés selon l'architecture de la figure 2.16. Il faut noter que l'inter-

face de communication assure la liaison du capteur à un ordinateur central via un bus partagé entre plusieurs capteurs intelligents.

Le capteur intelligent offre des avantages spécifiques : configurabilité à distance ; crédibilité accrue des mesures et aide à la maintenance grâce aux informations d'état fournies ; répartition des tâches, déchargeant le calculateur central.

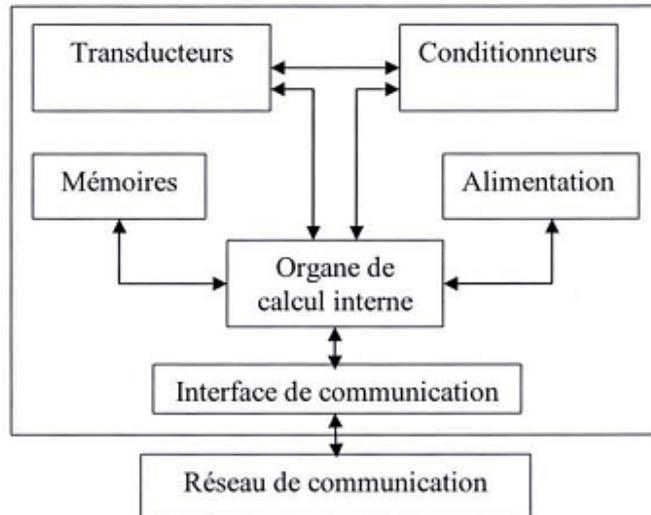


Figure 2.16 : Architecture générique de capteur intelligent

## 2.3 Classification des conditionneurs

Le signal issu directement du capteur est soit trop faible, trop bruité, ou encore contient des composantes parasites ou indésirables. Il est incompatible avec les caractéristiques d'entrée d'une chaîne d'acquisition de données. Le conditionnement permet de mettre en forme le signal mesuré en vue d'un traitement et d'une transmission éventuelle. Il ne s'agit pas de faire un bilan exhaustif des conditionnements associés aux capteurs mais d'en donner quelques exemples. Le choix d'un conditionneur est une étape importante dans la réalisation d'un ensemble de mesure. C'est en effet, l'association capteur-conditionneur qui permet de déterminer le signal électrique et ses caractéristiques.

### 2.3.1 Conditionnement des capteurs actifs

Dans ce cas, le capteur actif se comporte comme un générateur : une source de tension, une source de courant ou une source de charges.

Lorsque l'information électrique délivrée par les capteurs actifs se présente sous forme d'une f.è.m en série avec une impédance  $Z_c$  (figure 2.17), le signal électrique peut être lu aux bornes d'une impédance  $Z_i$  et on a :

$$V_m = \frac{Z_i}{Z_i + Z_c} e_c \quad (2.1)$$

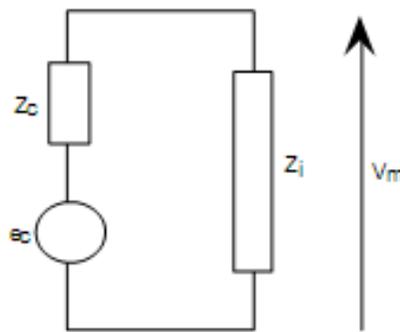


Figure 2.17 : Equivalence à une source de tension

Pour que la mesure soit la plus proche possible de la tension délivrée par le capteur, il faut donc que l'on ait  $V_m \approx e_c$ , soit encore que  $Z_i \gg Z_c$ , mais ceci conduit à une réduction de la bande passante.

#### Conversion courant-tension

Lorsque le signal de sortie du capteur est un courant, le rôle du convertisseur courant-tension est de transformer celui-ci en une tension.

Le montage de la figure 2.18 est réalisé de telle sorte qu'aucun courant ne parcourt  $R$ , et que tout le courant fourni par la source  $i(m)$  représentant le courant à convertir traverse

$R$  et détermine la tension de sortie. Le signal électrique  $V_m$  est donné par :

$$V_m = -R_c i_m \quad (2.2)$$

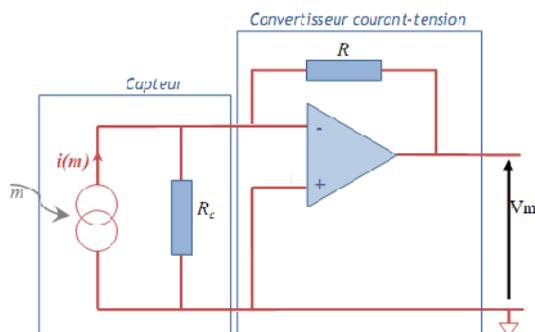


Figure 2.18 : Capteur générant un courant associé à un convertisseur courant-tension à amplificateur opérationnel.

### Amplification

Lorsque les signaux électriques issus des capteurs sont de faible amplitude, il peut être nécessaire de les amplifier pour les adapter à la chaîne de transmission. L'amplification (en tension ou en puissance) du signal électrique issu du capteur est un phénomène bruyant : elle s'accompagne d'une dégradation du rapport signal sur bruit. Cela signifie que si l'amplitude du signal utile issue du capteur est importante, les parasites (bruit) le sont également mais dans des proportions plus grandes encore.

Les amplificateurs d'instrumentation sont conçus de manière à optimiser le rapport signal sur bruit, c'est à dire le dégrader. Ils sont caractérisés par un gain d'amplification ratio du signal électrique de sortie de l'amplificateur sur le signal d'entrée, et qui quantifie la dégradation du rapport signal sur bruit entre l'entrée et la sortie.

### Filtrage

Le filtrage peut avoir différentes applications. Il peut en particulier être pratiqué afin de réduire le bruit (signal parasite « large bande » ou haute fréquence) entachant le signal utile. Ainsi un filtrage passe-bas éliminera le bruit haute fréquence et produira un effet de lissage utile.

### 2.3.2 Conditionnement des capteurs passifs

Les capteurs passifs transforment le mesurande en une variation d'impédance. Ils doivent toujours être associés à un circuit disposant d'une source de courant ou de tension et en général de plusieurs impédances additionnelles. Ce circuit est appelé le conditionneur. Les types de conditionneurs le plus généralement utilisés sont :

- \* le montage potentiométrique : association en série d'une source, du capteur et d'une impédance qui peut être ou non de même type ;
- \* le pont d'impédance dont l'équilibre permet la détermination de l'impédance du capteur ou dont le déséquilibre est une mesure de la variation de cette impédance ;
- \* le circuit oscillant qui contient l'impédance du capteur et qui est partie d'un oscillateur dont il fixe la fréquence ;
- \* l'amplificateur opérationnel dont l'impédance du capteur est l'un des éléments déterminant de son gain.

#### Montage potentiométrique

**Mesure de résistances** Le capteur de résistance  $R_C$  en série avec une résistance  $R_1$  est alimenté par une source de tension de résistance interne  $R_S$  et de f.é.m.  $e_S$  (figure 2.19). La tension  $V_m$  est mesurée aux bornes du capteur par un appareil de mesure de résistance d'entrée  $R_d$ ; on établit immédiatement :

$$V_m = e_S \cdot \frac{R_C R_d}{R_C (R_S + R_1) + R_d (R_S + R_1 + R_C)} \quad (2.3)$$

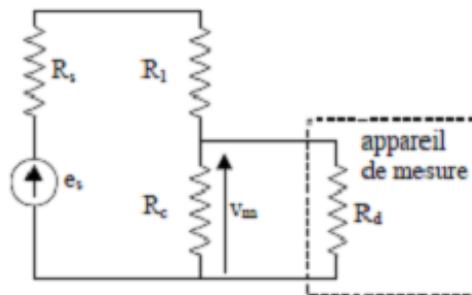


Figure 2.19 : Montage potentiométrique

La tension aux bornes du capteur est indépendante de l'appareil de mesure à condition que  $R_d \gg R_C$ ; dans ce cas :

$$V_m = e_S \cdot \frac{R_C}{R_C + R_1 + R_s}.$$

La tension  $V_m$  n'est pas une fonction linéaire de  $R_C$ .

### Linéarisation de la mesure

Le but est de trouver une relation proportionnelle entre la variation de la tension mesurée et la variation de la résistance du capteur. On va opter pour trois solutions.

*Première solution : fonctionnement en petit sigaux*

La résistance du capteur variant de  $R_{C0}$  à  $R_{C0} + \Delta R_C$ , la tension  $V_m$  passe de  $V_{m0}$  à  $V_{m0} + \Delta V_m$ .

la situation initiale prise comme origine des variations correspond à :  $V_m = V_{m0}$  et  $R_C = R_{C0}$ . Après variation, on a  $R_C = R_{C0} + \Delta R_C$ , et  $V_m = V_{m0} + \Delta V_m$ .

$$\Delta V_m = e_S \left( \frac{R_{C0} + \Delta R_C}{R_{C0} + \Delta R_C + R_1 + R_s} - \frac{R_{C0}}{R_{C0} + R_1 + R_s} \right) \quad (2.4)$$

à condition que :  $\Delta R_C \ll R_{C0} + R_1 + R_s$

$$\Delta V_m = e_S \frac{(R_1 + R_s) \Delta R_C}{(R_{C0} + R_1 + R_s)^2} \quad (2.5)$$

La sensibilité du conditionneur  $\frac{\Delta V_m}{\Delta R_C}$  est maximale si on va choisir :  $R_{C0} = R_1 + R_s$ , dans ce cas :

$$V_m = \frac{e_s}{4} \frac{\Delta R_C}{R_{C0}} \quad (2.6)$$

*Seconde solution : alimentation par source de courant (figure 2.20)*

Dans ce cas, le montage est alimenté par une source de courant, c'est à dire d'impédance interne  $R_s$  très élevée :  $R_s \gg R_{C0} + R_1$ . Dans ce cas la condition  $\Delta R_C \ll R_{C0} + R_1 + R_s$

est toujours vérifiée. En posant :  $i_s = e_s/R_s$  on a :

$$V_m = i_s \cdot \Delta R_C. \quad (2.7)$$

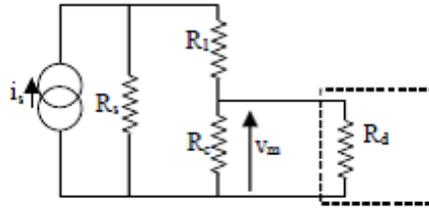


Figure 2.20 : Capteur alimenté par une source de courant.

*Troisième solution : Montage Push Pull*

On remplace la résistance fixe  $R_1$  par un second capteur, identique au premier, mais dont les variations sont de signes contraires :  $R_1 = R_{C0} - \Delta R_C$ . Cette association de deux capteurs fonctionnant en opposition est dite push-pull (figure 2.21). C'est le cas, par exemple de deux jauges d'extensomètre identiques subissant des déformations égales mais de signes contraires. On a alors :

$$V_{m0} + \Delta V_m = e_s \frac{R_{C0} + \Delta R_C}{R_{C0} + \Delta R_C + R_s + R_{C0} - \Delta R_C}$$

soit

$$\Delta V_m = e_s \frac{\Delta R_C}{2 \cdot R_{C0} + R_s}.$$

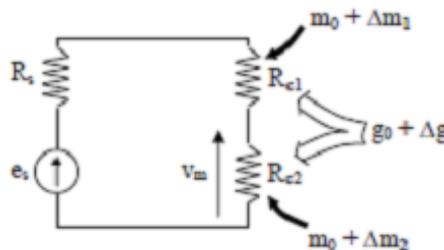


Figure 2.21 : Montage potentiométrique en push-pull.

