

## L2 ISTN notes personnelles

Alex Videcoq

# **Instrumentation**

pas prêt pour utilisation

ISTIC

Responsable de matiere Prof. Fabien Gunzt  
Cursus L2 ISTN

Rennes 2025

(Draft - 29 avril 2025)

# Table des matières

<b>Table des matières</b>	<b>ii</b>
<b>Introduction</b>	<b>iv</b>
.1 Instrumentation . . . . .	iv
.2 Internet of Things (IoT) . . . . .	iv
.3 Chaîne d'acquisition . . . . .	v
<b>Résumé Rapide</b>	<b>vi</b>
<b>1 Physique</b>	<b>1</b>
1.1 Capteurs . . . . .	1
1.2 Classification des capteurs . . . . .	4
Capteurs actifs 4 • Conditionnement des signaux des capteurs actifs 7 •	
Capteurs passifs 8 • Capteurs résistifs 10	
<b>2 Électronique</b>	<b>12</b>
2.1 Microcontrôleur . . . . .	12
Introduction 12 • Microprocesseur ( $\mu P$ ) 12 • Microcontrôleur ( $MCU$ ) 12	
2.2 Le microcontrôleur ESP32 . . . . .	12
Caractéristiques principales de l'ESP32 12 • Carte de développement ESP32-WROVER-B 13	
2.3 Amplificateur opérationnel . . . . .	14
2.4 Généralités sur les AOP . . . . .	14
Régime linéaire et régime saturé 16 • Largeur de la zone de fonctionnement linéaire : 17 • Impédance d'entrée 18	
2.5 Amplificateur opérationnel idéal . . . . .	18
Amplificateur opérationnel idéal 18	
2.6 Contre-réaction . . . . .	19
Effet de la contre-réaction négative 20 • Effet de la contre-réaction positive 21	
2.7 Utilités pour l'instrumentation . . . . .	21
Amplification de signaux 21 • Adaptation d'impédance 21 • Filtrage et réduction du bruit 21 • Conversion courant-tension 22 • Rejet du mode commun 22 • Conditionnement avant numérisation 22 • Compensation des erreurs et linéarisation 22 • Conclusion 22	
2.8 Schémas de base . . . . .	22
Le suiveur 22 • L'amplificateur non-inverseur 23	
2.9 Conditionneur simple . . . . .	25
Principe de mesure 25 • Choix de la valeur de $R1$ 26	
2.10 CAN-CNA . . . . .	27
Généralités 27 • Échantillonnage-Blocage 29 • Modélisation de l'échantillonnage 31	

<b>3</b>	<b>Hors programme</b>	<b>33</b>
3.1	Échantillonnage . . . . .	33
3.2	Fonction delta de Dirac . . . . .	33
	Le peigne de Dirac 34 • Série de Fourier 34	
3.3	Transformée de Fourier. . . . .	36
<b>A</b>	<b>Appendices</b>	<b>37</b>
	<b>Table des figures</b>	<b>38</b>
	<b>Liste des tableaux</b>	<b>39</b>
<b>B</b>	<b>Glossaire et acronymes</b>	<b>40</b>
	Glossaire . . . . .	40
	Acronymes. . . . .	40

# I Introduction

## .1 Instrumentation

L'instrumentation regroupe *les techniques, capteurs et systèmes* permettant de *mesurer, surveiller et contrôler* des grandeurs physiques (température, pression, courant, etc.). Elle est omniprésente dans divers domaines scientifiques et technologiques : *industrie, recherche, objets du quotidien, etc.*

Ce domaine est essentiel dans de nombreuses applications :

- **Reconnaissance** : code-barres, badge RFID<sup>1</sup>, etc.
- **Industrie** : chaîne de montage, automatisation.
- **Électroménager** : contrôle de température, détection d'ouverture.
- **Santé** : mesure de la fréquence cardiaque, glycémie, pression artérielle.
- **Automobile** : gestion du moteur, sécurité, freinage, direction.
- **Domotique** : capteurs de mouvement, stores, fumée.

**Instrumentation et applications spécifiques :**

- **Automobile** : une voiture moderne intègre des centaines de capteurs transmettant des données essentielles (*température moteur, pression des pneus, trajectoire, niveaux d'huile et d'essence, etc.*)
- **Domotique** : les capteurs contrôlent et automatisent les équipements (*éclairage, chauffage, sécurité, volets, détecteurs de fumée, etc.*).
- **Téléphonie** : les smartphones embarquent des capteurs pour *mesurer la luminosité, la pression, l'orientation, le mouvement, la proximité, etc.*

## .2 Internet of Things (IoT)

L'IoT<sup>2</sup> prolonge l'instrumentation en intégrant *connectivité et intelligence* aux capacités de mesure traditionnelles. Il repose sur un réseau d'objets connectés, équipés de capteurs et de logiciels, facilitant la collecte et l'échange de données.

Ses caractéristiques principales incluent : *connectivité, perception, analyse des données, interopérabilité, sécurité, évolutivité et expérience utilisateur*. Ces atouts permettent son adoption dans de nombreux secteurs, comme *la santé, l'agriculture, les villes et maisons intelligentes, etc.*

L'IOT doit suivre les caractéristiques suivantes :

- **Connectivité** : les appareils IoT interagissent entre eux et avec Internet pour *échanger des données et communiquer en temps réel*.

---

1. Glossaire : **RFID**

2. Glossaire : **IoT**

- **Détection et analyse** : des capteurs collectent des informations de l'environnement, puis les données sont traitées pour *prendre des décisions et automatiser des processus*.
- **Interopérabilité** : les dispositifs et systèmes hétérogènes peuvent *communiquer sans restrictions* pour fonctionner ensemble.
- **Sécurité et confidentialité** : des mesures protègent les données contre les accès non autorisés et garantissent leur intégrité.
- **Évolutivité** : le réseau s'adapte à *l'augmentation du nombre d'appareils* sans dégradation des performances.
- **Expérience utilisateur** : l'IoT vise une *utilisation intuitive* et une *intégration fluide* dans le quotidien.

L'architecture IoT désigne l'organisation des composants interconnectés et leur interaction pour offrir une solution complète. Elle repose sur *des appareils, capteurs, connectivité, applications et stockage*.

L'architecture se structure en quatre couches :

- **Détection** : capteurs et actionneurs collectent des données sur l'environnement.
- **Réseau** : assure la transmission des données via Bluetooth, Wi-Fi, réseaux cellulaires, etc.
- **Traitement** : gère l'analyse des données, le stockage et la prise de décision.
- **Application** : interface entre l'utilisateur et le système, incluant applications mobiles, Web et outils d'analyse.

Un élément central de l'IoT est le **microcontrôleur (MCU)**, essentiel pour collecter et traiter les données des capteurs.

### .3 Chaîne d'acquisition

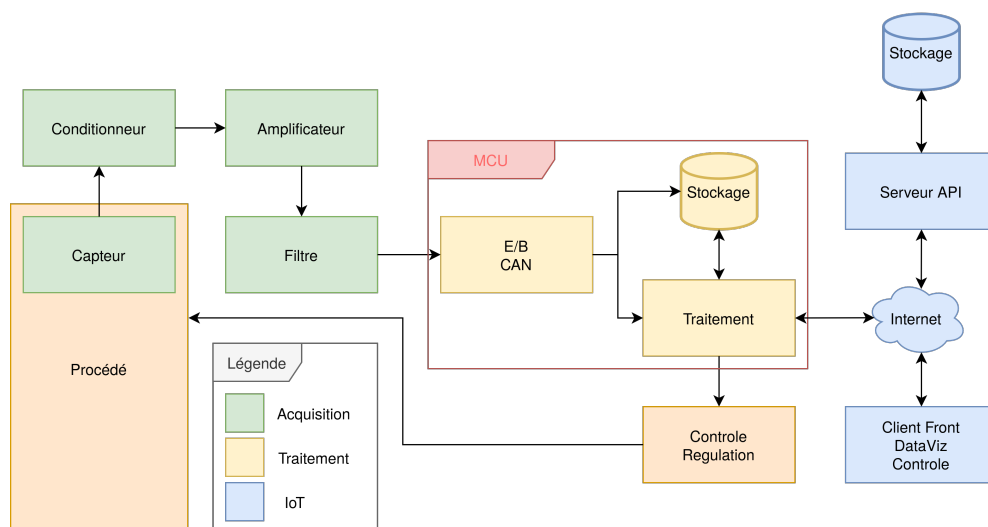


Figure 1 / Chaîne d'acquisition

# Résumé Rapide

## 1.1 Capteurs

Un transducteur est un dispositif convertissant une grandeur physique en une autre ; par exemple une onde lumineuse en signal nerveux (vision animale) ou signal électrique (photorécepteur).

Plus spécifiquement, un capteur est un dispositif qui transforme une grandeur physique d'entrée, appelée mesurande  $[m]$ , en un signal exploitable de nature électrique (en général) appelée réponse  $[s]$ .

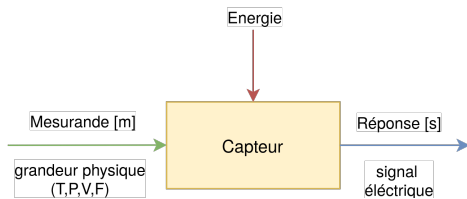


Figure 1.1 / Diagramme d'un capteur

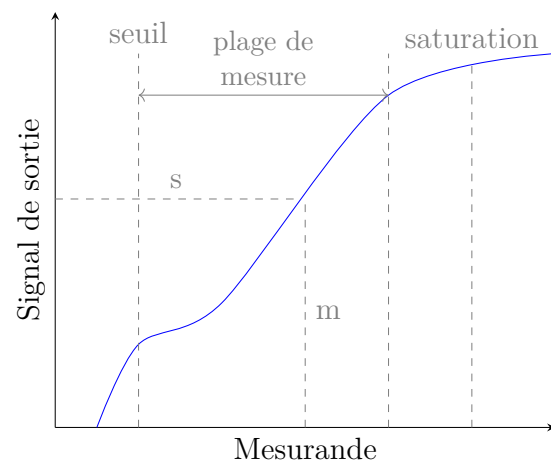


Figure 1.2 / Caractéristique d'un capteur

Le **mesurande**  $m$  représente la grandeur physique à mesurer, comme la température, la pression, la vitesse ou la force. La **réponse**  $s$  du capteur correspond à une grandeur électrique en sortie. La **caractéristique de transfert**  $s = f(m)$  établit la relation entre le mesurande et la réponse du capteur. Elle est propre au capteur et à son environnement de mesure.

Parmi toutes les grandeurs physiques, la température est l'une des plus couramment mesurées, car elle influence directement les propriétés de la matière.

Un capteur de température se caractérise par plusieurs paramètres. L'**étendue de mesure** (E.M) correspond à l'intervalle entre les valeurs extrêmes pouvant être mesurées ( $E.M = m_{\max} - m_{\min}$ ). La **résolution** est la plus petite variation détectable. Enfin, la **sensibilité** représente la variation du signal de sortie en réponse à une variation du mesurande, correspondant à la pente de la courbe caractéristique du capteur.

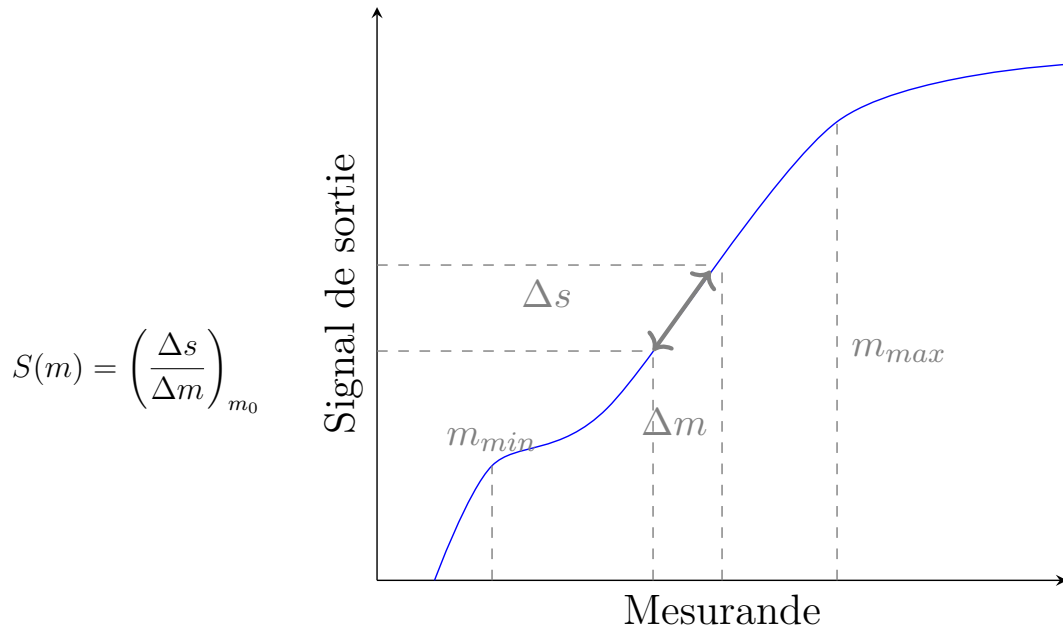


Figure 1.3 / Sensibilité d'un capteur

La **linéarité** d'un capteur définit la plage dans laquelle la **sensibilité** (variation du signal de sortie par rapport à la variation du mesurande) reste constante. Autrement dit, dans cette zone, la relation entre l'entrée ( $m$ , la grandeur physique mesurée) et la sortie ( $s$ , la réponse du capteur) peut être approximée par une fonction affine.

