

Techniques expérimentales / Capteurs et instrumentation

Eric Vourc'h

eric.vourch@satie.ens-cachan.fr

Ecole normale Supérieure de Cachan
Laboratoire SATIE

Ce cours vise à présenter les principes des **capteurs** et de l'**instrumentation** que l'on y associe pour réaliser des **mesures**.

Pourquoi s'intéresser aux capteurs et aux techniques d'instrumentation ?

Parce qu'ils sont nécessaires à de multiples applications :

Automobile,
Aéronautique,
Contrôle non destructif,
Energie
Génie civil,
Nucléaire,
Objets grand public
Recherche,
Santé,
Spatial,
Systèmes industriels
...

De l'utilité des capteurs ? Un exemple

Exemple d'application : La gestion des réseaux d'énergie

Production d'ε	Demande
Nucléaire	Chauffage
Héolienne	Climatisation
Solaire	Véhicules électriques
Marine	Industrie
	...

Pour faire coïncider production et demande en énergie électrique les réseaux doivent échanger et gérer les données de production et de consommation (d'où la notion de réseau intelligent, alias **smart grid**). Pour cela les mailles du réseau sont équipées de **capteurs de courant** (indicateurs de la production et de la consommation) et de systèmes de communication.

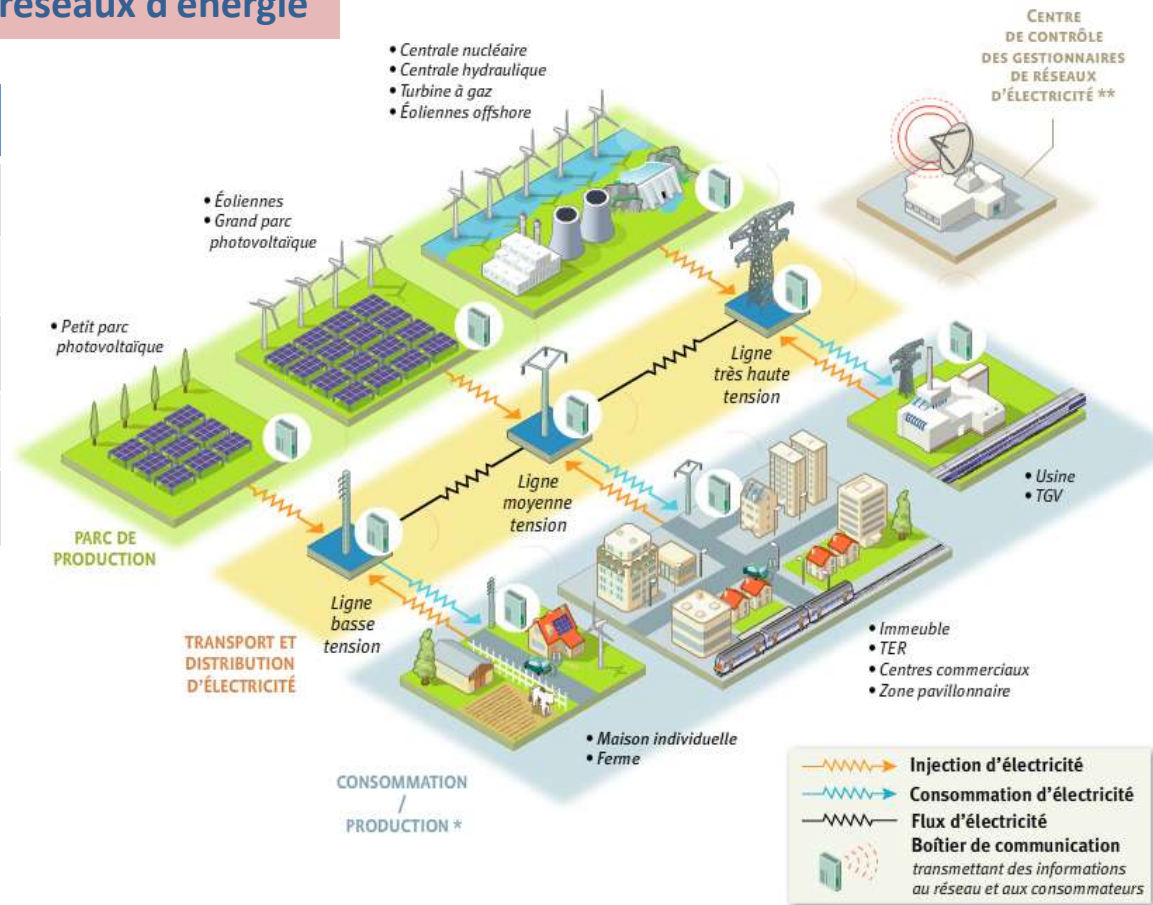
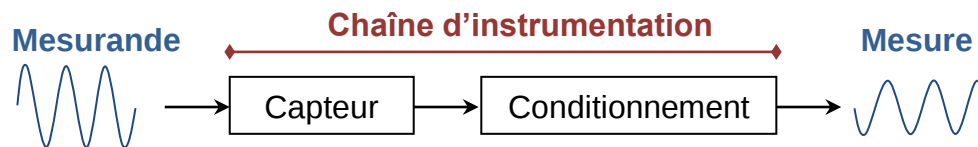


Image CRE (Commission de Régulation de l'Énergie)

Rôle de l'instrumentation : Le conditionnement des signaux

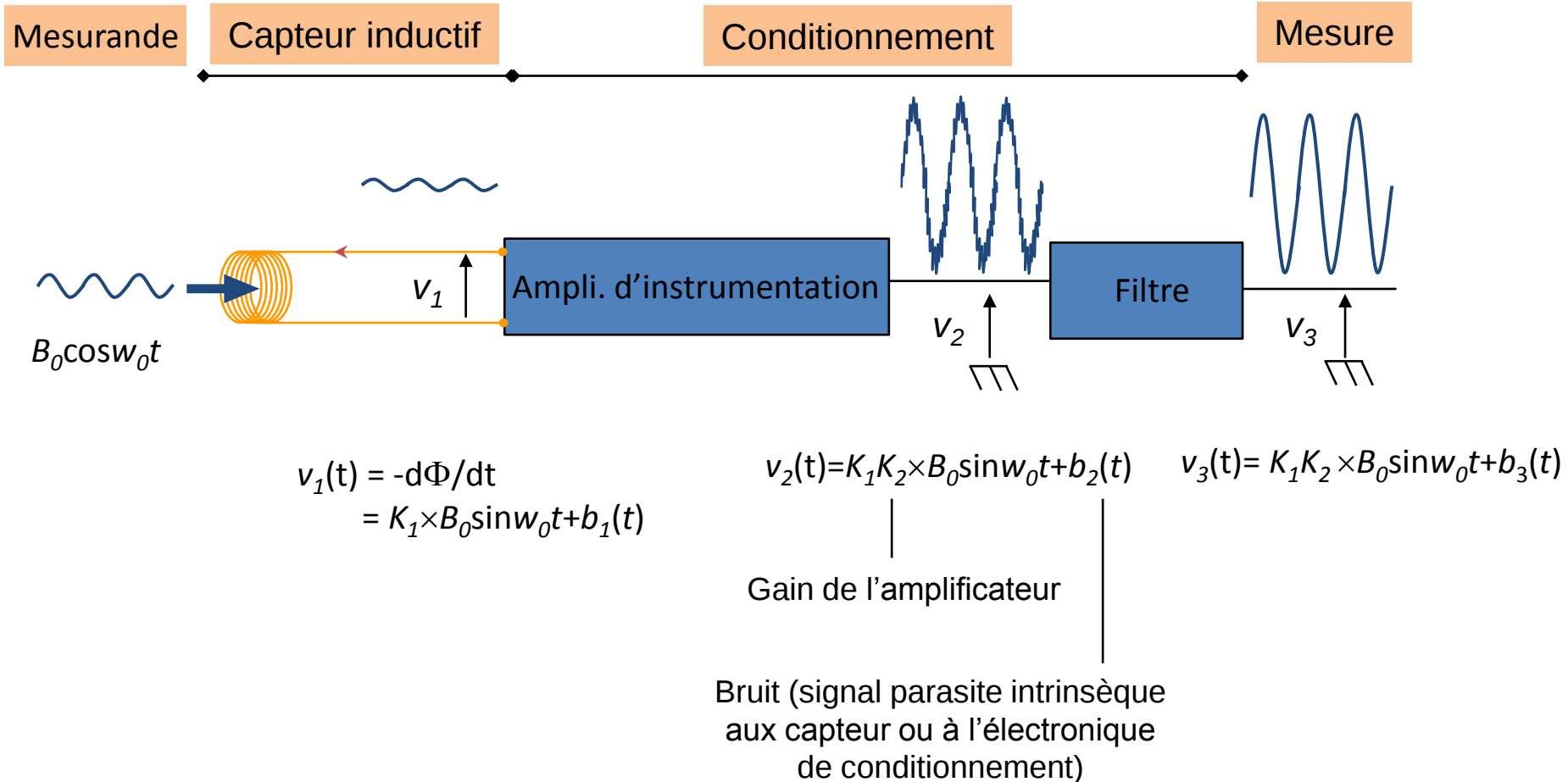
D'une manière générale, les capteurs s'intègrent dans une chaîne d'**instrumentation** où leur tension de sortie subit un **conditionnement**, i.e. des transformations, visant à conférer de bonnes propriétés à la mesure (amplitude, linéarité, précision...).



