

# Multidétecteurs de basse énergie

De INDRA à FAZIA

# Plan du cours

## 1. Contexte physique

## 2. Considérations sur les multidétecteurs

- Efficacité de détection et acceptance
- Espace des phases
- Granularité
- Détection
- Electronique et déclenchement

## 3. Multidétecteurs de particules chargés

- NAUTILUS : détection  $4\pi$
- INDRA : détection  $4\pi$ , Z
- CHIMERA : détection  $4\pi$ , Z et A ( $A < 20$ )
- Bilan

## 4. Vers un multidétecteur de 3<sup>e</sup> génération

- Mesure de la masse à l'aide du traitement numérique du signal ( $AZ4\pi$ )
- Effet de la canalisation pour le signal de courant
- Effet de l'uniformité de la résistivité
- Le projet FAZIA

# Le contexte

**Avènement des accélérateurs de particules autour et au-delà de 38 MeV/A dans les années 80...**

Grand nombre de **mécanismes de réaction** et de produits de réaction :

- **Fusion (fission, évaporation)**
- **Deep-inelastic, fragmentation**
- **Fusion incomplète**
- **Col, effets dynamiques**
- **Fermi-jets, pré-équilibre**

**Z=1 à Z>92**

**Energies de  
1-5000 MeV**

**Inclusif → Exclusif**

# Collisions d'Ions Lourds

Multitude de produits  
de réaction

Provenant de multiples  
sources ...

QP

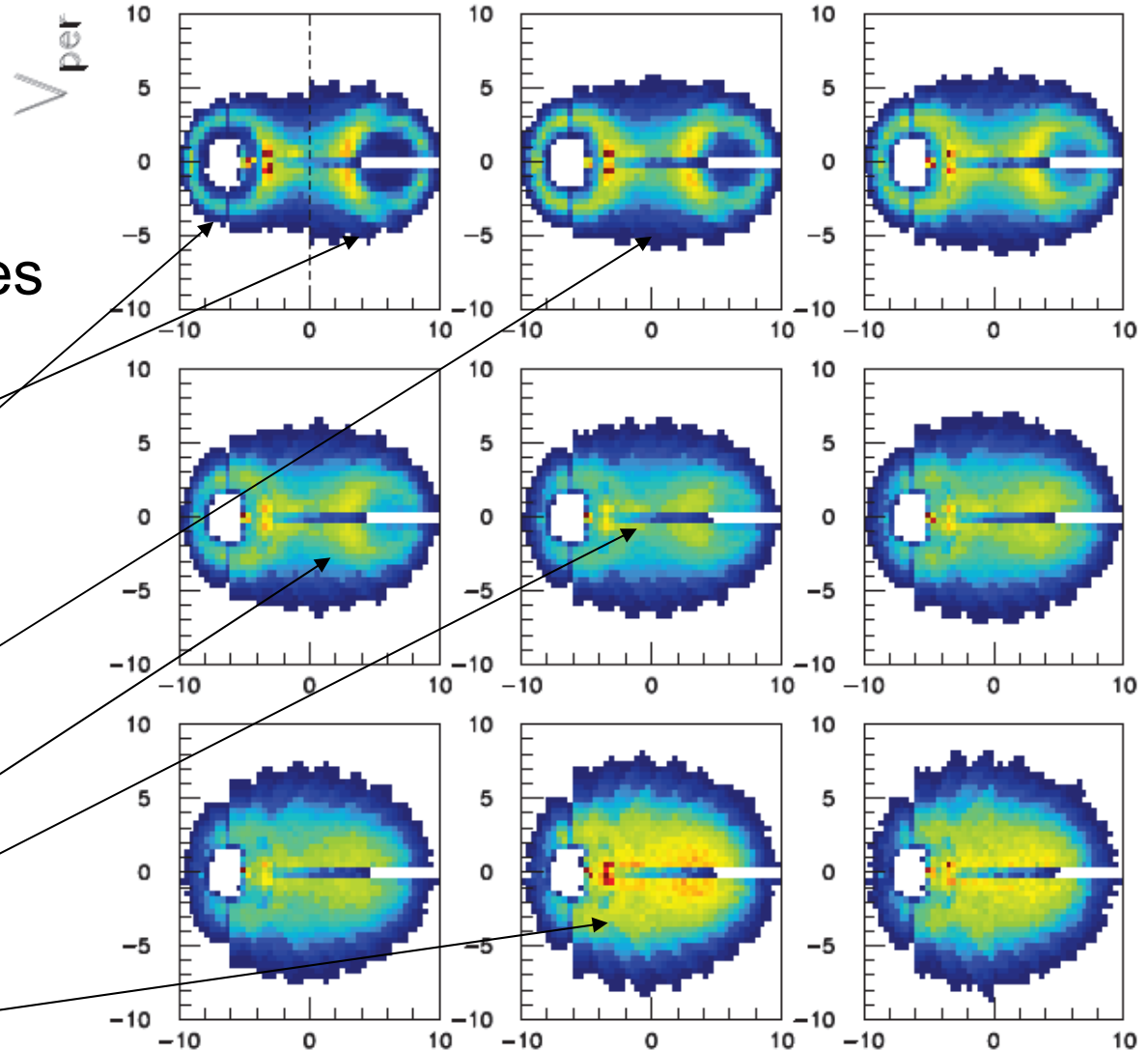
QC

Pré-équilibre

Deep-inelastic

Mi-rapacité

Fusion incomplète



$^{129}\text{Xe} + \text{natSn}$  80 MeV/A, INDRA data  $V_{\text{par}}$

# Collisions d'ions lourds $E_f$

## Pourquoi un multidétecteur ?

- Réactions **exclusives** ( $4\pi$ ) – sélection des evts (**classes**)
- **Maximiser** la section efficace de détection

## Pour quel(s) type(s) de particules ?

- **Particules chargées** (NAUTILUS, INDRA, CHIMERA, ...)
- Neutrons (ORION, DEMON, ...)
- Gammas (Château de Cristal, EUROGAM, EUROBALL, EXOGAM, ...)

## Pour quelle Physique ?

- Etude des corrélations **intra-événement**
- **Thermodynamique, dynamique** et Physique Statistique ( $E^*$ , T, J)

# Considérations sur les multidétecteurs

# Multidétecteurs : efficacité

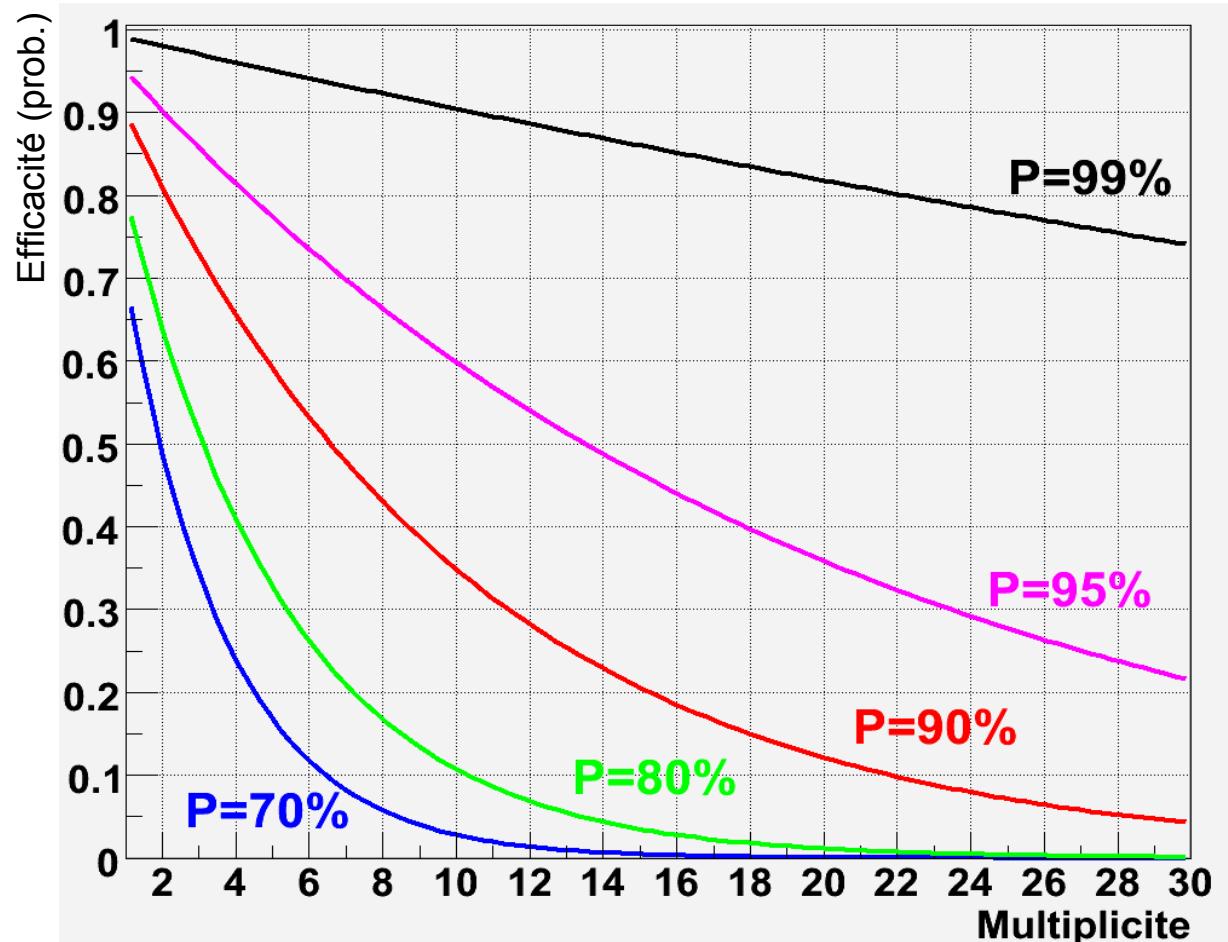
Point crucial : détecter les produits de réaction en **coïncidence**

Efficacité de détection  $\varepsilon$  :

Probabilité *intrinsèque* A de détection d'une particule ou *acceptance* :

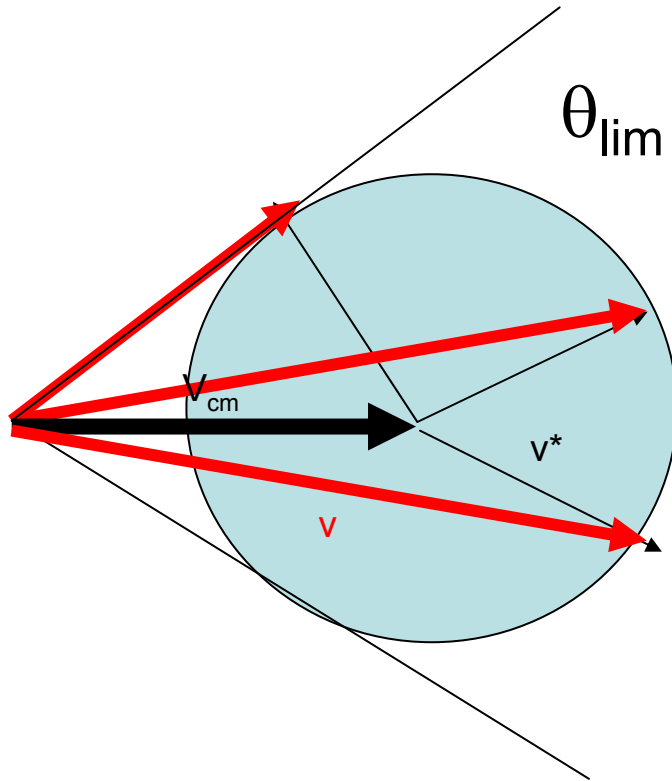
$$\varepsilon = A^M$$

M est la multiplicité détectée



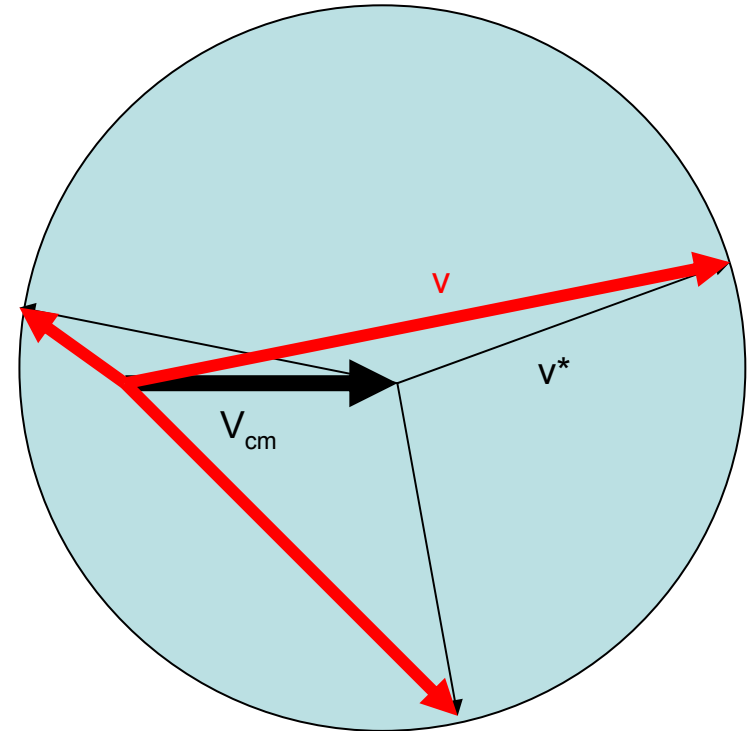
# Multidétecteurs: espace des phases

$$v^* < V_{cm}$$



**Existence d'une zone « interdite »  
dans le laboratoire**

$$v^* > V_{cm}$$



**Focalisation plus ou moins marquée  
suivant  $v^*/V_{cm}$**



# Multidétecteurs: espace des phases

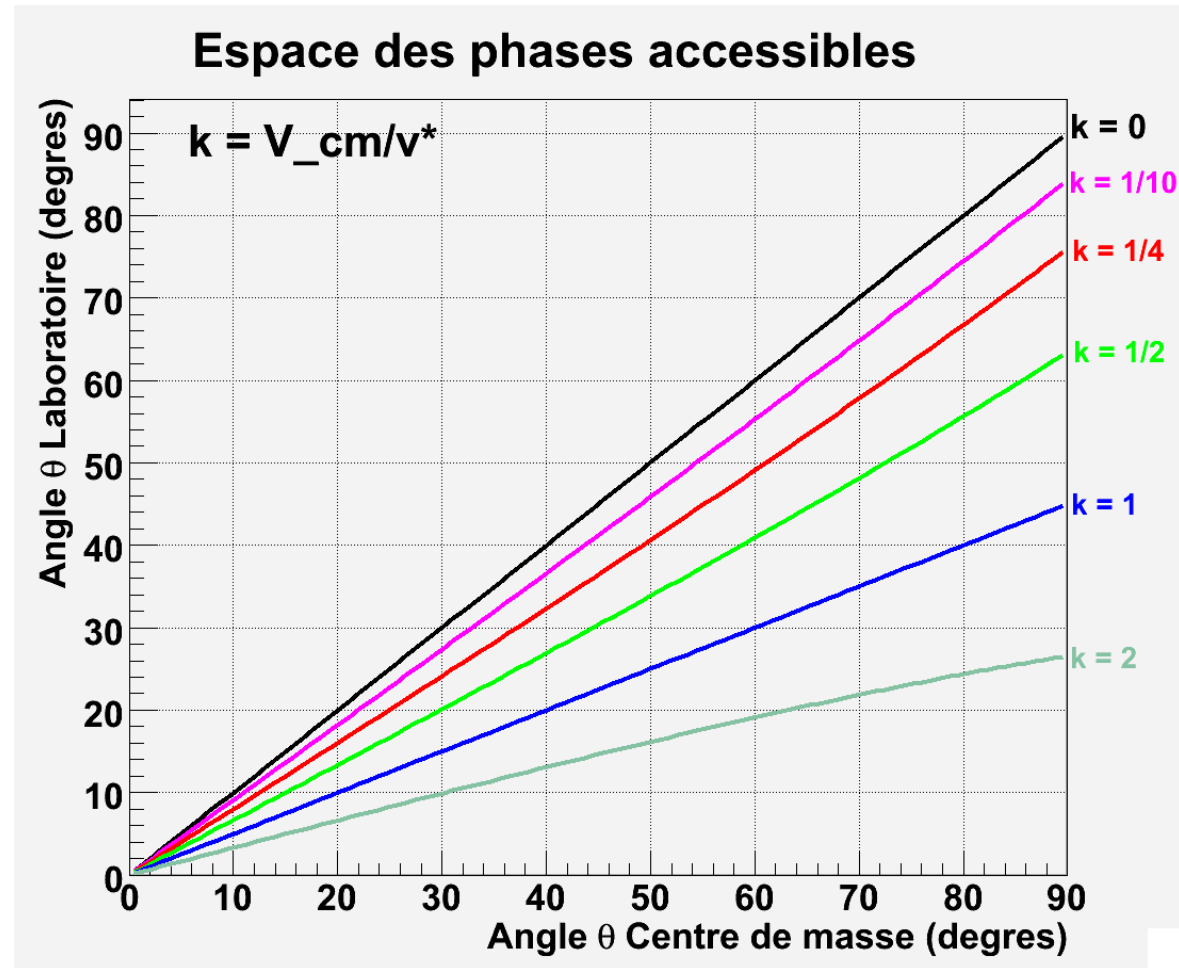
Changt de repère  
(classique)

$$\tan(\theta) = \frac{\sin(\theta^*)}{k + \cos(\theta^*)}$$

Angle limite de détection  $\theta_{\text{lim}}$   
en fct du rapport  $k = V_{\text{cm}}/v^*$

