

Recherches de WIMPs et d'axions avec l'expérience EDELWEISS

Thibault de Boissière

Université Paris-Sud

3 Juillet 2015



Introduction générale



- Astrologie et astronomie à Stonehenge ...



- Astrologie et astronomie à Stonehenge ...



- L'univers selon Ptolémée

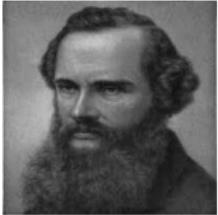
Première révolution



- Découverte des lois de la gravitation
- $\mathbf{F} = -G \frac{M_A M_B}{r^2} \cdot \mathbf{u}$

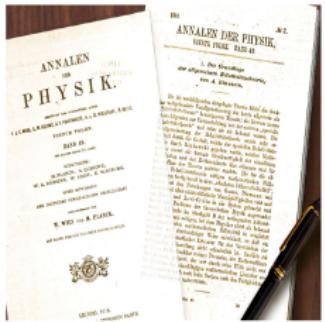


- Découverte des lois de la gravitation
- $\mathbf{F} = -G \frac{M_A M_B}{r^2} \cdot \mathbf{u}$



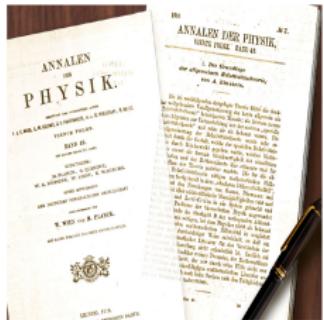
"There is nothing new to be discovered in physics now. All that remains is more and more precise measurement." Lord Kelvin.

Seconde révolution

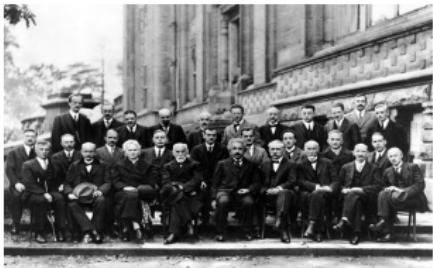


- 1905 : Théorie de la relativité restreinte
- 1915 : Théorie de la relativité générale

Seconde révolution

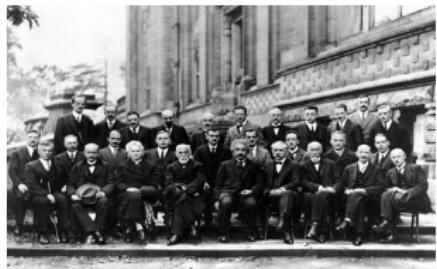
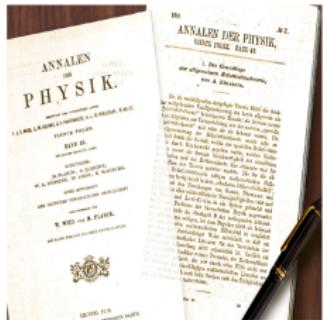


- 1905 : Théorie de la relativité restreinte
- 1915 : Théorie de la relativité générale



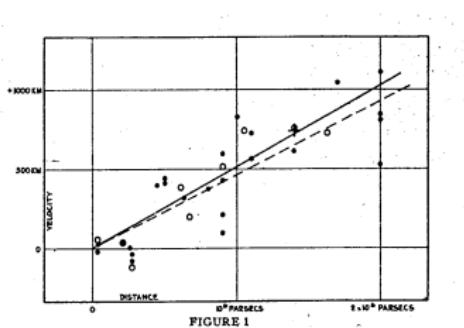
- Le congrès de Solvay pose les bases la mécanique quantique.

Seconde révolution



- Le congrès de Solvay pose les bases la mécanique quantique.

- 1905 : Théorie de la relativité restreinte
- 1915 : Théorie de la relativité générale

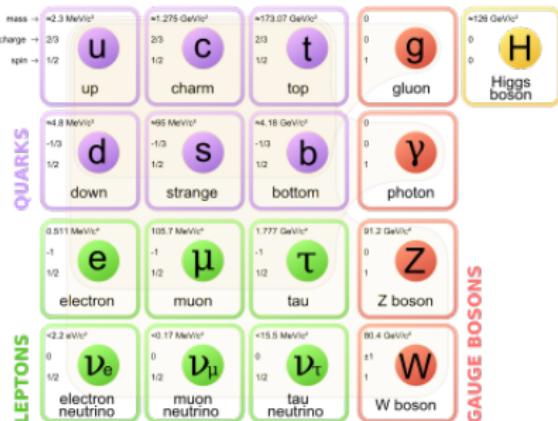


- Hubble : L'univers est en expansion.

À l'aube d'une 3ème révolution ?

- Énergie noire : énergie du vide, à l'origine de l'accélération de l'expansion de l'univers
- 85% de la matière est inexpliquée !

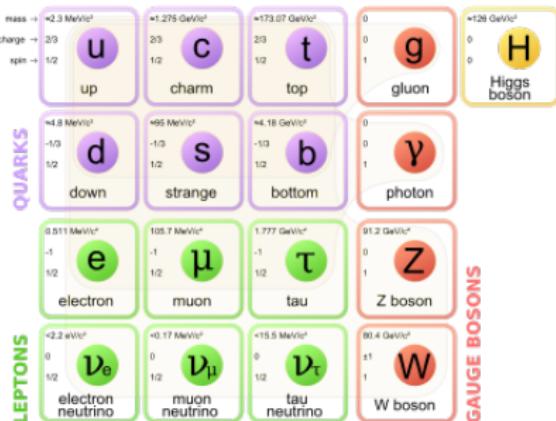
Physique des particules



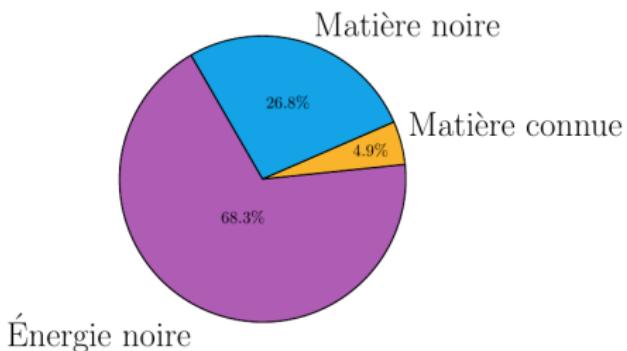
- Énergie noire : énergie du vide, à l'origine de l'accélération de l'expansion de l'univers
- 85% de la matière est inexpliquée !

À l'aube d'une 3ème révolution ?

Physique des particules



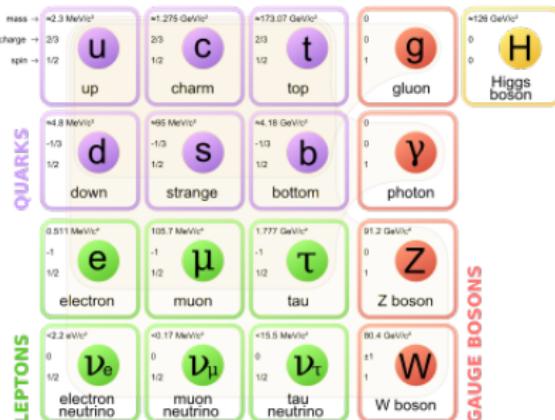
Cosmologie



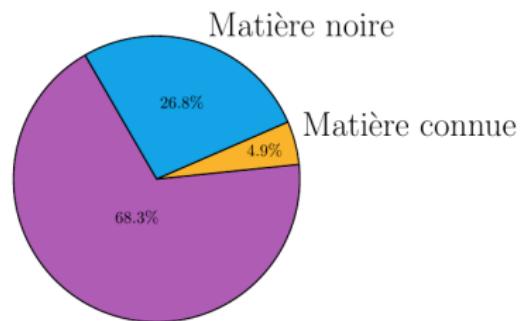
- Énergie noire : énergie du vide, à l'origine de l'accélération de l'expansion de l'univers
- 85% de la matière est inexpliquée !

À l'aube d'une 3ème révolution ?

Physique des particules



Cosmologie



- Énergie noire : énergie du vide, à l'origine de l'accélération de l'expansion de l'univers
- 85% de la matière est inexpliquée !

- À la recherche de la matière noire
- L'expérience EDELWEISS
- Recherche d'axions avec EDELWEISS-II
- Recherche de WIMPs de basse masse avec EDELWEISS-III

- À la recherche de la matière noire
- L'expérience EDELWEISS
- Recherche d'axions avec EDELWEISS-II
- Recherche de WIMPs de basse masse avec EDELWEISS-III

- À la recherche de la matière noire
- L'expérience EDELWEISS
- Recherche d'axions avec EDELWEISS-II
- Recherche de WIMPs de basse masse avec EDELWEISS-III

- À la recherche de la matière noire
- L'expérience EDELWEISS
- Recherche d'axions avec EDELWEISS-II
- Recherche de WIMPs de basse masse avec EDELWEISS-III

- À la recherche de la matière noire
- L'expérience EDELWEISS
- Recherche d'axions avec EDELWEISS-II
- Recherche de WIMPs de basse masse avec EDELWEISS-III

À la recherche de la matière noire

Pourquoi la matière noire ?

“There is a rather famous photograph of Zwicky making a silly face that now seems to be a de facto requirement for any public talk on dark matter”. F. Tanedo.

- Dans les années 30, il constate une disparité entre les prédictions de Hubble et les observations.
- Il propose d'introduire une nouvelle forme de matière invisible, qu'il baptise matière noire.

Pourquoi la matière noire ?

“There is a rather famous photograph of Zwicky making a silly face that now seems to be a de facto requirement for any public talk on dark matter”. F. Tanedo.



- Dans les années 30, il constate une disparité entre les prédictions de Hubble et les observations.
- Il propose d'introduire une nouvelle forme de matière invisible, qu'il baptise matière noire.

Pourquoi la matière noire ?

“There is a rather famous photograph of Zwicky making a silly face that now seems to be a de facto requirement for any public talk on dark matter”. F. Tanedo.



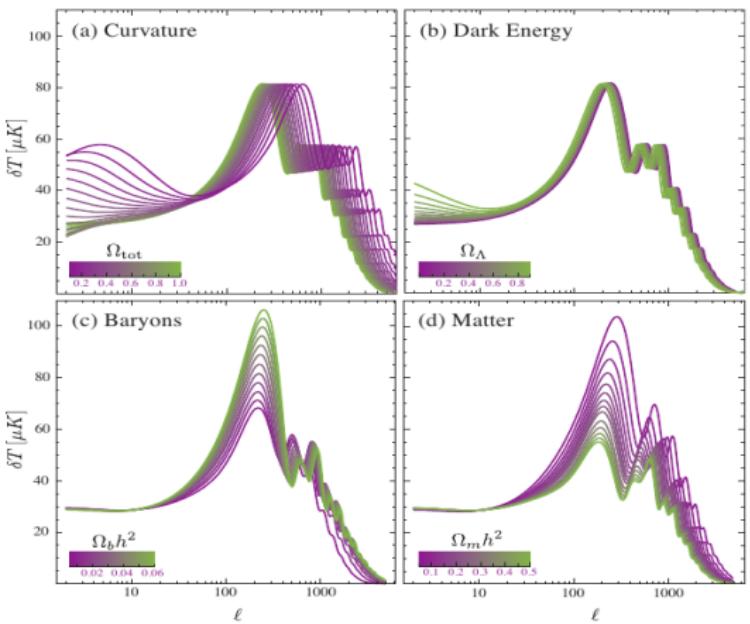
- Dans les années 30, il constate une disparité entre les prédictions de Hubble et les observations.
- Il propose d'introduire une nouvelle forme de matière invisible, qu'il baptise matière noire.

Les sondes cosmologiques et la matière noire

Les sondes cosmologiques à grande échelle apportent des mesures quantitatives.

Les sondes cosmologiques à grande échelle apportent des mesures quantitatives.

- L'ajustement des données du CMB requiert l'ajout de matière non-relativiste (froide) et non baryonique.



source : D. Baumann, Cambridge Cosmology course

Candidats pour la matière noire

Il existe de nombreux candidats dans les théories au-delà du Modèle Standard (BSM).



arXiv 1310.8642

Candidats pour la matière noire

Il existe de nombreux candidats dans les théories au-delà du Modèle Standard (BSM).

■ Les WIMPs

- Reliques thermiques du Big Bang.
- Ont la bonne densité relique pour une masse $M_\chi = \mathcal{O}(\text{GeV} - \text{TeV})$ et une section efficace d'annihilation $\langle\sigma v\rangle = 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{s}^{-1}$.
- Des théories BSM prédissent de telles particules avec masse et section efficace du même ordre de grandeur.
- "Miracle WIMP".



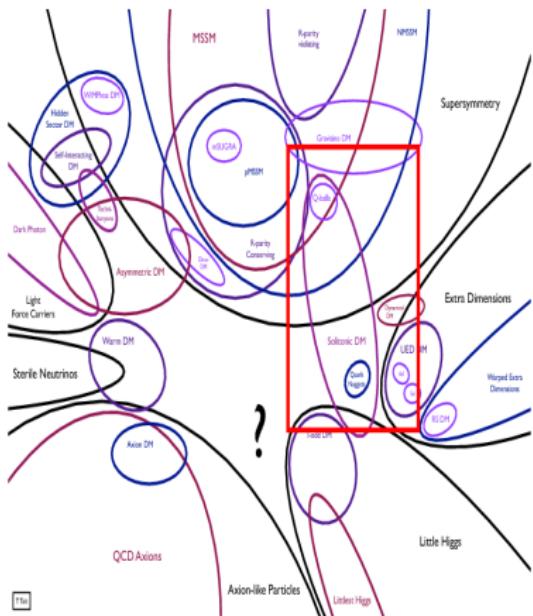
arXiv 1310.8642

Candidats pour la matière noire

Il existe de nombreux candidats dans les théories au-delà du Modèle Standard (BSM).

■ Les WIMPs

- Reliques thermiques du Big Bang.
- Ont la bonne densité relique pour une masse $M_\chi = \mathcal{O}(\text{GeV} - \text{TeV})$ et une section efficace d'annihilation $\langle\sigma v\rangle = 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{s}^{-1}$.
- Des théories BSM prédissent de telles particules avec masse et section efficace du même ordre de grandeur.
- "Miracle WIMP".



arXiv 1310.8642

Candidats pour la matière noire

Il existe de nombreux candidats dans les théories au-delà du Modèle Standard (BSM).

■ Les WIMPs

- Reliques thermiques du Big Bang.
- Ont la bonne densité relique pour une masse $M_\chi = \mathcal{O}(\text{GeV} - \text{TeV})$ et une section efficace d'annihilation $\langle\sigma v\rangle = 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$.
- Des théories BSM prédissent de telles particules avec masse et section efficace du même ordre de grandeur.
- "Miracle WIMP".



arXiv 1310.8642

Candidats pour la matière noire

Il existe de nombreux candidats dans les théories au-delà du Modèle Standard (BSM).

■ Les WIMPs

- Reliques thermiques du Big Bang.
- Ont la bonne densité relique pour une masse $M_\chi = \mathcal{O}(\text{GeV} - \text{TeV})$ et une section efficace d'annihilation $\langle\sigma v\rangle = 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$.
- Des théories BSM prédissent de telles particules avec masse et section efficace du même ordre de grandeur.
- "Miracle WIMP".



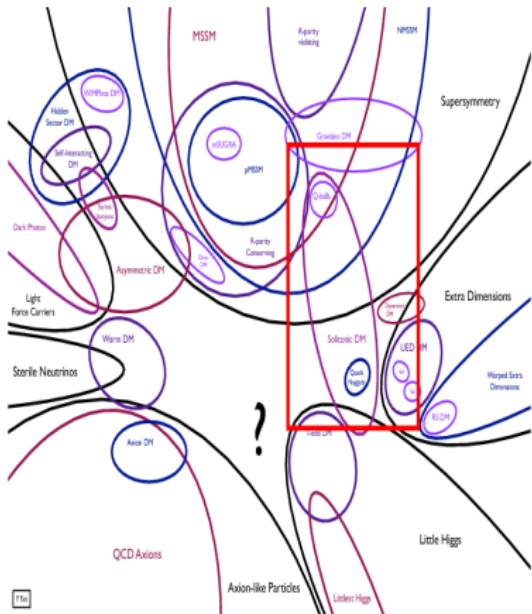
arXiv 1310.8642

Candidats pour la matière noire

Il existe de nombreux candidats dans les théories au-delà du Modèle Standard (BSM).

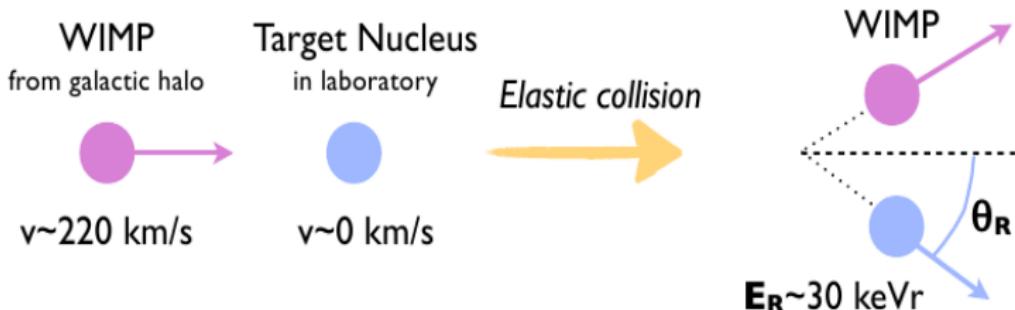
■ Les WIMPs

- Reliques thermiques du Big Bang.
- Ont la bonne densité relique pour une masse $M_\chi = \mathcal{O}(\text{GeV} - \text{TeV})$ et une section efficace d'annihilation $\langle\sigma v\rangle = 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$.
- Des théories BSM prédissent de telles particules avec masse et section efficace du même ordre de grandeur.
- “Miracle WIMP”.



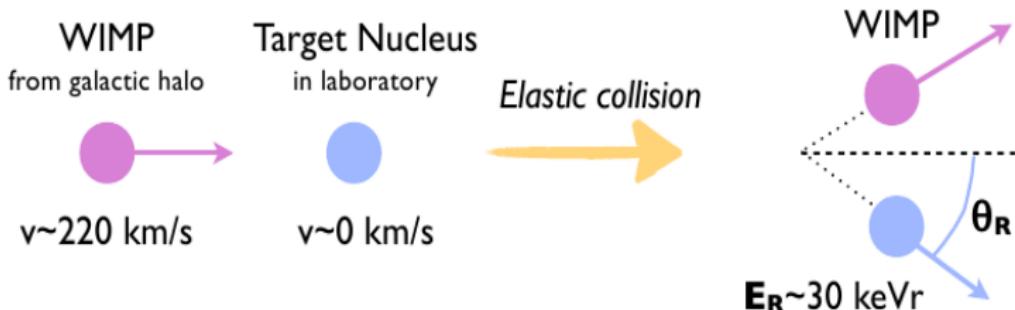
arXiv 1310.8642

Détection directe de WIMPs



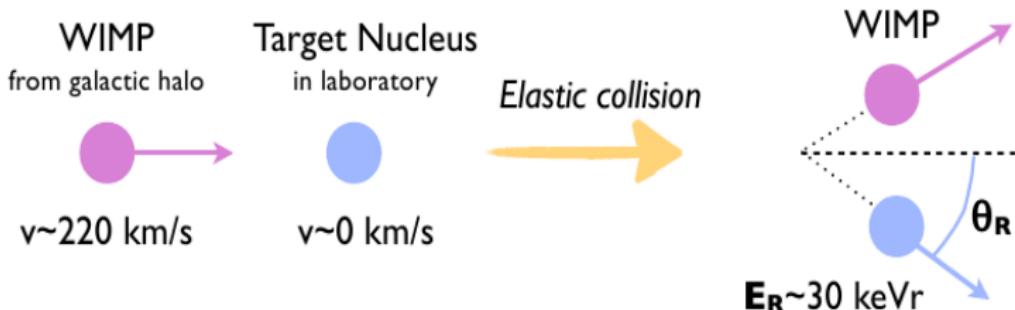
- Énergie typique :
 - $\mathcal{O}(\text{keV})$ à $\mathcal{O}(50 \text{ keV})$
- Taux attendu :
 - $< 1 \text{ evt/kg/an}$
- Contamination radioactive :
 - La plupart des matériaux utilisés ont un taux plus élevé
- Il faut donc :
 - Un seuil expérimental bas
 - Une exposition élevée
 - Des méthodes de réjection du bruit de fond

Détection directe de WIMPs



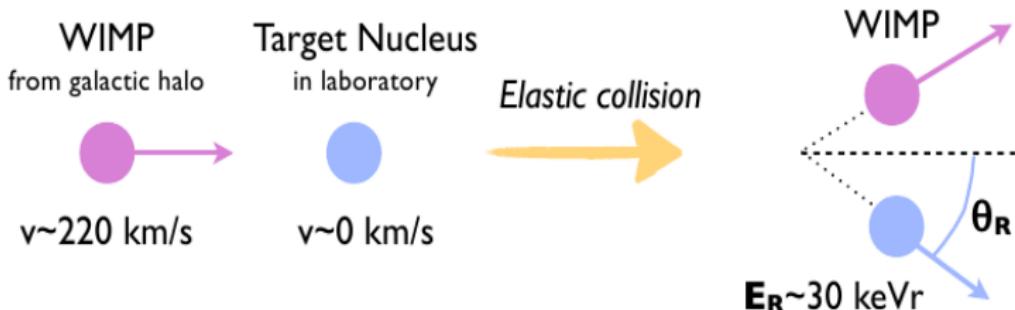
- Énergie typique :
 - $\mathcal{O}(\text{keV})$ à $\mathcal{O}(50 \text{ keV})$
- Taux attendu :
 - $< 1 \text{ evt/kg/an}$
- Contamination radioactive :
 - La plupart des matériaux utilisés ont un taux plus élevé
- Il faut donc :
 - Un seuil expérimental bas
 - Une exposition élevée
 - Des méthodes de réjection du bruit de fond

Détection directe de WIMPs



- Énergie typique :
 - $\mathcal{O}(\text{keV})$ à $\mathcal{O}(50 \text{ keV})$
- Taux attendu :
 - $< 1 \text{ evt/kg/an}$
- Contamination radioactive :
 - La plupart des matériaux utilisés ont un taux plus élevé
- Il faut donc :
 - Un seuil expérimental bas
 - Une exposition élevée
 - Des méthodes de réjection du bruit de fond

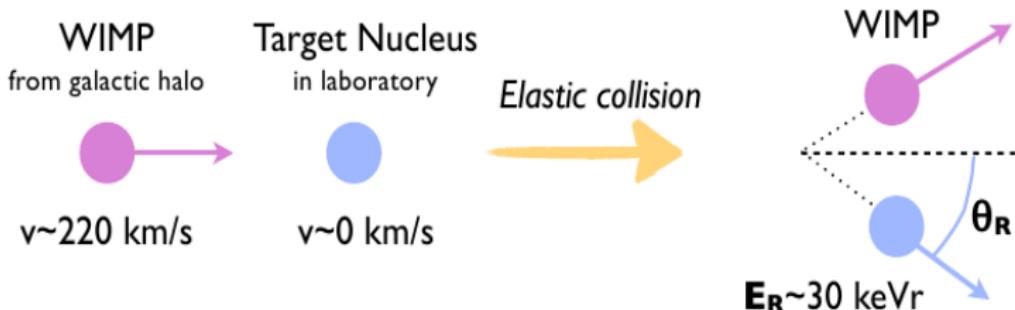
Détection directe de WIMPs



- Énergie typique :
 - $\mathcal{O}(\text{keV})$ à $\mathcal{O}(50 \text{ keV})$
- Taux attendu :
 - $< 1 \text{ evt/kg/an}$
- Contamination radioactive :
 - La plupart des matériaux utilisés ont un taux plus élevé

- Il faut donc :
 - Un seuil expérimental bas
 - Une exposition élevée
 - Des méthodes de réjection du bruit de fond

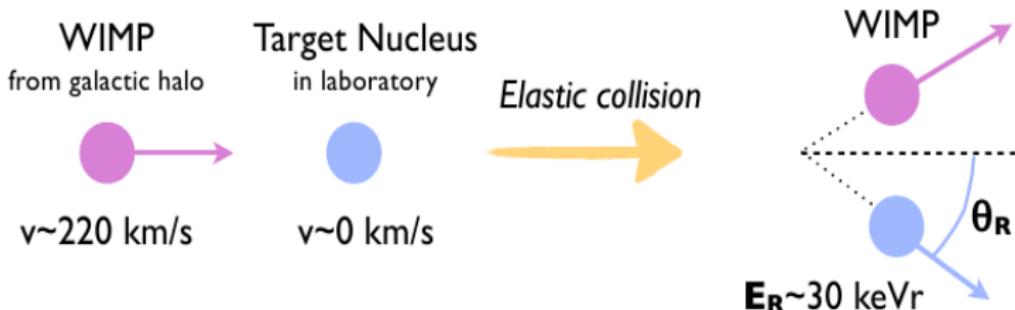
Détection directe de WIMPs



- Énergie typique :
 - $\mathcal{O}(\text{keV})$ à $\mathcal{O}(50 \text{ keV})$
- Taux attendu :
 - $< 1 \text{ evt/kg/an}$
- Contamination radioactive :
 - La plupart des matériaux utilisés ont un taux plus élevé

- Il faut donc :
 - Un seuil expérimental bas
 - Une exposition élevée
 - Des méthodes de réjection du bruit de fond

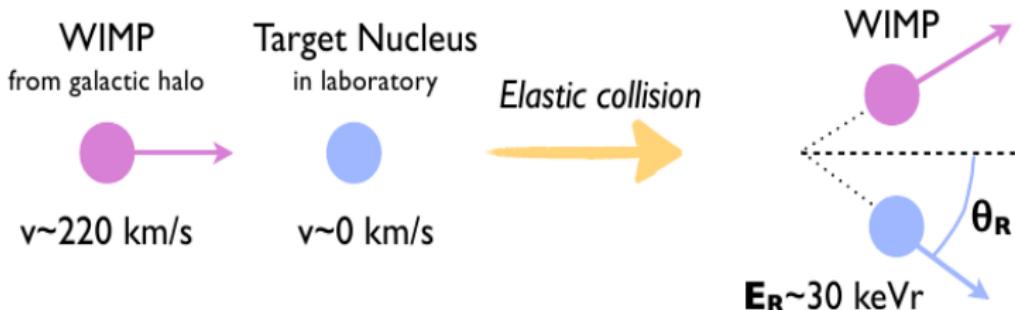
Détection directe de WIMPs



- Énergie typique :
 - $\mathcal{O}(\text{keV})$ à $\mathcal{O}(50 \text{ keV})$
- Taux attendu :
 - $< 1 \text{ evt/kg/an}$
- Contamination radioactive :
 - La plupart des matériaux utilisés ont un taux plus élevé

- Il faut donc :
 - Un seuil expérimental bas
 - Une exposition élevée
 - Des méthodes de réjection du bruit de fond

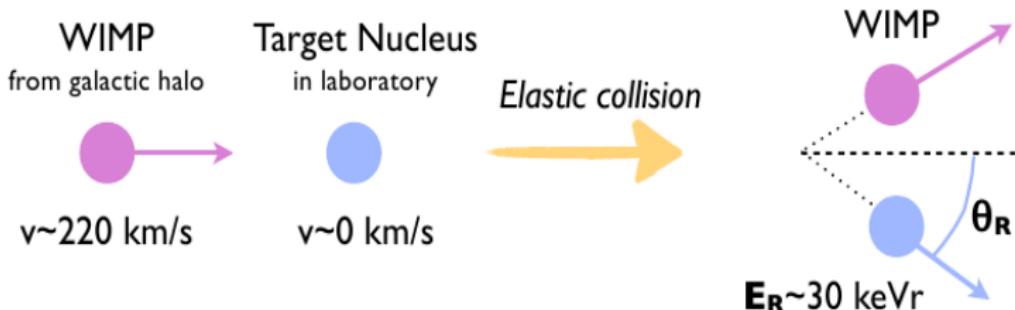
Détection directe de WIMPs



- Énergie typique :
 - $\mathcal{O}(\text{keV})$ à $\mathcal{O}(50 \text{ keV})$
- Taux attendu :
 - $< 1 \text{ evt/kg/an}$
- Contamination radioactive :
 - La plupart des matériaux utilisés ont un taux plus élevé

- Il faut donc :
 - Un seuil expérimental bas
 - Une exposition élevée
 - Des méthodes de réjection du bruit de fond

Détection directe de WIMPs



- Énergie typique :
 - $\mathcal{O}(\text{keV})$ à $\mathcal{O}(50 \text{ keV})$
- Taux attendu :
 - $< 1 \text{ evt/kg/an}$
- Contamination radioactive :
 - La plupart des matériaux utilisés ont un taux plus élevé

- Il faut donc :
 - Un seuil expérimental bas
 - Une exposition élevée
 - Des méthodes de réjection du bruit de fond

L'expérience EDELWEISS

Expérience pour DÉtecter Les WIMPs En Site Souterrain

Expérience pour DÉtecter Les WIMPs En Site Souterrain

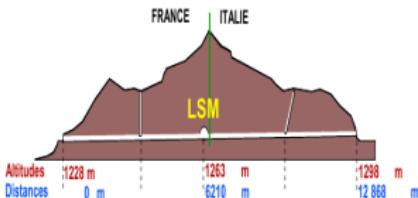


- **Détecteurs :**
 - Germanium ultra-pur.
 - Cryogénie à 20 mK.
- **Au Laboratoire Souterrain de Modane**

Expérience pour DÉtecter Les WIMPs En Site Souterrain



- **DéTECTEURS :**
 - Germanium ultra-pur.
 - Cryogénie à 20 mK.
- **Au Laboratoire Souterrain de Modane**



Bruits de fond attendus

■ Les neutrons

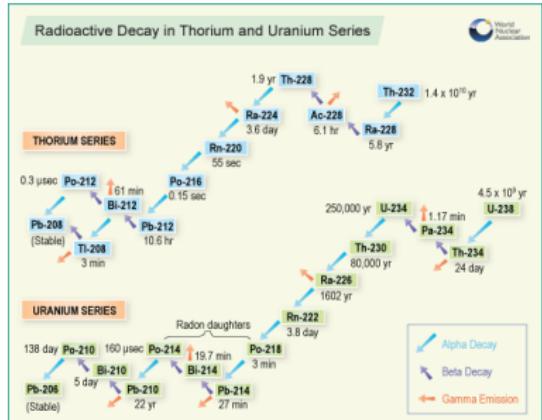
- Génèrent des reculs nucléaires

■ Les gammas

- Origine externe et interne
- Génèrent des reculs électroniques

■ Radioactivité de surface

- Particules γ , α , β et noyaux lourds.
- Interaction en surface du détecteur.



