CANBERRA

Dommages radiatifs dans les détecteurs HPGe

Benoît Pirard
R&D Manager, CANBERRA Specialty detectors

Journées thématiques
LPNHE, Paris, 16 juin 2016

CANBERRA

Agenda

- **Détecteurs HPGe**
  - **Spécificités**
  - **Configurations**
- **Dommages radiatifs**
  - **Causes (sources et mécanismes)**
  - **Effets (trapping, etc.)**
- **Prévention et récupération**
  - **Température d'irradiation et cycles thermiques**
  - **Récupération par recuit (annealings)**

CANBERRA

Détecteurs HPGe
Spécificités

- **Le germanium ultra-pur (HPGe) par rapport aux autres semi-conducteurs**
  - **Disponibilité de cristaux**
    - de haute pureté (N_A-N_D ~ 10^9 cm^{-3})
    - de grands volume (0.1 à 1000 cm^3)
    - de grande qualité cristallographique
  - **Excellente collection des charges (mobilité des porteurs)**
  - **Résolution intrinsèque inégalée (E_g et E_{eh})**
  - **Mais opération à température cryogénique**

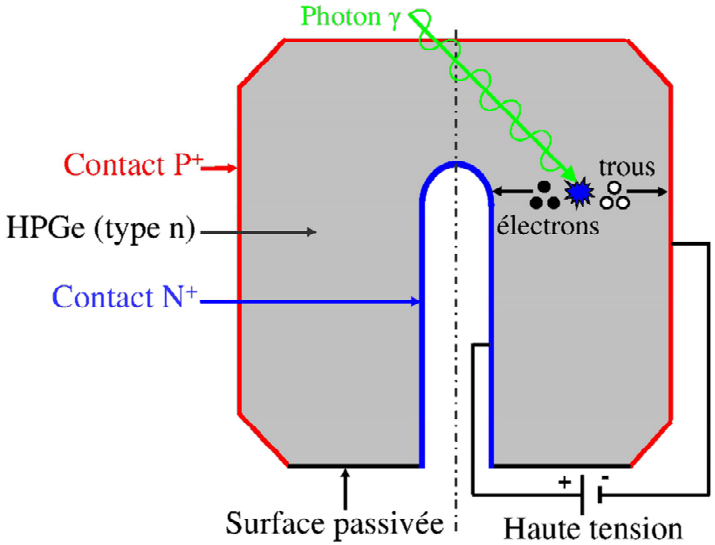
Semiconductor	Ge (77 K)	Si	GaAs	CdTe	CdZnTe	HgI_2
Density [g cm^{-3}]	5.32	2.33	5.32	5.85	5.78	6.3
Band gap [eV]	0.66	1.12	1.43	1.50	1.57	2.13
Pair creation energy [eV]	2.95	3.62	4.2	4.43	4.64	4.2
Electron mobility [cm^2 V^{-1} s^{-1}]	3900	1100	8000	1100	1000	60
Hole mobility [cm^2 V^{-1} s^{-1}]	1900	480	400	100	50 to 80	8

Semiconductor properties (all data measured at room temperature, except for Ge)

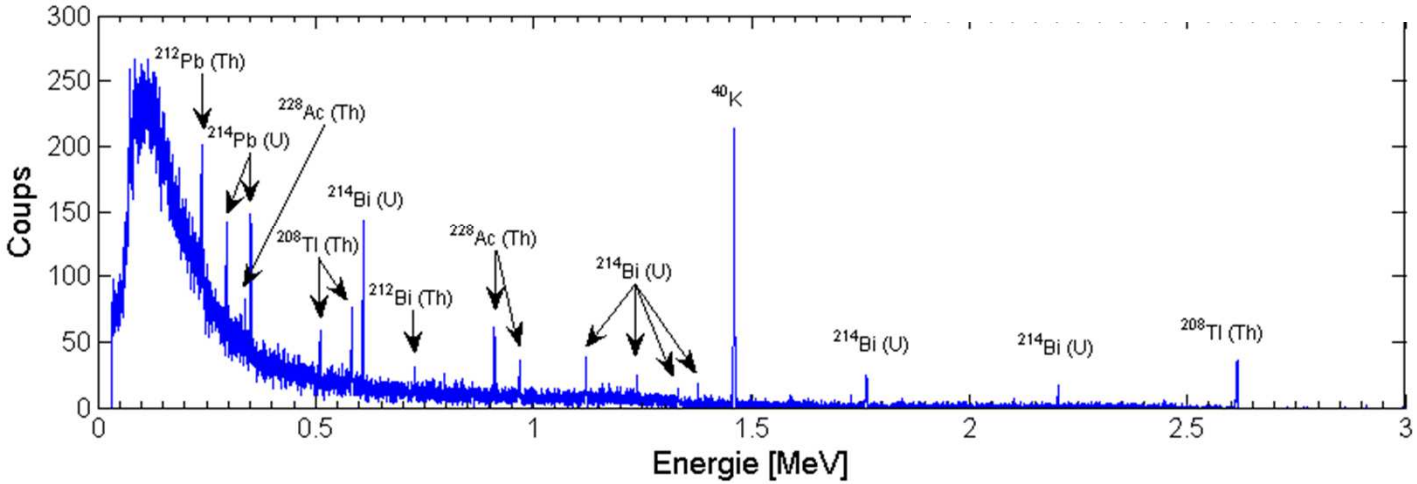
CANBERRA

Détecteurs HPGe
Principe de détection

- **Volume actif = zone déplétée**
  - **Doit être maximisé et très bien modélisé**
  - **Les deux électrodes peuvent être utilisées pour collection et amplification des charges**
    - Indifférence entre e et h
    - Choix de la capacité la plus faible (bruit)



- **Spectre typique:**
  - **Range en énergie: typique 1 keV à 10 MeV**



CANBERRA

Détecteurs HPGe
Configurations

Type N | Type P

Coaxiaux
- Configuration la plus commune
- Grande efficacité de détection

Semi-plan ou Point Contact (BEGe, SAGe)
- Meilleure résolution

Plans
- Tx de comptage élevé
- Faibles énergies (x)

Autres configurations: contacts segmentés, puits (well), trou traversant (true coax SAGe Well ou coax inversée, etc.

Contact N+ (cathode)

Contact P+ (anode)

CANBERRA

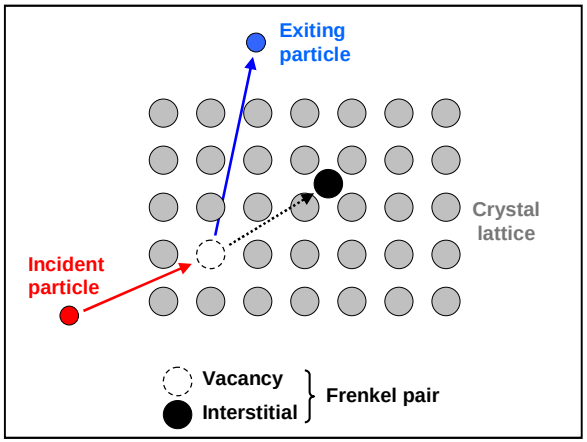
Dommages radiatifs
Causes

Dépôts d'énergie "non-ionisants" dans le HPGe

Déplacement atomique

- Atomes déplacés dans le réseau cristallin via des collisions avec les particules incidentes ou secondaires
- Il en résultes des défauts localisés dans le réseau cristalin (dislocations, paires Frenkel), qui peuvent former des régions désordonnées de plus grande échelle.

→ **Source principale de dommage, peut être "réparée" par processus de recuit (annealing)**

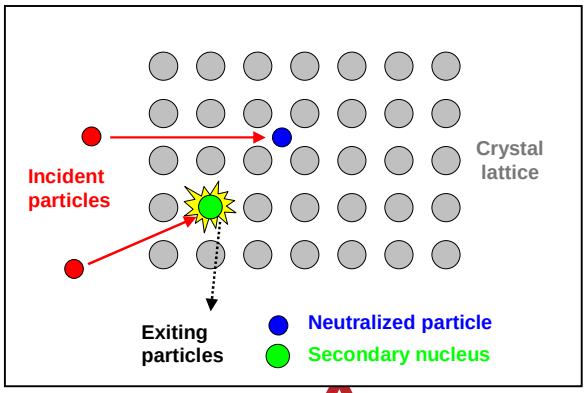


Production d'impuretés

- Noyaux résultant de la transmutation d'isotopes Ge
- Particules stoppées et neutralisées dans le cristal (protons et alpha typiquement).

→ **Source secondaire de dommage, irréversible**

<u>Note</u>: phénomène générant également de la radioactivité au sein du détecteur (activation)



CANBERRA

Dommages radiatifs
Causes

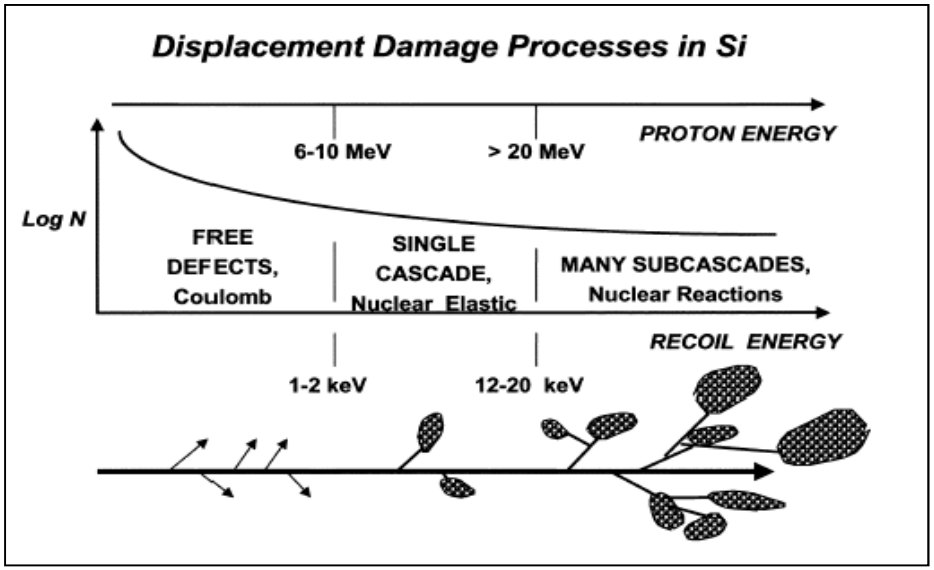
Note: grand nombre d'études réalisées dans le cas du Si

Ref. recommandée: Srour et al., IEEE TNS Vol. 50, No. 3 (2003)

