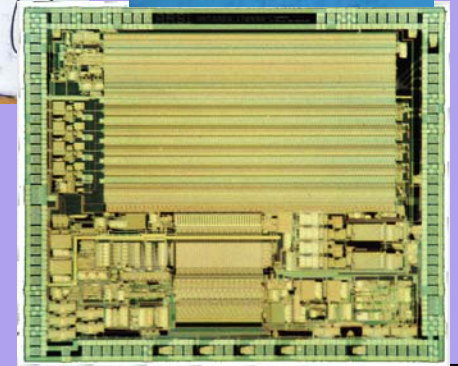
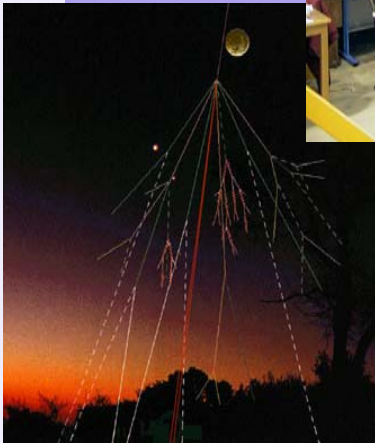
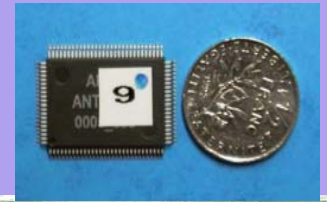


# Systemes Microelectroniques bas bruit pour la mesure nucléaire



# Sommaire

- Le domaine d'application
- Les types de fluctuations aléatoires de la mesures
  - Vocabulaire
  - Définition
- Modèles de bruit
  - Modèles des composants
- Les fonctions électroniques de base
- Exemples de réalisation
- Conclusion

# Le domaine d'application

- Instrumentation nucléaire : Utilisée partout où l'on cherche à mesurer les paramètres caractéristiques d'un flux de particules ( $p$ ,  $n$ , pions (quarks+gluons), photons ( $X$ ,  $\gamma$ ),  $\beta$ ,  $\alpha$ ,  $e$ ,  $\mu$ ,  $\nu$ )
  - **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).

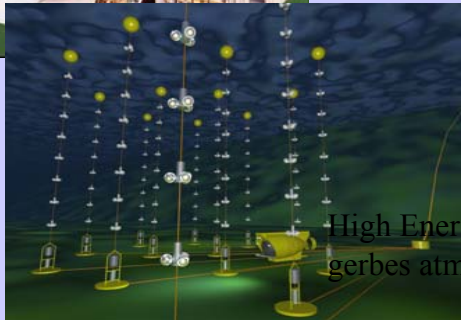


Réacteur de génération III(EDF)

Tore Supra tokamak à aimants supraconducteurs



Télescope à neutrino (ANTARES)  
Déploiement en Octobre 2005



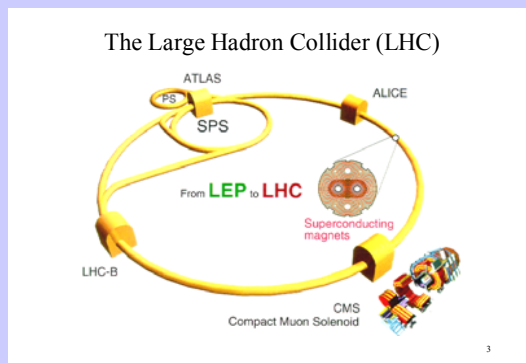
High Energy Stereoscopic System (HESS) étudie les gerbes atmosphériques en Namibie (2002)





CFHT sur le site d'hawaï (Le CFHT est situé sur la grande île d'Hawaï au sommet du volcan Mauna Kea à 4200 m d'altitude.

*Photograph by J.-C. Cuillandre (CFHT), © 2000*



Le linear hadron collider (LHC) au cern (genève)  
Mise en service en 2006



Satellite INTEGRAL lancé en octobre 2002  
Pour l'astronomie gamma

# Le domaine d'application

- 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).**

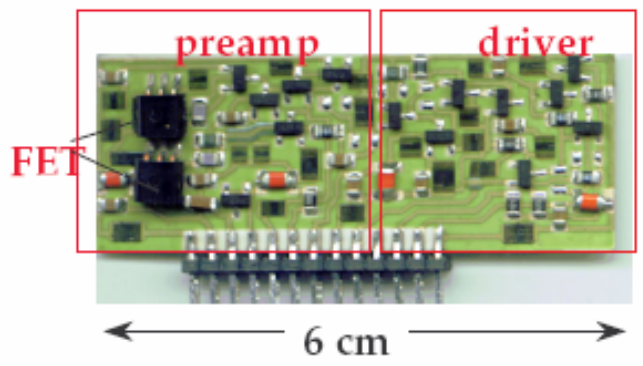
# Le domaine d'application : la révolution de la μélectronique

dapnia  
SI II

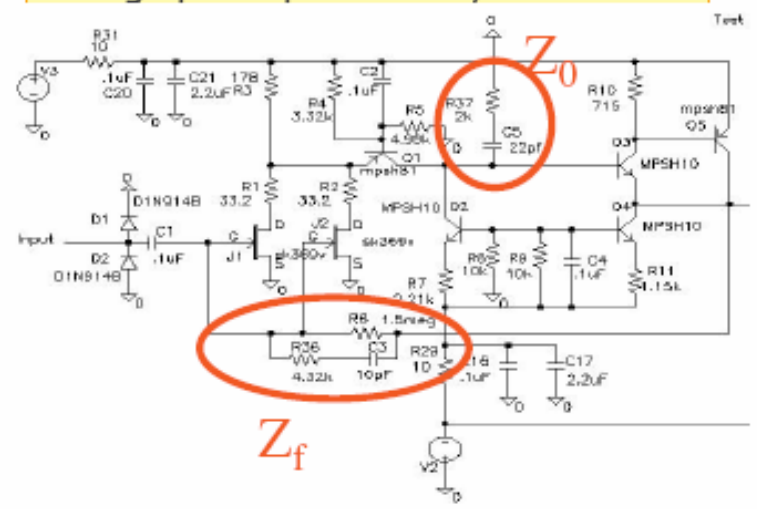


saclay

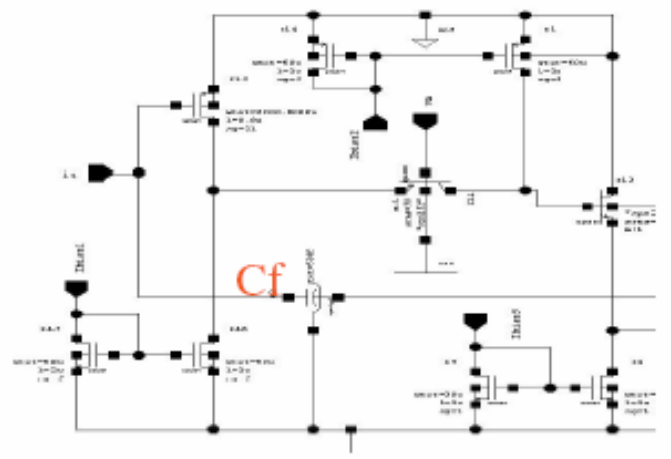
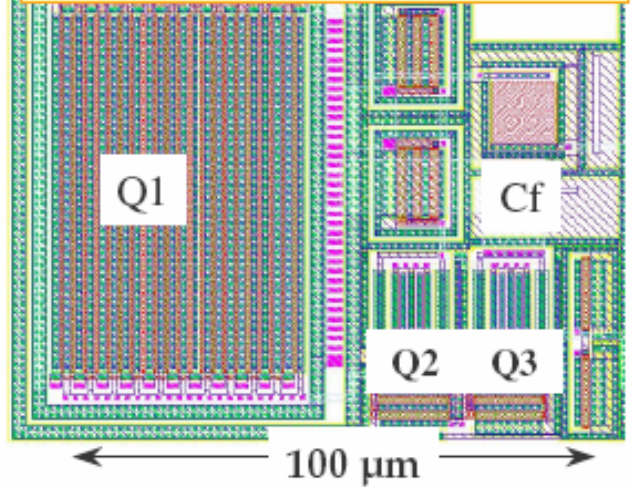
## ■ The revolution of microelectronics



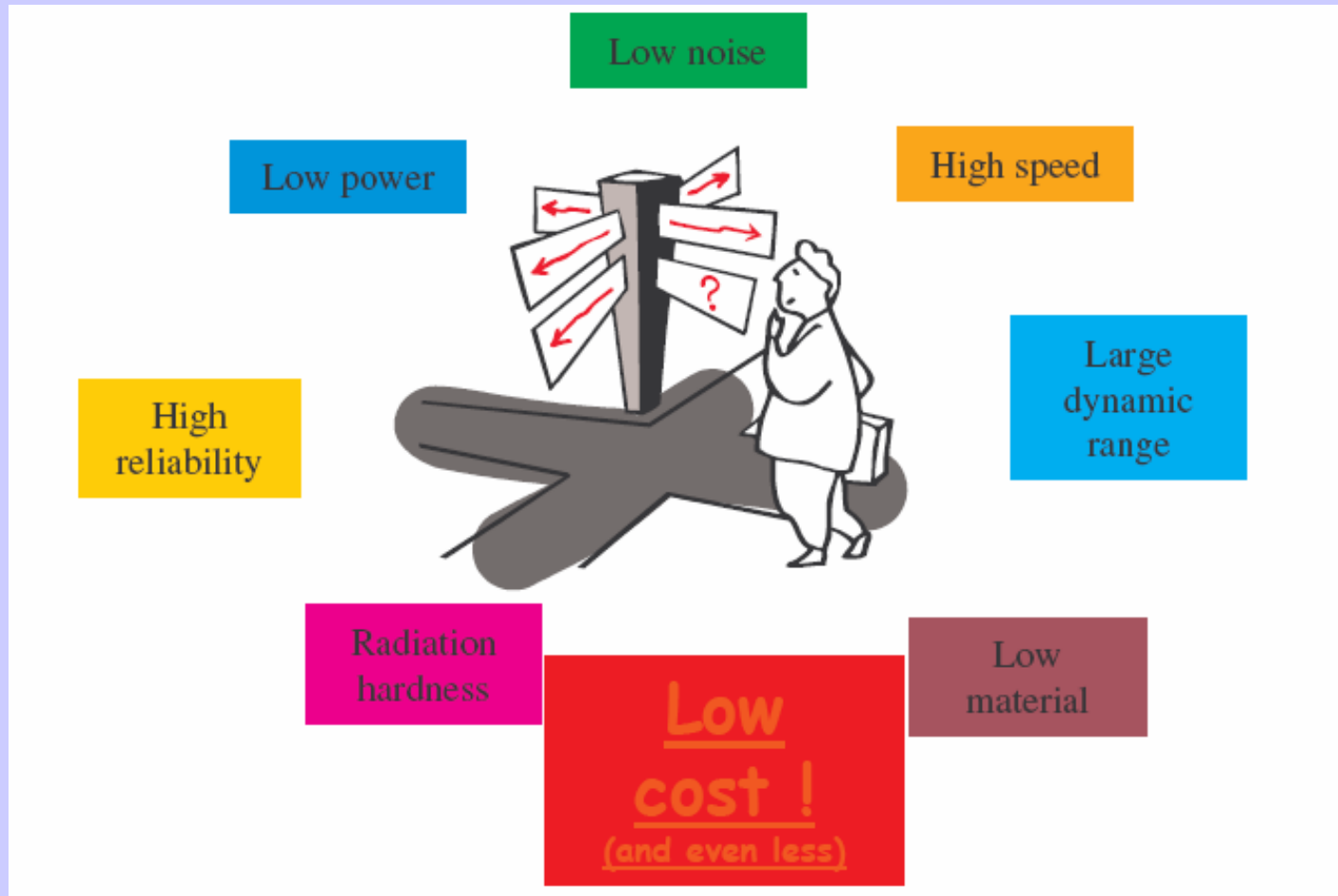
Charge preamp in SMC hybrid techno



Charge preamp in 0.8 μm BiCMOS



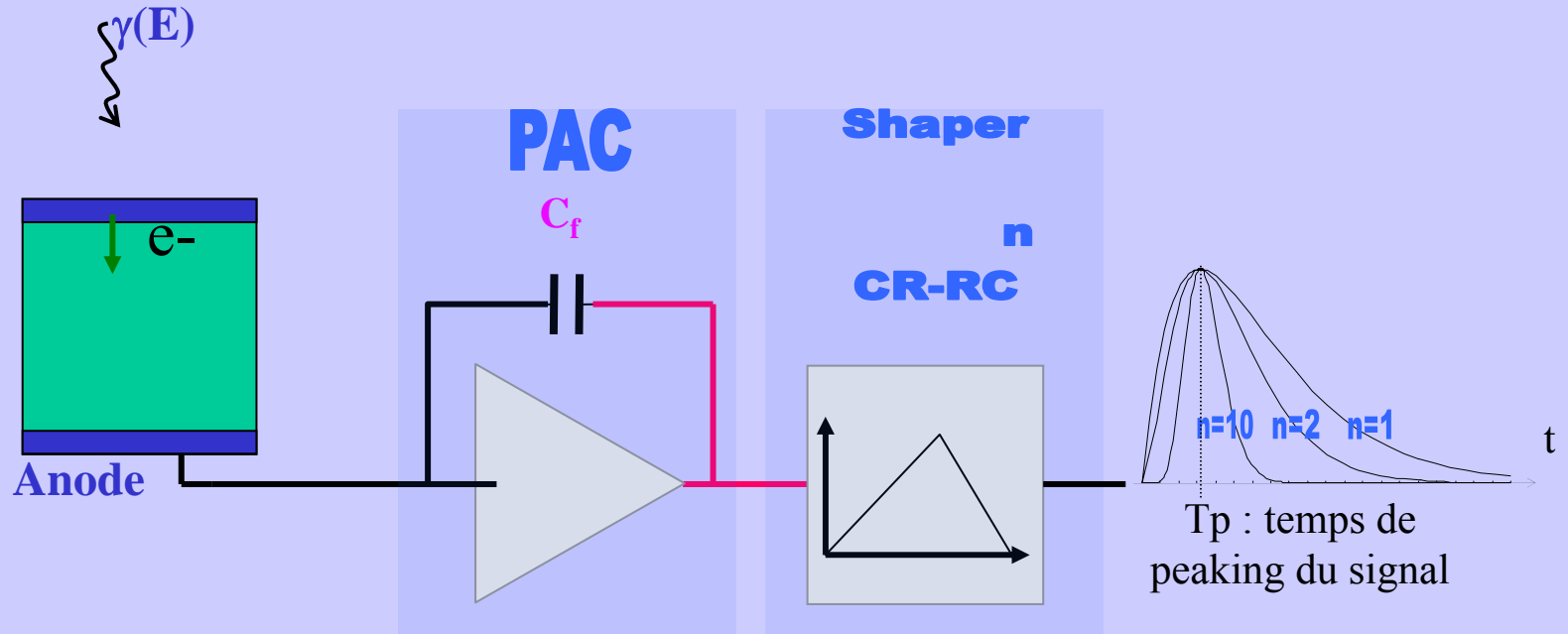
# Les contraintes de la microélectronique analogique



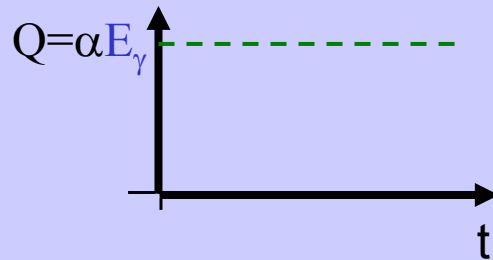
→ Construire un circuit qui a toutes ces exigences ?? :  
Compromis !!!

# Chaîne électronique front-end (mesure de charges)

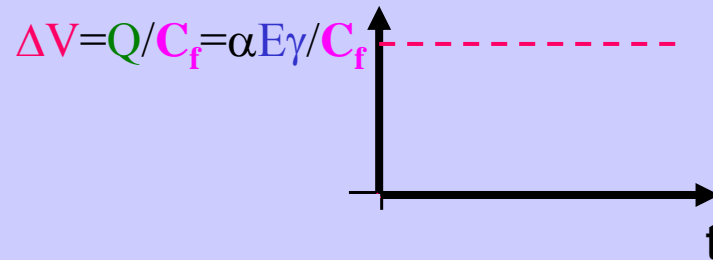
dapnia  
 CEA  
 saclay



Charge induite sur l'anode



Variation de tension en sortie PAC





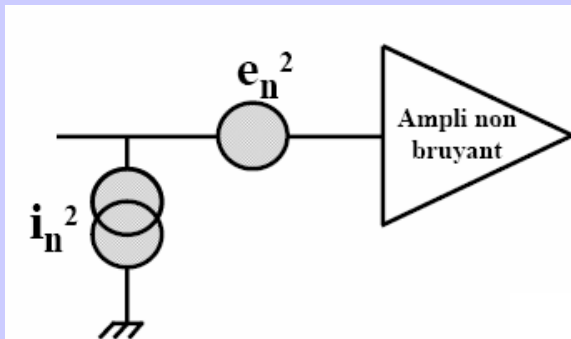
# Les fluctuations de la mesure

**Définition des fluctuations aléatoires:** Un processus aléatoire (série temporelle, processus stochastique) est un ensemble de fonctions du temps (souvent non comptabilisable) tel que cet ensemble peut être caractérisé à travers les propriétés statistiques.

- L'empilement
- Le déficit balistique
- **Le bruit du détecteur**
- **Le bruit électronique**
- Le Crosstalk

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

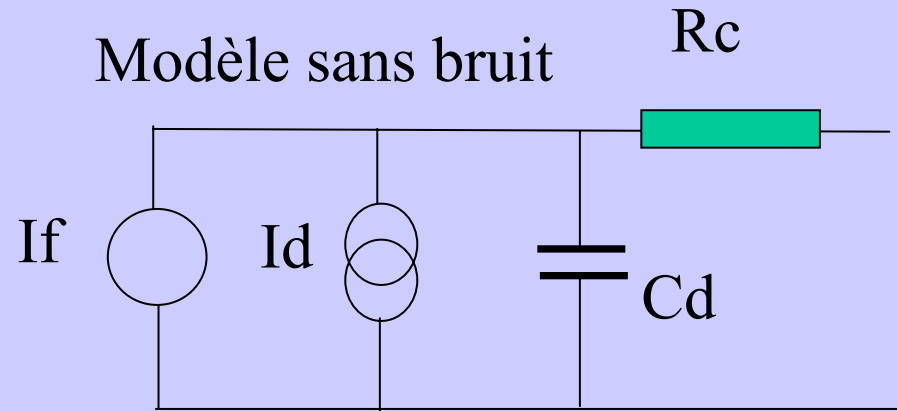
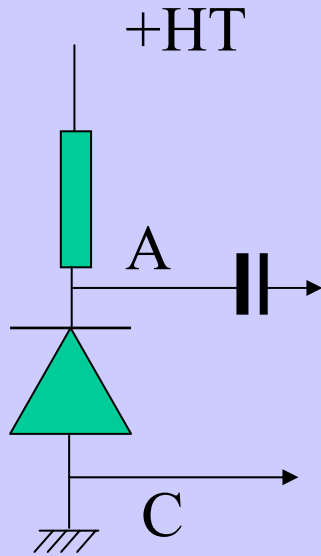
Le but est d'optimiser  $\sigma_{\text{pu}}$  ;  $\sigma_{\text{ba}}$  ;  $\sigma_{\text{elec}}$  pour minimiser  $\sigma_{\text{total}}$



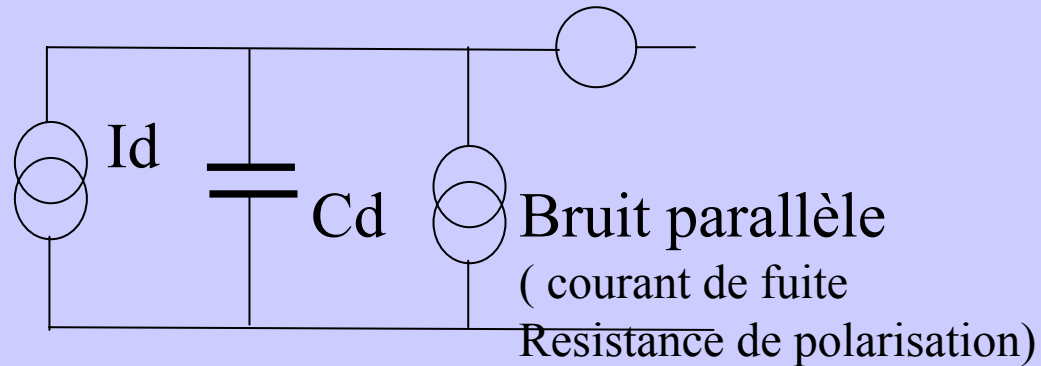
On modélise le bruit par un bruit en tension  $e_n^2$  et un bruit en courant  $i_n^2$  ramené en entrée d'un composant non bruyant (idéal en bruit)

