
Outils pour la physique

Mesure et Détection

Introduction



Comprendre le monde,
construire l'avenir®



Marie Poirier-Quinot, Nicolas
Vernier, Francesca Chiodi

Module outils pour la physique

Mesure et détection

Outils informatique

Traitement du signal

Module outils pour la physique

Mesure et détection

10 heures de CM

7 heures de TD

2TP 6h

TP: CR oral 10' (5 transparents)

CR écrit sous forme d'article scientifique (5 figures)

Objectif

Matériel et méthodes

Résultats

Discussion

Compte Rendu TP

Ecrit

L'ensemble doit tenir sur 2 pages recto/verso.

M1 Physique Appliquée, « Mesures et Détection » Raquel Lambert et Malarie Martin 11 février 2016

TP : Mesure de bruit - Fluctuations électroniques et constantes fondamentales

Introduction

Dans toute mesure électrique, il existe des fluctuations que l'on voudrait réduire, voir éviter, afin d'obtenir des mesures plus précises. Il existe deux types de bruits électroniques à tout conducteur électrique que nous allons essayer de mesurer et de comprendre : le bruit thermique et le bruit de grenaille. Le premier, étant relié à l'agitation thermique des électrons, nous permettra de mesurer la constante de Boltzmann « k_B », alors que le second, qui est dû à la nature discrète de la charge électronique, nous permettra de mesurer cette dernière.

Nous allons nous intéresser au bruit thermique.

Le Bruit Thermique

Dans le cadre de ce TP, la densité de bruit est indépendante de la fréquence, par conséquent, le bruit thermique est un bruit blanc, ce qui signifie que la densité spectrale de puissance est la même pour toutes les fréquences de la bande passante. Ce bruit contient toutes les fréquences en quantités égales, ce qui n'est valable qu'en dessous d'une certaine fréquence caractéristique.

Le bruit thermique a été étudié par Johnson et Nyquist, qui ont montré qu'en mesurant le courant aux bornes d'un conducteur avec une bande passante on peut trouver la

densité spectrale de bruit et ainsi la constante de Boltzmann.

Montage expérimental

Un système d'acquisition est mis en place dans le but de mesurer le bruit thermique d'une résistance. Pour cela, nous avons à notre disposition :

- Une carte d'acquisition qui se trouve dans le PC et qui assure la conversion des signaux analogiques (les tensions) en signaux numériques (les nombres).
- Un bornier qui permet de diriger les signaux analogiques sur la carte d'acquisition.
- Un amplificateur de tension bas bruit à gain variable que nous positionnerons aux bornes de la résistance à mesurer.
- Des résistances de 100 Ω à 47 k Ω enfermées dans des boîtes métalliques.

Nous sélectionnerons sur la carte d'acquisition les voies suivantes pendant tout le TP: High : 68 Low : 34 Gnd 67.

Expérimentation

a) Etude du Repliement de Bande ou « aliasing »

Nous branchons tout d'abord un Générateur de Basse Fréquence afin de générer un signal sinusoïdal directement sur la carte d'acquisition. La fréquence d'échantillonnage est réglée à 24000 Hz et la dynamique à ± 10 V. En faisant varier la fréquence du GBF de 2 kHz à 100 kHz nous observons des signaux qui contiennent des pics différents. Ces pics peuvent être

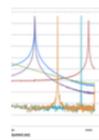
TP : mesure de bruit
Université Paris-Sud

éc. « Mesures et Détection » Raquel Lambert et Malarie Martin 11 février 2016

suivante : Pour les us de $F_{e1}/2 = 12$ kHz, lent à la fréquence quences au dessus de es les pics en utilisant iZ et en faisant la eux. Prenons quelques

pic à 10kHz.
sa multiple de 12 est 24
Hz
le de 12 est 48
Hz
pic de 12 est 96
kHz

si le graphe suivant s pour différentes



tillementage de Nyquist- en échantillonnage à la transmettre sans perte les fréquences ici nous avons une onnage qui est de 24 supérieures à 12 kHz

TP : mesure de bruit
Université Paris-Sud

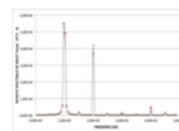
sont rendus comme des produits d'intermodulation entre la fréquence d'échantillonnage et ces fréquences. Ceci est appelé repliement de spectre ou « aliasing ».

b) Caractérisation préamplificateur

Le but de cette partie est de mesurer le gain de l'amplificateur à l'aide d'un générateur de signaux basses fréquences, en s'intéressant au spectre de fréquence moyenné par le nombre de mesures.

Nous configurons la fréquence d'échantillonnage à 5 kHz ainsi que la dynamique à ± 0.2 V afin d'observer des raies sur le spectre du signal, qui correspondent au bruit des mesures effectuées ; nous observons des pics tous les 50 Hz. Afin de s'en affranchir nous modifions le nombre de mesures ou la fréquence d'échantillonnage et observons le spectre.

Le spectre pour une fréquence de 5 kHz et pour différentes mesures est le suivant.



Nous observons que les principaux pics se trouvent à des fréquences de 100 et 200 Hz et ont des amplitudes respectives de $5.5 \cdot 10^{-4}$ et $4.2 \cdot 10^{-4}$ V/s. Ces pics sont les

Oral

L'ensemble doit tenir sur 4 ou 5 diapos

Résultats expérimentaux
Conclusion

TP Capteur Thermocouple TP1

L. Ranc Q. Bourgignon D'Herbigny

Présentation orale, 15/03/16

L. Ranc, Q. Bourgignon D'Herbigny TP Capteur

L. Ranc, Q. Bourgignon D'Herbigny TP Capteur

Expériences
Résultats

Graphiques suivants :

L. Ranc, Q. Bourgignon D'Herbigny TP Capteur

Tout compte-rendu doit faire figurer 4 paragraphes (introduction, matériel et méthodes, résultats et discussion/conclusion/interprétations) ainsi que 5 figures.

Bibliographie

Livres

*Gérard Couturier – cours – **bruit en électronique***

*Acquisition de données : Du capteur à l'ordinateur Georges Asch,
E. Chambérod, Patrick Renard, Gunther 528 pages - 2003 - 2e
édition – Dunod*

Sur internet

Pierre Bonnet – cours Master GSI – capteurs et chaîne de
mesure

Notion de mesure définitions

- Définition:

Une grandeur est **mesurable** si on définit l'**égalité**, la **somme** et le **rapport** entre deux valeurs de cette grandeur.

- Exemple:

La température exprimée en Kelvin est une grandeur **mesurable**, correspondant à un niveau d'énergie: l'entropie S varie comme sa température en Kelvin: @ 600 K elle est deux fois plus qu'@ 300 K

La température exprimée en Celsius est une grandeur **repérable**: on sait définir l'égalité, comparer, mais le rapport n'a pas de sens: @ 40°C il ne fait pas deux fois plus chaud qu'@ 20°C

Notion de mesure

types de grandeurs mesurables

- Scalaires : nombre (valeur) + unité

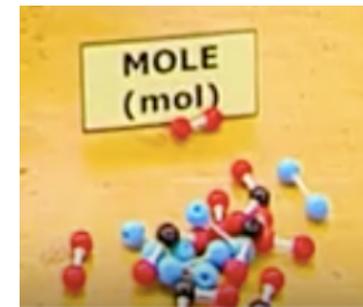
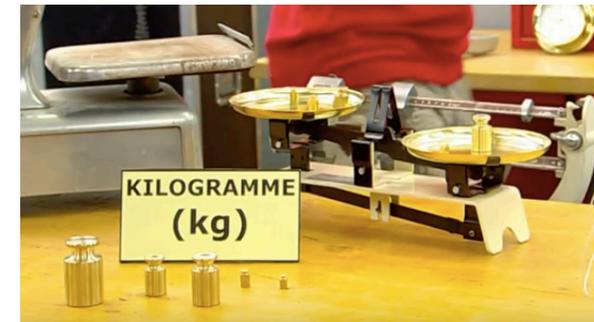
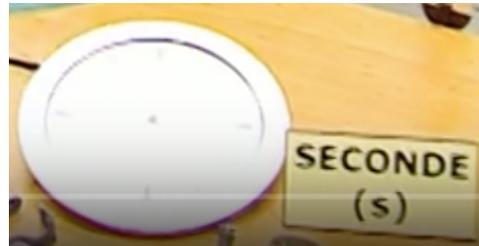
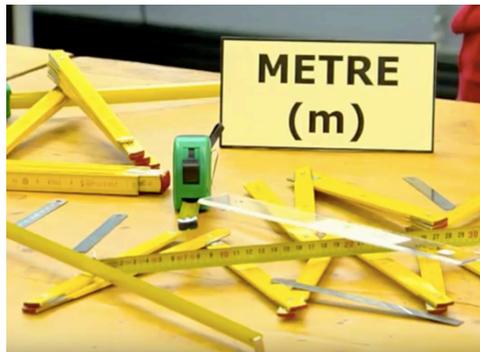
Longueur, température, surface, volume, masse, durée, puissance, travail...

- Vectorielles : nombre (valeur) + unité + direction + sens

[composanteX composanteY ...]+ unité

Position, vitesse, quantité de mouvement, poids, force....

Notion de mesure unités du Système International



C'est pas sorcier

Notion de mesure S.I

Nom/Symbole	définition
Mètre/m	longueur égale à 1 650 763,73 longueurs d'onde, dans le vide, du rayonnement correspondant à la transition entre les niveaux 2p10 et 5d5 de l'atome de krypton-86.
Kilogramme/ kg	unité de masse ; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme.
Seconde/s	durée de 9 192 631 770 périodes du rayonnement correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium-133.
Ampère/A	Courant électrique constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à 2×10^{-7} newton par mètre de longueur.

