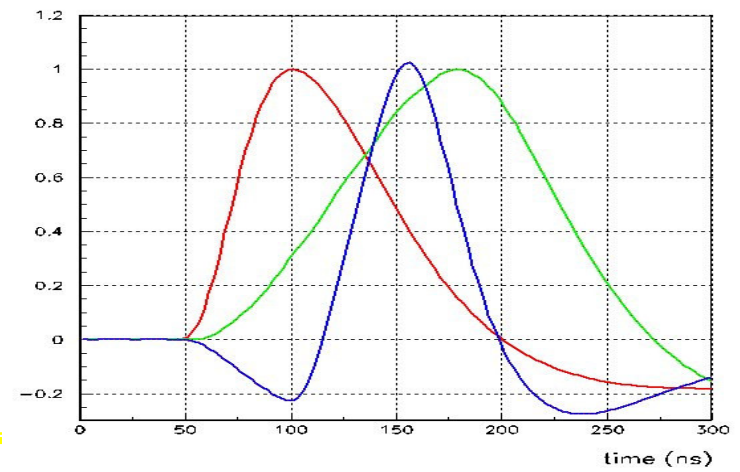
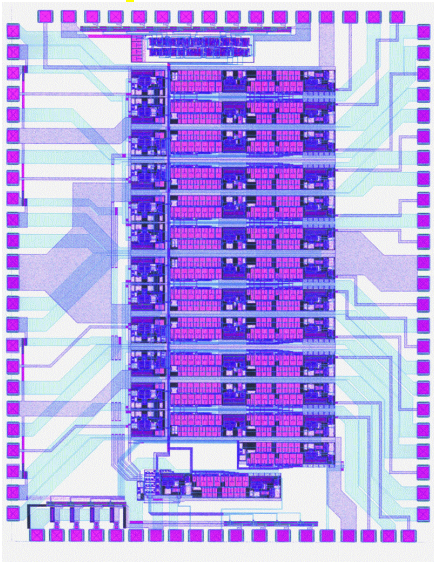
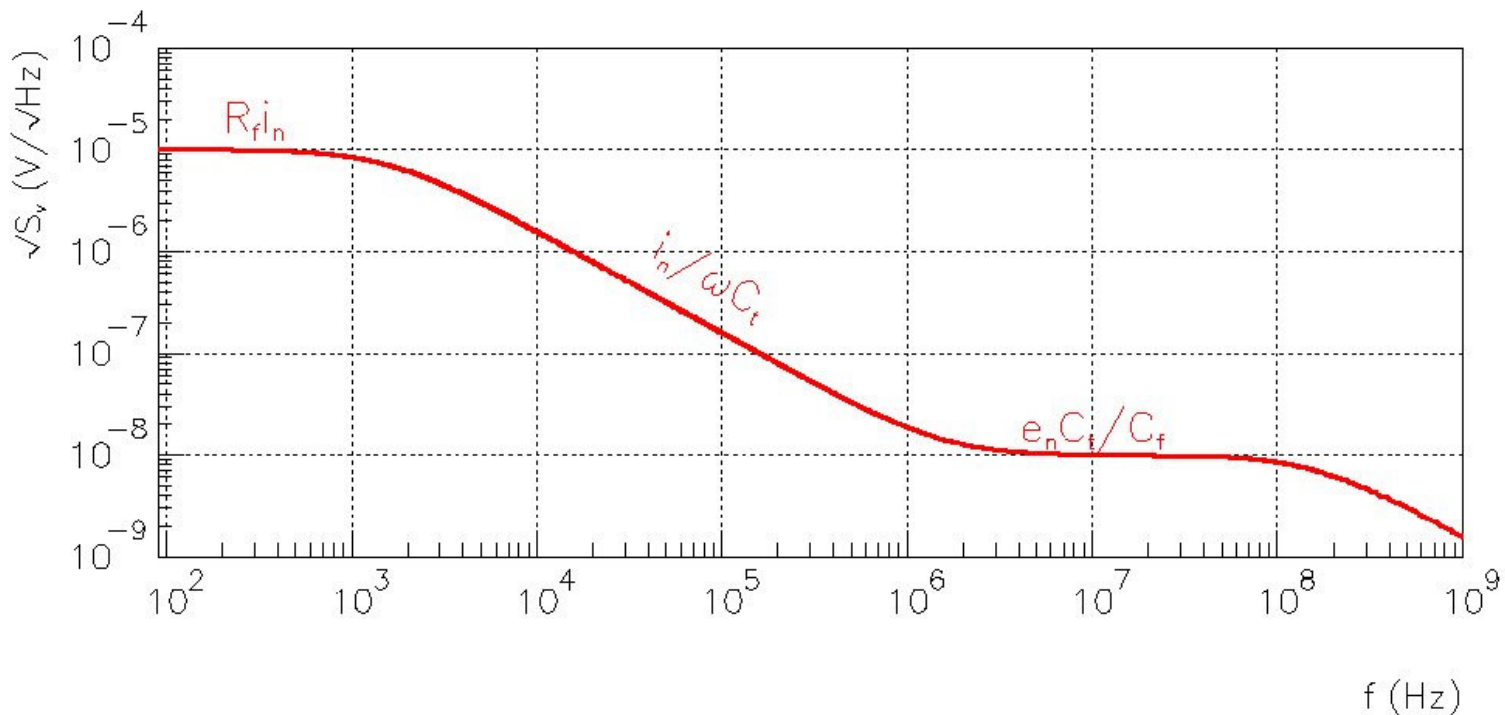


3. Filtrage



Filtrage optimal

- Densité spectrale de bruit en sortie de préampli
 - Bruit série en $e_n C_t / C_f$
 - Bruit parallèle en $i_n / \omega C_t$
 - Fréquence charnière de bruit : $f_c = i_n / 2\pi e_n C_t$



Filtrage optimal

■ Rappel théorème filtrage optimal

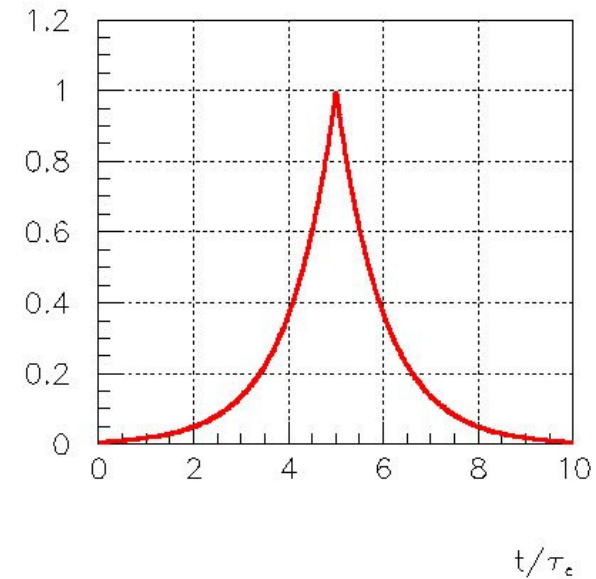
- Pour un signal $x(t)$ noyé dans un bruit blanc, le signal/bruit optimal est obtenu par un filtre de réponse impulsionnelle : $h(t) = x(t_0 - t)$
- NB : ce filtre est non causal

■ Cas du préampli de charge

- 1. Blanchir le bruit : filtre passe haut à t_c : $H(s) = ts / (1 + Ts)$
- 2. Filtre optimum : $H(s) = ts / (1 - ts)$
- réponse impulsionnelle $\exp(t_0 - t)$
- Signal après filtrage : « infinite cusp »

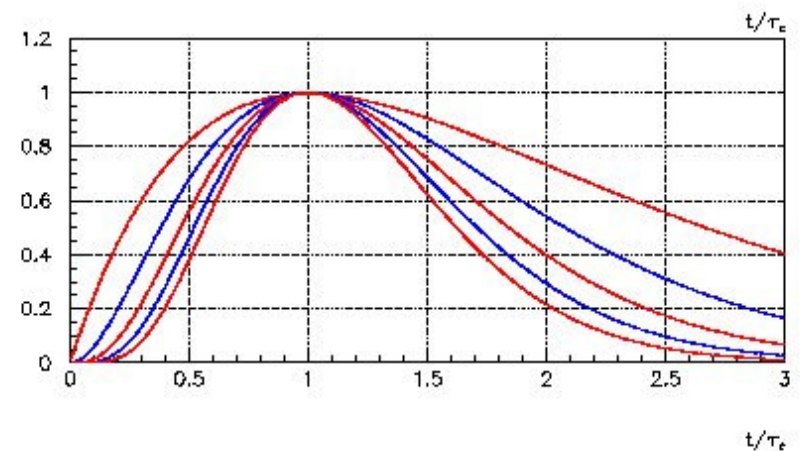
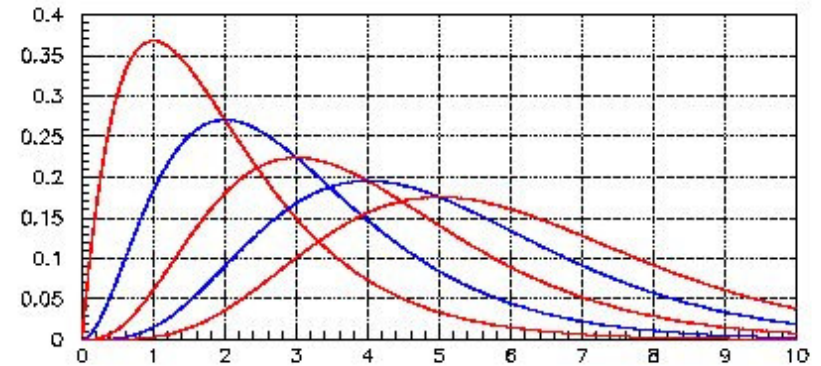
■ Bruit

- DSB : $S_v = (e_n C_t / C_f)^2$
- Bruit rms : $v_n = e_n C_t / 2 C_f \sqrt{t_c}$
- $(ENC)^\infty = \sqrt{e_n C_t i_n}$
- \sqrt{f}



Filtrage CRRCn

- **Filtre idéal approché par 1 différentiation et n intégrations : CRRCn**
 - Filtre passe-bande :
 - Passe-bas pour couper le bruit haute fréquence
 - Passe-haut pour enlever le bruit parallèle
 - Fonction de transfert :
$$H(\omega) = j\omega\tau / (1 + j\omega\tau)^{n+1}$$
 - τ est la constante de temps du filtre (« shaping time »)
- **Signal en sortie de filtre**
 - $V(t) = (t/\tau)^n \exp(-t/\tau)$
 - Maximum en $t_{\max} = n \tau$



Step output of CRRCⁿ shapers (n=1->5)