On a en effet :

$$\theta_{\text{lim}} = \text{Atan}(1/k) = \text{Atan}(v^*/V_{\text{cm}})$$

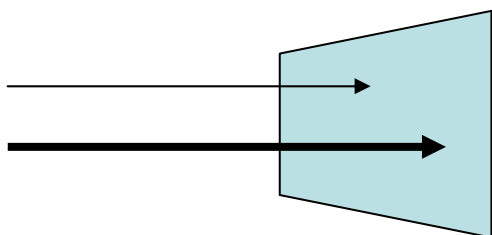


# Multidétecteurs : granularité

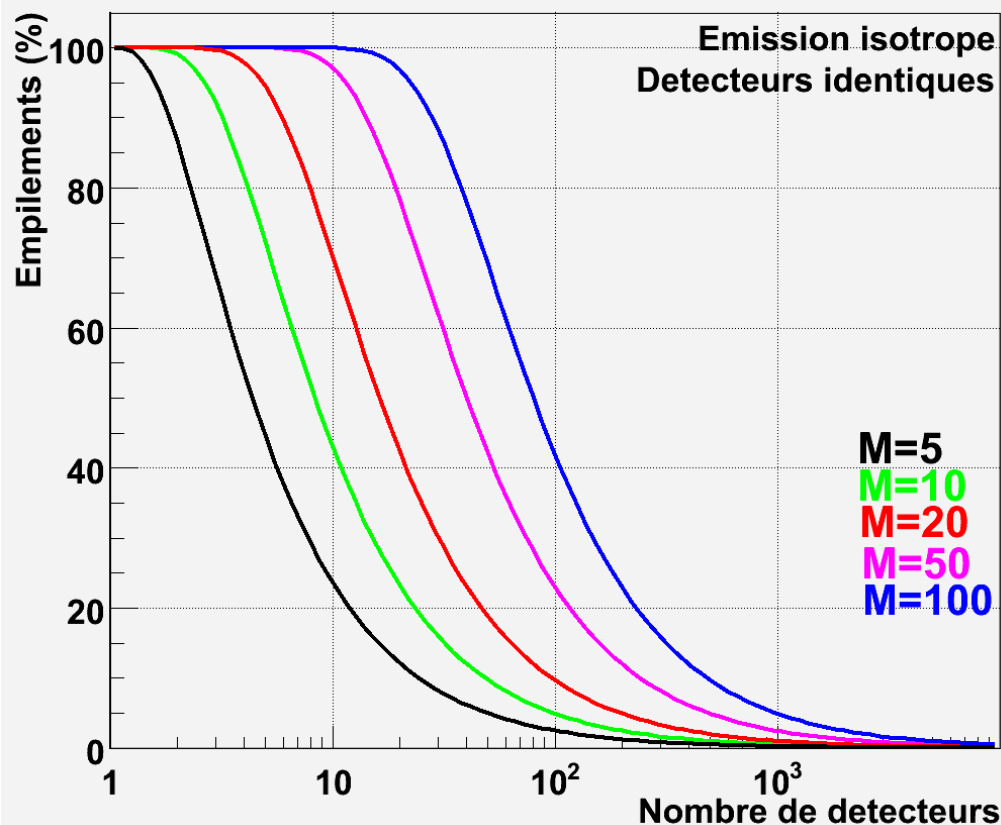
Empilement(s) dans le même détecteur : taux de « double hits »

Un calcul « simple » :

- Emission **isotrope** de  $M$  particules
- $N$  détecteurs **identiques**,  $p=1/N$
- Probabilité de détection **égale à 1**

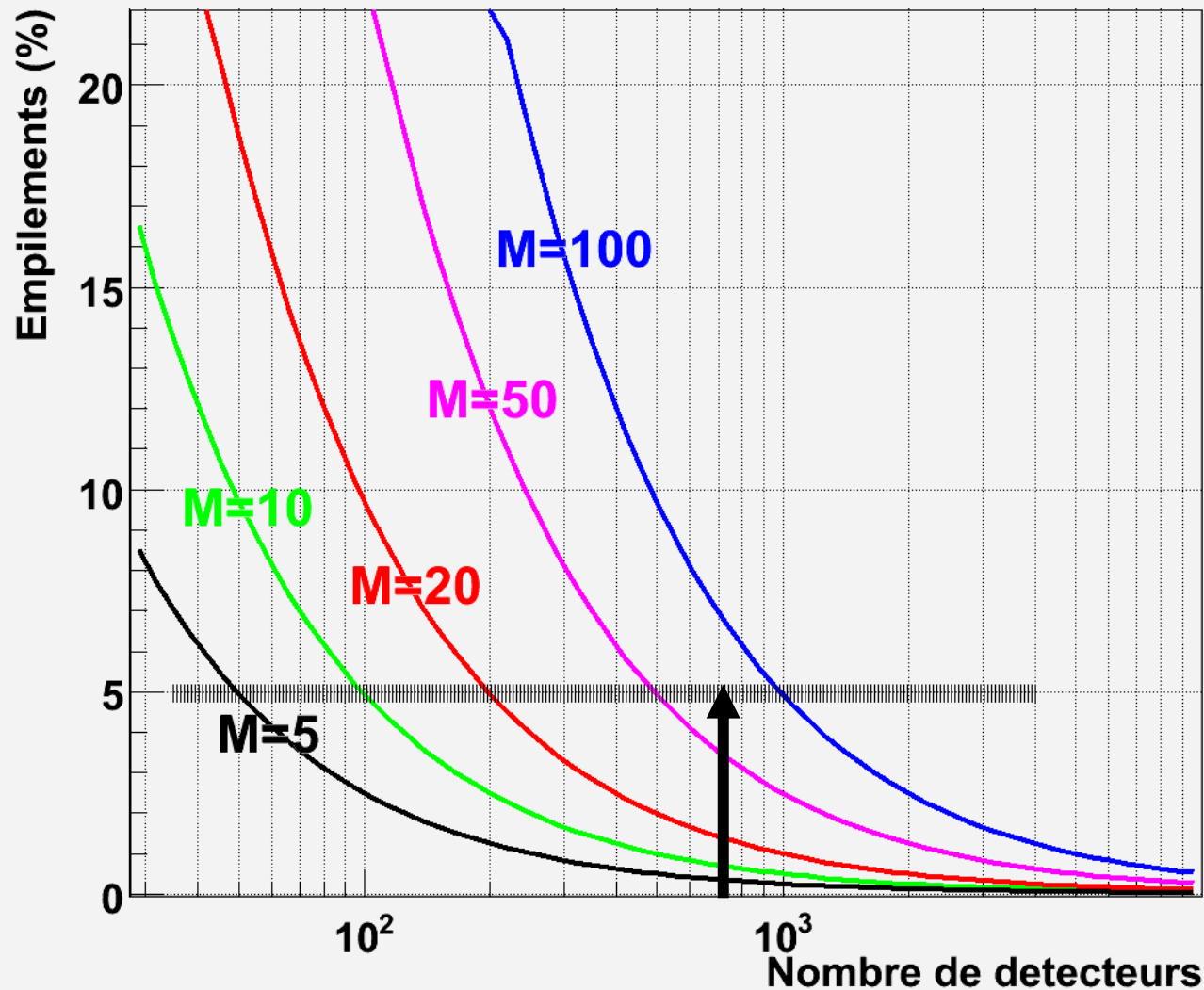


Empilement de particules dans le même détecteur



$$P_{\text{empilement}} = \frac{1 - (1 - p)^{M-1} (1 + (M - 1)p)}{1 - (1 - p)^M}$$

# Multidétecteurs : granularité



Pour  $P_{\text{empilement}} < 5\%$

On obtient :

- $M=5$ ,  $Nd > 50$
- $M=10$ ,  $Nd > 100$
- $M=20$ ,  $Nd > 200$
- $M=50$ ,  $Nd > 500$
- $M=100$ ,  $Nd > 1000$

# Détection des Particules chargées

## 1. Méthode E- $\Delta E$

Utilise **2 (ou plus) détecteurs** couplés D1+D2 : Si-Si, Chlo-Si, Si-Csl, ...  
Pouvoir d'arrêt (**épaisseur effective**) choisie suivant la **gamme d'énergie**

**Identification en Z,A pour  $0 < Z < 10$ , Z pour  $0 < Z < 60$**

## 2. Méthode par discrimination de forme

Utilise la **forme du signal** : 2 composantes temporelles (rapide-lent)  
Exemple : Csl(Tl ), Phoswich, ...

**Identification en Z,A pour  $0 < Z < 5$**

## 3. Méthode par mesure du temps de vol

Nécessite un détecteur produisant un **signal rapide** ( $t_{rise} < 1ns$ ), START  
Nécessite une **base de temps de vol** (distance) importante ( $L > 1m$ ), STOP

**Identification avec  $\Delta A < 1$  pour  $5 < A < 30$**

# Electronique et Trigger

- Nécessité de traiter un **nombre important de signaux** (100 à qq 1000)
- **Compacité et flexibilité** (couplage)
- Exclut la plupart du temps des **modules électroniques non intégrés**
- Electronique **dédiée et adaptée au détecteur** (brides, câblage)
- **Pièce essentielle** d'un multidétecteur  
(**collecte et regroupement** des signaux, logique de **déclenchement**)
- Nécessite une **certaine souplesse** pour s'adapter  
aux **différentes configurations** (couplages)
- Logique de **déclenchement asynchrone** préférable (calibration)

# Multidétecteurs de première génération

$4\pi$   
(1980-1990)

# NAUTILUS - Spécifications

*NAUTILUS est le nom d'une chambre de réaction de grand volume ( $V=15\text{ m}^3$ ), demeurant au GANIL (G4)*

Dans les années 80, elle était équipée de **4 systèmes de détection** :

- DELF : détection des **fragments lourds** entre 30 et 150°
- XYZt : détection des **fragments lourds** à l'avant entre 3 et 30°
- MUR : détection des **PLC** entre 3 et 30°
- TONNEAU : détection des **PLC** entre 30 et 150°

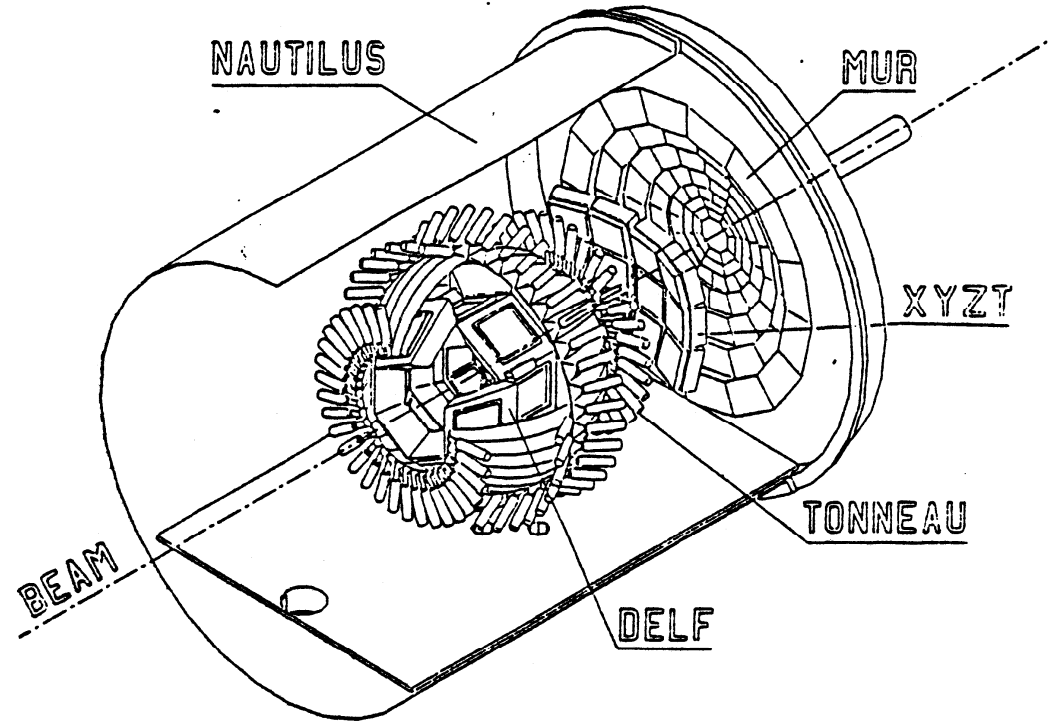
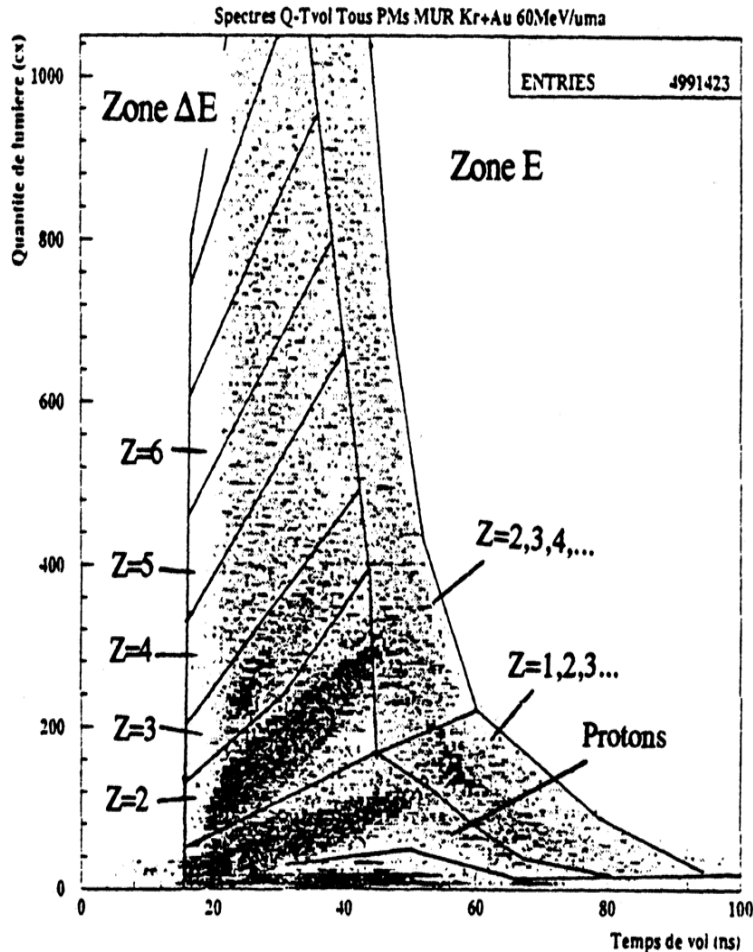
## **DELF/XYZt :**

- Plaques parallèles à avalanches (PPAC) + Chlo (mesure du  $T_{\text{vol}} + E$ )
- Résolution en vitesse de 4% (DELF) à 7% (XYZt)
- **Seuils de détection : 0.2 MeV/A (DELF) et 2 MeV/A (XYZt)**
- **Résolution angulaire : 0.5° (DELF), 0.1° (XYZt)**

## **MUR/TONNEAU :**

- Scintillateurs plastiques NE102
- **96 modules** (MUR) entre 3 et 30° et **144 modules** (TONNEAU) entre 30 et 150°
- Identification en Z pour Z=1-3, **en A pour Z=1-3** ( $E < 3\text{ MeV/A}$ )

# NAUTILUS - Spécifications



Matrice d'identification dans le MUR

Q -  $T_{vol}$  : 2 régimes

- Zone «  $\Delta E$  » (part. traversant le détecteur) : Z
- Zone « E » (part. en arrêt) : Z<



# NAUTILUS - Bilan

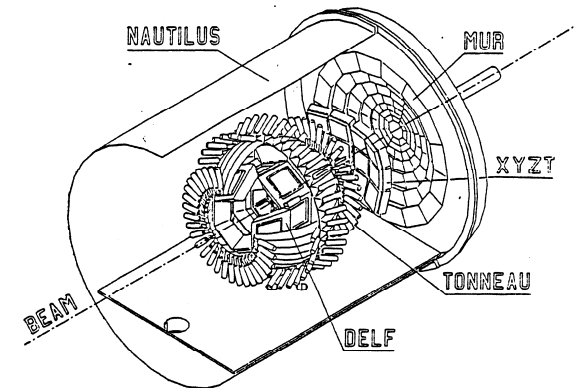
- Etude des **collisions dissipatives** entre ions lourds autour de l'énergie de Fermi
- Caractérisation de la **multifragmentation**
- Etude des **composantes dynamiques** d'émission : **fission, col, pré équilibre**
- Etude des noyaux produits en **fusion incomplète** : **séquentiel vs simultané**

## Points forts :

- **Excellente granularité** pour les fragments (corrélations)
- Couverture correcte ( $2\pi$ ) pour les **evts multi-corps**
- Seuils en énergie **très bas** ( $<0.5 \text{ MeV/A}$ )