Rôle de l'instrumentation : Exemple

Une illustration de la notion de conditionnement

Mesure d'un champ magnétique variable au moyen d'un capteur inductif



Vocabulaire concernant la mesure

Capteurs et instrumentation servent à réaliser des mesures.

Une mesure est une représentation quantifiée d'une grandeur physique (température, pression, champ magnétique ...).

Les métrologues emploient le vocabulaire suivant :

- Mesurande : grandeur physique soumise à un mesurage (pression, température, ...)
- Mesurage : toutes les opérations permettant l'obtention de la valeur d'un mesurande
- Mesure : valeur numérique représentant le mesurande (6 MPa , 20°C , 2 m.s^{-1} ...).

Un capteur est un dispositif dont le fonctionnement repose sur l'exploitation de certains phénomènes physiques (effet Hall, piézoélectricité, magnétorésistance...) grâce auxquels ils est sensible à une grandeur physique donnée (mesurande) influençant son signal électrique de sortie (mesure).

Remarque : D'autres grandeurs que le mesurande peuvent aussi influencer la mesure... On les désigne comme les *grandeurs d'influence*.

Un capteur élémentaire est souvent désigné par le terme de **transducteur**, étant donné qu'il transforme une grandeur physique (mesurande) en une autre (signal électrique...).

Types de grandeurs physiques

On peut classer les grandeurs physiques selon différents types :

- **Mécanique** : déplacement, force, masse, débit etc.
- **Thermique** : température, capacité thermique, flux thermique etc...
- **Electrique** : courant, tension, charge, impédance, diélectrique etc...
- **Magnétique** : champ magnétique, perméabilité, moment magnétique etc...
- **Radiatif** : lumière visible, rayons X, micro-ondes etc...
- **(Bio)Chimique** : humidité, gaz, sucre, hormone etc...

Quelques grands types de capteurs

Capteurs générateurs de courant :

- Photodiodes : **rayonnement optique** $\Rightarrow$ génération de porteurs libres (courant)
- Capteurs à **rayonnement nucléaire** : rayonnement nucléaire $\Rightarrow$ ionisation du milieu

Capteurs générateurs de charges :

- Capteurs piezoelectriques : **contraintes mécanique** $\Rightarrow$ variations de polarisation électrique dans des matériaux isolants $\Rightarrow$ l'apparition de charges superficielles $\Rightarrow$ tension électrique
- Capteurs pyroelectriques : **variation de T°** $\Rightarrow$ variations de polarisation électrique dans des matériaux isolants $\Rightarrow$ apparition de charges superficielles $\Rightarrow$ tension électrique

Capteurs résistifs :

- La résistance électrique de ces dipôles dépend des facteurs géométriques du capteur et de la conductivité des matériaux le constituant.

Or, $\sigma = q \cdot (\mu_p p + \mu_n n)$, aussi diverses grandeurs capables d'influencer suffisamment l'un ou l'autre de ces paramètres sont susceptibles de constituer un mesurande.

On dispose ainsi de **thermistances**, de **magnétorésistances**...

Capteurs inductifs :

- Capteurs comportant une ou plusieurs spires délivrant, d'après la loi de Lenz, une tension dépendant des variations de flux captées.

On en fait des capteurs de **champ magnétique** variable, des capteurs de **déplacement**, de **vitesse**...

Capteurs capacitifs :

- Ce sont des condensateurs généralement plans ou cylindriques :
 $C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \times K$, avec $\varepsilon_0 \varepsilon_r \rightarrow$ permittivité diélectrique ; $K \rightarrow$ facteur géométrique

Le mesurande doit donc modifier soit la permittivité diélectrique, soit les dimensions du condensateur

On en fait des capteurs de **pression**, des capteurs de **composition gazeuse**...

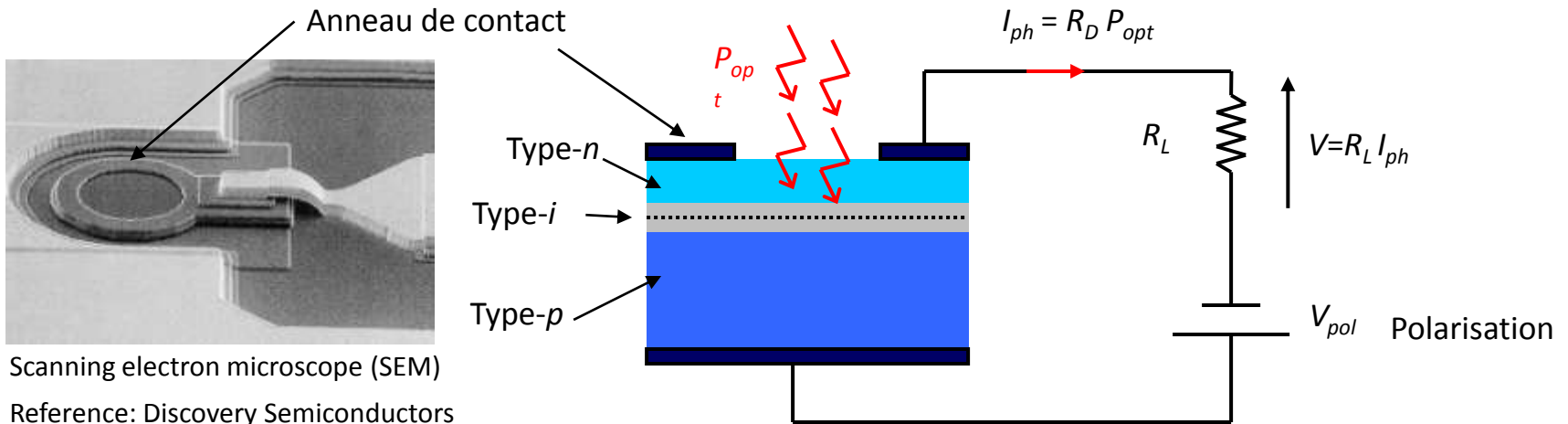
Exemples de capteurs

Capteur générateur de courant

Photodiode :

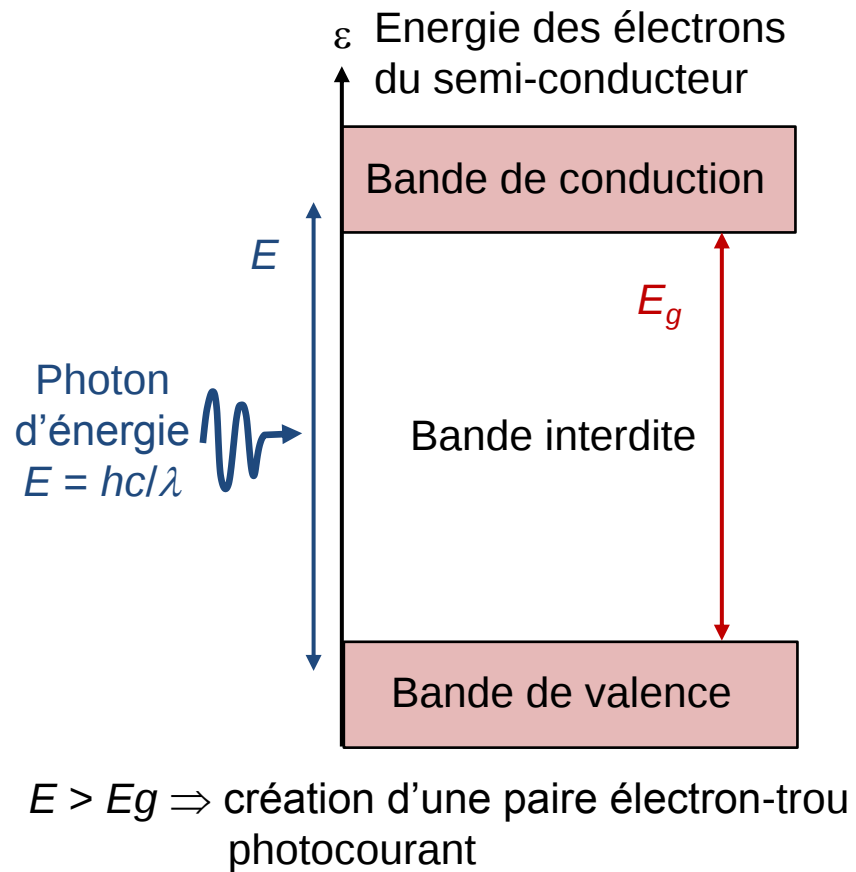
Une photodiode est un composant semiconducteur.

