

# **MIMAC-He3, Micro-tpc MAtrix of Chambers of Helium 3**

**Projet de détecteur pour la  
Détection Directe de Matière Sombre non-baryonique  
avec l'Hélium 3**

**Emmanuel Moulin  
LPTA Montpellier – DAPNIA/SPP Saclay**

# Plan

---

- Arguments en faveur de la matière sombre non-baryonique
- Candidat supersymétrique : le neutralino  $\chi$
- Pourquoi l'hélium 3 ?
- Résultats sur le prototype MACHe3
- Le projet MIMAC-He3
- Complémentarité avec la détection :
  - directe
  - indirecte

# Arguments en faveur de la matière sombre

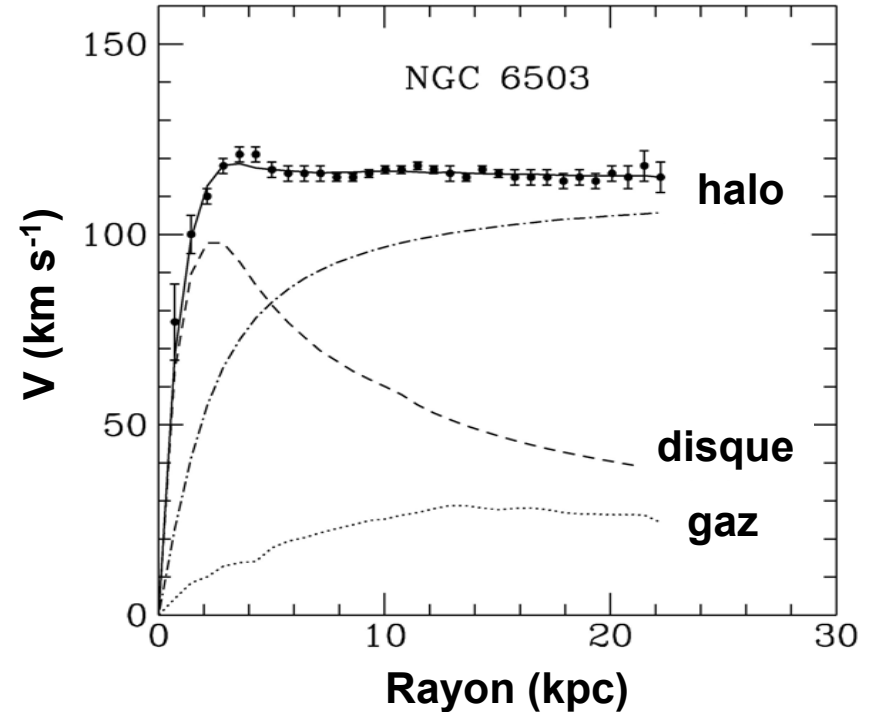
## Ordre de grandeur des paramètres cosmologiques

$\Omega_{\text{tot}}$	$\sim 1$
$\Omega_{\Lambda}$	$\sim 0.7$
$\Omega_{\text{M}}$	$\sim 0.3$
$\Omega_{\text{B}}$	$\sim 0.04$
$\Omega_{\text{lum}}$	$\sim 0.004$

$$\Omega_{\text{M}} \gg \Omega_{\text{B}} \gg \Omega_{\text{lum}}$$

⇒ existence de matière sombre  
- baryonique  
- non-baryonique

## A l'échelle galactique : les galaxies spirales



- présence d'un halo de matière sombre entourant le disque galactique
- densité locale de matière sombre  $\rho_0 \sim 0.3 \text{ GeV cm}^{-3}$

# Matière Sombre non-baryonique

---

- **MS chaude (relativiste) : les neutrinos**  $\Omega_{\nu} h^2 < 0.0067$  (95% CL) (WMAP+2dFGRS)
- **MS froide (non-relativiste) : les WIMPs,  $M_{\chi} \sim O(\text{GeV})$**

Pour des WIMPs :

$$\Omega_{\chi} h^2 = \frac{3 \times 10^{-27} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}}{\langle \sigma_{AV} \rangle}$$

avec  $M_{\chi} = O(100 \text{ GeV})$   
 $\Rightarrow \Omega_{\chi} h^2 = O(0.1)$

**Candidat idéal, une particule :**

- massive : de 1 GeV à 1 TeV
- (quasi-)stable
- neutre de charge et de couleur

# Matière Sombre Supersymétrique

---

- Pourquoi la SUSY ?
  - propose des solutions aux insuffisances du Modèle Standard de la physique des particules
  - fournit des **candidats privilégiés** (avec R-parité conservée) pour la matière sombre non-baryonique

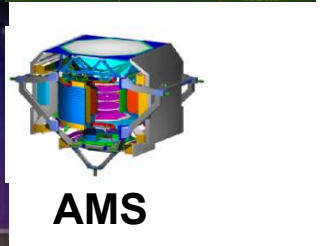
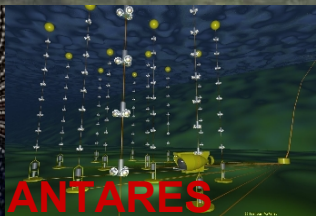
• **Candidat SUSY** à la matière sombre non-baryonique

**particule SUSY la plus légère (LSP) :**  
**le neutralino  $\tilde{\chi}$**

- **appartient aux WIMPs**
  - section efficace faible :  $< 10^{-2}$  pb
  - masses : du **GeV** au **TeV**
  - neutre de charge et de couleur
- **sa densité relique :  $\Omega_{\tilde{\chi}} h^2 = O(0.1)$**

# Techniques de détection de la Matière Sombre non-baryonique

- **Détection directe** : diffusion du neutralino sur le noyau cible
  - **Cryogénique** : Ge, Si, CaWO<sub>4</sub>, <sup>3</sup>He (MACHe3)
  - **Non cryogénique** : CS<sub>2</sub>, <sup>3</sup>He (MIMAC-He3)
- **Détection indirecte** : détection des produits d'annihilation de neutralinos
  - **Télescopes Cherenkov** : HESS, MAGIC
  - **Télescopes à neutrinos** : Super-K, ANTARES, IceCube
  - **Expériences spatiales** : AMS, GLAST
- **Accélérateurs (LEP, Tevatron)** :
  - ⇒ limites directes sur les masses des particules SUSY chargées
  - ⇒ LHC : découverte?



# Détection directe de Matière Sombre SUSY

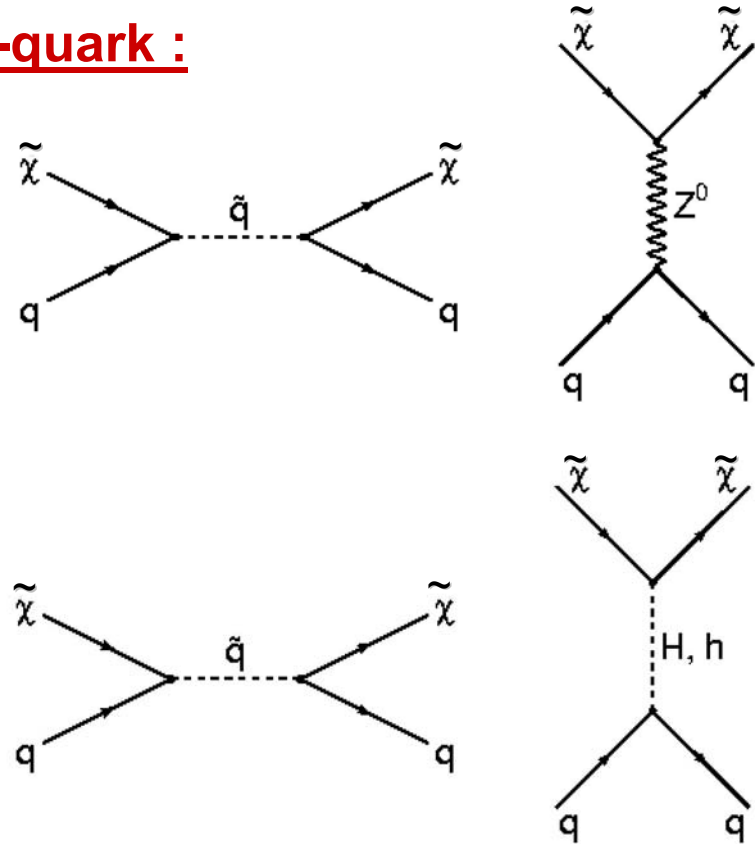
## diffusion élastique $\tilde{\chi}$ -quark :

- dépendante du spin (axiale)

$$\sigma_{SD}(AX) \propto \sigma_{SD}(p) \times A^2$$

- indépendante du spin (scalaire)

$$\sigma_{SI}(AX) \propto \sigma_{SI}(p) \times A^4$$

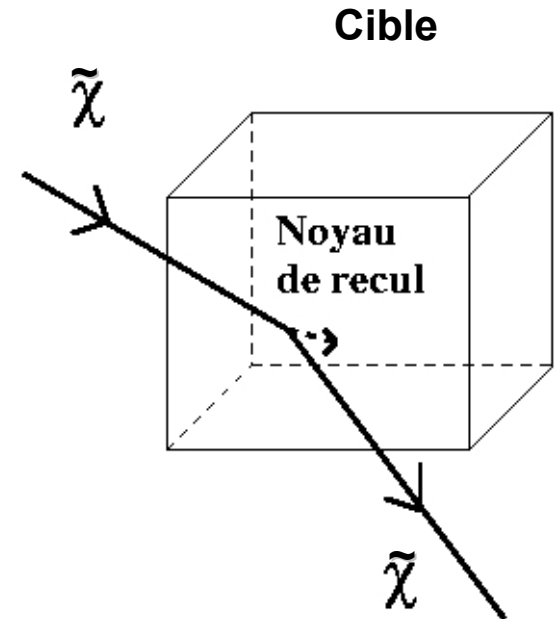


⇒ 2 types de détection directe en fonction du spin du noyau !

Pour le noyau  ${}^3\text{He}$  :  $\sigma_{SD} \gg \sigma_{SI}$

# Problématique de la détection directe

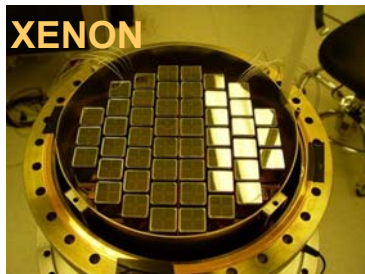
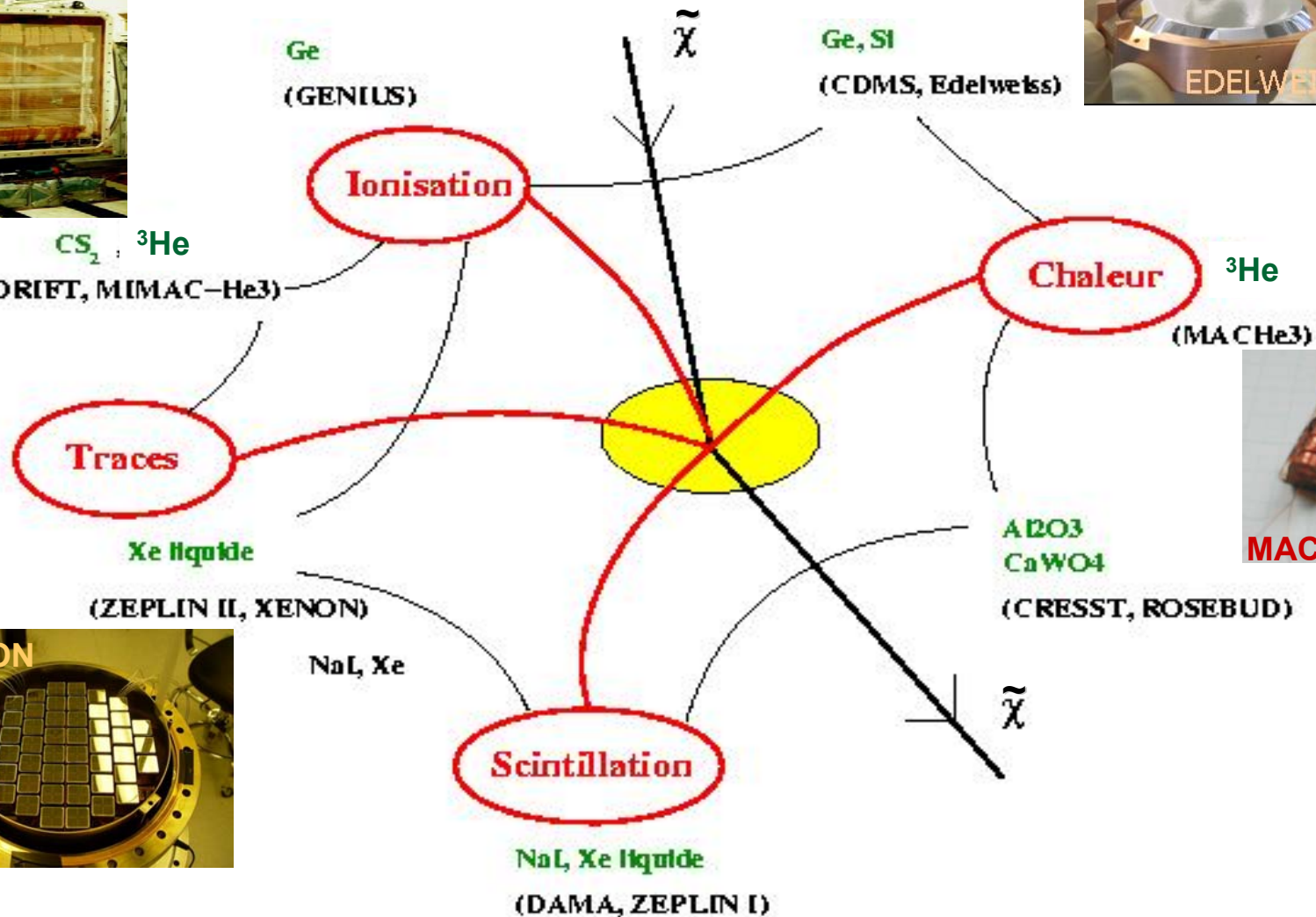
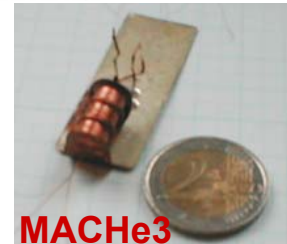
- Diffusion élastique d'un neutralino  $\tilde{\chi}$   
⇒ **dépôt d'énergie**
- Energie de recul : seuil en énergie – O(100) keV  
⇒ **seuil en énergie bas**
- Taux max.  $\sim 1$  evt/kg/jour  
⇒ **bruit de fond faible**
  - site souterrain (LSM, Gran Sasso)
  - pureté des matériaux
  - véto actif/passif⇒ **détecteur massif**
- Bruits de fond : muons cosmiques, rayons  $\gamma$ , neutrons  
⇒ **discrimination signal / bruit de fond**





# Techniques de détection **directe** de la MS

Objectif : Discrimination Signal/Bruit de fond



# Intérêt de l' $^3\text{He}$ pour la détection directe de matière sombre non-baryonique

- **noyau de spin 1/2**  $\Rightarrow$  interaction axiale avec le neutralino
- **plage en énergie des reculs nucléaires  $\sim 1-6 \text{ keV}$**
- **sensibilité au  $M_{\tilde{\chi}} > 5 \text{ GeVc}^{-2}$**
- **signature de la capture neutronique :  $n + ^3\text{He} \rightarrow p + ^3\text{H} + 764 \text{ keV}$**
- **très faible sensibilité aux rayons  $\gamma$**
- **pas de rayons X intrinsèques**

# **MACHe3 : MAtrice à Cellules d'Hélium 3 superfluide à 100 $\mu$ K**

Collaboration CRTBT – LPSC (jusqu'en 06/2003)  
Grenoble

- **CRTBT** : C. Winkelmann, Y. Bunkov,  
H. Godfrin
- **LPSC** : E. Moulin, J. Macías-Pérez,  
F. Mayet, D. Santos

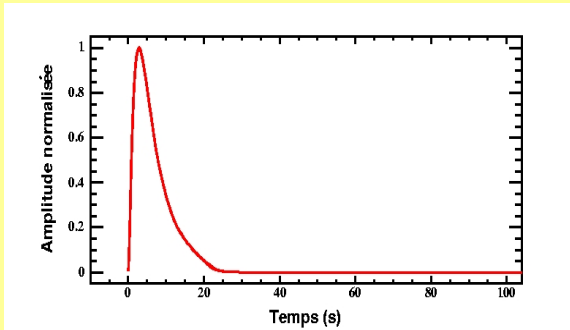


# Le prototype multicellulaire de MACHe3

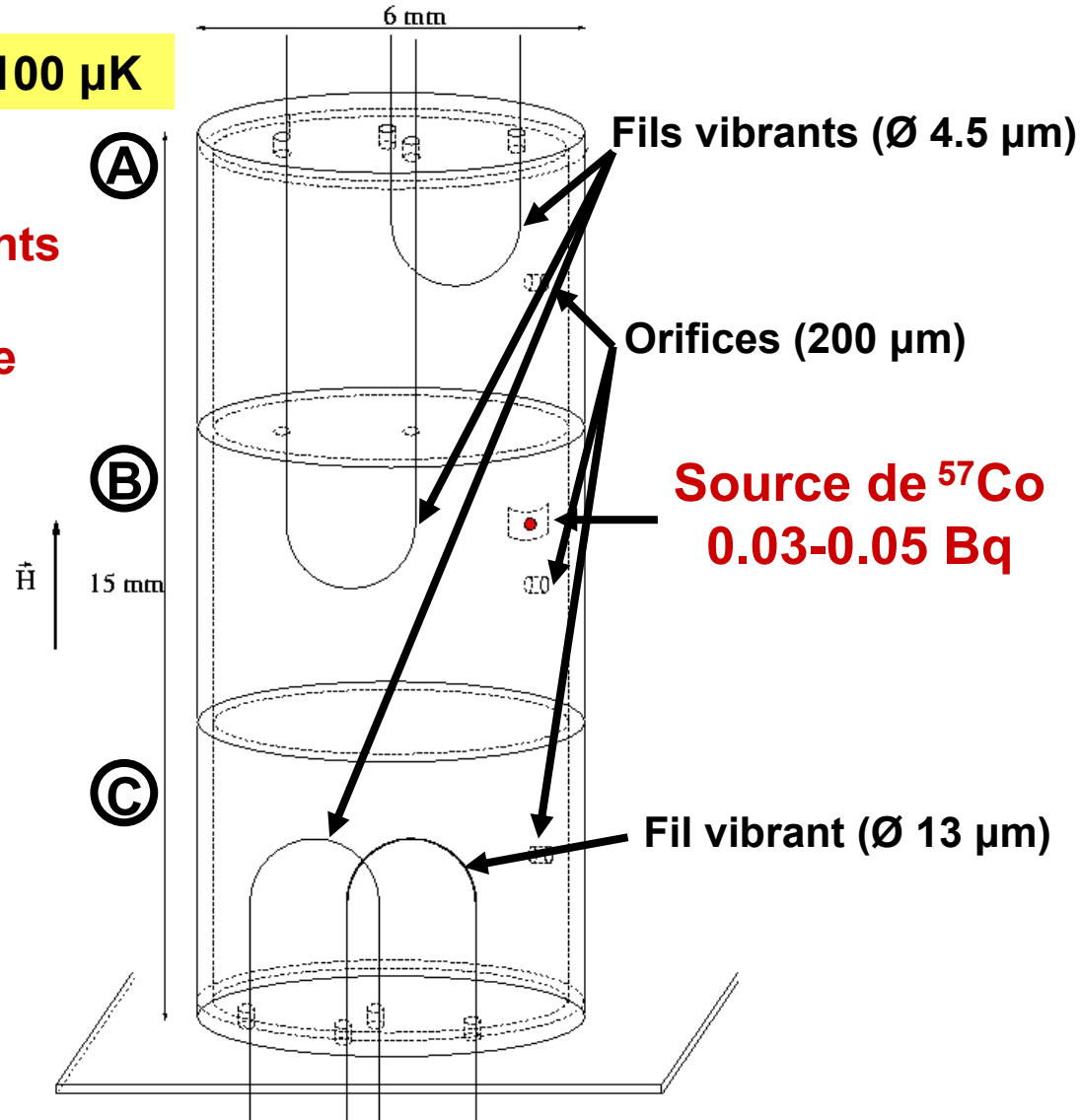


- Bolomètres à  $^3\text{He}$  superfluide à 100  $\mu\text{K}$
- Dépôt d'énergie mesuré par amortissement des fils vibrants
- Relaxation thermique par l'orifice