Bruits de fond attendus

■ Les neutrons

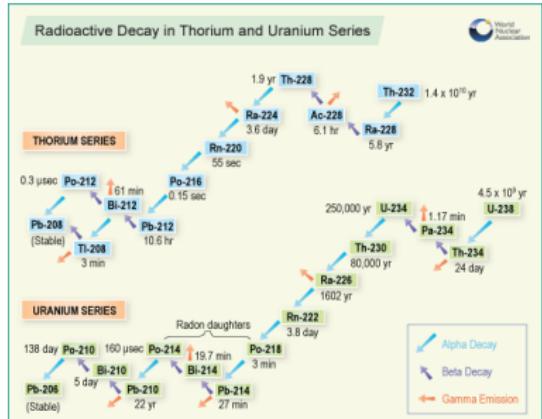
- Génèrent des reculs nucléaires

■ Les gammas

- Origine externe et interne
- Génèrent des reculs électroniques

■ Radioactivité de surface

- Particules γ , α , β et noyaux lourds.
- Interaction en surface du détecteur.



Bruits de fond attendus

■ Les neutrons

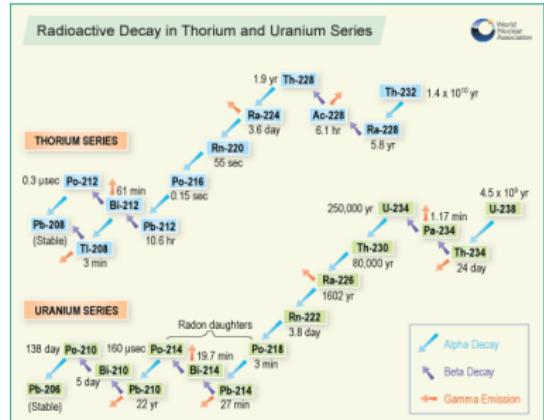
- Génèrent des reculs nucléaires

■ Les gammas

- Origine externe et interne
- Génèrent des reculs électroniques

■ Radioactivité de surface

- Particules γ , α , β et noyaux lourds.
- Interaction en surface du détecteur.



Bruits de fond attendus

■ Les neutrons

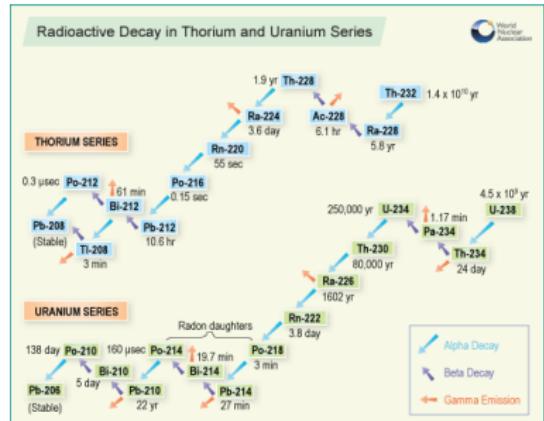
- Génèrent des reculs nucléaires

■ Les gammas

- Origine externe et interne
- Génèrent des reculs électroniques

■ Radioactivité de surface

- Particules γ , α , β et noyaux lourds.
- Interaction en surface du détecteur.



Bruits de fond attendus

■ Les neutrons

- Génèrent des reculs nucléaires

■ Les gammas

- Origine externe et interne
- Génèrent des reculs électroniques

■ Radioactivité de surface

- Particules γ , α , β et noyaux lourds.
- Interaction en surface du détecteur.

Élément	Demi-vie	Énergie de la raie
^{71}Ge	11 jours	10.37 keV, 1.30 keV
^{68}Ge	271 jours	10.37 keV, 1.30 keV
^{68}Ga	68 min	9.66 keV, 1.20 keV
^{65}Zn	244 jours	8.98 keV, 1.10 keV
^{55}Fe	996 jours	6.54 keV
^{68}Ge	312 jours	5.99 keV
^{54}Mn	330 jours	4.97 keV

Bruits de fond attendus

■ Les neutrons

- Génèrent des reculs nucléaires

■ Les gammas

- Origine externe et interne
- Génèrent des reculs électroniques

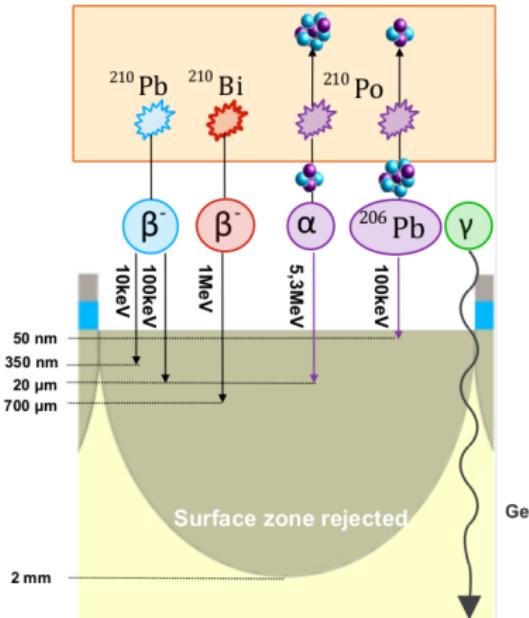
■ Radioactivité de surface

- Particules γ , α , β et noyaux lourds.
- Interaction en surface du détecteur.

Élément	Demi-vie	Énergie de la raie
^{71}Ge	11 jours	10.37 keV, 1.30 keV
^{68}Ge	271 jours	10.37 keV, 1.30 keV
^{68}Ga	68 min	9.66 keV, 1.20 keV
^{65}Zn	244 jours	8.98 keV, 1.10 keV
^{55}Fe	996 jours	6.54 keV
^{68}Ge	312 jours	5.99 keV
^{54}Mn	330 jours	4.97 keV

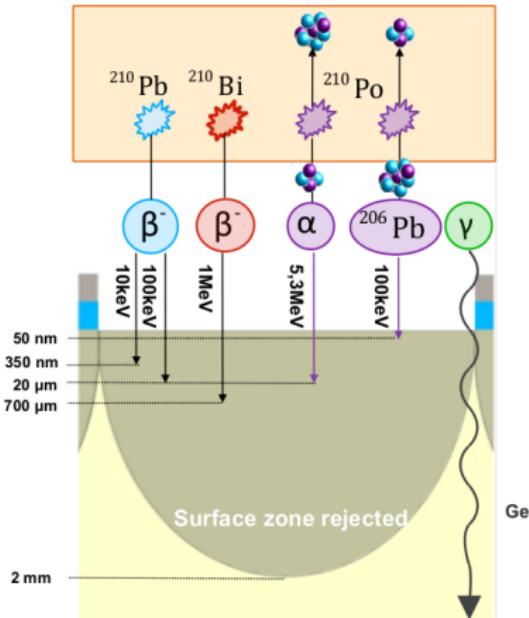
Bruits de fond attendus

- Les neutrons
 - Génèrent des reculs nucléaires
- Les gammas
 - Origine externe et interne
 - Génèrent des reculs électroniques
- Radioactivité de surface
 - Particules γ , α , β et noyaux lourds.
 - Interaction en surface du détecteur.



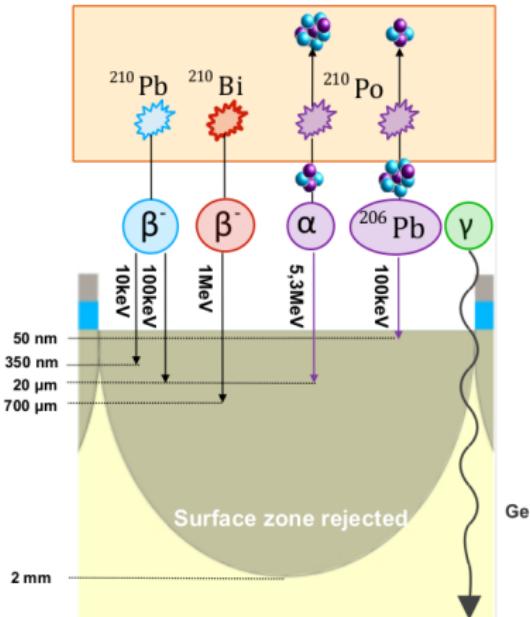
Bruits de fond attendus

- Les neutrons
 - Génèrent des reculs nucléaires
- Les gammas
 - Origine externe et interne
 - Génèrent des reculs électroniques
- Radioactivité de surface
 - Particules γ , α , β et noyaux lourds.
 - Interaction en surface du détecteur.



Bruits de fond attendus

- Les neutrons
 - Génèrent des reculs nucléaires
- Les gammas
 - Origine externe et interne
 - Génèrent des reculs électroniques
- Radioactivité de surface
 - Particules γ , α , β et noyaux lourds.
 - Interaction en surface du détecteur.



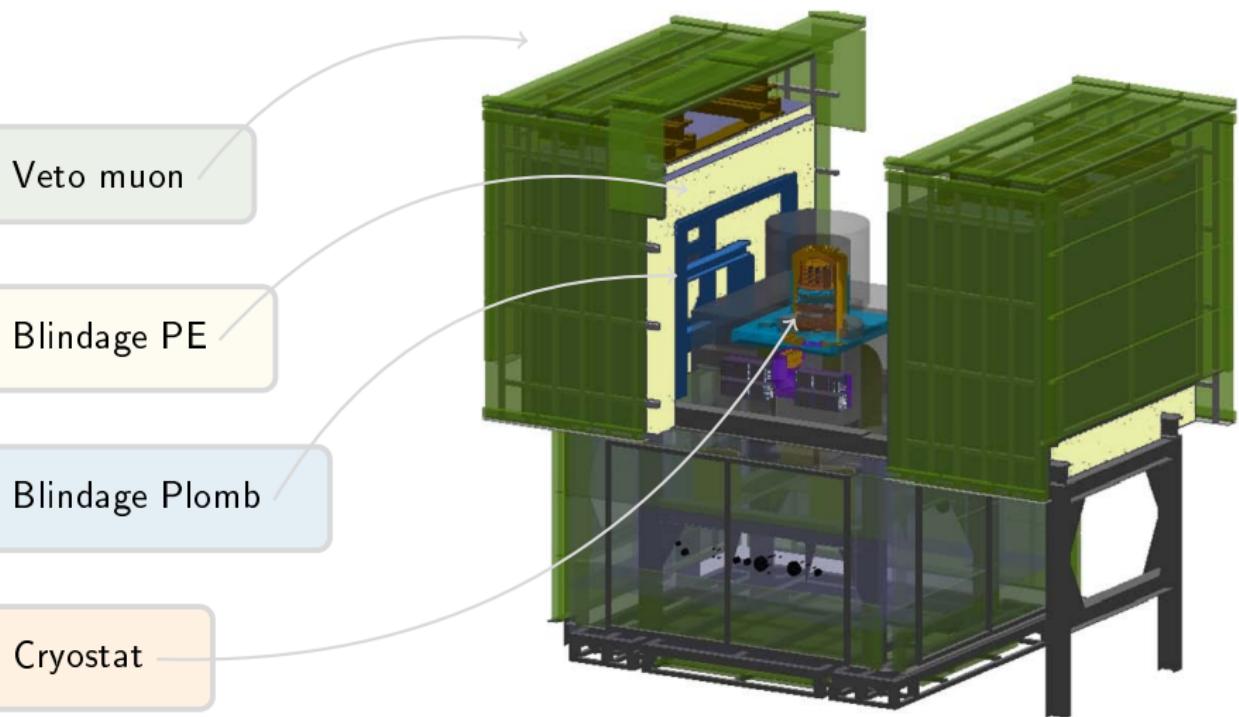
- Les bruits de fond sont nombreux et perturbent l'identification du signal. Comment limiter leur effet ?
 - Utilisation de blindages et de matériaux purs
 - Discrimination événement de surface / événement de volume (ou fiduciel)
 - Discrimination recul nucléaire / recul électronique

- Les bruits de fond sont nombreux et perturbent l'identification du signal. Comment limiter leur effet ?
 - Utilisation de blindages et de matériaux purs
 - Discrimination événement de surface / événement de volume (ou fiduciel)
 - Discrimination recul nucléaire / recul électronique

- Les bruits de fond sont nombreux et perturbent l'identification du signal. Comment limiter leur effet ?
 - Utilisation de blindages et de matériaux purs
 - Discrimination événement de surface / événement de volume (ou fiduciel)
 - Discrimination recul nucléaire / recul électronique

- Les bruits de fond sont nombreux et perturbent l'identification du signal. Comment limiter leur effet ?
 - Utilisation de blindages et de matériaux purs
 - Discrimination événement de surface / événement de volume (ou fiduciel)
 - Discrimination recul nucléaire / recul électronique

Dispositif général



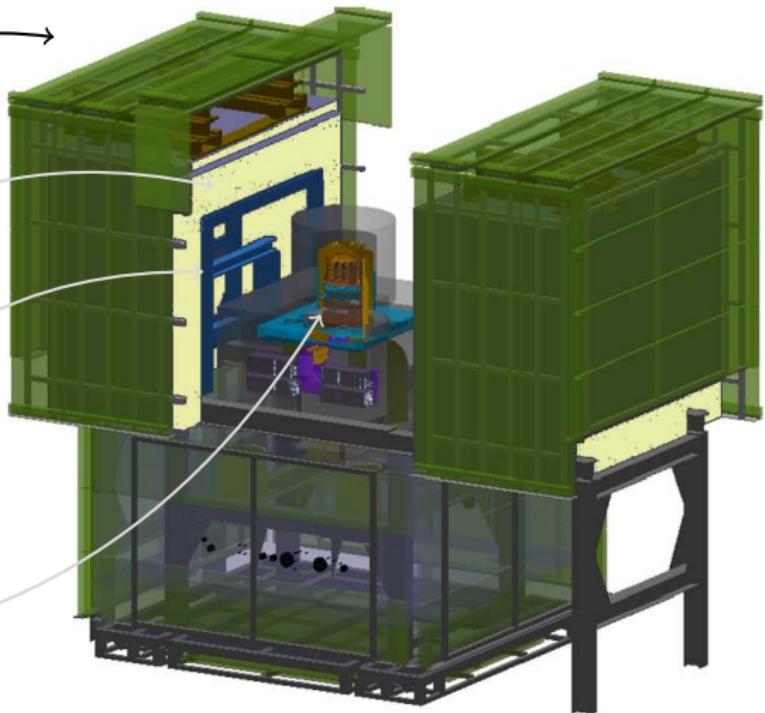
Dispositif général

Veto muon

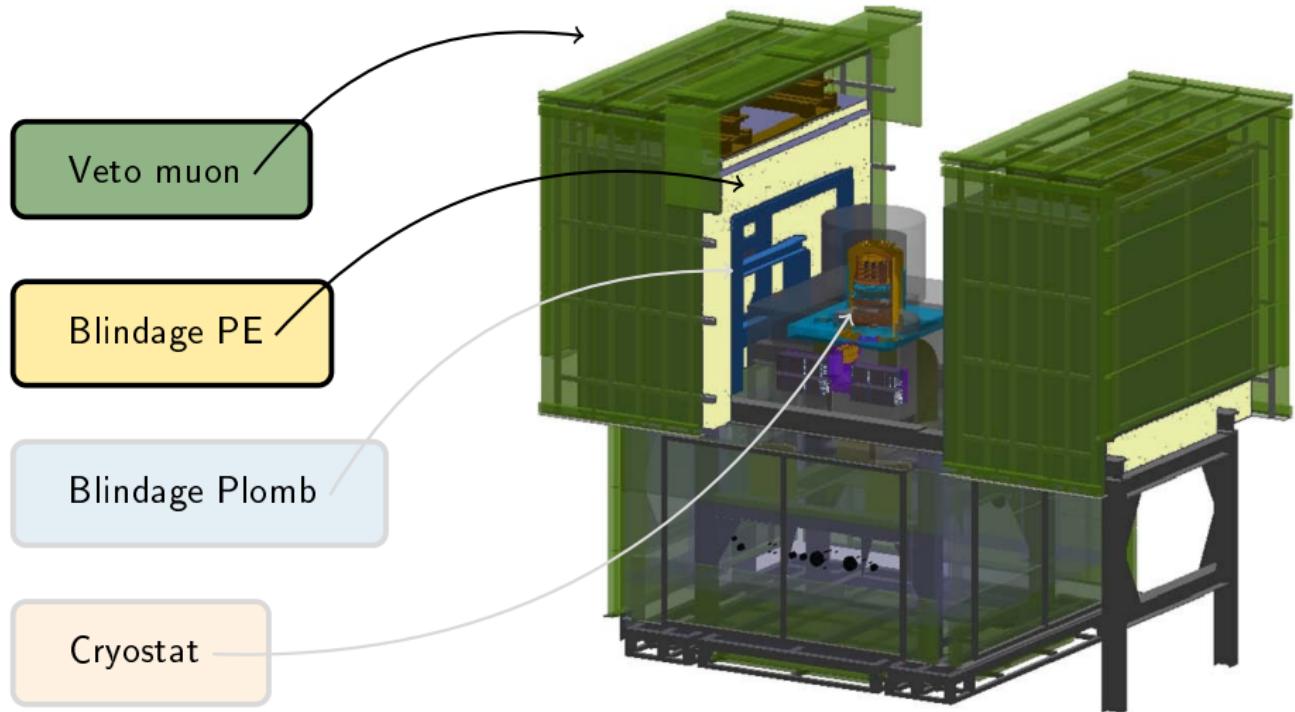
Blindage PE

Blindage Plomb

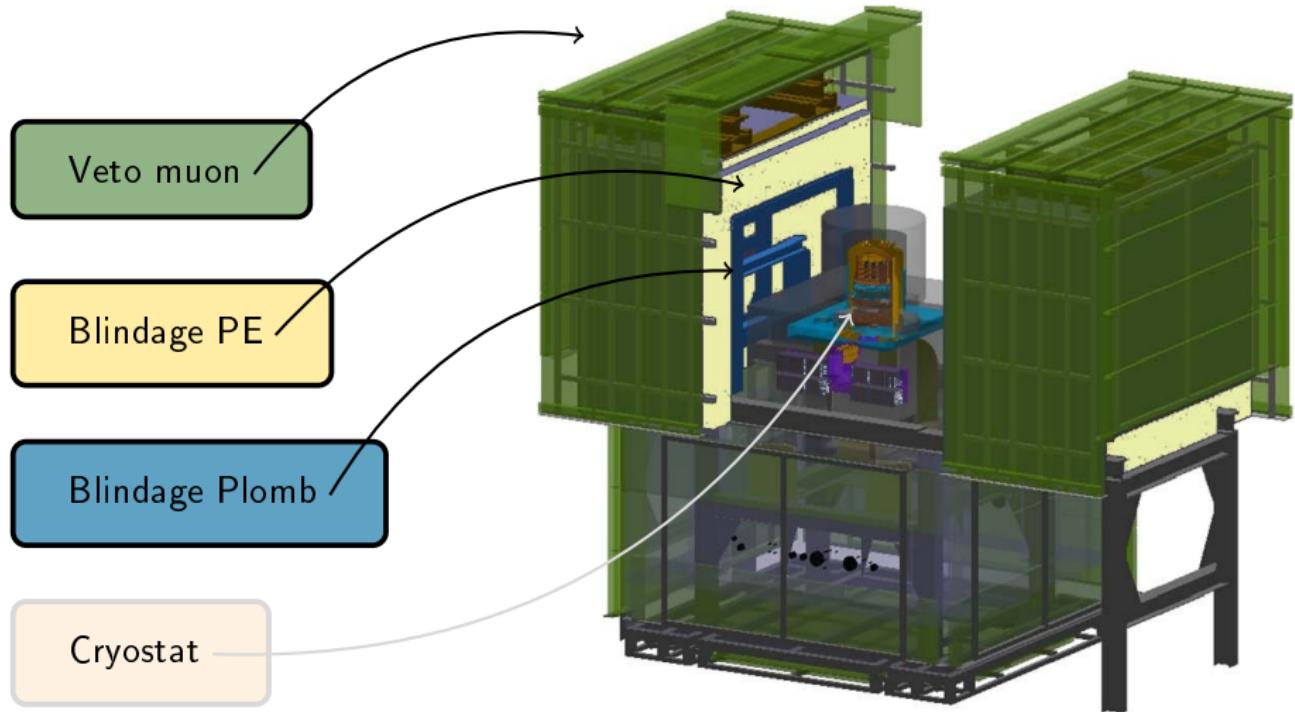
Cryostat



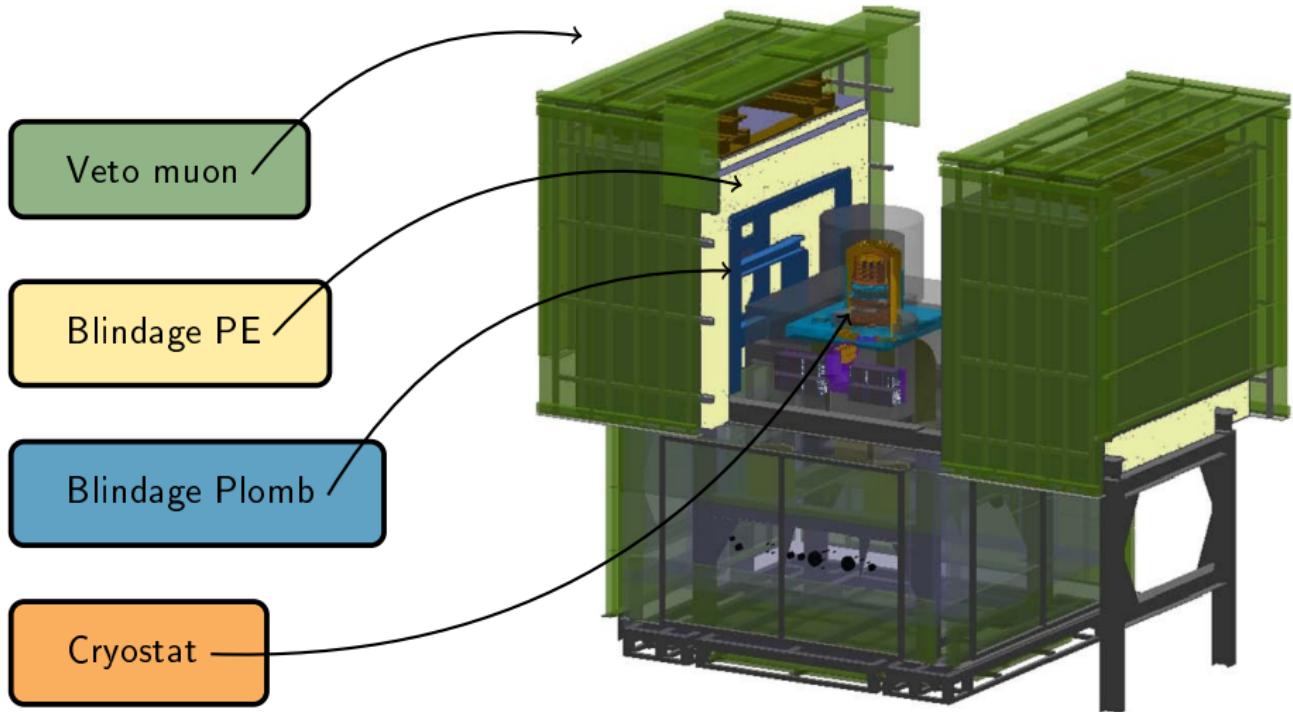
Dispositif général



Dispositif général



Dispositif général



Les détecteurs

- Les détecteurs EDELWEISS réalisent une double mesure :

- Signal chaleur
 - Signal ionisation

- Cette double mesure permet de calculer le rendement d'ionisation Q :

$$Q = \frac{E_{\text{ionisation}}}{E_{\text{recul}}}$$

- Q dépend du type de recul
 - $Q=1$ par construction pour des reculs électroniques
 - $Q \approx 0.3$ pour des reculs nucléaires



Les détecteurs

- Les détecteurs EDELWEISS réalisent une double mesure :