Bruit après filtrage CRRCn

■ Bruit rms après shaping

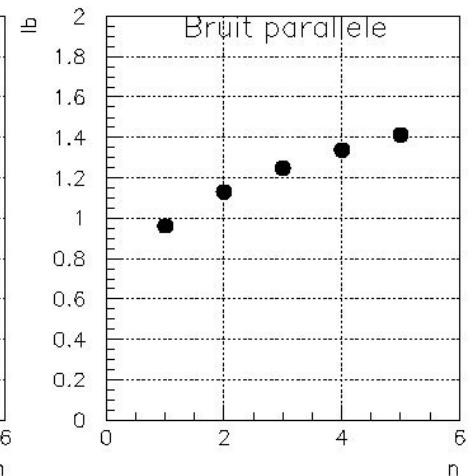
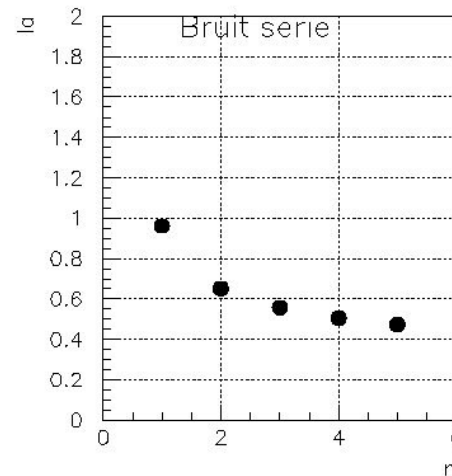
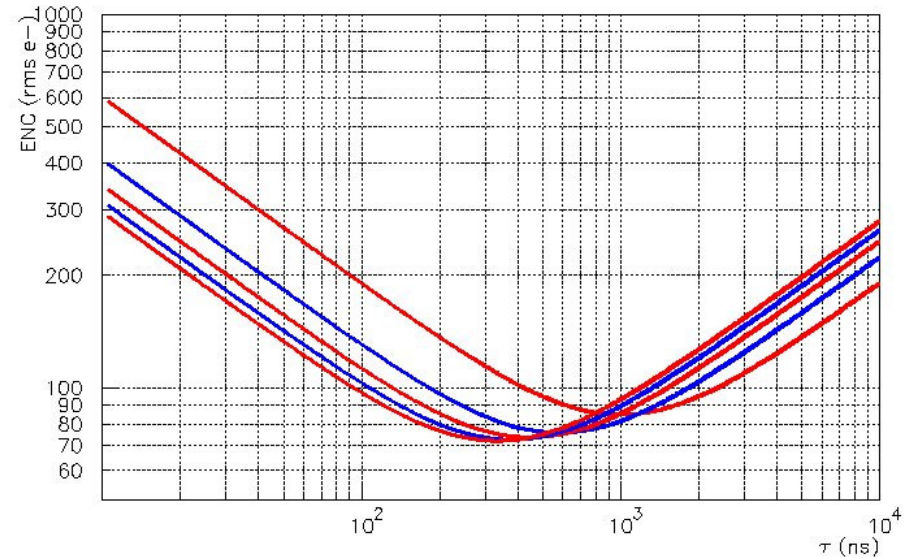
- $V_n^2 = \int S_v(\omega) |H(\omega)|^2 d\omega / 2\pi$
 $= I_a e_n^2 C_d^2 / \tau C_f^2 + I_b \tau i_n^2 / C_f^2$
- I_a and I_b sont appelées intégrales de bruit série et de bruit parallèle. Elles ne dépendent que de n

■

■ Charge equivalente de bruit

- Bruit série en $1/\sqrt{\tau}$
- Bruit parallèle en $\sqrt{\tau}$
- Bruit 1/f indépendant de τ
- Shaping time optimum $\tau_{opt} = \tau_c / \sqrt{2n-1}$

■ $ENC = I_a(n) e_n C_f / \sqrt{\tau} \oplus I_b(n) i_n^* \sqrt{\tau}$



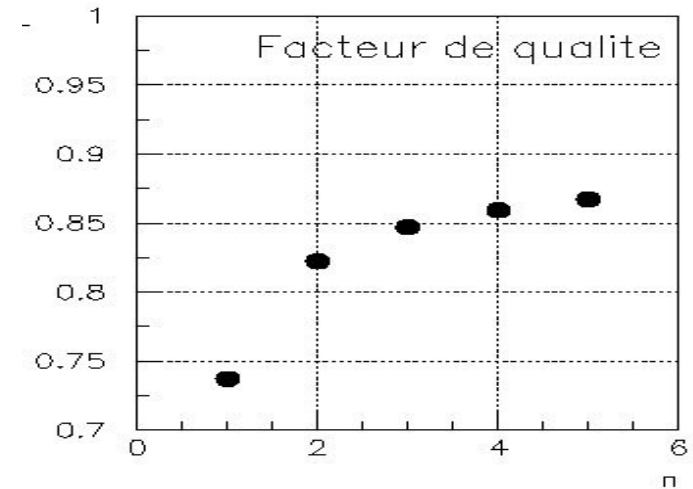
Bruit après filtrage CRRCn

■ Facteur de qualité

- $F = ENC(n) / (ENC)_{\infty}$
- Au delà de l'ordre 2, peu d'amélioration

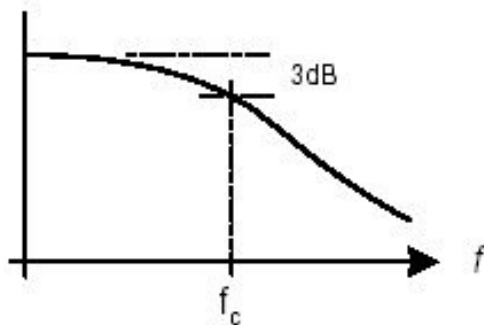
■ Filtres pseudo gaussiens

- Pôles complexes \rightarrow amélioration de la symétrie montée-descente
- Filtres de Bessel du n-ème ordre
- $h(t) = \sin kx e^{-x}$

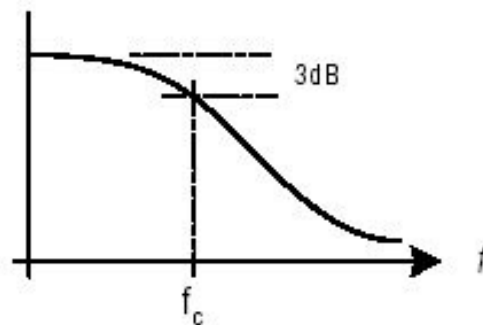


Filtrage : généralités

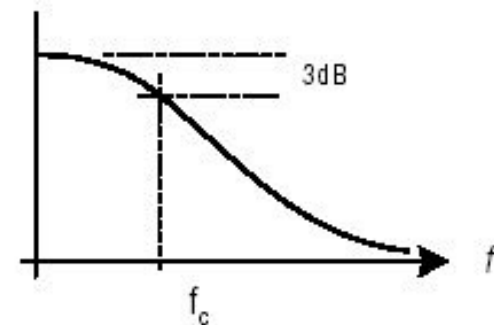
■ Différents types de filtres



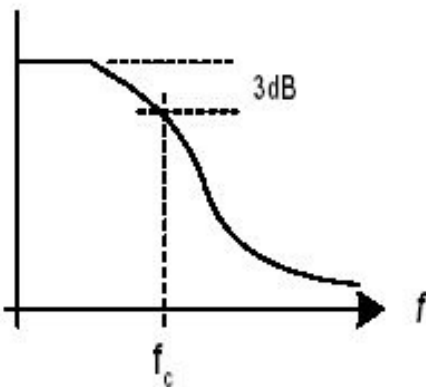
Gaussian Magnitude



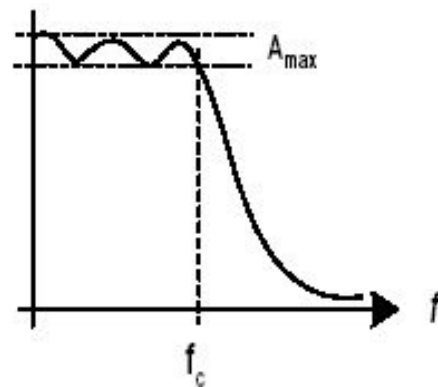
Bessel



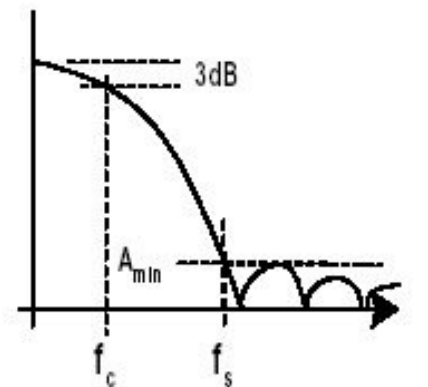
Equiripple Group Delay



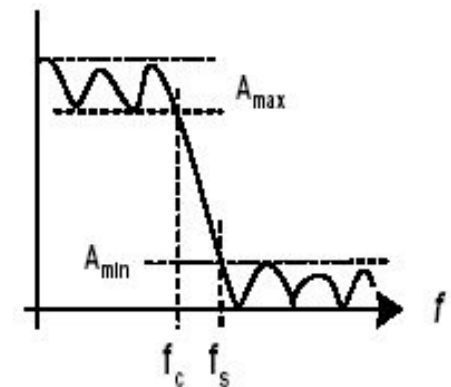
Butterworth



Chebyshev



Inverse Chebyshev



Cauer-Chebyshev
(elliptical)

Filtre CRRC2

■ Fonction de transfert

- $H(\omega) = j\omega\tau / (1 + j\omega\tau)^3$
- Maximum en $f = 1/2\pi\sqrt{2} \tau$
- Amplitude max :

