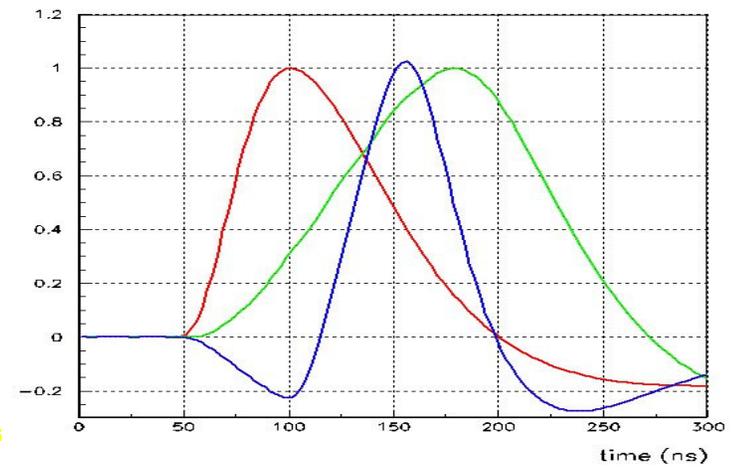
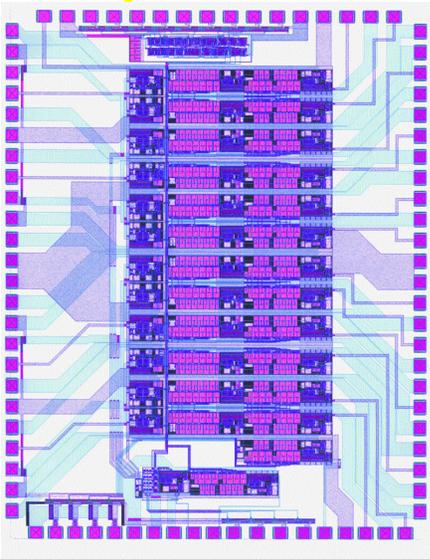
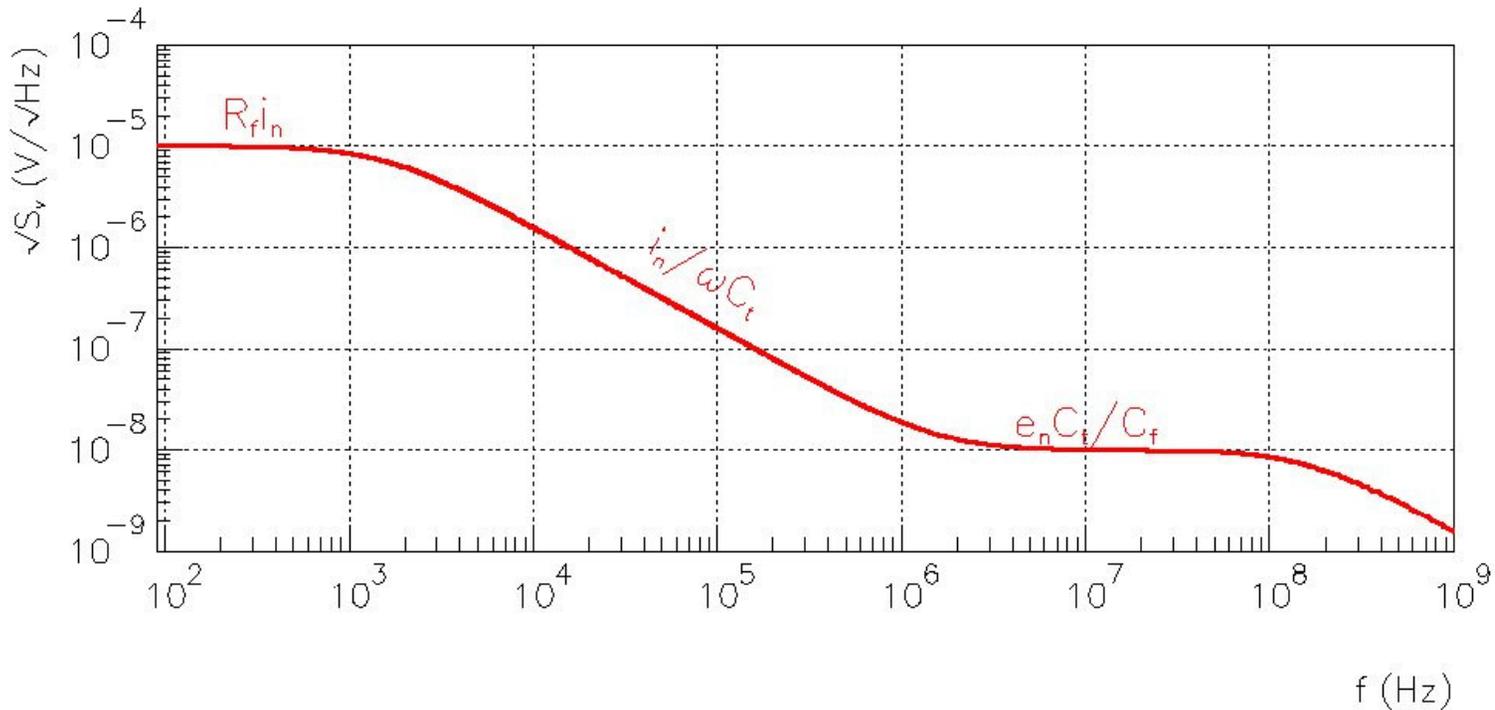


# 3. Filtrage



# 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

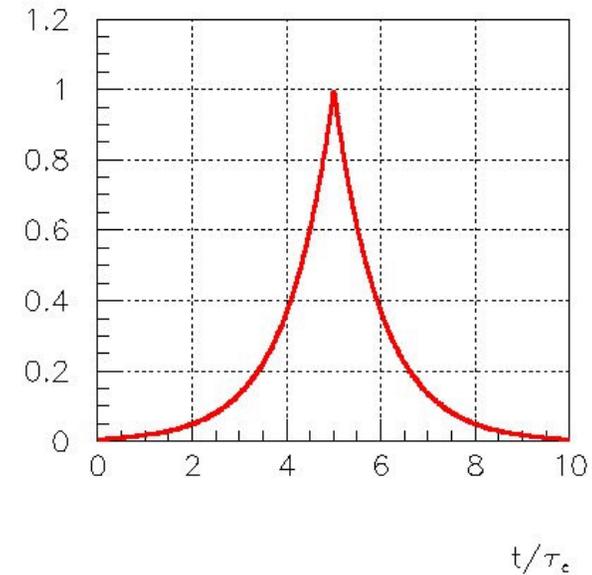
- Pour un signal  $x(t)$  noyé dans un bruit blanc, le signal/bruit optimal est obtenu par un filtre de réponse impulsionnelle :  $h(t) = x(t_0 - t)$
- NB : ce filtre est non causal

## ■ 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 :  $v_n = e_n C_t / 2 C_f \sqrt{t_c}$
- $(ENC)^\infty = \sqrt{e_n C_t i_n}$
- $\sqrt{f}$



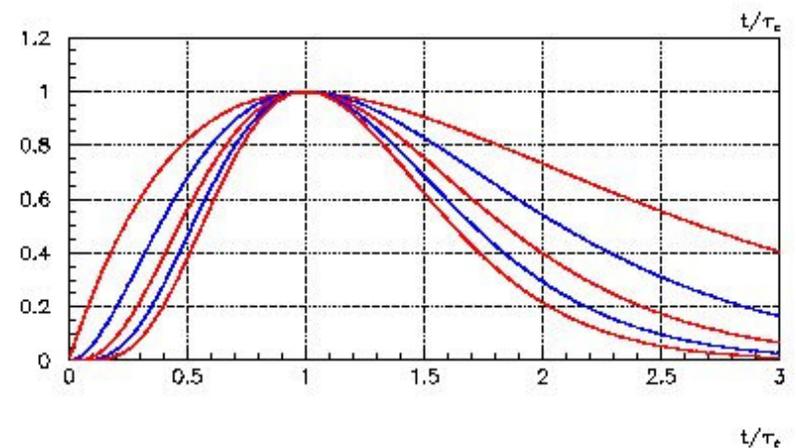
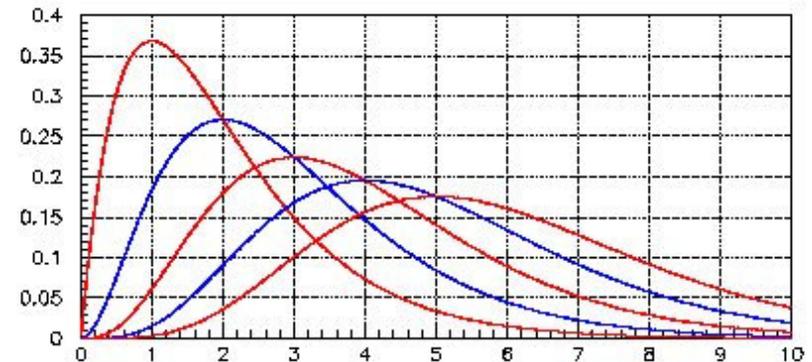
# Filtrage CRRCn

## ■ 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 :
$$H(\omega) = j\omega\tau / (1 + j\omega\tau)^{n+1}$$
- $\tau$  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 CRRC<sup>n</sup> shapers (n=1->5)