Notion de mesure S.I

Nom/ Symbole	définition
Kelvin/K	unité de température thermodynamique, c'est la fraction $1 / 273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau. le point triple de l'eau est la température d'équilibre ($0,01$ °C ; $273,16$ K) entre la glace pure, l'eau exempte d'air et la vapeur d'eau.
Mole/mol	quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans $0,012$ kilogramme de carbone-12.
Candela/cd	La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence $540 \cdot 10^{12}$ hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est $1/683$ watt par stéradian.

GUIDE TO CONVERTING TO METRIC

xkcd.com

TEMPERATURE

60°C	EARTH'S HOTTEST
45°C	DUBAI HEAT WAVE
40°C	SOUTHERN US HEAT WAVE
35°C	NORTHERN US HEAT WAVE
30°C	BEACH WEATHER
25°C	WARM ROOM
20°C	ROOM TEMPERATURE
10°C	JACKET WEATHER
0°C	SNOW!
-5°C	COLD DAY (BOSTON)
-10°C	COLD DAY (MOSCOW)
-20°C	FUCKFUCKFUCKCOLD
-30°C	FUUUUUUUUUCK!
-40°C	SPIT GOES "CLINK"



THE KEY TO CONVERTING TO METRIC IS ESTABLISHING NEW REFERENCE POINTS. WHEN YOU HEAR "26°C," INSTEAD OF THINKING "THAT'S 79°F" YOU SHOULD THINK, "THAT'S WARMER THAN A HOUSE BUT COOL FOR SWIMMING." HERE ARE SOME HELPFUL TABLES OF REFERENCE POINTS:

LENGTH

1 cm	WIDTH OF MICROSD CARD
3 cm	LENGTH OF SD CARD
12 cm	CD DIAMETER
14 cm	PENIS
15 cm	BIC PEN
80 cm	DOORWAY WIDTH
1 m	LIGHTSABER BLADE
170 cm	SUMMER GLAU
200 cm	DARTH VADER
2.5m	CEILING
5m	CAR-LENGTH
16m 4cm	HUMAN TOWER OF SERENITY CREW



SPEED

kph	m/s	
5	1.5	WALKING
13	3.5	JOGGING
25	7	SPRINTING
35	10	FASTEST HUMAN
45	13	HOUSECAT
55	15	RABBIT
75	20	RAPTOR
100	25	SLOW HIGHWAY
110	30	INTERSTATE (65 MPH)
120	35	SPEED YOU ACTUALLY GO WHEN IT SAYS "65"
140	40	RAPTOR ON HOVERBOARD

Measure et détection - Introduction

VOLUME

3 mL	BLOOD IN A FIELD MOUSE	
5 mL	TEASPOON	
30 mL	NASAL PASSAGES	SO, WHEN IT'S BLOCKED, THE MUCUS IN YOUR NOSE COULD ABOUT FILL A SHOT GLASS.
40 mL	SHOT GLASS	
350 mL	SODA CAN	
500 mL	WATER BOTTLE	
3 L	TWO-LITER BOTTLE	RELATED: I'VE INVENTED THE WORST MIXED DRINK EVER.
5 L	BLOOD IN HUMAN MALE	
30 L	MILK CRATE	
55 L	SUMMER GLAU	
65 L	DENNIS KUCINICH	
75 L	RON PAUL	
200 L	FRIDGE	

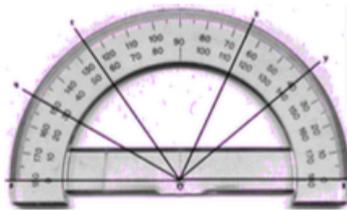


MASS

3g	PEANUT M&M
100g	CELL PHONE
500g	BOTTLED WATER
1 kg	ULTRAPORTABLE LAPTOP
2 kg	LIGHT-MEDIUM LAPTOP
3 kg	HEAVY LAPTOP
5 kg	LCD MONITOR
15 kg	CRT MONITOR
4 kg	CAT
4.1 kg	CAT (WITH CAPTION)
60 kg	LADY
70 kg	DUDE
150 kg	SHAQ
200 kg	YOUR MOM
220 kg	YOUR MOM (INCL. CHEAP JEWELRY)
223 kg	YOUR MOM (ALSO INCL. MAKEUP)



Notion de mesure unités dérivées



radian



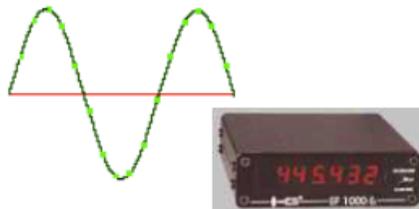
newton



joule



watt



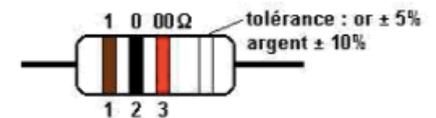
hertz



coulomb



volt



ohm

Notion de mesure S.I

Nom/ Symbole	définition
Newton/N	force qui communique à un corps ayant une masse d'un kilogramme, l'accélération d'un mètre par seconde par seconde.
Radian/rad	<p>mesure d'angle plan compris entre deux rayons qui, sur la rad circonférence d'un cercle, interceptent un arc de longueur égale à celle du rayon.</p> <p>Le watt est la puissance qui donne lieu à une production d'énergie égale à W un joule en une durée de une seconde.</p>
Joule/J	travail effectué lorsque le point d'application d'une force d'un newton se déplace d'une distance égale à un mètre dans la direction de la force.

Grandeur mesurable - temps

- Jours : décompte des heures
- Fractionnement : 12 h du lever au coucher
- Inconvénient et précaution:
 - orientation
 - Ne fonctionne qu'en plein air
 - Ne fonctionne que le jour
 - Le ciel doit être dégagé...



Précision de mesure

Les erreurs de mesures

- Seuls les étalons primaires sont parfaitement connus
 - Par définition même
- Toute opération de mesure introduit des erreurs
 - Il existe une incertitude qui doit être minimisée
- Il existe plusieurs types d'erreurs
 - Erreurs systématiques, accidentelles, aléatoires
- L'action à entreprendre dépend de la nature de l'erreur

Précision de mesure

Les erreurs de mesures

Incertitude: mesurer une grandeur c'est la comparer à une autre grandeur du même type prise pour référence

Ex: une longueur est mesurée avec une règle graduée en mm

$l_{\text{mes}} = 297 \pm 1$ mm incertitude absolue

$\Delta l_{\text{mesurée}} / l_{\text{mes}} = 3\%$ incertitude relative

Précision de mesure

Les erreurs de mesures

Ex: une résistance $R=5.1\pm 0.1 \Omega$ est traversée pendant un temps de 60 ± 0.1 s par un courant continu $i=2.2\pm 0.1$ A.

Quelle est l'énergie thermique dépensée dans cette résistance?

On rappelle que $W=P.t$. Donner son incertitude absolue?

Précision de mesure

Les erreurs de mesures

Ex: une résistance $R=5.1\pm 0.1 \Omega$ est traversée pendant un temps de 60 ± 0.1 s par un courant continu $i=2.2\pm 0.1$ A.

Quelle est l'énergie thermique dépensée dans cette résistance?

On rappelle que $W=P.t$. Donner son incertitude absolue?

$$W=Pt=1,5 \cdot 10^3 \text{ J}$$

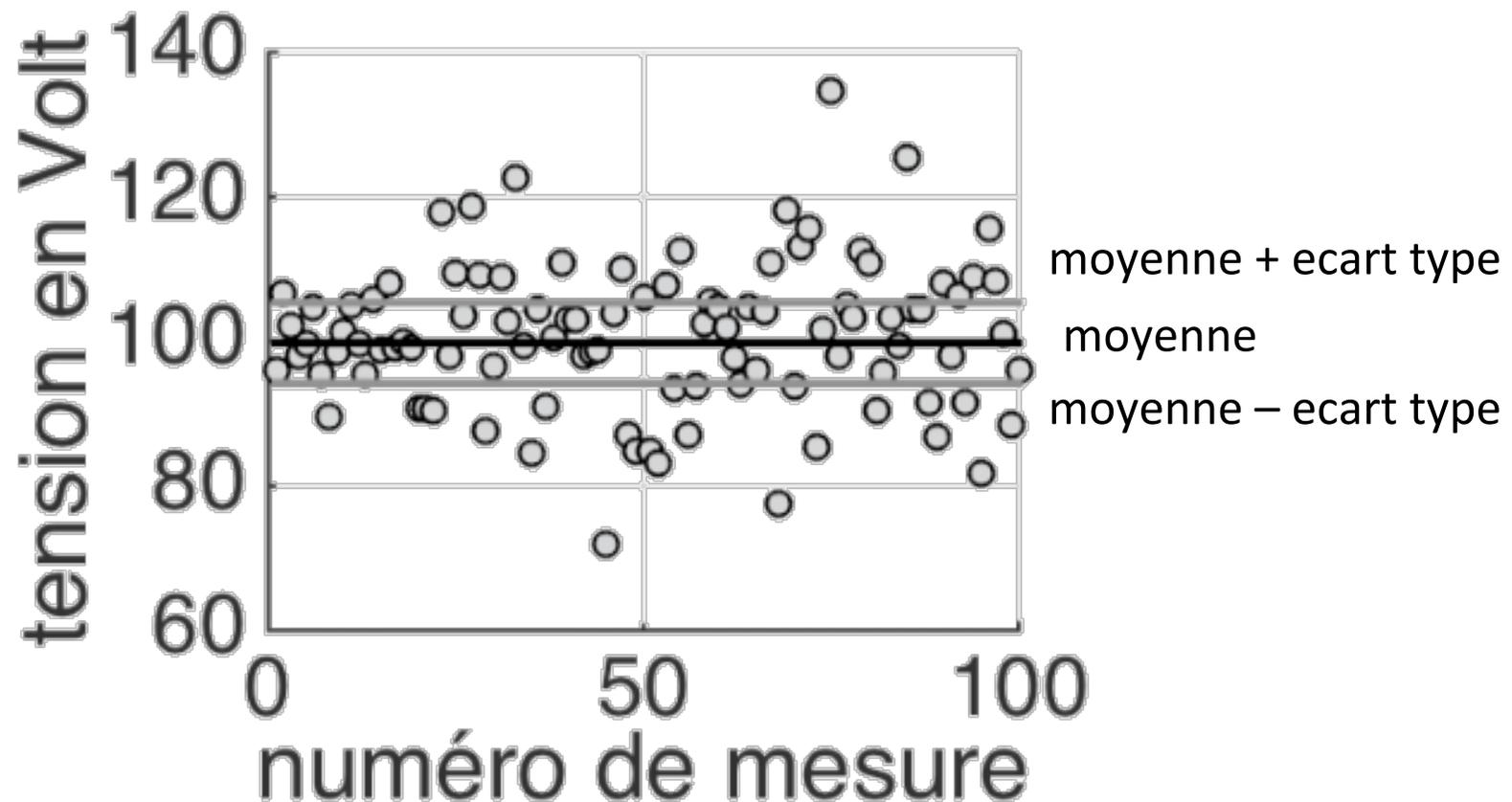
$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{\Delta R}{R} + 2\frac{\Delta i}{i} + \frac{\Delta t}{t} = \frac{\Delta R}{R} + 2\frac{\Delta i}{i} + \frac{\Delta t}{t}$$