## Points faibles :

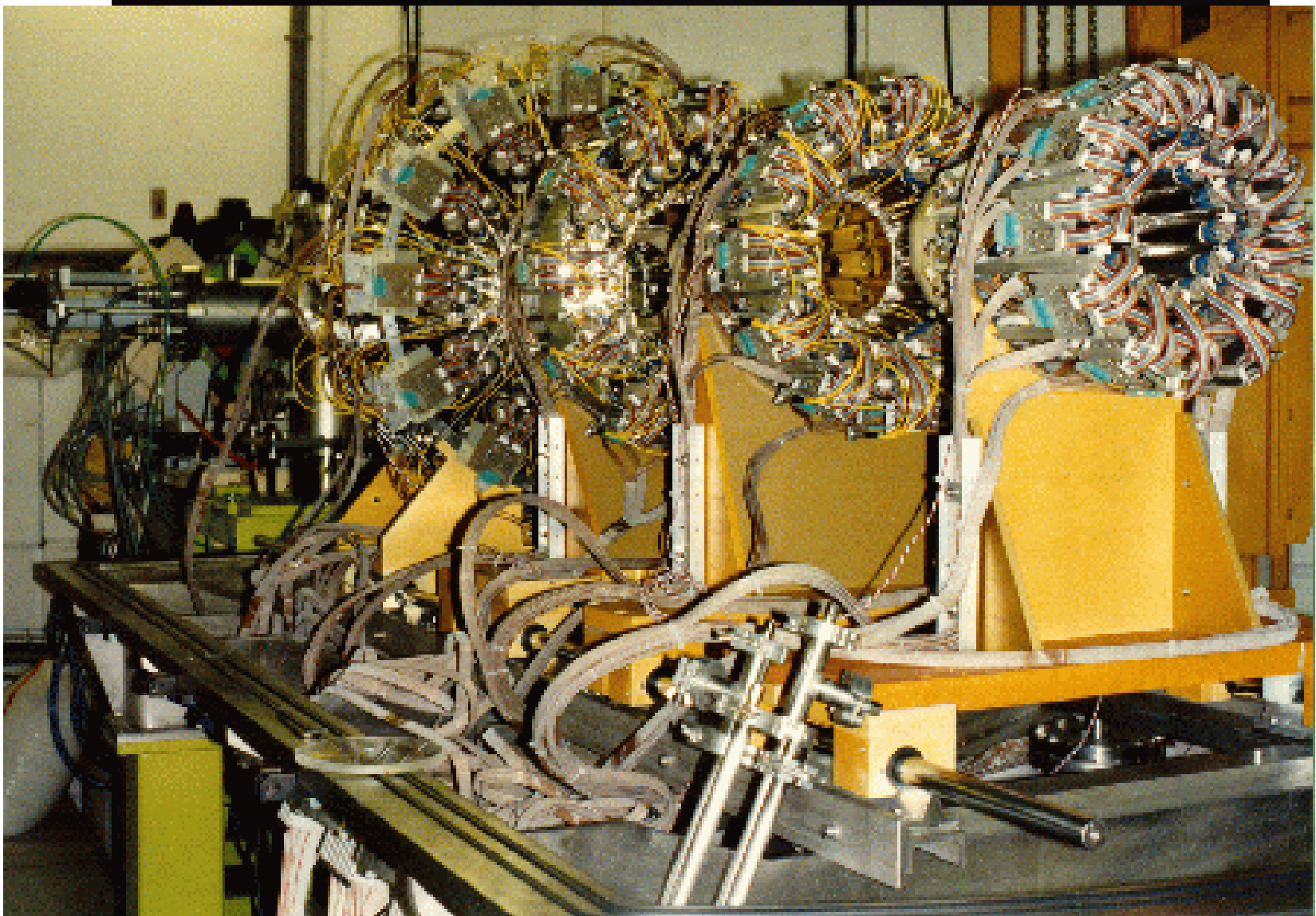
- Identification en Z :  $\Delta Z > 2$  pour **Z=30**
- Résolution en énergie : de l'ordre de **5 à 10%**
- Résolution **angulaire et énergétique** pour les **PLC**



# Mutidétecteurs de seconde génération

$4\pi Z$   
(1990-2005)

# INDRA : INstrument de Détection avec Résolution Accrue



# INDRA : des chiffres et des lettres

- **336 télescopes** répartis sur 17 couronnes, de **2 à 176°**
- **Seuils bas** : 1 MeV/A (détection), 1.5 MeV/A (Z), 6 MeV/A ( $1 < A < 10$ )
- **Large acceptance géométrique** : 90% de  $4\pi$
  
- **Electronique dédiée** : VME+VXI (intégration)
- **1200 voies** électroniques (regroupeur, corrélateur, trigger)
- Trigger **asynchrone** modulable (mode maître/esclave, coïncidences)
- **Large dynamique** en énergie (**2 gains**), de 1 à 4000 MeV
  
- **Acquisition spécifique** INDRA développée au GANIL
- **Commandes et contrôles** à distance (interfaces)
- **Inspection** (voies multiplexées)

# INDRA

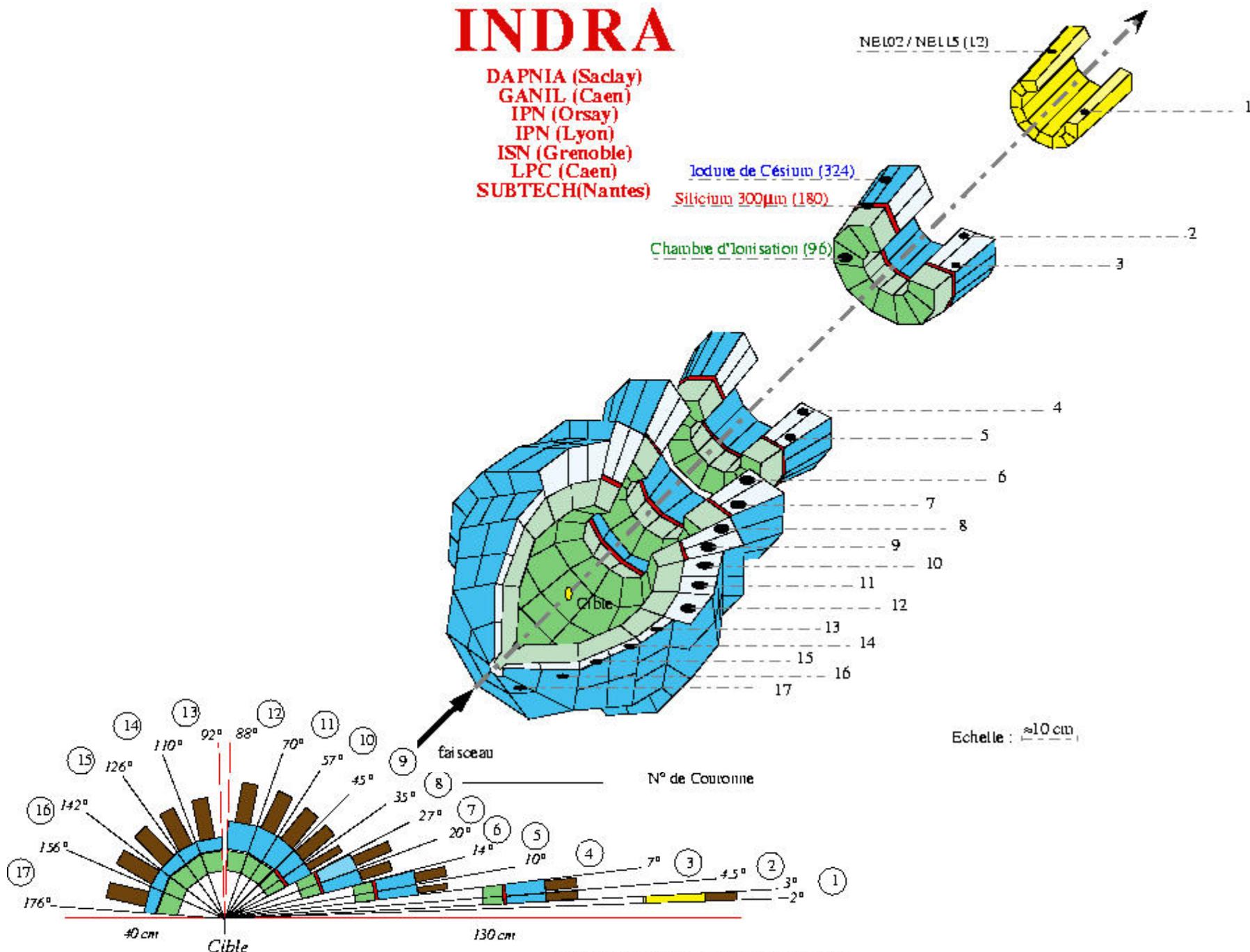
DAPNIA (Saclay)  
 GANIL (Caen)  
 IPN (Orsay)  
 IPN (Lyon)  
 ISN (Grenoble)  
 LPC (Caen)  
 SUBTECH(Nantes)

NE102 / NELL5 (L2)

Iodure de Césium (324)

Silicium 300 $\mu$ m (180)

Chambre d'Ionisation (96)

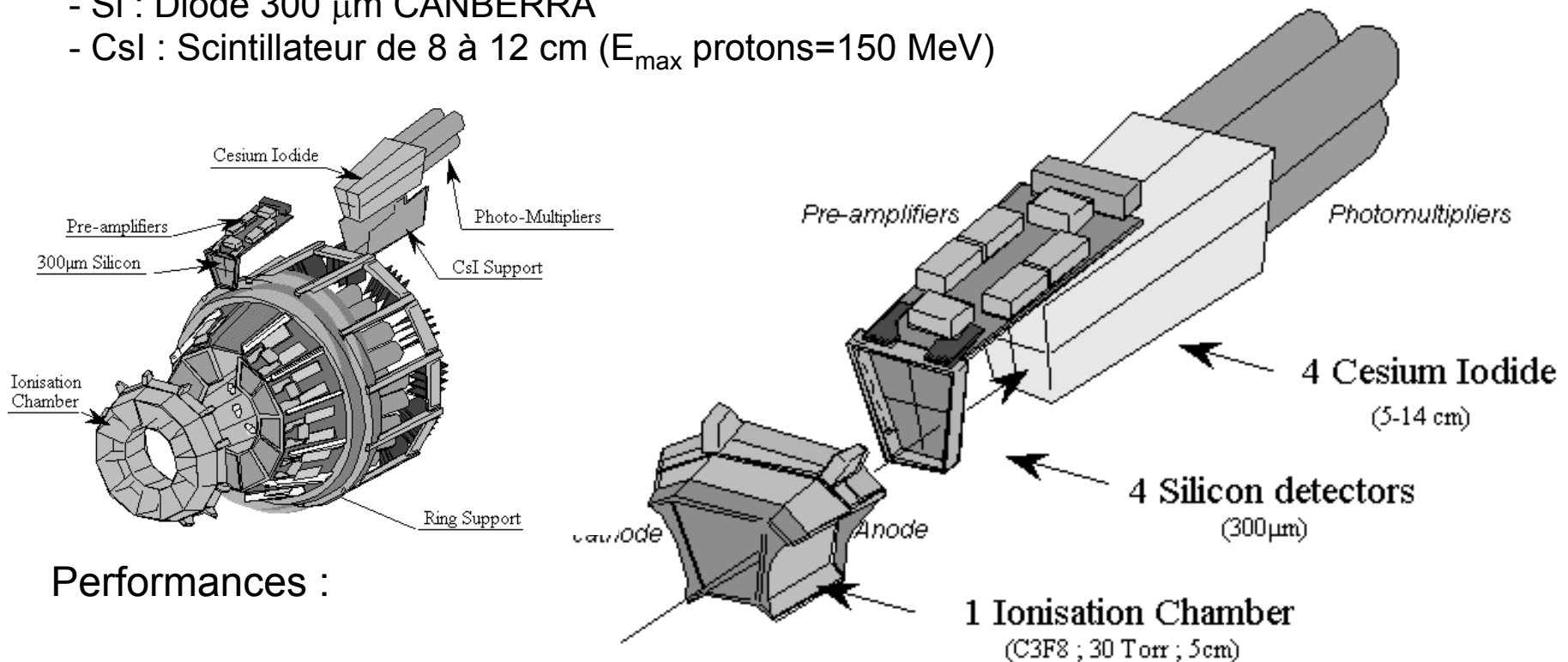


Echelle :  $\approx 10$  cm

# INDRA – Télescopes avant

Télescopes 3 étages : **Chlo – Si – Csl** entre 3 et 45° (180 Si-Csl, 48 Chlo)

- Chlo : Chambre d'ionisation (grille de Frisch), Pression 30/50 mb ( $\text{CH}_4$ ), épaisseur 10 cm
- Si : Diode 300  $\mu\text{m}$  CANBERRA
- Csl : Scintillateur de 8 à 12 cm ( $E_{\text{max}}$  protons=150 MeV)



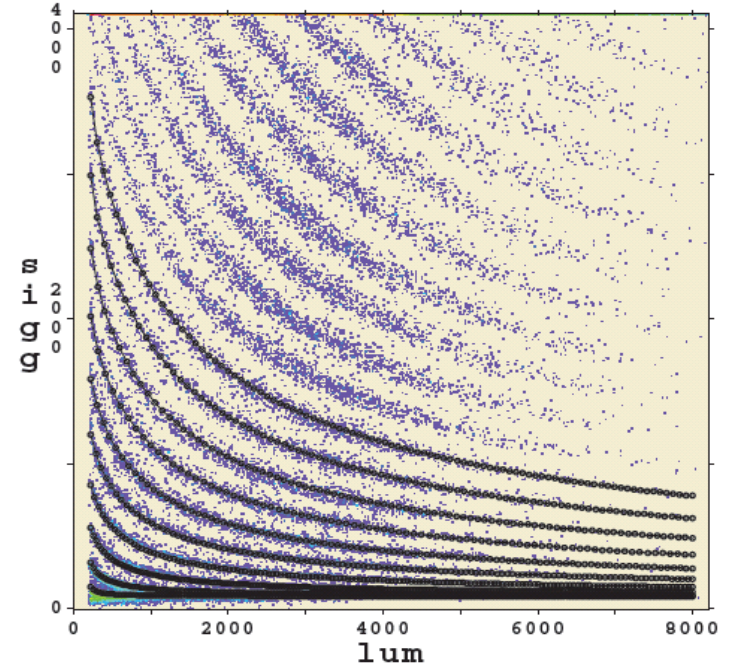
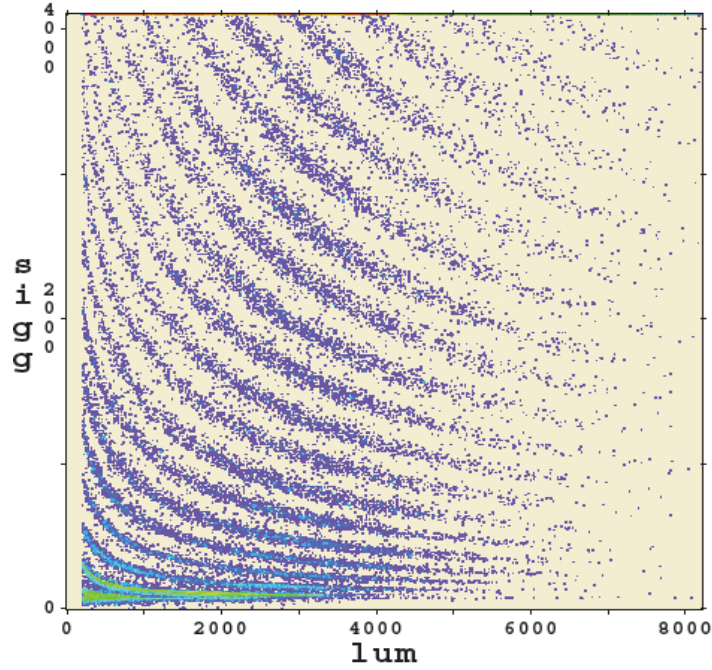
## Performances :

- Identification en Z par la méthode E- $\Delta$ E (Chlo-Si, Si-Csl)
- Identification en Z,A par discrimination de forme Csl Rapide-Lent ( $E > 6 \text{ MeV/A}$ )
- Résolution en énergie de 1 à 5% suivant la particule et l'énergie

# Identification Si-Csl

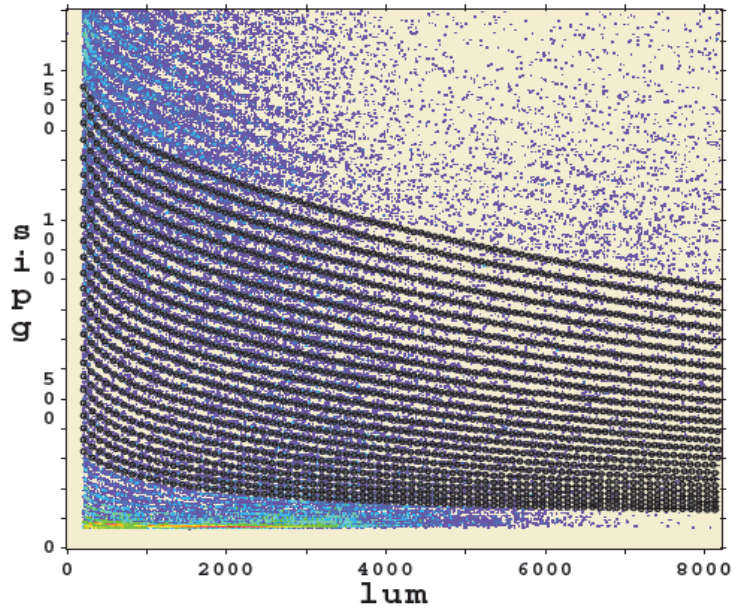
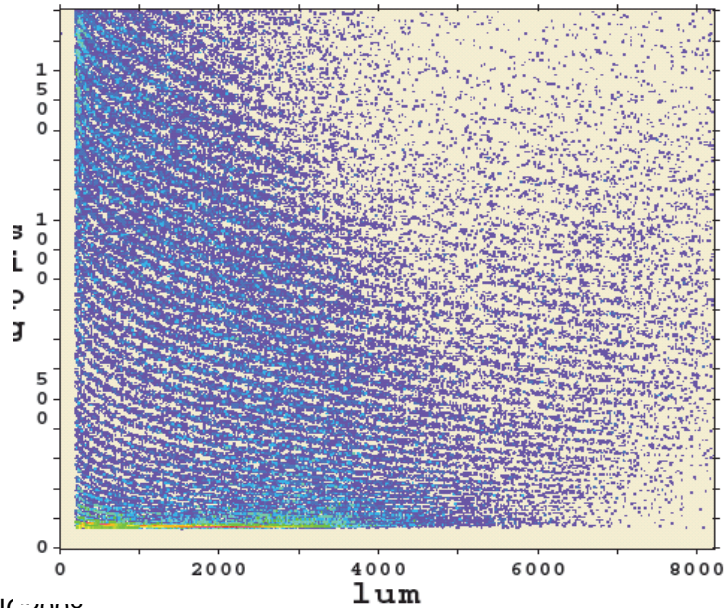
INDRA

