CONDITIONNEMENT DU SIGNAL

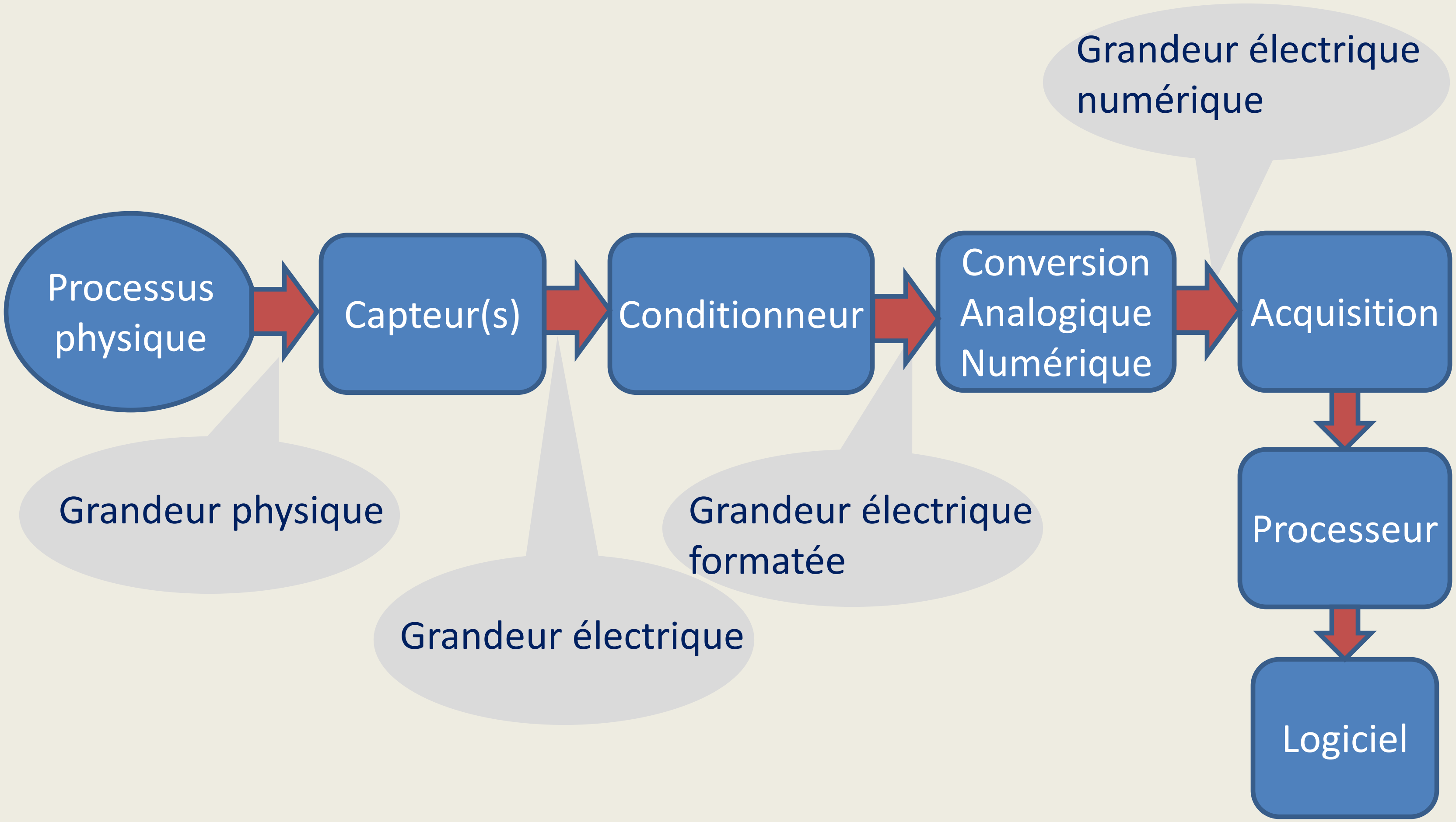
Définition du conditionnement

C'est un dispositif qui assure la conversion de la grandeur électrique de sortie du capteur en une grandeur électrique exploitable par l'organe de

Traitement.

- Cette définition nécessite la connaissance des capteurs.
- Le conditionneur est un montage électronique qui d'une manière plus générale englobe toute la chaîne instrumentale.

La chaîne instrumentale



Le processus physique (1)

- Que peut-on mesurer ?
  - Grandeurs spatiales
    - déplacement linéaire ou angulaire
    - épaisseur
    - présence / absence
    - distance
    - position/altitude absolues
    - niveau
    - surface
    - volume
    - angle
    - vitesse
    - accélération/choc/vibration

Le processus physique (2)

- Que peut-on mesurer ?
  - grandeurs temporelles
    - durée
    - fréquence
    - masse / poids
    - densité
    - allongement / déformation
    - force / couple
    - puissance mécanique
    - etc.

Le processus physique (3)

- Que peut-on mesurer ?
  - grandeurs mécaniques (fluides)
    - pression / vide
    - pression acoustique / son / ultrasons
    - débit
    - vitesse
    - viscosité
    - tension de surface
  - grandeurs thermiques
    - température
    - conductivité thermique
    - flux de chaleur
    - répartition de température (thermographie)

Le processus physique (4)

- Que peut-on mesurer ?
- grandeurs électromagnétiques
  - potentiel / différence de potentiel
  - courant
  - énergie / puissance électrique
  - charge électrique
  - champ électrique
  - champ magnétique
  - résistance, capacité, inductance
  - conductivité, permittivité, perméabilité
  - hystérésis
  - déphasage
  - facteur de puissance
  - facteur de qualité

Le processus physique (5)

- Que peut-on mesurer ?
  - grandeurs optiques (rayonnement non ionisant)
    - intensité lumineuse
    - polarisation
    - indice de réfraction
    - couleur / spectre
    - image
  - radioactivité (rayonnements ionisants)
    - quantité de rayonnement émis ou reçu
    - nature des particules
    - énergie

Le processus physique (6)

- Que peut-on mesurer ?
  - grandeurs chimiques
    - composition
    - pH
    - humidité
    - mesures environnementales
- grandeurs biomédicales
    - bio-potentiels
    - pression sanguine
    - flux sanguin
    - ventilation
    - composition du sang
    - imagerie médicale

Le processus physique (7)

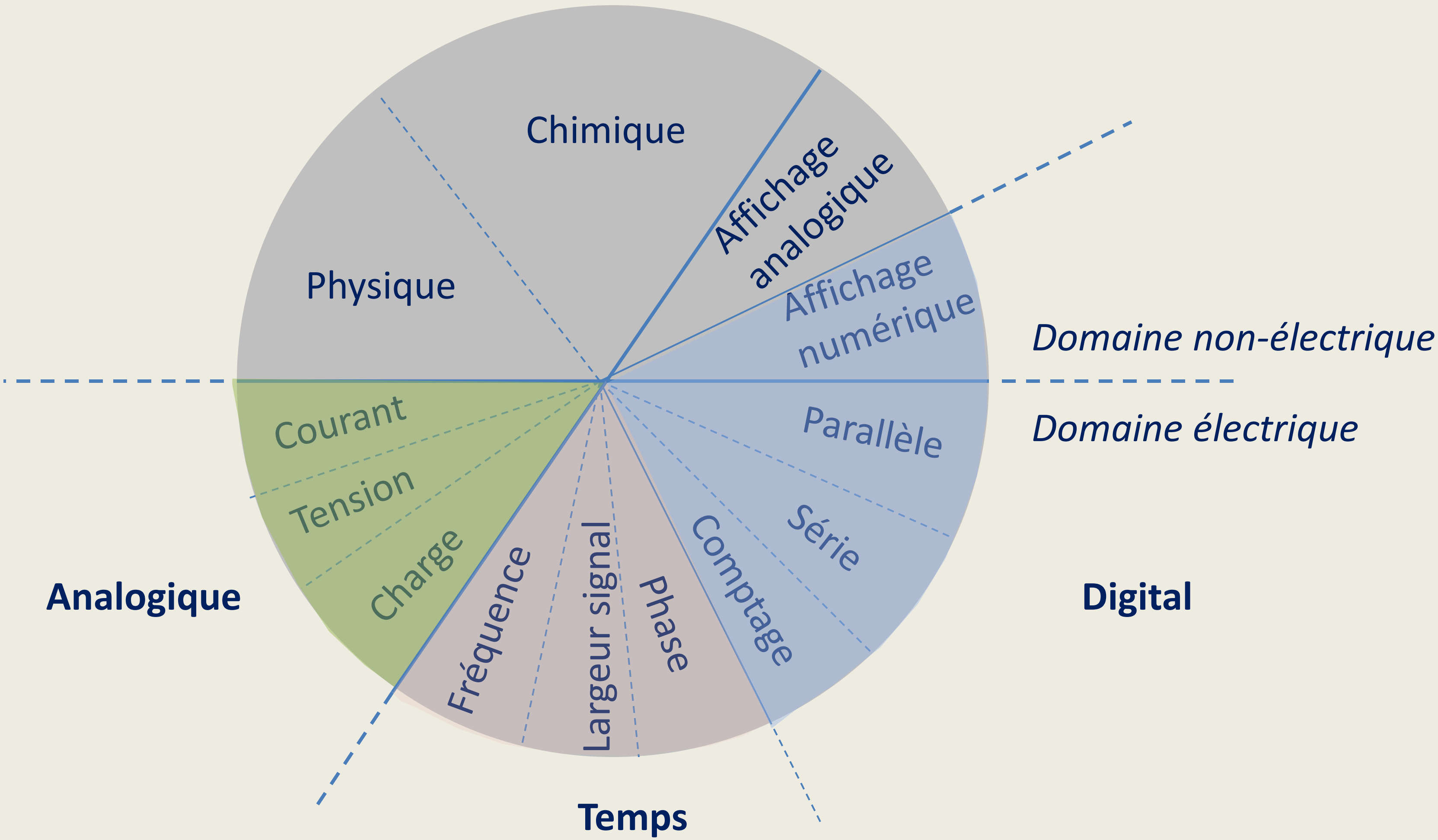
- Que peut-on mesurer ?

Le catalogue des grandeurs physiques mesurables est important…

Pour chaque grandeur, il peut exister de nombreuses solutions.

- ➢ On essayera de dégager des grandes familles de mesure.
- ➢ On utilisera des capteurs adaptés au processus physique.

Les grandes familles de mesure



Les Capteurs

- Le capteur transforme une grandeur physique en grandeur électrique (généralement).
  - Une tension
  - Un courant
  - Une charge électrique
  - Une résistance
  - Une capacité
  - Une inductance
  - Une fréquence