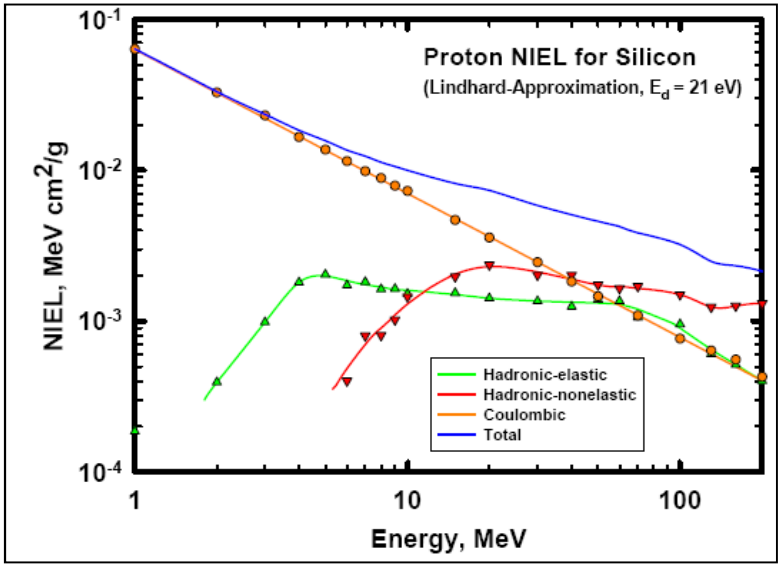
Relevant processes in displacement damage:

- **Colombic elastic scattering (Eproton < ~ 10 MeV)**
- **Nuclear (or hadronic) elastic scattering (5 < Eproton < 20 MeV)**
- **Nuclear (or hadronic) inelastic scattering (E > 20 MeV)**

→ Lien direct (proportionel) avec le **NIEL (Non Ionizing Energy loss)** de la particule incidente (Summers et al. 1987, Marshal et al. 1989)



Srour et al., IEEE Trans. Nucl Sci., Vol. 50, No. 3, 2003.



Thiel et al., SPENVIS & GEANT4 Workshop, Leuven October 2005

CANBERRA

Dommages radiatifs
Sources

	Neutrons	Protons
Environnement typique	**Physique nucléaire** (accélérateurs et réacteurs nucléaires) **Spatial** (neutrons secondaires)	**Spatial** (rayonnement cosmique, ceintures de radiation, événements solaires)
Exemples	EUROBALL AGATA, GRETA	WIND / TGRS, RHESSI, INTEGRAL/SPI, Mars Odyssey, KAGUYA, Messenger, etc.
Range en énergie	~ 1 MeV à ~100 MeV	~10 MeV à ~ 10 GeV
Distribution des dommages dans le volume ?	Homogène	Non homogène pour les protons solaires (< ~ 200 MeV) Homogène pour les protons cosmiques

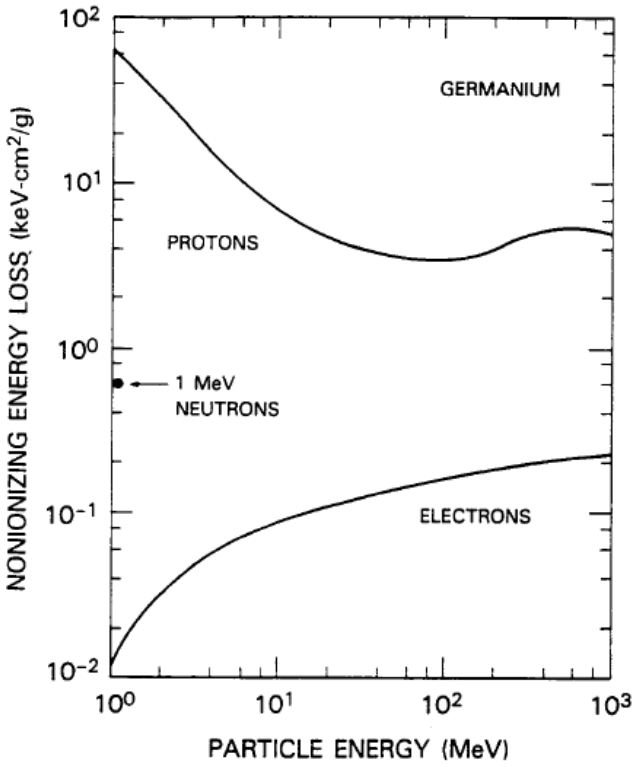
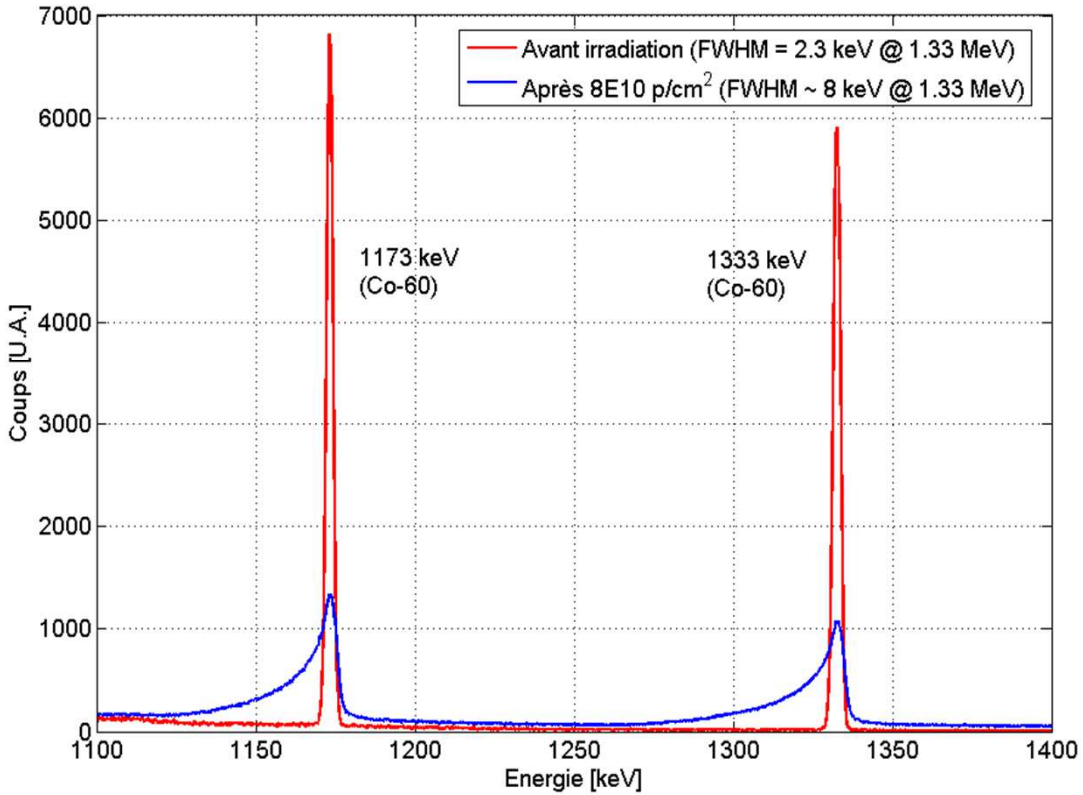


Figure 1. Calculations of the NIEL in Ge due to incident protons and electrons.

CANBERRA

Dommages radiatifs
Effets

- **Effet principal: dégradation de la résolution en énergie**
  - **Distorsion des pics gaussiens (apparition de tailing), surtout à haute énergie dans le spectre**



CANBERRA

Dommages radiatifs
Effets

Les premières études des dommages neutrons / protons dans le HPGe ont montré que:

- Les trous sont piégés en majorité (Pehl et al. 1979)
- Les centres de piégeage (trapping centers) sont plus complexes que des défauts ponctuels isolés (Darken et al. 1981, Koenen et al. 1995)
- Le trapping peut être modélisé (et corrigé …) par des paramètres simples:
  - λ_h: libre parcours moyen des trous $\lambda = \frac{1}{\frac{\sigma_0}{E} \times n_{trap}}$
  - n_{trap} : densité (homogène) de trapping centers
  - σ_0 : efficace de trapping
  - CCE (charge collection efficieny): ratio des charges induites (réellement mesurées sur l'électrode) sur celles initialement créée dans le volume. Toujours > 0.998 !!!
- En fonction de la position d'interaction dans le HPGe, les trous vont subir un déficit sur leur trajet vers l'anode, fonction de la longueur. Cela se voit sur les deux signaux (Shockley Ramo).

CANBERRA

Dommages radiatifs
Trapping vs configuration

Détecteur coaxial de type P

- Electrode interne collectant les trous
- Le volume majoritaire (grands rayons) présente le plus grand déficit en énergie
- CAS PIRE

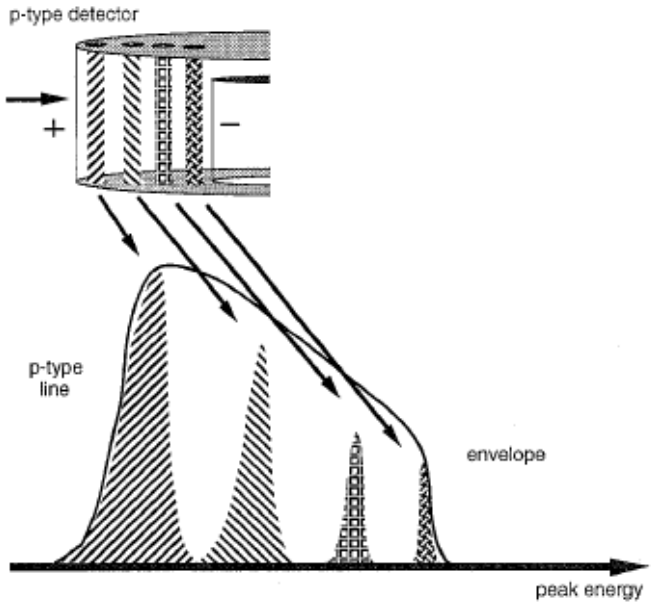
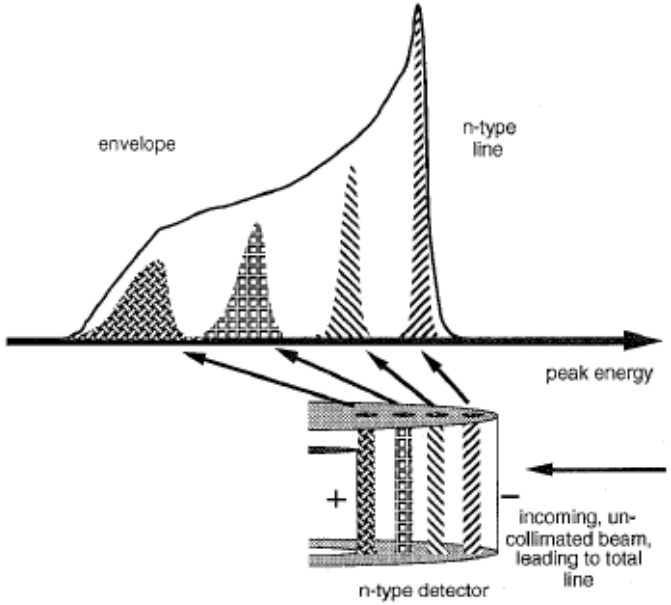


Fig. 5: Developement of line shapes of n-type and p-type coaxial detectors.