$$\Delta W = W\left(\frac{\Delta R}{R} + 2\frac{\Delta i}{i} + \frac{\Delta t}{t}\right) = 182 \text{ J}$$

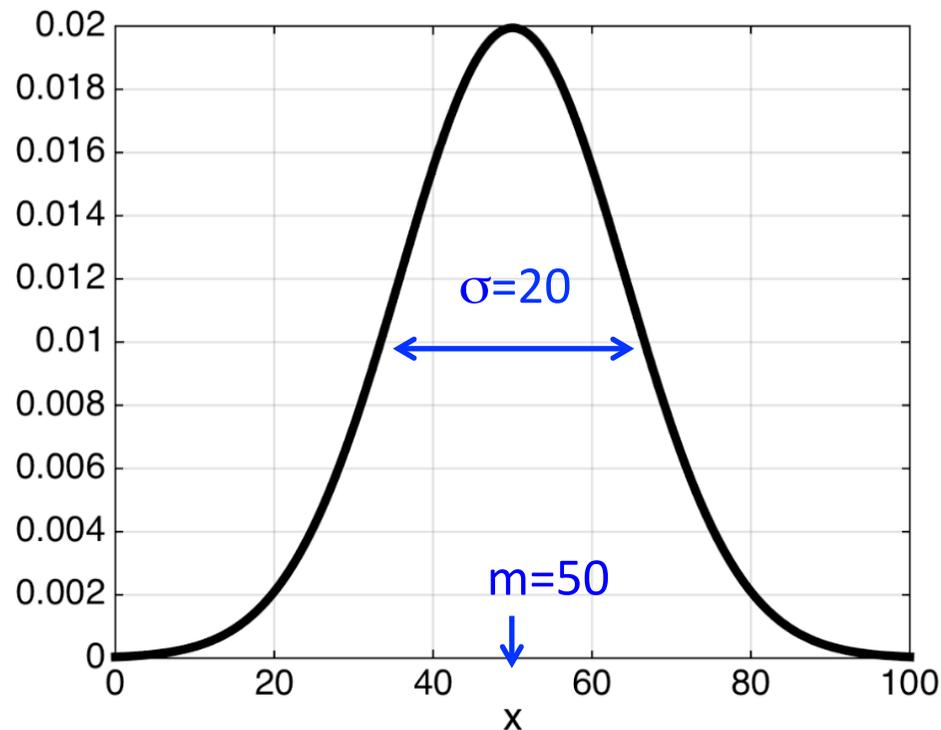
$$\text{D'où } W = (1,5 \pm 0,2) \cdot 10^3 \text{ J}$$

Erreurs aléatoires

Variable aléatoire - variable dont on ne peut pas savoir la valeur avant l'expérience.



Distribution gaussienne



$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}$$

m moment d'ordre 1 – moyenne de x

$$m = \frac{1}{n} \sum x_i$$

σ^2 moment d'ordre 2 – variance de x

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - m)^2}$$

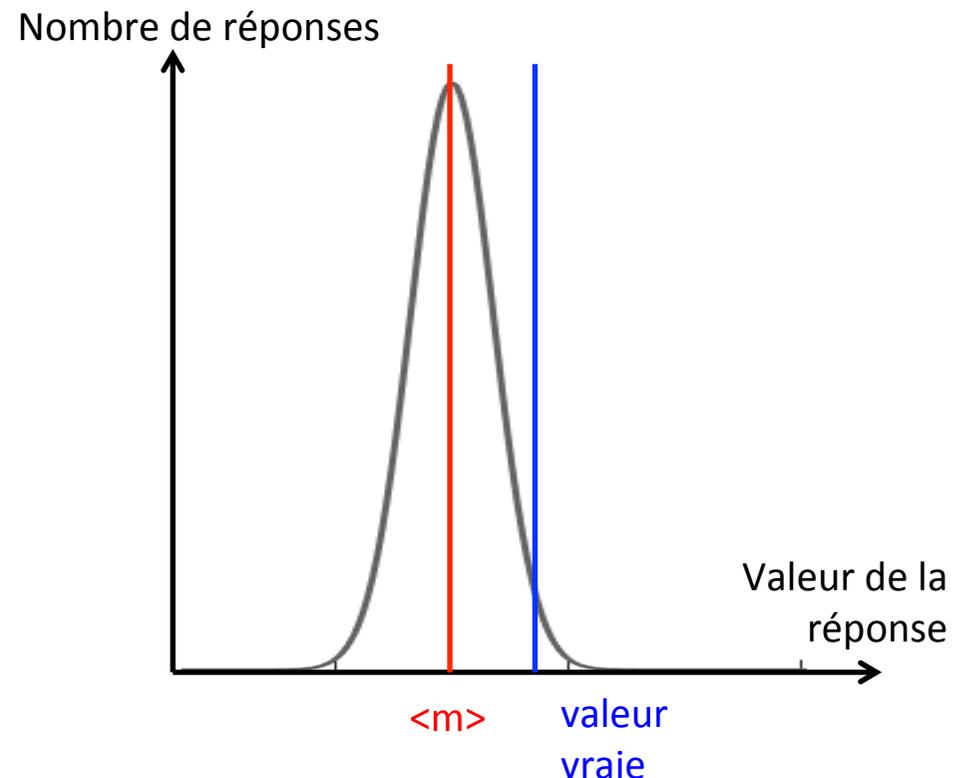
Erreurs aléatoires

Fidélité de mesure

La fidélité d'un appareil de mesure est caractérisée par la largeur du « pic » des occurrences : c'est la qualité d'un capteur qui compose un grand nombre de mesures proche de la valeur moyenne.

Un capteur est **fidèle** si l'**écart-type** sur les réponses à une même valeur du mesurande est **faible**

Histogramme de la valeur mesurée

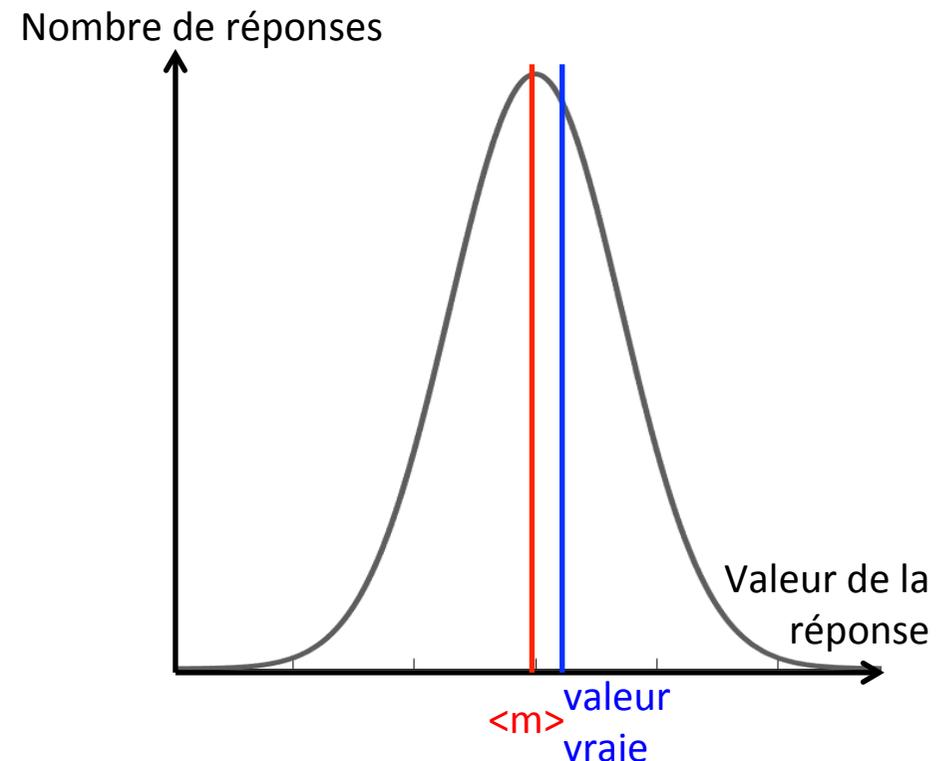


Erreurs aléatoires

Justesse de mesure

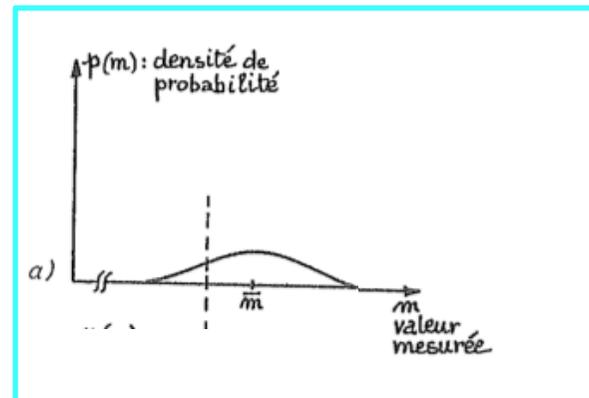
La justesse caractérise un capteur pour lequel les résultats statistiques sont proches de la valeur vraie: un capteur est juste si $\langle m \rangle$ est confondu avec la valeur vraie