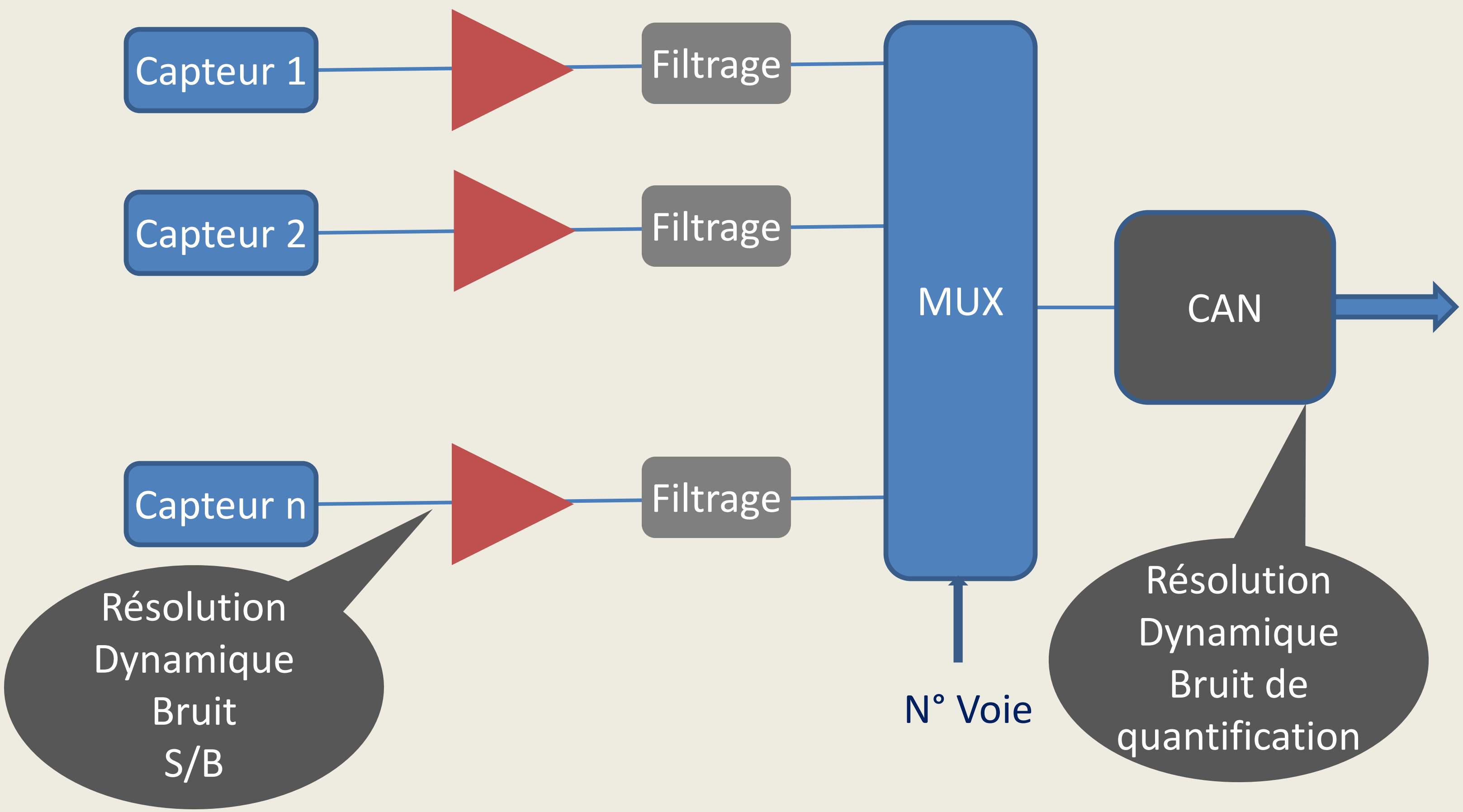
Le conditionneur sera adapté à la grandeur électrique

Le conditionnement (1)

Les fonctions réalisées par le conditionneur :

- Amplification
- Filtrage
- Alimentation d'un capteur passif
- Isolation galvanique (aucun courant entre 2 parties)
- Multiplexage
- Etc.

Le conditionnement (2)

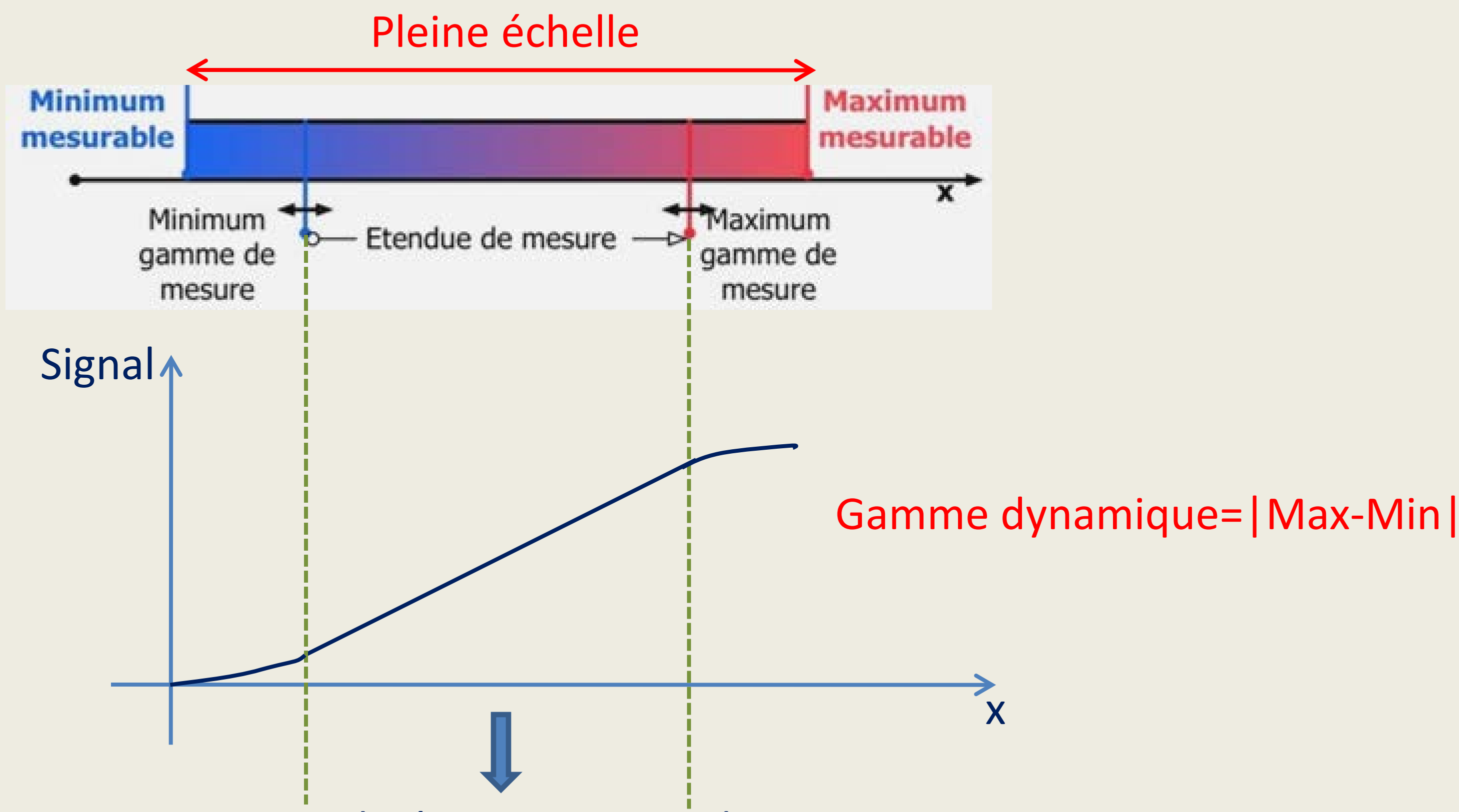


Les paramètres de la mesure

- L’étendue de la mesure ou gamme dynamique
- La résolution
- La sensibilité
- Les erreurs de mesure

L‘étendue de la mesure

L’étendue de la mesure ou gamme dynamique



Zone linéaire par exemple

La résolution

La résolution d'un système est la plus petite quantité que l'on peut mesurer.

Par exemple pour un système numérique :

$$R = \frac{\text{Etendue de mesure}}{\text{Nb de points de mesure}}$$

Par exemple pour 1 codage sur 10 bits d'une grandeur dont l'étendue de mesure est 1 Volt :

$$R = \frac{1\text{V}}{2^{10}} = \frac{1000\text{mV}}{1024} \approx 1\text{mV}$$

La sensibilité

La sensibilité d'un système est le rapport entre la variation de la valeur du signal de sortie à la variation correspondante du signal fourni par le capteur.

La sensibilité autour d'une valeur donnée G_i est donnée par :

$$S = \left.\frac{dE}{dG}\right|_{G = G_i}$$

Lorsque E et G sont de même nature alors S correspond au gain du système

Les erreurs de mesure

Les erreurs de mesure sont de deux grands types :

- Les erreurs systématiques ou biais de la mesure
  - C'est un décalage entre la valeur vraie et la valeur mesurée (décalage fixe ou à variation lente).
  - Ce type d'erreur est difficile à compenser, nécessite un étalonnage précis de la chaîne de mesure.
- Les erreurs statistiques
  - C'est une variation aléatoire de la valeur mesurée autour de la valeur la plus probable. Cette erreur suit une loi statistique particulière.

  (nécessite de connaître le modèle probabiliste du système mesuré)

Les erreurs statistiques

La présence de fluctuations statistiques nécessitent de répéter la mesure un certain nombre de fois :

Soit un ensemble de mesures $\{x_1, x_2 \ldots x_n\}$

Considérons qu'il n'y a pas d'erreur systématique.

La meilleure estimation de la mesure est donnée par la moyenne :

$$\hat{x}_n = \frac{x_1 + x_2 \ldots + x_n}{n} = \sum_{i=1}^{n} \frac{x_i}{n}$$

Nécessité de faire appel aux variables aléatoires et à leur loi de probabilité

Les moments d’une variable aléatoire (1)

L’espérance mathématique

- L'espérance mathématique caractérise la tendance centrale d’une distribution de probabilités.

- Lorsque l’on répète une épreuve et que l’on observe les valeurs prises par la variable aléatoire *X*, une opération naturelle est de calculer la moyenne des valeurs observées.

- L’espérance mathématique calcule la moyenne en pondérant les valeurs prises par leur probabilité

Les moments d'une variable aléatoire (2)

L'espérance mathématique

$$E[X] = \sum_{i=1}^{n} x_i \cdot P(X=x_i) = \sum_{i=1}^{n} x_i \cdot P_i$$

Exemple : Une variable aléatoire *X prend les valeurs suivantes :*

Valeur	0	2	4
Probabilité	21/32	6/32	5/32

$$E[X] = \sum_{i=1}^{n} x_i \cdot P_i = 0 \times \frac{21}{32} + 2 \times \frac{6}{32} + 4 \times \frac{5}{32} = 1$$

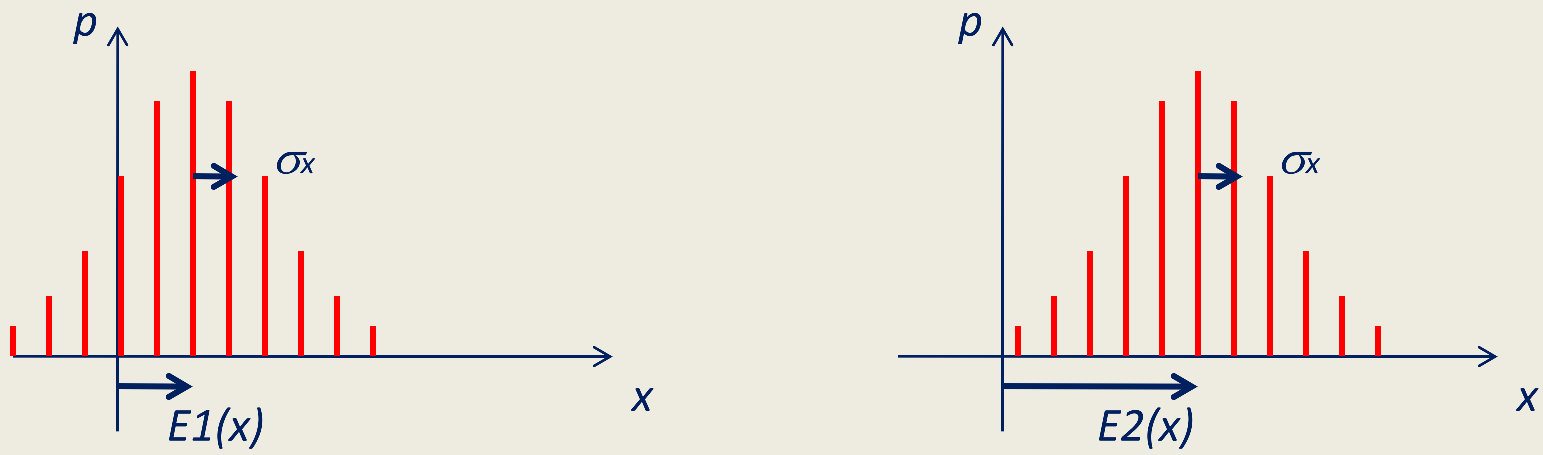
Les moments d'une variable aléatoire (3)

Variance et écart type

- La variance caractérise la dispersion des données.
- Soit X une variable aléatoire discrète $P(X=x_i) = p_i$
- La variance est un nombre réel positif :

$$\mathrm{Var}(X) = E[X - E(X)]^2 = \sum_{i=1}^{n} (x_i - E(X))^2 \cdot p_i = \sigma_X^2$$

- σ_X est l'écart type



Les moments d'une variable aléatoire (4)

Variance et écart type

$$\mathrm{Var}(X) = E[X - E(X)]^2 = \sum_{i=1}^{n} (x_i - E(X))^2 \cdot p_i = \sigma_X^2$$

Exemple : Une variable aléatoire *X prend les valeurs suivantes :*

Valeur	0	2	4
Probabilité	21/32	6/32	5/32

$$\sigma_X^2 = (0-1)^2 \cdot \frac{21}{32} + (2-1)^2 \cdot \frac{6}{32} + (4-1)^2 \cdot \frac{5}{32} = \frac{21}{32} + \frac{6}{32} + \frac{45}{32} \approx 2,25$$

$$\sigma_X^2 \approx 1,5$$

Variables aléatoires continues (1)

- On appelle variable aléatoire continue, une variable aléatoire qui peut prendre toutes les valeurs d'un intervalle borné, ou une demi-droite ou encore *R* tout entier.
- *Exemple :* le temps de désintégration d'un atome radioactif.
- La notion de base est la probabilité d'intervalle : $P(a < X \leq b)$

On pourra calculer $P(a < X \leq b)$ ou encore $P(X < b)$ mais $P(X = b) = 0$ pour une loi continue (un point existe mais sa longueur est nulle).

