

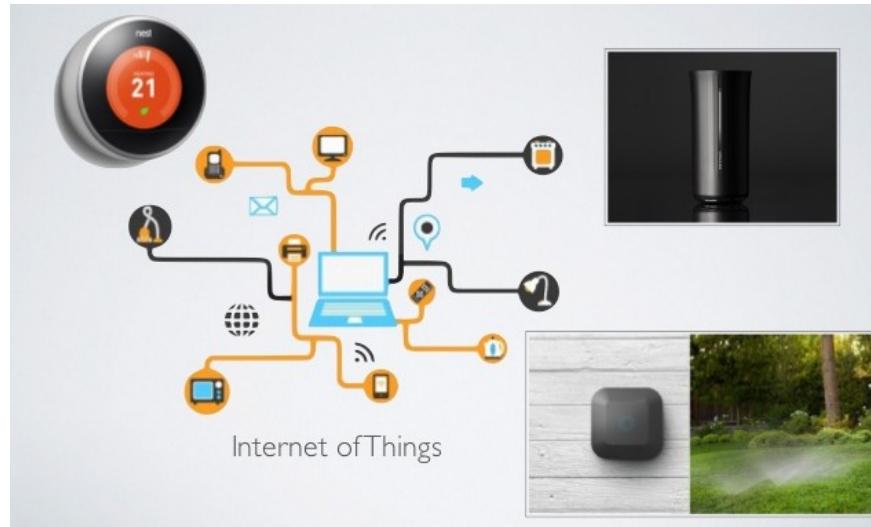


Université
de Toulouse



Université
de Toulouse

INTRODUCTION A LA CHAINE DE MESURE ET « SMART DEVICES »



Jérémie GRISOLIA

Département de Génie Physique – INSA TOULOUSE

05.61.55.96.58 – Bureau 138 (1er étage)

jeremie.grisolia@insa-toulouse.fr

<http://moodle.insa-toulouse.fr/course/view.php?id=494>



Laboratoire
de Physique & Chimie
des Nano-Objets



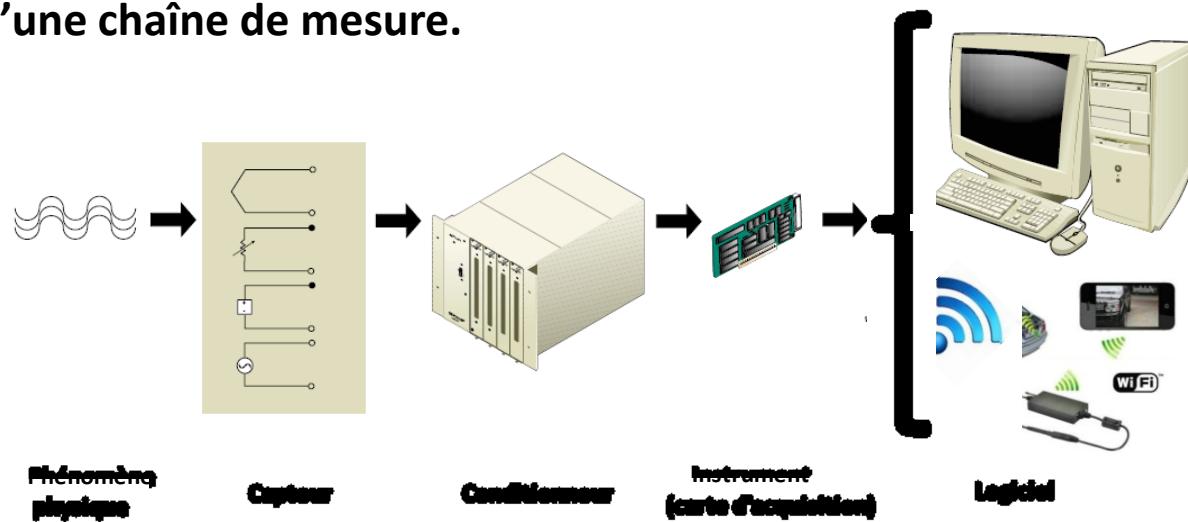
INTRODUCTION: OBJECTIFS

OBJECTIF: vous donner des éléments permettant

- la conception et l'utilisation d'une chaîne de mesure et
- le développement d'un « smart device ».

Ce cours présente notamment :

- les différentes familles de capteurs (actifs, passifs, intégrés,...),
- les principes physiques de fonctionnement de certains capteurs
- les différentes grandeurs physiques à mesurer (lumière, température, position...)
- leurs caractéristiques métrologiques : sensibilité, linéarité, fidélité, précision...,
- les procédures de mises en œuvre,
- les montages électriques dits « conditionneurs » (pont, amplificateurs...) qui leur sont associés pour optimiser leurs performances.
- la conception d'une chaîne de mesure.



PLAN DU COURS

1 - PRINCIPES FONDAMENTAUX

2 - CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES

3 - PRINCIPES DE DETECTION UTILISES DANS LES CAPTEURS

4 - CARACTERISTIQUES GENERALES DES CONDITIONNEURS DE CAPTEURS

5 - CONDITIONNEURS DU SIGNAL

6 - SYSTEMES AUTOMATISES

7 - APPLICATIONS

INTRODUCTION: OBJECTIFS

OBJECTIF PRATIQUE DU MODULE:

Développer une plateforme communicante incluant un capteur de gaz à base de nanoparticules:

- un capteur de gaz à nanoparticules et un étage d'électronique analogique permettant son interfaçage
- avec une base Arduino (μ contrôleur ATMEGA + USB)
- un étage de communication BlueTooth vers Android

1 – Vous réaliserez le capteur de gaz en salle blanche AIME pendant votre stage en semaine 43

2 – Vous concevrez avec EAGLE votre shield d'interfaçage du capteur pour Arduino
qui devra inclure à minima:

- le capteur de gaz
- l'étage d'amplification

- En option:

- inclure un écran OLED de visualisation des données
- un encodeur rotatoire pour la gestion du menu affiché sur l'écran

3 – Vous ferez vérifier votre schématique et circuit EAGLE

à Arnauld Biganzoli, Jean-Louis Noullet et Cathy Crouzet

4 – Une fois vérifié, vous réaliserez ce shield en prenant contact avec Cathy Crouzet

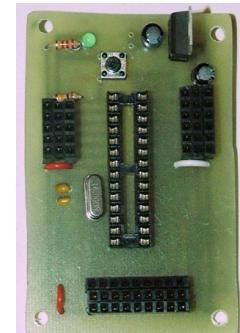
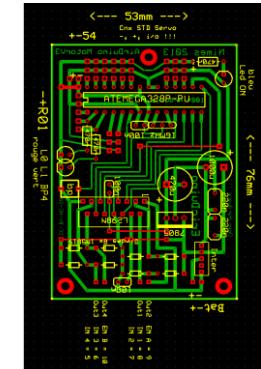
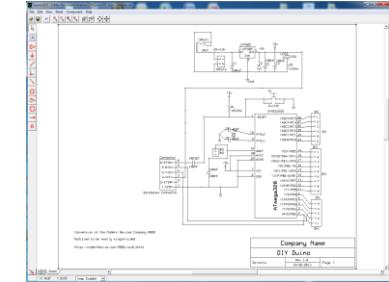
5 – Vous testerez et calibrerez le capteur lors des TP dédiés

- I-V de la zone sensible, de la couche d'aluminium, de la couche de polySilicium
- Pour plusieurs valeurs de température

6 – Vous réaliserez une DATASHEET du capteur inclus dans la plateforme

7 – Vous réaliserez le programme Arduino qui interfacera tous ces éléments

Il devra inclure une partie d'auto-calibration du capteur, une correction liée à la température...



REALISATION DU SHIELD DANS LA PRATIQUE :

- 1 - Vous constituerez des binômes
- 2 - Chaque binôme verra son module évalué
- 3 - Une revue finale sera effectuée et permettra de voter pour les meilleures réalisations
- 4 - Nous fusionnerons ensuite les groupes de binômes pour ne conserver que les 6 meilleurs shields
- 5 - Nous réaliserons ensuite ces 6 meilleurs shields

1. PRINCIPES FONDAMENTAUX

1.1 Définitions et caractéristiques générales:

- La grandeur physique objet de la mesure (déplacement, température, pression, etc.) = **mesurande**, représentée par m ;
- Les opérations expérimentales qui permettent la connaissance de la valeur numérique du mesurande = **mesurage**.
- Le résultat du **mesurage** = **mesure**

Remarque : 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** = dispositif qui soumis à l'action d'un mesurande non électrique présente une caractéristique de nature électrique (charge, tension, courant ou impédance) désignée par s
- et qui est fonction du mesurande:

$$s = F(m)$$

{ s est la grandeur de sortie ou réponse du capteur,
m est la grandeur d'entrée ou excitation.

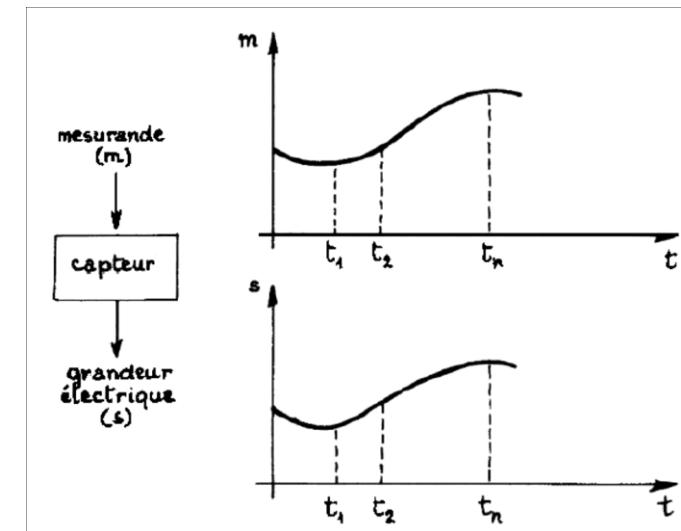


Figure 1.1 - Exemple d'évolution d'un mesurande m et de la réponse correspondante du capteur.

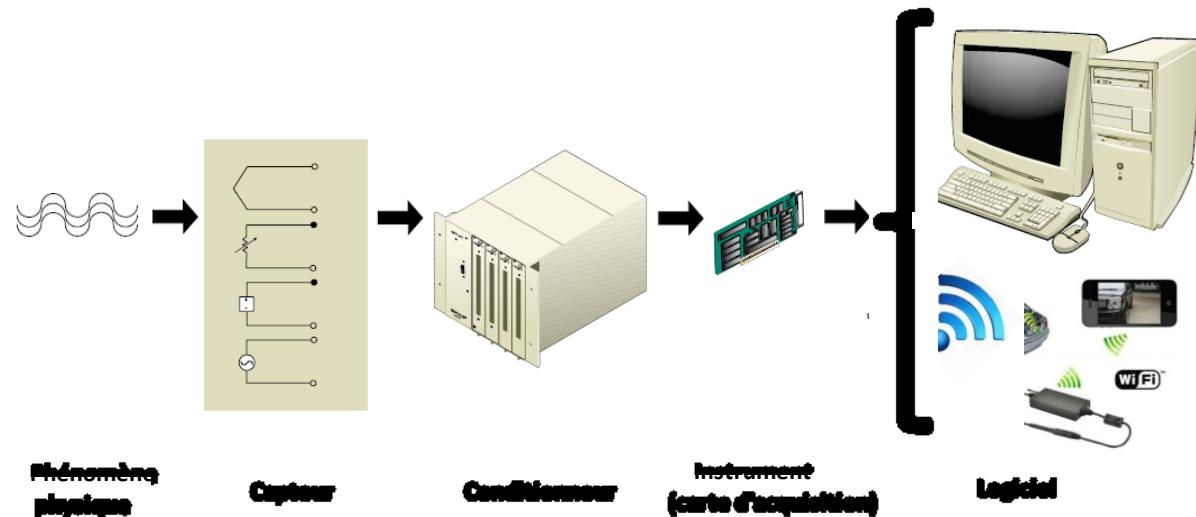
Pour des raisons de facilité d'exploitation, on s'efforce de réaliser le capteur, ou du moins de l'utiliser, en sorte qu'il établisse une relation linéaire entre les variations Δs de la grandeur de sortie et celles Δm de la grandeur d'entrée: $\Delta s = S \cdot \Delta m$, S étant la sensibilité du capteur.

1. PRINCIPES FONDAMENTAUX

1.2 Chaîne de mesure :

& Chaîne de mesure:

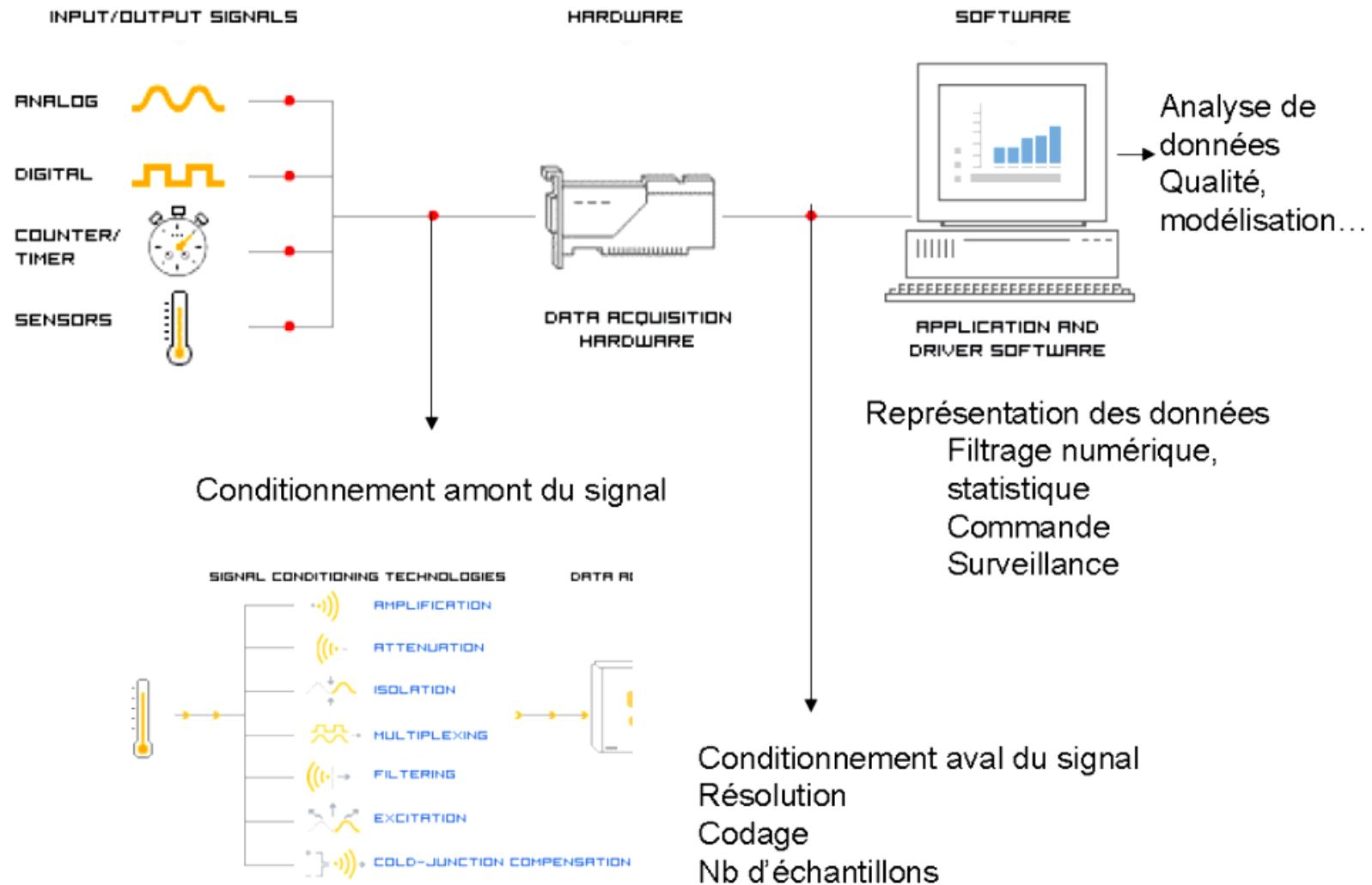
Suite d'éléments transducteurs et d'organes de liaison d'un instrument de mesure allant du capteur, premier élément de la chaîne, au dispositif indicateur, de stockage ou de traitement qui en est le dernier élément.



Objectif : rendre possible, dans les meilleures conditions, la détermination précise de la valeur de la grandeur physique (mesurande).

- * À 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 le signal électrique, support de l'information liée au mesurande.
- * À 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 ;
 - enregistrement analogique graphique;
 - affichage ou impression d'un nombre.
 - ...

1. PRINCIPES FONDAMENTAUX



1. PRINCIPES FONDAMENTAUX

1.2 Chaîne de mesure :

& Capteur : élément d'un appareil mesurleur servant à la prise d'informations relatives à la grandeur à mesurer. Selon cette définition, le capteur constitue nécessairement le premier élément transducteur.

& Transducteur : élément qui sert à transformer, suivant une loi déterminée, la grandeur mesurée en une autre grandeur, par exemple :

- un signal lumineux en signal nerveux ([vision animale](#)) ou
- signal électrique ([photorécepteur](#)).

Le capteur se distingue de l'[instrument de mesure](#) par le fait qu'il ne s'agit que d'une simple interface entre un processus physique et une information manipulable.

Rem: on fait souvent (à tort) la confusion entre capteur et transducteur: un transducteur peut être un capteur ou un actionneur.

& Transmetteur : élément influencé par une grandeur physique mesurée, qui transmet un signal. Ce peut être un assemblage d'éléments constitué d'un capteur, d'un amplificateur ou d'un convertisseur qui modifie le signal suivant spécification.

& Boucle de régulation. Ensemble des éléments utilisés pour l'asservissement à une grandeur de consigne. Une boucle de régulation va du (ou des) capteur(s) à l'actionneur comme organe de sortie.

Les éléments intermédiaires traitent généralement le signal par voie électronique ou pneumatique. Une boucle de régulation peut utiliser des techniques analogiques ou numériques.

1. PRINCIPES FONDAMENTAUX

1.2 Chaîne de mesure :



C'est l'étalonnage de la chaîne de mesure dans son ensemble qui permet d'attribuer à chaque indication en sortie la valeur correspondante du mesurande agissant à l'entrée.

Chaîne de mesure la plus simple: capteur + son conditionneur éventuel + un appareil de lecture :

- thermocouple et voltmètre ;
- jauge de contrainte dans un pont de Wheatstone avec appareil de lecture: galvanomètre ou voltmètre.

CEPENDANT les conditions pratiques de mesure imposées par :

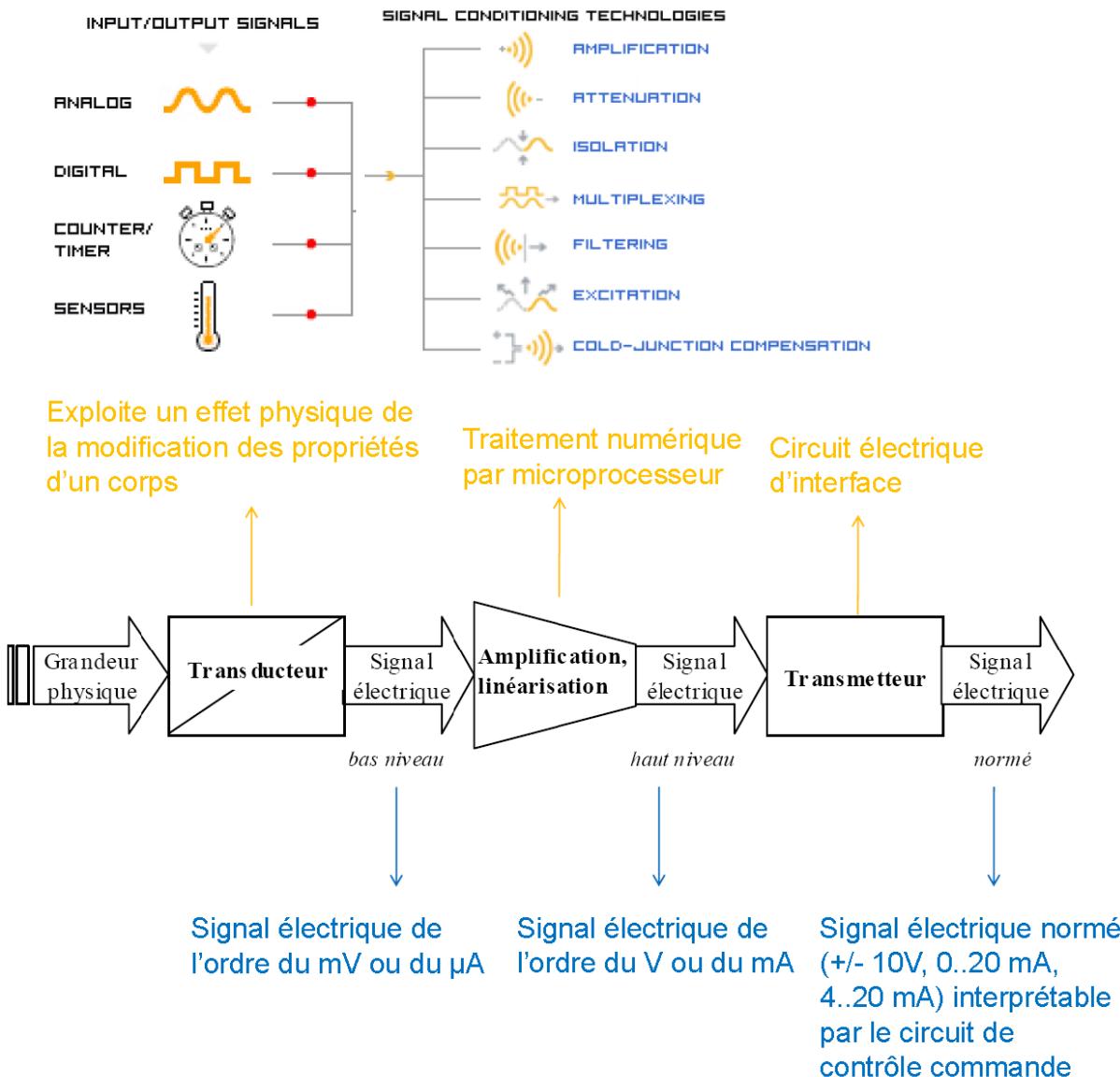
- l'environnement d'une part et par
- les performances exigées pour une exploitation satisfaisante du signal d'autre part

amènent à introduire dans la chaîne des blocs fonctionnels destinés à optimiser l'acquisition et le traitement du signal:

- circuit de linéarisation du signal délivré par le capteur ;
- amplificateur d'instrumentation ou d'isolement destiné à réduire les tensions parasites de mode commun ;
- multiplexeur, amplificateur d'instrumentation programmable, échantillonneur bloqueur, convertisseur analogique-numérique lorsque l'information doit être traitée par calculateur;
- convertisseur tension-courant, tension-fréquence lorsque le signal doit être transmis à distance par câble;
- modulateur de fréquence dans le cas de télémesure par voie hertzienne.
- ...

1. PRINCIPES FONDAMENTAUX

1.2 Chaîne de mesure : Schéma de principe d'un capteur industriel :



1. PRINCIPES FONDAMENTAUX

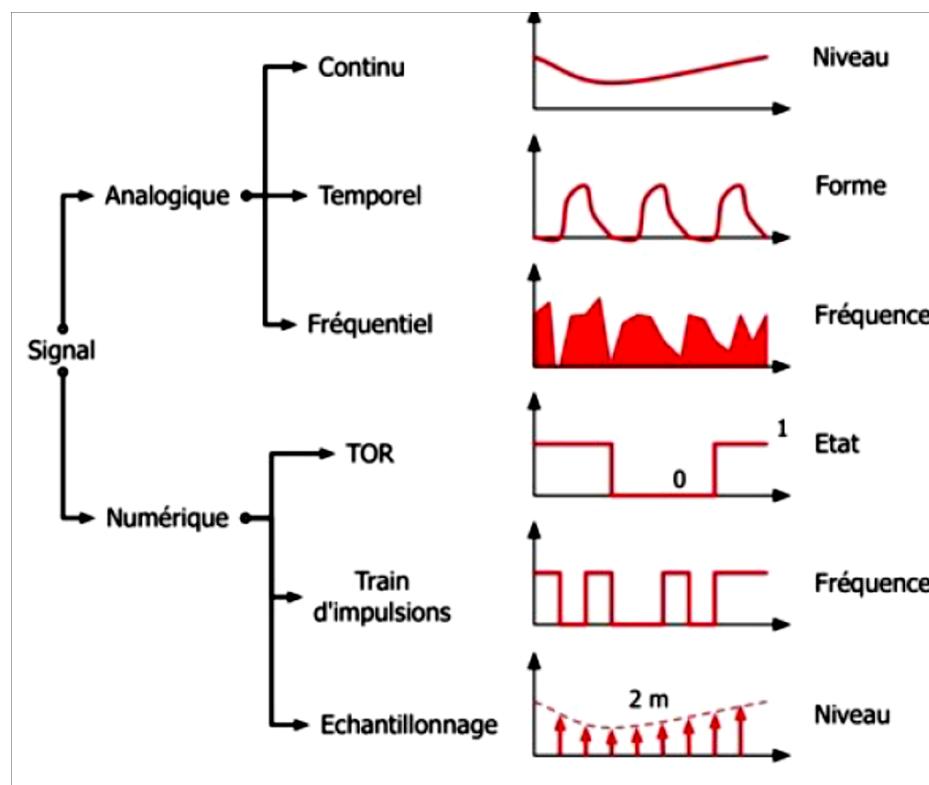
1.2 : Définition d'un capteur :

Un capteur est un dispositif transformant :

- l'état d'une grandeur physique (mesurande)
- en une grandeur utilisable de nature analogique ou numérique (telle qu'une tension électrique, une hauteur de mercure, une intensité ou la déviation d'une aiguille, ...).

1.3 Nature de l'information transmise :

Les signaux transmis peuvent être de nature analogique ou numérique :



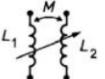
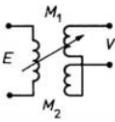
1. PRINCIPES FONDAMENTAUX

1.3 Type de capteur: & Capteurs passifs, capteurs actifs, conditionneurs.

1.3.1 Capteurs passifs:

Capteurs dont le signal électrique délivré, sensible au mesurande, est une variation d'impédance, car ils nécessitent une source d'énergie électrique pour que l'on puisse lire le signal de mesure.

Le circuit dans lequel ils sont incorporés s'appelle le « conditionneur ».

Tableau 2 – Grandeur de traduction électrique	
Grandeur de traduction	Transformations possibles
	Résistance R : $R = f(p, \ell, s)$ p résistivité, ℓ longueur, s section
	Capacité C : $C = f(S, e, \epsilon_0)$ S surface des armatures, e distance entre armatures, ϵ_0 permittivité
	Inductance L : $L = f(\ell, S, \mu, n)$ ℓ longueur, S surface d'une spire, n nombre de spires, μ perméabilité
	Inductance mutuelle : $M = f(L_1, L_2)$
	Tension V : $V = f(\omega, M_1, M_2)$ (M_1, M_2 étant généralement fonction d'un paramètre de circuit magnétique) ω pulsation, M_1, M_2 inductances mutuelles

Mesurande	Caractéristique électrique sensible	Types de matériaux utilisés
Température	Résistivité	Métaux : platine, nickel, cuivre. Semi-conducteurs.
Très basse température	Constante diélectrique	Verres.
Flux de rayonnement optique	Résistivité	Semi-conducteurs.
Déformation	Résistivité	Alliages de nickel, silicium dopé.
	Perméabilité magnétique	Alliages ferromagnétiques.
Position (aimant)	Résistivité	Matériaux magnéto-résistants : bismuth, antimonure d'indium.
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium.
	Constante diélectrique	Alumine ; polymères.
Niveau	Constante diélectrique	Liquides isolants.