Détecteur coaxial de type N

- Electrode interne collectant les trous
- Le volume majoritaire (grands rayons) présente le plus grand déficit en énergie
- CAS PREFERABLE: choix généralement opéré pour spatial et physique nucléaire



Koenen et al. (1996)

CANBERRA

Dommages radiatifs
Seuils de dégradation (trapping)

- **Seuils d'apparition des premières dégradations**

Note: valeurs approximatives (appréciation dépendant des crit`res de mesure, température des détecteurs, etc.)

Type de particule	Seuil de fluence	Référence
Neutrons 1 MeV	10^9 n/cm^2	Thomas et al., 1993
Neutrons 5 MeV	2.5 10^9 n/cm^2	Borrel et al., 1999
Neutrons 16 MeV	10^9 n/cm^2	Borrel et al., 1999
Neutrons 6-70 MeV (E_{moy}=27 MeV)	5 10^8 n/cm^2	Borrel et al., 1999
Protons de 50 MeV	5 10^8 p/cm^2	Pirard et al. 2006
Protons 1.5 GeV	5 10^7 p/cm^2	Pehl et al., 1978
Protons de 5.1 GeV	7 10^7 p/cm^2	Brückner et al., 1991

CANBERRA

Dommages radiatifs
Evolution

Seuils d'apparition des premières dégradations

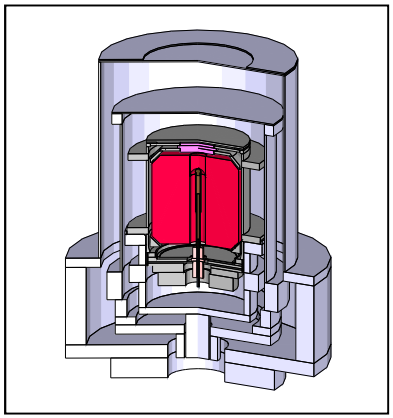
Note: valeurs approximatives (appréciation dépendant des crit`res de mesure, température des détecteurs, etc.)

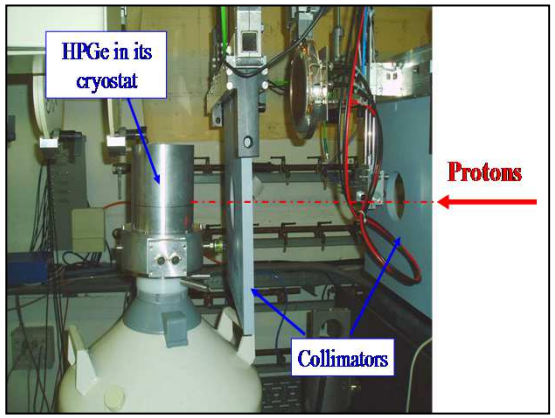
Type de particule	Seuil de fluence	Référence
Neutrons 1 MeV	10^9 n/cm^2	Thomas et al., 1993
Neutrons 5 MeV	2.5 10^9 n/cm^2	Borrel et al., 1999
Neutrons 16 MeV	10^9 n/cm^2	Borrel et al., 1999
Neutrons 6-70 MeV (E_{moy}=27 MeV)	5 10^8 n/cm^2	Borrel et al., 1999
Protons de 50 MeV	5 10^8 p/cm^2	Pirard et al. 2006
Protons 1.5 GeV	5 10^7 p/cm^2	Pehl et al., 1978
Protons de 5.1 GeV	7 10^7 p/cm^2	Brückner et al., 1991

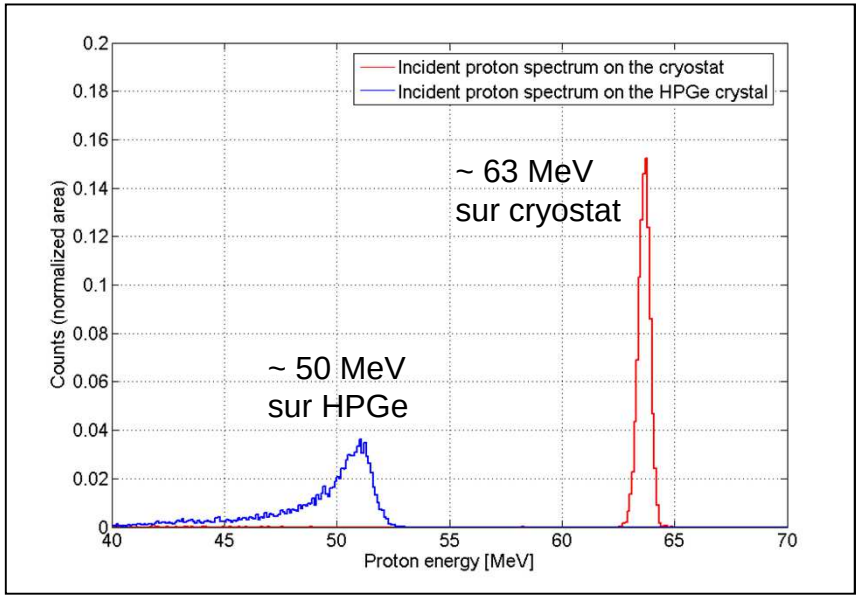
CANBERRA

Dommages radiatifs
Evolution typique du spectre

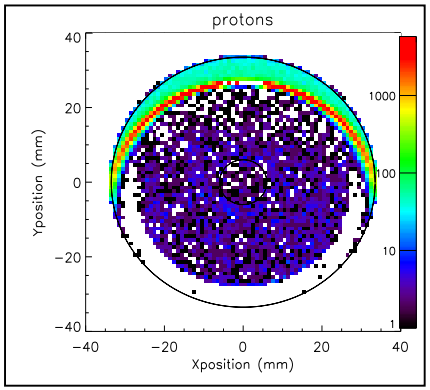
- **Exemple: campagne d'irradiation (Pirard et al. 2006)**