- Signal chaleur
 - Signal ionisation

- Cette double mesure permet de calculer le rendement d'ionisation Q :

$$Q = \frac{E_{\text{ionisation}}}{E_{\text{recul}}}$$

- Q dépend du type de recul
 - $Q=1$ par construction pour des reculs électroniques
 - $Q \approx 0.3$ pour des reculs nucléaires



Les détecteurs

- Les détecteurs EDELWEISS réalisent une double mesure :

- Signal chaleur
 - Signal ionisation

- Cette double mesure permet de calculer le rendement d'ionisation Q :

$$Q = \frac{E_{\text{ionisation}}}{E_{\text{recul}}}$$

- Q dépend du type de recul
 - $Q=1$ par construction pour des reculs électroniques
 - $Q \approx 0.3$ pour des reculs nucléaires



Les détecteurs

- Les détecteurs EDELWEISS réalisent une double mesure :

- Signal chaleur
 - Signal ionisation

- Cette double mesure permet de calculer le rendement d'ionisation Q :

$$Q = \frac{E_{\text{ionisation}}}{E_{\text{recul}}}$$

- Q dépend du type de recul
 - $Q=1$ par construction pour des reculs électroniques
 - $Q \approx 0.3$ pour des reculs nucléaires



Les détecteurs

- Les détecteurs EDELWEISS réalisent une double mesure :

- Signal chaleur
 - Signal ionisation

- Cette double mesure permet de calculer le rendement d'ionisation Q :

$$Q = \frac{E_{\text{ionisation}}}{E_{\text{recul}}}$$

- Q dépend du type de recul

- $Q=1$ par construction pour des reculs électroniques
 - $Q \approx 0.3$ pour des reculs nucléaires



Les détecteurs

- Les détecteurs EDELWEISS réalisent une double mesure :

- Signal chaleur
 - Signal ionisation

- Cette double mesure permet de calculer le rendement d'ionisation Q :

$$Q = \frac{E_{\text{ionisation}}}{E_{\text{recul}}}$$

- Q dépend du type de recul

- $Q=1$ par construction pour des reculs électroniques
 - $Q \approx 0.3$ pour des reculs nucléaires



Les détecteurs

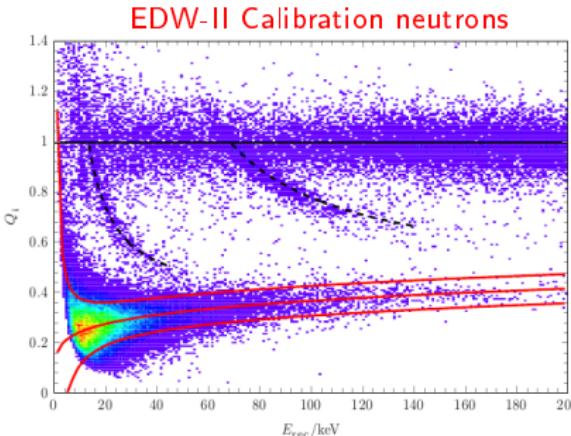
- Les détecteurs EDELWEISS réalisent une double mesure :

- Signal chaleur
 - Signal ionisation

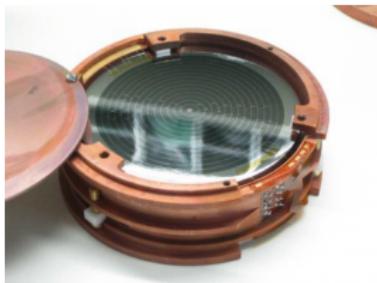
- Cette double mesure permet de calculer le rendement d'ionisation Q :

$$Q = \frac{E_{\text{ionisation}}}{E_{\text{recul}}}$$

- Q dépend du type de recul
 - $Q=1$ par construction pour des reculs électroniques
 - $Q \approx 0.3$ pour des reculs nucléaires

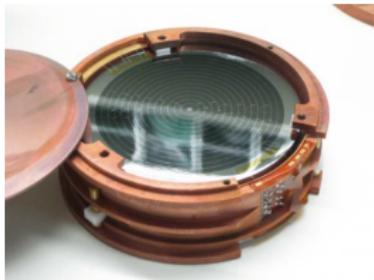


Voie ionisation et fiducialisation



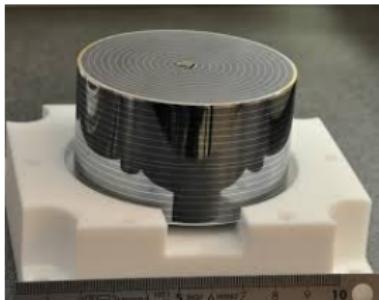
■ EDELWEISS-II (10 détecteurs)

- 400 g, avec une masse fiduciale de 160 g.
- 1 voie chaleur.
- 2 collectrices, 2 vetos, 2 gardes sur les côtés.



■ EDELWEISS-II (10 détecteurs)

- 400 g, avec une masse fiduciale de 160 g.
- 1 voie chaleur.
- 2 collectrices, 2 vetos, 2 gardes sur les côtés.



■ EDELWEISS-III (24 détecteurs)

- 800 g, avec une masse fiduciale de 600 g.
- 2 voies chaleur.
- 2 collectrices, 2 vetos sur toute la surface du détecteur.

Recherches d'axions avec EDELWEISS-II

■ Introduction théorique.

- Le lagrangien de QCD inclut un terme violant la symétrie CP :

$$\mathcal{L}_\Theta = \Theta \left(\frac{\alpha_s}{8\pi} \right) G^{\mu\nu a} \bar{G}_{\mu\nu}^a$$

- Expérimentalement, $|\Theta| \lesssim 10^{-10}$ alors que $\Theta \approx \mathcal{O}(1)$ est parfaitement satisfaisant. C'est un problème de *fine-tuning*.
- L'introduction d'une nouvelle symétrie $\mathcal{U}(1)$, brisée spontanément conduit à l'émergence d'un nouveau champ, l'axion.
- Θ et des phénomènes non-perturbatifs induisent un potentiel pour l'axion :

$$\mathcal{L} = \left(\Theta - \frac{\phi_A}{f_A} \right) \left(\frac{\alpha_s}{8\pi} \right) G^{\mu\nu a} \bar{G}_{\mu\nu}^a$$

- Minimisation du potentiel \Rightarrow annulation terme de violation CP.

■ Introduction théorique.

- Le lagrangien de QCD inclut un terme violent la symétrie CP :

$$\mathcal{L}_\Theta = \Theta \left(\frac{\alpha_s}{8\pi} \right) G^{\mu\nu a} \bar{G}_{\mu\nu}^a \quad \begin{matrix} \textcolor{red}{\alpha_s : \text{constante de couplage forte}} \\ \textcolor{red}{G : \text{tenseur de couleur}} \end{matrix}$$

- Expérimentalement, $|\Theta| \lesssim 10^{-10}$ alors que $\Theta \approx \mathcal{O}(1)$ est parfaitement satisfaisant. C'est un problème de *fine-tuning*.
- L'introduction d'une nouvelle symétrie $\mathcal{U}(1)$, brisée spontanément conduit à l'émergence d'un nouveau champ, l'axion.
- Θ et des phénomènes non-perturbatifs induisent un potentiel pour l'axion :

$$\mathcal{L} = \left(\Theta - \frac{\phi_A}{f_A} \right) \left(\frac{\alpha_s}{8\pi} \right) G^{\mu\nu a} \bar{G}_{\mu\nu}^a$$

- Minimisation du potentiel \Rightarrow annulation terme de violation CP.

■ Introduction théorique.

- Le lagrangien de QCD inclut un terme violent la symétrie CP :

$$\mathcal{L}_\Theta = \Theta \left(\frac{\alpha_s}{8\pi} \right) G^{\mu\nu a} \bar{G}_{\mu\nu}^a \quad \begin{matrix} \textcolor{red}{\alpha_s : \text{constante de couplage forte}} \\ \textcolor{red}{G : \text{tenseur de couleur}} \end{matrix}$$

- Expérimentalement, $|\Theta| \lesssim 10^{-10}$ alors que $\Theta \approx \mathcal{O}(1)$ est parfaitement satisfaisant. C'est un problème de *fine-tuning*.
- L'introduction d'une nouvelle symétrie $\mathcal{U}(1)$, brisée spontanément conduit à l'émergence d'un nouveau champ, l'axion.
- Θ et des phénomènes non-perturbatifs induisent un potentiel pour l'axion :

$$\mathcal{L} = \left(\Theta - \frac{\phi_A}{f_A} \right) \left(\frac{\alpha_s}{8\pi} \right) G^{\mu\nu a} \bar{G}_{\mu\nu}^a$$

- Minimisation du potentiel \Rightarrow annulation terme de violation CP.

■ Introduction théorique.

- Le lagrangien de QCD inclut un terme violent la symétrie CP :

$$\mathcal{L}_\Theta = \Theta \left(\frac{\alpha_s}{8\pi} \right) G^{\mu\nu a} \bar{G}_{\mu\nu}^a \quad \begin{matrix} \textcolor{red}{\alpha_s : \text{constante de couplage forte}} \\ \textcolor{red}{G : \text{tenseur de couleur}} \end{matrix}$$

- Expérimentalement, $|\Theta| \lesssim 10^{-10}$ alors que $\Theta \approx \mathcal{O}(1)$ est parfaitement satisfaisant. C'est un problème de *fine-tuning*.
- L'introduction d'une nouvelle symétrie $\mathcal{U}(1)$, brisée spontanément conduit à l'émergence d'un nouveau champ, l'axion.
- Θ et des phénomènes non-perturbatifs induisent un potentiel pour l'axion :

$$\mathcal{L} = \left(\Theta - \frac{\phi_A}{f_A} \right) \left(\frac{\alpha_s}{8\pi} \right) G^{\mu\nu a} \bar{G}_{\mu\nu}^a$$

- Minimisation du potentiel \Rightarrow annulation terme de violation CP.

■ Introduction théorique.

- Le lagrangien de QCD inclut un terme violent la symétrie CP :

$$\mathcal{L}_\Theta = \Theta \left(\frac{\alpha_s}{8\pi} \right) G^{\mu\nu a} \bar{G}_{\mu\nu}^a \quad \begin{matrix} \textcolor{red}{\alpha_s : \text{constante de couplage forte}} \\ \textcolor{red}{G : \text{tenseur de couleur}} \end{matrix}$$

- Expérimentalement, $|\Theta| \lesssim 10^{-10}$ alors que $\Theta \approx \mathcal{O}(1)$ est parfaitement satisfaisant. C'est un problème de *fine-tuning*.
- L'introduction d'une nouvelle symétrie $\mathcal{U}(1)$, brisée spontanément conduit à l'émergence d'un nouveau champ, l'axion.
- Θ et des phénomènes non-perturbatifs induisent un potentiel pour l'axion :

$$\mathcal{L} = \left(\Theta - \frac{\phi_A}{f_A} \right) \left(\frac{\alpha_s}{8\pi} \right) G^{\mu\nu a} \bar{G}_{\mu\nu}^a \quad \begin{matrix} \textcolor{red}{\phi_A : \text{champ axionique}} \\ \textcolor{red}{f_A : \text{constante de désintégration}} \end{matrix}$$

- Minimisation du potentiel \Rightarrow annulation terme de violation CP.

■ Introduction théorique.

- Le lagrangien de QCD inclut un terme violent la symétrie CP :

$$\mathcal{L}_\Theta = \Theta \left(\frac{\alpha_s}{8\pi} \right) G^{\mu\nu a} \bar{G}_{\mu\nu}^a$$

α_S : constante de couplage forte
 G : tenseur de couleur

- Expérimentalement, $|\Theta| \lesssim 10^{-10}$ alors que $\Theta \approx \mathcal{O}(1)$ est parfaitement satisfaisant. C'est un problème de *fine-tuning*.
- L'introduction d'une nouvelle symétrie $\mathcal{U}(1)$, brisée spontanément conduit à l'émergence d'un nouveau champ, l'axion.
- Θ et des phénomènes non-perturbatifs induisent un potentiel pour l'axion :

$$\mathcal{L} = \left(\Theta - \frac{\phi_A}{f_A} \right) \left(\frac{\alpha_s}{8\pi} \right) G^{\mu\nu a} \bar{G}_{\mu\nu}^a$$

ϕ_A : champ axionique
 f_A : constante de désintégration

- Minimisation du potentiel \Rightarrow annulation terme de violation CP.

■ Introduction théorique (II)

- L'axion acquiert une masse :

$$m_a \approx 10^{-6} \text{ eV} \left(\frac{10^{12} \text{ GeV}}{f_A} \right)$$

- Il peut se coupler avec des particules connues : $\mathcal{L} \sim g_{A\gamma} \times \mathbf{E} \cdot \mathbf{B} \phi_A$
idem g_{Ae}, g_{AN} .
- Leur contribution Ω_a à la densité de matière peut s'écrire :

$$\Omega_a \approx \left(\frac{f_A}{10^{12} \text{ GeV}} \right)^{7/6} \theta_1^2$$

- D'autres particules, avec des propriétés similaires, sont prédites par la théorie des cordes : les ALPs (Axion-Like Particles).

■ Introduction théorique (II)

- L'axion acquiert une masse :

$$m_a \approx 10^{-6} \text{ eV} \left(\frac{10^{12} \text{ GeV}}{f_A} \right)$$

- Il peut se coupler avec des particules connues : $\mathcal{L} \sim g_{A\gamma} \times \mathbf{E} \cdot \mathbf{B} \phi_A$
idem g_{Ae}, g_{AN} .
- Leur contribution Ω_a à la densité de matière peut s'écrire :

$$\Omega_a \approx \left(\frac{f_A}{10^{12} \text{ GeV}} \right)^{7/6} \theta_1^2$$

- D'autres particules, avec des propriétés similaires, sont prédites par la théorie des cordes : les ALPs (Axion-Like Particles).

■ Introduction théorique (II)

- L'axion acquiert une masse :

$$m_a \approx 10^{-6} \text{ eV} \left(\frac{10^{12} \text{ GeV}}{f_A} \right)$$

- Il peut se coupler avec des particules connues : $\mathcal{L} \sim g_{A\gamma} \times \mathbf{E} \cdot \mathbf{B} \phi_A$
idem g_{Ae}, g_{AN} .
 - Leur contribution Ω_a à la densité de matière peut s'écrire :
- $$\Omega_a \approx \left(\frac{f_A}{10^{12} \text{ GeV}} \right)^{7/6} \theta_1^2$$
- D'autres particules, avec des propriétés similaires, sont prédites par la théorie des cordes : les ALPs (Axion-Like Particles).

■ Introduction théorique (II)

- L'axion acquiert une masse :

$$m_a \approx 10^{-6} \text{ eV} \left(\frac{10^{12} \text{ GeV}}{f_A} \right)$$

- Il peut se coupler avec des particules connues : $\mathcal{L} \sim g_{A\gamma} \times \mathbf{E} \cdot \mathbf{B} \phi_A$
idem g_{Ae}, g_{AN} .
- Leur contribution Ω_a à la densité de matière peut s'écrire :

$$\Omega_a \approx \left(\frac{f_A}{10^{12} \text{ GeV}} \right)^{7/6} \theta_1^2$$

θ_1 : conditions initiales
dans le potentiel QCD

- D'autres particules, avec des propriétés similaires, sont prédites par la théorie des cordes : les ALPs (Axion-Like Particles).

■ Introduction théorique (II)

- L'axion acquiert une masse :

$$m_a \approx 10^{-6} \text{ eV} \left(\frac{10^{12} \text{ GeV}}{f_A} \right)$$

- Il peut se coupler avec des particules connues : $\mathcal{L} \sim g_{A\gamma} \times \mathbf{E} \cdot \mathbf{B} \phi_A$
idem g_{Ae}, g_{AN} .
- Leur contribution Ω_a à la densité de matière peut s'écrire :

$$\Omega_a \approx \left(\frac{f_A}{10^{12} \text{ GeV}} \right)^{7/6} \theta_1^2$$

θ_1 : conditions initiales
dans le potentiel QCD

- D'autres particules, avec des propriétés similaires, sont prédites par la théorie des cordes : les ALPs (Axion-Like Particles).

■ Les axions et EDELWEISS

- EDELWEISS peut détecter des reculs électroniques induits par les axions.
- Approche modèle-indépendante : résultats applicables à tout axion ou ALP.
- Deux types de sources :
 - Axions produits dans le soleil
 - Axions matière noire dans le halo.
- Deux mécanismes de détection :
 - L'effet axio-électrique (équivalent du photo-électrique).
 - L'effet Primakoff (conversion d'un axion en photon dans le détecteur).

■ Les axions et EDELWEISS

- EDELWEISS peut détecter des reculs électroniques induits par les axions.
- Approche modèle-indépendante : résultats applicables à tout axion ou ALP.
- Deux types de sources :
 - Axions produits dans le soleil
 - Axions matière noire dans le halo.
- Deux mécanismes de détection :
 - L'effet axio-électrique (équivalent du photo-électrique).
 - L'effet Primakoff (conversion d'un axion en photon dans le détecteur).

■ Les axions et EDELWEISS

- EDELWEISS peut détecter des reculs électroniques induits par les axions.
- Approche modèle-indépendante : résultats applicables à tout axion ou ALP.
- Deux types de sources :
 - Axions produits dans le soleil
 - Axions matière noire dans le halo.
- Deux mécanismes de détection :
 - L'effet axio-électrique (équivalent du photo-électrique).
 - L'effet Primakoff (conversion d'un axion en photon dans le détecteur).

■ Les axions et EDELWEISS

- EDELWEISS peut détecter des reculs électroniques induits par les axions.
- Approche modèle-indépendante : résultats applicables à tout axion ou ALP.
- Deux types de sources :
 - Axions produits dans le soleil
 - Axions matière noire dans le halo.
- Deux mécanismes de détection :
 - L'effet axio-électrique (équivalent du photo-électrique).
 - L'effet Primakoff (conversion d'un axion en photon dans le détecteur).

■ Les axions et EDELWEISS

- EDELWEISS peut détecter des reculs électroniques induits par les axions.
- Approche modèle-indépendante : résultats applicables à tout axion ou ALP.
- Deux types de sources :
 - Axions produits dans le soleil
 - Axions matière noire dans le halo.
- Deux mécanismes de détection :
 - L'effet axio-électrique (équivalent du photo-électrique).
 - L'effet Primakoff (conversion d'un axion en photon dans le détecteur).

■ Les axions et EDELWEISS

- EDELWEISS peut détecter des reculs électroniques induits par les axions.
- Approche modèle-indépendante : résultats applicables à tout axion ou ALP.
- Deux types de sources :
 - Axions produits dans le soleil
 - Axions matière noire dans le halo.
- Deux mécanismes de détection :
 - L'effet axio-électrique (équivalent du photo-électrique).
 - L'effet Primakoff (conversion d'un axion en photon dans le détecteur).

■ Les axions et EDELWEISS

- EDELWEISS peut détecter des reculs électroniques induits par les axions.
- Approche modèle-indépendante : résultats applicables à tout axion ou ALP.
- Deux types de sources :
 - Axions produits dans le soleil
 - Axions matière noire dans le halo.
- Deux mécanismes de détection :
 - L'effet axio-électrique (équivalent du photo-électrique).
 - L'effet Primakoff (conversion d'un axion en photon dans le détecteur).

■ Les axions et EDELWEISS

- EDELWEISS peut détecter des reculs électroniques induits par les axions.
- Approche modèle-indépendante : résultats applicables à tout axion ou ALP.
- Deux types de sources :
 - Axions produits dans le soleil
 - Axions matière noire dans le halo.
- Deux mécanismes de détection :
 - L'effet axio-électrique (équivalent du photo-électrique).
 - L'effet Primakoff (conversion d'un axion en photon dans le détecteur).

■ Les axions et EDELWEISS

- EDELWEISS peut détecter des reculs électroniques induits par les axions.
- Approche modèle-indépendante : résultats applicables à tout axion ou ALP.
- Deux types de sources :
 - Axions produits dans le soleil
 - Axions matière noire dans le halo.
- Deux mécanismes de détection :
 - L'effet axio-électrique (équivalent du photo-électrique).
 - L'effet Primakoff (conversion d'un axion en photon dans le détecteur).

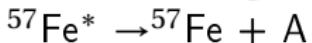
■ Résumé 4 canaux d'analyse

■ Résumé 4 canaux d'analyse

Mécanisme de production	Mécanisme de détection	Couplages
Production Primakoff dans le soleil	Détection Primakoff	$g_{A\gamma}^4$
Production CBRD dans le soleil	Détection axio-électrique	g_{Ae}^4
Production ^{57}Fe dans le soleil	Détection axio-électrique	$g_{AN}^2 \times g_{Ae}^2$
Axion matière noire	Détection axio-électrique	g_{Ae}^2

Productions d'axions solaires

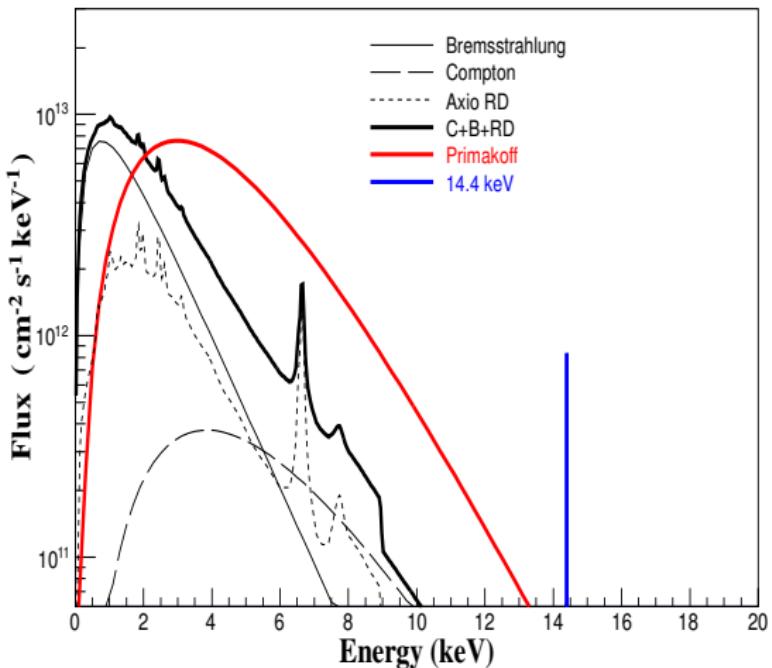
■ Transition magnétique :



■ CBRD :

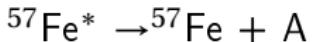


■ Effet Primakoff :

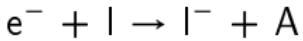
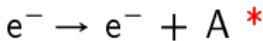
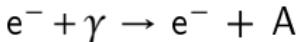


Productions d'axions solaires

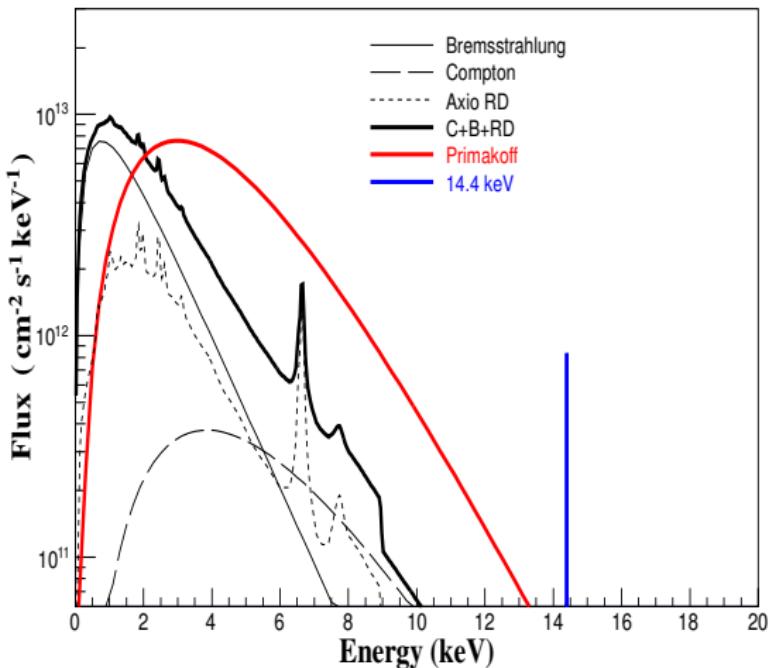
■ Transition magnétique :



■ CBRD :



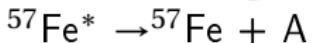
■ Effet Primakoff :



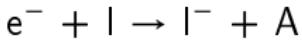
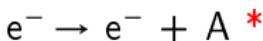
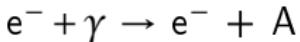
* : en présence de particules chargées

Productions d'axions solaires

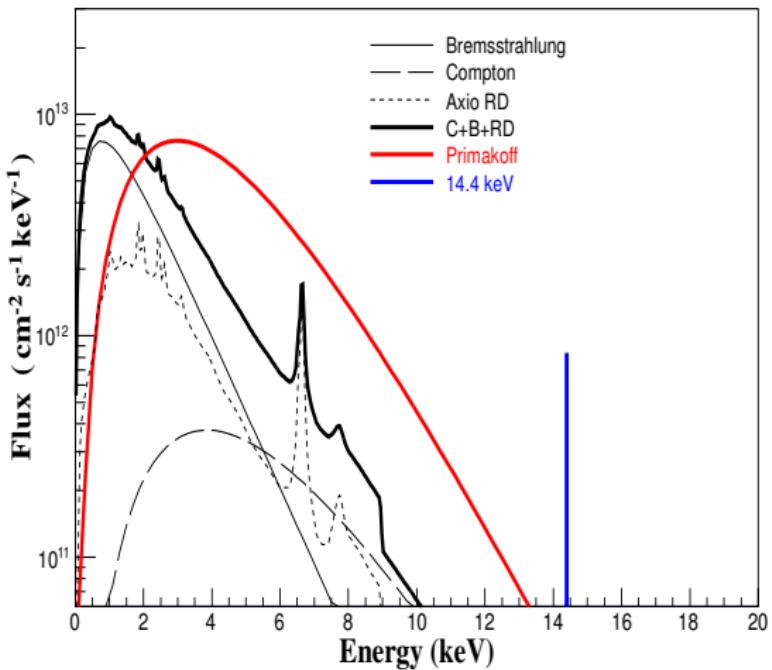
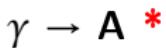
- Transition magnétique :



- CBRD :



- Effet Primakoff :



* : en présence de particules chargées

■ Effet Primakoff inverse

- $A \rightarrow \gamma^*$
- La longueur d'onde d'un axion solaire est du même ordre de grandeur que la distance interatomique : diffraction de Bragg.

■ Effet Primakoff inverse

- $A \rightarrow \gamma^*$

* : dans le champ électrique du détecteur

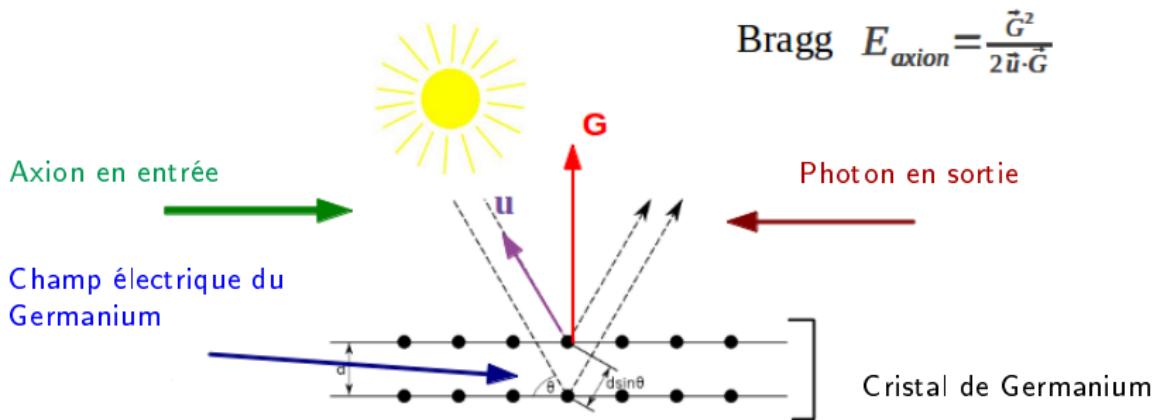
- La longueur d'onde d'un axion solaire est du même ordre de grandeur que la distance interatomique : diffraction de Bragg.