Histogramme de la valeur mesurée



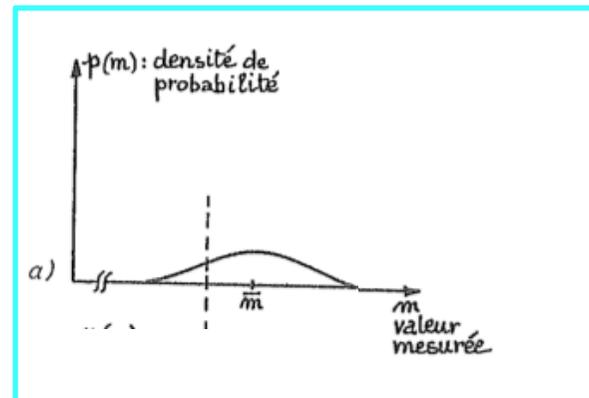
Précision de mesure

Erreurs systématiques et accidentelles
importantes: capteur ni juste ni fidèle



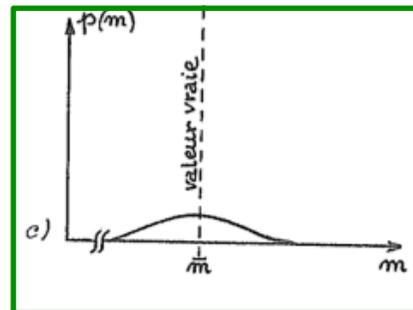
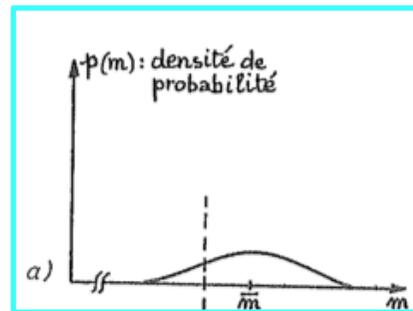
Précision de mesure

Erreurs systématiques et accidentelles
importantes: capteur ni juste ni fidèle



Précision de mesure

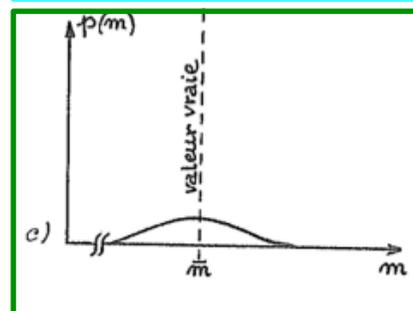
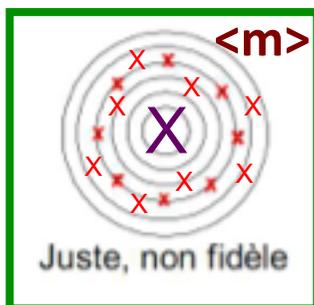
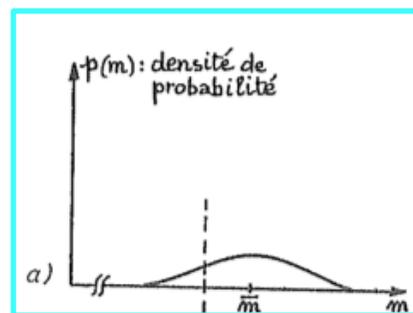
Erreurs systématiques et accidentelles importantes: capteur ni juste ni fidèle



Erreurs systématiques faibles et accidentelles importantes : capteur juste mais non fidèle

Précision de mesure

Erreurs systématiques et accidentelles importantes: capteur ni juste ni fidèle

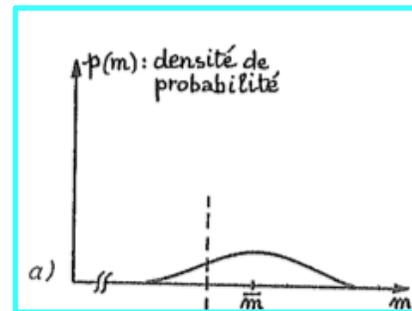


Erreurs systématiques faibles et accidentelles importantes : capteur juste mais non fidèle

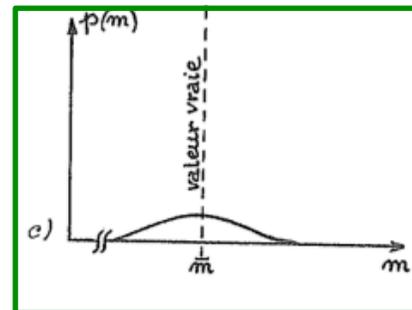
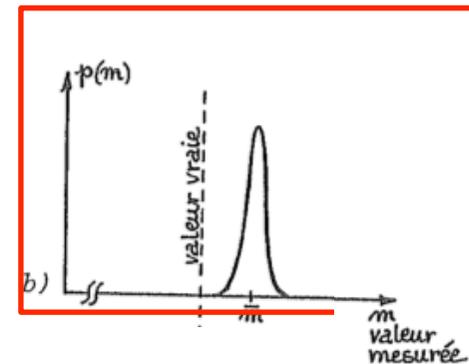
Précision de mesure

Contraintes imposées à la chaîne d'acquisition :

Erreurs systématiques et accidentelles importantes: capteur ni juste ni fidèle



Erreurs systématiques importantes et accidentelles réduites: capteur fidèle mais non juste

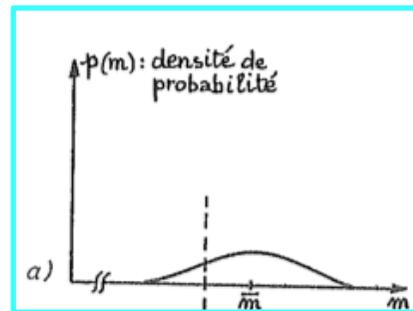


Erreurs systématiques faibles et accidentelles importantes : capteur juste mais non fidèle

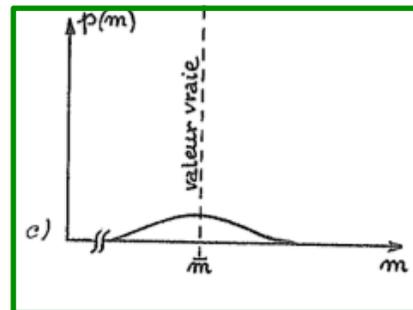
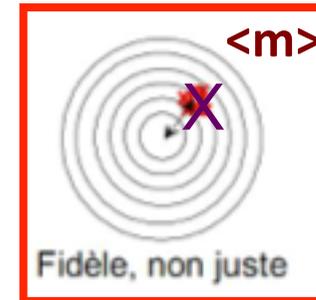
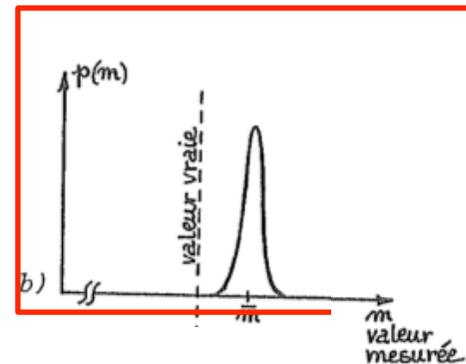
Précision de mesure

Contraintes imposées à la chaîne d'acquisition :

Erreurs systématiques et accidentelles importantes: capteur ni juste ni fidèle



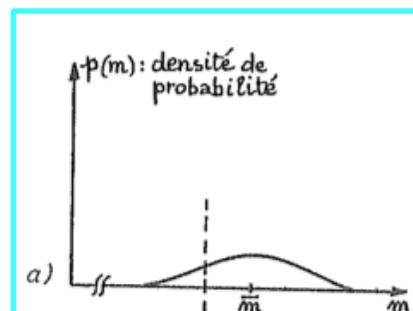
Erreurs systématiques importantes et accidentelles réduites: capteur fidèle mais non juste