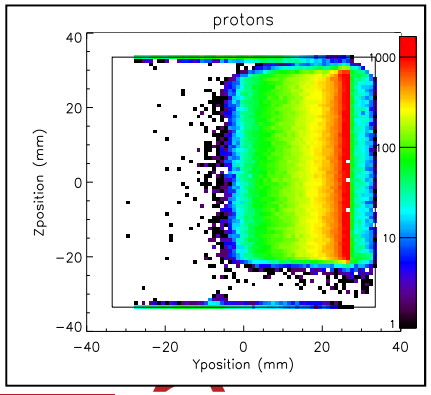






Distribution of the final positions of the primary protons in the HPGe crystal

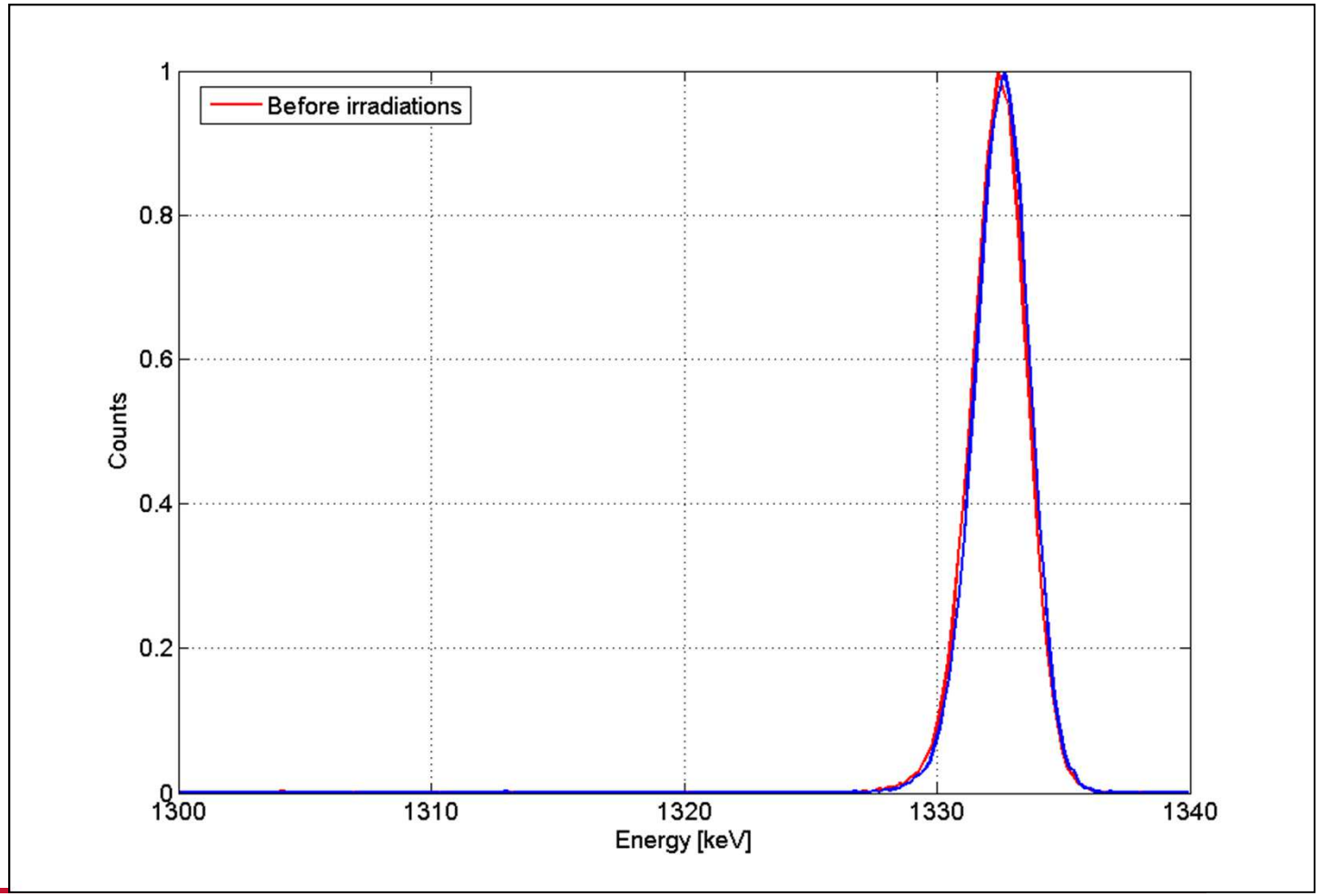




CANBERRA

Dommages radiatifs
Evolution typique du spectre

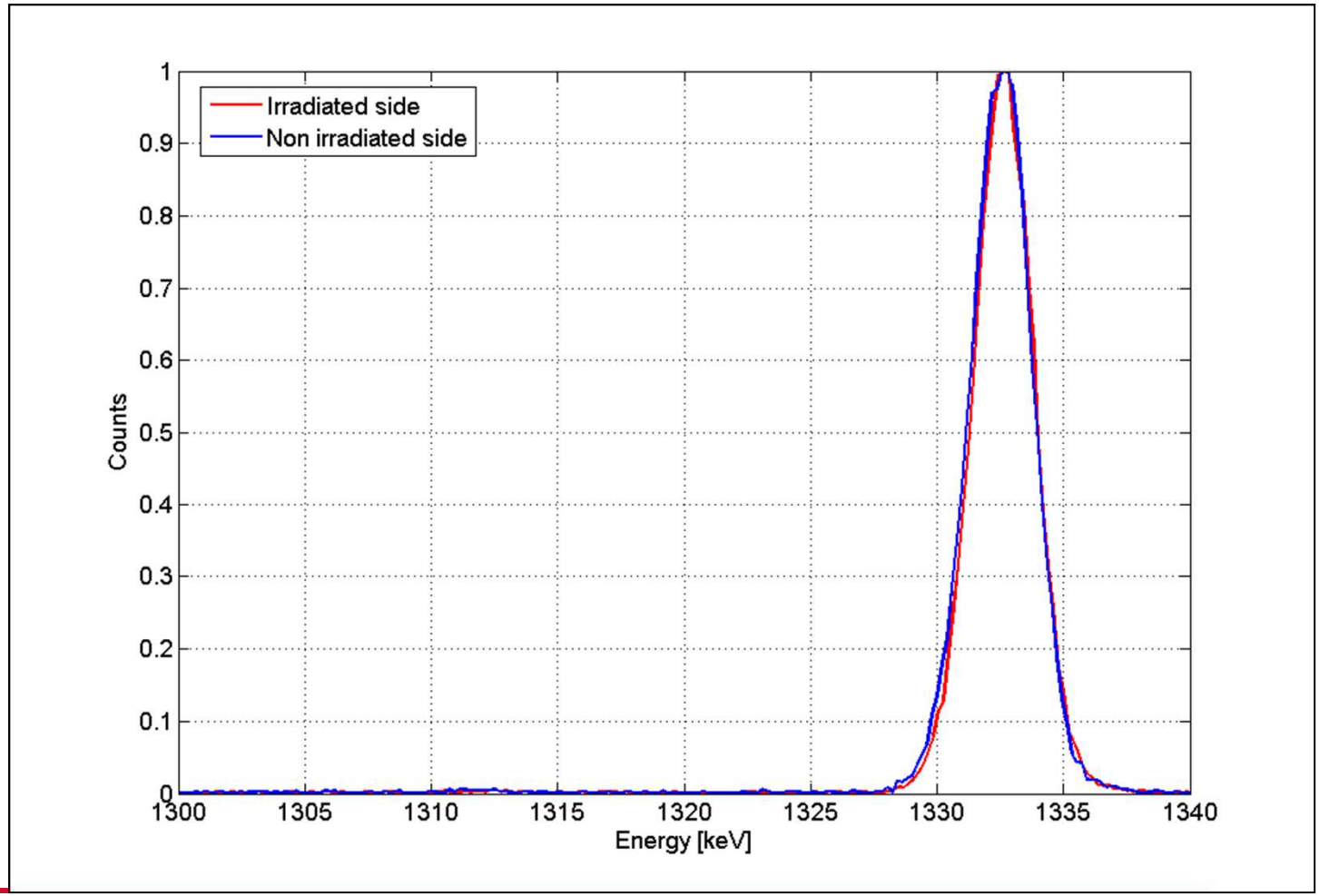
- **Evolution of the peak @ 1.33 MeV (Co-60) – Before irradiations**



CANBERRA

Dommages radiatifs
Evolution typique du spectre

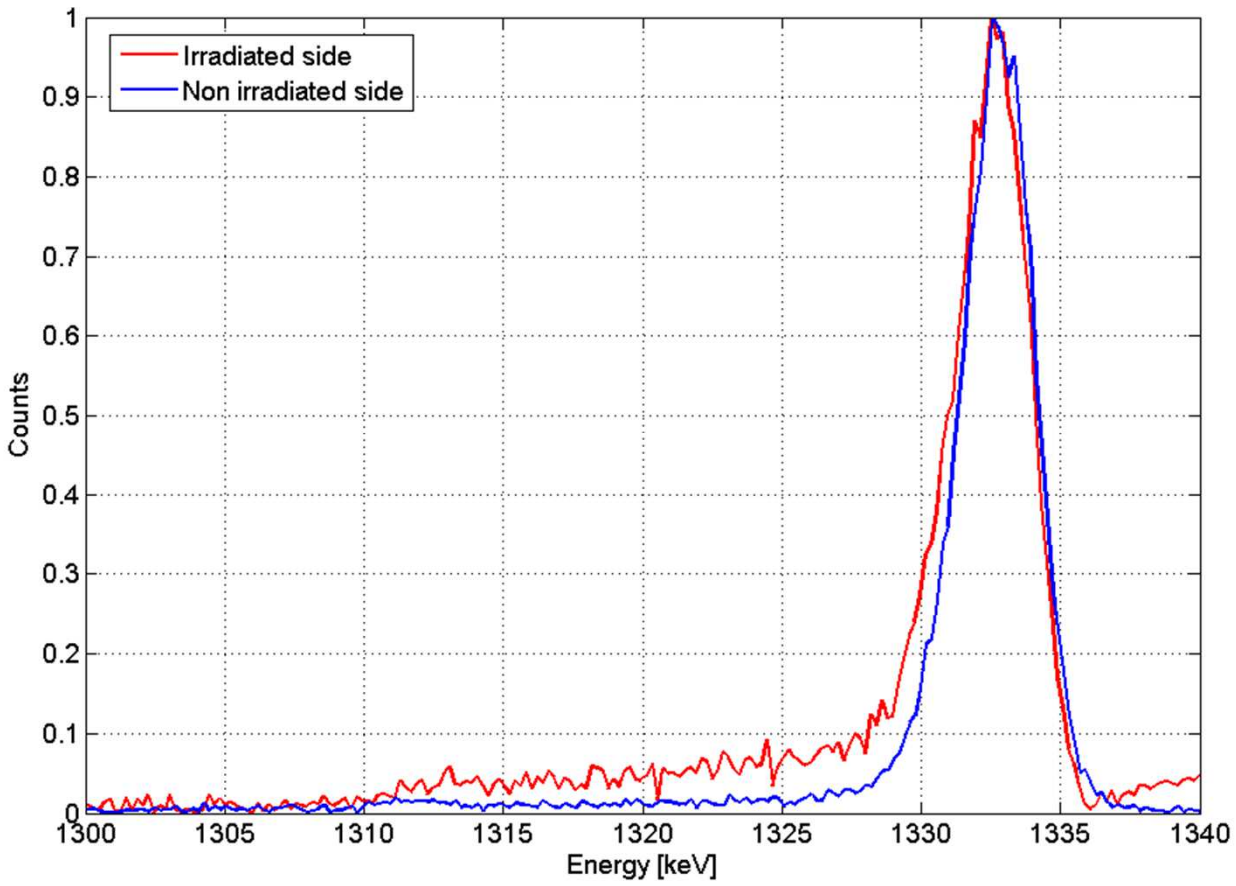
- **Evolution of the peak @ 1.33 MeV (Co-60) – After 10^9 p/cm²**



CANBERRA

Dommages radiatifs
Evolution typique du spectre

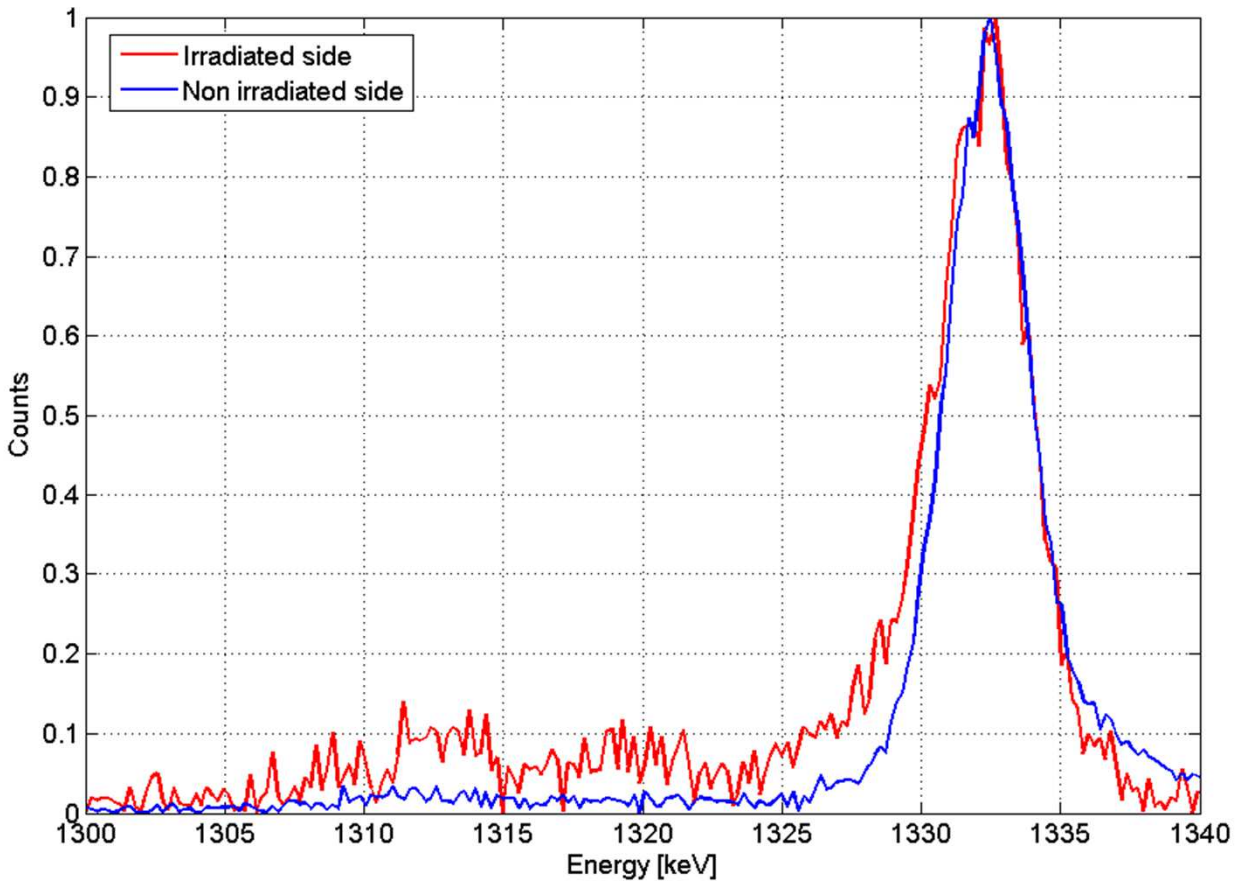
- **Evolution of the peak @ 1.33 MeV (Co-60) – After 5 10^9 p/cm²**