■ Réponse temporelle à l'échelon

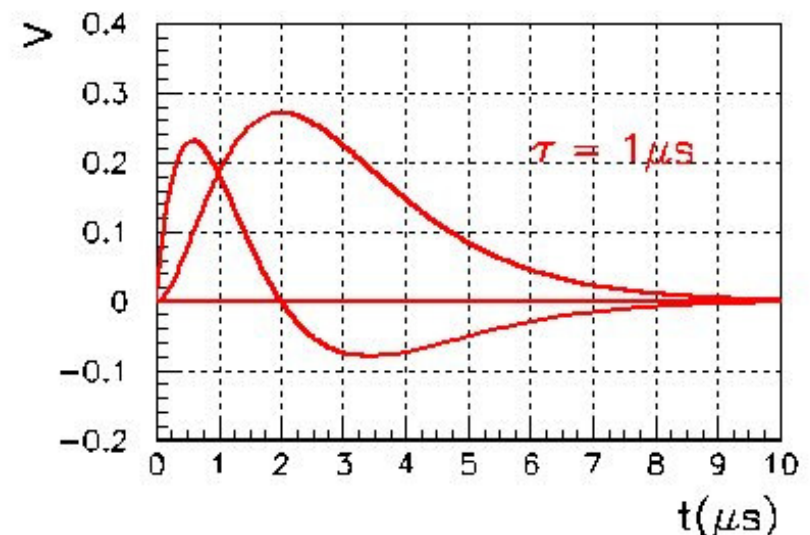
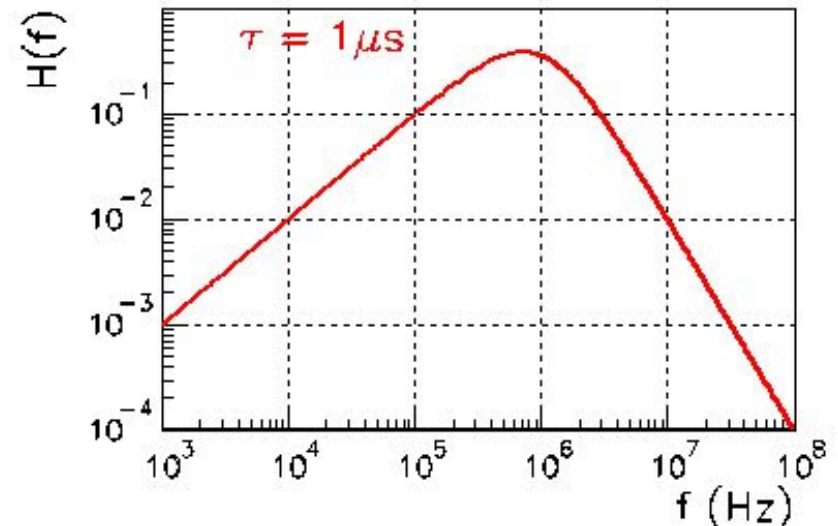
- $h(t) = x^2/2 e^{-x}$
- Maximum à $t = 2 \tau$
- Amplitude au maximum : $v_{max} = 0.2707$
- Peaking time 5-100% $t_p = 1.82 \tau$

■ Réponse temporelle à l'impulsion

- $h(t) = (2-x)/2\tau x e^{-x}$
- Maximum à $t = 0.56 \tau$
- Amplitude au maximum : $v_{max} = 0.2306/\tau$
- Peaking time 5-100% $t_p = 1.82 \tau$

■ Bruit

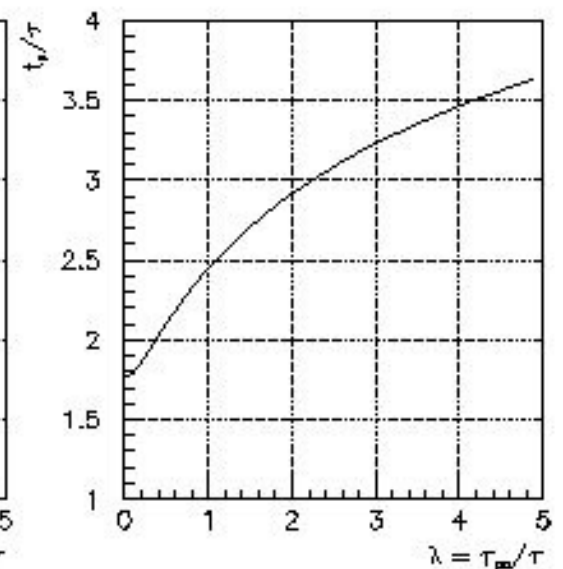
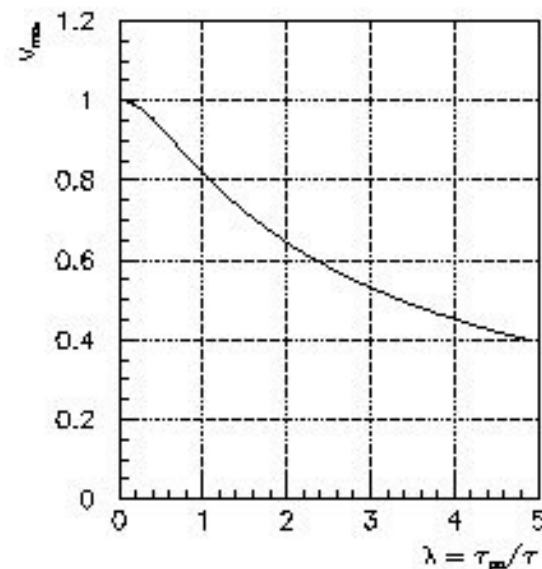
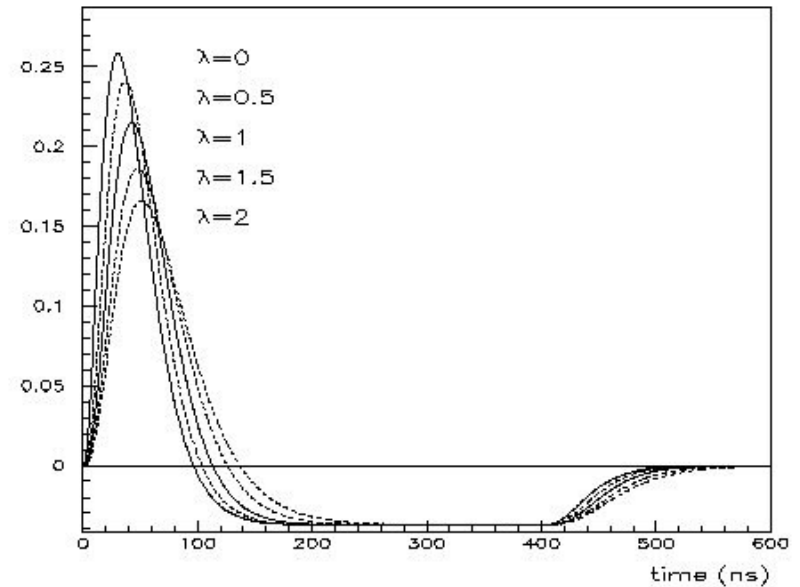
- Bruit $rms V_n = 0.957 / \sqrt{\tau}$
- $ENC = 174 e_n C_t / \sqrt{t_p} (\delta) \oplus 166 i_n \sqrt{t_p} (\delta)$



Déficit ballistique

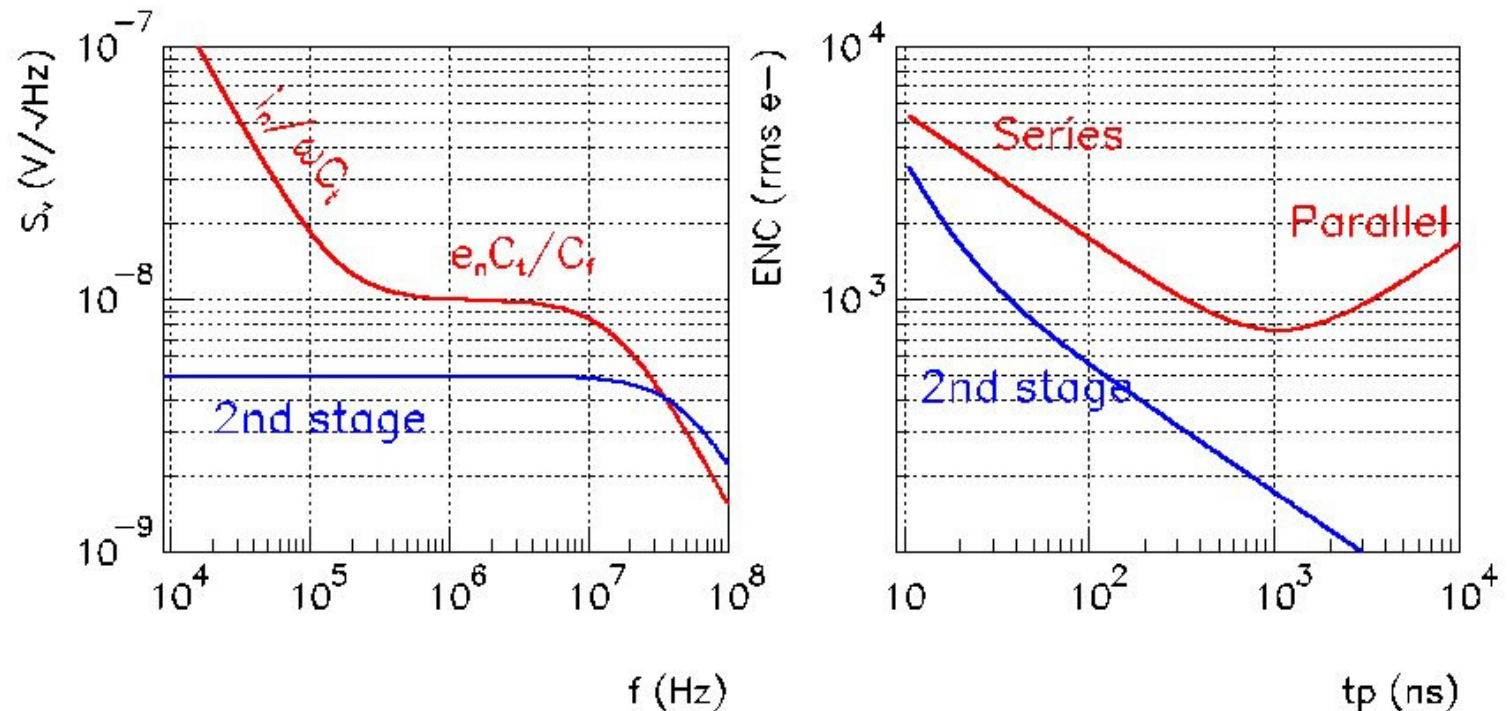
■ Effet du temps de montée du préampli

- Augmentation du peaking time
- Diminution du signal = déficit ballistique
- En fonction de $\lambda = T_{\text{preamp}} / T_{\text{shaper}}$



Bruit du shaper

- Le bruit du shaper est équivalent à un bruit série
 - Il s'ajoute quadratiquement au préampli
- Le temps de montée du préampli modifie le temps de shaping effectif
 - Mesurer le peaking time $t_p(\delta)$ (5-100%)



