

Ecole IN2P3: Electronique pour la physique

Référence **CENSEA17100052-01**

Présenté le : 1/04/2019



Indice	Evolution	Date
00	Création	15/09/2018
01	Modification pour l'école des technique de base des deteceturs	01/04/2019

Action	Nom	Fonction/Entité	Date	Visa
Rédigé par	F. Druillole	Responsable CENBG/SEA	14/09/2018	
Vérifié par				
Vérifié par				
Approuvé par				
Approuvé par				

Documents de référence Projet

Document	Référence	Emetteur	Date
Bruit de fond et mesures – Aspects Théoriques	R310V2	Techniques de l'ingénieur	18/12/2006
Bruit de fond et mesures – Mesures et applications en conception	R311V1	Technique de l'ingénieur	18/12/2006
Op Amp Noise Theory ans Applications	SLOA082	Texas Instruments	
NOISE ANALYSIS OF FET TRANSIMPEDANCE AMPLIFIERS	SBOA060	BurrBrown	02/1994
Presentation electronique multi-detecteur		Laurent Leterrier LPCCaen	

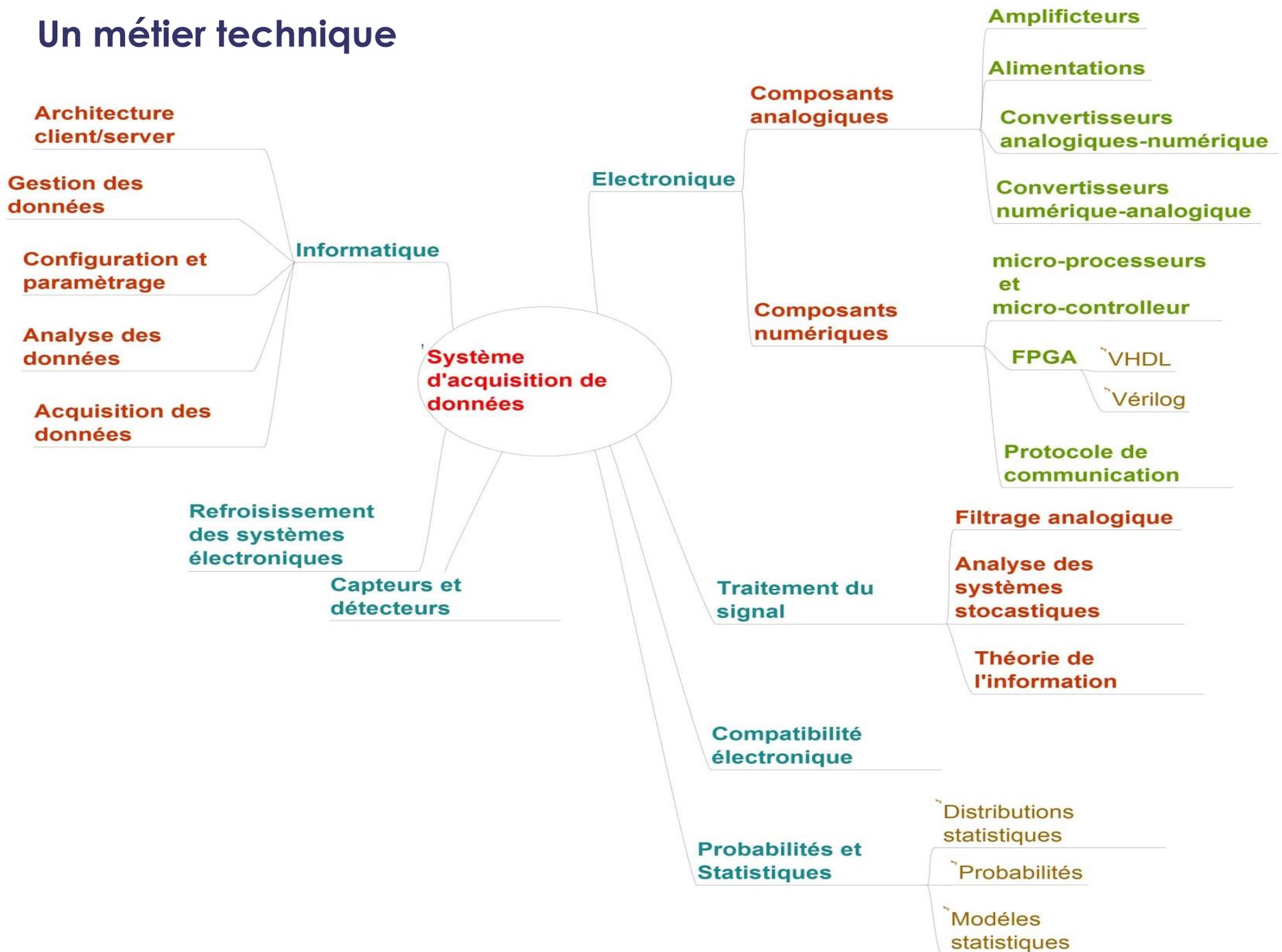


ECOLE IN2P3 : Techniques de base des acquisitions multi-détecteurs

**l'électronique du détecteur à la mesure
I- Généralités & Traitement Analogique du signal**

CARGESES, du 1er au 5 Avril 2019

Un métier technique



Définitions

La **mesure** est une valeur numérique correspondant à une grandeur physique objet de l'étude (Temperature, pression, tension, courant, déplacement, flux...). Cette grandeur est désignée par **mesurande**. L'ensemble des opérations qui concourent à la connaissance de la valeur numérique du **mesurande** constitue son **mesurage**.

Dans le cas des bancs d'instrumentation, nous utilisons des appareils dont l'objectif est de donner une représentation aussi précise que possible du **mesurande**. L'ensemble des **mesurande** permet de caractériser l'unité sous test, la fonction physique à acquérir.

Contrôlabilité

Observabilité

Devices Under Test

Unity Under Test

Les signaux : Le mot « signal » vient du mot latin « signum » signifiant signe convenu, c'est-à-dire qu'il y a la présence d'un émetteur de signe et d'un récepteur de signe. En physique, c'est la manifestation d'un phénomène par la fluctuation d'une grandeur observable directement ou indirectement. En mathématique, c'est une fonction d'une variable exogène (temps, espace) véhiculant une information (statistique, quantitatif) pertinente au sens de l'observateur.

Les systèmes d'acquisition sont basés sur deux théories mathématiques :

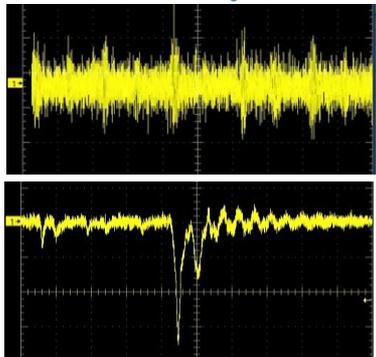
Définitions

Théorie du signal

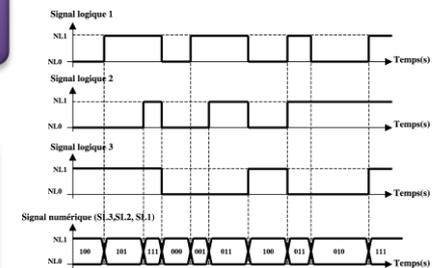
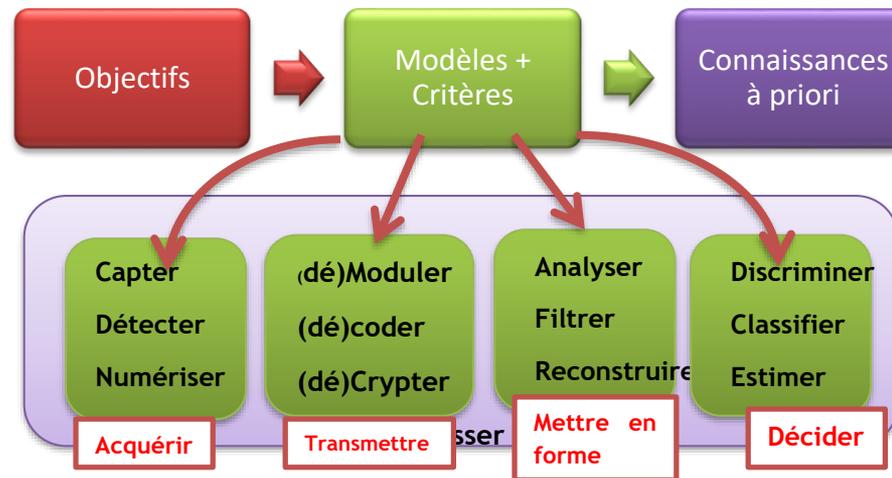
- Etude des signaux sous leur forme mathématique et modélisant un phénomène physique
- $x(t) = a.\sin(w.t) + e(t)$

Théorie de la décision

- Elaboration de modèles statistiques à partir de connaissances A PRIORI en vue de faire un choix optimal à partir des observations (prise de décision à partir de critères)



Signaux Analogiques :
Tension en fct du Temps



Signaux Numériques :
0 ou 1 en fct du Temps

Les applications multi-détecteurs

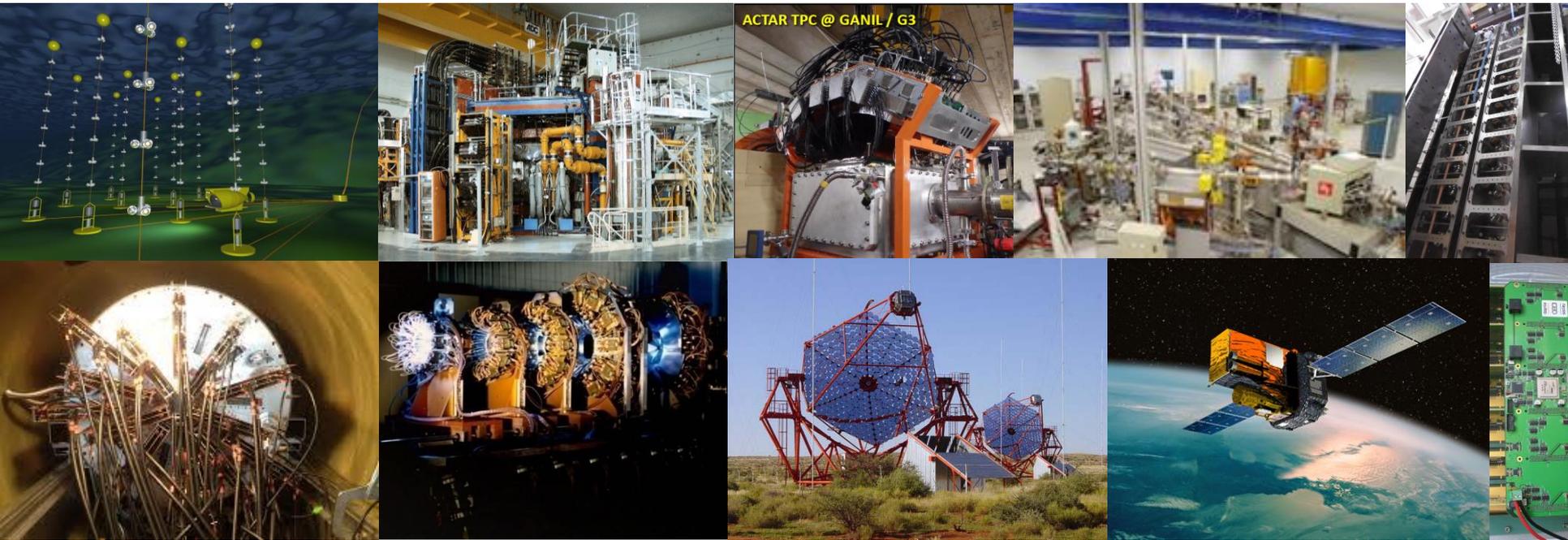
Instrumentation nucléaire : Utilisée partout où l'on cherche à mesurer les paramètres caractéristiques d'un flux de particules (p , n , pions (quarks+gluons), photons (X , γ), β , α , e , μ , ν)

→ **Mesure de rayonnement**

Applications directes :

Contrôle-Commande dans les réacteurs nucléaires ,les usines de traitement de déchets nucléaires et les tokamaks.

Expériences de physique nucléaire, physique des particules et astrophysique (astroparticules).



Une chaîne d'acquisition pour la physique

Ce que l'on cherche à mesurer :

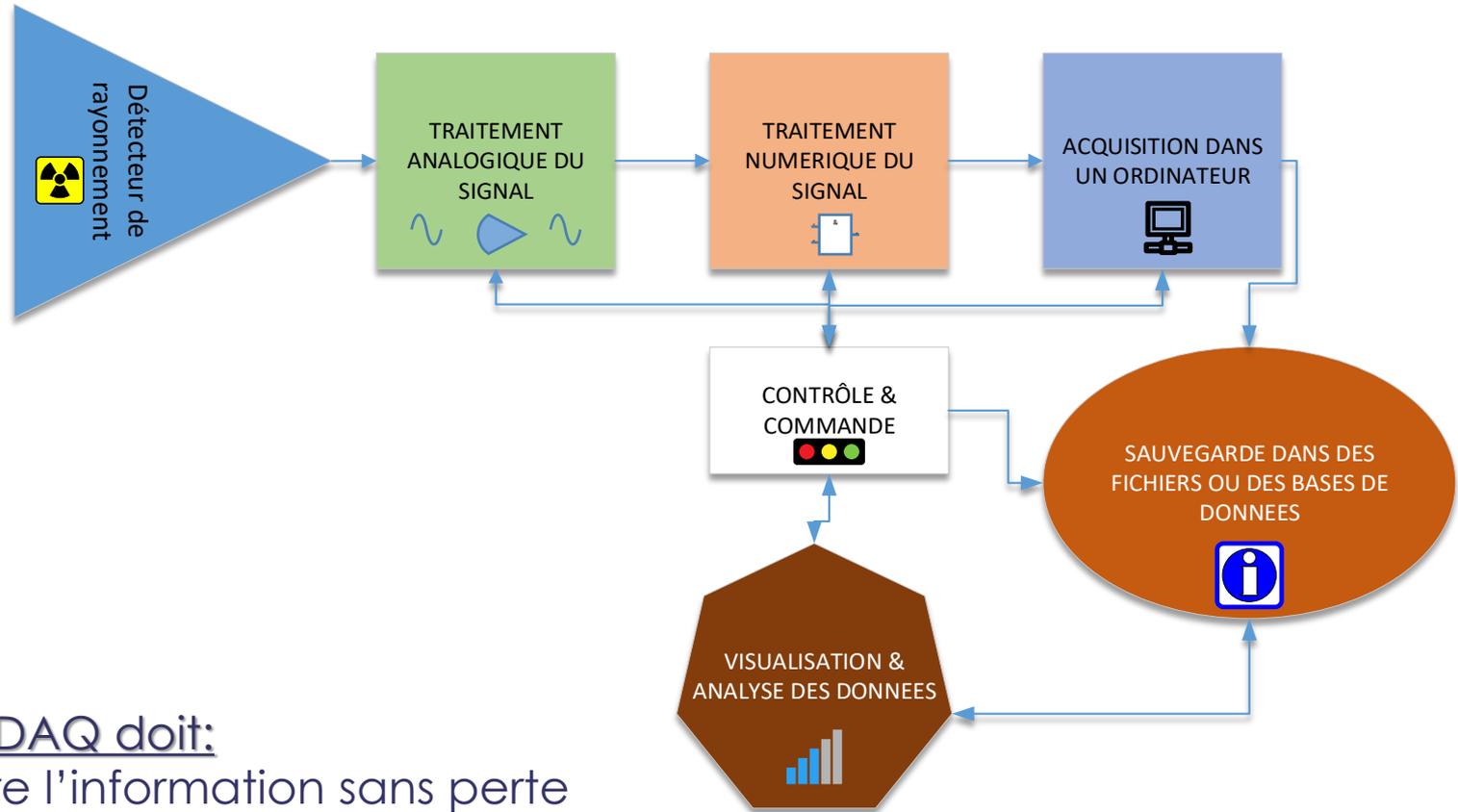
- Le taux de comptage (Activité)
- L'Énergie déposée
- La quantité de mouvement = impulsion
→ (quadrivecteur)
- La position du faisceau de particules
- La durée d'interaction
- Le temps de vol d'une particule
- La masse

On cherche à minimiser les fluctuations du signal à mesurer:

- Bruit de fond : rejection des signaux inutiles pour la mesure (technique de coïncidences, coupure)
- Perturbations : CEM (blindage, ligne de courant, mise à la masse)
- Bruit électronique : Système électronique + détecteur

Au niveau électronique, on mesure des tensions, du courant, (des charges, un temps).