1. PRINCIPES FONDAMENTAUX

1.3 Type de capteur: & Capteurs passifs, capteurs actifs, conditionneurs.

1.3.2 Capteurs actifs:

Les capteurs qui fonctionnent en générateurs en convertissant la forme d'énergie propre au mesurande en énergie électrique sont dits « actifs ».

Tableau 1 – Exemples de capteurs sans apport d'énergie extérieure			
Grandeur mesurée	Élément sensible	Relation	Symbole
Force F	Cristal piézo-électrique	$Q = KF$	
Température θ	Couple thermo-électrique	$V = f(\theta)$	
Flux d'énergie rayonnée R	Cellule photo-voltaïque	$V = f(R)$	
Vitesse dx/dt	Générateur à induction	$E = f(d\Phi/dt) = K(dx/dt)$	

Q charge électrique, V différence de potentiel, E force électromotrice, Φ flux magnétique, K coefficient de proportionnalité.

Il existe 3 types de capteurs actifs :

- capteur générateur de f.e.m
- capteur générateur de courant
 - transformation du courant en tension
- capteur générateur de charge
 - transformation de la charge en tension

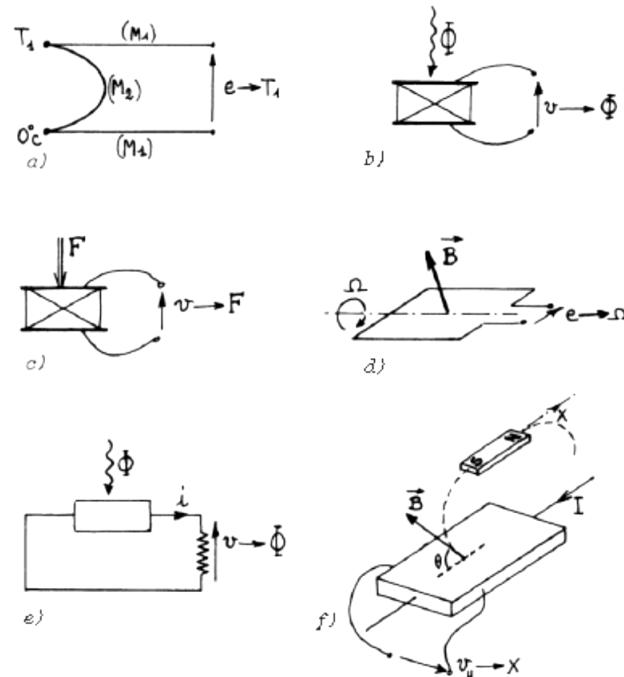


Figure 1.3 – Exemples d'application d'effets physiques à la réalisation de capteurs actifs :
(a) thermoelectricité, (b) pyroélectricité, (c) piézoélectricité, (d) induction électromagnétique, (e) photoélectricité, (f) effet Hall.

1. PRINCIPES FONDAMENTAUX

Exemples :

- Effet thermoélectrique :

Un circuit formé de deux conducteurs de nature chimique différente dont les jonctions sont à des températures T_1 et T_2 est le siège d'une force électromotrice $e(T_1, T_2)$.

Application : détermination à partir de la mesure de e d'une température inconnue T_1 lorsque T_2 (0°C par exemple) est connue.

- Effet photovoltaïque :

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

Tableau 1.1 – Capteurs actifs : principes physiques de base.

Mesurande	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité	Tension
	Pyroélectricité	Charge
Flux de rayonnement optique	Photoémission	Courant
	Effet photovoltaïque	Tension
Force	Effet photoélectromagnétique	Tension
Pression	Piezoelectricité	Charge
Accélération		
Vitesse	Induction électromagnétique	Tension
Position (aimant)	Effet Hall	Tension

1. PRINCIPES FONDAMENTAUX

1.3.3 Distinction capteur passif/actif:



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.

- * 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.

1. PRINCIPES FONDAMENTAUX

1.4 Transformation de la grandeur physique

& Transformations directes. Les variables physiques sont en général traduisibles directement en variables électriques: **par exemple, le couple thermoélectrique ou certaines sondes de mesure de pH.**

& Transformations indirectes : Corps d'épreuve. Capteurs composites :

Les variables mécaniques et certaines variables physiques nécessitent une transformation préalable permettant la traduction en grandeur électrique.

Le capteur comporte alors deux éléments sensibles.

Par exemple, dans un capteur de force à jauge de contrainte, nous **trouvons le corps d'épreuve, ou élément primaire**, qui relie le phénomène à un deuxième élément sensible, le pont de jauge de contrainte, qui assure la transformation en grandeur électrique. Ces éléments secondaires peuvent être actifs ou passifs.

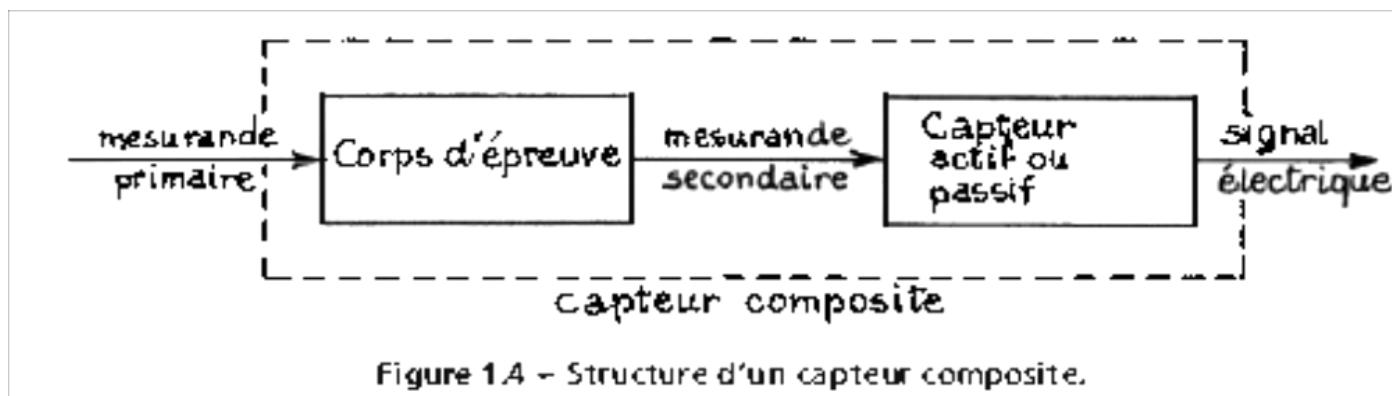


Figure 1.4 – Structure d'un capteur composite.

L'ENSEMBLE FORMÉ PAR LE CORPS D'ÉPREUVE ET UN CAPTEUR ACTIF OU PASSIF CONSTITUE UN « CAPTEUR COMPOSITE ».

1. PRINCIPES FONDAMENTAUX

Exemple:

Une traction F exercée sur une barre (longueur L , section A , module d'Young E) entraîne une déformation $\Delta L/L$ qui est mesurable par la variation $\Delta R/R$ de la résistance d'une jauge collée sur la barre, connaissant d'une part:

- l'équation du corps d'épreuve qui lie la traction, mesurande primaire, à la déformation, mesurande secondaire:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \Rightarrow \Delta L/L = (1/E) * (F/A) \quad (1)$$

- et d'autre part l'équation du capteur liant sa grandeur d'entrée, ici la déformation, à sa réponse électrique $\Delta R/R$ soit :

$$\Delta R/R = g \cdot \varepsilon \Rightarrow \Delta R/R = g * \Delta L/L \quad (2) \quad \text{où } g \text{ est le facteur de jauge,}$$

(1) et (2)  relation entre traction et variation de résistance: $\Delta R/R = (g/E) * (F/A)$

Autres exemples:

- une pression est mesurable au moyen d'une membrane, corps d'épreuve, dont la déformation est traduite électriquement par une jauge de contrainte,
- la membrane d'un microphone électrodynamique est un corps d'épreuve car c'est de son mouvement, conséquence de la pression acoustique à laquelle elle est soumise, que résulte le signal électrique,
- dans un accéléromètre, la masse sismique est le corps d'épreuve qui convertit l'accélération, mesurande primaire, en une force d'inertie, mesurande secondaire auquel est sensible un capteur piézoélectrique.

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 ».

1. PRINCIPES FONDAMENTAUX

1.5 Grandeur d'influence:

Grandeur qui, appliquée de l'extérieur, est susceptible de modifier les caractéristiques métrologiques du capteur.

Cette grandeur peut être de nature mécanique, thermique, électrique, chimique, etc.

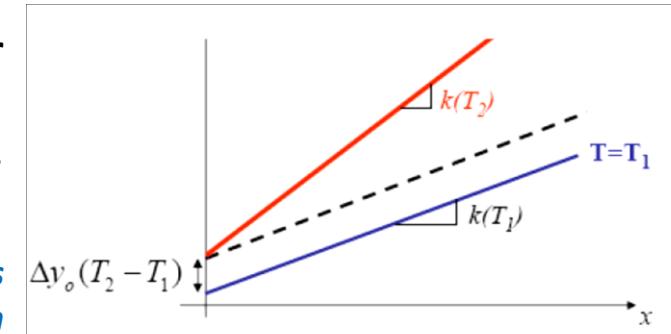
En effet, un capteur, est soumis non seulement au mesurande mais à d'autres grandeurs physiques dont les variations sont susceptibles d'entraîner un changement de la grandeur électrique de sortie qu'il n'est pas possible de distinguer de l'action du mesurande.

Principales grandeurs d'influence :

- la température modifie les caractéristiques électriques, mécaniques 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 qui fait varier certaines propriétés électriques: constante diélectrique, résistivité et qui risque de dégrader l'isolation électrique entre composants du capteur ou entre capteur et environnement
- les champs magnétiques variables ou statiques ; création de f.e.m. d'induction superposée au signal utile, les seconds modifient par exemple la résistivité lorsque le capteur utilise un matériau magnéto-résistif;
- la tension d'alimentation - amplitude et fréquence –

Désignons par $g_1, g_2 \dots$ les grandeurs d'influence,
la relation entre grandeur électrique de sortie s et mesurande m , qui dans le cas idéal serait :

$$s = F(m) \quad \rightarrow \quad s = F(m, g_1, g_2 \dots)$$



- La température modifie la sensibilité
- la température introduit un décalage de zéro

1. PRINCIPES FONDAMENTAUX

SOLUTIONS:

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 hygroscopie contrôlée, sources d'alimentation régulées** ;
- soit enfin d'utiliser des montages qui permettent de compenser l'influence des grandeurs parasites :
=> **pont de Wheatstone avec un capteur identique placé dans une branche adjacente au capteur de mesure (§ 3.3. 1 .3).**

& Conditions de référence:

Série de valeurs assorties de tolérances, ou de domaines réduits fixés pour les grandeurs d'influence, qui sont spécifiées pour effectuer les essais comparatifs.

1. PRINCIPES FONDAMENTAUX

1.6 Capteurs intégrés :

Un capteur intégré est un composant réalisé par les techniques de la microélectronique et qui regroupe sur un substrat de silicium commun:

- le capteur proprement dit,
- le corps d'épreuve éventuel,
- des circuits électroniques de conditionnement du signal

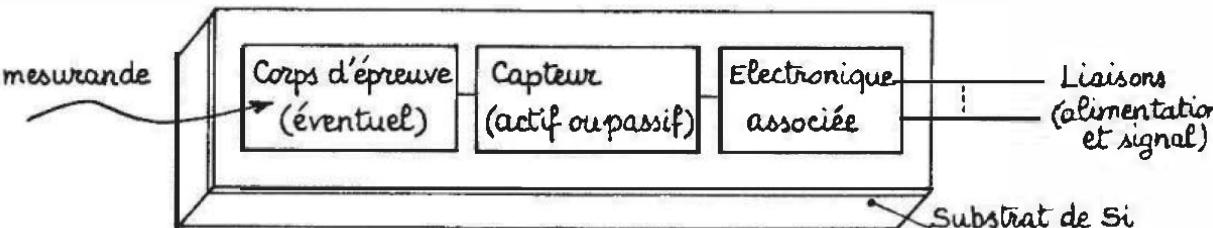
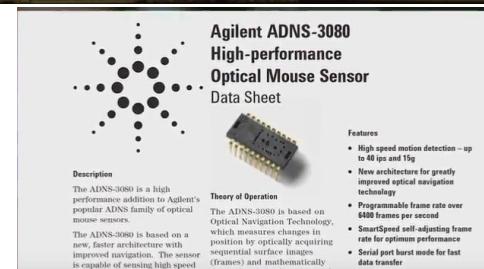
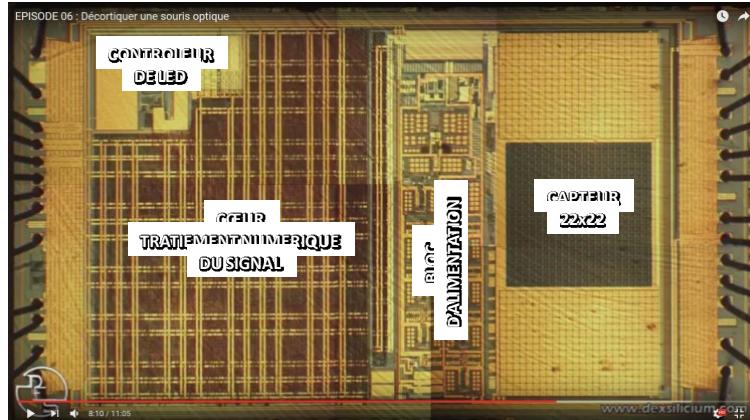


Figure - Structure générale d'un capteur intégré.

L'intégration apporte de multiples avantages :

- ✓ miniaturisation,
- ✓ diminution des coûts par la fabrication en grande série,
- ✓ 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.

1. PRINCIPES FONDAMENTAUX

1.7 Capteurs intelligents (« smart devices »):

1.7.1 Principe de base:

C'est un système qui, *dans sa version basique imaginée au début des années 80*, dispose:
d'une certaine capacité de calcul assurée par un circuit programmable du type microcontrôleur ou microprocesseur
lui permettant de prendre en compte certaines dérives et grandeurs d'influence et donc de générer un signal corrigé
que le système d'acquisition pourra alors acquérir tel quel via une interface de communication elle-même intégrée dans le capteur intelligent.

On désigne alors par capteur intelligent **un système composé de deux parties**:

- une chaîne de mesure pilotée par microprocesseur ;
 - un ou plusieurs capteurs
 - les conditionneurs associés
 - organe de calcul interne
- une interface de communication bidirectionnelle.

=> Différence Capteur intelligent / Capteur classique:

- Capacité de calcul interne
- Interface de communication bidirectionnelle

1. PRINCIPES FONDAMENTAUX

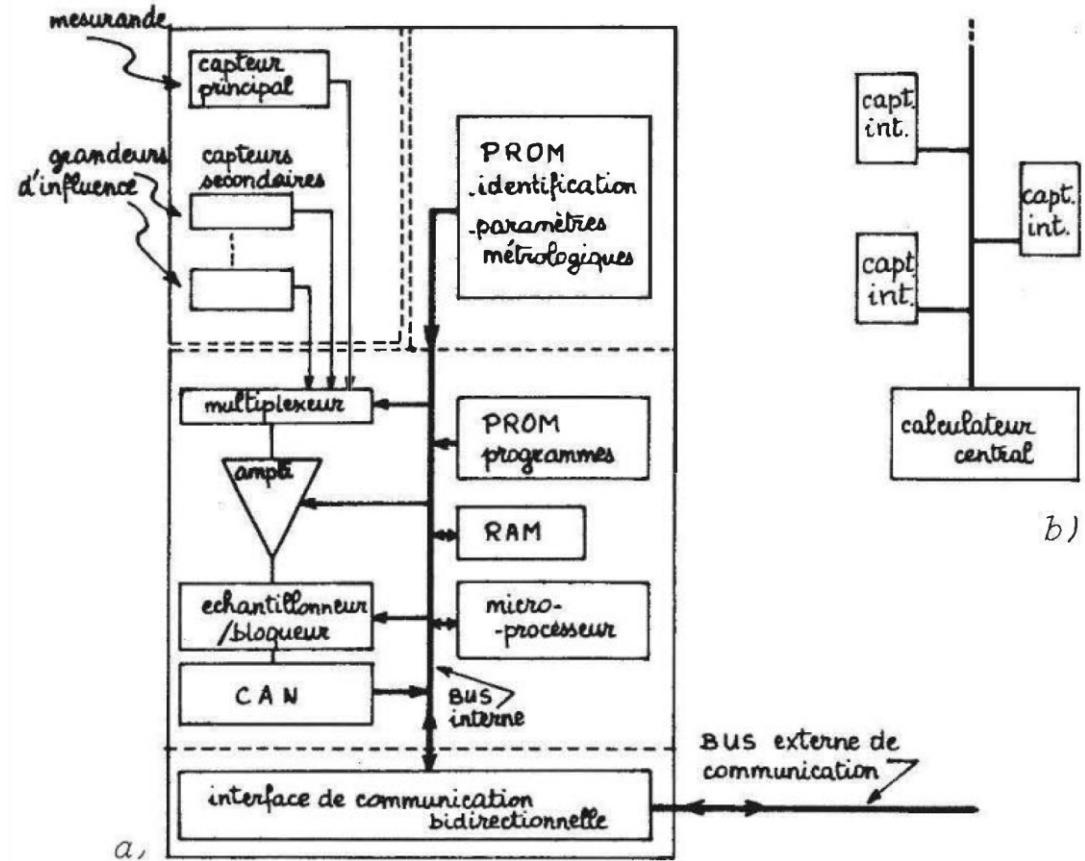


Figure : Capteur intelligent :

- a) structure générale;
- b) liaison par bus d'un ensemble de capteurs intelligents à un calculateur central.

La chaîne de mesure comporte :

- le capteur principal spécifique du mesurande étudié, et identifiable par un code stocké en PROM (Programmable Read Only Memory : mémoire programmable à lecture seule) ;
- les capteurs secondaires propres aux grandeurs d'influence susceptibles d'affecter la réponse du capteur principal ;
- les dispositifs classiques permettant l'obtention sous forme numérique de la grandeur de sortie de chaque capteur : conditionneur, multiplexeur, amplificateur, échantillonneur-bloqueur, convertisseur analogique-numérique ;
- un microprocesseur affecté aux tâches suivantes : gestion de l'acquisition, correction de l'effet des grandeurs d'influence au moyen des paramètres stockés en PROM et des données fournies par les capteurs secondaires, linéarisation, diagnostic des capteurs.
- L'interface de communication bidirectionnelle assure la liaison du capteur à un calculateur central via un bus partagé entre plusieurs capteurs intelligents

1. PRINCIPES FONDAMENTAUX

1.7.2 Fonctionnalités d'un capteur intelligent :

Capteur intelligent = capteur fournissant une mesure + d'autres services :

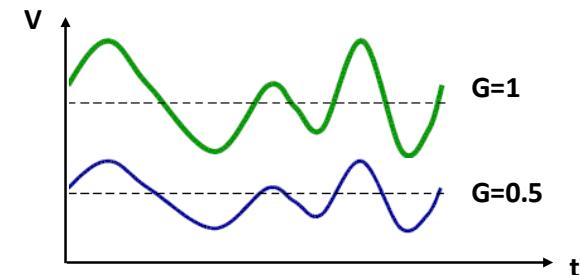
• 1.7.2.1 Fonctionnalités métrologiques :

1 - Auto-adaptabilité:

Capacité du capteur intelligent à s'adapter au signal mesuré.

Exemples :

- Amplificateur à gain variable
- Filtre à fréquence de coupure variable



2- Remplacement des données manquantes :

Défaillance ponctuelle du capteur => données non disponible à un temps t

Technique permettant d'estimer les données manquantes à partir des données disponibles

3- Précision et validation des mesures :

Précision => prise en compte et compensation des grandeurs d'influence (température, pression...)

Validation des mesures => évaluation de la qualité de la mesure, détection de mesures aberrantes

4 - Traitement du signal

Mise en place à proximité de la source de données d'un système de traitement de l'information

Filtrage des résultats pour n'obtenir que l'information utile

1. PRINCIPES FONDAMENTAUX

• 1.7.2.2 Fonctionnalités de maintenance

1 - Configuration à distance:

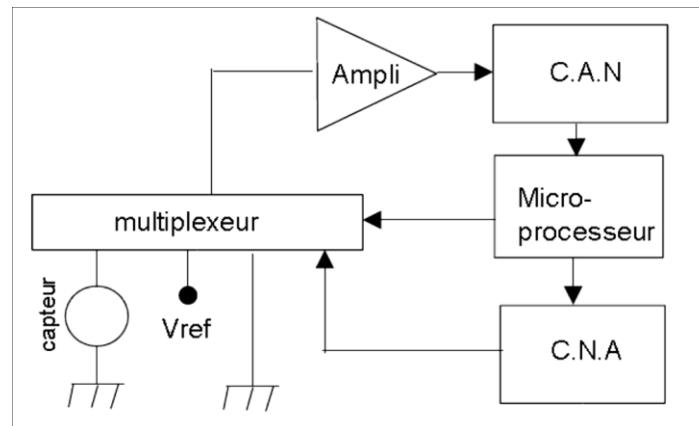
Communication bidirectionnelle + traitement numérique des données => flexibilité instrumentale

Exemples : Transmission d'un fichier d'initialisation ou d'un programme de traitement approprié

2 - Exploitation, détection de défaut, recherche de diagnostic:

- Après configuration, le système est autonome.
- Surveillance de processus : détection d'anomalie => déclenchement d'une alarme
- Détection de défaut, auto-diagnostic :

Exemple de montage pour auto-diagnostic:



1 - Mise à la masse de l'entrée => mesure d'une tension de décalage

2 - Entrée mise à une tension de référence => mesure du gain

3 - Contrôle de l'entrée via un CNA => validation du bon fonctionnement du CAN et CNA.

1. PRINCIPES FONDAMENTAUX

• 1.7.3 Structure de software:

Langages : dans la plupart des cas, on utilise le langage machine propre au micro-processeur (Texas, Motorola...), sinon on utilise le C et C++.

Avantages du langage machine : optimisation en vitesse et en mémoire.

Avantages du C : Langage généraliste, code portable.

Les messages porteurs du code du capteur concerné transitent par l'interface :

- soit dans le sens calculateur vers capteur : configuration, auto-étalonnage ...
- soit dans le sens capteur vers calculateur : résultats de mesure, état de la chaîne (étendue de mesure, dépassements de gamme du mesurande ou d'une grandeur d'influence ...).

• 1.7.4 Capteurs intelligents et réseaux:

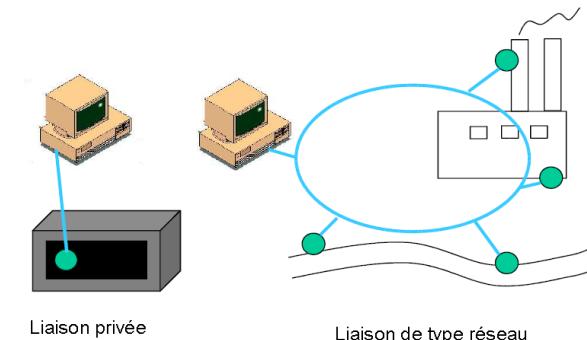
Le capteur intelligent est un dispositif communiquant.

Pourquoi est-ce important?

- conversation avec l'unité de calcul central et/ou l'organe de supervision.

- Plusieurs fonctionnalités sont clients du service de communication:

- la transmission de donnée (transfert des mesures, commandes, communication des résultats de traitement du signal)
- configuration et contrôle à distance (auto-diagnostic, transfert de fichier de configuration)



1. PRINCIPES FONDAMENTAUX

• 1.7.5 Exemples de capteurs intelligents :

Exemple 1 : l'industrie automobile est fortement consommatrice de capteurs intelligents, et truffe les voitures de ces systèmes.

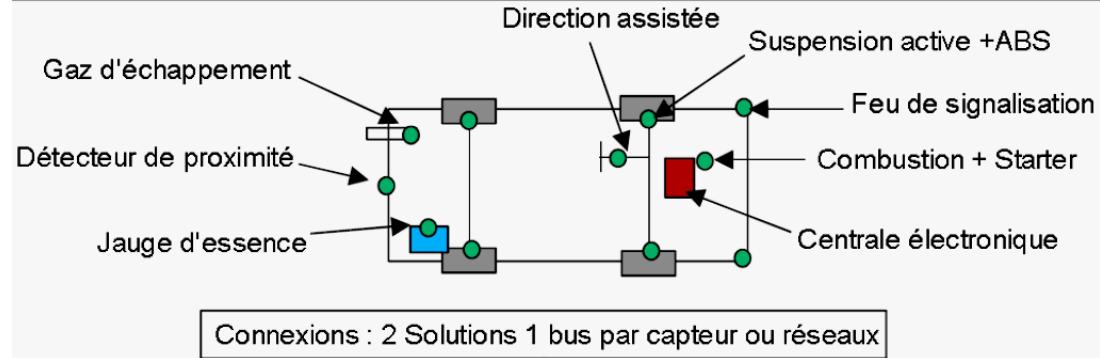
Système ABS :

Mesure de la vitesse de rotations des roues (codeur) et de la vitesse du véhicule (effet Doppler)

Si non concordance entre les vitesses, il y a dérapage

=> action en conséquence

=> communication entre capteurs et superviseur



Exemple 2 : Capteur de pression

Un capteur soumis à une dérive due à une grandeur d'influence, e.g. capteur de pression à jauge de contrainte, qui présente a priori les inconvénients suivants :

- non linéarité de la réponse en fonction de la pression
- dérive thermique du zéro (par un décalage de l'ensemble de la courbe sur la courbe d'étalonnage)
- dérive thermique de sensibilité (se traduit par une variation de la pente de la courbe d'étalonnage).

Si on connaît les équations et avec une précision suffisante la température du transducteur, une solution facile à mettre en œuvre est **une correction obtenue par un ajustement de gain et un contrôle d'offset**

=> **ajustement automatique et complètement transparente pour l'utilisateur qui ne voit qu'un signal analogique corrigé.**

1. PRINCIPES FONDAMENTAUX

Le capteur intelligent offre donc de nombreux avantages spécifiques et leur développement et utilisation en plein essor :

- développements d'applications
- miniaturisation et augmentation de la puissance des composants électroniques:
(déportation du module de traitement du signal)
- Communication haut ou bas débit

=> **Il est maintenant primordial d'intégrer ces capteurs intelligents dans les systèmes d'information**

2. CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES

• 2.1 Etalonnage du capteur :

& La courbe d'etalonnage: exprime la correspondance entre les valeurs de la grandeur mesurée et les valeurs indiquées par le capteur. Elle concerne un capteur individuellement désigné.

L'etalonnage du capteur comprend l'ensemble des opérations qui permettent d'expliciter, sous forme graphique ou algébrique:

la relation entre les valeurs du mesurande m et celles de la grandeur électrique de sortie s

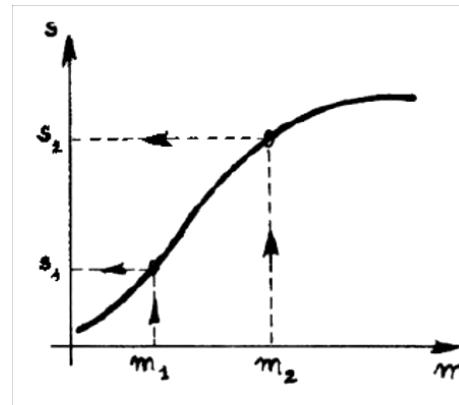
et ceci, compte tenu de tous les paramètres additionnels susceptibles de modifier la réponse du capteur.

Courbe d'etalonnage d'un capteur:

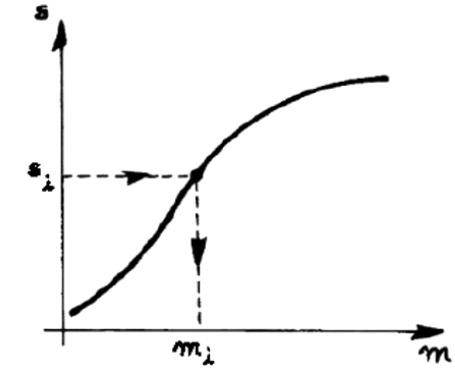
Pour tout capteur la relation $s = F(m)$ sous sa forme numériquement exploitable est explicitée par étalonnage :

Pour un ensemble de valeurs de m connues avec précision, on mesure les valeurs correspondantes de s ce qui permet de tracer la courbe d'etalonnage =>

Cette dernière, à toute valeur mesurée de s , permet d'associer la valeur de m qui la détermine (figure b).