Comme dans le cas discret : $F(x) = P(X \leq x)$

C'est une probabilité d'intervalle. $P(a < X \leq b) = F(b) - F(a)$

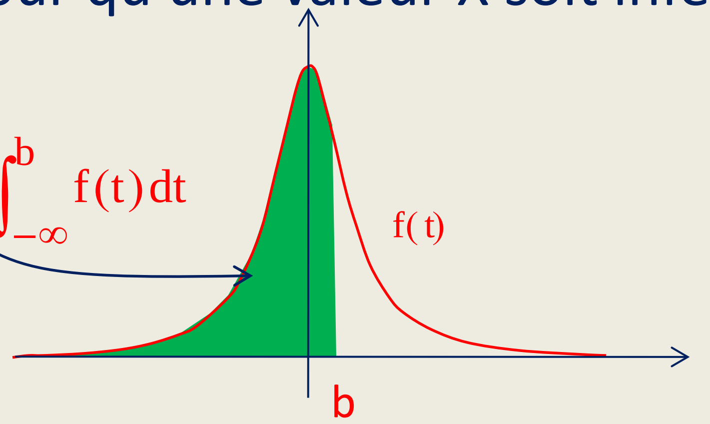
$$\lim_{x \to -\infty} F(x) = 0 \qquad \lim_{x \to +\infty} F(x) = 1$$

La dérivée $f(x) = F'(x)$ s'appelle densité de probabilité

Variables aléatoires continues (2)

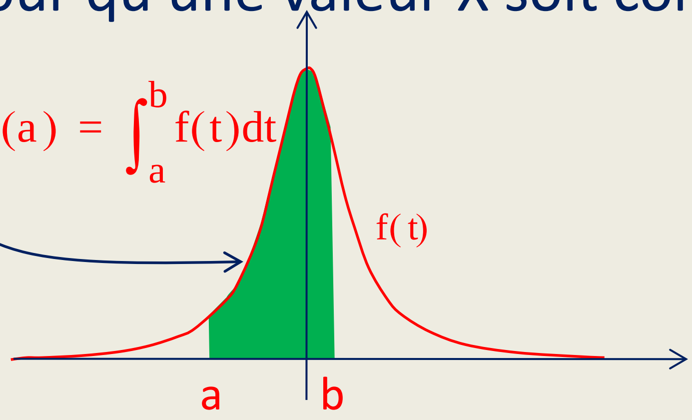
- Probabilité pour qu'une valeur X soit inférieure à b

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^{b} f(t)\,dt$$



- Probabilité pour qu'une valeur X soit comprise entre a et b

$$P(a < X \leq b) = F(b) - F(a) = \int_{a}^{b} f(t)\,dt$$



Variables aléatoires continues (4)

$$P(a < X \leq b) = F(b) - F(a) = \int_a^b f(x)dx$$

La condition que la probabilité totale soit égale à 1 est telle que : $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1$

Espérance mathématique : $E(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x)dx$

Variance et écart type : $Var(X) = E[X - E(X)]^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - E(x))^2 \cdot f(x)dx = \sigma_X^2$

La loi normale ou loi de Gauss

De nombreuses mesures expérimentales suivent une loi normale.

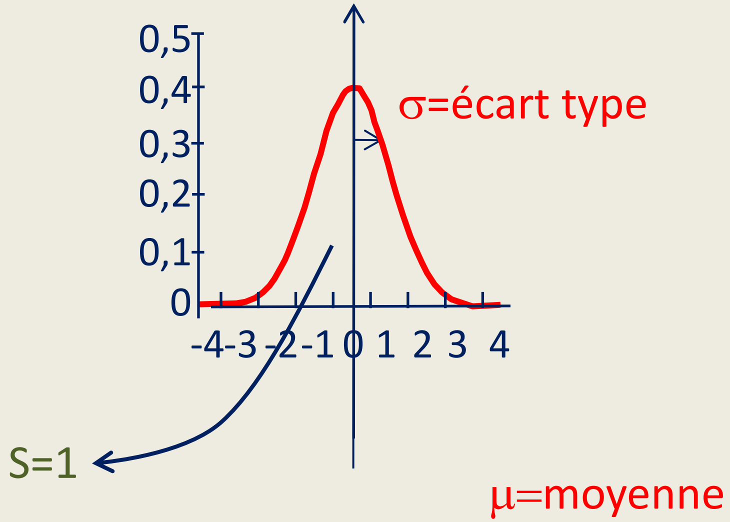
Cette loi est caractérisée par 2 paramètres :

- Une valeur moyenne μ
- Un paramètre de dispersion σ (l'écart type)

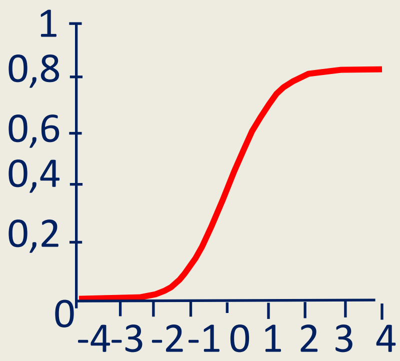
$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{x-\mu}{\sigma}\right]^2}$$

La loi normale ou loi de Gauss

Densité de probabilité
d'une variable aléatoire
de loi normale centrée et réduite

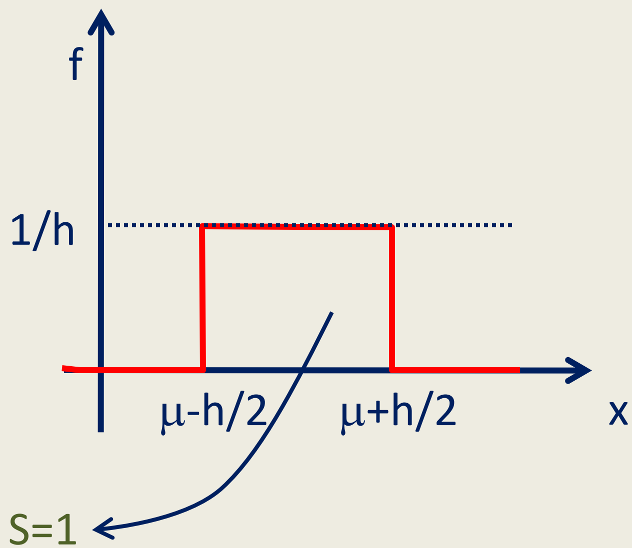


Fonction de répartition
d'une variable aléatoire
de loi normale centrée et réduite

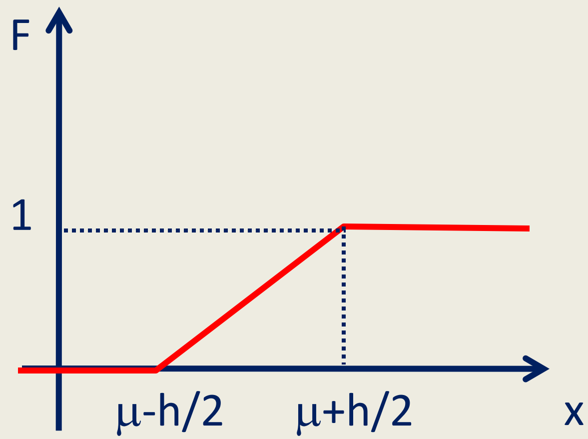


$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{x-\mu}{\sigma}\right]^2}$$

La loi uniforme



La surface sous la courbe est égale à 1



$$E[X] = \mu$$

$$V[X] = \frac{h^2}{12}$$

$$\sigma(X) = \frac{h}{\sqrt{12}}$$

Précision et exactitude (1)

Quelle est la validité des mesures que l'on a effectuée ?

Pour cela, il est nécessaire d'évaluer certaines caractéristiques telles que :

- **Justesse (ou Exactitude)**
- **Fidélité (ou Précision)**
  - **Répétabilité**
  - **Reproductibilité**

- **Justesse et Fidélité**
- **Robustesse**
  - **Rugosité**

Précision et exactitude (2)

Ces concepts font appels à des objets de statistique descriptive comme :

- La variance
- L'écart type
- L'intervalle de confiance
- Le test d'hypothèse
- Les lois de distribution

Les erreurs expérimentales (1)

Les erreurs expérimentales sont de deux types :

- Les erreurs systématiques
  - Biais, varient dans le même sens par rapport à la moyenne.
  - Affectent l’exactitude (la justesse).
- Les erreurs statistiques
  - Se répartissent de part et d’autre de la valeur moyenne.
  - Matérialisées par la variance et l’écart type.
  - Affectent la fidélité (précision).
  - Nécessité de réduire σ_X^2

Les erreurs expérimentales (2)
Justesse, fidélité et erreur

4 opérateurs A, B, C, D mesurent des résistances de 100 ohms

A	B	C	D
100,8	98,8	101,9	100,4
101,1	101,4	97,9	99,8
100,9	100,2	96,9	100,2
101,0	98,0	100,5	99,7
101,2	102,1	97,8	100,4

Les erreurs expérimentales (3) Justesse, fidélité et erreur

	A	B	C	D
	100,8	98,8	101,9	100,4
	101,1	101,4	97,9	99,8
	100,9	100,2	96,9	100,2
	101,0	98,0	100,5	99,7
	101,2	102,1	97,8	100,4
	Inexact	Exact	Inexact	Exact
Moyenne	101	100,1	99	100,1
Ecart type	0,16	1,72	2,1	0,33
	Précis	Imprécis	Imprécis	Précis

$$E(X) = \frac{1}{5}\sum_{i=1}^{5} x_i$$

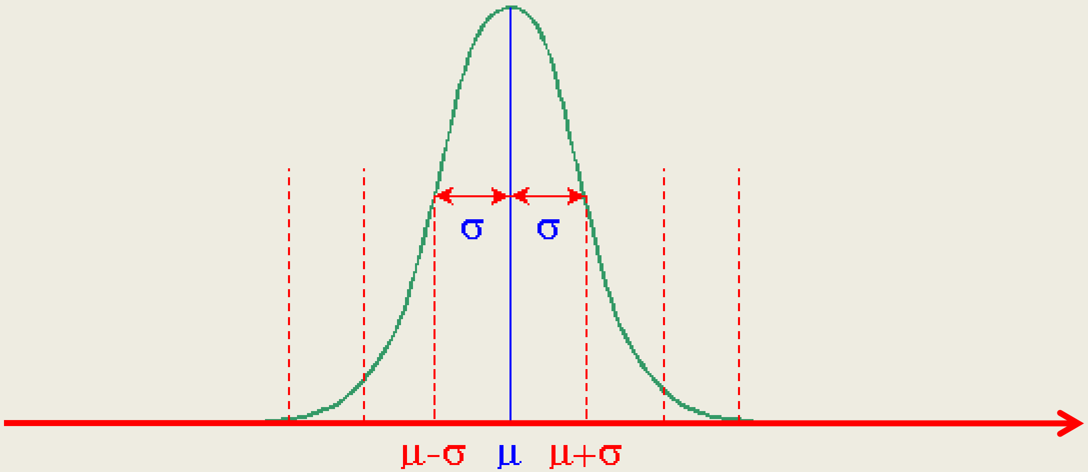
$$Var(X) = E[X - E(X)]^2 = \frac{1}{5}\sum_{i=1}^{5} (x_i - E(X))^2$$

Une moyenne exacte peut être affectée d'une imprécision

Intervalle de confiance

L'intervalle de confiance permet d'encadrer un résultat.