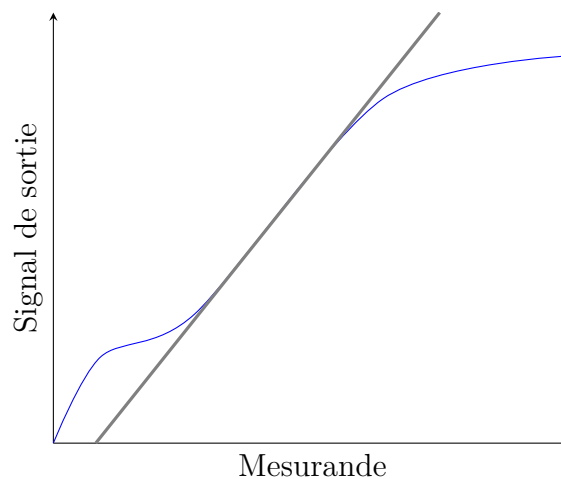


Figure 1.4 / Linéarité d'un capteur

Bien que la linéarité facilite l'interprétation des mesures et simplifie les traitements électroniques et numériques, elle limite la plage de mesure utilisable. En dehors de cette zone linéaire, le capteur peut présenter une **sensibilité variable**, c'est-à-dire que la relation entre  $s$  et  $m$  devient non linéaire, rendant les mesures plus complexes à interpréter et nécessitant des corrections. Il est alors nécessaire d'étalonner le capteur ou d'appliquer des algorithmes de compensation pour corriger les erreurs de linéarité lorsqu'on travaille en dehors de cette zone idéale.



La **précision** d'un capteur est définie par deux critères essentiels : la **fidélité** et la **justesse**.

Lorsque l'on effectue  $n$  mesures d'un même mesurande dans des conditions identiques, la **valeur vraie** du mesurande est notée  $X_v$ , tandis que les valeurs mesurées sont notées  $X_i$ . La **valeur moyenne** des mesures est définie par :

$$X_m = \frac{\sum_i X_i}{n}$$

La **fidélité** d'un capteur correspond à sa capacité à donner des résultats cohérents lors de mesures répétées. Elle est évaluée par l'**écart-type**  $\sigma$ , qui traduit la dispersion des valeurs mesurées autour de la moyenne  $X_m$  :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i (X_i - X_m)^2}{n - 1}}$$

Un capteur est considéré comme **fidèle** si son écart-type est faible, garantissant ainsi une bonne répétabilité des mesures. Toutefois, cela ne signifie pas nécessairement que les mesures sont proches de la valeur vraie.

La **justesse** reflète quant à elle l'écart entre la valeur moyenne  $X_m$  et la valeur vraie  $X_v$ . Un capteur est dit **juste** si  $X_m$  est proche de  $X_v$ , même si ses mesures individuelles présentent une certaine dispersion.

Enfin, un capteur est qualifié de **précis** lorsqu'il est à la fois **fidèle** et **juste**. Autrement dit, un capteur précis fournit des mesures répétables (fidélité) dont la moyenne est proche de la valeur vraie (justesse).

Les **grandeurs d'influence** sont des paramètres physiques, autres que la mesurande, dont la variation peut affecter la réponse d'un capteur. Parmi elles, la **température** peut modifier les caractéristiques électriques, mécaniques ou dimensionnelles du capteur, tandis que la **pression** et les **vibrations** peuvent induire des déformations et des contraintes altérant ses performances. L'**humidité**, quant à elle, influence les propriétés électriques, telles que la constante diélectrique ou la résistivité, et peut dégrader l'isolation électrique. Enfin, un **champ magnétique** variable peut générer une force électromotrice d'induction, tandis qu'un champ statique peut modifier la résistivité des matériaux.

Une autre grandeur d'influence est la **tension d'alimentation**, qui peut impacter directement la grandeur de sortie du capteur en modifiant son amplitude ou sa fréquence. L'effet des grandeurs d'influence se manifeste généralement par un **décalage du zéro** (offset) ou une **dérive de la sensibilité**. Pour minimiser ces perturbations, plusieurs solutions existent : **réduire** les grandeurs d'influence par des dispositifs spécifiques (table anti-vibration, blindages magnétiques, etc.), **stabiliser** ces grandeurs à des valeurs connues et maîtrisées, ou encore **compenser** leur effet en utilisant des montages adaptés, comme le **pont de Wheatstone** ou un **montage différentiel**.

## 1.2 Classification des capteurs

Les capteurs peuvent être classés en fonction de la nature de leur grandeur électrique de sortie  $s(m)$ . On distingue ainsi deux grandes catégories :

- **Les capteurs actifs** : ils génèrent directement une énergie électrique sous forme de tension ( $V$ ), de courant ( $I$ ) ou de charge électrique ( $Q$ ) en réponse à la mesure d'une grandeur physique. Ces capteurs ne nécessitent généralement pas d'alimentation externe pour fonctionner.
- **Les capteurs passifs** : ils se comportent comme un dipôle électrique dont l'impédance ( $R, L, C$ ) varie en fonction du mesurande. Leur fonctionnement requiert une excitation externe pour permettre la conversion de la grandeur physique en un signal exploitable.

### Capteurs actifs

- Convertissent un effet physique en une énergie électrique.
- Se comportent comme une source d'énergie. C'est un dipôle actif qui peut être de type courant, tension ou charge.

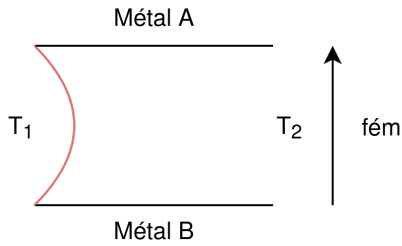
Grandeur mesurée	Principe physique	Grandeur de sortie
Température	Effet thermoélectrique	Tension
	Effet pyroélectrique	Charge
Force	Effet piézoélectrique	Charge électrique
Pression	Effet piézoélectrique	Tension
Vitesse	Induction électromagnétique	Tension
Position	Effet Hall	Tension
Flux lumineux	Effet photo émissif	Courant
	Effet photovoltaïque	Tension
	Effet photoélectrique	Tension

**Table 1.5** / Principes physiques et grandeurs de sortie des capteurs

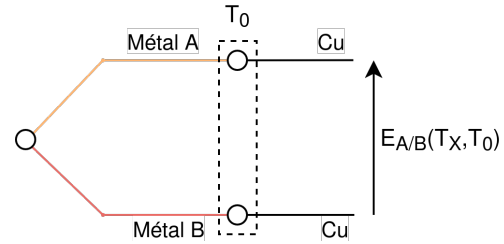
### Capteurs actifs – Effets physiques

#### Thermoélectricité – Thermocouple

Les thermocouples exploitent l'effet thermoélectrique pour générer une force électromotrice (f.é.m) proportionnelle à la différence de température entre deux jonctions.

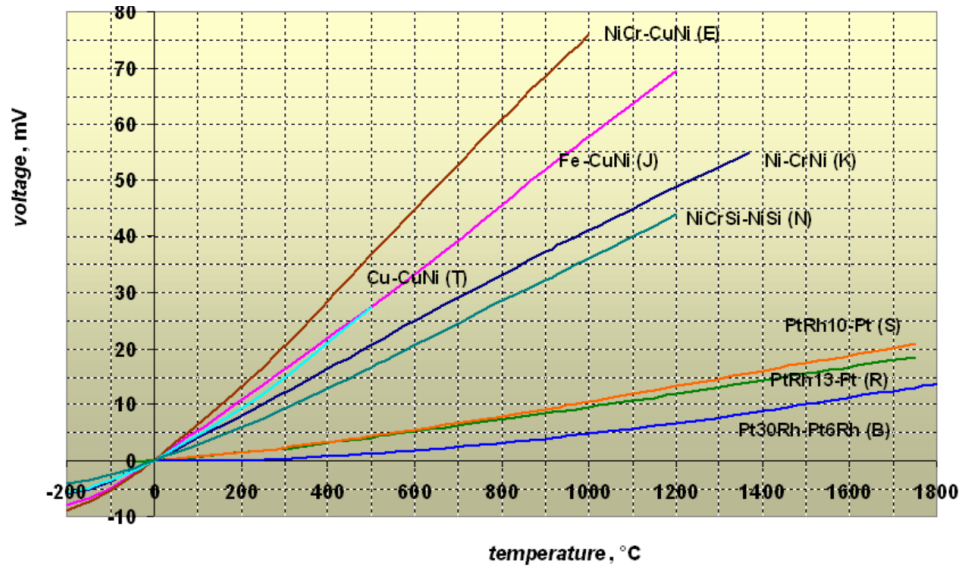


**Figure 1.6** / Force électromotrice liée à la différence de température ( $T_1 - T_2$ )



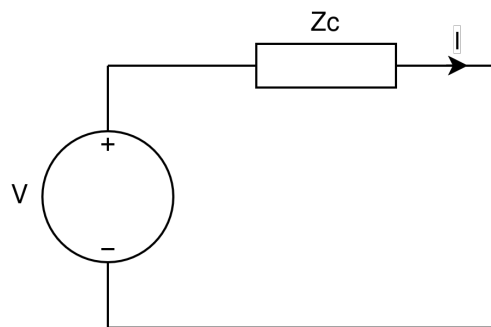
**Figure 1.7** / Schéma d'un thermocouple

Des tables normalisées permettent d'obtenir la f.é.m  $E_{A/B}$  en fonction de la température  $T_x$  lorsque  $T_0$  est fixé à 0 °C.



**Figure 1.8** / Variation de la différence de potentiel en fonction de la température pour différents thermocouples.

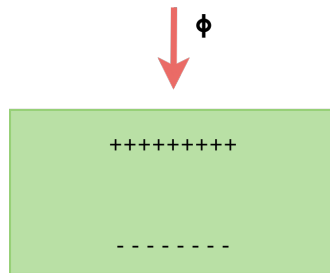
D'un point de vue électronique, un thermocouple peut être modélisé selon le schéma de Thévenin, c'est-à-dire comme un générateur de tension en série avec une impédance  $Z_c$ .



**Figure 1.9** / Modèle de Thévenin d'un thermocouple

## Pyroélectricité

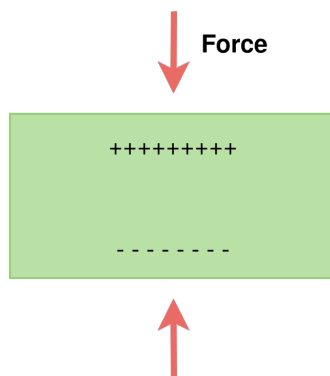
Certains cristaux présentent une polarisation spontanée dépendant de leur température. Lorsqu'ils absorbent un flux de rayonnement, leur température augmente, modifiant ainsi leur polarisation et entraînant une variation de tension détectable. Ce principe est exploité dans les capteurs pyroélectriques.



**Figure 1.10** / Apparition de charges électriques

## Piézo-électricité

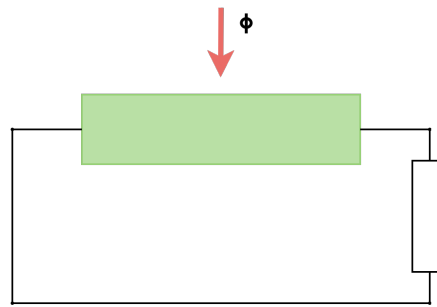
Certains cristaux, comme le quartz, se polarisent sous l'effet d'une contrainte mécanique. Cette déformation induit l'apparition de charges électriques sur les faces opposées du cristal. Ce phénomène est réversible, ce qui permet son utilisation dans divers capteurs piézoélectriques.



**Figure 1.11** / Apparition de charges sur les faces opposées par la déformation du matériau.

## Photoélectricité

Sous l'influence d'un rayonnement lumineux, certains matériaux libèrent des charges électriques. Ce principe est exploité dans les capteurs optoélectroniques comme les photodiodes.



**Figure 1.12** / Apparition de charges sous l'effet de la lumière

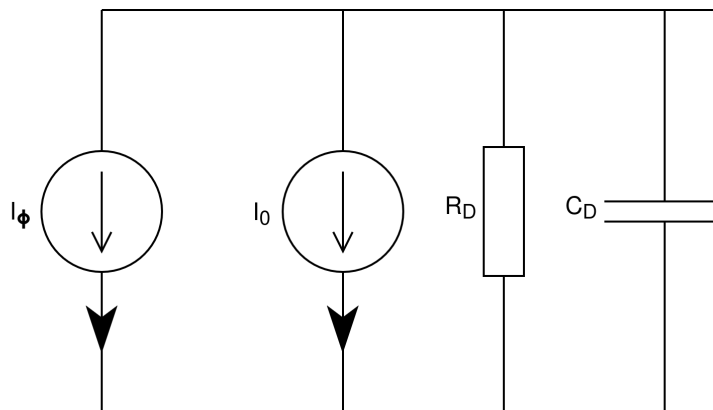
### Photodiode

Une photodiode est un capteur générateur de courant. Elle est polarisée en inverse, ce qui signifie que le potentiel de l'anode est inférieur à celui de la cathode.

Sans lumière, une photodiode est parcourue par un faible courant de fuite  $I_0$ . Lorsqu'un flux lumineux incident atteint la jonction de la diode, il génère un courant  $I_\Phi$  par effet photoélectrique, s'ajoutant au courant de fuite. Ainsi, le courant total est donné par :

$$I_d = I_0 + I_\Phi$$

D'un point de vue électronique, une photodiode peut être modélisée par un schéma de Norton, c'est-à-dire comme un générateur de courant en parallèle avec une impédance  $Z_D$ . Ce modèle peut être précisé en ajoutant la source de courant de fuite  $I_0$  et l'impédance  $Z_D$ , représentée par une résistance  $R_D$  en parallèle avec une capacité  $C_D$ . Cette capacité correspond à l'accumulation des charges dans la photodiode lorsqu'elle est exposée à la lumière.