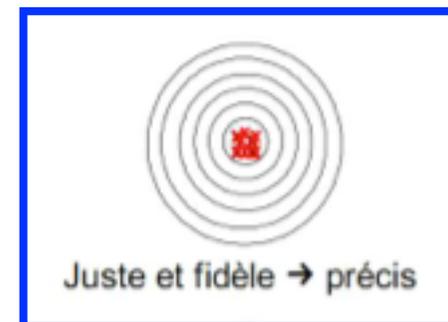
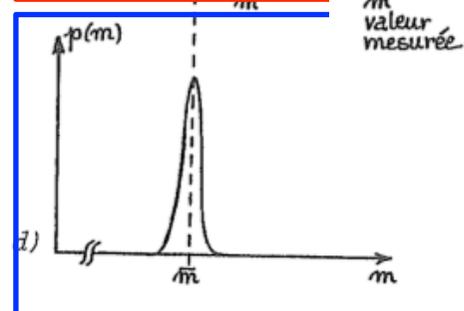
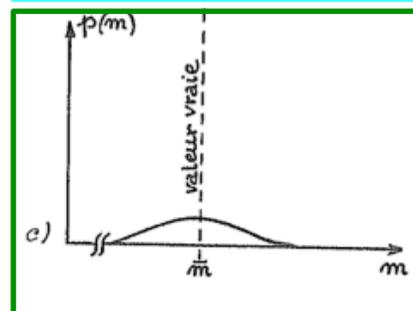
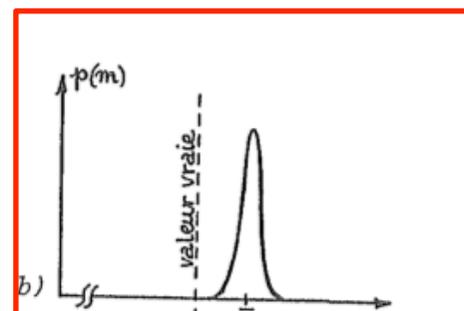
Erreurs systématiques faibles et accidentelles importantes : capteur juste mais non fidèle

Précision de mesure

Erreurs systématiques et accidentelles importantes: capteur ni juste ni fidèle



Erreurs systématiques importantes et accidentelles réduites: capteur fidèle mais non juste

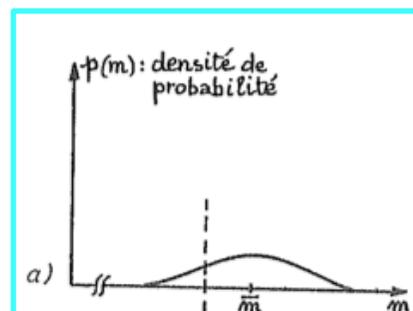


Erreurs systématiques faibles et accidentelles importantes : capteur juste mais non fidèle

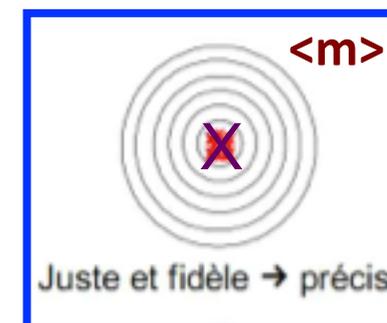
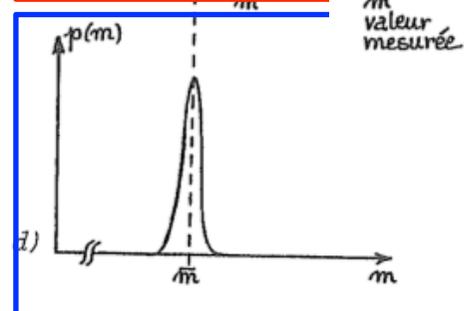
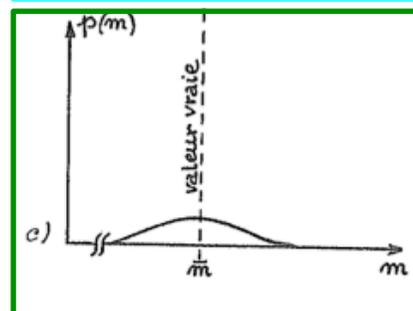
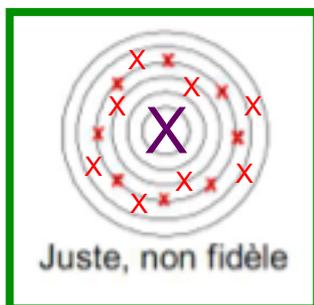
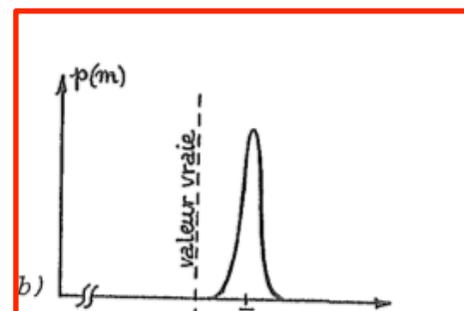
Erreurs systématiques et accidentelles faibles : capteur juste et fidèle

Précision de mesure

Erreurs systématiques et accidentelles importantes: capteur ni juste ni fidèle



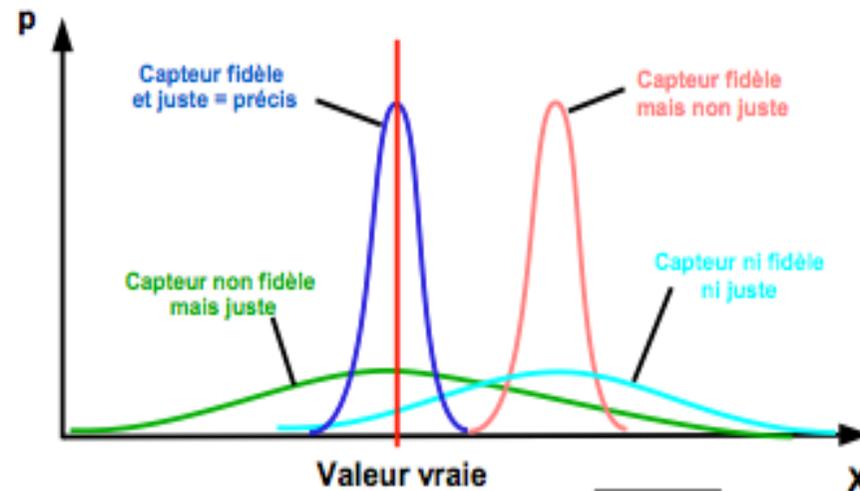
Erreurs systématiques importantes et accidentelles réduites: capteur fidèle mais non juste



Erreurs systématiques faibles et accidentelles importantes : capteur juste mais non fidèle

Erreurs systématiques et accidentelles faibles : capteur juste et fidèle

Caractérisation d'une chaîne d'acquisition précision

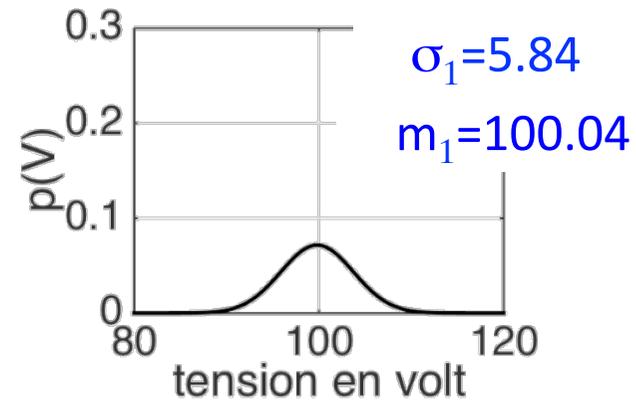
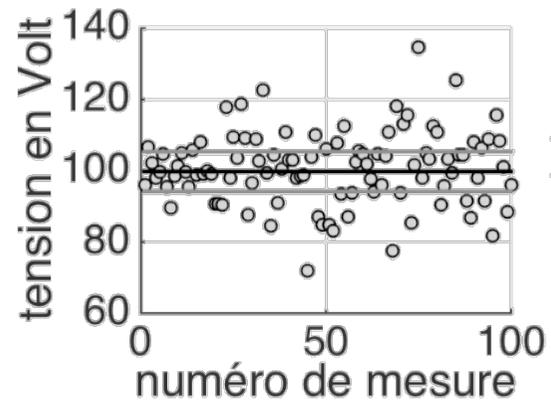


Evaluation de la précision : $P = \sqrt{J^2 + F^2}$
avec J erreur de justesse
et F erreur de fidélité

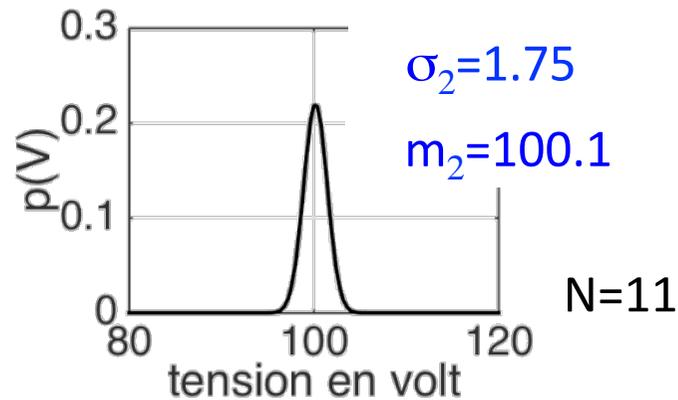
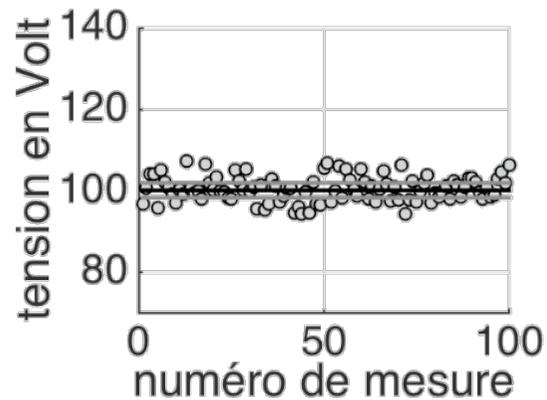
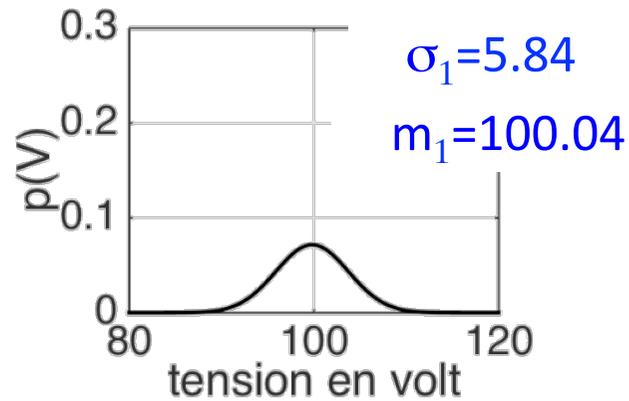
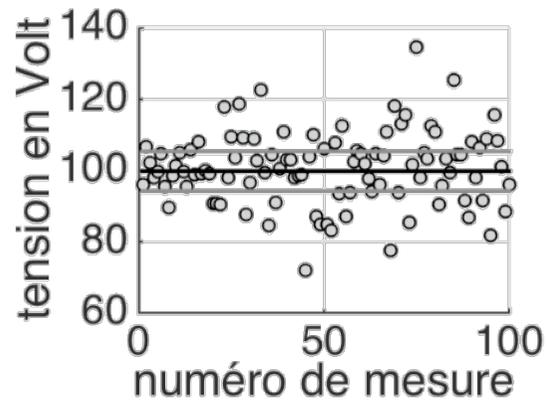