Principe : Illumination (puissance P_{opt}) $\Rightarrow$ génération d'un courant $I_{ph} = R_D P_{opt}$; R_D : rendement (A/W)



Les photodiodes en matériau InGaAs, qui sont sensibles aux longueurs d'ondes comprises entre 1 et 1.6 μm , sont utilisées dans les récepteurs des liaisons de télécommunication par fibre optique fonctionnant à 1,55 μm .

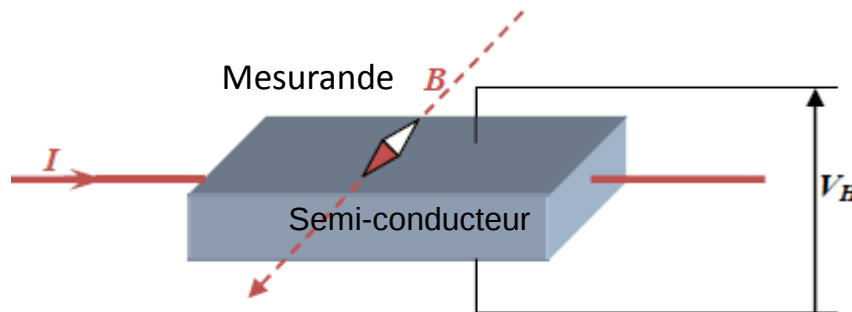
Diagramme de bande interdite d'un semi-conducteur



Capteur magnétique à effet Hall :

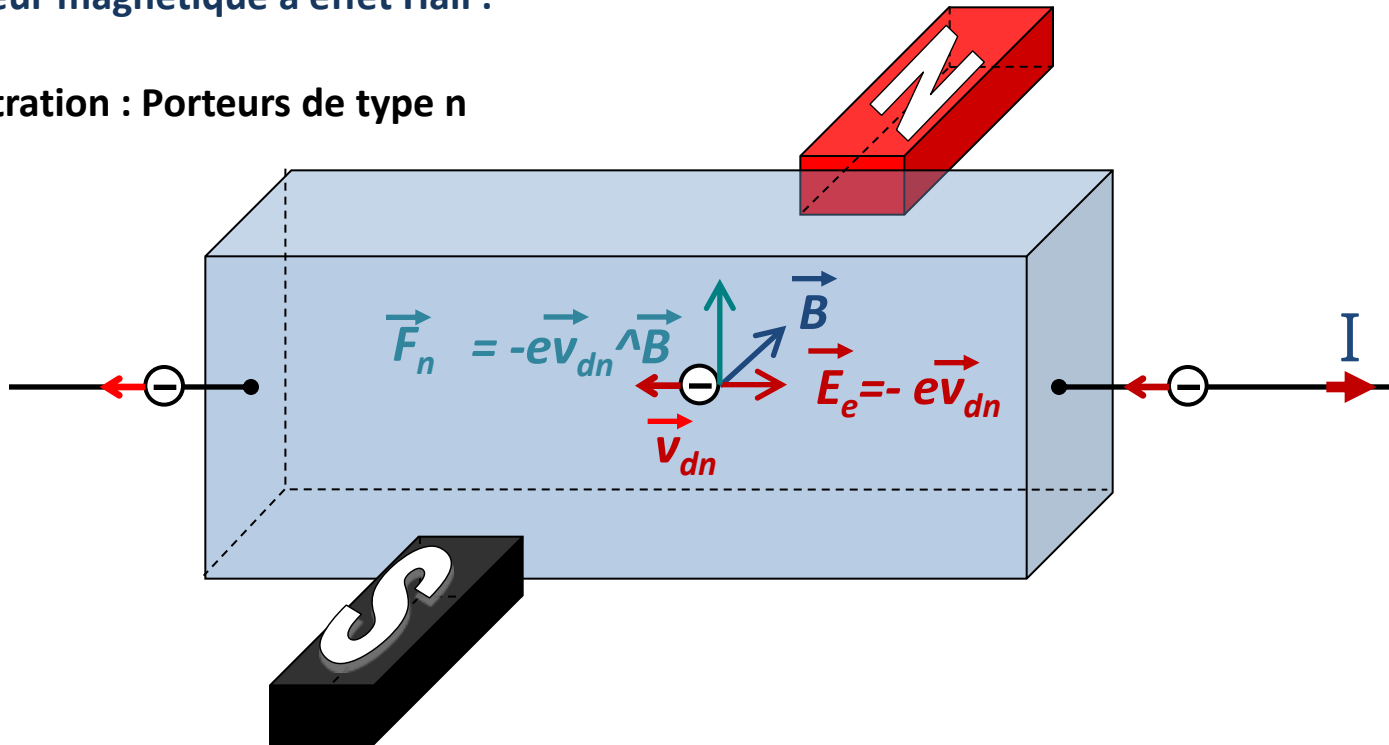
Un capteur de Hall est un capteur de champ magnétique $\mathbf{B}$. Il consiste en un barreau semi-conducteur alimenté par un courant I (c'est donc un capteur actif). Sous l'effet de $\mathbf{B}$, divers phénomènes entrent en jeu (force de Lorentz, champ de Hall consécutif...) et il apparaît entre les faces supérieure et inférieure du barreau une tension V_H proportionnelle à $\mathbf{B}$ qui constitue le signal de sortie.

$$V_{H_n} = \frac{R_{H_n}}{d} I \cdot B$$



Capteur magnétique à effet Hall :

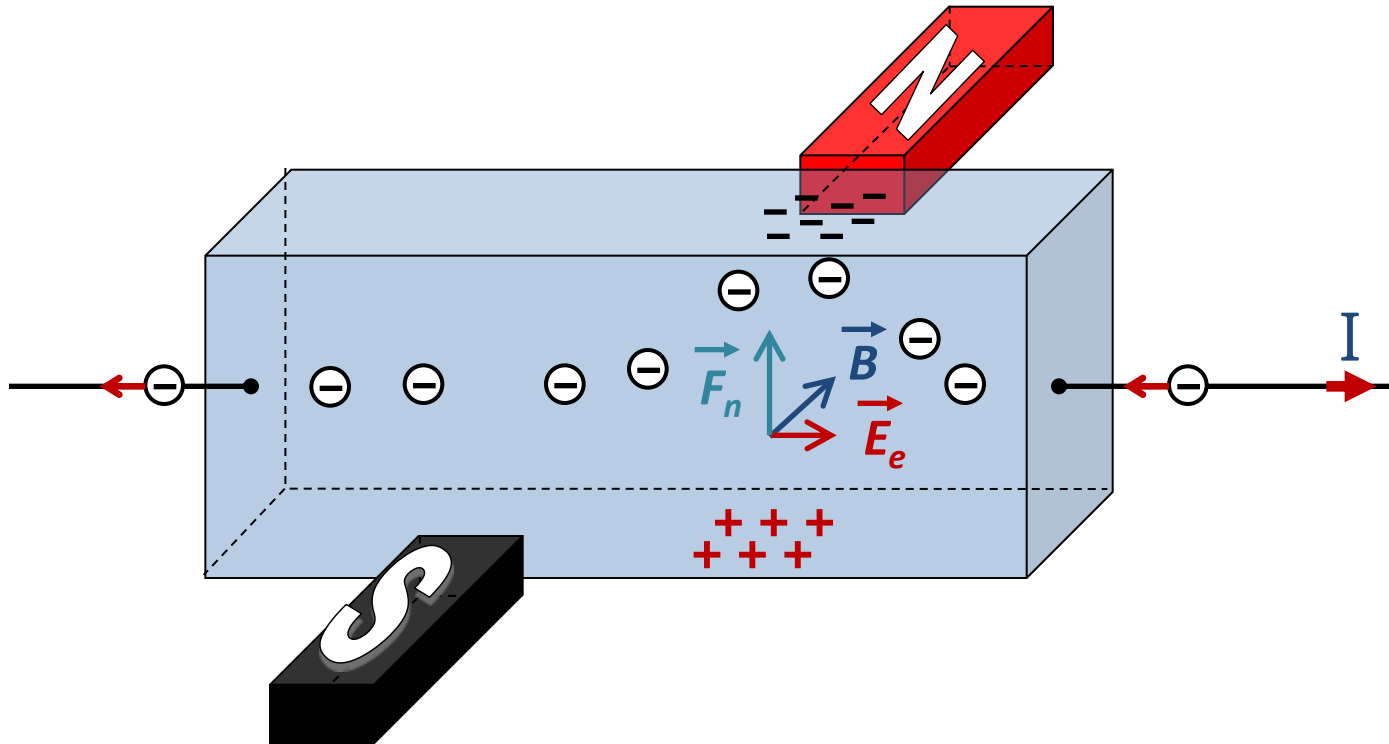
Illustration : Porteurs de type n



Dans la configuration prise pour exemple (compte tenu du sens du courant ...) les e- subissent une **force de Lorentz F_n** dirigée vers le haut...