**Figure 1.13** / Modèle de Norton d'une photodiode

### Conditionnement des signaux des capteurs actifs

Les capteurs actifs nécessitent souvent l'adjonction de conditionneurs pour améliorer l'exploitation de leur signal. Ces dispositifs permettent :

- d'amplifier le signal lorsque son amplitude est trop faible ;

- de filtrer le signal pour supprimer les bruits parasites ou interférences ;
- d'adapter l'impédance afin d'assurer une meilleure transmission du signal ;
- de convertir le signal si nécessaire (ex : conversion courant-tension, linéarisation) ;
- d'isoler électriquement le capteur du reste du circuit si besoin.

## Capteurs passifs

**Capteurs passifs** Les **capteurs passifs** sont des dispositifs qui ne génèrent pas directement de signal électrique, mais modifient une **grandeur électrique** telle que la **résistance** ( $R$ ), l'**inductance** ( $L$ ) ou la **capacité** ( $C$ ) en réponse à une variation du *mesurande*. En sortie, ils se comportent comme un **dipôle passif**, nécessitant ainsi un **circuit additionnel**, appelé *conditionneur*, pour interpréter les variations de l'**impédance** et les convertir en un **signal exploitable**. Ce *conditionneur* peut inclure des **ponts de mesure** (exemple : *pont de Wheatstone* pour les capteurs **résistifs**), des **oscillateurs** (pour les capteurs **capacitifs**) ou des **circuits d'adaptation d'impédance** afin d'assurer une **lecture fiable et précise** des variations de la *grandeur physique mesurée*.

Grandeur mesurée	Caractéristique électrique sensible	Types de matériaux utilisés
Température	Résistivité électrique	Métaux : platine, nickel, cuivre ...
Déformation	Résistivité électrique, Perméabilité magnétique	Alliage de Ni, Si dopé, Alliages ferromagnétiques
Position	Résistivité électrique	Magnétorésistances : bismuth...
Flux lumineux	Résistivité électrique	Semi-conducteurs
Humidité	Résistivité électrique	Chlorure de lithium

**Table 1.14** / Caractéristiques électriques sensibles et matériaux utilisés pour différents capteurs

## Capteurs résistifs

Les capteurs résistifs sont des capteurs passifs dont la résistance varie en fonction de la grandeur physique mesurée. Ils sont utilisés pour mesurer la température, la pression, la déformation, l'humidité, etc.

$$R = f(a, b, c) / \sigma$$

Avec  $f(a, b, c)$  une fonction de la géométrie et des dimensions  $a, b, c$  et  $\sigma$  la conductivité du matériau.

Dans le cas spécifique d'un **capteur de température**, la **résistance** d'un matériau varie en fonction de sa *température*. Il existe principalement deux types de capteurs de température :

- Les **résistances métalliques**
- Les **thermistances**

## Résistances métalliques (RTD - Résistance Température Detector)

Les résistances métalliques ont une valeur **croissante** avec la température selon une loi d'évolution de la forme :

$$R(T) = R_0(1 + AT + BT^2 + CT^3) \quad (1.15)$$

où :

- $T$  : température exprimée en  $^{\circ}C$
- $R_0$  : résistance à  $0^{\circ}C$
- $A, B, C$  : coefficients dépendant de la nature du métal

La **sonde de platine** est la plus utilisée et constitue un **étalon normalisé**. Cependant, d'autres matériaux comme le **Nickel** et le **Cuivre** sont aussi utilisés.

## Caractéristiques de la sonde Platine

- Excellente **précision** sur une large gamme de température.
- Très bonne **stabilité** dans le temps.
- **Faible sensibilité** : environ  $0.3$  à  $0.7 \Omega/^{\circ}C$ .
- **Auto-échauffement** :
  - Le courant chauffe la résistance, générant ainsi une erreur.
  - Pour réduire cet effet, il faut utiliser un courant aussi faible que possible.
- **Linéarisation** :
  - La courbe de sortie  $R = f(T)$  est *quasiment linéaire*.

## Thermistances

Les thermistances sont constituées de **mélanges agglomérés et frittés d'oxydes métalliques**. Leur **résistance décroît très rapidement** en fonction de la température selon la loi suivante :

$$R(T) = R_0 \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (1.16)$$

où :

- $T$  : température exprimée en  $K$
- $R_0$  : résistance à la température  $T_0$
- $3000K < B < 4000K$  : caractéristique de la thermistance

Les thermistances sont des **capteurs de grande sensibilité thermique** et sont particulièrement adaptées à la mesure de très faibles variations de température.

## Types de thermistances

Il existe deux types de thermistances selon leur réponse à la température :

- **CTN** (*Coefficient de Température Négatif*) : la résistance **diminue** lorsque la température **augmente**. Ces sondes peuvent être utilisées sur une large plage de température.
- **CTP** (*Coefficient de Température Positif*) : la résistance **augmente** lorsque la température **augmente**.

**Linéarisation** : la réponse d'une thermistance *n'est pas linéaire*. La variation de la résistance est beaucoup plus importante que pour une résistance métallique. D'où la nécessité d'un **conditionneur spécifique** pour linéariser la réponse.

## Capteurs résistifs

Les **jauges d'extensométrie** sont des éléments **résistifs** qui peuvent être de nature *métallique* ou *semi-conductrice*.

- Ces jauges sont fixées sur un **support isolant mince**, lui-même **collé** à l'endroit de la structure dont on souhaite mesurer la *déformation*.
- La variation de la résistance suit la relation :

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad (1.17)$$

où :

- $\Delta R$  : variation de la résistance
- $R$  : résistance initiale
- $K$  : **facteur de jauge**
- $\Delta l$  : variation de longueur de la structure
- $l$  : longueur initiale

Les valeurs typiques du facteur de jauge  $K$  sont :

- **Jauge métallique** :  $2 < K < 4$
- **Jauge semi-conductrice** :  $\pm 50 < K < \pm 100$

La première application des jauges d'extensométrie est la **détermination des déformations** dans des *structures soumises à des contraintes*.

## Capteurs capacitifs

Les **capteurs capacitifs** sont des **condensateurs**, généralement de *forme plane* ou *cylindrique*, dont la **capacité** est donnée par les relations suivantes :

- **Pour un condensateur plan** :

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \cdot \frac{A}{d} \quad (1.18)$$



— Pour un condensateur cylindrique :

$$C = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r \cdot \frac{l}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (1.19)$$

où :

- $C$  : capacité du condensateur (F)
- $\epsilon_0$  : **permittivité du vide** (F/m)
- $\epsilon_r$  : **permittivité relative** du *diélectrique*
- $A$  : **aire** des plaques du condensateur (m<sup>2</sup>)
- $d$  : **distance** entre les plaques (m)
- $l$  : **longueur** du condensateur cylindrique (m)
- $r_1, r_2$  : **rayons** intérieur et extérieur du condensateur cylindrique (m)

Le **mesurande** agit sur la **capacité** en modifiant :

- la **permittivité**  $\epsilon_r$  du *diélectrique*
- les **dimensions géométriques** du condensateur ( $A, d, l, r_1, r_2$ )

# 2 Électronique

## 2.1 Microcontrôleur

### Introduction

#### Microprocesseur ( $\mu P$ )

Un **microprocesseur** ( $\mu P$ ) est une **unité centrale de traitement** (CPU<sup>1</sup>) qui exécute des instructions, mais qui **ne contient ni mémoire RAM, ni mémoire ROM, ni entrées/sorties intégrées**. Il est conçu pour des systèmes où ces composants, tels que la *RAM*, la *ROM*, et les *interfaces*, sont ajoutés séparément sur une carte mère. Le *microprocesseur* est principalement utilisé dans les **ordinateurs, serveurs, et systèmes embarqués avancés**, comme les processeurs Intel, AMD, ou Apple Silicon.

#### Microcontrôleur (*MCU*)

Un **microcontrôleur** (*MCU*) est un **circuit intégré complet** qui inclut non seulement un **microprocesseur**, mais aussi de la **mémoire RAM**, de la **mémoire ROM (Flash)** et des **périphériques d'entrées/sorties** sur une seule puce. Cela lui confère un **plus haut degré d'intégration** par rapport à un microprocesseur. Il est également appelé un **Système sur une Puce (SoC, *System On a Chip*)**. Il est conçu pour exécuter des **tâches spécifiques** à un **coût réduit** et avec une **consommation d'énergie optimisée**. On le retrouve dans des **systèmes embarqués**, notamment dans des **appareils électroménagers**, des **voitures**, des **jouets électroniques**, et des **objets connectés**, comme les dispositifs basés sur *Arduino*, *STM32*, *PIC*, et *ESP32*.

## 2.2 Le microcontrôleur ESP32

Le microcontrôleur utilisé dans la mineure **Instrumentation** est l'**ESP32**, fabriqué par **Espressif Systems** (*Chine*).

### Caractéristiques principales de l'ESP32

Le **processeur** de l'ESP32 est un *Dual-Core Xtensa LX6* qui peut fonctionner jusqu'à 240 MHz, conçu par **Tensilica**. Il dispose également d'**instructions DSP** (*Digital Signal Processing*) intégrées, permettant le **traitement de signaux complexes**. En termes de **connectivité**, l'ESP32 supporte le **Wi-Fi**, le **Bluetooth**, ainsi que le **Bluetooth Low Energy (BLE)**. Il dispose également de **modes basse consommation**, ce qui est crucial pour les applications à faible

---

1. Glossaire : CPU

consommation énergétique. Parmi les **interfaces de périphériques** disponibles, on trouve :

- **CAN** (Convertisseur DAC)
- **CNA** (Convertisseur ADC)
- **Capteur de toucher**
- **SPI, I2C, I2S, CAN, UART, PWM**

ESP32 Function Block Diagram

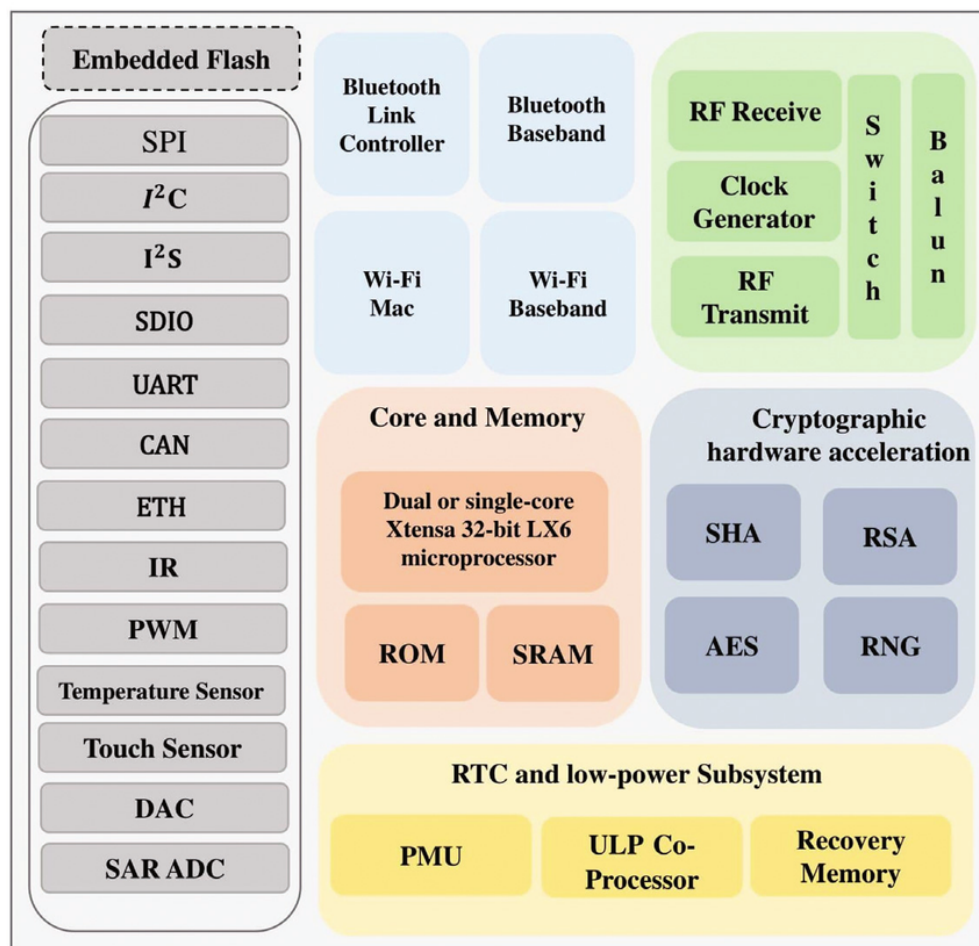


Figure 2.1 / Microcontrôleur ESP32

## Carte de développement ESP32-WROVER-B

Le microcontrôleur **ESP32** est intégré dans une **carte de développement** basée sur le module **ESP32-WROVER-B**, fabriqué par **uPesy (France)**, sous la référence **ESP32 Wrover DevKit v2.1**. Cette carte présente plusieurs **avantages** :

- **Brochage des principales entrées/sorties**, facilitant ainsi son utilisation pour le prototypage.
- **Alimentation et connexion USB-C** intégrées pour un usage simplifié.
- **Mémoire supplémentaire** pour des applications plus complexes.
- **Compatibilité breadboard**, idéale pour la réalisation de **prototypes**.

## 2.3 Amplificateur opérationnel

Un **amplificateur opérationnel** est un dispositif électronique permettant d'amplifier une différence de tension. Il est également appelé *Ampli OP*, *AOP* ou *ALI* (**A**mplificateur **L**inéaire **I**ntégré). Il possède deux entrées, notées  $V_+$  et  $V_-$ , ainsi qu'une sortie  $V_s$ . La sortie de l'amplificateur opérationnel correspond au produit de la différence de tension entre les deux entrées, multiplié par un facteur, souvent très élevé.