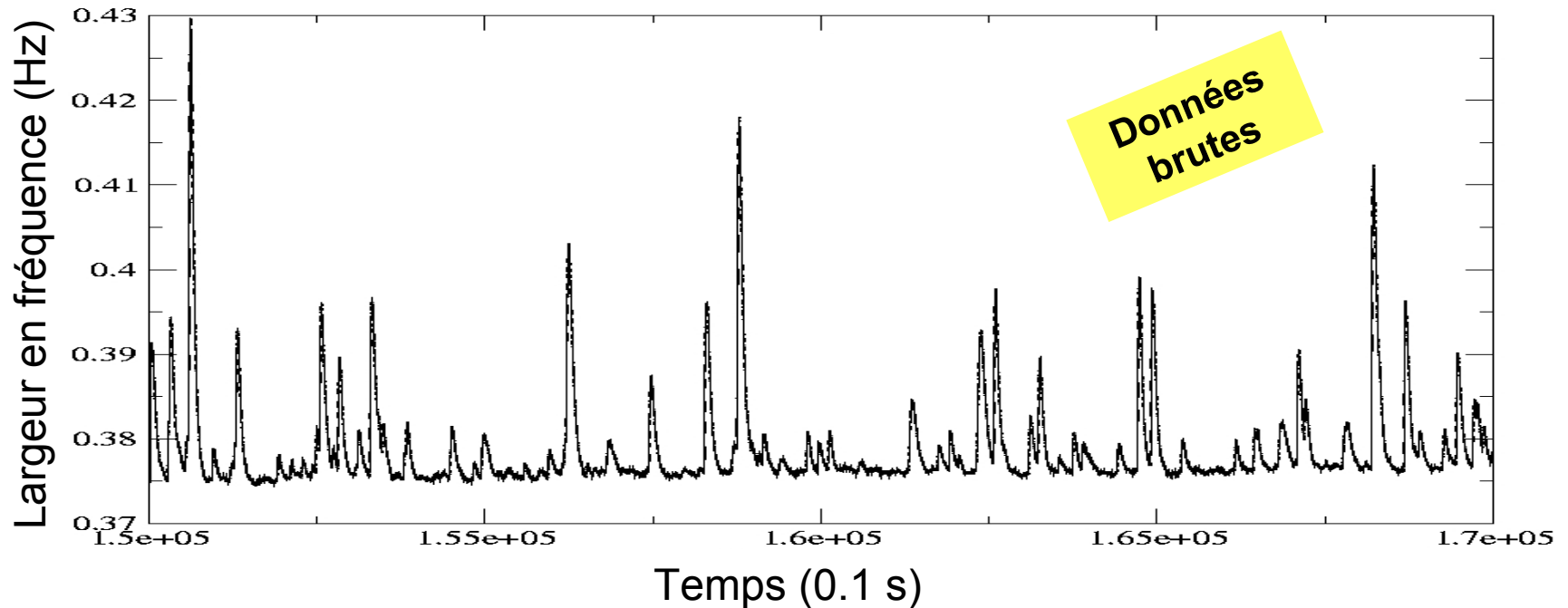
1 dépôt d'énergie  $\Rightarrow$  1 pic :



- temps de montée  $\sim$  1,5 s
- temps de descente  $\sim$  10 s



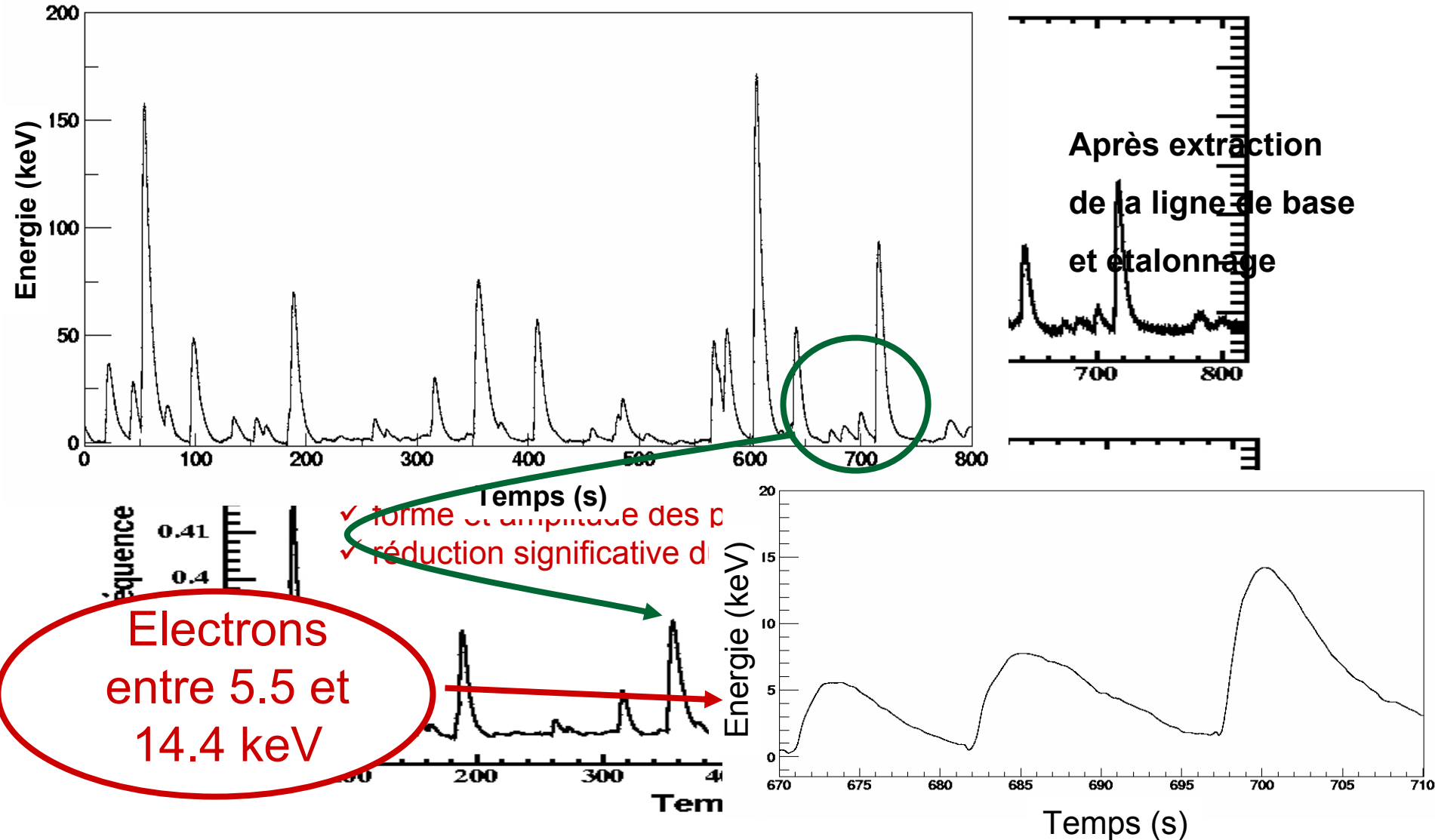
# Méthode d'analyse des données de MACHe3



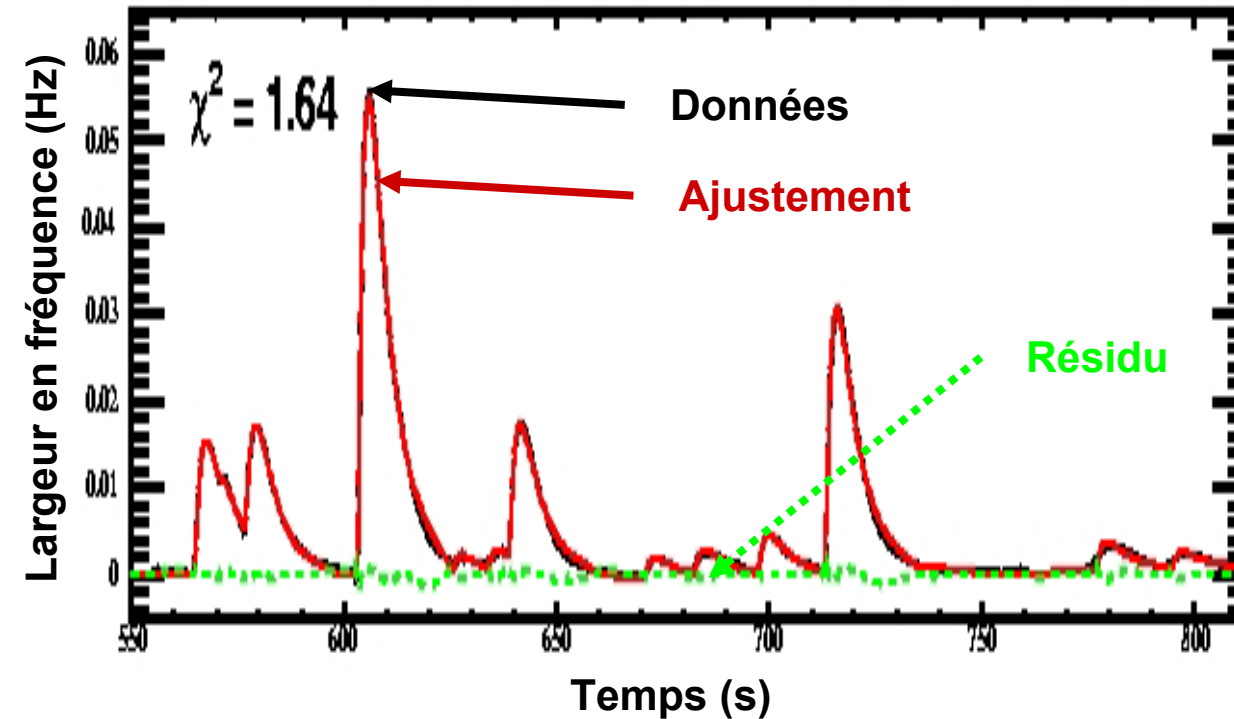
- 1. Débruitage des données brutes**
- 2. Extraction de la ligne de base**
- 3. Choix du pic de référence**
- 4. Ajustement itératif des données débruitées**

E. Moulin et al., A&A 453(2006)761

# Débruitage des données brutes



# Ajustement itératif des données débruitées



- **A chaque itération :**
  1. Recherche de la position des pics
  2. Etiquetage des positions
  3. Ajustement à l'aide du pic de référence

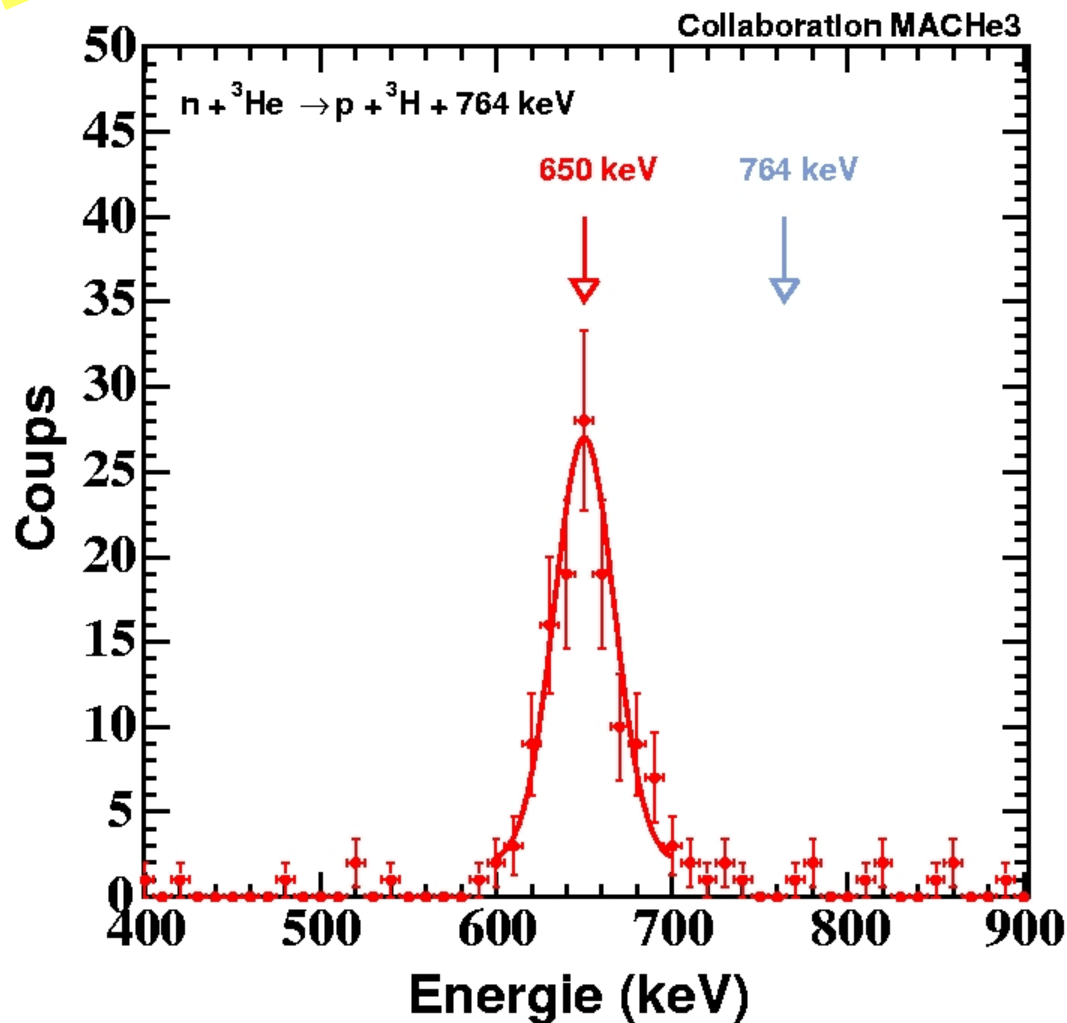
- **Pic caractérisé par :**

$$S/B = \frac{A}{\max(|\text{Residu}|)}$$

**Ajustement itératif  $\Rightarrow$  Accès aux faibles amplitudes**

# Résultats expérimentaux : Détection des neutrons

Données



Source Am/Be + 30 cm Paraffine

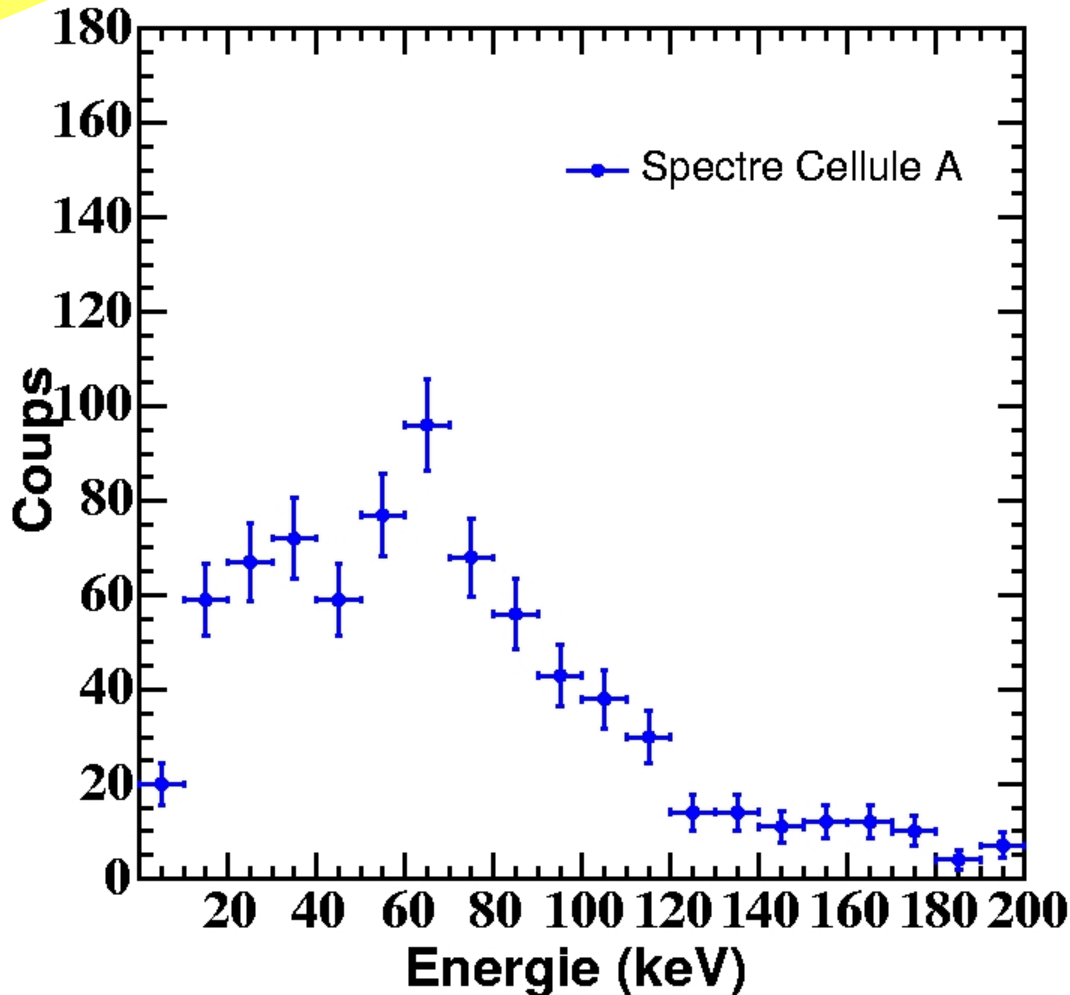
**Signature de la capture  
neutronique à 650 keV**  
( $\sigma = 20 \text{ keV}$ )