# Les fluctuations de la mesure

- Le bruit venant du détecteur:



Modèle avec bruit      Bruit série



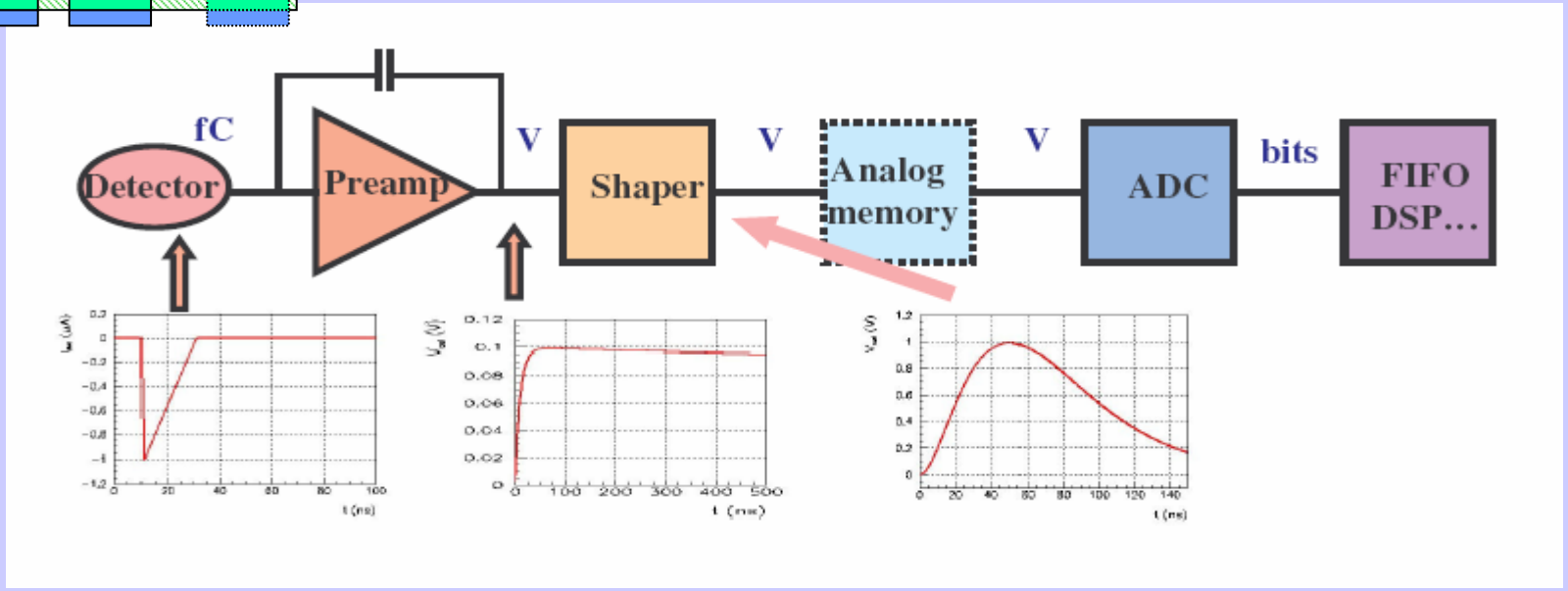
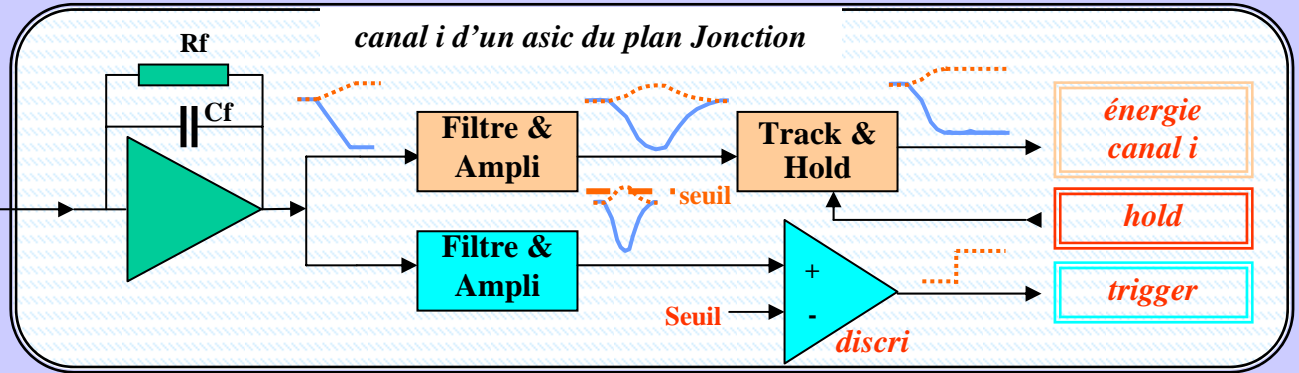
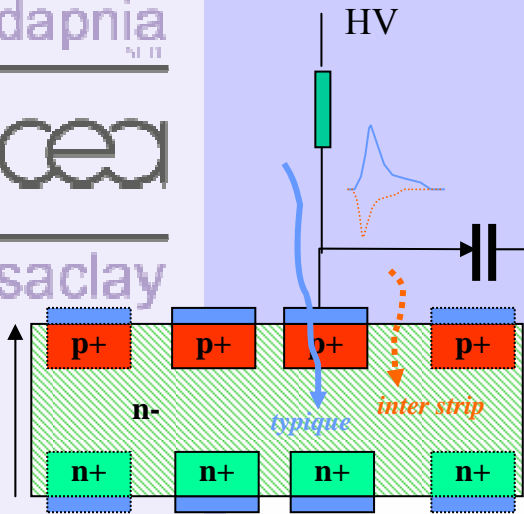
- $I_d$ : courant induit par le rayonnement
- $I_f$ : courant de fuite
- $C_d$ : capacité équivalente
- $R_c$ : résistance de contact

# Les fluctuations de la mesure

dapnia  
SI 11

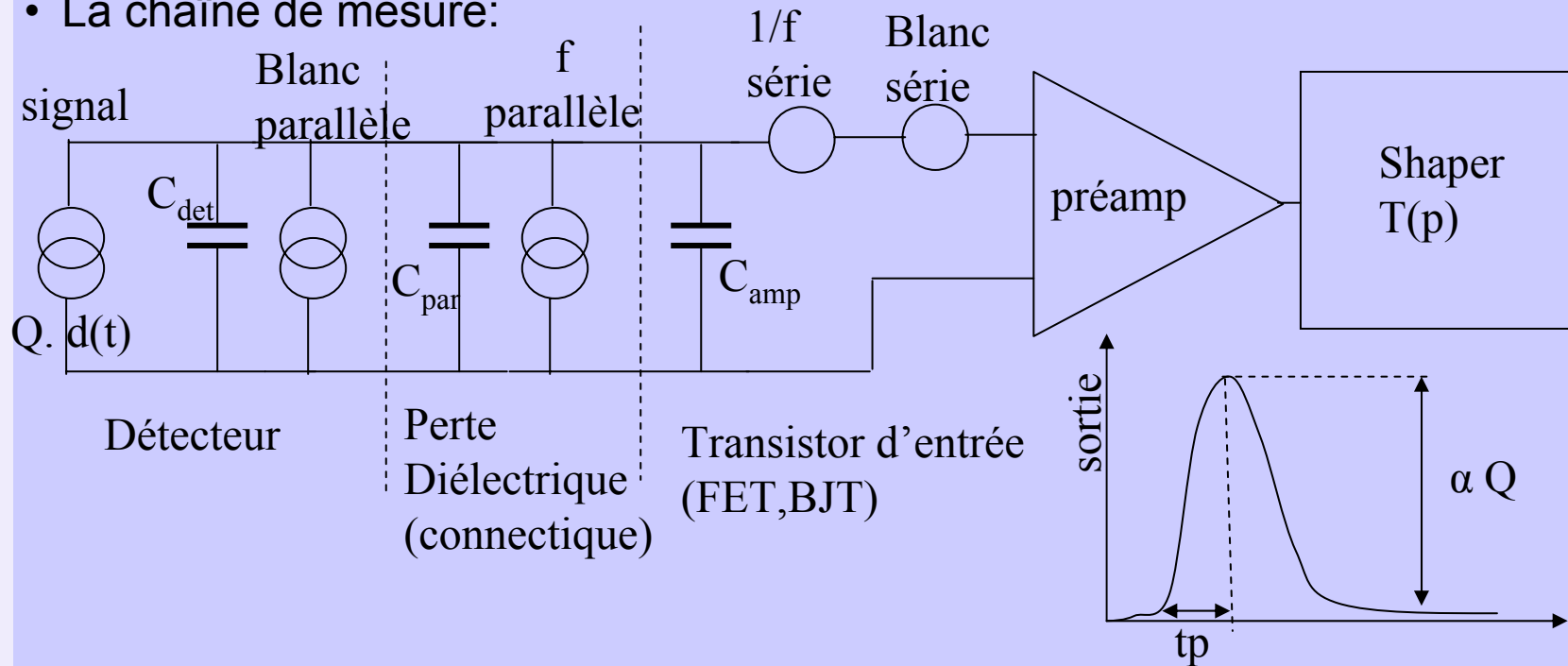


saclay



# Les fluctuations de la mesure

- La chaîne de mesure:



- Le principe est de synthétiser un filtre Shaper T(p) pour optimiser le rapport

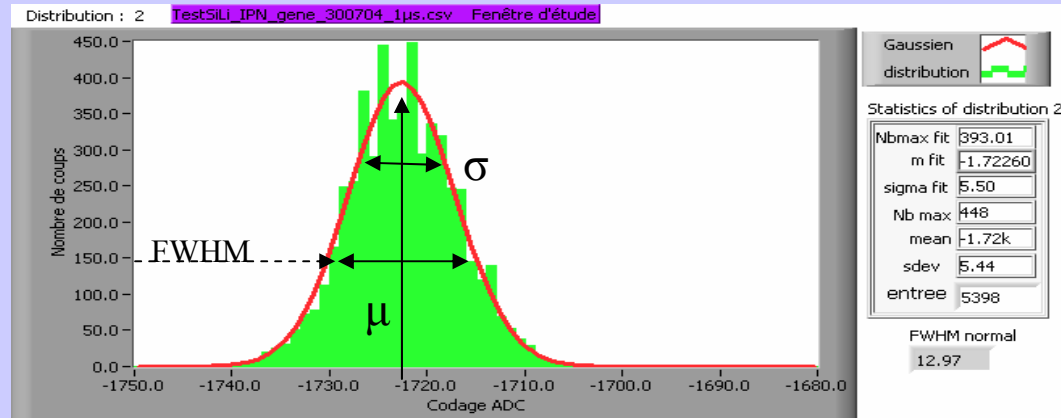
Signal sur bruit:

- Calcul du meilleur temps de pic (peaking Time) = temps de mesure.
- Optimisation de la forme d'ondes désirée en définissant une "Weighting function". (cf Radeka, F. Manfredi)

# Analyse du bruit : Vocabulaire

- Les outils statistiques:

- La moyenne
- L'écart type
- Le FWHM  
= 2.36 x Ecart type



- **Densité spectrale de puissance (de bruit) DSP**

→ Modélisation des composants, caractérisation de la technologie

→ Calcul de la propagation des erreurs

- Paramètres IEEE:
- Rapport signal sur bruit.  $S/N \gg 1$
- Facteur de bruit:  $(S/N)_{\text{sortie}} / (S/N)_{\text{entrée}}$

- **Charge équivalente de bruit (ENC)** : le rapport signal sur bruit ne fournit pas une description intrinsèque du bruit de la chaîne de mesure. En effet, il dépend du paramètre Q la charge relative dû au rayonnement incident.

**ENC** est la valeur de Q pour un rapport signal sur bruit égal à 1.

→  $V_{\text{sortie}} = V_{\text{rms}}$

# Modèles de bruit

- **Bruit Thermique** : éléments dissipatifs = résistances (Bruit blanc)

**Densité spectrale de puissance** :  $kT$  ( $W Hz^{-1}$ )

**de tension** :  $S_v = 4kTR$  ( $V^2 Hz^{-1}$ )

**de courant** :  $S_i = 4kT/R$  ( $A^2 Hz^{-1}$ )

- « Shot noise » ou bruit de grenaille : lié au passage d'un courant continu (Bruit blanc)

**Densité spectrale de courant** :  $S_i = 2qI_{DC}$  ( $A^2 Hz^{-1}$ )

- **Bruit en 1/f** ou « flicker noise » : bruit lié aux défauts de l'oxyde

**Densité spectrale de tension** :  $S_v = Af/f$  ( $V^2 Hz^{-1}$ )

Af est fonction de la technologie

**Bruit R.M.S. = Intégrale de la densité spectrale sur la bande passante**

# Modèles de bruit

## • Transistor MOS :

• Bruit série : Thermique  $e_n^2 = 4kT\alpha/g_m$      $2/3 < \alpha < 1.0$

1/f (flicker)  $e_n^2 = K_f/C_{gs} \cdot f$      $10^{-26} \text{ J} < K_f < 10^{-23} \text{ J}$

## • Transistor BJT :

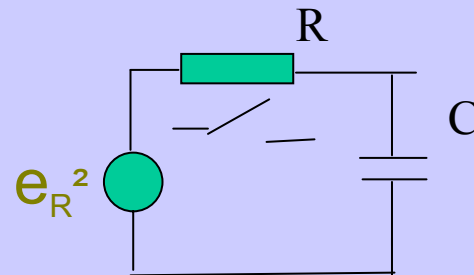
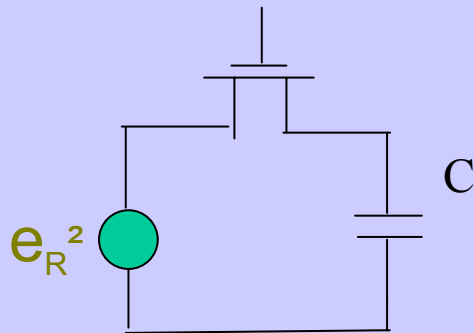
• Bruit serie :  $e_n^2 = 4kT(1/2g_m + r_b)$

Valeur ~ 1-2 nV Hz<sup>-1/2</sup>

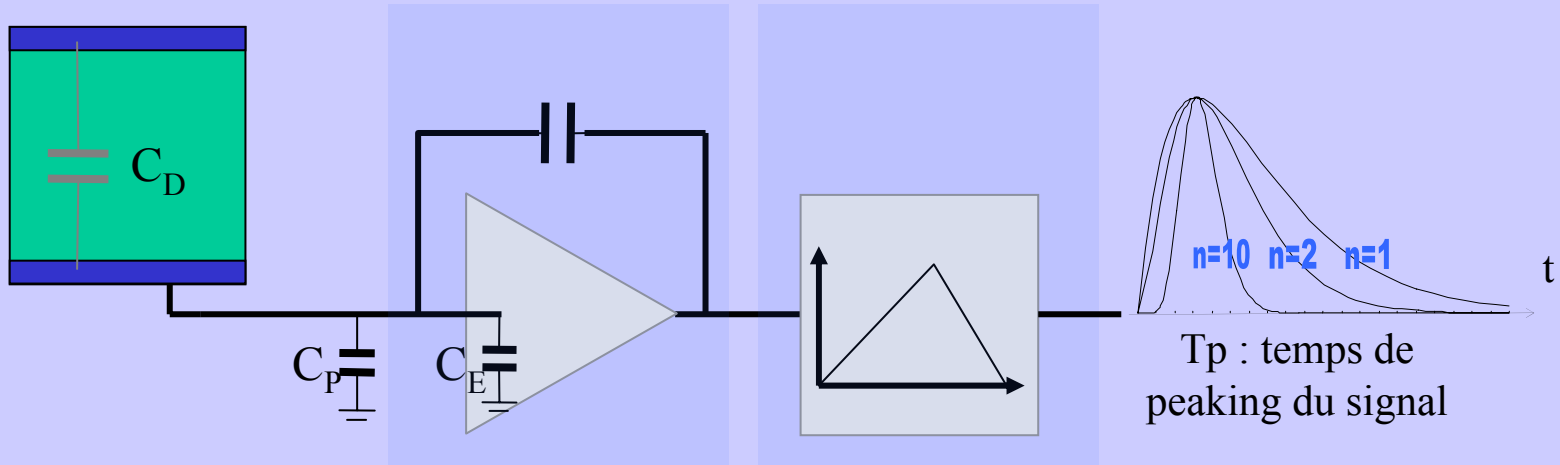
• Bruit parallele :  $i_n^2 = 2q \cdot I_b$

## • Transistor en interrupteur sur charge capacitive :

$$e_n^2 = kT/C$$



# Optimisation avec ENC



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

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

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

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

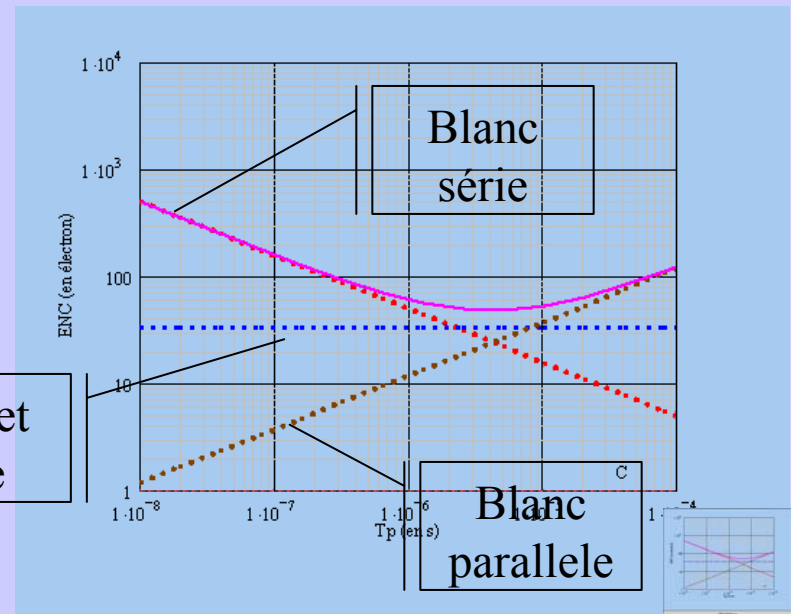
Optimisation du préamplificateur :