F_n engendre un **régime transitoire** durant lequel la trajectoire des e- est déviée.

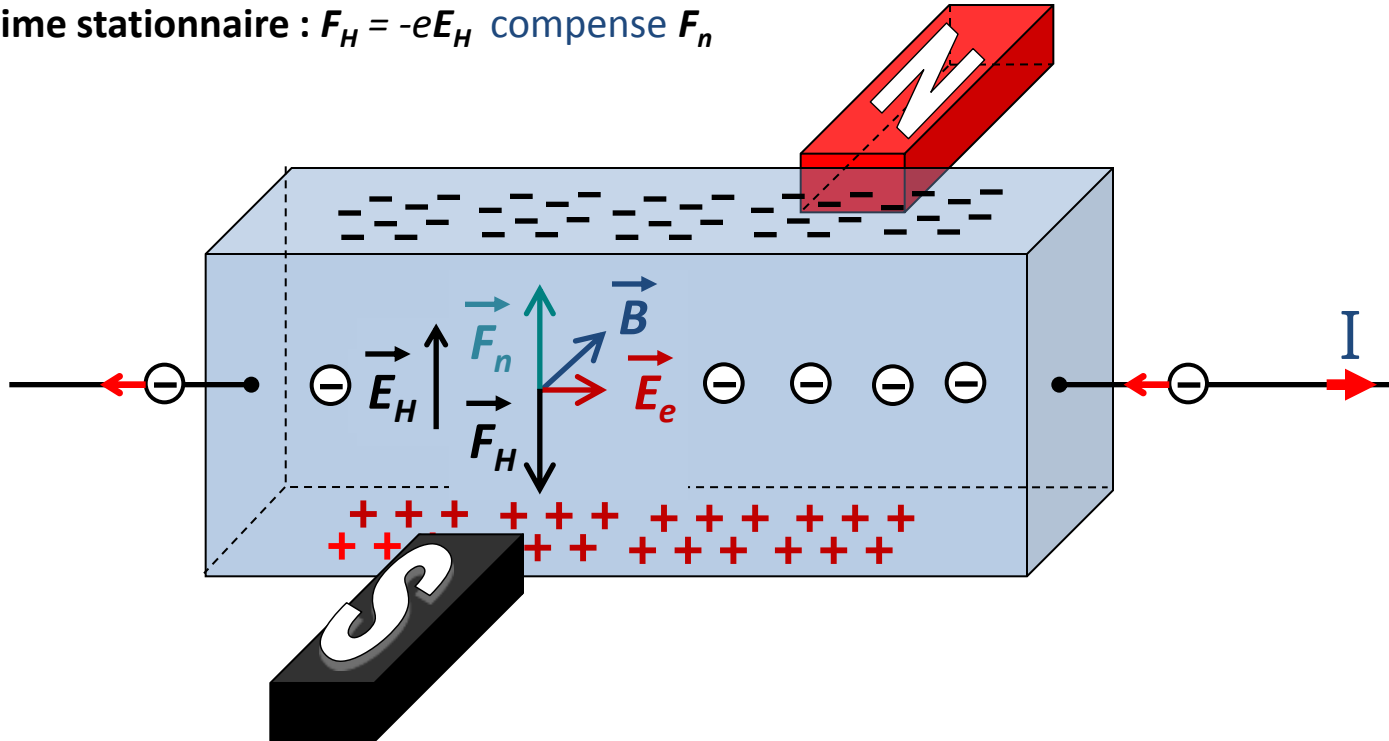
Capteur magnétique à effet Hall :



Il apparaît sur les faces (haut/bas) du matériau des charges électriques qui engendrent un **champ électrique de Hall** E_H qui s'oppose à F_n via la force $F_H = -eE_H$.

Capteur magnétique à effet Hall :

Régime stationnaire : $F_H = -eE_H$ compense F_n



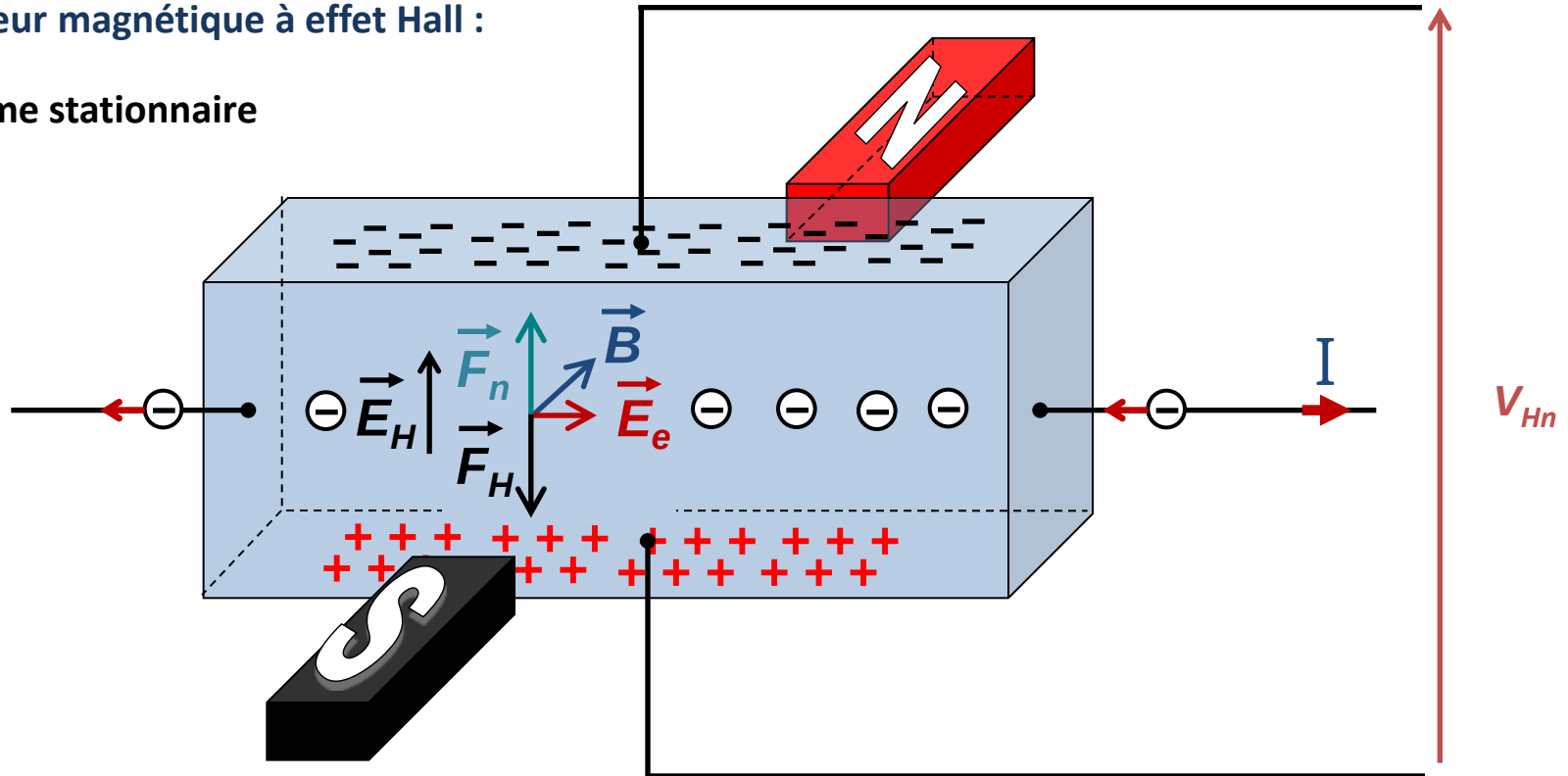
$$\vec{F}_n + \vec{F}_{H_n} = 0 \Leftrightarrow -e\vec{v}_{dn} \wedge \vec{B} - e\vec{E}_{H_n} = \vec{0}$$

$$\Rightarrow \vec{E}_{H_n} = -\vec{v}_{dn} \wedge \vec{B}$$

$$\Rightarrow \vec{E}_{H_n} = \mu_n \vec{E}_e \wedge \vec{B}$$

Capteur magnétique à effet Hall :