# Bruit après filtrage CRRCn

## ■ Bruit rms après shaping

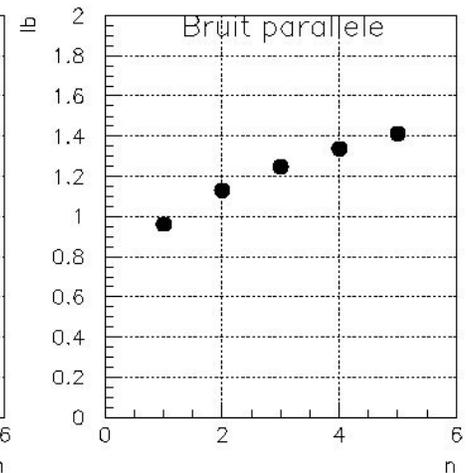
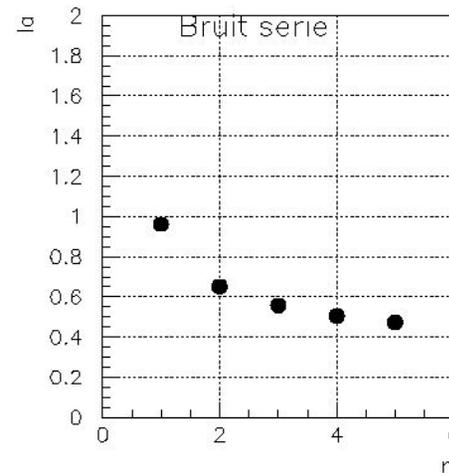
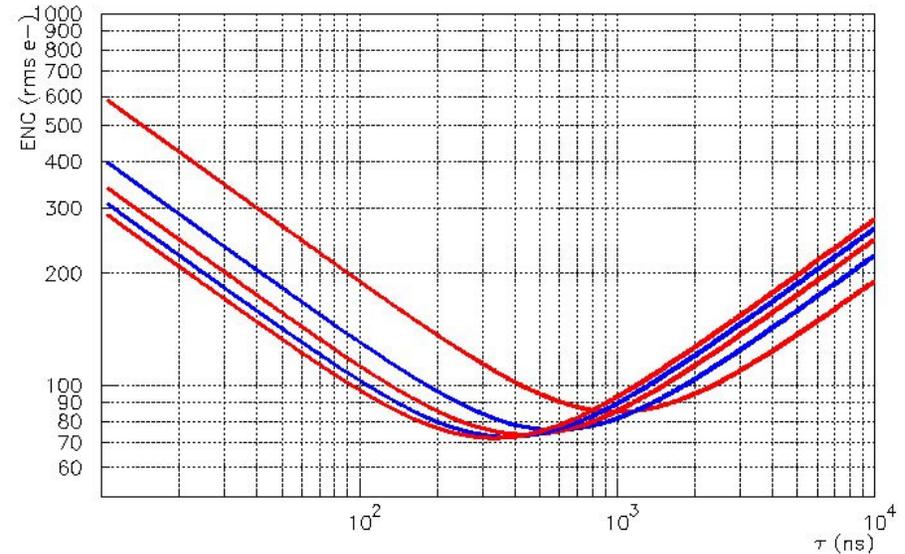
- $V_n^2 = \int S_v(\omega) |H(\omega)|^2 d\omega / 2\pi$   
 $= I_a e_n^2 C_d^2 / \tau C_f^2 + I_b \tau i_n^2 / C_f^2$
- $I_a$  and  $I_b$  sont appelées intégrales de bruit série et de bruit parallèle. Elles ne dépendent que de  $n$