Si  $C_T = C_P + C_D$

**Bruit série:**  $C_E = C_T / 3$

**Bruit 1/f:**  $C_E = C_T$

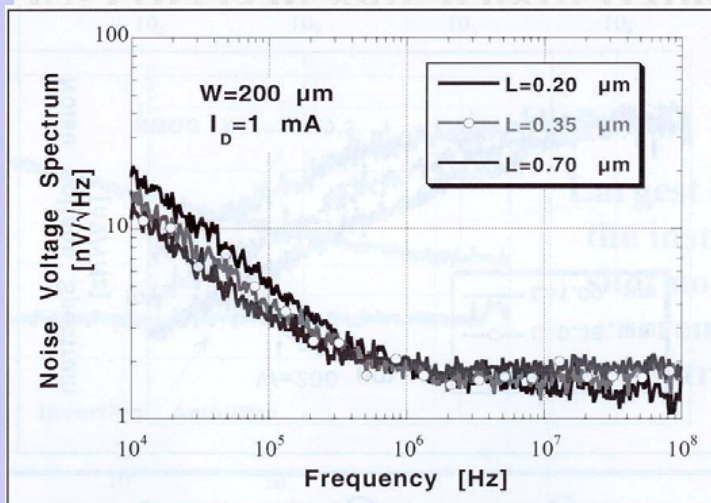
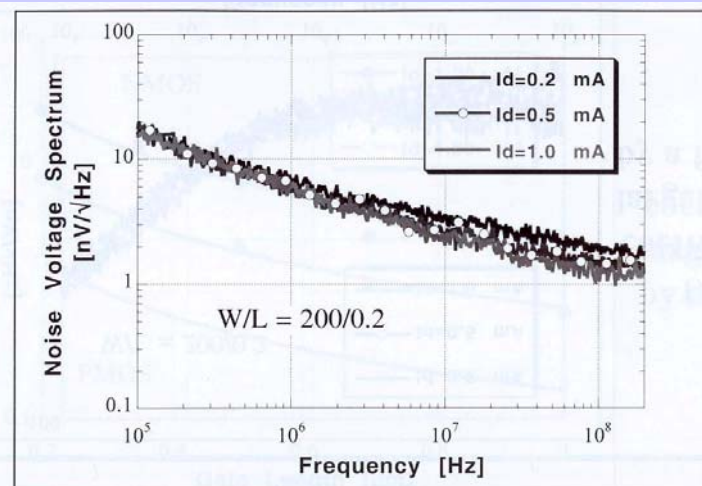
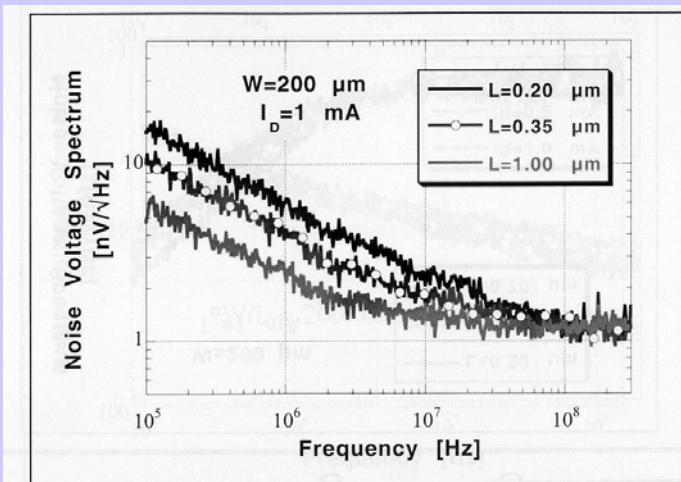
1/f // et  
série



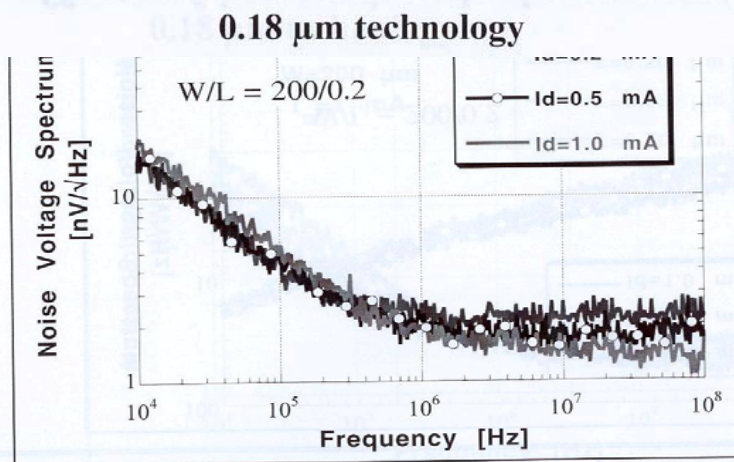


# Modèles de bruit et caractérisation

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



0.18  $\mu\text{m}$  technology



0.18  $\mu\text{m}$  technology

SOI MOS

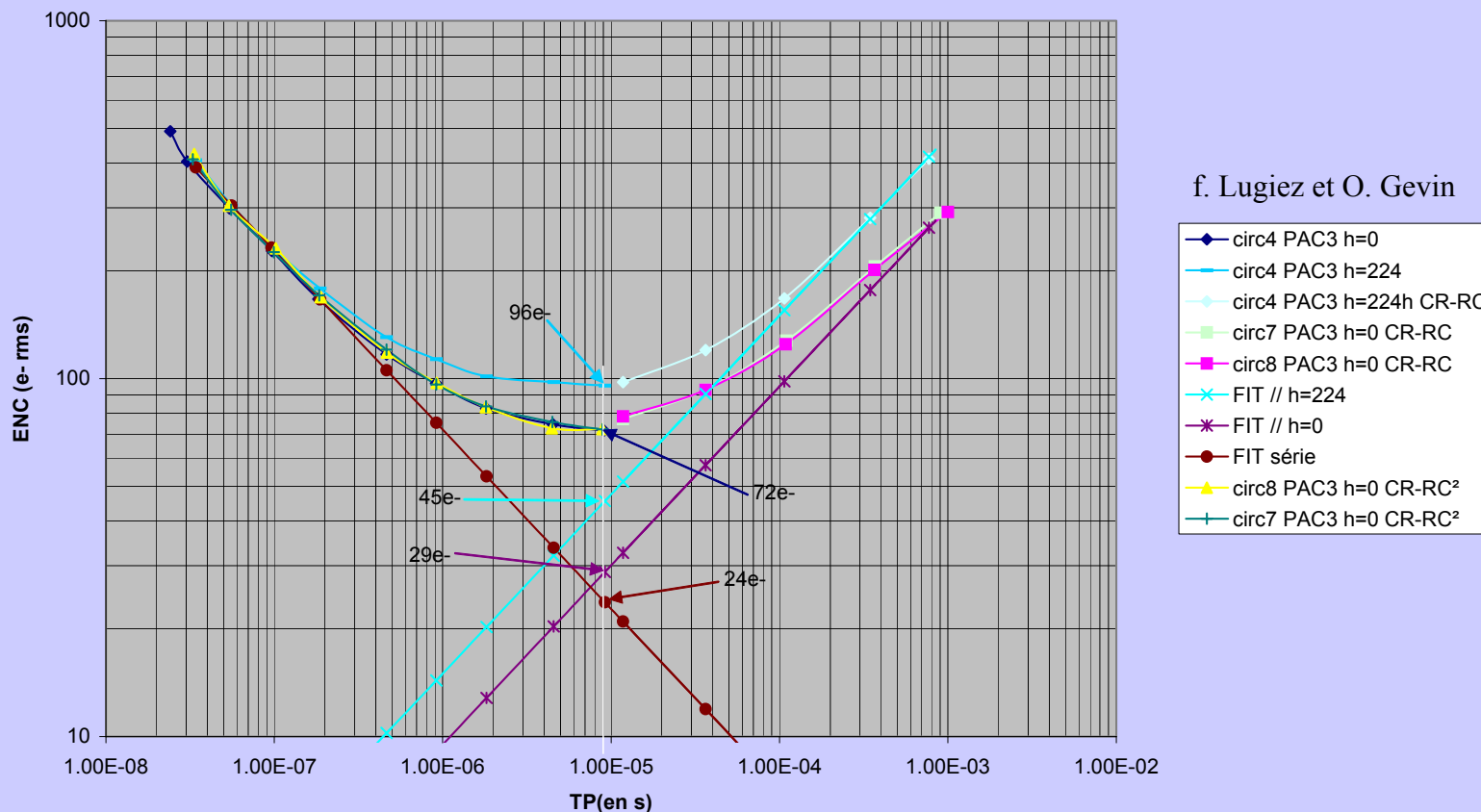
PMOS

# Modèles de bruit et caractérisation

- 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



f. Lugiez et O. Gevin

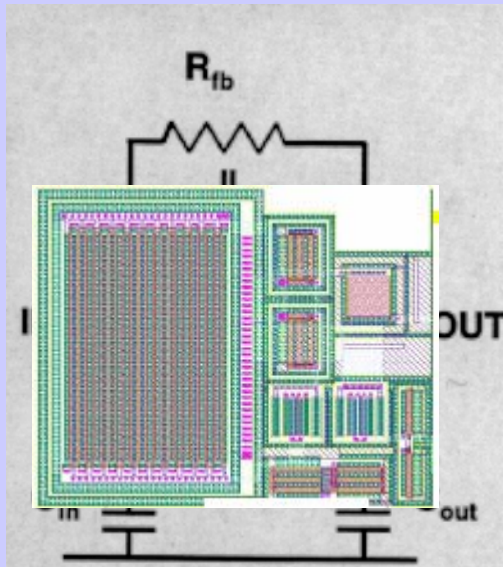
# Les fonctions de bases

PAC, CSA : convertir la charge en tension

dapnia  
SI II



saclay



Transfer function :

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

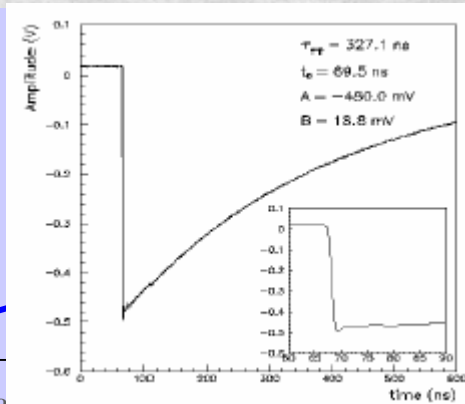
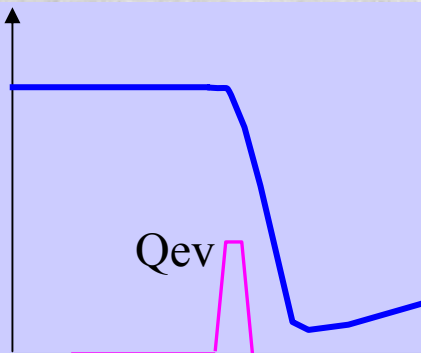
$$\tau_r = \frac{C_{fb}C_{in} + C_{fb}C_{out} + C_{in}C_{out}}{gmC_{fb}} \quad \tau_z = \frac{C_{fb}}{gm}$$

With feedback resistance :

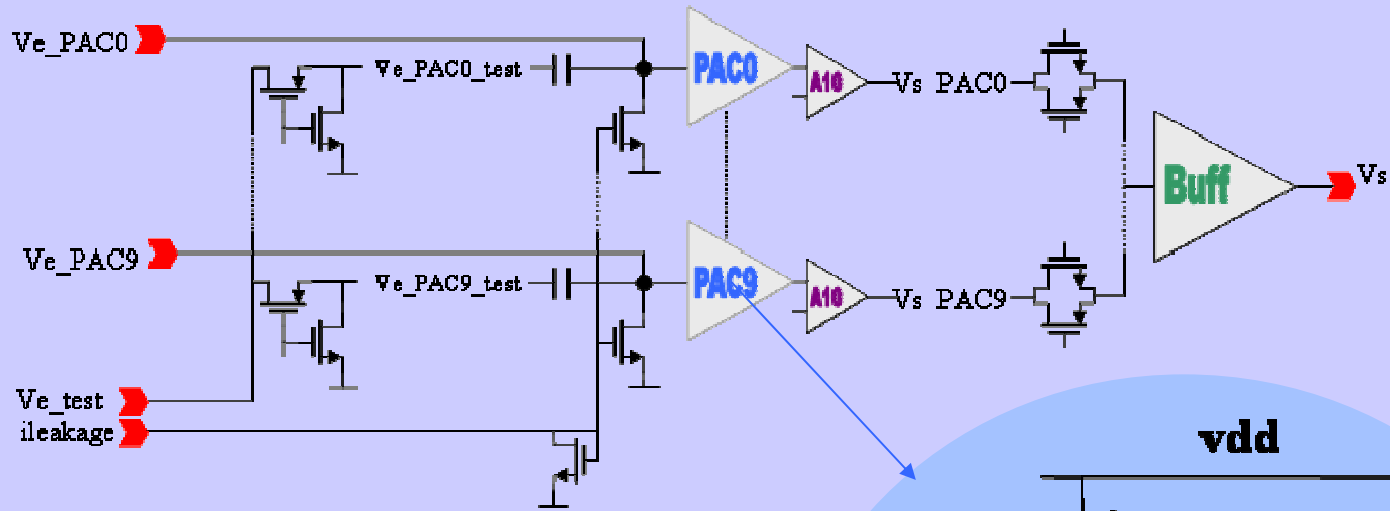
$$\frac{V_{out}(s)}{I_{in}(s)} = -\frac{(1-\tau_z s)}{G_{fb}(1+\tau_r s)(1+\tau_{fb} s)}$$

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

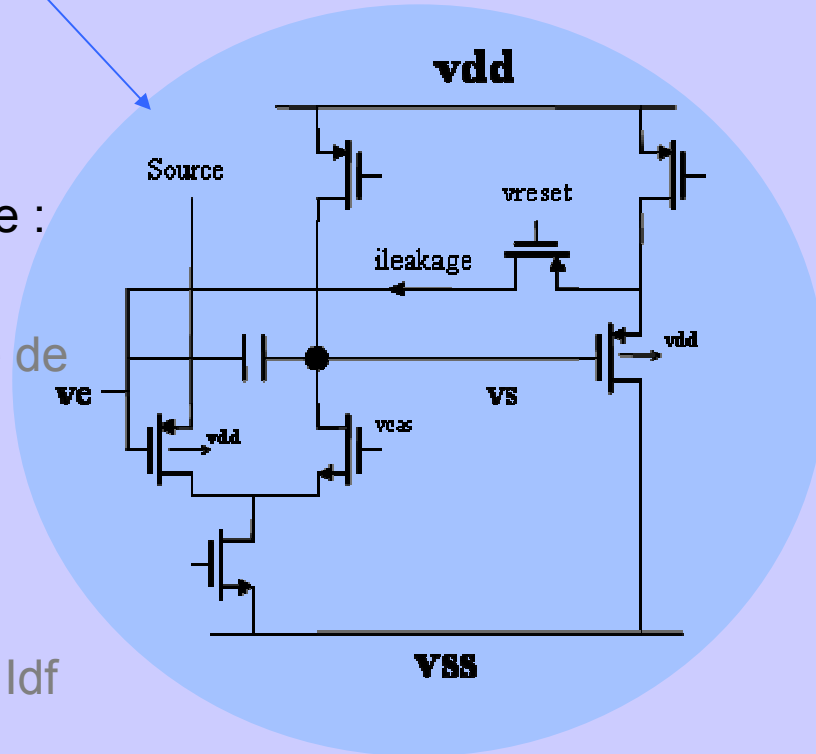
Vpac



# Imaging Detector Front-end : IDeF-X V0

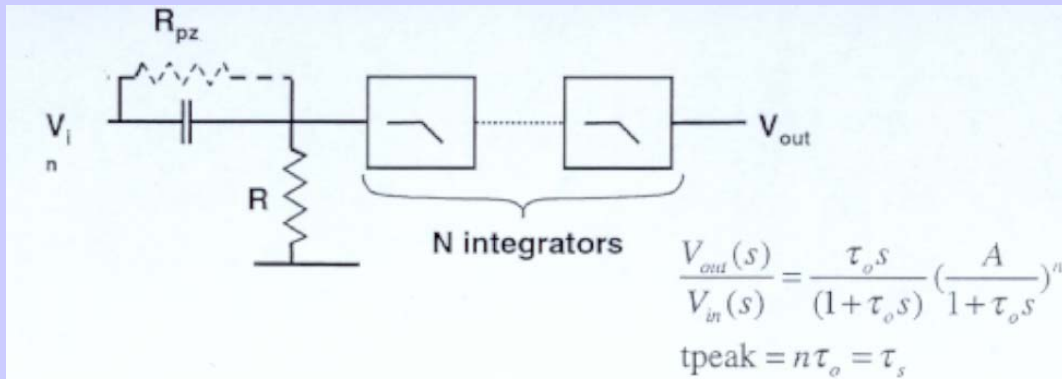
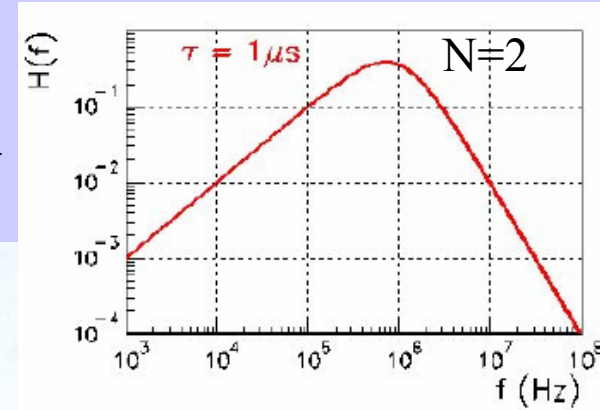
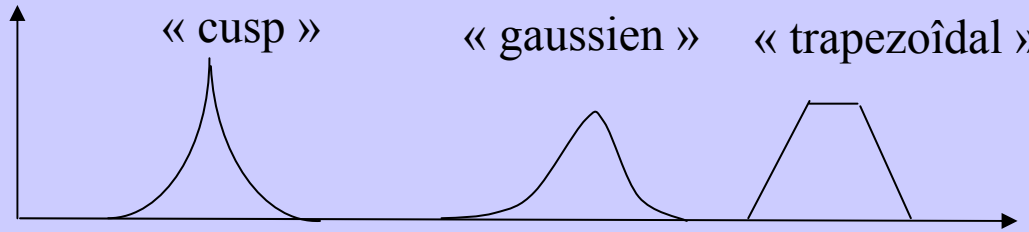


- Utilisation d'un amplificateur cascode :
  - Diminution de l'effet Miller
  - Augmentation de la résistance de sortie.
- Ajout d'un reset (équivalent à une résistance):
  - Vider Cf
  - Absorber ou fournir le courant  $I_{df}$  du détecteur



# Les fonctions de bases

- 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 :

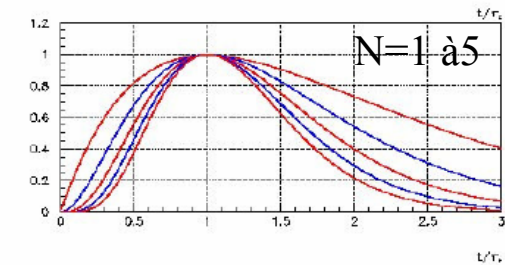
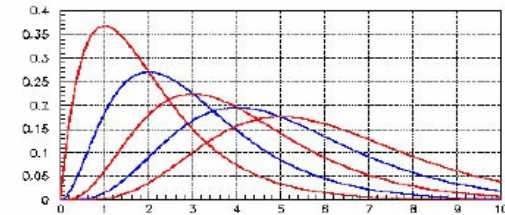


For step function input from CSA

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

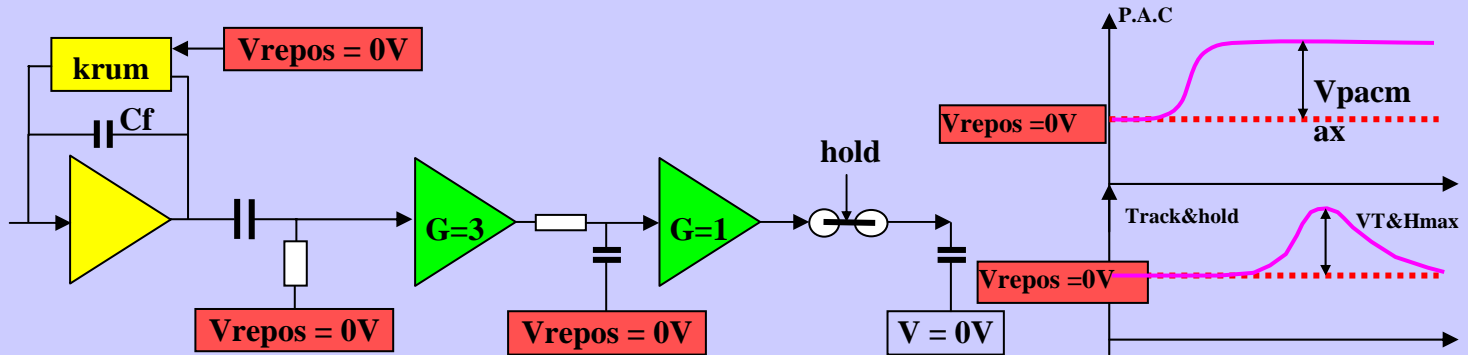
$$V_{out}(t) = \frac{Q}{C_f} \cdot \frac{A^n n^n}{n!} \left( \frac{t}{\tau_s} \right)^n \exp\left(-\frac{nt}{\tau_s}\right)$$