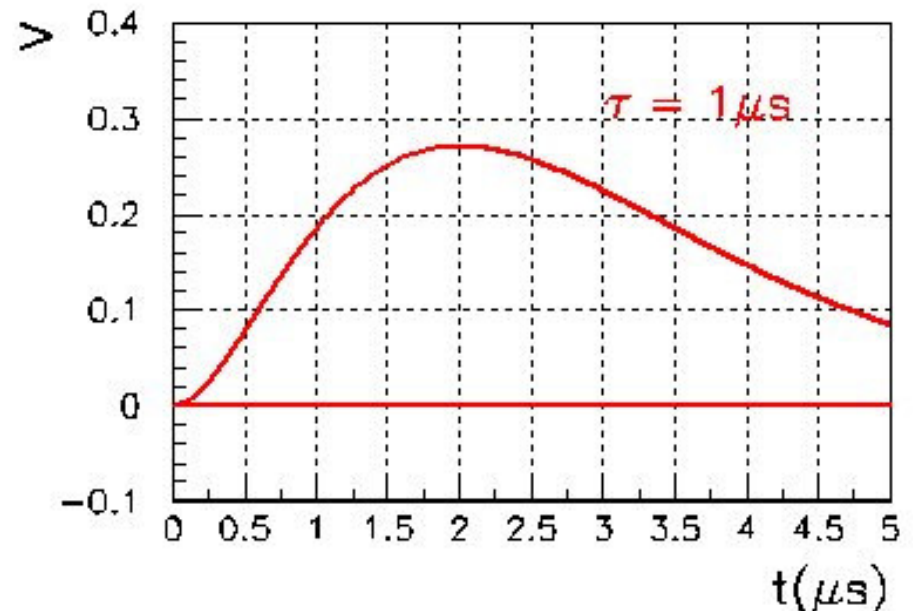
Mesures du shaper

■ Mesure du peaking time

- Fit d'une parabole autour du max (sur les points entre 95% et max)
- A partir du sommet, redescendre et déterminer le premier point en-dessous de 5%
- Fit d'une droite entre ce point et le suivant, puis calcul du point exactement à 5%

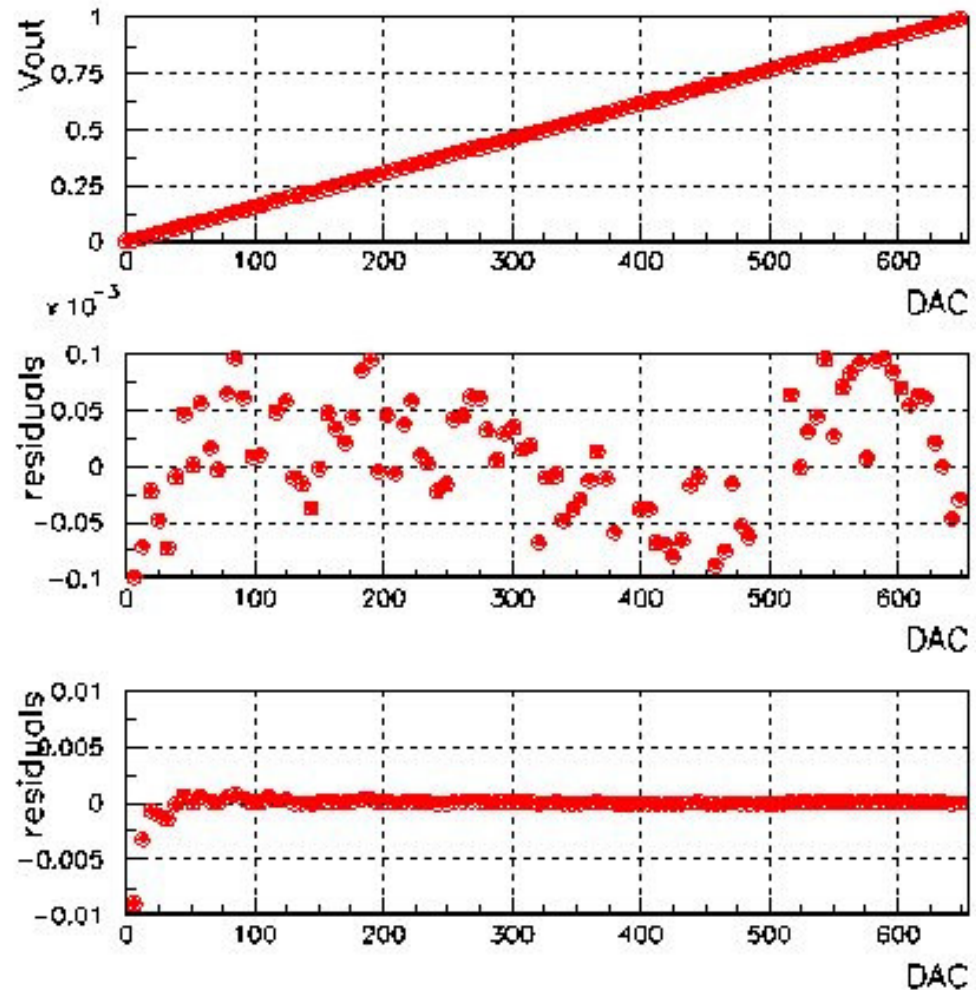
■ Mesure des intégrales de bruit

- $I_a = \frac{1}{2} \int (dh/dt)^2(t)dt / h_{\max}^2$
- $I_b = \frac{1}{2} \int h^2(t)dt / h_{\max}^2$



Mesure de la linéarité

- **Générateur d'impulsions de précision**
 - Voir calibration ATLAS
- **Carte d'acquisition 12 bits**
 - À l'oscillo, les changements de calibres dominant la non-linéarité
- **Calculer les résidus**
 - Non-linéarité intégrale INL
 - $INL = (Data - fit) / max$
 - $INL \neq (Data - fit) / data$
- **Raccordement des gammes**
 - Segmentation de la dynamique les lectures multi-gain

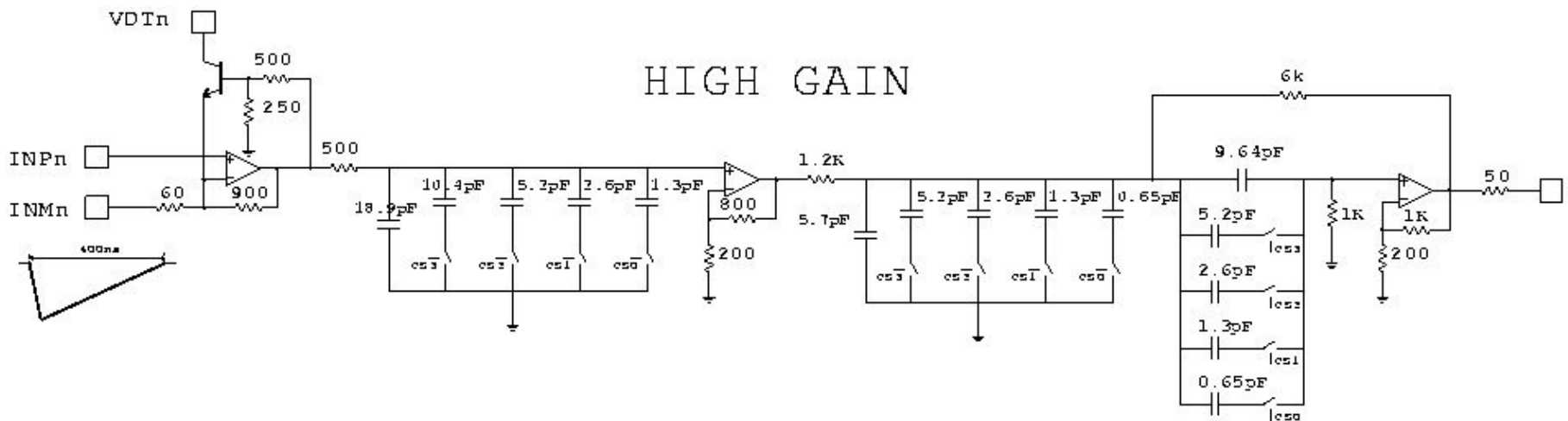
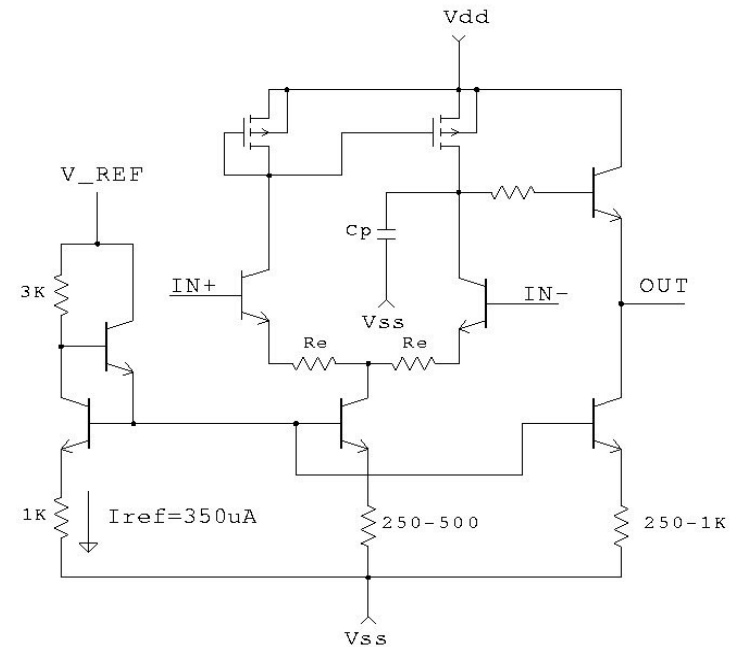