$^{129}\text{Xe} + \text{nat}\text{Sn}$   
45 MeV/A



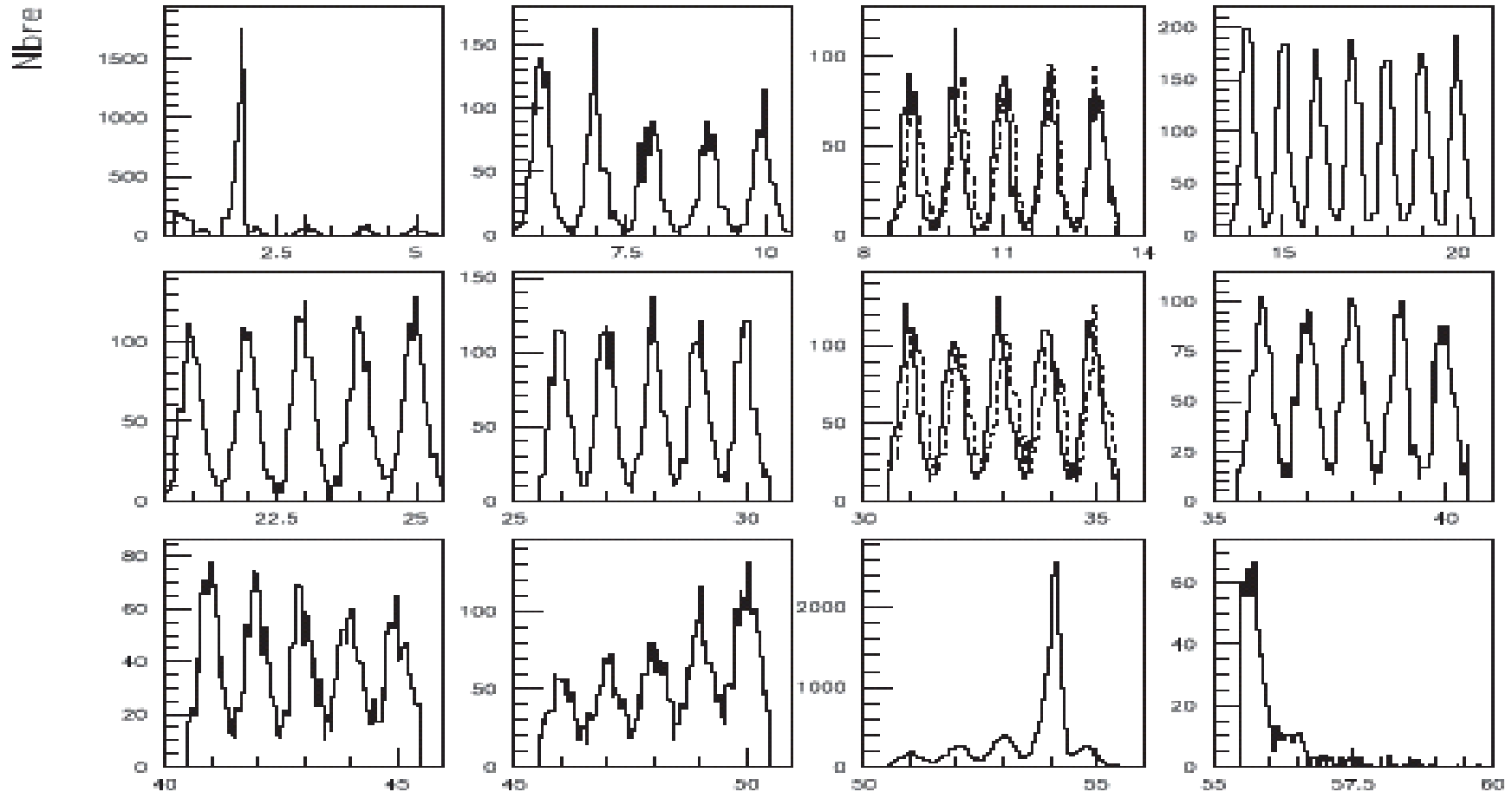
Matrices  
Si - CsiR

Z=1-54



# Identification Si-Csl

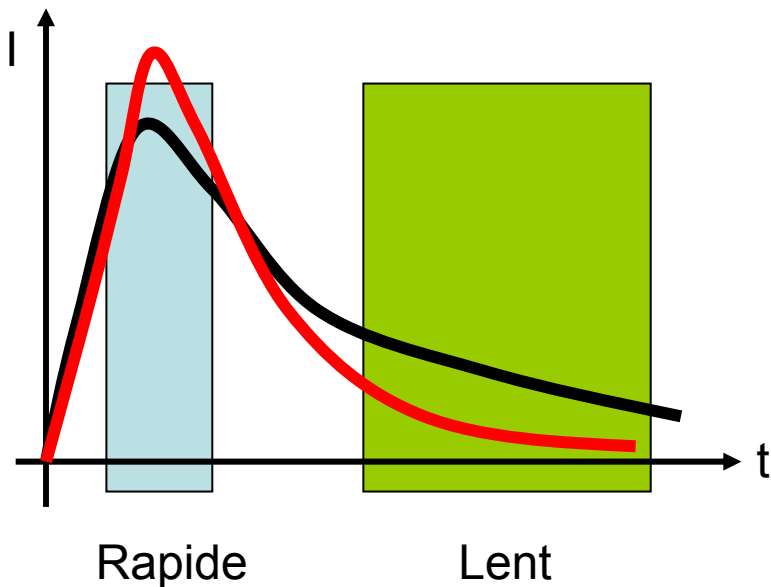
$$\Delta E = [(g.E)^{\mu+\nu+1} + (\lambda.Z^\alpha.A^\beta)^{\mu+\nu+1} + \xi.Z^2.A^\mu.(g.E)^\nu]^{\frac{1}{\mu+\nu+1}} - g.E$$



[Tas02] L. Tassan-Got, *A new functional for charge and mass identification in  $\Delta E-E$  telescopes*, Nuclear Instruments and Methods B 194 (2002) 503



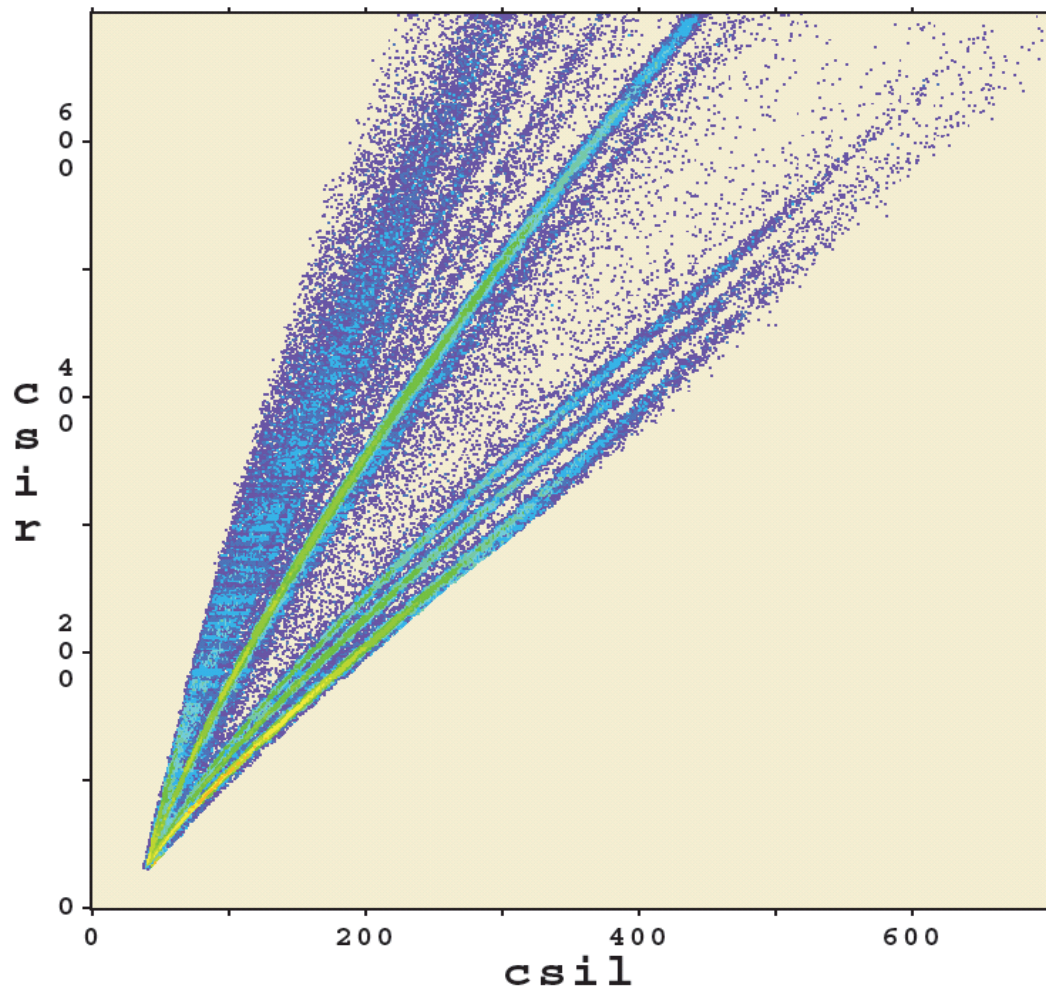
# Identification CsI R-L



$$\frac{dq(t)}{dt} = \frac{h}{\tau_0 - \tau} \cdot (e^{-\frac{t}{\tau_0}} - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

$$R = \frac{h}{\tau_0 - \tau} \cdot [\tau_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t_1}{\tau_0}}) - \tau \cdot (1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}})]$$

$$L \approx \frac{h \cdot \tau_0}{\tau_0 - \tau} \cdot (e^{-\frac{t_2}{\tau_0}} - e^{-\frac{t_3}{\tau}})$$



$\tau, \tau_0$  : temps de montée, descente

R : lumière entre 0 et  $t_1$

L : lumière entre  $t_2$  et  $t_3$

# INDRA - Bilan

- Etude des **collisions dissipatives** entre ions lourds autour de l'énergie de Fermi
- Caractérisation de la **multifragmentation** (transition de phase et équation d'état)
- Etude de la **vaporisation** (point critique)
- Etude des **composantes dynamiques** d'émission : **fission, col, pré équilibre**
- Etude des noyaux produits en **fusion incomplète** : **séquentiel vs simultané**

Points forts :

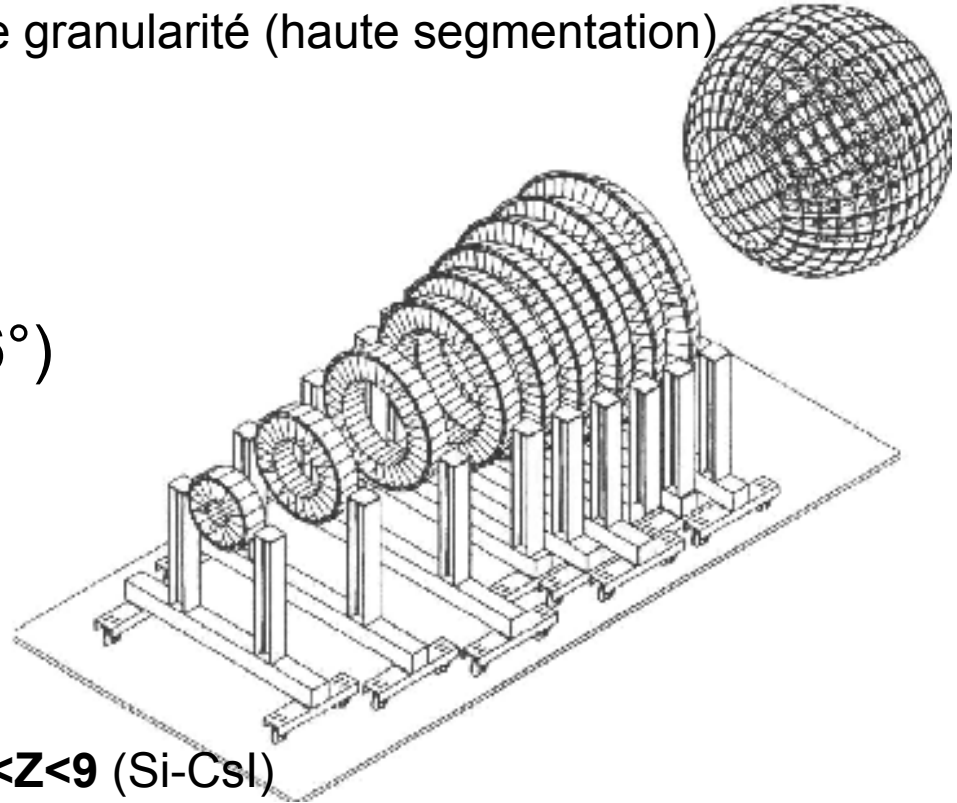
- **Jeu de données unique** dans le monde : plus de **50 systèmes**
- Caractérisation **evt par evt** : bilan énergétique et en charge (**calorimétrie**)
- **Thermodynamique des noyaux chauds et phénomènes associés**  
(Transition de phases, phénomènes critiques, taille finie, EOS, ...)

Points faibles :

- **Pas d'identification en masse** pour  $Z > 4$
- **Granularité** insuffisante pour corrélation intra-evt
- Pas de **temps de vol (A)**, résolution en énergie ~ **3-5%**

# CHIMERA - spécifications

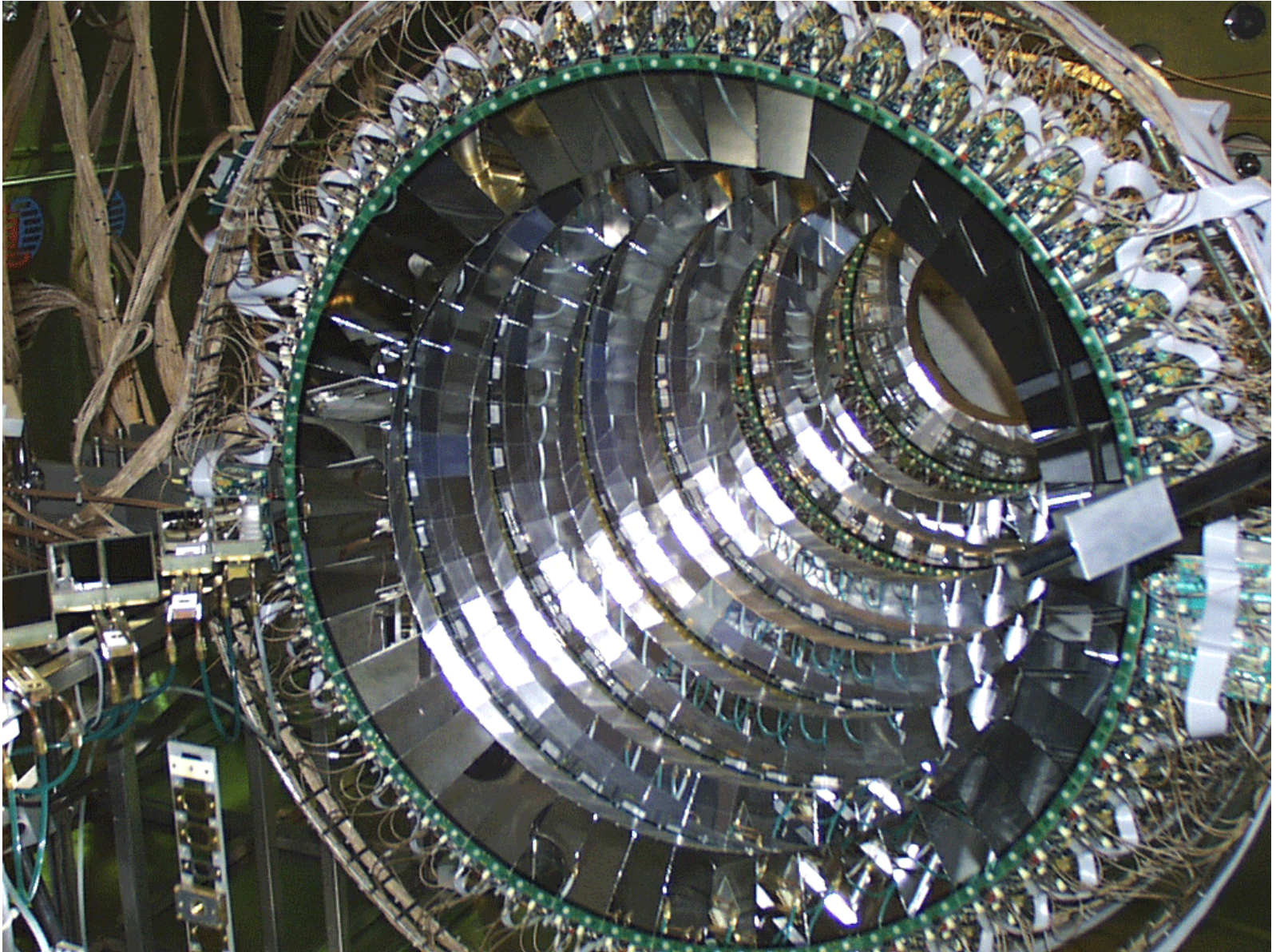
- **1192 télescopes Si-CsI** entre  $1$  et  $176^\circ$
- Couverture angulaire de  $94\%$  et grande granularité (haute segmentation)
- 2 parties :
  - Mur à l'avant ( $1-30^\circ$ )
  - Sphère à l'arrière ( $30-176^\circ$ )