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



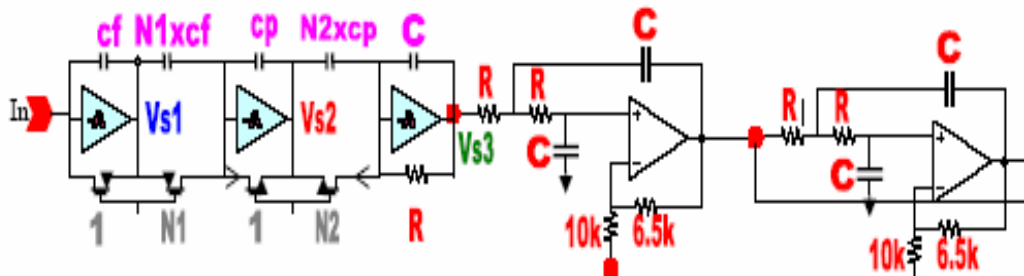
# Les fonctions de bases

- Implantation simple (ASIC MATE ) du shaper

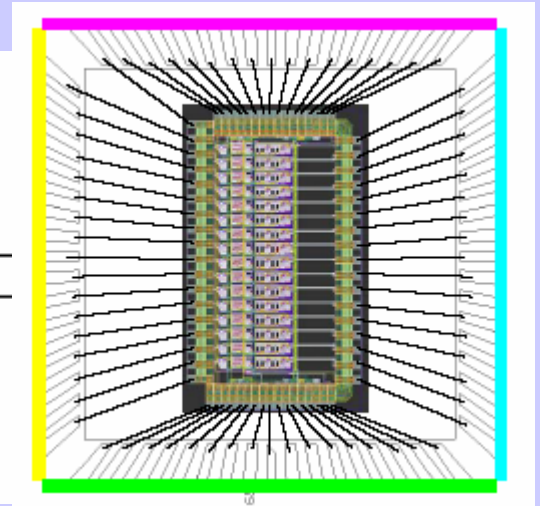


**Configuration Si(strips) & CsI**

- Utilisation d'un Sallen et Key (Idef-X)



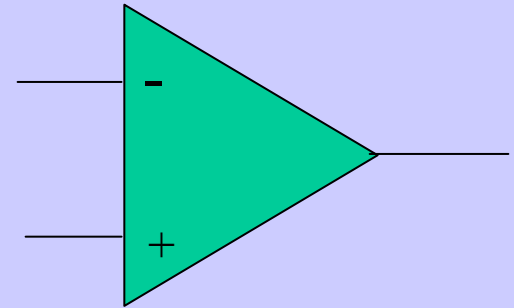
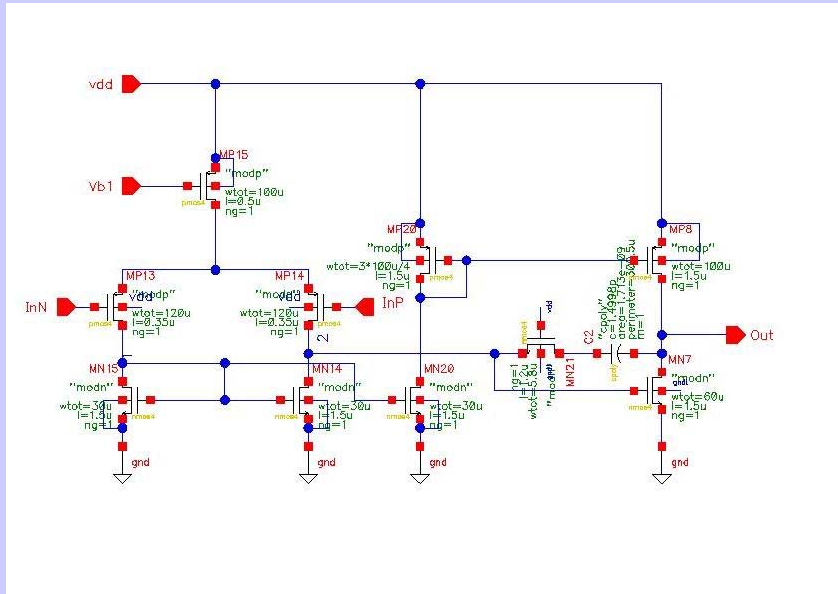
**Avantages :** - ajout de gain ( $1 < g < 2$ )  
 - filtre Ordre 2  $\rightarrow$  gaussien



# Les fonctions de bases

- **Amplificateurs opérationnels :**

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

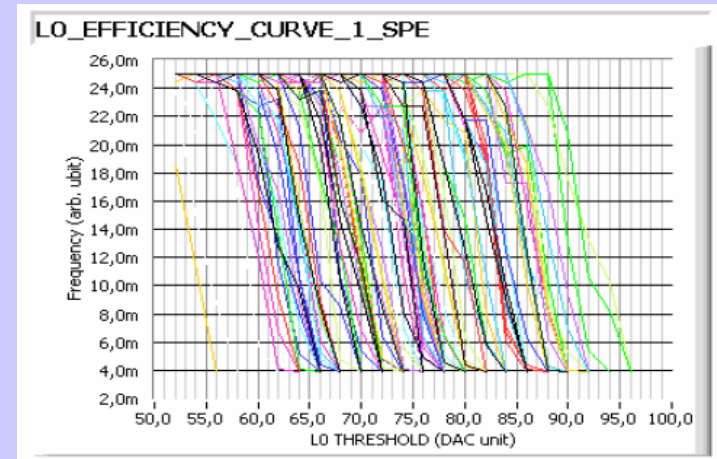
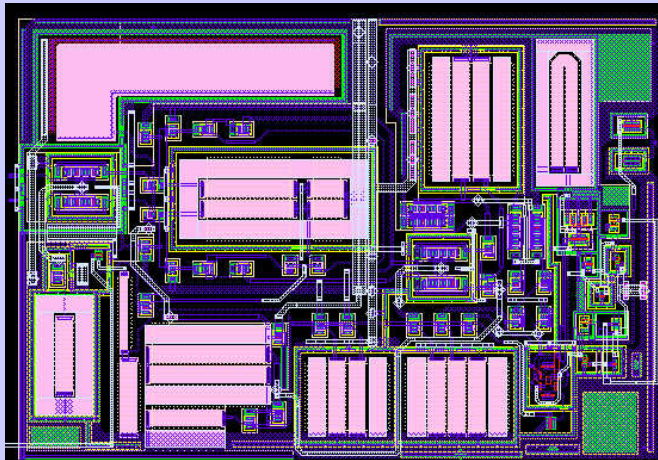
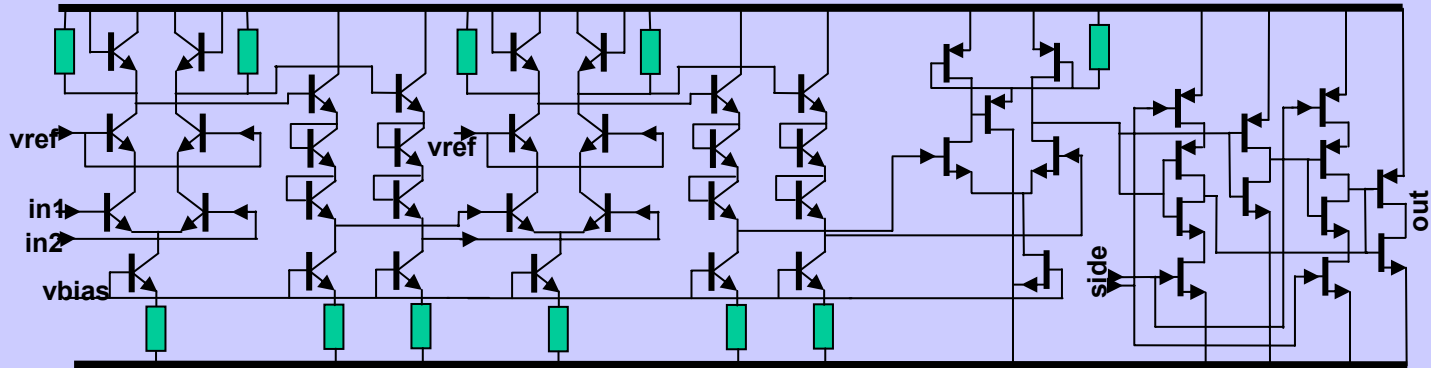


Ampli 2 étages avec compensation effet miller et suppression du zero



# Les fonctions de bases

- Discriminateur : Amplificateur à gain élevé, rapide, fonctionnant en grand signaux (saturation, rétroaction positive):
  - Utilisation pour détecter un signal du détecteur (suppression du bruit de fond) ou pour détecter un temps de passage d'un événement.
  - Dispersion des seuils entre canaux et entre circuits (calibration)
  - Problème de compensation d'offset



Dispersion des seuils



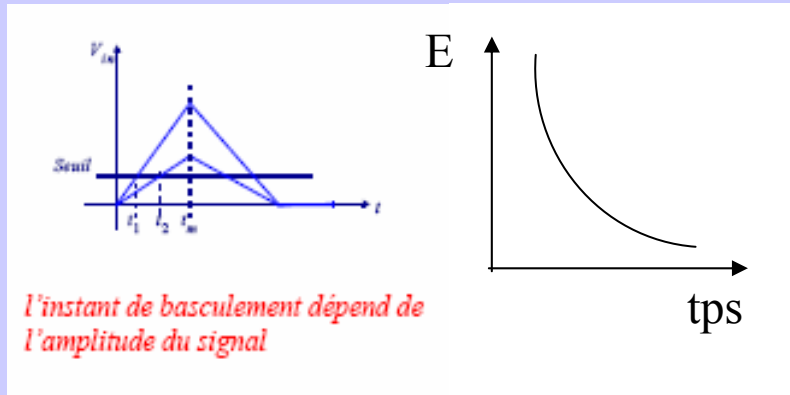
# Les fonctions de bases

- Inconvénient du discriminateur commandé par front (leading edge) :

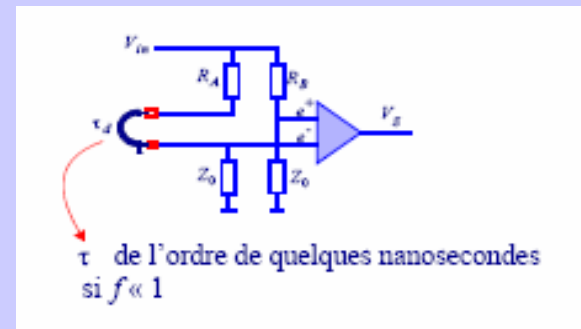
- Précision de passage dépend de la hauteur du signal
- Sensible aux jitters sur le signal (bruit)
- Nécessite une pente infinie ( consommation)

- **Time walk:**

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



- Discriminateur à fraction constante:



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

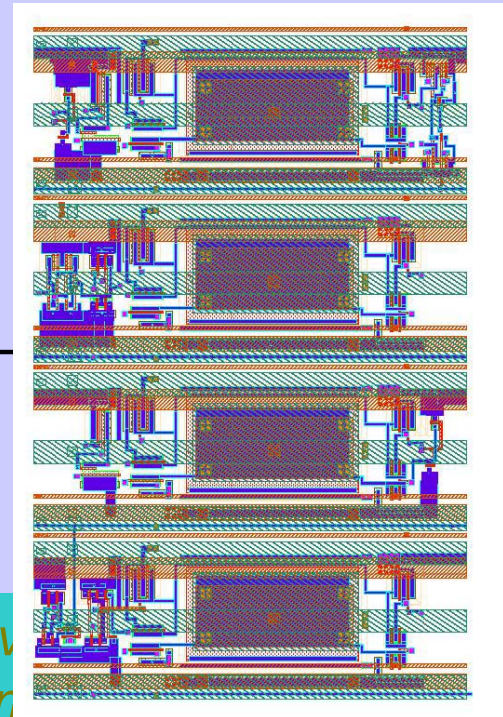
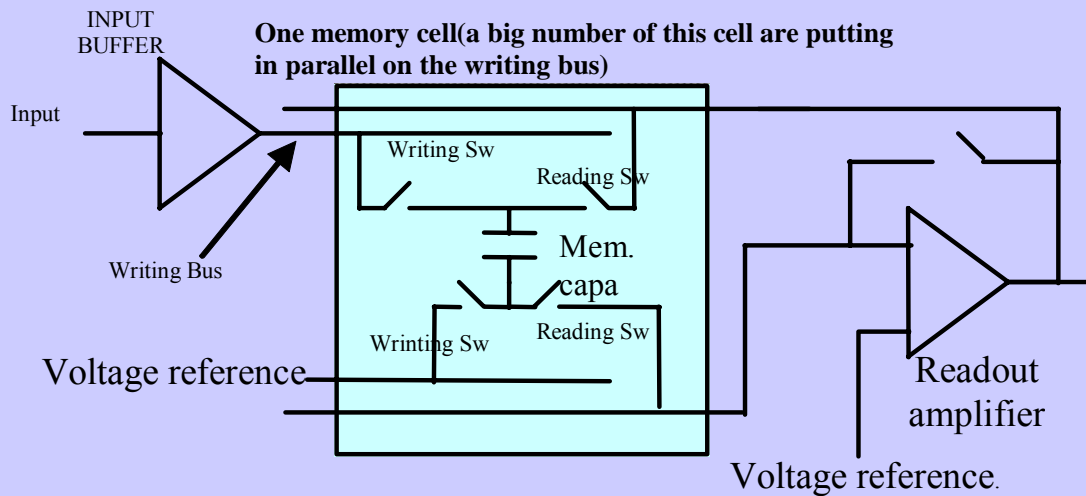
$A_o$  : amplitude de  $V_{in}$

$F$  : fraction prise  $< 1$

$\tau$  : retard de  $V_{in}$

# Les fonctions de bases

- Mémoire analogique, échantillonneur rapide :
  - Échantillonneur rapide (1MHz → 4GHz) 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 v
- Pb de courant de fuite des capacités (tps de r
- fréquence de lecture dépend du nbre de cellules sur le bus

# Les fonctions de bases

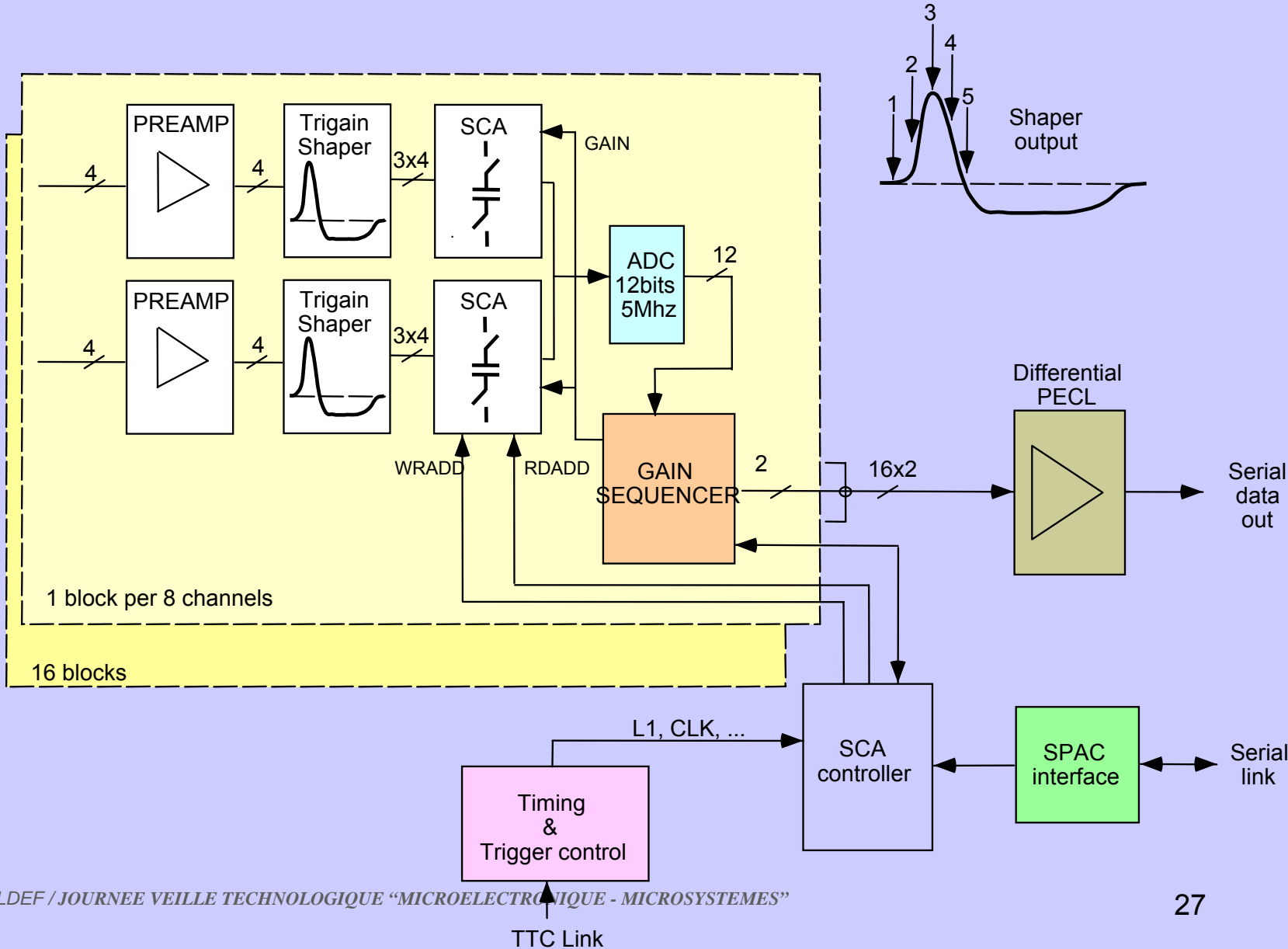
## Synopsis of Atlas Calorimeter Front-end Board

dapnia



saclay

From detector



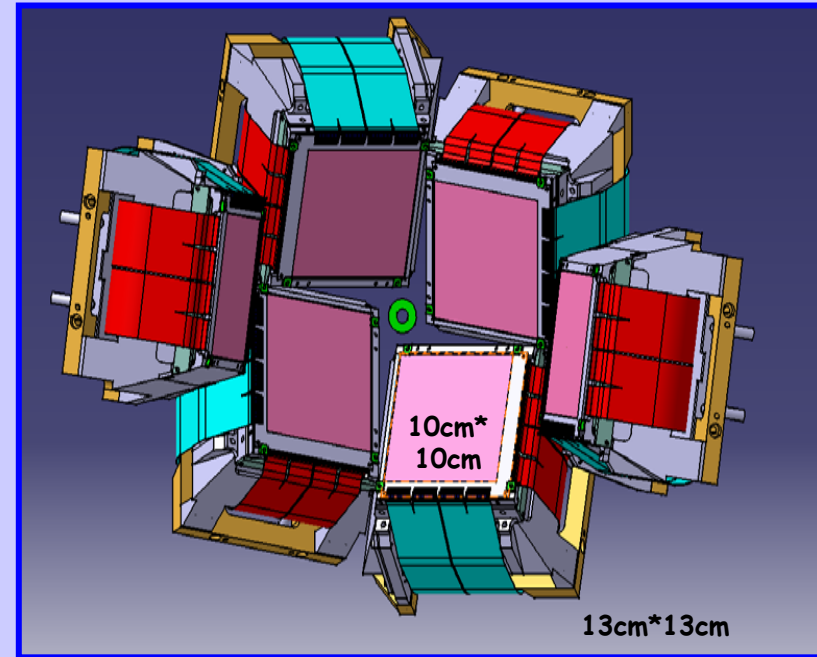
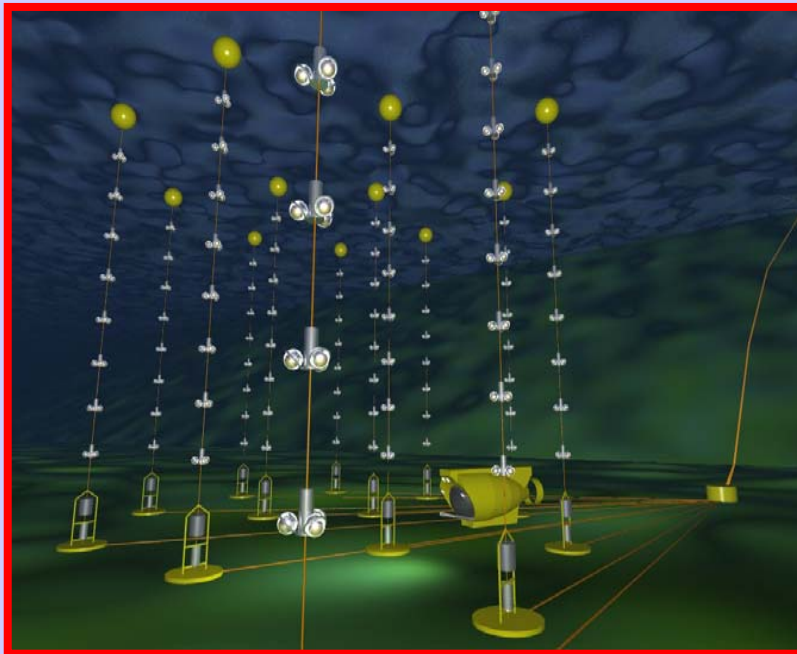
# Exemples de réalisation