**Décalage en énergie : ~ 15 %**  
- production de vortex ?  
- scintillation



# Résultats expérimentaux : Spectre des muons

Données



## Spectre expérimental

### Simulation

#### du spectre des muons :

1. Spectre simulé Geant4
2. Spectre simulé reconstruit
  - après analyse à  $S/B \geq 5$
  - convolution gaussienne de 2 keV FWHM :

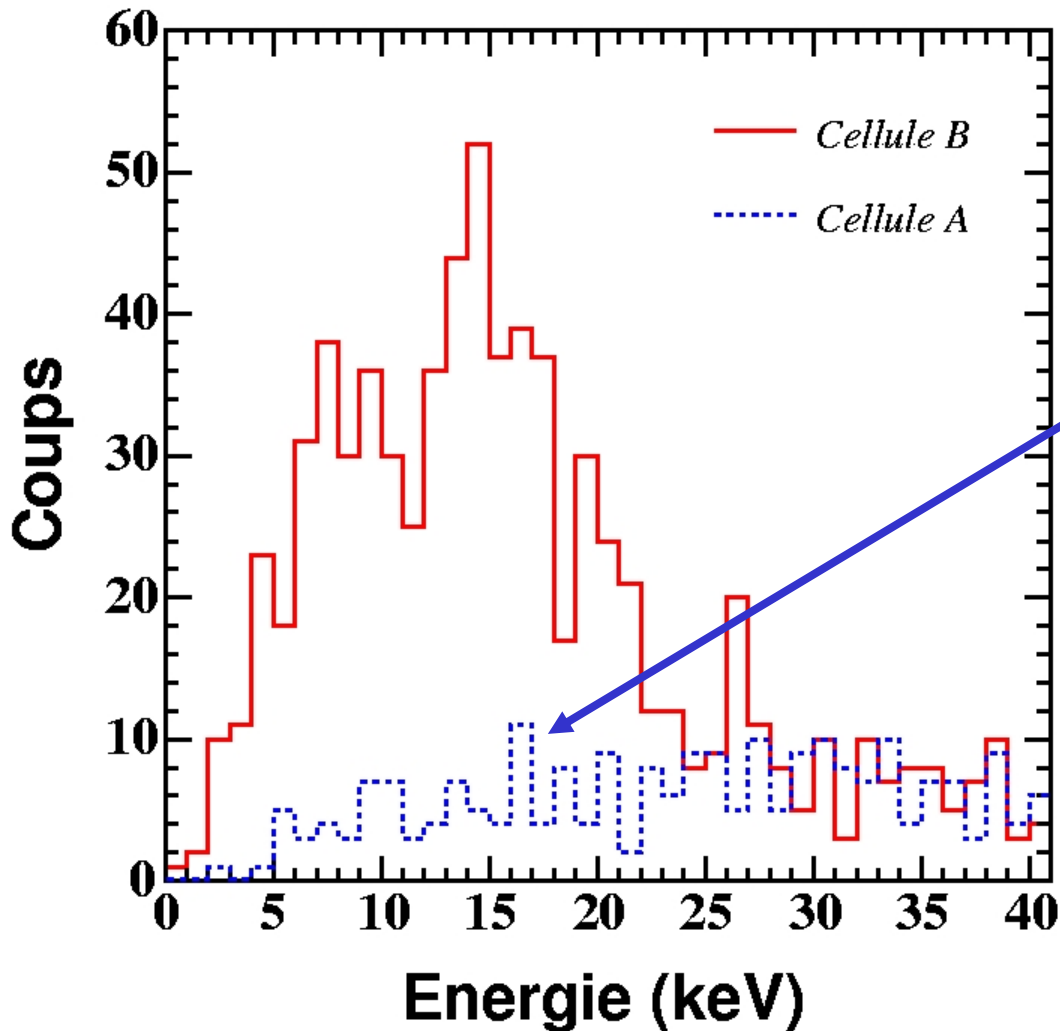
⇒ Pic à  $65 \pm 5$  keV

Bon accord simu/données

# Résultats expérimentaux : Spectre des électrons de la source de $^{57}\text{Co}$

Données

E. Moulin et al., NIMA548(2005)411



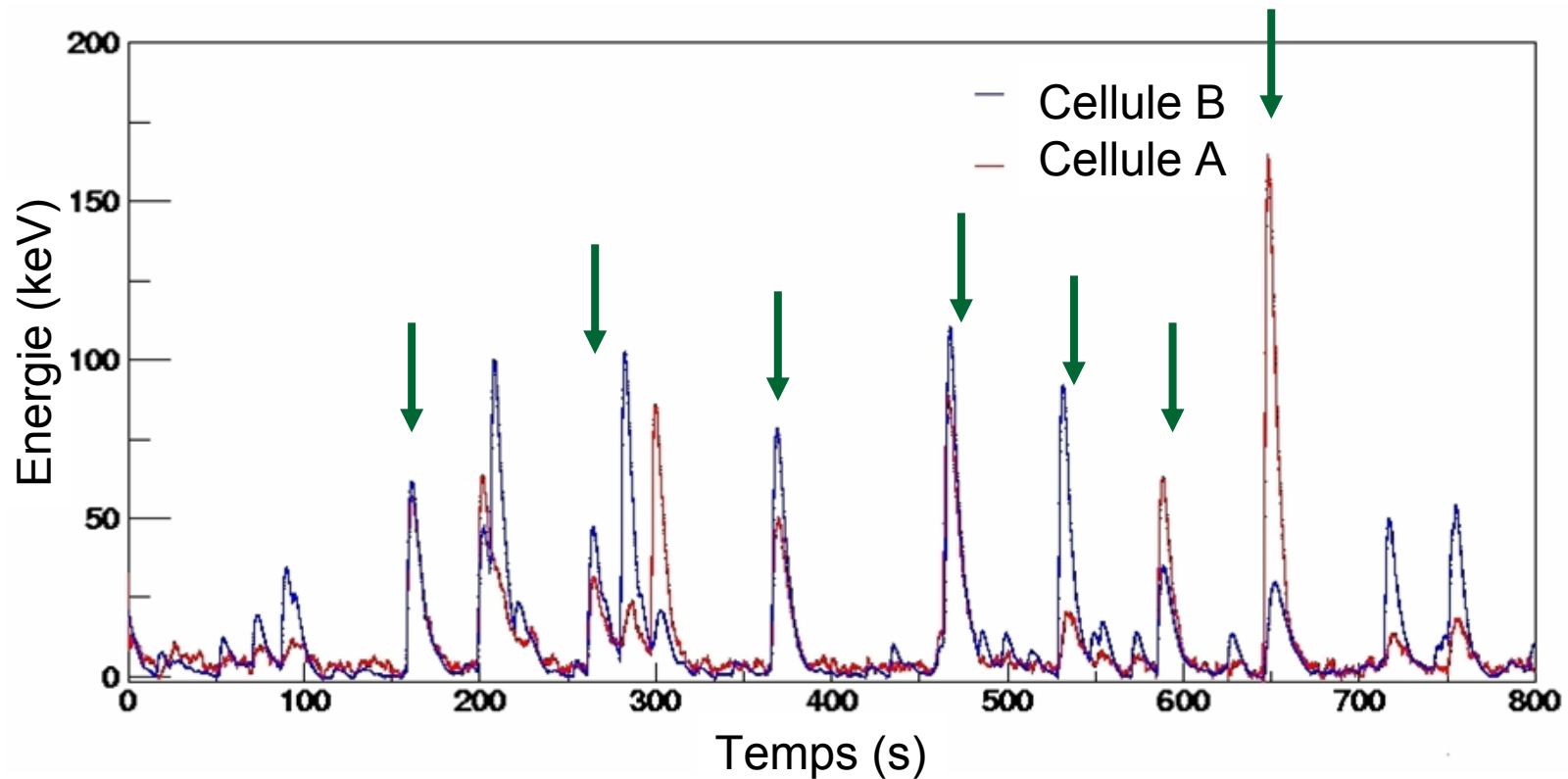
- Détection des **électrons de conversion** :

- Contributions des  $e^-$  de l'or (support de la source)

- **Très faible sensibilité aux  $\gamma$**

# Résultats expérimentaux : Coïncidences entre les cellules A et B

Données



⇒ **Muons cosmiques en coïncidence** dans les cellules A et B

# MACHe3 : résultats et conclusions

---

## Résultats :

1. **Détection** dans la plage en énergie du **keV**
2. Coïncidence entre les cellules
3. Mesure du spectre des **muons cosmiques**
4. Mesure du spectre des électrons de basses énergies de la source de  $^{57}\text{Co}$
5. **Très faible sensibilité aux rayons  $\gamma$**
6. **Discrimination neutron/neutralino**

## Insuffisances de MACHe3 :

1. Absence de discrimination recul nucléaire / recul électronique

Propriété liée au noyau d' $^3\text{He}$

2. Seuil en énergie lié à la taille de la cellule bolométrique

Comment séparer un gamma d'un neutralino ?

3. Cryogénie lourde

Refroidir 10 kg d' $^3\text{He}$  à 100  $\mu\text{K}$ ...

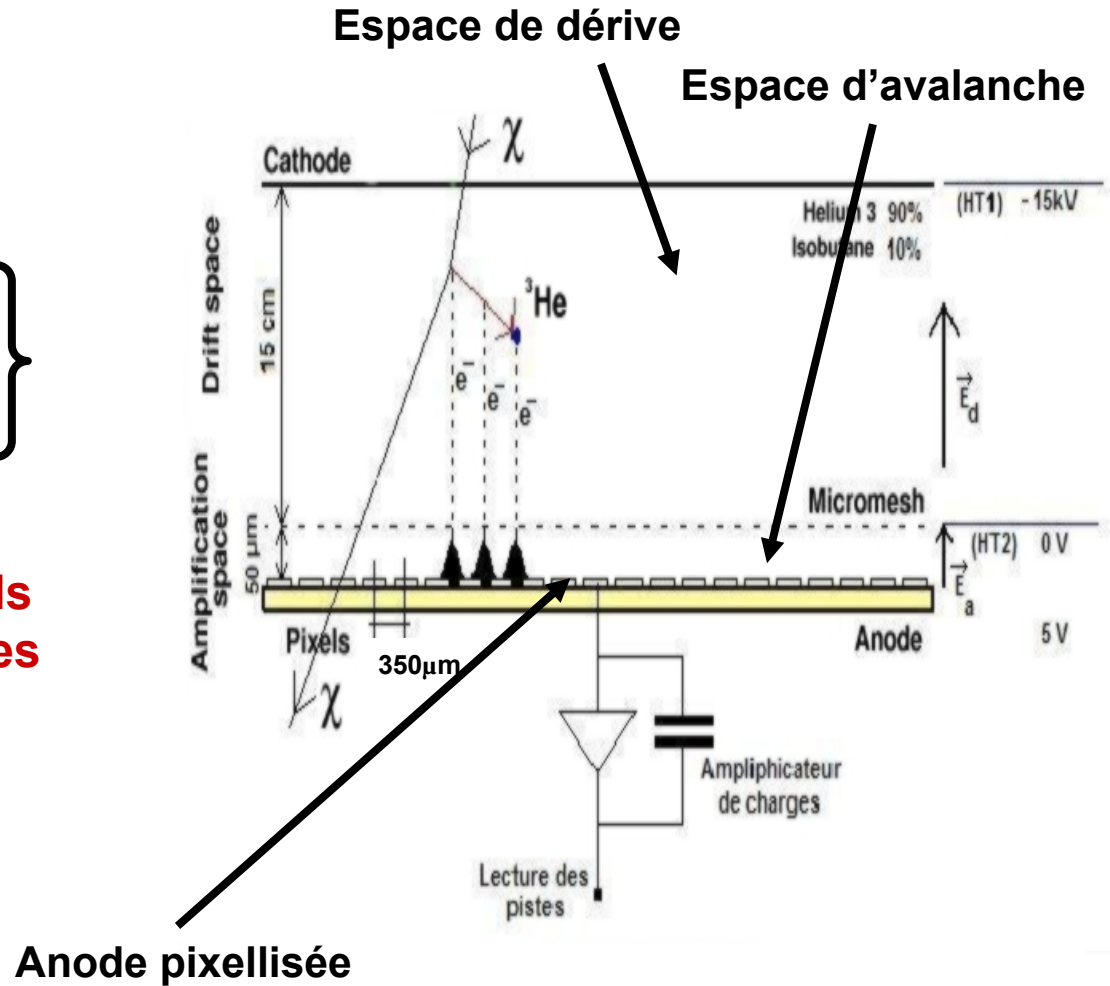
4. Temps mort important

# MIMAC-He3

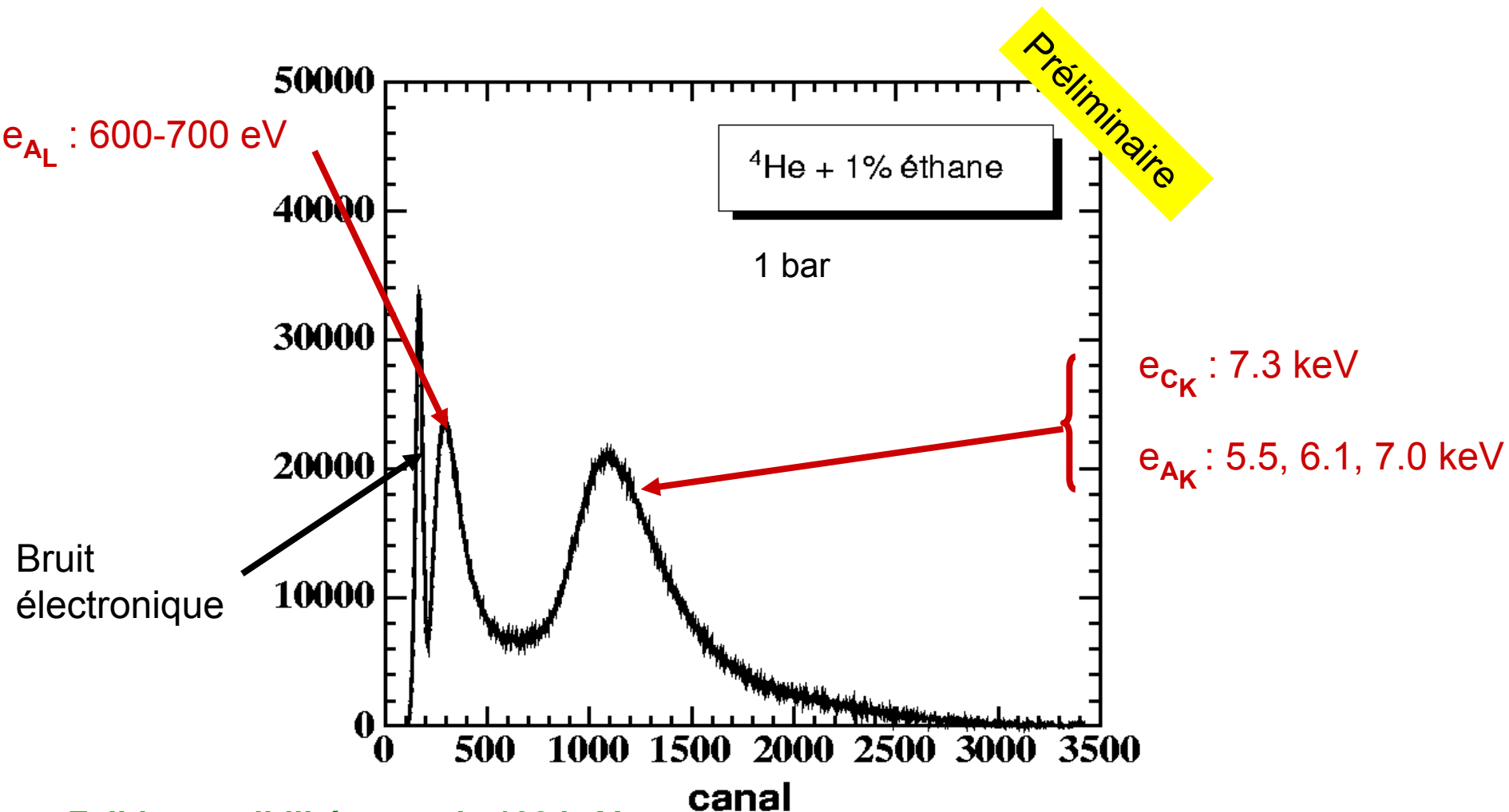
## Micro-tpc MAtrix of Chambers of Helium 3

Grande résolution { spatiale  
temporelle  
énergétique }

- ⇒ projection des traces de reculs
- ⇒ temps de collection de charges
- ⇒ seuil en énergie < 1 keV



# Spectre de la source de $^{57}\text{Co}$ (1 kBq)



- ⇒ Faible sensibilité aux  $\gamma$  de 122 keV
- ⇒ Seuil en énergie < 600 eV !
- ⇒ Résolution ~ 30%

# MIMAC-He3

## Micro-tpc MAtrix of Chambers of Helium 3

---

Atouts d'une micro-TPC par rapport à la cellule bolométrique :

1. Discrimination recul **électronique/nucléaire**  
⇒ **par projection de traces et temps de collection de charges**
2. Détecteur gazeux  
⇒ **fonctionnement à température ambiante**
3. Temps mort réduit  
⇒ **fréquence 50 MHz**
4. Localisation des électrons Auger provenant des parois  
⇒ **volume fiduciel à 3 mm de toutes les surfaces**
5. **Direction** du recul dans un mode à basse pression

# MIMAC-He3

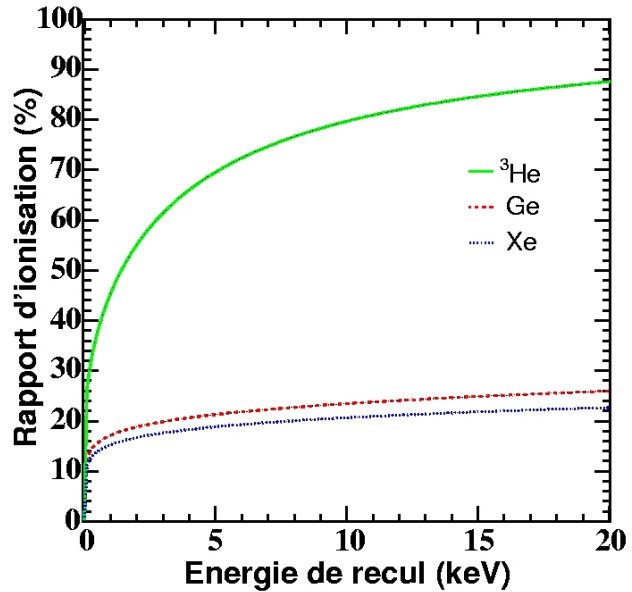
## Micro-tpc MAtrix of Chambers of Helium 3

---

- **LPSC (Grenoble)** : E. Moulin (jusqu'au 28/09/05),  
V. Comparat, F. Mayet, J.A. Pinston, D. Santos
- **ILL (Grenoble)** : B. Guerard, G. Manzin
- **Dapnia-Saclay** : I. Giomataris, P. Colas