Régime stationnaire



Une **tension de Hall** V_{Hn} apparaît entre les faces du matériau

$$V_{H_n} = \int_0^h \vec{E}_{H_n} \cdot dz = \mu_n \cdot E_e \cdot B \cdot h$$

$\Rightarrow$

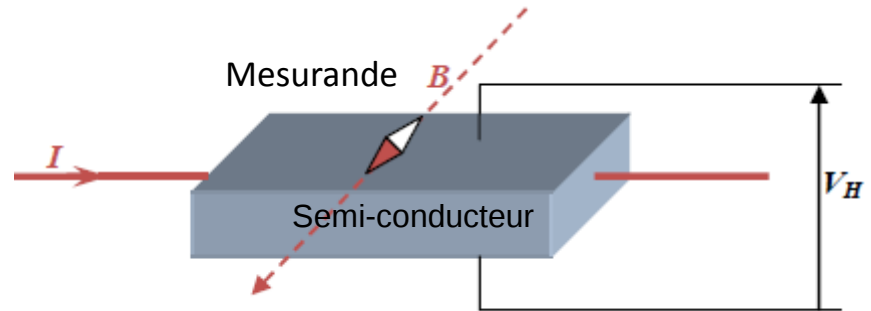
$$V_{H_n} = \frac{R_{H_n}}{d} I \cdot B$$

Cte de Hall

Largeur échant.

Capteur magnétique à effet Hall :

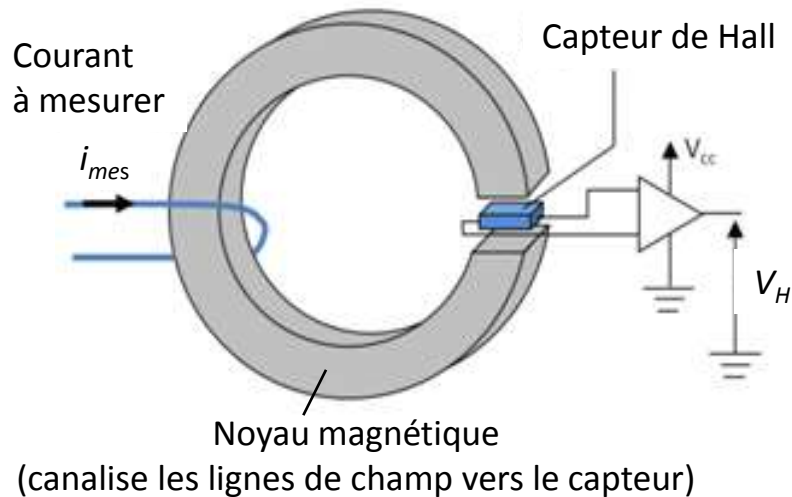
$$V_{H_n} = \frac{R_{H_n}}{d} I \cdot B$$



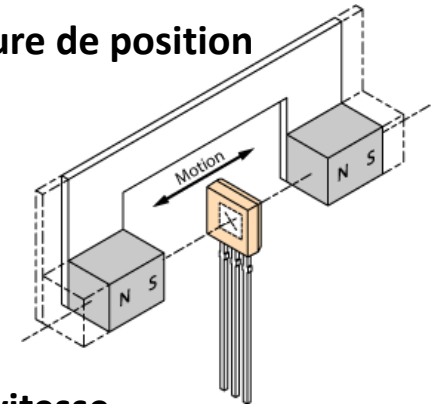
Nota : les capteurs de Hall sont directionnels : ils sont sensibles à B selon une direction donnée.

Exemples d'applications

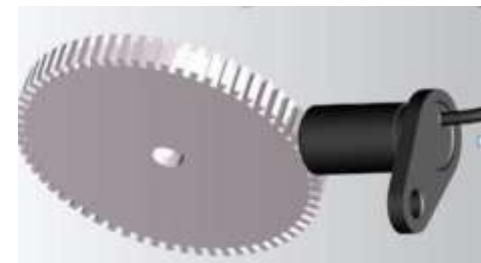
Mesure de courant : Un capteur de Hall peut être intégré dans une pince ampèremétrique.



Mesure de position



Mesure de vitesse

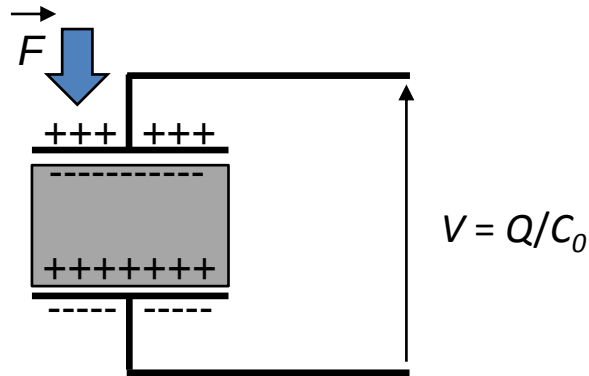


Capteur générateur de charges

Capteur de contrainte mécanique à effet piézoélectrique :

Un capteur piézoélectrique est un capteur générateur de charges consistant en une lame de matériau isolant (quartz, céramique (PZT), polymères (PVDF)) placée entre deux électrodes métalliques.

Sous l'effet d'une déformation (i.e. contrainte mécanique : force F), des charges liées $\pm Q$ apparaissent sur les faces de la lame isolante, attirant des charges libres de signes opposés sur les électrodes et engendrant une tension V aux bornes du capteur par effet capacitif : $V = Q/C_0$. C_0 étant la capacité du condensateur.



Exemples d'applications

Les capteurs piezoélectriques peuvent être déclinés sous forme de **dynamomètres** (mesure de forces de compression), **d'accéléromètres**...



Dynamomètre (marque Kistler)

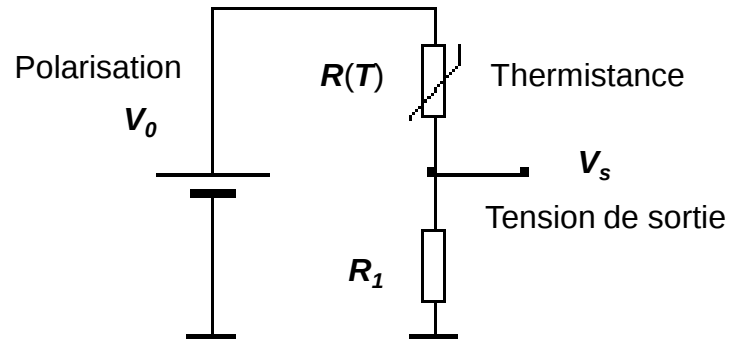
Capteur résistif

Thermistance

Une thermistance est un dipôle résistif (mélange aggloméré et fritté d'oxydes métalliques) dont la résistance électrique R dépend de la température T sous une forme exponentielle décroissant rapidement vs T : $R(T) = R_0 \times \exp[B(1/T - 1/T_0)]$

On l'utilise comme capteur de température en exploitant la **loi d'Ohm** ($V = R \times I$).

On peut mettre en œuvre la mesure avec un **montage potentiométrique** (comme illustré ici). Toutefois, le plus souvent on réalise un montage en **pont de Wheatstone**. Celui-ci sera présenté ultérieurement.



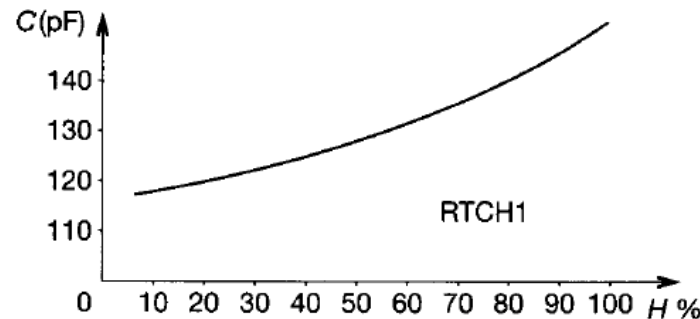
$$V_s = R_1 \times V_0 / (R + R_1)$$

Différentes caractéristiques méritent d'être considérées afin de pouvoir comparer des capteurs et faire des choix en fonction des applications visées.

Principales caractéristiques d'un capteur

Caractéristique entrée-sortie :

Relation d'évolution de la grandeur de sortie en fonction de la grandeur d'entrée. Elle est donnée classiquement par une courbe en régime permanent. Elle ne fournit pas d'informations sur les caractéristiques transitoires du capteur.