## Performances :

- Id. en **Z,A** par la méthode  $E-\Delta E$  pour  $0 < Z < 9$  (Si-CsI)
- Id en A par **temps de vol** pour les fragments lourds avec **seuils bas ( $0.3 \text{ MeV/A}$ )**
- Id. en Z,A pour  $Z < 5$  par discrimination de forme CsI rapide-lent
- Résolution en énergie entre  $3$  et  $5\%$
- Excellente **granularité**

# CHIMERA



# CHIMERA

Identification dans les matrices Si-Csi



# CHIMERA - Bilan

- Etude des **collisions dissipatives** entre ions lourds autour de l'énergie de Fermi
- Caractérisation des collisions binaires dissipatives : **deep-inelastic, col, QP/QC**
- Mesures des **corrélations en vitesse** entre IMFs

Points forts :

- **Excellente granularité** (corrélations)
- **Résolution** en énergie correcte (<5%)
- Upgrade en cours (**CHIMERA-PS**) pour la mesure de A ( $t_{\text{rise}}$  Si)

Points faibles :

- Trigger **synchrone (temps de vol)**
- **Non homogénéité** de la réponse en identification Z/A (simulations)
- **Seuils élevés** pour Id. Z,A (qq MeV/A)
- Id. en A seulement pour les **fragments lents** ( $E < 3$  MeV/A)

# Bilan des courses

Importance des corrélations INTRA-événement :  
**géométrie  $4\pi$ /espace des phases**

Nécessité d'une bonne résolution en énergie :  
 **$\Delta E/E < 2-3\%$**

Nécessité d'une granularité élevée :  
**résolution angulaire  $\theta, \varphi$  :  $\Delta\theta, \Delta\varphi < 1^\circ$**

Importance de l'identification en **Z, A** :  
 **$\Delta Z, \Delta A = 1$  pour  $A < 100$**

# Mutidétecteurs de troisième génération

$4\pi(N)AZ$   
(2010 – 2020)

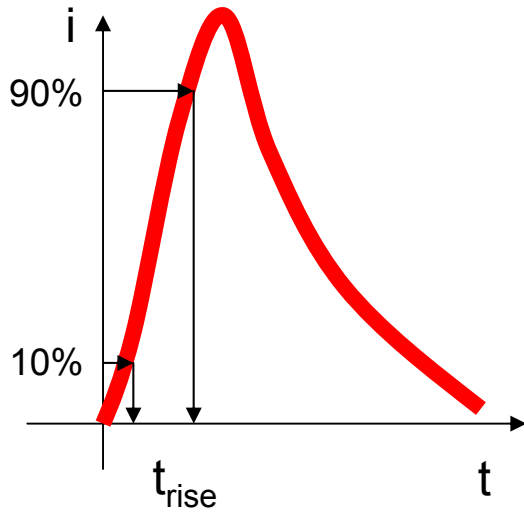


# Mesure de la masse

- Temps de vol, difficile pour des petites distances (1-2m)  
à moins d'avoir des résolutions en temps  $< 1\text{ns}$
- Analyse de la forme du signal ,
  - Analogique (hardware:porte,DFC)
  - Numérique (algorithmes:DSP)

# Pulse Shape Analysis (PSA) dans les Siliciums

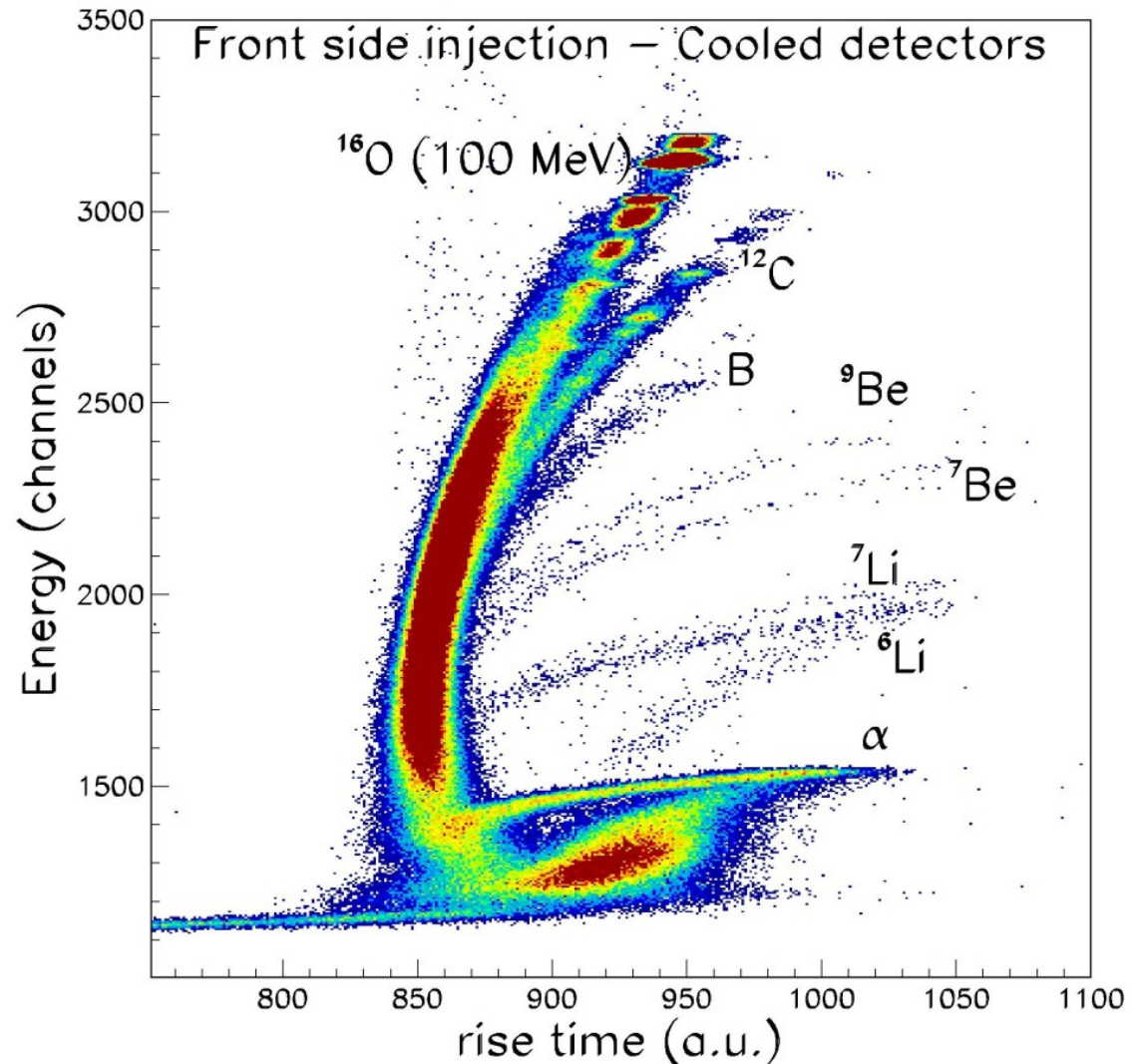
CHIMERA-PS  
(2004)



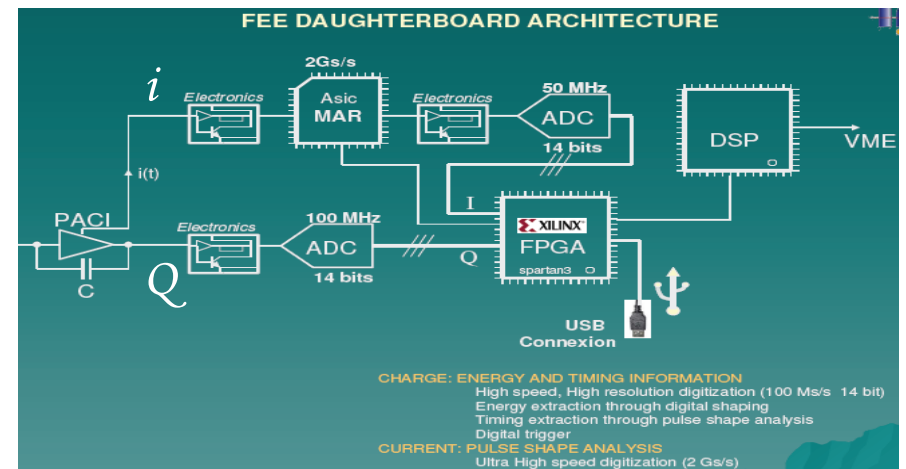
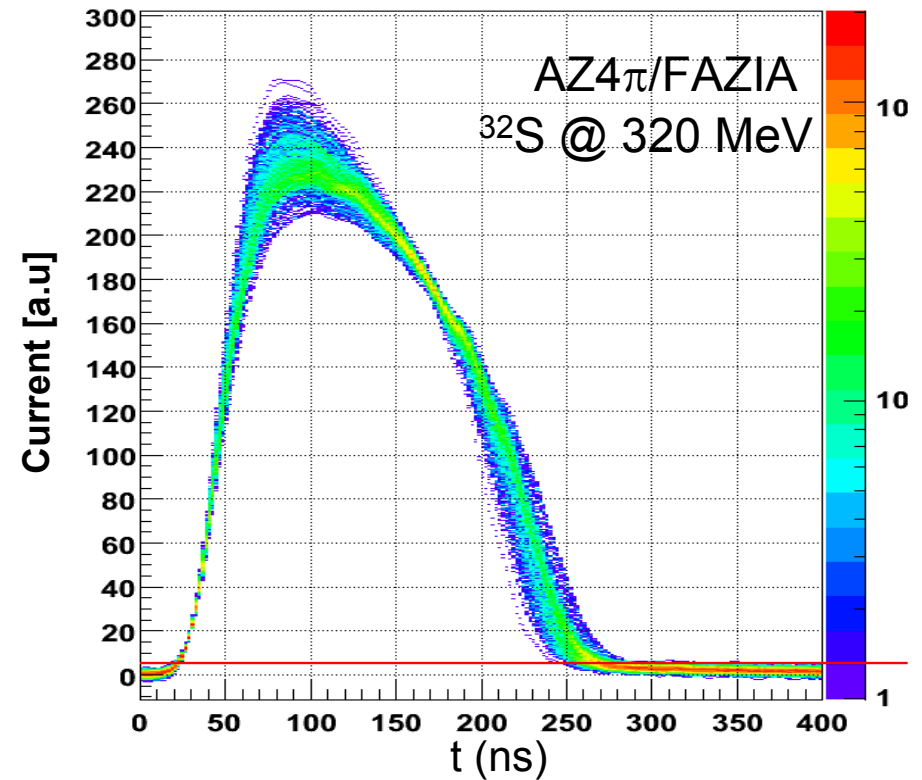
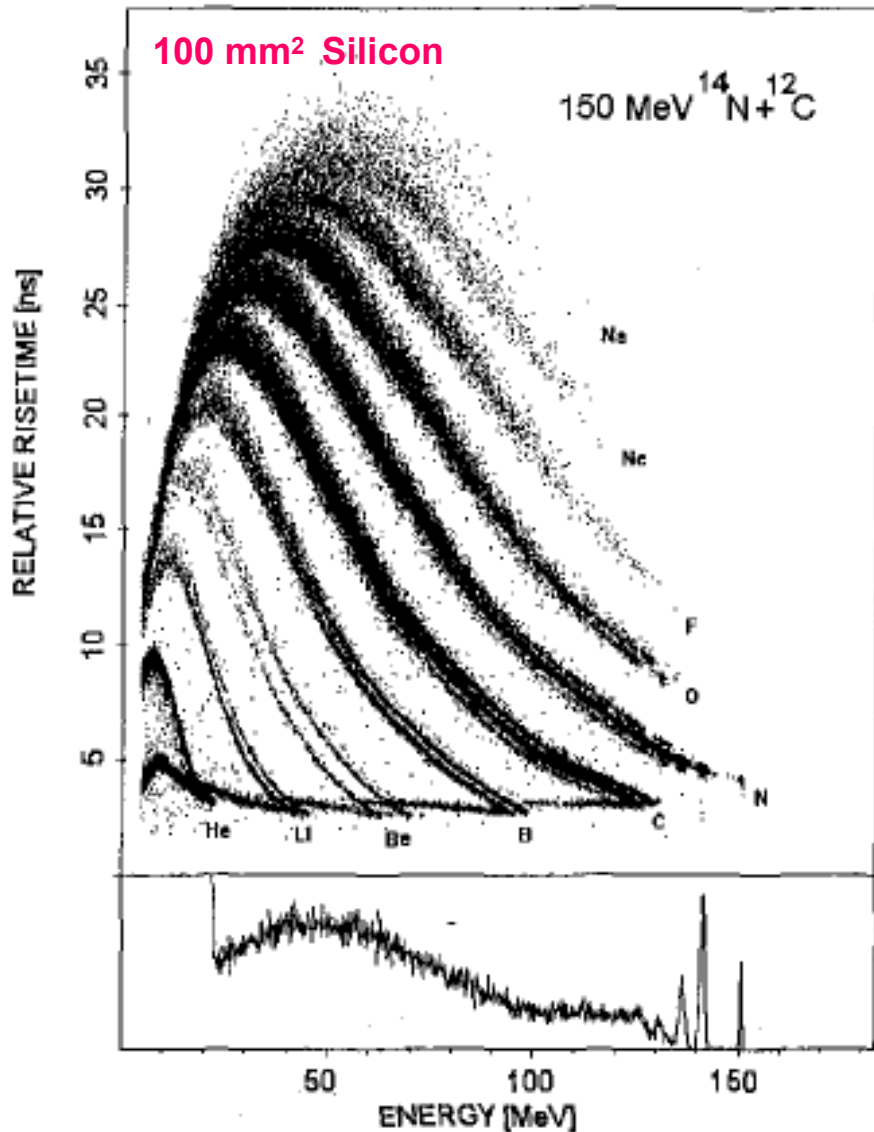
Electronique analogique

Double DFC à 10-90%  
du signal de charge

Pulse shape CHIMERA Si-detectors



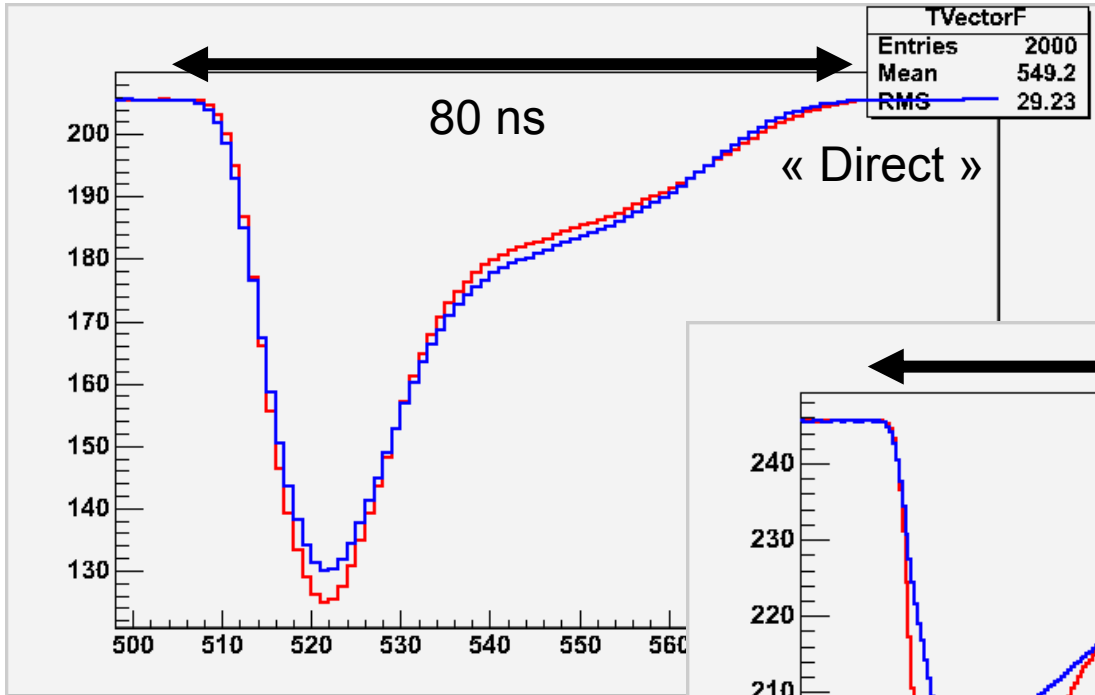
# Pulse Shape Analysis (PSA) dans les Siliciums