# Prédictions des rapports d'ionisation pour $I^3\text{He}$



**Rapport d'ionisation supérieur à 40%  
pour des  
reculs d'énergie supérieure à 1 keV**

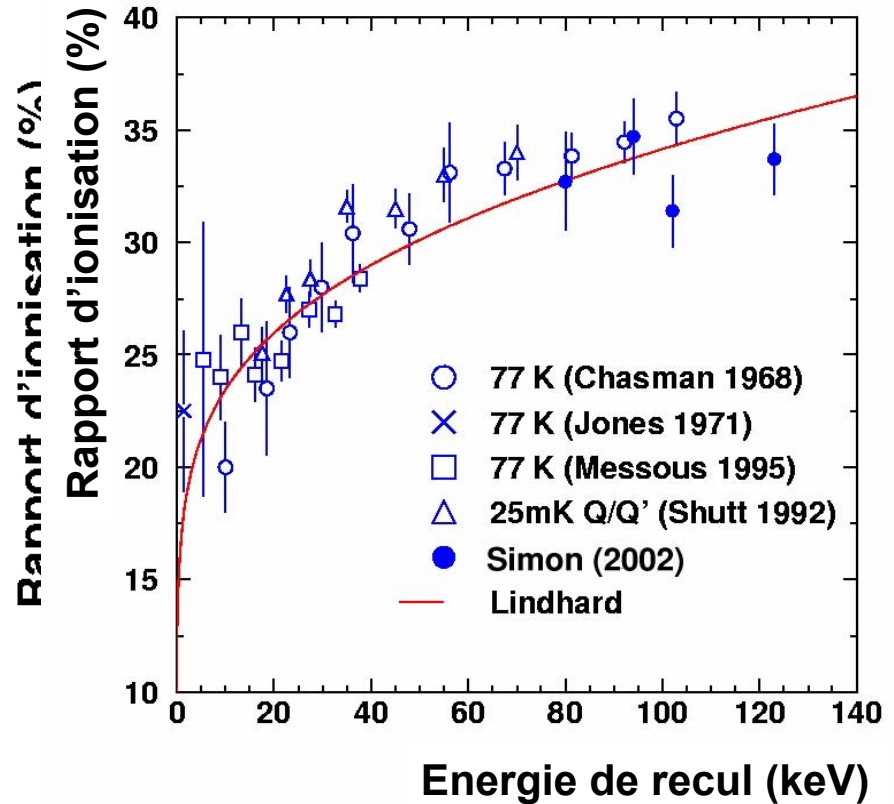
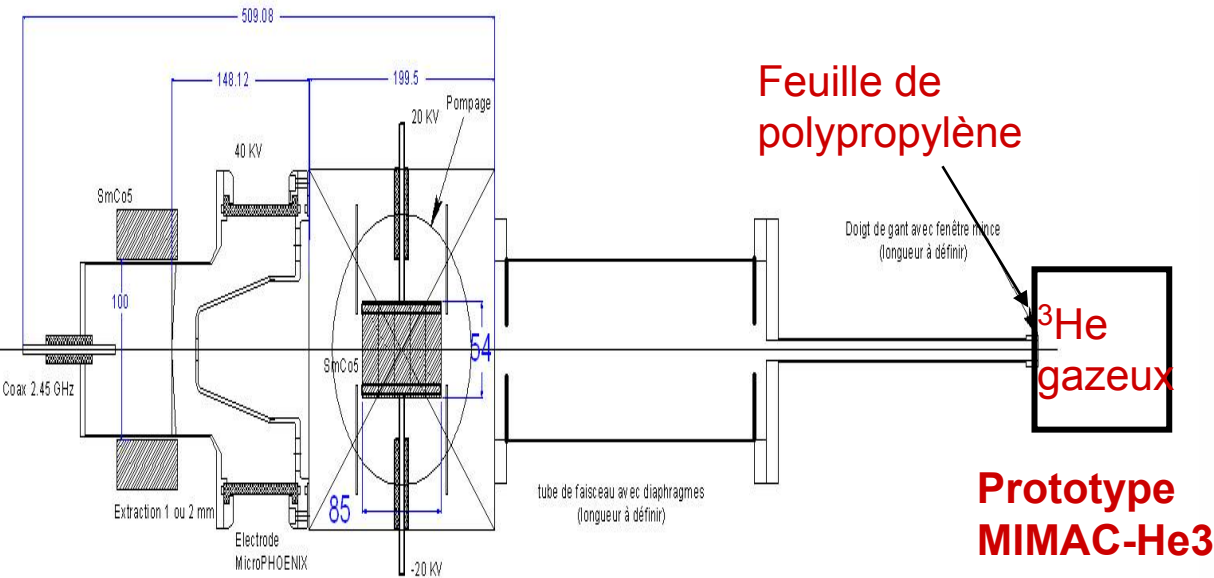


Figure adaptée de  
NIMA507,643,2003

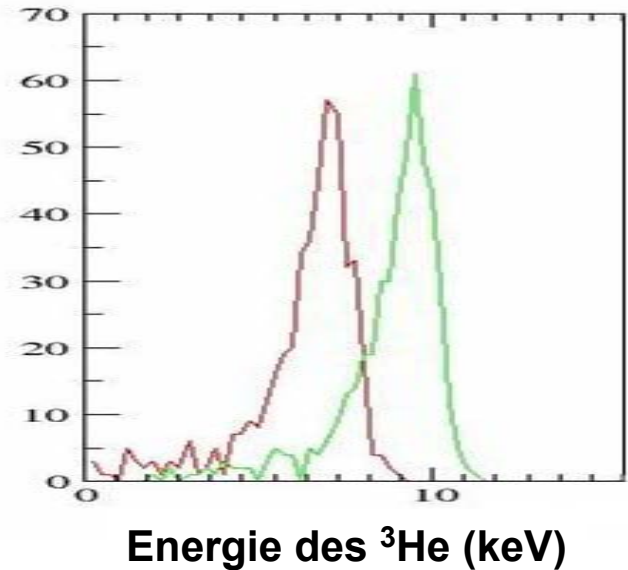
**Source d'ions  $^3\text{He}^{1+}$  construite au LPSC**

# Mesure du facteur de « quenching » pour MIMAC-He3



Source d'ions  $^3\text{He}^{1+}$   
dans la plage en énergie du keV  
en construction au LPSC

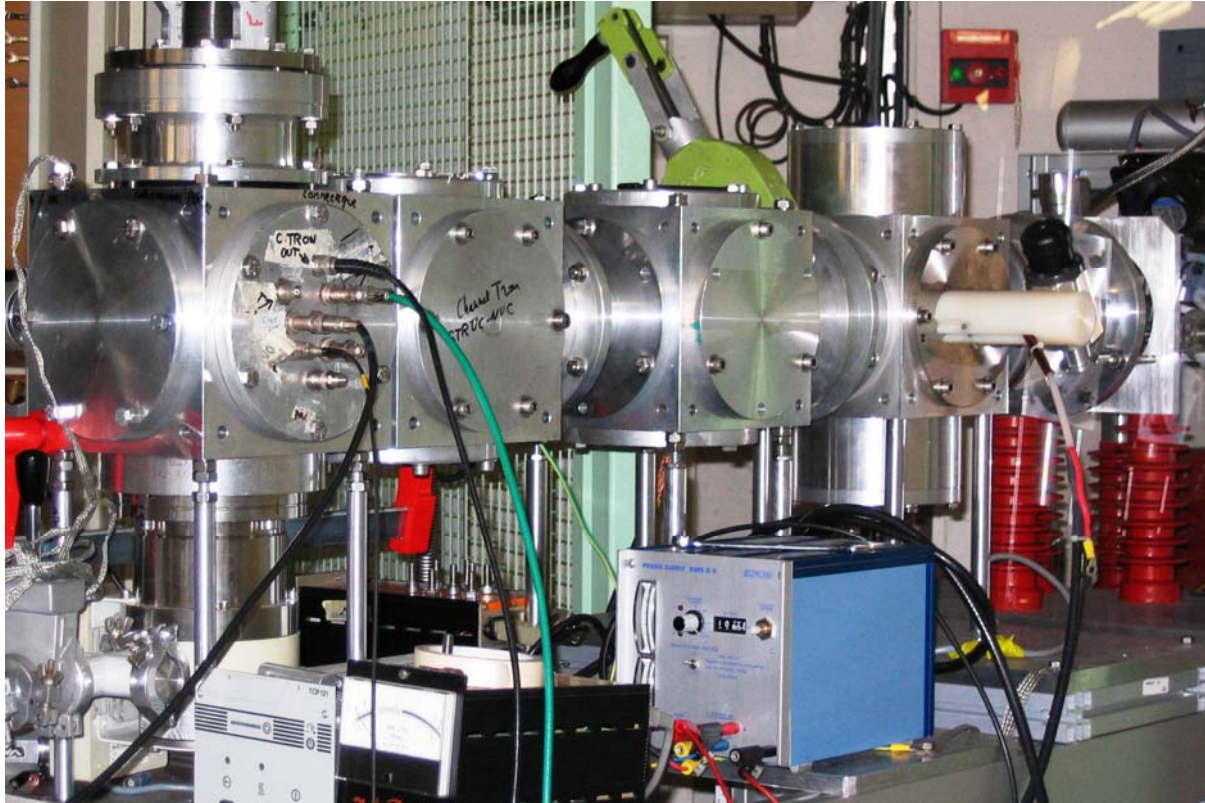
Simulations SRIM2003



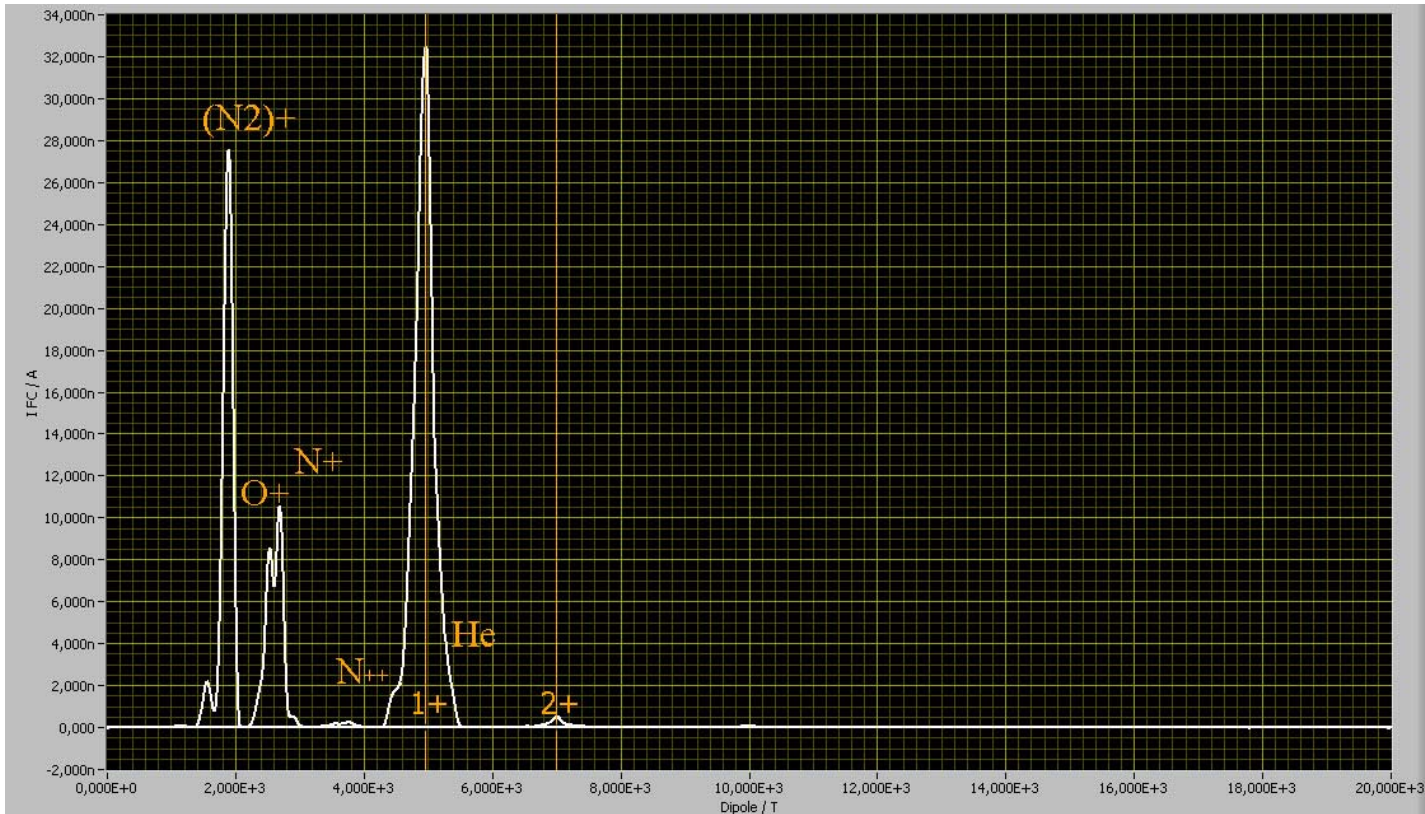
Distribution en énergie des reculs après  
une feuille de polypropylène ( $0.44\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) pour  
des énergies accélératrices de 45 et 50 keV

# Source d'ions $^3\text{He}$ , $^4\text{He}$ , $^1\text{H}$ (...)

---



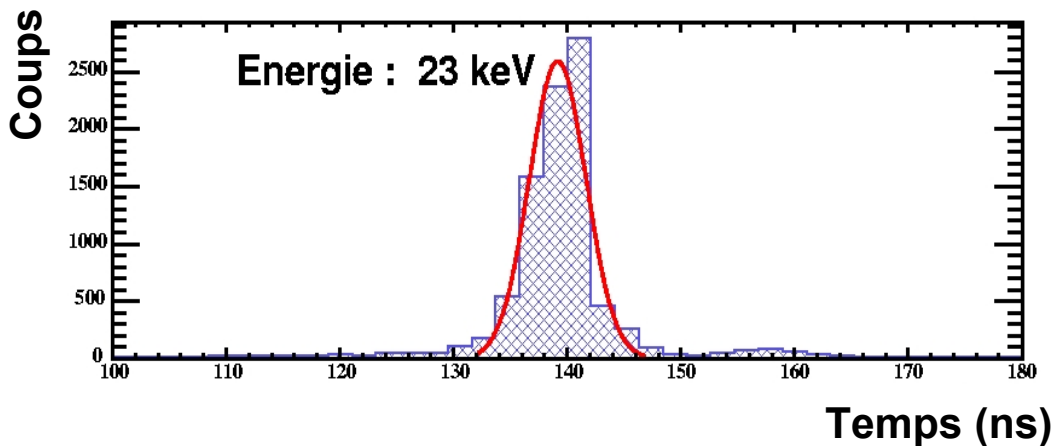
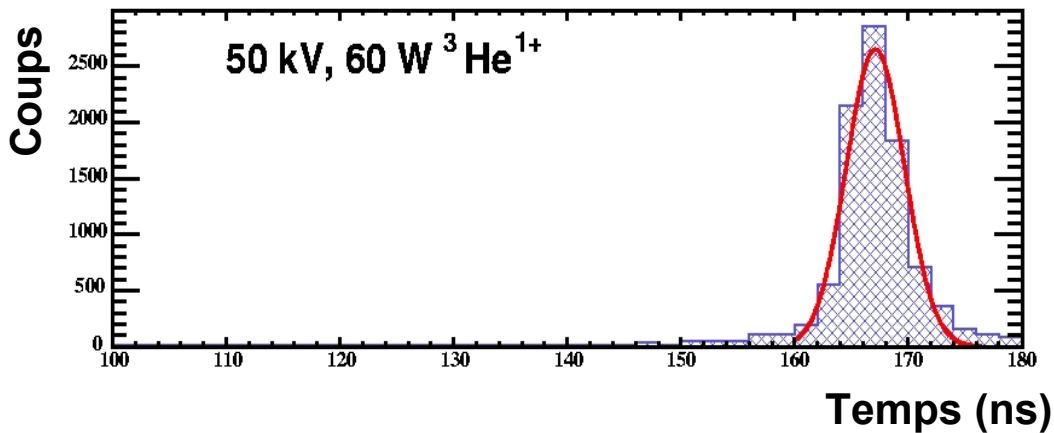
# Spectre de la source d'ions



reliée à  $Q/m$

- **Extraction à partir de  $^4\text{He}$**
- **Filtre de Wien : sélection des  $Q/m \Rightarrow$  pas de contaminations**

# Mesure du temps de vol à la sortie de la source d'ions MIMAC à 50 kV

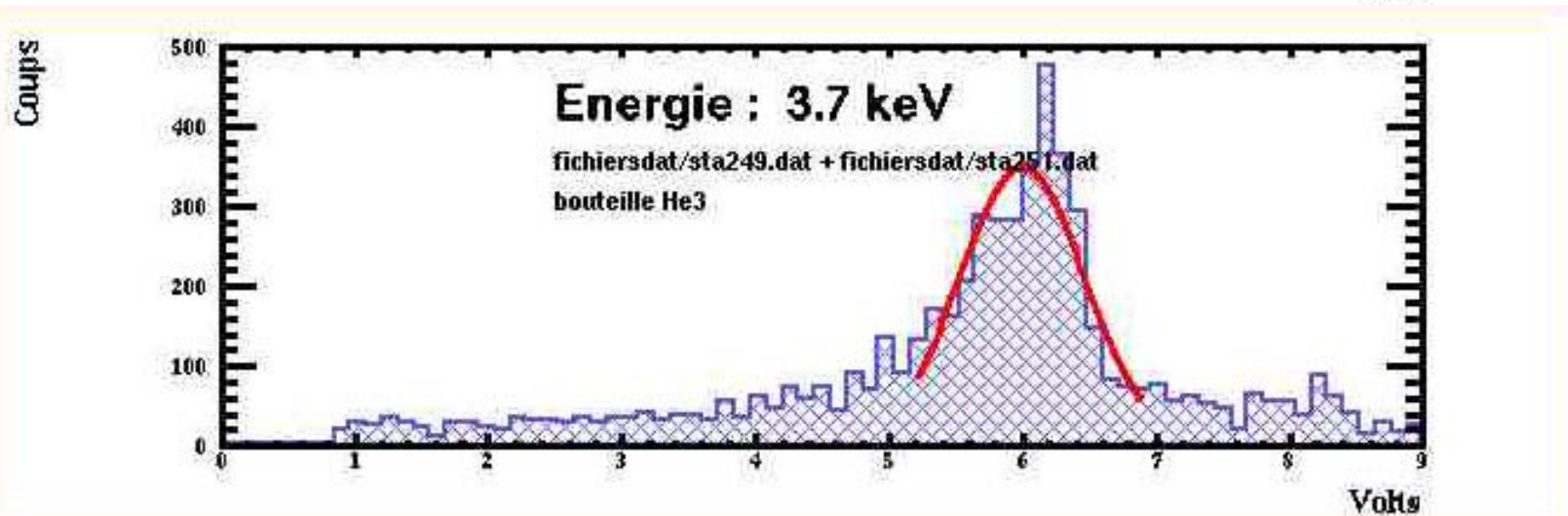
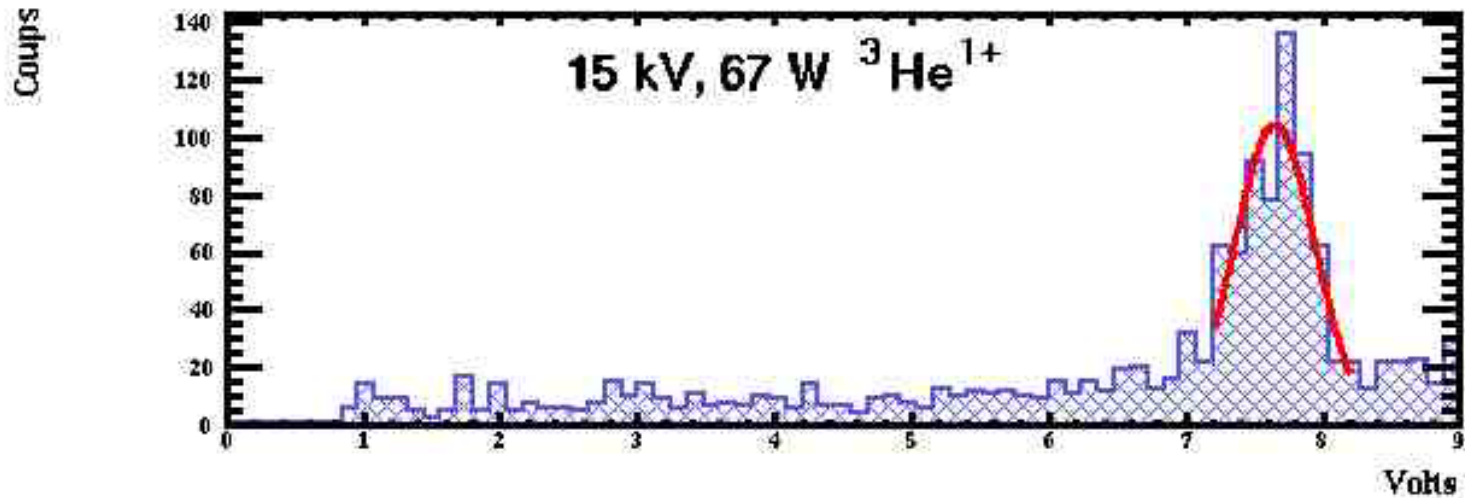