■ Effet Primakoff inverse

- $A \rightarrow \gamma^*$ * : dans le champ électrique du détecteur
- La longueur d'onde d'un axion solaire est du même ordre de grandeur que la distance interatomique : diffraction de Bragg.

■ Effet Primakoff inverse

- $A \rightarrow \gamma^*$ * : dans le champ électrique du détecteur
- La longueur d'onde d'un axion solaire est du même ordre de grandeur que la distance interatomique : diffraction de Bragg.



■ Taux d'événement attendu dans le détecteur

$$\begin{aligned} R(\tilde{E}, t, \alpha) &= 2(2\pi)^3 \frac{V}{v_a^2} \sum_G \frac{d\phi}{dE_a} \frac{g_{A\gamma}^2}{16\pi^2} \sin(2\theta)^2 \frac{1}{|\mathbf{G}|^2} \left| S(\mathbf{G}) F_A^0(\mathbf{G}) \right|^2 e^{-\frac{(\tilde{E}-E_\gamma)^2}{2\Delta^2}} \\ &= \left(\frac{g_{A\gamma} \times 10^8}{\text{GeV}^{-1}} \right)^4 \bar{R}(\tilde{E}, t, \alpha) := \lambda \bar{R}(\tilde{E}, t, \alpha) \end{aligned}$$

■ Taux d'événement attendu dans le détecteur

$$\begin{aligned}
 R(\tilde{E}, t, \alpha) &= 2(2\pi)^3 \frac{V}{v_a^2} \sum_G \frac{d\phi}{dE_a} \frac{g_{A\gamma}^2}{16\pi^2} \sin(2\theta)^2 \frac{1}{|\mathbf{G}|^2} \left| S(\mathbf{G}) F_A^0(\mathbf{G}) \right|^2 e^{-\frac{(\tilde{E}-E_\gamma)^2}{2\Delta^2}} \\
 &= \left(\frac{g_{A\gamma} \times 10^8}{\text{GeV}^{-1}} \right)^4 \bar{R}(\tilde{E}, t, \alpha) := \lambda \bar{R}(\tilde{E}, t, \alpha)
 \end{aligned}$$

■ Taux d'événement attendu dans le détecteur

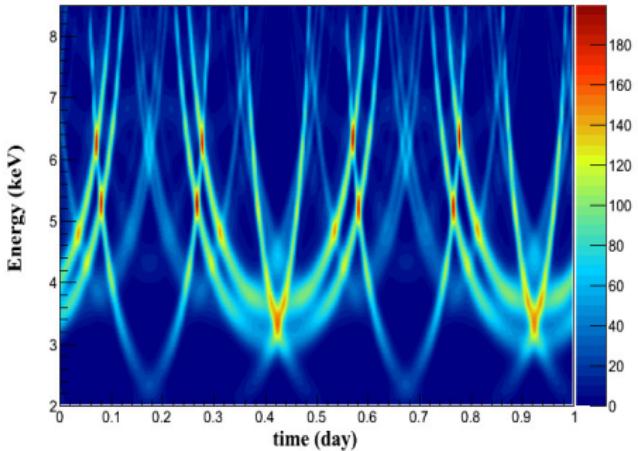
$$\begin{aligned}
 R(\tilde{E}, t, \alpha) &= 2(2\pi)^3 \frac{V}{v_a^2} \sum_G \frac{d\phi}{dE_a} \frac{g_{A\gamma}^2}{16\pi^2} \sin(2\theta)^2 \frac{1}{|\mathbf{G}|^2} \left| S(\mathbf{G}) F_A^0(\mathbf{G}) \right|^2 e^{-\frac{(\tilde{E}-E_\gamma)^2}{2\Delta^2}} \\
 &= \left(\frac{g_{A\gamma} \times 10^8}{\text{GeV}^{-1}} \right)^4 \bar{R}(\tilde{E}, t, \alpha) := \lambda \bar{R}(\tilde{E}, t, \alpha)
 \end{aligned}$$

■ Taux d'événement attendu dans le détecteur

$$\begin{aligned}
 R(\tilde{E}, t, \alpha) &= 2(2\pi)^3 \frac{V}{v_a^2} \sum_G \frac{d\phi}{dE_a} \frac{g_{A\gamma}^2}{16\pi^2} \sin(2\theta)^2 \frac{1}{|\mathbf{G}|^2} \left| S(\mathbf{G}) F_A^0(\mathbf{G}) \right|^2 e^{-\frac{(\tilde{E}-E_\gamma)^2}{2\Delta^2}} \\
 &\quad \text{flux solaire} \qquad \qquad \qquad \text{cristallographie} \qquad \qquad \text{résolution du détecteur} \\
 &= \left(\frac{g_{A\gamma} \times 10^8}{\text{GeV}^{-1}} \right)^4 \bar{R}(\tilde{E}, t, \alpha) := \lambda \bar{R}(\tilde{E}, t, \alpha)
 \end{aligned}$$

■ Taux d'événement attendu dans le détecteur

$$\begin{aligned}
 R(\tilde{E}, t, \alpha) &= 2(2\pi)^3 \frac{V}{v_a^2} \sum_G \frac{d\phi}{dE_a} \frac{g_{A\gamma}^2}{16\pi^2} \sin(2\theta)^2 \frac{1}{|\mathbf{G}|^2} \left| S(\mathbf{G}) F_A^0(\mathbf{G}) \right|^2 e^{-\frac{(\tilde{E}-E_\gamma)^2}{2\Delta^2}} \\
 &\quad \text{flux solaire} \qquad \qquad \qquad \text{cristallographie} \qquad \qquad \qquad \text{résolution du détecteur} \\
 &= \left(\frac{g_{A\gamma} \times 10^8}{\text{GeV}^{-1}} \right)^4 \bar{R}(\tilde{E}, t, \alpha) := \lambda \bar{R}(\tilde{E}, t, \alpha)
 \end{aligned}$$



Sélection des données

- Données d'EDELWEISS-II acquises avec 10 détecteurs de 400 g entre 2009 et 2010.
- Coupures qualité (Chi2, lignes de base) + sélection des reculs fiducielles électroniques.
- Estimateur d'énergie : $\tilde{E} = w_c EC + w_f EFID$.
- 448 kg.jour d'exposition
- Masse fiduciale : 160g.
Efficacité des autres coupures
 $> 95\%$.
- FWHM moyenne = 0.55 keV
- Seuil fixé par l'efficacité de déclenchement.

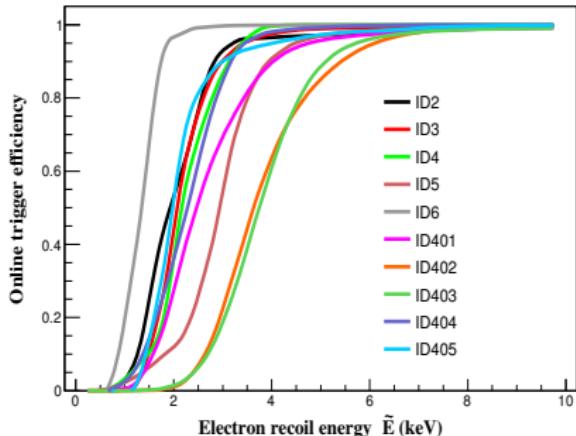
- Données d'EDELWEISS-II acquises avec 10 détecteurs de 400 g entre 2009 et 2010.
- Coupures qualité (Chi2, lignes de base) + sélection des reculs fiducielles électroniques.
- Estimateur d'énergie : $\tilde{E} = w_c EC + w_f EFID$.
- 448 kg.jour d'exposition
- Masse fiduciale : 160g.
Efficacité des autres coupures
 $> 95\%$.
- FWHM moyenne = 0.55 keV
- Seuil fixé par l'efficacité de déclenchement.

- Données d'EDELWEISS-II acquises avec 10 détecteurs de 400 g entre 2009 et 2010.
- Coupures qualité (Chi2, lignes de base) + sélection des reculs fiducielles électroniques.
- Estimateur d'énergie : $\tilde{E} = w_c EC + w_f EFID$.

- 448 kg.jour d'exposition
- Masse fiduciale : 160g.
Efficacité des autres coupures
 $> 95\%$.
- FWHM moyenne = 0.55 keV
- Seuil fixé par l'efficacité de déclenchement.

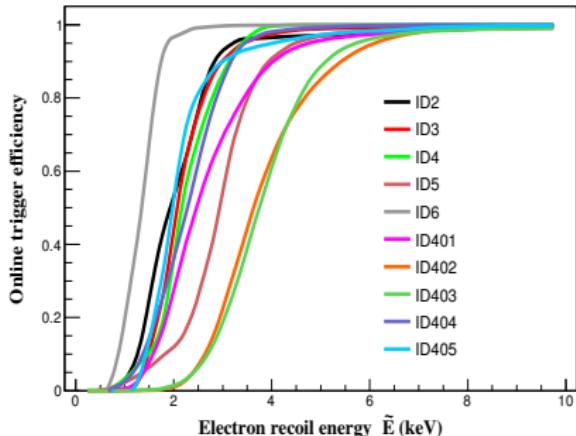
Sélection des données

- Données d'EDELWEISS-II acquises avec 10 détecteurs de 400 g entre 2009 et 2010.
- Coupures qualité (Chi2, lignes de base) + sélection des reculs fiducielles électroniques.
- Estimateur d'énergie : $\tilde{E} = w_c EC + w_f EFID$.
- 448 kg.jour d'exposition
- Masse fiduciale : 160g.
Efficacité des autres coupures > 95%.
- FWHM moyenne = 0.55 keV
- Seuil fixé par l'efficacité de déclenchement.



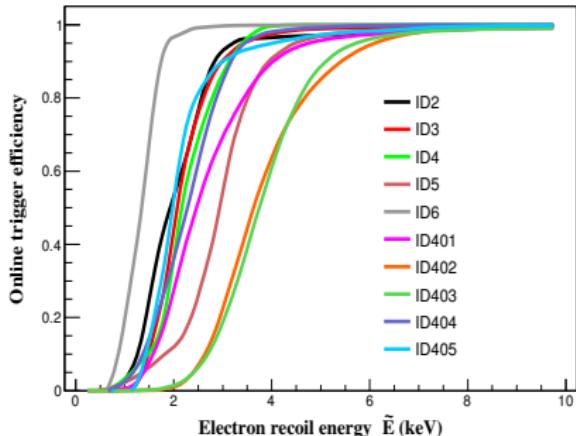
Sélection des données

- Données d'EDELWEISS-II acquises avec 10 détecteurs de 400 g entre 2009 et 2010.
- Coupures qualité (Chi2, lignes de base) + sélection des reculs fiducielles électroniques.
- Estimateur d'énergie : $\tilde{E} = w_c EC + w_f EFID$.
- 448 kg.jour d'exposition
- Masse fiduciale : 160g.
- Efficacité des autres coupures > 95%.
- FWHM moyenne = 0.55 keV
- Seuil fixé par l'efficacité de déclenchement.



Sélection des données

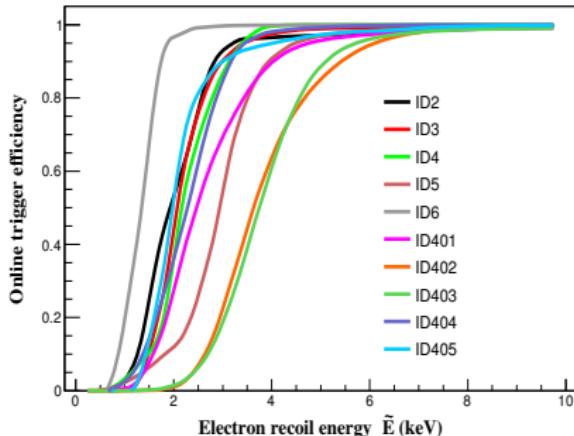
- Données d'EDELWEISS-II acquises avec 10 détecteurs de 400 g entre 2009 et 2010.
- Coupures qualité (Chi2, lignes de base) + sélection des reculs fiducielles électroniques.
- Estimateur d'énergie : $\tilde{E} = w_c EC + w_f EFID$.
- 448 kg.jour d'exposition
- Masse fiduciale : 160g.
- Efficacité des autres coupures > 95%.
- FWHM moyenne = 0.55 keV
- Seuil fixé par l'efficacité de déclenchement.



Sélection des données

- Données d'EDELWEISS-II acquises avec 10 détecteurs de 400 g entre 2009 et 2010.
- Coupures qualité (Chi2, lignes de base) + sélection des reculs fiducielles électroniques.
- Estimateur d'énergie : $\tilde{E} = w_c EC + w_f EFID$.

- 448 kg.jour d'exposition
- Masse fiduciale : 160g.
Efficacité des autres coupures > 95%.
- FWHM moyenne = 0.55 keV
- Seuil fixé par l'efficacité de déclenchement.



Modèle de bruit de fond

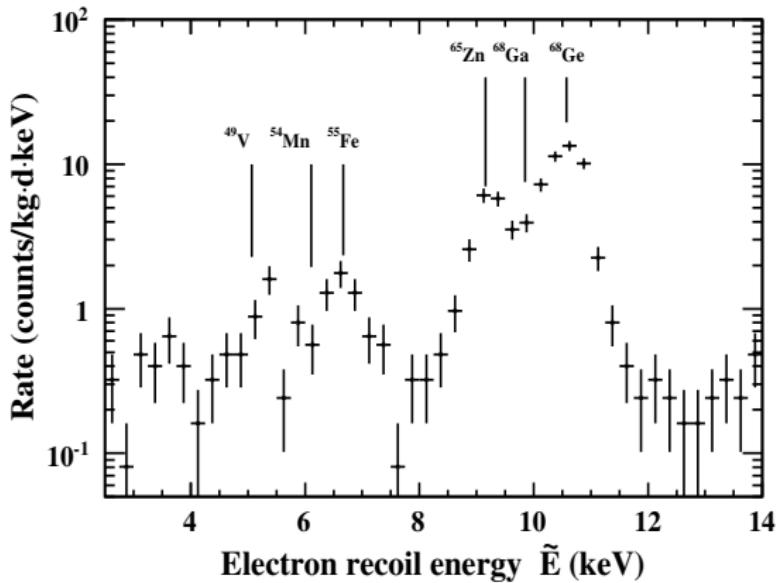
- Recherche d'un signal axion dans le spectre des reculs électroniques fiducIELS.
- Fond = Fond plat Compton + Pics cosmogéniques.
- Toutes les raies sont ajustées et incluses dans le modèle de fond.

Modèle de bruit de fond

- Recherche d'un signal axion dans le spectre des reculs électroniques fiducIELS.
- Fond = Fond plat Compton + Pics cosmogéniques.
- Toutes les raies sont ajustées et incluses dans le modèle de fond.

Modèle de bruit de fond

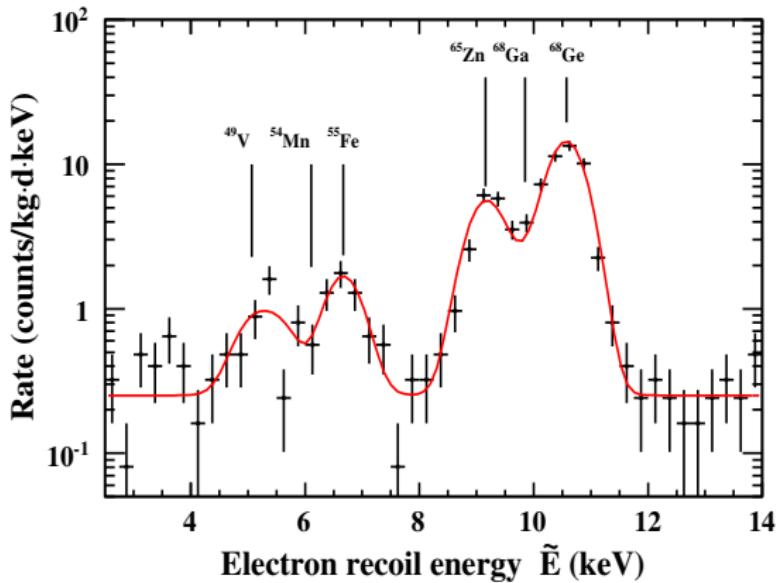
- Recherche d'un signal axion dans le spectre des reculs électroniques fiducIELS.



- Fond = Fond plat Compton + Pics cosmogéniques.
- Toutes les raies sont ajustées et incluses dans le modèle de fond.

Modèle de bruit de fond

- Recherche d'un signal axion dans le spectre des reculs électroniques fiducIELS.



- Fond = Fond plat Compton + Pics cosmogéniques.
- Toutes les raies sont ajustées et incluses dans le modèle de fond.

■ Utilisation d'un corrélateur temporel

■ Utilisation d'un corrélateur temporel

$$\chi_k(\alpha) = \epsilon_k \sum_i [\overline{R_k}(t_i) - \langle \overline{R_k} \rangle] \cdot n_{ik} := \sum_i W_{ik} \cdot n_{ik}$$

■ Utilisation d'un corrélateur temporel

$$\chi_k(\alpha) = \epsilon_k \sum_i [\overline{R_k}(t_i) - \langle \overline{R_k} \rangle] \cdot n_{ik} := \sum_i W_{ik} \cdot n_{ik}$$

$$A_k := \epsilon_k^2 \sum_i^n W_{ik}^2 \Delta t \Delta \tilde{E}$$

■ Utilisation d'un corrélateur temporel

$$\chi_k(\alpha) = \epsilon_k \sum_i [\overline{R_k}(t_i) - \langle \overline{R_k} \rangle] \cdot n_{ik} := \sum_i^n W_{ik} \cdot n_{ik}$$

$$A_k := \epsilon_k^2 \sum_i^n W_{ik}^2 \Delta t \Delta \tilde{E}$$

indice i : grandeur évaluée pour $t \in [t_i, t_i + \Delta t]$
 indice k : grandeur évaluée pour $\tilde{E} \in [\tilde{E}_k, \tilde{E}_k + \Delta \tilde{E}]$
 ϵ : efficacité
 n : nombre d'événements.
 b : bruit de fond attendu
 $\langle \rangle$: moyenne temporelle.
 $\Delta t = 2$ min
 $\Delta \tilde{E} = 0.5$ keV.

■ Utilisation d'un corrélateur temporel

$$\chi_k(\alpha) = \epsilon_k \sum_i [\overline{R_k}(t_i) - \langle \overline{R_k} \rangle] \cdot n_{ik} := \sum_i^n W_{ik} \cdot n_{ik}$$

$$A_k := \epsilon_k^2 \sum_i^n W_{ik}^2 \Delta t \Delta \tilde{E}$$

indice i : grandeur évaluée pour $t \in [t_i, t_i + \Delta t]$
 indice k : grandeur évaluée pour $\tilde{E} \in [\tilde{E}_k, \tilde{E}_k + \Delta \tilde{E}]$
 ϵ : efficacité
 n : nombre d'événements.
 b : bruit de fond attendu
 $\langle \rangle$: moyenne temporelle.
 $\Delta t = 2$ min
 $\Delta \tilde{E} = 0.5$ keV.

En pratique, $\chi_k \sim \mathcal{N}(\langle \chi_k \rangle, \sigma_k)$ donc on peut écrire la fonction de vraisemblance suivante :

$$L(\lambda) \propto \prod_k \exp \left[-\frac{(\chi_k - \langle \chi_k \rangle)^2}{2\sigma^2(\chi_k)} \right] \Rightarrow \tilde{\lambda}(\alpha) = \frac{\sum_k \frac{\chi_k}{\epsilon_k b_k}}{\sum_k \frac{A_k}{\epsilon_k b_k}} \quad \text{et} \quad \sigma(\tilde{\lambda}(\alpha)) = \left(\sum_k \frac{A_k}{\epsilon_k b_k} \right)^{-1/2}$$

■ Utilisation d'un corrélateur temporel

$$\chi_k(\alpha) = \epsilon_k \sum_i [\overline{R_k}(t_i) - \langle \overline{R_k} \rangle] \cdot n_{ik} := \sum_i^n W_{ik} \cdot n_{ik}$$

$$A_k := \epsilon_k^2 \sum_i^n W_{ik}^2 \Delta t \Delta \tilde{E}$$

indice i : grandeur évaluée pour $t \in [t_i, t_i + \Delta t]$
 indice k : grandeur évaluée pour $\tilde{E} \in [\tilde{E}_k, \tilde{E}_k + \Delta \tilde{E}]$
 ϵ : efficacité
 n : nombre d'événements.
 b : bruit de fond attendu
 $\langle \rangle$: moyenne temporelle.
 $\Delta t = 2$ min
 $\Delta \tilde{E} = 0.5$ keV.

En pratique, $\chi_k \sim \mathcal{N}(\langle \chi_k \rangle, \sigma_k)$ donc on peut écrire la fonction de vraisemblance suivante :

$$L(\lambda) \propto \prod_k \exp \left[-\frac{(\chi_k - \langle \chi_k \rangle)^2}{2\sigma^2(\chi_k)} \right] \Rightarrow \tilde{\lambda}(\alpha) = \frac{\sum_k \frac{\chi_k}{\epsilon_k b_k}}{\sum_k \frac{A_k}{\epsilon_k b_k}} \quad \text{et} \quad \sigma(\tilde{\lambda}(\alpha)) = \left(\sum_k \frac{A_k}{\epsilon_k b_k} \right)^{-1/2}$$

■ Utilisation d'un corrélateur temporel

$$\chi_k(\alpha) = \epsilon_k \sum_i [\overline{R_k}(t_i) - \langle \overline{R_k} \rangle] \cdot n_{ik} := \sum_i^n W_{ik} \cdot n_{ik}$$

$$A_k := \epsilon_k^2 \sum_i^n W_{ik}^2 \Delta t \Delta \tilde{E}$$

indice i : grandeur évaluée pour $t \in [t_i, t_i + \Delta t]$
 indice k : grandeur évaluée pour $\tilde{E} \in [\tilde{E}_k, \tilde{E}_k + \Delta \tilde{E}]$
 ϵ : efficacité
 n : nombre d'événements.
 b : bruit de fond attendu
 $\langle \rangle$: moyenne temporelle.
 $\Delta t = 2$ min
 $\Delta \tilde{E} = 0.5$ keV.

En pratique, $\chi_k \sim \mathcal{N}(\langle \chi_k \rangle, \sigma_k)$ donc on peut écrire la fonction de vraisemblance suivante :

$$L(\lambda) \propto \prod_k \exp \left[-\frac{(\chi_k - \langle \chi_k \rangle)^2}{2\sigma^2(\chi_k)} \right] \Rightarrow \tilde{\lambda}(\alpha) = \frac{\sum_k \frac{\chi_k}{\epsilon_k b_k}}{\sum_k \frac{A_k}{\epsilon_k b_k}} \quad \text{et} \quad \sigma(\tilde{\lambda}(\alpha)) = \left(\sum_k \frac{A_k}{\epsilon_k b_k} \right)^{-1/2}$$

■ Utilisation d'un corrélateur temporel

$$\chi_k(\alpha) = \epsilon_k \sum_i [\overline{R_k}(t_i) - \langle \overline{R_k} \rangle] \cdot n_{ik} := \sum_i^n W_{ik} \cdot n_{ik}$$

$$A_k := \epsilon_k^2 \sum_i^n W_{ik}^2 \Delta t \Delta \tilde{E}$$

indice i : grandeur évaluée pour $t \in [t_i, t_i + \Delta t]$
 indice k : grandeur évaluée pour $\tilde{E} \in [\tilde{E}_k, \tilde{E}_k + \Delta \tilde{E}]$
 ϵ : efficacité
 n : nombre d'événements.
 b : bruit de fond attendu
 $\langle \rangle$: moyenne temporelle.
 $\Delta t = 2$ min
 $\Delta \tilde{E} = 0.5$ keV.

En pratique, $\chi_k \sim \mathcal{N}(\langle \chi_k \rangle, \sigma_k)$ donc on peut écrire la fonction de vraisemblance suivante :

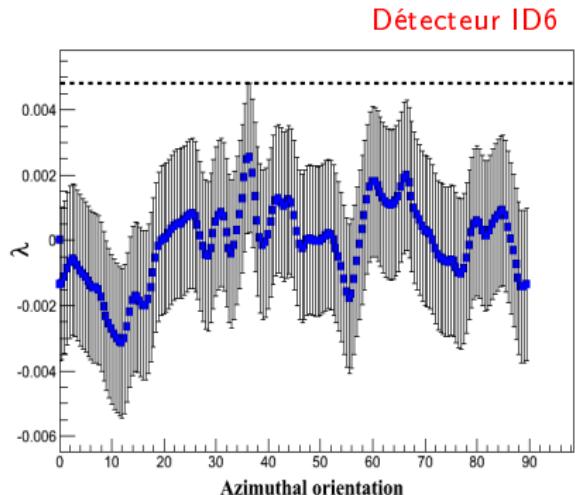
$$L(\lambda) \propto \prod_k \exp \left[-\frac{(\chi_k - \langle \chi_k \rangle)^2}{2\sigma^2(\chi_k)} \right] \Rightarrow \tilde{\lambda}(\alpha) = \frac{\sum_k \frac{\chi_k}{\epsilon_k b_k}}{\sum_k \frac{A_k}{\epsilon_k b_k}} \quad \text{et} \quad \sigma(\tilde{\lambda}(\alpha)) = \left(\sum_k \frac{A_k}{\epsilon_k b_k} \right)^{-1/2}$$

- Les résultats dépendent d' α , l'orientation azimutale du détecteur.
- α n'est pas mesuré dans EDELWEISS !

- Itération de la procédure pour tous les angles possibles

- Toutes les observations sont compatibles avec 0.
- Choisir l'orientation la plus conservative.

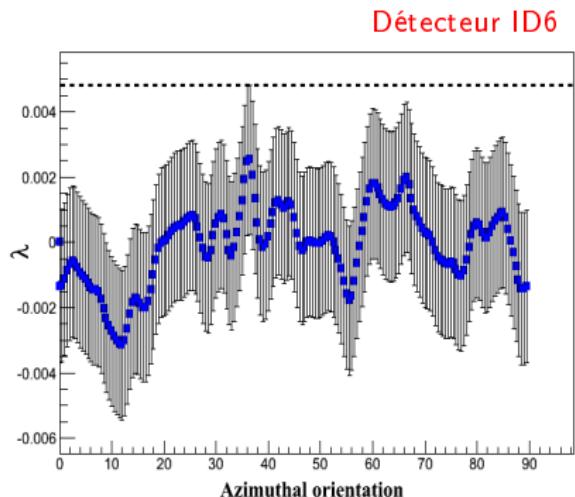
- Itération de la procédure pour tous les angles possibles



- Toutes les observations sont compatibles avec 0.
- Choisir l'orientation la plus conservative.