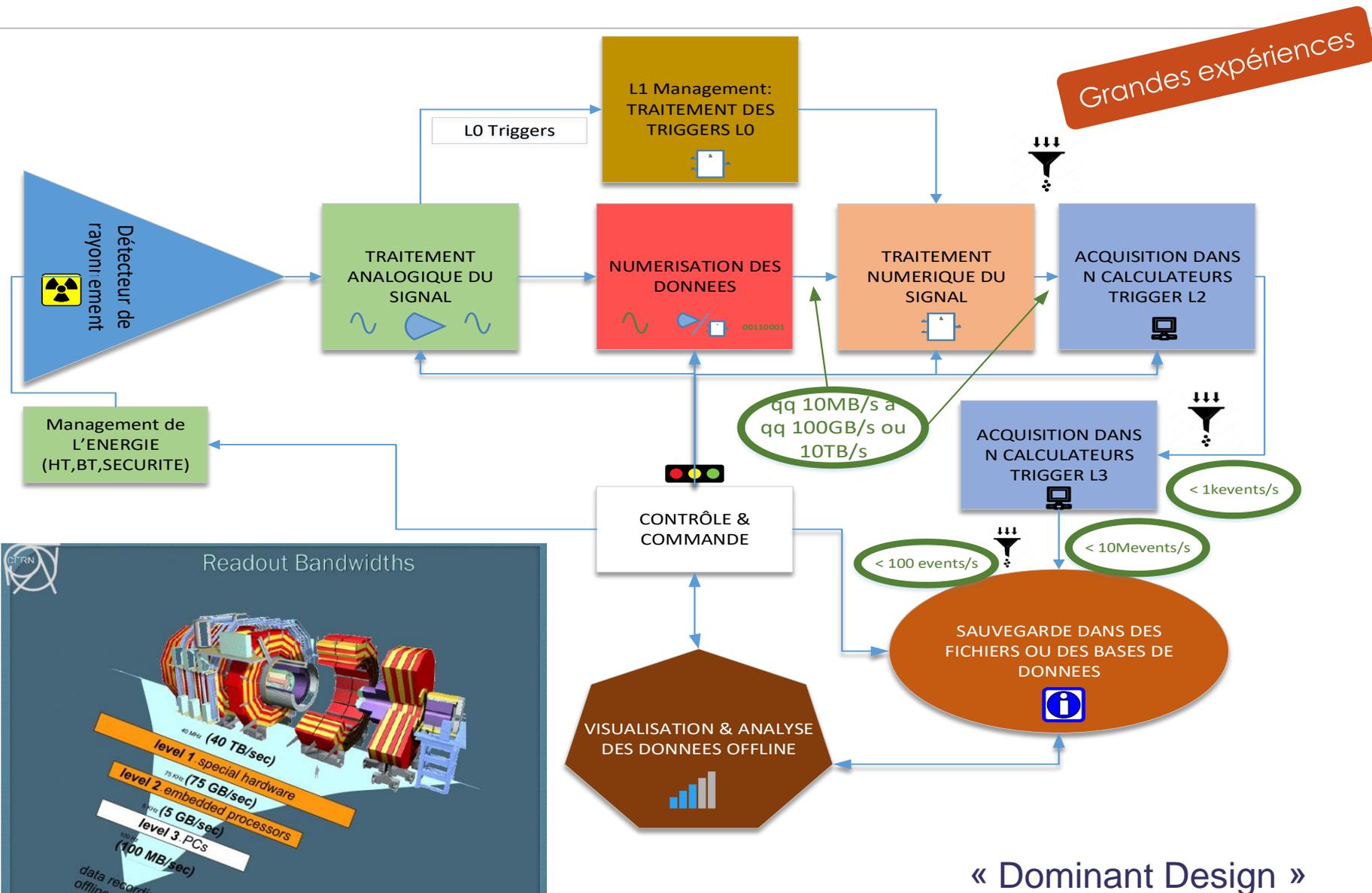
Un Système d'acquisition simple



Un système DAQ doit:

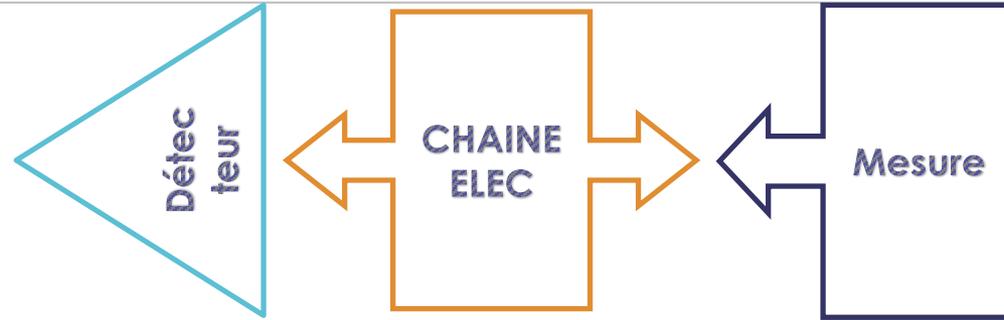
- Transmettre l'information sans perte
- Synchroniser les différentes voies de détection
- Réduire et traiter les données

Un Système d'acquisition actuel multicanaux



Electronique Analogique

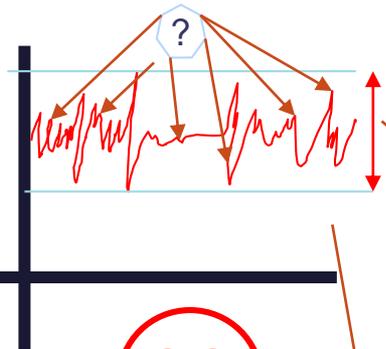
Phénomène Physique



Inconnue Désirable :
Mesure parfaite



Quelle est la valeur vraie
De la mesure ?



BRUIT D'INTERFERENCE :
Interaction du système avec le monde extérieur
une partie du système interagit avec le reste des fonctions
→ Compatibilité Electromagnétique

BRUIT INHERENT :
Phénomènes aléatoires dont nous ne maîtrisons pas la venue
Nous ne pouvons traiter que les conséquences

POURQUOI !!!!



Connaître
les phénomènes



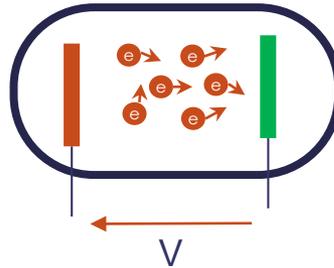
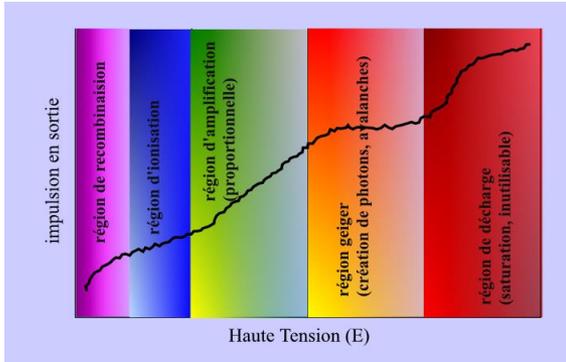
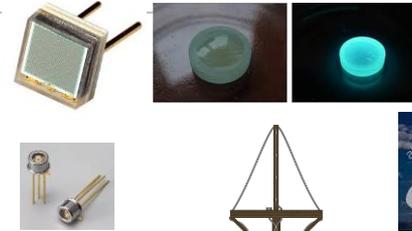
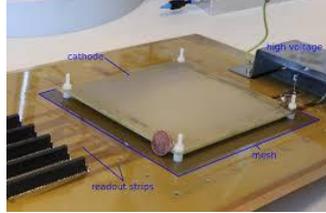
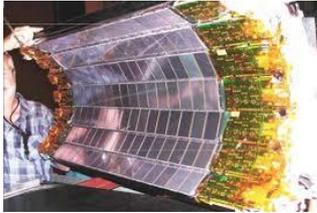
Comprendre
les phénomènes



Maîtriser, influencer sur
les phénomènes



Les signaux électriques issus des détecteurs

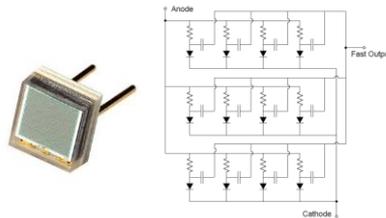


$$i = \frac{n \cdot e \cdot v}{l}$$

N : Nombre de porteurs créés
 V : Vitesse des porteurs
 L : longueur de diffusion

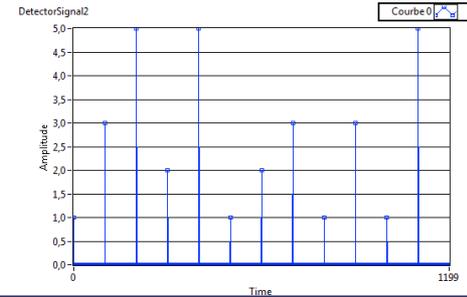


Scintillateur



SiPM

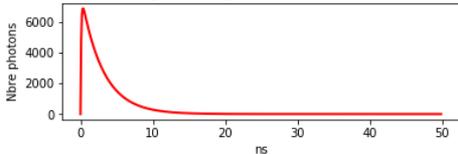
$$Q(t) \sim \frac{N_{fired} \cdot G \cdot q}{C_d} (e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}})$$



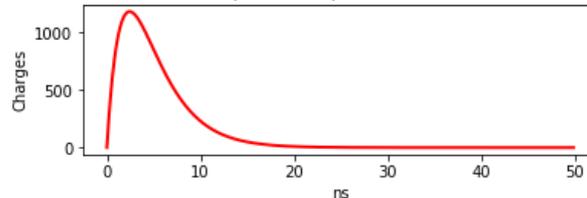
Signal Détecteur = Signal de Dirac

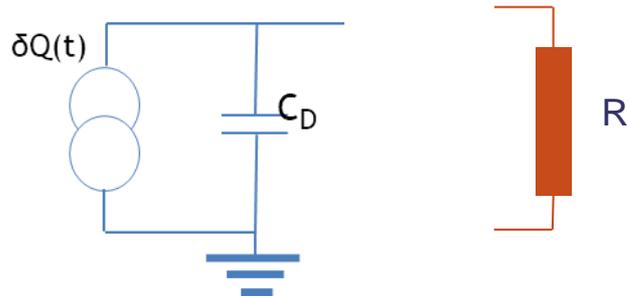
- $D(t) = Q$ si $t = 0$,
- $D(t) = 0$ si $t > 0$

Reponse temporelle du scintillateur

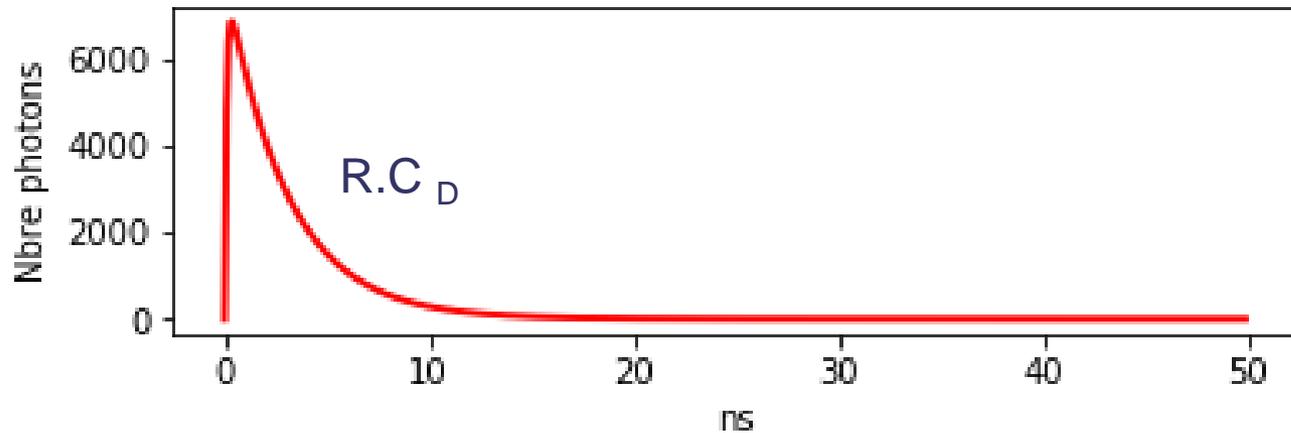


Reponse temporelle du SiPM



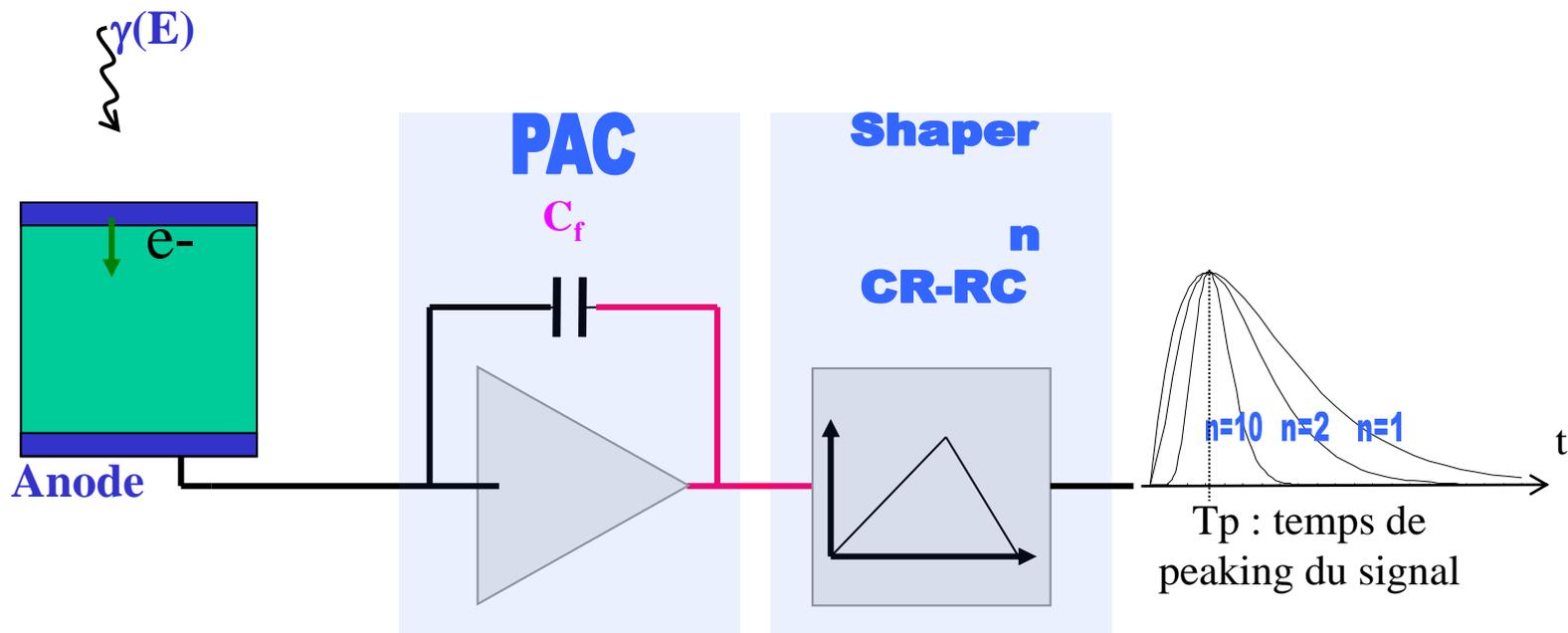


Reponse temporelle

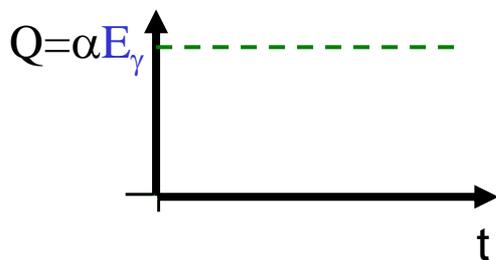


Mais C_D instable (dépend de la polarisation)
Charge faible (R faible)

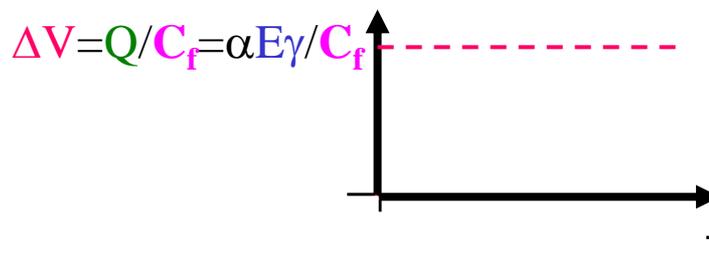
Chaîne électronique front-end (mesure de charges)



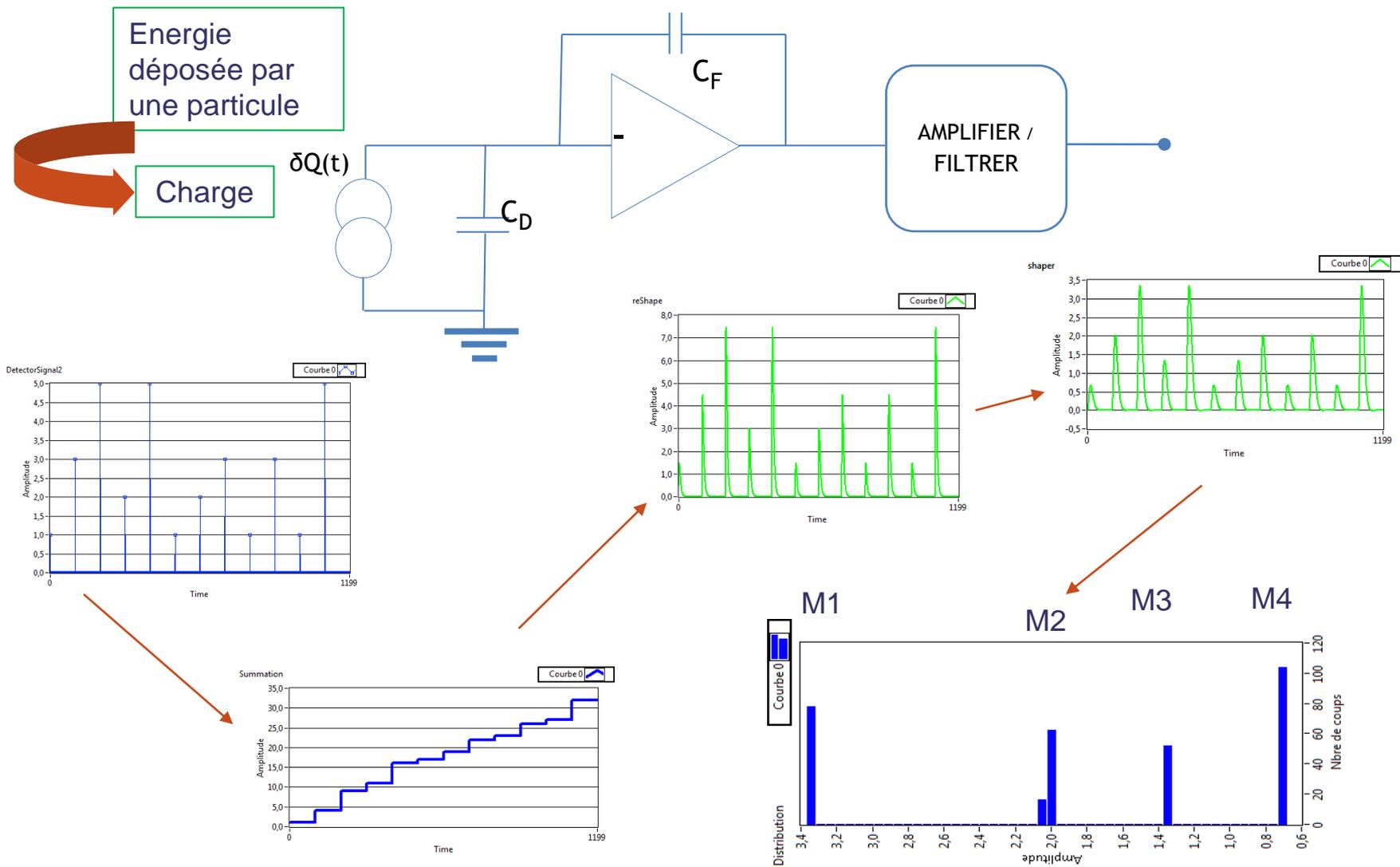
Charge induite sur l'anode



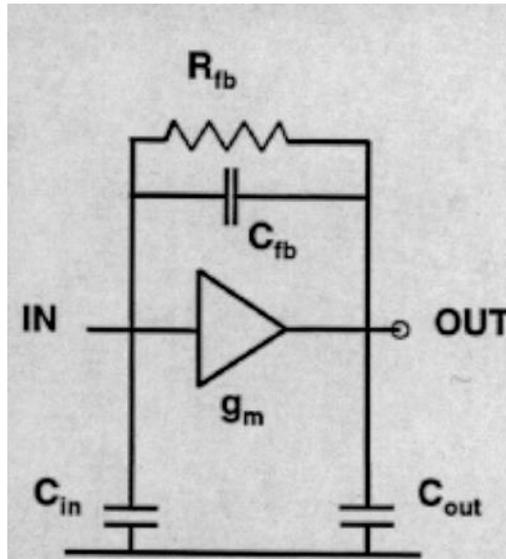
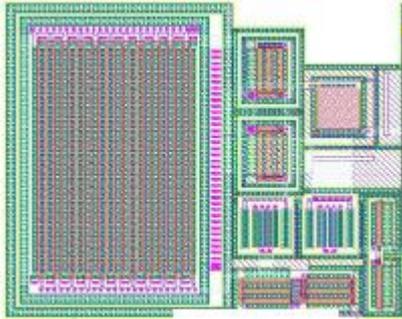
Variation de tension en sortie PAC