C'est un **circuit actif**, ce qui signifie qu'il a besoin d'une alimentation externe pour fonctionner. Il nécessite à la fois une alimentation positive ( $V_{CC+}$ ) et une alimentation négative ( $V_{CC-}$ ). Dans certains cas, l'alimentation négative peut être fournie par la masse ( $V_{CC-} = \text{masse}$ ).

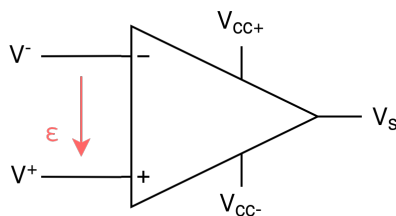


Figure 2.2 / Amplificateur opérationnel

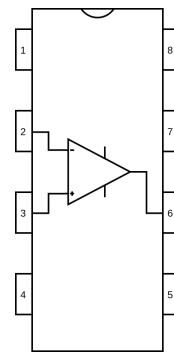


Figure 2.3 / Amplificateur opérationnel MCP6271

L'entrée  $V_+$  est aussi appelée **entrée non inverseuse** (notée + sur le schéma), tandis que l'entrée  $V_-$  est appelée **entrée inverseuse** (notée - sur le schéma). L'alimentation positive  $V_{CC+}$  est parfois aussi désignée sous les appellations  $V_{DD}$ ,  $V_{CC}$  ou  $V_{S+}$ . De même, l'alimentation négative  $V_{CC-}$  peut être nommée  $V_{SS}$ ,  $V_{EE}$ ,  $V_{S-}$  ou encore **GND** si elle est connectée à la masse.

## 2.4 Généralités sur les AOP

L'alimentation électrique d'un **amplificateur opérationnel (AOP)** peut être de deux types :

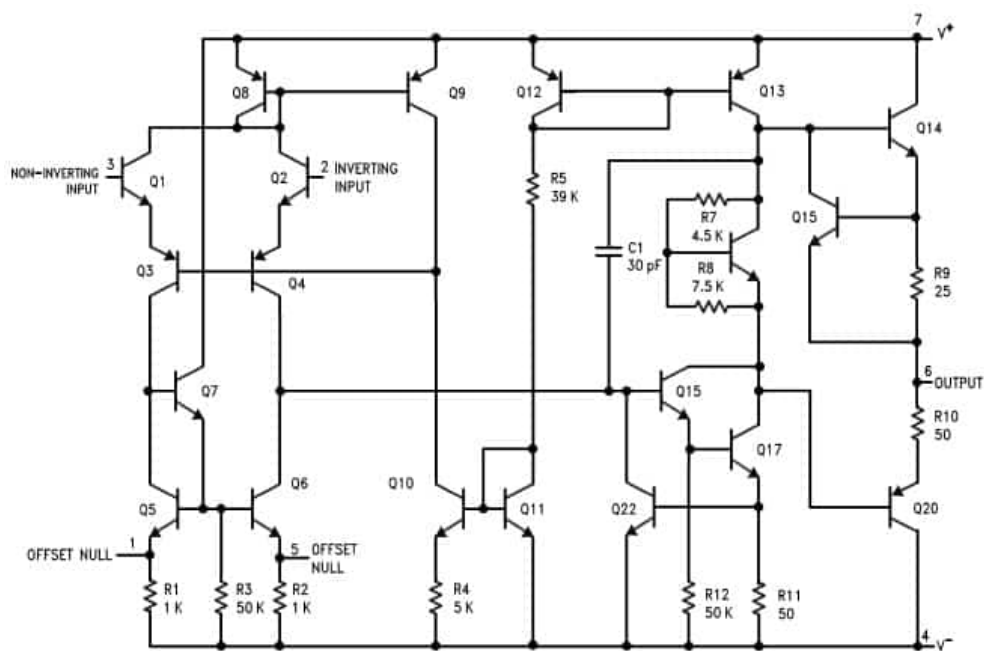
- Une **alimentation simple** (*single supply*), purement positive, par exemple 0 V / 12 V.
- Une **alimentation symétrique** (*dual supply*), où l'on dispose d'une tension négative et positive, par exemple -15 V / 15 V.

Certains AOP fonctionnent exclusivement avec une alimentation symétrique, d'autres uniquement avec une alimentation simple, et certains peuvent accepter les deux modes (*cf. datasheet du composant*). Il est important de noter que l'alimentation conditionne directement le niveau de tension en sortie : un AOP alimenté en -12 V / 12 V ne pourra délivrer qu'une tension de sortie comprise entre -12 V et 12 V.

Un amplificateur opérationnel ne s'utilise quasiment jamais seul. En pratique, il est accompagné de composants électroniques additionnels tels que des **résistances**, des **condensateurs** et des **inductances**. Ces composants permettent d'utiliser l'AOP dans diverses applications :

- **Calculs mathématiques analogiques** : addition, soustraction, inversion, intégration, dérivation, etc. Ces fonctions sont utilisées notamment pour le **pilotage et la régulation de moteurs électriques**.
- **Filtrage de signaux analogiques** : réalisation de filtres passe-bas, passe-haut, passe-bande, ou encore de filtres de rejet de bande. Ces filtres sont exploités dans des applications telles que le **filtrage audio**, le **mixage audio** ou encore l'atténuation de **bruits électroniques**.
- **Amplification de tensions et de courants** : un AOP peut être utilisé pour amplifier un signal avec adaptation d'impédance, ce qui est essentiel en **pré-amplification**, en **amplification** proprement dite, ainsi que pour la **régulation de tension et de courant**.

En interne un AOP est en fait un assemblage de plusieurs transistors, résistances et condensateurs. Il est donc possible de le modéliser par un schéma équivalent plus simple, appelé **schéma de représentation équivalent**.



**Figure 2.4** / Schéma équivalent d'un amplificateur opérationnel LM741

Dans le cas d'un **amplificateur opérationnel réel**, on note la relation entrée la sortie  $V_S$  et les tensions  $V_+$  et  $V_-$  :

$$V_S = G_{diff} \cdot (V^+ - V^-) + G_{mc} \cdot \frac{V^+ + V^-}{2}$$

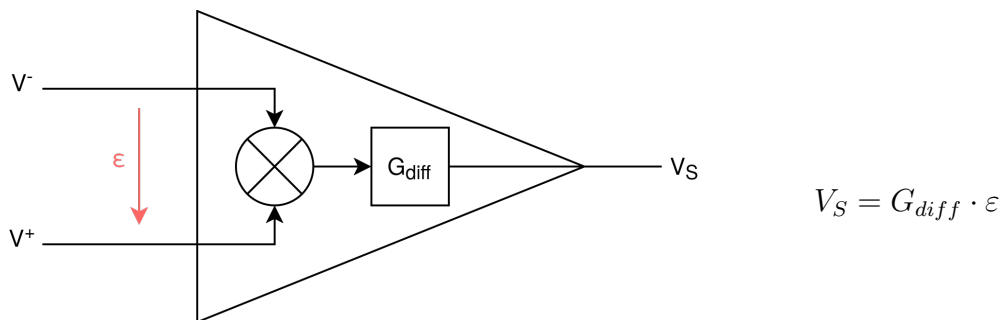
Où  $G_{diff}$  est le gain différentiel et  $G_{mc}$  le gain en mode commun. Le gain en mode commun est souvent très faible, de l'ordre de  $100 \mu\text{V/V}$ . Le gain différentiel

est très élevé, de l'ordre de  $100\,000\text{ V/V}$ , on voit très vite que le moindre écart différentiel au niveau des entrées va représenter une grande tension en sortie. Ainsi l'on peut approximer un **amplificateur opérationnel idéal** par la relation :

$$V_S = G_{diff} \cdot (V^+ - V^-)$$

$$V_S = G_{diff} \cdot \varepsilon$$

Ce qui donne la vue interne simplifiée d'un AOP :



**Figure 2.5** / Amplificateur opérationnel idéal

### Exemple 2.6. .

Si  $V^+ = 2345\text{ V}$  et  $V^- = 2320\text{ V}$ , alors  $\varepsilon = 25\text{ mV}$  et  $V_S = G_{diff} \cdot 25\text{ mV} = 2500\text{ V}$ . L'ampli Op ne sera bien évidemment pas capable de sortir une telle tension. La tension de sortie sera limitée à la tension d'alimentation positive ou négative suivant le cas. ┘

## Régime linéaire et régime saturé

L'amplificateur opérationnel peut adopter trois comportements distincts :

- Si  $V_S < V_{CC-}$ , l'AOP est en **saturation négative** et la tension de sortie est bloquée à  $V_{CC-}$ .
- Si  $V_S > V_{CC+}$ , l'AOP est en **saturation positive** et la tension de sortie est bloquée à  $V_{CC+}$ .
- Si  $V_{CC-} < V_S < V_{CC+}$ , l'AOP fonctionne en **régime linéaire** et la relation suivante est valide :

$$V_S = G_{diff} \times (V_+ - V_-)$$

En résumé, un amplificateur opérationnel peut fonctionner selon deux régimes principaux :

- (1) En **régime linéaire**, où la tension de sortie suit l'équation :

$$V_S = A \times (V_+ - V_-)$$

- (2) En **régime saturé**, où la tension de sortie est contrainte à une valeur maximale ou minimale, correspondant aux tensions d'alimentation de l'AOP.

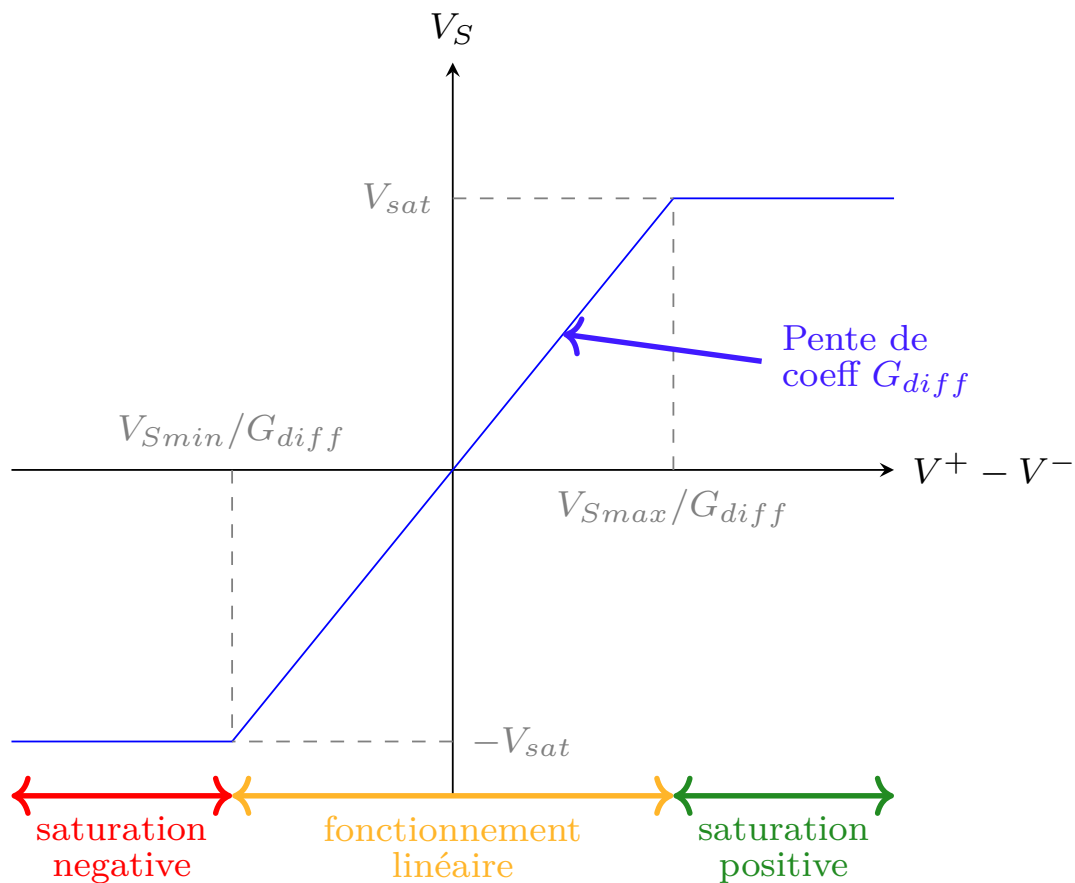


Figure 2.7 / Régime linéaire et régime saturé

### Largeur de la zone de fonctionnement linéaire :

Prenons l'exemple d'un amplificateur opérationnel alimenté en  $V_{CC+} = 12V$  et  $V_{CC-} = -12V$ , avec un gain différentiel  $G_{diff}$  de 100000. La largeur de la zone de fonctionnement linéaire est donnée par :

$$\Delta V = \frac{V_{CC+} - V_{CC-}}{G_{diff}} = \frac{12 - (-12)}{100000} = 240 \mu V$$

Ainsi, si l'écart entre  $V_+$  et  $V_-$  dépasse  $240 \mu V$ , l'amplificateur opérationnel entre en saturation. Cette plage de fonctionnement linéaire étant très réduite, cela limite considérablement la marge de manœuvre.

### Remarque : Boucle ouverte et stabilisation

Un amplificateur opérationnel n'est pas conçu pour fonctionner en **boucle ouverte** (c'est-à-dire sans rétroaction entre la sortie et l'entrée). C'est précisément le rôle des composants additionnels (résistances, condensateurs, etc.) d'assurer une stabilisation et de maintenir l'amplificateur opérationnel dans sa zone linéaire.