### Inconvénient du montage potentiométrique

La difficulté majeure lors de l'utilisation du montage potentiométrique risque de venir de

sa sensibilité aux dérives de la source et aux parasites comme mentionné dans les deux cas d'alimentation suivante.

*Alimentation dissymétrique.* Si le circuit est le siège simultanément d'une variation de résistance du capteur  $R_C = R_{C0} + \Delta R_C$  et d'une fluctuation de la tension de source  $e_S = e_{S0} + \Delta e$  (figure 2.22).

La variation  $\Delta V_m$  de la tension mesurée est, au second ordre près :

$$\Delta V_m = e_{S0} \frac{R_1 + R_s}{(R_{C0} + R_1 + R_s)^2} \Delta R_C + \frac{R_{C0}}{R_{C0} + R_1 + R_s} \Delta e \quad (2.8)$$

Il est donc difficile de séparer dans la variation de la tension la part due à  $\Delta R_C$  de celle due à  $\Delta e$ .

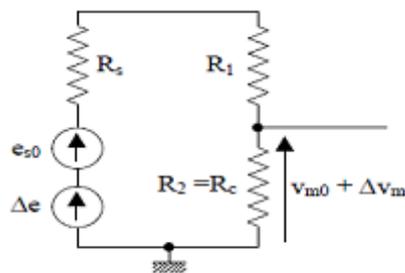


Figure 2.22 : Alimentation  
dissymétrique

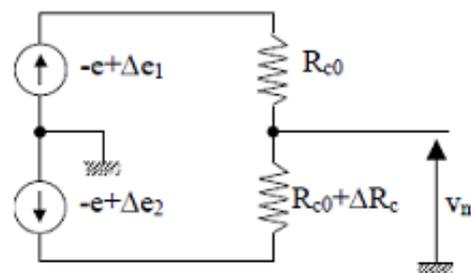


Figure 2.23 : Alimentaion  
symétrique

*Alimentation symétrique.* Il faut considérer dans ce cas les parasites  $\Delta e_1$  et  $\Delta e_2$  induits dans les deux branches de la source (figure 2.23) : ils superposent leurs effets à celui de  $\Delta R_C$  ; la variation globale de la tension de mesure est, au second ordre près :

$$\Delta V_m = \frac{e}{2} \frac{\Delta R_C}{R_{C0}} + \frac{\Delta e_1 + \Delta e_2}{2} \quad (2.9)$$

Sauf dans le cas particulier où les variations de la source seraient  $\Delta e_1 = -\Delta e_2$  , il est impossible de mettre en évidence la seule variation  $\Delta R_C$ .

## Les ponts

### Mesure des résistances-Pont de Wheatstone

### Equation générale. Condition d'équilibre

Dans ce cas le capteur est modélisé par une résistance  $R_c$ .

la structure générale du pont de Wheatstone est indiquée sur la figure. 2.19.  $e_s$  et  $R_s$  caractérisent la source,  $R_d$  est la résistance du diapositif de détection de l'équilibre du pont ou de mesure de son déséquilibre. La tension  $V_m$  est calculée en utilisant les équations de kirchoff; on a :

$$\text{la maille 1, } e_s = (R_1 + R_c) i_1 \implies i_1 = \frac{e_s}{R_1 + R_c}$$

$$\text{la maille 2, } e_s = (R_3 + R_4) i_2 \implies i_2 = \frac{e_s}{R_3 + R_4}$$

La tension de mesure  $V_m$  qui est la tension différentielle  $V_A - V_B$  a pour expression :

$$\begin{aligned} V_m &= V_A - V_B = (V_A - V_D) + (V_D - V_B) \\ &= e_s \left( \frac{R_c}{R_1 + R_c} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \end{aligned} \quad (2.10)$$

soit :

$$V_A - V_B = e_s \frac{R_c R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_c)(R_3 + R_4)} \quad (2.11)$$

le pont est dit équilibré lorsque :

$$V_A = V_B \implies R_c R_3 = R_1 R_4. \quad (2.12)$$

La condition d'équilibre ne dépend que des résistances du pont : elle est indépendante des résistances de la source et du détecteur de déséquilibre.

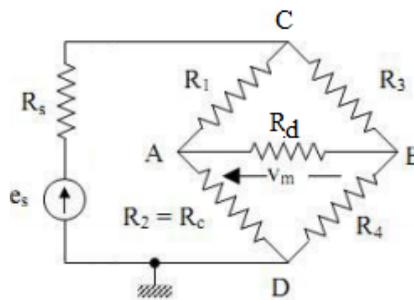


Figure 2.24 : pont de Wheatstone.

### Tension de déséquilibre

Le pont est généralement alimenté par une source dont la résistance  $R_s$  est faible :  $R_s \ll R_1, R_2, R_3, R_4, R_d$ . La tension de déséquilibre a pour expression :

$$V_m = R_d i_d = e_s \frac{R_c R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_c)(R_3 + R_4)} \quad (2.13)$$

$$i_d = e_s \frac{R_c R_3 - R_1 R_4}{R_d (R_1 + R_c)(R_3 + R_4)}. \quad (2.14)$$

## 2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, il a été question de donner une classification des différents capteurs utilisés en télécommunications. Particulièrement les capteurs actifs et les capteurs passifs. Nous avons aussi donné une description des capteurs composites et des capteurs intelligents. Les conditionneurs des capteurs utilisés dans la réalisation d'un ensemble de mesure ont été aussi détaillés. Le chapitre suivant présentera des exemples de capteur et leurs domaines d'applications.

## **Chapitre III**

### **Exemples de capteurs**

# Chapitre 3

## Exemples de capteurs

### 3.1 Introduction

Les capteurs ont connu une évolution fulgurante au cours de ces dernières années, il est intéressant de voir cette évolution tout au long de ces vingt dernières années (figure 3.1).

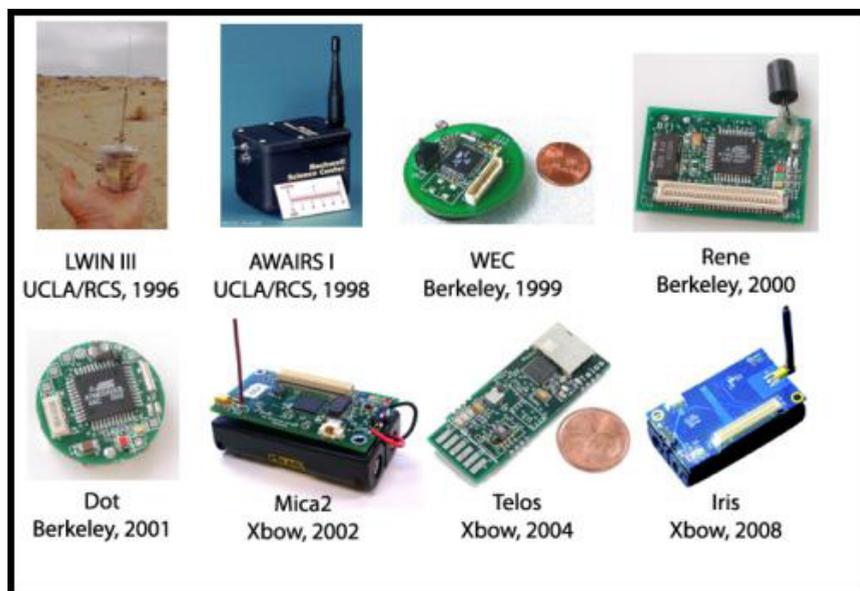


Figure 3.1 : Evolution des capteurs [1]

Nous constatons qu'une entreprise est privilégiée et se distingue des autres c'est **Xbow** aussi appelé Crossbow. est une entreprise incontournable dans la fabrication de capteurs,

cette dernière a vu le jour au sein d'une prestigieuse université californienne à s'avoir l'université de Berkeley qui enregistre les travaux de recherche parmi les plus importants au monde. Les capteurs fabriqués par Xbow au cours des dix dernières années (Famille de capteurs Mica et Telos entre autres) sont sans aucun doute les plus utilisés dans les expériences et travaux de recherches. Ces capteurs sont capables de mesurer plusieurs métriques (température, humidité, etc.,...) et s'articulent pour la plus part d'entre eux autour de Chipcon CC2420 qui est devenu le standard au niveau des modules de transmission utilisant le protocole de communication IEEE 802.15.4.

## 3.2 Les capteurs de forces

Les capteurs de force sont des capteurs de type, jauges de contrainte. La jauge de contrainte est une pièce qui sous l'effet d'une force va s'étirer longitudinalement. Elle est utilisée principalement pour la pesée d'objet ou de personne, ou pour mesurer des efforts de traction et de compression. Il existe différents types de capteurs à jauges de contraintes tel que :

\* Les capteurs de mesures de flexions qui sont des capteurs de force précis et stables de type à flexion, généralement d'étendue de mesure allant de  $0.5N$  à  $+/-125N$ . Ils trouvent généralement leurs applications dans des mesures de forces avec un encombrement réduit. (figure 3.2).



Figure 3.2 : Capteurs de mesures de flexions

Les capteurs de mesures de tractions de compression qui sont :

\* en "S" conçus pour mesurer des efforts de  $0 N$  à  $\pm 20000 daN$ . On les retrouve généralement dans des applications de mesures de tractions et de compressions (figure 3.3).

\* Pan-Cake qui est un capteur conçu pour les mesures de poids allant de  $0kg$  à  $100 tonnes$ . On les trouve aussi dans des mesures de tractions et de compressions (figure 3.4).

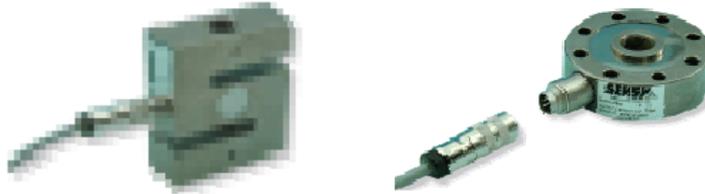


Figure 3.3 : capteur en S    Figure 3.4 : capteur pan Cake

\* Etalons pouvant mesurer de  $0N$  à  $30 MN$ . Il est utilisé pour la même chose que le précédent, donc les mesures de tractions et de compressions (figure 3.5).

\* Miniature mesurant de  $0kg$  à  $5000kg$ . Il est retrouvé dans des applications telles que la pesée de camion, silos, et les réservoirs (figure 3.6).



Figure 3.5 : capteur étalon



Figure 3.6 : capteur miniature

## 3.3 Les capteurs de son (Les microphones)

### 3.3.1 Définitions

Entendre la voix d'un ami, cela peut sembler banal. Pourtant ce n'est pas possible sur la lune. En effet, le son est une onde, ou une vibration qui se propage dans un milieu matériel en l'occurrence dans l'air. Ce sont les molécules qui en se serrant puis en s'écartant permettent au son de se propager. Sur la lune, il n'y a pas d'air donc pas de son. Le premier microphone a été inventé le 4 mars 1877 par Emile Berliner, mais c'est Alexandre Graham Bell qui inventa le premier microphone réellement utilisable.