Analyse Primakoff : un détecteur

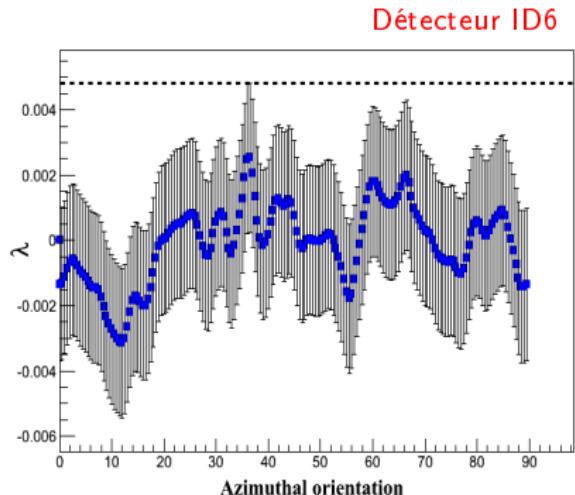
- Itération de la procédure pour tous les angles possibles



- Toutes les observations sont compatibles avec 0.
- Choisir l'orientation la plus conservative.

Analyse Primakoff : un détecteur

- Itération de la procédure pour tous les angles possibles



- Toutes les observations sont compatibles avec 0.
- Choisir l'orientation la plus conservative.

■ Comment combiner plusieurs détecteurs ?

- Répéter la procédure précédente \Rightarrow biais.
- Solution : traitement statistique à partir de simulations Monte Carlo.

■ Quelques définitions :

■ Comment combiner plusieurs détecteurs ?

- Répéter la procédure précédente \Rightarrow biais.
- Solution : traitement statistique à partir de simulations Monte Carlo.

■ Quelques définitions :

■ Comment combiner plusieurs détecteurs ?

- Répéter la procédure précédente \Rightarrow biais.
- Solution : traitement statistique à partir de simulations Monte Carlo.

■ Quelques définitions :

■ Comment combiner plusieurs détecteurs ?

- Répéter la procédure précédente \Rightarrow biais.
- Solution : traitement statistique à partir de simulations Monte Carlo.

■ Quelques définitions :

■ Comment combiner plusieurs détecteurs ?

- Répéter la procédure précédente \Rightarrow biais.
- Solution : traitement statistique à partir de simulations Monte Carlo.

■ Quelques définitions :

Distribution $D(\tilde{\lambda})$

$$D(\tilde{\lambda}) = \{\tilde{\lambda}_{k \in \{\text{détecteurs}\}} (\alpha \in [0, \frac{\pi}{2}])\}$$

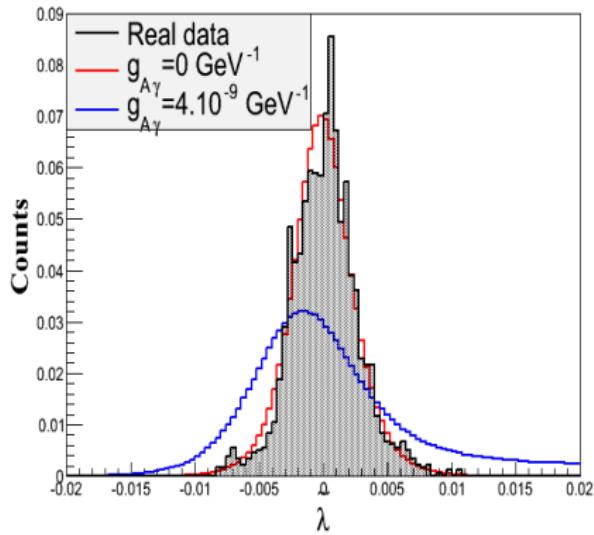
■ Comment combiner plusieurs détecteurs ?

- Répéter la procédure précédente \Rightarrow biais.
- Solution : traitement statistique à partir de simulations Monte Carlo.

■ Quelques définitions :

Distribution $D(\tilde{\lambda})$

$$D(\tilde{\lambda}) = \{\tilde{\lambda}_{k \in \{\text{détecteurs}\}} (\alpha \in [0, \frac{\pi}{2}])\}$$



■ Comment combiner plusieurs détecteurs ?

- Répéter la procédure précédente \Rightarrow biais.
- Solution : traitement statistique à partir de simulations Monte Carlo.

■ Quelques définitions :

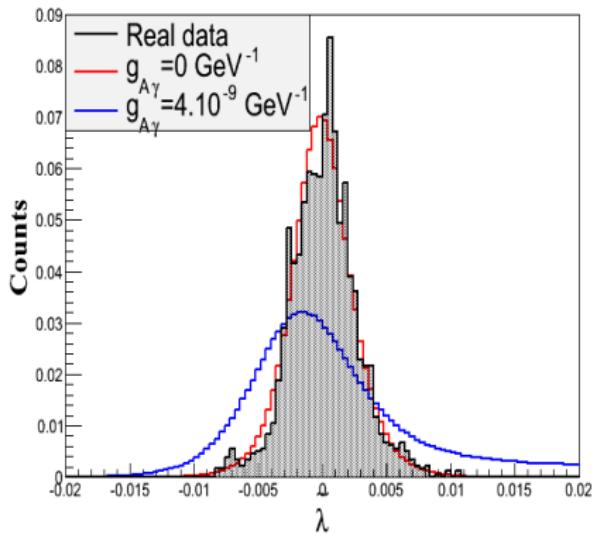
Distribution $D(\tilde{\lambda})$

$$D(\tilde{\lambda}) = \{\tilde{\lambda}_{k \in \{\text{détecteurs}\}} (\alpha \in [0, \frac{\pi}{2}])\}$$

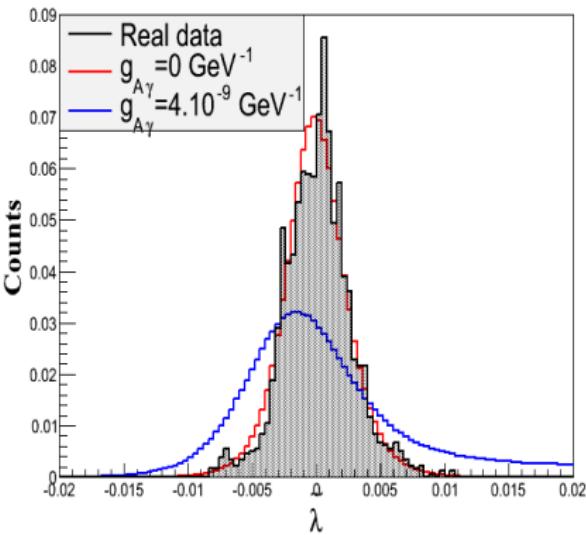
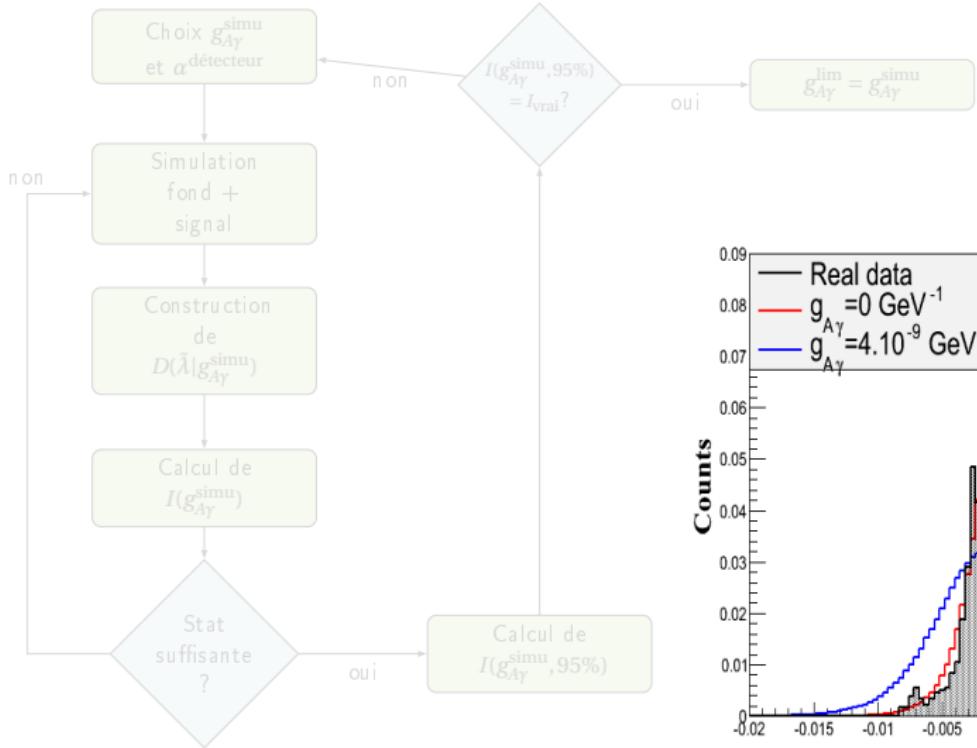
Observable I

Étant donné $D(\tilde{\lambda})$,

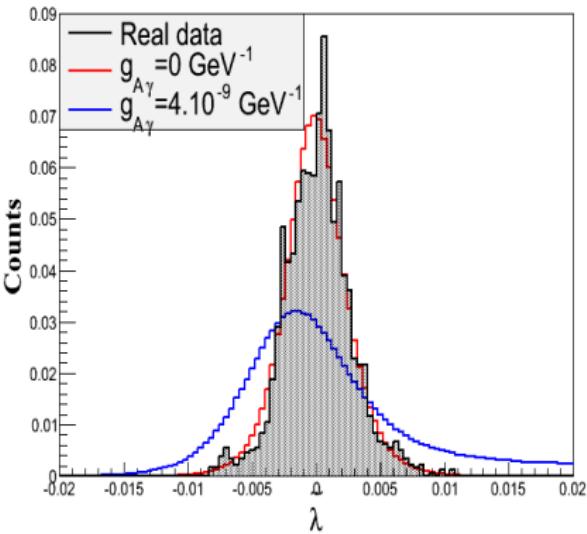
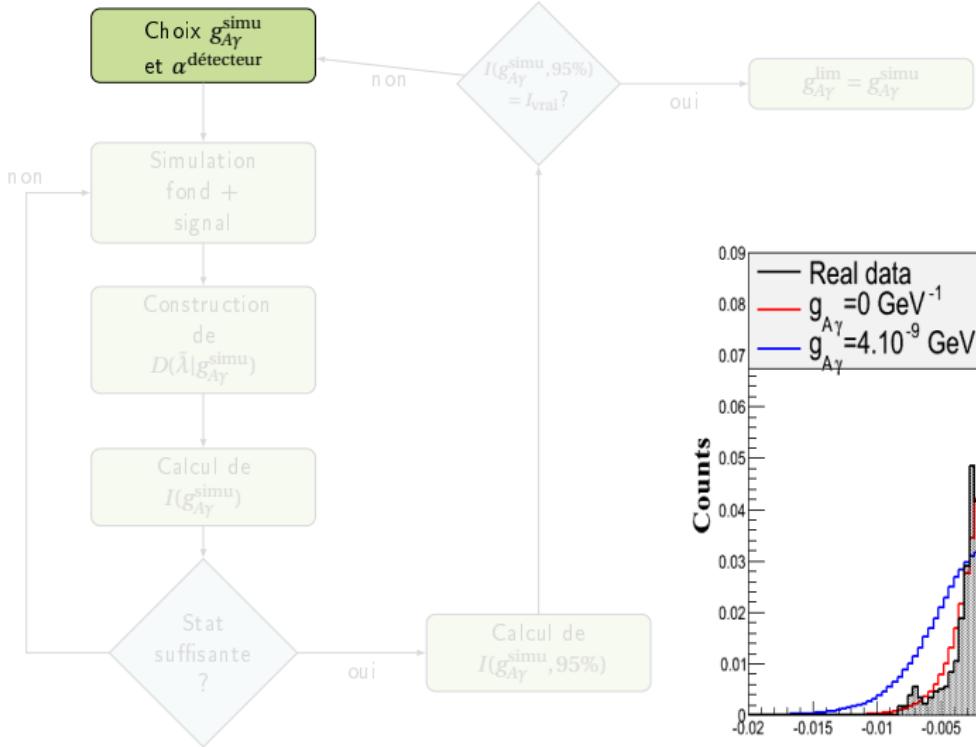
$$I = \int_{|\tilde{\lambda}| < \tilde{\lambda}_c} D(\tilde{\lambda}) - \int_{|\tilde{\lambda}| > \tilde{\lambda}_c} D(\tilde{\lambda})$$



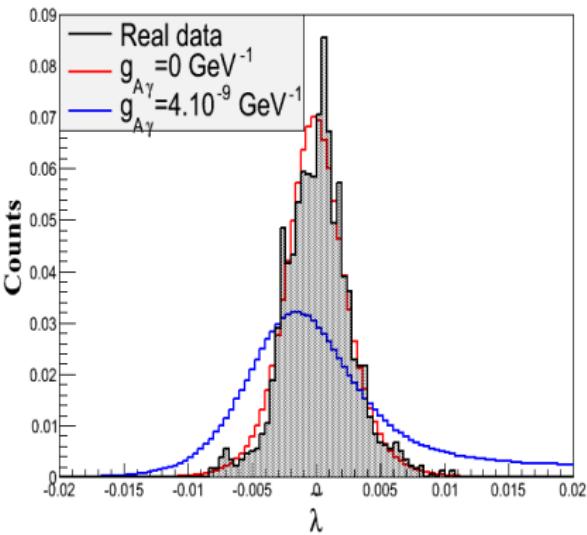
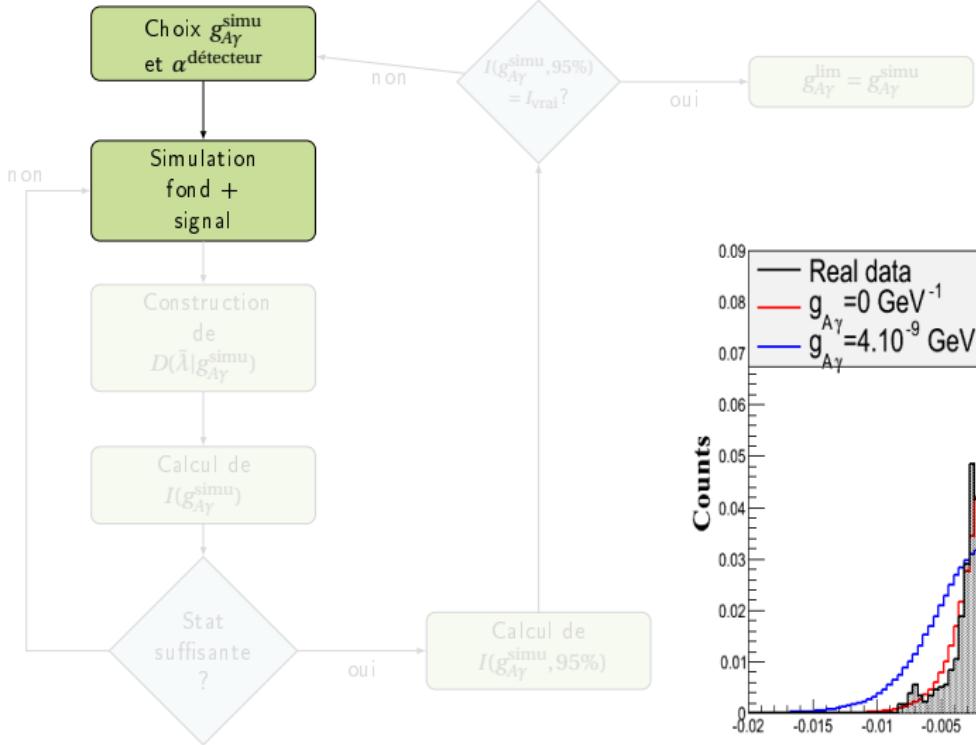
Analyse Primakoff : 10 détecteurs



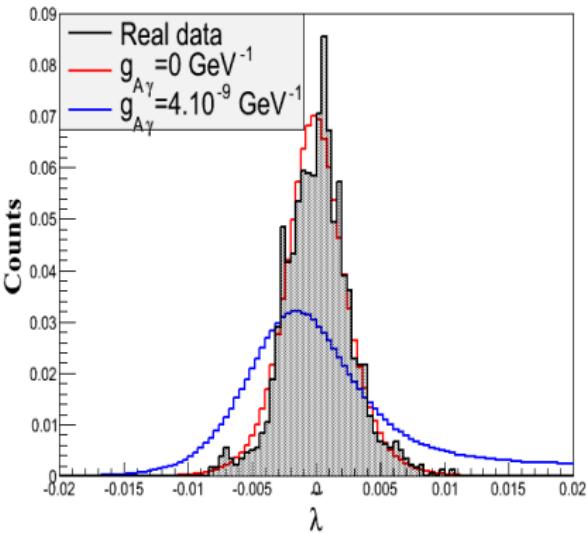
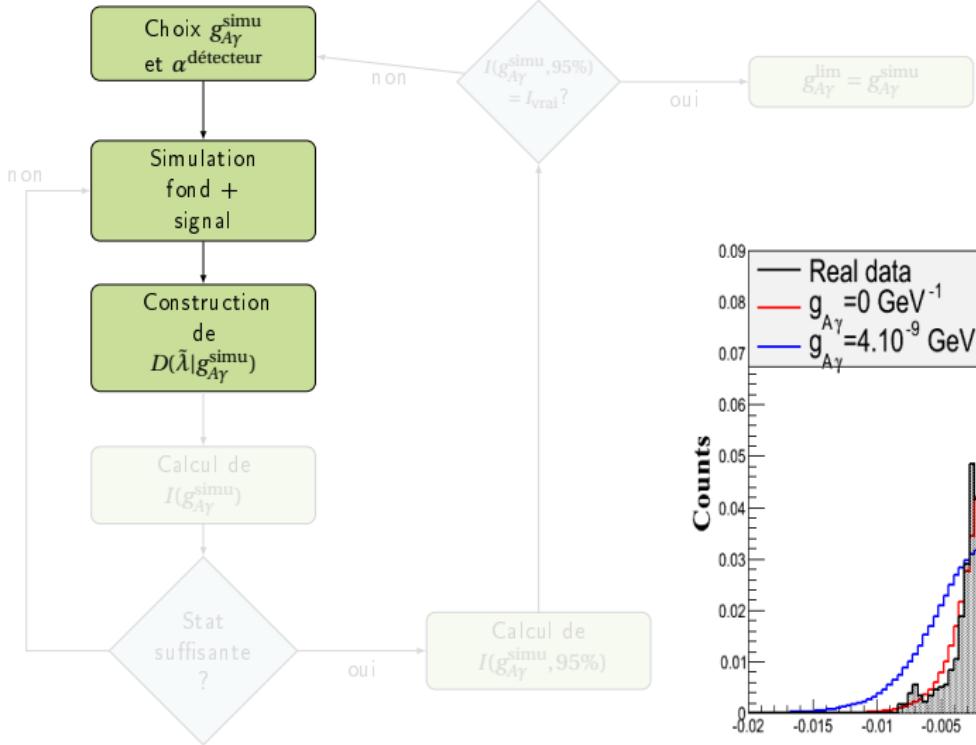
Analyse Primakoff : 10 détecteurs



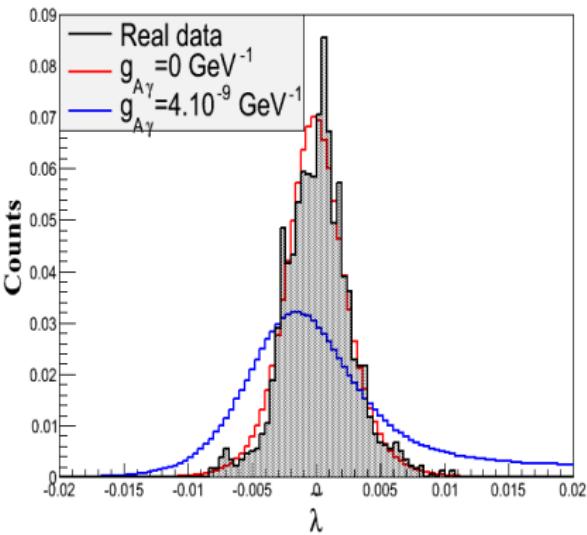
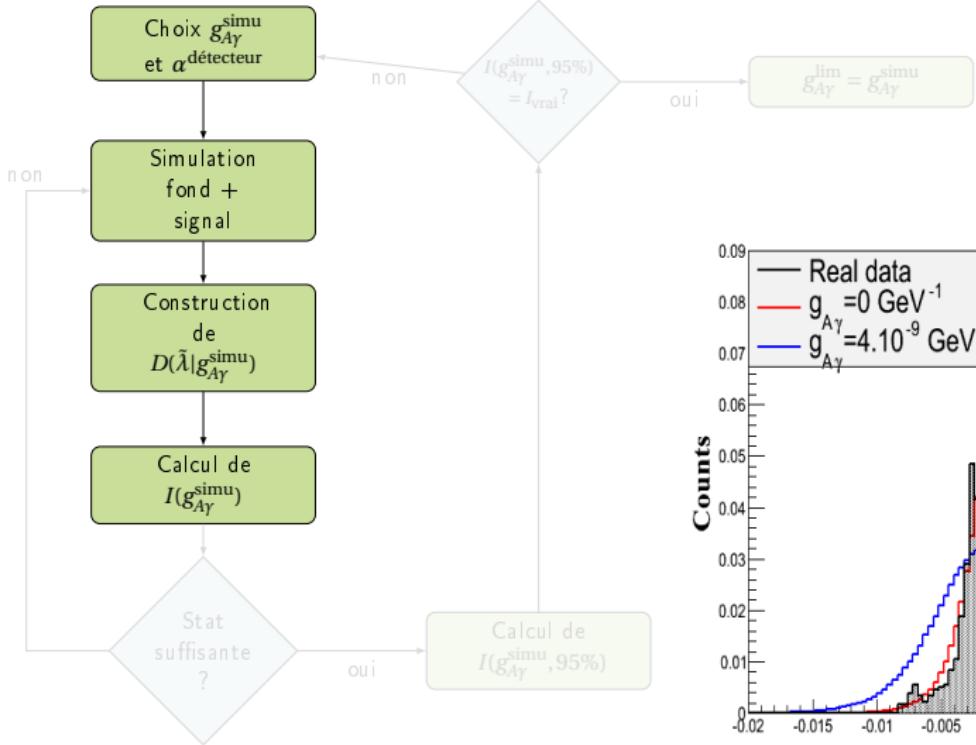
Analyse Primakoff : 10 détecteurs



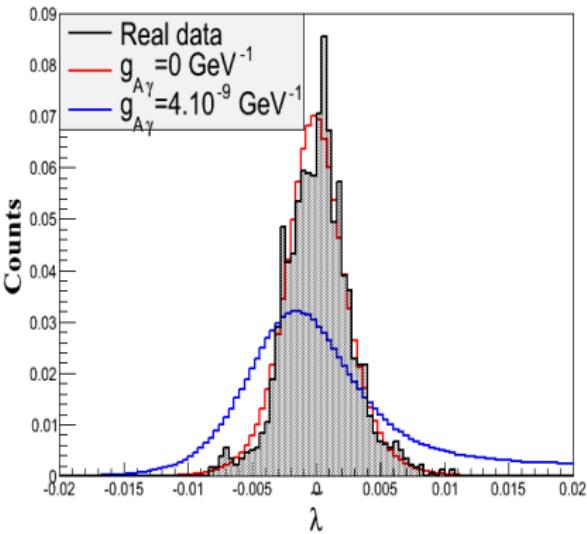
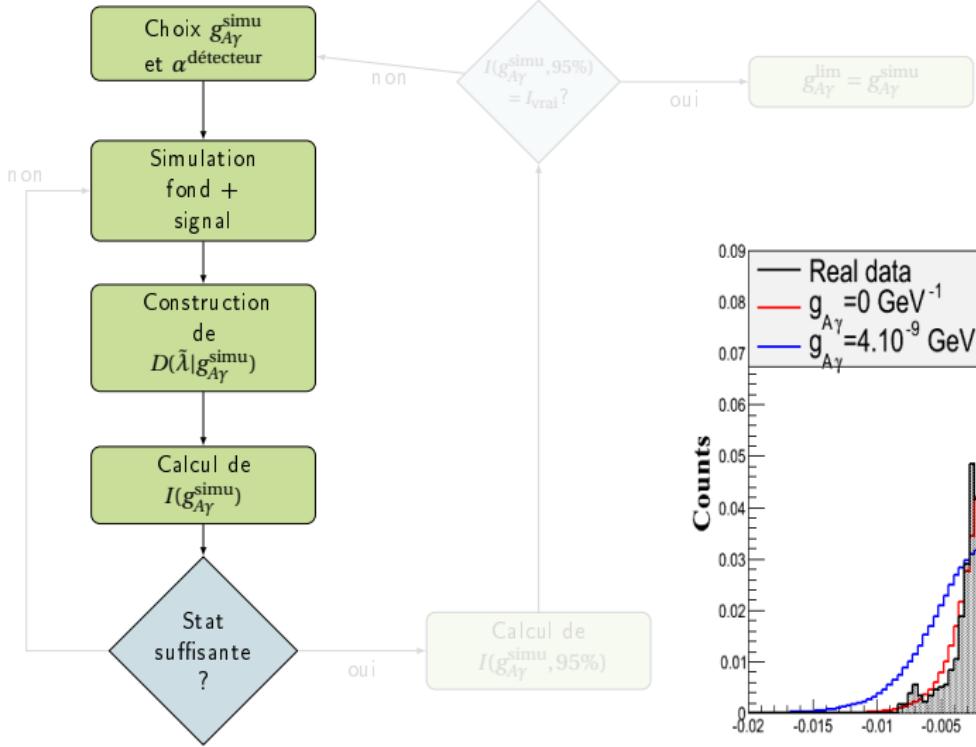
Analyse Primakoff : 10 détecteurs