Exemple de la loi normale.



Probabilité = 99,73% pour que x soit compris dans l'intervalle $\mu \pm 3\,\sigma$

La justesse

Un capteur ou plus généralement un instrument de mesure est d'autant plus juste que les valeurs indiquées sont proches des valeurs théoriques vraies.

- La justesse est évaluée statistiquement, en analysant un grand nombre de mesures. L'espérance mathématique E(X) doit être proche de la valeur théorique.
  - Ceci implique que les erreurs systématiques sont nulles et que l'erreur statistique est nulle en moyenne.
- La justesse est également appelée exactitude.

$$J = \bar{m} - V$$

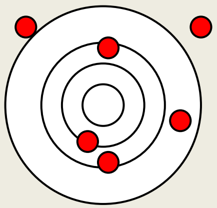
Valeur vraie

Moyenne arithmétique d'un grand nombre de mesures

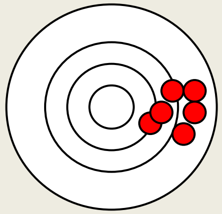
La fidélité (précision)

- La précision représente l'accord de la série de mesures.
- La précision est l'aptitude d'un instrument à donner des mesures dont la dispersion est faible.
  - La précision est évaluée statistiquement.
  - La précision implique que la variance de la série de mesure est faible.
- La précision est également appelée fidélité.

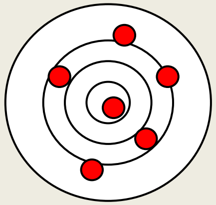
La justesse et la fidélité



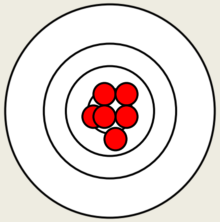
Ni juste, ni fidèle



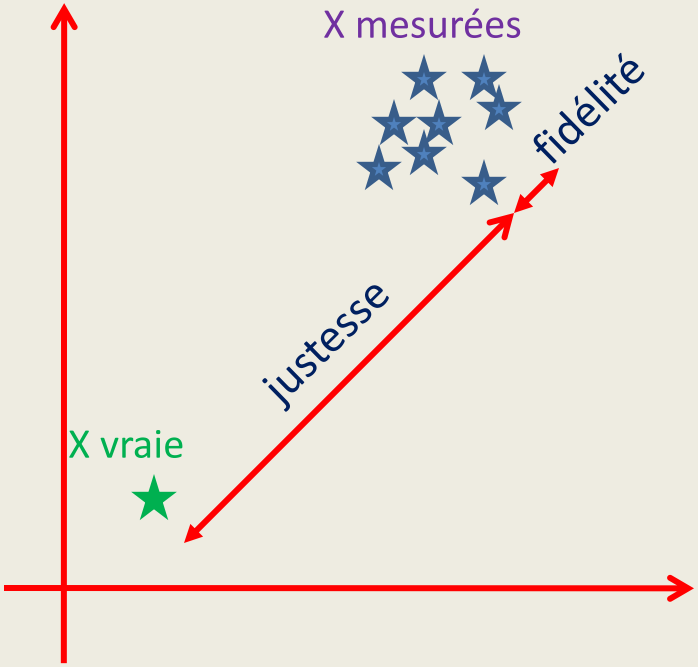
Pas juste mais fidèle



Juste mais pas fidèle



Juste et fidèle



La répétabilité

La répétabilité permet d'évaluer les mesures effectuées par un même opérateur, dans le même contexte (intervalle de temps réduit).

- C'est une mesure de dispersion statistique.
- La variance ou l'écart type sont utilisés pour évaluer la répétabilité.

La reproductibilité

La reproductibilité permet d'évaluer des lots de mesures issus d'opérateurs différents.

- C'est une mesure de dispersion statistique.
- La variance ou l'écart type sont utilisés pour évaluer la reproductibilité.

Propriétés dynamiques (1)

Le fonctionnement d'un capteur peut être statique ou dynamique.

Mode statique : L'évolution au cours du temps est nulle ou très lente.

Mode dynamique : évolution au cours du temps de la grandeur à mesurer. Nécessite de tenir compte de la bande passante et de caractériser la vitesse de réponse du capteur/système

Propriétés dynamiques (2)

- **Réponse en fréquence:** G(ν)
  - Variation de la sensibilité en fonction de la fréquence.
  - Réponse en fréquence = amplitude + phase.
  - A priori : limite basse fréquence et limite haute fréquence.

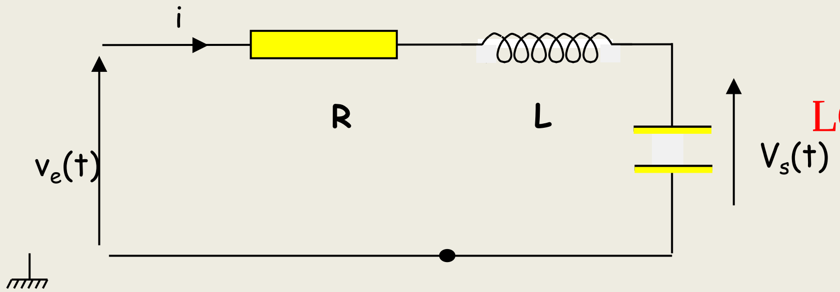
- **Bande passante**
  - Gamme de fréquence dans laquelle le capteur et son conditionneur est utilisable.
  - Définie par un affaiblissement de 3dB de la réponse en fréquence.

Propriétés dynamiques (3)

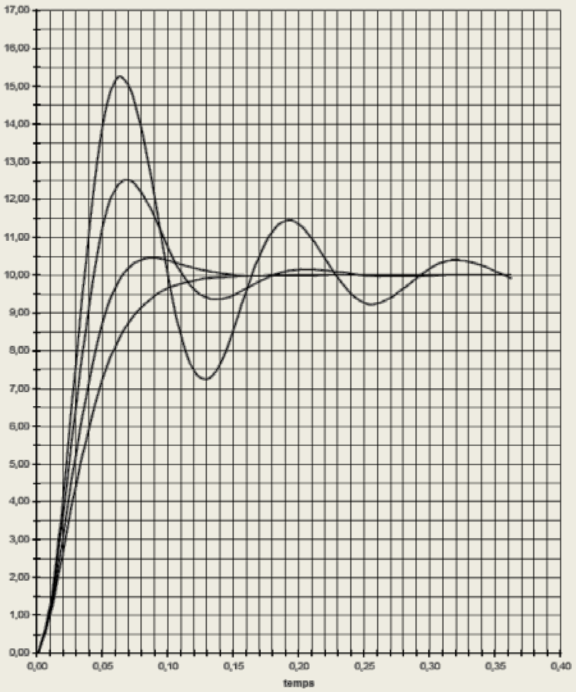
- **Réponse impulsionnelle :** h(t)
  - Réponse temporelle à une impulsion brève sur la grandeur d'entrée.
  - Intimement liée à la réponse en fréquence (transformée de Fourier).

- **Ordre du système**
  - Ordre de la dérivée la plus élevée dans l'équation différentielle du système.
  - Grande majorité des capteurs : premier ou second ordre.

Propriétés dynamiques (5)



$$LC\frac{d^2}{dt^2}S(t) + RC\frac{d}{dt}S(t) + S(t) = X(t)$$



Exemple de réponse indicielle pour différents facteurs d'amortissement ξ

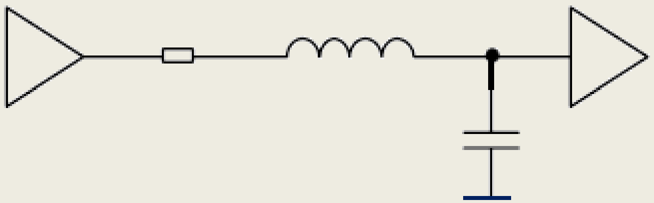
$$\xi = \frac{R}{2\sqrt{\frac{L}{C}}}$$

Un circuit du second ordre est une source potentielle d'oscillations !

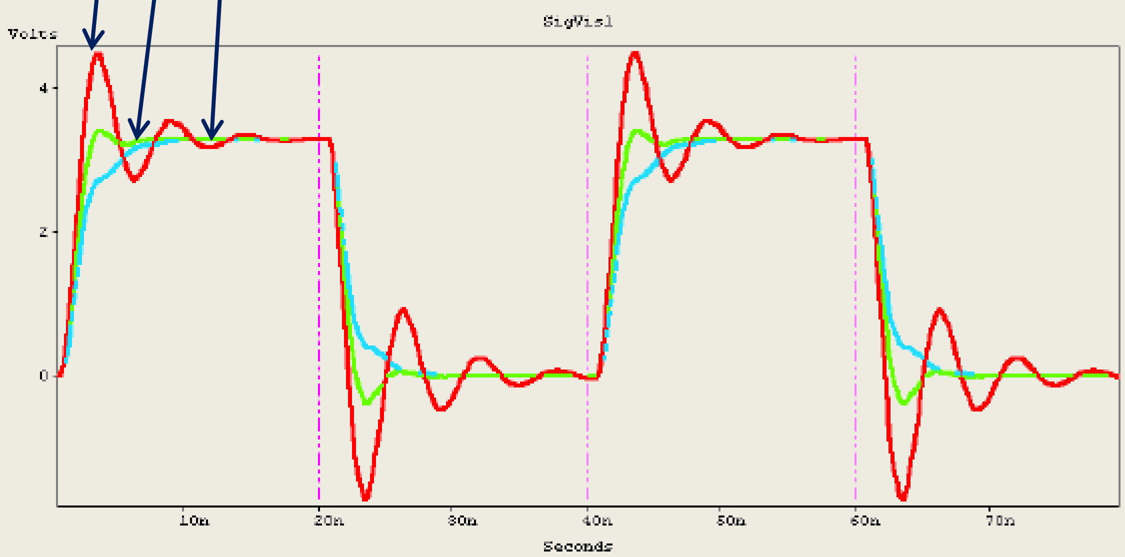
• Solution : diminuer L, en limitant la longueur des fils. (~10nH/cm)

Propriétés dynamiques (6)

Conséquence : sur-oscillation (overshoot)



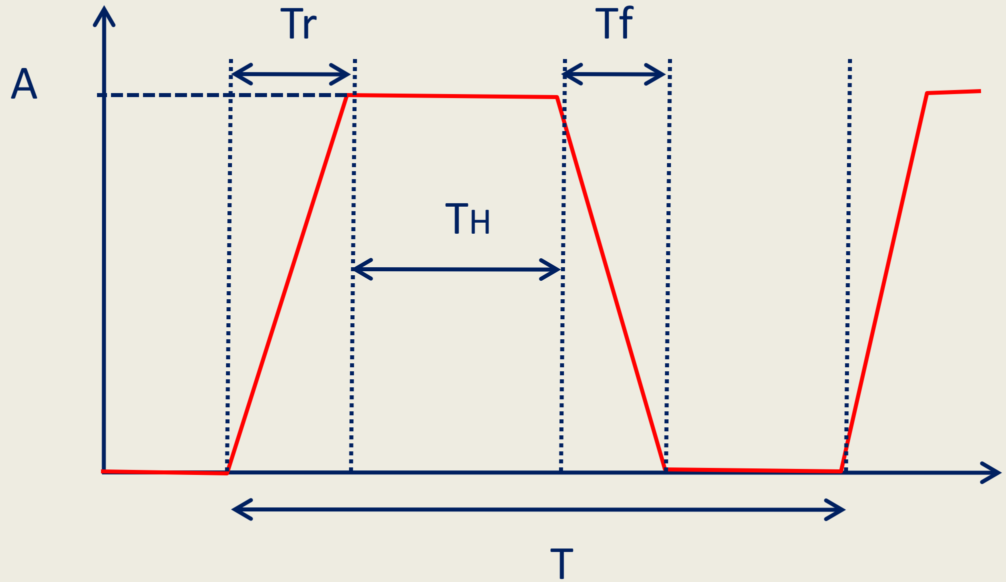
$$\xi = \frac{R}{2\sqrt{\frac{L}{C}}} = 0{,}1/0{,}5/1$$



Répartition spectrale

- Considérons un signal trapézoïdal

Quelle est sa représentation spectrale ?