### Remarque : Saturation et amplificateurs rail-to-rail

En régime saturé, un amplificateur opérationnel atteint rarement exactement sa tension d'alimentation. La tension de sortie réelle est généralement légèrement

inférieure aux valeurs  $V_{CC+}$  et  $V_{CC-}$ , ce qui est souvent noté  $V_{\text{sat}}$  et  $-V_{\text{sat}}$  sur les graphes de réponse. Cependant, les amplificateurs opérationnels dits **rail-to-rail**, grâce à leur conception spécifique, sont capables d'atteindre quasiment les tensions d'alimentation, améliorant ainsi leur plage de fonctionnement.

## Impédance d'entrée

Un amplificateur opérationnel se caractérise par une **grande impédance d'entrée** au niveau des bornes  $V_+$  et  $V_-$ .

La conséquence directe est que le **courant consommé** au travers des entrées est **quasi nul**, ce qui permet de le négliger dans la plupart des applications.

Dans le domaine de l'instrumentation, cette caractéristique constitue un **atout majeur**. En effet, grâce à son impédance d'entrée élevée, l'amplificateur opérationnel n'affecte pas le signal fourni par un capteur, préservant ainsi l'intégrité des mesures réalisées.

## 2.5 Amplificateur opérationnel idéal

### Amplificateur opérationnel idéal

Si l'on néglige les imperfections des amplificateurs opérationnels, on obtient ce que l'on appelle un **amplificateur opérationnel idéal** ou **parfait**. Ses caractéristiques sont les suivantes :

— **Gain en boucle ouverte** en régime linéaire :

$$\varepsilon = \frac{(V^+ - V^-)}{G_{\text{diff}}} \Rightarrow V^+ \approx V^-$$

— **Impédance d'entrée** :  $R_{\text{in}} \rightarrow \infty$  :

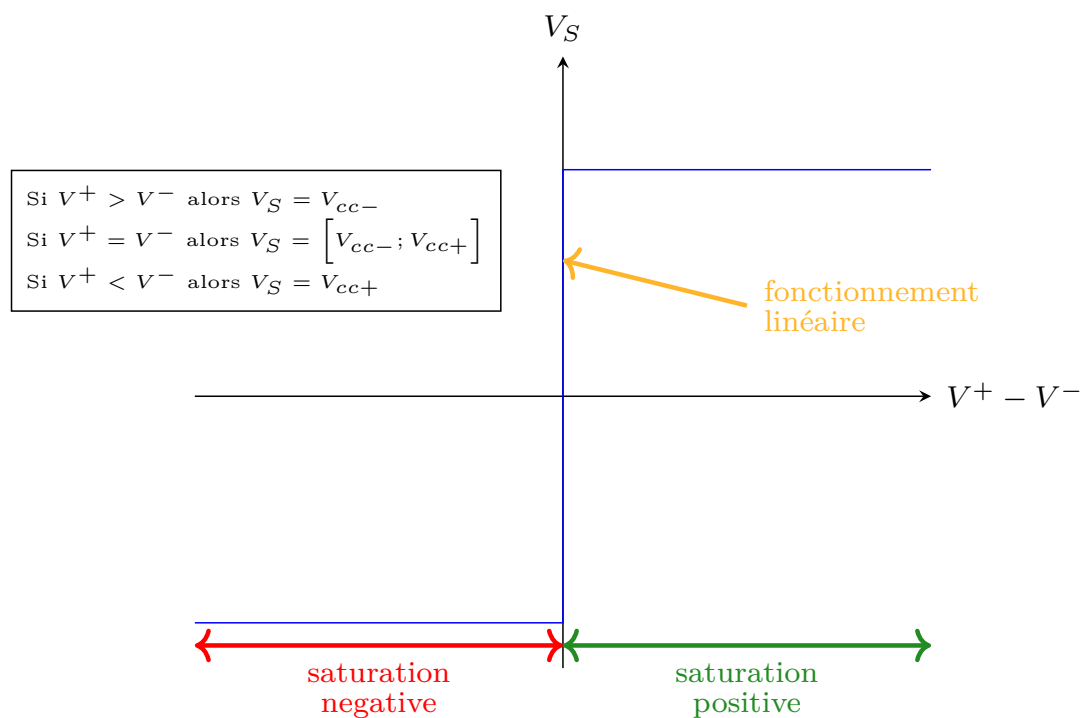
$$R_{\text{in}} = \frac{V_{\text{in}}}{i_{\text{in}}} \approx \infty \Rightarrow i_+ \approx i_- \approx 0$$

— **Impédance de sortie** :

$$R_{\text{out}} = \frac{V_{\text{out}}}{i_{\text{out}}} \approx 0 \Rightarrow i_+ \approx i_- \approx \infty$$

— **Tension de sortie** pouvant atteindre les valeurs maximales d'alimentation.





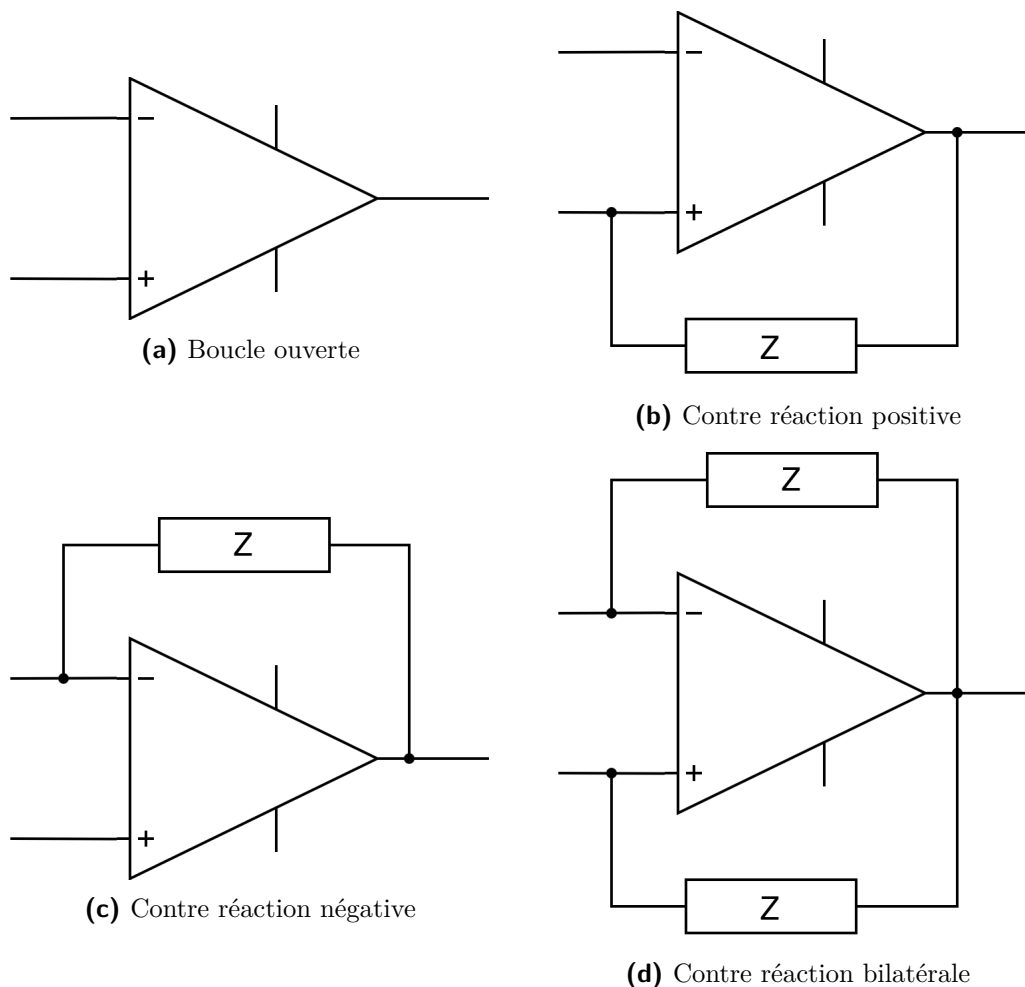
**Figure 2.8** / Cas d'un ampli op alimenté symétriquement

## 2.6 Contre-réaction

Un amplificateur opérationnel ne s'utilise jamais en **boucle ouverte**. Il est toujours utilisé avec des composants reliant la sortie à l'entrée, un principe appelé **contre-réaction**. Cette contre-réaction permet de stabiliser le fonctionnement de l'amplificateur et d'adapter ses performances aux besoins du circuit.

On distingue trois types de contre-réaction :

- **Contre-réaction positive** : elle amplifie les variations du signal d'entrée et peut conduire à une saturation rapide du circuit. Elle est utilisée dans des applications comme les comparateurs et les oscillateurs.
- **Contre-réaction négative** : elle réduit l'écart entre l'entrée et la sortie, stabilisant ainsi le fonctionnement de l'amplificateur. Ce type de contre-réaction est largement utilisé dans les circuits d'amplification linéaire.
- **Contre-réaction bilatérale** : elle combine des aspects des deux contre-réactions précédentes et est utilisée dans certains circuits spécifiques nécessitant un contrôle précis du gain et de la réponse en fréquence.



**Figure 2.9** / Contre-réaction des amplificateurs opérationnels

Ici  $Z$  est un composant ou un ensemble de composants quelconques (résistances, condensateurs, etc.).

- **Boucle ouverte** : jamais utilisée en pratique.
- **Contre-réaction positive** : régime saturé.
- **Contre-réaction négative** : régime linéaire.
- **Contre-réaction bilatérale** : régime linéaire ou saturé.

Comme la zone de linéarité d'un amplificateur opérationnel est très réduite, une **contre-réaction négative** est nécessaire pour le maintenir en régime linéaire.

## Effet de la contre-réaction négative

Lorsque l'on applique une contre-réaction négative :

- Si  $V_+ > V_-$ , la tension de sortie  $V_S$  augmente. En raison de la contre-réaction négative,  $V_-$  augmente également jusqu'à ce que l'égalité  $V_+ = V_-$  soit atteinte.
- Si  $V_+ < V_-$ , la tension de sortie  $V_S$  diminue. La contre-réaction négative entraîne alors une diminution de  $V_-$  jusqu'à ce que l'égalité  $V_+ = V_-$  soit rétablie.

- Cet ajustement se fait de manière progressive.
- Grâce à cette contre-réaction négative, l'amplificateur opérationnel **converge vers un point d'équilibre** pour sa tension de sortie.

### Effet de la contre-réaction positive

À l'inverse, lorsque l'on applique une **contre-réaction positive**, le régime saturé est inévitable :

- Si  $V_+ > V_-$ , la tension de sortie  $V_S$  augmente, ce qui entraîne une augmentation de  $V_+$  due à la contre-réaction positive, jusqu'à ce que  $V_S$  atteigne  $V_{CC+}$ .
- Si  $V_+ < V_-$ , la tension de sortie  $V_S$  diminue, ce qui provoque une diminution de  $V_+$  jusqu'à ce que  $V_S$  atteigne  $V_{CC-}$ .
- Cet ajustement se fait de manière progressive.
- Avec une contre-réaction positive, l'amplificateur opérationnel **diverge systématiquement** vers  $V_{CC+}$  ou  $V_{CC-}$ , ce qui le maintient en saturation.

## 2.7 Utilités pour l'instrumentation

Les amplificateurs opérationnels jouent un rôle essentiel dans l'instrumentation en permettant le traitement et l'adaptation des signaux issus de divers capteurs.

### Amplification de signaux

De nombreux capteurs, tels que les **thermocouples**, **jauges de contrainte** ou **photodiodes**, génèrent des tensions ou courants très faibles, généralement de l'ordre du *microvolt* ( $\mu\text{V}$ ) au *millivolt* ( $\text{mV}$ ). Un amplificateur opérationnel permet d'amplifier ces signaux pour les rendre exploitables par un microcontrôleur ou un système d'acquisition.

### Adaptation d'impédance

Certains capteurs possèdent une **forte impédance de sortie**, ce qui signifie qu'ils ne peuvent pas fournir suffisamment de courant pour alimenter un circuit suivant. Grâce à son **impédance d'entrée quasi infinie**, un AOP permet de récupérer le signal du capteur sans l'altérer, assurant ainsi un transfert d'énergie efficace.

### Filtrage et réduction du bruit

Les signaux des capteurs sont souvent affectés par du bruit électrique ou des interférences, notamment les perturbations à 50 Hz du réseau électrique ou les parasites radiofréquence (*RF*). Un AOP peut être utilisé pour concevoir des **filtres actifs**, permettant d'éliminer ces bruits parasites avant le traitement du signal.

## Conversion courant-tension

Certains capteurs, comme les **photodiodes** ou les **capteurs électrochimiques**, délivrent un **courant** plutôt qu'une tension. Un AOP configuré en **convertisseur courant-tension** ( $I_{\text{capteur}} \rightarrow V$ ) permet de transformer ce signal en une tension exploitable par les circuits électroniques.

## Rejet du mode commun

Les capteurs à **ponts résistifs**, tels que les **jauges de contrainte** et les **capteurs de pression**, nécessitent un **amplificateur différentiel** pour extraire leur signal utile tout en éliminant les perturbations en mode commun. Un AOP en configuration différentielle permet d'optimiser le rapport signal/bruit dans ces applications.

## Conditionnement avant numérisation

Les microcontrôleurs et cartes d'acquisition ne supportent généralement que des plages de tensions spécifiques (par exemple, 0 – 3.3 V ou 0 – 5 V). Un AOP permet de :

- **Ajuster** la plage de tension du capteur afin qu'elle corresponde à celle de l'ADC (*Analog-to-Digital Converter*).
- **Décaler (offset)** un signal pour éviter les tensions négatives et le rendre compatible avec l'électronique numérique.