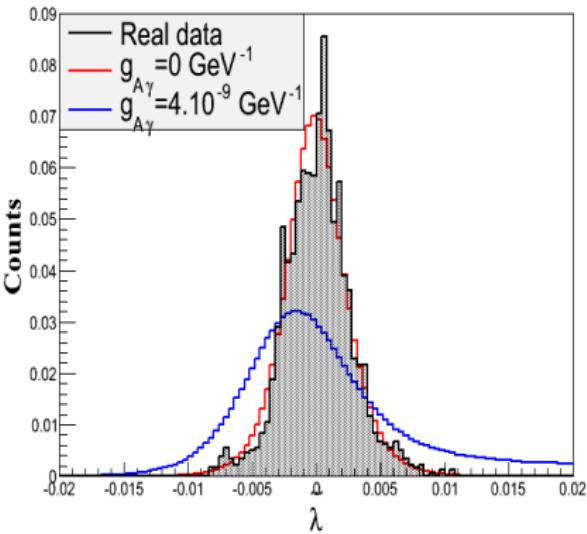
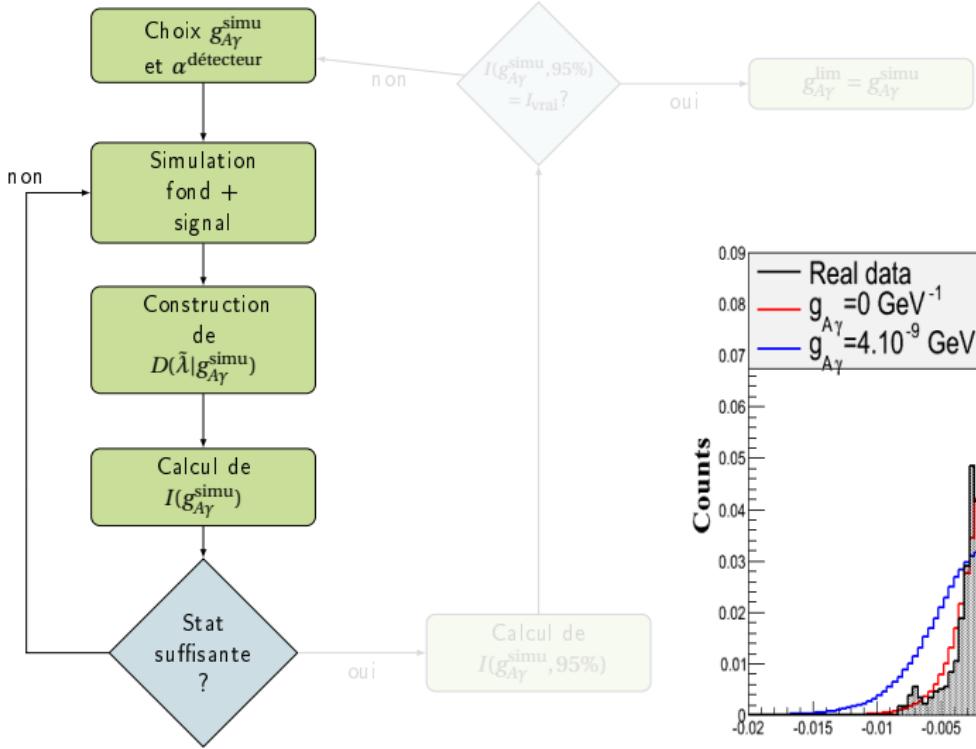
Analyse Primakoff : 10 détecteurs



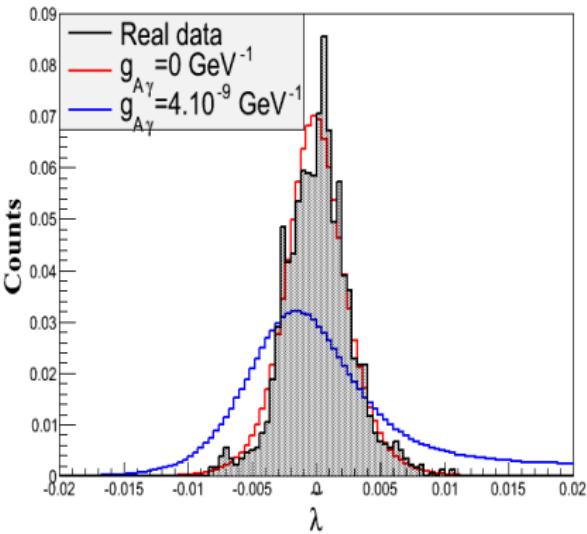
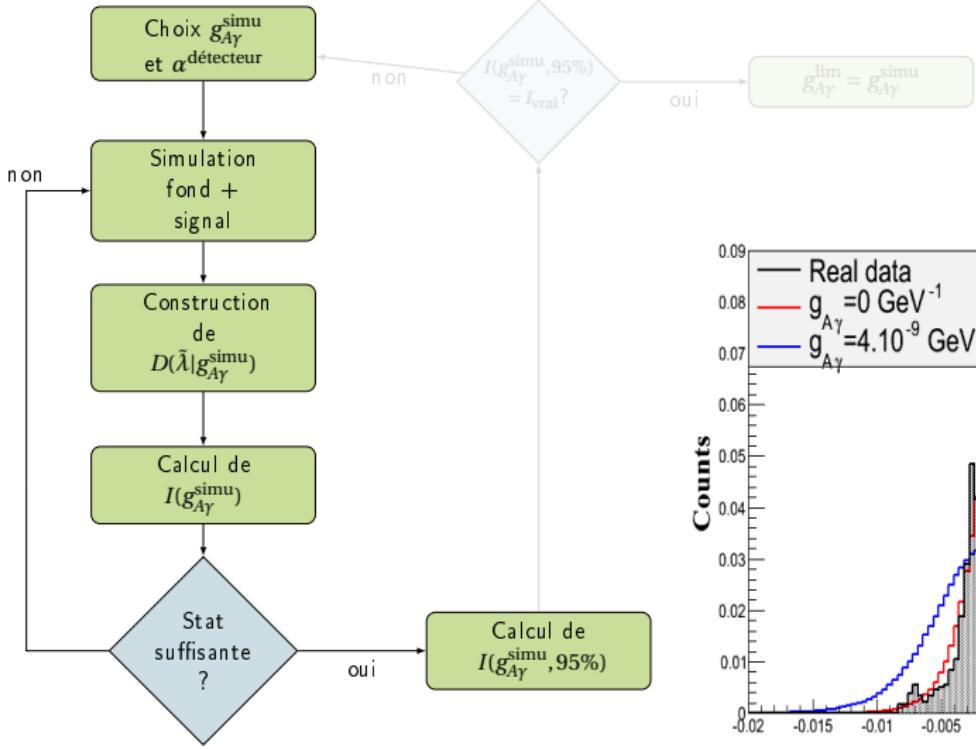
Analyse Primakoff : 10 détecteurs



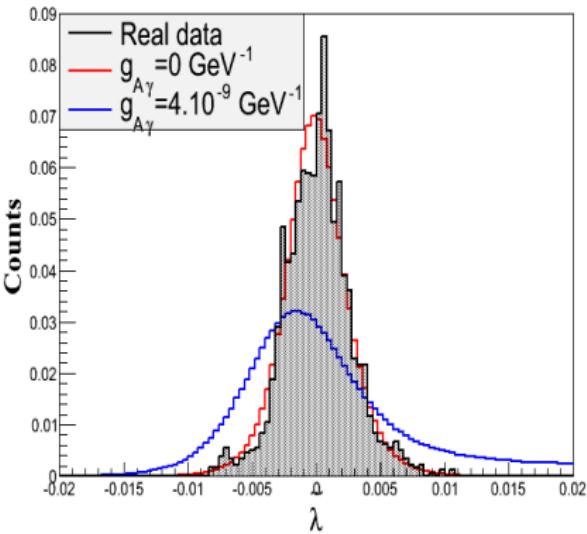
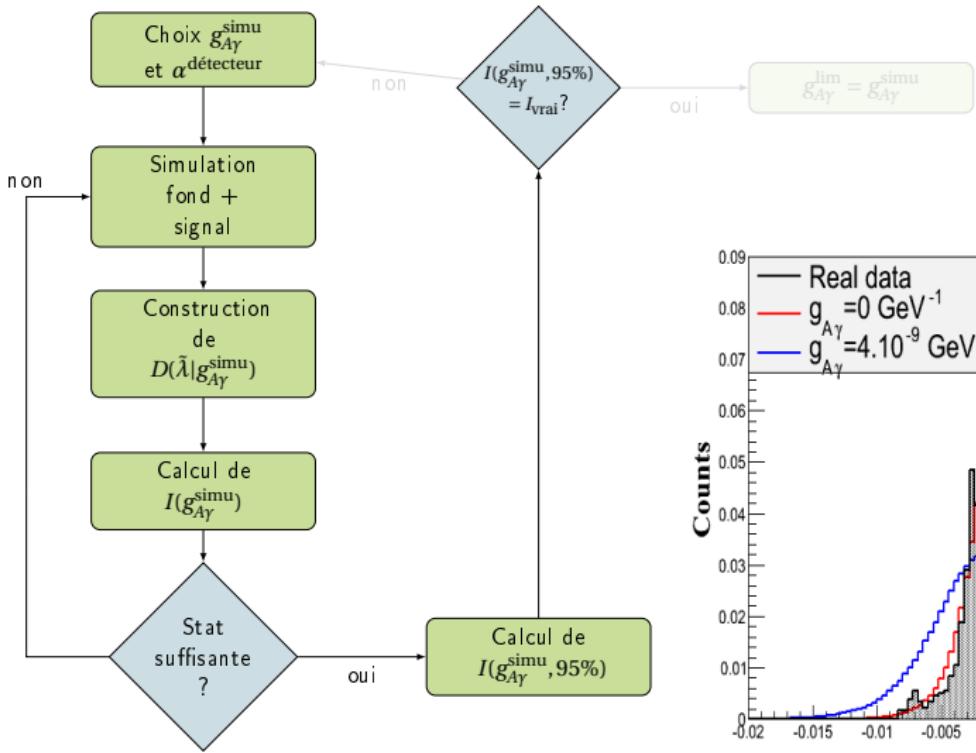
Analyse Primakoff : 10 détecteurs



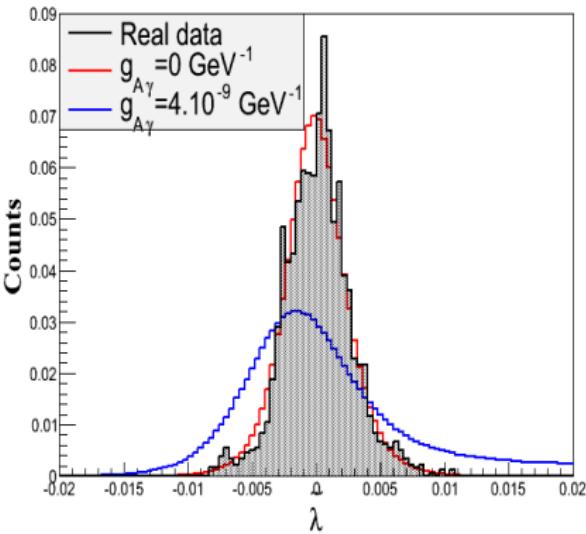
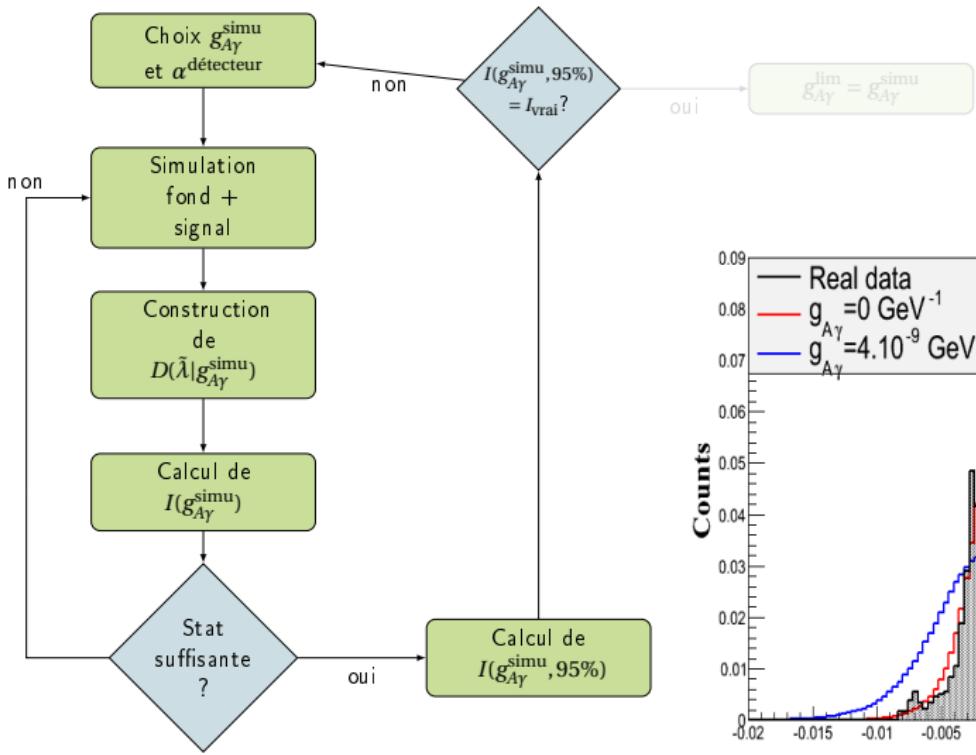
Analyse Primakoff : 10 détecteurs



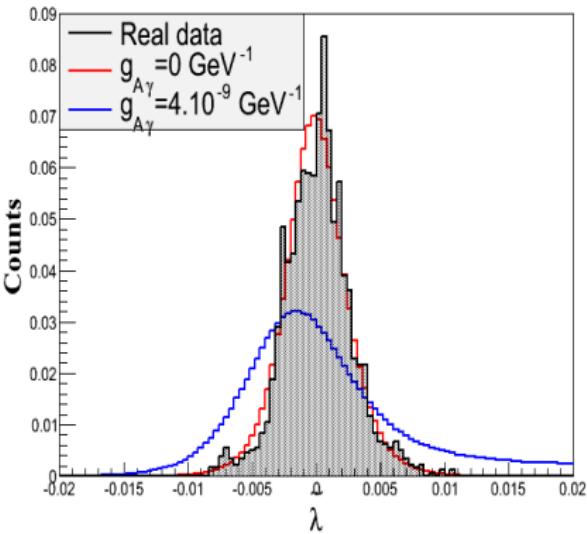
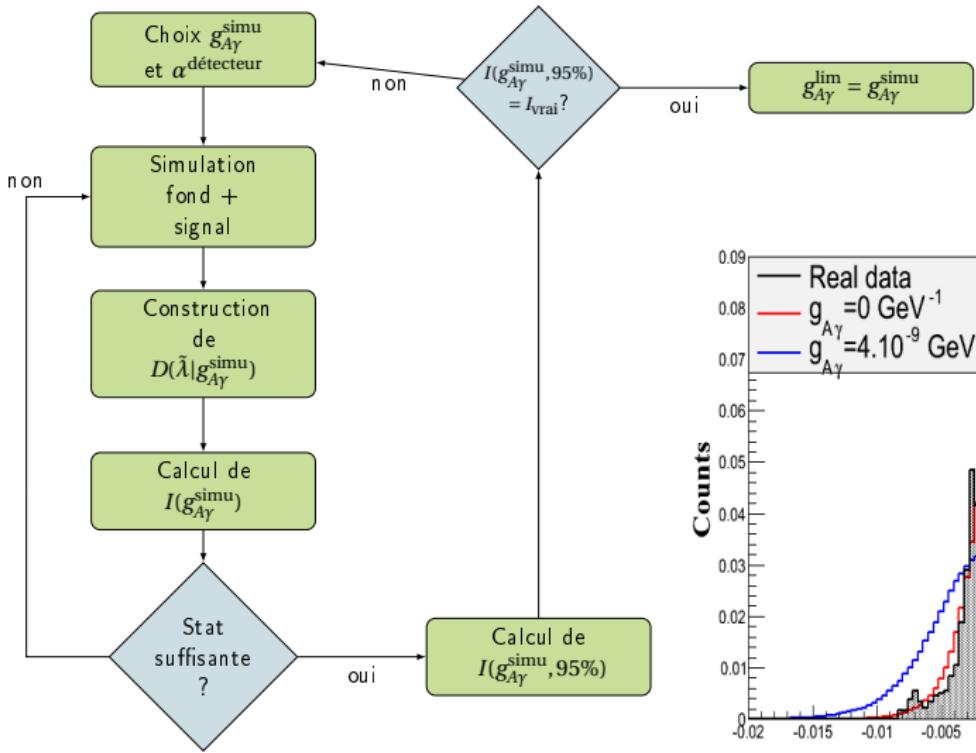
Analyse Primakoff : 10 détecteurs



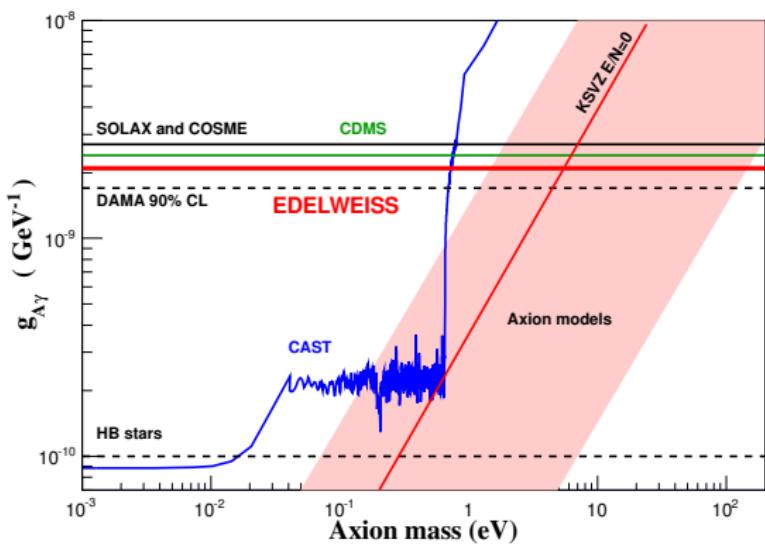
Analyse Primakoff : 10 détecteurs



Analyse Primakoff : 10 détecteurs

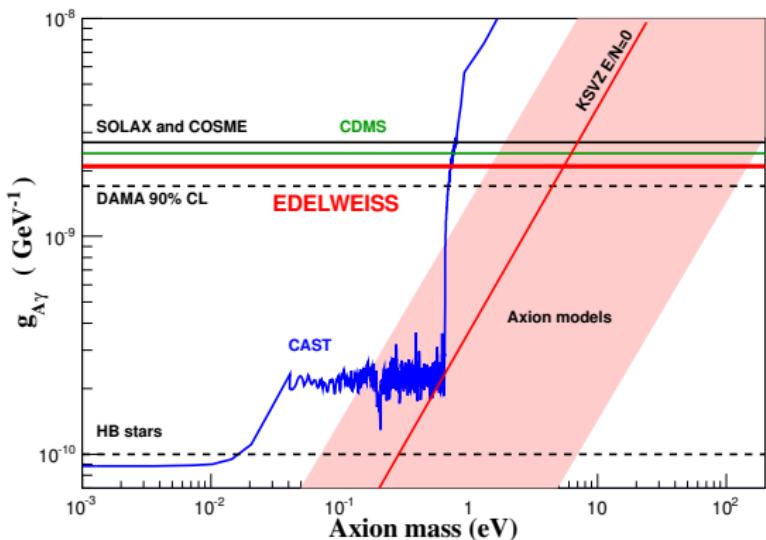


Analyse Primakoff : résultats



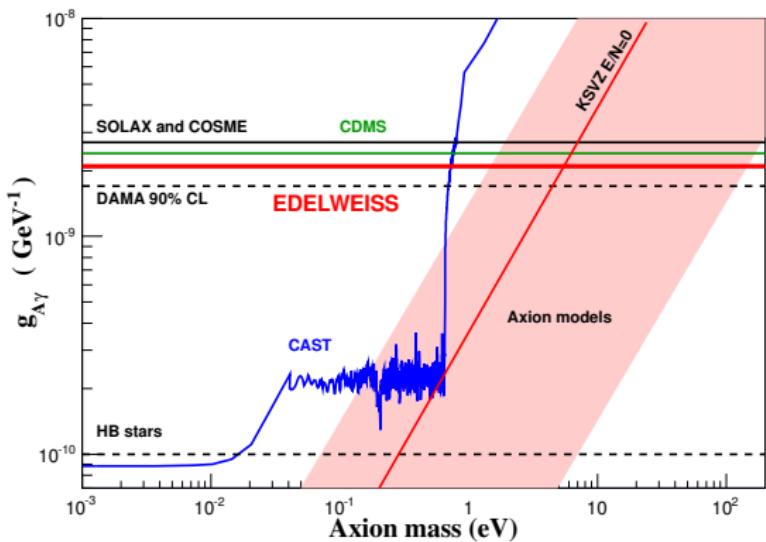
- Les résultats sont peu pénalisés par l'absence de connaissance des orientations azimutales.
- Difficile d'améliorer la sensibilité car $g_{A\gamma} \propto \left(\frac{\text{fond}}{\text{exposition}} \right)^{1/8}$

Analyse Primakoff : résultats



- Les résultats sont peu pénalisés par l'absence de connaissance des orientations azimutales.
- Difficile d'améliorer la sensibilité car $g_{A\gamma} \propto \left(\frac{\text{fond}}{\text{exposition}} \right)^{1/8}$

Analyse Primakoff : résultats



- Les résultats sont peu pénalisés par l'absence de connaissance des orientations azimutales.
- Difficile d'améliorer la sensibilité car $g_{A\gamma} \propto \left(\frac{\text{fond}}{\text{exposition}}\right)^{1/8}$

Recherche de WIMPs de basse masse avec EDELWEISS-III

■ Motivations.

- Il y a peu de contraintes sur la masse du WIMP : de $\mathcal{O}(\text{GeV})$ à $\mathcal{O}(\text{TeV})$.
- Dans le cadre de la Supersymétrie (SUSY), les derniers résultats du LHC favorisent des masses $\mathcal{O}(100 - 1000\text{GeV})$.
- Les galaxies naines favorisent également les plus hautes masses dans un scénario standard.
- Néanmoins, des expériences de détection directe et indirecte ont observé des indices de WIMPs de basse masse.
- Le modèle de la matière noire asymétrique privilégie les WIMPs de basse masse.

■ Motivations.

- Il y a peu de contraintes sur la masse du WIMP : de $\mathcal{O}(\text{GeV})$ à $\mathcal{O}(\text{TeV})$.
- Dans le cadre de la Supersymétrie (SUSY), les derniers résultats du LHC favorisent des masses $\mathcal{O}(100 - 1000\text{GeV})$.
- Les galaxies naines favorisent également les plus hautes masses dans un scénario standard.
- Néanmoins, des expériences de détection directe et indirecte ont observé des indices de WIMPs de basse masse.
- Le modèle de la matière noire asymétrique privilégie les WIMPs de basse masse.

■ Motivations.

- Il y a peu de contraintes sur la masse du WIMP : de $\mathcal{O}(\text{GeV})$ à $\mathcal{O}(\text{TeV})$.
- Dans le cadre de la Supersymétrie (SUSY), les derniers résultats du LHC favorisent des masses $\mathcal{O}(100 - 1000\text{GeV})$.
- Les galaxies naines favorisent également les plus hautes masses dans un scénario standard.
- Néanmoins, des expériences de détection directe et indirecte ont observé des indices de WIMPs de basse masse.
- Le modèle de la matière noire asymétrique privilégie les WIMPs de basse masse.

■ Motivations.

- Il y a peu de contraintes sur la masse du WIMP : de $\mathcal{O}(\text{GeV})$ à $\mathcal{O}(\text{TeV})$.
- Dans le cadre de la Supersymétrie (SUSY), les derniers résultats du LHC favorisent des masses $\mathcal{O}(100 - 1000\text{GeV})$.
- Les galaxies naines favorisent également les plus hautes masses dans un scénario standard.
- Néanmoins, des expériences de détection directe et indirecte ont observé des indices de WIMPs de basse masse.
- Le modèle de la matière noire asymétrique privilégie les WIMPs de basse masse.

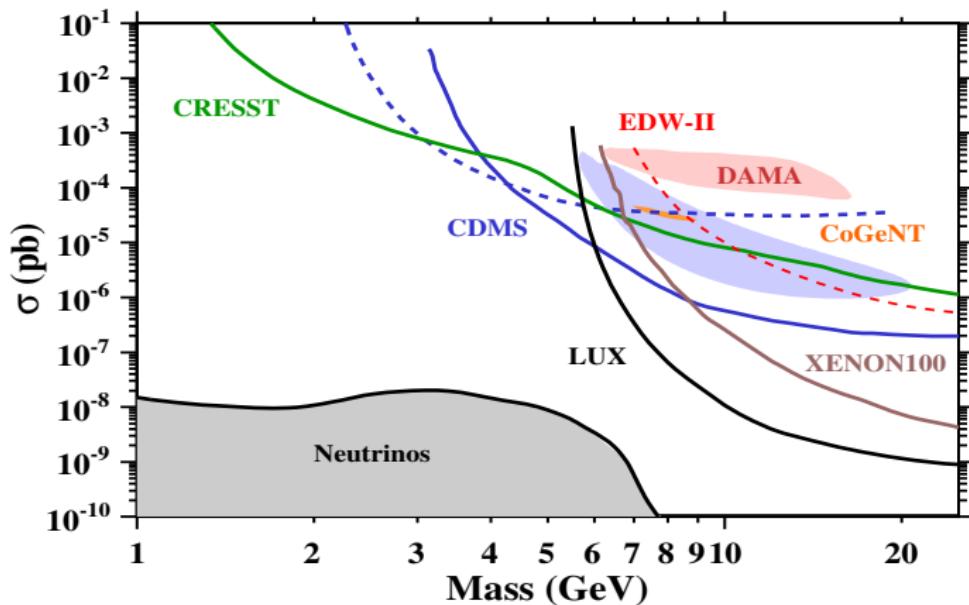
Motivations.

- Il y a peu de contraintes sur la masse du WIMP : de $\mathcal{O}(\text{GeV})$ à $\mathcal{O}(\text{TeV})$.
- Dans le cadre de la Supersymétrie (SUSY), les derniers résultats du LHC favorisent des masses $\mathcal{O}(100 - 1000\text{GeV})$.
- Les galaxies naines favorisent également les plus hautes masses dans un scénario standard.
- Néanmoins, des expériences de détection directe et indirecte ont observé des indices de WIMPs de basse masse.
- Le modèle de la matière noire asymétrique privilégie les WIMPs de basse masse.

Motivations.

- Il y a peu de contraintes sur la masse du WIMP : de $\mathcal{O}(\text{GeV})$ à $\mathcal{O}(\text{TeV})$.
- Dans le cadre de la Supersymétrie (SUSY), les derniers résultats du LHC favorisent des masses $\mathcal{O}(100 - 1000\text{GeV})$.
- Les galaxies naines favorisent également les plus hautes masses dans un scénario standard.
- Néanmoins, des expériences de détection directe et indirecte ont observé des indices de WIMPs de basse masse.
- Le modèle de la matière noire asymétrique privilégie les WIMPs de basse masse.

Résultats expérimentaux



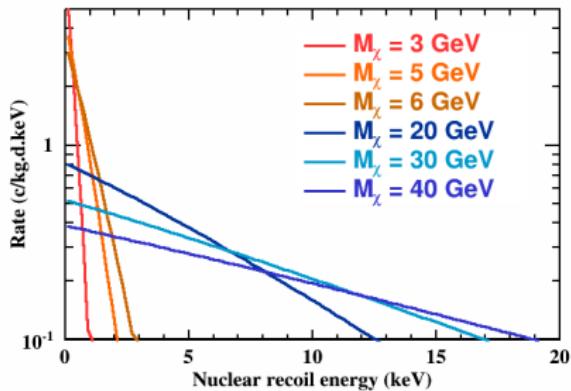
- Certaines expériences observent un excès par rapport au bruit de fond.
- Les expériences au Xenon ont peu de sensibilité aux très basses masses.

Les défis d'une analyse basse masse

- Le signal est concentré aux basses énergies, près du seuil : l'identification de bons événements de type signal est difficile.
- Présence de nombreux bruits de fond intense, en particulier les "chaleur seule".
- Solution : analyse multivariée. Nécessite un modèle pour chaque bruit de fond.