(a) son établissement, à partir de valeurs connues du mesurande m ;



(b) son exploitation, à partir des valeurs mesurées de la réponse s du capteur.

Les paramètres additionnels peuvent être :

• soit des grandeurs physiques liées au mesurande et auxquelles le capteur est sensible:

• sens et vitesse de variation du mesurande, propriétés physiques du support matériel du mesurande ;

• soit des grandeurs physiques, indépendantes du mesurande, auxquelles le capteur est soumis pendant son utilisation et qui peuvent modifier sa réponse :

• grandeurs d'influence d'ambiance : température, humidité ou

• grandeurs d'influence d'alimentation: amplitude, fréquence des tensions nécessaires au fonctionnement du capteur.

2. CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES

2.1.1 Etalonnage simple:

Il s'applique à un mesurande défini par une grandeur physique unique et à un capteur non sensible ou non soumis à des grandeurs d'influence.

=> dans ces conditions, l'étalement consiste à associer à des valeurs parfaitement déterminées du mesurande les valeurs correspondantes de la grandeur électrique de sortie;

2.1.2 Étalonnage multiple:

Lorsque le mesurande à lui seul ne permet pas de définir la réponse du capteur, il faut que soit précisée, par une série d'étalements successifs l'influence de chacun des paramètres actifs additionnels.

Exemple du phototransistor: capteur optique dont la grandeur de sortie, le courant collecteur I_C dépend:

- du flux de rayonnement incident ϕ ainsi que de sa longueur d'onde λ ;
- de l'angle α entre le rayonnement incident et la normale à la surface éclairée ;
 - de la tension collecteur-émetteur V_{CE} et de la résistance de charge R_m ;
 - de la température.



Pour chacun des paramètres indiqués, le constructeur fournit l'étalement correspondant, obtenu en relevant l'influence sur I_C du paramètre considéré.

À partir de ces courbes, l'utilisateur peut, dans les conditions expérimentales qui lui sont propres, déterminer par interpolation la réponse du capteur.

2. CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES

• 2.1.3 Validité de l'étalonnage :

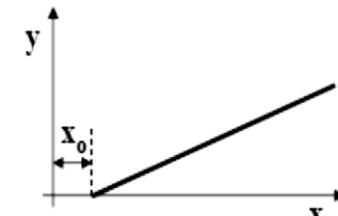
& Zéro: Valeur prise comme origine de l'information délivrée par le capteur.

Ce sera, suivant le cas :

- soit la valeur de l'information de sortie pour une valeur nulle de la grandeur d'entrée ;
- soit la valeur de l'information de sortie qui correspond à la portée minimale.

& Dérive: Déplacement lent et progressif du zéro, ou plus généralement de l'indication, au cours du temps.

$$x_0 \text{ tel que } y(x_0)=0 \\ y=k.x+y_0 \text{ avec } y_0=-k.x_0$$



& Erreur moyenne: Pour une valeur donnée de la grandeur X à mesurer, c'est la moyenne arithmétique des erreurs obtenues au cours de l'étalonnage par valeurs croissantes \uparrow et par valeurs décroissantes \downarrow de la grandeur à mesurer.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum x_i$$

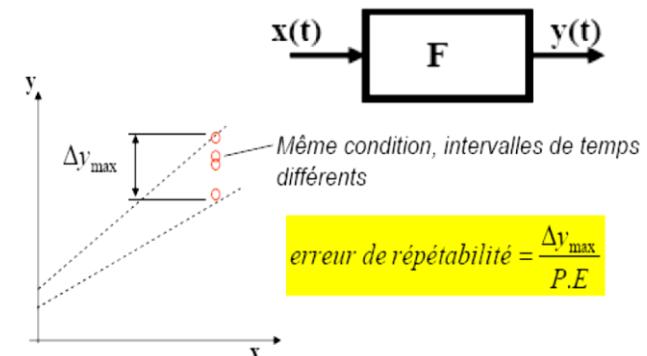
& Reproductibilité: Étroitesse de l'accord entre les résultats des mesures d'une même grandeur dans le cas où des mesures individuelles sont effectuées:

- suivant différentes méthodes,
- au moyen de différents instruments de mesure,
- par différents observateurs,
- dans différents laboratoires,
- après des intervalles de temps assez longs par rapport à la durée d'une seule mesure,
- dans différentes conditions usuelles d'emploi du capteur utilisé.

2. CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES

& Répétabilité: Étroitesse de l'accord entre les résultats de mesure successifs d'une même grandeur :

- effectués avec la même méthode,
- par le même observateur,
- avec les mêmes instruments de mesure,
- dans le même laboratoire, et
- à des intervalles de temps assez courts.



& Erreur de répétabilité: indice de dispersion des indications d'un capteur pour une série de mesures consécutives:

- effectuées dans les mêmes conditions,
- par un même observateur,
- avec les mêmes méthodes et
- à des intervalles de temps assez courts.

& Organismes professionnels:

Lors du choix de capteurs, de procédures d'essai ou d'étalonnage on peut s'adresser aux organismes suivants (liste non exhaustive) :

- LNE laboratoire national d'essais,
- LCIE laboratoire central des industries électriques,
- SIMTEC syndicat d'instrumentation de mesure du test de l'énergie et de la CAO,
- CETIM centre technique des industries mécaniques

2. CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES

• 2.2 Limites d'utilisation du capteur :

& Portée minimale, portée maximale: valeurs de la grandeur à mesurer correspondant aux limites minimale et maximale de l'étendue de mesure.

& Étendue de mesure: Valeur absolue de la différence entre les valeurs extrêmes pouvant être prises par la grandeur à mesurer, pour lesquelles les indications d'un capteur, obtenues à l'intérieur du domaine nominal d'emploi en une seule mesure, ne doivent pas être entachées d'une erreur supérieure à l'erreur maximale tolérée.

& Domaine nominal d'emploi: défini par les valeurs limites que peuvent atteindre et conserver de façon permanente, d'une part, la grandeur à mesurer, d'autre part, les grandeurs d'influences, sans que les caractéristiques (en particulier métrologiques) du capteur soient modifiées (les erreurs correspondantes ne dépassent pas les valeurs maximales tolérées).

& Domaine de non-détérioration: défini par les valeurs limites que peuvent atteindre et conserver, d'une part la grandeur à mesurer, d'autre part les grandeurs d'influence, sans que les caractéristiques (en particulier métrologiques) du capteur soient altérées après retour dans le domaine nominal.

& Domaine de non-destruction: défini par les valeurs limites que peuvent atteindre, d'une part la grandeur à mesurer, d'autre part les grandeurs d'influence sans qu'il y ait destruction du capteur, mais dans lequel les caractéristiques (en particulier métrologiques) du capteur peuvent être altérées plus ou moins profondément et d'une manière permanente.

& Classe de précision - Résolution: valeur du rapport entre la plus grande erreur possible et l'étendue de mesure. Classe = $100 \times (\text{La plus grande erreur possible} / \text{Étendue de mesure})$

Si l'appareil de mesure est un numérique, on parle de Résolution:

Résolution = Etendue de la mesure / Nombre de points de la mesure

2. CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES

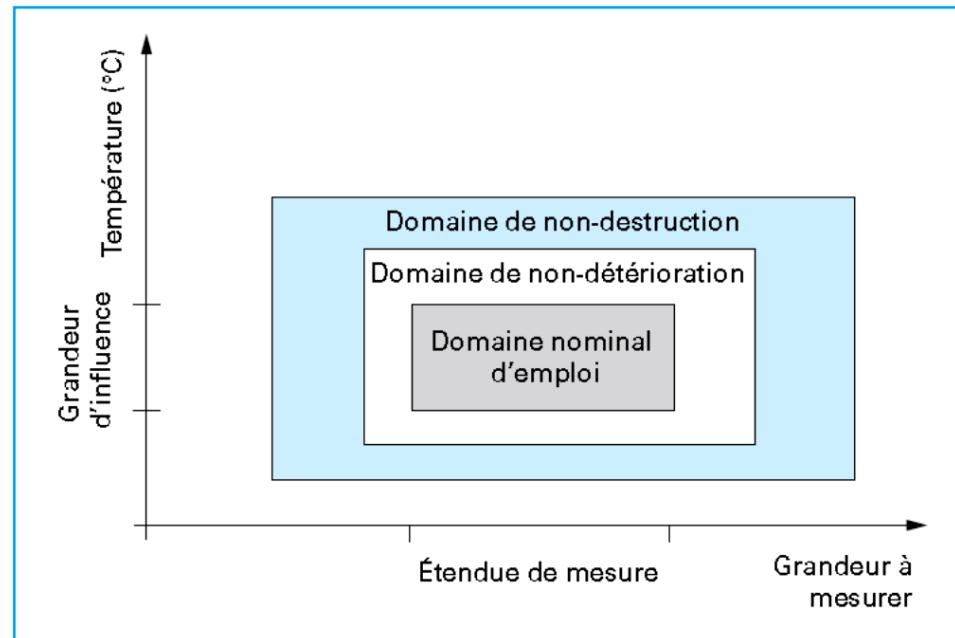
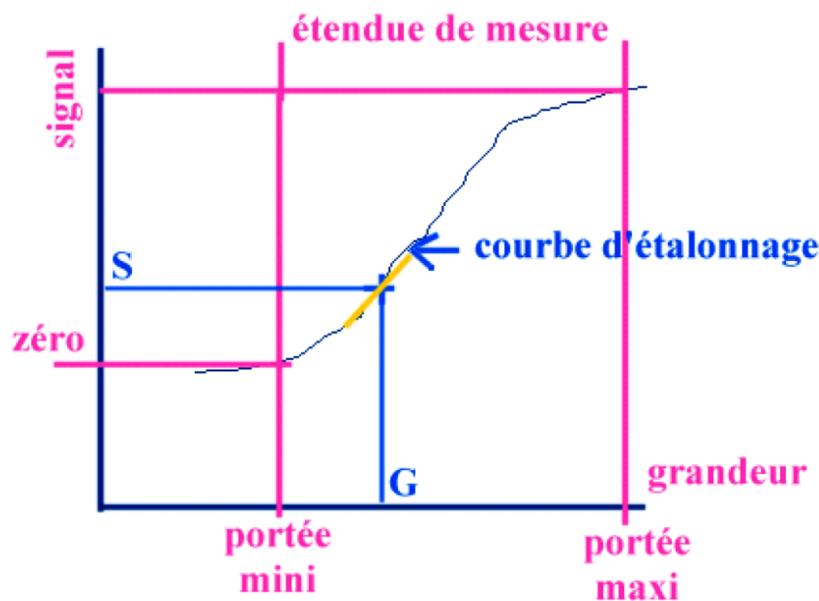


Figure – Domaine de fonctionnement et courbe d'étalonnage.

Les liens entre un capteur et la grandeur qu'il mesure sont définis par ses caractéristiques d'emploi:

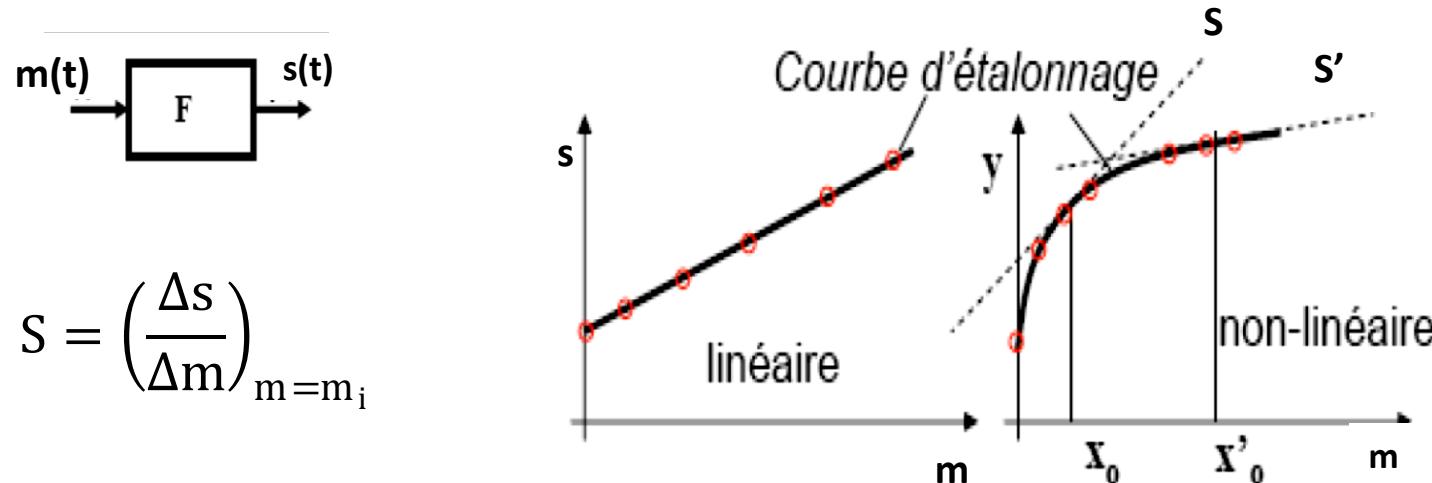
Tableau 2.1 – Capteur de force à jauge piézorésistive N556-1 (fabricant J.P.B.)

Domaine	Mesurande	Température
nominal	1 daN (E.M.)	0 °C à 60 °C
non-détérioration	1,5 × E.M.	-20 °C à 100 °C
non-destruction	3 × E.M.	-50 °C à 120 °C

2. CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES

• 2.3 Sensibilité :

& **Sensibilité**: pour une valeur donnée de la grandeur mesurée, la sensibilité s'exprime par le quotient de la variation de la grandeur de sortie par la variation correspondante de la grandeur mesurée :



Elle permet à l'utilisateur :

- d'estimer l'ordre de grandeur de la réponse du capteur, connaissant l'ordre de grandeur des variations du mesurande ;
- de choisir le capteur de façon que la chaîne de mesure dans son ensemble satisfasse aux conditions de mesure imposées.

L'**unité de S résulte du principe qui est à la base du capteur et des ordres de grandeur mis en jeu** :

- $\Omega/^{\circ}\text{C}$ pour une résistance thermométrique ;
- $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ pour un couple thermoélectrique, par exemple.

2. CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES

& Sensibilité réduite :

La sensibilité peut en outre être fonction de paramètres additionnels lorsque ces derniers influencent la réponse du capteur :

- cas de la tension et de la fréquence de l'alimentation,
- de la température du milieu où se trouve placé le capteur,
- de la fréquence des variations du mesurande.

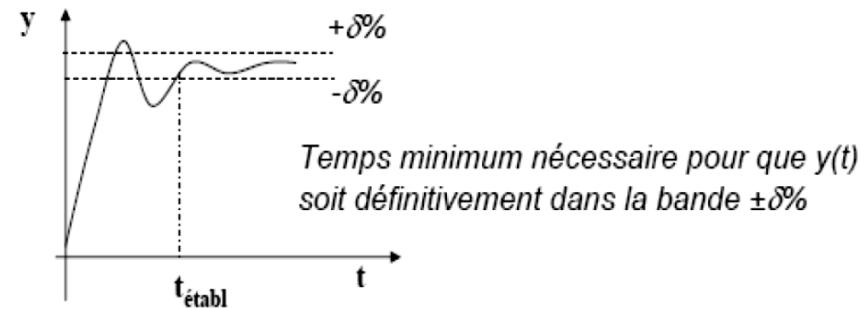
$$S_r = \frac{1}{E} \left(\frac{\Delta s}{\Delta m} \right)_{m=m_i}$$

où E est la tension d'alimentation

& Sensibilité en régime dynamique :

Elle est définie lorsque le mesurande est une fonction périodique du temps $m(t)$;

Dans ces conditions la grandeur de sortie s a en régime permanent même périodicité que le mesurande.



Il est caractérisé par la fréquence propre, la bande passante, la sensibilité dynamique, et le temps d'établissement : temps minimum nécessaire pour que $y(t)$ soit définitivement dans la bande $\pm\delta\%$.

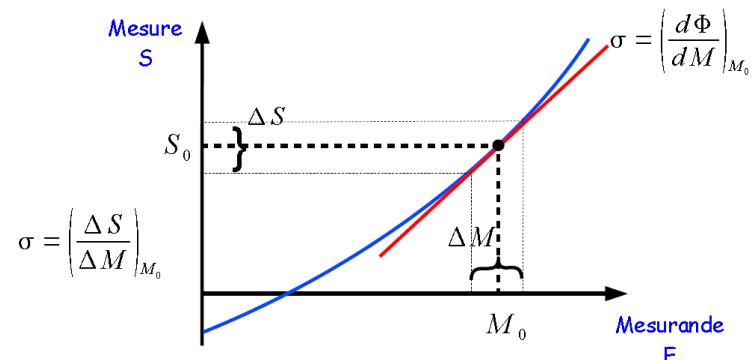
2. CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES

• 2.4 Linéarité :

& Conditions de linéarité :

-Un capteur est dit linéaire dans une plage déterminée du mesurande si **sa sensibilité y est indépendante de la valeur du mesurande**.

Dans la plage de linéarité du capteur, le signal électrique tout au long de la chaîne est proportionnel à la variation du mesurande dès lors que les divers dispositifs associés au capteur (pont, amplificateurs) sont eux-mêmes linéaires ;

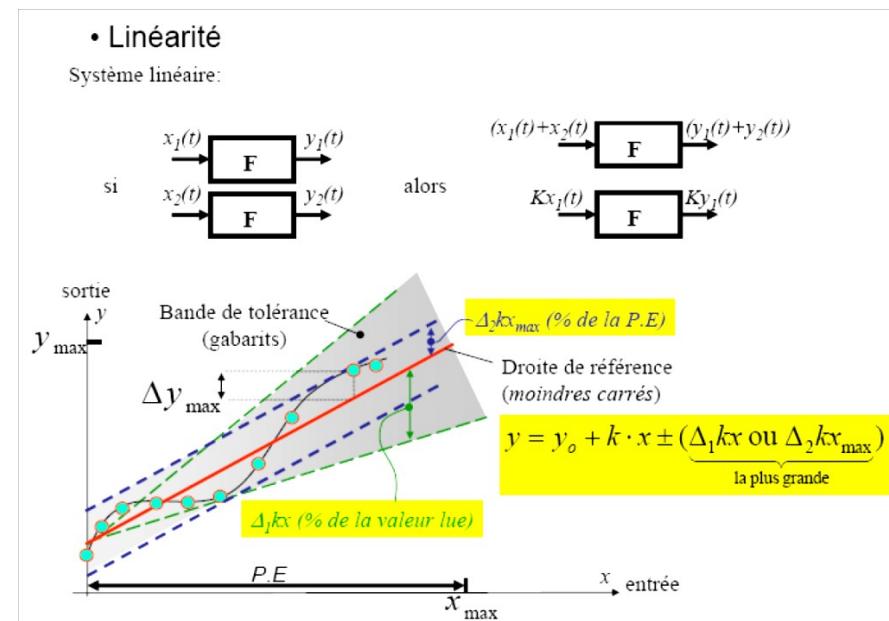


Objectif : il en résulte une plus grande simplicité dans le traitement du signal permettant d'accéder à la valeur numérique de la variation du mesurande.

& Écart et erreur de linéarité (dans le cas d'une réaction linéaire):

Plus grand écart entre la courbe d'étalonnage et une ligne droite appelée « meilleure droite » obtenue par la méthode des moindres carrés (cf Δy_{\max} sur la figure).

L'erreur de linéarité s'exprime en pourcentage de l'étendue de mesure ($\Delta y_{\max} / y_{\max} - y_0$)



EXERCICE D'APPLICATION

Exercice 3: Etalonnage indirect – régression linéaire

On réalise une sonde de température à partir d'un capteur de température bas coût. Cette sonde délivre une tension $V_{mes}(t)$ fonction de la température t (exprimée en °C) à laquelle elle est soumise. Pour étalonner cette sonde, on la place dans une enceinte thermostatée dont on fait varier la température sur l'étendue de mesure E.M. = [0°C, 100°C]. La température est mesurée à l'aide d'une sonde thermométrique Pt100 de précision. On réalise ainsi un étalonnage indirect pour lequel on considère que la température donnée par la sonde Pt100 est parfaitement exacte. Les résultats des mesures sont consignés dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1- Étalonnage de la sonde thermique

t °C	3,35	8,80	11,66	17,66	22,12	30,11	31,83	36,44	38,81	39,86
V_{mes}	26	83	120	168	215	302	328	355	390	390
t °C	43,00	45,20	47,19	49,95	51,83	59,59	59,86	61,67	64,10	67,84
V_{mes}	424	443	476	500	497	583	592	594	627	660
t °C	68,26	77,33	78,18	80,18	82,82	82,91	85,69	91,76	92,51	99,59
V_{mes}	671	745	759	773	790	799	823	878	884	936

3.1: Sur l'étendue de mesure E.M., on cherche à modéliser le comportement de la sonde par l'approximation linéaire $V_{mes} = V_{mes0} + \alpha t$.

Déterminer les expressions V_{mes0} et α obtenues à partir des N points expérimentaux $(t_i, V_{mes,i})$ donnés dans le tableau et en calculer la valeur. Pour ceci, on cherchera à minimiser l'écart quadratique moyen χ^2 entre l'approximation linéaire et les points expérimentaux. On réalise alors une régression linéaire au sens des moindres carrés.

3.2 Estimer la sensibilité $S = dV_{mes}/dt$.

3.3 Donner l'écart de linéarité ε plus grand écart sur l'étendue de mesure entre la caractéristique réelle et l'approximation linéaire donnée par la droite.

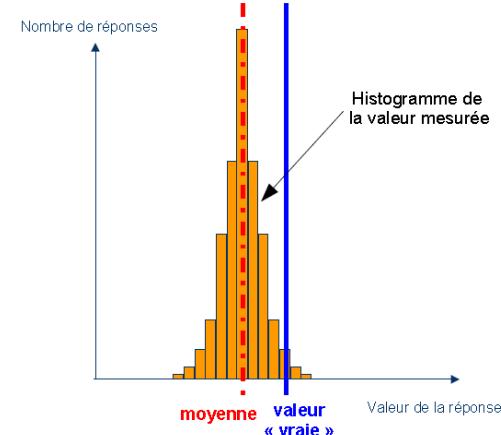
3.4 Calculer l'erreur de linéarité err , écart de linéarité normalisé à l'excursion de $V_{mes}(t)$ sur l'étendue de mesure E.M.

2. CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES

• 2.5 Fidélité - justesse – précision :

& Fidélité. Qualité qui caractérise l'aptitude d'un capteur à donner, pour une même valeur de la grandeur mesurée, des indications concordant entre elles, les erreurs systématiques des valeurs variables n'étant pas prises en considération.

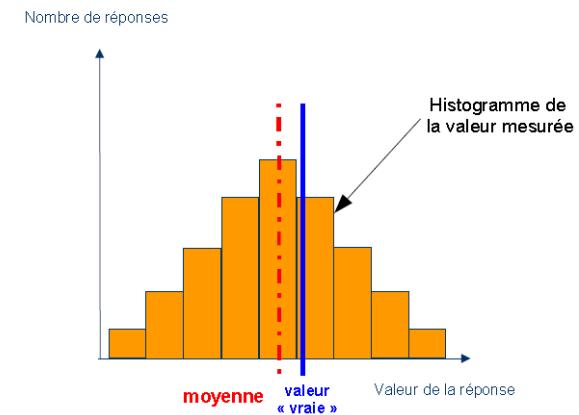
D'après cette définition, la fidélité caractérise l'aptitude d'un capteur à donner des indications qui ne sont pas entachées d'erreurs fortuites.



& Erreur de fidélité. C'est un indice de dispersion des indications d'un capteur pour une série d'indications correspondant à une même valeur de la grandeur mesurée. Pour représenter cet indice, on adopte souvent **l'écart type** qui est appelé alors « **erreur moyenne quadratique de fidélité** » pour une série d'indications consécutives dans des conditions déterminées d'emploi du capteur.

& Justesse. Qualité qui caractérise l'aptitude d'un capteur à donner des indications égales à la valeur de la grandeur mesurée, les erreurs de fidélité n'étant pas prises en considération.

D'après cette définition, la justesse caractérise l'aptitude d'un capteur à donner des indications qui ne sont pas entachées d'erreurs systématiques.



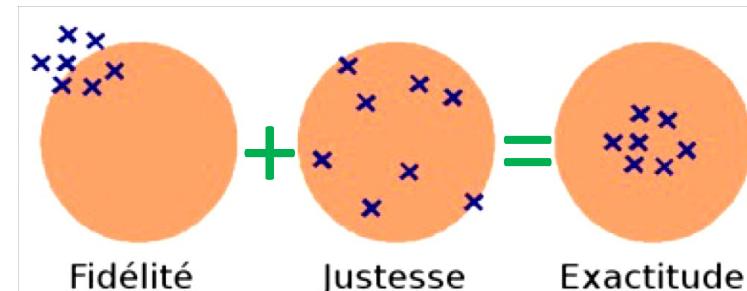
& Erreur de justesse. Somme algébrique (résultante) des erreurs systématiques entachant l'indication d'un capteur dans des conditions déterminées d'emploi.

2. CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES

& Exactitude (précision). Qualité qui caractérise l'aptitude d'un capteur à donner des indications proches de la valeur vraie de la grandeur mesurée.

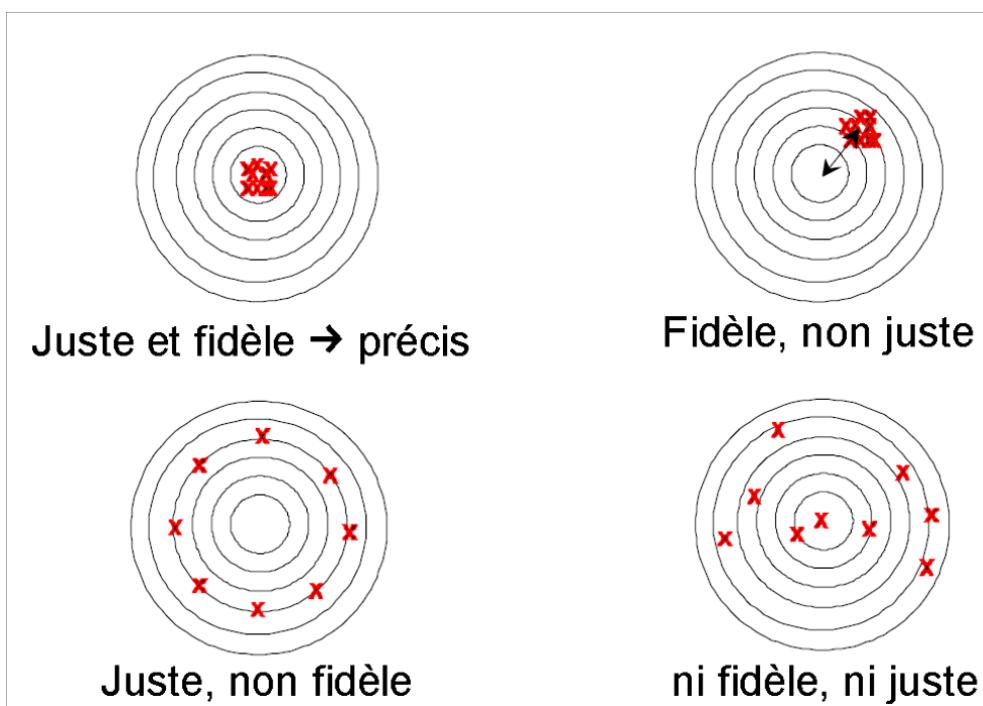
& Erreur d'exactitude (précision). Erreur globale d'un capteur dans les conditions déterminées d'emploi et comprenant l'erreur de justesse ainsi que l'erreur de fidélité.

