



list
cea tech



cea

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

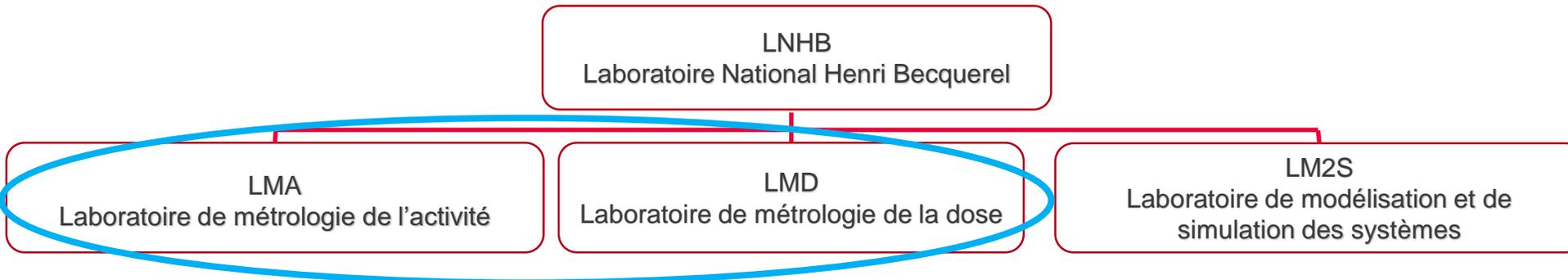
Le Laboratoire national Henri Becquerel - Une Introduction au monde de la métrologie



27 & 28 juin 2022

Mark A. Kellett





LNHB appartient au réseau national de métrologie française, piloté par le LNE
Le LNHB est le laboratoire national de métrologie pour les rayonnements ionisants

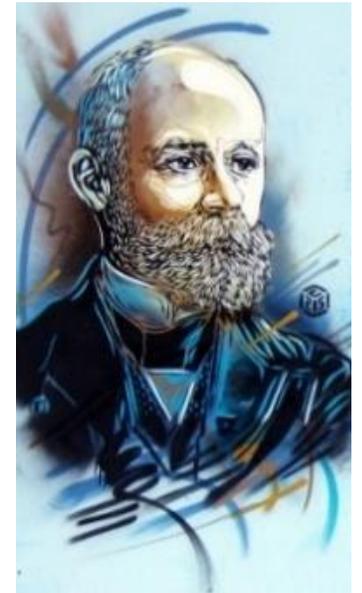
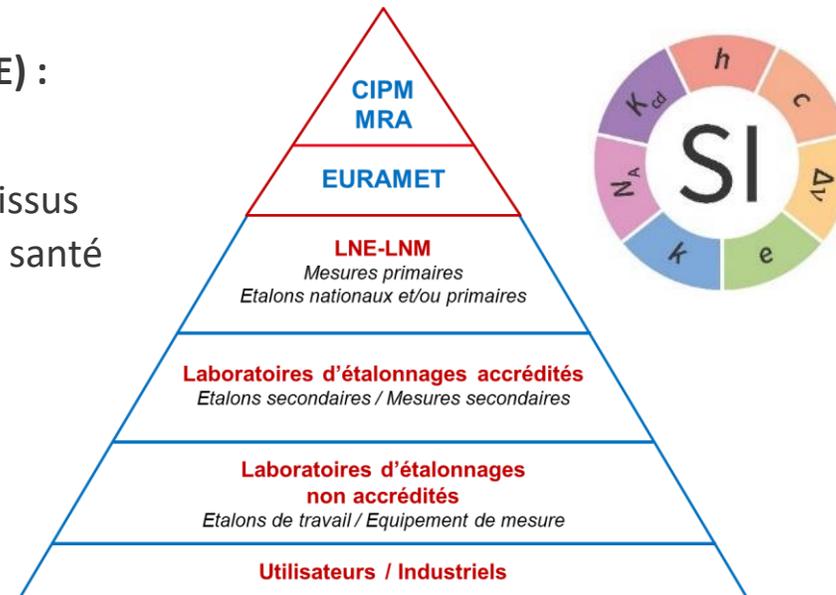


Missions de métrologie (LMA & LMD, convention cadre CEA LNE) :

- R&D pour la mise en œuvre des unités du SI (Bq, Gy, Sv)
- Permettre un accès traçable aux références des utilisateurs issus de l'industrie, la recherche, la défense, l'environnement et la santé

Missions de R&D pour proposer des approches innovantes

- Instrumentation : dispositifs de mesures métrologiques
- Simulation MC des interactions rayonnements – matière
- Modélisation statistique, outils logiciels, codes de calculs



www.lnhb.fr

Etalonnage en activité de gaz radioactifs (¹³³Xe, ⁸⁵Kr, ³H)

Compteurs proportionnels triples



Etalonnage en activité absolue ou massique de dosimètres activés dans des réacteurs Dosimètres niobium, rhodium, ...