La précision caractérise un capteur à la fois juste et fidèle

Effet du moyennage



Effet du moyennage



N moyennage ou N accumulations

Signal - $m_1=m_2$

Bruit - $\sigma_1=\sigma_2/\sqrt{N}$

Précision de mesure

Les erreurs systématiques

- Erreurs due à l'environnement ou à la dérive de l'appareil
 - Elles sont reproductibles donc potentiellement corrigeables
- Il faut les éliminer ou les minimiser
 - Mesures d'objets connus (étalons secondaires)
 - Utilisation d'un appareil de référence
 - Attention à la plage de mesure et aux échelles de mesures
- La qualité de la mesure dépend
 - De la qualité des étalons ou de l'appareil de référence
 - mais aussi de la bonne correction des erreurs

l'infidélité interdit la précision

Mais la fidélité ne la garantit pas

Précision de mesure

Les erreurs accidentelles

- L'expérimentateur est généralement responsable
 - Mauvaise condition d'utilisation
 - Protection contre les perturbateurs (y compris humain)
 - Mauvais contrôle de l'environnement
 - Perturbation par l'appareil de mesure

- Il faut les éliminer ou les minimiser
 - Mesures différentielles, filtrage, ...

C'est une cause d'infidélité sans préavis !

Précision de mesure

Les erreurs aléatoire

- La correction dépend de la statistique
 - Statistique aléatoire : le moyennage améliore
 - N^2 mesures donne un gain de N
 - Valeur aberrante : il faut l'éliminer et trouver la source
- Principales sources aléatoires
 - Bruit des composants : thermique, grenaille,...
 - Fluctuations des alimentations, ...

Compromis temps précision

Notion de mesure – signal

Un signal est le support physique d'une certaine information :

- ondes sonores,
- rayonnement électro-magnétique
- Courant électrique,.

Le résultat d'une mesure est un signal.

Un signal est émis par un système physique, généralement en évolution :

- temporelle : parole, ...
- spatiale : image, ...
- spectrale : raie dans un spectre, – ...

Notion de mesure – bruit

Un signal est pratiquement toujours entaché d'un bruit.

- Ce bruit peut être intrinsèque au signal.
 - Par exemple le bruit de photons dû à la nature quantique du rayonnement électro-magnétique.
- Le bruit peut aussi se « rajouter » au signal émis.
 - Dans une salle de cours, le signal est la parole du professeur, le bruit le bavardage des étudiants.
 - la notion de signal et bruit est relative (pour deux étudiants qui parlent entre eux, qu'est-ce que le signal ?).

Un signal transporte une information utile
un bruit une information inutile.

Notion de mesure bruit et effets systématiques

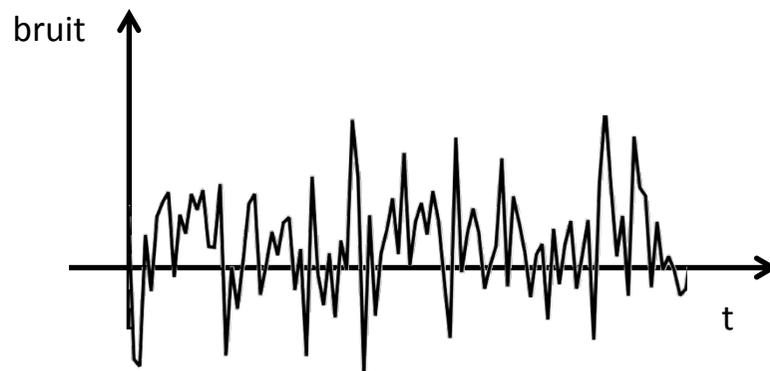
l'objet mesuré n'est pas nul, la mesure est répétée N fois de façon rigoureusement identique.

Les N mesures ne sont pas toutes égales.

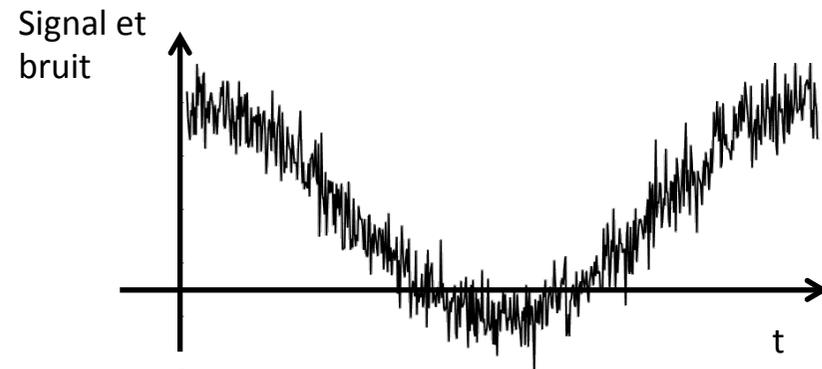
Elles fluctuent autour d'une certaine valeur « **moyenne** ». **Par définition, ces fluctuations correspondent au bruit.**

Notion de mesure – bruit et signaux parasites

Signal temporel aléatoire à valeur moyenne nulle, ses valeurs sont à répartition gaussienne.



Allure du bruit (U ou I)



Signal avec bruit

Il ne doit pas être confondu avec les parasites ou interférences qui sont des « bruits » externes.

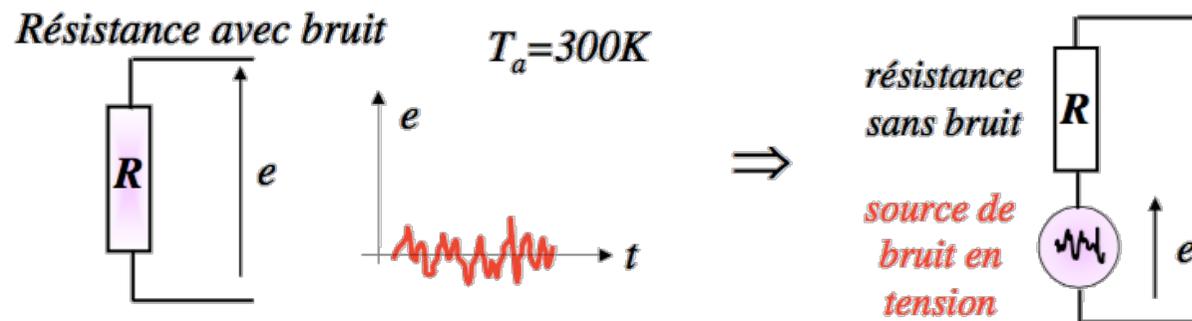
Notion de mesure - bruit

Le bruit peut être dû :

- au système de mesure (bruit thermique, bruit de lecture, bruit de transmission, bruit de quantification, bruit "en $1/f$ ", ...)
- et/ou à l'objet observé (nature fluctuante de celui-ci, bruit de photons),
- et/ou aux fluctuations des signaux parasites qui se superposent aux mesures.

Origine du bruit – thermique (bruit Johnson)

A la température ambiante ($T_a=300K$), les atomes vibrent autour de leurs positions d'équilibre. La vibration des atomes entraîne une fluctuation spatiale de la densité électronique générant ainsi une fluctuation de tension.
Dans la limite $T_a \rightarrow 0$ les atomes sont immobiles.