L'erreur de précision est déterminée en composant les erreurs élémentaires, pour le domaine d'emploi considéré.



BILAN:

un capteur est précis
s'il est juste et fidèle

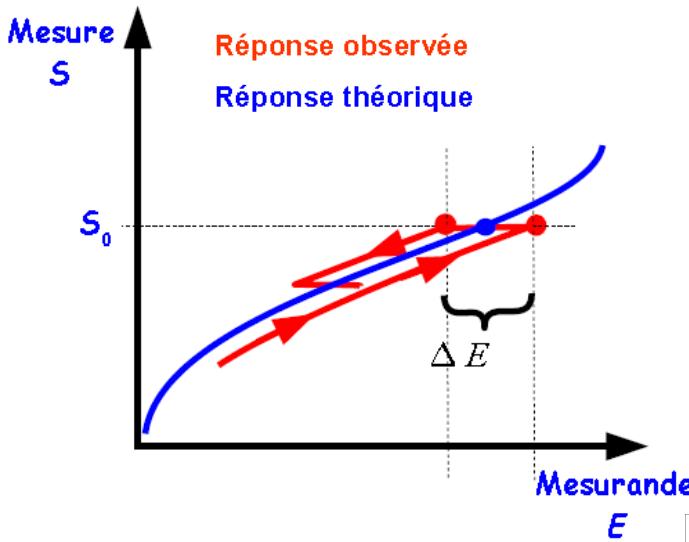


2. CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES

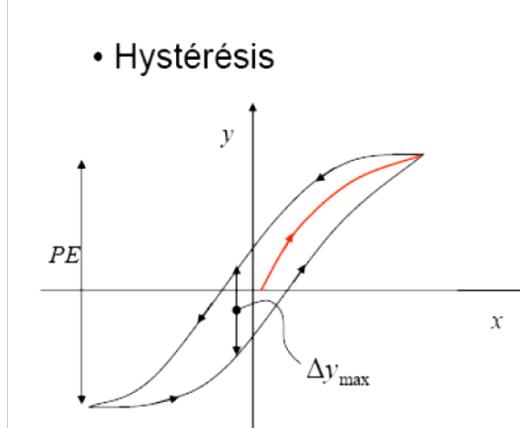
& Réversibilité (hystérésis). Qualité qui caractérise l'aptitude d'un capteur à donner la même indication lorsqu'on atteint une même valeur de la grandeur mesurée, que cette valeur ait été atteinte par variation croissante continue ou décroissante continue de la grandeur.

& Erreur de réversibilité (erreur d'hystérésis):

En cas d'indications différentes, on parle d'erreur d'hystérésis, qu'on exprime en % de l'E.M.



Exemple d'un capteur de force à sortie fréquentielle



$$\text{Erreur hysteresis} = (\Delta y_{\max} / P.E)$$

- polarisation magnétique
- polarisation électrique
- frottement sec

étendue de mesure	0 - 30 N
sensibilité	10,5 Hz . N-1
linéarité	3,6 % de l'étendue de mesure
répétabilité	2 %
hystérésis	1,8 %
dérive temporelle	- 0,6 Hz . h-1
dérive thermique	0,5 Hz . °C-1
facteur de qualité	180

Tableau 4.1 : caractéristiques techniques du capteur

2. CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES

• 2.6 Rapidité :

& Rapidité: Qualité qui exprime la manière de suivre dans le temps les variations de la grandeur à mesurer.

Remarque: la caractéristique la plus intéressante à connaître pour caractériser la rapidité dépend essentiellement de la grandeur à mesurer:

- elle peut être la bande passante à $x\%$,
- le temps de réponse à $x\%$ à un échelon, etc.

• 2.7 Discrédition ou finesse :

& Finesse (discrédition): Qualité exprimant l'aptitude d'un capteur à donner la valeur de la grandeur à mesurer sans modifier celle-ci par sa présence.

Remarque : le vocabulaire international ISO retient le terme « discrédition », pour cette caractéristique.

Exemples: l'augmentation de la masse sismique d'un accéléromètre accroît sa sensibilité mais diminue sa discrédition par la perturbation que cette masse apporte aux mouvements de la structure étudiée.

CONCLUSION :

Le capteur idéal est celui pour lequel :

- on dispose d'une relation linéaire connue entre la grandeur à mesurer et le signal de sortie du capteur
- les conditions d'emploi sont telles qu'aucune grandeur d'influence ne perturbe son fonctionnement
- aucun bruit parasite ne se superpose au signal utile
- ...

EXERCICE D'APPLICATION

EXERCICE 6: Erreur de finesse d'un oscilloscope

On mesure la tension aux bornes de la bobine d'un circuit RLC série. Le circuit est alimenté en sinusoïdal à la fréquence de résonance. L'appareil de mesure est un oscilloscope dont l'impédance d'entrée est modélisée par une résistance R_c en parallèle avec un condensateur C_c .

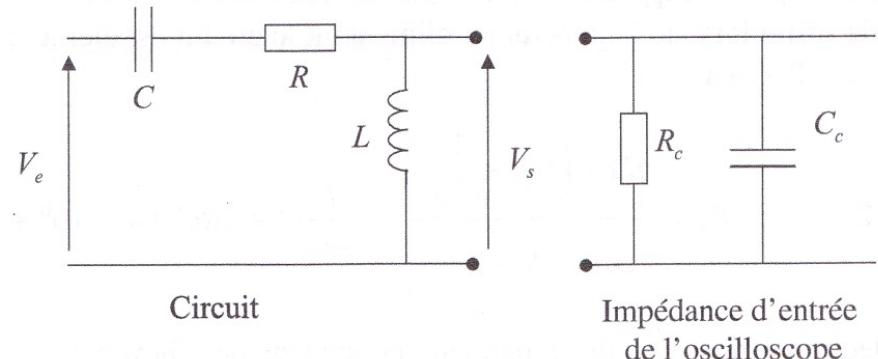


Figure 6.1: le circuit et l'impédance d'entrée de l'oscilloscope.

6.1 Calculer, en fonction de V_e , l'amplitude complexe V_s de la tension de sortie en l'absence de l'oscilloscope. On donne $R=100\Omega$, $L=10mH$, $C=100pF$, $R_c=1M\Omega$ et $C_c = 2 pF$

6.2 Calculer V_{mes} , amplitude de la tension de sortie en présence de l'oscilloscope. Pour cela on utilisera le théorème de Thévenin et on calculera de façon explicite la force électromotrice V_{Th} du générateur équivalent de Thévenin et son impédance interne Z_{Th} .

6.3 Calculer l'erreur de finesse de la mesure $(V_s - V_{mes})/V_s$, puis son module.

3. PRINCIPES DE DETECTION UTILISES DANS LES CAPTEURS

On peut distinguer 6 grandes classes de grandeurs physiques:

1 - électriques :

tension, courant, charge, résistance, inductance, capacitance, constante diélectrique, polarisation, champ électrique, fréquence, moment dipolaire, etc.

2 - thermiques :

température, chaleur, entropie, flux de chaleur, état de la matière, etc.

3 - mécaniques :

longueur, surface, volume, vitesse linéaire ou angulaire, accélération, flux de masse, force, couple, pression, longueur d'onde et intensité acoustique, etc.

4 - optiques :

intensité, phase, longueur d'onde, polarisation, réflectance, transmittance, réfraction...

5 - magnétiques :

intensité du champ, densité du flux, moment magnétique, perméabilité, etc.

6 - chimiques :

composition, concentration, vitesse de réaction, pH, oxydation, réduction, potentiel chimique...

Il existe 2 méthodes fondamentales de détection:

-Le capteur fournit **un signal analogique** fonction de la position de l'une des parties mobiles.

La majorité de ce type de capteurs a pour principe la variation de $Z=f(m)$ sensible:

- soit aux paramètres dimensionnels
- soit aux propriétés électriques (**R, L, C ou mutuelle inductance**) du matériau constitutif.

Exemples : capteurs Résistifs, Capteurs Capacitifs, Capteurs Inductifs

- Le capteur fournit **un signal numérique**, sous la forme d'une impulsion à chaque déplacement élémentaire.

Exemples : Codeurs Absolus, Codeurs Incrémentaux...

3. PRINCIPES DE DETECTION UTILISES DANS LES CAPTEURS

3.1 Capteurs analogiques:

3.1.1 Mesures de résistances

3.1.1.1 Capteur potentiométrique :

La résistance est fonction de la position du curseur lié à l'élément mobile (a)

3.1.1.2 Capteur extensométrique :

Les extensomètres à jauge de contrainte (strain gauge) sont réalisés sur la base d'un élément résistif, monté en pont, qui détecte la déformation de la structure sur laquelle les jauge sont collées.

Dans le montage en pont, le signal est prélevé aux bornes de la diagonale de mesure et correspond au niveau de référence qui peut être annulé par un équilibrage du pont (b).

3.1.1.3 Capteurs à jauge piézorésistives

L'effet piézo-résistif est utilisé dans les capteurs à jauge à semiconducteur, diffusées ou collées (c).

L'application d'une contrainte modifie la résistivité du silicium dopé, en modifiant à la fois le nombre des porteurs et leur mobilité.

La grandeur et le signe de la variation obtenue dépendent de la concentration des porteurs et de l'orientation cristallographique de la contrainte appliquée.

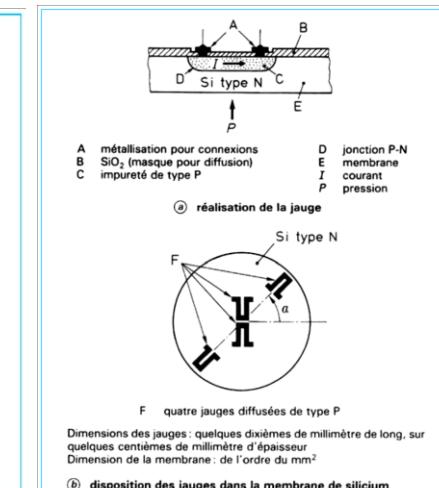
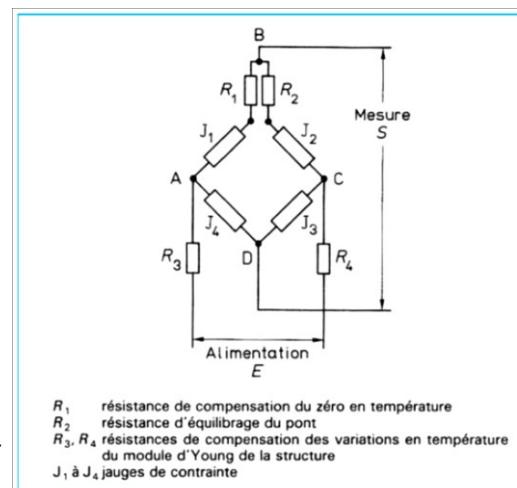
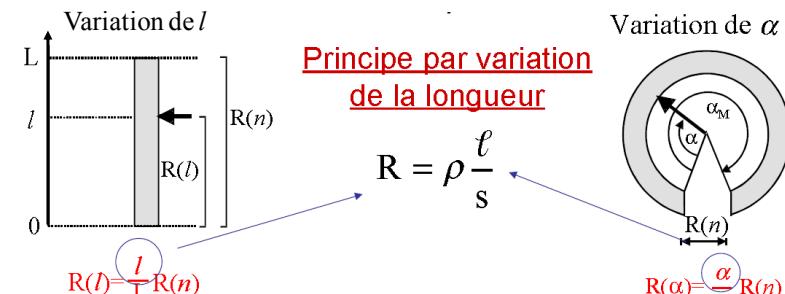


Figure – (a) Montage potentiométrique, (b) Montage des jauge extensométriques en pont de Wheatstone (c) Capteur de pression à jauge piézorésistives diffusées

EXERCICE D'APPLICATION

Effet de la résistance des fils de liaison d'un capteur résistif alimenté en courant.

On considère une résistance thermométrique Pt100 de résistance

$R_c(T) = R_0(1+\alpha T)$ où T représente la température en $^{\circ}\text{C}$, $R_0=100\Omega$ la résistance à 0°C et $\alpha=3.85\times 10^{-3} \ ^{\circ}\text{C}$ le coefficient de température.

On dispose, pour alimenter cette résistance thermométrique, d'une carte de conditionnement fournissant une sortie de courant parfaite calibrée à $I=5\text{mA}$, les deux entrées différentielles d'un amplificateur d'instrumentation, la borne de sortie de ce dernier et une borne de masse.

La résistance ajustable R permet de faire varier le gain G de l'amplificateur et les impédances d'entrée de ce dernier sont considérées infinies. La carte est schématisée figure 16.1

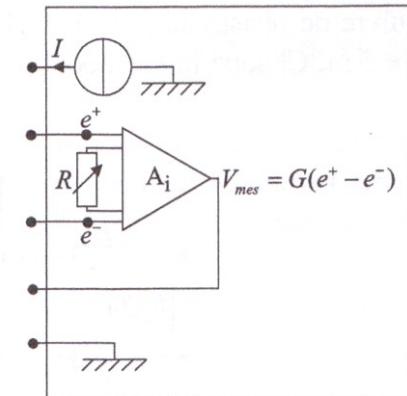


Figure 16.1- Carte de conditionnement

16.1 La Pt100 est directement connectée entre la source de courant et la masse et ses bornes reliées à l'amplificateur d'instrumentation (voir figure 16.2). Les fils de liaison sont de longueur négligeable.

Déterminer l'expression de la tension de mesure V_{mes} et calculer la sensibilité de la mesure $S_{mes}=\Delta V_{mes}/\Delta T$.

Quel doit être le réglage du gain de l'amplificateur d'instrumentation pour obtenir une sensibilité $S_{mes}=0.1\text{V.}^{\circ}\text{C}^{-1}$?

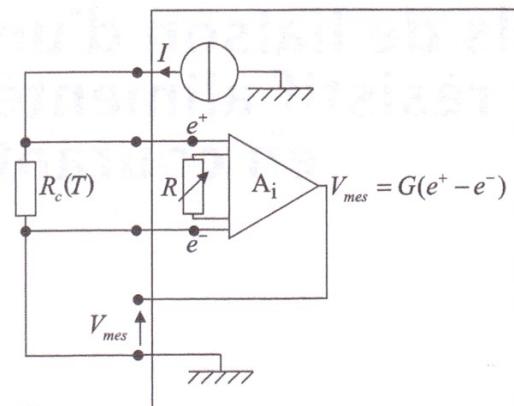


Figure 16.2- Montage 2 fils de résistance négligeable

EXERCICE D'APPLICATION (SUITE)

16.2 La Pt100 est maintenant en service à distance de la carte et on doit donc tenir compte de la résistance des fils de liaison. Ces fils de liaison sont des fils de cuivre de résistivité $\rho=1.72\times10^{-8}\Omega\cdot\text{m}$, de diamètre $d=0.5\text{mm}$ et de longueur $l=5\text{m}$. Chaque fil est modélisé par sa résistance r (voir figure 16.3).

Déterminer la nouvelle tension de mesure $V_{mes,2}$.

En déduire l'erreur $\delta V_2 = V_{mes,2} - V_{mes}$ sur la tension de mesure introduite par la résistance des fils de liaison.

Quelle est alors l'erreur engendrée sur la mesure de la température ?

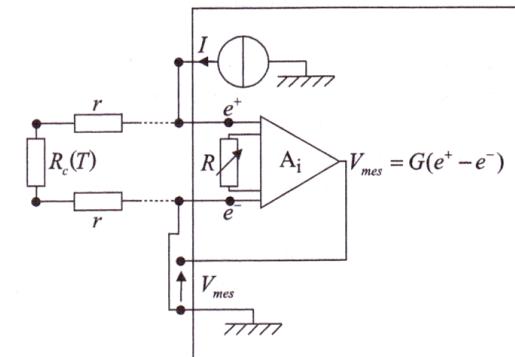


Figure 16.3 - Montage 2 fils réels

16.3 Pour pallier cette erreur, on modifie le montage pour obtenir un montage classique dit à quatre fils: deux fils amenant le courant à la résistance thermométrique et deux fils servant à la prise de tension aux bornes de celle-ci (voir figure 16.4).

Déterminer la nouvelle tension de mesure $V_{mes,4}$ et conclure.

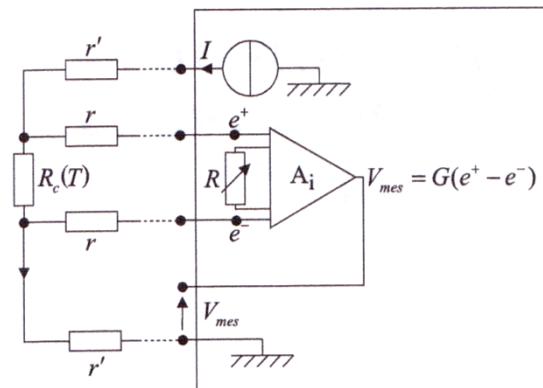


Figure 16.4 - Montage 4 fils

3. PRINCIPES DE DETECTION UTILISES DANS LES CAPTEURS

• 3.1.2 Variation de capacité:

3.1.2.1 Variation de surface active des armatures:

La plupart du temps condensateurs plans ou de condensateurs cylindriques dont l'armature subit le déplacement à traduire par une variation de capacité.

L'une des armatures est fixe alors que l'autre peut se déplacer avec le dispositif dont on veut suivre le mouvement

- 3.1.2.1.1 Condensateur unique :

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

[

- ϵ_0 est la permittivité du vide $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$
- ϵ_r est la permittivité relative du milieu entre les armatures
- A surface des armatures en regard (m^2)
- d distance entre armatures (m)
- C capacité (F)

- Variation de la surface A en regard
- Etendue de mesure > au cm
- Mesure linéaire en fonction de x ou de θ
- Remarque: électrodes concentriques

- 3.1.2.1.2 Condensateur à double référentiel :

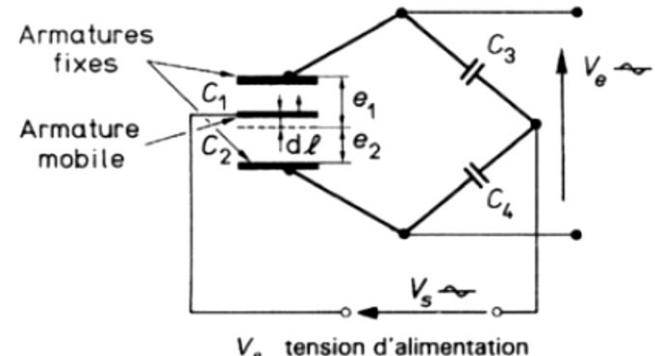
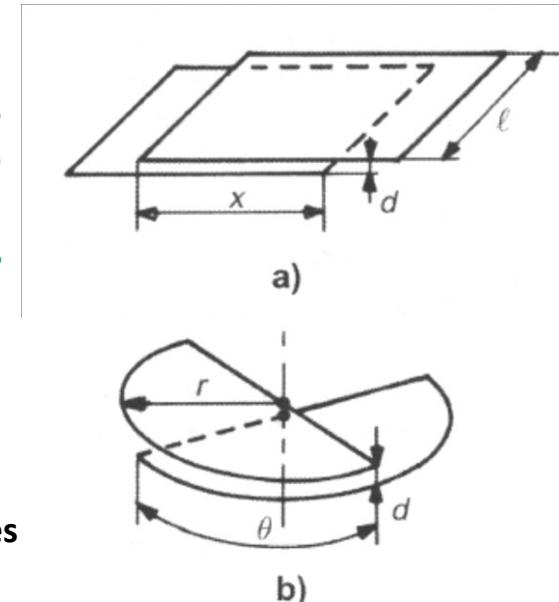
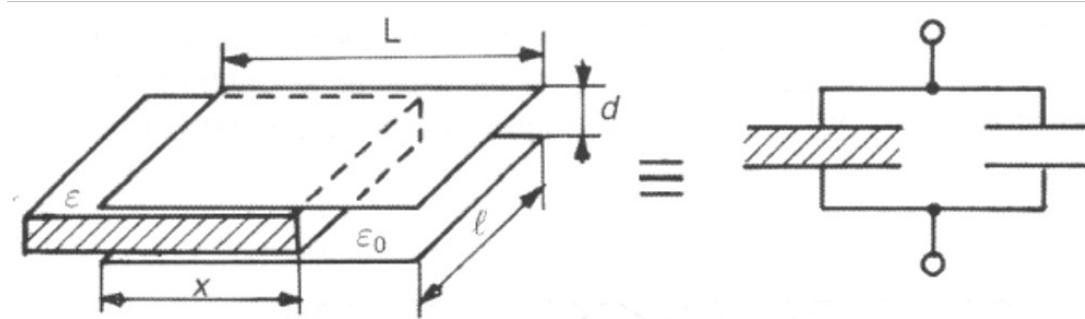


Figure – Capteur à variation de capacité par variation de distance entre les armatures

3. PRINCIPES DE DETECTION UTILISES DANS LES CAPTEURS

• 3.1.2.2 Variation de permittivité :

Les capteurs de ce type sont constitués par deux armatures d'un condensateur à air entre lesquelles on introduit un diélectrique de forte permittivité.



Ce diélectrique est en général un liquide car le procédé est surtout utilisé en capteur de niveau.

La position du diélectrique se modifie.

Le condensateur global est la somme de la partie avec le diélectrique et de la partie correspondant au vide.

Le système est équivalent à deux condensateurs en parallèle, de capacités C_1 et C_2 ;
la capacité totale est :

$$C = C_1 + C_2 = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{x \cdot l}{e} + \epsilon_0 \frac{(L - x) \cdot l}{e} = \frac{\epsilon_0}{e} \cdot l (\epsilon_r \cdot x + L - x)$$

3. PRINCIPES DE DETECTION UTILISES DANS LES CAPTEURS

• 3.1.3 Variation de quantité d'électricité :

& Piézoélectricité: L'effet piézoélectrique est la particularité que possèdent certains matériaux NON CONDUCTEURS (quartz, céramiques PZT, etc.) de se polariser électriquement lorsqu'ils sont soumis à des contraintes mécaniques convenablement orientées par rapport aux axes cristallographiques.

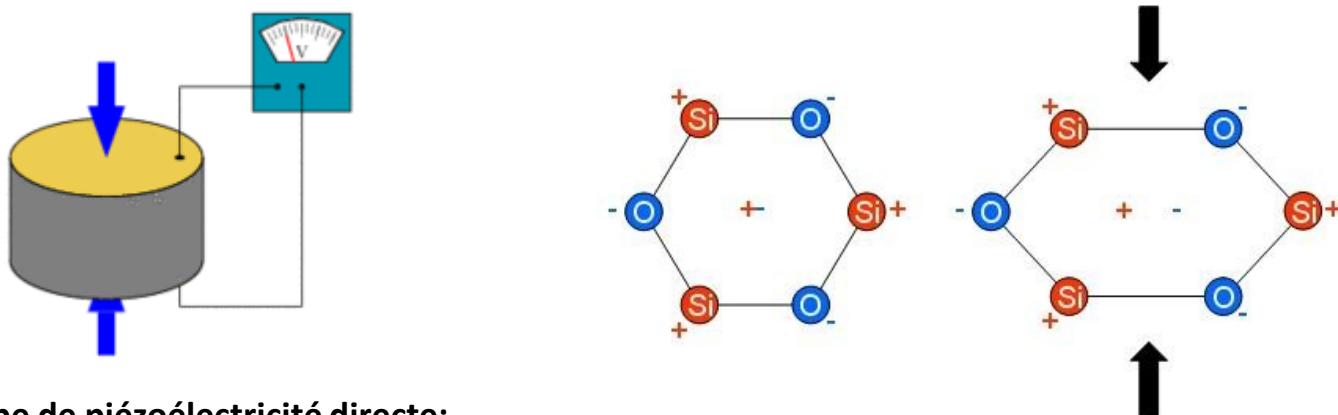


Illustration du principe de piézoélectricité directe:

la déformation causée par l'effort de compression génère une séparation des centres des charges positives et négatives
=> apparition d'un champ électrique.

La quantité d'électricité apparaissant en surface du cristal peut s'écrire : $q = KF$ avec :

$\left\{ \begin{array}{l} K \text{ module piézoélectrique ou constante de Curie,} \\ F \text{ contrainte mécanique.} \end{array} \right.$

& Photoélectricité: La cellule photoélectrique permet de mesurer des rayonnements (cas de la mesure de température) ou peut être utilisée comme élément sensible secondaire pour transformer une grandeur physique en courant électrique.

Ce type de capteur fait partie d'une famille détaillée dans le cours de Mr Bosch (capteurs optiques)

3. PRINCIPES DE DETECTION UTILISES DANS LES CAPTEURS

• 3.1.4 Variation de fréquence:

& Corde vibrante : dans ce type de capteur, le corps d'épreuve est une corde d'acier tendue entre deux points ancrés dans une structure ou dans un élément de capteur.

Un dispositif d'excitation fait vibrer la corde.

Un dispositif de détection mesure les variations de fréquence directement liées à la tension mécanique ou à un déplacement.

La fréquence propre de la corde est :

$$f = \frac{1}{2l} \cdot \sqrt{\frac{F}{\rho S}}$$

avec
F force appliquée,
l longueur de la corde,
S section de la corde,
ρ masse volumique.

& Quartz et céramiques : Les quartz et céramiques sont utilisés en piézoélectricité.

On peut mesurer des pressions, des forces, etc., en exploitant la variation de fréquence d'un quartz ou d'une céramique.

Si le quartz est excité, sa fréquence de résonance sera modifiée

- par l'application d'un dépôt, par exemple, ou par
- la modification d'un débit de fluide.

3. PRINCIPES DE DETECTION UTILISES DANS LES CAPTEURS

•3.1.5 Récapitulatif :

Le tableau 3 donne, dans les grandes lignes, les différents principes de détecteurs utilisés.