ATLAS : LAr shaper

■ CRRC² architecture : Sallen Key

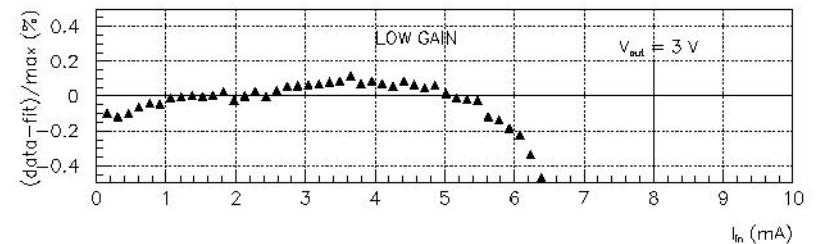
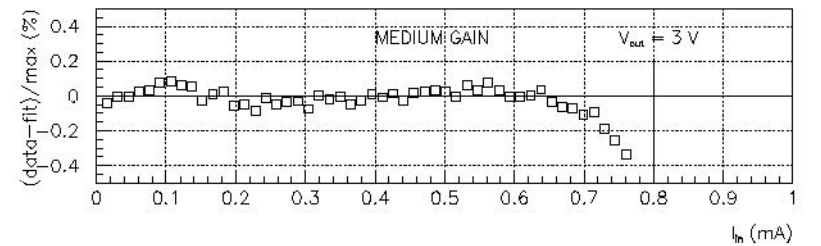
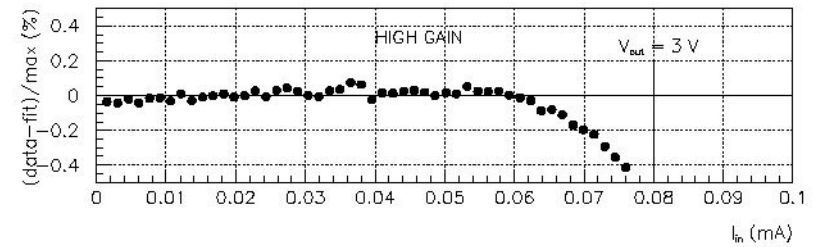
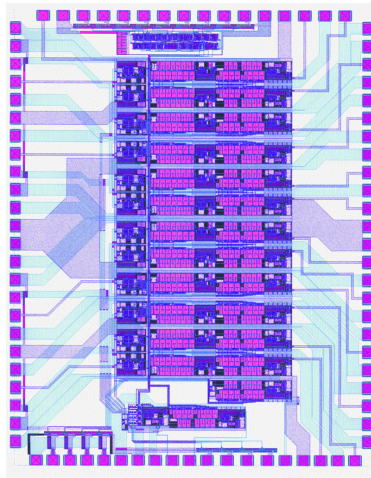
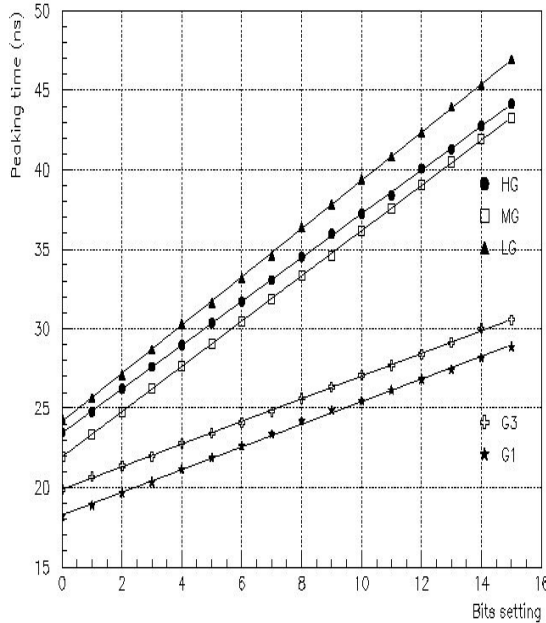
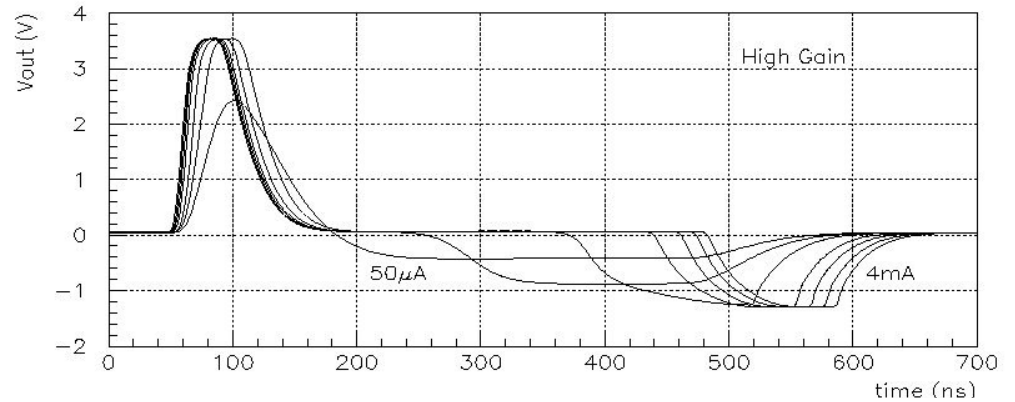
- Trigain : 1, 10, 100,
- Gamme dynamique 18 bits ($10 \mu\text{V eq} - 3 \text{ V}$)
- Time constant : $\tau = 13\text{ns} \rightarrow 50 \text{ ns peaking time}$
 - Trimming par **fusibles** to $\pm 1 \text{ ns}$ pour compenser les variations $\pm 10\%$ sur Capas et $\pm 10\%$ sur Résistances
- Basé sur un Opamp bas-bruit
 - $e_n = 2 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ $G_0 = 600$ $\text{BW} = 300 \text{ MHz}$
 - Antisaturation transistor for high gain
- Dissipation : 100 mW/ch





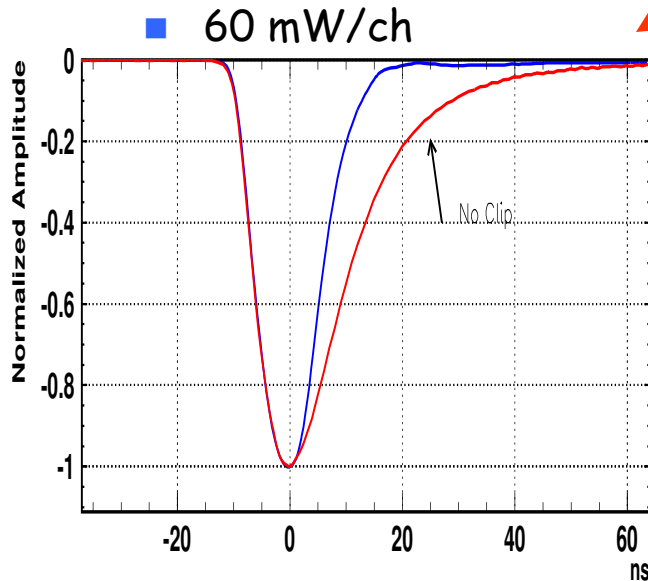
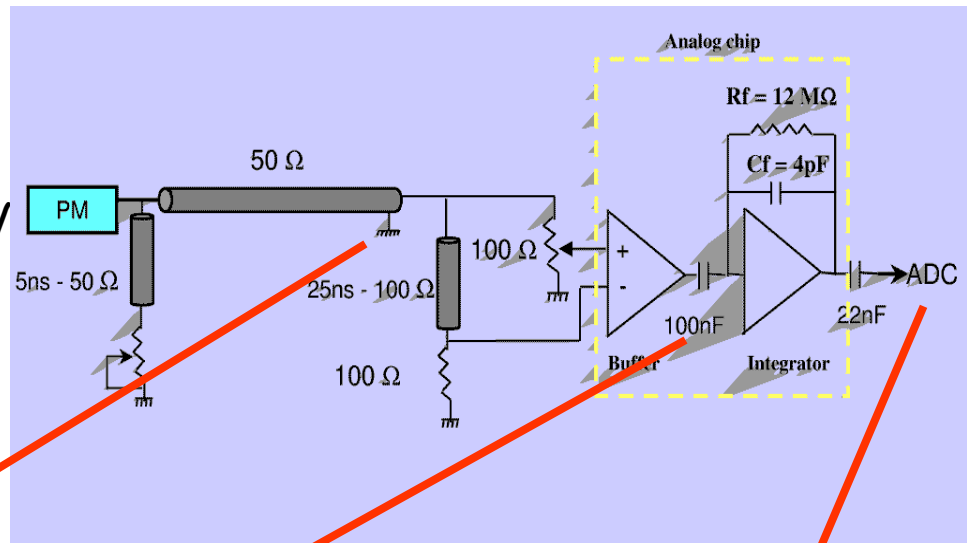
ATLAS : LAr shaper Performance

- **ASIC 4 channels 3 gains**
 - 1.2 μm AMS BiCMOS
 - 50 000 chips Produced in 20000
 - Yield : 85%
- **Performance**
 - Peaking time within 1 ns
 - Linearity : $< 0.2\%$ on three gains
 - Crosstalk $< 0.1\%$

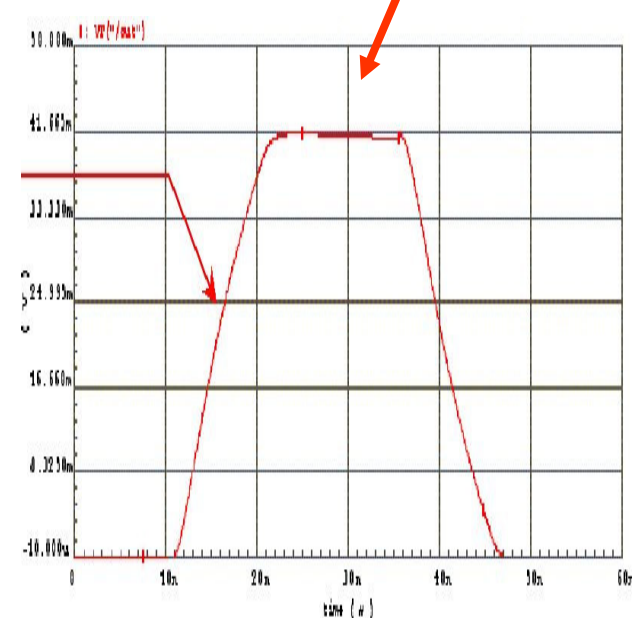
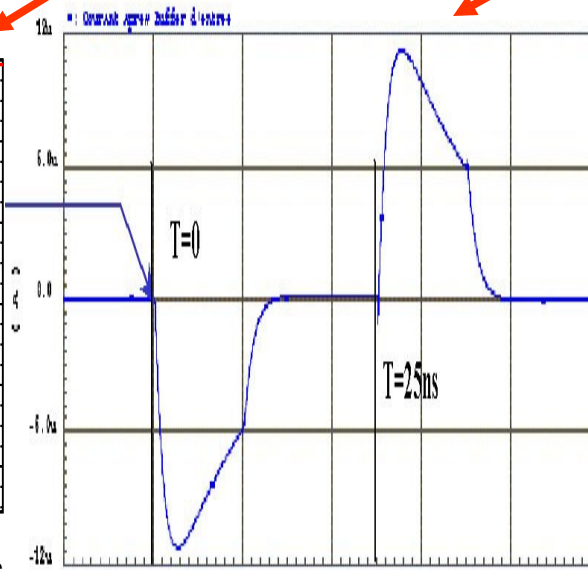


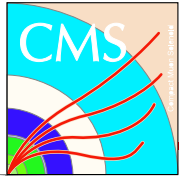
LHCb : Ecal shaper principle

- shape pulse in less than 25 ns
 - Minimize pileup
 - Provide flat top of 3 ns
- Noise < 1 LSB (250 μ V, 2.5 MeV)
- Architecture
 - Delay line clipping to remove PM trailing edge
 - Deadtimeless integrator
 - AMS 0.8 μ m BiCMOS (4 mm²)
 - 60 mW/ch