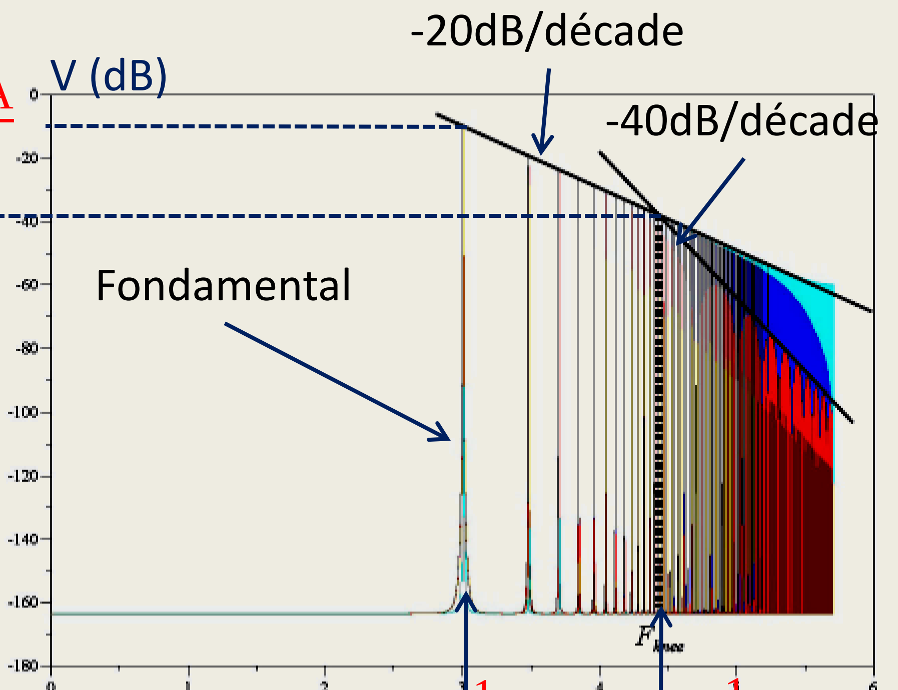
Répartition spectrale (1)

Prenons Tr = Tf = tm >0

Les harmoniques décroissent selon 2 pentes.

$$V_1 = \frac{2A}{\pi}$$

$$V_T = \frac{2At_m}{T}$$



$$\nu_1 = \frac{1}{T} \qquad \nu_T = \frac{1}{\pi t_m}$$

Dans la zone à -40dB/décade les amplitudes harmoniques sont données par :

$$V_i = \frac{V_T}{\left(\frac{\nu_i}{\nu_T}\right)^2}$$

Bases de conception de circuits

Les circuits de base sont nécessaires lorsque la grandeur à mesurer est de faible niveau et ne peut pas être lue directement.

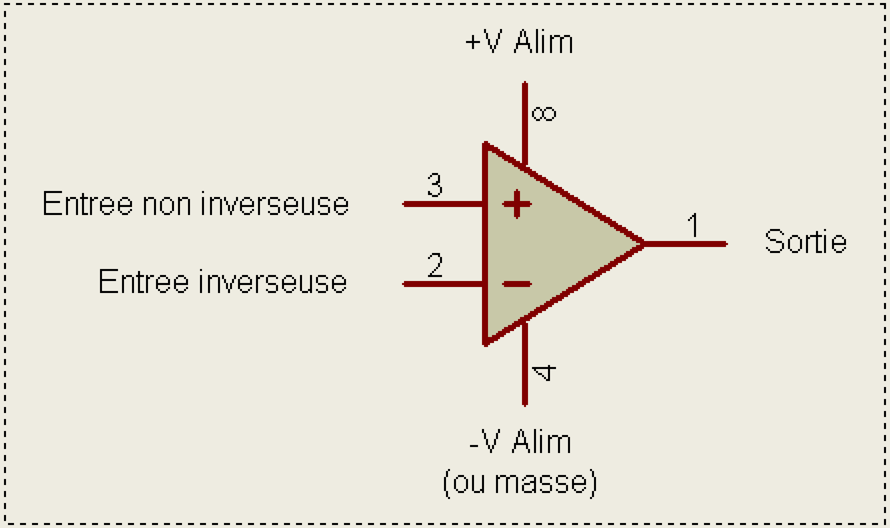
- On parle alors de circuit de base bas niveau.
- Généralement, la grandeur de bas niveau, est entachée d'un bruit, qu'il faudra limiter.

Les circuits de base vont transformer la grandeur d'entrée (V, I, Q) en une tension proportionnelle à cette grandeur.

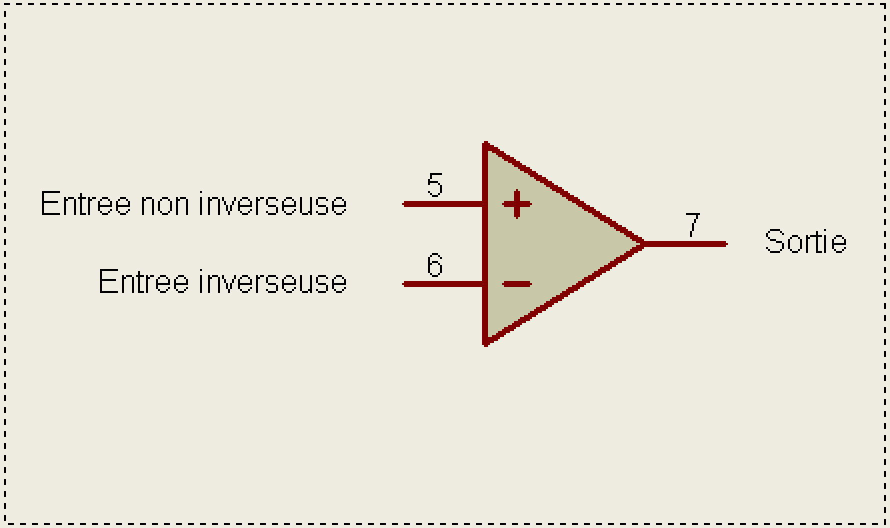
Ces conditionneurs s'apparentent aux appareils de mesure bas niveau (millivoltmètre, pico-ampèremètre ou électromètre/pico-coulombmètre).

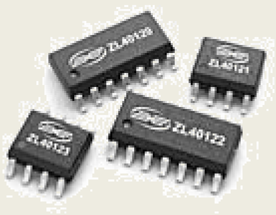
Amplificateur opérationnel de base (1)

Représentation avec les broches d'alimentation :



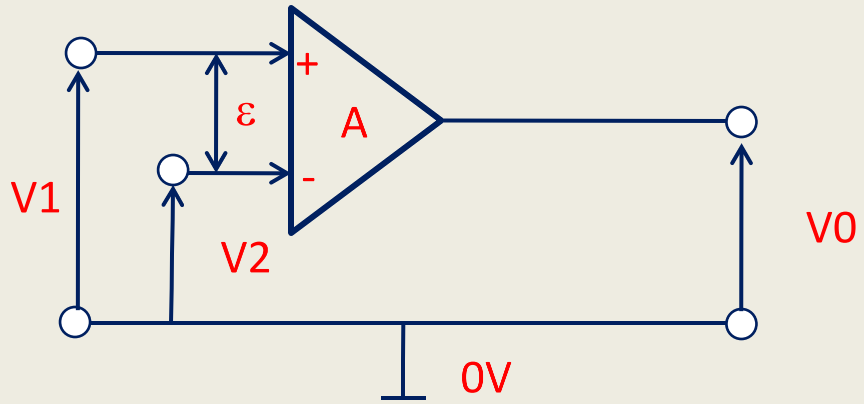
Représentation sans les broches d'alimentation :





Amplificateur opérationnel de base (2)

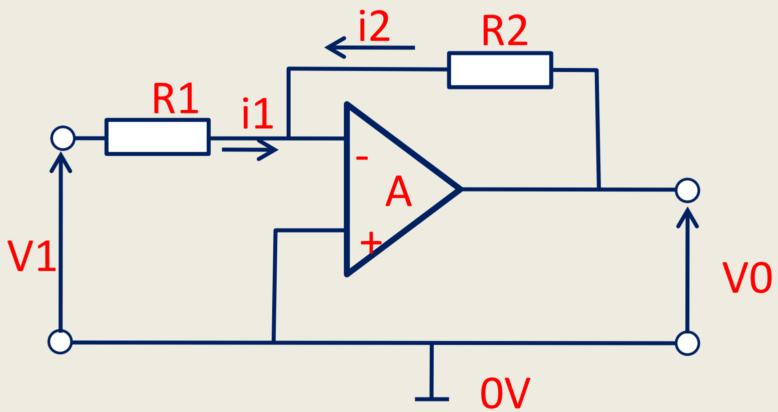
- V0=A(V1-V2)



- A est très grand (minimum de 10^4 à 10^5)
- Les courants entrants dans l'AOP $\rightarrow$ 0 $Z_{in} \rightarrow \infty$
- Une contre réaction va s'assurer que (V1-V2)=ε $\rightarrow$ 0

Amplificateur opérationnel de base (3)

- Amplificateurs de tension (inverseur et non-inverseur)

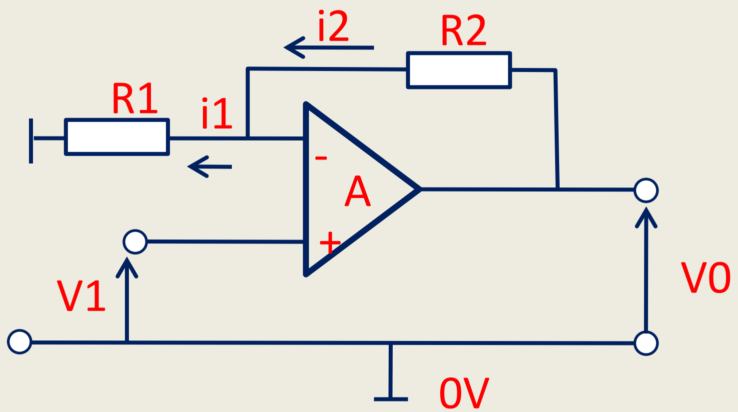


$$i_1 + i_2 = 0$$

$$i_1 = \frac{V_1}{R1}$$

$$i_2 = \frac{V_0}{R2}$$

$$\frac{V_0}{V_1} = -\frac{R2}{R1}$$



$$i_1 = i_2$$

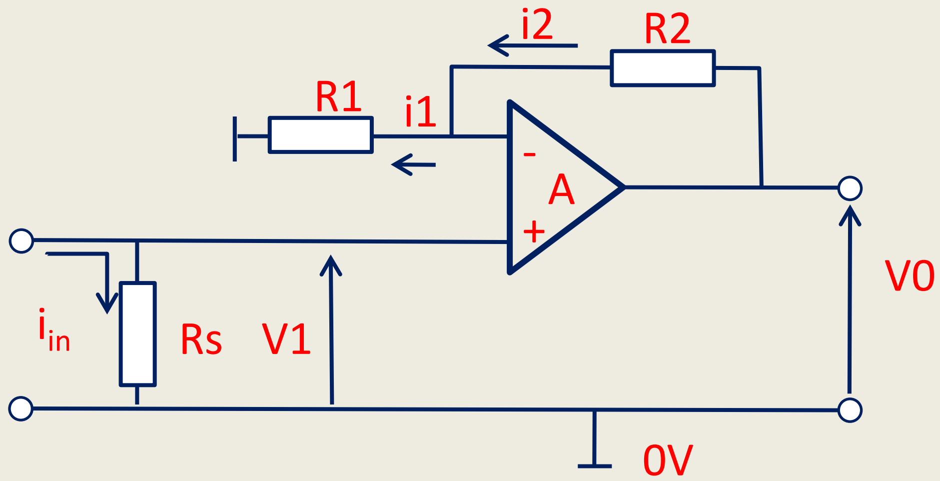
$$i_1 = \frac{V_1}{R1}$$

$$i_2 = \frac{V_0 - V_1}{R2}$$

$$\frac{V_0}{V_1} = 1 + \frac{R2}{R1}$$

Amplificateur opérationnel de base (4)