Capteur de déplacement	Résistif	Inductif		Capacitif
type	Potentiomètre	Inducteur variable	Transformateur différentiel	Capacité variable
avantages	Etendue de mesure importante Faible coût	Etendue de mesure importante	Etendue de mesure importante Bonne linéarité Excellent résolution Pas d'hystérisis Robustesse Fiabilité Faible encombrement	Etendue de mesure moyenne Robustesse Fiabilité
inconvénients	Résolution limitée Vitesse limitée Durée de vie limitée	Linéarité moyenne Sensible aux champs magnétiques	Sensible aux champs magnétiques	Non linéarité Sensible à l'environnement

Grandeur mesurée	Éléments traducteurs								
	Variation de résistance	Variation d'induction magnétique	Variation de capacité	Variation de quantité d'électricité	Variation de fréquence	Variation de caractéristique de composant	Variation de flux (rayonnement)	Variation de force électromotrice ou de potentiel	Variation du temps de parcours d'ondes ultrasonores
Longueur, épaisseur	Conductivité Potentiométrique Extensométrique	Réductance variable Transformateur différentiel Courants de Foucault	Variation : – de surface des électrodes – de distance – de permittivité		Résonance mécanique			Transparence aux rayons X, γ et β Interférométrie	Sonde à effet Hall
Force, poids	Potentiométrique Extensométrique Piézorésistif	Magnéto-traction Mutuelle inductance	Variation : – de surface des électrodes – de distance Effet électret	Pièzo électrique Photo électrique	Corde vibrante Quartz, céramique	Effet piézo-FET (transistor à effet de champ)	Magnéto-traction Flux lumineux	Pot magnétique	
Pression	Potentiométrique Extensométrique Fil chaud	Transformateur différentiel Mutuelle inductance	Variation de distance des électrodes Effet électret	Pièzo électrique	Quartz, céramique Lame vibrante	Effet piézo-FET	Flux lumineux Fibre optique Flux ionique		
Déplacement	Potentiométrique Extensométrique	Variation : – d'enferrer – de réductance Courants de Foucault	Variation : – de distance des électrodes – de surface		Corde vibrante			Codeur optique Flux lumineux	
Allongement relatif	Extensométrique		Électrodes scellées en deux points		Corde vibrante				
Temps					Quartz				
Position, niveau	Potentiométrique Codeur	Réductance variable	Variation de distance des électrodes					Codeur optique	
Vitesse linéaire	Fil chaud (vitesse de fluides)				Effet Doppler-Fizeau Lame vibrante			Flux lumineux	
Vitesse angulaire	Potentiomètre asservi			Charge et décharge du condensateur	Roue phonique			Flux lumineux Dynamo	
Température	Sonde plastique à semi-conducteur (thermistances)			Quartz oscillant					Couples thermovoltaïques
Conductivité	Mesure directe								
Humidité	Variation d'électrode		Variation de permittivité diélectrique						
pH, pK			Charge et décharge du condensateur						Électrode spécifique
Couple	Extensométrique				Optique et mesure du déphasage			Flux lumineux	
Accélération, vibrations	Extensométrique Potentiométrique	Réductance variable	Variation de distance des électrodes	Pièzo électrique	Corde vibrante	Effet piézo-FET			Pot magnétique Effet Hall

3. PRINCIPES DE DETECTION UTILISES DANS LES CAPTEURS

• 3.2. Capteurs digitaux :

Le principe est exposé ci-dessous :

3.2.1 Codeurs optiques:

Un codeur optique est un système électromécanique dont la sortie représente sous forme numérique une fonction de la position angulaire

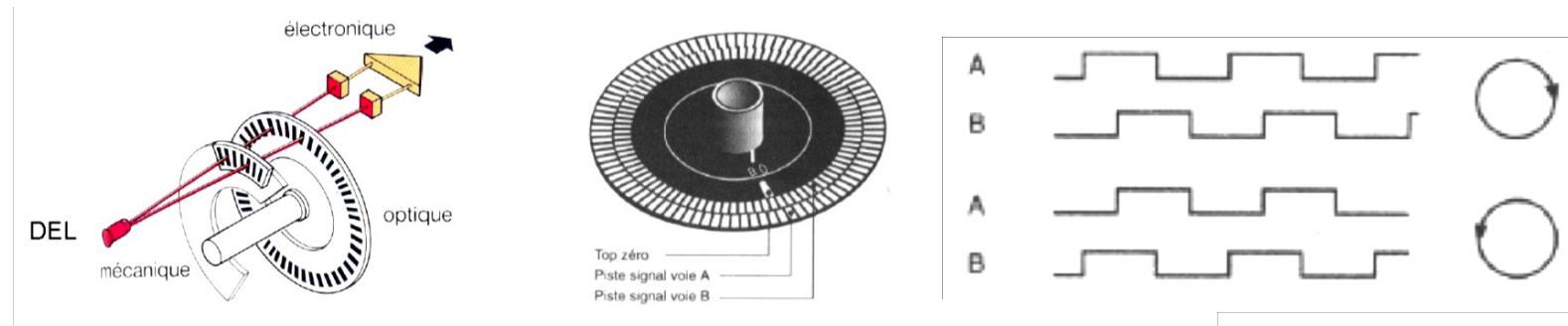
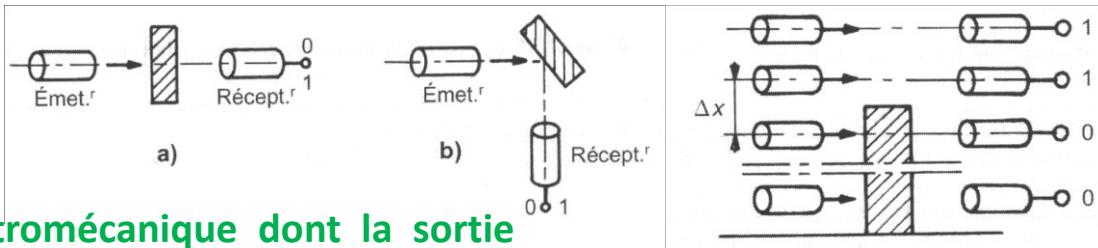
3.2.1.1 Codeur incrémental :

3 pistes divisées en n intervalles égaux alternativement opaques et transparents.

Le déphasage de 90° des signaux A et B permet d'obtenir le sens de rotation

La piste intérieure Z détermine une position de référence.

Le comptage -décomptage des impulsions définit la position du mobile.



3.2.1.2 Codeur absolu :

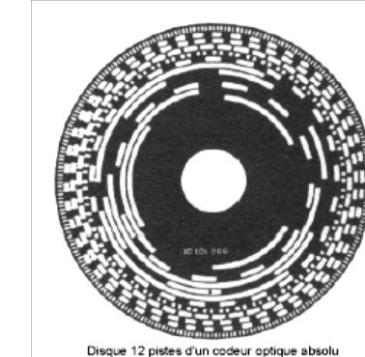
N pistes concentriques

Piste intérieure donne le demi-tour \Leftrightarrow MSB Most Significant Bit

Piste suivante $\frac{1}{4}$ de tour, puis $1/8$ de tour, $1/16$

La piste extérieure donne la résolution du codeur $2^N \Leftrightarrow$ LSB Least Significant Bit

Un codeur absolu fournit un code binaire image de la position réelle du mobile



4. CARACTERISTIQUES GENERALES DES CONDITIONNEURS DE CAPTEURS:

• 4.1 Principaux types de conditionneurs pour capteurs passifs :

Les variations de l'impédance Z_c d'un capteur passif liées aux évolutions d'un mesurande m ne peuvent être traduites sous la forme d'un signal électrique qu'en associant au capteur une source de tension e_s ou de courant i_s et généralement d'autres impédances Z_k constituant alors le conditionneur du capteur.

Il existe plusieurs types de conditionneurs :

- 1 - Le montage potentiométrique (figure a) présente l'intérêt de la simplicité mais son inconvénient majeur est sa sensibilité aux parasites;
- 2 - L'alimentation par source de courant (figure b) peut être considérée comme un cas limite ($Z_1 \gg Z_c$) du montage potentiométrique dont elle améliore la protection vis à vis des parasites.
- 3 - Le pont (figure c), qui est un double potentiomètre, permet une mesure différentielle réduisant de façon importante l'influence des parasites.

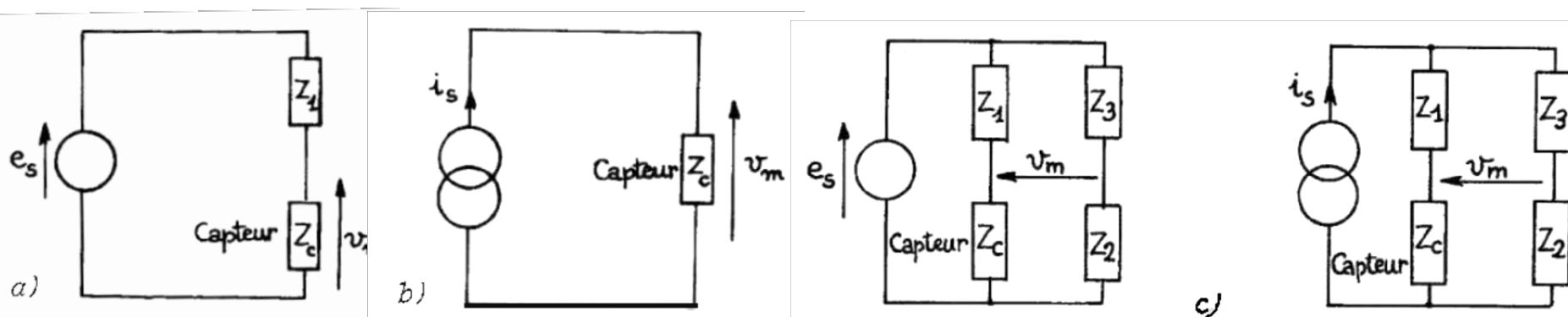


Figure : conditionneurs de capteurs passifs :

- a) montage potentiométrique ;
- b) capteur alimenté par une source de courant ;
- c) montages en pont ;

4. CARACTERISTIQUES GENERALES DES CONDITIONNEURS DE CAPTEURS:

• 4.2 Qualité d'un conditionneur :

Sensibilité et linéarité:

- Le conditionneur est linéaire si sa sensibilité propre est indépendante de Z_c ;
- L'association d'un conditionneur linéaire et d'un capteur linéaire délivre un signal de mesure proportionnel aux variations du mesurande.
- Si le conditionneur n'est pas linéaire, il peut être linéarisé en remplaçant l'un des composants fixes par un second capteur (fonctionnement push-pull).

Remarque : lorsque le capteur lui-même n'est pas linéaire, il est quelquefois possible de compenser sa non-linéarité par une non-linéarité opposée du conditionneur, l'ensemble ayant un fonctionnement qui est quasi linéaire, au moins dans une plage limitée du mesurande (cf problème 5).

4. CARACTERISTIQUES GENERALES DES CONDITIONNEURS DE CAPTEURS:

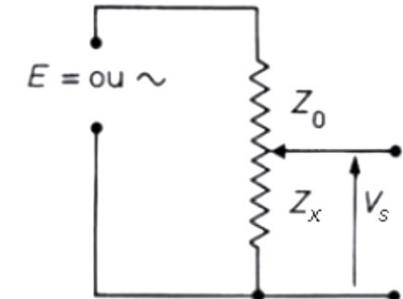
• 4.3 Montage potentiométrique :

4.3.1 Mesures de résistances

Le potentiomètre (figure) fournit une relation linéaire entre la variable Z_x et la tension de sortie V_s , à condition que le dispositif de mesure de cette dernière ait une impédance d'entrée suffisamment grande.

Les voltmètres et les millivoltmètres électroniques ont une impédance d'entrée supérieure à $1 \text{ M}\Omega$. Compte tenu de la dissipation maximale admissible dans les divers éléments du diviseur de tension, la tension E sera choisie aussi élevée que possible.

Le circuit ainsi constitué est asymétrique : la tension correspondant au niveau de référence de la grandeur à mesurer n'est pas nulle.



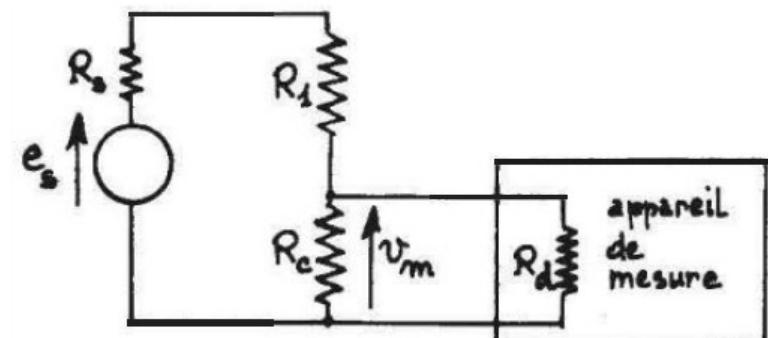
$$V_s = E \frac{Z_x}{Z_x + Z_0}$$

avec $Z_x + Z_0 = Z$ impédance totale fixée

En tenant compte de l'impédance d'entrée de l'appareil de mesure :

$$v_m = e_s \cdot \frac{R_c R_d}{R_c (R_s + R_1) + R_d (R_s + R_1 + R_c)}.$$

Figure – Montage potentiométrique



4. CARACTERISTIQUES GENERALES DES CONDITIONNEURS DE CAPTEURS:

• 4.3.2 Linéarisation de la mesure :

• 4.3.2.1 - Première solution : fonctionnement en « petits signaux »

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

À condition que $\Delta R_c \ll R_{C0} + R_1 + R_s$, la sensibilité du conditionneur $\Delta V_m / \Delta R_c$ est maximale si l'on choisit $R_s + R_1 = R_{C0}$; =>

$$v_m = e_s \cdot \frac{R_c R_d}{R_c(R_s + R_1) + R_d(R_s + R_1 + R_c)}.$$

$$\Delta v_m = \frac{e_s}{4} \cdot \frac{\Delta R_c}{R_{C0}}$$

• 4.3.2.2 - Seconde solution : alimentation par source de courant

Le montage est alimenté par une source de courant i.e.

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 :

$$\Delta v_m = i_s \cdot \Delta R_c$$

• 4.3.2.3 - Troisième solution : montage push-pull

On remplace R_1 par un second capteur, identique au premier, mais dont les variations sont de signe contraire : $R_1 = R_{C0} - \Delta R_c$.

Cette association de 2 capteurs fonctionnant en opposition est dite **push-pull**. C'est le cas, par exemple, pour 2 jauge d'extensométrie identiques subissant des déformations égales et de signes contraires.

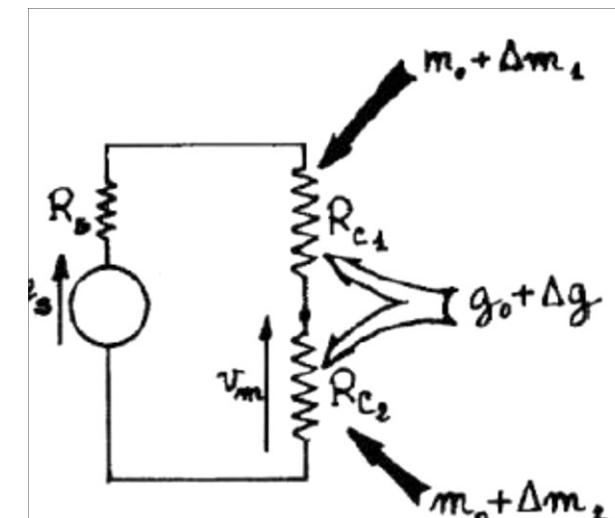
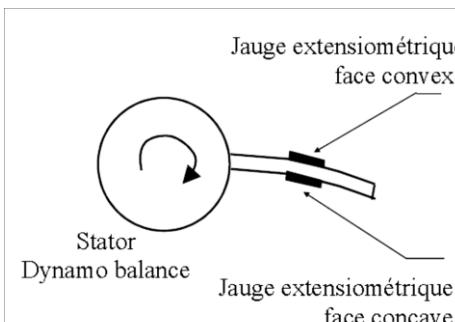


Figure 3.3 - Réalisation du montage potentiométrique pour fonctionnement en push-pull.

Exemple avec jauge de contraintes :

Cas particulier montage push-pull: Deux jauge actives soumises à des déformations égales et de signes contraires.

4. CARACTERISTIQUES GENERALES DES CONDITIONNEURS DE CAPTEURS:

• 4.3.3 Élimination de la composante permanente de la tension de mesure :

L'un des inconvénients de la méthode potentiométrique décrite est que la variation de tension Δv_m qui porte l'information est superposée à une tension V_{mo} qui lui est en général de beaucoup supérieure.

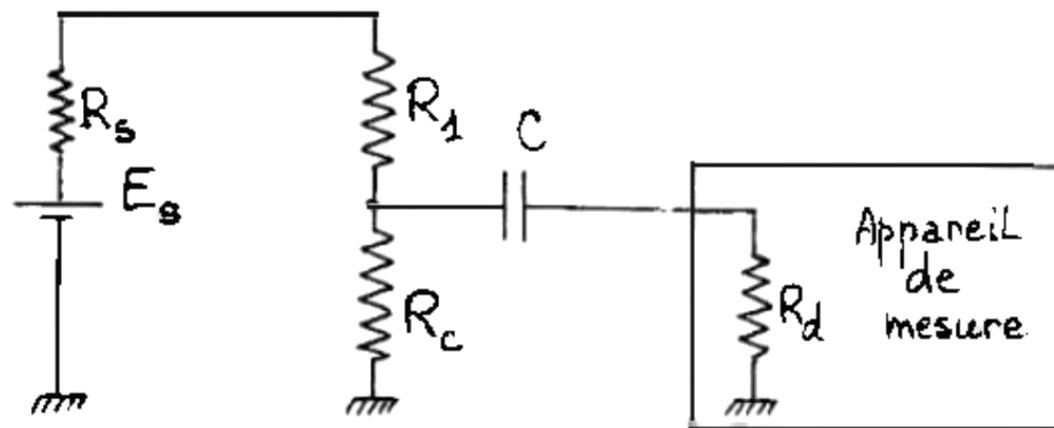
Ceci risque de rendre la mesure particulièrement imprécise dans le cas de phénomènes statiques pour lesquels ΔR_C est constant ou lentement variable:

Si, par exemple, $V_{mo} = 5 \text{ V}$ et $\Delta v_m = 5 \text{ mV}$, il est évidemment très difficile de faire une lecture précise de Δv_m sur le calibre 6V d'un voltmètre.

1 - Deux montages permettent l'élimination de la composante permanente :

- le double potentiomètre ou pont ;
- l'alimentation symétrique.

2 - Dans le cas de phénomènes dynamiques où les variations du mesurande sont alternatives, il en est de même pour les variations de résistance du capteur et de la tension de mesure Δv_m .



4. CARACTERISTIQUES GENERALES DES CONDITIONNEURS DE CAPTEURS:

•4.4 Les ponts :

L'intérêt des ponts résulte précisément de la nature différentielle de la mesure qui la rend moins sensible aux bruits et dérives de la source.

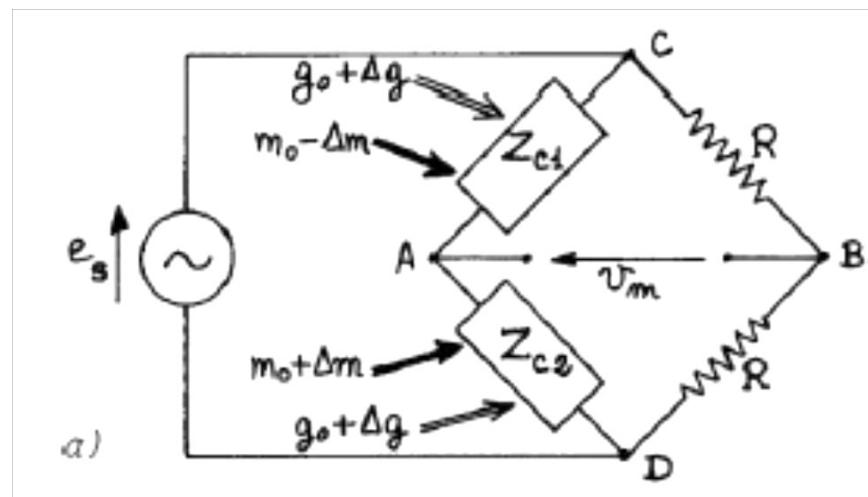
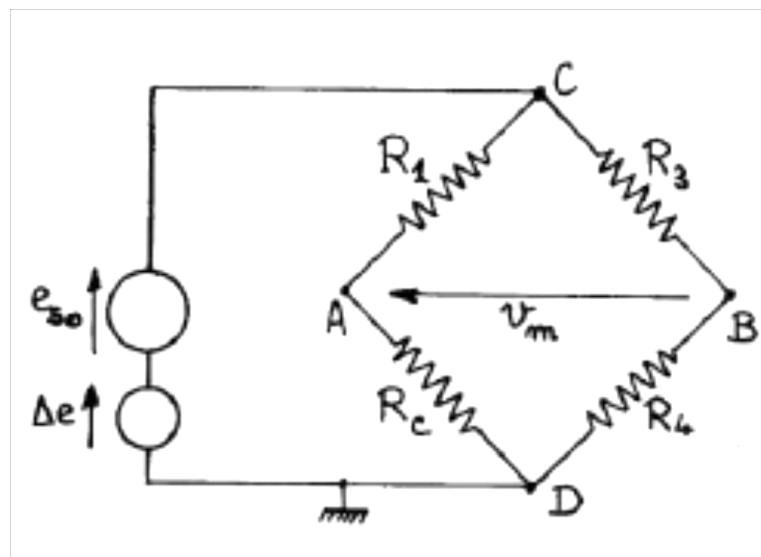


Figure :

- (a) Montage pont potentiométrique,
- (b) généralisation aux capteurs d'impédance complexe, particularité montage push-pull

EXERCICE D'APPLICATION N°2

Capteur capacitif push-pull à glissement du diélectrique

On considère la structure de la figure 2.1, constituée de deux condensateurs plans identiques C_1 et C_2 , de surface carrée ou rectangulaire d'aire A , entre les armatures desquels se déplace selon l'axe x un noyau diélectrique de permittivité relative ϵ_r .

2.1 Le noyau étant à sa position initiale, centré en $x = 0$, **déterminer l'expression des capacités $C_1(x = 0) = C_2(x = 0)$ que l'on notera C_0 (on négligera pour cela les effets de bords et le couplage possible entre les deux condensateurs).** On donne $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$, $\epsilon_r = 3$, $e = 1 \text{ mm}$ et $A = 6 \text{ cm}^2$.

2.2 Le noyau est déplacé de x de sa position d'origine, **déterminer les expressions de $C_1(x)$ et $C_2(x)$. Les écrire sous la forme $C_1(x) = C_0 + \Delta C_1(x)$ et $C_2(x) = C_0 + \Delta C_2(x)$ en précisant les expressions de $\Delta C_1(x)$ et de $\Delta C_2(x)$ en fonction de C_0 , x , l et ϵ_r .**

2.3 Les deux condensateurs sont montés dans un circuit en pont selon le schéma de la figure 2.2. Exprimer la tension différentielle de mesure V_{mes} en fonction de x , l , ϵ_r et V_g . Conclusion ?

2.4 En déduire la sensibilité S de la mesure et la sensibilité réduite S_r .

On donne : $l = 2 \text{ cm}$ et $V_g = 10 \text{ V}$.

2.5 Quelles sont les valeurs de l'étendue de mesure $E.M.$ et de l'excursion de V_{mes} ?

2.6 Peut-on mesurer ces variations avec un ADC de l'Arduino Uno (ATMEGA 328) de 10 bits de résolution et dont la tension de référence est de 5V. Si non que faudrait-il faire ?

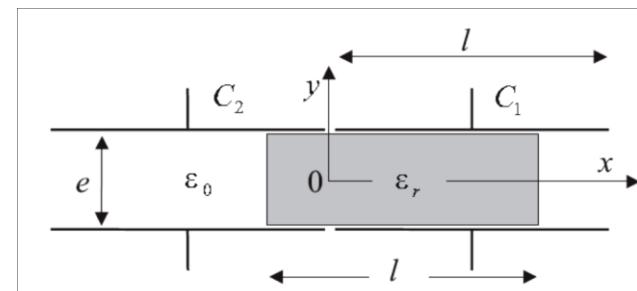


Figure 2.1. Condensateur à diélectrique glissant

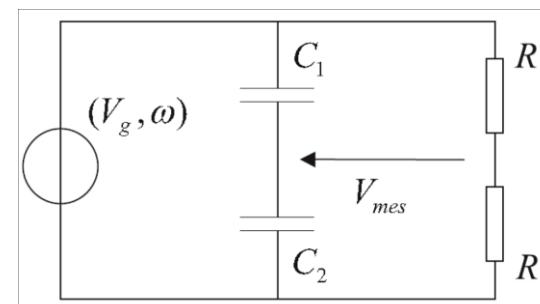


Figure 2.2 . Montage du capteur

PROBLÈME : Capteur résistif non linéaire[®]



Ce problème traite de la réduction de la non-linéarité de la mesure réalisée avec un capteur résistif non linéaire. Différents montages sont envisagés et comparés : montage potentiométrique alimenté en tension ou en courant, quart de pont, demi-pont push-pull et linéarisation par quart de pont actif.

Énoncé

I. Capteur résistif

Soit un capteur dont l'impédance purement résistive R_c évolue en fonction du mesurande m sur l'étendue de mesure $m \in [0,2]$ selon le tableau 5.1.

Tableau 5.1 - Résistance du capteur

m	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
R_c	100,00	101,00	102,01	103,03	104,05	105,08	106,11
$R_{c,lin}$	99,81	100,87	101,93	102,99	104,05	105,11	106,17
m	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3
R_c	107,15	108,19	109,24	110,30	111,36	112,43	113,51
$R_{c,lin}$	107,23	108,29	109,35	110,41	111,47	112,53	113,59
m	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
R_c	114,59	115,68	116,77	117,87	118,97	120,08	121,20
$R_{c,lin}$	114,65	115,71	116,77	117,83	118,89	119,95	121,01

Une étude par régression polynomiale sur les valeurs montre que le comportement de ce capteur est très bien décrit par la loi suivante :

$$R_c(m) = am^2 + bm + c \quad \text{avec} \quad a = 0,3 \quad b = 10 \quad \text{et} \quad c = 100$$

Sur l'étendue de mesure on pratique, par la méthode des moindres carrés, une régression linéaire de la caractéristique du capteur. On obtient une approximation linéarisée de la loi de variation du capteur donnée par :

$$R_{c,lin}(m) = b'm + c' \quad \text{avec} \quad b' = 10,6 \quad \text{et} \quad c' = 99,81$$

Ceci entraîne une modélisation linéaire de la résistance du capteur, $R_{c,lin}$, indiquée dans le tableau précédent.

Les données de ce problème sont téléchargeables (cf. l'avant-propos de l'ouvrage).

5 • Capteur résistif non linéaire

- 5.1 Calculer l'écart à la linéarité δR_c sur l'étendue de mesure donnée.
- 5.2 Calculer l'erreur de linéarité ε .
- 5.3 Donner sous l'approximation linéaire, la sensibilité S_c du capteur.
- 5.4 Autour de quelle valeur m_0 du mesurande vaut-il mieux évaluer les évolutions de celui-ci, valeur pour laquelle on posera $R_c(m_0) = R_{c0}$?
- 5.5 En posant que pour m évoluant de m_0 , R_c évolue de ΔR_c depuis R_{c0} , mettre ΔR_c sous la forme $\Delta R_c = A(\Delta m)^2 + B\Delta m$.

II. Montage potentiométrique – Alimentation en tension

Ce capteur est monté dans un conditionneur potentiométrique alimenté par un générateur de tension constante, de f.e.m. V_g et d'impédance interne négligeable ($R_g = 0$) (voir figure 5.1).

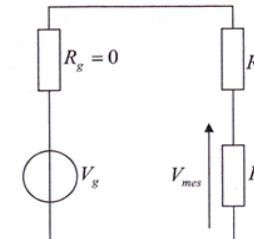


Figure 5.1 - Montage potentiométrique

On limite l'utilisation du capteur à l'étendue de mesure donnée et on utilise pour l'expression de la résistance du capteur l'expression quadratique précédente de R_c supposée exacte.

- 5.6 Donner l'expression de la tension de mesure V_{mes} en fonction de V_g , R_c et R puis en fonction de V_g , ΔR_c , R_{c0} et R .
- 5.7 En posant que pour la valeur de référence m_0 , la tension de mesure s'écrit V_{mes0} , calculer l'évolution ΔV_{mes} de la tension de mesure pour une évolution Δm du mesurande entraînant une variation ΔR_c de la résistance du capteur.
- 5.8 Quelle valeur optimale faut-il alors donner à R ? Que devient alors l'expression de ΔV_{mes} ?

PROBLEME D'APPLICATION N°5 (SUITE)

Problème 5

5.9 En déduire l'approximation linéaire $\Delta V_{mes,lin}$ de ce résultat en fonction de Δm ?

5.10 Calculer dans cette approximation la sensibilité réduite S_r de la mesure.

5.11 Le but de la mesure est d'extraire l'évolution du mesurande de l'évolution de la tension de mesure. Ceci se fait très simplement de manière électronique si ΔV_{mes} est proportionnel à Δm .

Déterminer l'erreur de linéarité, $\varepsilon_1 = (\Delta V_{mes} - \Delta V_{mes,lin}/\Delta V_{mes})$, lorsqu'on approche ΔV_{mes} par $\Delta V_{mes,lin}$. On calculera son approximation à l'ordre 2 en Δm et on cherchera la valeur maximale sur l'étendue de mesure.

III. Montage potentiométrique – Alimentation en courant

On remplace dans le conditionneur précédent la source de tension par une source de courant I_g parfaite. On garde évidemment la même valeur de référence m_0 du mesurande que précédemment, valeur pour laquelle on a $R_c(m_0) = R_{c0}$.

5.12 Donner l'expression de la tension de mesure V_{mes} en fonction de I_g , R_c puis déterminer l'expression de l'évolution ΔV_{mes} de la tension de mesure pour une évolution Δm du mesurande entraînant une variation ΔR_c de la résistance du capteur.