■

## ■ Charge equivalente de bruit

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

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



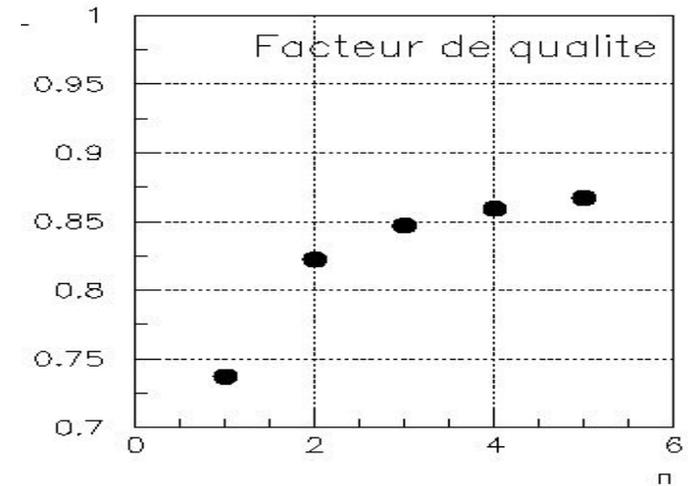
# Bruit après filtrage CRRCn

## ■ Facteur de qualité

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

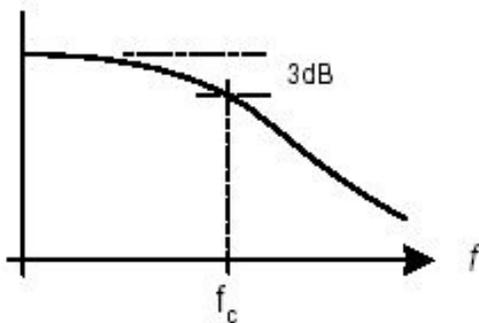
## ■ Filtres pseudo gaussiens

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

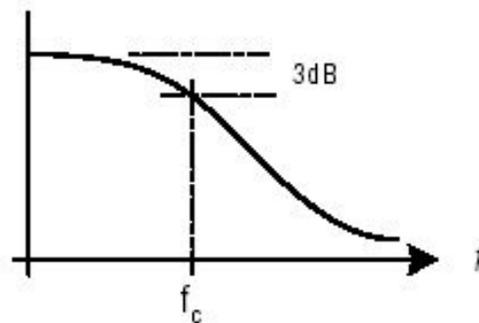


# Filtrage : généralités

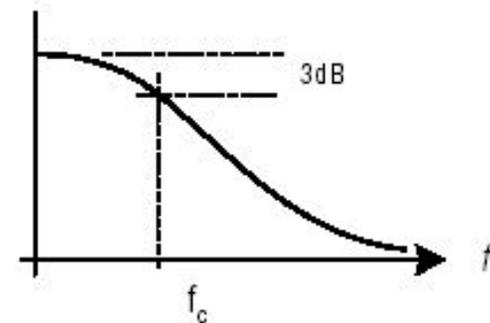
## ■ Différents types de filtres



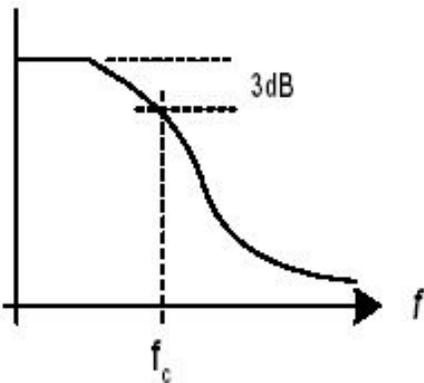
Gaussian Magnitude



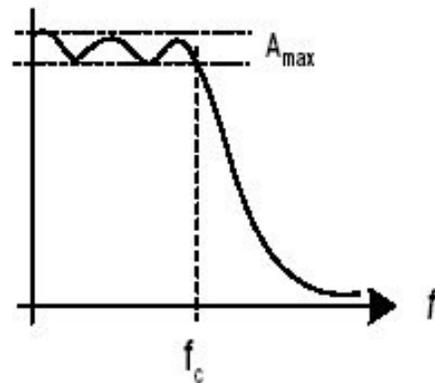
Bessel



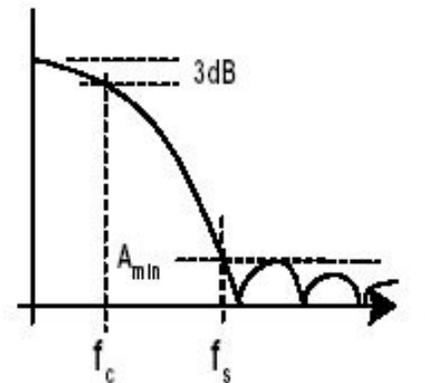
Equiripple Group Delay



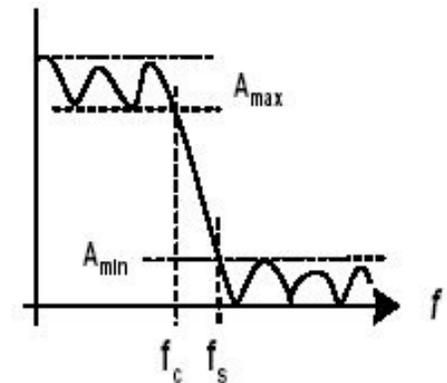
Butterworth



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

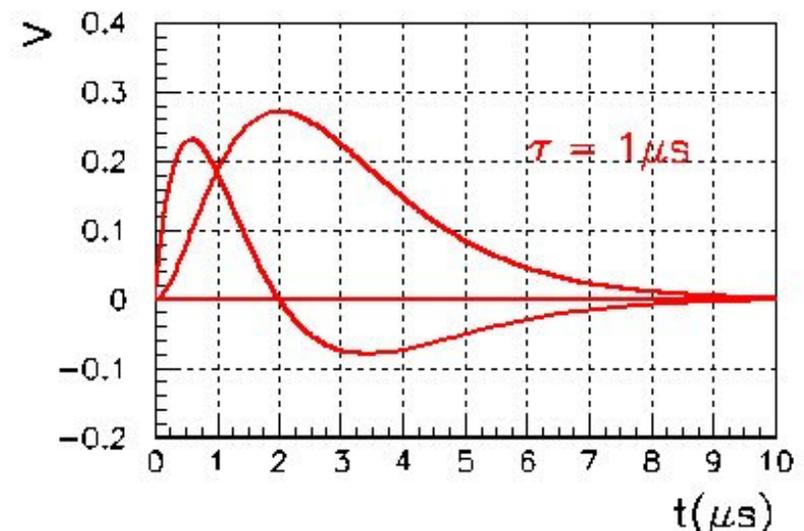
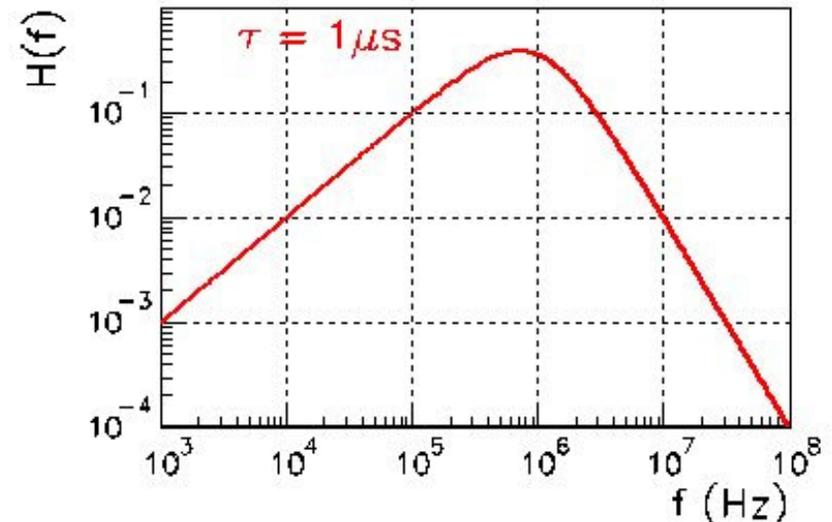
- $h(t) = x^2/2 e^{-x}$
- Maximum à  $t = 2 \tau$
- Amplitude au maximum :  $v_{max} = 0.2707$
- Peaking time 5-100%  $t_p = 1.82 \tau$

## ■ 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

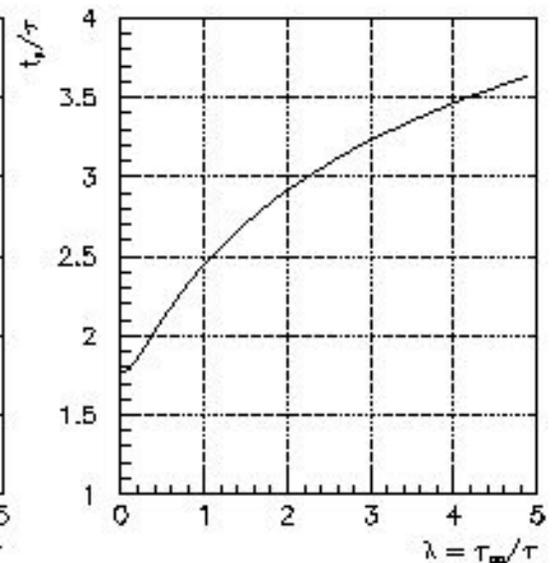
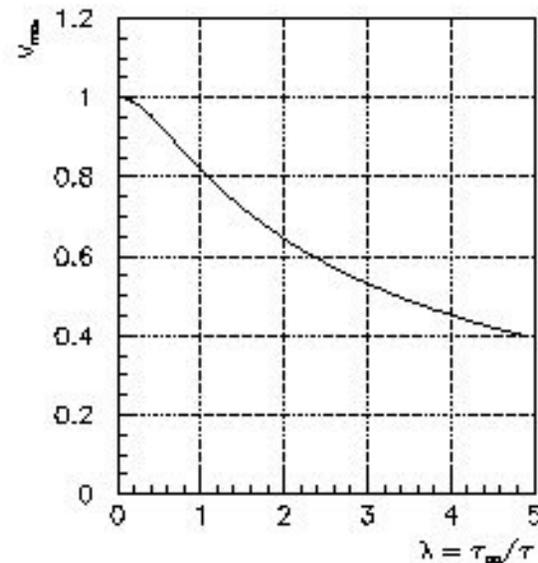
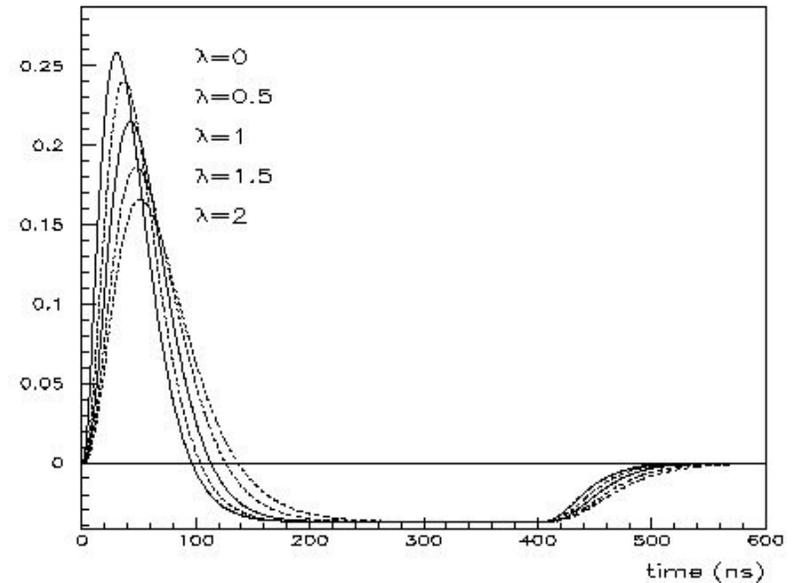
- Bruit rms  $V_n = 0.957 / \sqrt{\tau}$
- ENC =  $174 e_n C_t / \sqrt{t_p} (\delta) \oplus 166 i_n \sqrt{t_p} (\delta)$



# Déficit ballistique

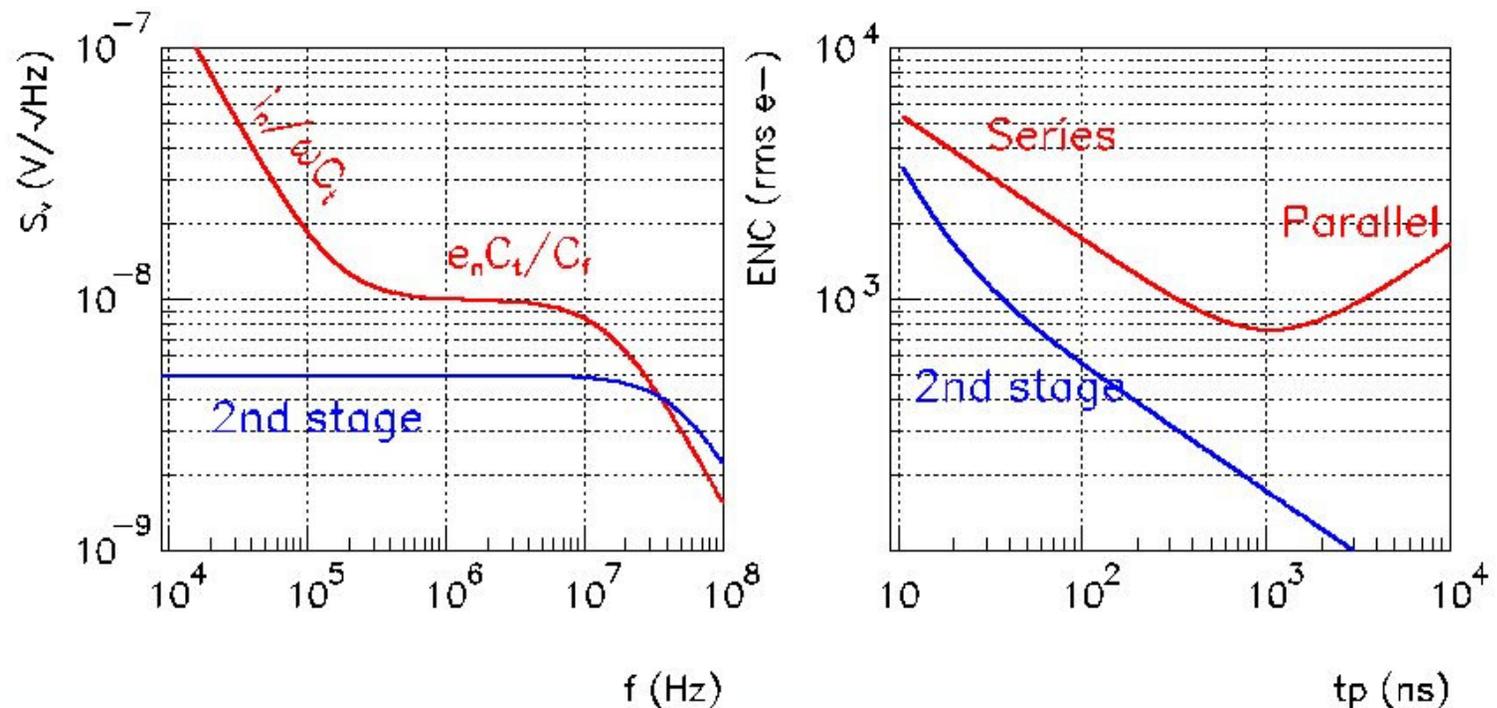
## ■ Effet du temps de montée du préampli

- 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%)