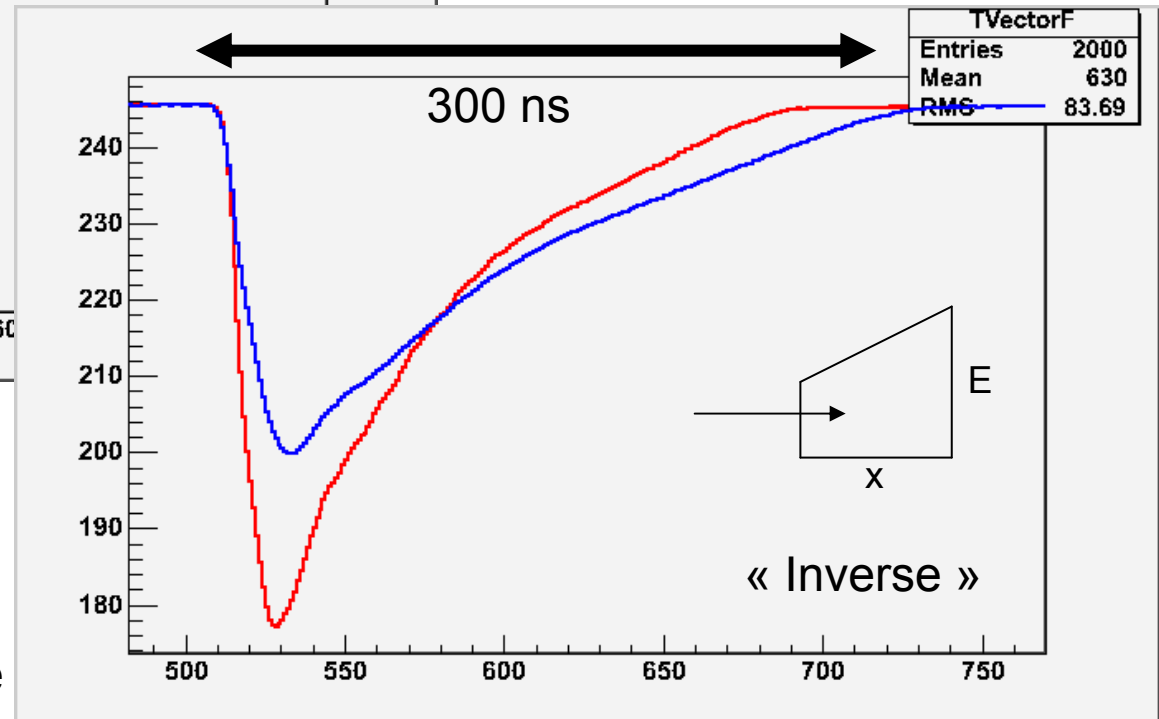
Mutterer et al IEEE TNS 47 (2000) 756

# PSA dans les siliciums : montage direct - inverse

Echantillonnage du signal de courant (**PACI**),  $f=2\text{GHz}$  (8bits)



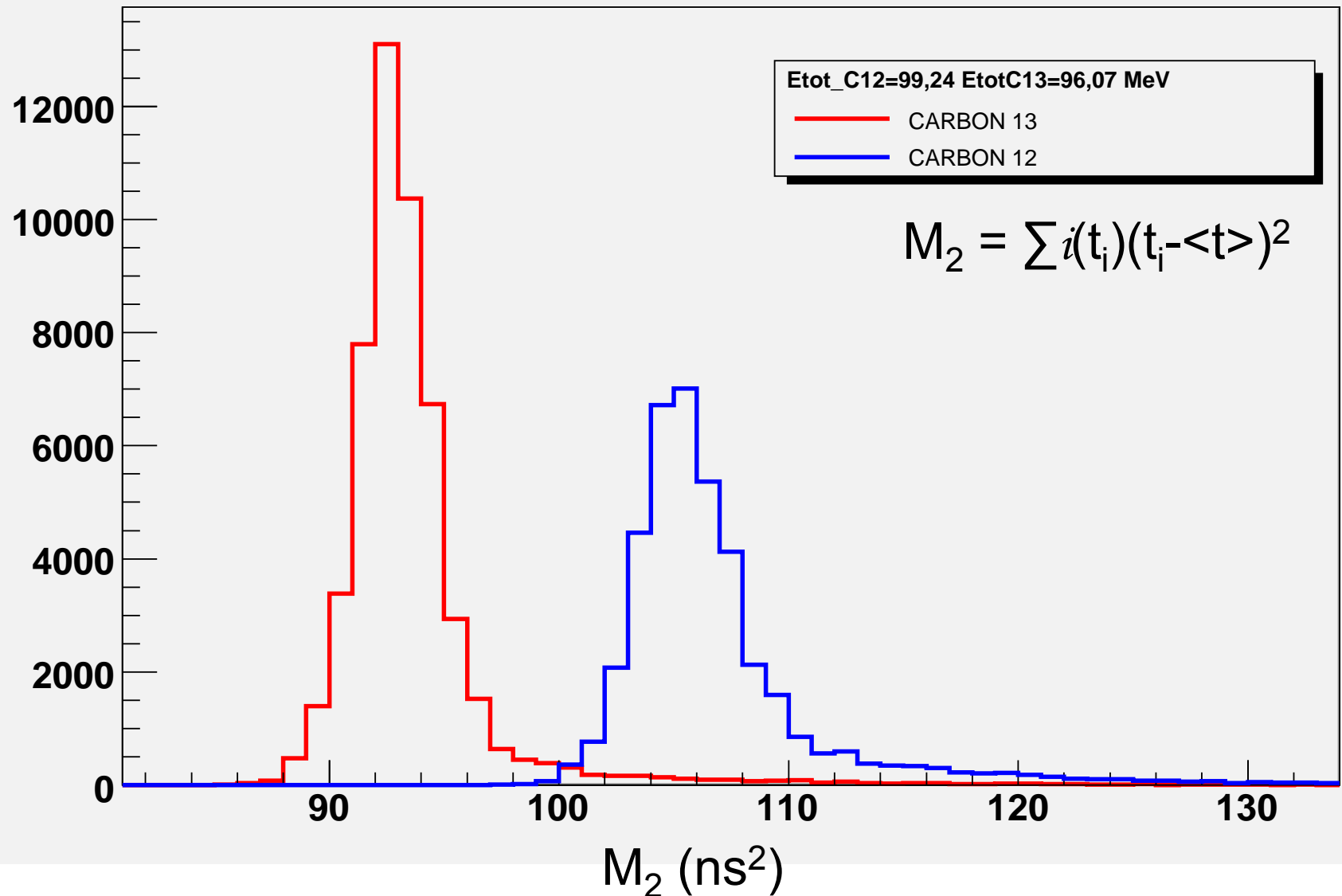
$^{36}\text{Cl} / ^{33}\text{P} @ 8 \text{ MeV/A}$



Montage direct :  
Dynamique en temps plus faible  
Mais discrimination moins bonne

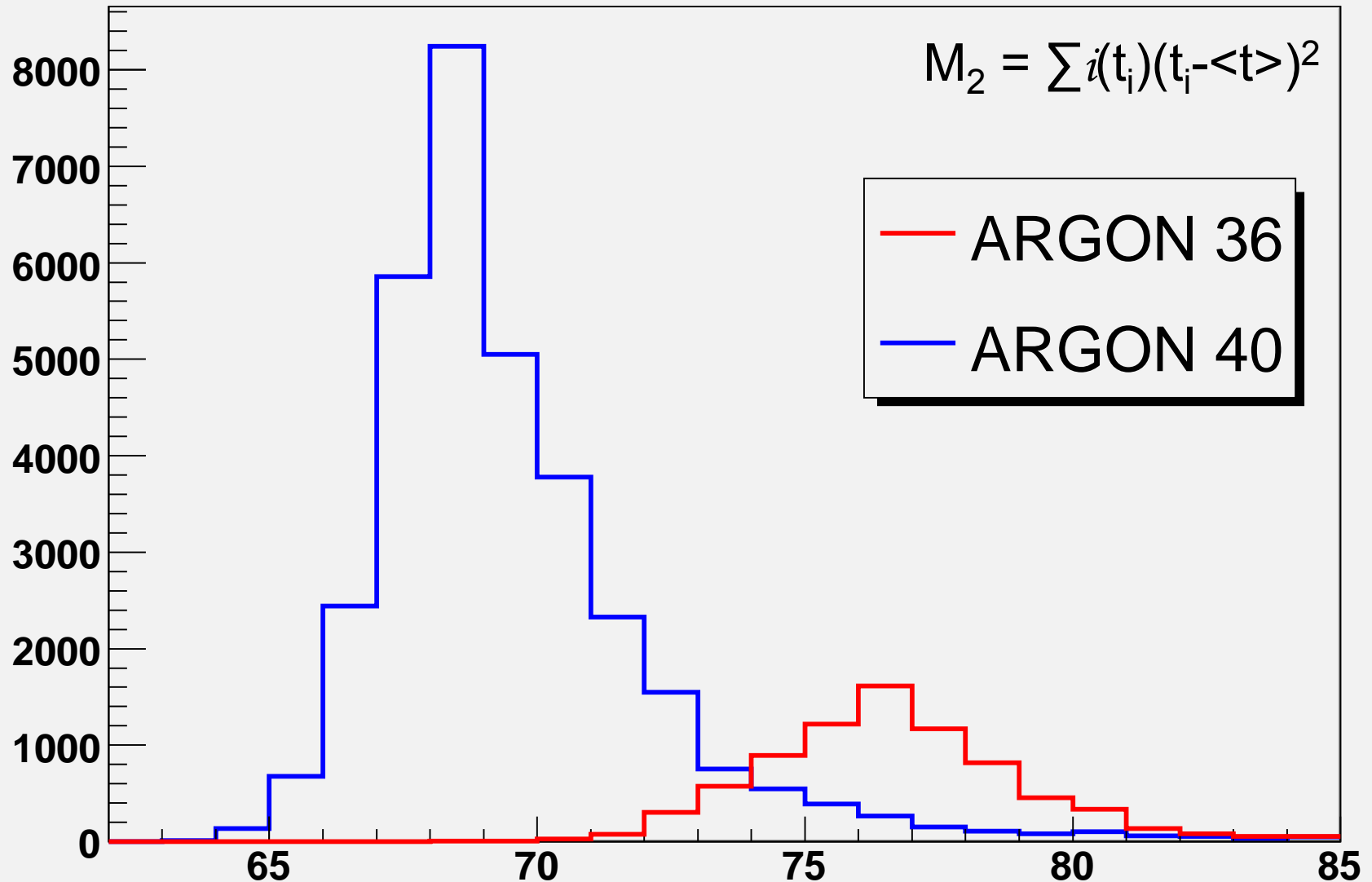
# Analyse en forme du signal de courant dans les siliciums : FAZIA

CIME2 experiment@GANIL, Sept. 2006, Carbon Isotopes



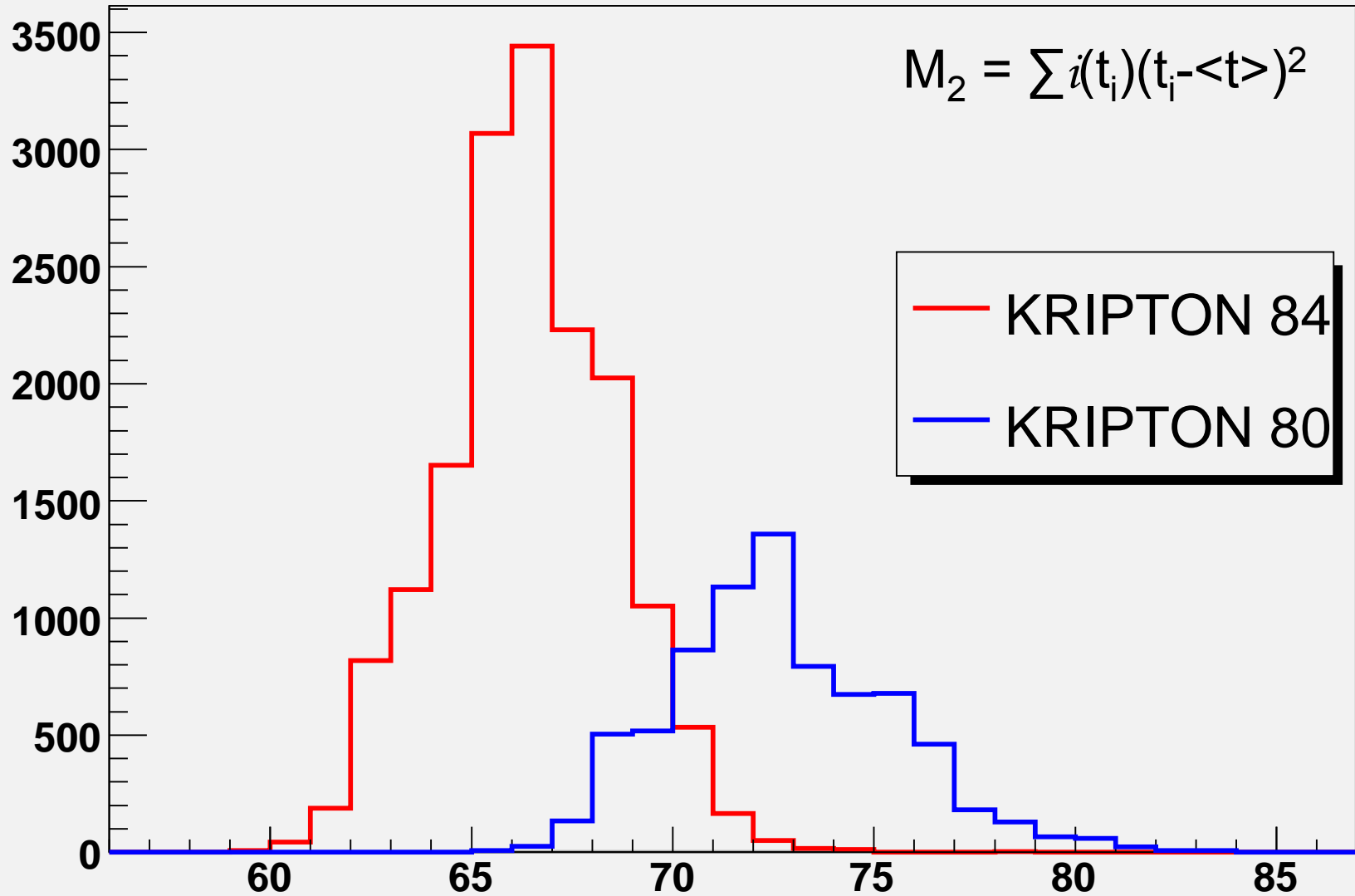
# Analyse en forme du signal de courant dans les siliciums : FAZIA

CIME2 experiment@GANIL, Sept. 2006,  $E_{tot}=312,4$  MeV

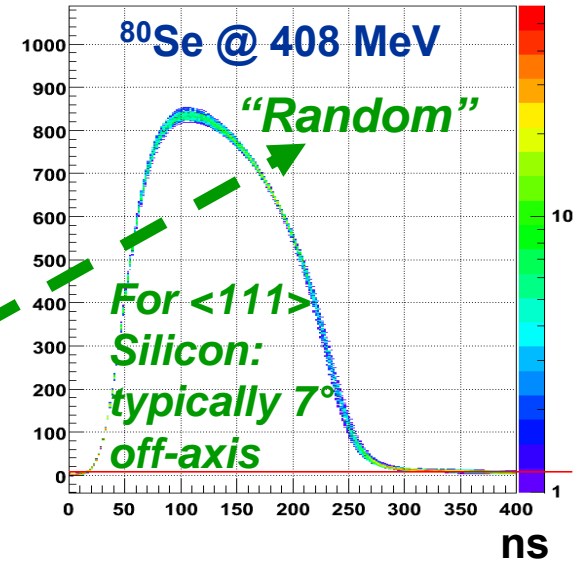
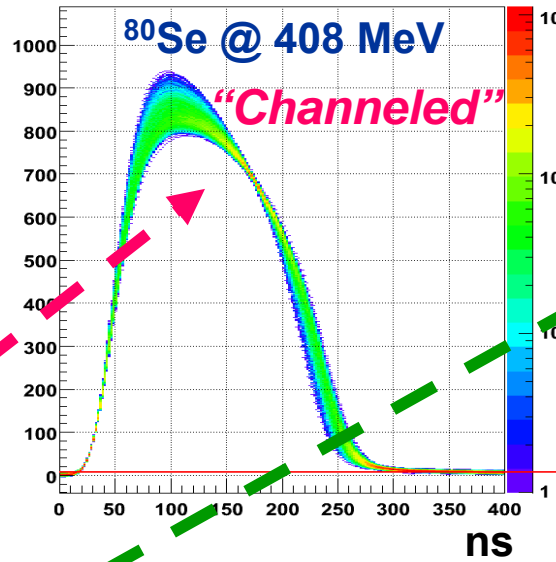
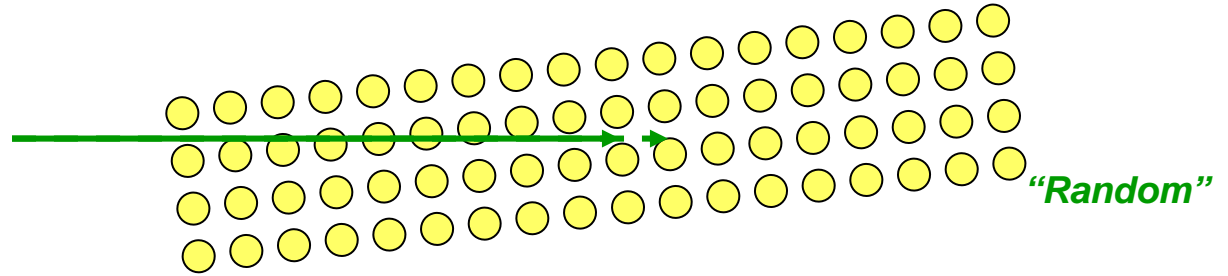
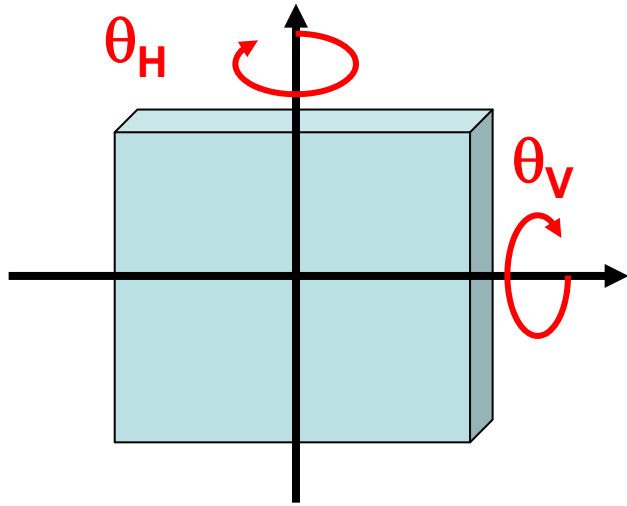