- Sélection des  $^3\text{He}^{1+}$  :  $Q/m = 1/3$
- Feuille de polypropylène :  $0.33 \mu\text{g}/\text{cm}^2$
- Coïncidence entre 2 channeltrons C1 et C2
- Mesure de différences de temps

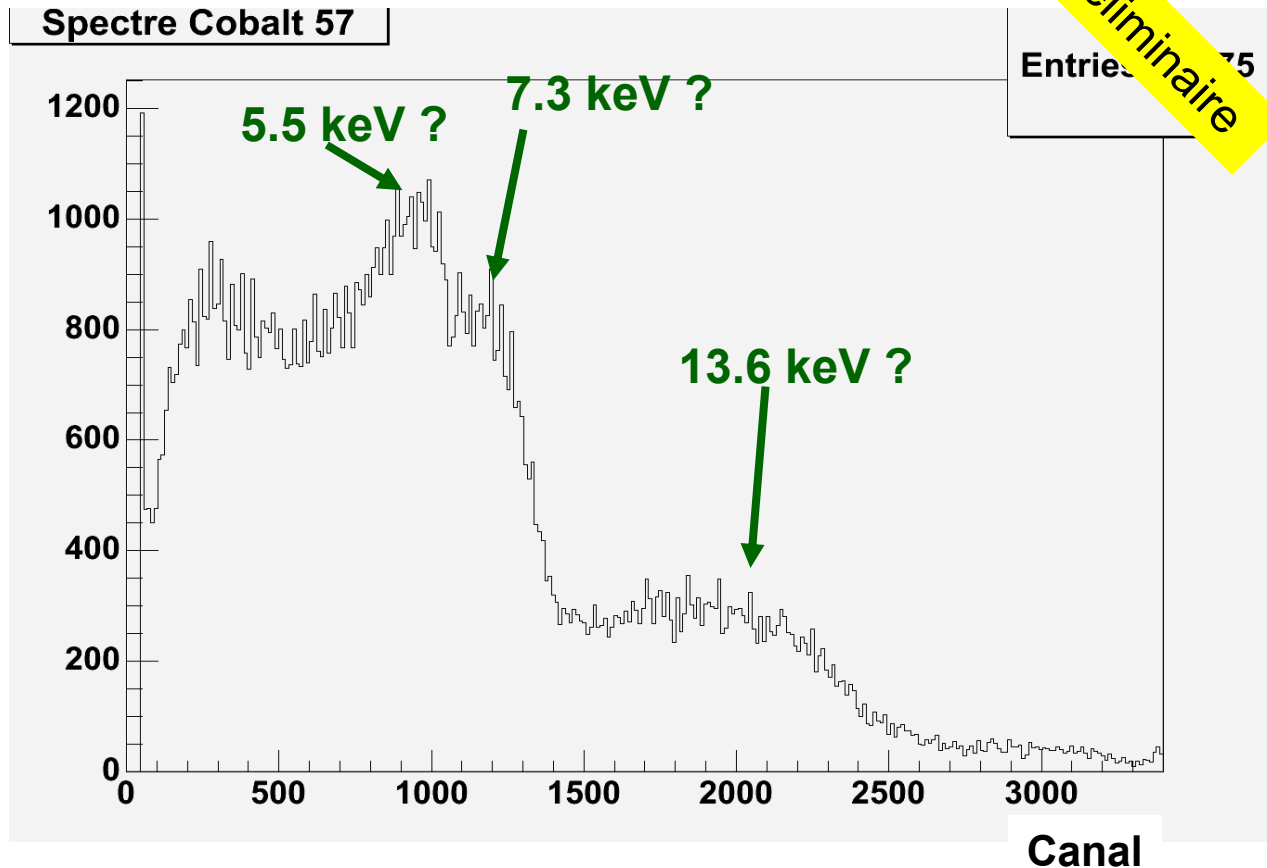
Ici : C2 déplacé de 3.4 cm

⇒ Détermination de l'énergie moyenne :  
 $23 \pm 1 \text{ keV}$

# Mesure du TOF pour les $^3\text{He}$



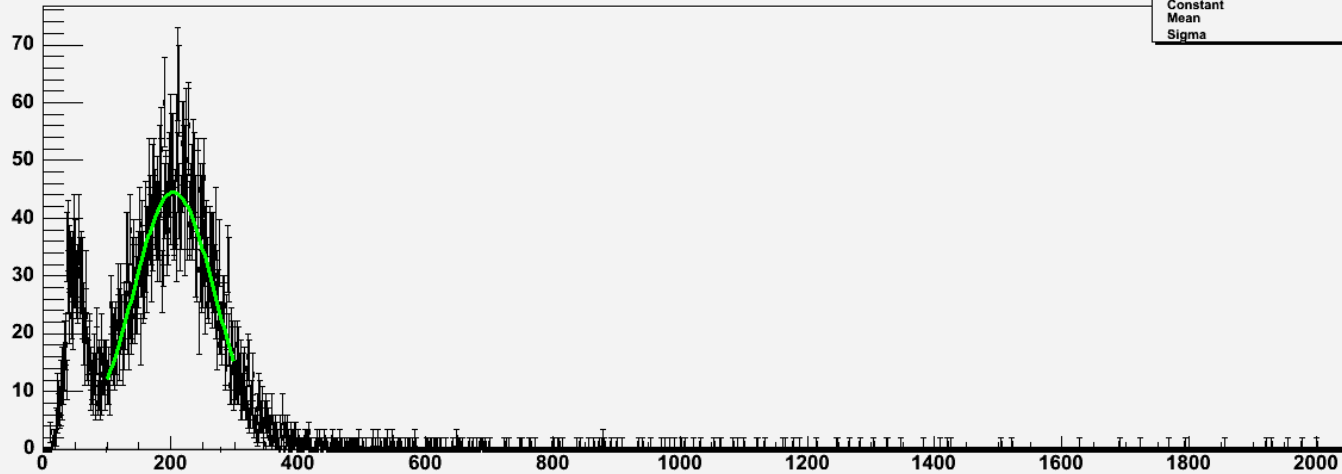
# Electrons de conversion et électrons Auger provenant de la source de $^{57}\text{Co}$



Etalonnage en cours...

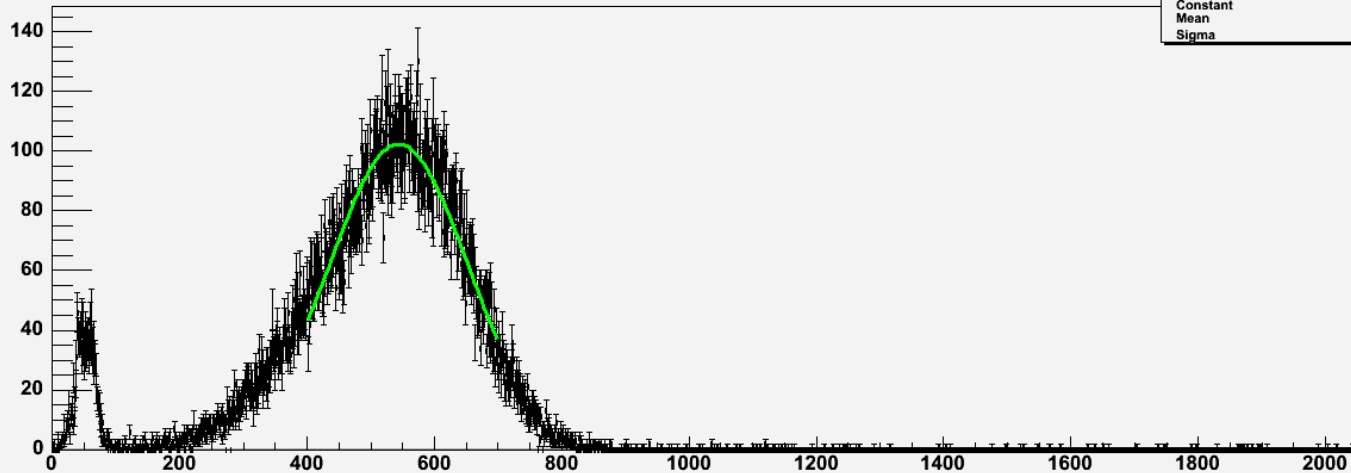
# Mesure de l'ionisation d' $^3\text{He}$ / $^1\text{H}$ dans la plage en énergie du keV (dans l' $^4\text{He}$ )

Source 11 kV (Helium)



Entries	873
$\chi^2 / \text{ndf}$	227.3 / 196
Prob	0.06221
Constant	$44.5 \pm 0.8$
Mean	$204.6 \pm 1.1$
Sigma	$64.26 \pm 1.31$

Source 11kV (Proton)



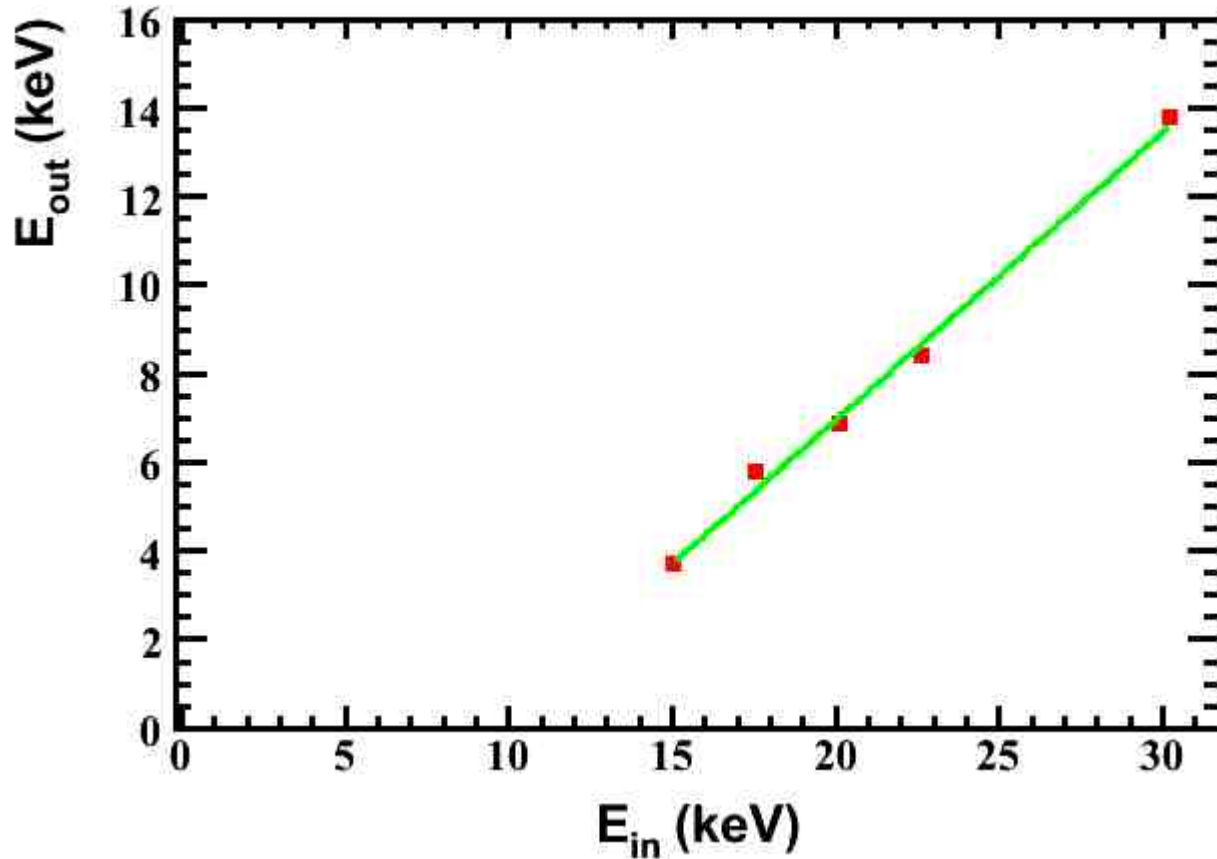
Entries	1199
$\chi^2 / \text{ndf}$	342.1 / 297
Prob	0.03658
Constant	$102.3 \pm 0.9$
Mean	$543.9 \pm 1.0$
Sigma	$108.5 \pm 1.4$

Canal



# Energies des $^3\text{He}$ à partir des mesures de TOF à 15, 17.5, 20, 22.5, 30 kV

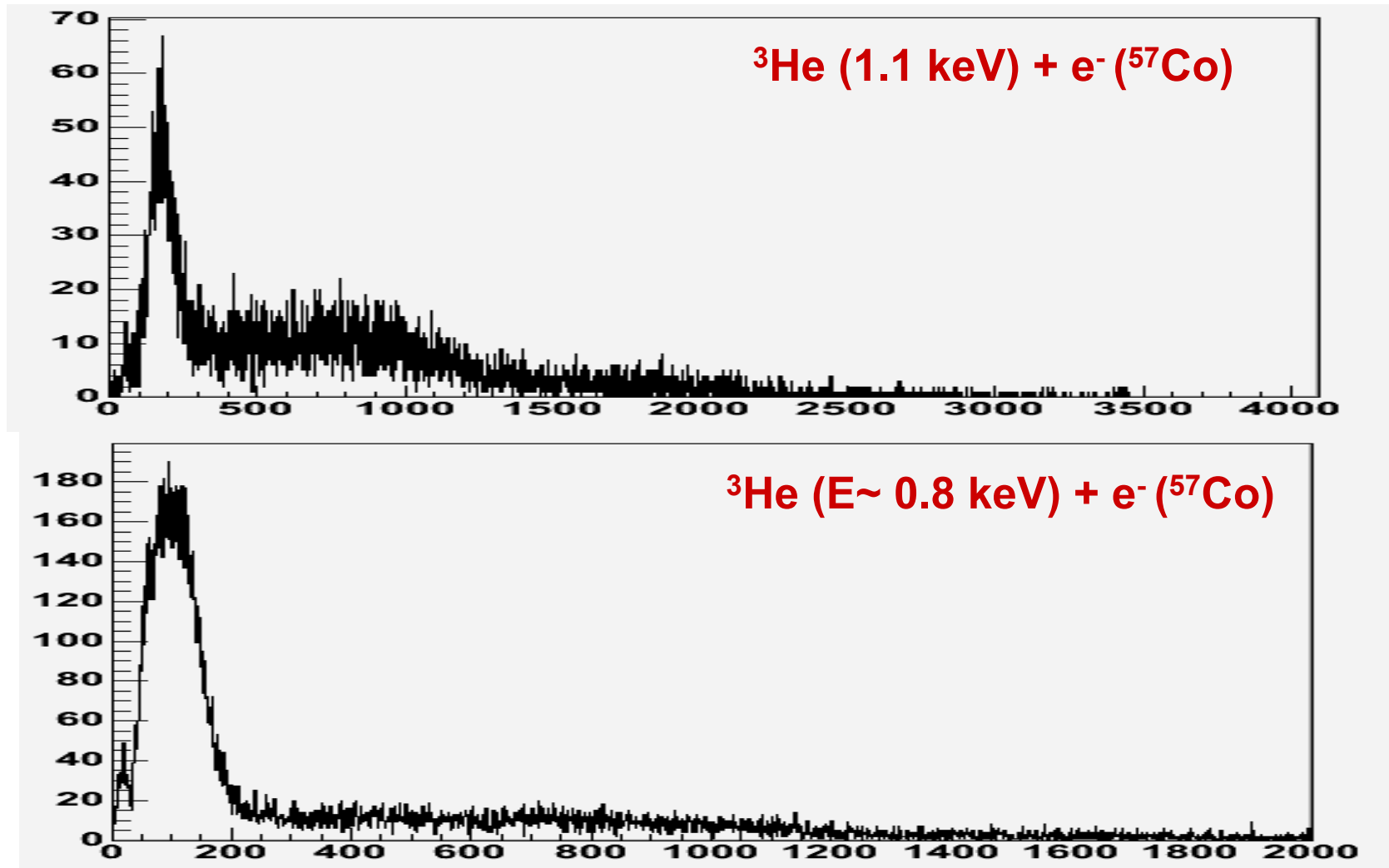
---



$\Rightarrow E(11\text{keV}) = 1.1 \text{ keV}$

$E(10.5\text{keV}) = 0.8 \text{ keV}$

# Sources d'ions $^3\text{He}$ + source de $^{57}\text{Co}$



Détermination du facteur de « quenching » dans la plage en énergie du keV en cours ...