Exemple de caractéristique d'un capteur d'humidité de type capacitif

Sensibilité :

Représente l'évolution de la grandeur de sortie en fonction de la grandeur d'entrée en un point donné de la caractéristique entrée-sortie du capteur. C'est donc la pente de la tangente à cette courbe.

Dans le cas d'un capteur linéaire, la sensibilité du capteur est constante. Elle ne fournit pas d'informations sur les caractéristiques transitoires du capteur.

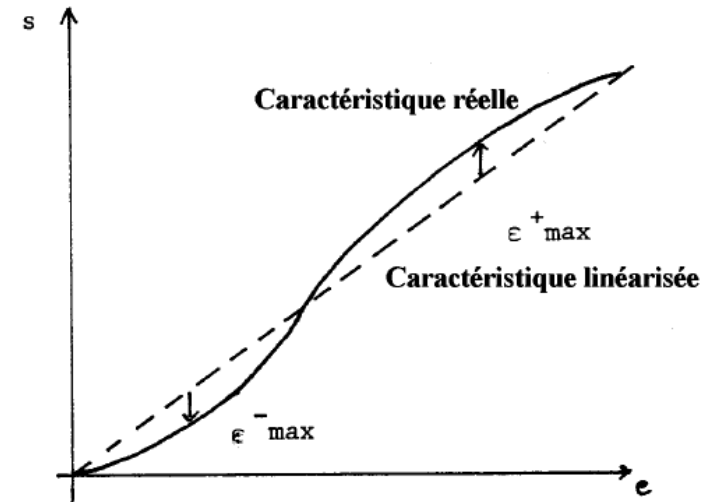
$$\text{Sensibilité} = \frac{d(\text{Grandeur de sortie})}{d(\text{mesurande})} \bigg|_{\text{Ptd'étude}}$$

Linéarité :

Représente la zone dans laquelle la sensibilité du capteur est indépendante de la valeur du mesurande.

Celle-ci peut être définie à partir de la droite approchant au mieux la caractéristique réelle du capteur au regard d'un certain critère, par exemple des moindres carrés.

On définit à partir de cette droite l'écart de linéarité, exprimé en %, comme l'écart maximal entre la courbe réelle et la droite approchée.



Résolution :

Représente la plus petite variation de mesurande que le capteur est en mesure d'identifier.
La résolution est liée au bruit.

Bande passante :

Représente la gamme de fréquence où le capteur fonctionne. Elle est caractéristique de la rapidité du capteur.

Coût

Encombrement

Facilité de mise en oeuvre

Dérives : Sensibilité à la T° , offset.

Caractéristiques liées aux erreurs de mesures

- Erreur systématique, erreur accidentelle

Un capteur, ou plus généralement un système de mesure, ne donne pas nécessairement ni systématiquement la **valeur vraie** X_0 de la grandeur recherchée.

La **mesure** X comporte souvent une erreur

$$\text{Erreur absolue} = X - X_0$$

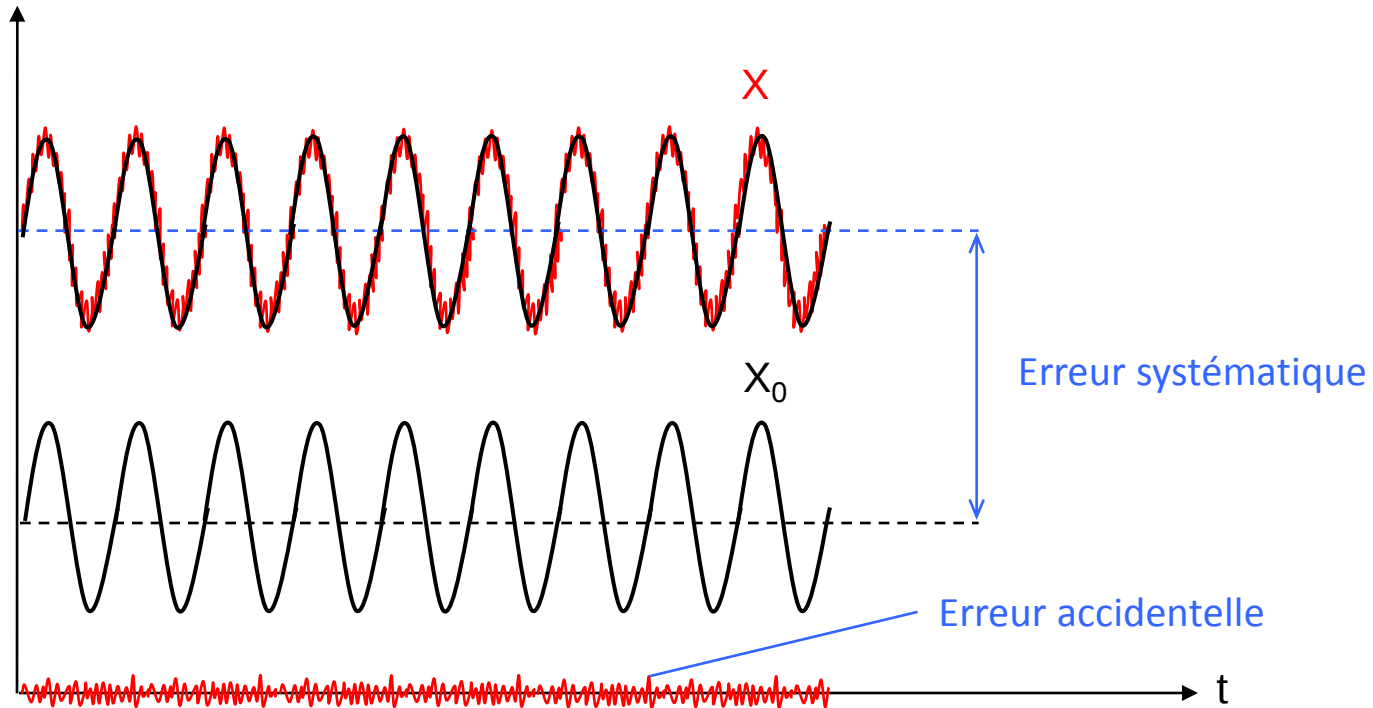
$$\text{Erreur relative (\%)} = (X - X_0) / X_0$$

L'erreur de mesure résulte de plusieurs contributions généralement classées dans deux catégories :

- les **erreurs systématiques** ou **biais**
- les **erreurs accidentelles** (aléatoires).

Caractéristiques liées aux erreurs de mesures

- Erreur systématique, erreur accidentelle



Origine des erreurs systématiques :

- valeur erronée d'une grandeur de référence,
- erreur d'une courbe d'étalonnage,
- écart à la linéarité d'un capteur ou conditionneur (exple pont de Wheatstone) supposé linéaire,
- ...

Origine des erreurs accidentelles :

- erreur de lecture d'un appareil à déviation (**exemple : le pèse personne**),
- erreur de mobilité (**mobilité : variation maximale du mesurande qui n'entraîne pas de variation de la grandeur de sortie du capteur**) : en dessous d'une certaine variation du mesurande le capteur n'est pas sensible ;
- erreur d'hystérésis (matériau ferromagnétique, ou hystérésis mécanique d'un ressort...);
- **bruits** : thermique, amplificateurs de l'électronique de conditionnement...
- fluctuations des tensions d'alimentation ;
- inductions parasites (dues au rayonnement électromagnétique à fréquence industrielle en particulier) ;
- dérive temporelle de la tension de sortie d'un ampli. par exemple
- **diverses dérives** : sensibilité à la T° , offset.

- Justesse, fidélité, précision

La notion de **justesse** (accuracy) est liée à l'erreur systématique...

La notion de **fidélité** (precision) est liée aux erreurs accidentelles de la mesure...

Soit par exemple une grandeur mesurée $X[n]$ consistant en une superposition de

- X_0 : la valeur vraie
- e_{syst} : une erreur systématique (biais)
- $b[n]$: un bruit

$$X[n] = X_0 + e_{\text{syst}} + b[n]$$

Il est intéressant, pour quantifier l'incertitude sur la valeur mesurée, d'en calculer l'espérance et l'écart type.