Chaîne électronique front-end (mesure de charges)



Les fonctions de bases : PAC, CSA : convertir la charge en tension



Transfer function :

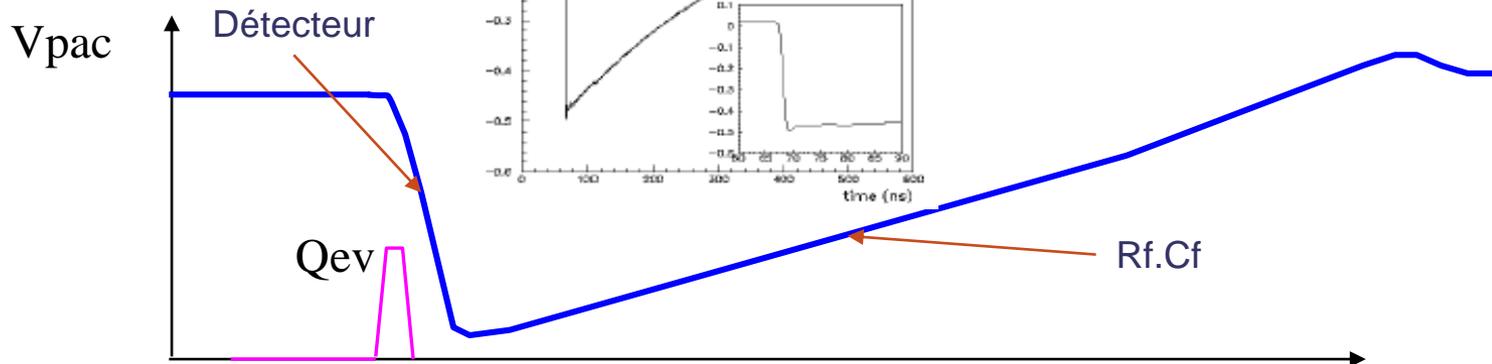
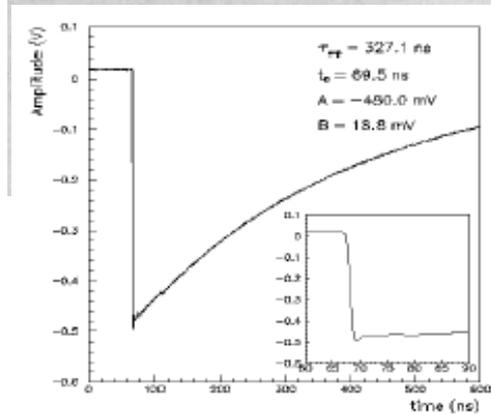
$$\frac{V_{out}(s)}{I_{in}(s)} = -\frac{1}{sC_{fb}} \cdot \frac{(1 - \tau_z s)}{(1 + \tau_r s)}$$

$$\tau_r = \frac{C_{fb}C_{in} + C_{fb}C_{out} + C_{in}C_{out}}{gmC_{fb}} \quad \tau_z = \frac{C_{fb}}{gm}$$

With feedback resistance :

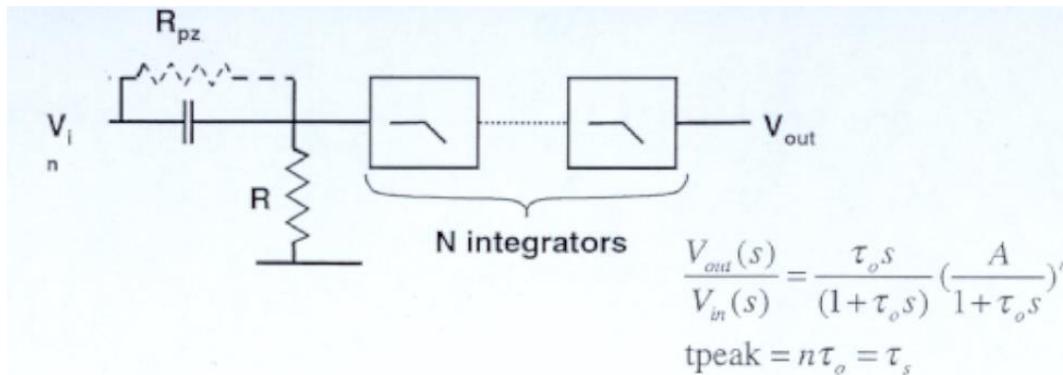
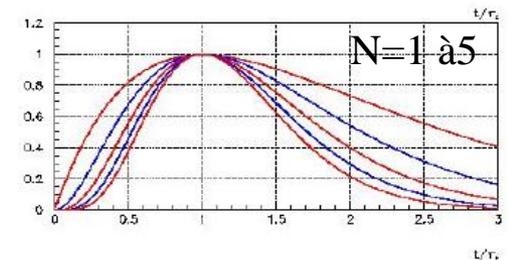
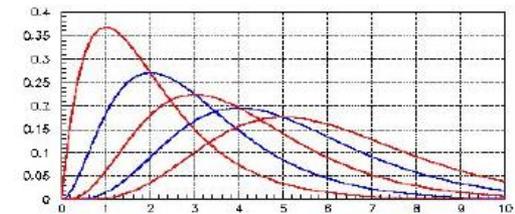
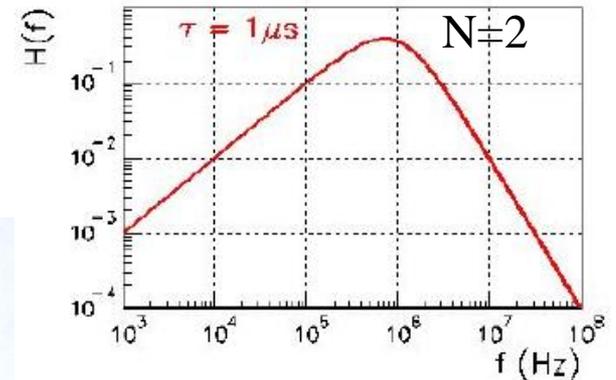
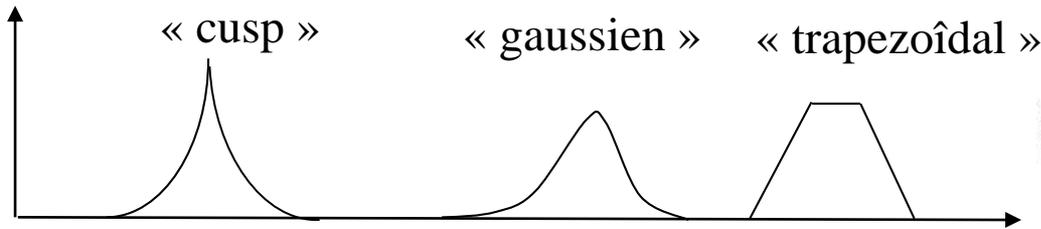
$$\frac{V_{out}(s)}{I_{in}(s)} = -\frac{(1 - \tau_z s)}{G_{fb}(1 + \tau_r s)(1 + \tau_{fb} s)}$$

$$\tau_{fb} = R_{fb}C_{fb} = \frac{C_{fb}}{G_{fb}}$$



Les fonctions de bases : Filtre Shaper (S/B)

- Shaper : Pour un detecteur nucléaire capacitif, le filtre **optimal** (shaper) est le filtre « cusp » → on crée donc un filtre ressemblant à cela, un filtre gaussien ou trapézoïdal :



For step function input from CSA

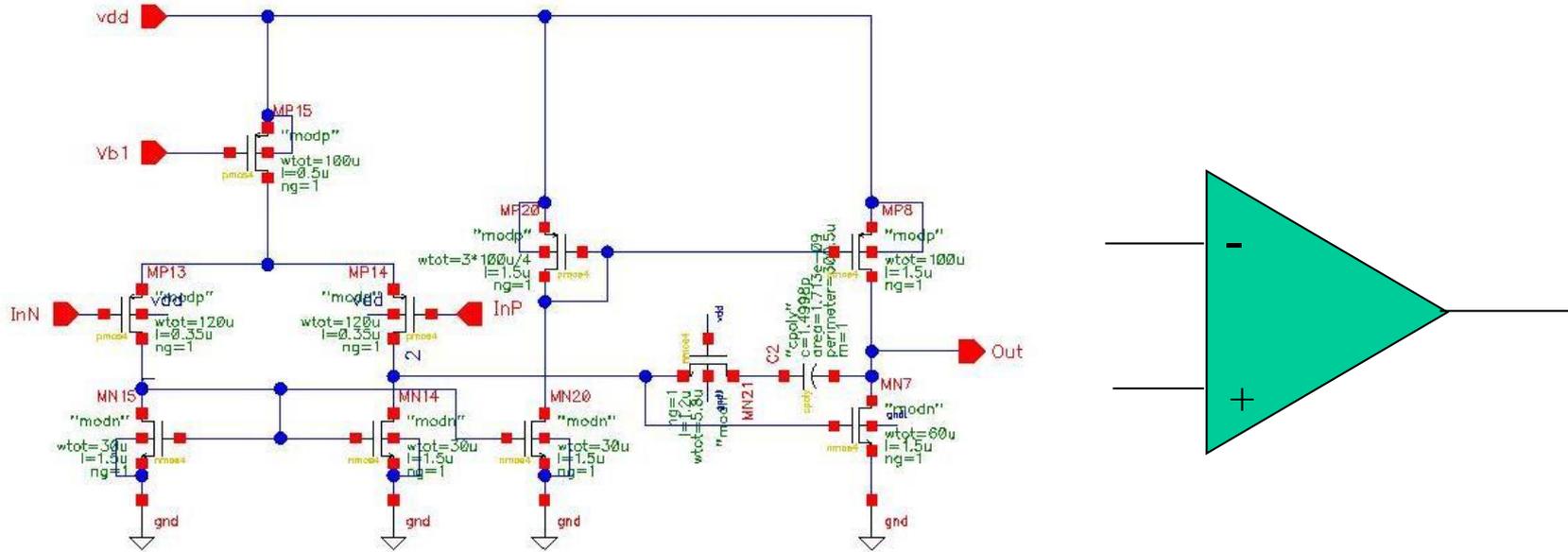
$$V_{out}(s) = \frac{s\tau_o}{1 + s\tau_o} \left(\frac{A}{1 + \tau_o s} \right)^n \cdot \frac{Q}{sC_f}$$

$$V_{out}(t) = \frac{Q}{C_f} \cdot \frac{A^n n^n}{n!} \left(\frac{t}{\tau_s} \right)^n \exp\left(-\frac{nt}{\tau_s}\right)$$

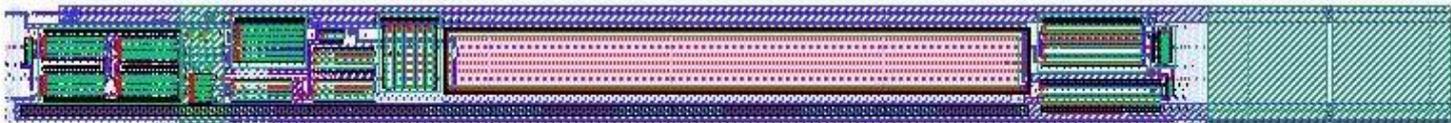
$$\text{peak amplitude} = \frac{Q}{C_f} \frac{A^n n^n}{n! e^n}$$

Les fonctions de bases : Amplificateurs Opérationnels

- Amplificateurs opérationnels :
 - Utilisation principale comme buffer d'écriture, de lecture, de sortie.



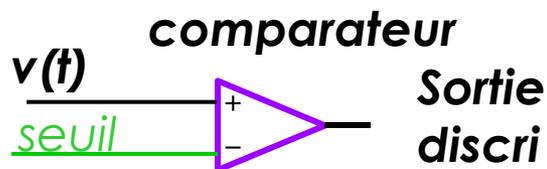
Ampli 2 étages avec compensation effet miller et suppression du zero



Les fonctions de bases : Discriminateurs

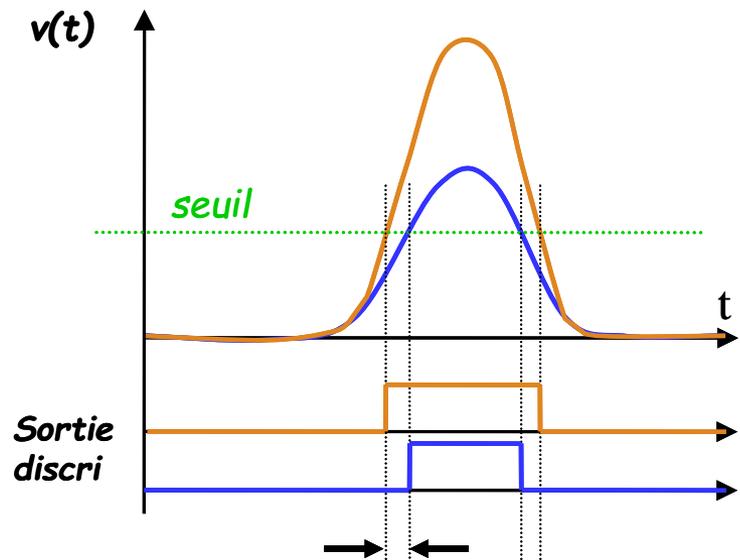
• Discriminateur :

- Amplificateur à gain élevé, rapide, fonctionnant en grand signaux (saturation, rétroaction positive):
- Utilisation pour supprimer une partie du signal du détecteur (bruit de fond) ou pour détecter un temps de passage d'un événement.

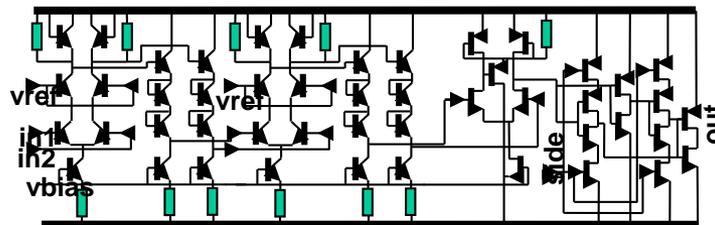
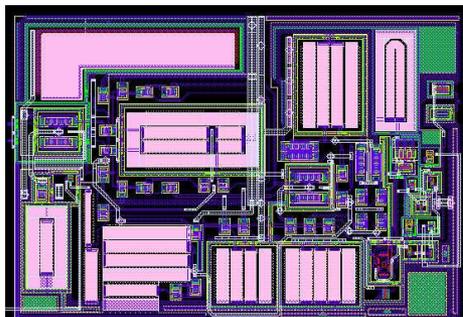


si $v(t) < \text{seuil} \Rightarrow$ Sortie discri = « 0 »
logique

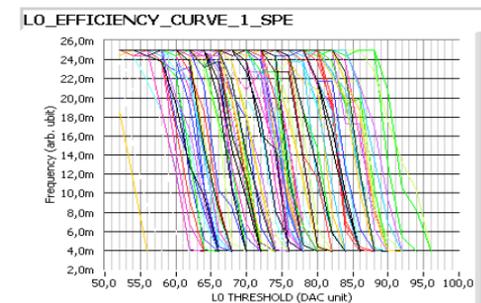
si $v(t) > \text{seuil} \Rightarrow$ Sortie discri = « 1 »
logique



Erreur temporelle
appelée « walk »



Dispersion des seuils

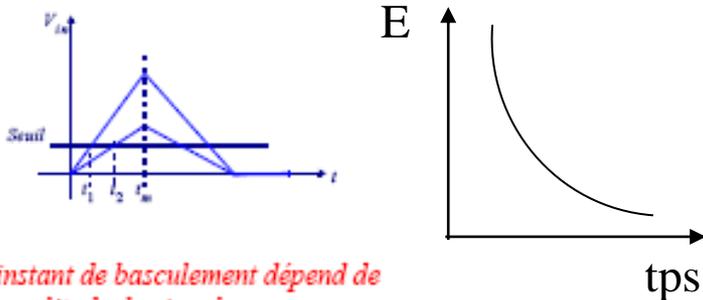


Les fonctions de bases : Discriminateurs

- **Inconvénient du discriminateur commandé par front (leading edge) :**
 - Précision de passage dépend de la hauteur du signal
 - Sensible aux jitters sur le signal (bruit)
 - Nécessite une pente infinie (consommation)

• *Time walk:*

On a une corrélation entre amplitude (énergie et temps de passage) → correction soft possible



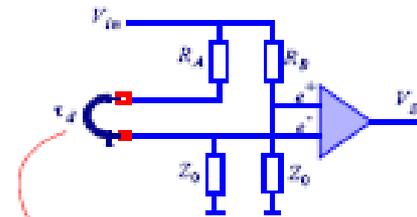
$$V_s = A_o \cdot F \cdot [V_{in}(t) - V_{in}(t-\tau)]$$