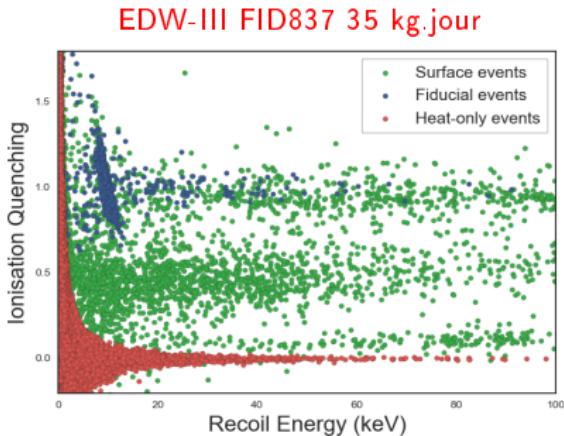
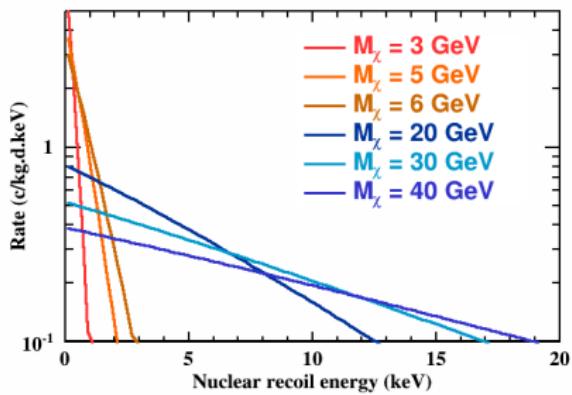
Les défis d'une analyse basse masse

- Le signal est concentré aux basses énergies, près du seuil : l'identification de bons événements de type signal est difficile.
- Présence de nombreux bruits de fond intense, en particulier les "chaleur seule".
- Solution : analyse multivariée. Nécessite un modèle pour chaque bruit de fond.



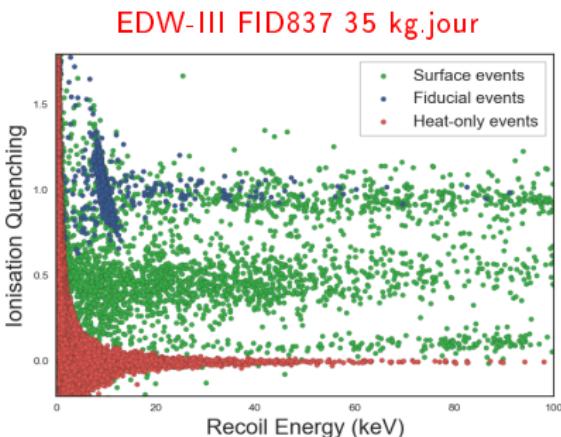
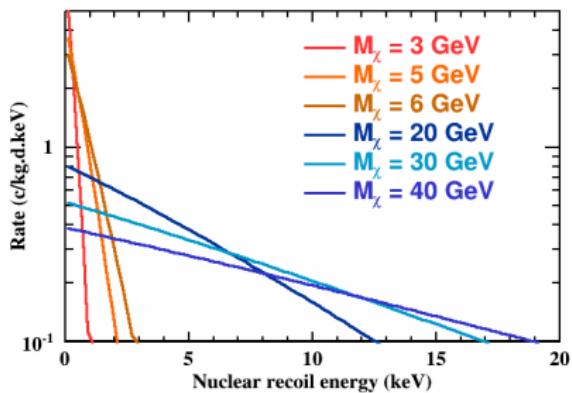
Les défis d'une analyse basse masse

- Le signal est concentré aux basses énergies, près du seuil : l'identification de bons événements de type signal est difficile.
- Présence de nombreux bruits de fond intense, en particulier les "chaleur seule".
- Solution : analyse multivariée. Nécessite un modèle pour chaque bruit de fond.



Les défis d'une analyse basse masse

- Le signal est concentré aux basses énergies, près du seuil : l'identification de bons événements de type signal est difficile.
- Présence de nombreux bruits de fond intense, en particulier les "chaleur seule".
- Solution : analyse multivariée. Nécessite un modèle pour chaque bruit de fond.



Les bruits de fond : modèle à 1D

■ Exemple des gammas fiducielles

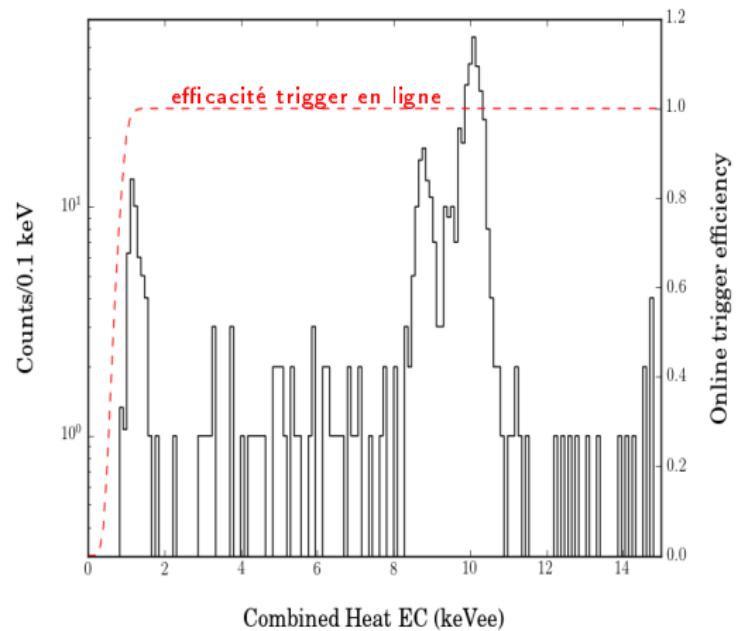
- Sélection dans *sideband*.
- Modèle : fond plat + pics radioactifs.
- L'intensité des pics autour de 1.3 keV est fixée par les pics à 8.98 et 10.37 keV

- Exemple des gammas fiducielles

- Sélection dans *sideband*.
- Modèle : fond plat + pics radioactifs.
- L'intensité des pics autour de 1.3 keV est fixée par les pics à 8.98 et 10.37 keV

Les bruits de fond : modèle à 1D

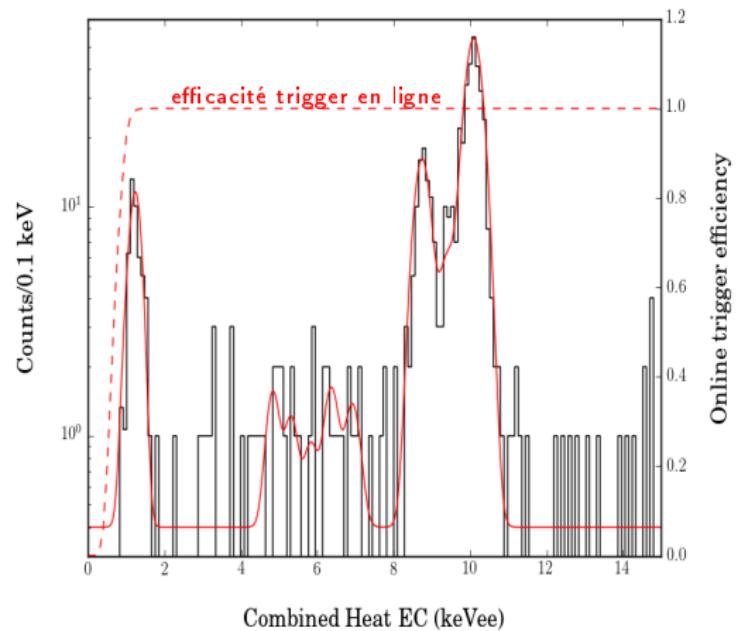
■ Exemple des gammas fiducIELS



- Sélection dans *sideband*.
- Modèle : fond plat + pics radioactifs.
- L'intensité des pics autour de 1.3 keV est fixée par les pics à 8.98 et 10.37 keV

Les bruits de fond : modèle à 1D

■ Exemple des gammas fiducielles



- Sélection dans *sideband*.
- Modèle : fond plat + pics radioactifs.
- L'intensité des pics autour de 1.3 keV est fixée par les pics à 8.98 et 10.37 keV

■ Les chaleur seule

- Bruit de fond de loin le plus intense pour les basses masses.
- Chaleur bien reconstruite, pas de signal ionisation.
- Dépendance temporelle complexe.
- Mais parfaitement reconstruit grâce à la sideband.

■ Les chaleur seule

- Bruit de fond de loin le plus intense pour les basses masses.
- Chaleur bien reconstruite, pas de signal ionisation.
- Dépendance temporelle complexe.
- Mais parfaitement reconstruit grâce à la sideband.

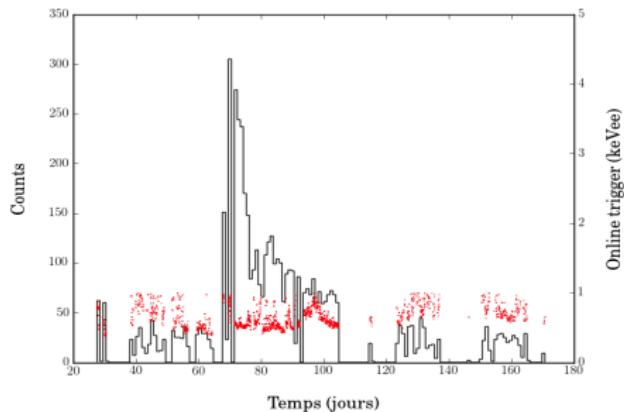
■ Les chaleur seule

- Bruit de fond de loin le plus intense pour les basses masses.
- Chaleur bien reconstruite, pas de signal ionisation.
- Dépendance temporelle complexe.
- Mais parfaitement reconstruit grâce à la sideband.

Cas particulier des chaleur seule

■ Les chaleur seule

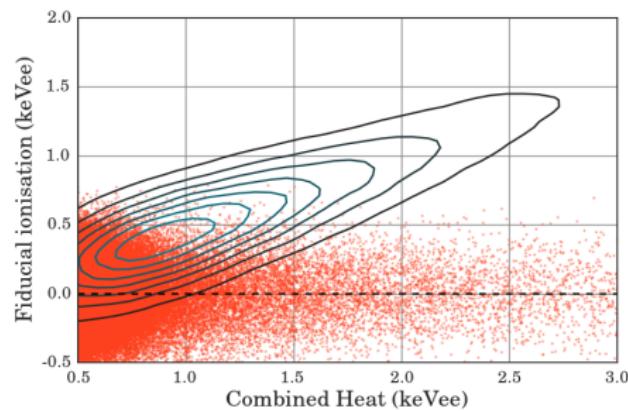
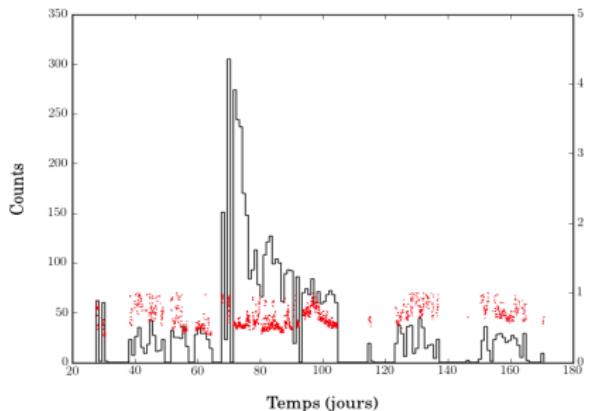
- Bruit de fond de loin le plus intense pour les basses masses.
- Chaleur bien reconstruite, pas de signal ionisation.
- Dépendance temporelle complexe.
- Mais parfaitement reconstruit grâce à la sideband.



Cas particulier des chaleur seule

■ Les chaleur seule

- Bruit de fond de loin le plus intense pour les basses masses.
- Chaleur bien reconstruite, pas de signal ionisation.
- Dépendance temporelle complexe.
- Mais parfaitement reconstruit grâce à la sideband.



■ Bruits de fond

- Déconvolution du spectre chaleur 1D \mathcal{S} .
- Tirer aléatoirement une énergie E de \mathcal{S} .
- Signal chaleur : ajout de bruit gaussien à E pour chacune des 2 voies chaleur.
- Signal ionisation : correction des effets Luke-Neganov et de quenching, ajout de bruit ionisation corrélé pour chacune des 4 voies ionisation.
- **Cas des chaleur seule** : Reconstruction identique pour l'ionisation. Les énergies chaleur sont tirées de la distribution 2D chaleur 1 - chaleur 2 dans la sideband.
- Les effets de seuil, de variation de résolution et les coupures d'analyse sont inclus.

■ Bruits de fond

- Déconvolution du spectre chaleur 1D \mathcal{S} .
- Tirer aléatoirement une énergie E de \mathcal{S} .
- Signal chaleur : ajout de bruit gaussien à E pour chacune des 2 voies chaleur.
- Signal ionisation : correction des effets Luke-Neganov et de quenching, ajout de bruit ionisation corrélé pour chacune des 4 voies ionisation.
- **Cas des chaleur seule** : Reconstruction identique pour l'ionisation. Les énergies chaleur sont tirées de la distribution 2D chaleur 1 - chaleur 2 dans la sideband.
- Les effets de seuil, de variation de résolution et les coupures d'analyse sont inclus.

■ Bruits de fond

- Déconvolution du spectre chaleur 1D \mathcal{S} .
- Tirer aléatoirement une énergie E de \mathcal{S} .
- Signal chaleur : ajout de bruit gaussien à E pour chacune des 2 voies chaleur.
- Signal ionisation : correction des effets Luke-Neganov et de quenching, ajout de bruit ionisation corrélé pour chacune des 4 voies ionisation.
- **Cas des chaleur seule** : Reconstruction identique pour l'ionisation. Les énergies chaleur sont tirées de la distribution 2D chaleur 1 - chaleur 2 dans la sideband.
- Les effets de seuil, de variation de résolution et les coupures d'analyse sont inclus.

■ Bruits de fond

- Déconvolution du spectre chaleur 1D \mathcal{S} .
- Tirer aléatoirement une énergie E de \mathcal{S} .
- Signal chaleur : ajout de bruit gaussien à E pour chacune des 2 voies chaleur.
- Signal ionisation : correction des effets Luke-Neganov et de quenching, ajout de bruit ionisation corrélé pour chacune des 4 voies ionisation.
- **Cas des chaleur seule** : Reconstruction identique pour l'ionisation. Les énergies chaleur sont tirées de la distribution 2D chaleur 1 - chaleur 2 dans la sideband.
- Les effets de seuil, de variation de résolution et les coupures d'analyse sont inclus.

■ Bruits de fond

- Déconvolution du spectre chaleur 1D \mathcal{S} .
- Tirer aléatoirement une énergie E de \mathcal{S} .
- Signal chaleur : ajout de bruit gaussien à E pour chacune des 2 voies chaleur.
- Signal ionisation : correction des effets Luke-Neganov et de quenching, ajout de bruit ionisation corrélé pour chacune des 4 voies ionisation.
- **Cas des chaleur seule** : Reconstruction identique pour l'ionisation. Les énergies chaleur sont tirées de la distribution 2D chaleur 1 - chaleur 2 dans la sideband.
- Les effets de seuil, de variation de résolution et les coupures d'analyse sont inclus.

■ Bruits de fond

- Déconvolution du spectre chaleur 1D \mathcal{S} .
- Tirer aléatoirement une énergie E de \mathcal{S} .
- Signal chaleur : ajout de bruit gaussien à E pour chacune des 2 voies chaleur.
- Signal ionisation : correction des effets Luke-Neganov et de quenching, ajout de bruit ionisation corrélé pour chacune des 4 voies ionisation.
- **Cas des chaleur seule** : Reconstruction identique pour l'ionisation. Les énergies chaleur sont tirées de la distribution 2D chaleur 1 - chaleur 2 dans la sideband.
- Les effets de seuil, de variation de résolution et les coupures d'analyse sont inclus.

■ Bruits de fond

- Déconvolution du spectre chaleur 1D \mathcal{S} .
- Tirer aléatoirement une énergie E de \mathcal{S} .
- Signal chaleur : ajout de bruit gaussien à E pour chacune des 2 voies chaleur.
- Signal ionisation : correction des effets Luke-Neganov et de quenching, ajout de bruit ionisation corrélé pour chacune des 4 voies ionisation.
- **Cas des chaleur seule** : Reconstruction identique pour l'ionisation. Les énergies chaleur sont tirées de la distribution 2D chaleur 1 - chaleur 2 dans la sideband.
- Les effets de seuil, de variation de résolution et les coupures d'analyse sont inclus.

■ Signal

- Tirer aléatoirement une énergie E de la distribution théorique du taux d'événement WIMP.
- Signal chaleur : ajout de bruit gaussien à E pour chacune des 2 voies chaleur.
- Signal ionisation : correction des effets Luke-Neganov et de quenching, ajout de bruit ionisation corrélé pour chacune des 4 voies ionisation.
- Les effets de seuil, de variation résolution et les coupures d'analyse sont inclus.

■ Fonctionnement

- Les BDT permettent de résoudre un problème de classification supervisée.
- L'élément de base est l'arbre de décision : coupures séquentielles optimisées dans l'espace des paramètres.
- Boosting : plusieurs arbres sont utilisés. À chaque étape, un nouveau poids est affecté à chaque événement en fonction du score de classification.
- Les prédictions sont ensuite moyennées : l'espace à n paramètres est réduit à un espace à une seule variable, le BDT output.

■ Fonctionnement

- Les BDT permettent de résoudre un problème de classification supervisée.
- L'élément de base est l'arbre de décision : coupures séquentielles optimisées dans l'espace des paramètres.
- Boosting : plusieurs arbres sont utilisés. À chaque étape, un nouveau poids est affecté à chaque événement en fonction du score de classification.
- Les prédictions sont ensuite moyennées : l'espace à n paramètres est réduit à un espace à une seule variable, le BDT output.

■ Fonctionnement

- Les BDT permettent de résoudre un problème de classification supervisée.
- L'élément de base est l'arbre de décision : coupures séquentielles optimisées dans l'espace des paramètres.
- Boosting : plusieurs arbres sont utilisés. À chaque étape, un nouveau poids est affecté à chaque événement en fonction du score de classification.
- Les prédictions sont ensuite moyennées : l'espace à n paramètres est réduit à un espace à une seule variable, le BDT output.

■ Fonctionnement

- Les BDT permettent de résoudre un problème de classification supervisée.
- L'élément de base est l'arbre de décision : coupures séquentielles optimisées dans l'espace des paramètres.
- Boosting : plusieurs arbres sont utilisés. À chaque étape, un nouveau poids est affecté à chaque événement en fonction du score de classification.
- Les prédictions sont ensuite moyennées : l'espace à n paramètres est réduit à un espace à une seule variable, le BDT output.

■ Fonctionnement

- Les BDT permettent de résoudre un problème de classification supervisée.
- L'élément de base est l'arbre de décision : coupures séquentielles optimisées dans l'espace des paramètres.
- Boosting : plusieurs arbres sont utilisés. À chaque étape, un nouveau poids est affecté à chaque événement en fonction du score de classification.
- Les prédictions sont ensuite moyennées : l'espace à n paramètres est réduit à un espace à une seule variable, le BDT output.

Validation du BDT

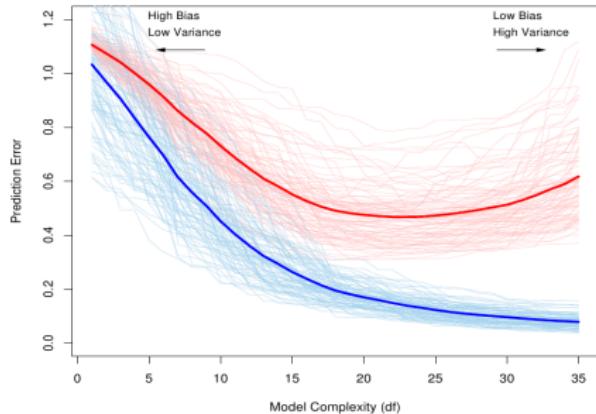
- Choisir les variables + hyperparamètres.
- Deux écueils : sous-entraînement et sur-entraînement.
- Optimisation classique biais-variance.
- But : améliorer les performances sur l'échantillon test.

- Choisir les variables + hyperparamètres.
- Deux écueils : sous-entraînement et sur-entraînement.
- Optimisation classique biais-variance.
- But : améliorer les performances sur l'échantillon test.

- Choisir les variables + hyperparamètres.
- Deux écueils : sous-entraînement et sur-entraînement.
- Optimisation classique biais-variance.
- But : améliorer les performances sur l'échantillon test.

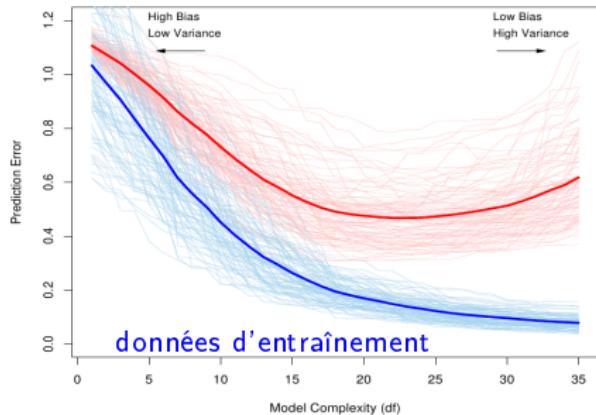
Validation du BDT

- Choisir les variables + hyperparamètres.
- Deux écueils : sous-entraînement et sur-entraînement.
- Optimisation classique biais-variance.
- But : améliorer les performances sur l'échantillon test.



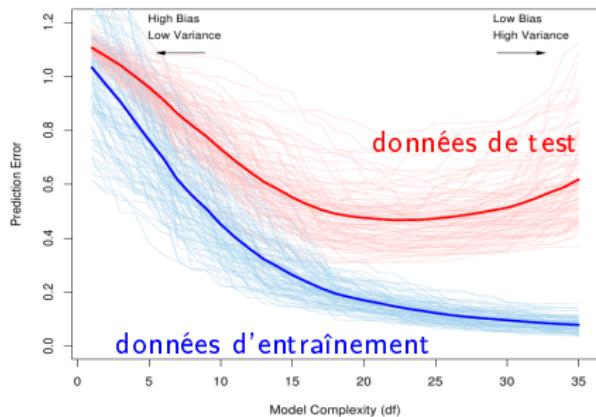
Validation du BDT

- Choisir les variables + hyperparamètres.
- Deux écueils : sous-entraînement et sur-entraînement.
- Optimisation classique biais-variance.
- But : améliorer les performances sur l'échantillon test.



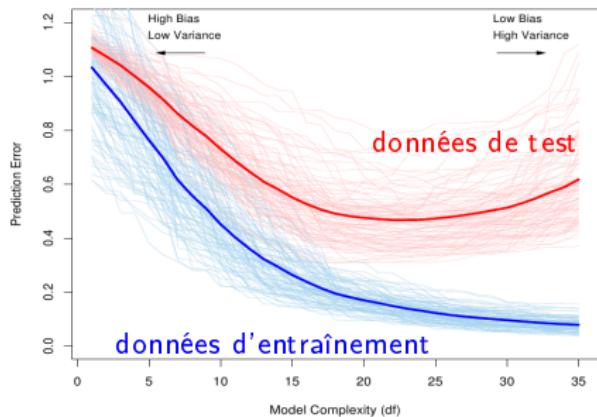
Validation du BDT

- Choisir les variables + hyperparamètres.
- Deux écueils : sous-entraînement et sur-entraînement.
- Optimisation classique biais-variance.
- But : améliorer les performances sur l'échantillon test.



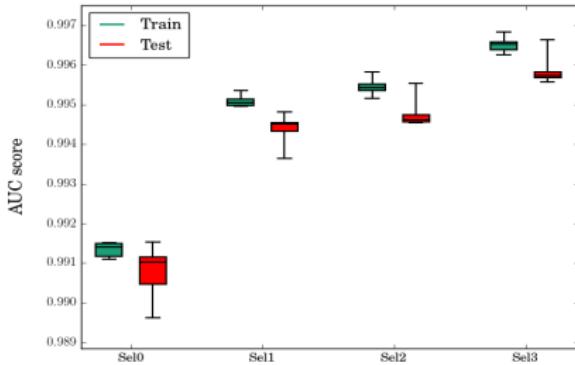
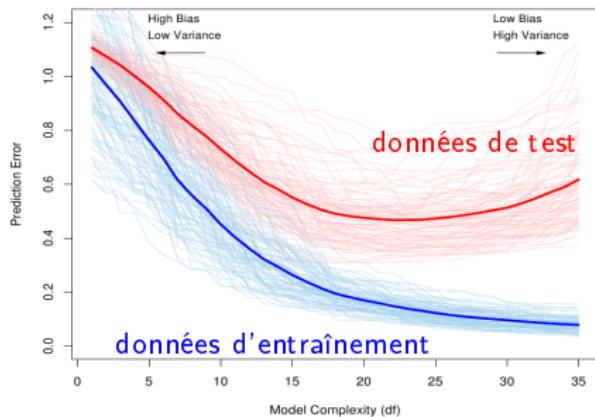
Validation du BDT

- Choisir les variables + hyperparamètres.
- Deux écueils : sous-entraînement et sur-entraînement.
- Optimisation classique biais-variance.
- But : améliorer les performances sur l'échantillon test.



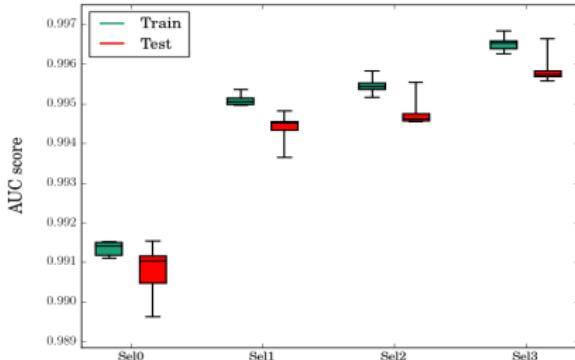
Validation du BDT

- Choisir les variables + hyperparamètres.
- Deux écueils : sous-entraînement et sur-entraînement.
- Optimisation classique biais-variance.
- But : améliorer les performances sur l'échantillon test.



Validation du BDT

- Choisir les variables + hyperparamètres.
- Deux écueils : sous-entraînement et sur-entraînement.
- Optimisation classique biais-variance.
- But : améliorer les performances sur l'échantillon test.
- Variables :
 - EC1, EC2, EIA, EIB, EIC, EID
 - (EFID-QER), HR
- Hyperparamètres :
 - Prof = 3, arbres = 150,
Régularisation = 0.1



- Données d'EDELWEISS-III acquises avec FID837 de Juillet 2014 à Décembre 2014.
- Coupures qualité (Chi2, lignes de base) + définition d'une boîte WIMP : $0 < \text{EFID} < 15$ et $1.5 < \text{EC} < 15$ + coupures veto.
- Masse fiduciale de 600g, efficacité des autres coupures > 90%.
- 35 kg.jour d'exposition
- FWHM moyenne = 0.28 keV
- Seuil d'analyse à 1.5 keV.

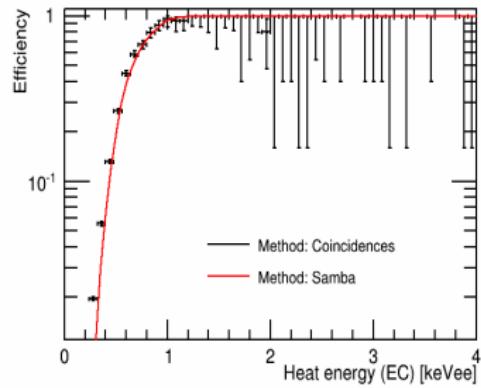
- Données d'EDELWEISS-III acquises avec FID837 de Juillet 2014 à Décembre 2014.
- Coupures qualité (Chi2, lignes de base) + définition d'une boîte WIMP : $0 < \text{EFID} < 15$ et $1.5 < \text{EC} < 15$ + coupures veto.
- Masse fiduciale de 600g, efficacité des autres coupures $> 90\%$.
- 35 kg.jour d'exposition
- FWHM moyenne = 0.28 keV
- Seuil d'analyse à 1.5 keV.