- Circuit MATE pour l'expérience MUST
- Circuit ARS1 pour l'expérience ANTARES

dapnia  
SI II

cea

saclay



*L'asic MATE associé aux 3  
détecteurs de l'hodoscope  
MUST2*

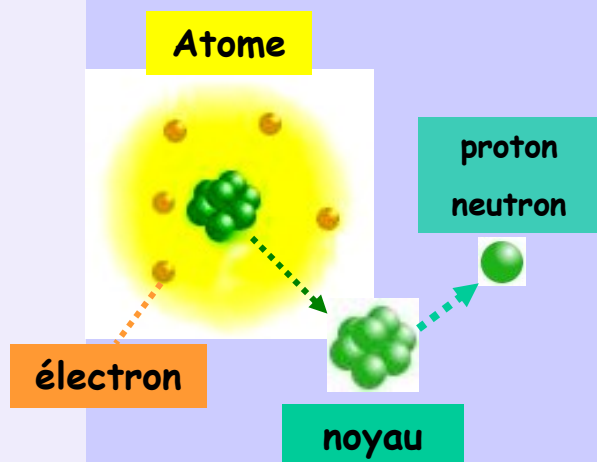
# 1/ La physique des noyaux exotiques

## • Noyaux atomiques

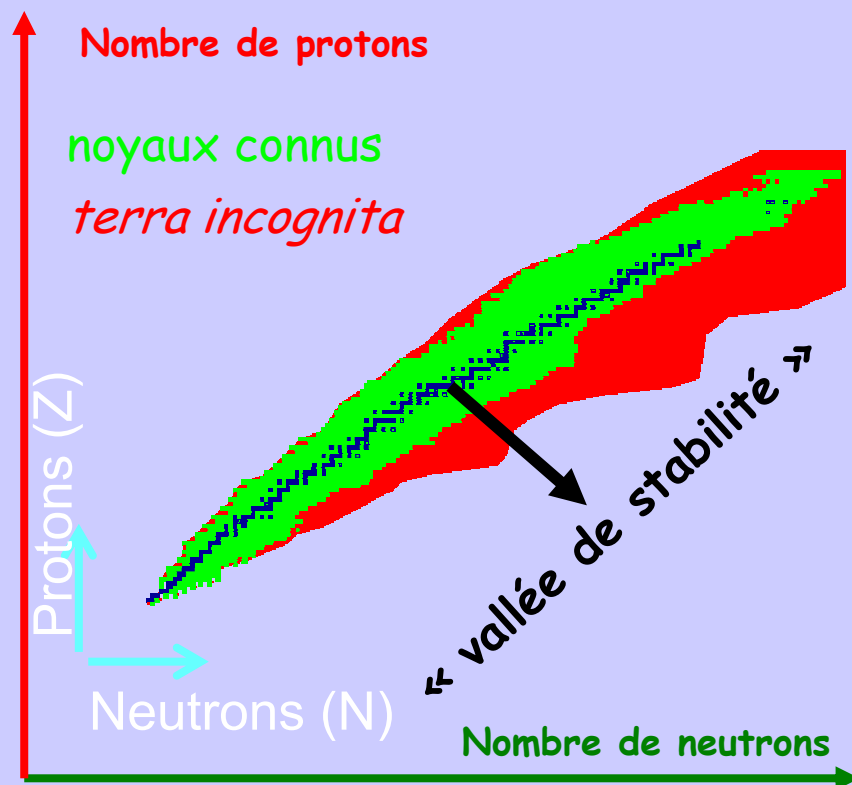
Plus de 3000 noyaux atomiques dans l'univers  
300 noyaux atomiques sur terre: => 9/10 ??

## • Noyaux exotiques

Noyaux radioactifs => éphémères !!



Rapport neutron/proton  $> 4$  ou  $< 0.5$



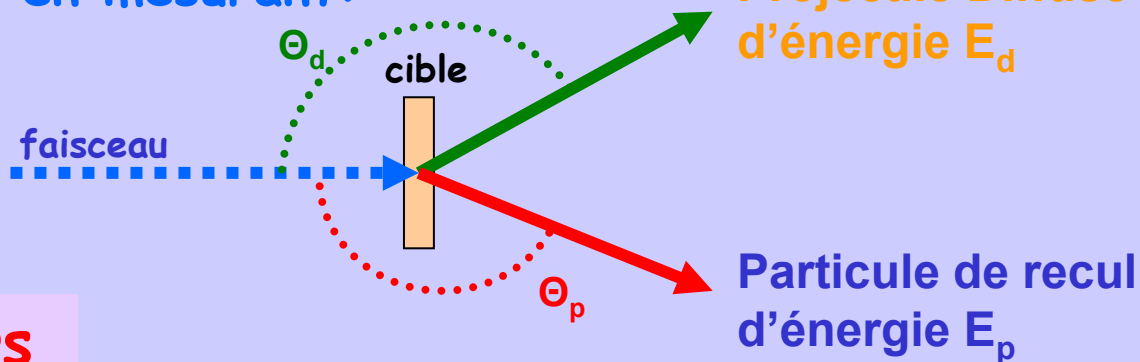
# 1/ La physique des noyaux exotiques

## • Comment les étudier ??

1. En les projetant sur une cible

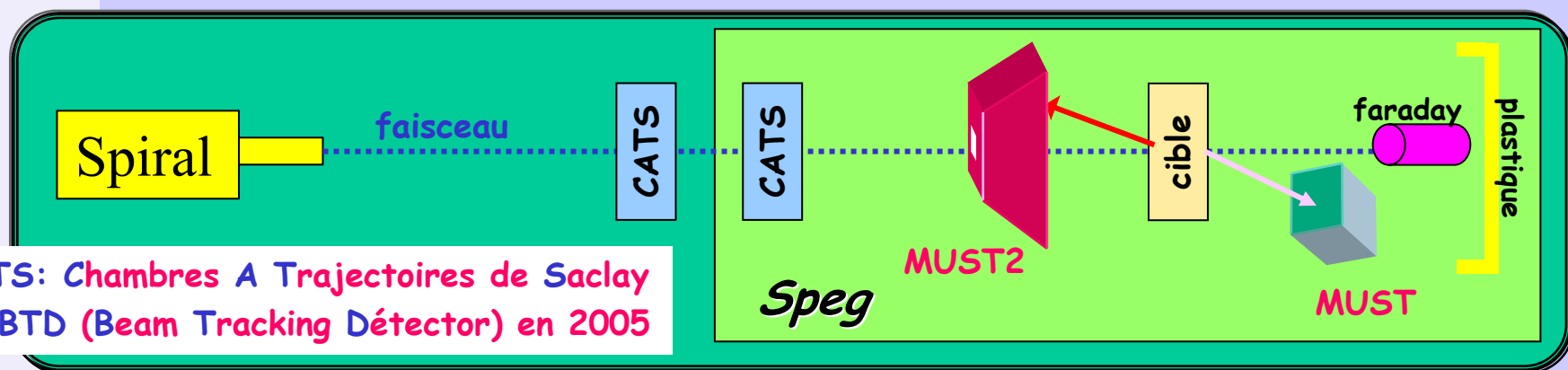
2. En détectant et en mesurant:

- Énergie,
- Angle,
- type de particule.



## • Les détecteurs

EXO GAM, VAMOS, SPEG[MUST] ...



CATS: Chambres A Trajectoires de Saclay  
=> BTD (Beam Tracking Détecteur) en 2005

## 2/ L'hodoscope MUST2

- 1 télescope de MUST2

dapnia  
S111

cea

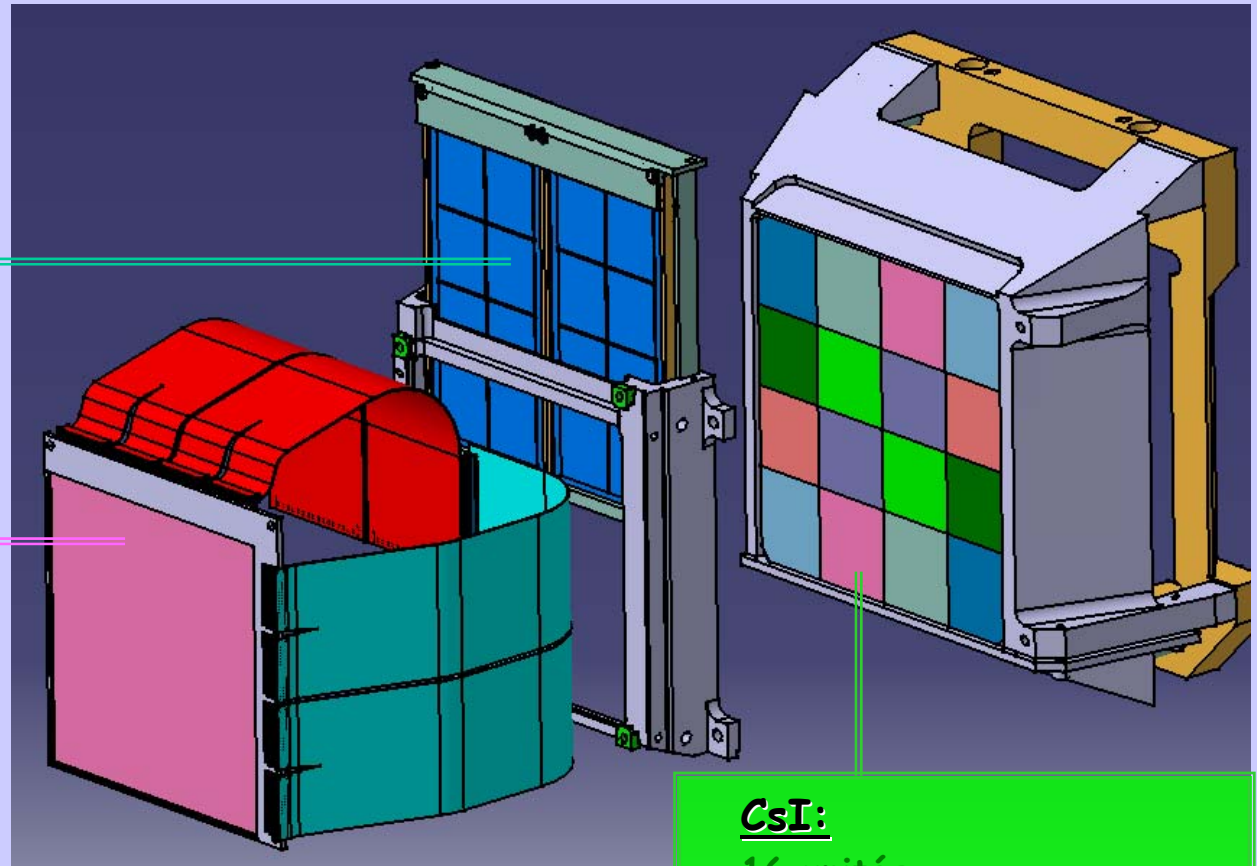
saclay

### Si(Li):

2 morcelés en 8  
Épaisseur: 3.5mm  
 $C_{dét}=25pF$ ;  $I_{dét}=2\mu A$

### Si à strips:

2 x 128 pistes  
Épaisseur: 300 $\mu m$   
 $C_{dét}=65pF$ ;  $I_{dét}<20nA$



### CsI:

16 unités  
Épaisseur: 3cm  
 $C_{dét}=130pF$ ;  $I_{dét}<10nA$

# 2/ L'hodoscope MUST2

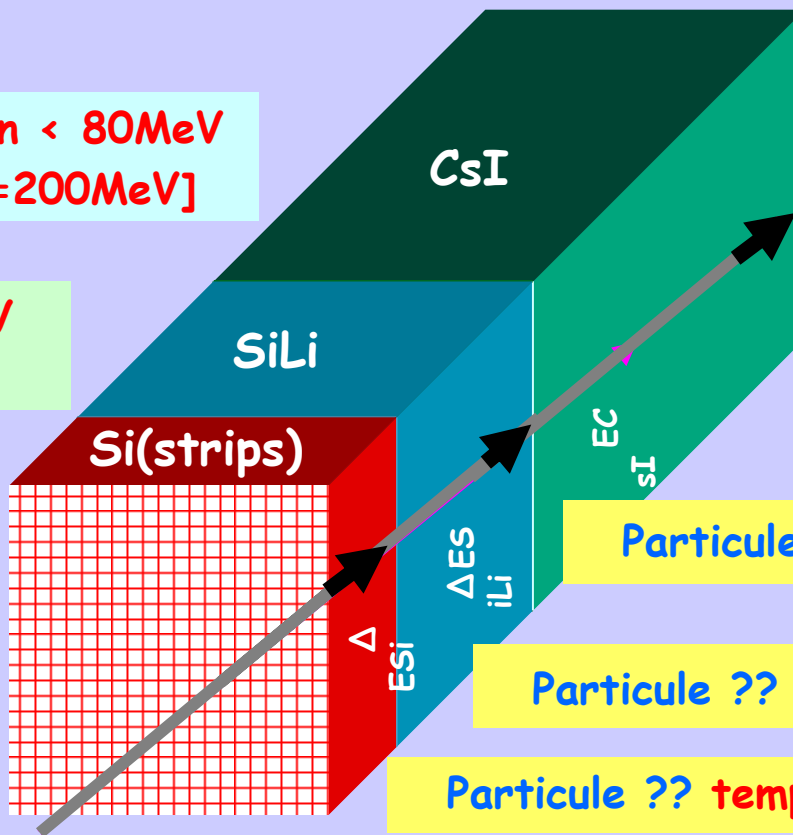
- Rôle de MUST2

Localisation: lecture des  $2 \times 128 + 16 + 16$

Eproton < 80MeV  
[E<sub>max</sub>=200MeV]

Eproton < 32MeV  
[E<sub>max</sub>=225MeV]

Eproton < 6MeV  
[E<sub>max</sub>=45MeV]



Particule ??  $\Delta E_{Si}$ ,  $\Delta E_{SiLi}$  &  $E_{CsI}$

Particule ??  $\Delta E_{Si}$  &  $E_{SiLi}$

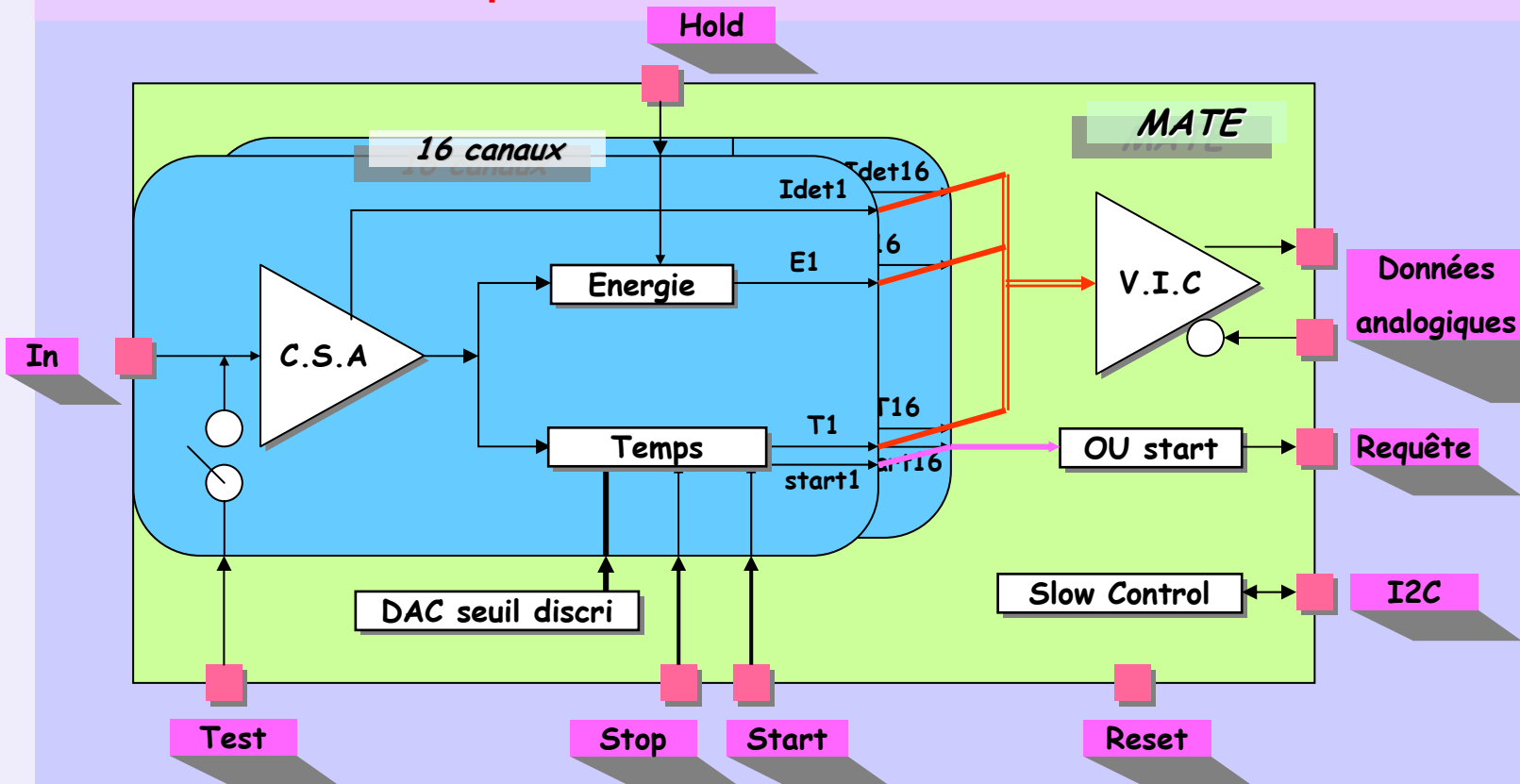
Particule ?? temps de vol= $f(E)$  => Temps

Détection: Si (strips) [  $E > E_{min}$  ] => Requête



# 3/ L'architecture générale de MATE

- **Modularité: 16 canaux**
- **V.I.C: sortie en courant [ $\pm 2\text{mA/V}$ ]; Flecture=2Mhz**
- **D.A.C: 8 bits pour la tension de seuil des discriminateurs**
- **Slow Control: bus série I2C; DAC, inhibition canaux, sélection du canal pour le test, Gain C.S.A, Constante de filtrage Energie, mode de lecture, ...**
- **Entrées Test & Start pour le test de MATE**