A_o : amplitude de V_{in}

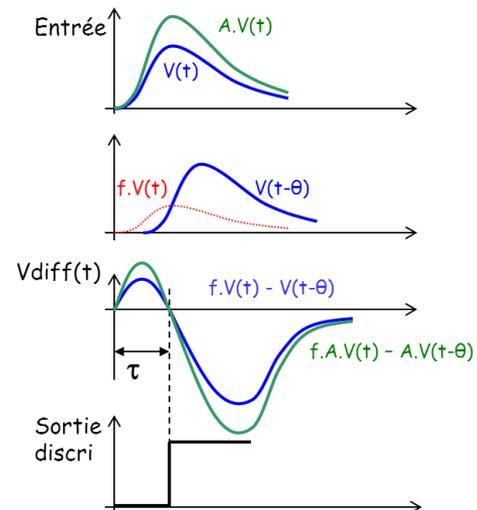
F : fraction prise < 1

τ : retard de V_{in}

• Discriminateur à fraction constante:

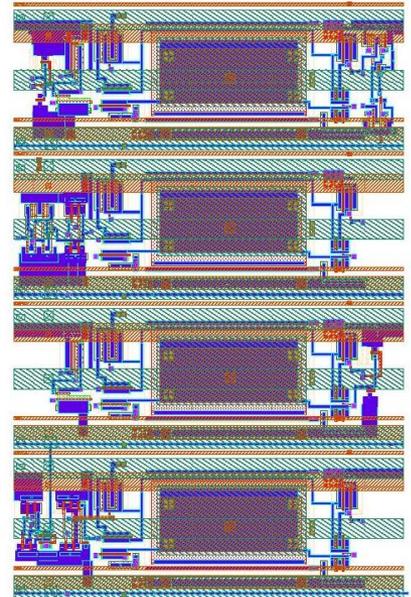
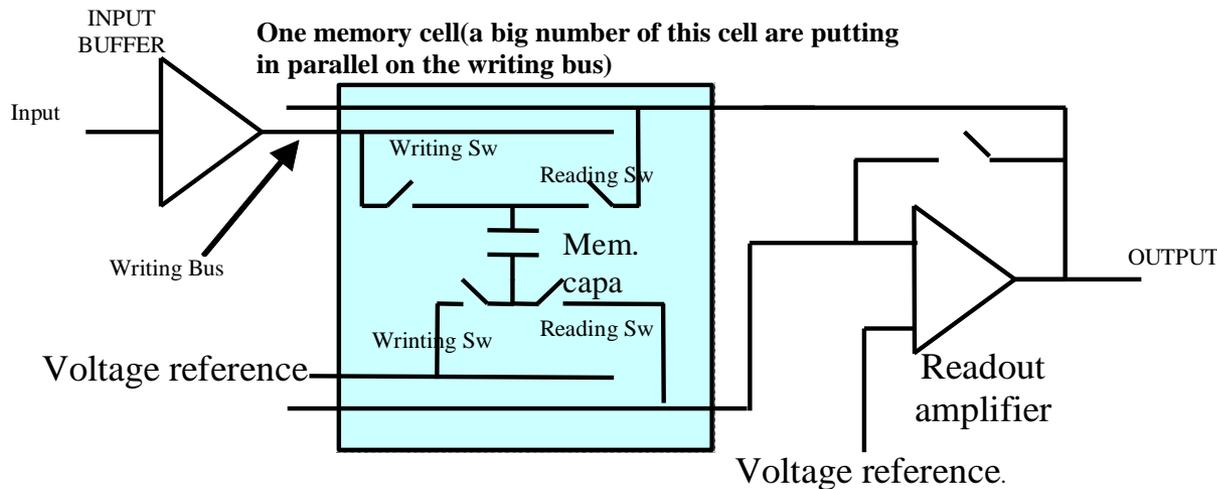


τ de l'ordre de quelques nanosecondes si $f \ll 1$



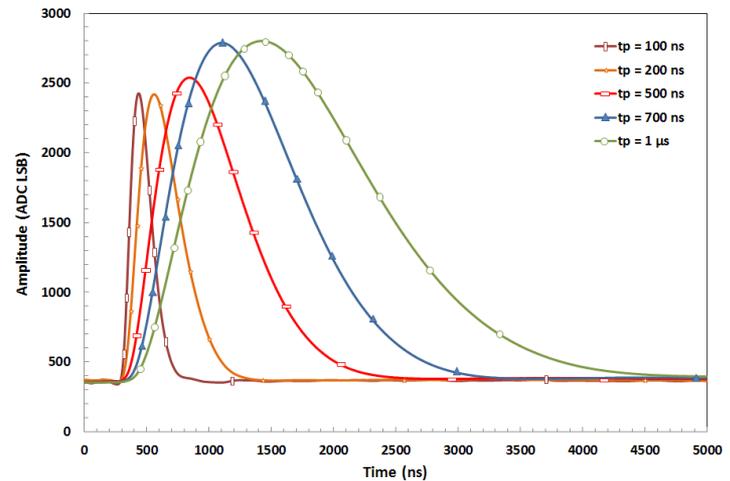
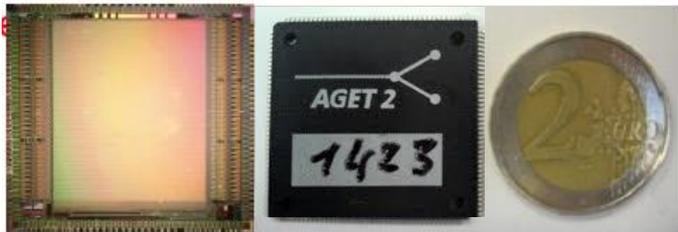
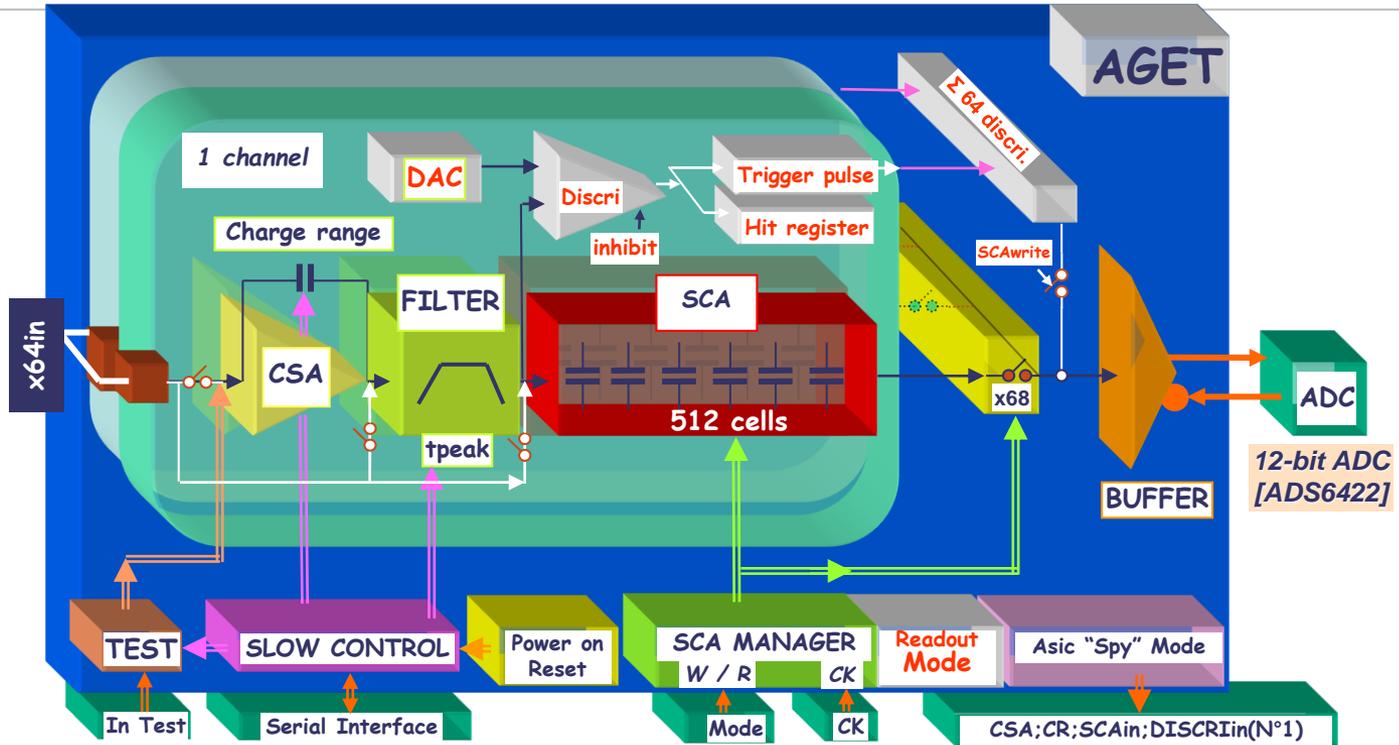
Les fonctions de base: Les mémoires analogiques

- Mémoire analogique, échantillonneur rapide :
 - Échantillonneur rapide (1MHz \rightarrow 8GHz) utilisant un ensemble de track and hold et d'interrupteur MOS
 - Mémorisation sur une courte durée (nbre de cellules)
 - Numérisation (lecture) à plus basse fréquence.
 - Séquenceur logique permettant d'avoir une écriture et lecture simultanée ou non.



- Pb de *Fixed Pattern Noise* (mismatche entre valeur de capacité)
- Pb de courant de fuite des capacités (tps de maintien < 2,5 ms)
- fréquence de lecture dépend du nbre de cellules sur le bus

L'ASIC AGET : Un système dans une puce



L'ASIC AGET : Un système dans une puce

CSA level: 4 Charge ranges; 2 bits register / channel: 120 fC, 240 fC, 1 pC & 10 pC.

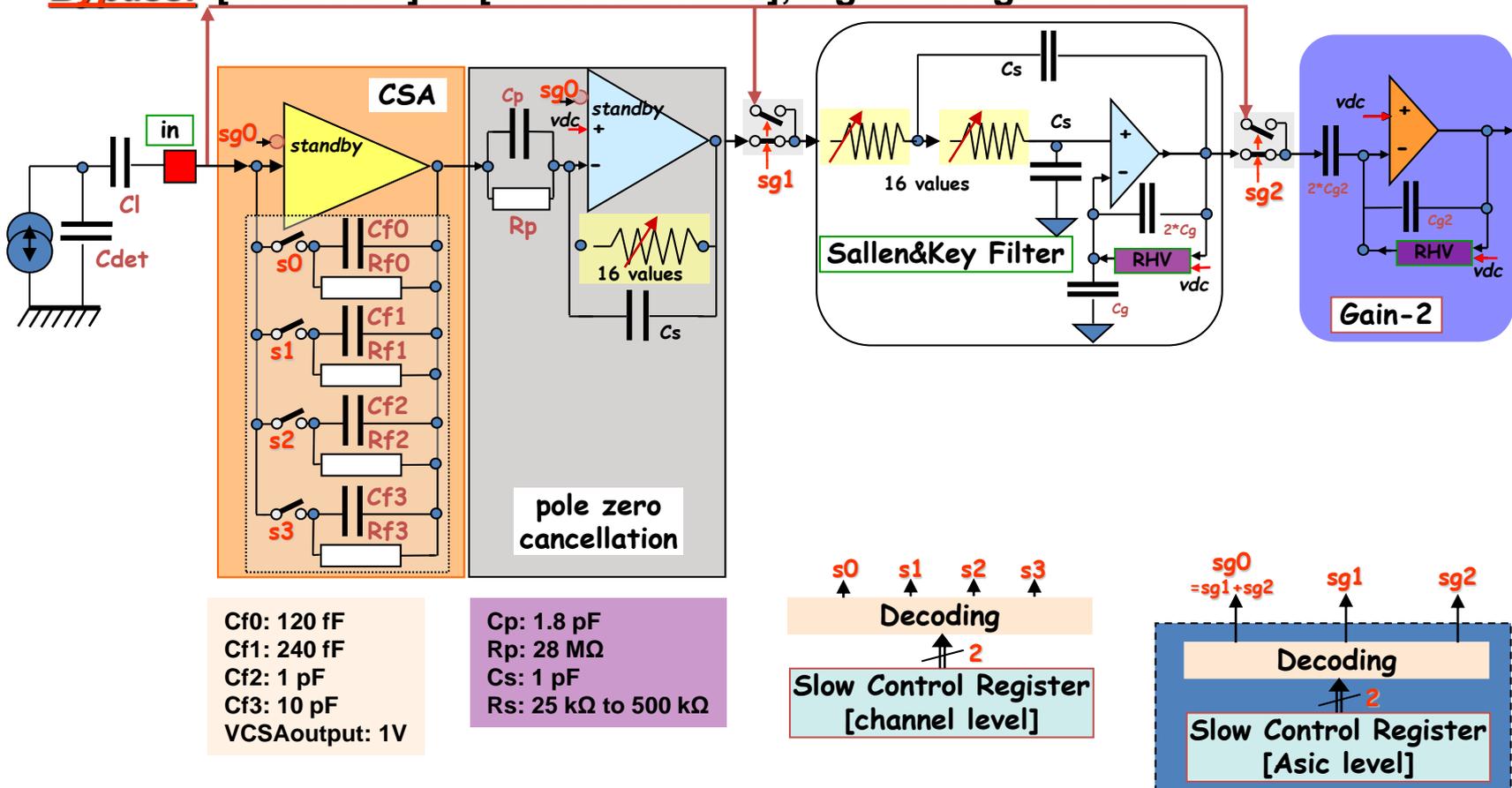
saturation behavior improved

PZC : zero: 50 μ s; 1 Pole: 25ns to 500ns.

RC2 : 2 Poles: 25 ns to 500 ns.

Peaking Time: 50ns to 1 μ s

Bypass: [CSA+PZC] or [CSA+PZC+RC2]; 2 global register bits.



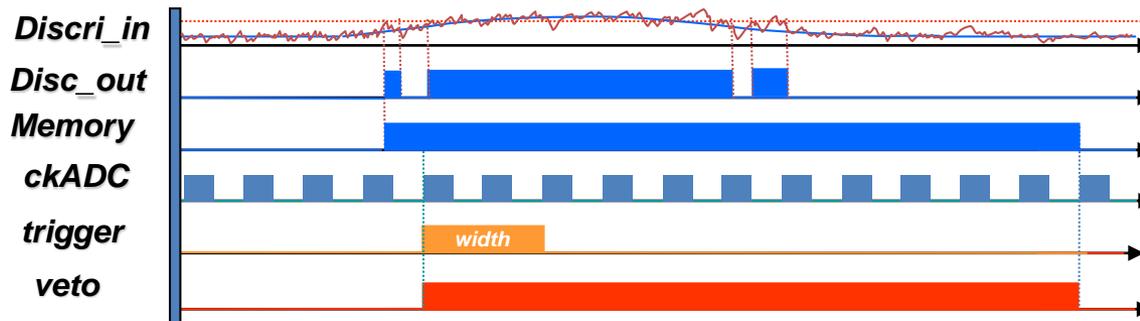
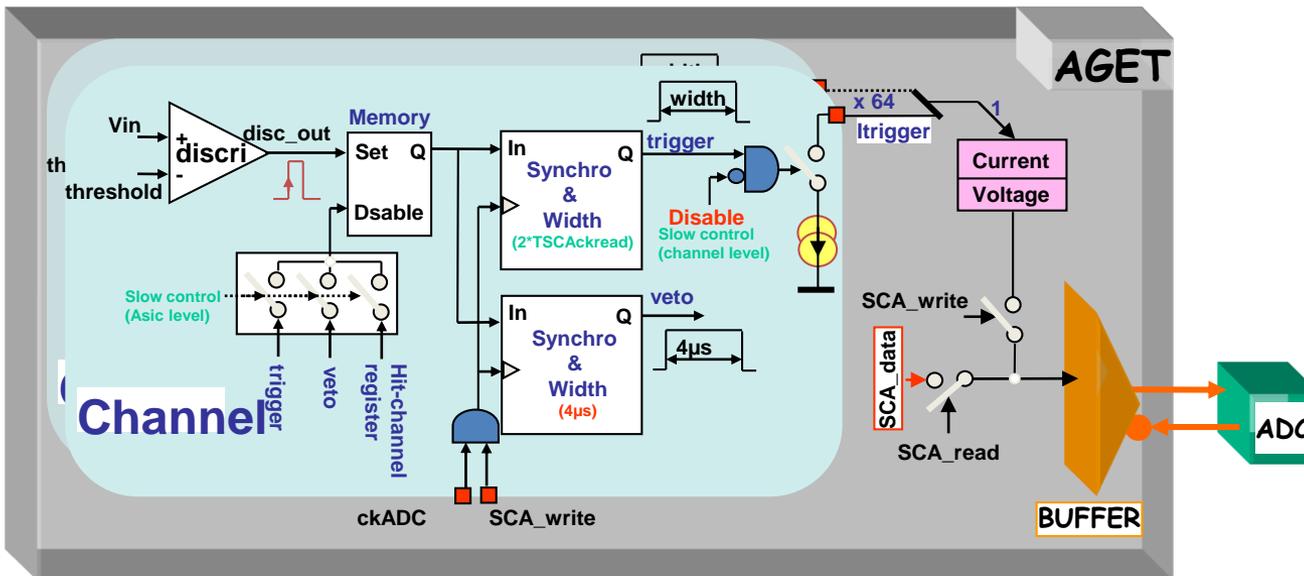
Trigger architecture: analog sum of the 64 discriminators outputs