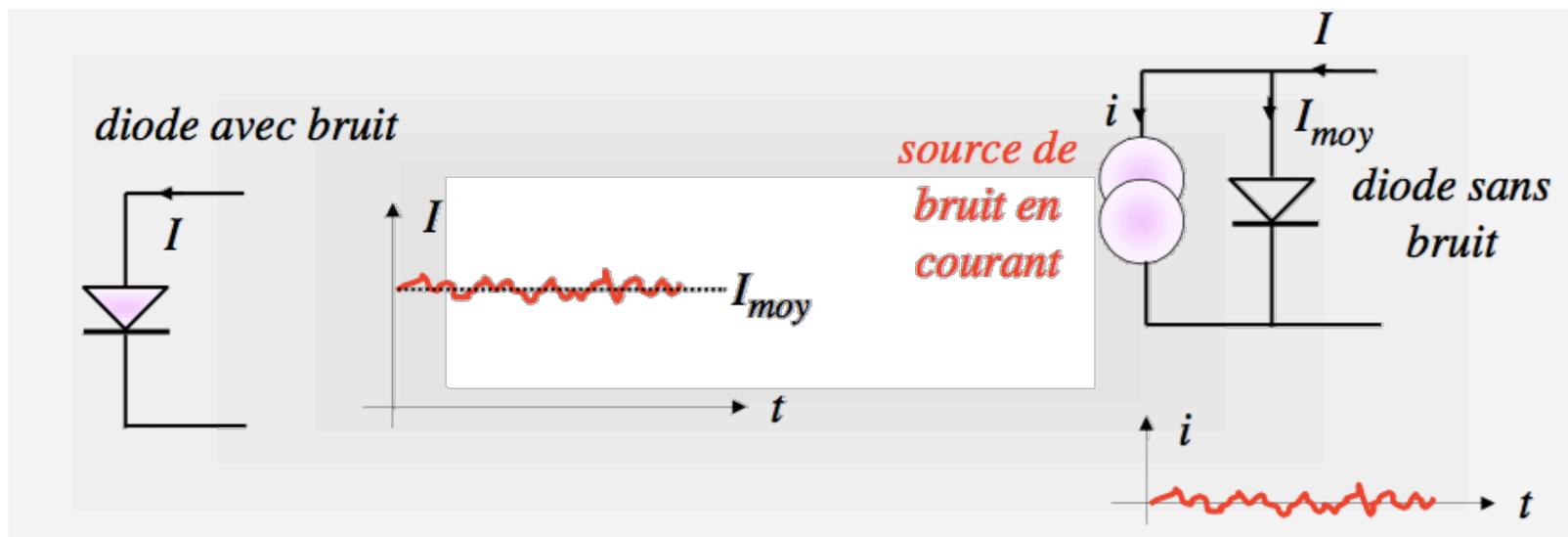
Remarque : → les inductances et capacités ne présentent pas de bruit thermique

Origine du bruit – grenaille

Bruit de (Schottky ou shot noise)

Le bruit de grenaille est dû à la fluctuation dans le temps du flux de porteurs passant d'un coté à l'autre d'une jonction ($I=dQ/dt$).

Le courant est à l'image du peloton du tour de France : le nombre de coureurs passant, par seconde, devant un observateur immobile fluctue dans le temps.



Origine du bruit – scintillation

Bruit de scintillation, bruit en $1/f$

Il provient des défauts/impuretés dans le réseau cristallin du matériau. Ces pièges dans le matériau vont libérer/capter de manière aléatoire les porteurs de charge avec des constantes de temps très élevées.

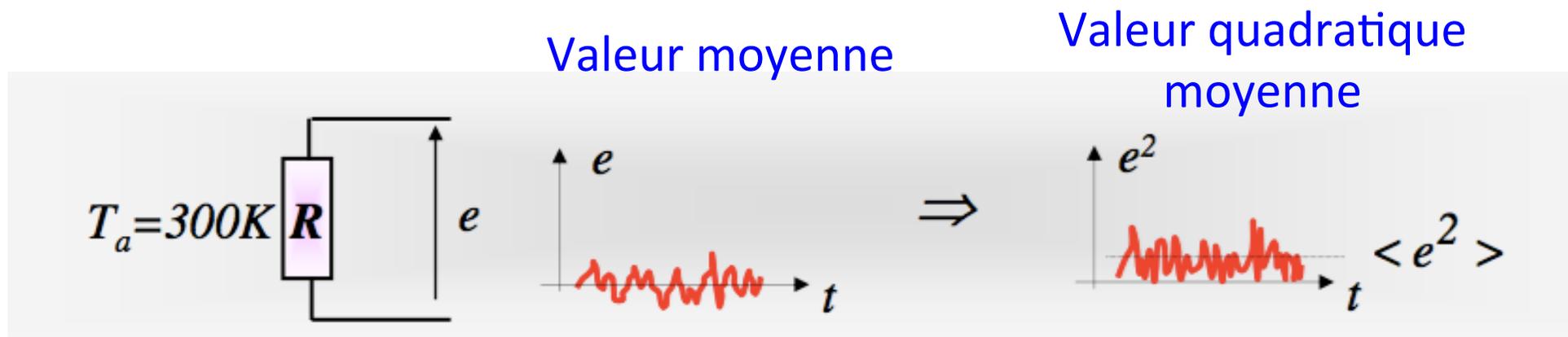
On le trouve dans :

- structures semi-conductrices (transistors, diodes, etc)
 - résistances à couche de carbone (si $I=0$, il ne reste que le bruit thermique)
- + faible dans les transistors PNP/canal P que les NPN/canal N
-

Bruit dans les systèmes électroniques

La présence de bruit de fond dans les systèmes électroniques est lié à la nature des composants.

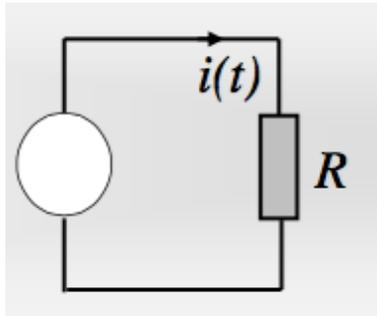
Il est **inévitabile** et fixe la limite basse de la résolution



$$\langle e \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T e(t) dt = 0$$

$$\langle e^2 \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T e^2(t) dt$$

Rappel

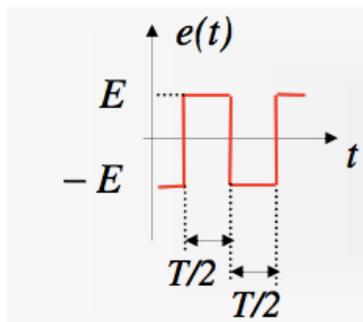
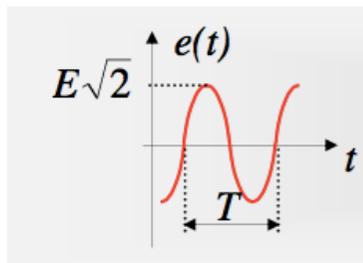
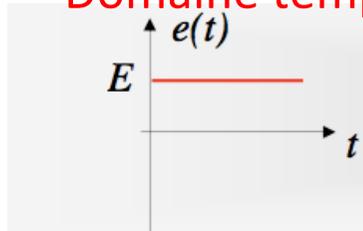


Les 3 sources ont même valeur efficace car elles produisent la même puissance dans la charge R.

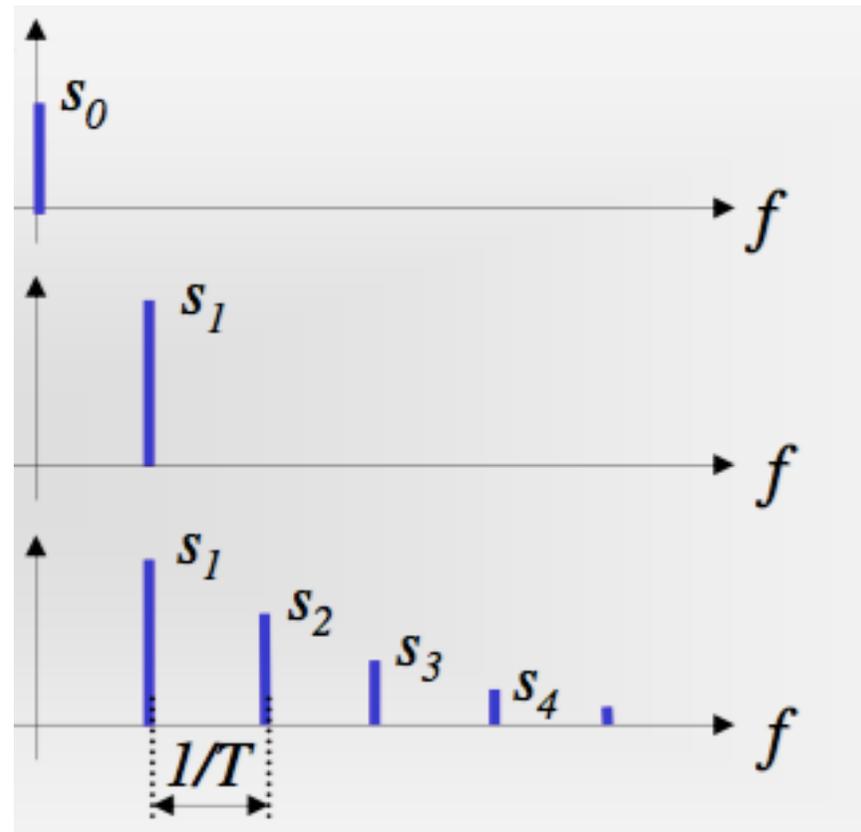
	Puissance moyenne dissipée dans R	$\langle e^2 \rangle$
	E^2/R	E^2
	E^2/R	E^2
	E^2/R	E^2