Espérance : $E[X] = \sum_{n=1}^N p_n X_n = m$ Variance : $\text{Var}[X] = E[(X - E[X])^2] = E[(X - m)^2]$

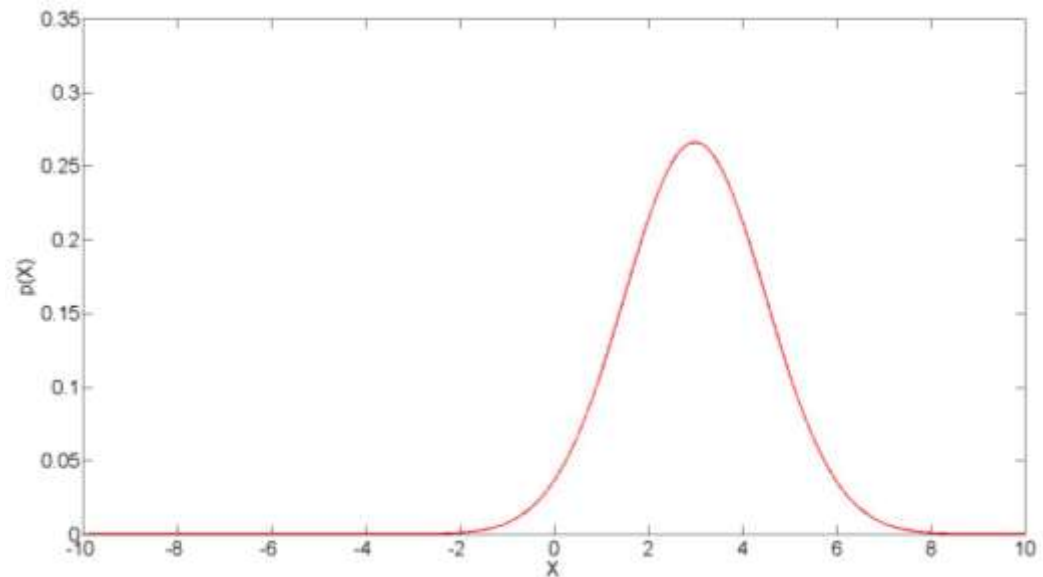
Ecart-type : $\sigma = \sqrt{\text{Var}[X]}$ σ est une indication de la dispersion des résultats par rapport à la valeur moyenne

- Justesse, fidélité, précision

Si la statistique du bruit (densité de probabilité $p(x)$) satisfait la loi normale (gaussienne) on a :

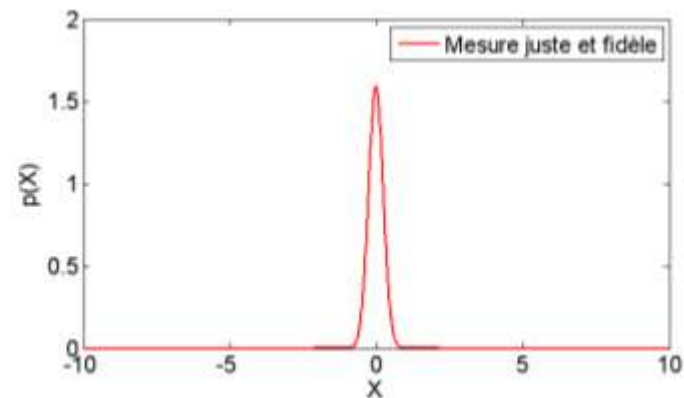
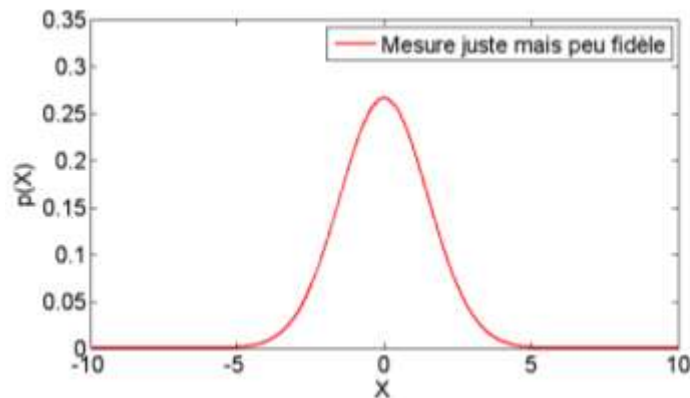
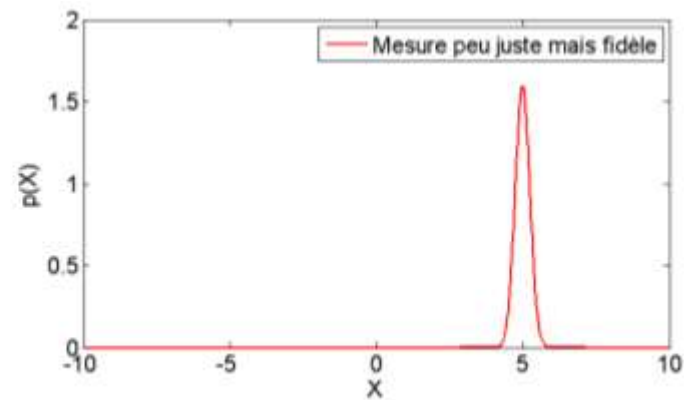
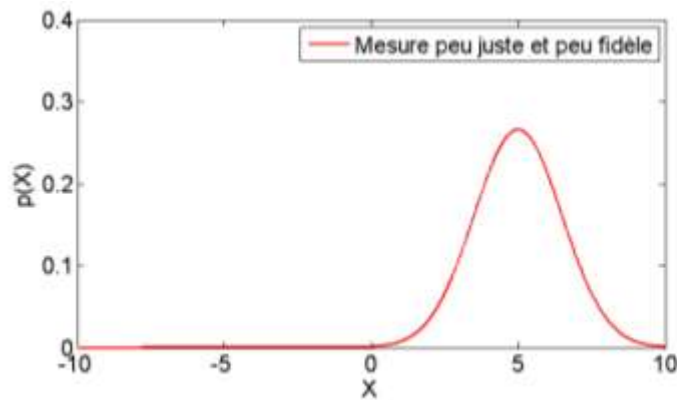
$$p(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(X-m)^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$P(X < X_1) = \int_{-\infty}^{X_1} p(X) dX$$

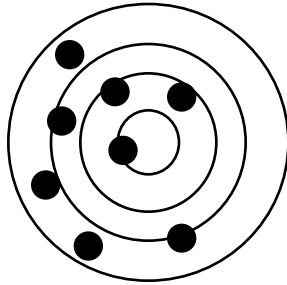


- Justesse, fidélité, précision

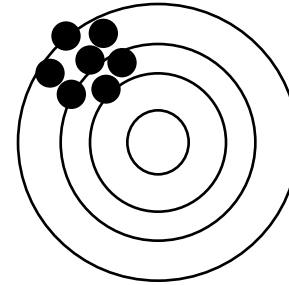
Prenons l'exemple $X_0=0$ et supposons que la mesure comporte des erreurs systématiques (biais...) et accidentelles (aléatoires).



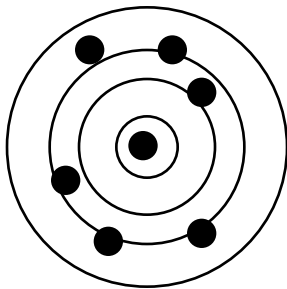
- Justesse, fidélité, précision



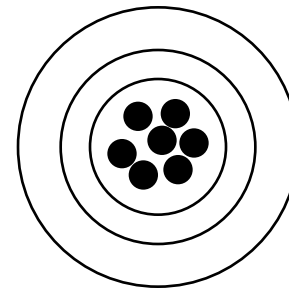
Faible justesse et faible fidélité



Faible justesse et grande fidélité



Grande justesse et faible fidélité



Grande justesse et grande fidélité

- Justesse, fidélité, précision

- Justesse :

- Fidélité :

- Précision :

Parenthèse : Le bruit en électronique

Le bruit affecte tout système de mesure et a fortiori les capteurs de champ.

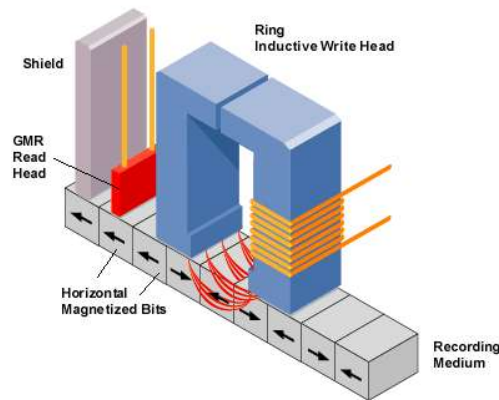
La source de bruit peut être intrinsèque au capteur (bruit thermique dû à la résistance interne de bobines par exemple) ou liée aux circuits électroniques de conditionnement (étages d'amplification en particulier)

- **Le bruit thermique**
- **Le bruit dans les quadripôles**
 - **Facteur de bruit**
 - **Formule de Friis**

Le bruit en électronique

Conséquences du bruit sur la mesure d'un capteur muni d'une électronique de conditionnement.