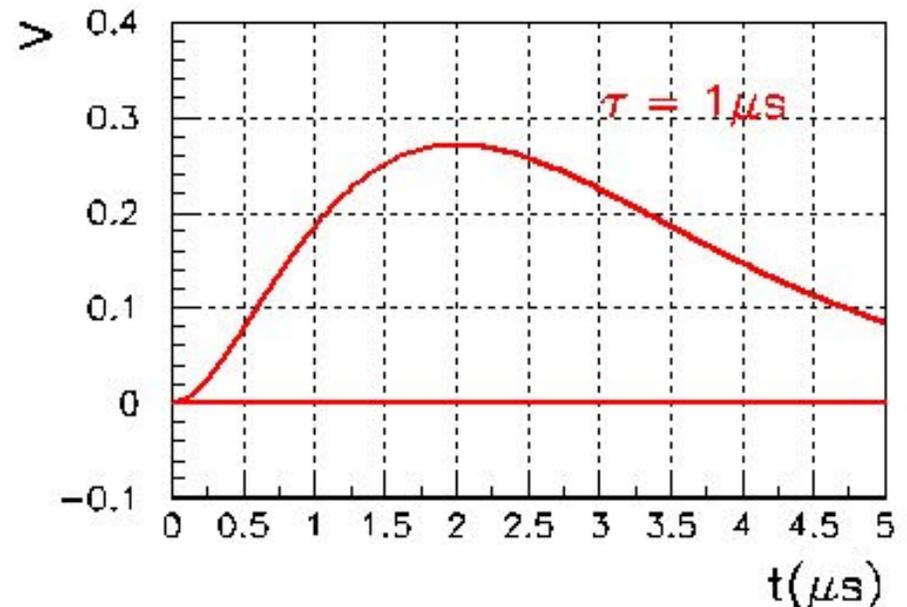
# Mesures du shaper

## ■ 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%

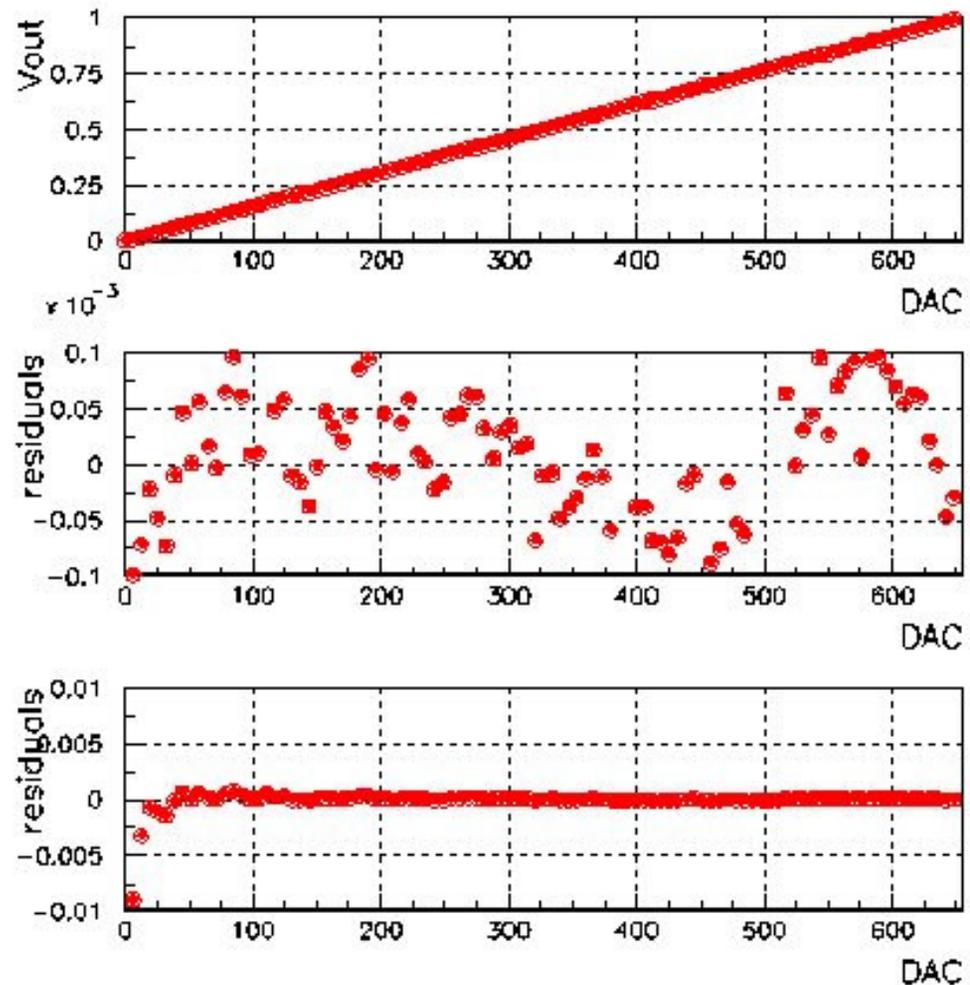
## ■ Mesure des intégrales de bruit

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



# 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

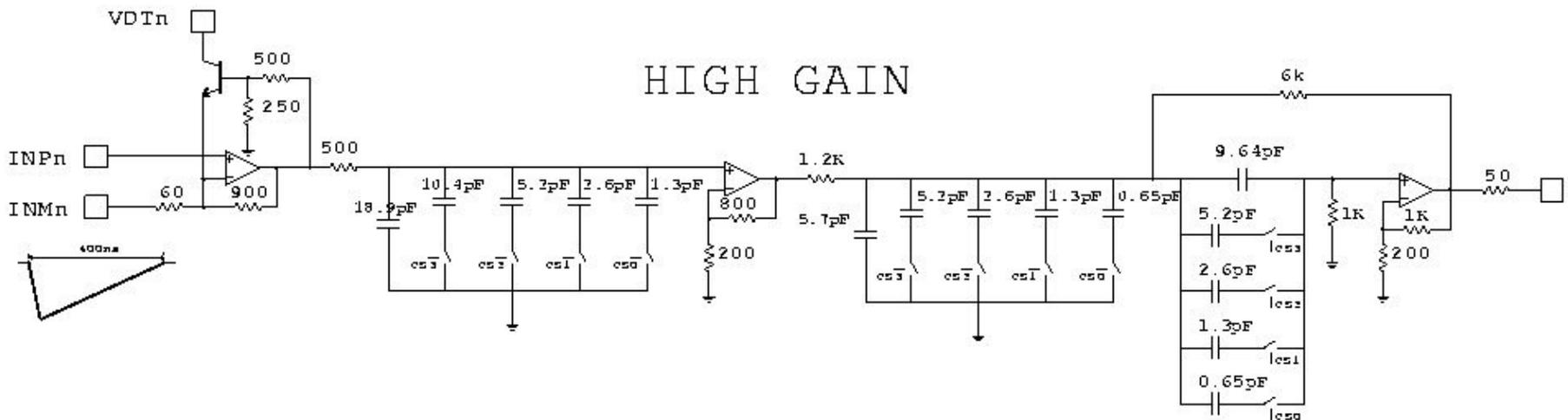
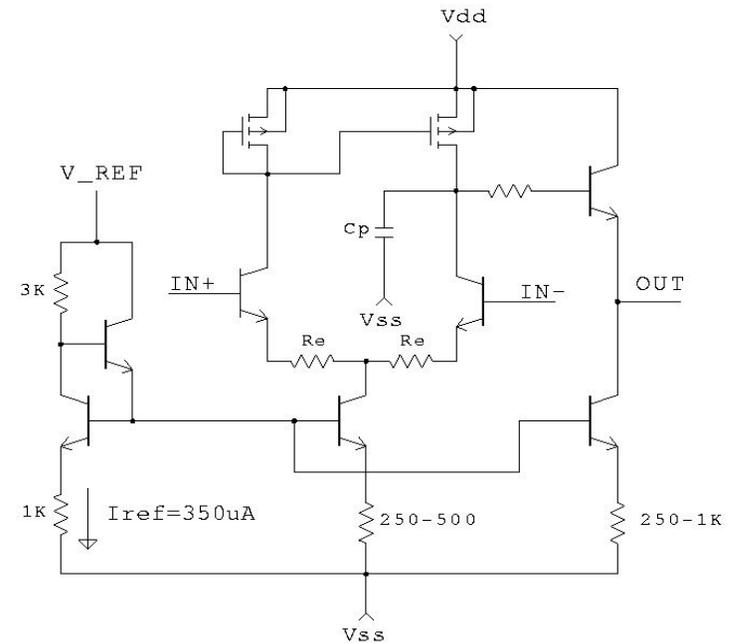