Les microphones sont les capteurs qui assurent la conversion du signal acoustique (des ondes sonores) en signal électrique appelé signal audio (figure 3.7).

A ce titre, un microphone est un transducteur **électroacoustique**. Son rôle est de transformer une onde de pression acoustique (onde sonore) en un signal électrique. Ceci se fait en deux étapes ; dans un premier temps, il convertit les variations de **pression acoustique** en variations mécaniques : c'est le rôle de la membrane/cavité ouverte ou fermée. Cela correspond au **fonctionnement acoustique** du micro. Puis, ces variations mécaniques doivent être transformées en un signal électrique. C'est le **fonctionnement électrique** du micro.

Il n'existe pas un microphone capable de faire un enregistrement optimal dans l'ensemble des situations : à chaque situation de prise de son correspond un microphone, dont les constructeurs spécialisés proposent de nombreux modèles. Les caractéristiques principales d'un microphone sont donc : Son type, sa technologie, sa directivité, ses caractéristiques électro-acoustiques (sensibilité, pression acoustique maximale, ... ).

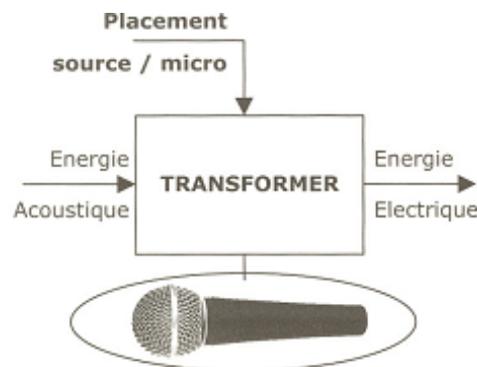


Figure 3.7 : Principe d'un microphone

La transformation d'énergie acoustique en énergie électrique, et réciproquement, ne s'effectue pas directement : il y a un passage par un stade intermédiaire, celui où l'énergie mécanique est emmagasinée par un solide qui se meut ou qui est déformé.

Une membrane qui se déplace au rythme des vibrations acoustiques entraîne une modification d'un élément solide (ou gazeux) qui lui-même délivre une grandeur électrique

variable. Nous pouvons représenter schématiquement un microphone par les trois " parties " A B C de la figure 3.8 :

**A : L'élément transducteur** caractérisé par le principe physique mis en jeu pour la transformation d'énergie. Trois grands principes sont utilisés Principe piézo-électrique, électromagnétique (ou électrodynamique) et électrostatique.

**B : Le boîtier du microphone** : La forme ainsi que les ouvertures du boîtier vont avoir une grande importance sur une des qualités du microphone, notamment la directivité.

**C : Le générateur E et sa résistance interne  $R_i$**  : Au point de vue électrotechnique, un microphone peut parfaitement être considéré comme un générateur de tension alternative possédant une résistance interne.

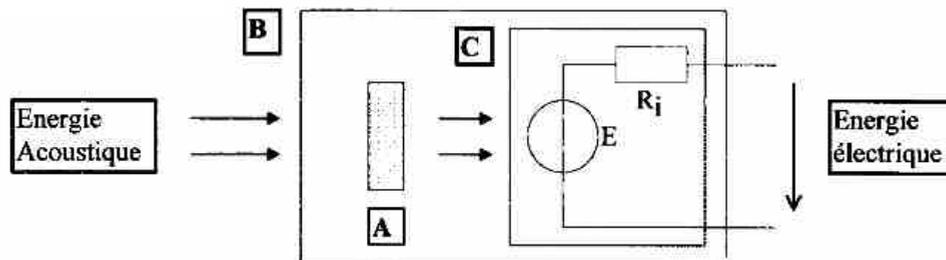


Figure 3.8 : Schéma d'un microphone.

### 3.3.2 Classification des microphones

On peut choisir les microphones selon plusieurs critères

\* **Par leurs modes d'utilisations :**

- \* les microphones de service (téléphone et prothèses auditives).
- \* les microphones de prise de son (micros de sonorisation, de radiodiffusion, de studio d'enregistrement).
- \* les microphones de mesure (élément de sonomètre).

\* **Par leurs modes de conversion de transducteur :** électrodynamique (à bobine mobile, à ruban), électrostatique, piézoélectrique, microphone à charbon.

\* **Par leurs modes de directivité :** micros omnidirectionnels, micros bidirectionnels, micros unidirectionnels.

\* **Par leurs modes d'action ou mode d'attaque du diaphragme** : l'orientation du microphone par rapport à la source ainsi que la direction des ondes arrivant sur le microphone vont avoir une importance très grande sur la qualité du signal électrique de sortie du microphone. Nous distinguons trois principaux types de microphones, les microphones de pression, de gradient de pression et mixtes. Le type du microphone, c'est-à-dire la constitution de son boîtier va déterminer le diagramme de directivité du microphone.

### 3.3.3 Les microphones numériques

On retrouve les débuts de la technologie des microphones numériques à la fin des années 80 dans le monde informatique avec le microphone Ariel Digital Microphone (figure 3.9). Le premier microphone numérique rassemblait un microphone stéréo, un préamplificateur stéréo et un double convertisseur analogique-numérique.

Jon Paul son inventeur a alors l'idée de placer un convertisseur analogique-numérique directement dans le corps du microphone. Le son capté par la capsule stéréo est alors préamplifié puis directement numérisé avec une résolution de 16 bits. Il fait alors breveter le dispositif, ce qui bloquera un certain temps le développement d'autres microphones numériques aux Etats-Unis.



Figure 3.9 : Ariel Digital Microphone

En 1995, un étudiant en ingénierie audio et vidéo à l'université de Sciences appliquées de Düsseldorf, Kai Konrath a pour sujet de thèse le développement d'un microphone numérique de studio chez Beyerdynamic. Après plusieurs prototypes, le MCD 100 est créé. Ce microphone est considéré comme le premier microphone numérique professionnel. On

voit sur son schéma fonctionnel ci-dessous, que le signal électrique fourni par la capsule du microphone est préamplifié, puis converti via un convertisseur analogique / numérique fonctionnant en 22 bits, avant d'être traité par un processeur DSP pour être transformé en un signal exploitable par des tables de mixage ou des enregistreurs numériques.

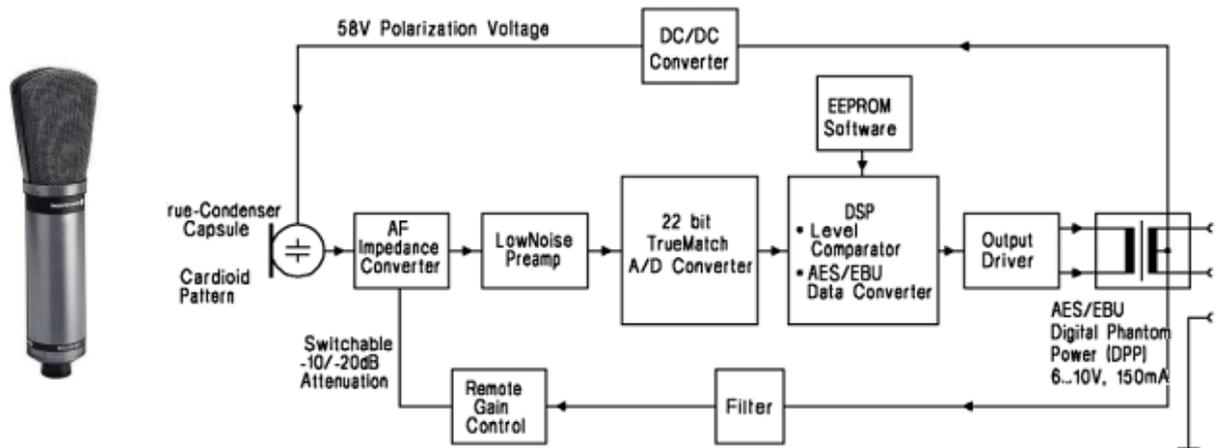


Figure 3.10 : Beyerdynamic MCD 100 et son schéma fonctionnel

### 3.3.4 Définitions

un microphone numérique est un appareil permettant de convertir un signal acoustique en un signal audio numérique. Le microphone convertit l'onde sonore en un signal électrique qui transite ensuite dans un câble jusqu'au préamplificateur. Si ce câble est trop long ou de mauvaise qualité, il peut altérer le signal. Le préamplificateur, lui aussi potentiellement sensible aux perturbations électromagnétiques, amplifie ensuite le niveau de ce signal. Son réglage est source d'erreur. Un gain trop haut peut entraîner des problèmes de distorsion en sortie du préamplificateur et de saturation numérique dans le convertisseur. Si le gain est réglé trop bas, la résolution de conversion ne sera pas optimum et un souffle apparaîtra si, par la suite, on remonte numériquement le signal. De plus, la qualité de l'ensemble sera toujours dépendante de l'élément le plus faible dans la chaîne ; Il faudra alors veiller à ce que chacun d'eux soit de gamme équivalente.

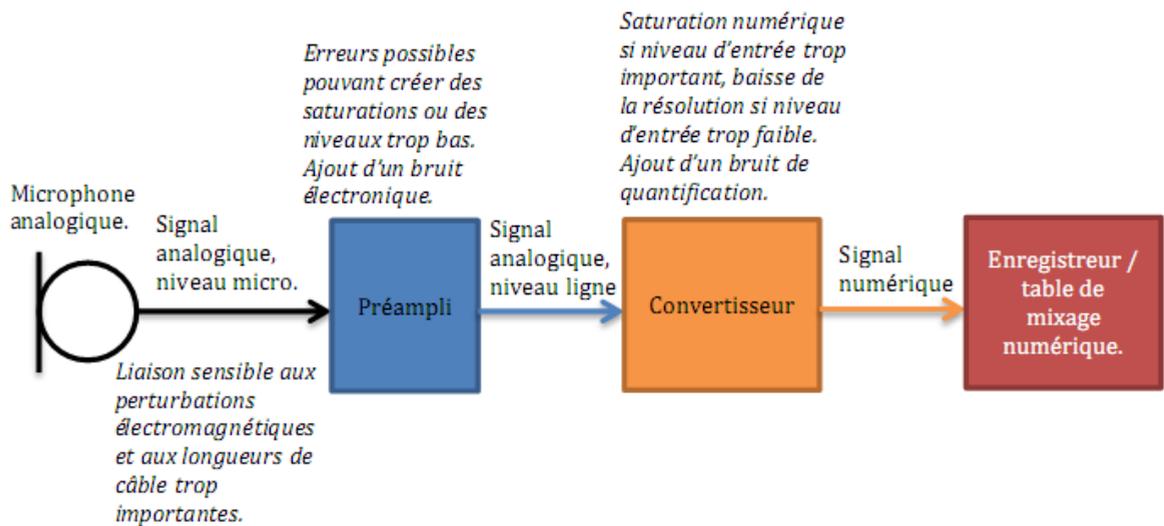


Figure 3.11 : Chaîne traditionnelle d'un microphone

La même installation est réalisée mais avec un microphone numérique (figure 3.12).