CANBERRA

Dommages radiatifs
Evolution typique du spectre

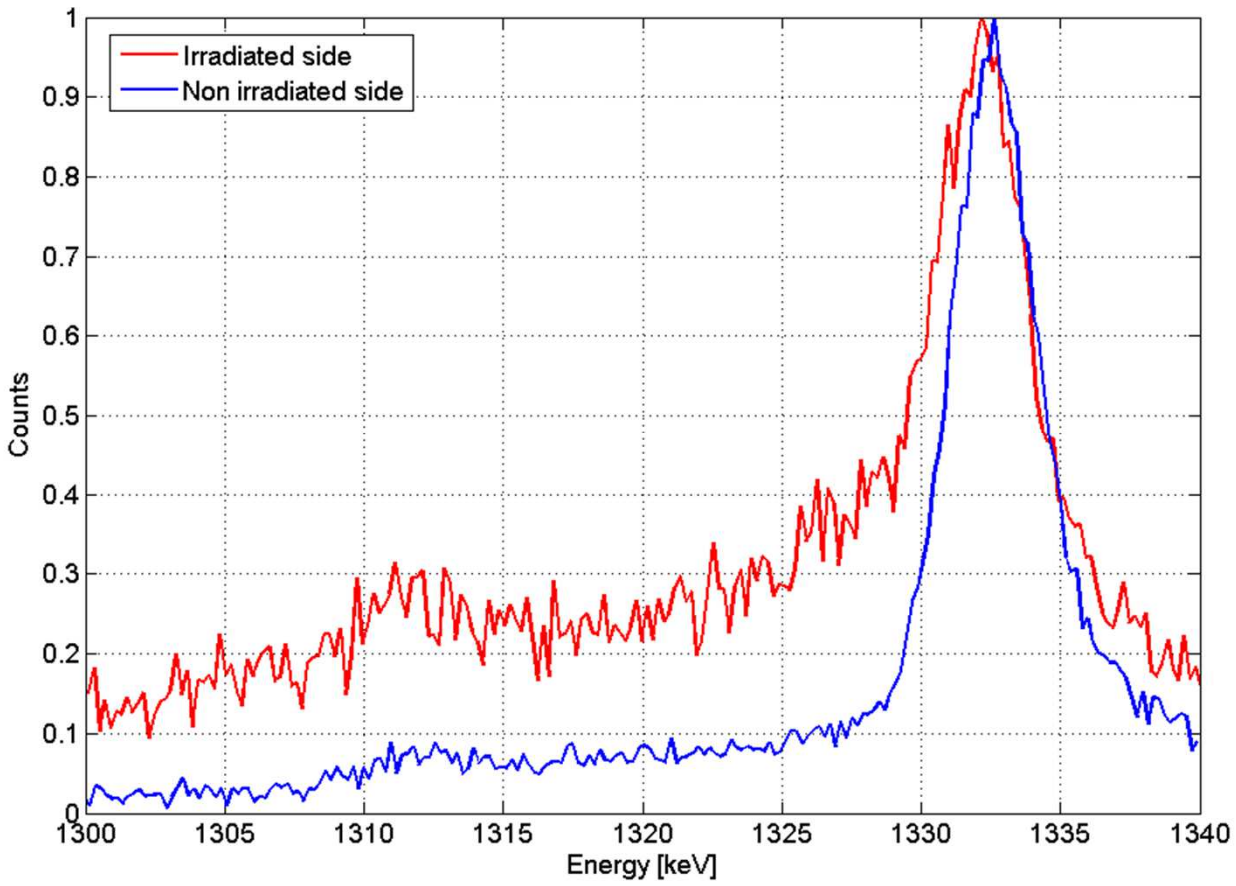
- **Evolution of the peak @ 1.33 MeV (Co-60) – After 9 10^9 p/cm²**



CANBERRA

Dommages radiatifs
Evolution typique du spectre

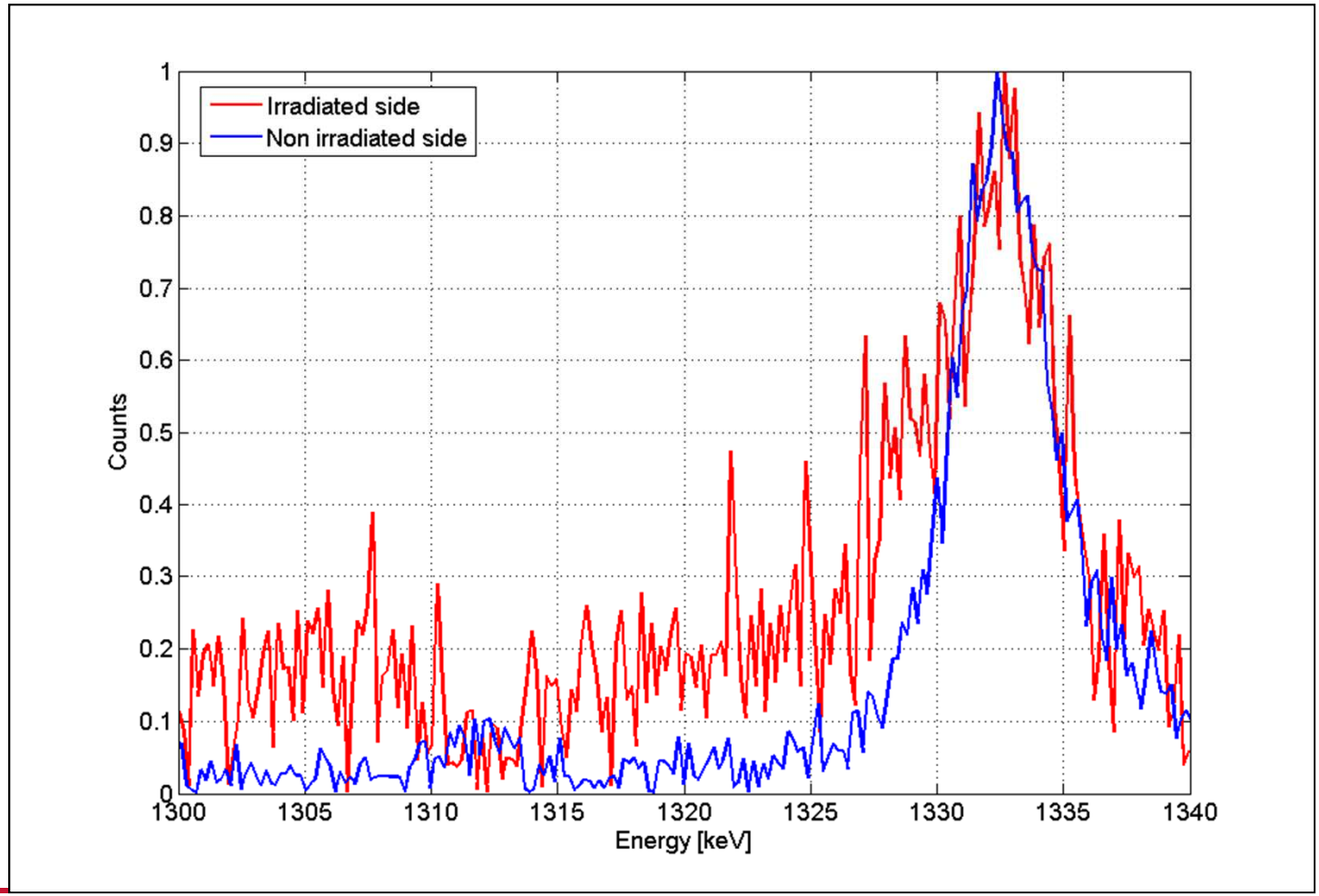
- **Evolution of the peak @ 1.33 MeV (Co-60) – After 2.5 10^{10} p/cm²**



CANBERRA

Dommages radiatifs
Evolution typique du spectre

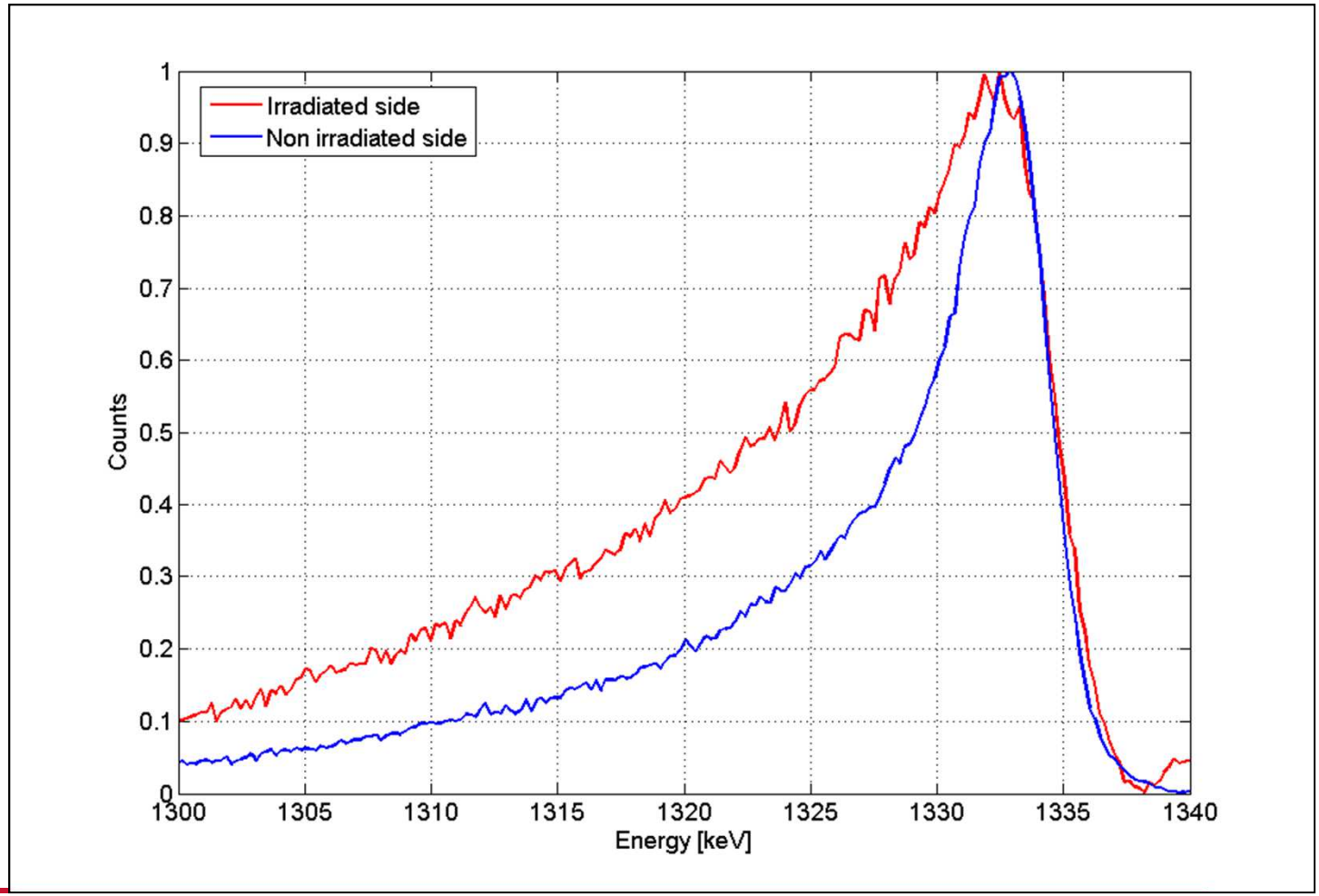
- **Evolution of the peak @ 1.33 MeV (Co-60) – After 7.6 10^{10} p/cm²**