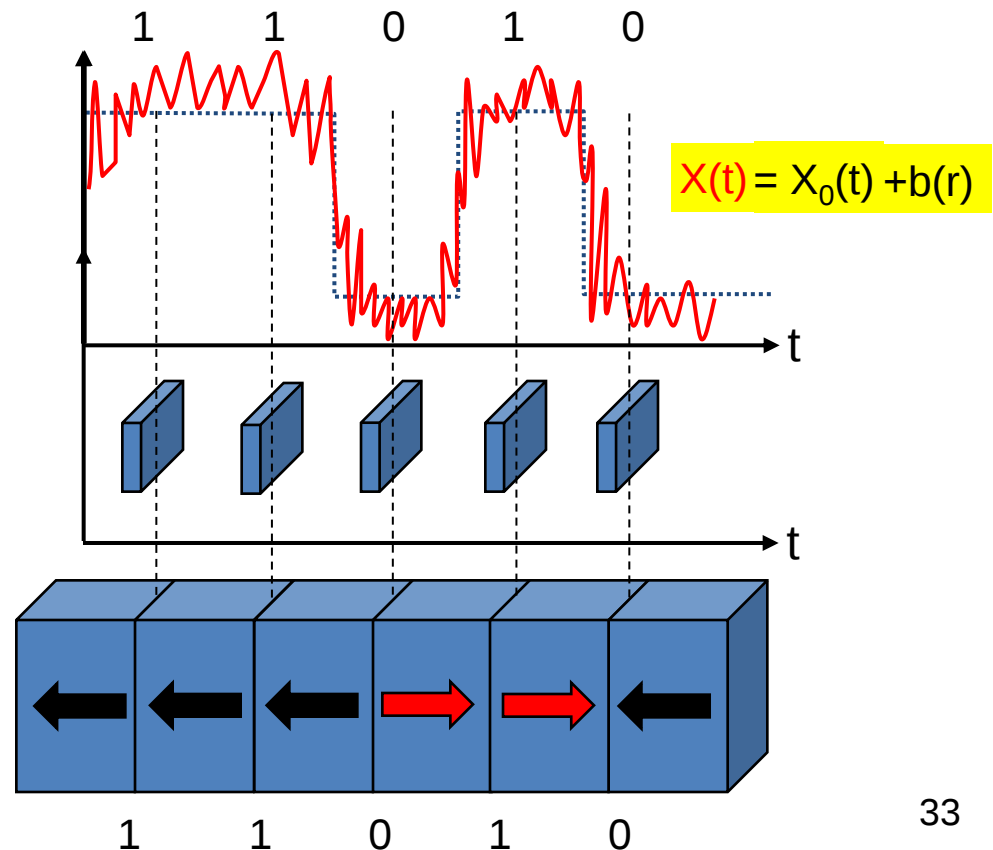
Exemple des **tête de lecture de disques durs magnétiques** (à base de capteurs GMR)



La tête de lecture mesure le champ magnétique à la frontière de deux domaines magnétiques du disque. Idéalement le résultat est binaire.

$X_0(t)$ = valeur vraie

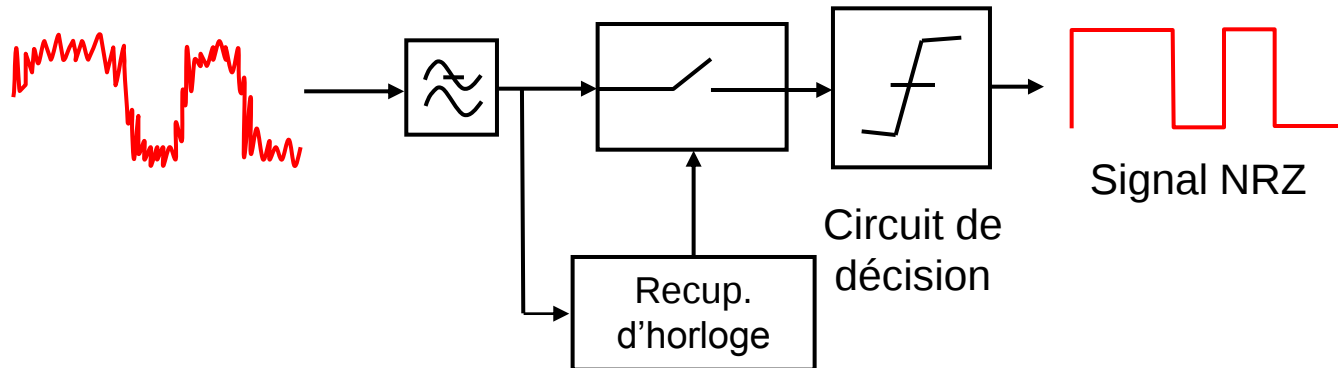
$X(t)$ = valeur mesurée



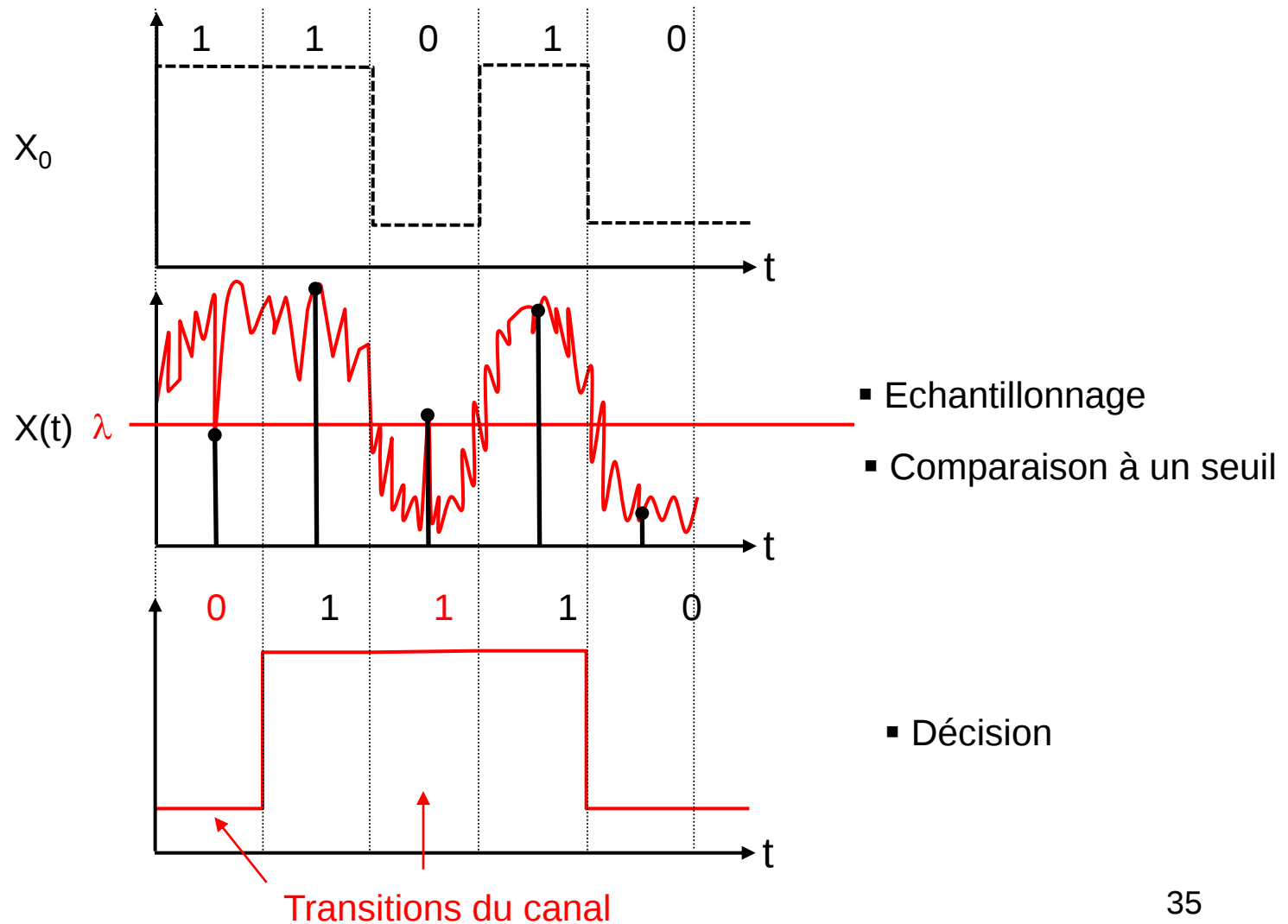
Conséquences du bruit

Circuit de conditionnement : récepteur optimal

Le rôle du récepteur optimal est de reconstruire le signal binaire à partir de la mesure bruitée



Conséquences du bruit



Conséquences du bruit