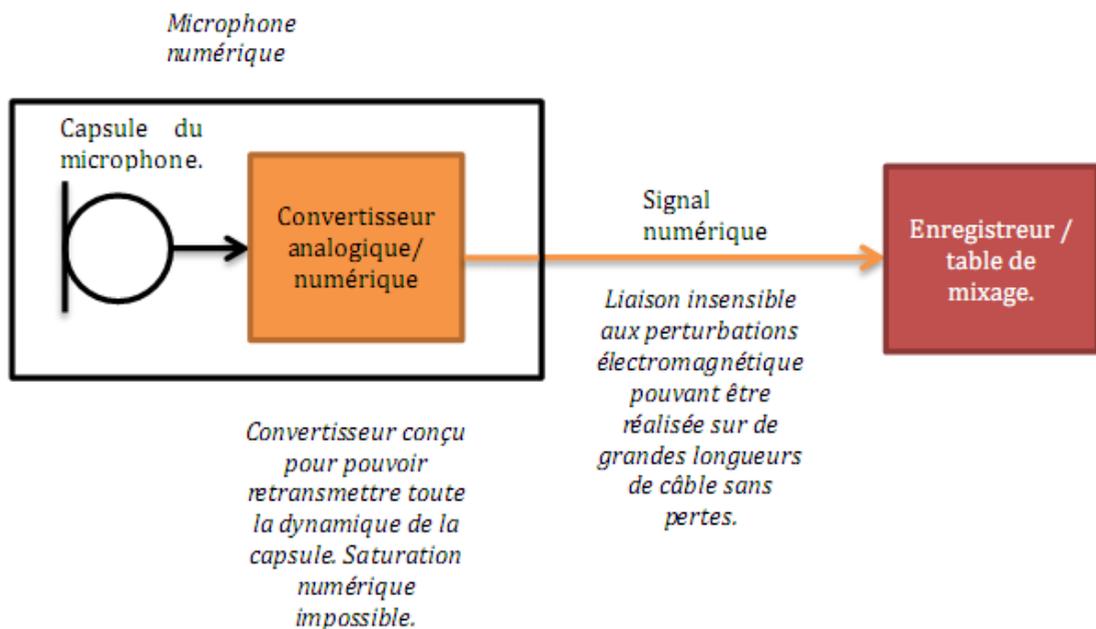


Figure 3.12 : Chaîne d'un microphone numérique

L'avantage, c'est que la ligne numérique est absolument insensible aux parasites électromagnétiques. Donc évidemment, c'est très appréciable. Le deuxième point c'est qu'il n'y a

pas de perte par rapport à la distance. Les problèmes de liaison sont supprimés. Comme le signal est numérique, il peut subir les mêmes dégradations qu'un signal analogique sans être altéré au final. En effet, les niveaux hauts et les niveaux bas servant à coder le signal numérique seront toujours interprétés en tant que tel même s'ils sont déformés par des perturbations électromagnétiques. Le signal restera donc identique de sa source à sa destination, même avec de grandes longueurs de câble.

Le convertisseur étant conçu pour la capsule, il est capable de retranscrire toute la dynamique de celle-ci, sans générer de saturation numérique. Il n'y a donc plus d'erreur de réglage de gain dans la partie analogique. On est alors certain de recevoir, en sortie du microphone, un signal numérisé de manière optimum.

Le nombre d'éléments dans la chaîne est réduit. Même si les microphones numériques sont plus onéreux que des microphones traditionnels équivalent, il est inutile d'investir dans un préampli et un convertisseur externe. Deux éléments qui en haut de gamme sont souvent très dispendieux. Pour une qualité similaire, le coût d'une chaîne en micro numérique sera donc moindre.

La réduction du nombre d'éléments entre la capsule du microphone et l'enregistreur participe également à la réduction du bruit contenu dans le signal final.

Les fabricants de microphones, s'assurent avec les microphones numériques que le signal fourni par leurs capsules est numérisé de la meilleure des manières. Ils assurent alors à leurs clients un rendu qu'ils retrouveront quel que soit l'enregistreur utilisé. Certains pourront toutefois déplorer la perte de la coloration qu'apportent certains préamplificateurs.

## **3.4 Capteurs CCD (charges coupled devices)**

### **3.4.1 Généralités**

La photographie numérique a connu un développement spectaculaire à partir des années 1990. Cela est dû au développement de capteurs de haute qualité, chargés de capturer la lumière lors de la prise de vue. Le premier dispositif indispensable pour réaliser

une prise de vue numérique est un capteur capable de délivrer une matrice de pixel. C'est le capteur CCD (Charge Coupled Device)

Les CCD furent inventés par Boyle et Smith dans les laboratoires Bell en 1970. et sont utilisées dans de nombreuses applications (commerciales, médicales, et scientifiques.

Un CCD est un capteur de lumière basé sur un dispositif à transfert de charges. L'élément photosensible charge chacun des éléments du CCD, qui les transfère selon le signal d'horloge. Dans les scanners de documents et beaucoup d'autres applications similaires, les dispositifs sont linéaires, et passent sur l'objet à explorer. Dans les appareils photographiques et les caméras vidéo numériques, les capteurs sont regroupés sur une surface rectangulaire, où chaque CCD forme une ligne, souvent dans la plus petite dimension de l'image. Quelques exemples sont illustrés sur la figure 3.13 ci dessous.

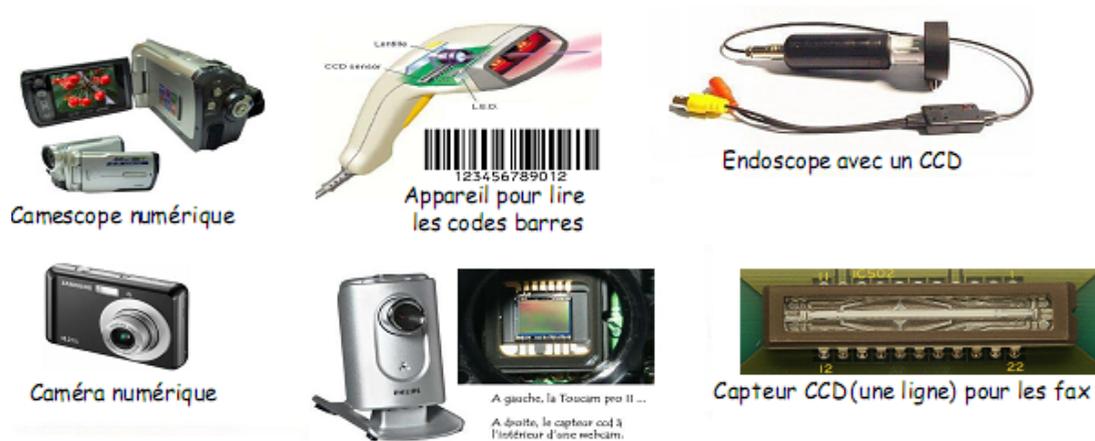


Figure 3.13 : Exemples de capteurs CCD [5].

### 3.4.2 Structure d'un capteur CCD

Dans sa structure de base, un capteur CCD est équivalent à un condensateur MOS (Metal Oxide Semiconductor).comme illustré sur la figure 3.14. Les électrodes (Grille ou Gate), de quelques microns d'épaisseur, sont réalisées en matériau fortement conducteur, en métal (aluminium) ou en silicium poly cristallin. La couche isolante, de quelques microns d'épaisseur, est réalisée en dioxyde de silicium (SIO) et le substrat (support) dans

lequel se formera un canal où se déplaceront les charges électriques est en semi conducteur dopé P (P-Silicium par exemple).

L'ensemble (sous une grille) se comporte comme un condensateur. La majorité des capteurs CCD possède une couche enterrée de semiconducteur N dans le silicium, sous la couche d'oxyde.

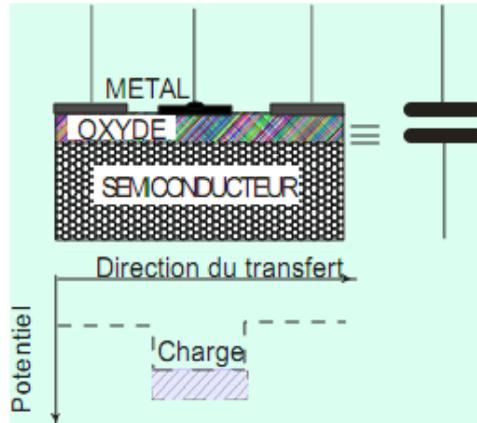


Figure 3.14 :Structure de base d'un CCD et son équivalent.

### 3.4.3 Principe de fonctionnement

#### La génération de charges

La première opération réalisée dans le capteur est la conversion de l'énergie lumineuse (photons) en énergie électrique (électrons). Son principe est basé sur l'effet photoélectrique. Lorsqu'un photon d'énergie supérieure au gap est absorbé dans le semiconducteur, une paire électron/trou est créée. Il s'agit en fait d'un atome du réseau du semiconducteur qui va libérer un électron (promotion de la bande de valence à la bande de conduction) et laisser à sa place une charge positive appelée trou.

Dans ces conditions, lorsqu'une lumière incidente atteint la surface active, elle traverse les couches métalliques et d'oxyde pour se dissiper dans le semi-conducteur  $SI - P$ . Si l'énergie  $E = h\nu$  d'un photon est suffisante, elle va être transmise à un électron d'un atome de silicium qui va devenir un électron libre, laissant à sa place une charge positive ou trou lié à l'atome dans lequel il a été créé.(voir figure.3.15).

Le substrat dopé  $P$  contient des porteurs positifs (trous) majoritaires (a). Si on applique une polarisation positive sur l'électrode métallique, ces porteurs seront repoussés et il se crée une zone de déplétion dont la hauteur dépend de la tension appliquée (b et c).

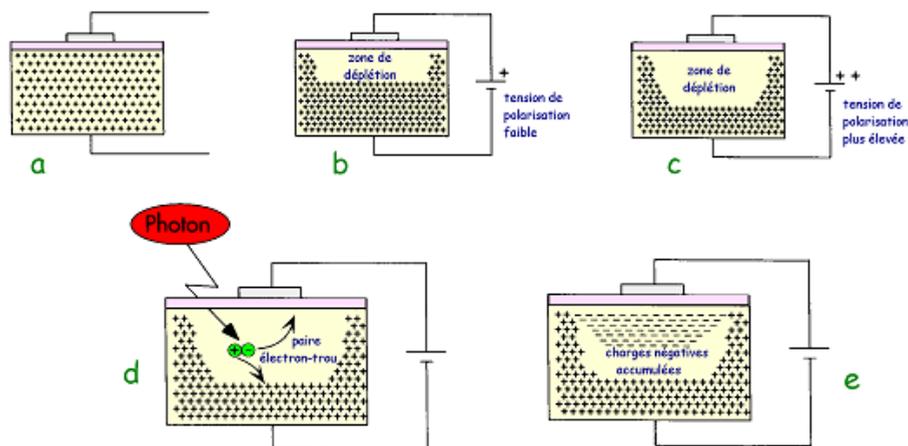


Figure 3.15 : Fonctionnement d'un photosite.

Chaque fois qu'un photon arrive dans le substrat, il y crée une paire électron-trou (d). L'électron est attiré par l'électrode et se trouve piégé dans la zone de déplétion.

Après interactions des photons avec le silicium, les électrons sont collectés et stockés dans chaque photo-site. Sinon, les charges vont se recombiner au bout d'un temps caractéristique  $\tau$ . A la fin du temps d'intégration (typiquement 20 ms), la charge totale recueillie dans la zone de déplétion (e) est proportionnelle à l'intensité lumineuse reçue.