# Principe de discrimination signal/bruit de fond avec MIMAC-He3

- **Neutralinos  $\tilde{\chi}$**  :

- 1 seule interaction
- $E_{ee} < 4.2$  keV
- **recul nucléaire**

- **Rayons  $\gamma$**  :

- Diffusion Compton/ Effet photoélectrique
- $\Rightarrow$  **recul électronique**

**Discrimination : Parcours vs Energie**

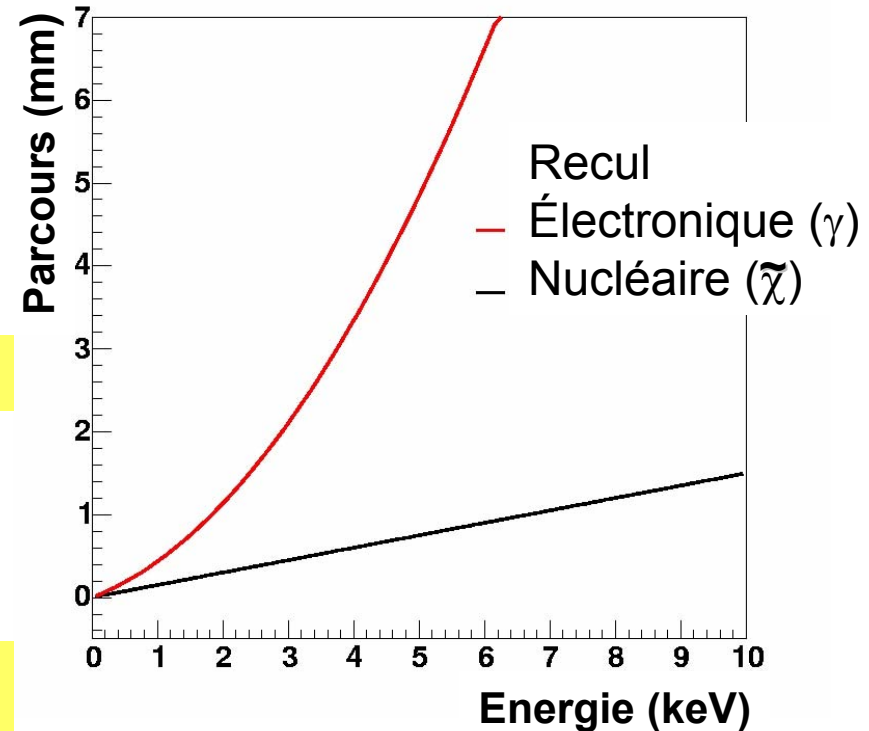
- **Neutrons** :

- diffusion élastique
- $\Rightarrow$  **recul nucléaire**

**Discrimination :**

- diffusion multiple (anti-coïncidence)
- capture :  $n + {}^3\text{He} \rightarrow p + {}^3\text{H} + 764$  keV

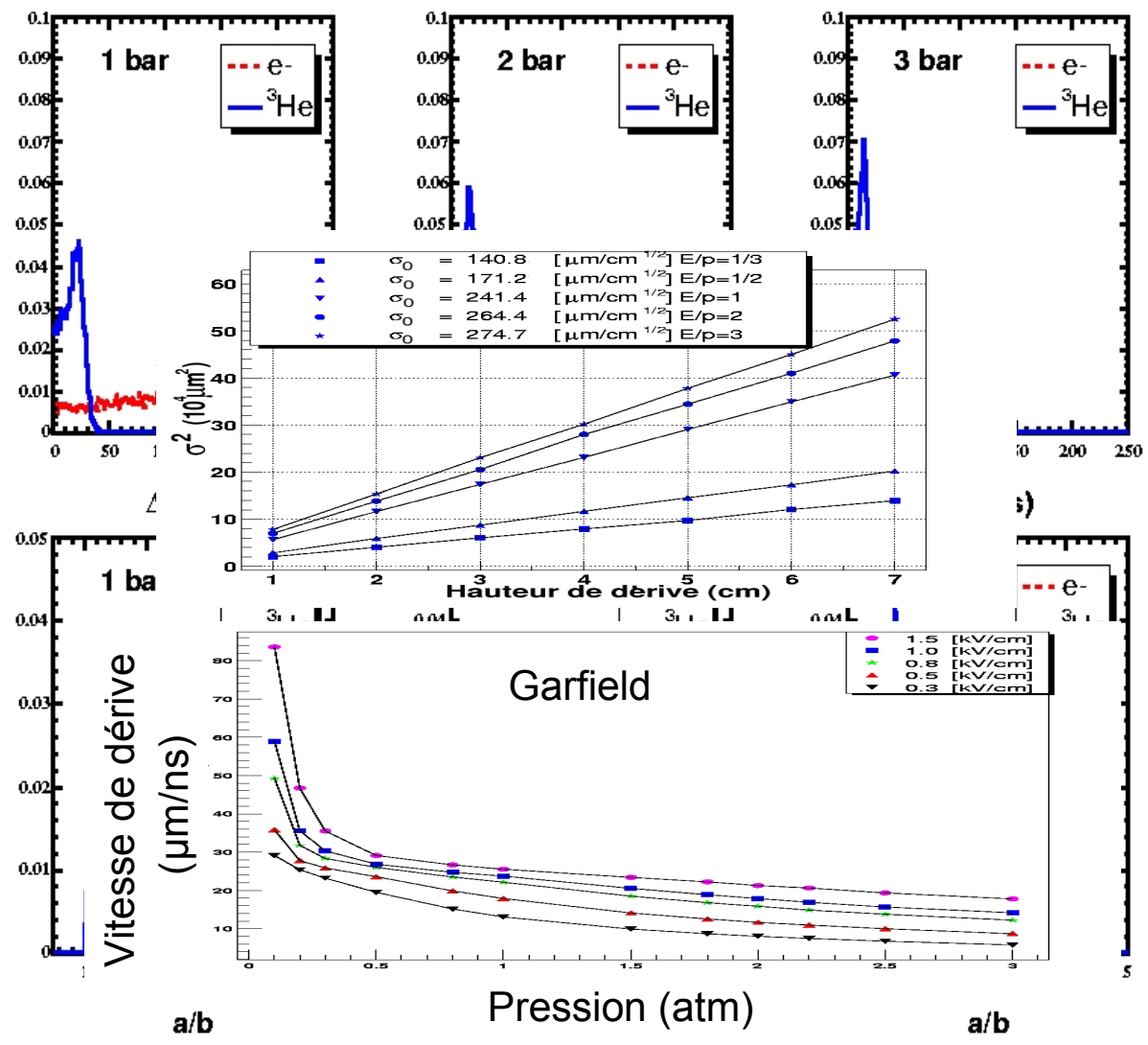
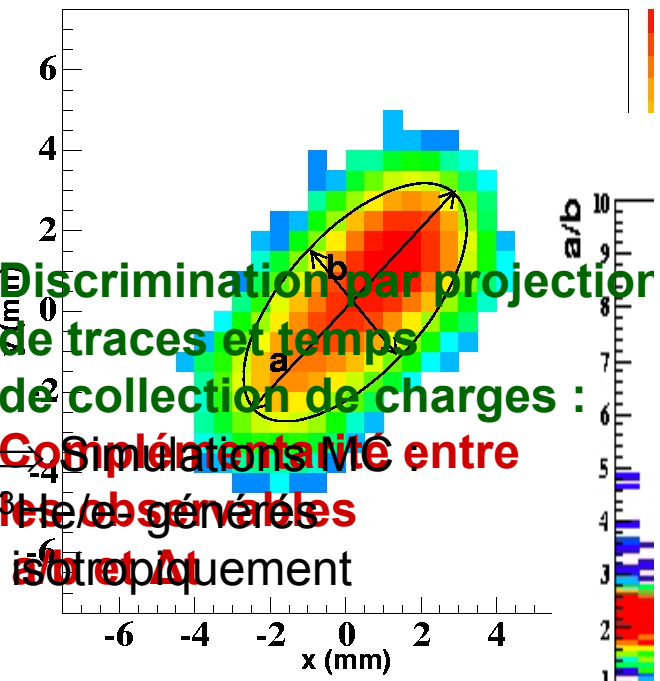
**Discrimination intrinsèque  
recul nucléaire/recul électronique**



# Discrimination recul électronique/nucléaire

Discrimination par projection de traces et temps de collection de charges :  
 Simulations MC entre  
 les observés  
 isotropiquement

Recul électronique pro dans le plan de l'anode



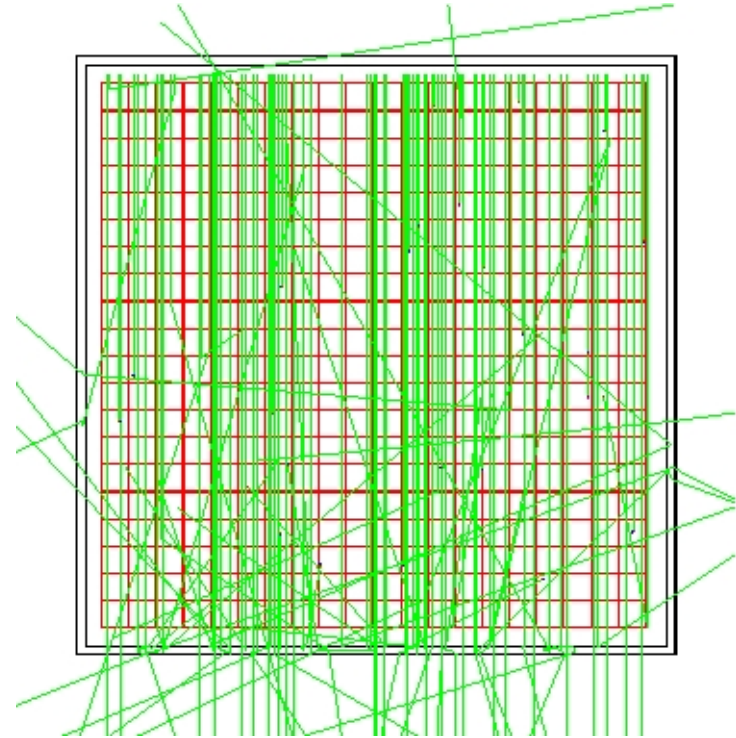
# Pouvoir de rejet de MIMAC-He3 des bruits de fond physiques

- **Dispositif de simulation Geant4 :**  
**27 m<sup>3</sup> d'<sup>3</sup>He à 3 bar**

- **Simulation du pouvoir de rejet**

**Définition des coupures sur les observables :**

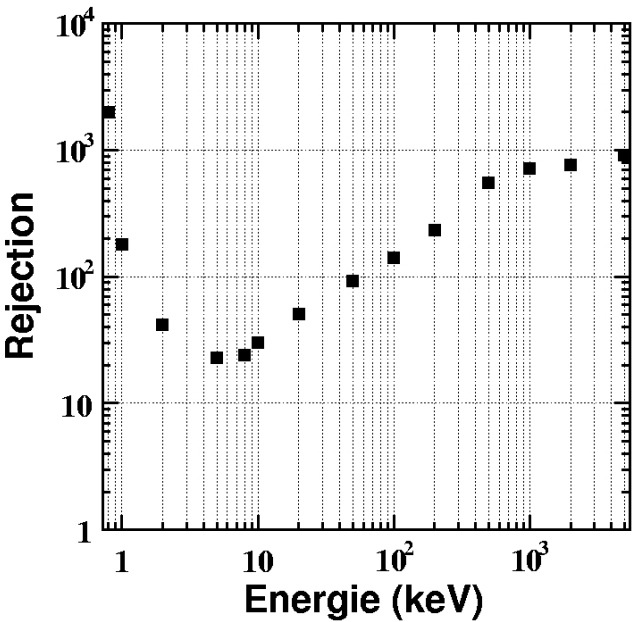
- Une seule chambre touchée (anti-coïncidence)
- Energie déposée : 0.6-4.2 keV
- Rapport a/b < 1.5
- Temps de collection de charges  $\Delta t < 40$  ns



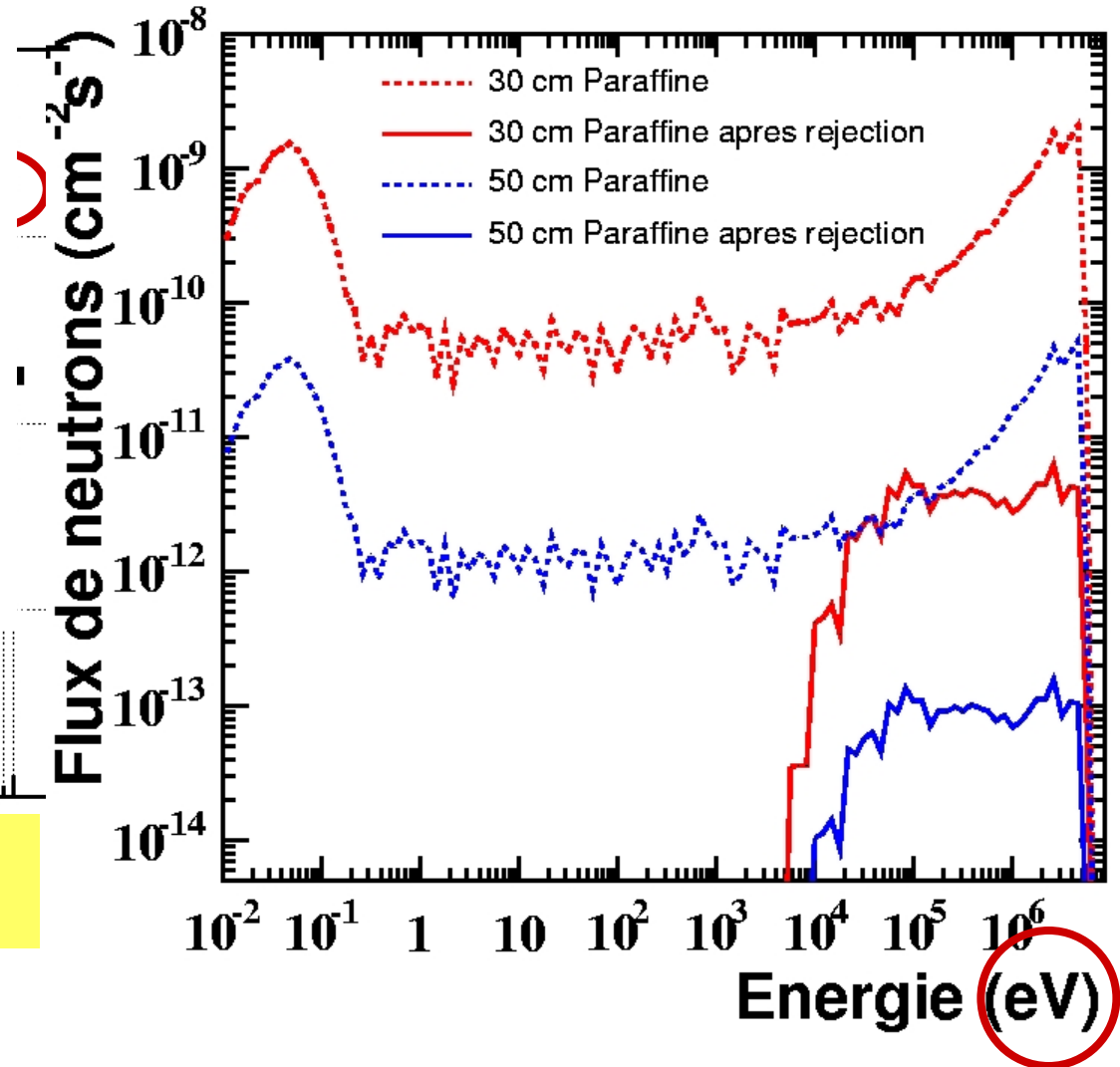
⇒ **Taux de bruits de fond au Laboratoire Souterrain de Modane (LSM) :**

- ✓ **Neutrons**
- ✓ **Rayons  $\gamma$  de la radioactivité naturelle**
- ✓ **Muons cosmiques**

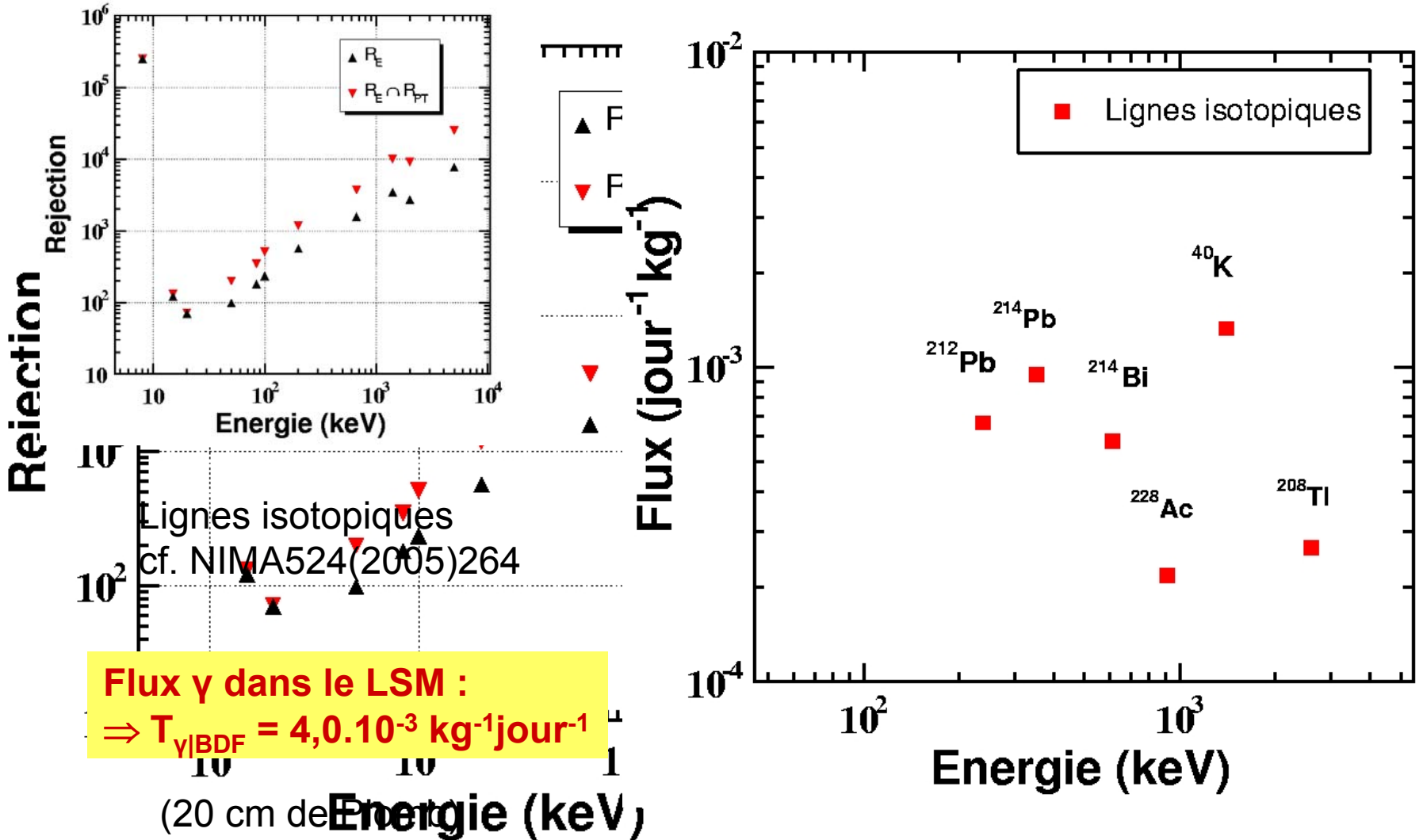
# Rejet des neutrons et bruit de fond induit