CANBERRA

Dommages radiatifs
Evolution typique du spectre

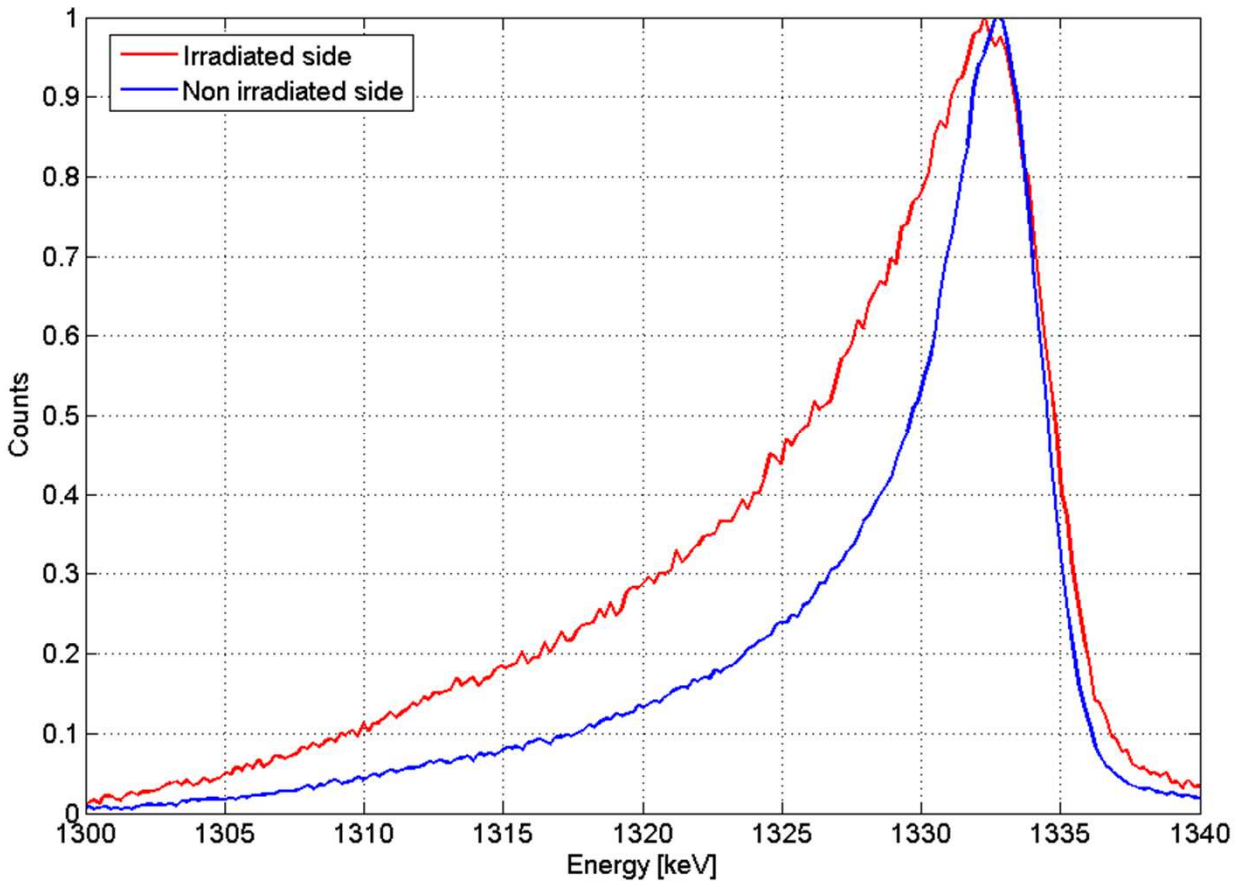
- **Evolution of the peak @ 1.33 MeV (Co-60) – After 1day @ T < 0°C**



CANBERRA

Dommages radiatifs
Evolution typique du spectre

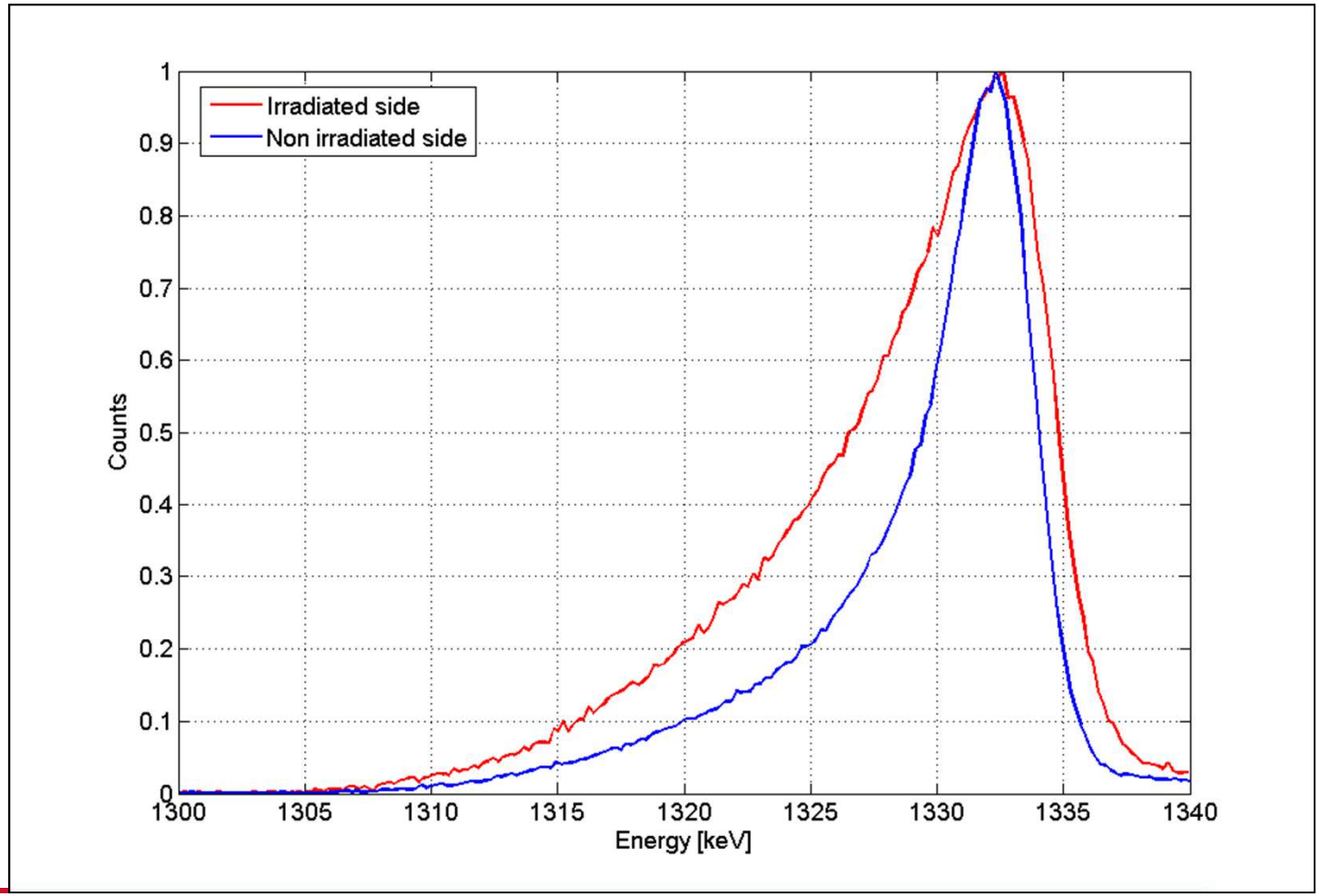
- **Evolution of the peak @ 1.33 MeV (Co-60) – After 1 day @ 21°C**



CANBERRA

Dommages radiatifs
Evolution typique du spectre

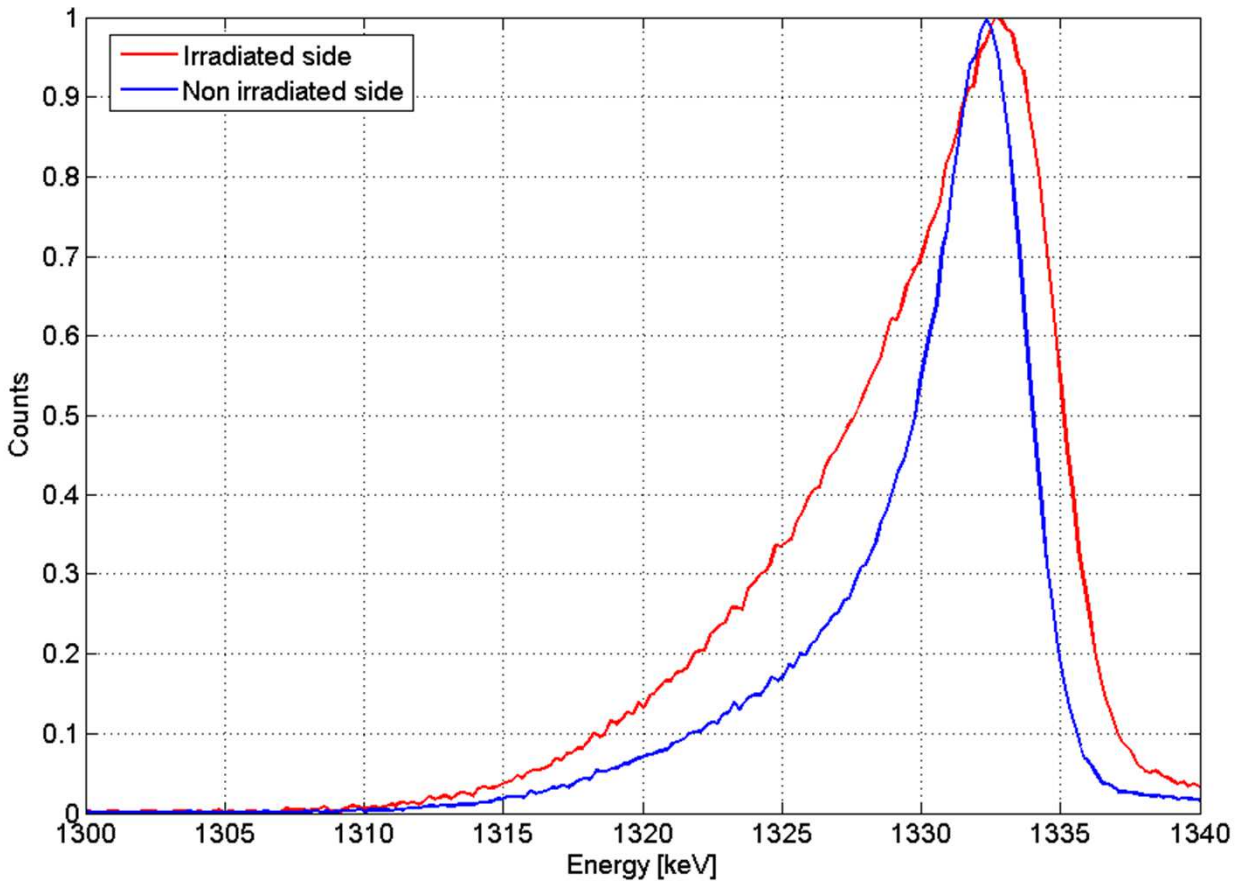
- **Evolution of the peak @ 1.33 MeV (Co-60) – After 23 days @ 21°C**