Chaque photosite se comporte donc comme un condensateur de faible valeur qui se charge au cours du temps sous l'effet de l'éclairement.

### Transfert des charges

La charge accumulée à la fin du temps d'intégration doit maintenant être transférée dans un registre pour être lue et participer à l'élaboration du signal vidéo.

Le déplacement de la charge de la cellule 2 à la cellule 3 s'effectue de la façon suivante (figure 3.16) :

\* on applique une polarisation plus importante à la cellule 3. Celle ci aura une zone de

déplétion plus profonde.

\* Il en résulte un champ électrique local qui fait bouger les électrons de la zone 2 à la zone 3.

\* La polarisation de la cellule 3 revient à sa valeur nominale.

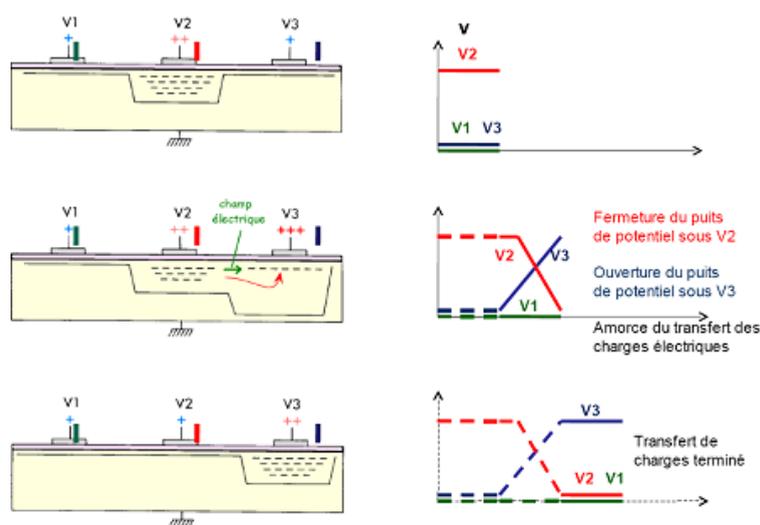


Figure 3.16 : Le mécanisme de transfert de charges.

En appliquant des signaux comparables à des horloges décalées à des électrodes contiguës, on peut donc déplacer les charges à travers un grand nombre de cellules, avec une perte de charge très faible. Ce mécanisme de transfert de charge utilisé dans ces dispositifs CCD (charge coupled devices) est aussi exploité dans des registres à décalage analogiques et des dispositifs de mémorisation analogique de la voix (répondeurs téléphoniques).

### La lecture des charges dans le capteur CCD

À la fin de l'exposition, les charges sont transférées de photosite en photosite par le jeu de variations de potentiel cycliques provenant d'une horloge externe. Elles sont ensuite envoyées dans un registre de sortie. Enfin les charges sont transformées en tension proportionnelle au nombre d'électrons. Ce signal sera, à l'extérieur du CCD, amplifié et numérisé.

### 3.4.4 Qualités, limitations du capteur CCD et domaines d'applications

#### Points positifs :

- \* Qualité d'image élevée. Selon le CCD employé, le facteur de remplissage peut être proche de 1, cela permet une qualité d'image élevée.
- \* Bruit très faible. Le bruit est faible avec un capteur CCD puisqu'il y a moins d'électronique composant le capteur.
- \* Haute sensibilité : cela permet l'emploi de ces capteurs où il y a peu de lumière.

#### Points négatifs :

- \* Saturation du capteur aux fortes luminosités : Cela peut créer des taches circulaires blanches, appelées blooming, qui peuvent être compensées par un logiciel de retouche d'image ou bien réduire au minimum le temps de pose.
- \* Nécessité d'horloges multiples pour piloter les transferts de charges

#### Domaine d'applications

Les capteurs CCD sont à l'origine employés pour toutes les applications nécessitant un haut niveau de précision, pour les systèmes de traitement d'images complexes, les applications scientifiques, pour celles présentant un faible niveau d'éclairage.

**Applications en imagerie** On peut utiliser les capteurs CCD aussi bien pour les longueurs d'onde visibles que pour l'infrarouge proche, les UV ou les Rayons X : leur spectre d'application s'étend en vérité de  $0,1 \mu m$  à près de  $1\ 100 \text{ nm}$ . Le pouvoir de résolution des grandes longueurs d'onde est limité par les bandes interdites des matériaux semi-conducteurs (env.  $1,1 \text{ eV}$  pour les puces au silicium et  $0,66 \text{ eV}$  pour les puces au germanium).

Ils sont donc suffisamment polyvalents pour qu'on les emploie en sciences naturelles et

dans l'industrie. Mais c'est surtout en astronomie qu'ils ont très vite détrônés par d'autres récepteurs comme les plaques photographiques, de par leur haute sensibilité qui a permis de détecter des astres de très faible luminosité; mais ils ont bien d'autres avantages, comme l'étendue du spectre à laquelle ils réagissent, leur gamme dynamique plus élevée (c'est-à-dire leur aptitude à contraster efficacement sur une même image les sources minuscules des objets très lumineux) et enfin le caractère digital de l'information enregistrée; ce dernier point est un grand avantage en photométrie et pour le développement d'algorithmes complexes de traitement d'image.

### **3.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, des exemples de quelques capteurs utilisés dans plusieurs domaines ont été présentés. On avait cité en particulier les capteurs de forces, les microphones et les CCD.

## **Chapitre IV**

### **Mesures statiques et dynamiques en télécommunications**

# Chapitre 4

## Mesures statiques et dynamiques en télécommunications

### 4.1 Introduction

Il semble évident que l'exactitude des mesures dimensionnelles est un facteur décisif en fabrication. Réaliser les mesures dimensionnelles selon la même procédure tout au long de la chaîne de fabrication, de la réception des matériaux à l'expédition, en passant par le traitement, l'assemblage et le contrôle, permet de créer des produits parfaitement conformes au dessin de conception et d'en garantir la qualité. Cela permet d'apporter au client une qualité de service sur le contrôle et la fiabilité du matériel pour un bon fonctionnement. Cette qualité de service fait le sérieux de notre profession.

### 4.2 Présentation des appareils de mesure

Les appareils de mesure doivent être conformes aux normes de sécurité qui leur sont applicables et doivent porter le marquage CE qui atteste la conformité à la directive CEM et à la directive basse tension. Le marquage de l'appareil doit comporter :

- \* La valeur assignée de la tension phase - neutre.
- \* La catégorie d'installation.

\* Le degré de pollution électromagnétique connue sous le nom de CEM

CEM : signifie compatibilité électromagnétique.

On peut distinguer deux types d'appareils de mesures :

Les appareils de mesures statiques à savoir : les multimètres analogique et numérique, les réflectomètres, analyseurs de spectres, et pour les mesures dynamiques, on peut citer les testeurs de liaisons, les analyseurs de trames, et analyseurs de protocoles. Ces appareils seront définis dans la suite du chapitre.

#### **4.2.1 Mesure avec un multimètre (recherche de continuités)**

La mesure au multimètre est une mesure statique ou très basse fréquence : elle est donc utilisée essentiellement pour vérifier les points de repos d'un circuit. Un multimètre possède, en général, quatre modes de fonctionnement : voltmètre, ampèremètre, diode-mètre, ohmmètre. Grâce à une fonction de reconnaissance automatique, cet appareil convient pour presque toutes les tâches de mesure électriques quotidiennes sans qu'aucune commutation ne soit nécessaire.

##### **Présentation du test de continuité**

La continuité est la présence d'un trajet complet pour la circulation du courant. Un circuit est complet lorsque son interrupteur est fermé. Le mode test de continuité d'un multimètre numérique permet de tester les interrupteurs, les fusibles, les connexions électriques, les conducteurs et d'autres composants. Par exemple, un bon fusible doit présenter une continuité.

Un multimètre émet une réponse sonore (un bip) lorsqu'il détecte un trajet complet. Le bip, un indicateur sonore, permet aux techniciens de se consacrer aux procédures de test sans avoir à regarder l'écran du multimètre.

Lors d'un test de continuité, un multimètre émet un son en fonction de la résistance du composant testé. Cette résistance est déterminée par le réglage de la gamme du multimètre.

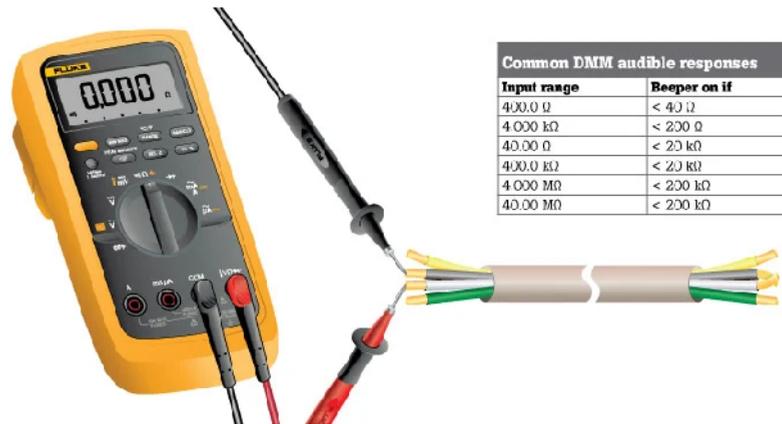


Figure 4.1 : Multimètre numérique pour recherche de continuité [11].

Exemples :

- \* Si la gamme est définie sur 400,0  $\Omega$ , le multimètre bipie généralement si la résistance du composant est inférieure ou égale à 40 $\Omega$ .
- \* Si la gamme est définie à 4,000  $K\Omega$ , le multimètre bipie généralement si la résistance du composant est inférieure ou égale à 200  $\Omega$ .

La gamme la plus basse doit être utilisée pour tester des composants de circuit qui ont normalement une faible valeur de résistance, comme les connexions électriques ou les contacts d'interrupteur.

### Étapes de mesure de la continuité

Placer le sélecteur rotatif en mode Test de continuité (Continuity test icon). Il est probable que le symbole sur le sélecteur rotatif partage son emplacement avec une ou plusieurs autres fonctions, généralement la résistance ( $\Omega$ ). Les sondes de test étant séparées, l'écran du multimètre peut afficher OL et  $\Omega$ . Si nécessaire, appuyer sur la touche de continuité.

- \* Insérer d'abord le cordon de test noir dans la fiche COM.
- \* Insérer ensuite le cordon rouge dans la fiche  $V\Omega$ . Ensuite, retirer les fils dans l'ordre inverse : d'abord rouge, puis noir.
- \* Le circuit étant hors tension, connecter les cordons de mesure sur le composant en cours

de test. La position de ces cordons est arbitraire. Noter que le composant peut devoir être isolé des autres composants du circuit.

\* Le multimètre numérique (DMM) émet un son si un trajet complet (une continuité) est détecté. Si le circuit est ouvert (l'interrupteur est en position OFF), le multimètre n'émet aucun son.

\* Lorsque la mesure est terminée, mettre le multimètre hors tension pour économiser la batterie.

## 4.2.2 Testeurs de fibre optique

Les entreprises manquent toujours de temps et de ressources. La consolidation des réseaux et la virtualisation des serveurs et des réseaux entraînent une complexification des centres de données.