# 3/ Le layout

## • Le layout

dapnia  
S111



saclay

VIC

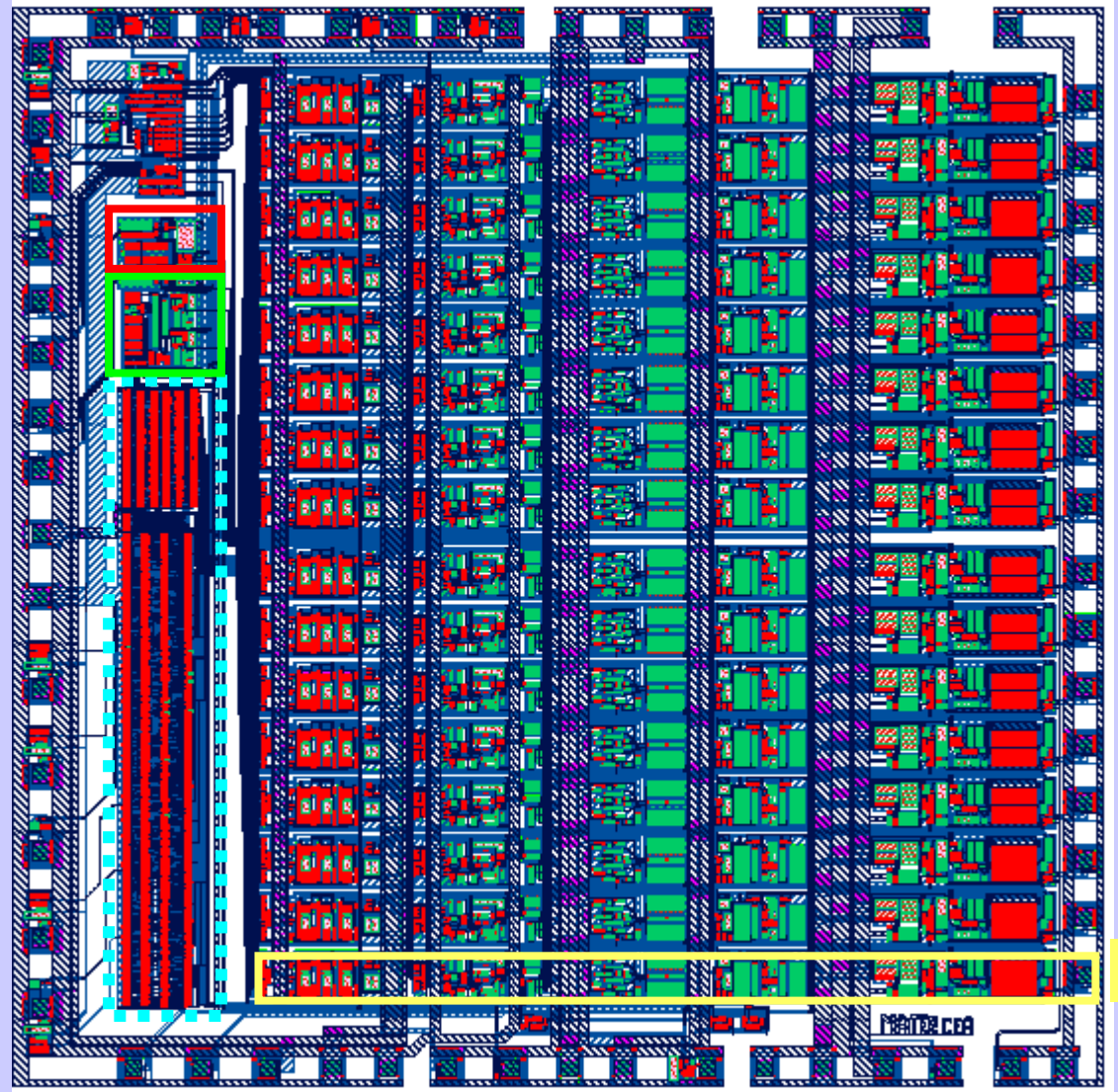
DAC

Slow control

BICMOS 0.8 $\mu$ m d'AMS

Surface: 41 mm<sup>2</sup>  
(6.438mm x 6.368mm)

16000 transistors



canal

# 4/ L'architecture du canal analogique de MATE

## • Le C.S.A

### Structure:

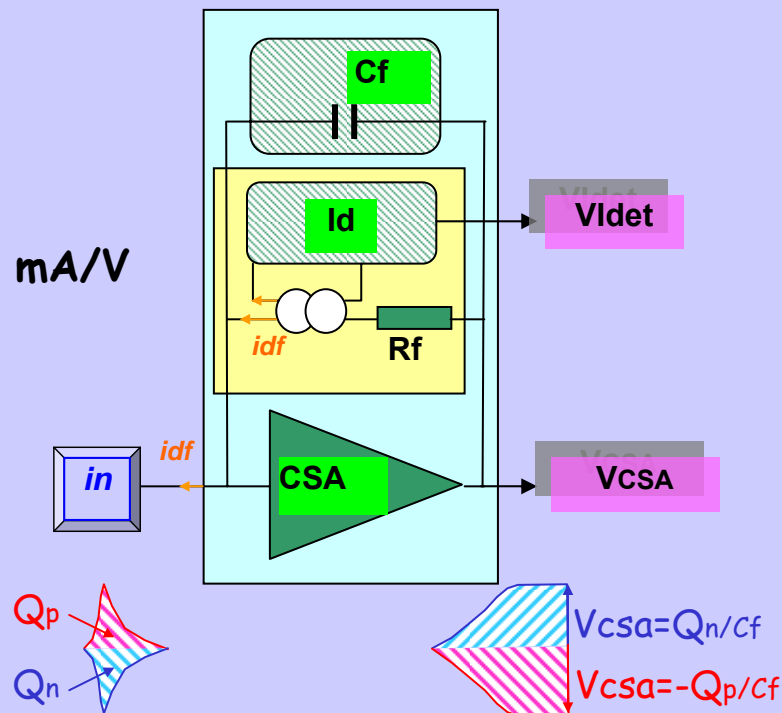
- \* Temps de montée: 10ns
- \* Transistor d'entrée: PMOS;  $G_m=28.38 \text{ mA/V}$
- \* Puissance: 10mW(+/-2.5V)

### Gain (Cf):

- 0.6pF CsI; 2.6pF Si(strips);
- 6.6pF SiLi; 4.6pF (interm.)

### Bloc Rf:

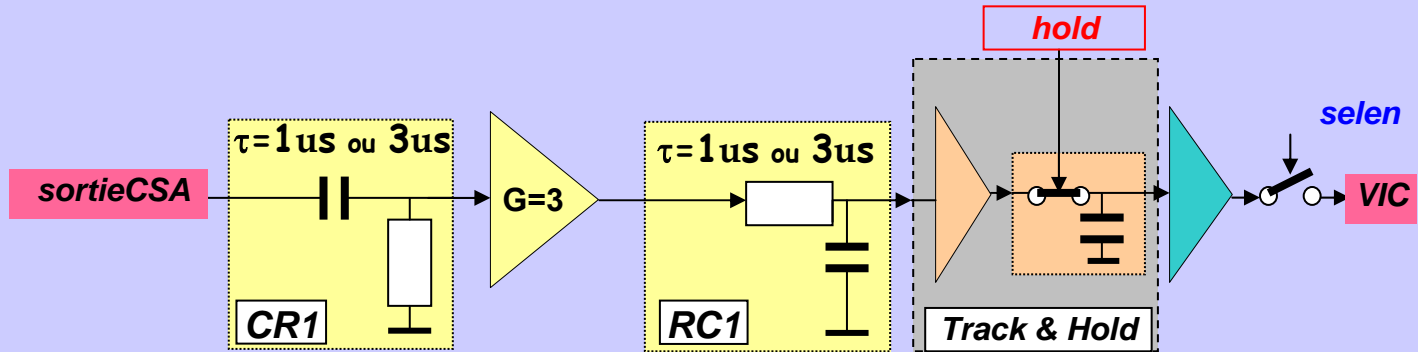
- \* Valeur de la résistance de feedback ( $60\text{M}\Omega$ )
- \* Valeur de la tension D.C en sortie du C.S.A (0V; polarité + & -)
- \* Courant D.C du détecteur (250nA max.) [Si(strips) face Ohmique]
- \* Lecture de ce courant (pour contrôle)



# 4/ L'architecture du canal analogique de MATE

## • Le canal énergie

- filtrage: CR-RC;  $1\mu\text{s}$  [Si(strips)] ou  $3\mu\text{s}$  [SiLi & CsI] de temps de sommet



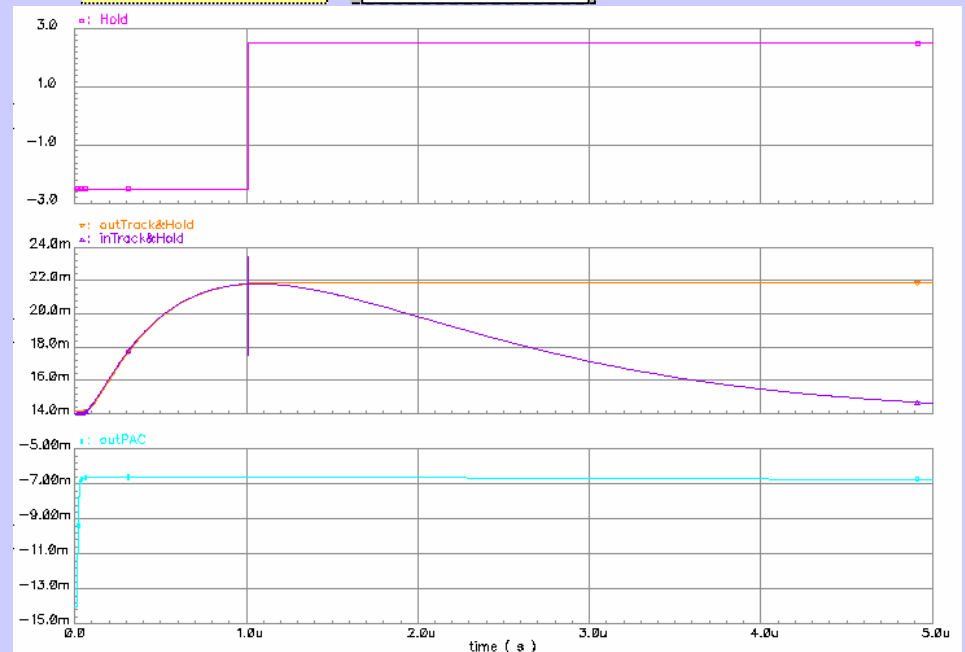
- polarité du signal:

positive & négative

- maximum du signal:

solution Track&Hold;

Le Hold est géré par MUVI

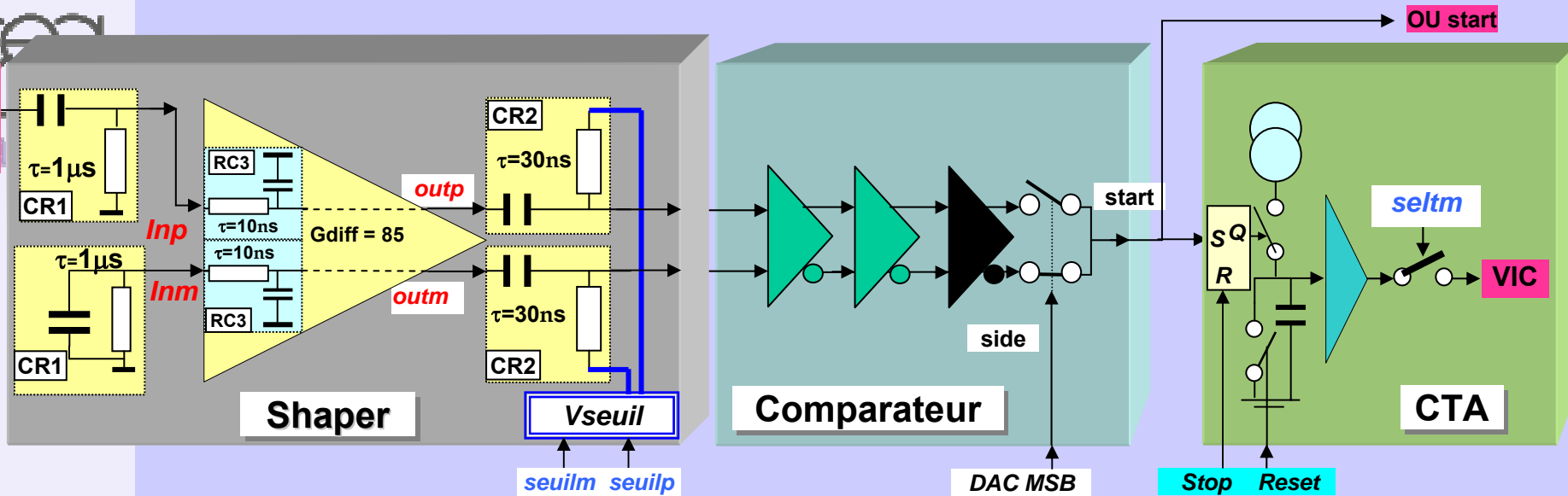


# 4/ L'architecture du canal analogique de MATE

• Le canal temps: Filtrage + Comparateur + CTA

dapnia

outCSA



● **Shaper:** Bipolaire; Différentiel;  $G=85$ ;  $T_{\text{sommet}} = 22 \text{ ns}$ ;  $\text{NLI} [300 \text{ keV} - 700 \text{ keV proton}] = 0.84\%$ ;

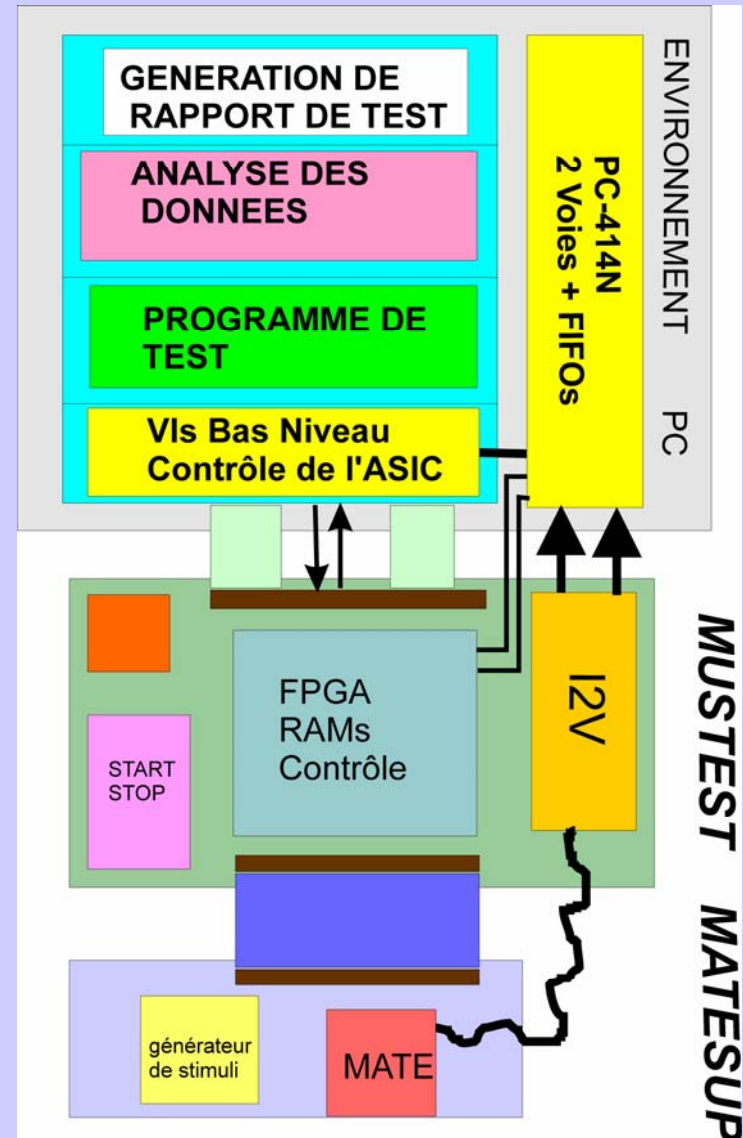
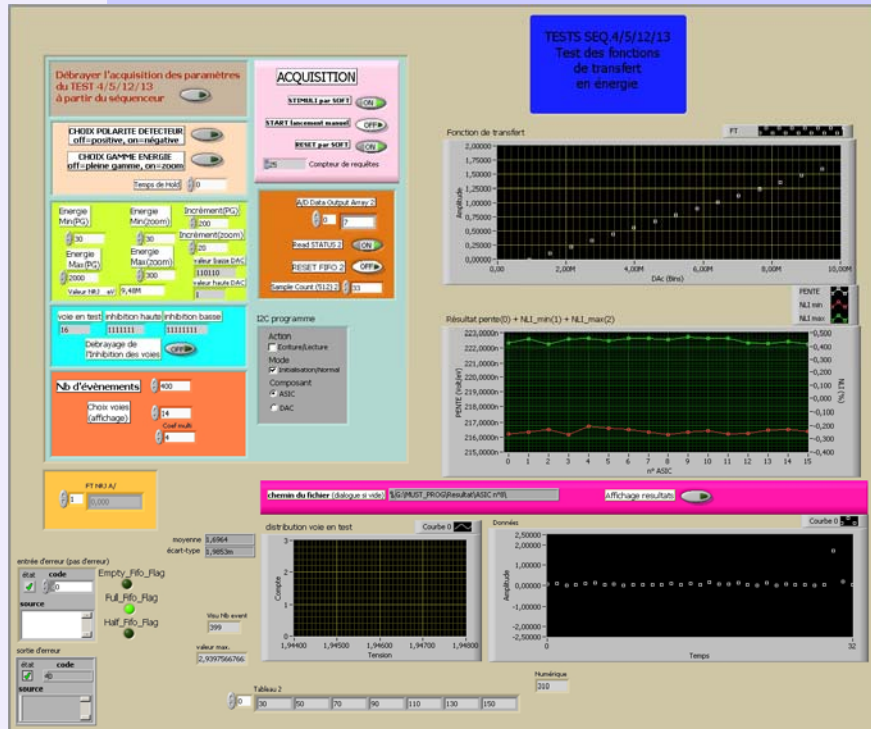
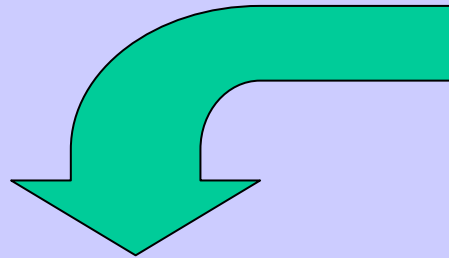
Variations des 16 canaux à 300keV = +/- 30keV

● **Comparateur:** Bipolaire; Différentiel; Leading Edge;  $G=5000$ ; Puissance=7mW

● **CTA:** Gamme de conversion: 300ns;  $\text{NLI} = 2.3 \text{ E} - 2\%$ ; Jitter=18ps FWHM

# 5/ Le test de MATE

- Le banc de test

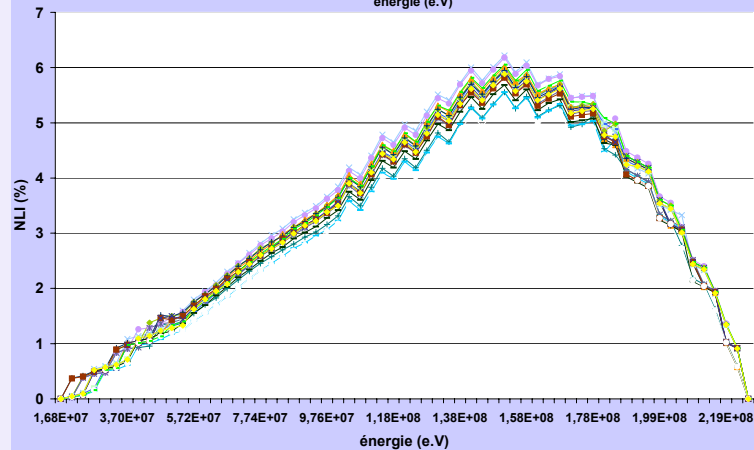
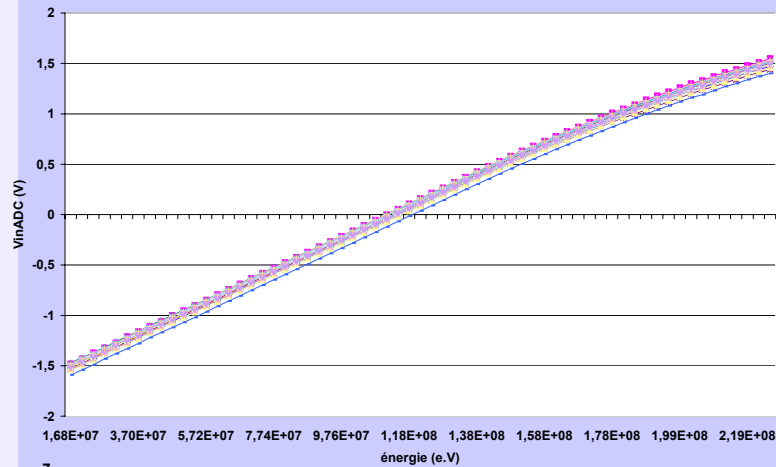