Normal and Clipped (5 + .5 ns 23 Ohms) Signal
15-20 mars 2004





CMS PS : Delta shaper

Dual gain

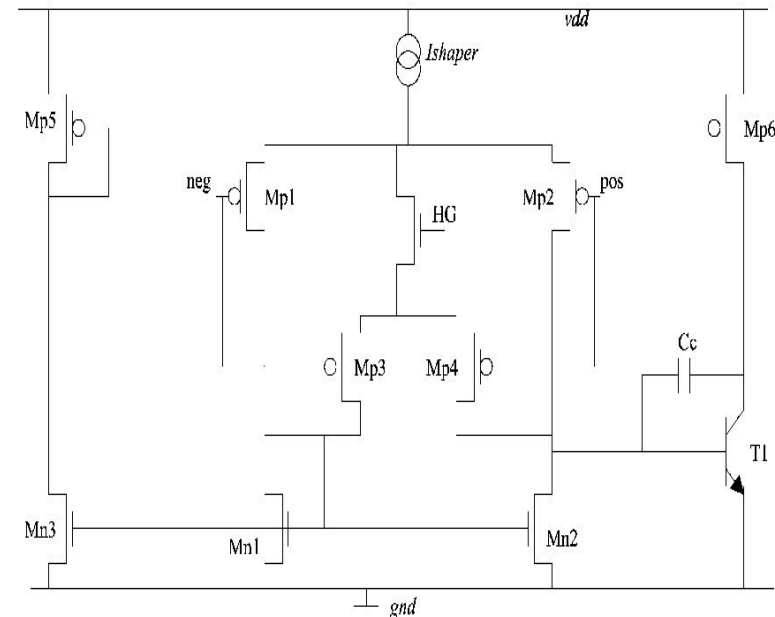
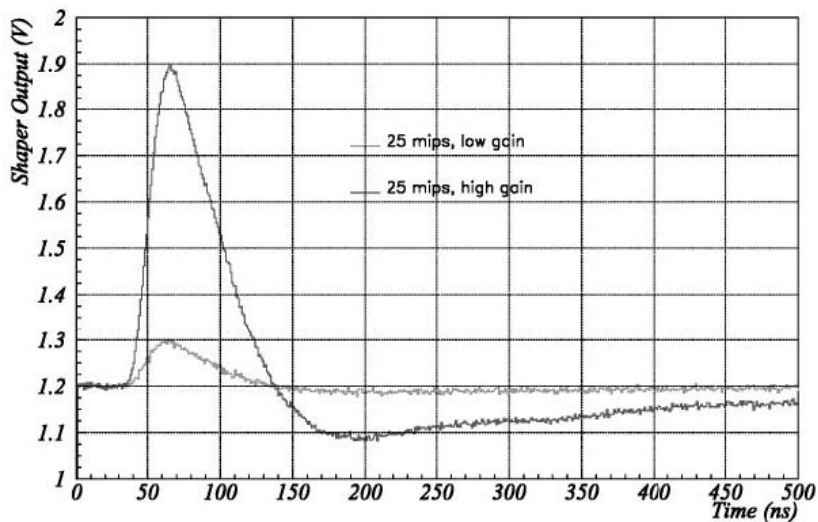
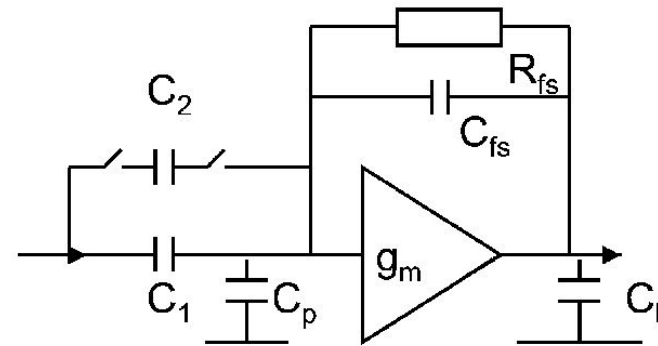
- High gain (30 mV/MIP) for calib
- Low gain (4 mV/MIP) for physics

Architecture

- $CR RC^2$: $t_p = C_f(R_f + C_0/g_m C_f)$
- g_m changed to match t_p between gains by switching Mp1-Mp2 to Mp3-Mp4

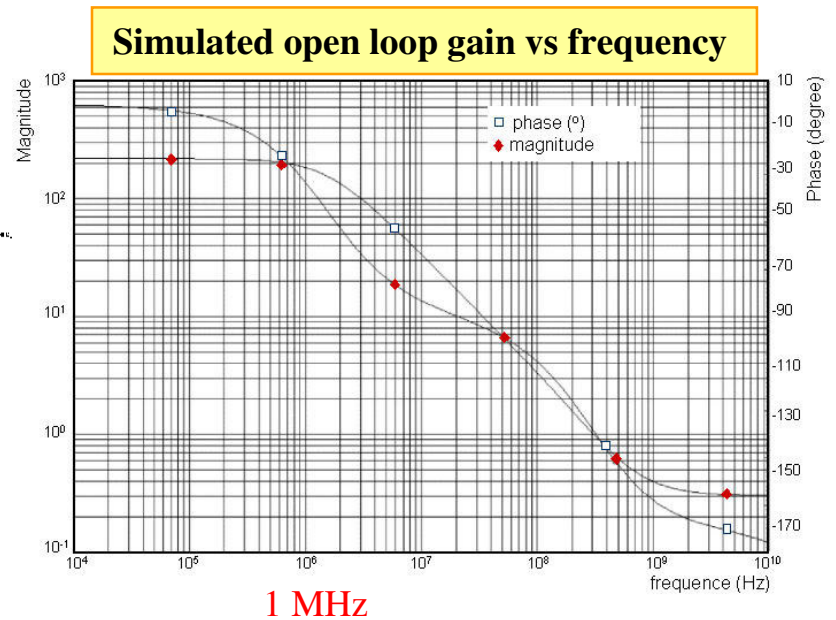
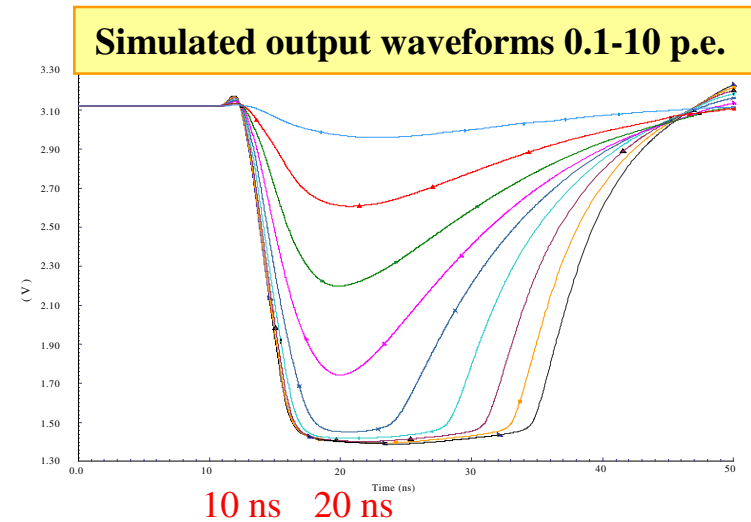
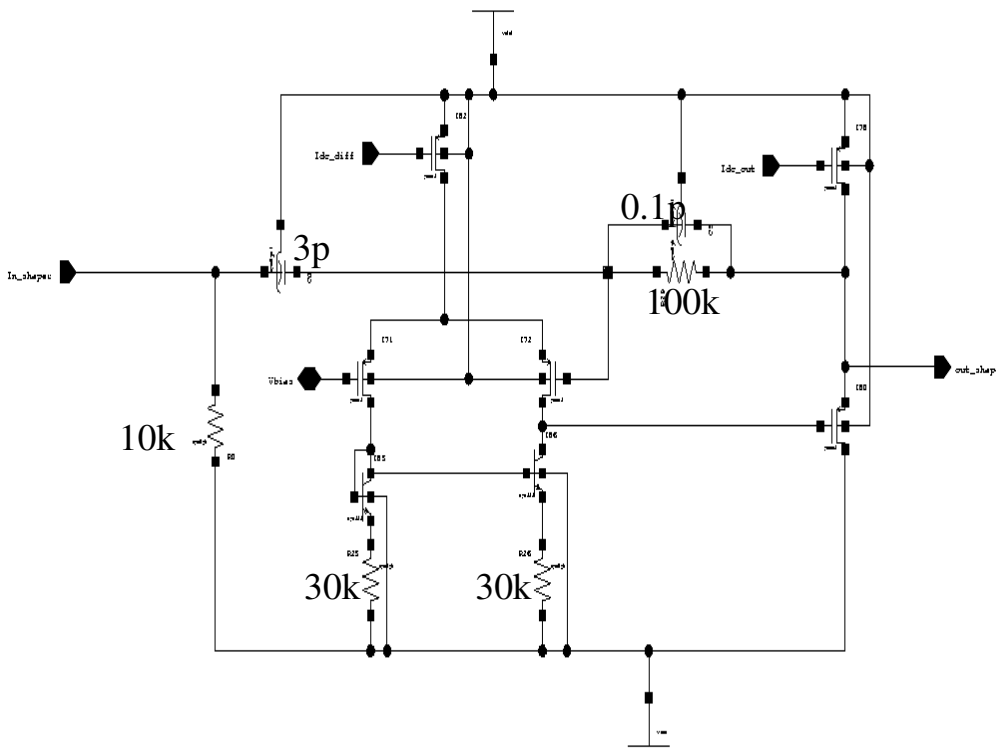
Performance

- Linearity ~7%



Fast shaper design

- **Differential configuration**
 - PMOS input pair. Dissipation : 1 mW
- **Simulated performance**
 - Open loop gain $G_o=220$: $\omega_c = 300$ MHz
- **Feedback :**
 - $R_f = 100$ k Ω ; $C_f = 100 + 50$ fF