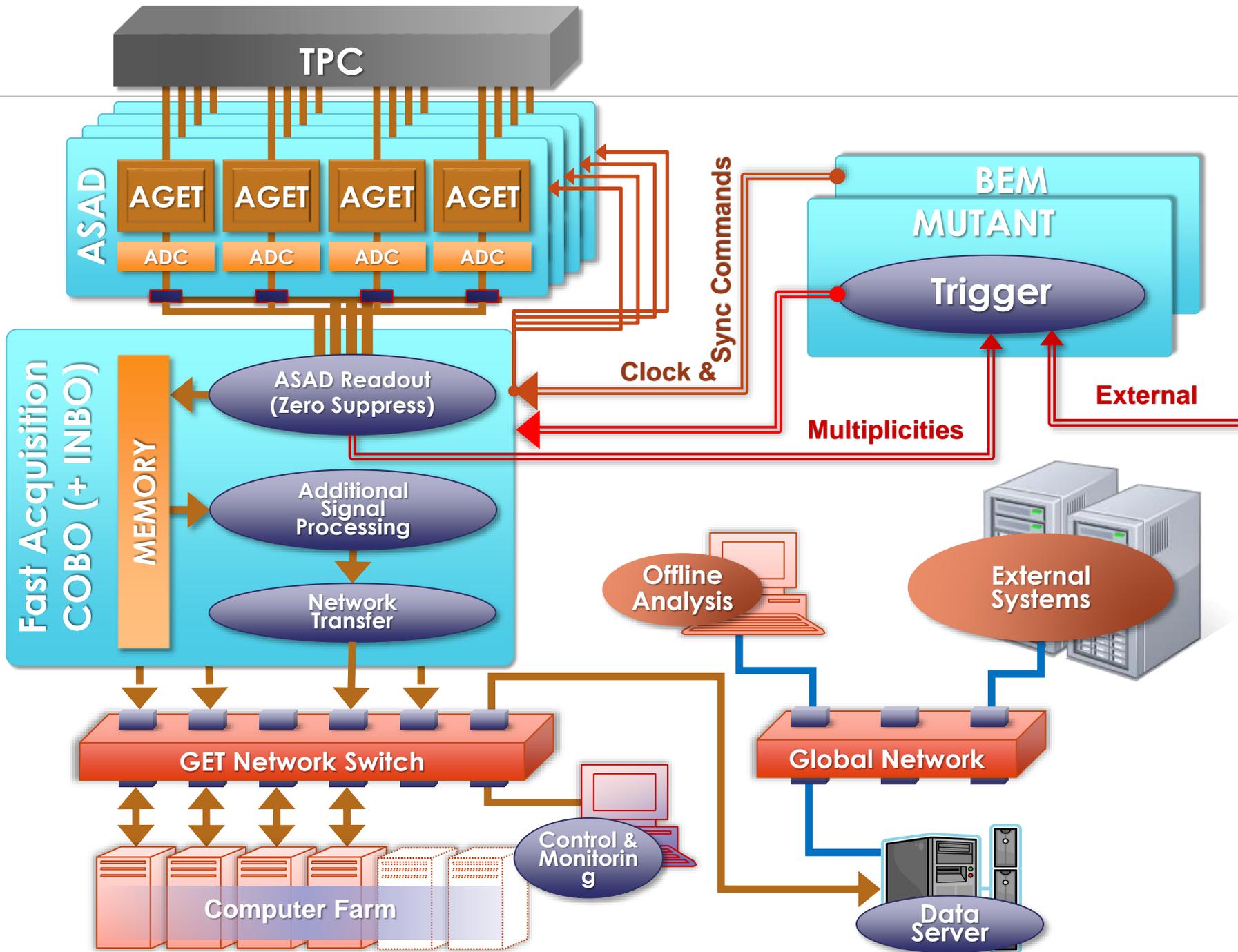
Signal: synchronous with the SCA readout clock (CK_{ADC}).

Width: $2 \times TCK_{ADC}$.

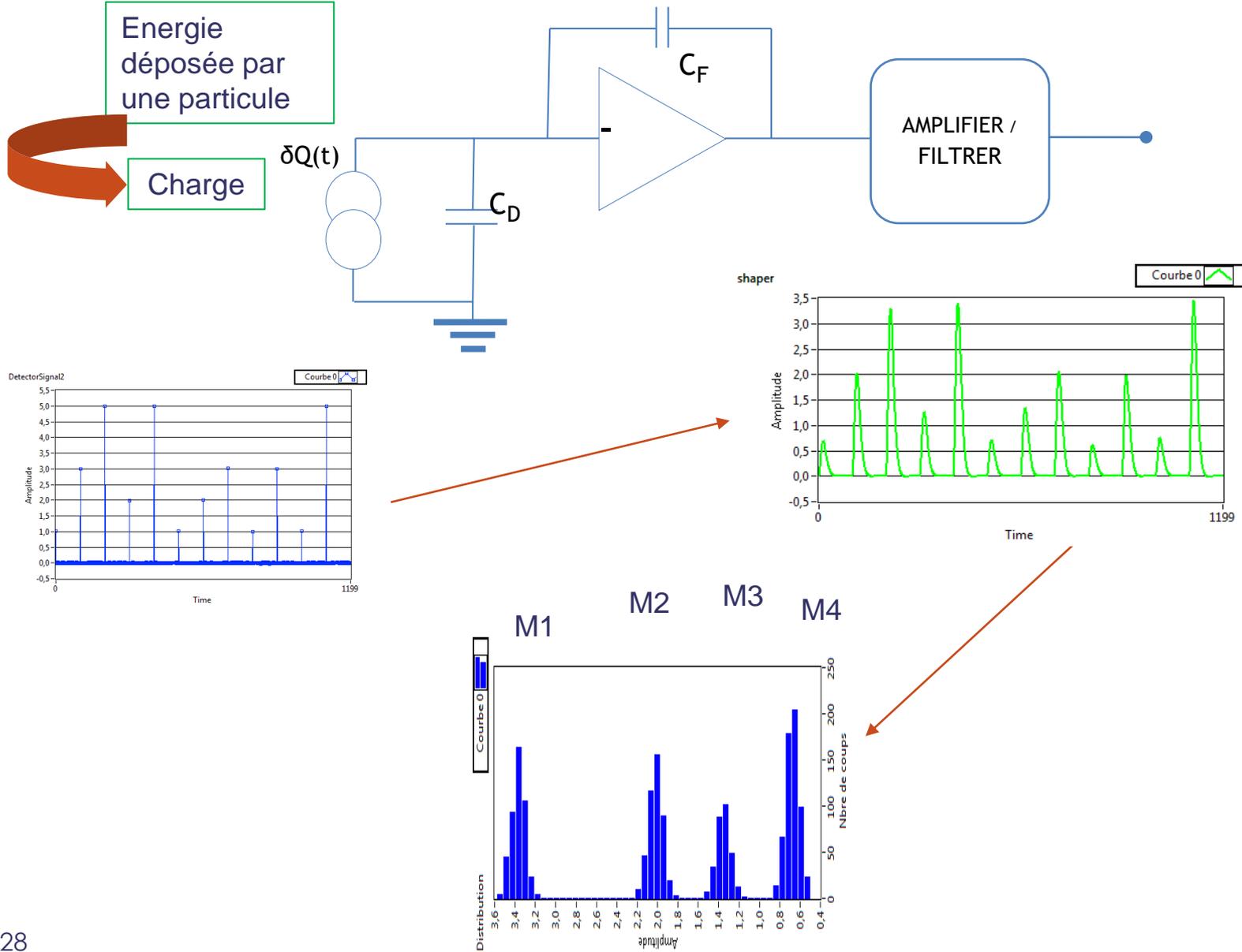
Veto [to avoid ringing]: no veto, fixed value ($4\mu s \pm 1.5\mu s$) or hit-channel register.

Disable [to avoid beam contribution]: by slow control.

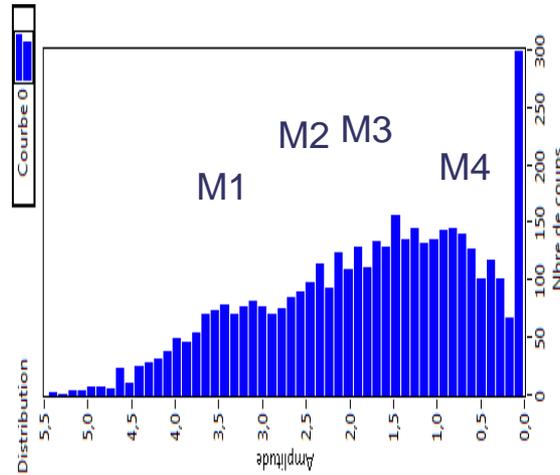
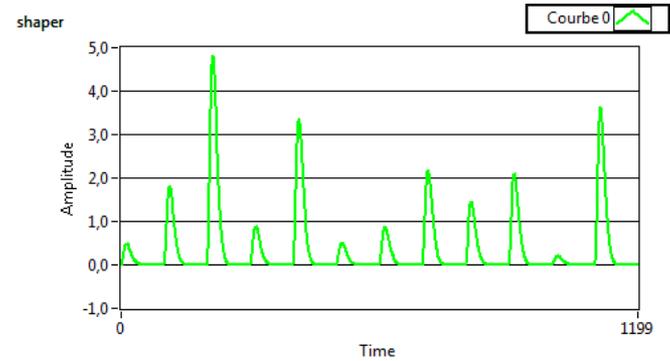
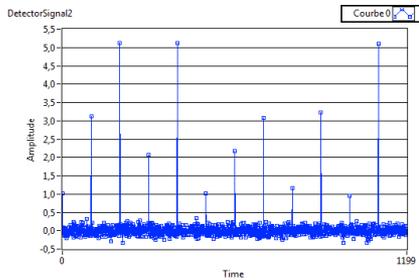
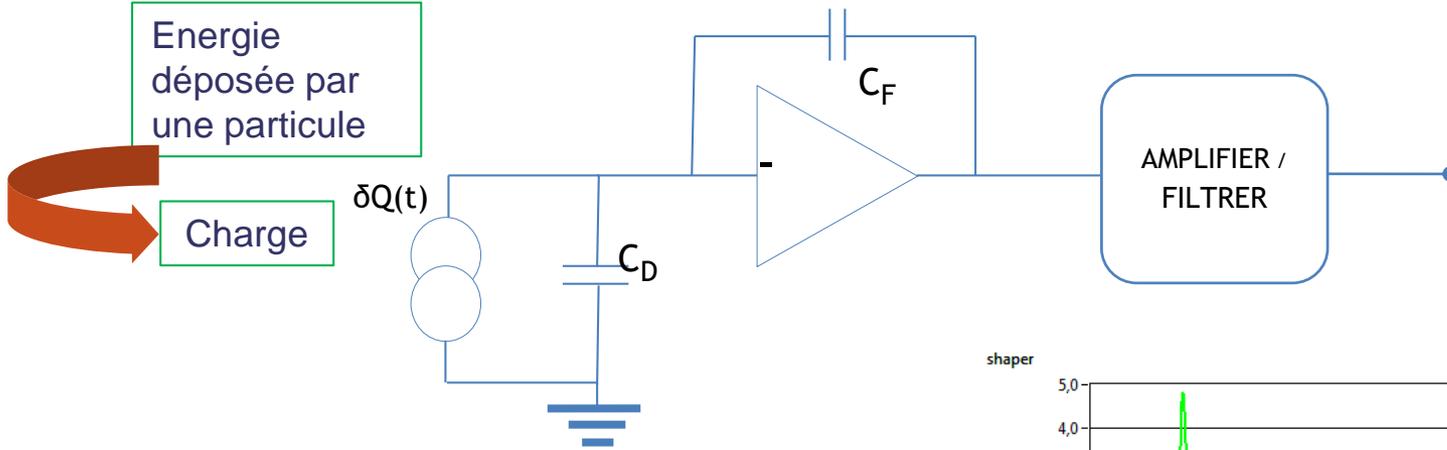




Problématique du bruit



Problématique du bruit



Ligne de Base



- **La mesure** n'est pas constante
- Elle a un **intervalle** de valeurs possibles.
- ➔ Cette intervalle définit **la résolution** du système de mesure.

L'étude du bruit consiste à comprendre, à quantifier et à optimiser cette intervalle de valeurs possibles pour obtenir la meilleure probabilité d'avoir une mesure proportionnelle à l'énergie constante déposée dans le détecteur par la particule à l'étude.

- ➔ **Les types de bruits**
- ➔ **Les outils statistiques**
- ➔ **Analyse du bruit**
- ➔ **Les modèles de bruit**
- ➔ **Exemple d'Etude**

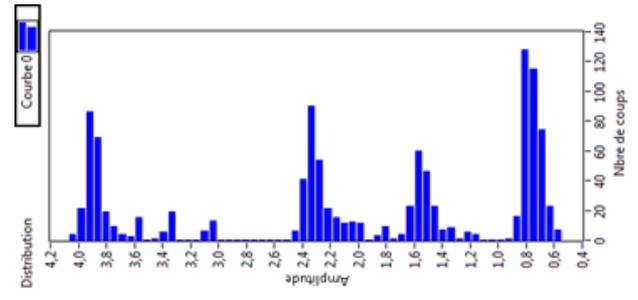
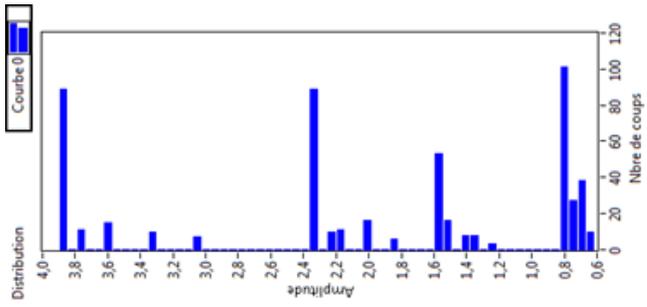
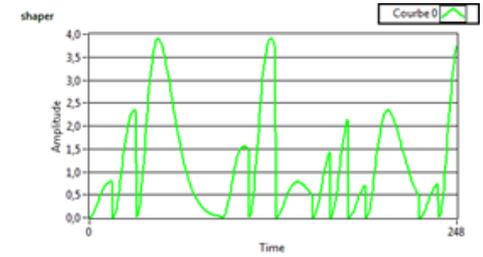
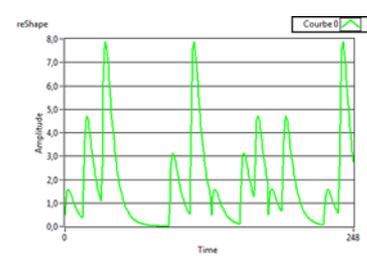
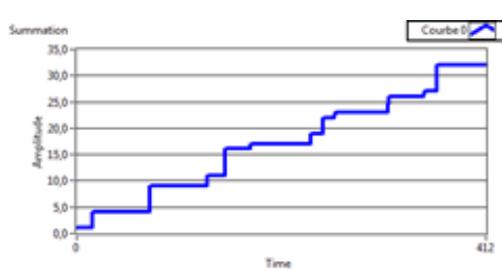
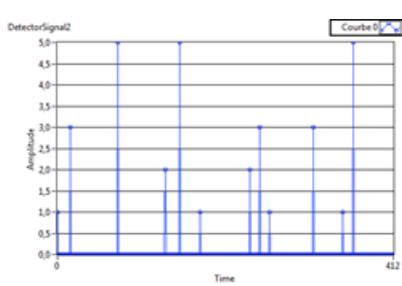
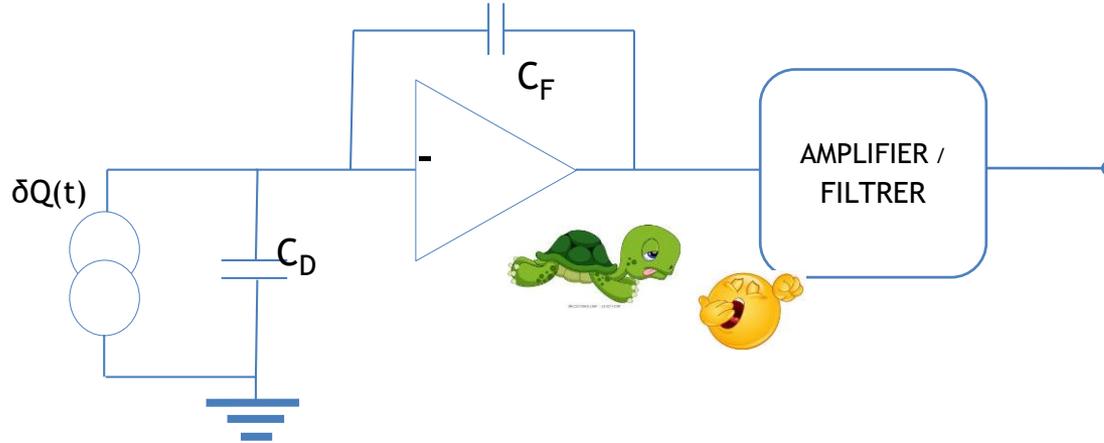
Les bruits typiques (1)

On peut considérer cinq phénomènes qui peuvent entacher la mesure d'une erreur statistique:

- **L'empilement**
- **Le déficit balistique**
- **Le cross-talk**
- **Le bruit du détecteur ou du capteur**
- **Le bruit de la chaîne électronique de mesure**

$$\sigma^2_{\text{total}} = \sigma^2_{\text{det}} + \sigma^2_{\text{pu}} + \sigma^2_{\text{ba}} + \sigma^2_{\text{elec}}$$

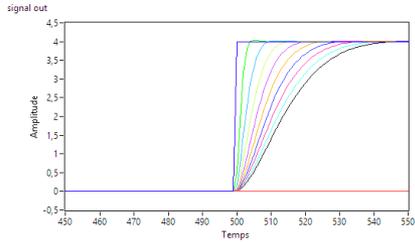
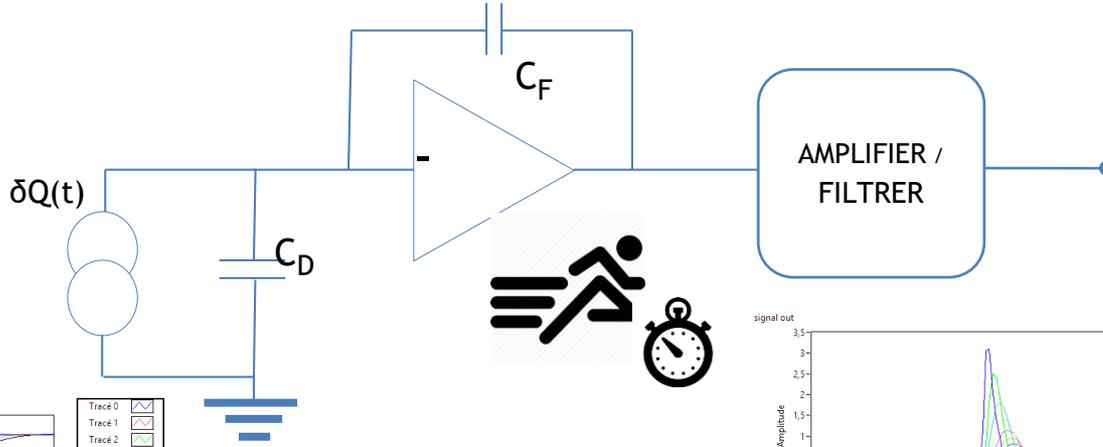
Les bruits typiques (2) : Empilements