# 5/ Le test de MATE

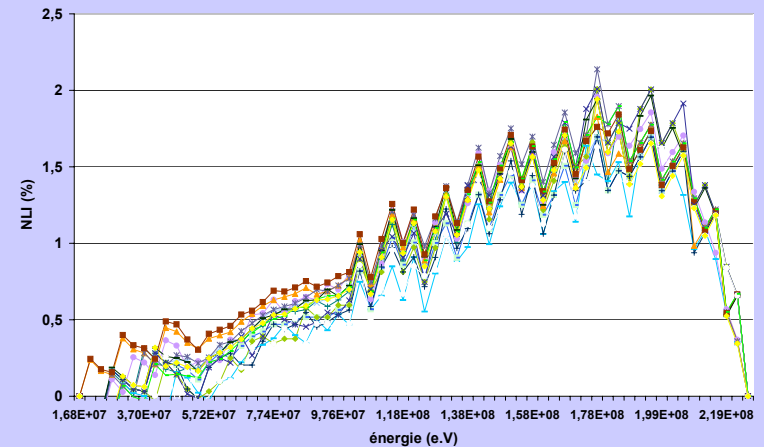
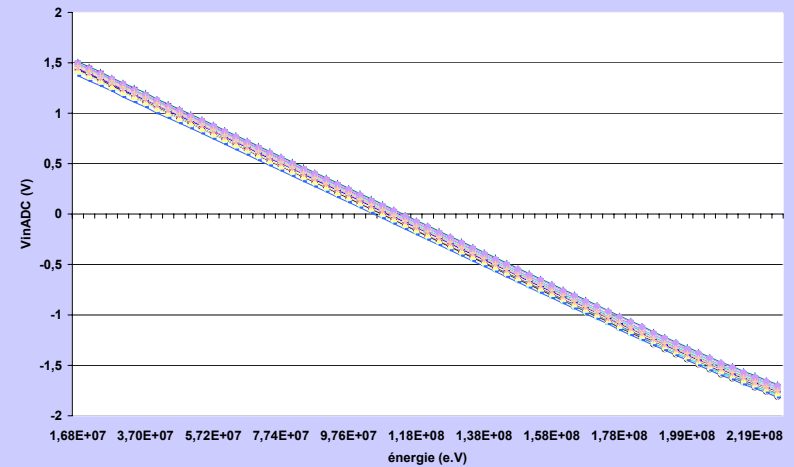
Rapport de test  
datasheet

## • Les résultats SiLi

### canal énergie: linéarité



I détecteur positif

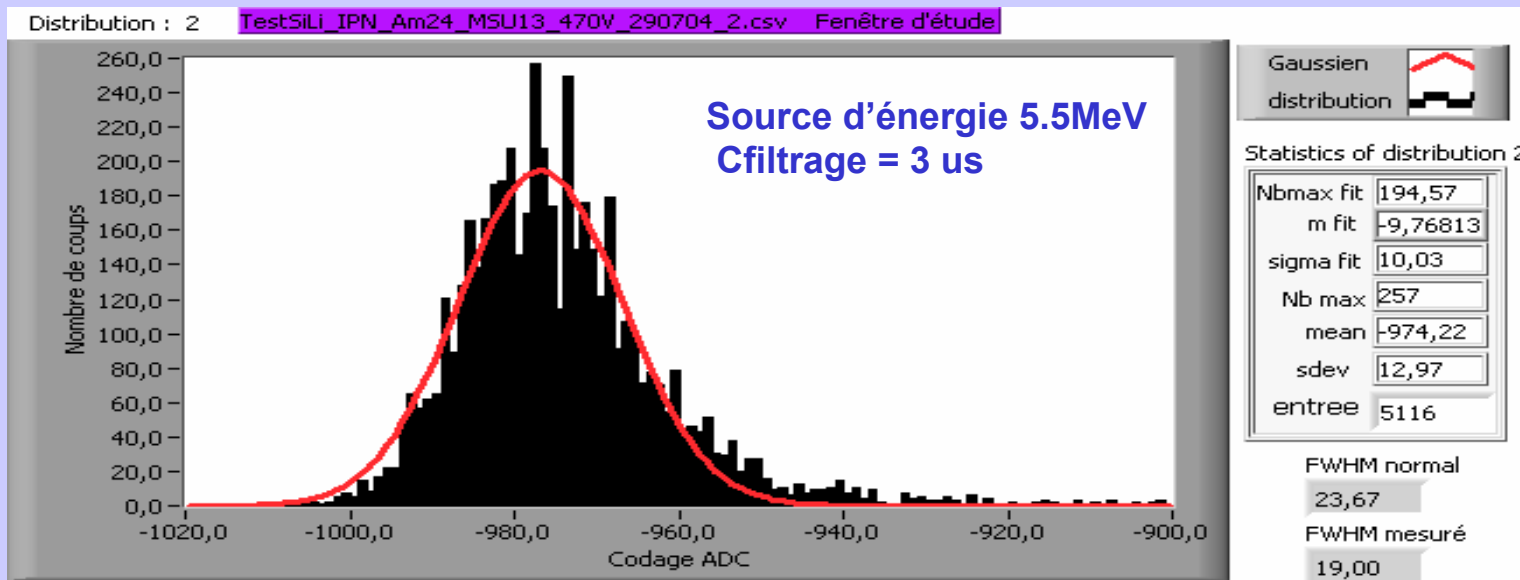
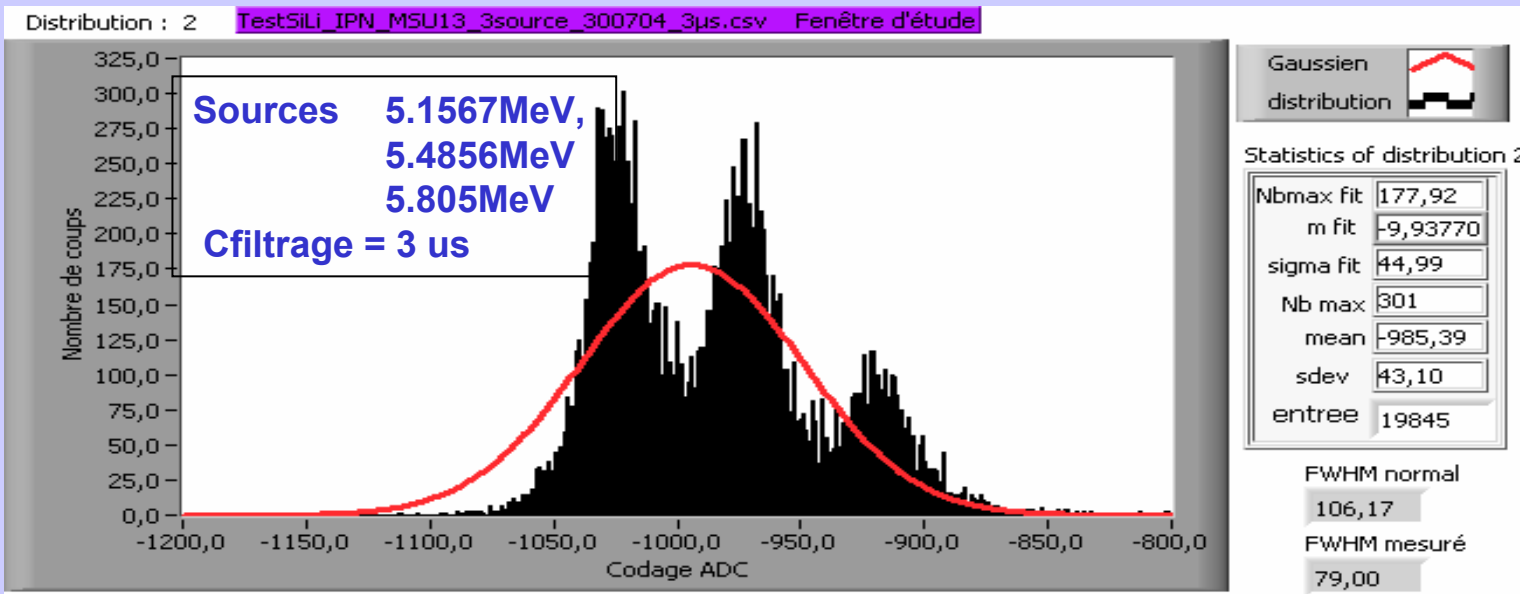


I détecteur négatif

# MATE ENERGIE Americium 5.5 MeV



Test avec sources radioactives





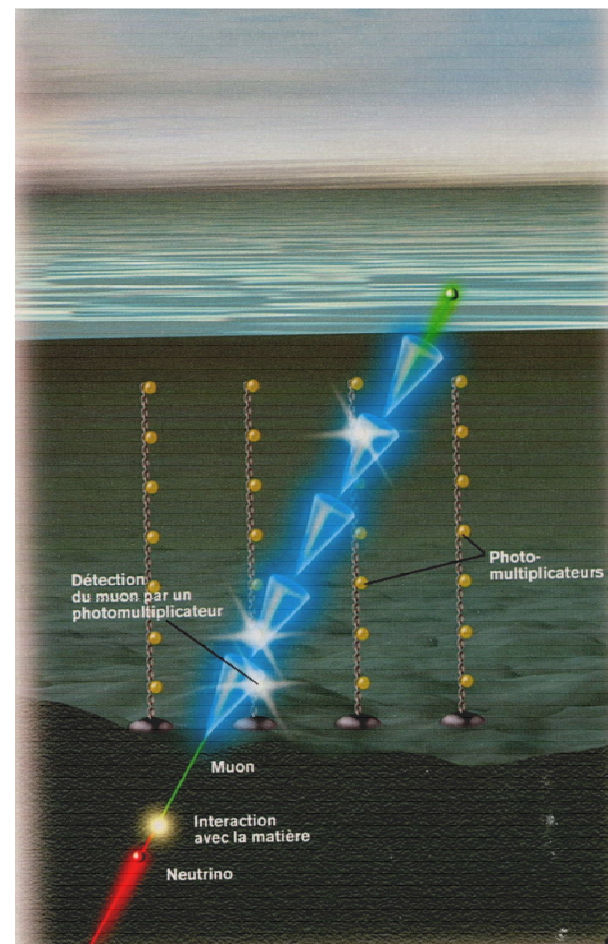
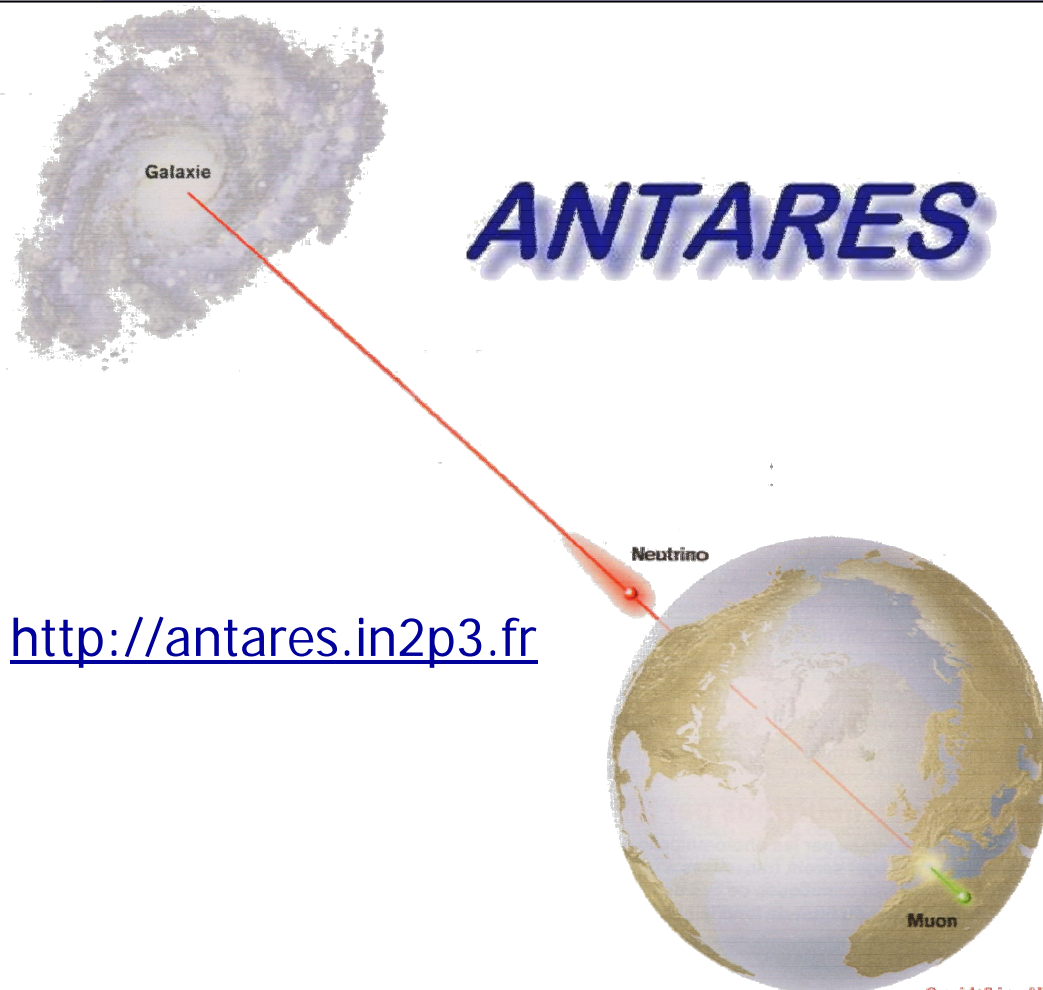
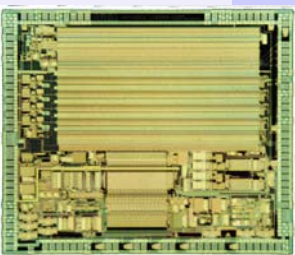
Astronomy with a Neutrino Telescope

# ANTARES

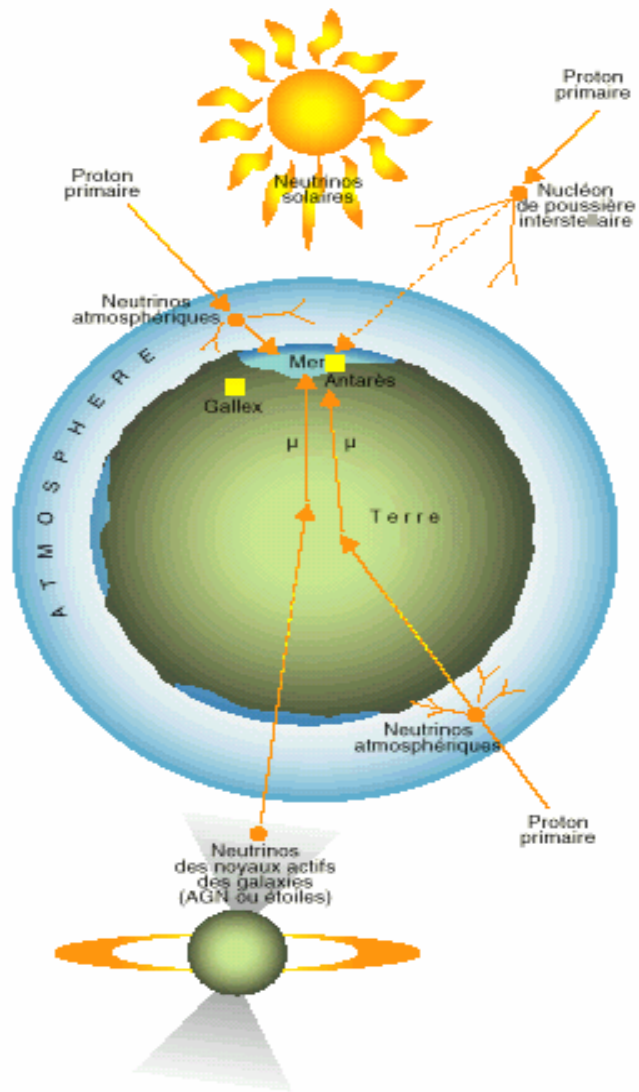
and Abyss environmental RESearch



## Traitement analogique de l'information dans ANTARES



# Le principe de l'expérience



- Neutrinos de hautes énergies
  - supernova, microquasars
- Cosmologie:
  - WIMPS (neutralinos)
  - défaut topologique
- *Propriétés des neutrinos:*
  - $\nu$  oscillations
- Autres études:
  - Océanographie
  - Tomographie de la terre
- Phénomène inattendus

# Le site de l'expérience



Station côtière  
Institut Michel Pacha

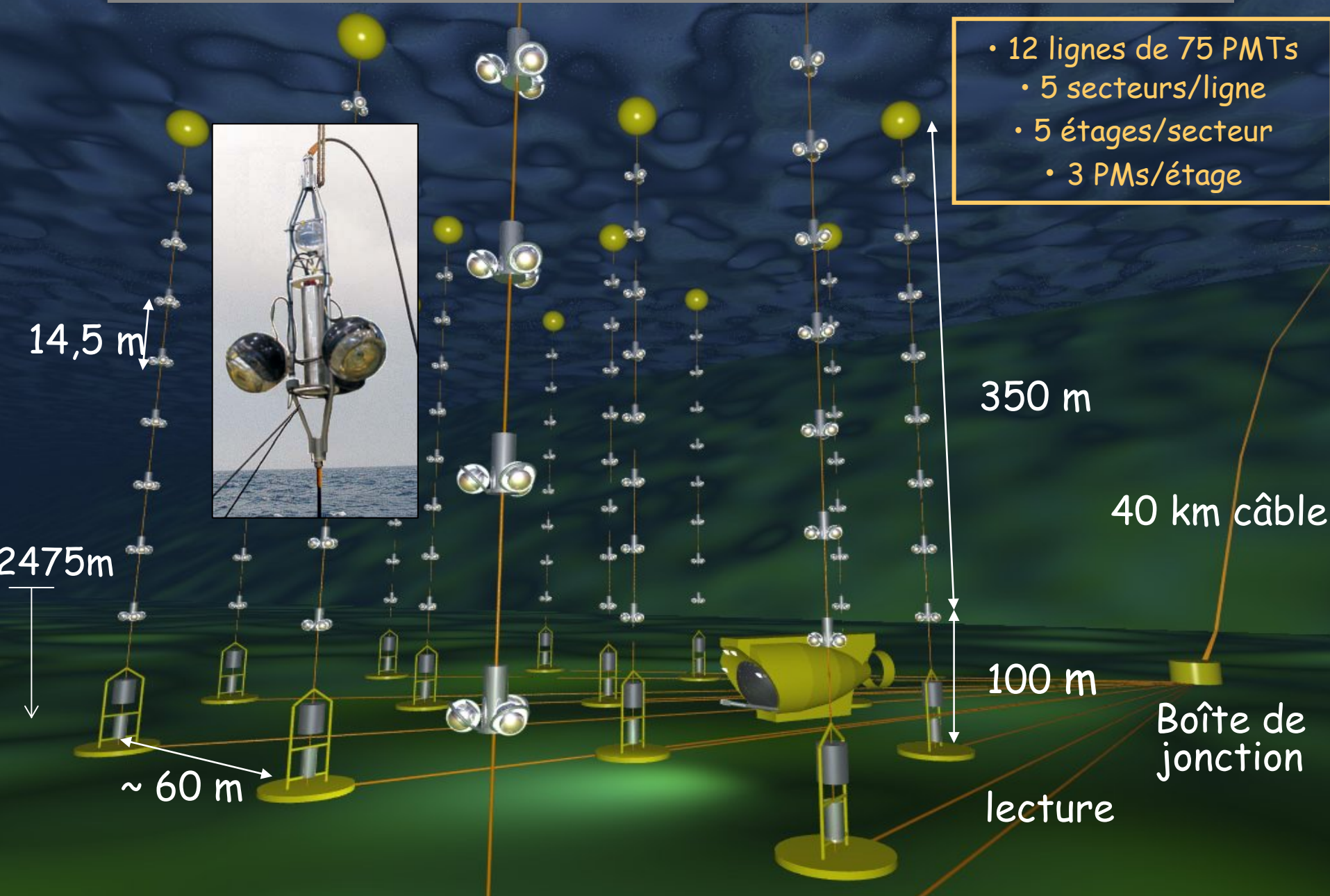


Station  
d'alimentation

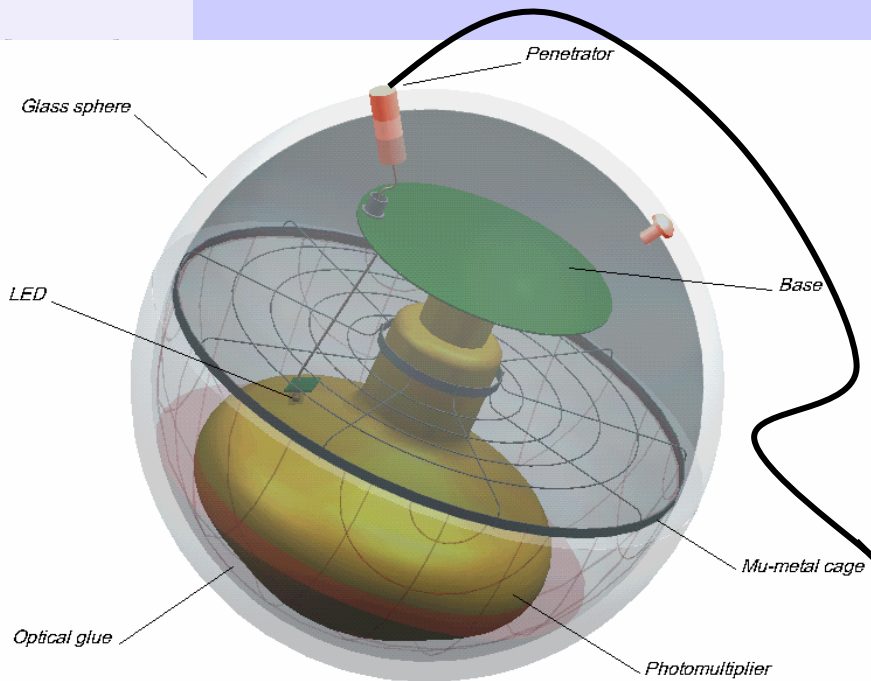
Câble sous-marin  
(Fibre optique et alimentation)