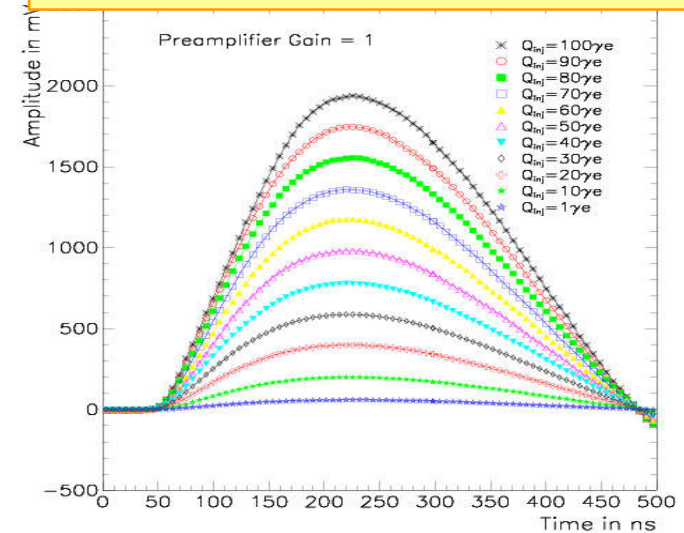




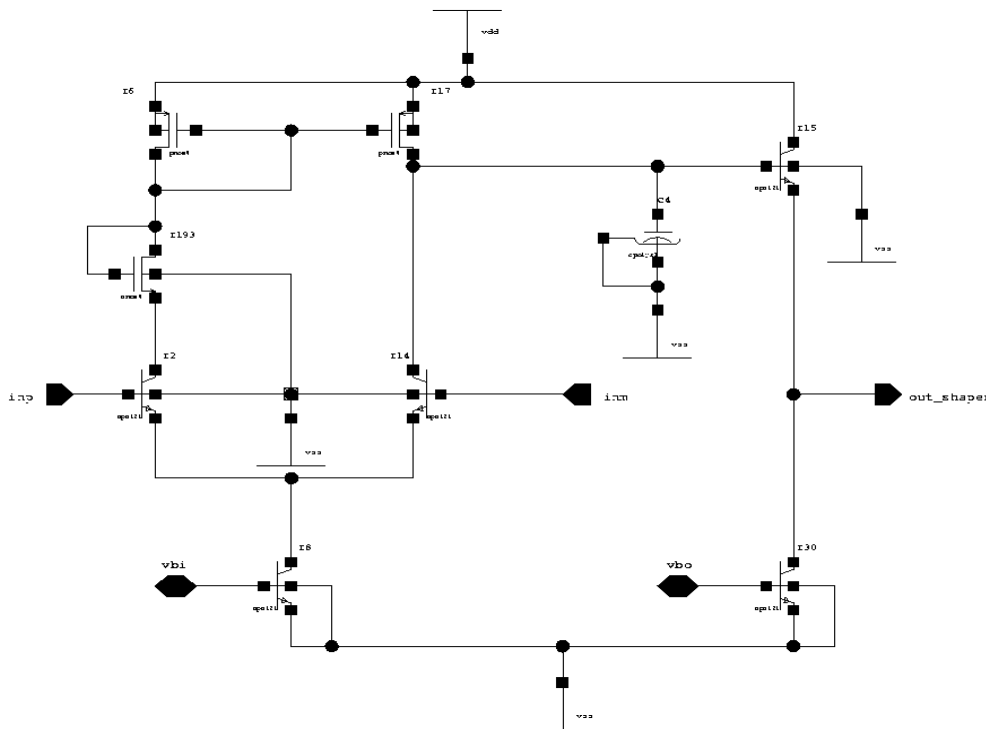
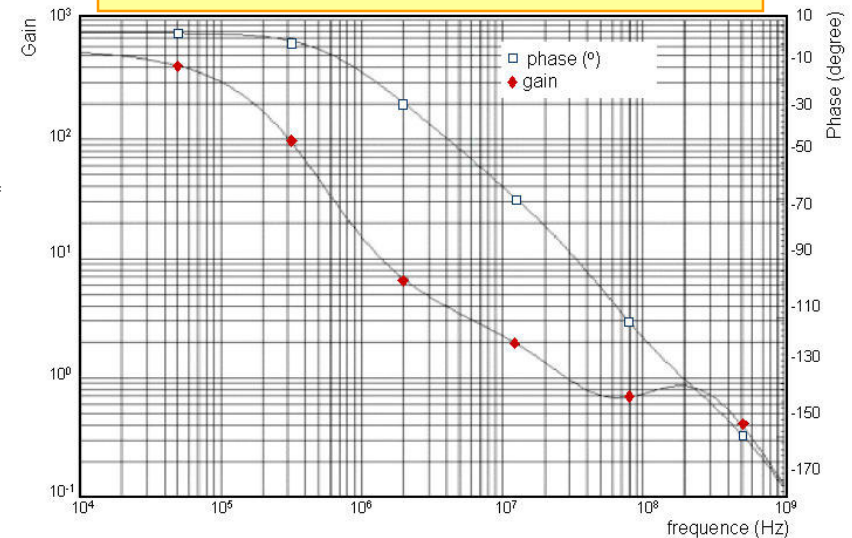
Slow shaper design

- **Differential architecture**
 - NPN centroid input pair. $P_d \sim 500 \mu W$
- **Simulated performance**
 - Open loop gain $G_o = 720 : \omega_c = 300 MHz$
- **Sallen Key configuration**
 - $t_p = 160 ns$ to reduce sensitivity to timing dispersion in scintillator (0.3 % for 10 ns)

Simulated output waveforms 1-100 p.e.



Simulated open loop gain vs frequency



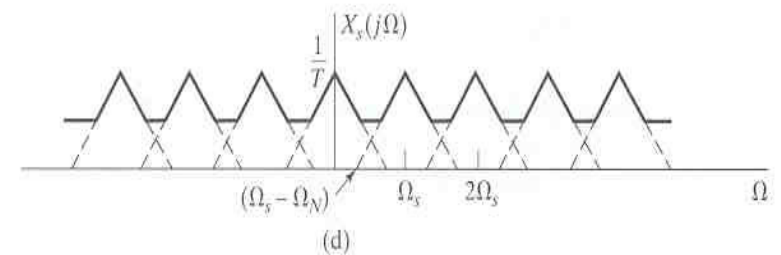
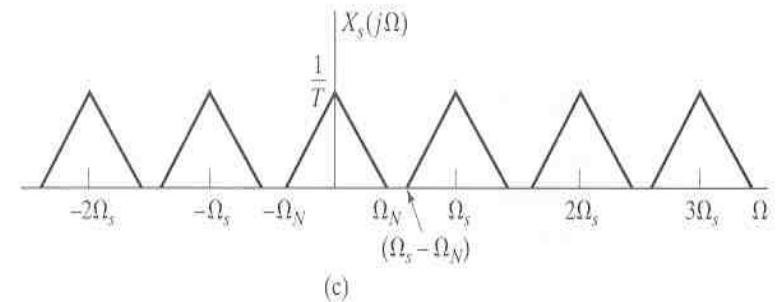
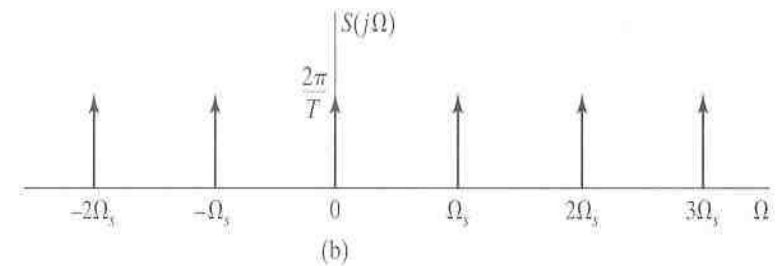
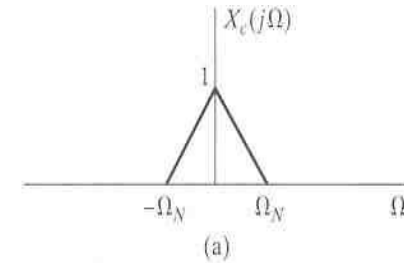
Filtrage numérique

■ Echantillonnage du signal

- Fréquence fech
- Peigne en fréquence

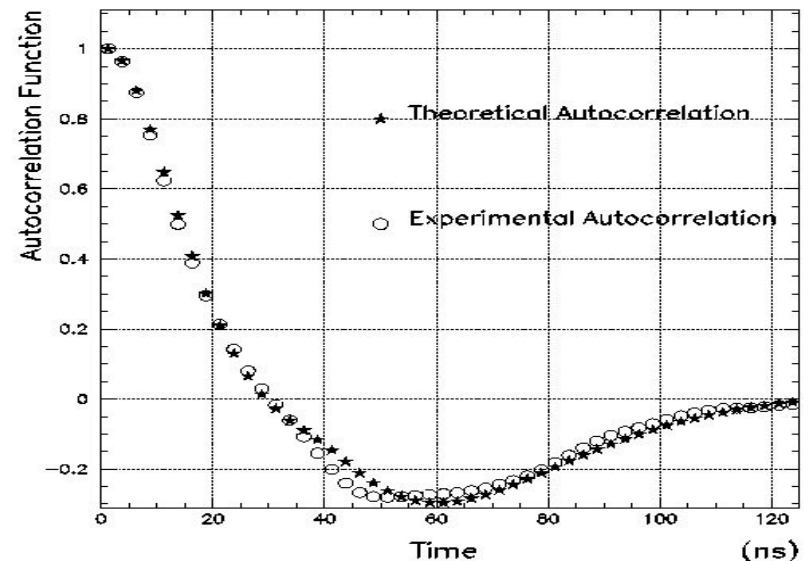
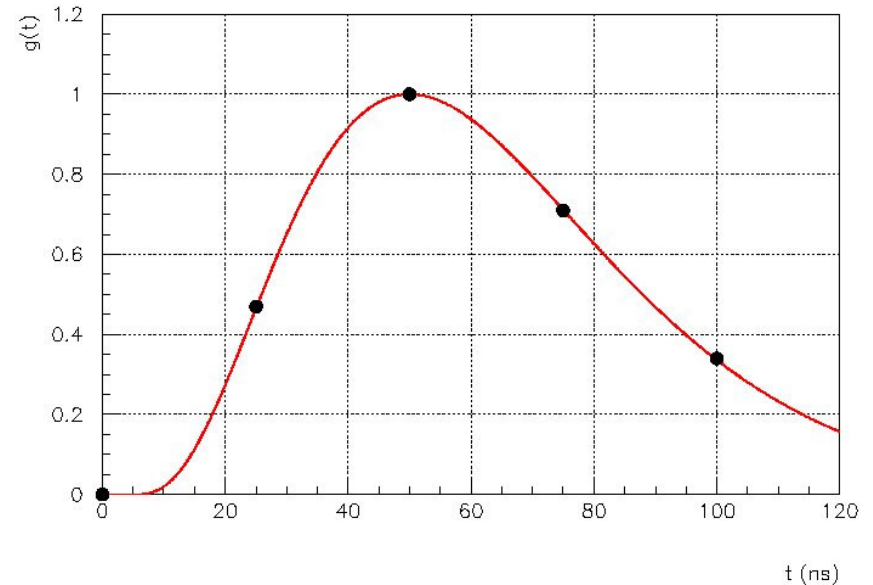
■ Repliement

- Le spectre initial est répliqué tous les multiples de fech : le repliement (aliasing)



Filtrage numérique

- **Combinaison linéaires du signal échantillonné**
 - Filtrage adaptatif numérique (FIR)
 - Filtrage non causal
- **Signal : $s(t) = Ag(t) + b$**
 - A : amplitude
 - G(t) : forme normalisée
 - B : bruit
 - Signal échantillonné : $s_i = Ag_i + b_i$
- **Filtrage : somme pondérée $\sum a_i s_i$**
 - $a_i = \sum R^{-1}_{ij} g_j$
 - R = autocorrelation fonction
 - $g_i =$ signal shape (0, 0.63, 1, 0.8, 0.4)
 - $S = \sum_{i=1}^n a_i s_i$