# ATLAS : LAr shaper

## ■ CRRC<sup>2</sup> 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





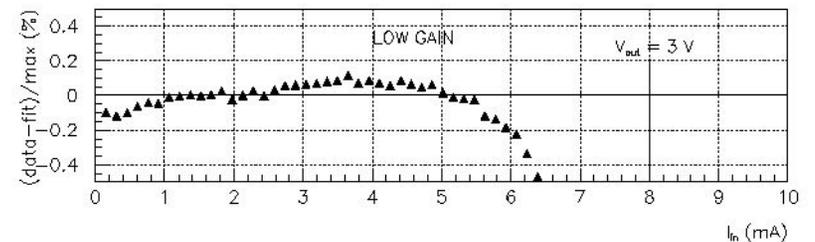
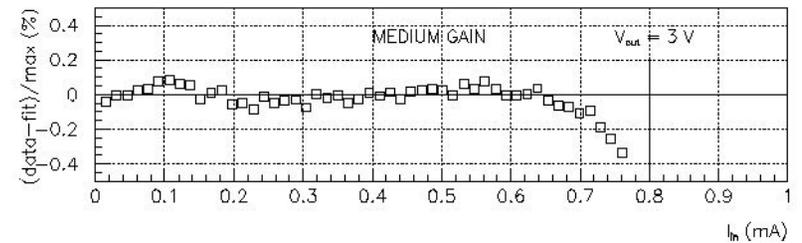
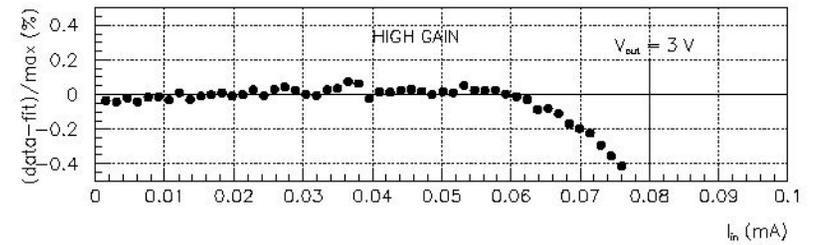
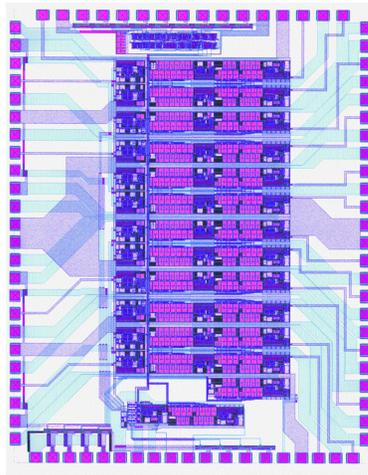
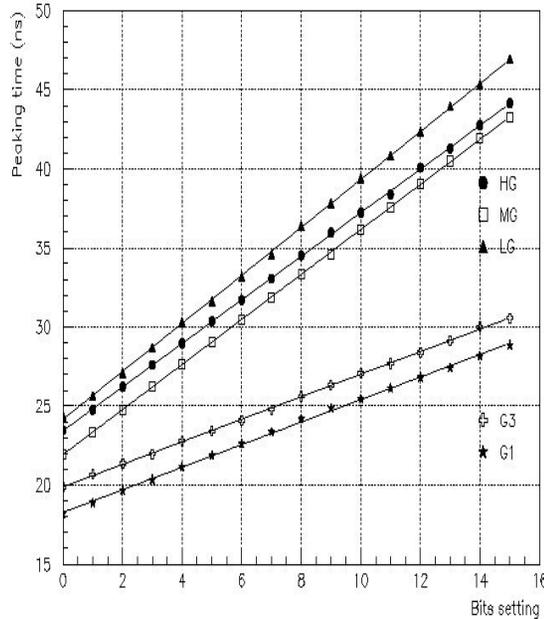
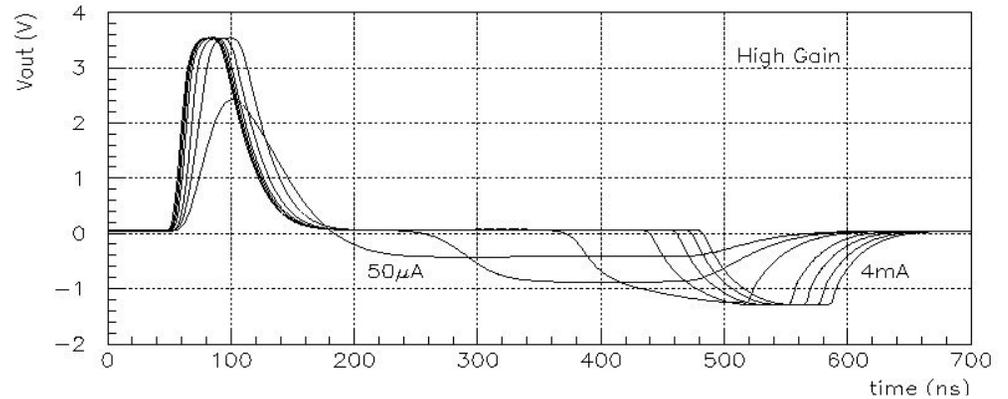
# ATLAS : LAr shaper Performance

## ASIC 4 channels 3 gains

- 1.2  $\mu\text{m}$  AMS BiCMOS
- 50 000 chips Produced in 20000
- Yield : 85%

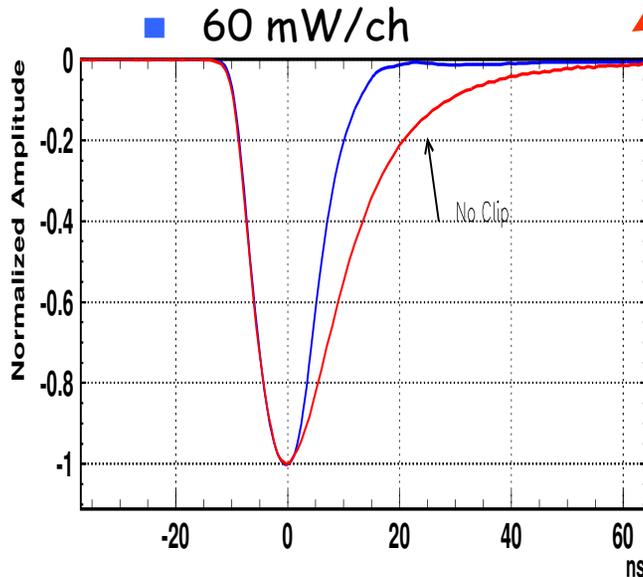
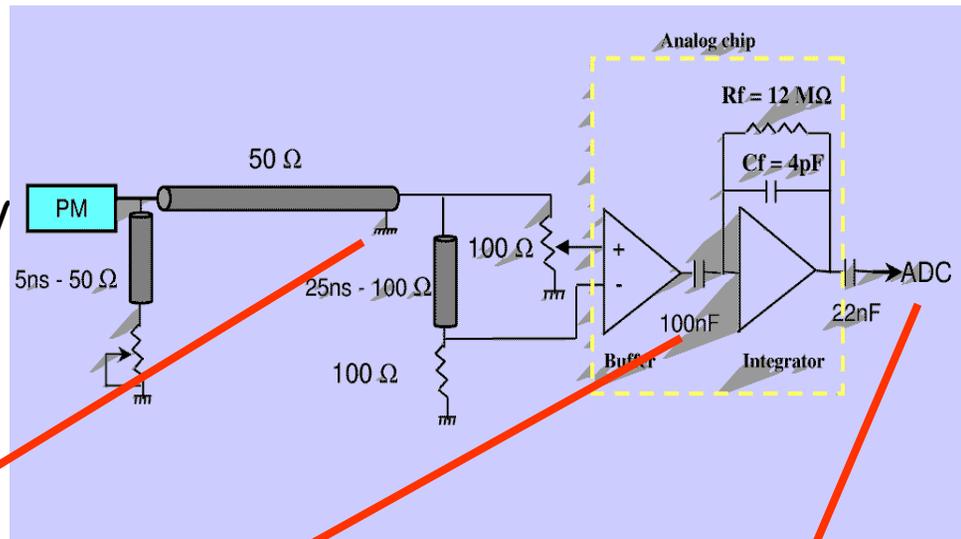
## Performance

- Peaking time within 1 ns
- Linearity :  $< 0.2\%$  on three gains
- Crosstalk  $< 0.1\%$

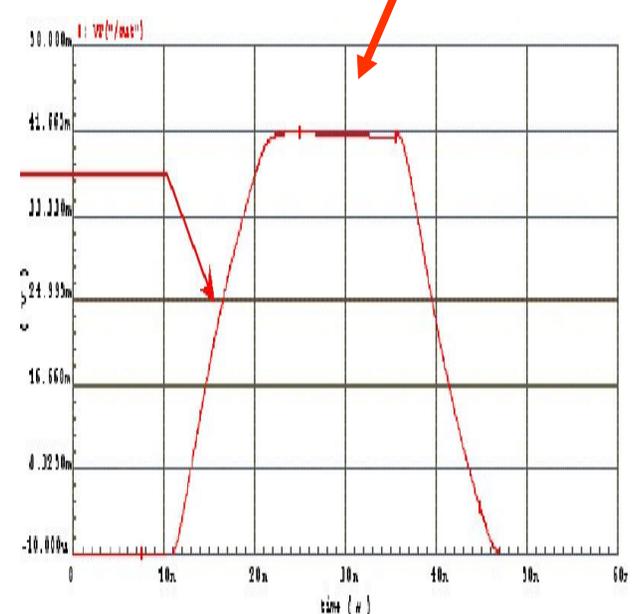
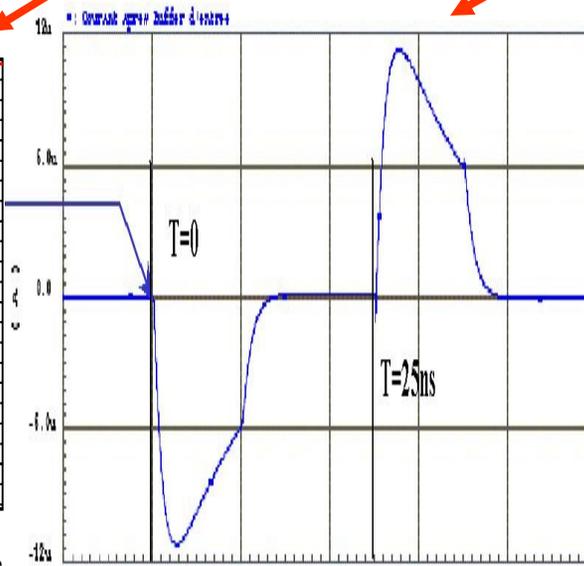


# LHCb : Ecal shaper principle

- shape pulse in less than 25 ns
  - Minimize pileup
  - Provide flat top of 3 ns
- Noise < 1 LSB (250  $\mu$ V, 2.5 MeV)
- Architecture
  - Delay line clipping to remove PM trailing edge
  - Deadtimeless integrator
  - AMS 0.8  $\mu$ m BiCMOS (4 mm<sup>2</sup>)
  - 60 mW/ch