- Lecture d'un courant montage shunt



$$V_1 = I_{in} R_s$$

$$\frac{V_0}{V_1} = 1 + \frac{R2}{R1}$$

$$V_0 = I_{in} R_s \left(1 + \frac{R2}{R1}\right)$$

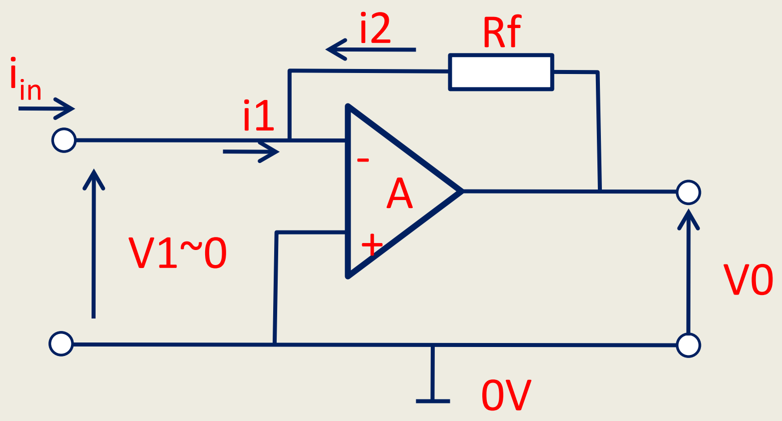
Rs doit être de faible valeur :

- Meilleure précision et stabilité.
- Limite la constante de temps de l'entrée (rapidité)

Mais si Rs faible, le rapport S/B se dégrade

Amplificateur opérationnel de base (5)

- Lecture d'un courant montage à contre réaction



$$i_{in} = i_1$$
$$V_0 = -i_{in} \cdot R_f$$

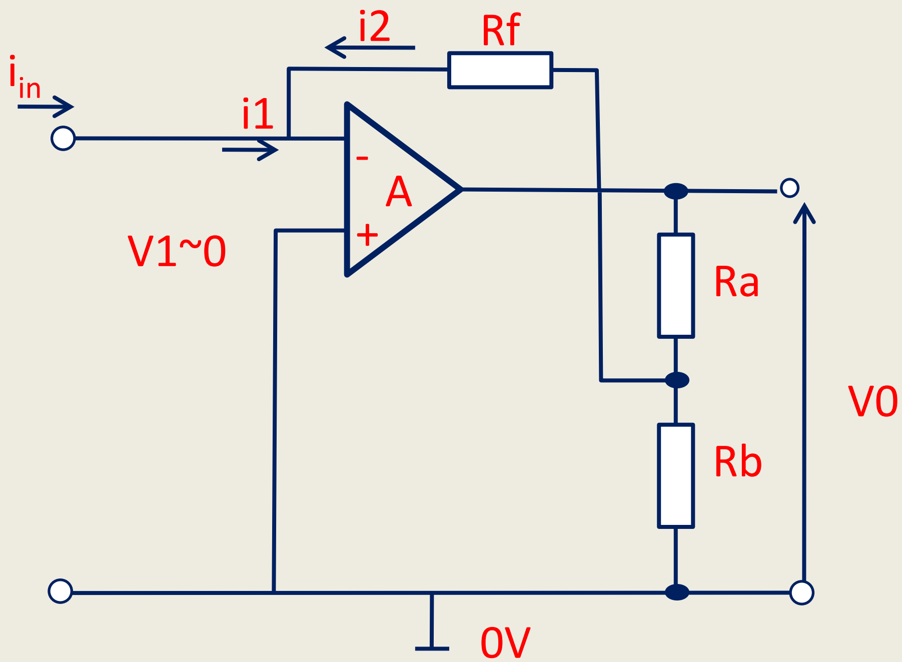
Amplificateur opérationnel de base (6)

- Lecture d'un courant montage à contre réaction (variante)
  - Multiplication par un facteur supplémentaire.

$$V_{Rb} = V_0 \frac{Rb}{Ra + Rb}$$

$$V_{Rb} = -i_{in} \cdot R_f$$

$$V_0 = i_{in} \cdot R_f \left(1 + \frac{R_a}{Rb}\right)$$



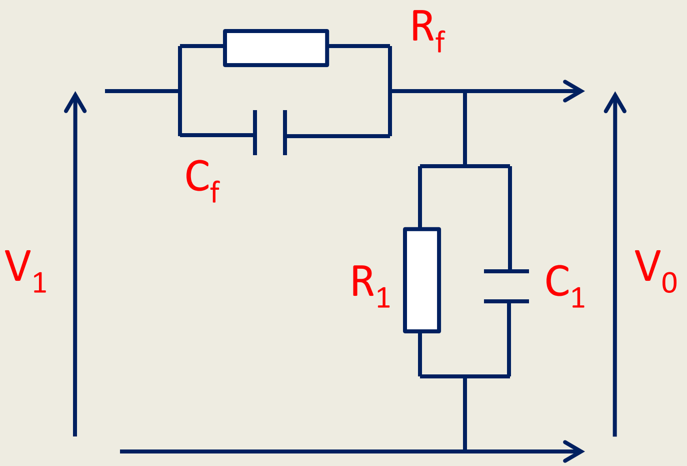
Pico-ampèremètre rapide (1)

- La vitesse d'un amplificateur de courant est limitée par la constante de temps $R_f x C_f$.

Dans le cas où C_f est une capacité parasite (pistes, câblage, etc.), il est possible de neutraliser cette capacité.

Montage préliminaire :

$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_f} = \frac{\dfrac{R_1}{1 + R_1 C_1 p}}{\dfrac{R_1}{1 + R_1 C_1 p} + \dfrac{R_f}{1 + R_f C_f p}} = \frac{R_1}{R_1 + R_f \dfrac{1 + R_1 C_1 p}{1 + R_f C_f p}}$$

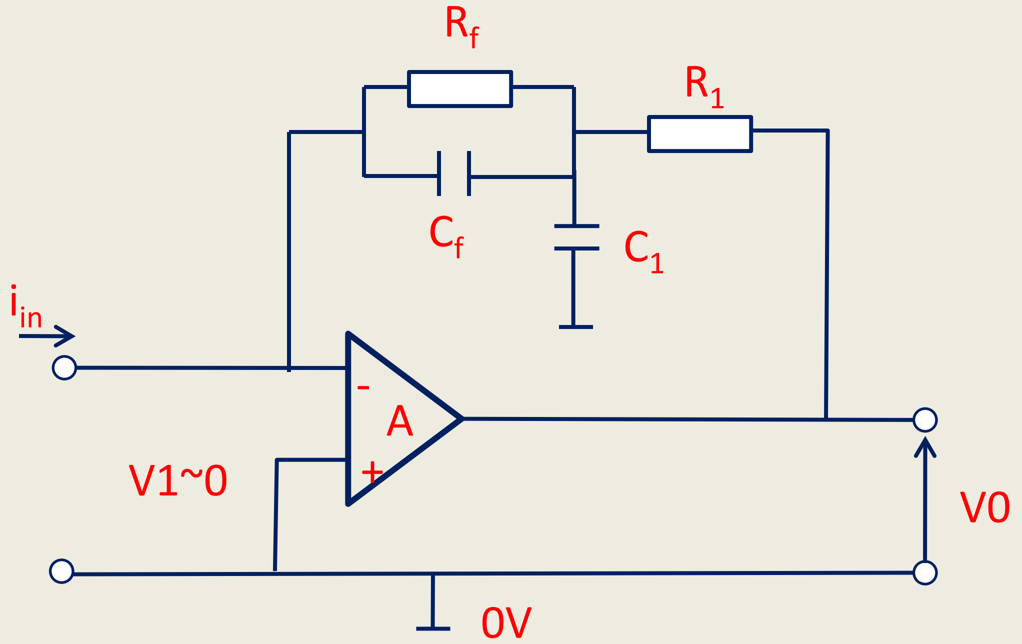


Si $R_f x C_f = R_1 x C_1$ le rapport V0/V1 ne dépend plus que des résistances :

$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{R_1}{R_1 + R_f}$$

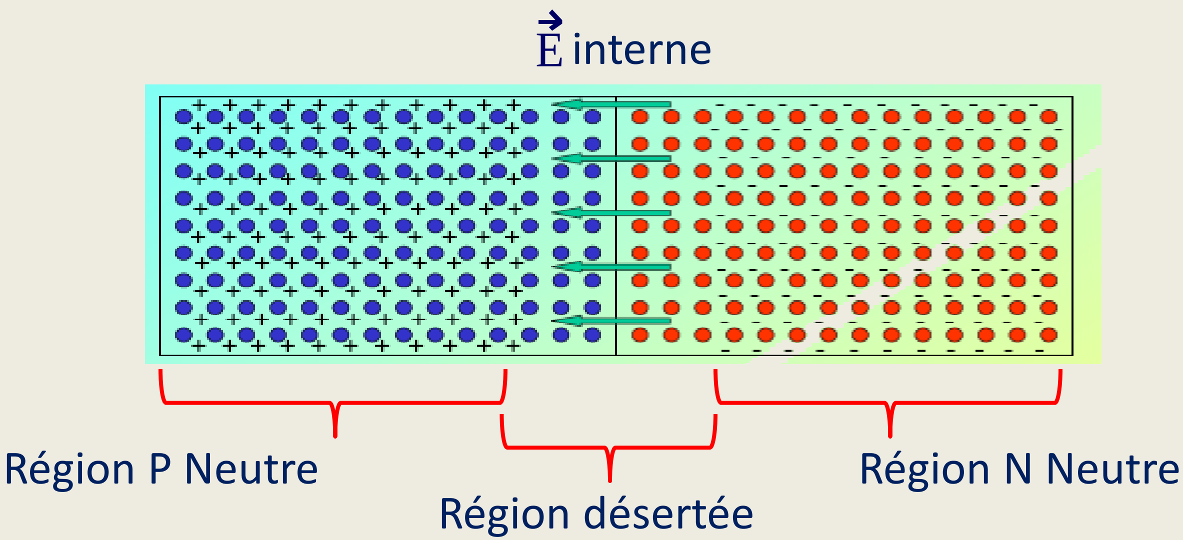
Pico-ampèremètre rapide (2)

- La capacité C_f est neutralisée lorsque $R_f x C_f = R_1 x C_1$



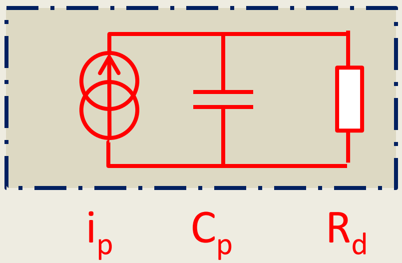
Exemple de lecture en courant

- Lecture du courant d'une photodiode
  - 3 modes de lecture sont possibles :
    - Photovoltaïque (sans polarisation)
    - Photoconducteur (effet photoélectrique, polarisation inverse)
    - Avalanche (polarisation inverse)