Les tests sont essentiels pour s'assurer que les câbles à fibres optiques composant le réseau fonctionnent efficacement. Le contrôle des pertes de réseau devient de plus en plus important pour les ingénieurs réseau car les budgets consacrés au traitement des pertes se réduisent en même temps que les exigences augmentent. C'est là qu'interviennent les tests et l'inspection des fibres.

### Inspection et nettoyage des fibres optiques

Les extrémités sales constituent la cause n° 1 des défaillances des liaisons fibre optique, mais également la plus facile à éviter. Les détériorations d'extrémités, qui prennent la forme d'éraflures, de piqûres, de fêlures ou de bris, peuvent également provoquer la panne d'un réseau fibre optique, et proviennent souvent de raccordements médiocres ou d'un jumelage contaminé.

**Procédure** Avant toute connexion de fibre optique, inspectez l'extrémité (ou le port) de la fibre à l'aide d'un microscope vidéo afin d'identifier toute contamination.

\* S'il suffit de retirer de la poussière, utilisez un outil de nettoyage OneClick (figure 4.2).

\* En cas de dépôt graisseux suite à un contact avec la peau, procédez comme suit :

1-Tamponnez l'extrémité contaminée à l'aide d'une lingette ou d'un écouvillon imbibé de

solvant.

2-Frottez l'extrémité de la fibre à la perpendiculaire contre une lingette sèche.

3-Inspectez de nouveau l'extrémité (ou le port) de la fibre à l'aide du microscope vidéo afin de vous assurer que tous les débris ont été éliminés.

4-Si ce n'est pas le cas, répétez la procédure de nettoyage jusqu'à élimination de toute contamination.



Figure 4.2 : Kit de nettoyage pour fibre optique [11].

### **Test des fibres optiques**

Après toute installation de liaison de fibres optiques, afin de vérifier que l'installation répond aux exigences relatives aux tolérances de perte optique spécifiées par les normes d'infrastructure de câblage.

Cette procédure est requise par des normes reconnues à l'échelle internationale, telles que TIA-568-C, ISO-11801 et IEC 14673-3 afin de garantir une installation de qualité.

**Procédure de certification des fibres optiques** Avant de procéder à un test de perte, on connecte le port source et le port de wattmètre optique avec un cordon de test de référence (TRC).

Définissez et enregistrez un niveau de puissance à partir de la source, qui servira de référence pour les mesures de perte de puissance suivantes.

Connectez la source à la liaison que vous testez en débranchant le cordon du wattmètre optique et en le connectant à la liaison. Ensuite, branchez le wattmètre optique à l'autre extrémité de la liaison à l'aide d'un cordon de test de référence.

Un test de la perte optique (OLTS) calculera le budget lié à la perte optique en se basant

sur les normes appropriées et la longueur mesurée. La perte mesurée sera comparée à ce chiffre et le résultat présenté comme « Pass » (Réussite) ou « Fail » (Echec). Un ensemble wattmètre optique/source optique mesurera uniquement la perte (les limites et les marges doivent être calculées manuellement).

Lorsqu'un ensemble wattmètre optique/source optique est utilisé, le port source et le port de wattmètre optique doivent être connectés aux deux extrémités de la liaison fibre optique à tester et les étapes mentionnées ci-dessus doivent être répétées.

### 4.2.3 Mesure avec un réflectomètre optique

Les réseaux fibre optique présentent des tolérances de perte extrêmement réduites et laissent moins de place à l'erreur, ce qui conduit les propriétaires et les concepteurs de réseaux à définir non seulement des tolérances de perte générales, mais également des tolérances de perte pour des épissures et connecteurs individuels. Un module de réflectométrie optique est nécessaire pour effectuer ces mesures.

#### La réflectométrie

La réflectométrie est un des moyens pour garantir le budget optique d'une liaison, mais elle peut relever bien plus d'informations. Les réflectomètres optiques (Optical Time Domain reflectometer, OTDR) séries AQ7275 Yokogawa (figure 4.3) couvrent une large gamme d'applications (PON FTTH, Metro, LAN, WAN) pour l'installation et la maintenance des réseaux fibres optiques monomodes et multimodes.



Figure 4.3 : OTDR AQ7275

Un OTDR est un appareil de test de fibre optique utilisé pour caractériser les réseaux optiques utilisés dans les télécommunications. c'est un instrument des tests optiques polyvalent effectuant des mesures de distance et de perte sur les événements des fibres optiques au moyen des tests réalisés depuis une extrémité de la fibre. L'objectif d'un OTDR est :

- \* La caractérisation et la localisation de défauts sur les liens de fibre optique.
- \* La mesure de la longueur d'une fibre optique dans la possibilité de ses caractéristiques.
- \* La détection des zones d'atténuation et de rupture de fibre optique.

### **Étapes de mesure**

Le test de réflectométrie optique bidirectionnel est nécessaire pour calculer les valeurs de perte d'événement de la liaison que vous testez. Le test est requis en raison de la « directivité » résultant des différences de diamètre, de rétrodiffusion, d'ouverture numérique et d'indice de réfraction de la liaison testée et des fibres d'amorce et de queue. Les étapes de mesure sont :

- 1-** Connectez le réflectomètre optique à une extrémité de la liaison fibre optique testée à l'aide d'une fibre d'amorce. Fixez une fibre de queue au connecteur situé à l'extrémité.
- 2-** Configurez ou sélectionnez les limites de référence pour le test.
- 3-** Injectez une impulsion sur la liaison fibre optique testée.
- 4-** Débranchez le réflectomètre de la liaison testée et laissez les fibres d'amorce et de queue en place. Connectez le module de réflectométrie optique à l'extrémité en utilisant la fibre de queue en place. Effectuez une seconde analyse sur la liaison testée, pour obtenir des résultats dans la direction opposée.
- 5-** Calculez les moyennes des deux résultats obtenus pour chaque occurrence dans la liaison et consultez les résultats Réussite ou Echec. Les résultats sont généralement représentés sous forme de graphique.
- 6-** Comparez ces résultats aux limites de référence par rapport au budget lié à la perte optique afin de vous assurer que les mesures des composants sont dans les limites spécifiées.

## 4.2.4 Domaines d'interventions

**Installations extérieures** Les fournisseurs de services de télécommunications, de vidéos et de données, et les opérateurs réseau veulent la garantie que leurs investissements dans des réseaux optiques sont protégés. Dans les installations de fibre optique à l'extérieur, chaque câble doit faire l'objet de tests à l'aide d'un réflectomètre optique pour confirmer que l'installation a été effectuée correctement. Il sera demandé aux techniciens d'utiliser des kits de tests de perte (source optique et photomètre) et des réflectomètres optiques pour établir un cahier de recette qui atteste de la conformité de leur travail. Plus tard, les réflectomètres optiques pourront servir à rechercher les pannes telles que des ruptures provoquées par des travaux de terrassement.

## 4.2.5 Documentation

Toujours, lorsqu'une mesure a été prise, il est important d'enregistrer les résultats. Elle permet de faire valoir la fiabilité et l'intégrité de l'installation, aide à résoudre les litiges et favorise un dépannage plus efficace.

Le logiciel de gestion des tests de câble LinkWare permet de gérer l'ensemble des résultats de tests effectués à l'aide de plusieurs testeurs, et ce, à partir d'une seule et même application.

### Procédure de documentation

Après chaque mesure, enregistrez les résultats. Au moment de terminer la tâche ou à n'importe quel autre moment, vous pouvez télécharger le formulaire de résultats à partir du testeur via une connexion directe au PC ou via LinkWare Live, une solution SaaS (service logiciel) de Fluke Networks. Lorsque les résultats des tests sont téléchargés dans le logiciel de gestion des tests de câble LinkWare, vous pouvez générer des rapports professionnels dans un format courant (PDF, par exemple).

## 4.2.6 Mesure avec analyseur de spectre

Les signaux radiofréquences nous entourent de toutes parts. Ils se sont multipliés avec l'avènement des technologies sans fil dans de nombreux secteurs grand public ou industriel : télécommunication, radiodiffusion, Internet, réseaux, communication Machine-to-Machine, informatique mobile, sans oublier les dispositifs de transmission satellite, les communications militaires, les applications radars. . .

Tous ces signaux doivent être créés mais aussi contrôlés, mesurés, analysés. C'est le rôle des analyseurs de spectre, instruments qui, dans leur version traditionnelle, sont entièrement consacrés à la mesure dans le domaine fréquentiel. permettant de découvrir, capturer et analyser avec célérité et précision des signaux qu'il était auparavant difficile ou impossible de trouver.

La mesure par un analyseur de spectre permet d'afficher les différentes fréquences contenues dans un signal ainsi que leurs amplitudes respectives. Ils examinent la composition spectrale de formes d'onde électriques, acoustiques ou optiques. L'analyseur de spectre divise un signal en une composante d'amplitude et de fréquence. Parmi les analyseurs audio et radiofréquences, il existe aujourd'hui différentes variétés d'analyseurs de spectre.

### **Exemple**

Un réseau de petits capteurs RF à hautes performances fonctionne de façon synchronisée, avec un logiciel puissant, pour vous aider à surveiller en permanence le spectre des RF (figure 4.4). Chaque nœud de capteur RF utilise un petit analyseur de spectre Tektronix en temps réel et un ordinateur embarqué pour rechercher les signaux en RF qui vous intéressent et signaler les incidents sur le spectre à un poste de contrôle centralisé. Tous les incidents sur le spectre sont enregistrés dans une base de données SQL pour faciliter l'analyse et la création de rapports. C'est à la fois puissant et simple à utiliser, sans avoir besoin des services d'un ingénieur.



Figure 4.4 : Un réseau de petits capteurs RF [9].

### Les éléments d'un analyseur de spectre

Un analyseur de spectre est constitué essentiellement des éléments suivants (figure 4.5) :

- \* Le filtre passe-bas : pour éliminer l'élément haute fréquence indésirables, mais il faudra tenir compte de son absence lors de l'analyse de signaux de fréquences élevées.
- \* L'oscillateur local : L'oscillateur local dans l'analyseur de spectre est un élément nécessaire de l'ensemble du fonctionnement de l'appareil. Ses performances régissent un bon nombre des paramètres de performance globaux de l'analyseur complet.
- \* Le générateur de rampe : Le générateur de rampe entraîne le balayage de l'oscillateur local ainsi que l'affichage. De cette manière, l'axe horizontal de l'affichage est directement lié à la fréquence.
- \* Le multiplieur : réalise l'opération  $y(t) = e(t).x(t)$ .
- \* Le filtre passe bande : est un filtre très sélectif laissant qu'une bande ou intervalle de fréquence compris.
- \* Le détecteur de crête : va nous donner une tension  $s(t)$  proportionnelle à l'amplitude des raies que contient  $z(t)$ . La tension  $s(t)$  sera envoyée sur l'entrée Y de l'oscilloscope.