CANBERRA

Dommages radiatifs
Evolution typique du spectre

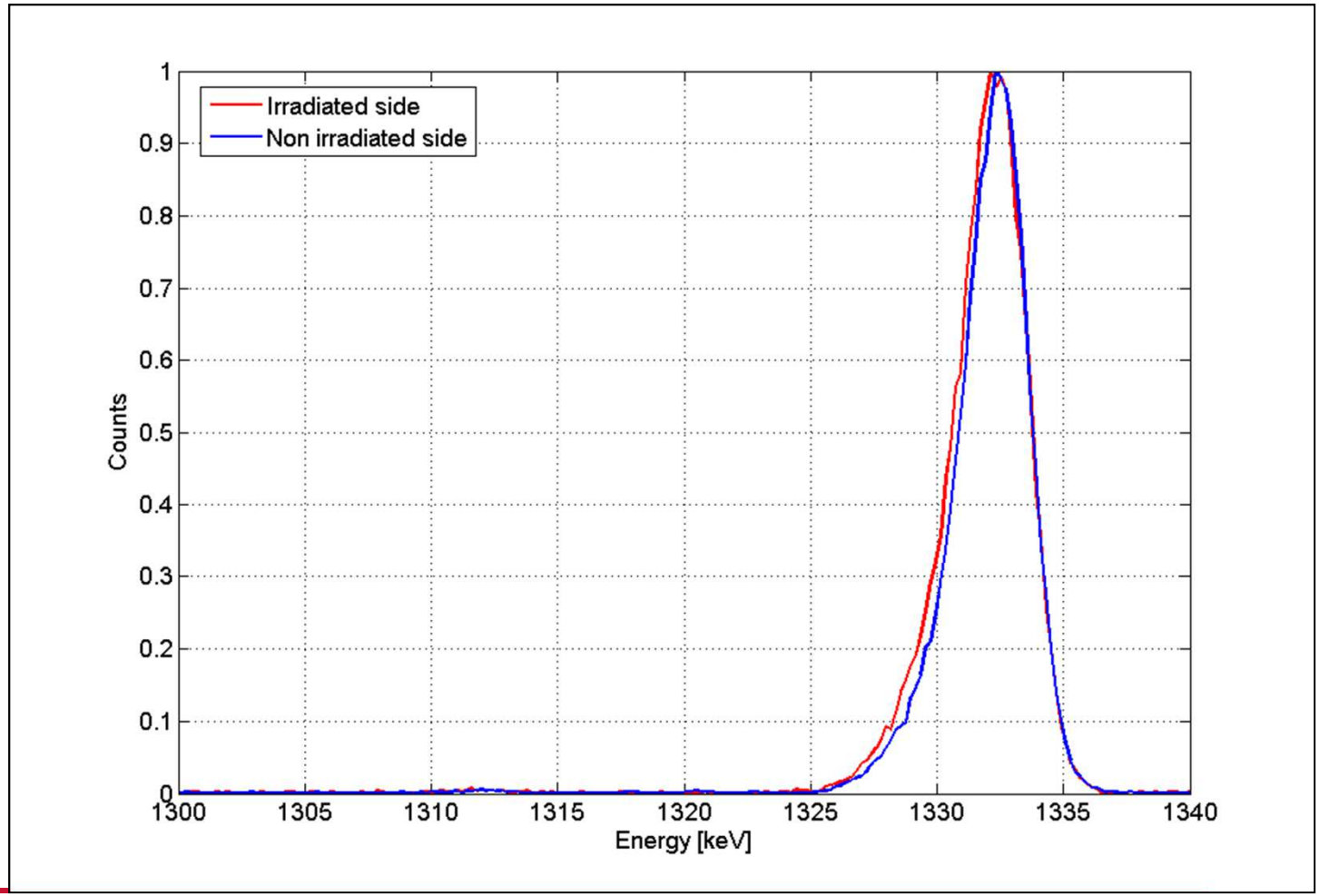
- **Evolution of the peak @ 1.33 MeV (Co-60) – After 1.5 days@ 50°C**



CANBERRA

Dommages radiatifs
Evolution typique du spectre

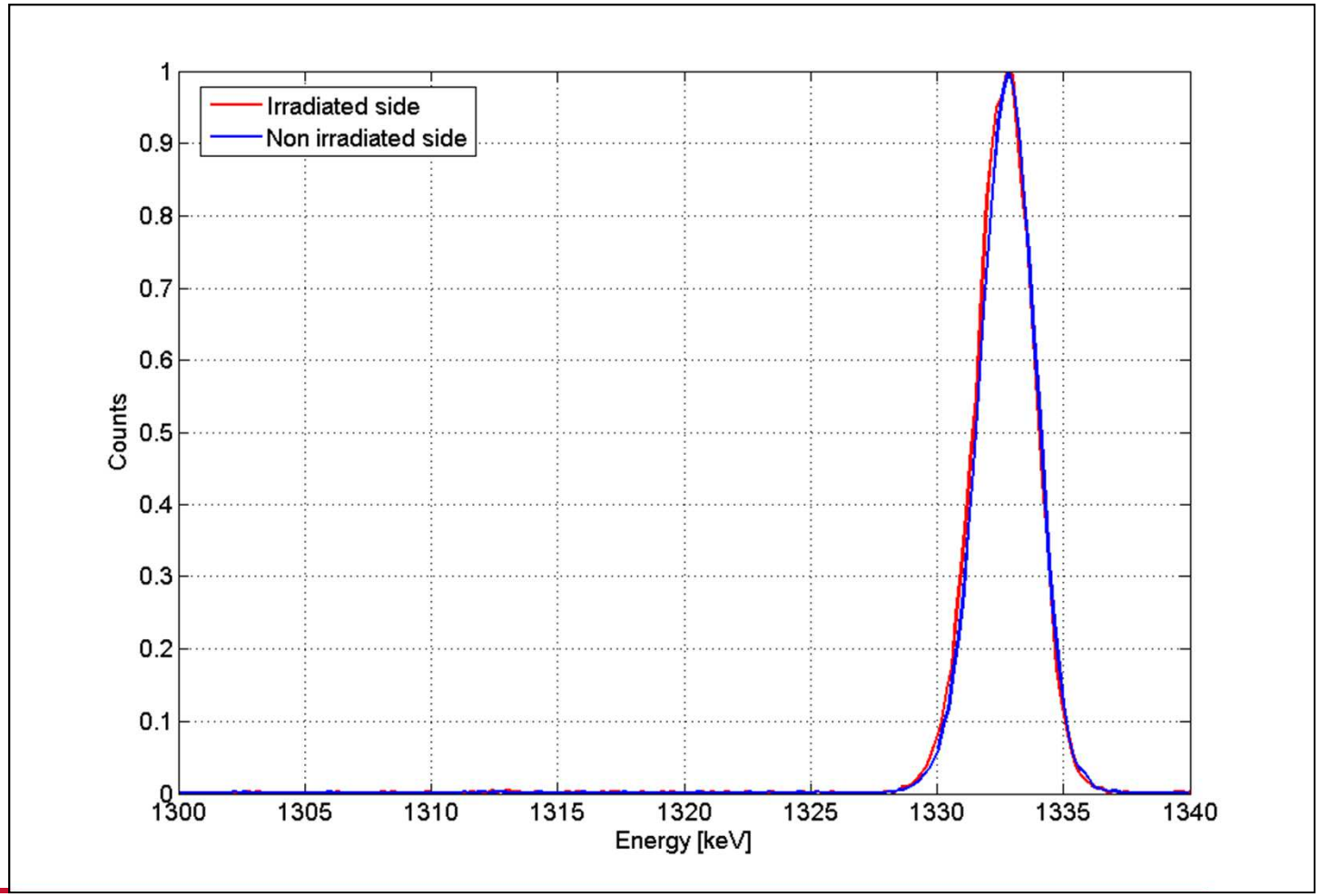
- **Evolution of the peak @ 1.33 MeV (Co-60) – After 4 days @ 80°C**



CANBERRA

Dommages radiatifs
Evolution typique du spectre

- **Evolution of the peak @ 1.33 MeV (Co-60) – After 4 days @ 100°C**



CANBERRA

Prévention et récupération
Conditions de stockage

- **Effet de la température d'irradiation (hystérésis)**

→ **Préférable de garder le détecteur le plus froid possible pendant et après irradiation**

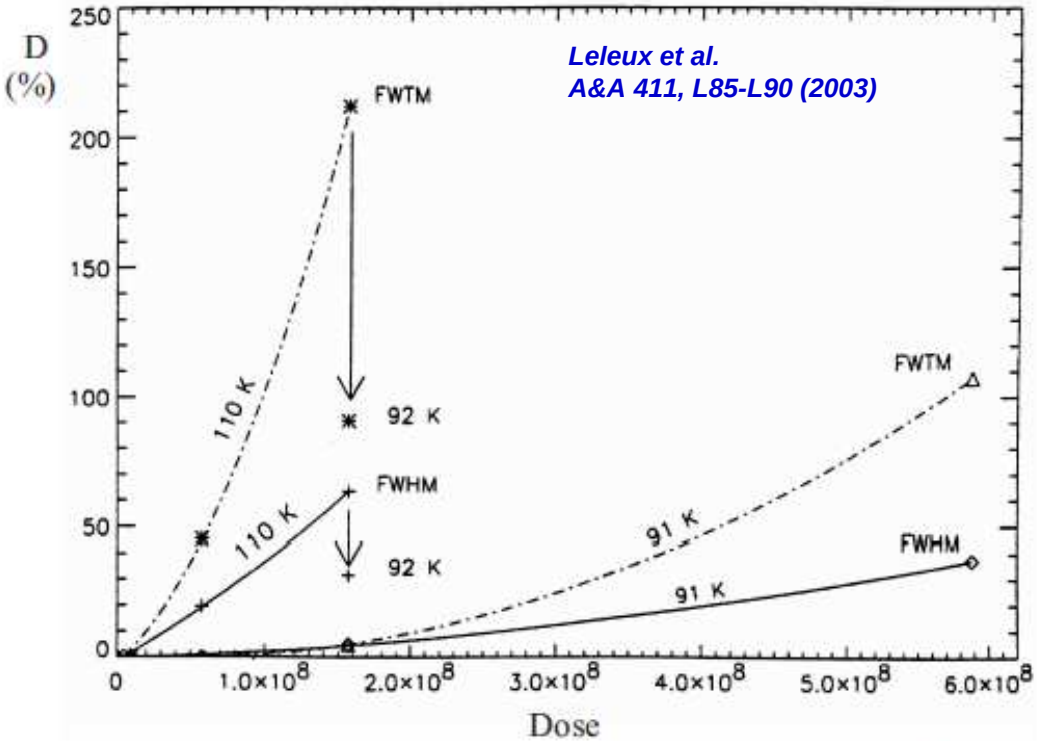


Fig. 4. Degradation (D, in %) vs. the neutron fluence (in n/cm^2), for two detectors irradiated at 91 K and 110 K. The degradation was measured by the relative increase of the FWHM (solid line) or the relative increase of the FWTM (dot-dashed line). After the irradiations, the 110 K detector was returned to 92 K: vertical arrows indicate the recovery obtained.