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





# CMS PS : Delta shaper

## Dual gain

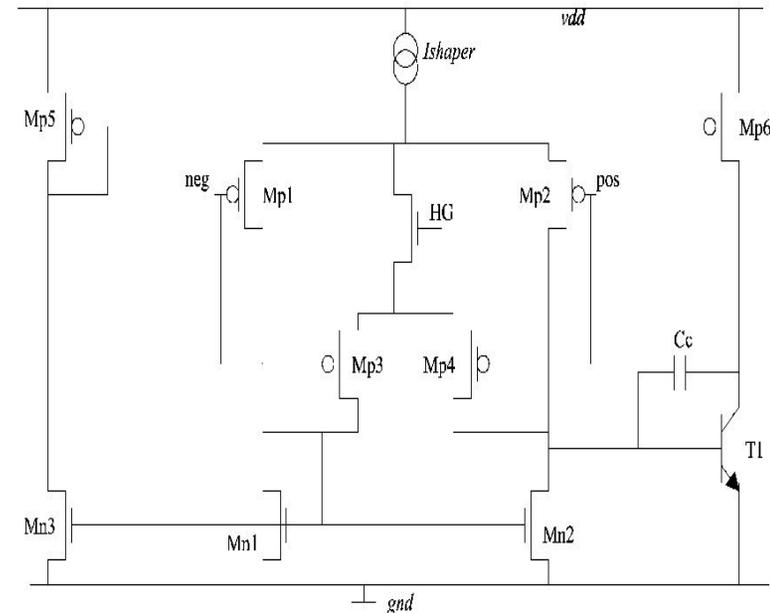
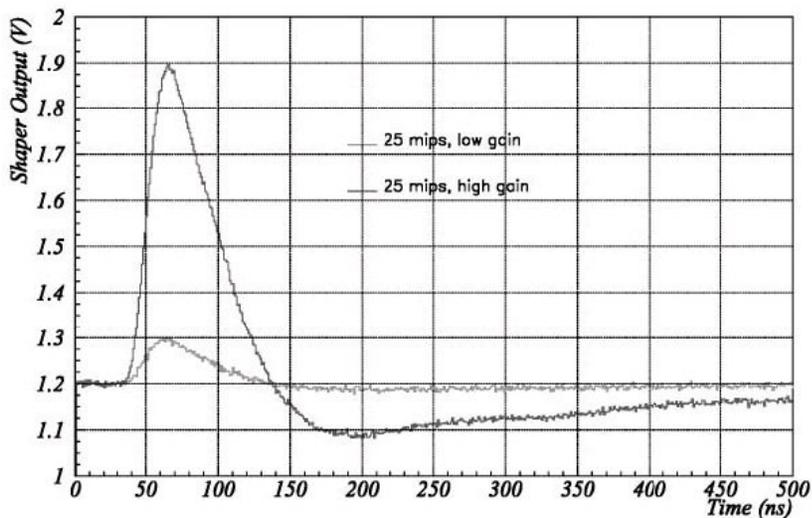
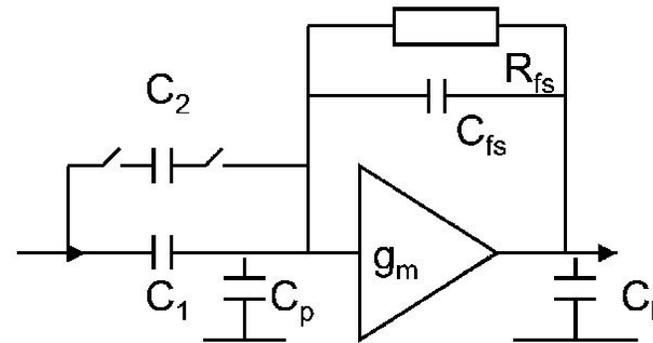
- High gain (30 mV/MIP) for calib
- Low gain (4 mV/MIP) for physics

## 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

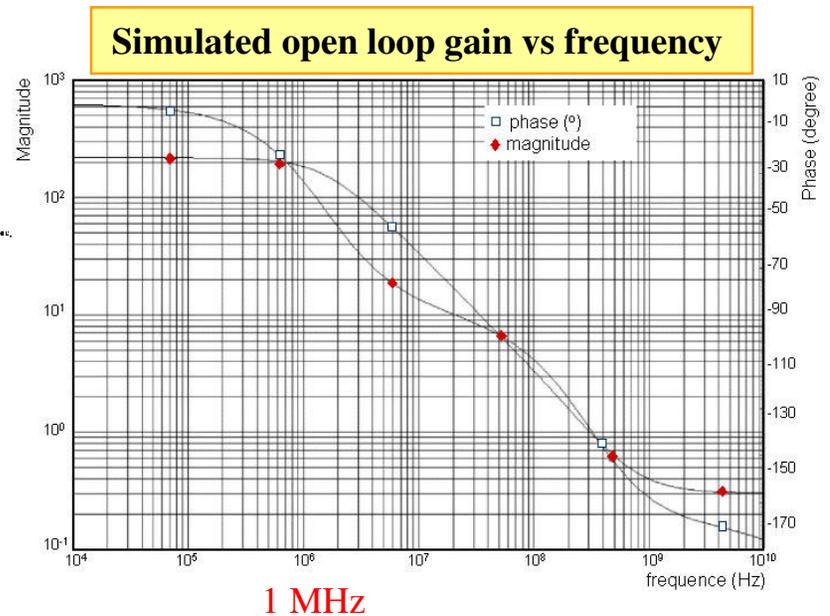
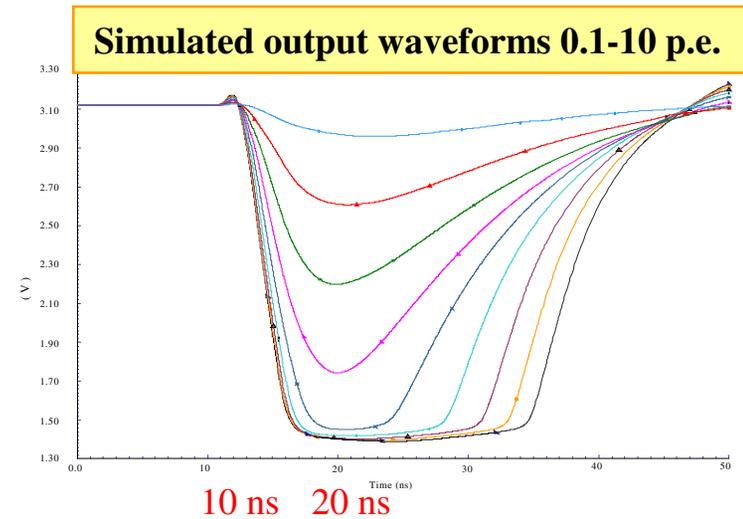
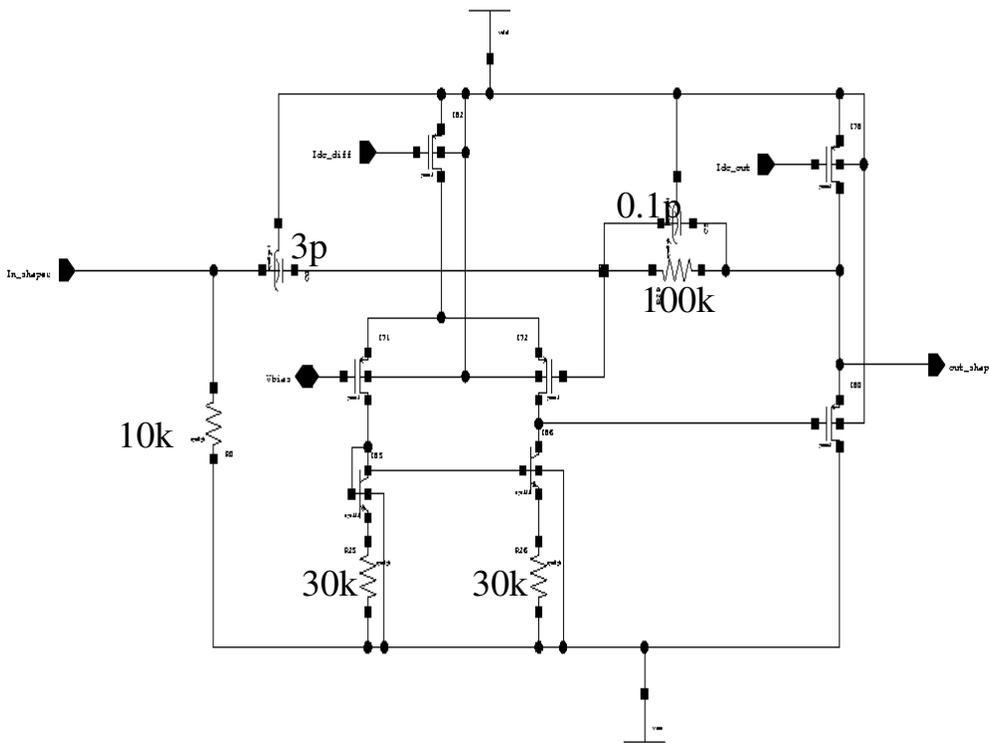
## Performance

- 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 $\Omega$  ;  $C_f = 100 + 50$  fF