## Compensation des erreurs et linéarisation

Certains capteurs présentent des **non-linéarités** ou des erreurs liées à des **variations de température**. Un AOP peut être utilisé dans un circuit de compensation pour corriger ces erreurs et améliorer la précision des mesures.

## Conclusion

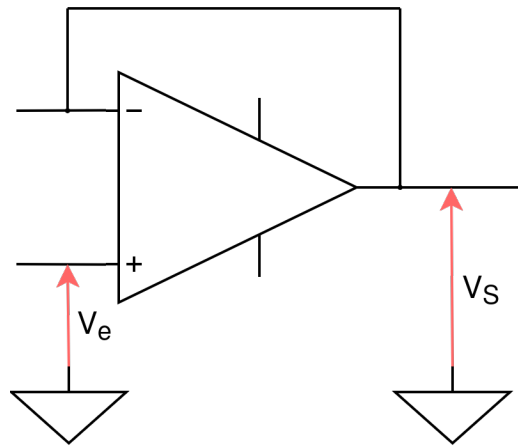
Les amplificateurs opérationnels sont indispensables en instrumentation. Sans eux, de nombreux capteurs seraient inexploitablement directement, rendant difficile le traitement et l'analyse des signaux dans les systèmes électroniques modernes.

## 2.8 Schémas de base

### Le suiveur

Le suiveur est le montage à contre-réaction négative le plus simple existant. Il est utilisé pour éviter de tirer du courant à l'entrée tout en étant capable de délivrer un courant significatif en sortie, dans les limites de l'alimentation.

En régime linéaire, l'égalité  $V_+ = V_-$  est vérifiée, ce qui implique que :

**Figure 2.10** / Montage suiveur

$$V_S = V_E$$

Cela est vrai tant que :

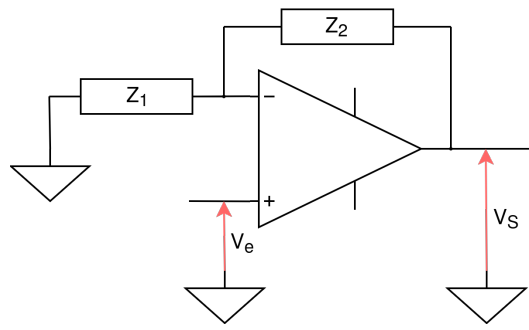
- $V_E$  reste dans la plage des tensions d'alimentation de l'amplificateur opérationnel.
- La fréquence du signal  $V_E$  n'est pas trop élevée.

Le suiveur offre plusieurs avantages pratiques :

- Il permet d'interfacer un capteur sensible à la charge, en exploitant son signal sans l'altérer.
- Il offre une impédance d'entrée très élevée et une impédance de sortie très faible, permettant ainsi d'amplifier en courant sans affecter la source.
- Lorsqu'il est placé en sortie d'une broche de microcontrôleur, il permet de délivrer un courant supérieur à celui que le microcontrôleur pourrait fournir seul. Ce montage est donc utile pour interfacer un microcontrôleur avec des charges nécessitant plus de courant.

## L'amplificateur non-inverseur

L'amplificateur non inverseur est un montage utilisant un amplificateur opérationnel (AOP) avec une rétroaction négative. Il est utilisé pour amplifier une tension d'entrée  $V_E$  sans inversion de phase. Ce montage est particulièrement prisé pour des applications nécessitant un gain précis et une impédance d'entrée élevée.



**Figure 2.11** / Montage amplificateur non-inverseur

En régime linéaire, la relation  $V_+ = V_-$  est vérifiée, et comme  $V_+$  est directement relié à l'entrée  $V_E$ , on a :

$$V_- = V_E$$

D'autre part, la tension  $V_-$  est obtenue à partir d'un pont diviseur de tension formé par deux résistances  $Z_1$  et  $Z_2$ . D'après la loi des diviseurs de tension :

$$V_- = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} V_S$$

Or, en régime linéaire,  $V_- = V_E$ , donc :

$$V_E = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} V_S$$

### Expression du gain :

En réarrangeant l'équation précédente pour exprimer  $V_S$  en fonction de  $V_E$ , on obtient :

$$V_S = V_E \cdot \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1}$$

Ce qui peut être réécrit sous la forme :

$$V_S = \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right) V_E$$

Le gain en tension du montage est donc :

$$G = 1 + \frac{Z_2}{Z_1}$$

L'amplificateur non inverseur présente plusieurs avantages :

- **Impédance d'entrée élevée** : Grâce à l'entrée non inverseuse de l'AOP, la source de signal ne subit pratiquement aucune charge.
- **Amplification sans inversion** : La tension de sortie  $V_S$  est en phase avec la tension d'entrée  $V_E$ .
- **Gain réglable** : Le facteur d'amplification dépend du rapport  $Z_2/Z_1$ , ce qui permet une grande flexibilité dans la conception.
- **Stabilité et précision** : L'utilisation de la contre-réaction négative améliore la stabilité du gain et réduit la sensibilité aux variations des caractéristiques de l'AOP.

Ce montage est couramment utilisé dans :

- Les **préamplificateurs audio**, où il est utilisé pour amplifier des signaux faibles en maintenant une bonne fidélité.
- Les **capteurs électroniques**, où une amplification sans inversion est nécessaire avant le traitement du signal.
- Les **systèmes de conditionnement de signal**, où il est utilisé pour adapter les niveaux de tension avant un traitement numérique.
- Les **circuits d'instrumentation**, notamment dans les mesures précises de faibles signaux électriques.

## 2.9 Conditionneur simple

### Principe de mesure

Le principe de mesure consiste en une source de tension qui alimente un pont diviseur de tension avec une résistance fixe  $R_1$  et une autre représentant le capteur  $R_c$ .

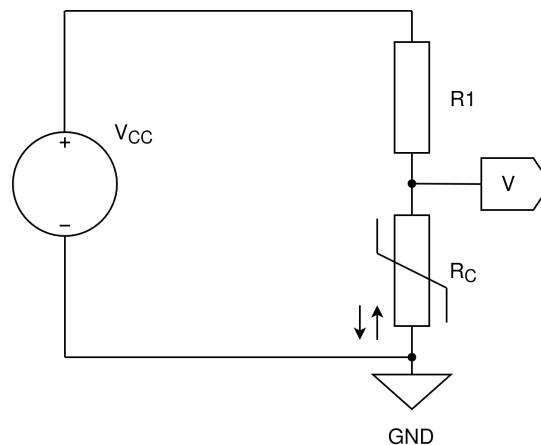


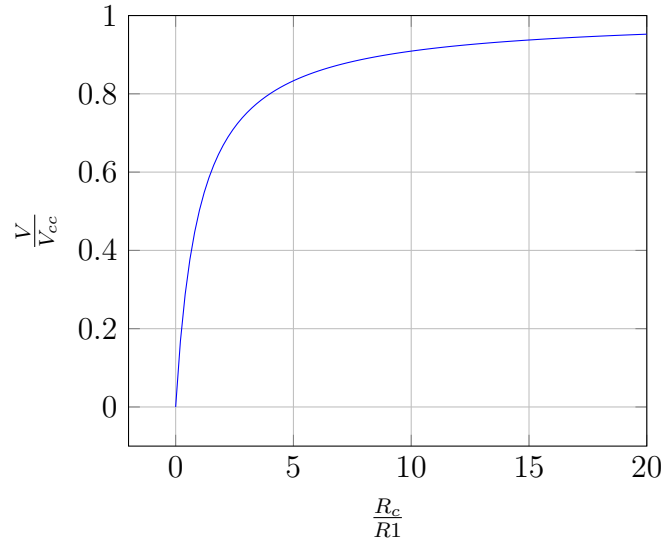
Figure 2.12 / Conditionneur simple

Le montage suivant nous permet d'écrire la tension  $V$  :

$$V = \frac{R_c}{R_1 + R_c} V_{cc}$$

L'évolution de  $V$  en fonction de  $R_c$  n'est pas linéaire :

$$\frac{V}{V_{cc}} = \frac{x}{1+x} \quad \text{avec } x = \frac{R_c}{R_1}$$



**Figure 2.13** / Trace de la fonction  $\frac{V}{V_{cc}} = \frac{R_c}{R_1 + R_c}$

## Choix de la valeur de $R_1$

Considérons un conditionneur de signal basé sur un pont diviseur résistif alimenté par une tension  $V_{cc}$ , et composé de deux résistances :  $R_1 = R_0$  (fixe), et  $R_c = R_0 + \Delta R$ , une résistance variable représentant le capteur.

La tension de sortie  $V$  prélevée au point milieu du diviseur s'écrit :

$$V = \frac{R_c}{R_1 + R_c} \cdot V_{cc} = \frac{R_0 + \Delta R}{2R_0 + \Delta R} \cdot V_{cc}$$

Cette expression montre que  $V$  n'est pas une fonction linéaire de  $\Delta R$ .

La sensibilité  $S$  est définie comme la dérivée de  $V$  par rapport à  $R_c$  :

$$S = \frac{dV}{dR_c} = \left[ \frac{(R_0 + R_c) - R_c}{(R_0 + R_c)^2} \right] \cdot V_{cc} = \frac{R_0}{(R_0 + R_c)^2} \cdot V_{cc}$$

En remplaçant  $R_c$  par  $R_0 + \Delta R$ , on obtient :

$$S = \frac{R_0}{(2R_0 + \Delta R)^2} \cdot V_{cc}$$

Dans le cas où le capteur fonctionne en petits signaux, c'est-à-dire lorsque  $\Delta R \ll R_0$ , on peut approximer la réponse du conditionneur comme étant linéaire. Sous cette hypothèse :

$$S = \left. \frac{dV}{dR_c} \right|_{R_c=R_0} = \frac{V_{cc}}{4R_0}$$



Ainsi, dans cette zone de fonctionnement linéaire, la variation de la tension de sortie  $\Delta V$  en fonction de la variation de la résistance du capteur  $\Delta R$  s'exprime comme :

$$\Delta V = S \cdot \Delta R = \frac{V_{cc}}{4R_0} \cdot \Delta R$$

Cette relation montre que, dans le régime de petits signaux, la sortie est proportionnelle à la variation de résistance, ce qui est idéal pour les applications de mesure ou de détection.

## 2.10 CAN-CNA

### Généralités

Dans le monde réel, l'information est généralement représentée sous forme de signaux analogiques. Ces signaux sont le plus souvent électriques et leur forme reflète en continu l'évolution d'une grandeur physique.

Un signal analogique est donc une représentation continue dans le temps, dont un ou plusieurs paramètres — typiquement l'amplitude ou la fréquence — sont proportionnels à une grandeur physique d'origine. Voici quelques exemples classiques de grandeurs analogiques :

- **L'intensité lumineuse** : convertie en tension électrique par un photodétecteur.
- **La pression acoustique** : convertie en signal électrique par un microphone.
- **La température** : convertie en tension par une thermistance ou un capteur analogique.

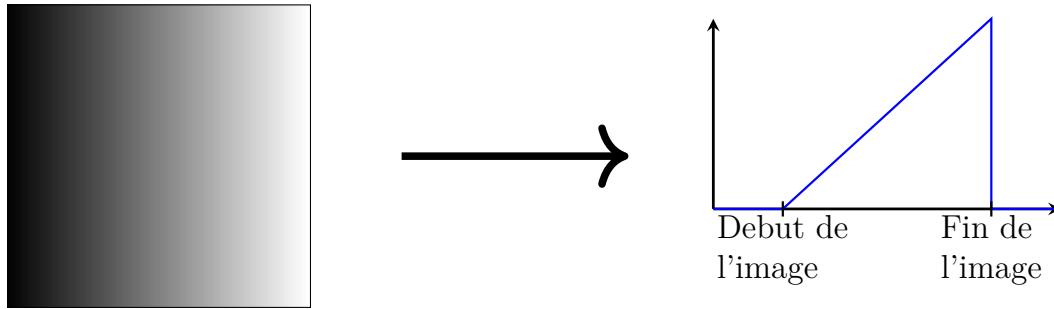
### Illustration : codage d'une ligne d'image

Prenons l'exemple d'un balayage d'image. L'intensité lumineuse captée ligne par ligne est convertie en une tension analogique proportionnelle. À titre d'illustration :

- Au début de la ligne, la tension est nulle (0 V) : cela correspond à une zone sombre (noir).
- À la fin de la ligne, la tension atteint 0.7 V) : cela correspond à une zone très claire (blanc).

Cette variation continue de la tension en fonction du temps représente fidèlement le dégradé d'intensité lumineuse de la ligne d'image.

### Représentation schématique :

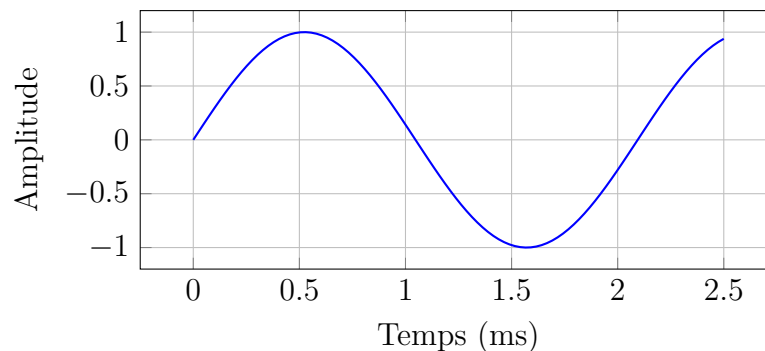


(Note : L'illustration ci-dessus montre l'évolution temporelle d'une tension analogique correspondant au balayage d'une ligne d'image du noir vers le blanc.)