Flux neutron dans le LSM  
 $\Rightarrow T_{n|BDF} = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ kg}^{-1} \text{ jour}^{-1}$   
(50 cm de Paraffine)



# Rejet des rayons $\gamma$ et bruit de fond induit

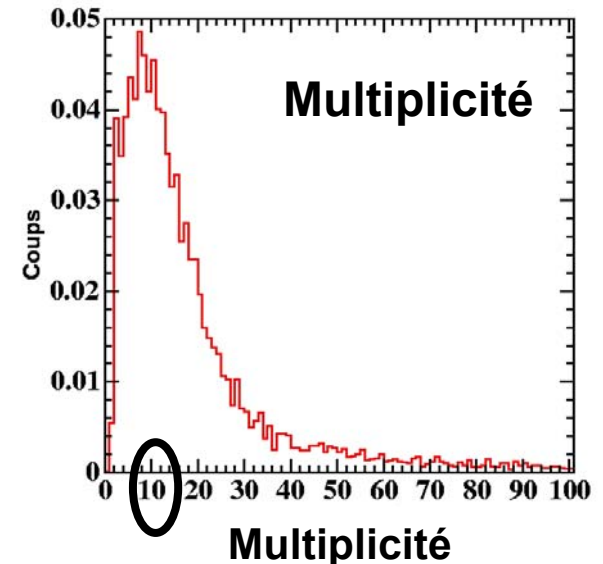
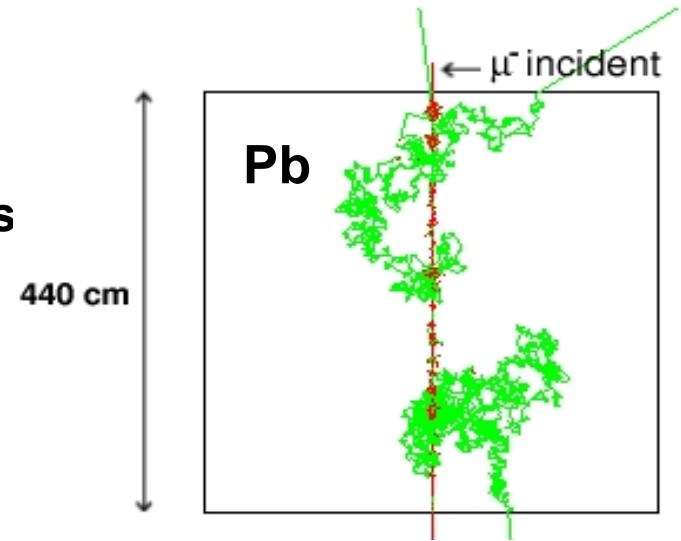


# Production de neutrons par les muons cosmiques de hautes énergies

- **Neutrons induits en milieu souterrain**
  - blindage = cible pour les muons énergétiques
  - **Processus :**
    - . spallation des muons
    - . production dans les cascades hadronique et électromagnétique
  - spectre “dur”, jusqu’à plusieurs GeV

**Importance de la réjection des neutrons**

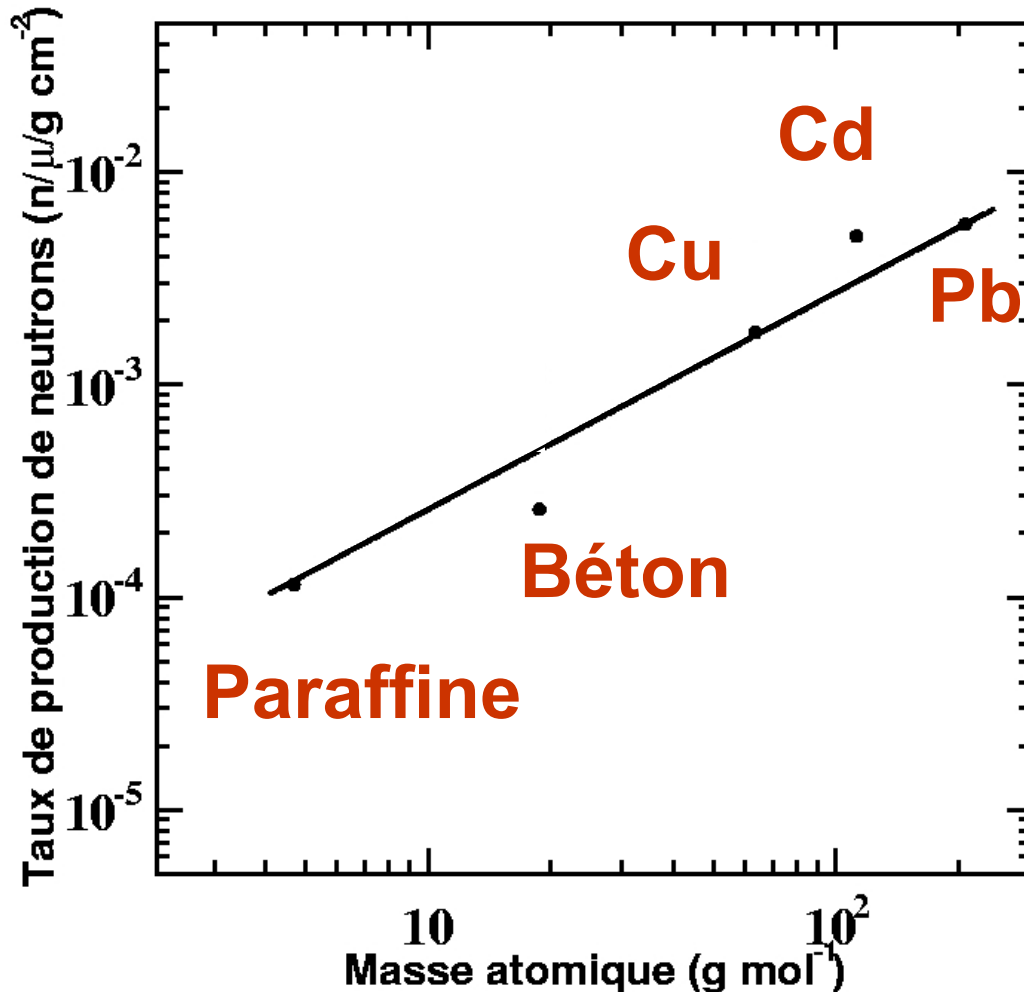
- **Dispositif de simulation Geant4 dédié :**  
Faisceau de  $\mu^-$  (270 GeV) sur une cible large de matériau





# Taux de production de neutrons induits dans différents matériaux

Geant4.6.2.p01



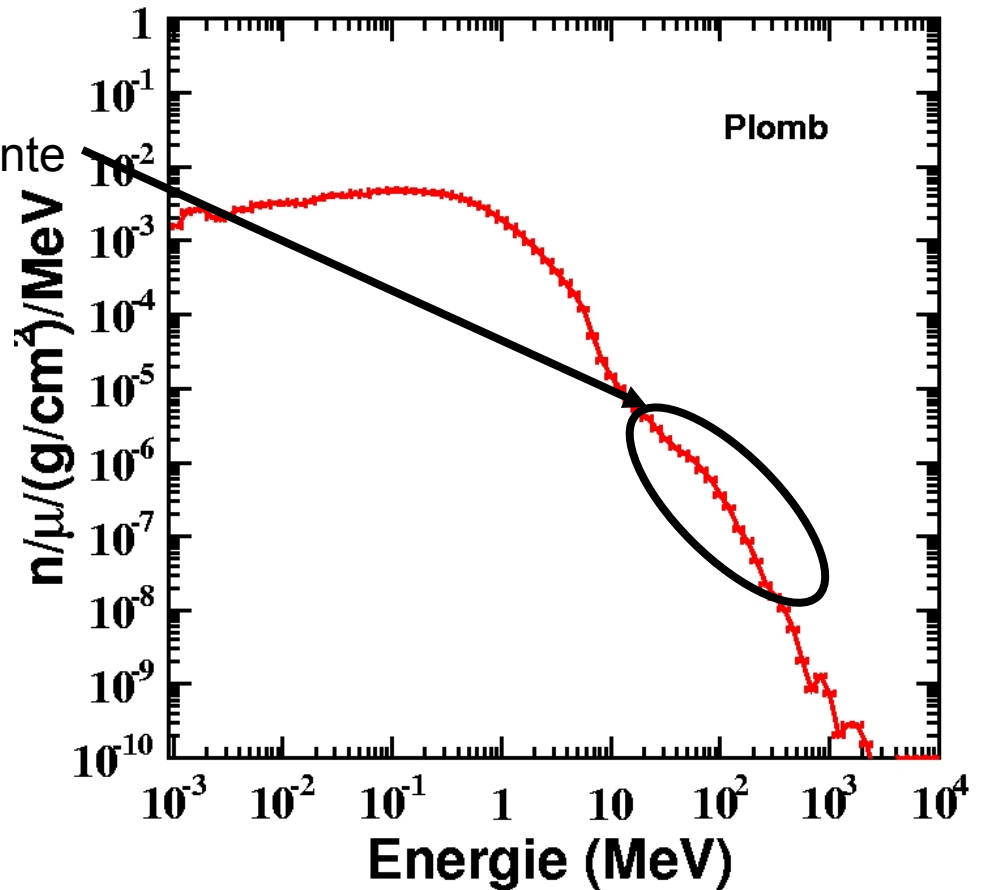
- Matériaux utilisés pour les blindages
- **Augmentation du taux avec <A>**
- **Blindage de Pb :**
  - ⇒ Protection contre les rayons γ
  - ⇒ Production de neutrons (et de rayons γ) induits

# Spectres différentiels des neutrons induits

- seuil de production 1 keV
- $E_n > 10$  MeV : résonance dipolaire géante
- Energie  $\leq$  O(GeV)

• Spectre obtenu pour :

- Cuivre
- Béton
- Paraffine



# Taux de bruits de fond attendus dans MIMAC-He3 au LSM

Particules	Flux au LSM	Taux dans MIMAC-He3 (kg <sup>-1</sup> jour <sup>-1</sup> )
Muons	$4 \times 10^{-5} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$	$< 1.6 \times 10^{-5}$
Rayons $\gamma$	$2.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}\text{kg}^{-1}$	$4.0 \times 10^{-3}$
Neutrons	$1.6 \times 10^{-2} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$	$2.1 \times 10^{-3}$
Neutrons induits par les muons	$5.9 \times 10^{-5} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$	$6.4 \times 10^{-4}$

après 20 cm de Pb

après 50 cm de Paraffine

20 cm de Pb +  
50 cm Paraffine

# Taux de signal neutralino dans MIMAC-He3 ?

- Taux de bruit de fond connu :  $\sim 10^{-3} \text{ kg}^{-1}\text{jour}^{-1}$
- Taux de signal dans MIMAC-He3 ?
  - LSP : le neutralino le plus léger

$$\tilde{\chi} = a_1 \tilde{B} + a_2 \tilde{W}^3 + a_3 \tilde{H}_1 + a_4 \tilde{H}_2$$

Modèles SUSY phénoménologique effectifs à l'échelle électrofaible :

Paramètres	$M_2$ (GeVc <sup>-2</sup> )	$\mu$ (GeVc <sup>-2</sup> )	$m_0$ (GeVc <sup>-2</sup> )	$M_A$ (GeVc <sup>-2</sup> )	$\tan \beta$
Min.	50	50	100	100	5
Max.	1000	1000	1000	1000	60

# Neutralinos reliques légers ? (1)

---

- dans les *modèles SUSY universels* :

les masses  $M_1$ ,  $M_2$  des jauginos de U(1) et SU(2) sont unifiées à  $M_{\text{GUT}}$   
⇒ relation standard (après RGE) à l'échelle électrofaible (EW) :

$$M_1 = 5/3 \tan^2 \theta_w M_2 \cong 0.5 M_2$$

- contrainte **LEP2** sur la masse du chargino  $\chi^\pm$  :

$$m_{\chi^\pm} > 103 \text{ GeV} \Rightarrow M_{2,\mu} \geq 103 \text{ GeV} \Rightarrow m_{\tilde{\chi}} \geq 50 \text{ GeV}$$

Limite dépendante  
de ce modèle



# Neutralinos reliques légers ? (2)

---

- dans les *modèles SUSY non-universels* :

les masses  $M_1$ ,  $M_2$  des jauginos de U(1) et SU(2) **non unifiées** à  $M_{\text{GUT}}$

$$M_1 \neq M_2/2 \text{ à l'échelle EW}$$

⇒ **contrainte de LEP2 sur  $m_{\tilde{\chi}}$  non valide**


- $M_1 = R M_2$ , R paramètre libre (contrainte **à l'échelle EW** relachée)
- limite sur la masse des neutralinos dans les **modèles non-universels** provient de la contrainte sur la densité relique :

$$m_{\tilde{\chi}} \geq 6 \text{ GeV}$$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{A. Bottino } et al, \text{ PRD2004} \\ \text{G. Belanger } et al, \text{ JHEP2004} \end{array} \right]$$

# Modèles SUSY et balayage de l'espace des paramètres

---

- Paramètres :  $M_2, \mu, m_0, M_A, \tan \beta$
- Couplages trilineaires :  $A_{t,b} = 0$
- **Non-universalité des masses des jauginos** :  $0.01 \leq R \leq 0.5$   
*cas universel* 

*DarkSUSY (modifié pour inclure la non-universalité)*

Balayage  $\Rightarrow$   $25 \times 10^6$  modèles

- ✓ **Contrainte cosmologique** :  $0.02 < \Omega_{\chi} h^2 < 0.15$
- ✓ **Contraintes accélérateurs** :
  - $-25 < \delta a_{\mu} \times 10^{10} < 69$
  - $2.04 < \text{BR}(b \rightarrow s + \gamma) \times 10^4 < 4.42$
  - $m_h > 91.6 \text{ GeV}$
  - $m_{\chi^{\pm}} > 103.5 \text{ GeV}$

Après contraintes :  $4 \times 10^5$  modèles

# Section efficace $\tilde{\chi}$ - $^3\text{He}$

Pour  $^3\text{He}$  :  $\sigma_{\text{SD}} \gg \sigma_{\text{SI}} \Rightarrow$  **seulement  $\sigma_{\text{SD}}$  est considérée**

$$\sigma(^3\text{He}) \propto m_r^2 (J+1)/J (a_p \langle S_p \rangle + a_n \langle S_n \rangle)^2$$

$\Rightarrow$  **section efficace axiale**

-  $a_p$  : amplitude de diffusion sur le neutron

-  $a_n$  : amplitude de diffusion sur le proton

Avec le contenu en spin de l' $^3\text{He}$  :  $\langle S_p \rangle = -0.05$

$\langle S_n \rangle = 0.49$

$\Rightarrow$  diffusion essentiellement sur le neutron "non apparié"