- Données d'EDELWEISS-III acquises avec FID837 de Juillet 2014 à Décembre 2014.
- Coupures qualité (Chi2, lignes de base) + définition d'une boîte WIMP : $0 < \text{EFID} < 15$ et $1.5 < \text{EC} < 15$ + coupures veto.
- Masse fiduciale de 600g, efficacité des autres coupures $> 90\%$.
- 35 kg.jour d'exposition
- FWHM moyenne = 0.28 keV
- Seuil d'analyse à 1.5 keV.

- Données d'EDELWEISS-III acquises avec FID837 de Juillet 2014 à Décembre 2014.
- Coupures qualité (Chi2, lignes de base) + définition d'une boîte WIMP : $0 < \text{EFID} < 15$ et $1.5 < \text{EC} < 15$ + coupures veto.
- Masse fiduciale de 600g, efficacité des autres coupures $> 90\%$.
- 35 kg.jour d'exposition
- FWHM moyenne = 0.28 keV
- Seuil d'analyse à 1.5 keV.

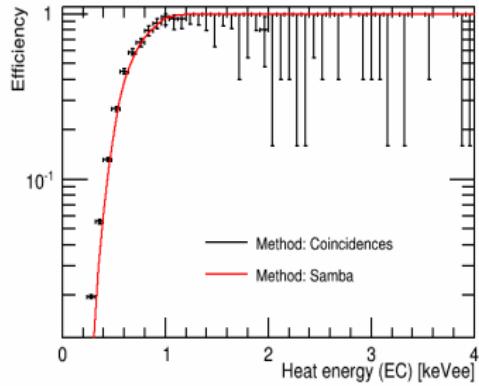
Sélection des données

- Données d'EDELWEISS-III acquises avec FID837 de Juillet 2014 à Décembre 2014.
- Coupures qualité (Chi2, lignes de base) + définition d'une boîte WIMP : $0 < \text{EFID} < 15$ et $1.5 < \text{EC} < 15$ + coupures veto.
- Masse fiduciale de 600g, efficacité des autres coupures $> 90\%$.
- 35 kg.jour d'exposition
- FWHM moyenne = 0.28 keV
- Seuil d'analyse à 1.5 keV.

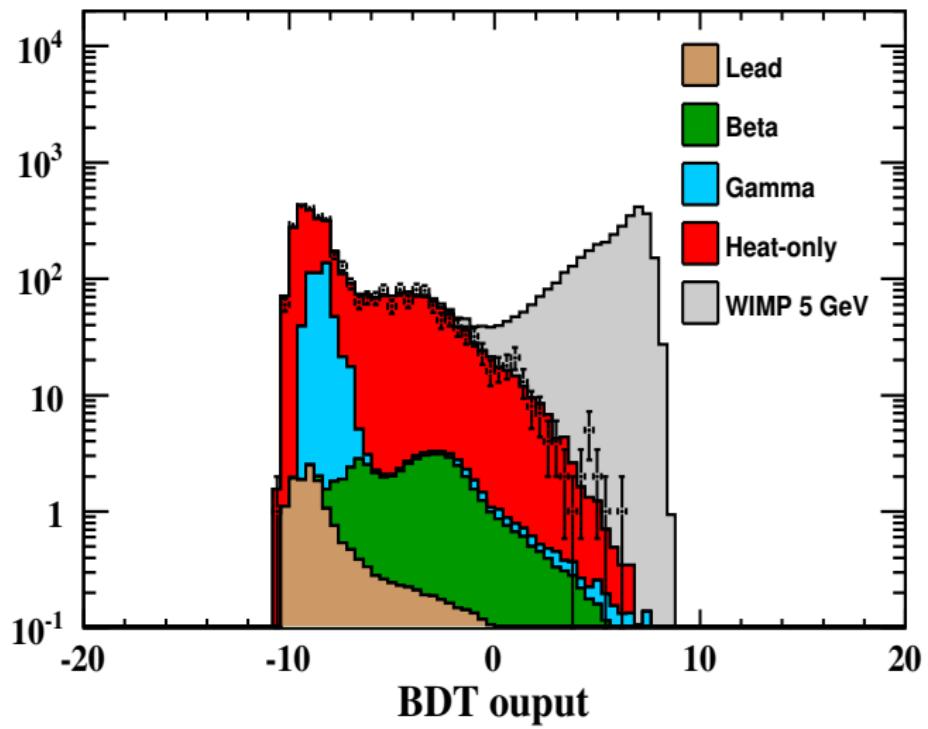


Sélection des données

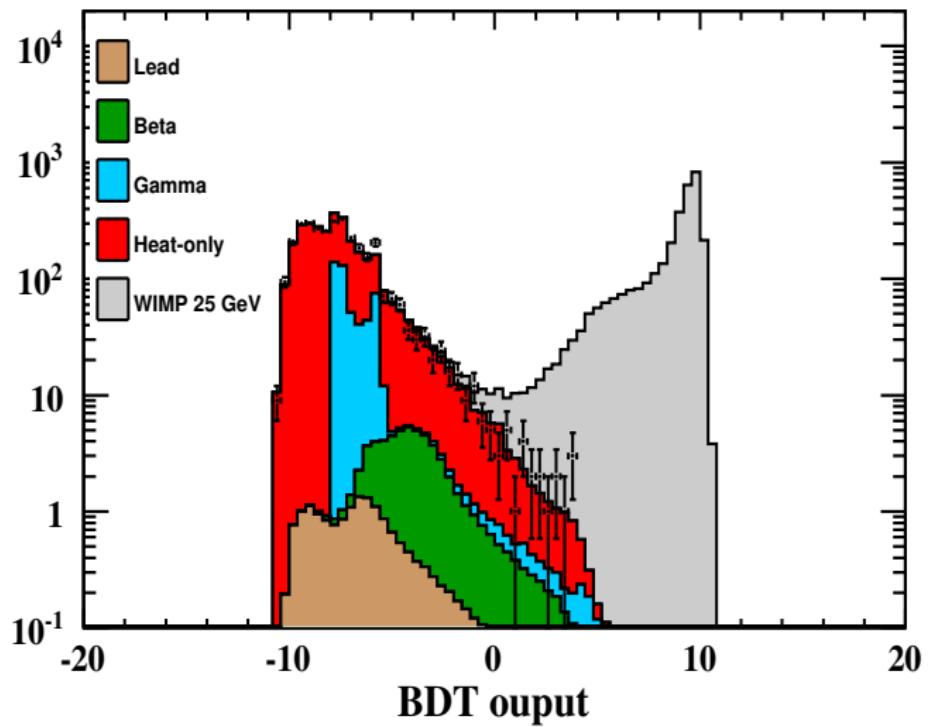
- Données d'EDELWEISS-III acquises avec FID837 de Juillet 2014 à Décembre 2014.
- Coupures qualité (Chi^2 , lignes de base) + définition d'une boîte WIMP : $0 < \text{EFID} < 15$ et $1.5 < \text{EC} < 15$ + coupures veto.
- Masse fiduciale de 600g, efficacité des autres coupures > 90%.
- 35 kg.jour d'exposition
- FWHM moyenne = 0.28 keV
- Seuil d'analyse à 1.5 keV.



Résultats BDT



Résultats BDT



- Pas d'excès significatif, bon accord bruit de fond / données.
- Limite exclusion : coupure sur BDT output + limite Poisson
- La valeur de la coupure est optimisée comme suit :

- Pas d'excès significatif, bon accord bruit de fond / données.
- Limite exclusion : coupure sur BDT output + limite Poisson
- La valeur de la coupure est optimisée comme suit :

- Pas d'excès significatif, bon accord bruit de fond / données.
- Limite exclusion : coupure sur BDT output + limite Poisson
- La valeur de la coupure est optimisée comme suit :

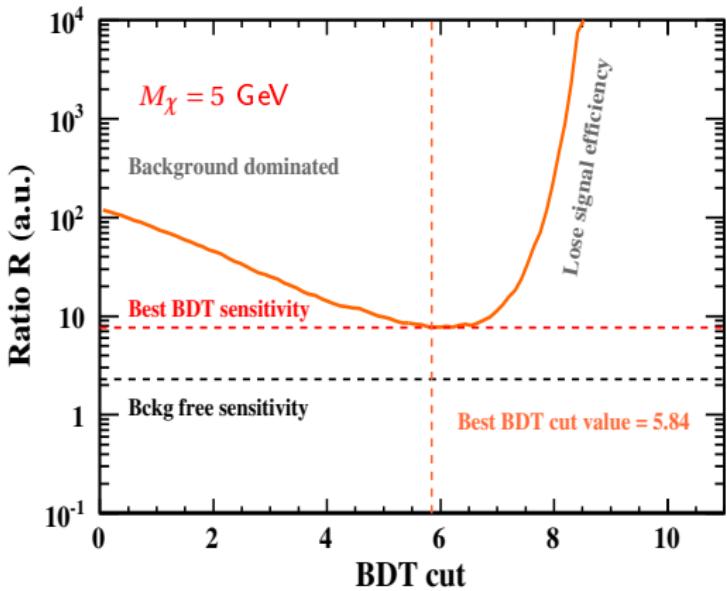
- Pas d'excès significatif, bon accord bruit de fond / données.
- Limite exclusion : coupure sur BDT output + limite Poisson
- La valeur de la coupure est optimisée comme suit :

$$R = \frac{\sum_n \mathcal{P}_{90}(n) P[X = n; N_{\text{bckg}}(\text{cut})]}{\epsilon_{\text{WIMP}}(\text{cut})}$$

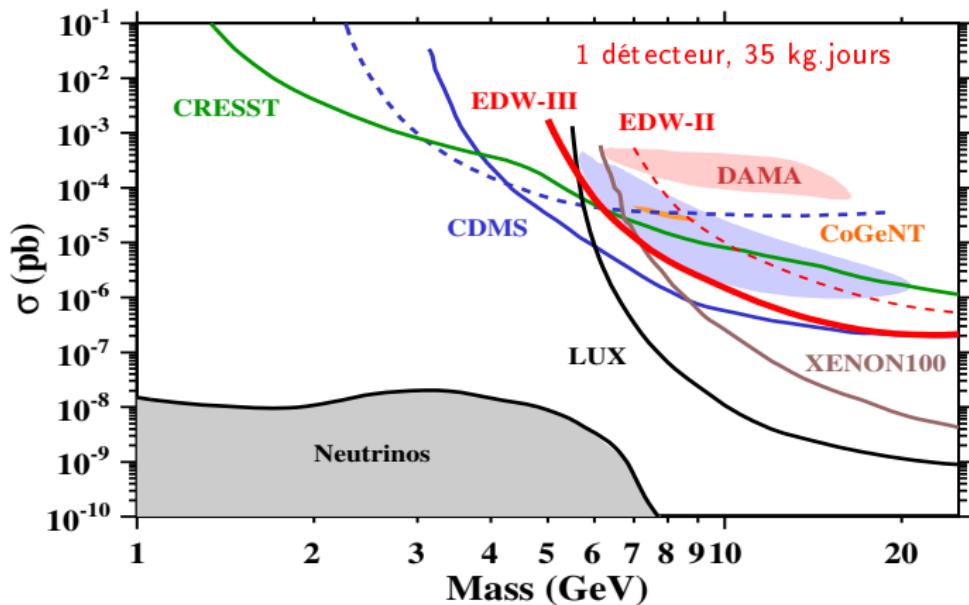
Analyse statistique

- Pas d'excès significatif, bon accord bruit de fond / données.
- Limite exclusion : coupure sur BDT output + limite Poisson
- La valeur de la coupure est optimisée comme suit :

$$R = \frac{\sum_n \mathcal{P}_{90}(n) P[X = n; N_{\text{bckg}}(\text{cut})]}{\epsilon_{\text{WIMP}}(\text{cut})}$$

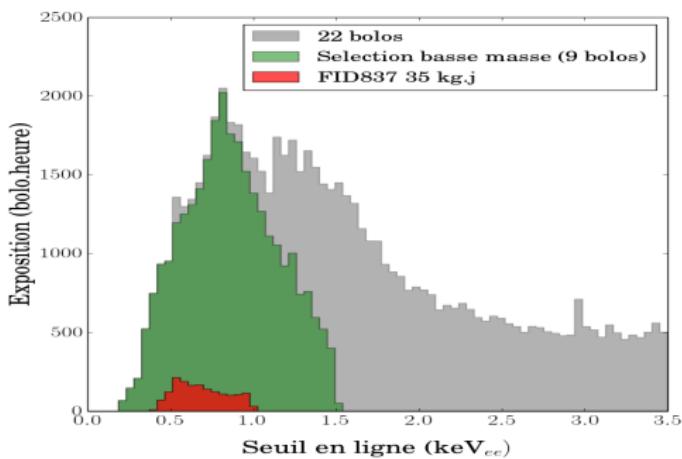


Limite FID837 (35 kg.jours)

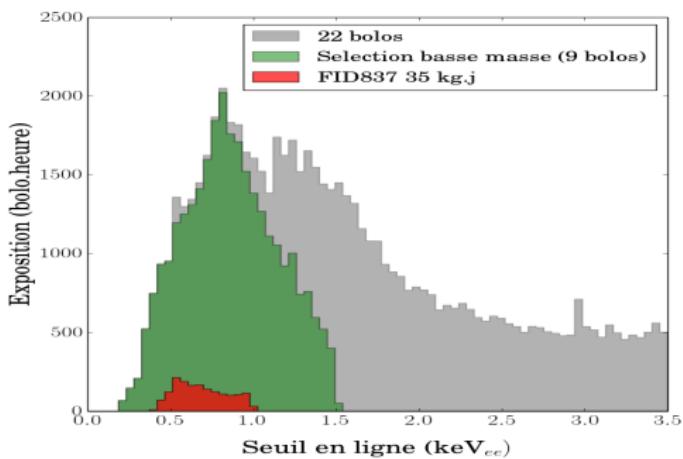


Actualisation de : arXiv 1504.00820

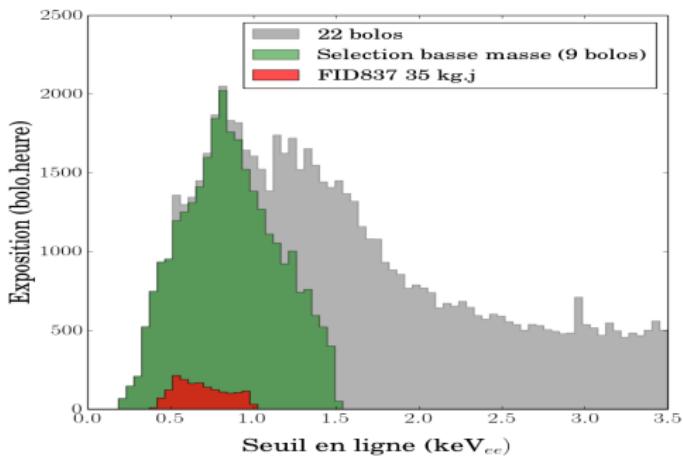
- Extension de l'analyse sur l'ensemble des données EDW-III (Juillet 2014 - Avril 2015).
- Amélioration de la sensibilité à basse masse :
 - Réduction fond chaleur seule.
 - Améliorer la résolution ionisation (HEMT).
 - Stratégie haut voltage



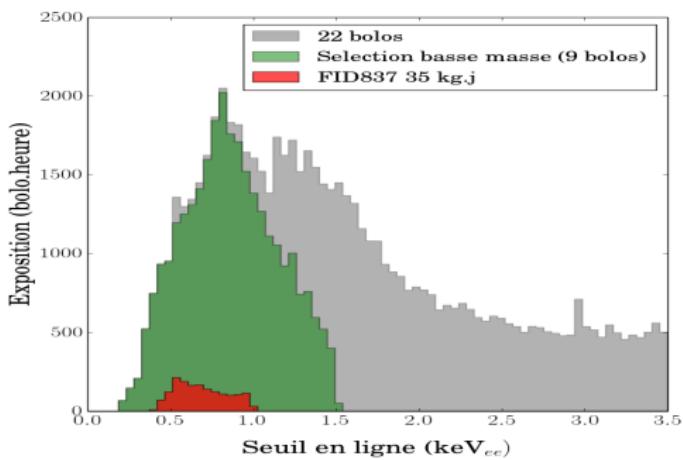
- Extension de l'analyse sur l'ensemble des données EDW-III (Juillet 2014 - Avril 2015).
- Amélioration de la sensibilité à basse masse :
 - Réduction fond chaleur seule.
 - Améliorer la résolution ionisation (HEMT).
 - Stratégie haut voltage.



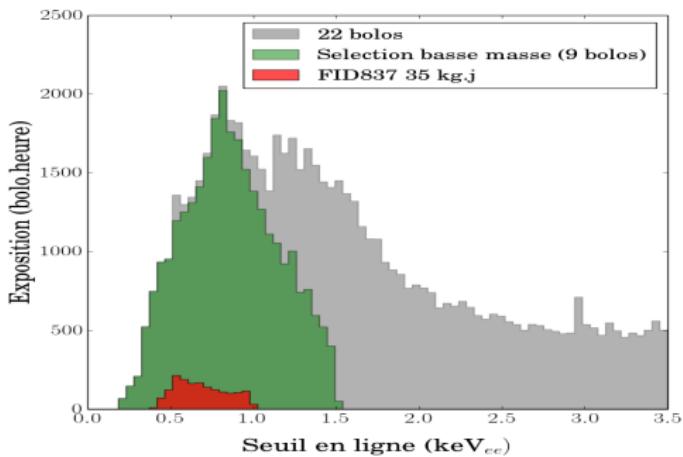
- Extension de l'analyse sur l'ensemble des données EDW-III (Juillet 2014 - Avril 2015).
- Amélioration de la sensibilité à basse masse :
 - Réduction fond chaleur seule.
 - Améliorer la résolution ionisation (HEMT).
 - Stratégie haut voltage.



- Extension de l'analyse sur l'ensemble des données EDW-III (Juillet 2014 - Avril 2015).
- Amélioration de la sensibilité à basse masse :
 - Réduction fond chaleur seule.
 - Améliorer la résolution ionisation (HEMT).
 - Stratégie haut voltage.



- Extension de l'analyse sur l'ensemble des données EDW-III (Juillet 2014 - Avril 2015).
- Amélioration de la sensibilité à basse masse :
 - Réduction fond chaleur seule.
 - Améliorer la résolution ionisation (HEMT).
 - Stratégie haut voltage.



Conclusions

■ Recherches pour 2 types de particules, les axions et les WIMPs.

■ Axions :

- Étude complète et originale du canal Primakoff :
 $g_A y < 2.15 \times 10^{-9} \text{ GeV}^{-1}$.
- 3 autres canaux étudiés
- La combinaison des résultats permet d'exclure plusieurs ordres de grandeur de la masse de l'axion dans le cadre de modèles QCD.
- Amélioration difficile, mais les excellents seuils d'EDELWEISS III vont grandement accroître la région de signal.

■ WIMPs de basse masse :

- Modélisation de tous les bruits de fond de l'expérience à 6D.
- Nouvelle analyse multivariée avec une optimisation rigoureuse.
- Perspectives : combinaison des 9 meilleurs détecteurs, analyse en vraisemblance pour soustraire le bruit de fond.

Conclusions

■ Recherches pour 2 types de particules, les axions et les WIMPs.

■ Axions :

- Étude complète et originale du canal Primakoff :
 $g_{aY} < 2.15 \times 10^{-9} \text{ GeV}^{-1}$.
- 3 autres canaux étudiés
- La combinaison des résultats permet d'exclure plusieurs ordres de grandeur de la masse de l'axion dans le cadre de modèles QCD.
- Amélioration difficile, mais les excellents seuils d'EDELWEISS III vont grandement accroître la région de signal.

■ WIMPs de basse masse :

- Modélisation de tous les bruits de fond de l'expérience à 6D.
- Nouvelle analyse multivariée avec une optimisation rigoureuse.
- Perspectives : combinaison des 9 meilleurs détecteurs, analyse en vraisemblance pour soustraire le bruit de fond.

Conclusions

■ Recherches pour 2 types de particules, les axions et les WIMPs.

■ Axions :

- Étude complète et originale du canal Primakoff :
 $g_{A\gamma} < 2.15 \times 10^{-9} \text{ GeV}^{-1}$.
- 3 autres canaux étudiés
- La combinaison des résultats permet d'exclure plusieurs ordres de grandeur de la masse de l'axion dans le cadre de modèles QCD.
- Amélioration difficile, mais les excellents seuils d'EDELWEISS III vont grandement accroître la région de signal.

■ WIMPs de basse masse :

- Modélisation de tous les bruits de fond de l'expérience à 6D.
- Nouvelle analyse multivariée avec une optimisation rigoureuse.
- Perspectives : combinaison des 9 meilleurs détecteurs, analyse en vraisemblance pour soustraire le bruit de fond.

Conclusions

■ Recherches pour 2 types de particules, les axions et les WIMPs.

■ Axions :

■ Étude complète et originale du canal Primakoff :

$$g_{A\gamma} < 2.15 \times 10^{-9} \text{ GeV}^{-1}$$

- 3 autres canaux étudiés
- La combinaison des résultats permet d'exclure plusieurs ordres de grandeur de la masse de l'axion dans le cadre de modèles QCD.
- Amélioration difficile, mais les excellents seuils d'EDELWEISS III vont grandement accroître la région de signal.

■ WIMPs de basse masse :

- Modélisation de tous les bruits de fond de l'expérience à 6D.
- Nouvelle analyse multivariée avec une optimisation rigoureuse.
- Perspectives : combinaison des 9 meilleurs détecteurs, analyse en vraisemblance pour soustraire le bruit de fond.

Conclusions

■ Recherches pour 2 types de particules, les axions et les WIMPs.

■ Axions :

- Étude complète et originale du canal Primakoff :
 $g_{A\gamma} < 2.15 \times 10^{-9} \text{ GeV}^{-1}$.
- 3 autres canaux étudiés
- La combinaison des résultats permet d'exclure plusieurs ordres de grandeur de la masse de l'axion dans le cadre de modèles QCD.
- Amélioration difficile, mais les excellents seuils d'EDELWEISS III vont grandement accroître la région de signal.

■ WIMPs de basse masse :

- Modélisation de tous les bruits de fond de l'expérience à 6D.
- Nouvelle analyse multivariée avec une optimisation rigoureuse.
- Perspectives : combinaison des 9 meilleurs détecteurs, analyse en vraisemblance pour soustraire le bruit de fond.

Conclusions

- Recherches pour 2 types de particules, les axions et les WIMPs.
- Axions :
 - Étude complète et originale du canal Primakoff :
 $g_{A\gamma} < 2.15 \times 10^{-9} \text{ GeV}^{-1}$.
 - 3 autres canaux étudiés
 - La combinaison des résultats permet d'exclure plusieurs ordres de grandeur de la masse de l'axion dans le cadre de modèles QCD.
 - Amélioration difficile, mais les excellents seuils d'EDELWEISS III vont grandement accroître la région de signal.
- WIMPs de basse masse :
 - Modélisation de tous les bruits de fond de l'expérience à 6D.
 - Nouvelle analyse multivariée avec une optimisation rigoureuse.
 - Perspectives : combinaison des 9 meilleurs détecteurs, analyse en vraisemblance pour soustraire le bruit de fond.

Conclusions

■ Recherches pour 2 types de particules, les axions et les WIMPs.

■ Axions :

- Étude complète et originale du canal Primakoff :
 $g_{A\gamma} < 2.15 \times 10^{-9} \text{ GeV}^{-1}$.
- 3 autres canaux étudiés
- La combinaison des résultats permet d'exclure plusieurs ordres de grandeur de la masse de l'axion dans le cadre de modèles QCD.
- Amélioration difficile, mais les excellents seuils d'EDELWEISS III vont grandement accroître la région de signal.

■ WIMPs de basse masse :

- Modélisation de tous les bruits de fond de l'expérience à 6D.
- Nouvelle analyse multivariée avec une optimisation rigoureuse.
- Perspectives : combinaison des 9 meilleurs détecteurs, analyse en vraisemblance pour soustraire le bruit de fond.

Conclusions

■ Recherches pour 2 types de particules, les axions et les WIMPs.

■ Axions :

- Étude complète et originale du canal Primakoff :
 $g_{A\gamma} < 2.15 \times 10^{-9} \text{ GeV}^{-1}$.
- 3 autres canaux étudiés
- La combinaison des résultats permet d'exclure plusieurs ordres de grandeur de la masse de l'axion dans le cadre de modèles QCD.
- Amélioration difficile, mais les excellents seuils d'EDELWEISS III vont grandement accroître la région de signal.

■ WIMPs de basse masse :

- Modélisation de tous les bruits de fond de l'expérience à 6D.
- Nouvelle analyse multivariée avec une optimisation rigoureuse.
- Perspectives : combinaison des 9 meilleurs détecteurs, analyse en vraisemblance pour soustraire le bruit de fond.

Conclusions

- Recherches pour 2 types de particules, les axions et les WIMPs.
- Axions :
 - Étude complète et originale du canal Primakoff :
 $g_{A\gamma} < 2.15 \times 10^{-9} \text{ GeV}^{-1}$.
 - 3 autres canaux étudiés
 - La combinaison des résultats permet d'exclure plusieurs ordres de grandeur de la masse de l'axion dans le cadre de modèles QCD.
 - Amélioration difficile, mais les excellents seuils d'EDELWEISS III vont grandement accroître la région de signal.
- WIMPs de basse masse :
 - Modélisation de tous les bruits de fond de l'expérience à 6D.
 - Nouvelle analyse multivariée avec une optimisation rigoureuse.
 - Perspectives : combinaison des 9 meilleurs détecteurs, analyse en vraisemblance pour soustraire le bruit de fond.

Conclusions

■ Recherches pour 2 types de particules, les axions et les WIMPs.

■ Axions :

- Étude complète et originale du canal Primakoff :
 $g_{A\gamma} < 2.15 \times 10^{-9} \text{ GeV}^{-1}$.
- 3 autres canaux étudiés
- La combinaison des résultats permet d'exclure plusieurs ordres de grandeur de la masse de l'axion dans le cadre de modèles QCD.
- Amélioration difficile, mais les excellents seuils d'EDELWEISS III vont grandement accroître la région de signal.

■ WIMPs de basse masse :

- Modélisation de tous les bruits de fond de l'expérience à 6D.
- Nouvelle analyse multivariée avec une optimisation rigoureuse.
- Perspectives : combinaison des 9 meilleurs détecteurs, analyse en vraisemblance pour soustraire le bruit de fond.

Conclusions

- Recherches pour 2 types de particules, les axions et les WIMPs.
- Axions :
 - Étude complète et originale du canal Primakoff :
 $g_{A\gamma} < 2.15 \times 10^{-9} \text{ GeV}^{-1}$.
 - 3 autres canaux étudiés
 - La combinaison des résultats permet d'exclure plusieurs ordres de grandeur de la masse de l'axion dans le cadre de modèles QCD.
 - Amélioration difficile, mais les excellents seuils d'EDELWEISS III vont grandement accroître la région de signal.
- WIMPs de basse masse :
 - Modélisation de tous les bruits de fond de l'expérience à 6D.
 - Nouvelle analyse multivariée avec une optimisation rigoureuse.
 - Perspectives : combinaison des 9 meilleurs détecteurs, analyse en vraisemblance pour soustraire le bruit de fond.