La plupart des grandeurs physiques que nous mesurons existent sous forme **analogique** : température, vitesse, position, pression, force, etc. Un signal analogique se caractérise par un **nombre infini de points de mesure**. Cela signifie que :

- L'information est **continue** dans le temps.
- L'information est **continue** en amplitude.

Un signal analogique typique peut être représenté par la courbe ci-dessous :

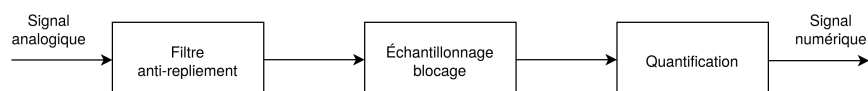


Comme le montre ce graphique, un signal analogique possède une infinité de valeurs et une infinité de points de mesure.

Le processus de **numérisation** consiste à transformer un signal analogique en une **suite de valeurs numériques** qui décrivent ses variations. Puisqu'il est impossible de stocker une infinité de points, il est nécessaire de :

- **Limiter** le nombre de points de mesure, c'est l'opération d'**échantillonnage**.
- **Coder** chaque échantillon avec un nombre fini de chiffres.

L'échantillonnage consiste donc à prendre un certain nombre de points représentatifs du signal analogique. Chaque point est ensuite **quantifié** et **codé** en une valeur numérique exploitable par un système numérique.



**Figure 2.14** / Chaîne de conversion numérique-analogique

À l'inverse, un signal numérique peut être transformé en un signal analogique grâce à un **convertisseur numérique-analogique** (CNA). Ce processus est

appelé **conversion numérique-analogique** et consiste à reconstituer le signal analogique à partir des valeurs numériques. Le CNA effectue une **interpolation** entre les points numériques pour créer un signal analogique continu. Il est important de noter que la qualité de la conversion dépend de la fréquence d'échantillonnage et de la résolution du convertisseur. Un échantillonnage trop faible peut entraîner une perte d'information, tandis qu'une résolution insuffisante peut introduire des erreurs dans la représentation du signal analogique. La figure ?? illustre le processus de conversion numérique-analogique. Le signal numérique est d'abord échantillonné, puis quantifié et enfin converti en un signal analogique continu.

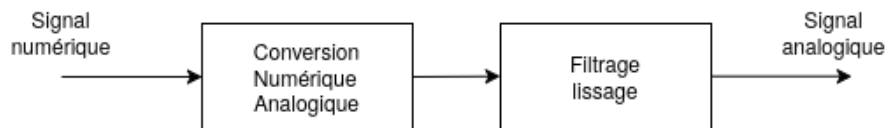


Figure 2.15 / Chaîne de conversion analogique-numérique

## Échantillonnage-Blocage

Exemple, on veut numériser la fonction suivante :

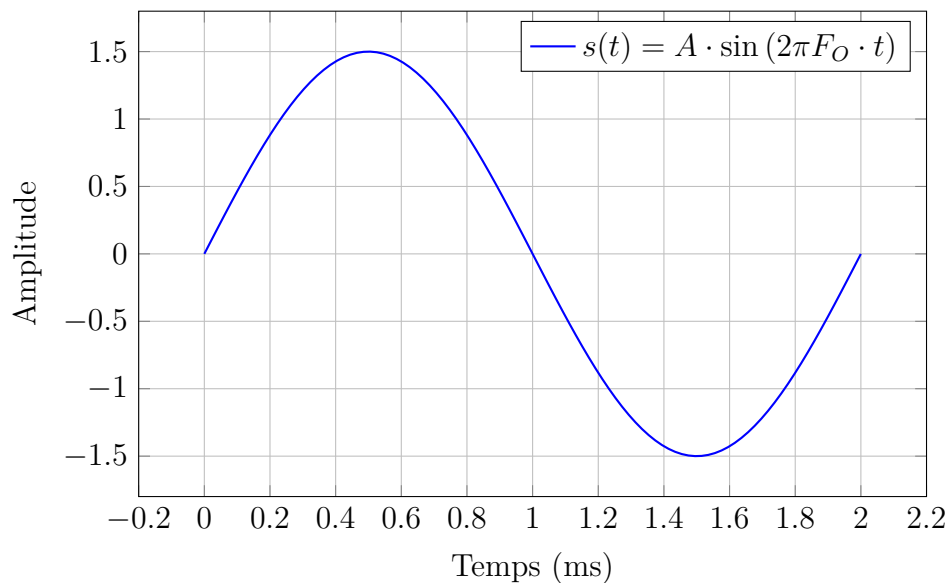


Figure 2.16 / Signal analogique

La première étape consiste à échantillonner le signal analogique. Pour cela, on prend des échantillons à intervalles réguliers. Par exemple, on peut choisir de prélever un échantillon tous les  $T_e$  (ici 0.125 ms). La fréquence d'échantillonnage est donc  $F_e = \frac{1}{T_e}$ . Dans notre exemple, on a :

$$F_e = \frac{1}{T_e} = \frac{1}{0.125} = 8 \text{ kHz}$$

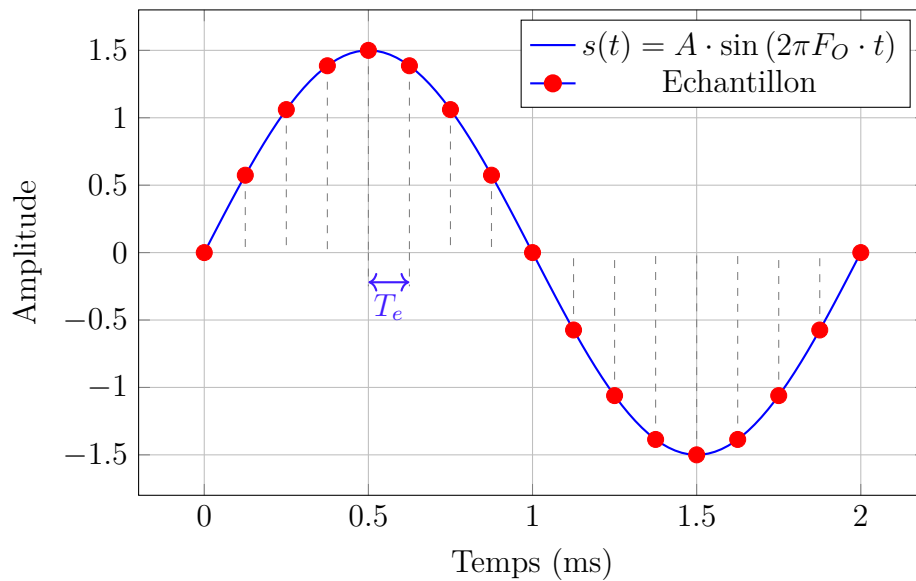


Figure 2.17 / Signal analogique échantillonné

On obtient ainsi une série de points discrets, qui représentent le signal analogique à des instants précis. Ces points sont appelés **échantillons**. Ensuite, on doit **bloquer** le signal entre chaque échantillon. Cela signifie que l'on maintient la valeur de chaque échantillon constant jusqu'au prochain échantillon. Le signal résultant est donc une série de segments horizontaux, représentant la valeur de chaque échantillon. Ce processus est souvent appelé **signal bloqué** ou **signal échantillonné et bloqué**. Il est important de noter que le signal bloqué ne représente pas fidèlement le signal analogique d'origine, car il ne conserve que les valeurs des échantillons et ignore les variations entre eux. Cependant, il est plus facile à traiter par un système numérique, car il est discret dans le temps et l'amplitude.

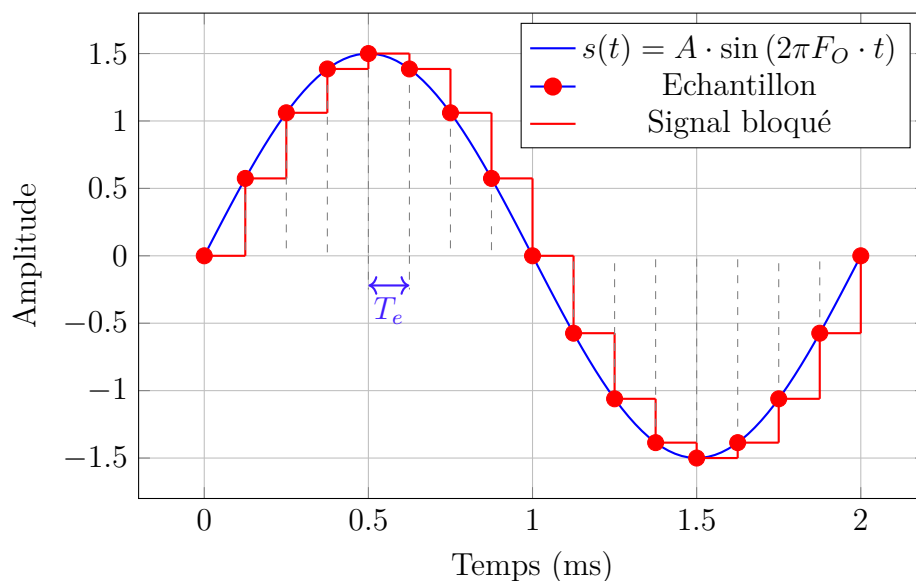
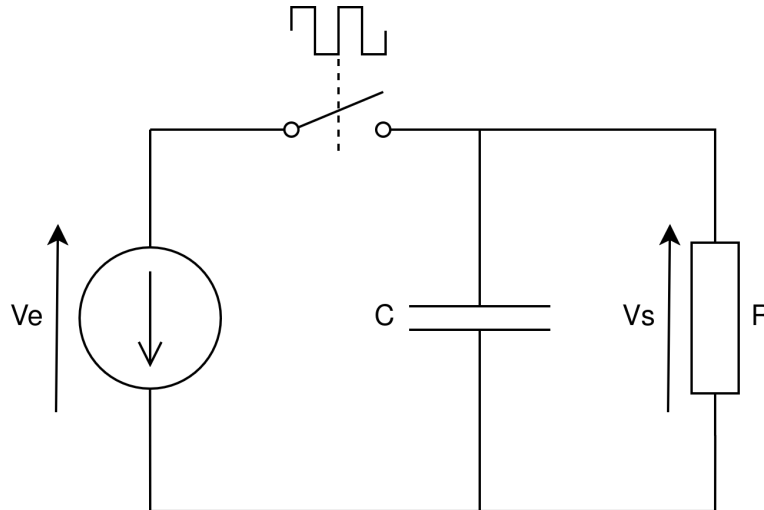


Figure 2.18 / Signal analogique échantillonné et bloqué

Un échantillonneur-bloqueur peut être réalisé à l'aide des composants suivants :

- Un interrupteur commandé par un signal TTL (signal carré prenant deux valeurs : 0 V et 5 V), appelé *signal d'horloge*,
- Un condensateur,
- Une résistance montée en parallèle avec le condensateur.



**Figure 2.19** / Échantillonneur-bloqueur

Ce circuit est utilisé dans la chaîne d'acquisition analogique-numérique, notamment avant un convertisseur analogique-numérique (CAN).

**Fonctionnement :** On distingue deux états de fonctionnement en fonction de l'état de l'interrupteur :

- (a) **Interrupteur fermé :** Le condensateur suit la tension d'entrée. La tension de sortie est donc égale à la tension d'entrée :

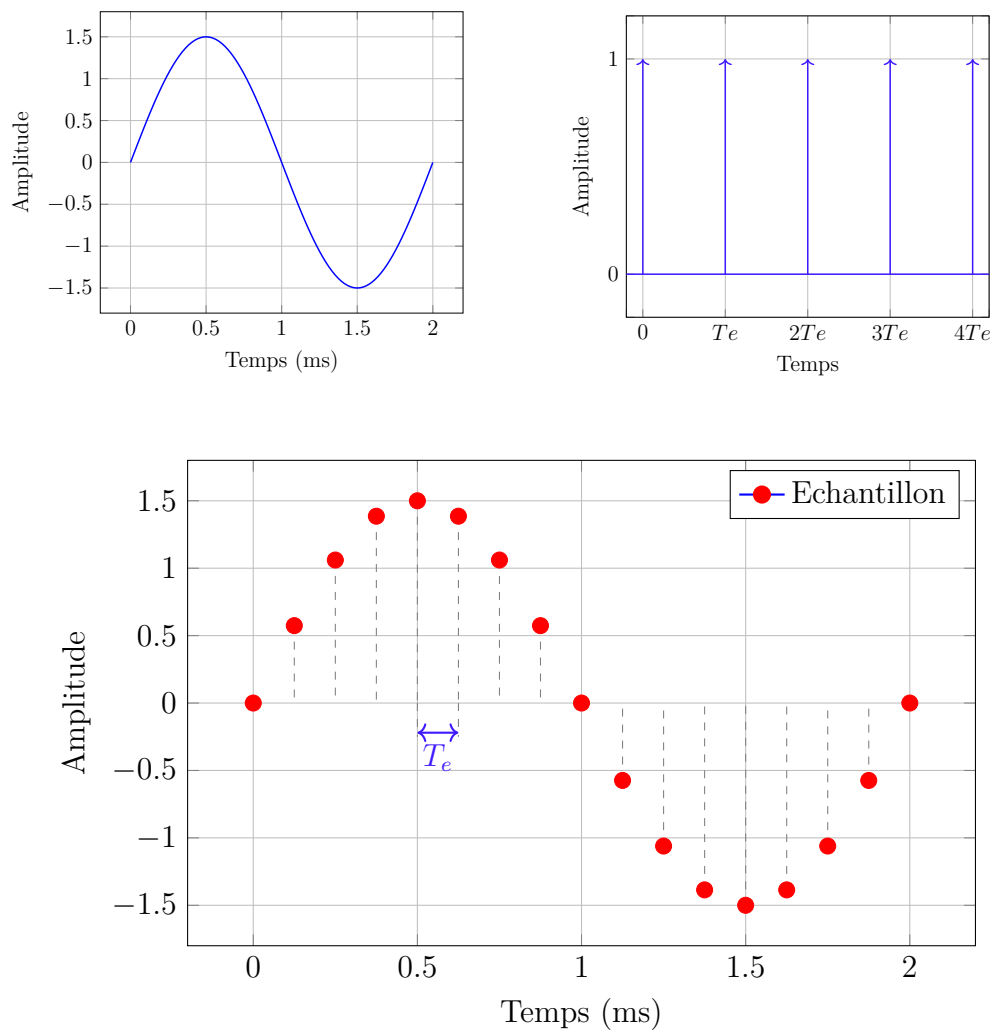
$$V_s = V_e$$

- (b) **Interrupteur ouvert :** Le condensateur est isolé de l'entrée et conserve sa charge. La tension de sortie reste constante :

$$V_s = \text{constante}$$

## Modélisation de l'échantillonnage

L'échantillonnage-blocage entraîne une **distorsion** du signal analogique. En effet, le signal bloqué ne représente pas fidèlement le signal analogique d'origine, car il ne conserve que les valeurs des échantillons et ignore les variations entre celles-ci. Cependant, il est plus facile à traiter par un système numérique, car il est discret dans le temps et l'amplitude.