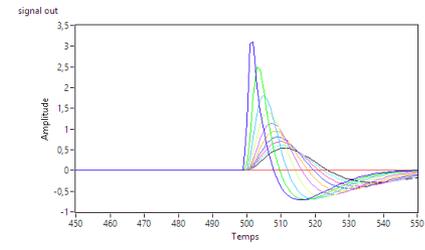
Sans bruit

Avec bruit

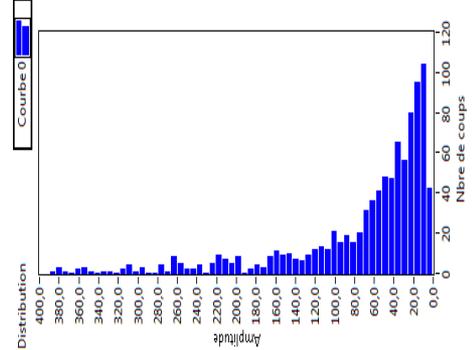
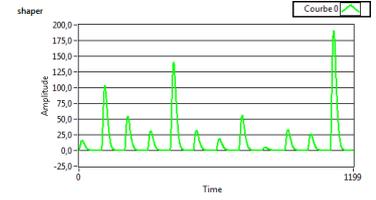
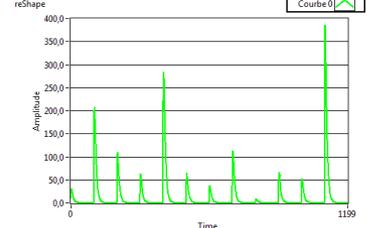
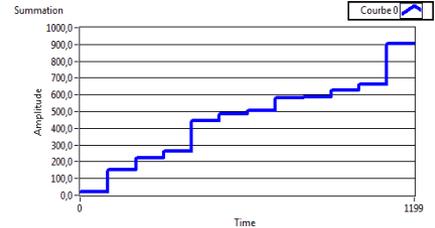
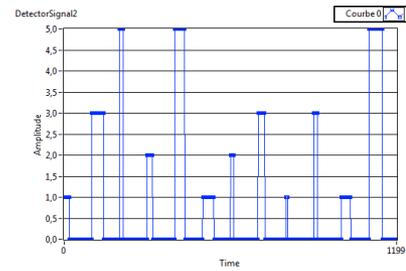
Les bruits typiques (3) : Deficit balistique



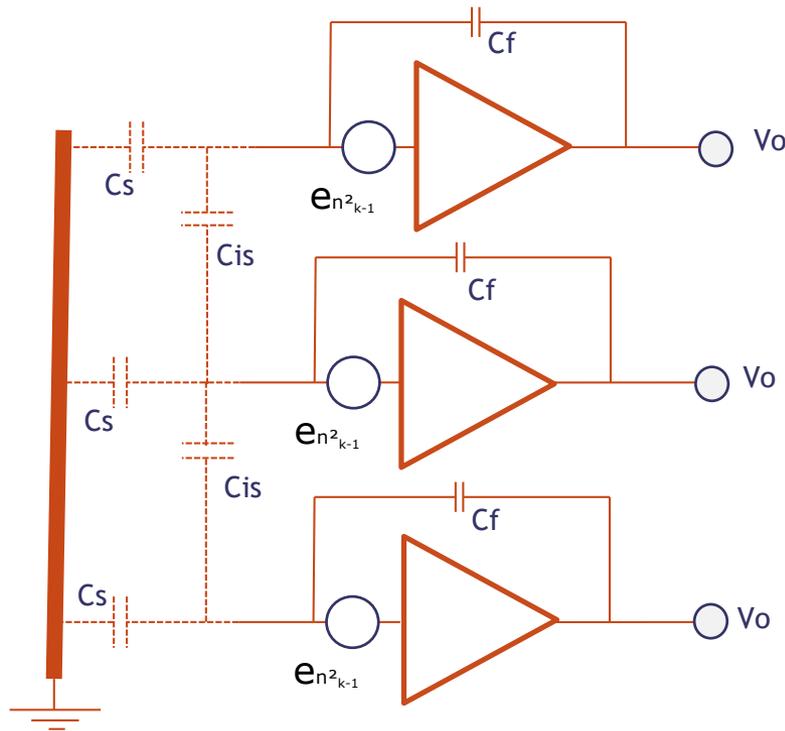
- Trace 0
- Trace 1
- Trace 2
- Trace 3
- Trace 4
- Trace 5
- Trace 6
- Trace 7
- Trace 8
- Trace 9
- Trace 10
- Trace 11
- Trace 12
- Trace 13



- Trace 0
- Trace 1
- Trace 2
- Trace 3
- Trace 4
- Trace 5
- Trace 6
- Trace 7
- Trace 8
- Trace 9
- Trace 10
- Trace 11
- Trace 12
- Trace 13



Les bruits typiques (4) : crosstalk



$$v_o^2 = e_{n^2_k} \cdot [(2C_{is} + C_s + C_f)^2 + 2C_{is}^2] / C_f^2$$

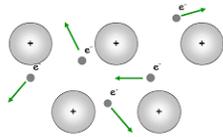
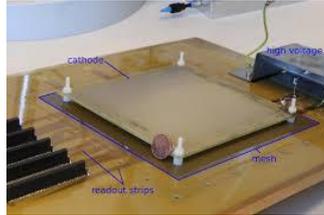
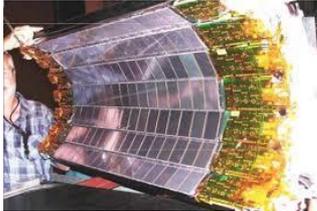
Capacité plan :

$$C = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot S / e_p$$

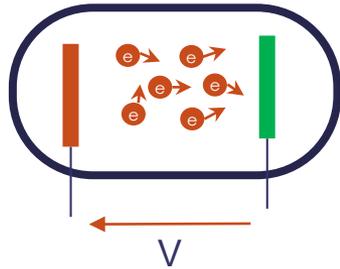
Crosstalk influence :

- Le Bruit
- Le Signal
- Les interférences

Les bruits typiques (5): bruit des détecteurs



On a une circulation naturelle des électrons
 → **courant continu dans le temps**



$$i = \frac{n \cdot e \cdot v}{l}$$

$$\langle di \rangle^2 = \left(\frac{n \cdot e}{l} \langle dv \rangle \right)^2 + \left(\frac{e \cdot v}{l} \langle dn \rangle \right)^2$$

- Porteurs et leur vitesse statistiquement non corrélés
- Variation du nombre de porteur
- Variation de leur vitesse

Bruit thermique, constante jusqu'à la limite de Planck

La variation du nombre de porteurs a plusieurs origines :

- **Emission de porteurs à travers une barrière de potentiel** : « shot noise » et à un spectre blanc (constant).
- **Piégeage de porteurs dans les impuretés des semi-conducteurs ou des gaz** : spectre de puissance de bruit dépendant inversement de la fréquence

Les bruits typiques (6): Bruit de la chaîne électronique

En temps qu'électronicien :

→ **comprendre et maîtriser** l'ensemble des composants de la chaîne de traitement de signal analogique

- les résistances, les capacités, les inductances et les transistors.

→ **des composants imparfaits**

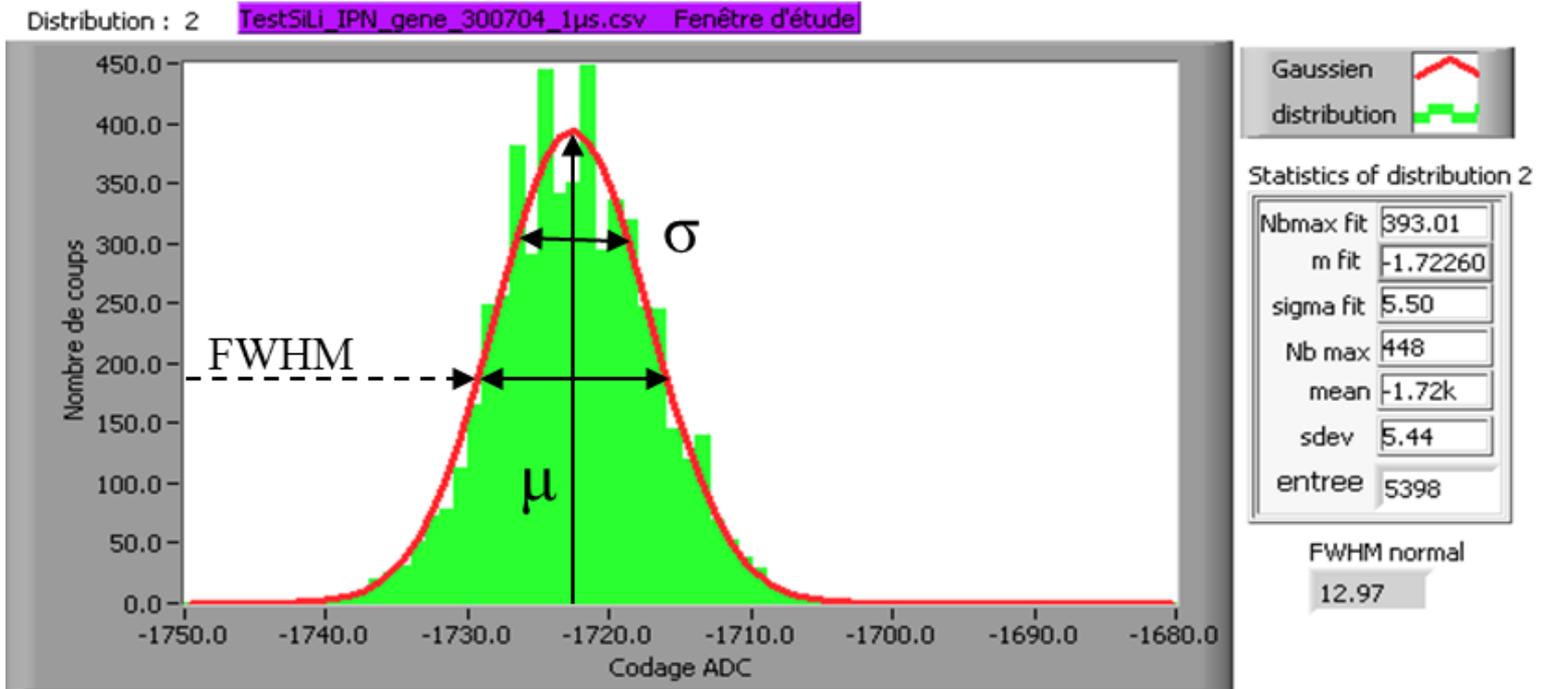
- des phénomènes naturels génèrent une fluctuation aléatoire des courants et tensions.

Objectif : comprendre la nature statistique des différents phénomènes pour les minimiser
avoir un signal utile bien supérieur aux signaux perturbant la mesure.

La résolution de la mesure dépend donc des différents bruits :

$$\sigma^2_{\text{total}} = \sigma^2_{\text{det}} + \sigma^2_{\text{pu}} + \sigma^2_{\text{ba}} + \sigma^2_{\text{elec}}$$

Les outils statistiques (1): Introduction



Phénomène aléatoire est défini par:

- Une distribution au sens des statistique :
 - ✓ Modèle Normal, Poissonien, de Weibull, binomial
- Une moyenne
- Une médiane
- Une valeur RMS → écart-type si modèle OK
- Valeur FWHM → Facilité de mesure (Full Width Half Maximum)

Les outils statistiques (2) : grandeurs statistiques usuelles

La statistique est la technique mathématique pour l'étude d'un ensemble de données observées, mesurées et les méthodes de recueils, d'analyse et de traitement de ces données. Chaque individu d'une population possède un ensemble de caractéristiques appelées variables aléatoires ou caractères. Pour chaque variable (une tension, un courant ou une charge dans notre cas), nous définissons N classes (intervalle de valeurs). Pour chaque classe, nous comptons le nombre de données dans l'intervalle et le nombre de données de la population à l'étude.

- La moyenne : $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^k f_i \cdot x_i$ avec f_i fréquence pour chaque classe.
- Les paramètres de dispersion :
 - L'étendue : $W = x_{max} - x_{min}$
 - Variance : $\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^k x_i^2 \cdot f_i$
 - L'écart-type : $\sigma = \sqrt{Variance}$

L'écart-type n'étant pas facilement mesurable sur une distribution, il est plus utile d'utiliser la largeur totale de la distribution à mi-hauteur, notée FWHM.

→ FWHM = 2.355 x écart-type.

La plupart des distributions des mesures sauf cas physique particulier (radioactivité avec une distribution poissonnienne) sera une distribution gaussienne, ou distribution normale.

Les outils statistiques (3) : Modèle Normal

Un variable aléatoire suit une loi normale ou gaussienne de paramètres (μ, σ^2) si elle admet pour densité de probabilité (=distribution) la fonction f définie par :

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

En effet, le théorème central limite dit que la somme de distributions statistiques quelconques est une distribution gaussienne.

Si $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est une suite de variable aléatoires, c.-à-d. de même espérance μ et de même écart-type $\sigma > 0$ alors, en posant $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$, on a :

$$\frac{\bar{X} - \mu}{\sigma / \sqrt{n}} \xrightarrow{L} N(0,1)$$

Mesure --> ensemble de phénomènes aléatoires → distribution Normale / gaussienne

Sinon --> calcul des moments d'ordre supérieur → détermination de la loi statistique

Analyse temporelle du bruit :

Hypothèses:

- **Stationnarité** : signaux issus d'un processus aléatoire
 - **Caractéristiques statistiques indépendantes du temps**
 - **Moyenne et écart-type constant**
 - **La matrice de variance – covariance est fonction d'une seule variable. Fonction de corrélation**
- **Ergodicité**: moyennes temporelles mesurées à un jour donné sont semblables à des moyennes d'ensemble effectué à un temps donné fixe et à des jours différents.

➔ L'analyse des signaux aléatoires à un moment donné possède les mêmes caractéristiques statistiques que les signaux pris plus loin dans le temps.

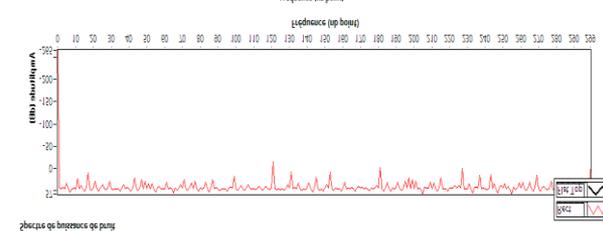
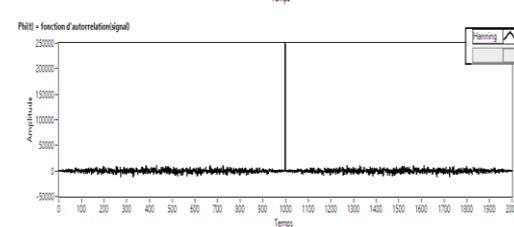
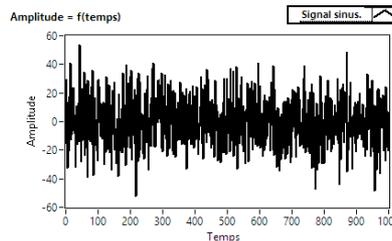
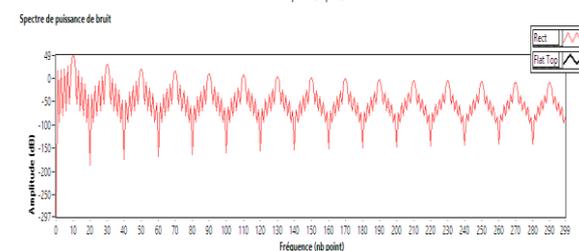
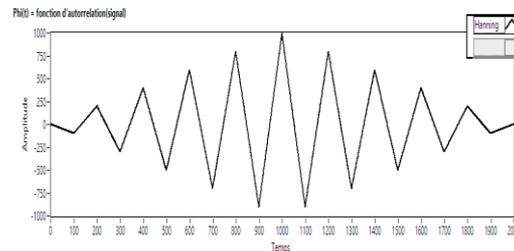
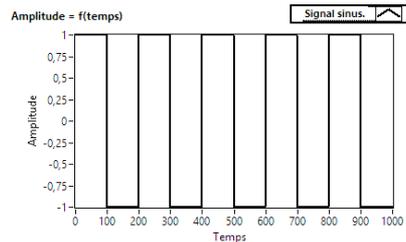
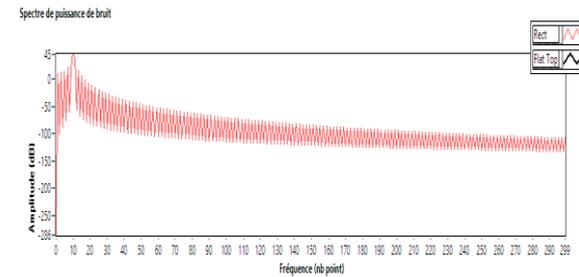
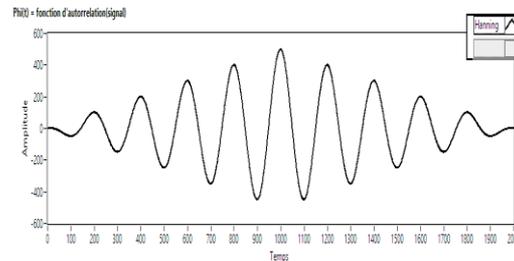
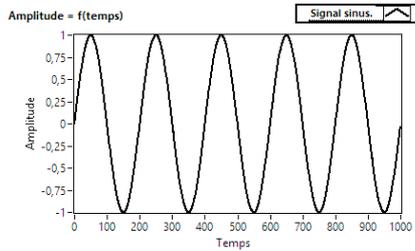
➔ Cela permet de définir le spectre en énergie du signal aléatoire

Analyse temporelle du bruit :

$$P = \lim_{T_1 \rightarrow \infty} \frac{1}{2T_1} \int_{-T_1}^{T_1} x^2(t) dt = \text{Variance}$$

Variance → fonction d'auto-correlation du signal aléatoire

→ Transformée de Fourier → Densité Spectrale de Puissance



Analyse temporelle du bruit :

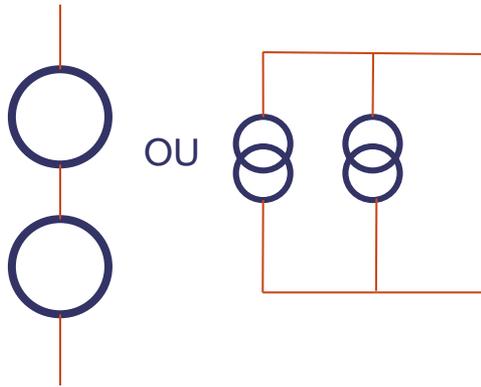
$$S_n(rms) = \left[\frac{1}{T} \int_0^T S_n^2(t) \cdot dt \right]^{1/2}$$

- $T \gg$; $S_n(rms)$ précis
- $S_n(t)$ peut être une tension ou un courant

$$V_{no}^2(rms) = \frac{1}{T} \int_0^T [V_{n1}(t) + V_{n2}(t)]^2 \cdot dt$$

$$V_{no}^2(rms) = V_{n1}^2(rms) + V_{n2}^2(rms) + \frac{2}{T} \int_0^T V_{n1}(t) V_{n2}(t) \cdot dt$$

aucune corrélation, $V_{no}^2(rms) = V_{n1}^2(rms) + V_{n2}^2(rms)$



Exemple : Quel est la valeur V_{no} pour $V_{n1} = 15\mu V$ et $V_{n2} = 5\mu V$? Quel valeur doit avoir V_{n1} pour que $V_{n2} = 5\mu V$ soit négligeable pour $V_{no} = 15\mu V$?

$$V_{no} = 15^2 + 5^2 \rightarrow V_{no} = 15,8 \mu V$$

$$15^2 = V_{n1}^2 + 5^2 \rightarrow V_{n1} = 14,14 \mu V$$

Une réduction de 5,73% de V_{n1} élimine l'influence de bruit de V_{n2} .