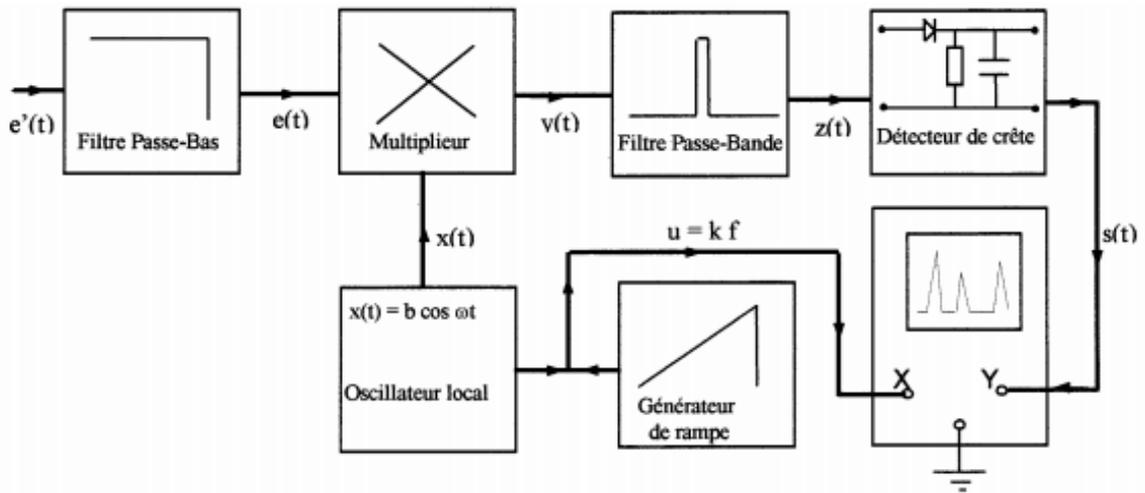


Figure 4.5 : Schéma fonctionnel d'un analyseur de spectre [9].

### Principe de fonctionnement

Selon le type d'applications visées, ces appareils couvrent une plus ou moins large bande de fréquences. L'essentiel des applications réclame des bandes de fréquences allant de 3 à 10  $GHz$  (télécoms, produits grand public, etc.). « Mais on peut avoir besoin de monter à 26,5  $GHz$  pour capturer les harmoniques », indique Renaud Duverne, responsable marketing EMEA de la division générateurs et analyseurs de signaux d'Agilent Technologies. « Le plus gros marché se situe autour des bandes de fréquences radiocom soit 3 et 6  $GHz$  voire 9  $GHz$ . Au-delà, ce sont des niches », confirme Cyril Noger, ingénieur support produits RF et Wireless chez Anritsu. Il s'agit par exemple de tests des liaisons point à point, de radar ou encore de systèmes de communication satellite ou de surveillance électronique qui exigent des fréquences bien supérieures.

Quelle que soit la bande de fréquences couverte par l'appareil, les analyseurs de spectres reposent sur le même principe hétérodyne avec plus ou moins de sophistications selon les caractéristiques et les performances de l'appareil. Le signal d'entrée, après mise à niveau (atténuation ou préamplification), interagit avec un oscillateur local qui le transpose dans une fréquence dite fréquence intermédiaire (FI). En choisissant une valeur FI fixe (définie par le centre d'un filtre passe bande) et en faisant varier la fréquence de l'oscillateur local,

l'instrument balaie l'ensemble de la plage de fréquences spécifiées par l'utilisateur (et par les limites de l'appareil).

La finesse d'analyse est déterminée par la largeur de bande du filtre FI et par le traitement qui est effectué. Le principe théorique est simple. Mais dans la pratique la transposition s'effectue en plusieurs passes en fonction de la gamme de fréquences et de certains autres paramètres dont il faut tenir compte. Le signal subit une multitude d'opérations de pré-amplification, amplification, décalage, multiplication, filtrage... Un des nombreux défis d'un analyseur de spectre est de pouvoir capter et analyser aussi bien un signal fort qu'un signal faible. Il faut donc se méfier de certains appareils d'entrée de gamme qui pourraient être perturbés par un signal fort au point de ne plus avoir la capacité de mesurer le signal faible.

### **Domaine d'utilisation**

Les champs de radiofréquences (RF) sont largement utilisés dans les communications modernes. Les sources les plus connues sont les téléphones portables, les téléphones sans fil, les réseaux locaux sans fil et les tours de transmission radio. D'autres appareils utilisent également des champs de radiofréquences : les scanners médicaux, les systèmes de radar et les fours à micro-ondes. Les radiofréquences varient de  $100\text{ kHz}$  à  $300\text{ GHz}$ .

Quand le corps est exposé à des champs de radiofréquences, il absorbe peu à peu de l'énergie. Déterminer la quantité d'énergie de radiofréquence qu'un individu absorbe quotidiennement n'est pas évident car l'exposition dépend de nombreux facteurs, en particulier de la distance qui sépare la personne des différentes sources. La force d'un champ chute rapidement avec la distance, ce qui signifie qu'une personne peut absorber davantage d'énergie en provenance d'un appareil qui s'utilise de près - un téléphone portable tenu à la main, par exemple - que d'une source plus puissante, comme une tour de transmission radio, qui est plus éloignée.

### **Exemple :**

En médecine, on utilise de puissants champs de radiofréquences pour chauffer des tissus corporels, ce qui peut soulager la douleur ou éliminer des cellules cancéreuses. Ces

champs sont également utilisés pour produire des images du cerveau ou d'autres parties du corps grâce à l'imagerie par résonance magnétique (IRM). L'exposition des patients ou du personnel médical pourrait dépasser les limites de sécurité habituelles.

## **4.3 Mesures dynamiques en télécommunications**

La constante évolution d'un réseau informatique nécessite, d'une part un outil de gestion et d'administration et d'autre part des outils de mesure de la qualité des supports physiques, d'analyse de trafic, d'analyse de la cohérence des informations et de diagnostic. Il existe différents systèmes pour collecter les informations qui seront ensuite traitées et présentées de façon la plus conviviale possible.

Les environnements technique, économique et géographique ainsi que la croissance des flux d'informations entraînent des modifications mineures ou majeures sur des réseaux existants. Il appartient donc aux responsables réseaux de contrôler à tout moment la bonne circulation des informations mais aussi la qualité de cette circulation. En effet, la complexité des architectures, l'hétérogénéité des matériels et des protocoles peuvent engendrer une difficulté d'analyse des problèmes. Le fait de ne pas toujours connaître le cheminement exacte d'une communication amplifie cette complexité. Les temps de résolution des dysfonctionnements peuvent être incompatibles avec ceux exigés par les utilisateurs. Il s'agit donc de prévenir les problèmes potentiels (installations aux normes et seuils d'alarme), de les détecter lors de leur apparition (alarmes) et de les corriger le plus rapidement possible (analyse et diagnostic).

### **4.3.1 Testeurs de câbles**

Souvent utilisés à des fins de maintenance ou de certification d'une installation de câblage, les testeurs de câbles détectent les problèmes au niveau de la couche physique du modèle OSI. Leur premier rôle est de mesurer la qualité du signal ( mesure de la diaphonie sur paires torsadées, bruit, impédance ...) sur le support physique. Ils peuvent vérifier des câbles de différents types : fibre optique, et paires torsadées, coaxiaux.



Figure 4.6 : Exemple testeur de cable.audiofanzine [13].

De par sa fonction d'appareil destiné à la maintenance, donc souvent utilisé dans des environnements hétérogènes par des utilisateurs pressés par le temps, les testeurs de câbles sont très ergonomiques et assez simples à utiliser. Ces avantages ont été conservés par les constructeurs pour installer sur ces appareils des fonctionnalités plus évoluées. Aujourd'hui, des fonctions d'analyseur de protocoles sont embarquées sur ce type d'appareils, permettant ainsi de déplacer de façon très pratique ces testeurs/analyseurs sur chaque segment de réseau. Les testeurs/analyseurs sont limités dans le nombre de protocoles connus et sont souvent dédiés à un type de réseaux (ex : ethernet). Ces appareils n'ont pas toute la capacité de stockage et la puissance de traitement des véritables analyseurs de protocoles.

### 4.3.2 Analyseurs de protocoles

Que ce soit pour l'analyse ad-hoc d'un problème ou pour la surveillance continue, un analyseur de protocole peut s'avérer un outil précieux pour le professionnel de la sécurité. Les analyseurs de protocole sont des outils informatiques ou de logiciel utilisé sur un PC qui permettent aux administrateurs et aux équipes de sécurité IT de capturer le trafic réseau et d'effectuer une analyse des données capturées afin d'identifier les problèmes liés à ce trafic ou les activités malveillantes potentielles.

Ces données de trafic peuvent être visualisées en temps réel par un technicien à des fins de dépannage, surveillées par un outil d'alerte pour identifier les menaces actives pouvant affecter le réseau, ou conservées pour une analyse médico-légale en cas de découverte

d'une brèche dans le réseau.

Ces appareils permettent :

de visualiser l'ensemble du trafic sur le segment de réseau sur lequel ils sont installés ;

de décoder les trames en fonction des protocoles ( niveau 1 à 4 du modèle OSI) ;

de capturer les trames pour une interprétation ultérieure ou une exploitation ;

de filtrer les trames en fonction de nombreux critères comme le type de protocole, la taille des trames, les adresses sources et/ou destination ;

de générer du trafic à partir de modèle de trames, ou de réémettre des trames préalablement capturées pour rejouer des scénarios ;

de positionner des seuils d'alarmes ;

### **Les différentes catégories**

Il existe en général deux catégories principales d'analyseurs de protocole : les outils d'analyse de protocole ad hoc et les outils d'analyse de protocole d'entreprise.

Les outils d'analyse de protocole ad hoc sont surtout utilisés pour dépanner ou analyser un problème spécifique et peuvent être mis en œuvre à peu de frais ou gratuitement avec une planification minimale ou une faible expertise technique. Mais ils sont plus adaptés pour l'analyse ciblée (un protocole ou un hôte spécifique) et ne conviennent pas à la surveillance d'un réseau entier pendant une période prolongée. Quant aux outils d'analyse d'entreprise, ils sont plus adaptés à la surveillance de l'ensemble de l'infrastructure de l'entreprise 24 heures sur 24, et leurs options permettent de planifier différentes alertes lorsque le réseau est menacé.

**Analyse de protocole ad hoc** Les professionnels de la sécurité ont parfois besoin d'un analyseur de protocole pour dépanner un problème sur le réseau, comme des échecs d'authentification ou pour confirmer que le cryptage est suffisant.

Dans le passé, la concurrence était rude entre les outils d'analyse de protocole ad hoc pour gagner l'intérêt des professionnels de la sécurité (et des réseaux). Mais WireShark (anciennement Ethereal) a dominé l'espace, au point que beaucoup d'autres (y compris

Microsoft Network Monitor) ont été abandonnés.

Les deux particularités les plus importantes d'un outil d'analyse ad hoc, est que l'outil doit être à la fois flexible et facile à utiliser. WireShark est capable de filtrer les paquets soit pendant la capture, soit lors de l'analyse, selon différents niveaux de complexité, si bien qu'il peut convenir à tous les utilisateurs, aussi bien les débutants que les professionnels chevronnés.

Comme il est open source et disponible pour toutes les plateformes importantes, l'outil bénéficie d'un grand soutien de la part de la communauté. Le coût n'est pas un obstacle et les outils de formations pour l'utiliser sont facilement accessibles. Autre avantage de WireShark : il peut ingérer et analyser le trafic capturé à partir d'autres outils d'analyse de protocole. Il est donc facile d'examiner le trafic du réseau à un moment précis de l'historique (à condition que le trafic ait été capturé) sans surcoût.