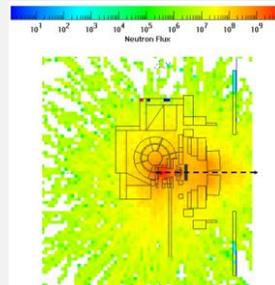
Qualification métrologique de dispositifs de radioprotection

Prestations d'étalonnages
Tests types d'appareils, ...



Réalisation de calculs d'activation

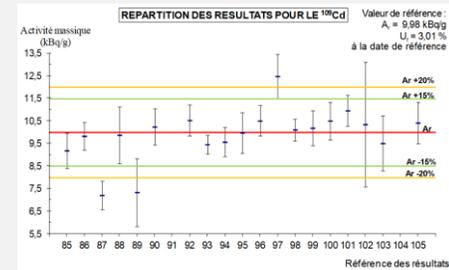
Calculs de démantèlement des accélérateurs
médicaux, ...



Tests inter-laboratoires

Fabrication de solutions certifiées pour la CETAMA

Tests de l'aptitude de mesure de radioactivité des laboratoires (suivi des REP, mesures environnementales, ...)



-> reproduire la composition (chimique, isotopique) du fluide primaire (produits d'activation, de fission) et des effluents (SEK, KER)

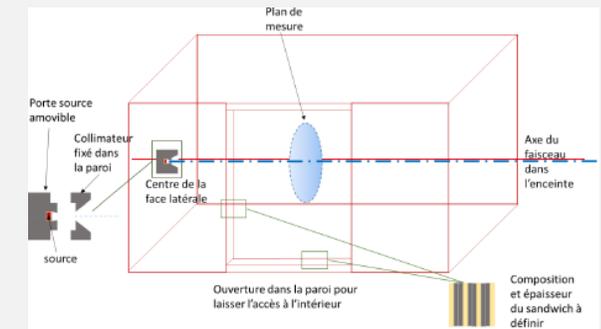
Production & mesures de sources radioactives bas débits de dose

Environnement, déchets, démantèlement :

Conception et réalisation en cours d'une installation d'étalonnage pour les faibles débits d'équivalents de dose, fabrication de sources de faible débit de dose



10 – 100 nSv/h à 1 m ou 2 m



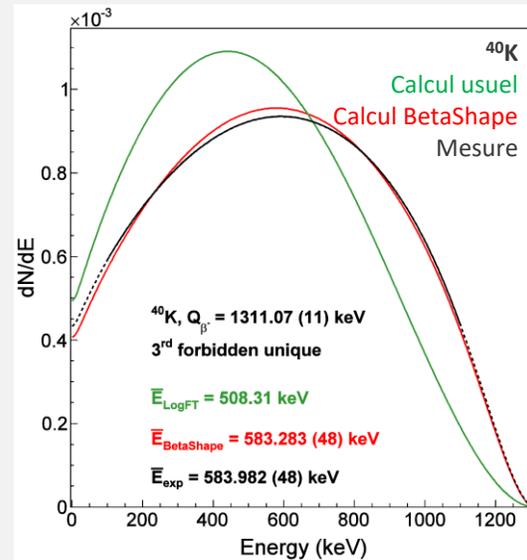
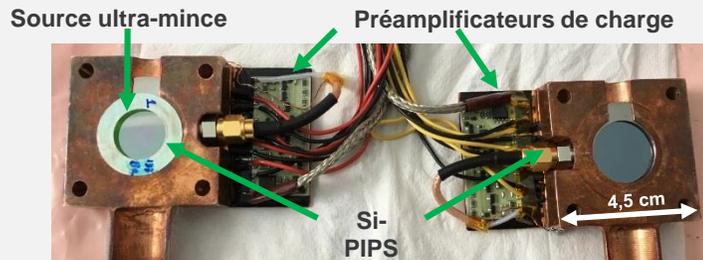
Métrologie, physique fondamentale, puissance résiduelle, simulations MC, dosimétrie,...

Etude de la forme des spectres β

Développement du logiciel BetaShape de calcul de spectres β

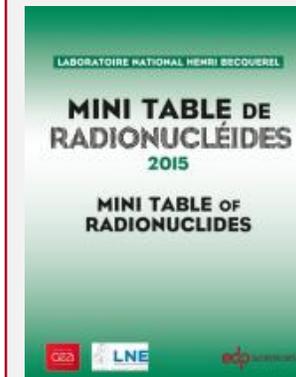
Validation expérimentale à l'aide :

- des calorimètres métalliques magnétiques
- d'un dispositif $\sim 4\pi$ sr avec 2 silicium PIPS (1mm)



Evaluation de données nucléaires

Coordination du projet international DDEP
(Decay Data Evaluation Project)



Cette introduction présente une brève description des processus physiques de la radioactivité, l'énumération des règles d'évaluation menant aux valeurs recommandées et un résumé des symboles et des termes utilisés dans toutes les publications.