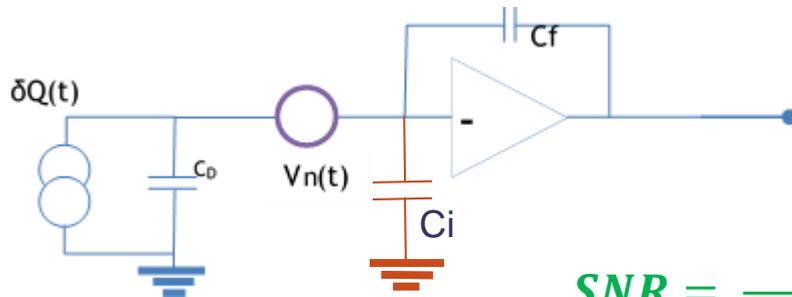
Analyse temporelle du bruit :

Pour comparer le signal utile et le niveau de bruit → rapport signal sur bruit :

$$SNR = 10 \cdot \log \left[\frac{\text{puissance du signal}}{\text{puissance de bruit}} \right] \text{ (dB)}$$

$$SNR = 10 \cdot \log \left[\frac{V_{v(rms)}^2}{V_{n(rms)}^2} \right] = 20 \cdot \log \left[\frac{V_{v(rms)}}{V_{n(rms)}} \right]$$

Application à une électronique Front-end



$$V_{in} = \frac{Q_{in}}{C_d + C_i}$$

Le bruit en entrée est V_n

$$SNR = \frac{Q_{in}}{V_n(C_d + C_i)}$$

- $SNR \gg 1$ si $C_d + C_i \ll$
- Depend de Q_{in}



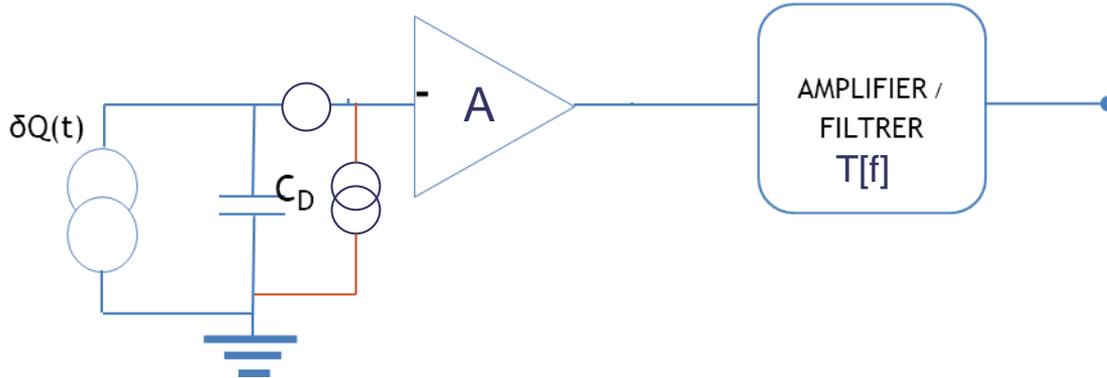
ENC → **SNR = 1** donc, $ENC = V_n(C_d + C_i)$
exprimé en e-rms

Charge équivalente de Bruit :

On veut le S/B le plus grand ⇒ la CEB la plus petite possible

Analyse temporelle du bruit :

Optimiser ENC dans le cas réel des détecteurs capacitifs,



$$V_s(t) = L^{-1} \left\{ \frac{Q \cdot A}{s(C_D + C_i)} \cdot T(s) \right\}$$

avec L^{-1} : Transformée de Laplace inverse

$$V_{max} = Q \cdot \text{MAX}[V_s(t)]$$

$$[V_n^2] = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} N(\omega) \cdot |T(\omega)|^2 \cdot d\omega \right]^{1/2}$$

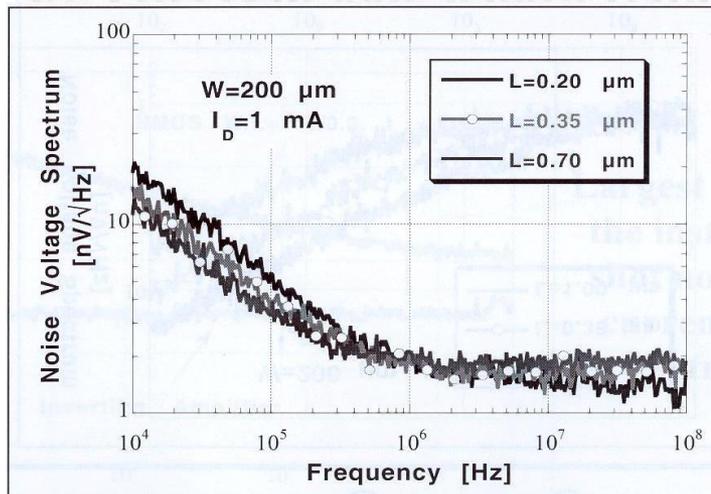
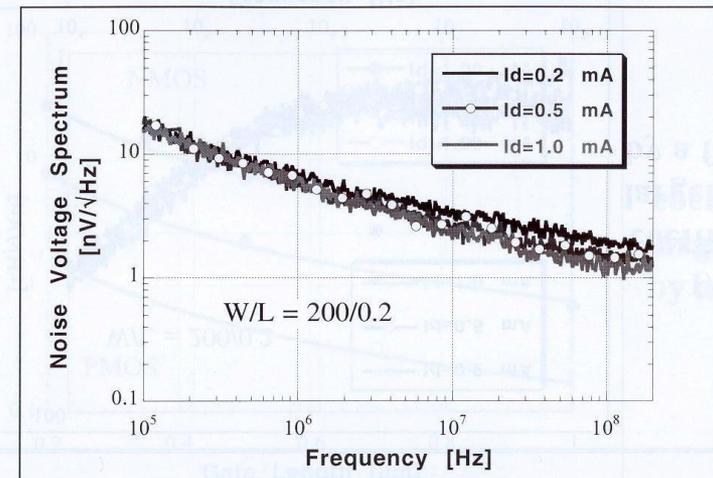
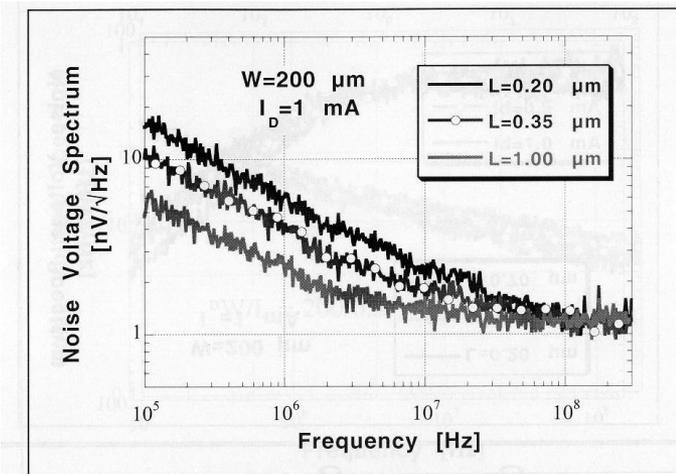
$$[V_n^2] = \left[\frac{1}{2\pi} A^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \left(a + \frac{b}{\omega^2(C_d + C_i)^2} \right) \cdot |T(\omega)|^2 \cdot d\omega \right]^{1/2}$$

$$\text{SNR} = \frac{\frac{Q \cdot A}{C_d + C_i} \cdot \text{MAX} \left\{ L^{-1} \left[\frac{T(s)}{s} \right] \right\}}{\left[\frac{1}{2\pi} A^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \left(a + \frac{b}{\omega^2(C_d + C_i)^2} \right) \cdot |T(\omega)|^2 \cdot d\omega \right]^{1/2}}$$

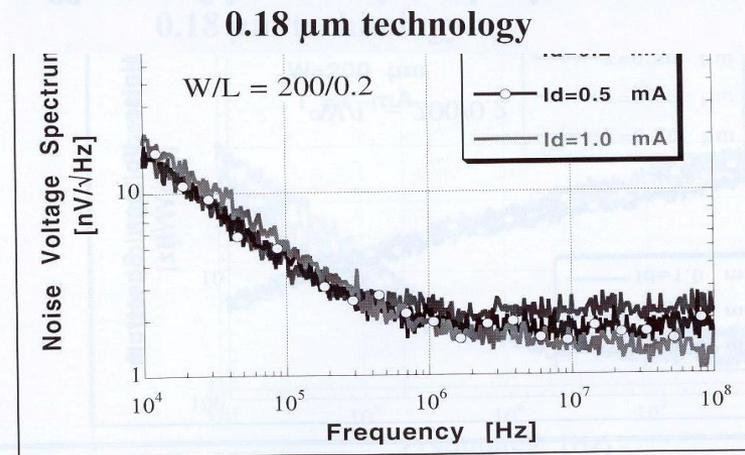
$$\text{ENC} = \frac{\left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(a(C_d + C_i)^2 + \frac{b}{\omega^2} \right) \cdot |T(\omega)|^2 \cdot d\omega \right]^{1/2}}{\text{MAX} \left\{ L^{-1} \left[\frac{T(s)}{s} \right] \right\}}$$

L'objectif est de déterminer $T(s)$ afin de minimiser ENC.

Densité spectrale des transistor MOS



0.18 μm technology



0.18 μm technology

Mesure de densité spectrale de bruit (M. Manghisoni et all –INFN Pavia -NSS2001)

Bruit ENC ramené en entrée + filtre shaper

- n ordre du filtrage
- Ts temps de pic

$$ENC_{TOT}^2 = ENC_d^2 + ENC_f^2 + ENC_o^2$$

where

Bruit
série

thermal

$$ENC_d^2 = \frac{4\gamma kTC_i^2}{gmq^2\tau_s} X(n)$$

$$X(n) = \frac{B(\frac{3}{2}, n - \frac{1}{2})n}{4\pi} \left(\frac{n!^2 e^{2n}}{n^{2n}} \right)$$

1/fnoise

$$ENC_f^2 = \frac{KF_F C_i^2}{C_{ox}^2 WL q^2} Y(n)$$

$$Y(n) = \frac{1}{2n} \left(\frac{n!^2 e^{2n}}{n^{2n}} \right)$$

Bruit
parallèle

shot noise

$$ENC_o^2 = \frac{2qI_o\tau_s}{q^2} Z(n)$$

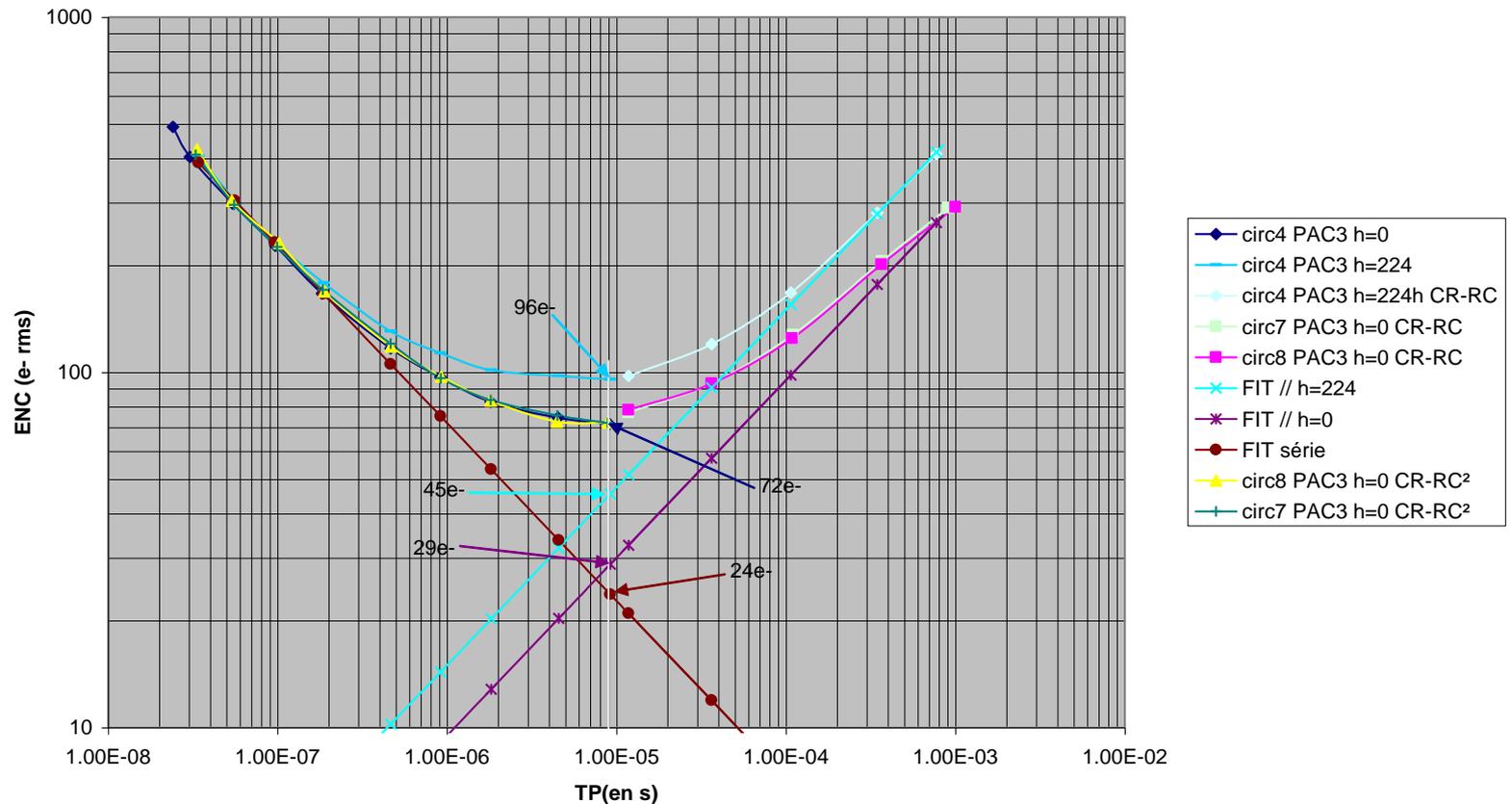
$$Z(n) = \frac{B(\frac{1}{2}, n + \frac{1}{2})}{4\pi n} \left(\frac{n!^2 e^{2n}}{n^{2n}} \right)$$

Ref.: Z.Y. Chang and W.M.C. Sansen : ISBN 0-7923-9096-2, Kluwer Academic Publishers, 1991

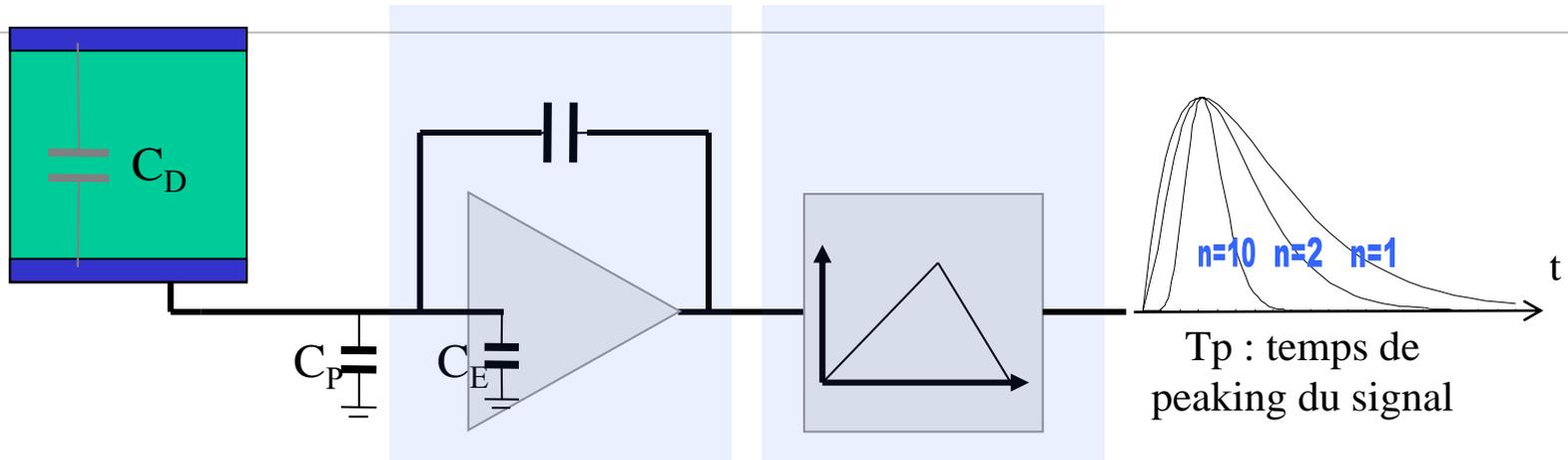
Mesure de $ENC=f(tpic)$

→ Permet de connaître le bruit d'une technologie en terme de possibilité pour le système préamplificateur + Shaper