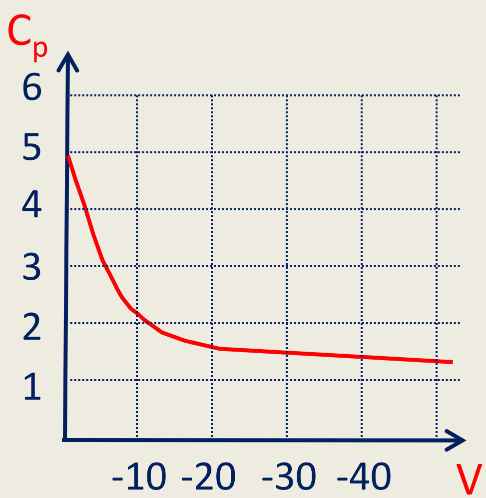


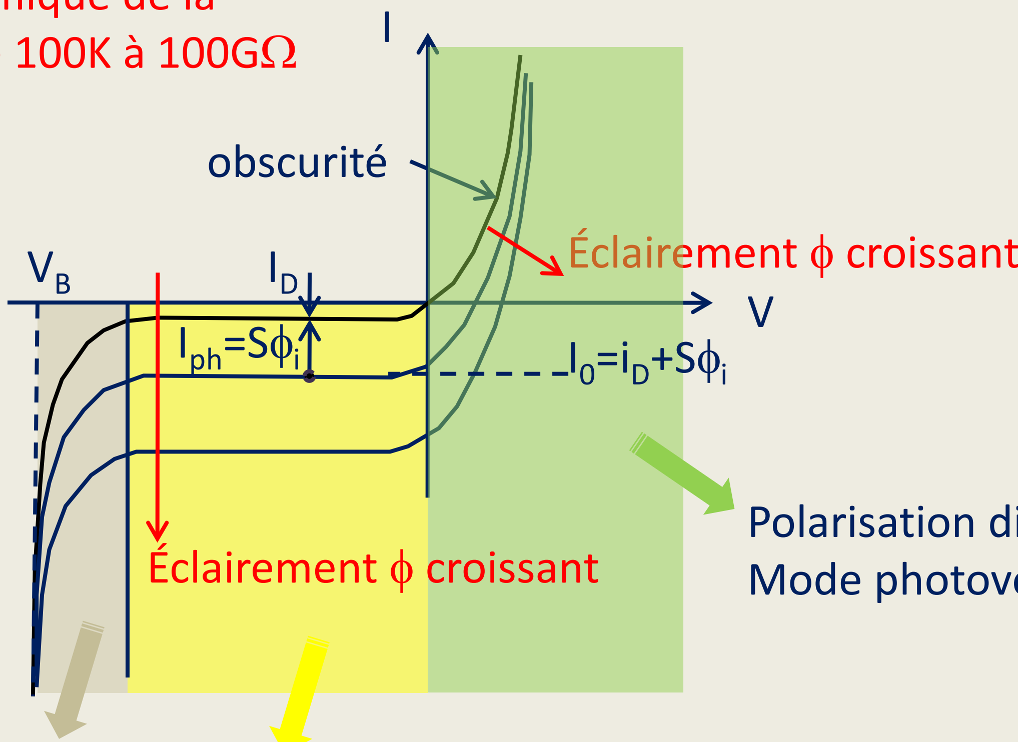
Réponse en courant d'une photodiode

Circuit équivalent



Rd résistance dynamique de la diode 100K à 100GΩ



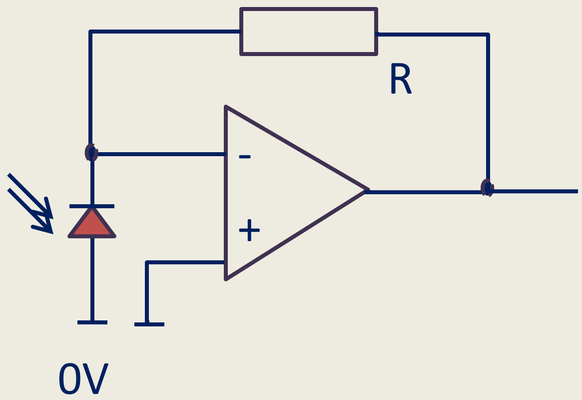


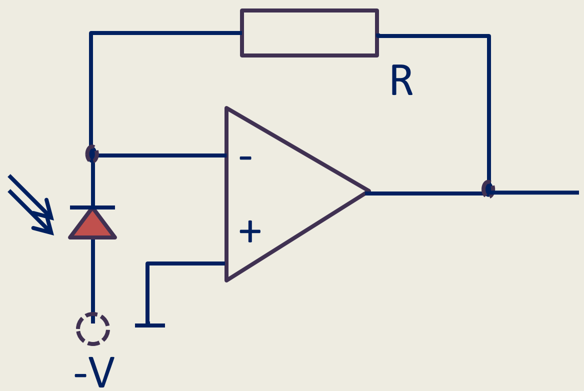
Polarisation directe
Mode photovoltaïque

Mode PDA
(avalanche)

Polarisation inverse
Mode photoconducteur

Circuits pour photodiodes





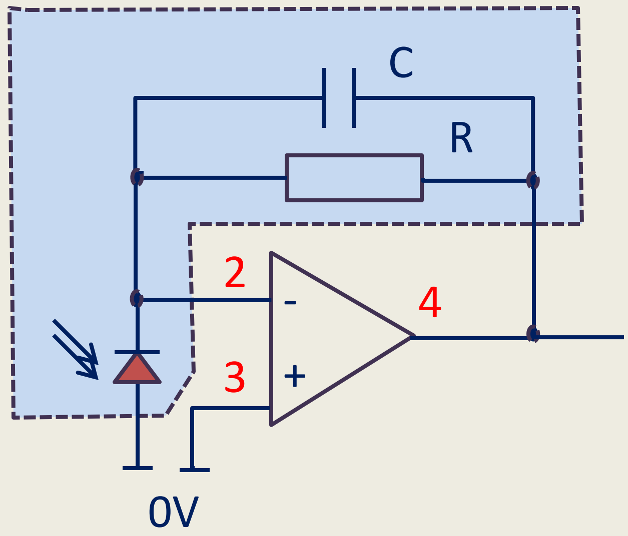
Mode photovoltaïque

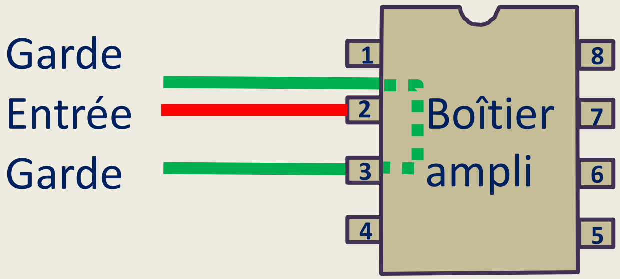
- Sans polarisation
- Pas de courant noir
- Linéaire
- Bas bruit (Johnson)
- Précis et peu rapide

Mode photoconducteur

- Polarisation inverse
- Courant noir
- Linéaire par zone
- Bruit (Johnson + impulsionnel)
- Rapide

Précautions particulières dans le cas de lecture de courant faible



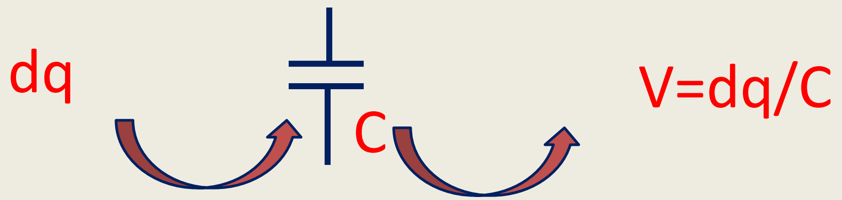


La partie encadrée est sujette à perturber le signal mesuré (fuites).

- Toutes les connexions au point de sommation doivent être les plus courtes possibles
- Si la photodiode est connectée par un câble, celui-ci doit être le plus court possible, diélectrique en téflon faibles pertes.
- Une piste de garde permet de limiter les fuites

Electromètre (mesure de charges)

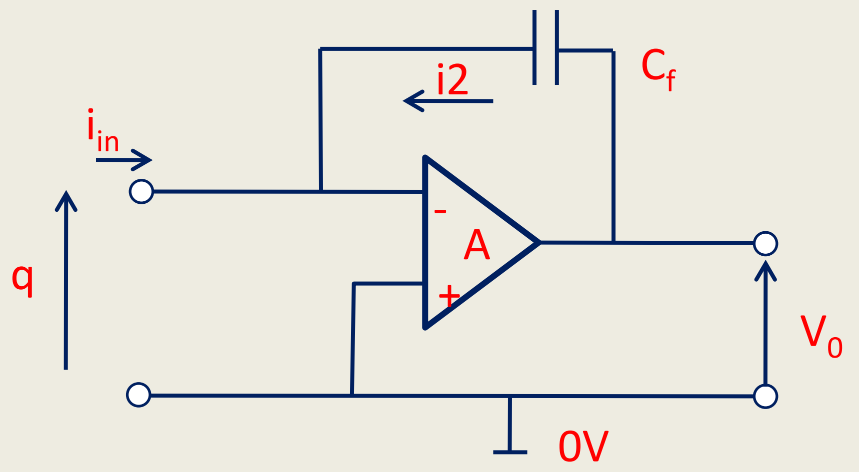
- Principe : la charge à lire est transférer dans un condensateur puis la tension correspondante est lue.



Amplificateur de charges (1)

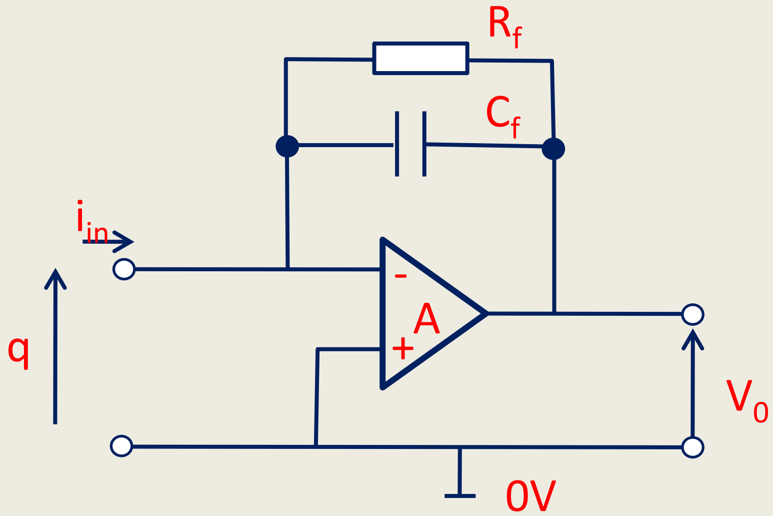
- La charge q est transférée intégralement dans C_f

$$V_0 = -\frac{q}{C_f}$$



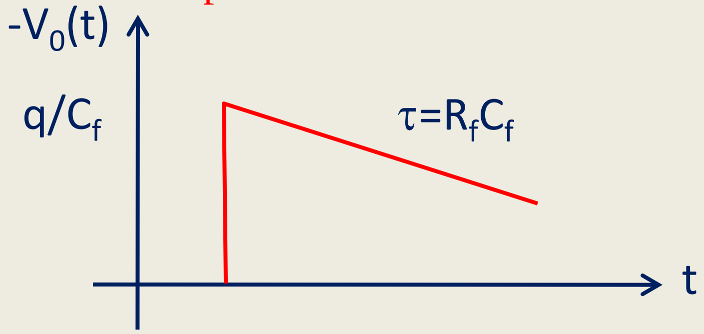
Amplificateur de charges (2)

- Stabilisation de l'amplificateur de charges en basses fréquences et en continu.
  - Si ν est faible, l'amplificateur n'a plus de contre-réaction : $\frac{1}{C_f\omega}$ »
  - Une résistance R_f permet de stabiliser l'amplificateur



$$\frac{dq}{dt} + \frac{V_0}{R_f} + C_f\frac{dV_0}{dt} = 0$$

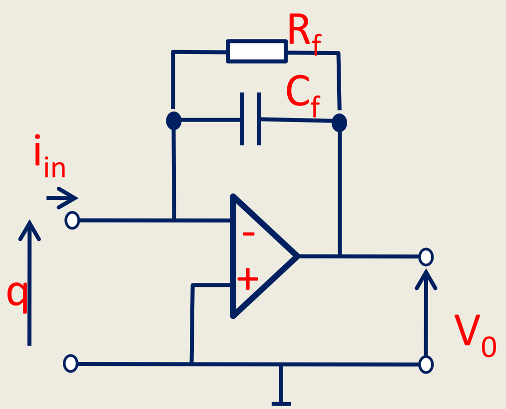
$$V_0 = -\frac{q}{C_f}e^{-\frac{t}{R_fC_f}}$$

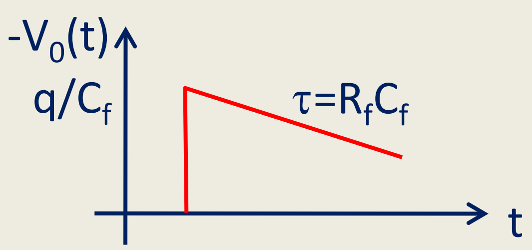


Suppression du pôle zéro (1)

- Le signal en sortie du préamplificateur de charge est de la forme :

$$V_1 = \frac{q}{C} e^{-\frac{t}{RC}} = A_1 e^{-\frac{t}{\tau 1}}$$





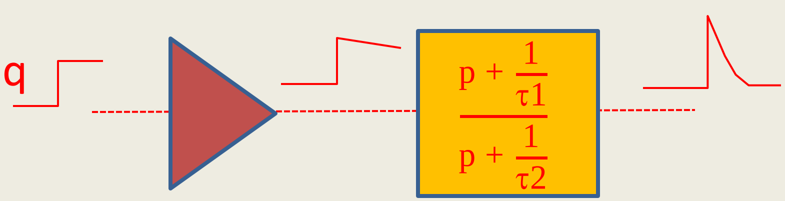
La longue décroissance exponentielle est généralement gênante : favorise l'empilement.