# Analyse en forme du signal de courant dans les siliciums : FAZIA

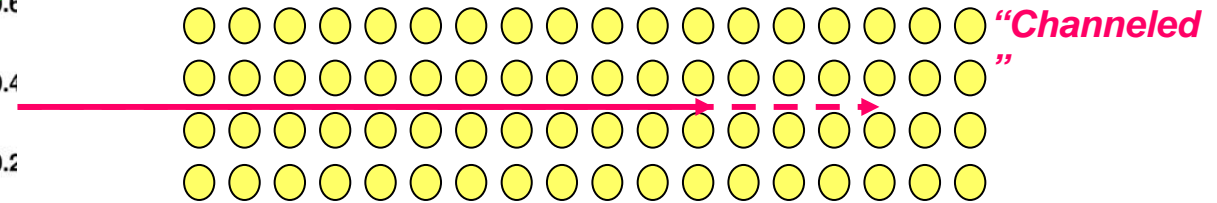
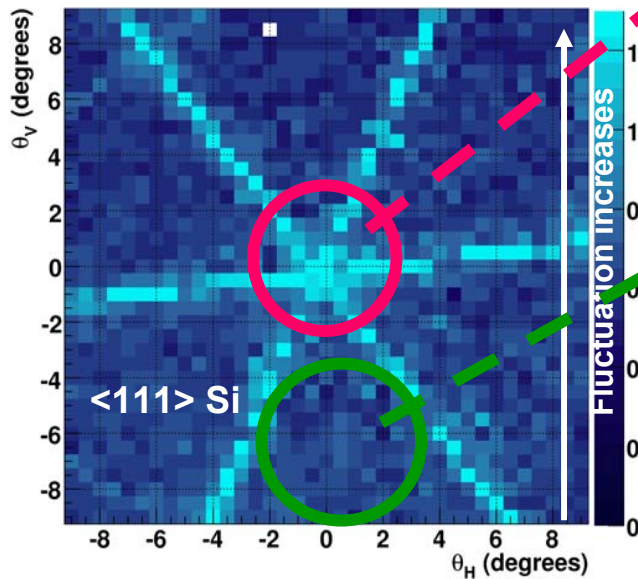
CIME2 experiment@GANIL, Sept. 2006, Etot=694,4



# Effet de la canalisation sur la forme du signal



Risetime-fluctuations vs gonio-angles

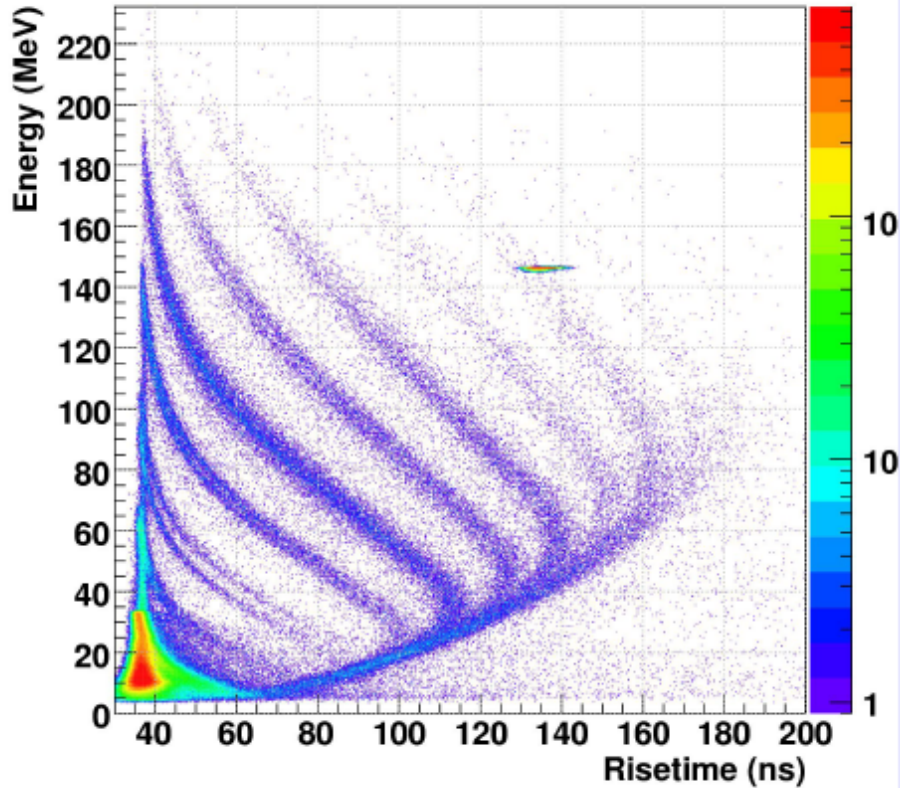




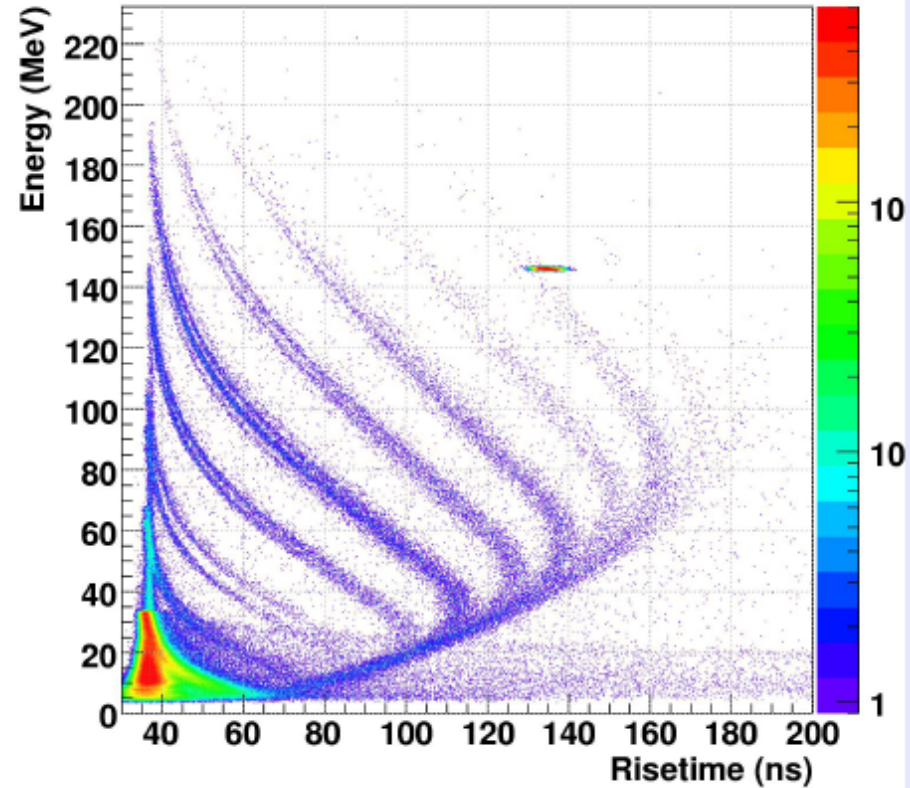
# Effet de la canalisation sur la forme du signal



Energy vs risetime (det.G-E) - channeled configuration

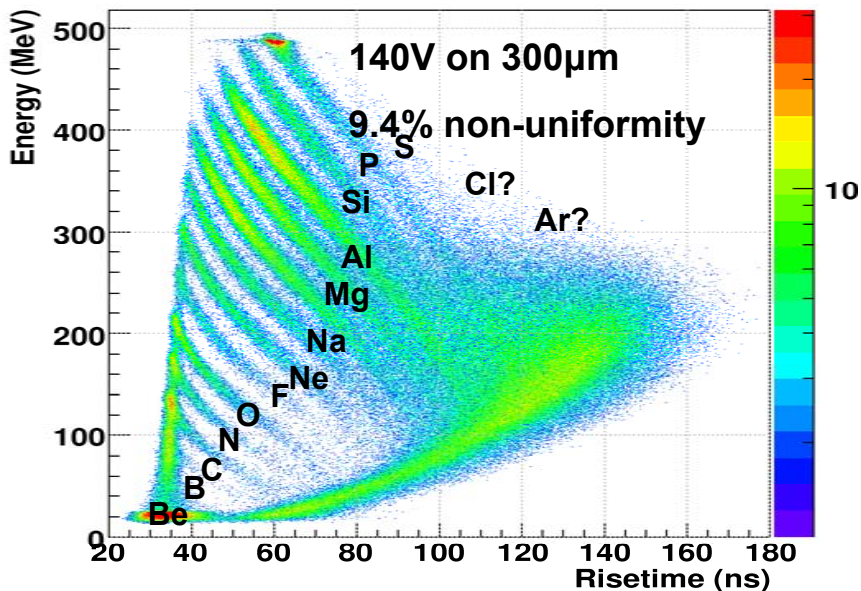


Energy vs risetime (det.G-E) - random configuration



# Effet de la résistivité non uniforme

Energy vs risetime (det.G-dE) - random configuration

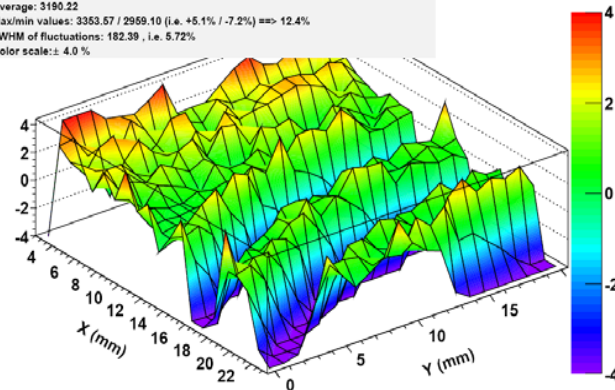


## Detector no.73311

Thickness: 315.0  $\mu$ m, Vdepl: 109.40 V

Resistivity map ( $\Omega$  cm) for run\_det73311

Average: 3190.22  
Max/min values: 3353.57 / 2959.10 (i.e. +5.1% / -7.2%) => 12.4%  
FWHM of fluctuations: 182.39 , i.e. 5.72%  
Color scale:  $\pm$  4.0 %



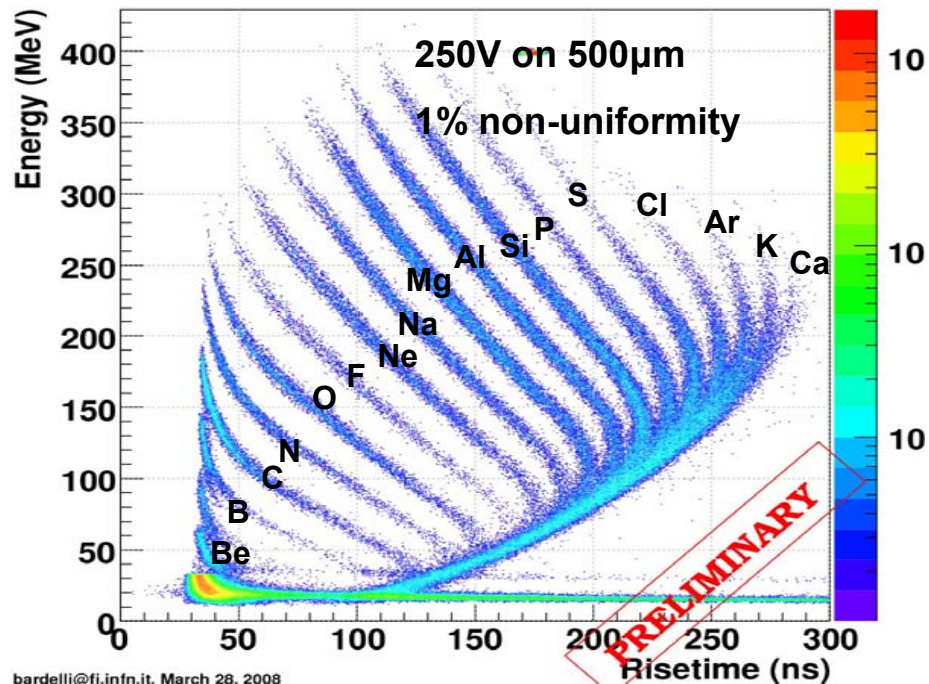
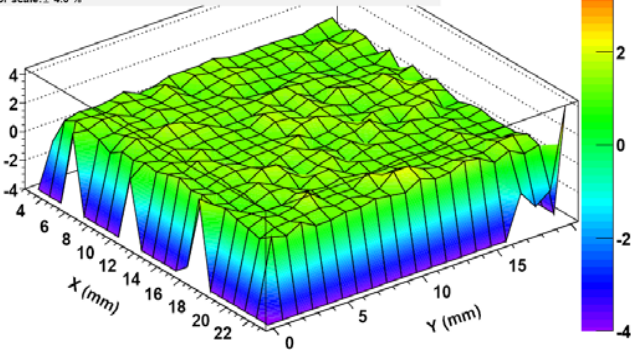
Energy vs risetime (SCT.1) - random configuration

## Detector no.73313

Thickness: 516.0  $\mu$ m, Vdepl: 227.40 V

Resistivity map ( $\Omega$  cm) for run\_det73313

Average: 4120.36  
Max/min values: 4421.03 / 3631.28 (i.e. +7.3% / -11.9%) => 19.2%  
FWHM of fluctuations: 313.44 , i.e. 7.61%  
Color scale:  $\pm$  4.0 %