5.13 En déduire l'approximation linéaire $\Delta V_{mes,lin}$ de ΔV_{mes} .

5.14 Comparer ce résultat au cas de l'alimentation en tension.

5.15 Déterminer l'erreur de linéarité ε_2 si on approche ΔV_{mes} par $\Delta V_{mes,lin}$ et l'évaluer à l'ordre 2 en Δm .

IV. Montage en quart de pont

Le capteur est monté dans un pont alimenté par un générateur de tension constante de f.e.m. V_g et d'impédance interne négligeable ($R_g = 0$) comme sur la figure 5.2. La valeur de référence du mesurande reste identique.

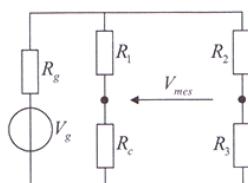


Figure 5.2 - Montage en quart de pont

5.16 Donner l'expression de la tension de mesure V_{mes} en fonction de R_c , R_1 , R_2 , R_3 et V_g .

5.17 Donner les valeurs de R_1 , R_2 et R_3 permettant l'équilibre du pont pour la valeur m_0 du mesurande.

5.18 En déduire, pour une variation Δm du mesurande à partir de la valeur m_0 , l'expression rigoureuse de la variation ΔV_{mes} en fonction de ΔR_c , R_{c0} et V_g puis en fonction de A , B , Δm , R_{c0} et V_g .

5.19 Donner l'approximation linéaire $\Delta V_{mes,lin}$ de ΔV_{mes} en fonction de R_{c0} , B , V_g et Δm .

5.20 Toujours dans l'approximation linéaire, en déduire l'expression de la sensibilité réduite S_r de la mesure.

5.21 En fonction de R_{c0} , A , B et Δm , calculer l'erreur de linéarité ε_3 , l'évaluer au second ordre en Δm et en donner la valeur maximale.

V. Montage en demi-pont push-pull

On considère un deuxième capteur identique à R_c que l'on substitue à R_1 . R_c et R_1 fonctionnent en mode push-pull.

5.22 Exprimer ΔV_{mes} en fonction de ΔR_c , ΔR_1 , R_{c0} et V_g en supposant que l'équilibre du pont est toujours réalisé pour la même valeur m_0 .

5.23 Donner les expressions de ΔR_c et ΔR_1 .

5.24 En tenant compte des expressions précédentes, donner la nouvelle expression de ΔV_{mes} .

5.25 Donner l'approximation linéaire $\Delta V_{mes,lin}$ de ΔV_{mes} .

5.26 Toujours dans l'approximation linéaire, en déduire l'expression de la sensibilité réduite S_r de la mesure.

5.27 En fonction de R_{c0} , A et Δm , calculer l'erreur de linéarité ε_4 . En donner la valeur maximale.

VI. Linéarisation amont – Montage en quart de pont actif

On désire éventuellement améliorer la linéarité de façon active à l'aide du montage suivant où seul R_c est un capteur.

PROBLEME D'APPLICATION N°5 (SUITE)

Problème 5

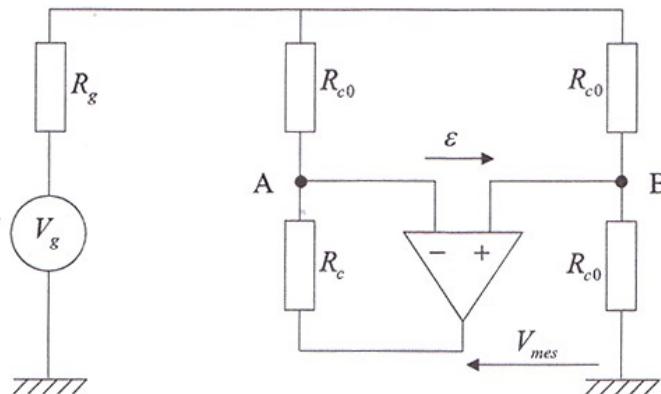


Figure 5.3 - Montage en quart de pont actif

- 5.28 L'amplificateur opérationnel étant supposé idéal, exprimer V_A et V_B .
- 5.29 En déduire ΔV_{mes} en fonction de ΔR_c , R_{c0} et V_g puis A , B , Δm et V_g .
- 5.30 Donner l'approximation linéaire $\Delta V_{mes,lin}$ de ΔV_{mes} .
- 5.31 En déduire l'expression de la sensibilité réduite S_r de la mesure.
- 5.32 Calculer l'erreur de linéarité ε_5 , l'évaluer à l'ordre 2 et calculer sa valeur maximale.

VII. Avantages et inconvénients des différents conditionneurs

Commenter les différentes solutions mises en œuvre. Quels en sont les avantages et les inconvénients ?

5. CONDITIONNEURS DU SIGNAL :

Le capteur ET son conditionneur éventuel (potentiomètre, pont, oscillateur) sont la source du signal électrique dont la chaîne de mesure doit assurer le traitement.

5.1 Adaptation de la source du signal à la chaîne de mesure :

Le capteur, associé à son conditionneur lorsqu'il est passif, équivaut à un générateur constitué d'une source et d'une impédance interne, et **délivrant le signal au circuit qui le charge**.

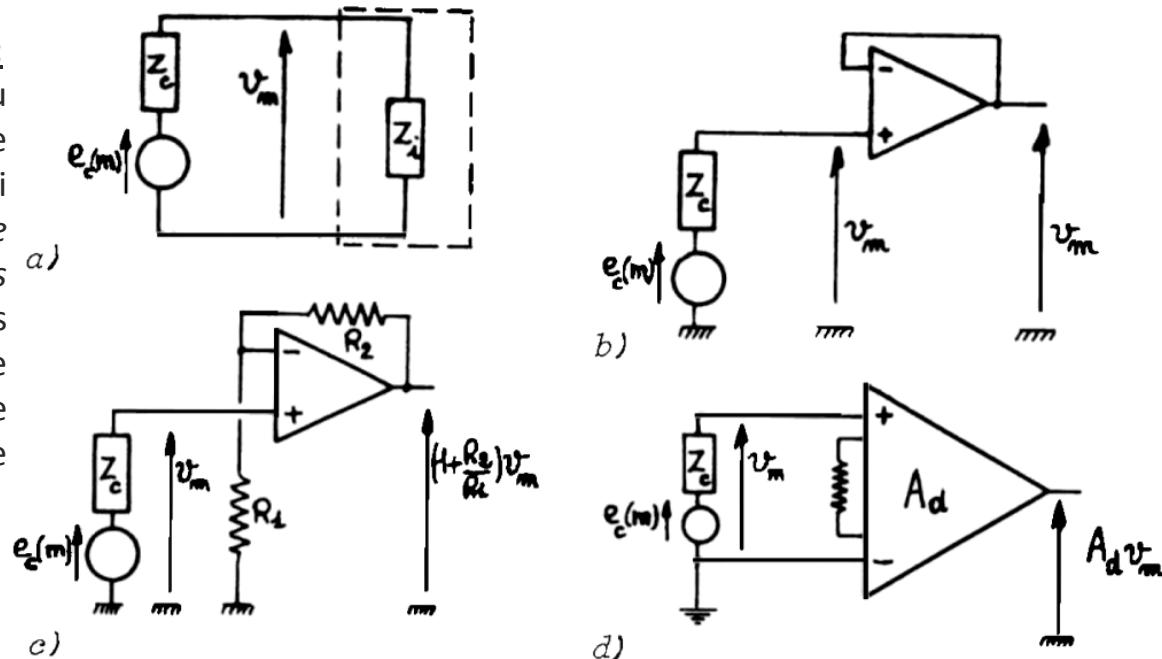
Afin que le signal soit obtenu dans les meilleures conditions:

- d'une part de sensibilité et d'autre part de stabilité vis-à-vis des variations éventuelles de l'impédance interne, **le générateur équivalent doit être chargé par une impédance appropriée**.

1 – Capteur équivalent à une source de tension:

Lorsque l'information correspondant au mesurande m est délivrée sous la forme d'une f.e.m. $e_c(m)$ en série avec une impédance Z_c qui peut être importante et variable (*thermocouple avec liaison longue, capteur résistif monté dans un pont de Wheatstone*) le circuit aux bornes duquel est recueilli le signal V_m doit être d'impédance d'entrée Z_i très supérieure à Z_c de façon à minimiser l'influence de cette dernière (figure a) : $V_m = e_c * (Z_i) / (Z_i + Z_c)$

$$\Rightarrow \text{Si } Z_i \gg Z_c \Rightarrow V_m = e_c * (Z_i) / (Z_i + Z_c) \sim e_c$$



Adaptation à la chaîne de mesure d'un capteur source de tension : a) schéma électrique équivalent; b) montage suiveur; c) montage non-inverseur; d) amplificateur d'instrumentation.

5. CONDITIONNEURS DU SIGNAL :

2 – Capteur électriquement équivalent à une source de courant

$i_c(m)$ en parallèle avec une impédance interne Z_c (*photodiode ou photomultiplicateur par exemple*),

il faut que l'impédance d'entrée Z_i du circuit de mesure soit très inférieure à Z_c pour que le signal recueilli, i_m , soit pratiquement égal à i_c et indépendant de Z_c (figure a) : $i_m = i_c * (Z_c) / (Z_i + Z_c)$

$$\Rightarrow \text{Si } Z_i \ll Z_c \Rightarrow i_m = i_c * (Z_c) / (Z_i + Z_c) \sim i_c$$

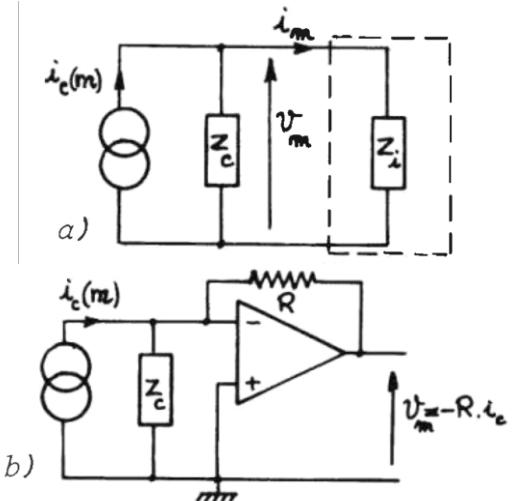
Remarque: cependant, la tension V_m aux bornes de Z_i risque dans ce cas d'être elle-même très faible. L'emploi d'un convertisseur courant-tension permet à la fois de réduire l'influence de Z_c et d'obtenir une tension V_m importante (figure b).

3 – Si le capteur est un générateur de charge $q_c(m)$,

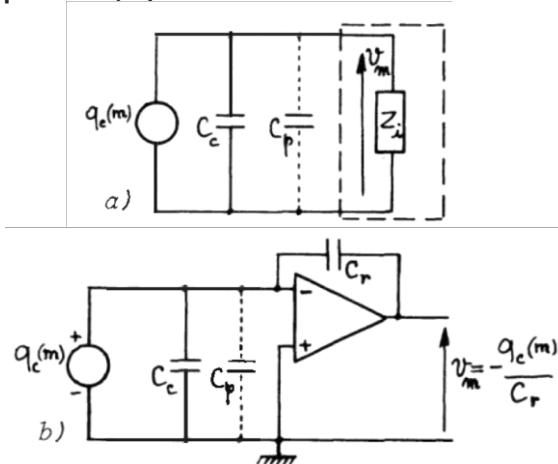
d'impédance interne capacitive (C_c , *cristal piézoélectrique par exemple*), il n'est en général pas possible de placer à ses bornes un circuit dont l'impédance d'entrée serait résistive :

en effet, d'une part la décharge de la capacité risquerait d'être trop rapide pour permettre l'exploitation du signal et d'autre part, la tension recueillie qui dépend de l'ensemble des capacités (C_p) du montage, capacités des câbles par exemple, serait sensible à leurs variations erratiques (figure a).

Le dispositif à utiliser dans ce cas est l'amplificateur de charge (figure b) qui délivre une tension proportionnelle à la charge et indépendante de la capacité du capteur et des câbles de liaison.



Adaptation à la chaîne de mesure d'un capteur source de courant : a) schéma électrique équivalent ; b) convertisseur courant-tension.



Adaptation à la chaîne de mesure d'un capteur source de charge : a) schéma électrique équivalent ; b) amplificateur de charge.

5. CONDITIONNEURS DU SIGNAL :

• 5.2 Linéarisation:

Il existe un certain nombre de procédés, dits de linéarisation, qui permettent de corriger le défaut de linéarité d'un capteur ou de son conditionneur éventuel lorsqu'ils présentent dans leur domaine d'emploi des écarts à la linéarité interdisant de considérer la sensibilité comme constante à la précision exigée des mesures.

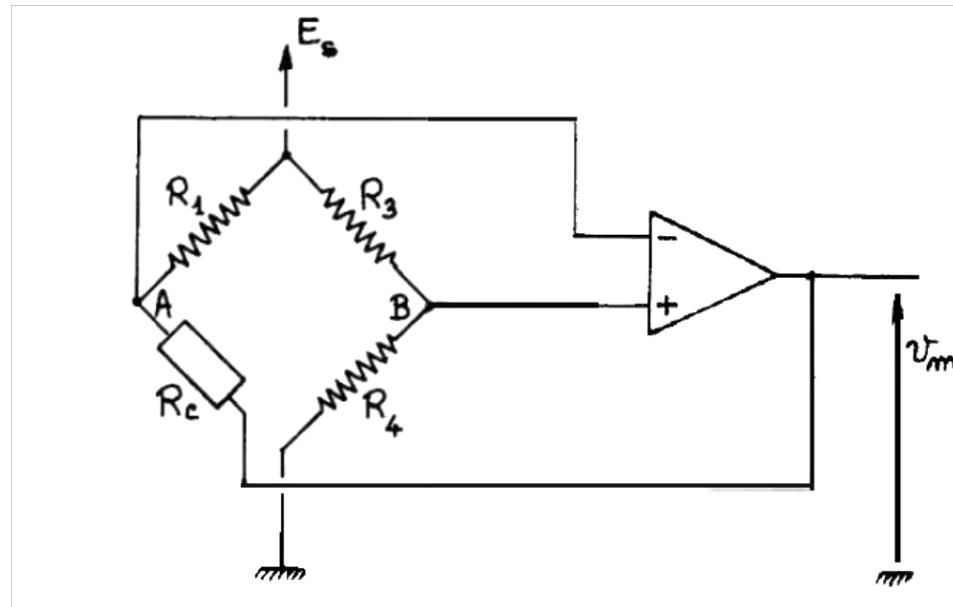


Figure 4.4 - Linéarisation du pont de Wheatstone par réaction sur la tension de déséquilibre.

5. CONDITIONNEURS DU SIGNAL :

• 5.3 Amplification du signal et réduction de la tension de mode commun :

5.3.1 Introduction :

La mesure de tension est toujours une mesure de différence de potentiel, on appellera :

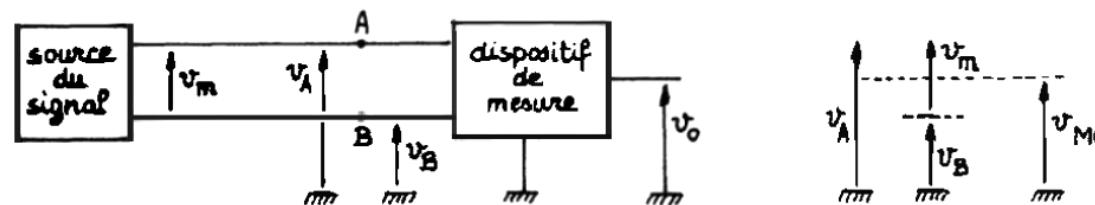
- mesure simple la mesure de tension entre deux points dont l'un est la masse du montage.
- mesure différentielle une mesure de tension entre deux points quelconques d'un circuit.

5.3.2 Mode commun et mode différentiel:

Dans un circuit où la tension de mesure V_m est la tension différentielle entre deux conducteurs: $V_m = V_A - V_B$ (figure), la tension de mode commun V_{MC} **représente la valeur de tension commune à V_A et V_B et qui n'est support d'aucune information**; en posant : $v_{MC} = \frac{v_A + v_B}{2}$

on peut écrire :

$$v_A = v_{MC} + \frac{v_m}{2} \quad v_B = v_{MC} - \frac{v_m}{2}$$



PROBLEME: La tension de mode commun V_{MC} peut être très >> au signal V_m et dans certains cas, l'expérimentateur ne la connaît pas avec précision.

Un des problèmes les plus importants en instrumentation est donc l'élimination ou réjection du mode commun afin d'obtenir et pouvoir **traiter dans l'installation de mesure un signal proportionnel à V_m et donc indépendant de V_{MC} .**

5. CONDITIONNEURS DU SIGNAL :

5.3.3 Origine des tensions de mode commun :

5.3.3.1 Tension de mode commun due à l'alimentation:

Le cas se présente lorsque V_A et V_B dépendent de l'alimentation.

$$Rc = Rco + \Delta Rc$$

$$V_A = \frac{Rc}{Rc + Rco} E$$

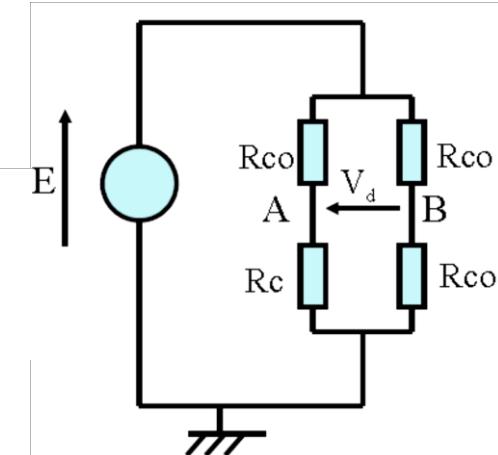
$$V_B = \frac{Rco}{Rco + Rco} E = 0,5E$$

AN: $E=10$ V; R_c est une Pt 100: $R_{c0}=100\Omega$ et $R_c=R_{c0}(1+\alpha T)$ avec $\alpha=3,9 \cdot 10^{-3}/^\circ C$

Calculer $V_D=V_A-V_B$ et V_{MC} pour $T=1^\circ C$ conclure

Réponse : $R_c(1^\circ C)=100.39\Omega$

$V_A=5.0097V$, $V_B=5V$, $V_D=0.0097V \sim 10mV$, $V_{MC}=5.0048V \Rightarrow V_{MC} >> V_D$



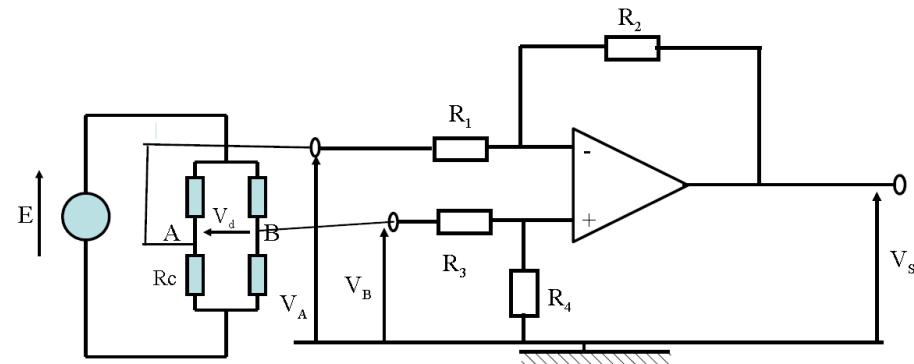
Exemple du pont de Wheatstone: la mesure est bien une mesure différentielle

=> Montage différentiel simple à AO parfait

Si $R_1 = R_3$ et $R_2 = R_4$ on a $V_s = (V_A - V_B) (R_4/R_3) = G (V_A - V_B)$

Si les résistances ne sont pas égales (même si l'AO est parfait) on va amplifier aussi V_{MC} .

Le facteur d'amplification de V_{MC} , G_{MC} , sera faible mais V_{MC} peut être grand devant $V_d=V_A-V_B$ donc en sortie on peut retrouver une partie de la tension de mode commun.



On définit le **Taux de Rejection de Mode Commun** comme étant: $TRMC=20*\log|G/G_{MC}|$

5. CONDITIONNEURS DU SIGNAL :

• 5.3.3.2 Tension de mode commun de masse:

Entre deux points de mise à la masse éloignés existent en général :

- une impédance de masse Z_M de l'ordre de l'ohm ;
- une f.e.m. de masse e_M qui a pour origines principales les inductions électromagnétiques (50 Hz) et la circulation de courants de retour des diverses installations.

Les distances entre points de mise à la masse pouvant atteindre des centaines de mètres dans les installations industrielles, la f.e.m. de masse peut être supérieure à plusieurs dizaines de volts.

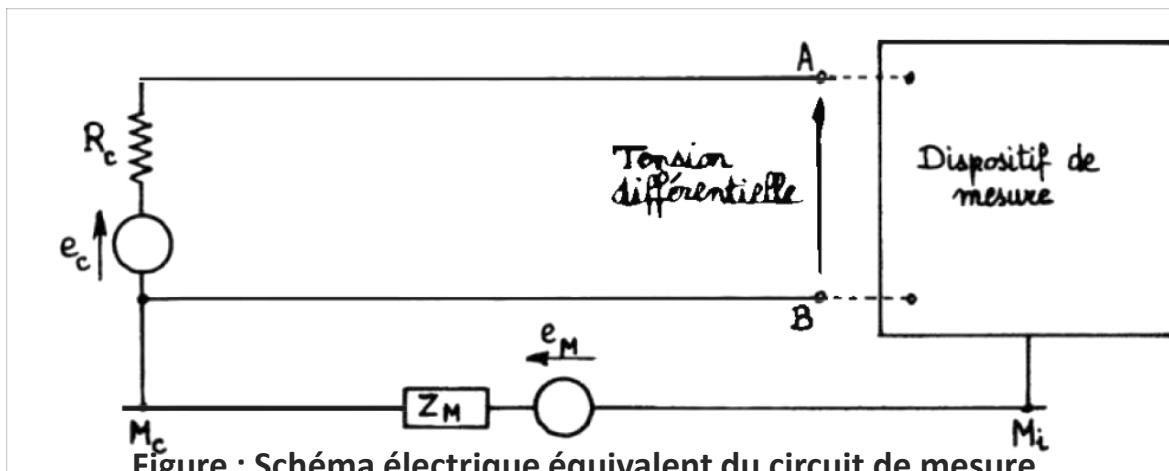


Figure : Schéma électrique équivalent du circuit de mesure en présence d'une f.e.m. de masse.

$$V_B = e_M, V_A = e_M + e_c \text{ avec habituellement } e_c \ll e_M \\ \text{Soit } v_{MC} = e_M \text{ et } V_m = e_c$$

Avantages: Coût faible et réalisation facile

Inconvénients: Nécessité d'apparier les résistances pour obtenir un bon TRMC

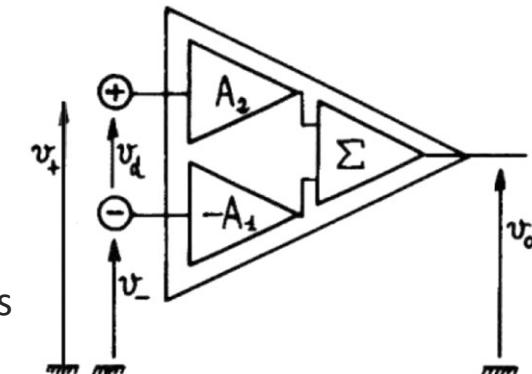
5. CONDITIONNEURS DU SIGNAL :

• 5.3.3 Amplificateur différentiel et taux de réjection du mode commun

Lorsque le signal apparaît comme tension différentielle aux extrémités d'une liaison, son traitement par un amplificateur différentiel s'impose.

Un amplificateur différentiel (figure) peut être considéré comme constitué :

- de deux voies amplificatrices :
 - une voie inverseuse de gain $-A_1$ dont l'entrée est marquée - et
 - une voie non inverseuse de gain A_2 dont l'entrée est marquée + ;
 - les valeurs A_1 et A_2 devant être aussi proches que possible;
- d'un sommateur additionnant les tensions fournies par chacune des voies précédentes et dont la sortie est celle de l'amplificateur différentiel.



$$v_0 = A_2 \cdot v_+ - A_1 \cdot v_- \quad \text{Or} \quad v_{MC} = \frac{v_+ + v_-}{2} \quad \text{et} \quad v_d = v_+ - v_-$$

$$\rightarrow v_0 = \frac{A_1 + A_2}{2} \cdot v_d + (A_1 - A_2) \cdot v_{MC}$$

On définit alors les gains :

- Gain différentiel : $A_d = (A_1 + A_2)/2$
- Gain en mode commun : $A_{MC} = A_1 - A_2$

$$\rightarrow v_0 = A_d \cdot \left(v_d + \frac{A_{MC}}{A_d} \cdot v_{MC} \right) = A_d \cdot \left(v_d + \frac{1}{\tau_r} \cdot v_{MC} \right)$$

Taux de réjection du mode commun TRMC : $\tau_r = A_d / A_{MC}$

AN: $V_d=2mV$, $V_{MC}=5V$, $TRMC=88 dB$ et $G=1000$ (valeurs obtenues pour un AO parfait et des résistances à 1%), calculer l'erreur sur V_s due à V_{MC}

6. SYSTEMES AUTOMATISES:

Les signaux issus de capteurs sont la plupart du temps utilisés dans un système de traitement numérique (microprocesseurs, microcontrôleur, API....).

Ce système de traitement permet non seulement d'obtenir la valeur du mesurande mais également son exploitation (action sur les différents actionneurs, stockage en fonction du temps par exemple)

A la sortie de la chaîne on a donc un système de contrôle, automates, composé par un composant central

Exemple du microcontrôleur; il se présente sous la forme d'un circuit intégré réunissant tous les éléments d'une structure à base de microprocesseur, on trouve notamment:

- Un microprocesseur (C.P.U.),
- De la mémoire (RAM et EEPROM),
- Des interfaces parallèles pour la connexion
- Des interfaces pour la connexion avec d'autres systèmes, par exemple une liaison USB vers un PC, pour le dialogue vers d'autres microcontrôleurs ou pour communiquer avec l'extérieur.
- Des timers pour générer ou mesurer des signaux avec une grande précision temporelle.
- ...

Les microcontrôleurs sont utilisés:

- dans les systèmes embarqués, comme les contrôleurs des moteurs automobiles,
- les systèmes de régulation (température, vitesse, position...),
- les télécommandes,
- l'électroménager, les jouets, la téléphonie mobile...

Certains capteurs donnent directement des valeurs exploitables par un système numérique (capteurs numériques, capteurs TOR), d'autres nécessitent l'emploi d'un convertisseur analogique-numérique.

Cette partie sera amplement décrite dans la section MOSH de l'UF

7. APPLICATIONS

7.1 CAPTEURS OPTIQUES :

7.1.1 Variation de flux lumineux : capteurs optique et optoélectronique

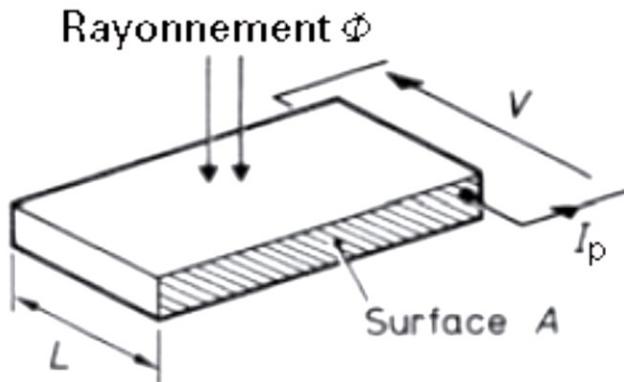
7.1.1.1 PhotodéTECTEURS:

& Cellule photoconductrice: La photoconduction résulte d'un effet photoélectrique interne.

La lumière libère dans le matériau semi-conducteur des charges électriques provoquant une augmentation corrélative de la conductivité (figure 22). Le courant photoélectrique I_p s'écrit :

avec V tension appliquée, σ_{ph}
conductivité photo-induite, σ_0
conductivité à l'obscurité.

$$I_p = V \cdot (\sigma_{ph} - \sigma_0) \cdot \frac{A}{L}$$



7. APPLICATIONS

& Photodiode à jonction PN.