Suppression du pôle zéro (2)

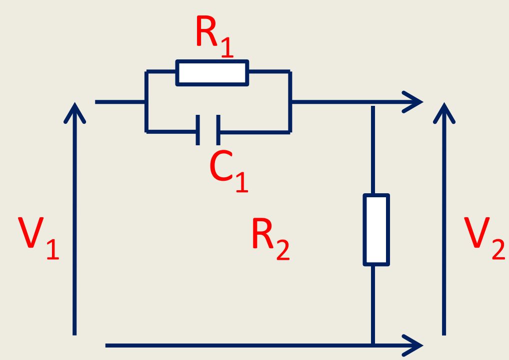
- Selon le formalisme de Laplace la sortie du préamplificateur s'écrit :

$$V_1 = \frac{A_1}{p + \frac{1}{\tau 1}}$$

- Pour raccourcir V_1, il faut remplacer $(p+1/\tau_1)$ par $(p+1/\tau_2)$ tel que $\tau_1 << \tau_2$.

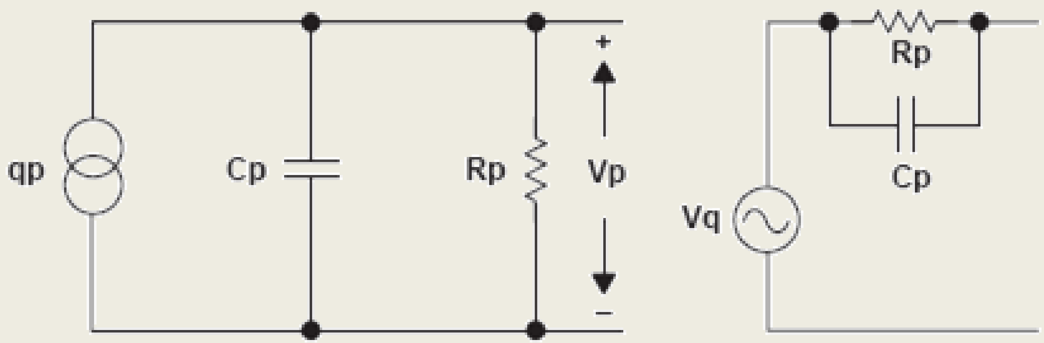


$$V_1 = \frac{A_1}{p + \frac{1}{\tau 1}} \qquad V_2 = \frac{A_1}{p + \frac{1}{\tau 2}}$$



$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{p + \frac{1}{\tau 1}}{p + \frac{1}{\tau 2}}$$

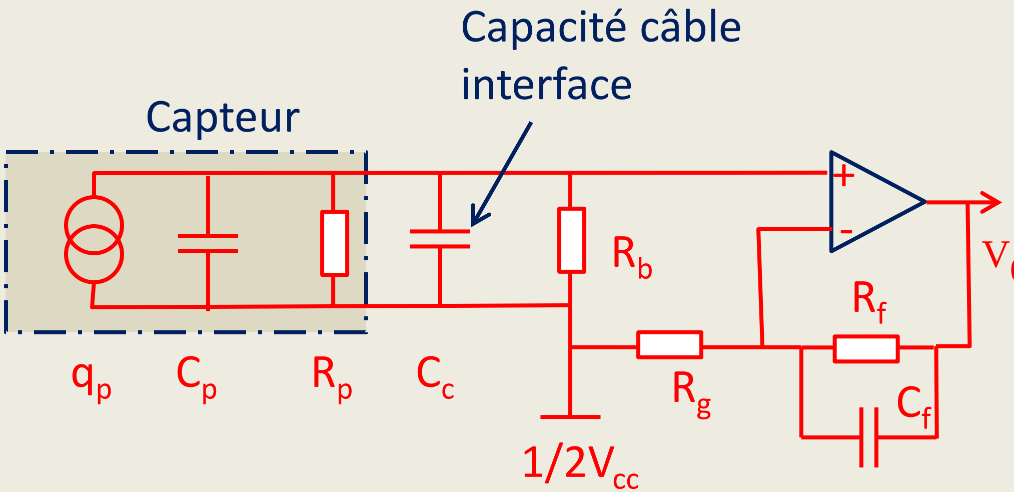
Modèle du capteur piézoélectrique



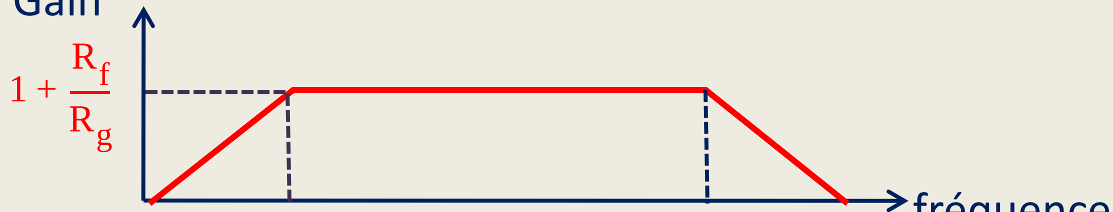
Modèle en charge Modèle en tension

- La capacité C_p est définie par les dimensions du capteur.
- La résistance R_p correspond à l'impédance du capteur (impédance élevée).

Lecture en tension



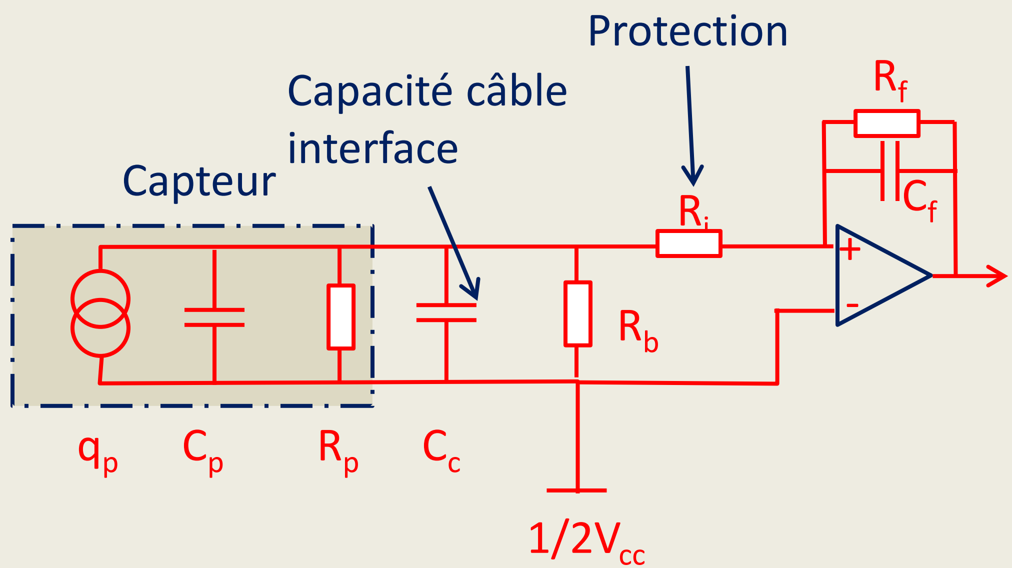
$$V_0 = \frac{q_p}{(C_p + C_c)} \cdot \left[1 + \frac{R_f}{R_g}\right] + \frac{V_{cc}}{2}$$



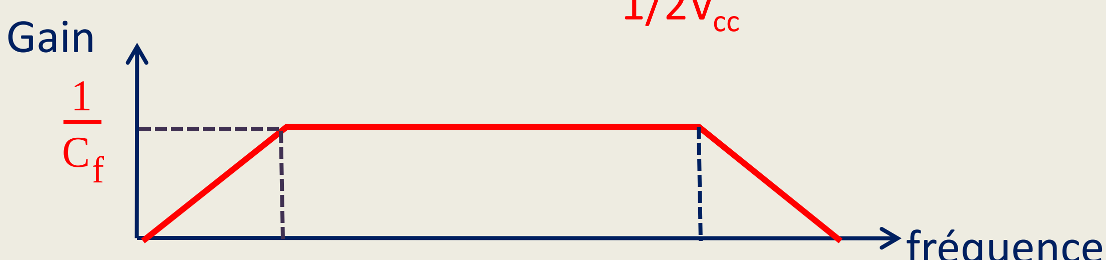
$$f_L = \frac{1}{2\pi(R_p // R_b)(C_p // C_c)} \qquad f_H = \frac{1}{2\pi R_f C_f}$$

- **R_b résistance de polarisation**
- **La tension de sortie dépend de C_c**
- **La fréquence supérieure dépend de $R_f C_f$**
- **R_b doit être la plus grande possible**

Lecture en charge



$$V_0 = \frac{q_p}{C_f} + \frac{V_{cc}}{2}$$



$$f_L = \frac{1}{2\pi R_f C_f} \qquad f_H = \frac{1}{2\pi R_i (C_p + C_c)}$$

Application : Courant et charge dans un calorimètre (1)

Une particule chargée, traversant le détecteur ionisera le milieu. L'ionisation totale sera proportionnelle à l'énergie perdue par la particule. Les charges créées dans la cellule du détecteur sont collectées grâce à un champ électrique externe.
Chaque cellule du détecteur peut être modélisée comme un condensateur C_d

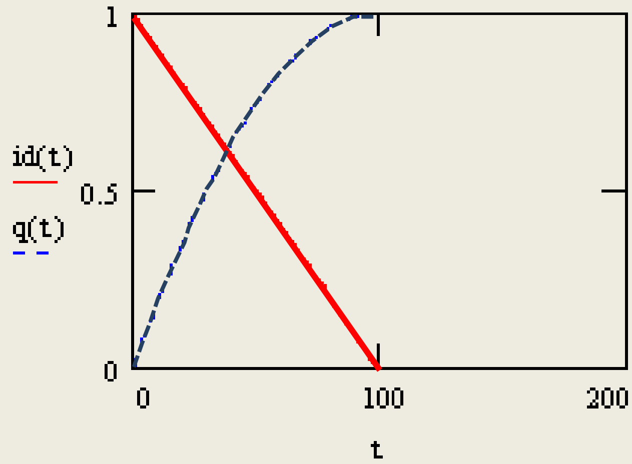
Par exemple, pour un calorimètre de type à " argon liquide ", le courant dans le détecteur est défini par :

$$i_d = I_m\left[1 - \frac{t}{t_d}\right]$$

i_d est la variation du courant détecteur en fonction du temps.
t_d est le temps au bout duquel toutes les charges sont collectées.

$$q(t) = \int_0^T i_d(t)\,dt$$

Courant et charge dans un calorimètre (2)



- Le courant est instantané.
  - La mesure est très rapide.
  - Très sensible au bruit.
- La charge demande que tous les électrons soient collectés
  - La mesure est plus lente.
  - Peu sensible au bruit.

Les contraintes

- Le plus petit signal mesurable sera fonction du bruit du détecteur et de son électronique associée.

- L'empilement peut être une limitation. L'empilement est un phénomène qui se matérialise par un recouvrement des signaux. Si l'on désire discerner deux signaux consécutifs créés dans la même cellule du détecteur, il sera nécessaire d'augmenter la bande passante de l'électronique. (le bruit est proportionnel à la bande passante !).

- D'une manière plus générale, on tient compte de la probabilité qu'une même cellule soit touchée deux fois de suite dans un laps de temps bien défini. L'empilement doit être considéré comme un bruit qu'il faut optimiser.

- Le bruit lié à la physique (tous les événements indésirables).

Selon, les applications, il est possible de lire l'information issue du détecteur par un préamplificateur de charges ($V_s=f(q_{in})$), de courant ($V_s=f(I_{in})$) ou plus rarement de tension.