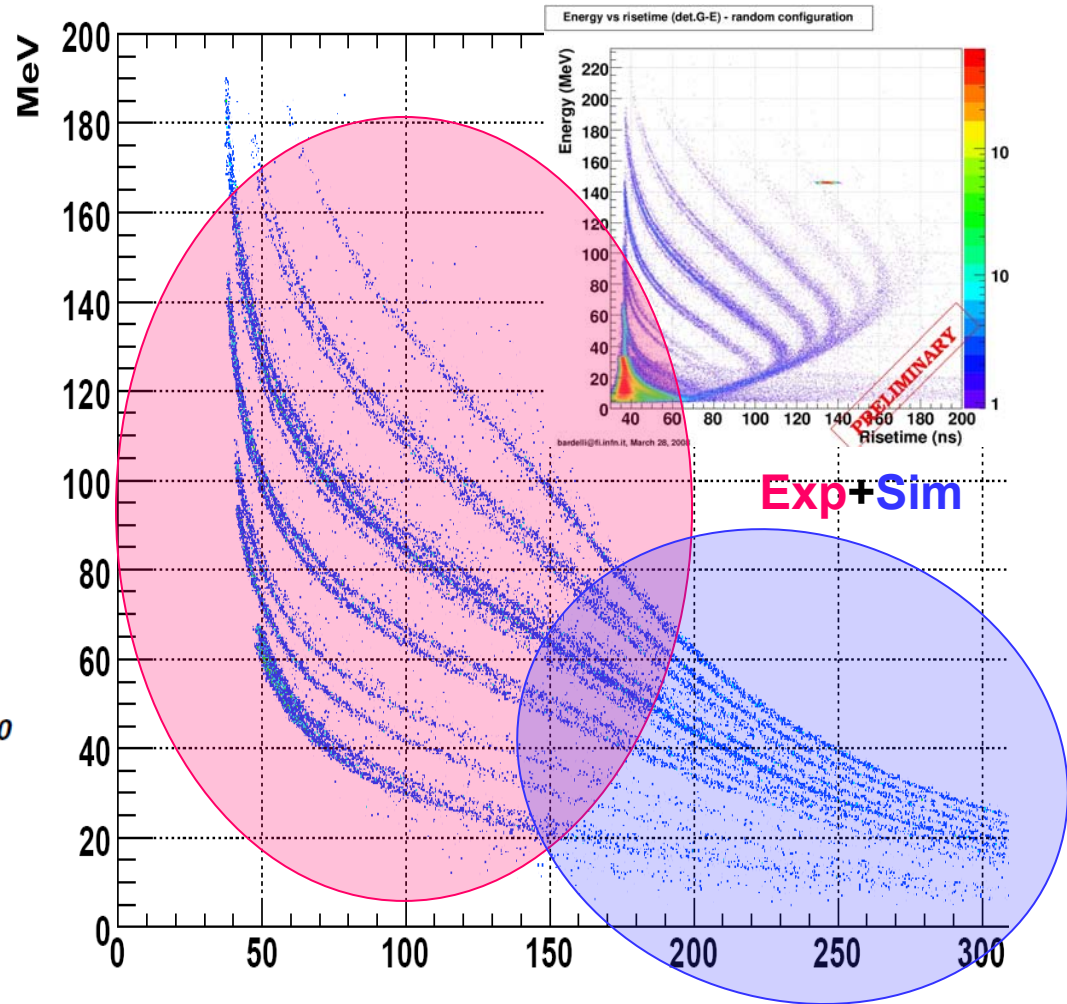
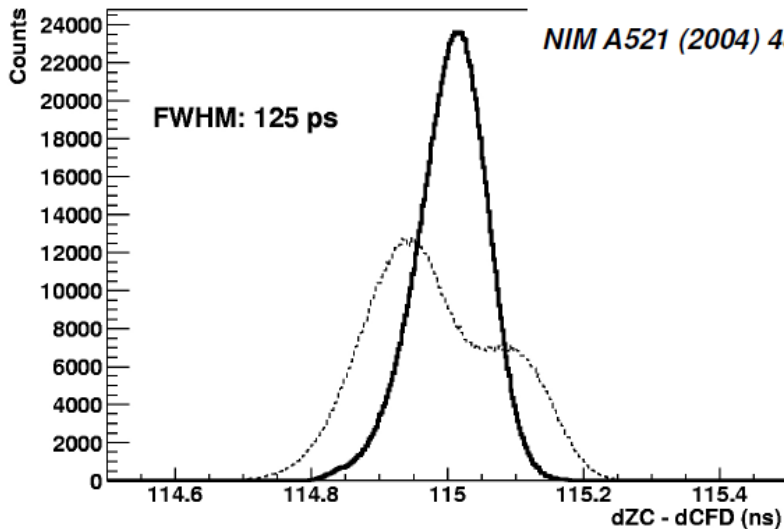
# Intégration du temps de vol pour la discrimination à basse énergie

Intégrer le temps de vol dans la matrice E- $t_{\text{montée}}$

Permet une extension de la discrimination en Z,A à plus basse énergie

$t_{\text{vol}}$  simulé pour L=1.1m et un  $\Delta t_{\text{vol}}=500\text{ps}$

Timing resolution for elastic peak



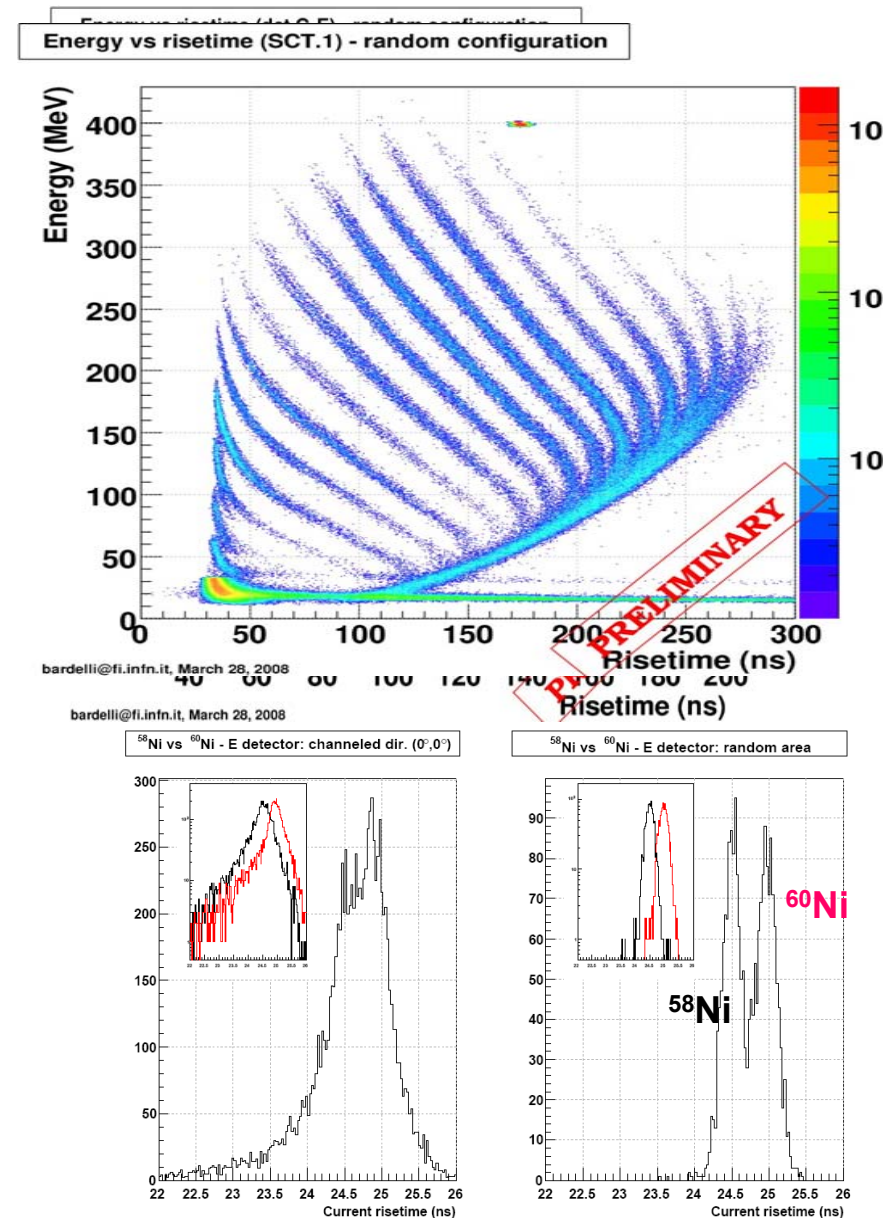
$$t_{\text{vol}}' = t_{\text{montée}} + t_{\text{vol}}$$

Résultat d'un filtre « Zero Crossing Time » + interpolation cubique du signal de courant

# Conclusions sur le PSA dans les siliciums (Septembre 2008!)

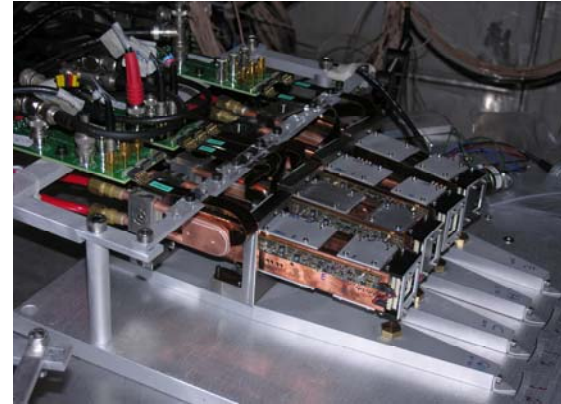
Avec des détecteurs **uniformes**  
et correctement **orientés**

- Identification en charge possible jusqu'à **Z = 36 (50)**, avec des seuils en énergie de l'ordre de **3 à 4 MeV/A**
- Identification en masse possible pour **Z < 15 - 20**, avec la possibilité d'être étendue par la mesure du **temps de vol**



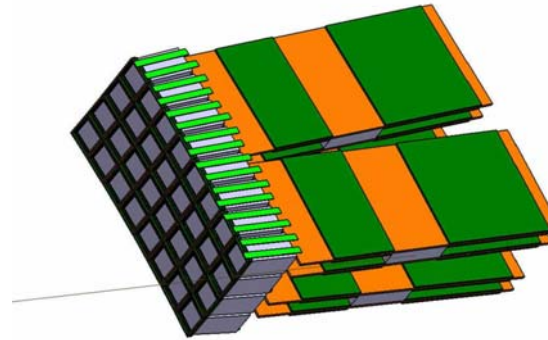
# Etapas du projet FAZIA

1. **Prototype R&D** (2006-2008)  
(8 télescopes Si-Si/CsI)



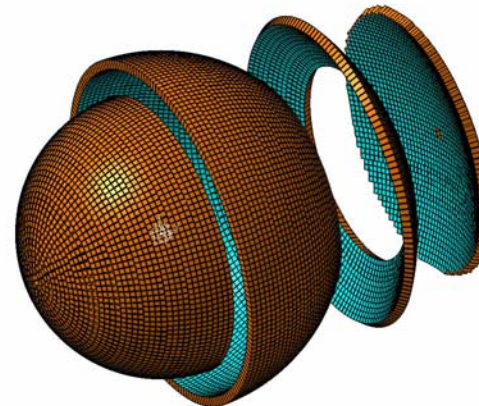
Phase 1

2. **Prototype Array R&D** (2008-2011)  
(cluster de 32 télescopes + électronique)



Phase 2

3. **Demonstrator** (2011-2012)  
(~10-20 clusters + électronique + trigger)

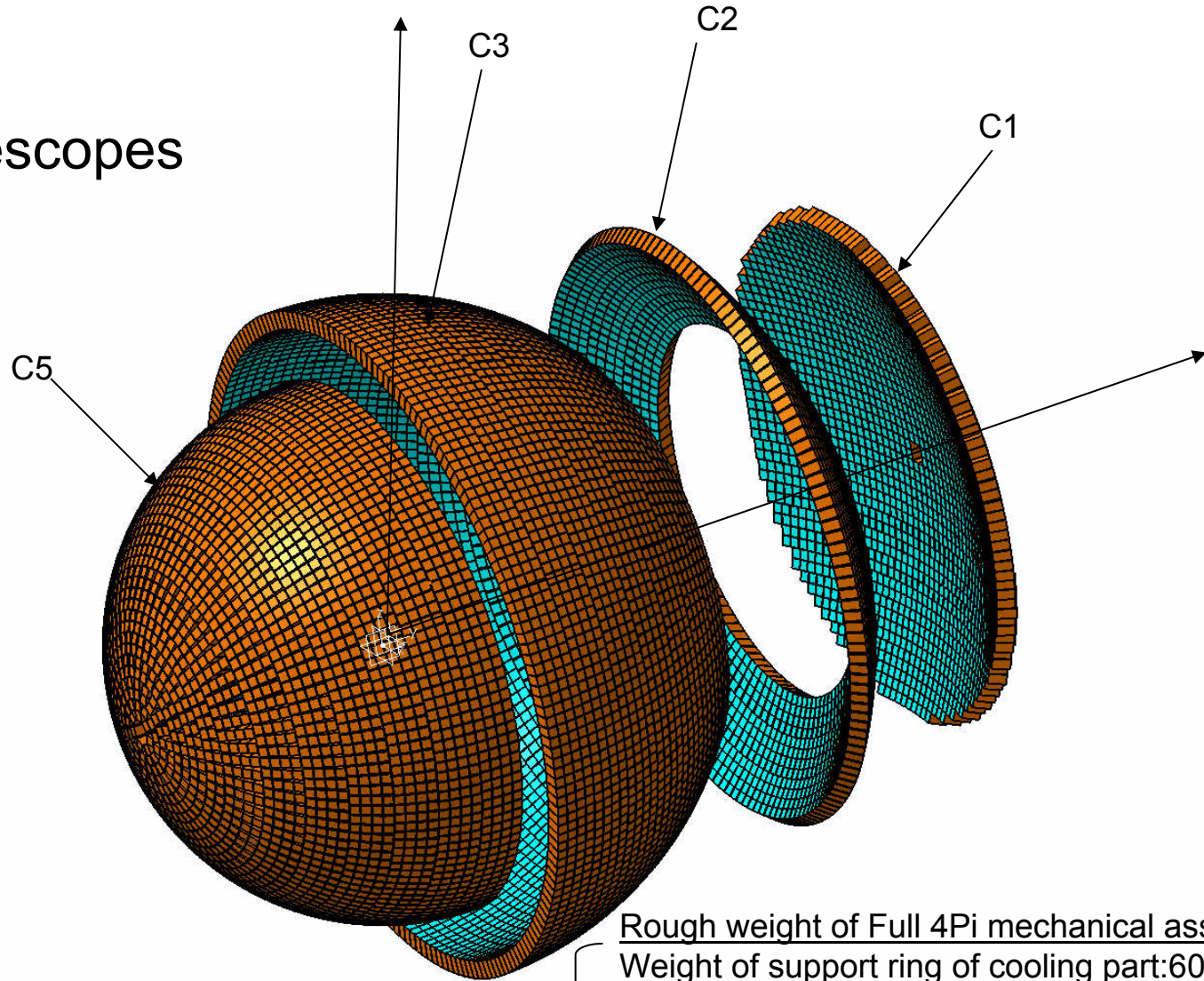


Phase 3

4. **Full  $4\pi$  array** (2012-2014)

# FAZIA configuration $4\pi$ : granularité accrue !

11856 Télescopes  
Si-Si-CsI



Ref 0,0,0 Target

Lxl = 130x50cm

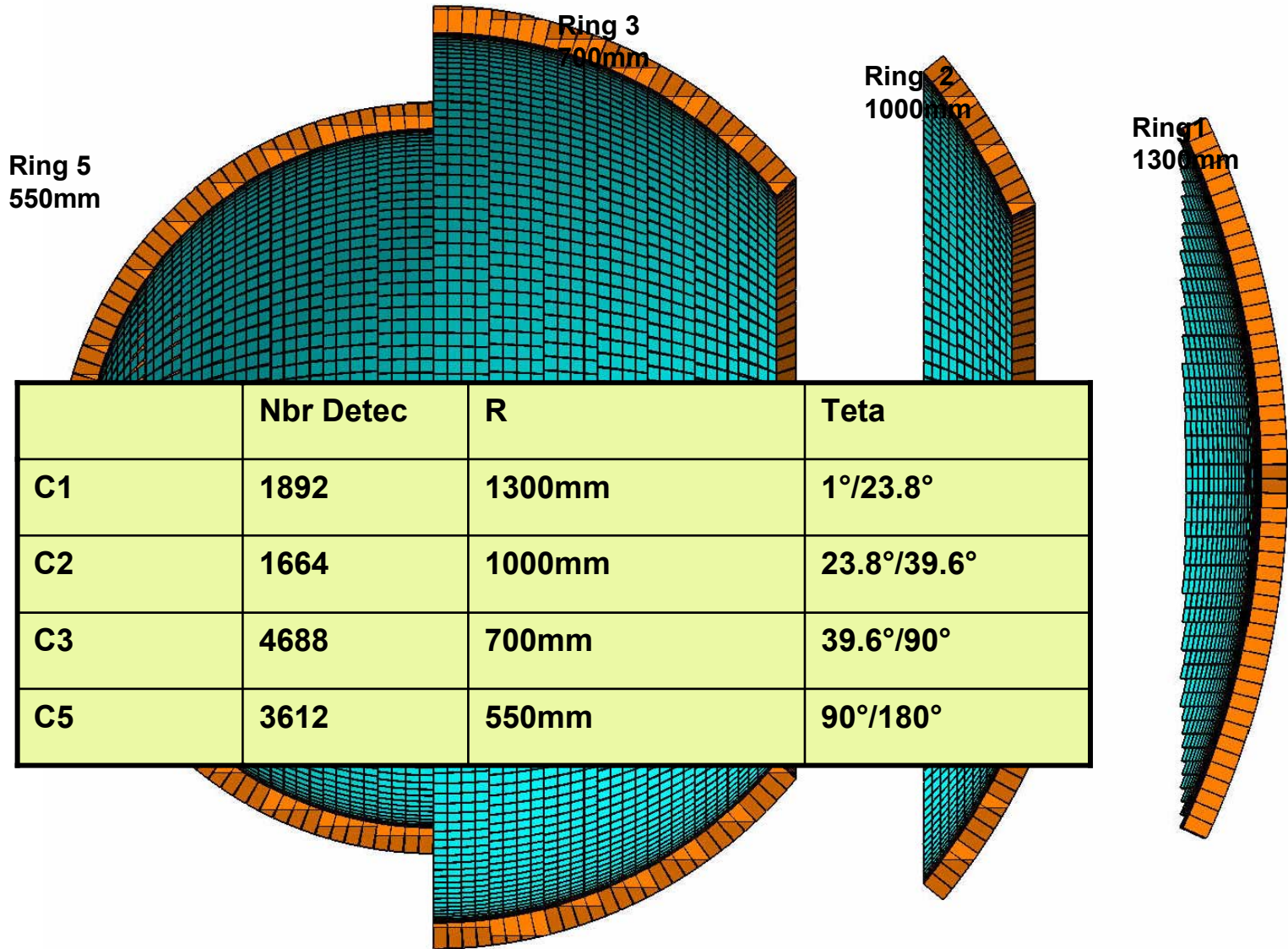
Rough weight of Full  $4\pi$  mechanical assembly:

Weight of support ring of cooling part: 600g

Weight of 32 Telescopes: 7.76 Kg

Weight Estimation full  $4\pi$ : ~3000 Kg

# FAZIA : CONFIGURATION PHASE Full $4\pi$



**Fin (provisoire)**