# Le détecteur Antares

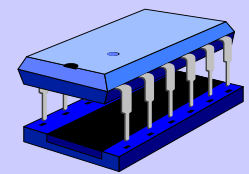
- 12 lignes de 75 PMTs
- 5 secteurs/ligne
- 5 étages/secteur
- 3 PMs/étage



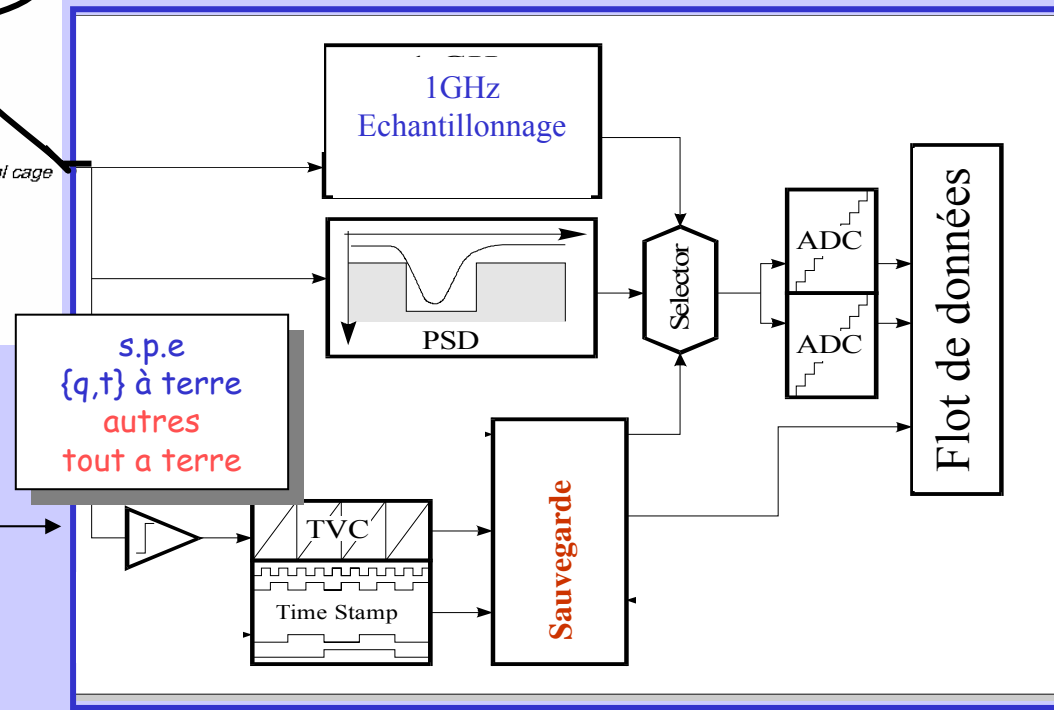
# Signaux optiques



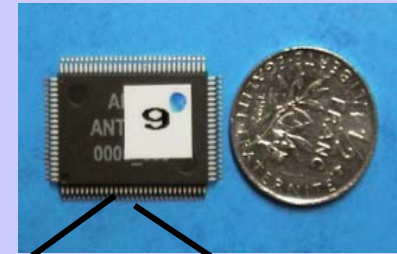
ARS  
Analog Ring Sampler



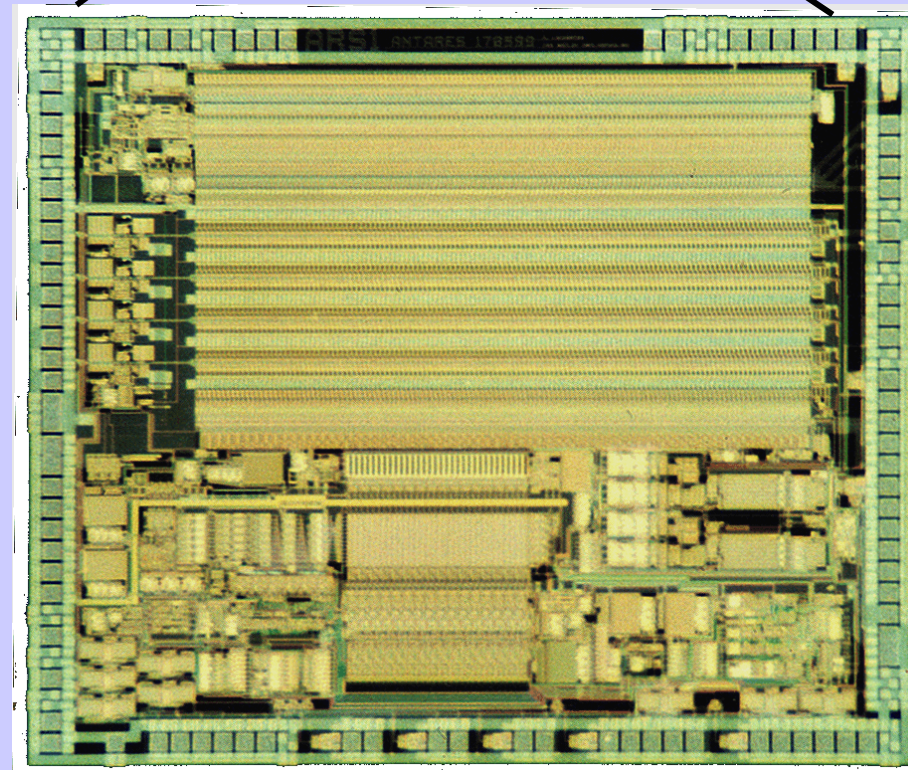
**Intégration  
Développement  
à Saclay**



# ARS1 chip : overview



70 000 transistors



Full custom ASIC (AMS 0.8 $\mu$ )  
23 mm<sup>2</sup> (68000 transistors)  
92 input/output pins

250mW under 5V

## Main features:

4 channels 1GHz analog sampler  
2 ADC (8 bits) - 24 DACs  
20 Mbit/s Fast output port  
Fully configurable (online)  
via 75 SC parameters

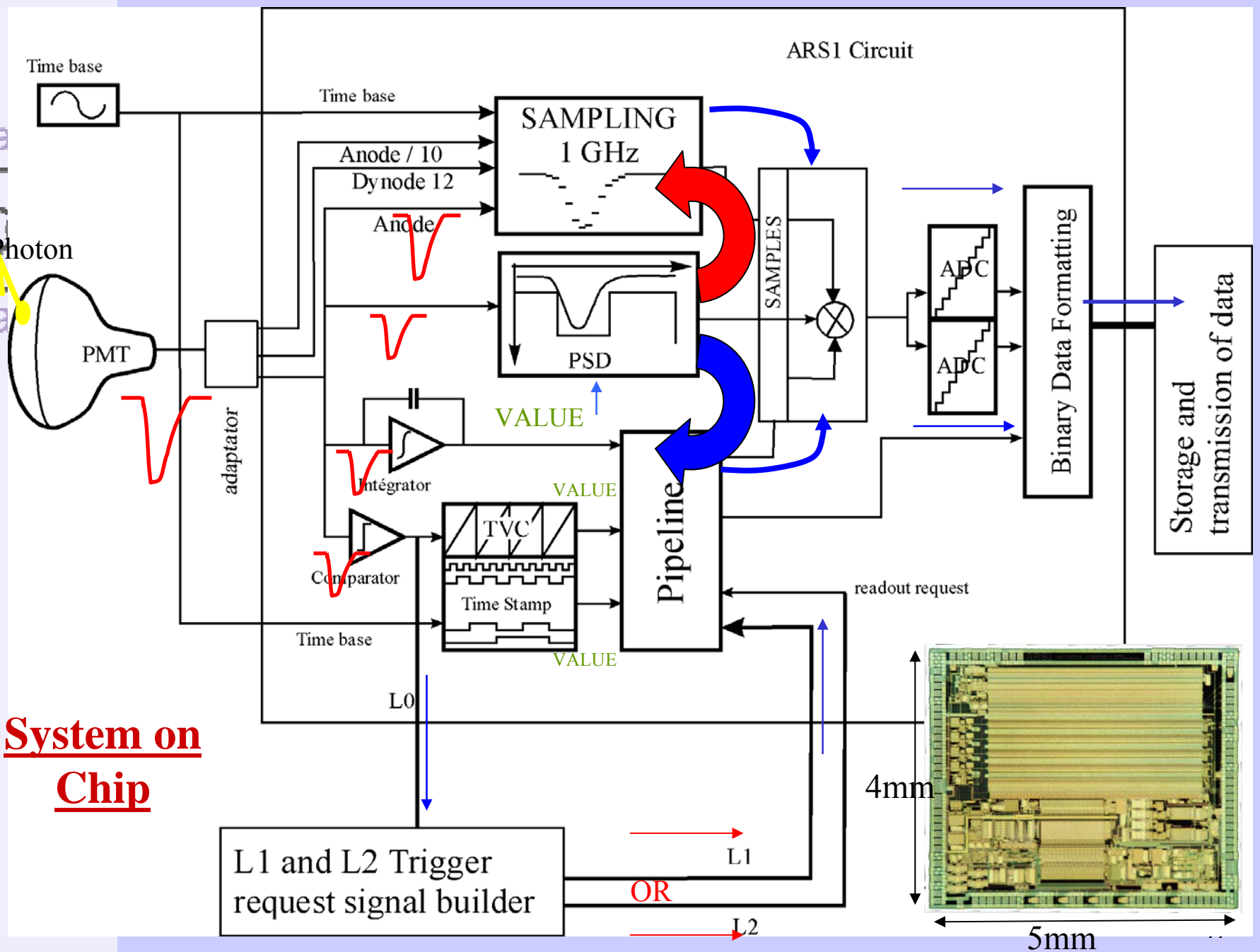
4mm

Low prod. cost ~10 \$/chip

5mm

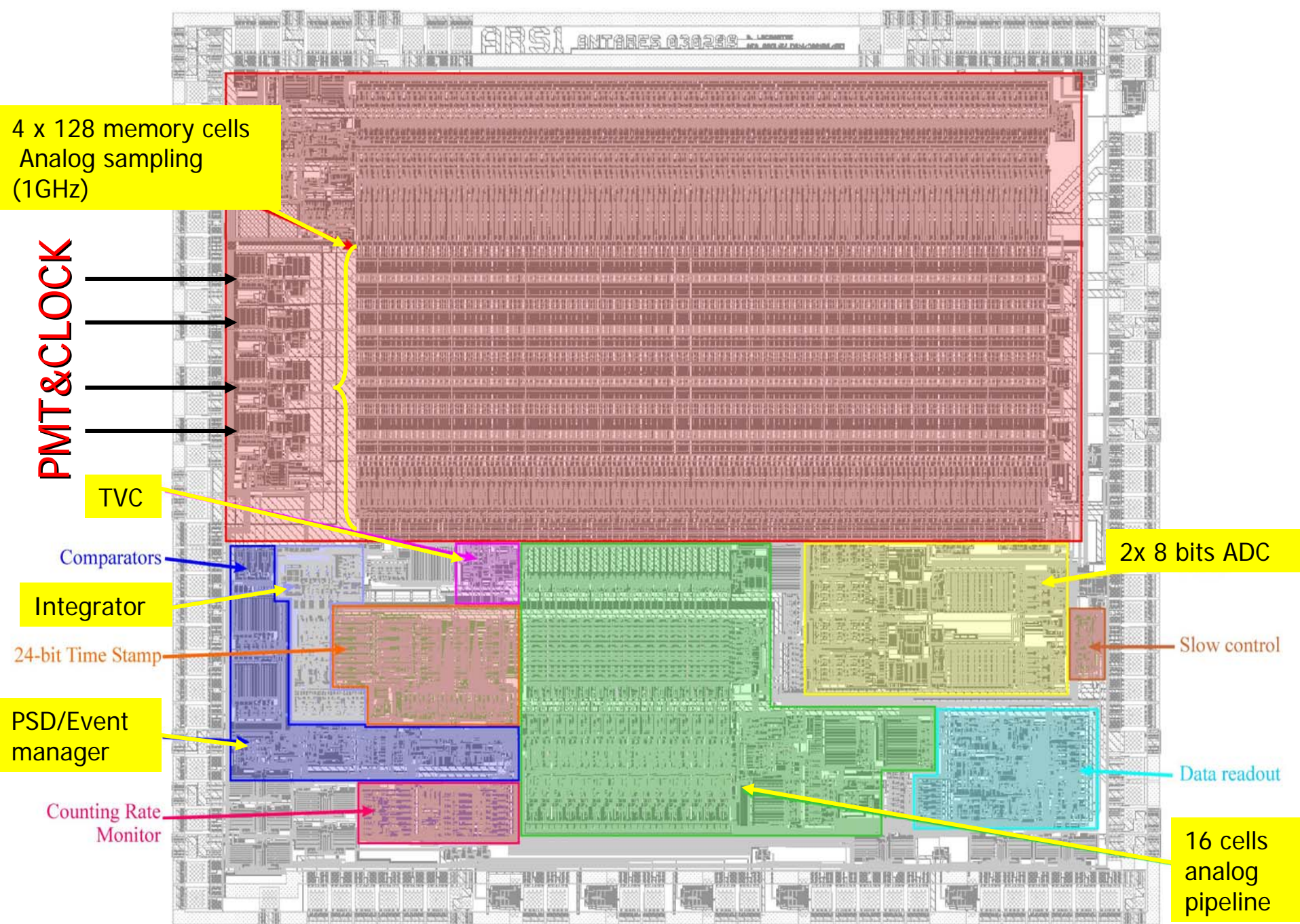
46

data  
sampler



**System on Chip**

# ARSI layout structures

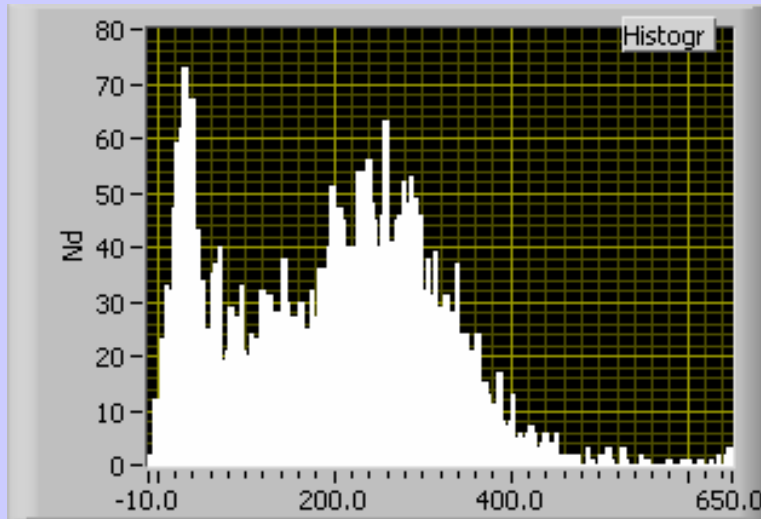




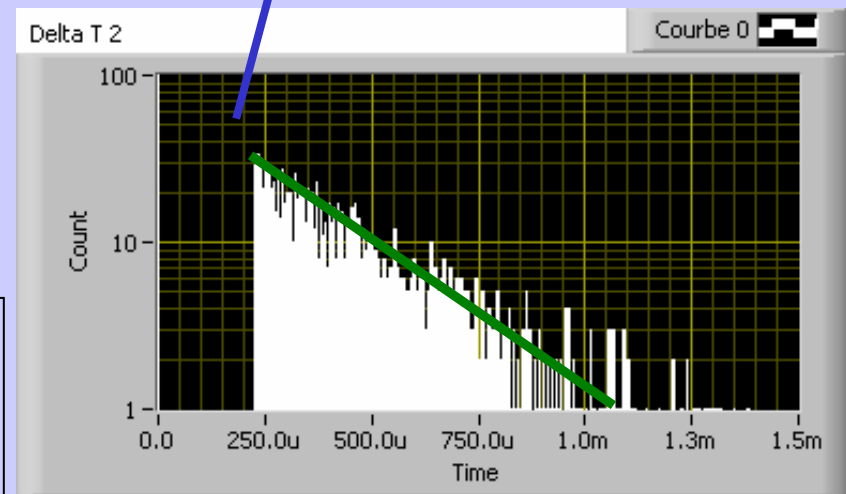
# ARS1 raw data

→PMT Noise

Time difference between adjacent events



Signature of uniform distribution of light (PMT Noise)



SPE = 300 → 47.9pC

Gain increase (HV + 120V/HV) =  
3.4

# Effet des radiations sur les composants

## PREMIER TYPE D'EFFET : EFFET À 1 PARTICULE

(applicable aux neutrons, protons, ions)

- Single Event Effects – Single Event Transient – Single Event Rate
- Scaling

## SECOND TYPE D'EFFET : EFFET À N PARTICULES INDIFFÉRENCIÉES

(applicable aux photons X et gamma)

- Dose Effet dans les isolants - Transistor MOS
  - Modèle simple pour la tension de seuil
  - Courants de fuite
- Scaling

## SIMULATION et MÉTHODES DE DURCISSEMENT

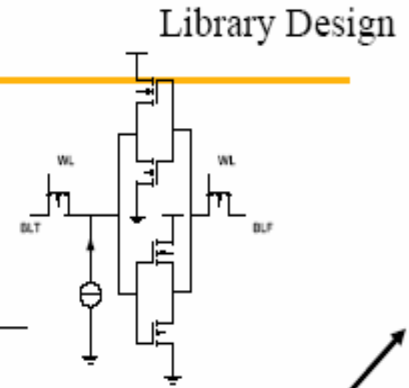
- Simulation Multiéchelle
  - Etapes de la création d'un circuit intégré
- Hardening by design
  - Création de bibliothèques
- Hardening by technology
  - Technologies SOS et SOI
- Hardening by System

# Etre capable de designer des circuits durcis quelque soit la technologie du moment

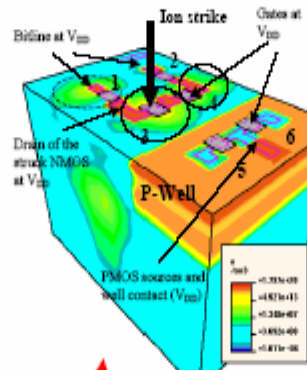
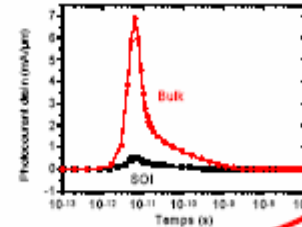


**Rad-Hard Design Chain**  
under construction

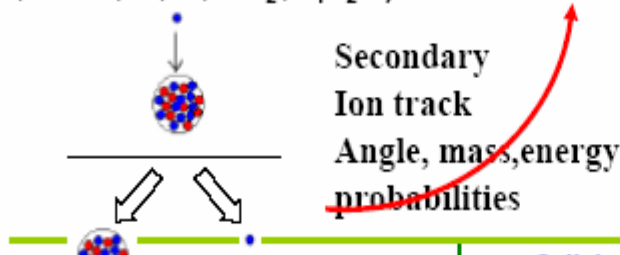
- **CircuitScale: Library Simulation and Design**



- **MicroScale: Device Simulation**  
3D Code



- **Nanoscale: Particules Interaction**  
(silicon, Boron, Al, W, SiO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>...)



Multi-Scale Modeling

CEA res\_le\_Chatel  
DIF/DCRE/EC J-Luc Leray

Cellule Radiation Spatiales  
février 2005 DAPNIA SAP

© jean-luc leray-CEA 2005 104

# CONCLUSIONS

- Un ASIC permet d'intégrer à bas prix (en comparaison des systèmes discrets) des systèmes complexes et nombreux (risque technologique)
- Les outils ne couvrent pas 100% des cas de fonctionnement → Stress professionnel
- **Maîtriser tous les phénomènes physiques liés à l'électronique.**
  - perpétuel formation
- La microélectronique demande une rigueur intellectuelle pour parvenir rapidement à un système qui fonctionne.

- **Recette pour faire un asic**