Rappel

Domaine temporel

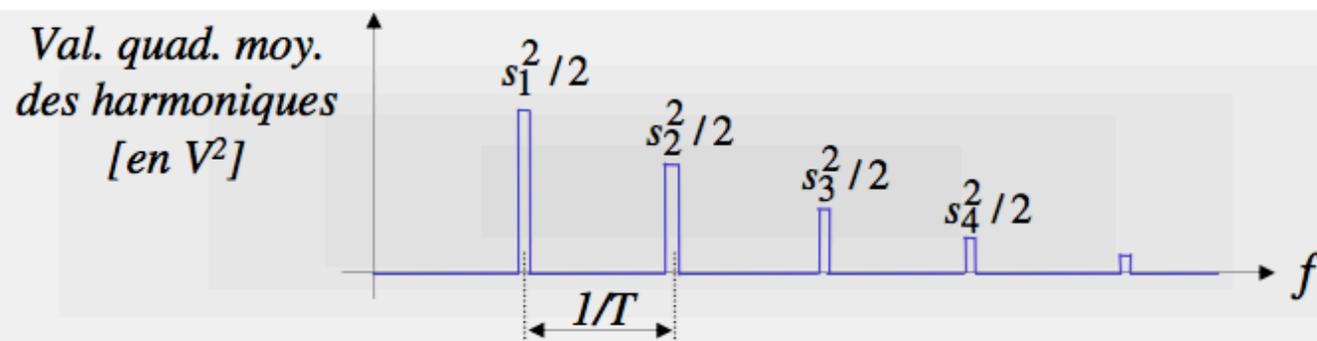
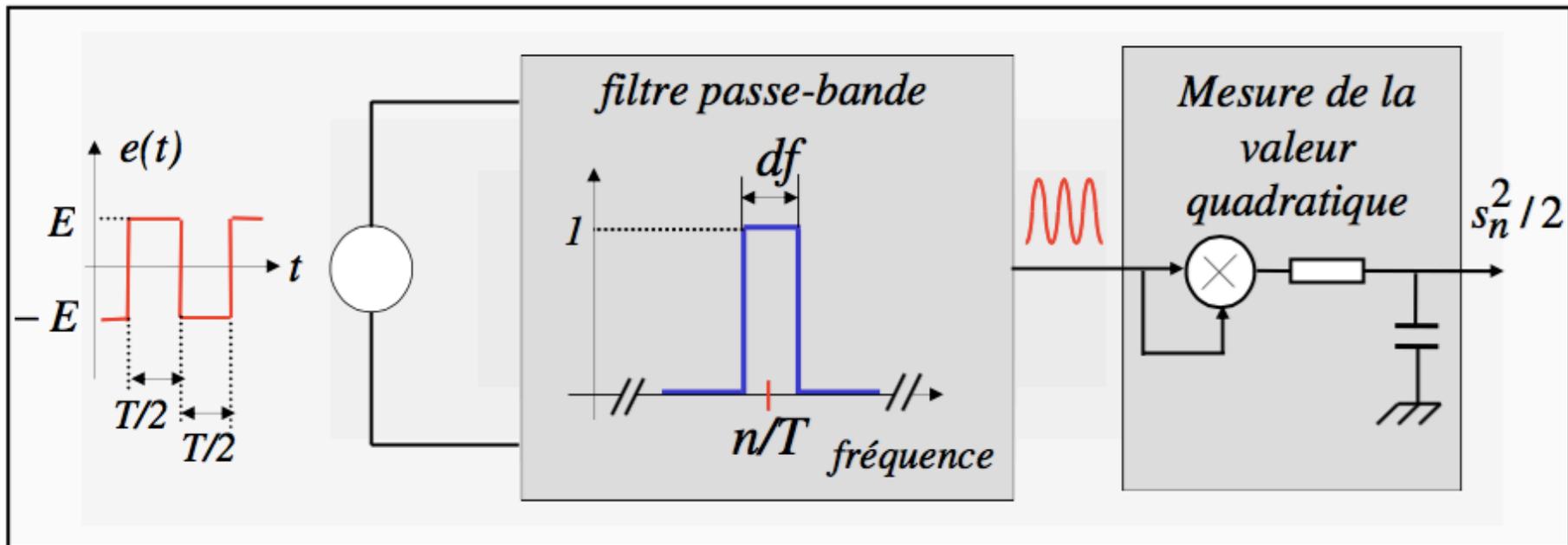


Domaine fréquentiel

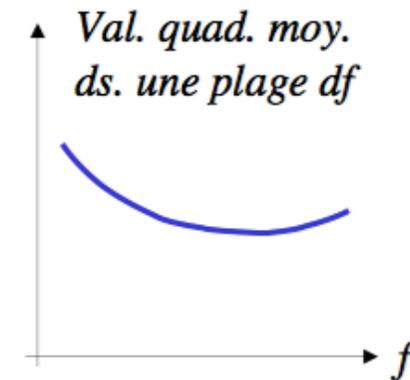
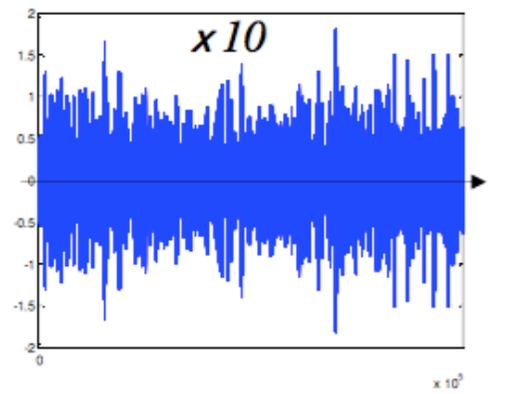
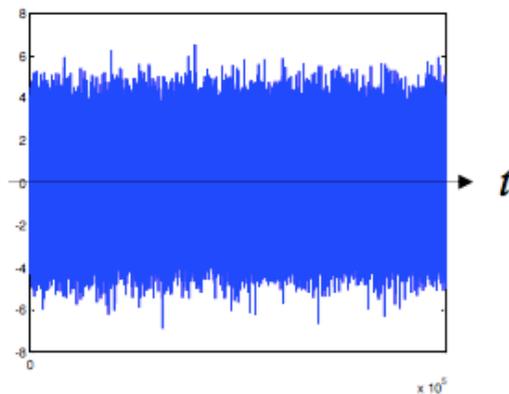
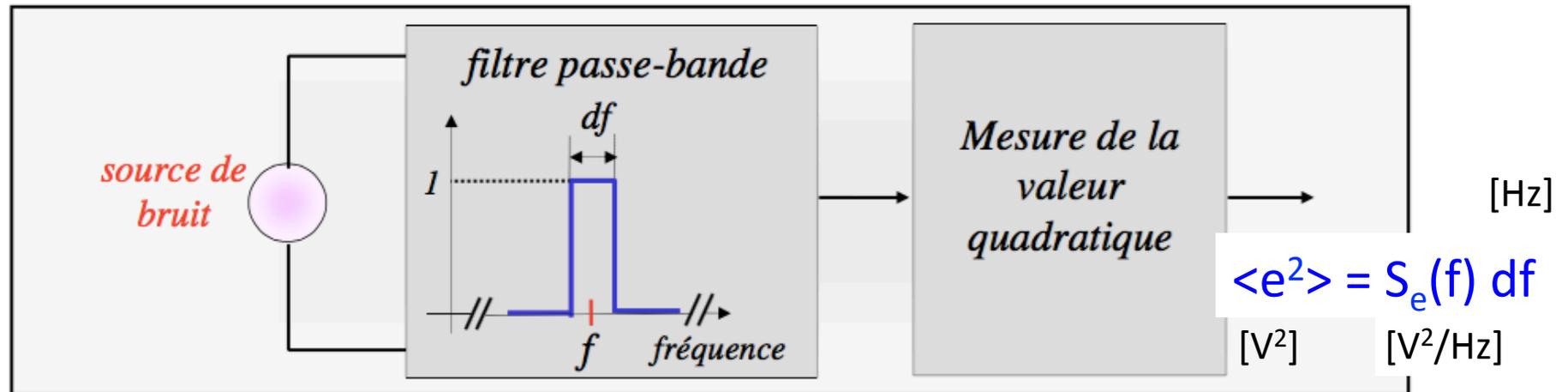


$$\langle e^2 \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T e^2(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\sum_0^{\infty} s_n \cos(n\omega t - \varphi_n) \right)^2 dt = \sum_0^{\infty} \frac{s_n^2}{2}$$

Rappel

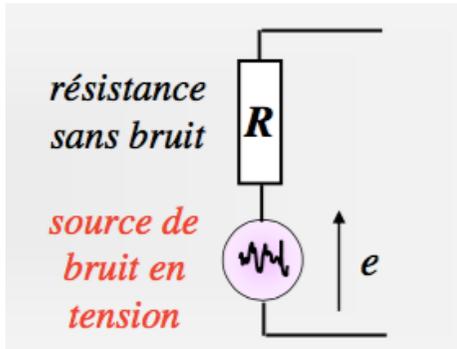


Densités spectrales



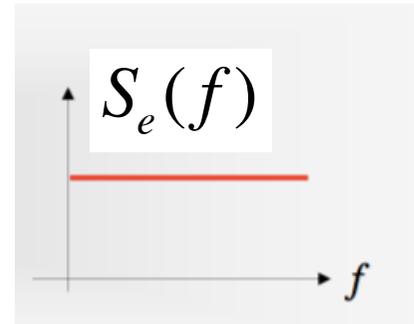
$S_e(f)$ - densité spectrale d'une source de bruit est donc la valeur quadratique moyenne de bruit par unité de fréquence

Densités spectrales

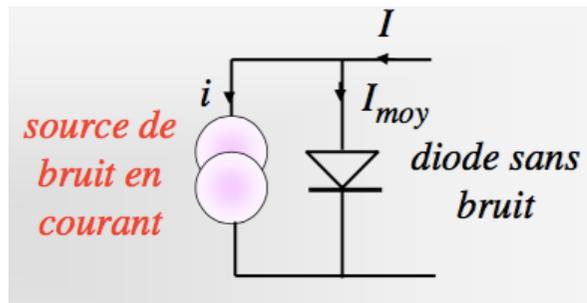


$$S_e(f) = 4k_B T R$$

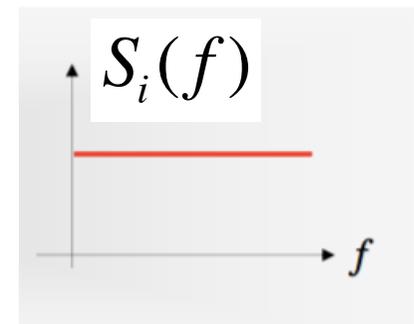
$k = 1,38 \times 10^{-23}$
 T : Température (°K)



Densité spectrale de bruit indépendante de la fréquence → bruit blanc



$$S_i(f) = 2 \cdot q \cdot I$$



Bruit de scintillation, bruit en $1/f$

$$S_s = \frac{K_c}{f}$$

K_c : Constante dépend du type de résistance

Bruit « rose » à prendre en compte dans les basses fréquences