**Taux de détection obtenu avec : -  $\rho_0$  densité locale :  $0.3 \text{ GeVcm}^{-3}$**

**-  $v_0$  vitesse relative  $\tilde{\chi}$ - $^3\text{He}$  :  $220 \text{ kms}^{-1}$**

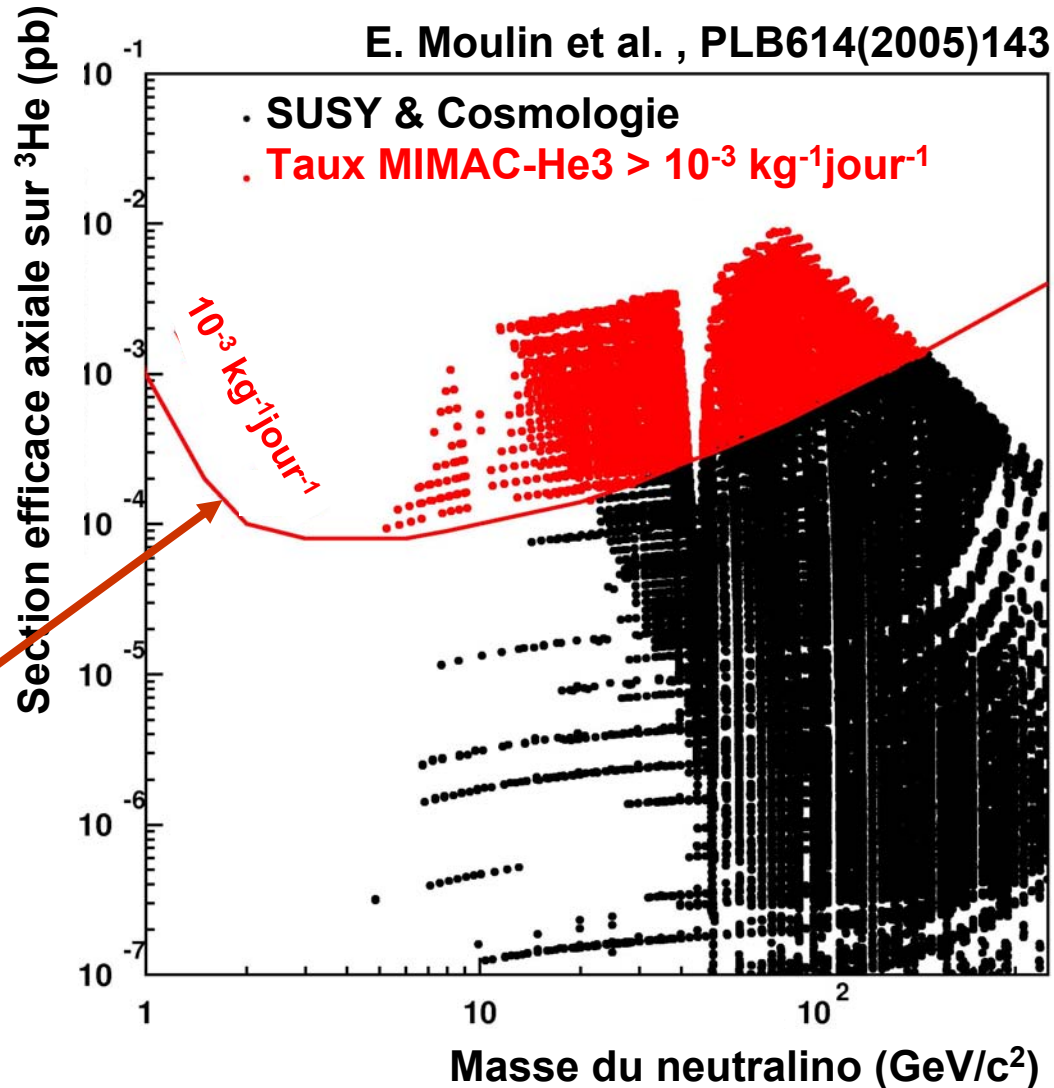


# Section efficace axiale $\tilde{\chi}^0$ - $^3\text{He}$ et taux dans MIMAC-He3 (10kg)

E. Moulin et al. , PLB614(2005)143

- $0.02 < \Omega_{\tilde{\chi}^0} h^2 < 0.15$
- Contraintes accélérateurs

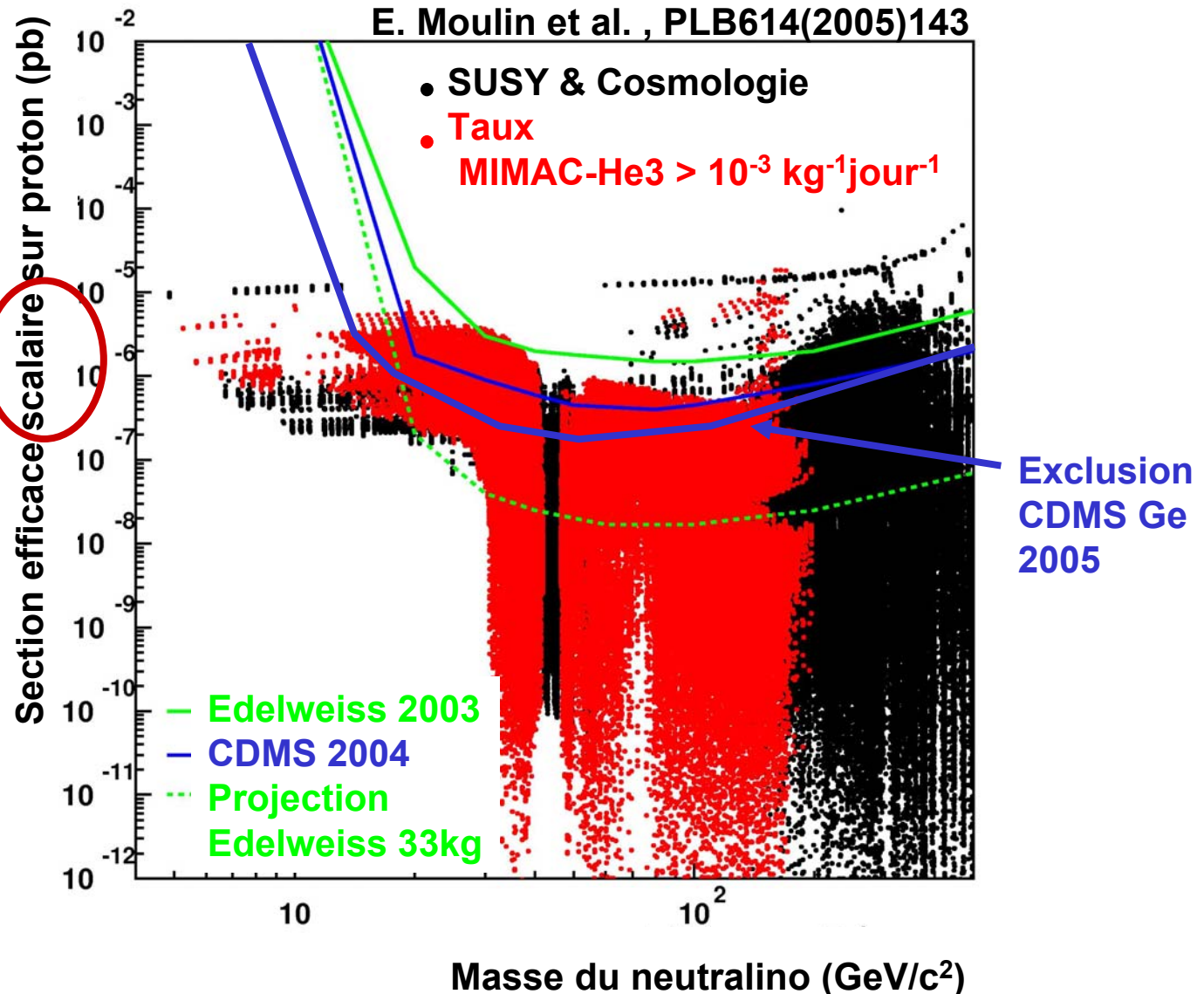
Courbe d'exclusion pour  
bruit de fond de  
 $10^{-3} \text{ kg}^{-1}\text{jour}^{-1}$



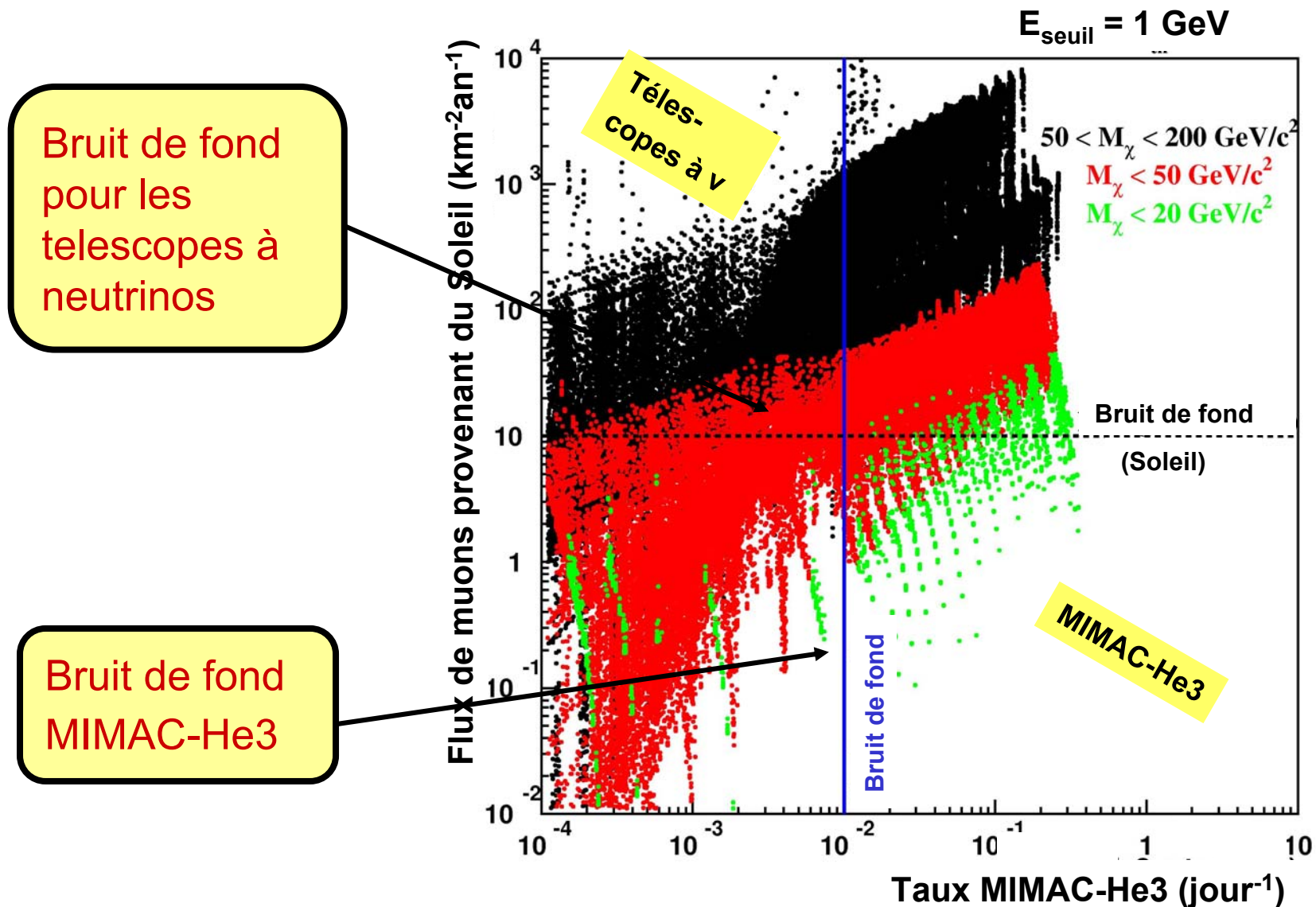
# Complémentarité avec la détection directe scalaire

Sensibilité de MIMAC-He3 aux faibles masses de neutralinos

$\sigma_{SD}$  et  $\sigma_{SI}$  ne sont pas corrélées



# Complémentarité avec les télescopes à neutrinos



# Section efficace élastique WIMP-noyau dépendante du spin

---

$$\sigma_A \propto \left( a_p \langle S_p \rangle + a_n \langle S_n \rangle \right)^2$$

Limite expérimentale sur  $\sigma_A \Rightarrow$  limites sur  $\sigma_p$  ou  $\sigma_n$  ?

**Problématique !**

Méthodes classiques :

- $a_p = 0$  ou  $a_n = 0$
- $a_p/a_n = \text{constant}$

Ce rapport dépend généralement du contenu jaugino/higgsino du neutralino :

**$\Rightarrow$  méthode dépendante d'un modèle de neutralino**

# Courbes d'exclusion pour les expériences sensibles à l'interaction dépendante du spin (1)

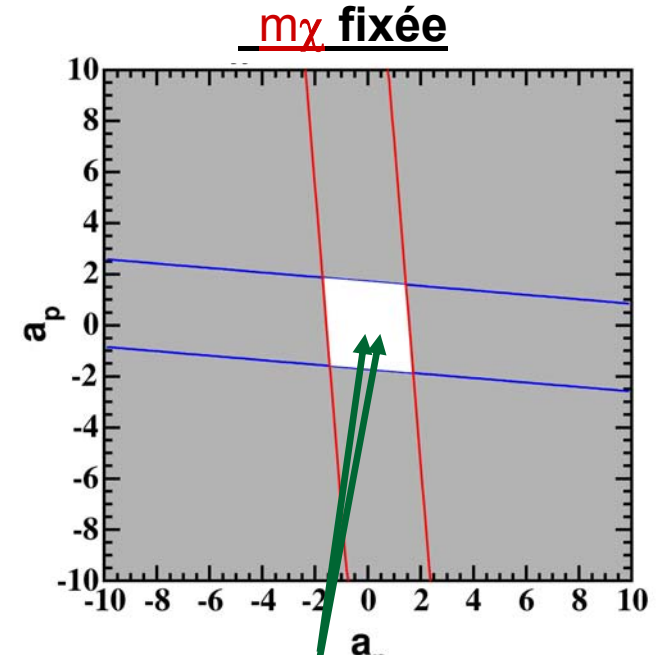
Pour un noyau donné:

$$a_p \leq \mp \frac{\langle S_n \rangle}{\langle S_p \rangle} a_n + f(m_{\tilde{\chi}}, \sigma_A^{\text{lim}})$$

où  $\sigma_A^{\text{lim}}$  est la limite  
d'exclusion expérimentale

D. Tovey et al.  
PLB (2000)

⇒ Graphes d'exclusion 3D :  $a_p, a_n, m_{\tilde{\chi}}$



Espace autorisé

=

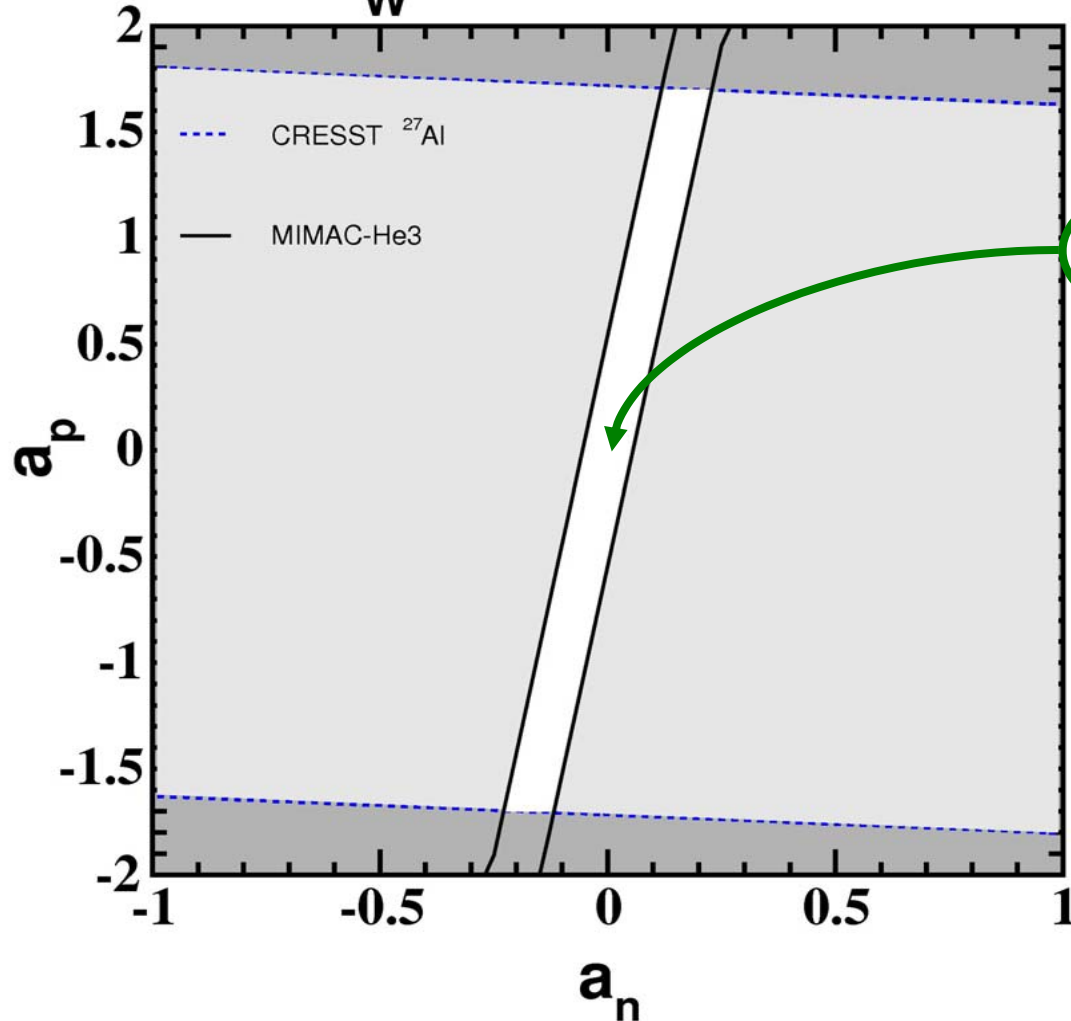
Intersection  
des 2 couples  
de droites

# Courbes d'exclusion pour les expériences sensibles à l'interaction dépendante du spin (2)

Noyaux	Expériences	Nucléon "non apparié"	$\langle S_p \rangle$	$\langle S_n \rangle$
$^3\text{He}$	MIMAC-He3	n	-0.05	0.49
$^{19}\text{F}$	SIMPLE	p	0.44	-0.11
$^{27}\text{Al}$	CRESST	p	0.34	0.03
$^{73}\text{Ge}$	Edelweiss (~7%)	n	0.03	0.38

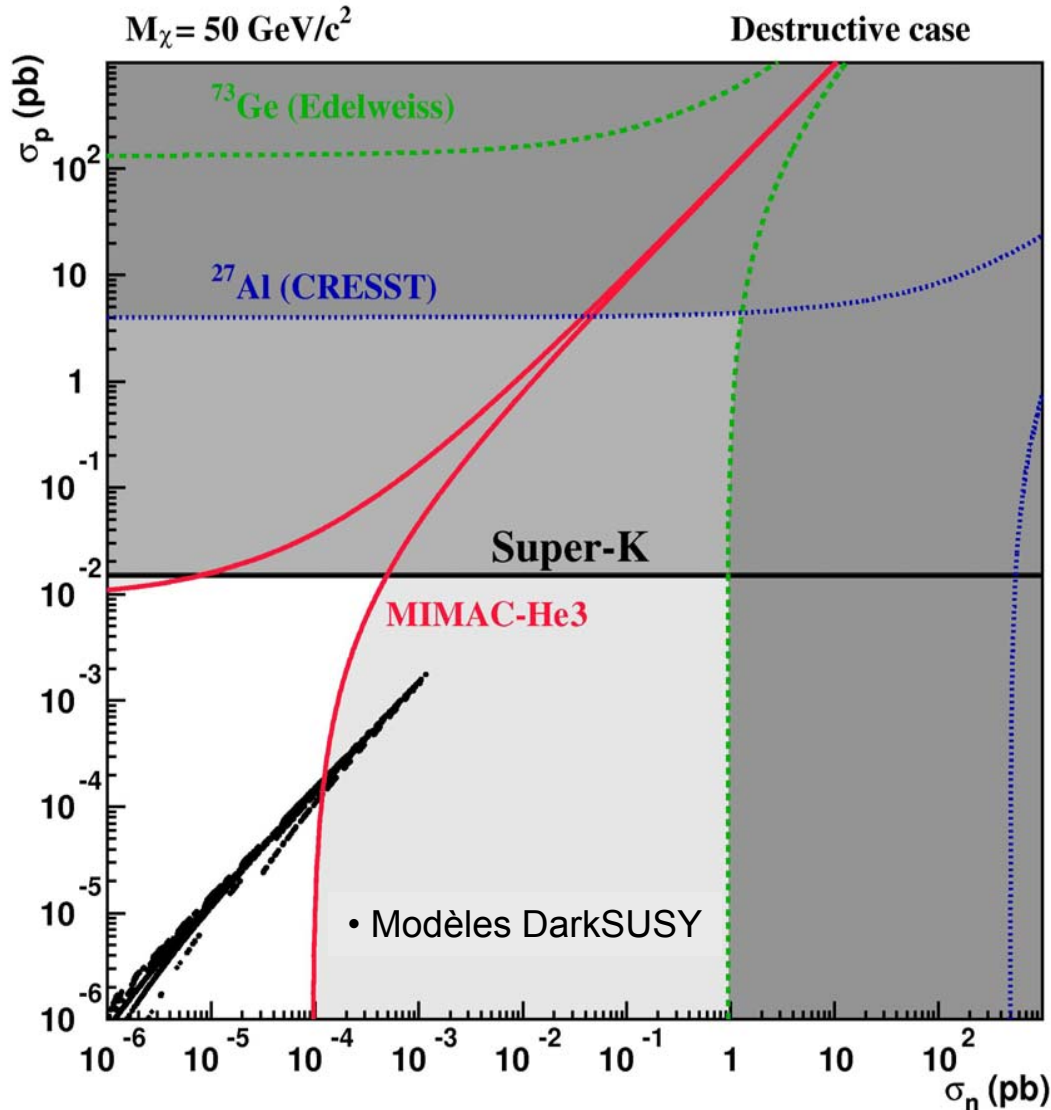
# Exclusion dans le plan ( $a_p, a_n$ )

$$m_W = 50 \text{ GeV}/c^2$$



Espace de  
paramètres autorisé

# Courbes d'exclusion dans le plan $(\sigma_p, \sigma_n)$



**Complémentarité  
avec la détection :**

- directe SD sur proton
- indirecte

E. Moulin et al., PLB614(2005)143



# Conclusions

---

- **MIMAC-He3 : discrimination recul nucléaire/électronique par projection de traces et temps de collection de charges**
- **Pouvoir de réjection des bruits de fond physiques**
- **Mesure du facteur de “quenching” dans l’<sup>3</sup>He :**  
couplage de la chambre prototype et de la source d’ions <sup>3</sup>He<sup>2+</sup> développée au LPSC : en cours
- **Complémentarité avec la détection :**
  - directe
  - indirecte
- **Perspective : MIMAC-He3 Phase I**