# Slow shaper design

## Differential architecture

- NPN centroid input pair.  $P_d \sim 500 \mu W$

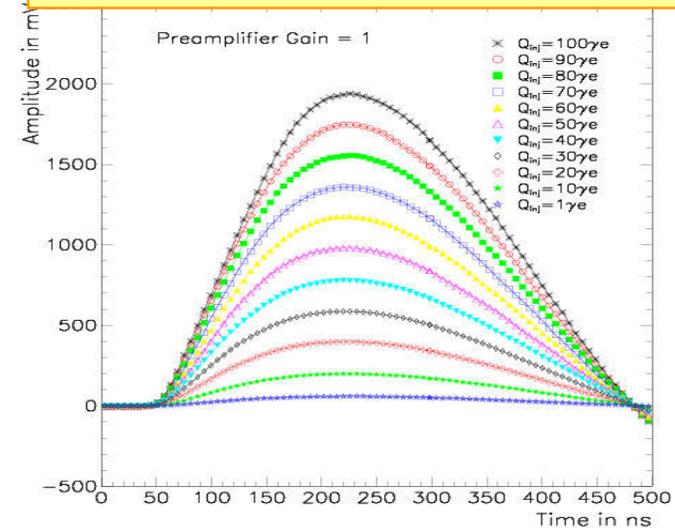
## Simulated performance

- Open loop gain  $G_o = 720 : \omega_c = 300 MHz$

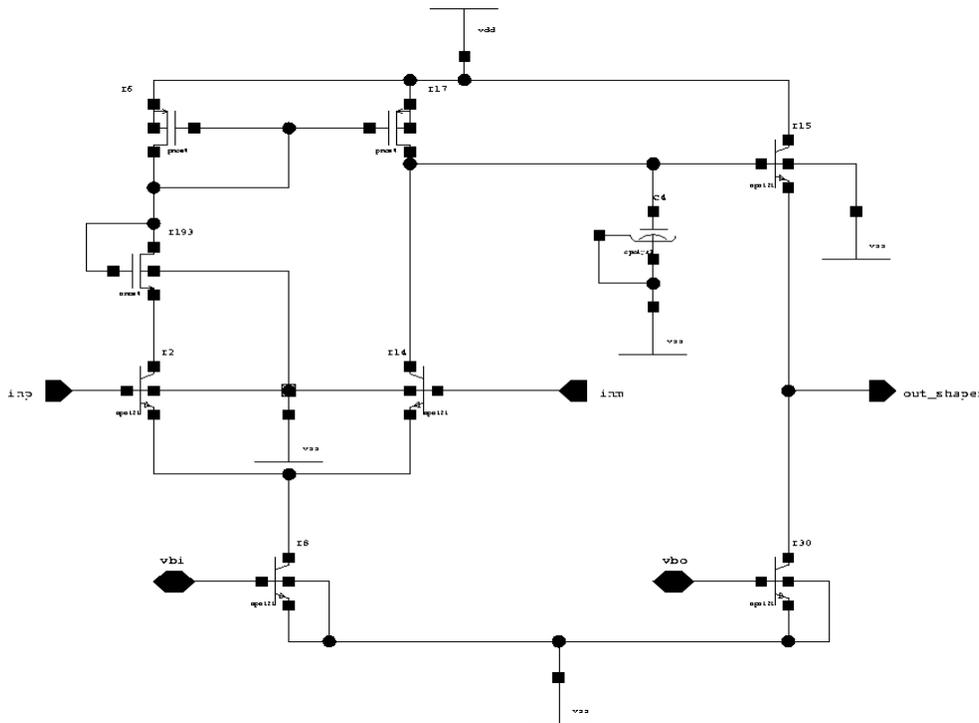
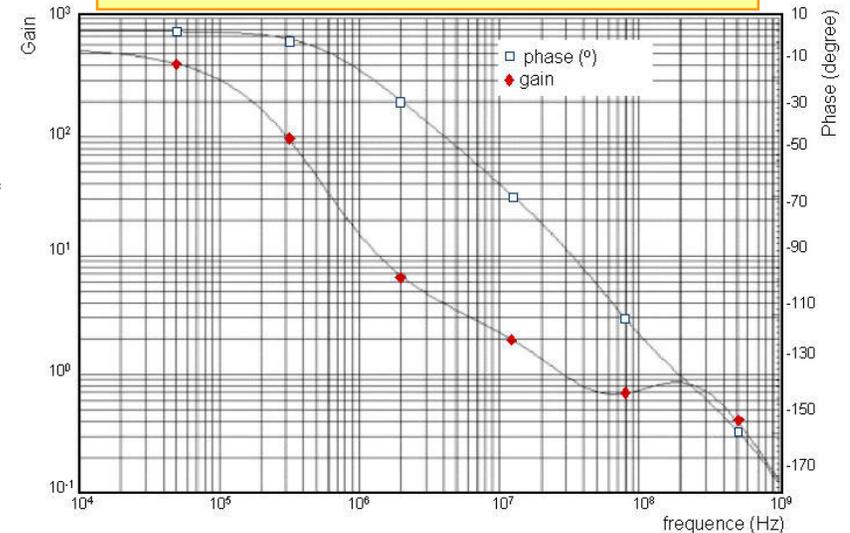
## Sallen Key configuration

- $t_p = 160 ns$  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



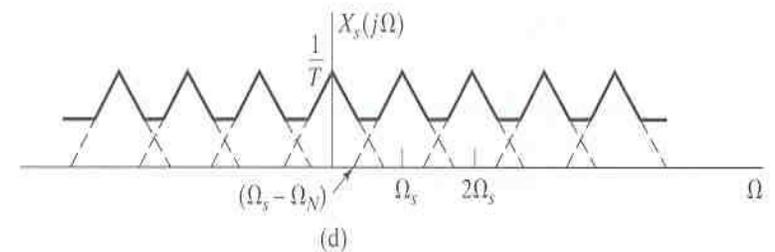
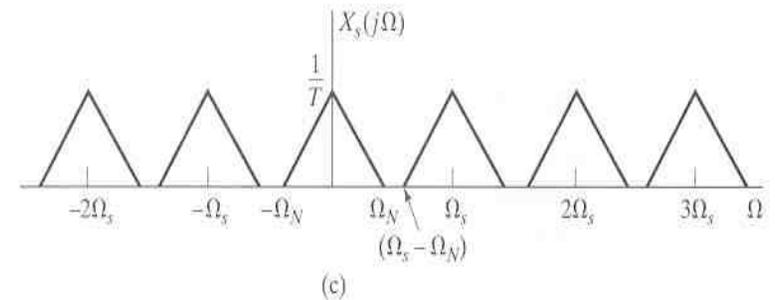
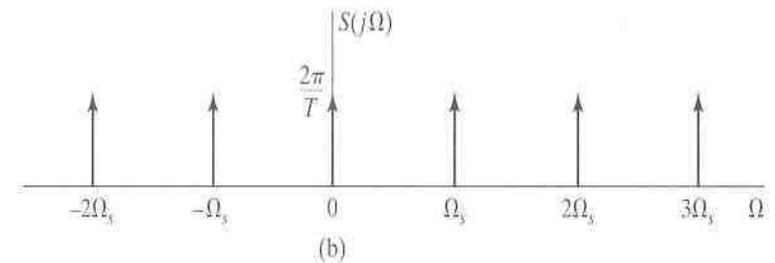
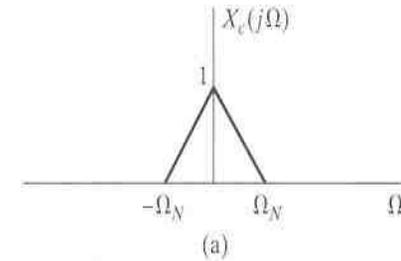
# Filtrage numérique

## ■ Echantillonnage du signal

- Fréquence fech
- Peigne en fréquence

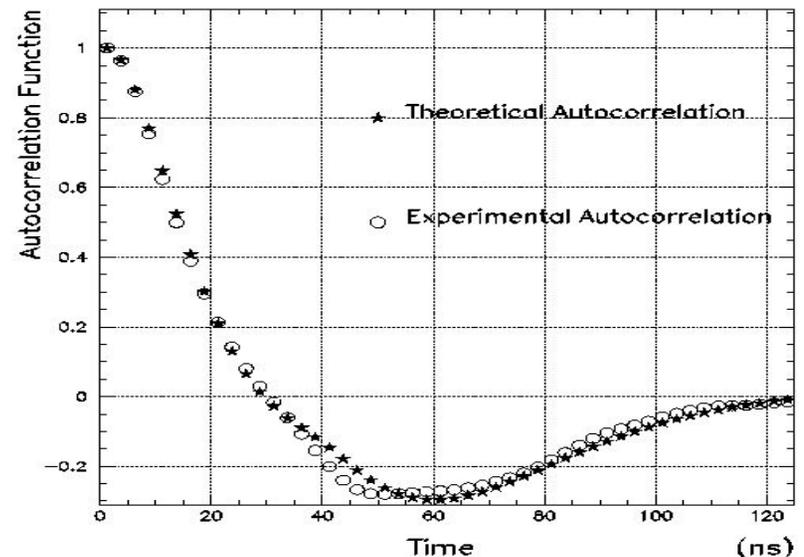
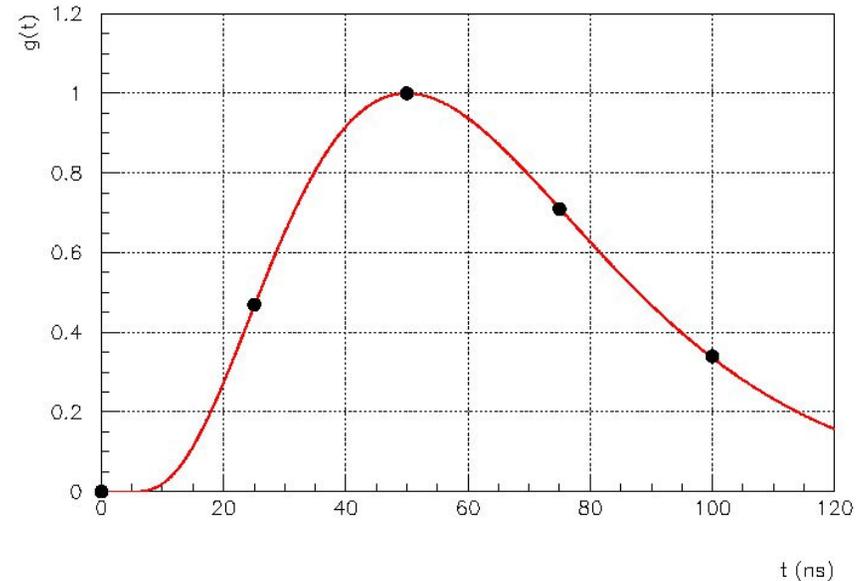
## ■ Repliement

- 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)
  - $S = \sum_{i=1}^n a_i s_i$