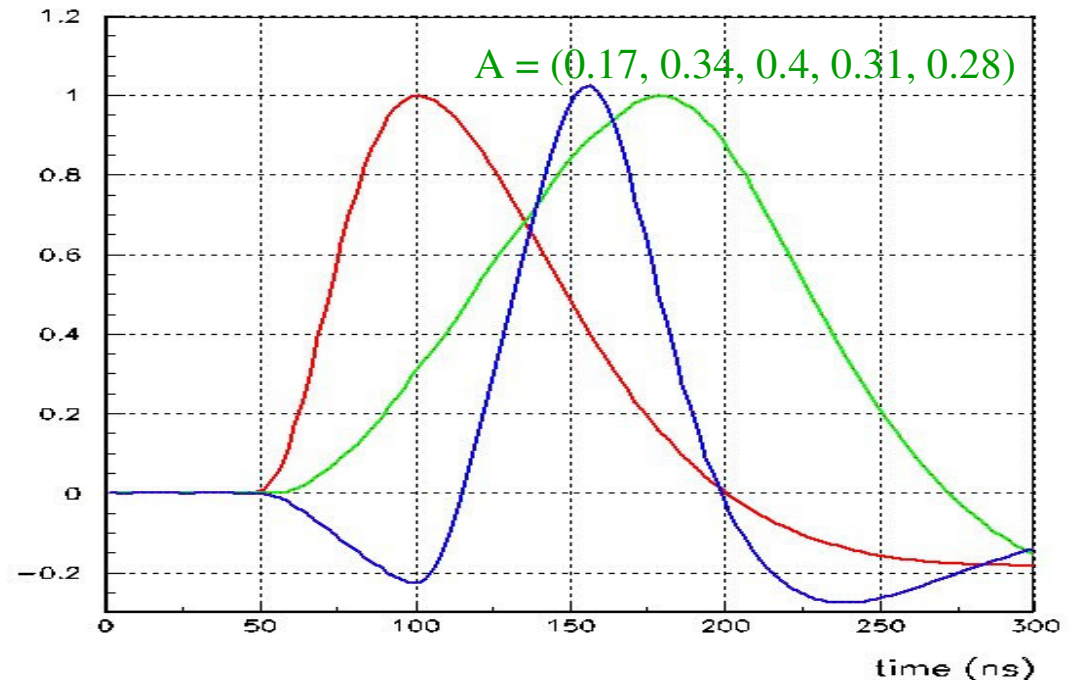
Exemple ATLAS "multiple sampling"

■ Ralentir le signal

- Réduction du bruit série
- $A = (0.17, 0.34, 0.4, 0.31, 0.28)$
- Proche d'une simple intégration

■ Accélérer le signal

- Réduction du bruit d'empilement
- $A = (-0.75, 0.47, 0.75, 0.07, -0.19)$
- Similaire à une dérivation

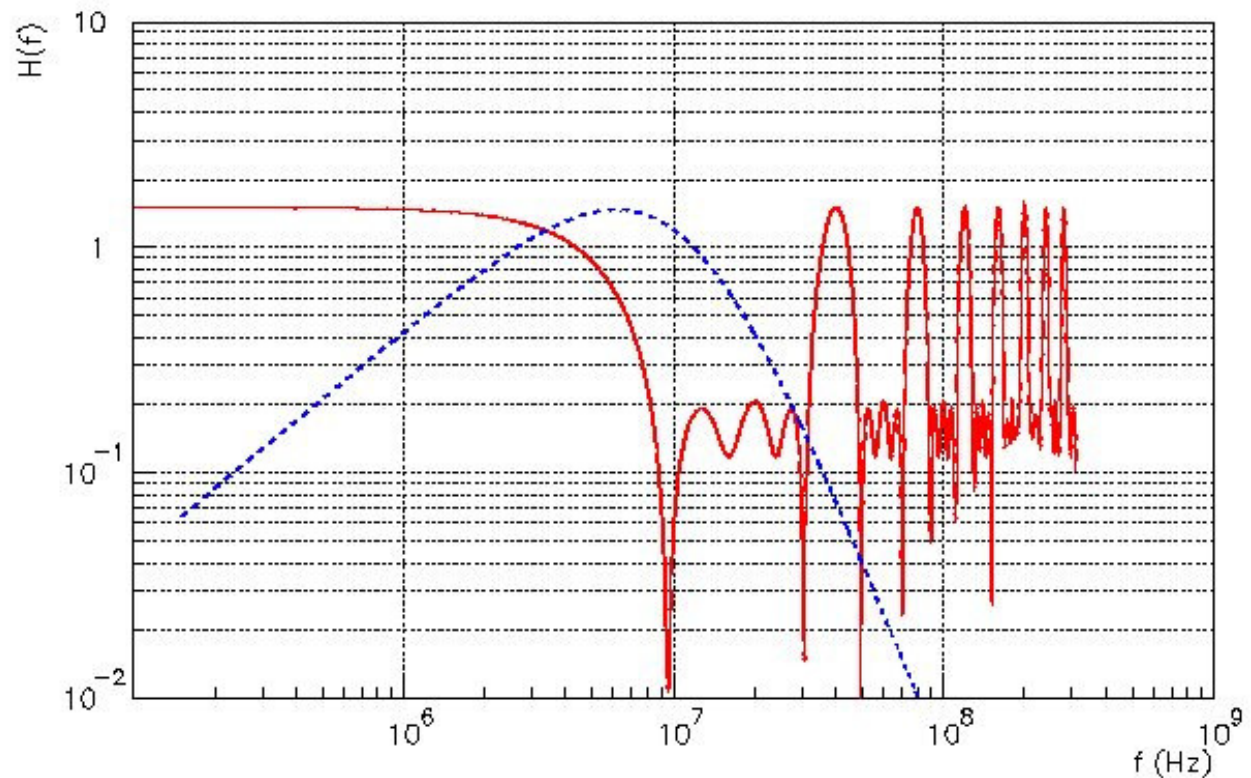


$$A = (-0.75, 0.47, 0.75, 0.07, -0.19)$$

Fonction de transfert du filtre numérique

■ Calcul de la fonction de transfert avec la transformée en Z

- $H(Z) = a_1Z^{-4} + a_2Z^{-3} + a_3Z^{-2} + a_4Z^{-5} + a_5$
- $Z = \exp(j\omega T_{ech})$ ($T_{ech} = 25$ ns)
- Attention au repliement

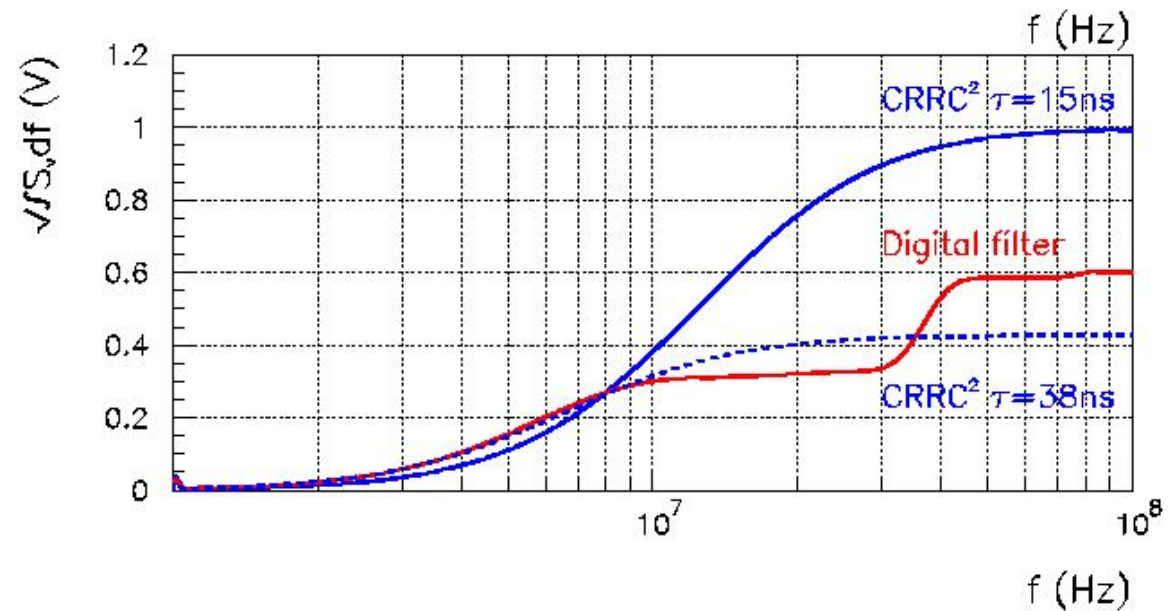
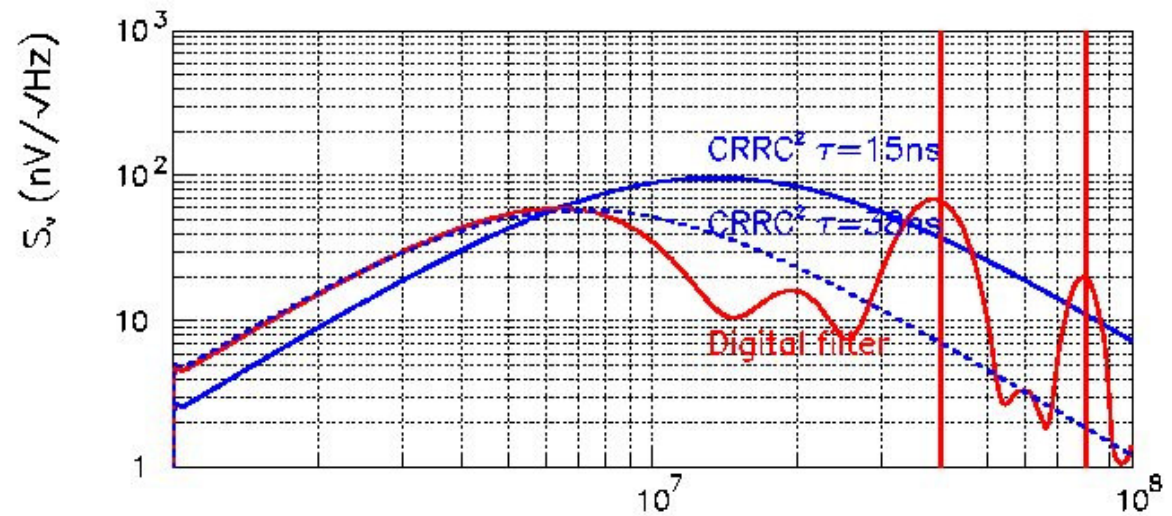




Bruit après filtrage numérique

■ Calcul du bruit après filtrage numérique

- Produit des fonction de transfert et de la DSB du préampli
- Bruit rms = intégrale la DSB en sortie
- Contribution des repliements à $n \cdot f_{ech}$





Bruit mesuré après filtrage numérique

■ Amélioration du bruit

- Amélioration entre 1.2 et 1.8
- Modeste à shaping lent et rapide
- Optimum vers 15-25 ns

■ Questions

- Comment se compare avec un filtre analogique ?
- Combien faut-il prendre d'échantillons ?
- Comment varient-ils avec la phase ?
- Quelle précision demande-t-on sur la fonction d'autocorrélation et la forme du signal ?
- Quelle relation faut-il mettre entre le temps d'échantillonnage et le filtre analogique
- Le filtre analogique est-il utile ?
- Peut-on aussi mesurer le temps ?