**Analyse de protocoles d'entreprise** L'analyse de protocoles d'entreprise diffère de l'analyse ad hoc sur plusieurs points essentiels, notamment l'échelle et la durée. Généralement, on lance une analyse ad hoc quand on soupçonne un problème ou si l'on a besoin d'évaluer un segment de réseau, un service ou une application spécifique. La suite d'analyse d'entreprise doit pouvoir consommer autant de trafic réseau que possible, 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7, afin d'identifier les motifs, détecter les anomalies, offrir un aperçu des goulots d'étranglement des performances et alerter si des modalités de trafic reproduisent des méthodes d'attaque connues. Un autre aspect à prendre en compte lors du choix d'une suite d'analyse de protocole d'entreprise, c'est de savoir si elle prévoit d'utiliser la solution uniquement pour surveiller le trafic réseau ou si elle souhaite également intégrer des journaux d'audit provenant des applications et des serveurs de l'entreprise. Cette décision aura un impact sur le coût, car elle déterminera le choix de la solution et probablement le nombre d'administrateurs qui utiliseront l'outil.

### 4.3.3 Analyseurs de trames (sniffers)

Gérer, suivre, améliorer la qualité de service de son réseau, sont les casse-tête quotidiens des administrateurs. Pour assurer cette tâche, plates-formes d'administration et analyseurs de trames (sondes logicielles aussi appelées sniffer) sont à leur disposition.

Un analyseur réseau appelé également analyseur de trames ou en anglais sniffer, traduisez « renifleur ») est un dispositif permettant d'« écouter » le trafic d'un réseau, c'est-à-dire de capturer les informations qui y circulent.

En effet, dans un réseau non commuté, les données sont envoyées à toutes les machines du réseau. Toutefois, dans une utilisation normale les machines ignorent les paquets qui ne leur sont pas destinés. Ainsi, en utilisant l'interface réseau dans un mode spécifique (appelé généralement mode promiscuous) il est possible d'écouter tout le trafic passant par un adaptateur réseau (une carte réseau ethernet, une carte réseau sans fil, etc.).

#### Principe

Un sniffer est un formidable outil permettant d'étudier le trafic d'un réseau. Il sert généralement aux administrateurs pour diagnostiquer les problèmes sur leur réseau ainsi que pour connaître le trafic qui y circule. Ainsi les détecteurs d'intrusion (IDS, pour intrusion detection system) sont basés sur un sniffeur pour la capture des trames, et utilisent une base de données de règles (rules) pour détecter des trames suspectes.

### 4.3.4 Exemple d'analyseur de réseau

**Wireshark** a été spécifiquement conçu pour renifler et récupérer les paquets de données qui circulent au niveau d'un réseau. Le processus est effectué de manière totalement transparente et il peut s'exécuter hors ligne.

Wireshark est un analyseur de paquets libre et gratuit. Il est utilisé dans le dépannage et l'analyse de réseaux informatiques, le développement de protocoles, l'éducation et la rétro-ingénierie.

Wireshark utilise la bibliothèque logicielle Qt pour l'implémentation de son interface

utilisateur et pcap pour la capture des paquets ; il fonctionne sur de nombreux environnements compatibles UNIX comme GNU/Linux, FreeBSD, NetBSD, OpenBSD ou Mac OSX, mais également sur Microsoft Windows. Il existe aussi entre autres une version en ligne de commande nommé TShark. Ces programmes sont distribués gratuitement sous la licence GNU General Public License.

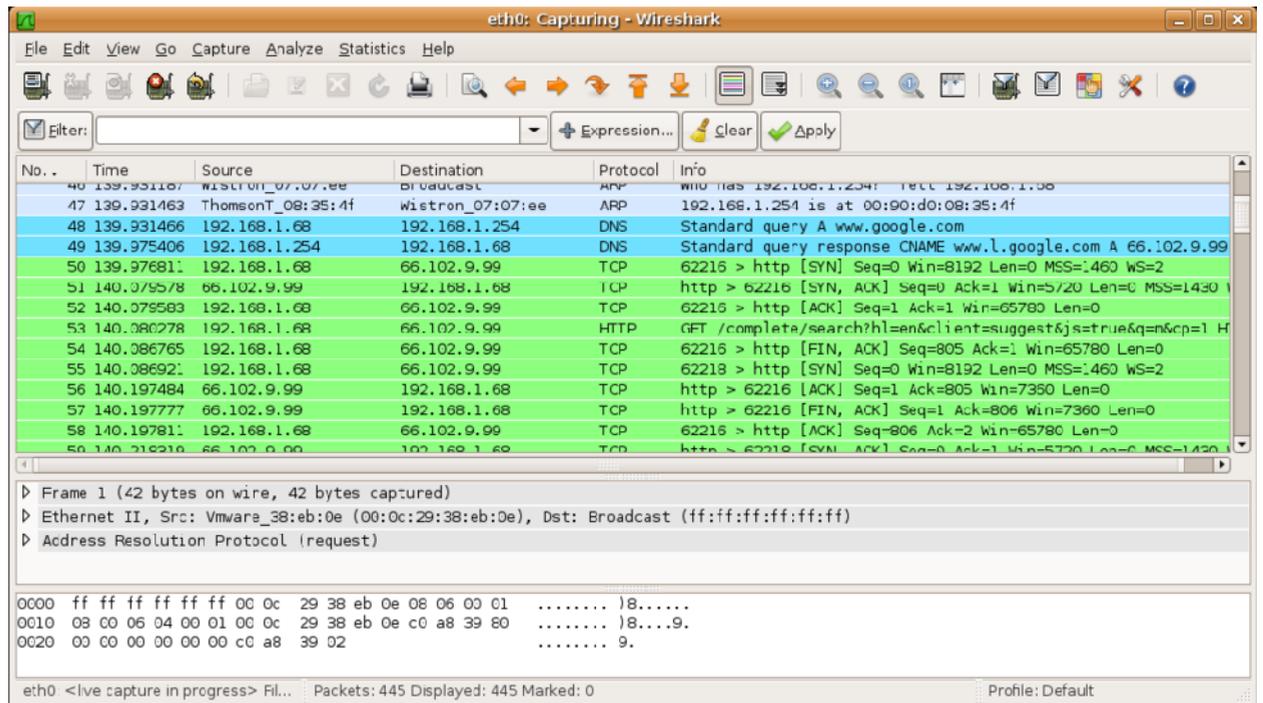


Figure 4.7 : Wireshark sur Ubuntu [15].

## Principe de fonctionnement

Wireshark est similaire à tcpdump, mais il implémente une interface graphique ainsi que plusieurs options de tri et filtrage des paquets. Il décode les paquets capturés et comprend les différentes structures (encapsulation) des protocoles de communication. Wireshark utilise pcap pour capturer les paquets, donc il ne supporte que les types de réseaux supporté par pcap.

Des données d’une capture précédente peuvent être lues depuis un fichier.

- \* Les données peuvent être capturées “from the wire” d’une connexion réseau.
- \* Les données peuvent être lues sur différents réseaux, comme Ethernet, IEEE 802.11

("Wi-Fi"), les réseaux FTTH et les réseaux mobiles utilisant les protocoles IP.

- \* Les données capturées peuvent être affichées via une interface graphique, ou via un terminal en ligne de commande avec l'outil TShark.
- \* Les fichiers capturés peuvent être édités ou convertis via la ligne de commande à l'aide de l'outil editcap.
- \* Des plug-ins peuvent être créés pour l'analyse de nouveaux protocoles<sup>5</sup>.
- \* Support de Lua pour le prototypage et le scriptage<sup>6</sup>.
- \* Les appels VoIP peuvent être capturés et les médias peuvent être lus si les paquets sont compatibles.
- \* Les données brutes d'un trafic USB peuvent être capturées<sup>7</sup>.
- \* Une connexion sans fil peut aussi être capturée si elle passe sur le réseau Ethernet surveillé.
- \* Plusieurs paramètres et filtres peuvent être activés pour faciliter le tri du trafic de sortie.
- \* Wireshark permet d'activer le Promiscuous mode (mode promiscuité) sur votre carte réseau, si celle-ci le permet. Ceci permet de voir les paquets de type unicast sur un réseau qui ne sont pas dirigées vers votre adresse MAC.

## 4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, il a été question de décrire les deux types de mesures. Nous avons énuméré les types d'appareils utilisés pour les mesures statiques et les mesures dynamiques. Le principe de fonctionnement ainsi que le domaine d'utilisation de chaque dispositif pour chacune de ces mesures a été discuté.

# Conclusion générale

L'objectif de ce support de cours était de donner les fondements de base des systèmes de mesures utilisés en télécommunications et de déduire les caractéristiques principales d'un tel système.

Nous avons donné dans premier chapitre, des généralités sur la mesure, les différents types de mesure. En outre, nous avons présenté les caractéristiques métrologiques d'une chaîne de mesure et nous avons passé en revue sur la notion du capteur.

Le deuxième chapitre a été axé sur la description du capteur. Ce dernier est le résultat de l'exploitation ingénieuse d'une loi physique et donc les principes physiques qui sont à leur base ont été présentés. Nous avons ensuite défini les capteurs suivant leur mode de fonctionnement suivie d'une classification de leurs conditionneurs associés.

Dans le troisième chapitre, on a présenté quelques exemples de capteurs à savoir les capteurs de force, les microphones et les ccd.

Enfin les mesures statiques et dynamiques en télécommunication ont été discuté dans le quatrième chapitre.

# Bibliographie

- [1] Boisseau J.F., Méthodologie de la mesure, Techniques de l'ingénieur, Mesures et contrôle, 1989, R140, page 120.
- [2] Selianov M.N., Definitions of Metrologie, Quantity and Measurement, Traduit de Izmeritel'naya Technica, N°2, Février 1992, pages 11 à 15.
- [3] Prieur G., Nadi M., La mesure et l'instrumentation, Etat de l'art et perspectives, Editions MASSON, 1995, pages 726.
- [4] Robert M., Marchandiaux M., Porte M., Les capteurs intelligents et méthodologie d'évaluation, Editions HERMES, 1993.
- [5] Georges Asch et Collaborateurs, «Les capteurs en instrumentation industrielle», 5ème édition Dunod, 1999.
- [6] Kahlouch Ahmed, cours pour le module : Capteurs et Métrologie, Université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2015/2016
- [7] Dominique Placko, « Mesure et instrumentation. De la physique du capteur au signal électrique », Volume 1, Hermès-Lavoisier, 1970.
- [8] Dorian RACINE, Les microphones numériques et la prise de son à l'image. Mémoire de Master Professionnel, mai 2016.
- [9] David Martins, Sécurité dans les réseaux de capteurs sans fil Stéganographie et réseaux de confiance, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2010
- [10] Georges Asch, E. Chambérod, Patrick Renard, Gunther, «Acquisition de données : Du capteur à l'ordinateur », 2ième édition, Dunod, 2003.

- [11] K. Hoffmann, “An Introduction to Measurements using Strain Gages“, 1987.
- [12] <https://fr.wikipedia.org/wiki/réfectométrie>.
- [13] <https://fr.audiofanzine.com/testeur-cables/>.
- [14] Sur [www.techniques-ingenieur.fr/](http://www.techniques-ingenieur.fr/) Les Sélections Techniques de l'Ingénieur/mesures des télécommunications.
- [15] <https://inetdoc.developpez.com/tutoriels/analyse-reseau-wireshark/>.