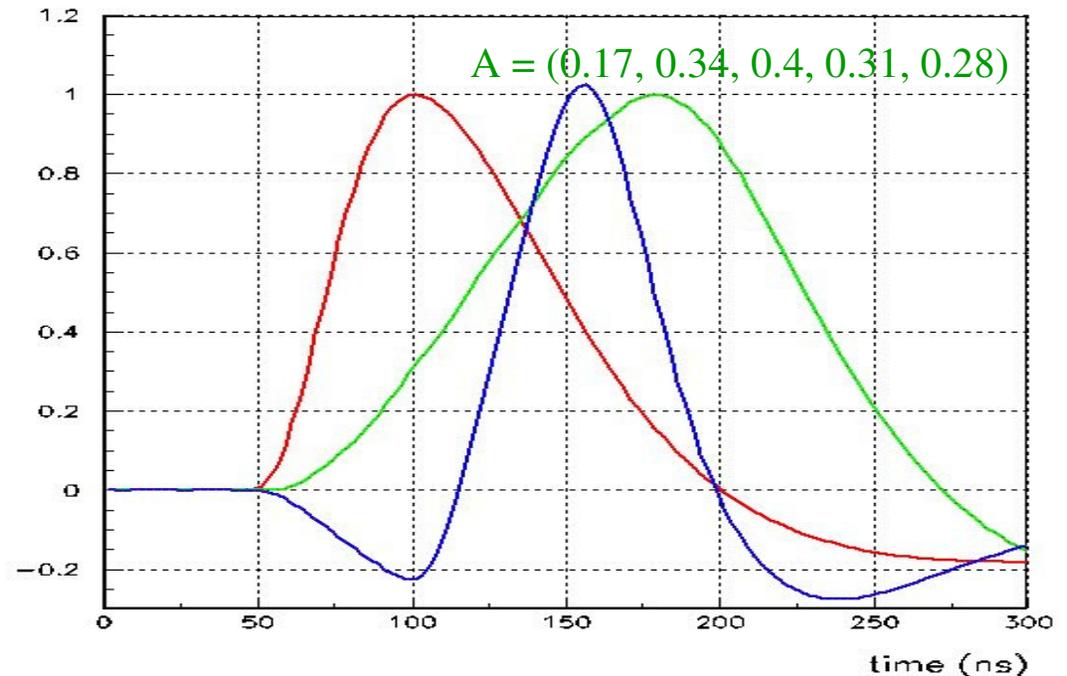
## Exemple ATLAS "multiple sampling"

### ■ 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

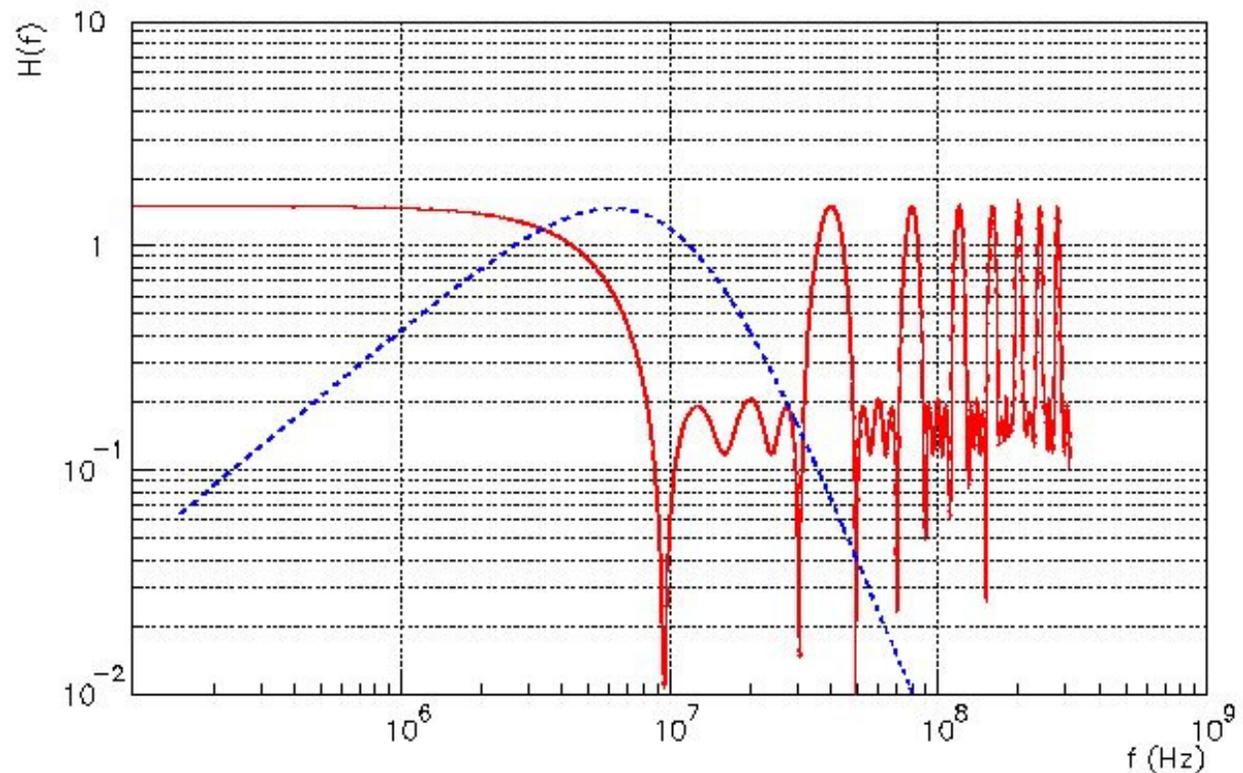


$$A = (-0.75, 0.47, 0.75, 0.07, -0.19)$$

# 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

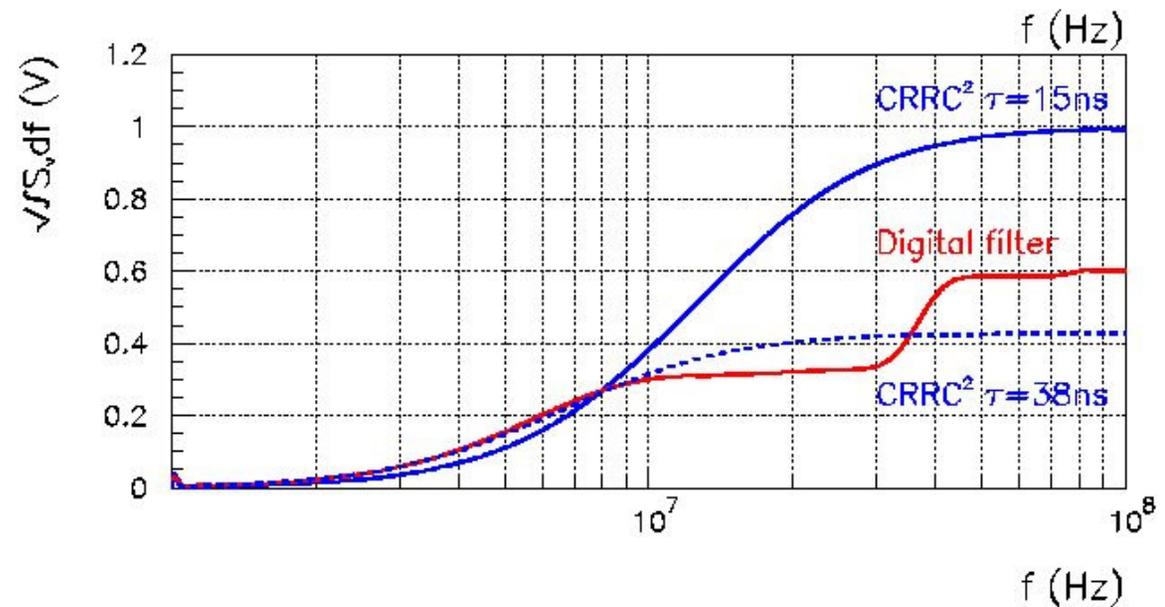
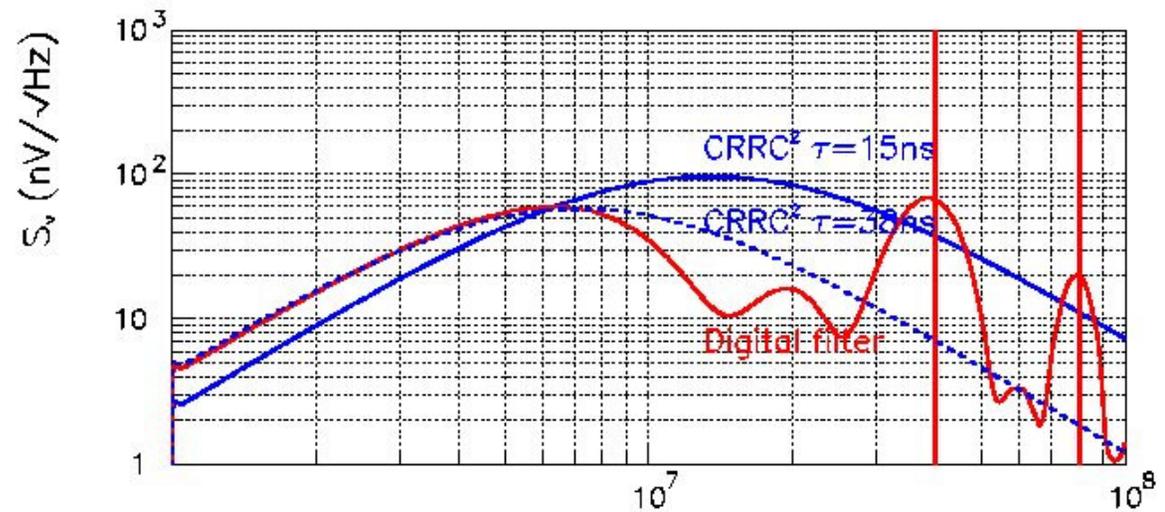




# Bruit après filtrage numérique

## ■ 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 ?