La zone de charge d'espace, localisée entre une jonction d'un semi-conducteur de type N et d'un semi-conducteur de type P, est dénuée de porteurs libres en équilibre à cause du champ électrique qui établit entre les deux éléments de semi-conducteur une barrière de potentiel ϕ .

Celle-ci est modifiée par une tension extérieure appliquée.

Un courant traverse alors la jonction.

Sous l'action du rayonnement lumineux, il y a augmentation des porteurs minoritaires et le courant traversant la diode s'écrit :

$$I = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] - I_{ph}$$

avec I_0 courant de saturation inverse, e charge de l'électron, V tension appliquée, k constante de Boltzmann, T température thermodynamique, I_{ph} courant dû à l'éclairement.

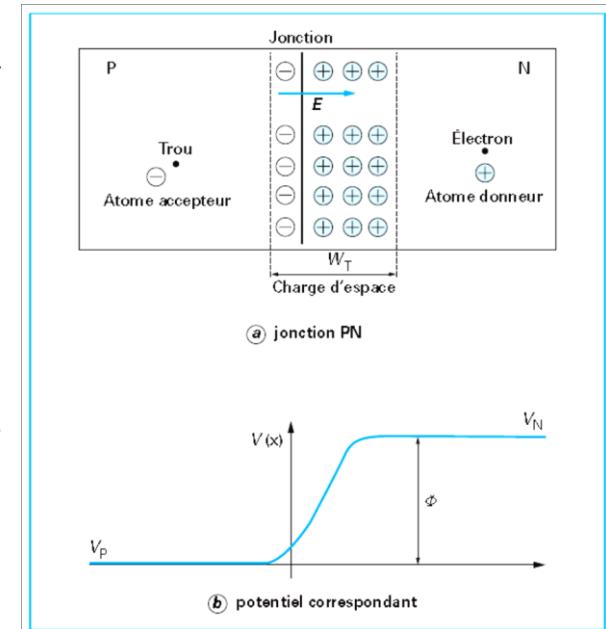


Figure 22 – Cellule photoconductrice, Figure 23 – Représentation d'une jonction PN à l'équilibre thermodynamique en circuit ouvert (d'après http://www.brive.unilim.fr/files/fichiers/quere/Elec_phys/CHAP_2.pdf)

Ces photodiodes peuvent fonctionner:

- en mode photoconducteur (une source polarise la diode en inverse, et le signal est recueilli aux bornes d'une résistance) ou
- en mode photovoltaïque (aucune source de polarisation externe).

7. APPLICATIONS

Problème 11: Photo-résistance –LDR: fonctionnement et utilisation pour le centrage d'un ruban défilant.

Notions abordées:

Capteurs semi-conducteurs

Expression de la résistance du capteur

Montage Push-pull

7. APPLICATIONS

• 7.2 CAPTEURS DE GAZ:

Les capteurs de mesure de la concentration d'une espèce chimique dans un mélange gazeux connaissent un développement important.

L'importance de l'analyse de la composition des gaz ne fait que croître aujourd'hui car elle est liée à des préoccupations majeures de notre temps :

- économie d'énergie,
- de matières premières,
- contrôle qualité,
- optimisation des procédés industriels,
- protection de l'environnement...

De nombreux nouveaux capteurs de composition des gaz concernent des molécules consommées ou produites lors de l'oxydation des combustibles fossiles :

O₂, O₃, CO, CO₂, H₂O, SO₂, SO₃, NO_x, CH_x...

Le développement des capteurs « tout solide » présentent de nombreux avantages:

- réalisation simple,
- miniaturisation,
- utilisation de techniques propres à la microélectronique, => coût de fabrication souvent peu élevé,
- grande sensibilité,
- alimentation basse tension ...

7. APPLICATIONS

7.2.1 Caractéristiques métrologiques :

Le temps de réponse t_r des capteurs est fonction des propriétés catalytiques, de la composition du gaz, de la température et parfois de la géométrie de la cellule.

Dans le cas des capteurs à oxygène:

- le temps de réponse est de quelques secondes si la pression d'oxygène du gaz est $> 1 \text{ Pa}$ ou avec des mélanges CO_2/CO et $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$;
- il est de quelques minutes si la pression d'oxygène est $< 0,1 \text{ Pa}$.

Sous vide, le temps de réponse du capteur est nettement plus court que celui obtenu lorsque la même pression partielle d'oxygène est fixée par dilution dans un gaz inerte.

7.2.2 Caractéristiques technologiques :

L'impédance des capteurs aux températures habituelles d'utilisation étant généralement notable, il est souvent indispensable d'effectuer la mesure avec un millivoltmètre à haute impédance d'entrée ($10^{10} - 10^{12} \Omega$).

Sauf si vous concevez correctement une chaîne permettant d'adapter l'impédance du capteur.

7. APPLICATIONS

- Capteurs à variation d'impédance :

7.2.3.1 Mesure de la conductivité superficielle :

Le principe du capteur repose sur la variation de la conductivité électrique d'un solide semi-conducteur déposé en couche mince, due à l'adsorption d'un gaz sur sa surface.

Exemple: Les capteurs utilisant l'oxyde d'étain (SnO_2) sont fabriqués industriellement à grande échelle (dès 1968) ont été initialement développés pour la détection des fuites de gaz domestique, puis pour diverses applications (fours micro-ondes, détection d'hydrogène sulfuré, du monoxyde de carbone, des fréons, etc.) et progressivement étendus: **contrôle de la pollution, sécurité en milieux industriel et domestique, contrôle des procédés industriels, industrie agroalimentaire, etc.**

La figure 19.9 représente le capteur le plus utilisé :

- Un film mince d'oxyde d'étain (SnO_2) est déposé sur un tube support en alumine Al_2O_3 .
- Deux fils d'or, reliés à deux anneaux métalliques réalisés sur le tube support, servent d'amenée de courant.
- Un filament, inséré à l'intérieur du tube support, permet de porter, par effet Joule, le capteur à sa température de fonctionnement, soit 350°C environ.

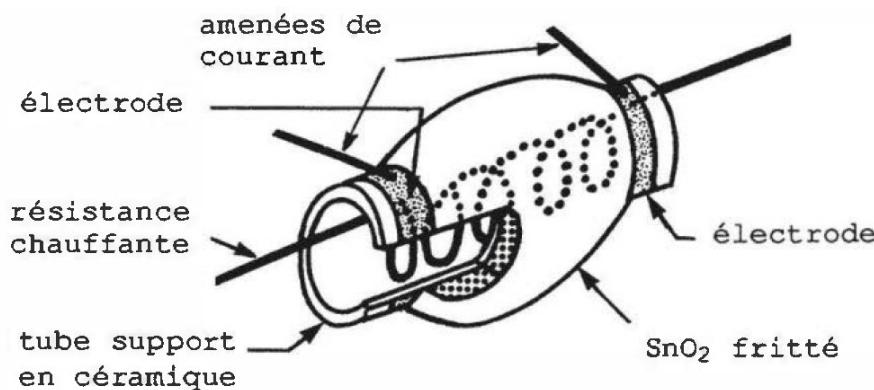


Figure 19.9 - Schéma d'un capteur à oxyde semi-conducteur (type « FIGARO »).

L'adsorption d'un gaz à la surface de l'oxyde semi-conducteur crée une charge d'espace provoquant une variation de la conductivité superficielle, $\Delta\sigma$, selon :

$$\Delta\sigma = q \cdot \mu_S \cdot \Delta N$$

Où ΔN est la variation de la densité de charges due à l'adsorption du gaz analysé (un excès ou un défaut de charges), q , la charge des espèces mobiles et μ_S leur mobilité superficielle.

7. APPLICATIONS

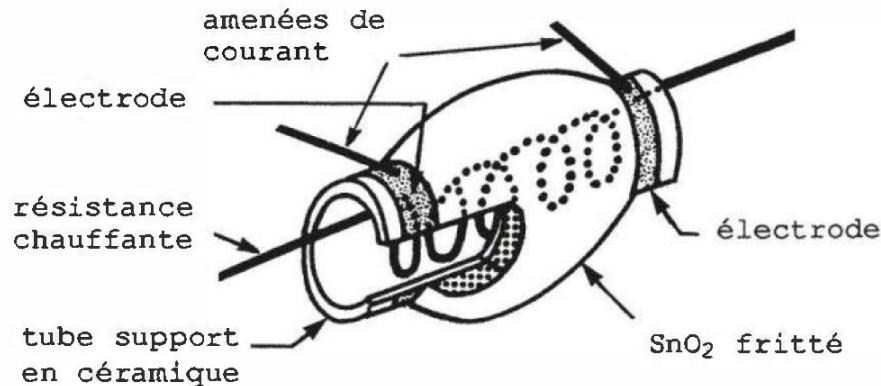


Figure 1.9.9 - Schéma d'un capteur à oxyde semi-conducteur (type « FIGARO »).

Caractéristiques de ces capteurs :

- principaux gaz détectés : CO , CH_4 , H_2S et NO_x .
- température de fonctionnement de 350°C environ
- relativement peu sélectifs
- la conductivité superficielle est fonction de la température ambiante, de l'humidité et de la pression partielle d'oxygène. La sélectivité est améliorée par un choix approprié de la température de fonctionnement et par l'insertion dans la couche d'oxyde d'un matériau catalytique tel que Pd, Cu, Ni, Pt.
- Le temps de réponse du capteur est compris entre quelques secondes et quelques minutes.
- La limite de détection est de l'ordre de 1 ppm.
- Le principal inconvénient concerne la mauvaise stabilité dans le temps du capteur qui doit être périodiquement ré-étalonné ou changé. **Son principal avantage est d'être peu coûteux.**

7. APPLICATIONS

• 7.2.3.2 Mesure de la capacité électrique :

Des capteurs capacitifs sont principalement utilisés pour le dosage de la vapeur d'eau présente dans un gaz.

Leur fonctionnement est basé sur le changement important de capacité que provoque l'adsorption d'eau par un produit diélectrique.

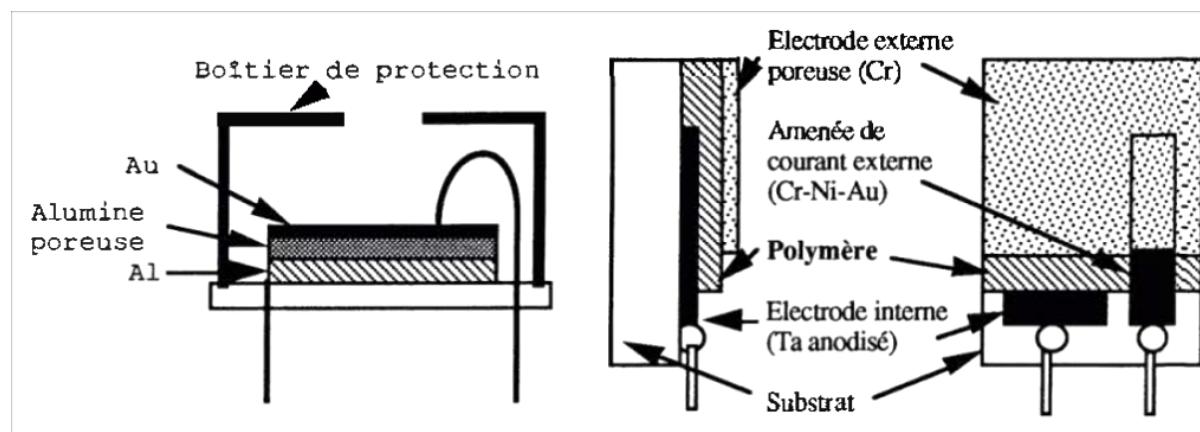
La capacité du matériau varie linéairement avec l'humidité relative, en première approximation.

Le diélectrique peut être constitué d'alumine Al_2O_3 poreuse déposée par voie électrochimique sur une plaquette d'aluminium constituant l'une des électrodes (figure a).

L'autre électrode est obtenue par dépôt métallique sur l'autre face du diélectrique.

Dans un autre dispositif, le diélectrique est constitué d'une couche de quelques microns d'un polymère déposé sur une électrode en tantale.

La deuxième électrode est obtenue par dépôt d'une couche mince métallique (chrome ou or) sur le polymère (figure b).

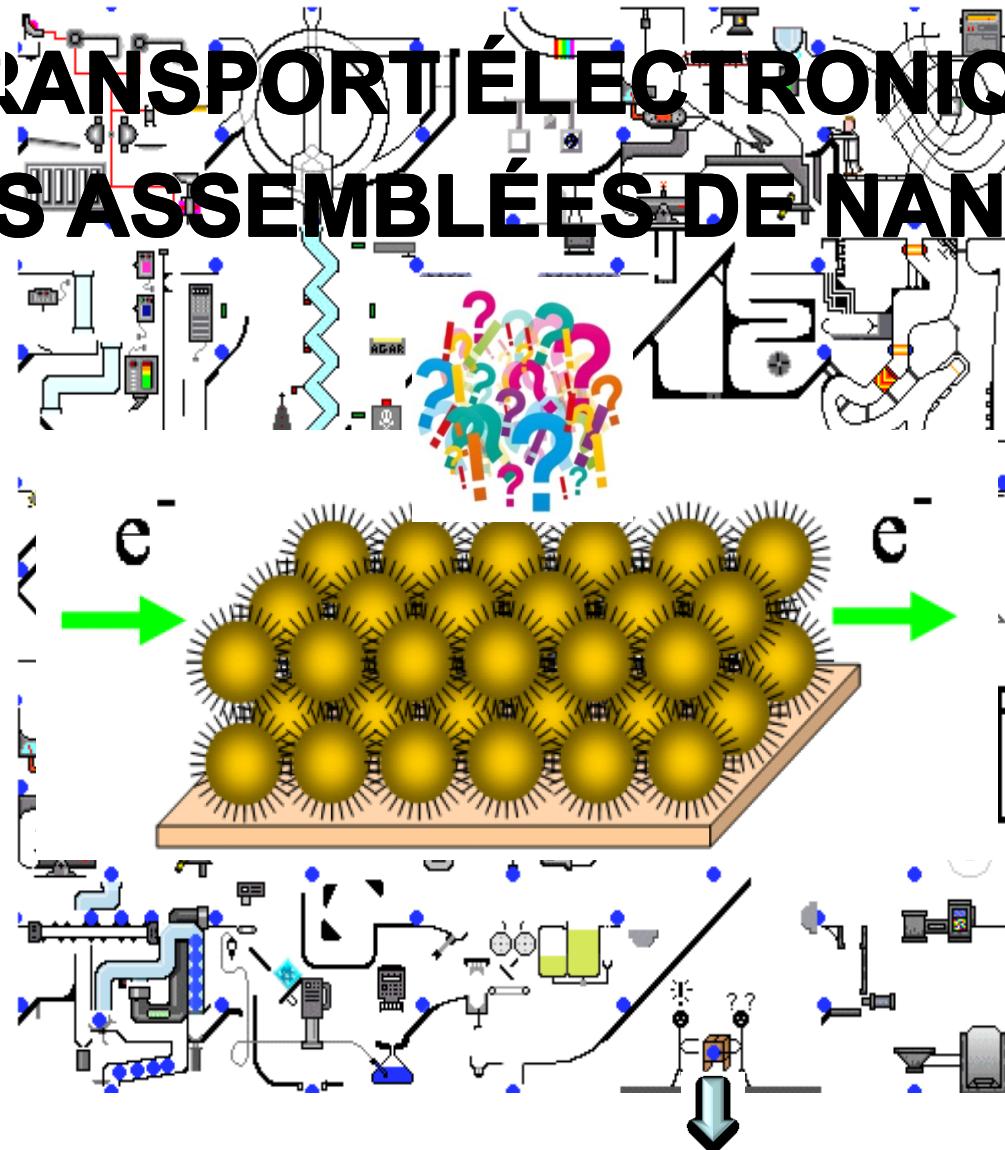


Caractéristiques de ces capteurs :

- La plage de mesure de ces capteurs s'étend de 0 % à 100% d'humidité relative.
- La précision de mesure est de quelques %.
- Le temps de réponse est, en général, de l'ordre de quelques secondes.

Remarque: dans le stage, vous manipulerez un capteur de gaz à nanoparticules.

TRANSPORT ÉLECTRONIQUE DANS DES ASSEMBLÉES DE NANO-OBJETS



TRANSPORT ELECTRONIQUE DANS DES ASSEMBLEES GRANULAIRES DE NPs

1 - « Transport électronique »:

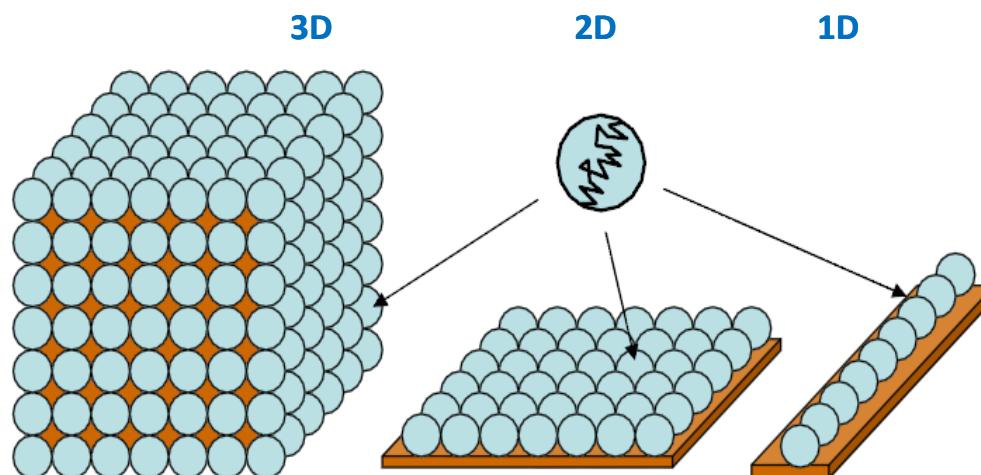
- Sous stimulus d'un champ électrique ou d'un gradient de température => système hors-équilibre
- Le système répond par un flux (e.g. de charge) => siège de phénomènes de transport
- A t=0, le régime de flux est d'abord transitoire puis atteint un régime permanent.
- Quand les contraintes sont supprimées => retour à l'équilibre suivant un processus de relaxation irréversible

=> Pb à N corps hors équilibre où il s'agit de décrire la réponse de la mer d'électrons, interagissant à la fois avec le réseau cristallin et avec elle-même, à l'application d'un stimulus

2 – Assemblées granulaires de NPs:

Réseau de NPs, de taille nanométrique, de forme quelconque et d'arrangement pouvant être périodique ou irrégulier, « mésoscopiquement » reliées par un couplage électronique intergrain décrit par des matrices tunnels.

Exemples d'assemblées:



L'arrangement des grains pouvant être :
- périodique
- ou irrégulier

BARRIERE TUNNEL: TUNNELING À TRAVERS UNE BARRIÈRE DE POTENTIEL 1D

1 - Barrière de potentiel V_0 et largeur L :

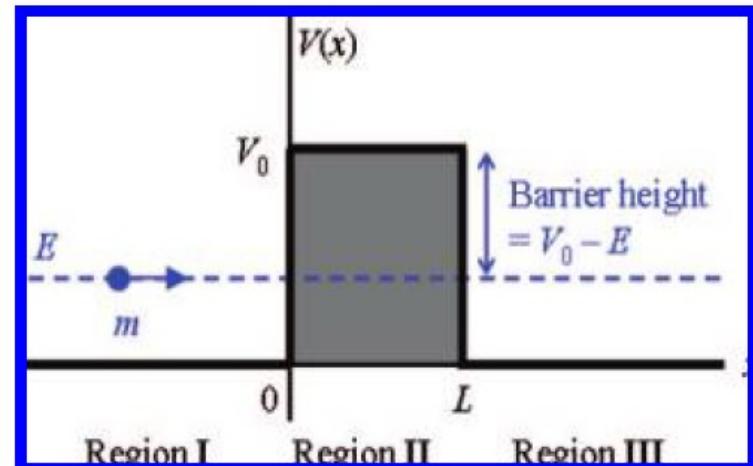
$$\begin{cases} -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + V_0\psi(x) = E\psi(x) & 0 \leq x \leq L, \\ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = E\psi(x) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \psi_I(x) = A e^{i\alpha x} + B e^{-i\alpha x} & \text{Partie incidente} \\ \psi_{II}(x) = C e^{\kappa x} + D e^{-\kappa x} & \text{Partie réfléchie} \\ \psi_{III}(x) = F e^{i\alpha x} & \text{Partie transmise} \end{cases}$$

Barrière épaisse: $\kappa L \gg 1$

*Proba.
transmission*

$$|T|^2 = \left| \frac{F}{A} \right|^2$$



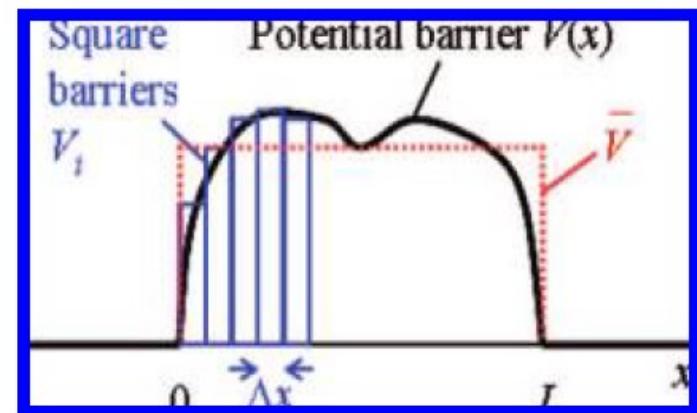
$$|T|^2 \approx \left| \frac{4i\alpha\kappa e^{-i\alpha L}}{(i\alpha - \kappa)^2 e^{\kappa L}} \right|^2 = \frac{16\alpha^2\kappa^2}{(\alpha^2 + \kappa^2)^2} e^{-2\kappa L} = 16 \cdot \left(\frac{E}{V_0} \right) \left(1 - \frac{E}{V_0} \right) e^{-2\kappa L}$$

$$|T|^2 \approx e^{-2\kappa L} \quad \alpha = \sqrt{2mE/\hbar} \quad \kappa = \sqrt{2m(V_0 - E)/\hbar} \quad \beta = 2\kappa$$

Cte décroissance tunnel

2 - Slowly varying arbitrary shape:

$$|T|^2 \approx \exp \left(-\frac{2\sqrt{2m(\bar{V} - E)L}}{\hbar} \right) = e^{-2\bar{\kappa}L} \quad \bar{\kappa} = \sqrt{2m(\bar{V} - E)/\hbar}$$



TUNNELING DANS DES ASSEMBLEES DE NANOPARTICULES

T=300K

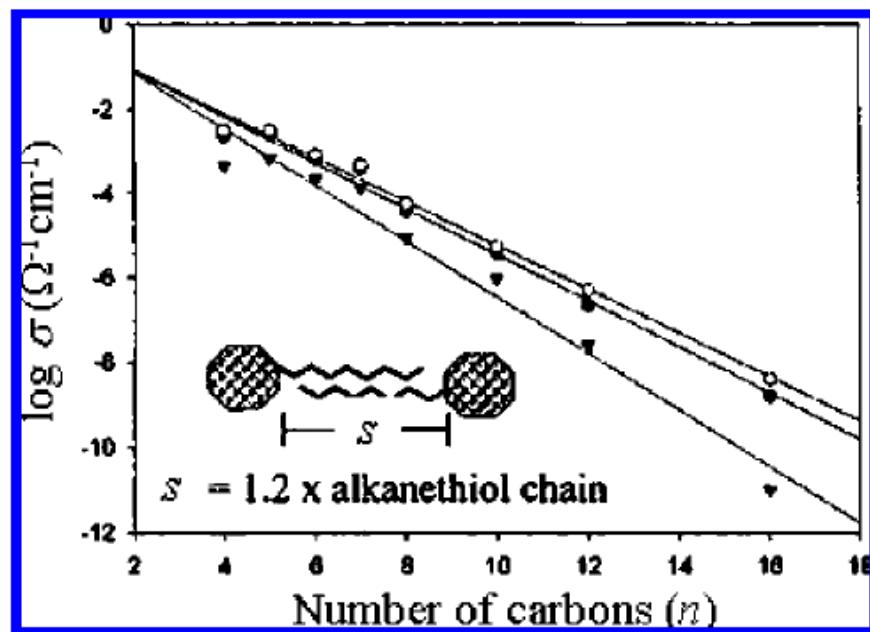
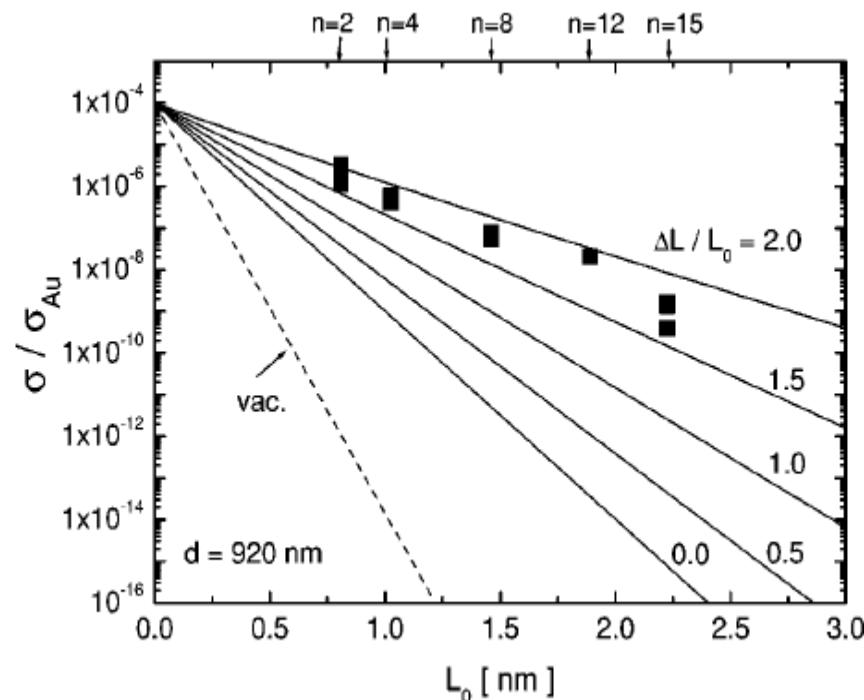


Figure 15. Conductivities of films of $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{n-1}\text{S}$ -capped 2.2 nm Au NPs at 70 (○), 30 (●), and $-60\text{ }^\circ\text{C}$ (▼) vs n . The inset is a schematic illustrating interdigitation of capping ligand chains in the NP films. Reprinted with permission from ref 123 (Murray's group). Copyright 2000 American Chemical Society (<http://dx.doi.org/10.1021/ja002367+>).

monolayers on gold electrodes using an electrochemical approach. For $n = 9$, they measured $k_{\text{CT}} \approx 10^4 \text{ s}^{-1}$. Using $\text{DOS} \approx 7 \times 10^{-6} (\text{eV})^{-1}$,⁵⁷ one obtains $g \approx 7 \times 10^{-10} \Omega^{-1} = (1.4 \text{ G}\Omega)^{-1}$, which is consistent with the value reported by Frisbie and co-workers using CP-AFM.²¹⁷



K. -H. Müller,* G. Wei, B. Raguse, and J. Myers

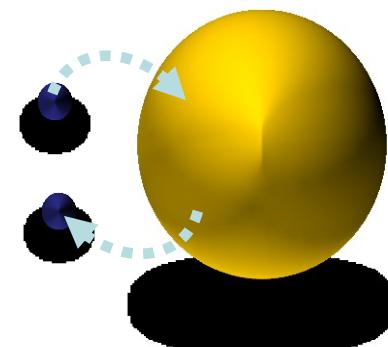
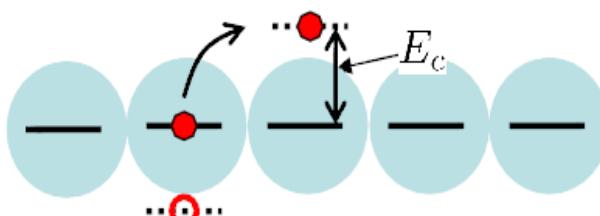
PHYSICAL REVIEW B 68, 155407 (2003)