PAC3 $ENC=f(T_P)$ avant et après 224h heures d'irradiations



Optimisation avec ENC



$$ENC^2 = ENC_{\text{série}}^2 + ENC_{1/f}^2 + ENC_{//}^2$$

$$\bullet ENC_{\text{série}} = A * C_{\text{tot}} * T_p^{-1/2}$$

$$\bullet ENC_{1/f} = C * C_{\text{tot}}$$

$$\bullet ENC_{//} = B * T_p^{1/2}$$

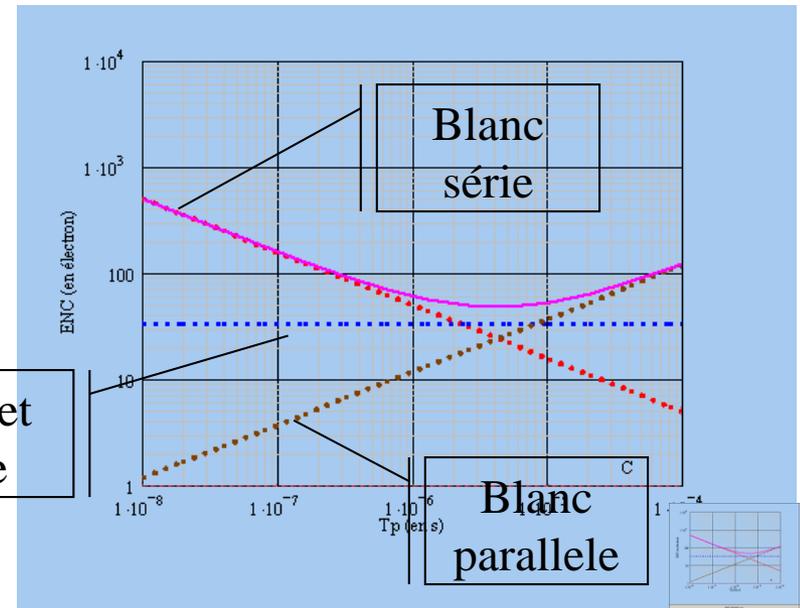
Optimisation du préamplificateur :

$$\text{Si } C_T = C_P + C_D$$

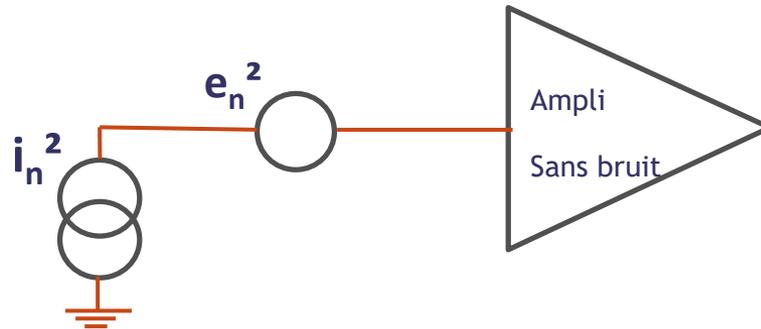
$$\text{Bruit série: } C_E = C_T / 3$$

$$\text{Bruit 1/f: } C_E = C_T$$

1/f // et
série



Modèle général :



Pour déterminer e_n^2 et i_n^2 ,

- Générateurs de signaux résultant de la physique de composants
- Connaître la répartition en énergie dans le domaine fréquentiel

Modèle électronique du Bruit: Bruit thermique

Le bruit thermique : le phénomène physique le plus rencontré dans les systèmes électroniques.

Il est causé par l'agitation aléatoire des porteurs dans un conducteur et semi-conducteur. Ce déplacement est semblable à un déplacement Brownien des particules.

Il a été observé pour la première fois par J.B Johnson (Bell Telephone Laboratory) en 1927 et son étude théorique a été réalisé par Nyquist en 1928.

Les charges dans un conducteur ont un déplacement aléatoire. Cette vibration est dépendant de la température. Comme chaque charge électronique, de valeur $q = 1,59 \cdot 10^{-19}$ C, est transporté par un porteur (électron ou ion), une multitude de petits courants nuls en moyenne est créée. Cette variation crée une tension instantanée à travers le conducteur.

La puissance de cette source est :

$$Nt = kT\Delta f. \quad K : \text{constante de boltzmann } 1,38 \cdot 10^{28} \text{ W.s/K}$$

T : Temperature absolue

Δf : Bande passante de bruit

La puissance maximale permise d'une source alimentant une résistance est, lorsque la résistance de charge égale la résistance de source :

$$Nt = (Et/2)^2/R = Et^2/4R \text{ avec } Et \text{ tension de source}$$

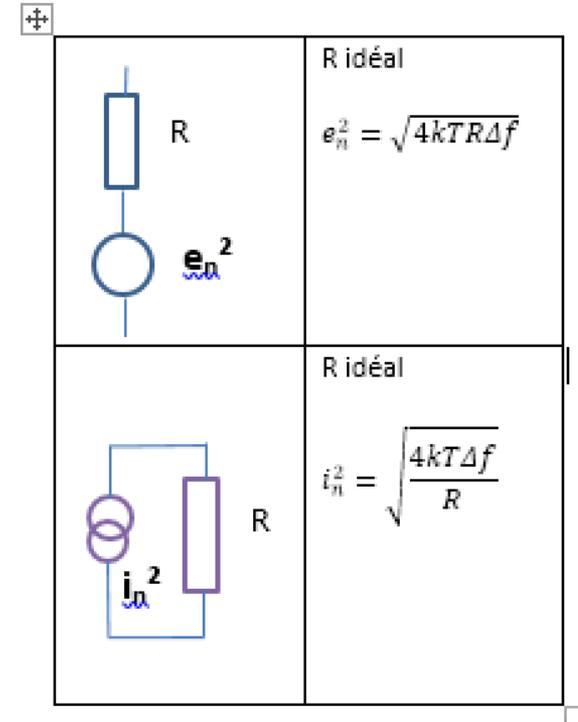
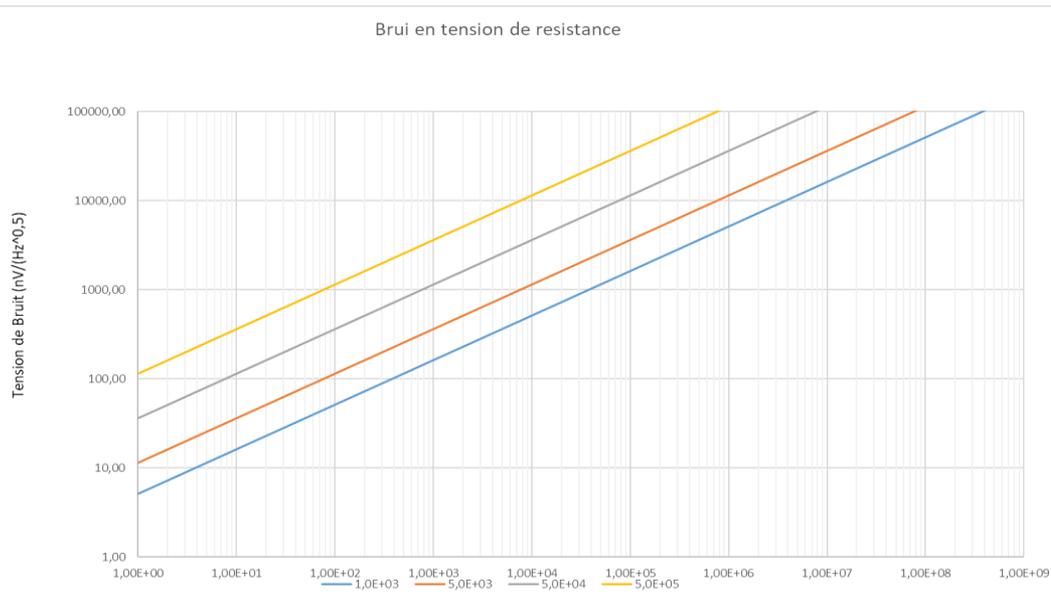
Ainsi,

$$V_{n(rms)} = \sqrt{4kTR \cdot \Delta f}$$

$$kT\Delta f = Et^2 / 4R \text{ donc } Et^2 = 4kTR \cdot \Delta f$$

Modèle électronique du Bruit: Bruit thermique

$$V_{n(rms)} = \sqrt{4kTR \cdot \Delta f}$$



Modèle électronique du Bruit: Bande passante de bruit

La bande passante de bruit est la largeur d'un filtre rectangulaire qui possède la même aire et le même gain A_0 qu'un filtre normal avec en entrée un bruit blanc. Cela permet de simplifier les calculs du bruit dans la bande passante du circuit. Le calcul pour un filtre du premier ordre est :

$$|A(f)|^2 = \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2} \right)^2$$

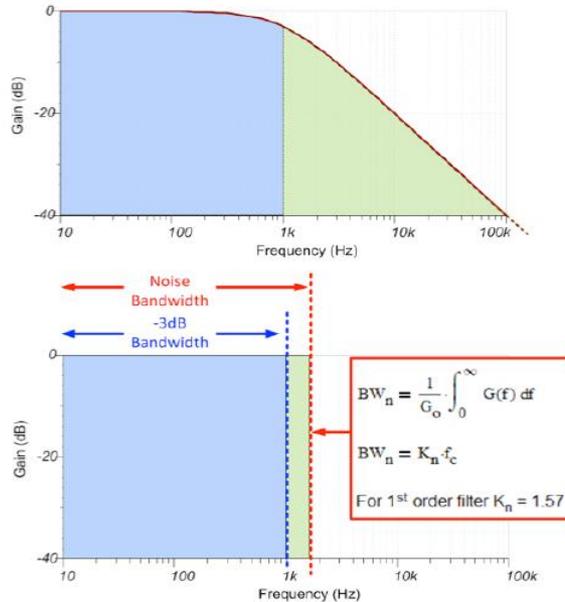
$$V_{ni}(f) = V_{wn}$$

$$V_{no(rms)}^2 = \int_0^{\infty} \frac{V_{wn}^2}{\left[1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right]^2} df = V_{wn}^2 f_0 \arctan\left(\frac{f}{f_0}\right) \Big|_0^{\infty} = \frac{V_{wn}^2 \pi f_0}{2}$$

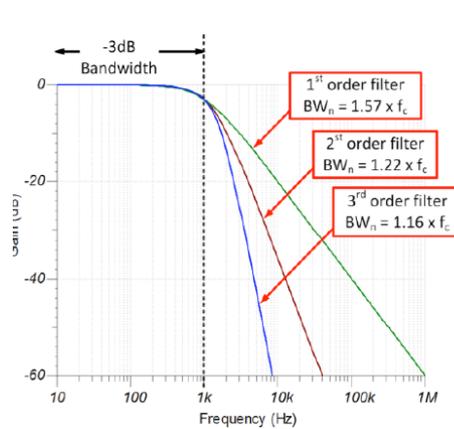
Ainsi, la bande passante de bruit d'un bruit blanc pour un filtre du 1^{er} ordre à -3dB égale $\frac{\pi f_0}{2}$

Modèle électronique du Bruit: Bande passante de bruit

Noise Bandwidth: Brick Wall Filter



Noise Bandwidth: Brick Wall Factor



Noise Bandwidth

$$BW_n = f_H \cdot K_n$$

Number of Poles	K_n Brickwall Correction Factor
1	1.57
2	1.22
3	1.16
4	1.13
5	1.12

TEXAS INSTRUMENTS

TEXAS INSTRUMENTS

Bruit en excès : En plus du bruit thermique dans une résistance, le matériau avec lequel est réalisée la résistance peut engendrer un bruit supplémentaire, appelé bruit d'excès. *Le courant de bruit augmente comme la racine carrée de l'inverse de la fréquence.*

<https://training.ti.com/ti-precision-labs-op-amps-noise-1>

Modèle électronique du Bruit: Bruit basse fréquence

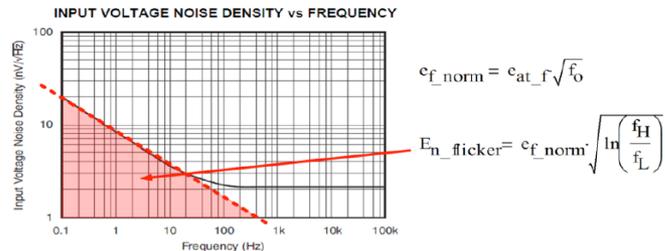
- Apparaît aux basses fréquences
- n'a pas de limites fréquentielles.
- Firlé et Winston ont mesuré ce bruit en $1/f$ jusqu'à 6.10^{-5} Hz.
- Il a été identifié en premier lieu dans les tube à vide et a été nommé « flicker noise ».
- Il possède plusieurs noms comme bruit d'excès, bruit rose, bruit semi-conducteur, bruit basse fréquence et bruit de contact.
- Le terme « bruit rouge » s'applique au bruit en $1/f^2$.

La puissance de bruit suit généralement une loi en $1/f^\alpha$ avec α compris entre **0,8 et 1.3**

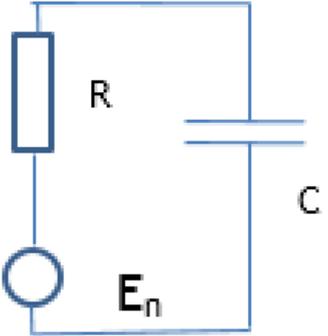
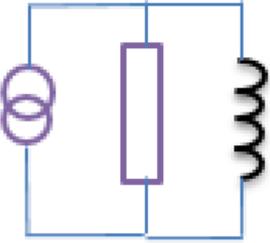
$$\frac{dNt}{df} = K_1 \frac{1}{f} \quad \int_{f_l}^{f_h} K_1 \frac{df}{f} = K_1 \cdot \ln\left(\frac{f_h}{f_l}\right) = K_1 \cdot \ln\left(1 + \frac{\Delta f}{f_l}\right) \approx K_1 \frac{\Delta f}{f}$$

Different Regions: 1/f or Flicker

$$S(f) = \frac{K_1}{f} \text{ V}^2/\text{Hz}$$



Modèle électronique du Bruit: Bruit capacitif & Inductif

	$e_{t_{no}} = e_t \cdot \left \frac{-jX_c}{R - jX_c} \right = \frac{e_t}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}}$ $e_{t_{no}}^2 = \frac{4kTR\Delta f}{1 + \omega^2 R^2 C^2}$ $\int_0^{\infty} [e_{t_{no}}^2(f)] \cdot df = \frac{kT}{C}$
	<p>De la même façon :</p> $I_{no(rms)}^2 = \frac{kT}{L}$

Ce bruit est négligeable sauf dans les montage ou R est la résistance d'un interrupteur. C'est utilisé dans les montage à capacités commutées ou les échantillonneurs des ADC.

Modèle électronique du Bruit: Bruit dans une diode

- Le courant traversant un composant n'est pas un mécanisme doux et continu
- la somme d'impulsions de courant causé par le flux de porteur transportant une charge
- un bruit appelé bruit de grenaille ou « shot noise » a.
- Ce phénomène est observé dans les composants ayant une barrière de potentiel type diode.



$$\frac{dI_{sh}^2}{df} = 2qI_{dc}$$

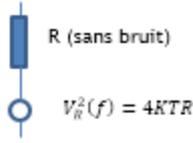
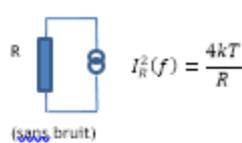
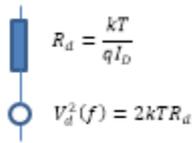
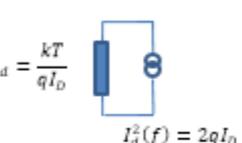
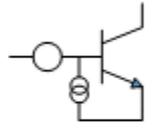
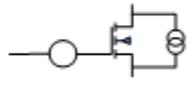
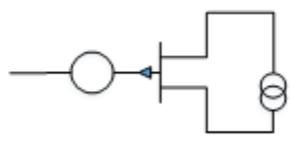
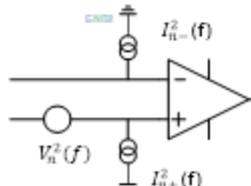
⊕



⊖

Modèle électronique du Bruit: schéma équivalent

VIII.3.5 Schéma équivalent pour l'ensemble des composants électroniques

Composants	Modèles de bruit	
Résistance	 <p>R (sans bruit) $V_n^2(f) = 4KTR$</p>	 <p>(sans bruit) $I_n^2(f) = \frac{4kT}{R}$</p>
Diode	 <p>$R_d = \frac{kT}{qI_D}$ $V_d^2(f) = 2kTR_d$</p>	 <p>$R_d = \frac{kT}{qI_D}$ $I_d^2(f) = 2qI_D$</p>
Transistor bipolaire	 <p>Sans Bruit $I_n^2(f) = 2q \left(I_B + \frac{kI_B}{f} + \frac{I_C}{ \beta(f) ^2} \right)$</p>	<p>$V_n^2(f) = 4kT \left(r_b + \frac{1}{2g_m} \right)$</p>
Transistor MOS		<p>$V_n^2(f) = \frac{k}{WLC_{ox}f}$ $I_n^2(f) = 4kT \left(\frac{2}{3} \right) g_m$</p>
Transistor JFET		<p>$V_n^2(f) = 4kT \left(r_b + \frac{2}{3g_m} \right)$ $I_n^2(f) = 2q \left(\frac{kI_{DS}}{f} + \frac{k'I_{DS}}{f^2} \right)$</p>
Ampli opérationnel	 <p>Les valeurs dépendent des amplis Les DSP de bruit ne sont pas corrélées</p>	

Choisir les technologies minimisant les bruits suivant le circuit :
Résistance,
Diode,
Transistors,
AOP

→ banc de mesure de bruit pour sélectionner les composants

Conclusion :

1. Le problème du bruit est crucial en mesure
 2. La compréhension est basé sur des outils statistiques
 3. La modélisation est faite en densité spectrale de puissance de Bruit
 4. On a une relation entre la valeur RMS et le DSP en tension/courant de bruit:
 - Intégration en fréquence de la DSP = Valeur RMS de bruit
1. Il faut tester les composants en bruit. On risque sinon de ne pas avoir ce qu'on attend.
 2. Les modèle SPICE ne sont pas forcément très juste / datasheet
 3. On diminue le bruit en limitant la bande passante à ce qui nous est strictement utile
 4. On optimise le rapport signal/bruit ou on minimise l'ENC