**Figure 2.20** / Signal analogique échantillonné

# Hors programme

## 3.1 Échantillonnage

L'opération d'échantillonnage consiste à représenter un signal fonction du temps  $s(t)$  à des instants multiples d'un intervalle de temps  $T$  (période d'échantillonnage). Cette opération s'analyse simplement par l'intermédiaire de la théorie des distributions. Par définition la distribution des masses unitaires aux points de l'axe réel multiples entiers de la période  $T$ , associée à la fonction  $s(t)$  a l'ensemble de ses valeurs  $s(nT)$  où  $n$  est un entier.

$$u(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT)$$

## 3.2 Fonction delta de Dirac

Soit  $\mathbb{R}^n$ . La fonction delta de Dirac, notée  $\delta$ , n'est pas une fonction ordinaire, mais une mesure borélienne<sup>1</sup> particulière. Elle est **concentrée en un seul point**, à savoir l'origine 0, et attribue une masse totale égale à 1 à ce point. On la définit ainsi comme la mesure de probabilité telle que :

$$\delta(\{0\}) = 1$$

et plus généralement : 
$$\delta(A) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \in A \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Pour tout borélien<sup>2</sup>  $A \subset \mathbb{R}^n$ .

Par abus de langage, on dit que la fonction delta de Dirac est **nulle partout sauf en 0**, où elle prend une valeur infinie, de manière que **l'intégrale sur l'ensemble de l'espace soit égale à 1**. Il ne s'agit pas d'une fonction au sens classique, mais d'un objet distribué, c'est-à-dire une **mesure** (ou une **distribution**) dont l'effet se fait uniquement sentir en un seul point.

La mesure  $\delta$  est une **mesure de Radon**, ce qui signifie en particulier qu'elle est définie sur les ensembles boréliens et qu'elle est finie sur les compacts. Elle peut alors être identifiée à une **forme linéaire continue de norme 1** sur l'espace des fonctions continues à support compact, noté  $\mathcal{C}_c(\mathbb{R}^n)$ . Cette forme linéaire agit comme suit :

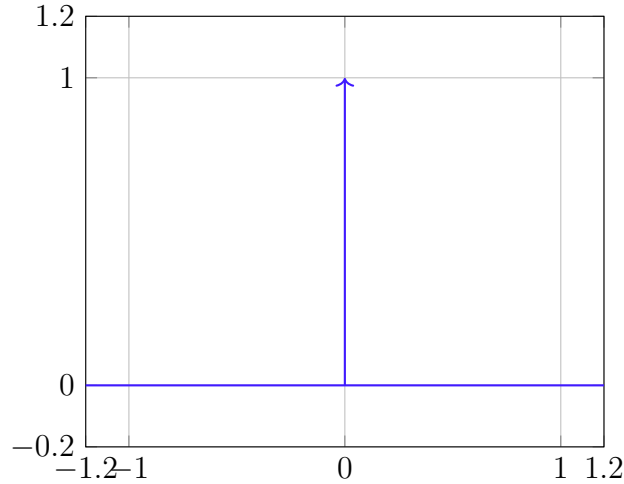
$$\mathcal{C}_c(\mathbb{R}^n) \rightarrow \mathbb{R}, \quad \varphi \mapsto \langle \delta, \varphi \rangle := \int \varphi d\delta = \varphi(0)$$

1. Glossaire : **Mesure borélienne**

2. Glossaire : **Borélien**

Autrement dit, **intégrer une fonction test  $\varphi$  contre la mesure  $\delta$  revient simplement à évaluer cette fonction en 0.**

L'espace  $\mathcal{C}_c(\mathbb{R}^n)$  désigne l'ensemble des fonctions continues à support compact dans  $\mathbb{R}^n$ , muni de la norme uniforme  $\|\cdot\|_\infty$  associée à la convergence uniforme.



**Figure 3.1** / La fonction delta de Dirac.

*Figure 3.1  $\rightarrow p. 34$*  La flèche signifie que toute la "masse" de la fonction est concentrée en 0 et vaut 1.

## Le peigne de Dirac

Le peigne de Dirac est une mesure borélienne sur  $\mathbb{R}^n$  qui **concentre une masse unitaire** sur chaque point de la grille  $\mathbb{Z}^n$  (l'ensemble des entiers naturels). Il est défini par la **somme infinie** de la fonction delta de Dirac, notée  $\delta$ , **pondérée** par la période d'échantillonnage  $T$  :

$$\text{III}_T(t) \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta_{kT}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT).$$

## Série de Fourier

Il est clair que  $\text{III}_T(t)$  est périodique de période  $T$ . C'est-à-dire que :

$$\text{III}_T(t + T) = \text{III}_T(t)$$

pour tout  $t$ . La série de Fourier complexe de ce genre de fonction périodique est :

$$\text{III}_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n e^{i2\pi n \frac{t}{T}}$$



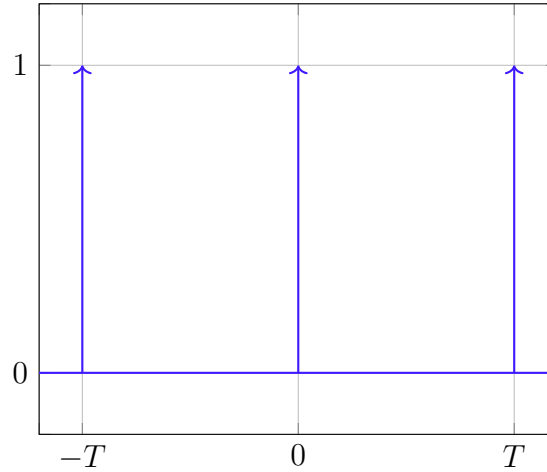


Figure 3.2 / Le peigne de Dirac.

où les coefficients de Fourier sont donnés par :

$$\begin{aligned}
 c_n &= \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \text{III}_T(t) e^{-i2\pi n \frac{t}{T}} dt \quad (-\infty < t_0 < +\infty) \\
 &= \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \text{III}_T(t) e^{-i2\pi n \frac{t}{T}} dt \\
 &= \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \delta(t) e^{-i2\pi n \frac{t}{T}} dt \\
 &= \frac{1}{T} e^{-i2\pi n \frac{0}{T}} \\
 &= \frac{1}{T}
 \end{aligned}$$

Tous les coefficients de Fourier sont donc égaux à  $\frac{1}{T}$ . En conséquence, la série de Fourier de  $\text{III}_T(t)$  est :

$$\text{III}_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{T} e^{i2\pi n \frac{t}{T}}$$

Quand la période est  $T = 1$ , on obtient :

$$\text{III}(x) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} e^{i2\pi nx}$$

Cette série diverge, quand elle est étudiée comme une série de nombres complexes ordinaires. Mais elle converge dans le sens des distributions.

Une "racine carrée" du peigne de Dirac a des applications en physique, spécifiquement :

$$\delta_N^{(1/2)}(\xi) = \frac{1}{\sqrt{NT}} \sum_{\nu=0}^{N-1} e^{-i\frac{2\pi}{T}\xi\nu}, \quad \lim_{N \rightarrow \infty} |\delta_N^{(1/2)}(\xi)|^2 = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(\xi - kT)$$

même si ce n'est pas une distribution au sens de classique.

### 3.3 Transformée de Fourier

La transformée de Fourier d'un peigne de Dirac est également un peigne de Dirac. Pour la transformée de Fourier  $\mathcal{F}$ , exprimée dans le domaine des fréquences (en Hz), le peigne de Dirac  $\text{III}_T$  de période  $T$  se transforme en un peigne de Dirac redimensionné de période  $1/T$ , c'est-à-dire que :

$$\begin{aligned}\mathcal{F}[f](\xi) &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i2\pi\xi t} dt \\ \mathcal{F}[\text{III}_T](\xi) &= \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta\left(\xi - k\frac{1}{T}\right) \\ &= \frac{1}{T} \text{III}_{\frac{1}{T}}(\xi)\end{aligned}$$

Est proportionnelle à un autre peigne de Dirac de période  $1/T$  (radians par seconde). Le peigne de Dirac  $\text{III}$  de période  $T = 1$  est une fonction propre de  $\mathcal{F}$  vers la valeur propre 1.

Ce résultat peut être établi en considérant la transformée de Fourier  $S_\tau(\xi) = \mathcal{F}[s_\tau](\xi)$  de la famille de fonctions  $s_\tau(x)$  de la forme :

$$S_\tau(\xi) = \tau^{-1} \sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{-\pi\tau^2 m^2} e^{-\pi\tau^{-2}(\xi-m)^2}$$

# Appendices

# Table des figures

1	Chaîne d'acquisition . . . . .	v
1.1	Diagramme d'un capteur . . . . .	1
1.2	Caractéristique d'un capteur . . . . .	1
1.3	Sensibilité d'un capteur . . . . .	2
1.4	Linéarité d'un capteur . . . . .	2
1.6	Force électromotrice liée à la différence de température ( $T_1 - T_2$ )	5
1.7	Schéma d'un thermocouple . . . . .	5
1.8	Variation de la différence de potentiel en fonction de la température pour différents thermocouples. . . . .	5
1.9	Modèle de Thévenin d'un thermocouple . . . . .	5
1.10	Apparition de charges électriques . . . . .	6
1.11	Apparition de charges sur les faces opposées par la déformation du matériau. . . . .	6
1.12	Apparition de charges sous l'effet de la lumière . . . . .	7
1.13	Modèle de Norton d'une photodiode . . . . .	7
2.1	Microcontrôleur ESP32 . . . . .	13
2.2	Amplificateur opérationnel . . . . .	14
2.3	Amplificateur opérationnel MCP6271 . . . . .	14
2.4	Schéma équivalent d'un amplificateur opérationnel LM741 . . .	15
2.5	Amplificateur opérationnel idéal . . . . .	16
2.7	Régime linéaire et régime saturé . . . . .	17
2.8	Cas d'un ampli op alimenté symétriquement . . . . .	19
2.9	Contre-réaction des amplificateurs opérationnels . . . . .	20
2.10	Montage suiveur . . . . .	23
2.11	Montage amplificateur non-inverseur . . . . .	24
2.12	Conditionneur simple . . . . .	25
2.13	Trace de la fonction $\frac{V}{V_{cc}} = \frac{R_c}{R_1 + R_c}$ . . . . .	26
2.14	Chaîne de conversion numérique-analogique . . . . .	28
2.15	Chaîne de conversion analogique-numérique . . . . .	29
2.16	Signal analogique . . . . .	29
2.17	Signal analogique échantillonné . . . . .	30
2.18	Signal analogique échantillonné et bloqué . . . . .	30
2.19	Échantillonneur-bloqueur . . . . .	31
2.20	Signal analogique échantillonné . . . . .	32
3.1	La fonction delta de Dirac. . . . .	34
3.2	Le peigne de Dirac. . . . .	35

# Liste des tableaux

1.5	Principes physiques et grandeurs de sortie des capteurs . . . . .	4
1.14	Caractéristiques électriques sensibles et matériaux utilisés pour différents capteurs . . . . .	8

# Glossaire et acronymes

## Glossaire

**$\sigma$ -algèbre** Une  $\sigma$ -algèbre est une collection d'ensembles qui est fermée sous les opérations de complémentation et d'union dénombrable.

**Borélien** Un ensemble est dit *borélien* s'il appartient à la  $\sigma$ -algèbre de Borel, c'est-à-dire s'il peut être obtenu à partir d'ensembles ouverts par des opérations de complémentation et d'union dénombrable.

**CPU** Le CPU est le cerveau de l'ordinateur. Il exécute des instructions, traite les données et contrôle les opérations du système.

**IoT** L'IoT est un réseau d'objets physiques, d'appareils et de systèmes connectés à Internet et équipés de capteurs, de logiciels et d'une connectivité réseau, leur permettant de collecter et d'échanger des données.

**Mesure** Une mesure est une fonction qui attribue une valeur non négative à des ensembles, permettant de quantifier leur taille ou leur volume.

**Mesure borélienne** Une mesure borélienne est une mesure définie sur une  $\sigma$ -algèbre de Borel, qui est l'ensemble des ensembles mesurables dans un espace topologique.

**RFID** La technologie RFID utilise des ondes radio pour identifier des objets à distance. Elle est utilisée dans de nombreux domaines tels que la logistique, la distribution, la santé, la sécurité, etc.

## Acronymes

**CPU** Central Processing Unit

**IoT** Internet of Things

**RFID** Radio Frequency IDentification