GRANDEURS PHYSIQUES IMPORTANTES D'UN ECHANTILLON GRANULAIRE: INTERACTION e⁻-e⁻, ENERGIE DE COULOMB

Définition: énergie égale au changement d'énergie d'un grain lorsque lui ajoute ou lui enlève un e⁻

Energie de Coulomb:

$$E_C = \frac{e^2}{2C}$$



Sphère isolé:

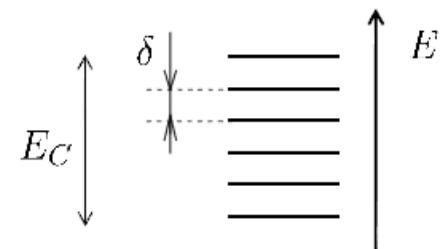
$$\boxed{E(\vec{r}) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{r} \quad r > R}$$

$$V(R) = - \int_0^R E(\vec{r}) d\vec{r} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R}$$

$$C_0 = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R} \rightarrow E_C \propto R^{-1}$$

Pour des grains réalistes (e.g. quelques nm à ~100nm): $E_C \gg \delta$

$$\delta \approx R^{-3}$$

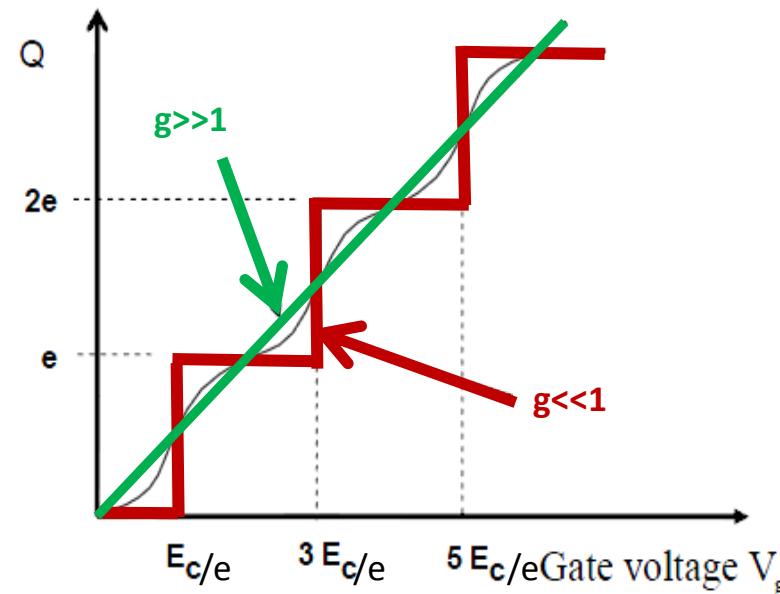
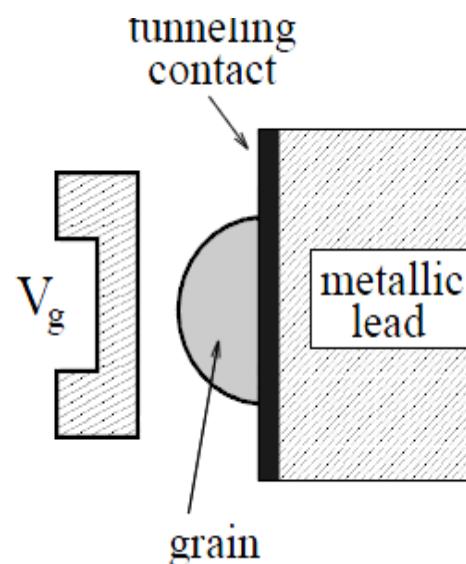


(distance moyenne entre les niveaux d'énergie δ)

Interactions de Coulomb:

- Rôle crucial dans le régime isolant quand les e⁻ sont localisés dans les grains, mène à la quantification de la Q du grain.
- En toutes circonstances: E_C gêne la migration des porteurs de NP en NP
 => sous certaines conditions, supprime notamment la conductance à basse tension

BLOCAGE DE COULOMB DANS UN GRAIN ELEMENTAIRE



$g \leq 1$ - Quantification de la charge comme dans le cas du régime de blocage de Coulomb –
L'e- doit dépasser une barrière électrostatique $\sim E_c/e$ pour passer => entrave le transport pour $T < E_c/k_B$

→ Régime Isolant

$g \geq 1$ - Les effets de la quantification de la charge sont exponentiellement petits
et les e- sont échangés « librement » entre le grain et le réservoir (interactions de Coulomb sont « écrantées »)

→ Régime Métallique

Pour un système granulaire: $g \sim 1$ donne une transition METAL-ISOLANT

RAPPELS: TRANSITION METAL - ISOLANT (MIT)

Classification des matériaux: en fonction du comportement de la conductance pour $T \rightarrow 0$

- **Métaux:** au moins une bande partiellement remplie => conductance \rightarrow valeur finie

$$\lim_{T \rightarrow 0} \sigma(T) > 0$$

- **Non-métaux:** bandes d'énergie soit complètement remplie, soit complètement vide => conductance $\rightarrow 0$

Modèle de DRUDE de la conductivité:

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m} \quad \left[\begin{array}{l} n: \text{concentration d'électrons de conduction} \\ \tau: \text{temps moyen de collision} \\ m: \text{masse effective de l'électron} \\ e: \text{charge élémentaire} \end{array} \right]$$

τ déterminé par la diffusion des électrons:

- diffusion élastique : e.g. impuretés, défauts
- diffusion inélastique: e.g. e^-e^- , e^- -phonon

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{elastic}} + \frac{1}{\tau_{inelastic}} \Rightarrow \sigma^{-1} = \sigma_0^{-1} + \sigma(T)^{-1}$$

A basse T: $\tau_{élastique}$ domine car indépendant de la température

A haute T: $\tau_{inélastique}$ devient important et donne une conductivité dépendante de la température

Le taux de diffusion inélastique des interactions e^- phonon augmente comme $\sim kT$

$$\Rightarrow \sigma \sim 1/kT \Rightarrow \rho \sim T$$

\Rightarrow Métaux: $R \uparrow$ si $T \uparrow$

\Rightarrow Non-Métaux: $n \uparrow$ si $T \uparrow \Rightarrow \sigma \Rightarrow R \downarrow$

MODELES DE HOPPING

Dépendance générale de la conductivité en fonction de T:

$$g \propto \exp\left[-\left(\frac{T_0}{T}\right)^\gamma\right] \quad 0 \leq \gamma \leq 1$$

où γ dépend de la densité d'état

$\gamma = 0$: dépendance de l'effet tunnel résonant

$\gamma = 1$: dépendance d'un phénomène thermiquement activé (loi d'Arrhenius)

$0 < \gamma < 1 \Rightarrow$ mélange entre ces deux phénomènes

→ le hopping est un mélange entre l'effet tunnel et l'activation thermique

Parmi les modèles existants:

- **M-VRH** (Mott-VRH, hopping à distance variable (Variable Range Hopping, VRH)): $\gamma=1/(D+1)$; D dimension
- **ES-VRH** (Efros-Shklovskii): $\gamma=1/2$
- **Nearest Neighbor Hopping, NNH** (hopping au premier voisin): $\gamma=1$
- **NNH-percolation** (hopping au premier voisin + percolation): $\gamma=1/2$

MODELE DE MOTT: γ FRACTIONNAIRES

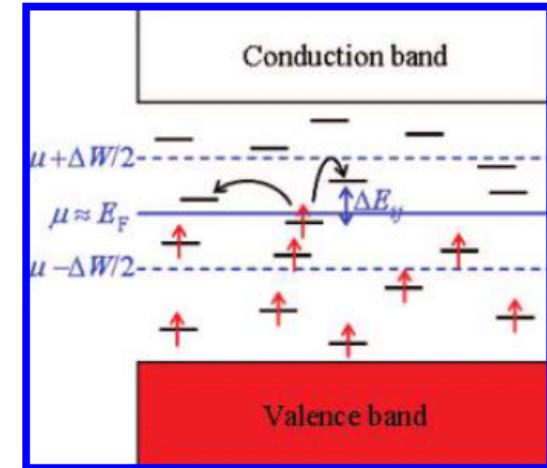
Hypothèse: un mécanisme simplifié / Miller-Abrahams

- 1 - La contribution majeure au hopping se fait à travers des états dans l'intervalle kT autour du potentiel chimique μ
- 2 - La densité d'états $\rho(E) = \rho_0$ ($\rho_0 = \text{cte}$) et E_F est au minimum $\rho(E)$

Idée: NNH n'est pas toujours la situation la plus favorable car il peut exister une distance r_{ij} plus grande présentant un ΔE_{ij} plus petit

Différence d'énergie entre un site i et j:

$$\Delta E_{ij} = E_j - E_i$$



Hopping d'une site occupé i vers un site non occupé j dans la bande d'énergie ΔW :

$$E_j - E_i \leq \Delta W$$

Concentration d'états dans ΔW :

$$\Delta N = \rho(E_F) \cdot \Delta W$$

Distance moyenne entre deux sites localisés i et j:

$$r_{ij} \approx \Delta N^{-1/D} = [\rho(E_F) \cdot \Delta W]^{1/D}$$

où D : dimension du système

1 - Probabilité de saut tunnel:

$$P_{\text{tunnel}} \approx \exp[-2\kappa r_{ij}] \quad \text{où } \beta = 2\kappa \quad \text{et} \quad \beta = \sqrt{\frac{8mU_0}{\hbar^2}}$$

r_{ij} : distance entre les deux états localisés (i.e. épaisseur de la barrière de potentiel entre les 2 états)

β (ou κ): paramètre caractérisant la décroissance de la fonction d'onde de l'e- dans la barrière de potentiel

2 - Probabilité d'acquérir une énergie ΔW (distribution de Boltzmann):

$$P_{\Delta W} \approx \exp\left[-\frac{\Delta W}{k_B T}\right]$$

MODELE DE MOTT: γ FRACTIONNAIRES

Probabilité globale de hopping de i à j:

$$P_{hop} = P_{tunnel} \cdot P_{\Delta W} \approx \exp[-2.\kappa.r_{ij}] \exp\left[-\frac{\Delta W}{k_B T}\right]$$

=> Compétition entre la distance et la différence énergétique

$$P_{hop} = P_{tunnel} \cdot P_{\Delta W} \approx \exp\left[-2.\kappa.r_{ij} - \frac{1}{k_B T \cdot \rho(E_F) r_{ij}^D}\right]$$

Maximiser la probabilité => distance optimale de hopping r_{hop}

$$\frac{dP_{hop}(r_{ij})}{dr_{ij}} = 0 \quad \Rightarrow \quad r_{hop} \approx \left(\frac{D}{2.\kappa.\rho(E_F).k_B T} \right)^{\gamma} \quad \text{où} \quad \gamma = \frac{1}{D+1}$$

$$r_{hop} \propto T^{-\gamma} \quad T_0 \approx \frac{\kappa^D}{k_B \rho(E_F)}$$

Dimension D	Exposant γ
1	$\frac{1}{2}$
2	$\frac{1}{3}$
3	$\frac{1}{4}$

Le régime de hopping dépend donc:

- du matériau (barrière κ) caractérisé par la longueur de localisation
- de la densité d'états $\rho(E_F)$
- de la température T

$$\xi = \frac{1}{\kappa}$$

7. APPLICATIONS

On désire mesurer la température à l'intérieur d'une enceinte soumise à de brusques variations de température (c'est en fait la chambre de combustion d'un moteur à explosion monocylindre schématisé par la figure 12.1). La mesure de la température est effectuée par un thermo-couple.

La quantité de chaleur passant pendant dt d'un milieu 2 à la température T_2 à un milieu 1 à la température T_1 est donnée en première approximation par:

$$\delta Q = K(T_2 - T_1)dt$$

K représente le coefficient d'échange calorifique entre le milieu 1 et le milieu 2.

On donne:

T_{ext} : la température supposée constante du milieu extérieur à l'enceinte (en K).

T_{cap} : la température du capteur (en K).

T_{enc} : la température du milieu intérieur à l'enceinte (en K).

K_{ext} : le coefficient d'échange calorifique du capteur avec l'extérieur (en W/K).

K_{enc} : le coefficient d'échange calorifique du capteur avec l'enceinte (en W/K).

M : la masse du capteur (en kg).

C : la capacité calorifique du capteur (en J. Kg⁻¹.K⁻¹).

12.1 Etablir le bilan énergétique lors d'une variation dT_{cap} de la température du capteur pendant l'intervalle élémentaire de temps dt .

12.2 On suppose que la température extérieure est constante et on pose :

$$\Delta T_{cap} = T_{cap} - T_{ext} \quad \text{et} \quad \Delta T_{enc} = T_{enc} - T_{ext} \quad (12.2)$$

Calculer dans le domaine de Laplace la fonction de transfert :

$$\Delta T_{cap}(p)/\Delta T_{enc}(p)$$

Conclure quant au comportement du système.

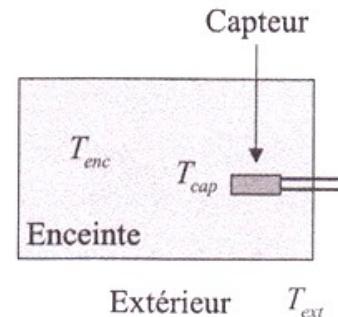


Figure 12.1- Principe de la mesure

12.3 Le moteur tournant à 730 tours/minute, l'évolution de la température à l'intérieur de l'enceinte est rapide (explosion du mélange combustible). Choisir le capteur le plus adapté parmi les trois proposés dans le tableau 12.1.

Tableau 12.1- Caractéristiques des thermocouples

	Thermocouple n° 1	Thermocouple n° 2	Thermocouple n° 3
M (kg)	$5 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
C (J/kg.K)	8360	3230	5210
K_{ext} (W/K)	9	3	8
K_{enc} (W/K)	36	175	61

12.4 On fait l'approximation grossière que la température dans l'enceinte varie sinusoidalement, la température extérieure restant constante et égale à 20 °C.

Calculer les valeurs extrêmes de la température de l'enceinte sachant que les valeurs extrêmes données par le capteur sont 288,8 °C et 960,6 °C. On rappelle qu'à une température de 0 °C correspond une température absolue de 273,15 K.

8. REFERENCES

8. REFERENCES :

- 1 - Les capteurs en instrumentation industrielle – Georges Asch et coll. DUNOD Série EEA
- 2- Techniques de l'ingénieur : Capteurs - Définitions, principes de détection, Yves PARMANTIER, Frédéric KRATZ

THEOREME de Thevenin:

1 - La tension de Thevenin V_{TH} est la tension sur les bornes de sortie lorsqu'on enlève la charge.

On l'appelle aussi la tension de circuit ouvert: $V_{TH}=V_{CO}$

2 - La résistance de Thevenin R_{TH} est la résistance mesurée par un ohmmètre branché sur la sortie quand toutes les sources sont annulées et la résistance de charge enlevée:

Définition: $R_{TH}=R_{CO}$

En pratique:

Annuler une source de tension = la remplacer par un court-circuit (e.g. fil)

Annuler une source de courant = la remplacer par un court-ouvert (e.g. interrupteur ouvert)

Thevenin a prouvé qu'en dépit de la complexité du circuit dans la boîte noire, le courant de sortie est le même que celui obtenu avec le circuit simple de la figure (b):

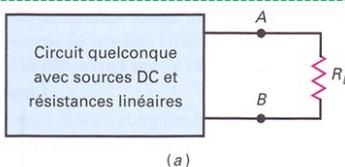
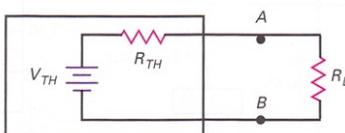


Figure:

- (a) Boîte noire contenant un circuit linéaire;
- (b) Circuit équivalent de Thevenin



$$I_L = \frac{V_{TH}}{R_{TH} + R_L}$$

En pratique:^(b)

1 – Retrait $R_L \Rightarrow V_{TH}$

2 – Annule la source de tension + retrait $R_L \Rightarrow R_{TH}$

Bon à savoir: 1 – Selon les circuits il est plus simple d'utiliser le théorème de Thevenin ou celui de Norton
2 - ces deux théorèmes s'appliquent aussi aux circuits composés d'inductances, capacités, alimentés par des sources de tension et courant alternatifs: $R_{TH} \Rightarrow Z_{TH}$ et $R_N \Rightarrow Z_N$

THEOREME de Norton:

1 – Le courant de Norton I_N est le courant de sortie quand la charge est court-circuittée.

On l'appelle aussi courant de court-circuit : $I_N=I_{CC}$

2 – La résistance de Norton R_N est la résistance mesurée par un ohmmètre branché sur la sortie quand toutes les sources sont annulées et la résistance de charge est enlevée:

Définition: $R_N=R_{CO}$

Comme $R_N=R_{CO}$ et $R_{TH}=R_{CO} \Rightarrow R_N=R_{TH}$

En pratique:

Si on a déterminé R_{TH} avec le théorème de Thevenin, on sait immédiatement la résistance de Norton R_N

Attention: valeurs égales MAIS POSITIONS DIFFERENTES (Thevenin=> Série, Norton => Parallèle)

Norton a prouvé que le circuit de la boîte noire donne la même tension de sortie que le circuit élémentaire ci-dessous:

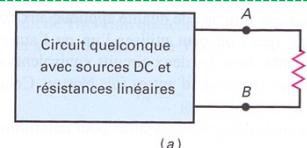
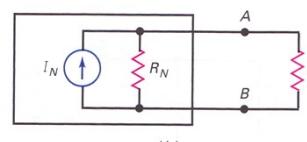


Figure:

- (a) Boîte noire contenant un circuit linéaire;
- (b) Circuit équivalent de Norton



$$V_L = I_L (R_N // R_L)$$

En pratique:

1 – Court-circuiter $R_L \Rightarrow I_N$

2 – Ouvrir la source de courant + retrait $R_L \Rightarrow R_{CO}=R_N$

PRINCIPE DE DUALITE

Principe de dualité:

Chaque théorème sur les circuits électriques possède son dual (opposé) dans lequel on remplace les grandeurs originelles par les quantités duales:

Tension \Leftrightarrow Courant

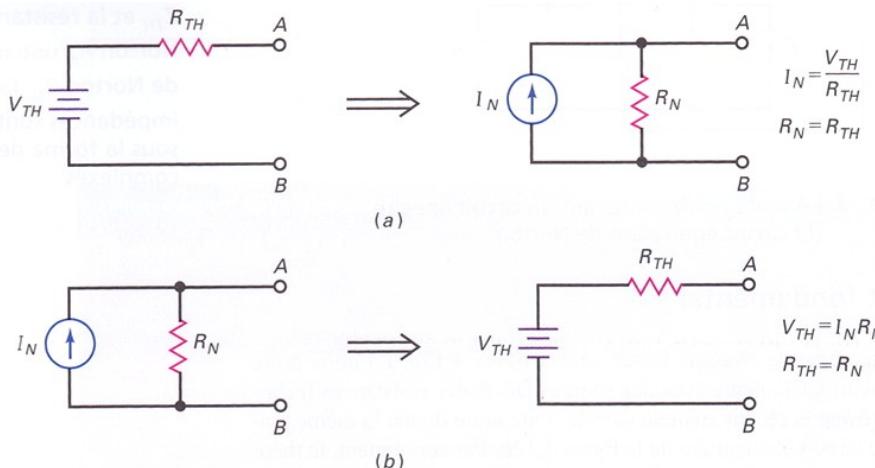
Source de tension \Leftrightarrow Source de courant

Série \Leftrightarrow Parallèle

Résistance Série \Leftrightarrow Résistance parallèle

Application:

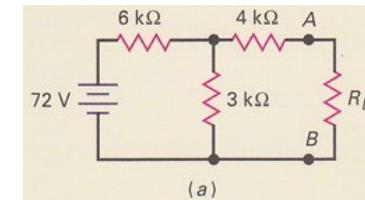
Le théorème de Thevenin sous-entend le théorème de Norton et réciproquement:



(a) Conversion Thévenin \Rightarrow Norton
(b) Conversion Norton \Rightarrow Thévenin

Exercice 1:

1 - Quelles sont la tension et la résistance de Thevenin du circuit ci-dessous ?



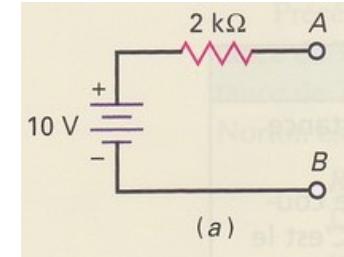
Réponses: $V_{TH}=24V$, $R_{TH}=6k\Omega$

2 - Quels sont les courants dans la charge pour les valeurs suivantes de R_L : 2k Ω , 6k Ω , 18k Ω ?

Réponses: $I=24V/(6k\Omega+2k\Omega)=3mA$; $I=2mA$; $I=1mA$

Exercice 2:

Supposons que nous ayons réduit un circuit complexe en un circuit équivalent de Thévenin (figure ci-contre). Comment le convertir en un circuit de Norton ?



Réponses: $I_N=10V/2k\Omega=5mA$; R_N mis en parallèle avec $R=R_{TH}$

TRANSFORMEE DE LAPLACE

Définition:

Soit $f(t)$ une fonction réelle définie $\forall t \geq 0$. La transformée de Laplace de f , $\mathcal{L}(f(t))$ est :

$$\mathcal{L}(f(t)) = F(p) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt$$

Cette intégrale n'existe que si $|f(t)| \leq K e^{at}$.

On peut définir la transformée de Laplace inverse :

$$\mathcal{L}^{-1}(F(p)) = \mathcal{L}^{-1}(\mathcal{L}(f(t))) = f(t)$$

Opérations algébriques

- Linéarité de la transformation

$$\mathcal{L}(a f(t) + b g(t)) = a F(p) + b G(p)$$

- Changement d'échelle de la transformée

$$\mathcal{L}\left(\frac{1}{a} f\left(\frac{t}{a}\right)\right) = F(a \cdot p)$$

- Translation de la transformée

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

- Transformée des dérivées

$$\mathcal{L}(f'(t)) = p F(p) - f(0)$$

$$\mathcal{L}(f''(t)) = p^2 F(p) - p f(0) - f'(0)$$

$$\mathcal{L}(f^{(n)}(t)) = p^n F(p) - p^{n-1} f(0) - p^{n-2} f'(0) - \dots - f^{(n-1)}(0)$$

- Transformée d'une intégrale

$$\mathcal{L}\left(\int_0^t f(u) du\right) = \frac{1}{p} F(p)$$

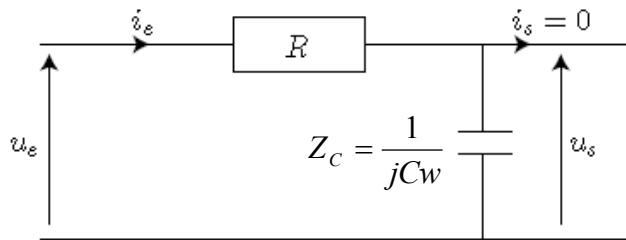
- Dérivée de la transformée

$$\mathcal{L}(t f(t)) = -F'(p)$$

$F(p) = \mathcal{L}(f(t))$	$f(t)$
$\frac{1}{p}$	1
$\frac{1}{p^2}$	t
$\frac{1}{p^n}$	$\frac{t^{n-1}}{(n-1)!}$
$\frac{1}{\sqrt{p}}$	$\frac{1}{\sqrt{\pi t}}$
$\frac{1}{\sqrt{p-a}}$	$\frac{1}{\sqrt{\pi t}} e^{at}$
$\frac{1}{p-a}$	e^{at}
$\frac{1}{(p-a)^2}$	$t e^{at}$
$\frac{1}{(p-a)^n}$	$\frac{t^{n-1}}{(n-1)!} e^{at}$
$\frac{1}{(p-a)(p-b)}$ ($a \neq b$)	$\frac{e^{at} - e^{bt}}{a-b}$
$\frac{p}{(p-a)(p-b)}$ ($a \neq b$)	$\frac{a e^{at} - b e^{bt}}{a-b}$
$\frac{1}{p^2 + a^2}$	$\frac{1}{a} \sin at$
$\frac{p}{p^2 + a^2}$	$\cos at$
$\frac{1}{p^2 - a^2}$	$\frac{1}{a} \sinh at$
$\frac{p}{p^2 - a^2}$	$\cosh at$
$\frac{1}{\sqrt{p^2 + a^2}}$	$J_0(at)$ (fonction de Bessel)
$\frac{1}{\sqrt{p^2 - a^2}}$	$I_0(at)$ (fonction de Bessel modifiée)
e^{-ap}	$\delta(t - a)$ (fonction impulsion delta de Dirac)
$\frac{e^{-ap}}{p}$	$H(t - a)$ (fonction échelon de Heaviside)
$\frac{e^{-a\sqrt{p}}}{p}$	$\text{erfc}\left(\frac{a}{2\sqrt{t}}\right) = 1 - \text{erf}\left(\frac{a}{2\sqrt{t}}\right)$
$\frac{e^{-a\sqrt{p}}}{p^2}$	$\left(t + \frac{a^2}{2}\right) \cdot \text{erfc}\left(\frac{a}{2\sqrt{t}}\right) - a \cdot \sqrt{\frac{t}{\pi}} \cdot e^{-\left(\frac{a}{2\sqrt{t}}\right)^2}$

FILTRES PASSE-BAS

Filtre passe-bas 1^{er} ordre:



Cas limites:

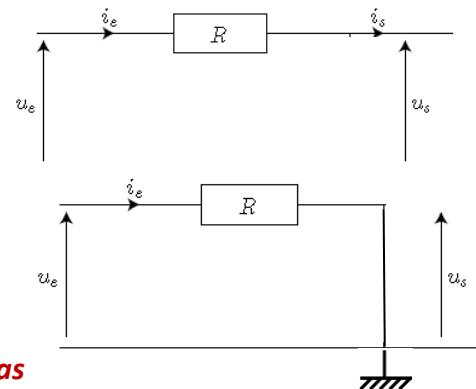
Si $\omega \rightarrow 0$: $Z_C \rightarrow \infty$

$$\Rightarrow u_e = u_s$$

Si $\omega \rightarrow \infty$: $Z_C \rightarrow 0$

$$\Rightarrow u_s \rightarrow 0$$

=> Filtre passe bas



Résolution « classique » :

Pont diviseur: => $U_s = Z_C / (Z_C + R) \cdot U_e \Rightarrow U_s / U_e = 1 / (1 + jRC\omega)$

$$\Rightarrow H(j\omega) = \frac{U_s}{U_e} = \frac{1}{1 + jRC\omega}$$

$$\text{En posant: } \omega_0 = RC^{-1} \Rightarrow H(j\omega) = \frac{U_s}{U_e} = \frac{1}{1 + jRC\omega} = \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}}$$

$$\left. \begin{aligned} |H(j\omega)| &= \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \\ \varphi(\omega) &= \arg H(j\omega) = -\arctan\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) \end{aligned} \right\}$$

Gain en décibel:

$$G_{db} = 20 \cdot \log(|H(j\omega)|) = -10 \cdot \log\left(1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)$$

$$\omega_0 = \omega_c$$

$$G_{dB}(\omega_c) = -3 dB$$

Résolution par transformée de LAPLACE:

$$\begin{aligned} u_e(t) &= R \cdot i(t) + u_s(t) = R \frac{dq}{dt} + u_s(t) \\ &= R \cdot \frac{d(C \cdot u_s)}{dt} + u_s(t) = RC \cdot \frac{du_s}{dt} + u_s(t) \end{aligned}$$

En supposant la capacité déchargée initialement: $u_s(0^+) = 0$
 TL => $U_e(p) = RCpU_s(p) + U_s(p)$

$$H(p) = U_s(p) / U_e(p) = 1 / (1 + RCp)$$

Cas d'un régime sinusoïdal: $p=j\omega$ (p purement imaginaire)

$$H(j\omega) = U_s(j\omega) / U_e(j\omega) = 1 / (1 + j\omega / \omega_0) \text{ où } \omega_0 = 1/RC$$