CANBERRA

Prévention et récupération
Annealings

- **Principe: régénération de la structure cristalline par agitation thermique**
- **Effet du temps et de la température**
  - **Critère généralement adopté : FWHM > 4-5 keV (parfois 10keV)**
  - **Conditions de recuit : 80-105C pendant ~ 100h**

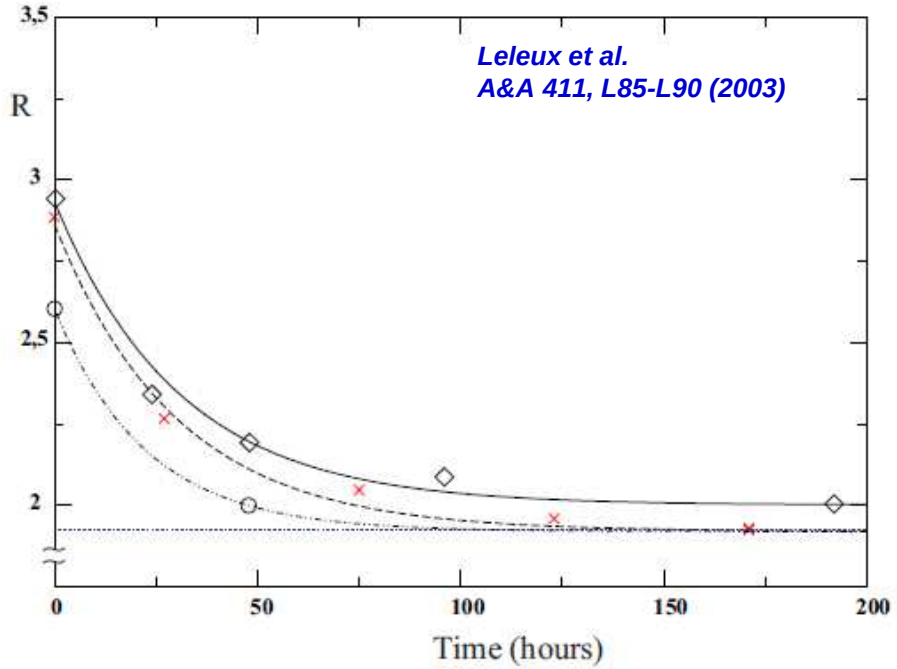


Fig. 5. Recovery (R) of a detector vs. the annealing time. The parameter used to quantify the recovery is the FWTM/FWHM ratio, which is equal to 1.82 for a perfect detector (horizontal dotted line). Annealings were performed at three different temperatures: 94 °C (diamonds fitted with the solid line); 100 °C (crosses fitted with the dashed line), and 105 °C (open dots fitted with the dot-dashed line).

CANBERRA

Dommages radiatifs
Autres effets (secondaires)

- **Changements apparents dans la densité d'impuretés (charged defects ?)**
  - **Diminution de la tension de déplétion → changement de type N vers type P**
  - **Partiellement récupéré avec les recuits**
  - **Observés également par:**
    - Koenen et al. 2006
    - Kurczynski et al, 1999 (instrument WIND/TGRS)

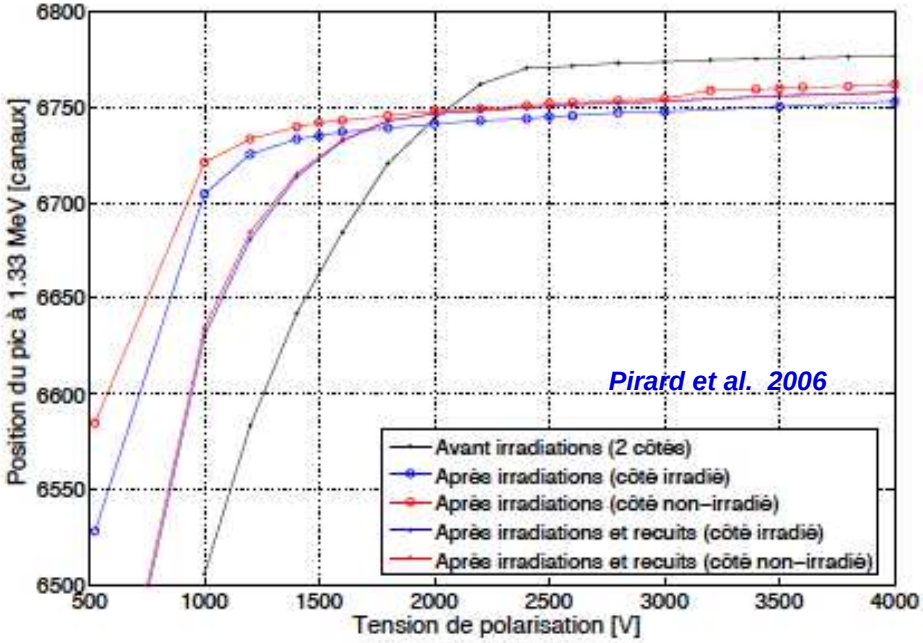


FIG. 3.19: Position du pic à 1.33 MeV en fonction de la tension de polarisation avant irradiations, après irradiations et après recuits (campagne 1).

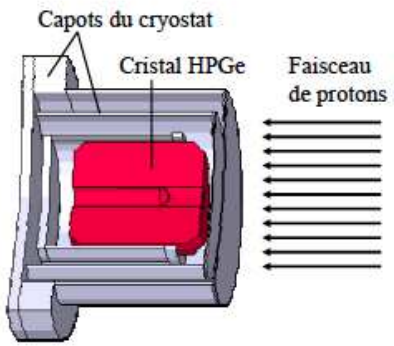
CANBERRA

Dommages radiatifs
Autres effets (secondaires)

Perte d'efficacité à haute fluence

- Génération d'une zone morte correspondant à la zone irradiée (zone non déplétée, extention de l'électrode externe) pour des fluences > 10^{10} p/cm^2 (protons de 50 MeV)
- Pas d'effet du recuit
- Pas de perturbation de la zone fonctionnelle du détecteur (partie non irradiée)

<u>Note</u>: cas particulier d'une irradiation non homogène (protons de basse énergies)



Mesure	Résolution en énergie (FWHM à 1.33 MeV)	Efficacité intrinséque (pic à 1.33 MeV)
Avant irradiation	3.76 keV	11.97%
Après irradiation (10^{10} p/cm^2)	3.79 keV	7.47%
Après le 1er recuit (25 jours à 22° C)	5.30 keV	7.71%
Après le 2ème recuit (2 mois à 22° C)	5.19 keV	7.83%
Après le 3ème recuit (4 jours à 80° C)	2.50 keV	7.47%

TAB. 3.5: Evolution des performances du second détecteur avec l'irradiation et les recuits qui ont suivi. Toutes ces mesures ont été réalisées avec une source de ^{60}Co placée devant la zone irradiée du cristal (sur l'axe de symétrie) à une distance de 25 cm de celui-ci.

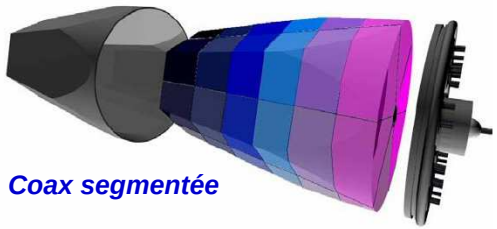
CANBERRA

Synthèse (1)

- **Les effets des dommages radiatifs (p, n) dans les détecteurs HPGe « standard » sont bien compris depuis les années 90:**
  - Les déplacements atomiques dans la structure cristalline engendre des déficits (< 0.1 %) dans la collection charges, ce qui affecte la résolution en énergie (FWHM > 2-3 keV @ 1332 keV)
  - Si l'environnement radiatif de l'expérience (spatiale / physique nucléaire) est connu (fluences et distribution en énergie des particules), les dégradations peuvent être anticipées, et les campagnes de recuits planifiées.

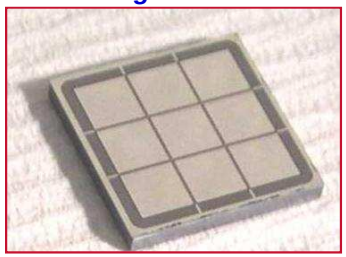
  Attention aux détecteurs gardés froids après irradiations et ne montrant qu'une dégradation légère en résolution …

- **L'utilisation intensive de détecteurs segmentés en dans des faisceaux de plus en plus intenses, pourrait relancer des études de caractérisation.**

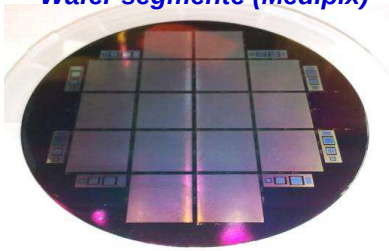


Coax segmentée

Planar segmentée



Wafer segmenté (Medipix)



CANBERRA

Synthèse (2)

- **Les détecteurs HPGe peuvent être conçus pour des environnements radiatifs:**
  - **Etre moins sensible aux dégradations (coax de type N plutôt que P, blindages éventuels)**
  - **Subir plusieurs cycles de recuits:**
    - Capacité de chauffage dans les cryostat (kits annealing / outgassing)
    - Maintien de l'intégrité du vide pour éviter la pollution (encapsulation UHV)
    - Conception robuste des couches minces (en particulier contact N+ diffusé)

CANBERRA