Explication sur les données recommandées et sur l'évaluation (en plusieurs langues):



Merci de citer nos évaluations en utilisant les références suivantes:

Vol	Publication	Année	ISBN	NSR	BBaT-X	Vol	Publication	Année	ISBN	NSR	BBaT-X
1	Report IAEA, Table of Radionuclides	1988	2-7203-0301-8	1000000	1000000	1	Table of Radionuclides	2018	978-92-822-2248-9	1000000	1000000
2	Monographie BIPM-5, 'Table of Radionuclides, vol. 1'	2004	92-822-2291-2	1000000	1000000	2	Monographie BIPM-5, 'Table of Radionuclides, vol. 2'	2011	978-92-822-2248-9	1000000	1000000
3	Monographie BIPM-5, 'Table of Radionuclides, vol. 2'	2004	92-822-2291-2	1000000	1000000	3	Monographie BIPM-5, 'Table of Radionuclides, vol. 3'	2011	978-92-822-2248-9	1000000	1000000
4	Monographie BIPM-5, 'Table of Radionuclides, vol. 3'	2004	92-822-2291-2	1000000	1000000	4	Monographie BIPM-5, 'Table of Radionuclides, vol. 4'	2011	978-92-822-2248-9	1000000	1000000
5	Monographie BIPM-5, 'Table of Radionuclides, vol. 4'	2004	92-822-2291-2	1000000	1000000	5	Monographie BIPM-5, 'Table of Radionuclides, vol. 5'	2020	978-92-822-2248-9	1000000	1000000

Filterer les données :

Entrez votre valeur

par Élément par Numéro atomique (Z) par Nombre de masse (A)

Trier par :

Numéro atomique

Nuclide	Z	Vol. (?)	UpDate	Type (?)	Table (?)	Comments (?)	ASCII files (?)
All Nuclides			22/09/2021	N	T	C	E P L B
H-3	³ H	1	3	04/09/2006	1	T	C E P L B
Be-7	⁷ Be	4	1	18/02/2004	1	T	C E P L B
C-11	¹¹ C	6	1	03/11/2011	2	T	C E P L B

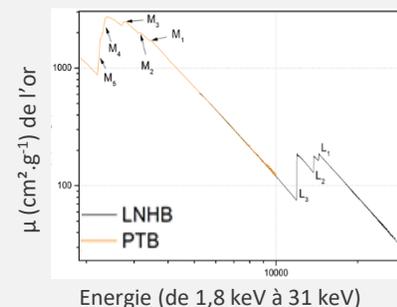
Spectrométrie X pour la caractérisation de matériaux nanostructurés et la mesure de données physiques

Goniomètre CASTOR (Chambre d'Analyse Spectrométrique en Transmission ou en Réflexion) sur les lignes X-UV et X-durs de SOLEIL

Fluorescence X en incidence rasante GIXRF



Caractérisation absolue de couches : quantité de matière déposée, spéciation, gradient, interfaces...



Dispositif miniaturisé de mesure d'activité volumique pour la médecine nucléaire (TEP: ^{11}C : 20 min; ^{15}O : 2 min)

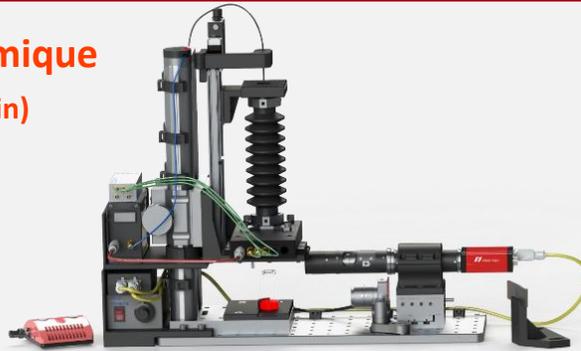
Transport impossible → appareil portable

Prélèvement et mesure précise de micro volume

Mesure d'activité par scintillation et méthode RCTD

Mesure d'impuretés par spectrométrie

1^{ers} essais : radiopharmaceutiques au SHFJ (Orsay)

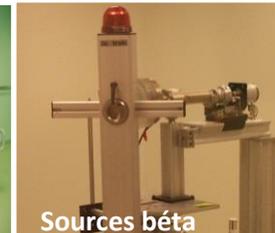
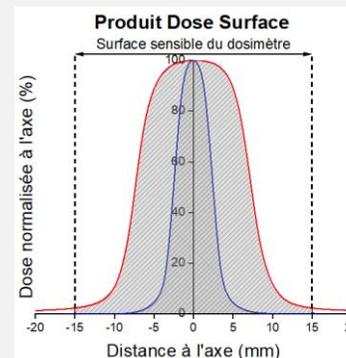
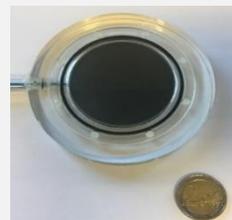


www.platformedoseo.com

Caractérisation en radiothérapie de champs petits et complexes

Définition d'une nouvelle grandeur de dose en radiothérapie, le PDS

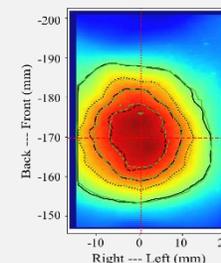
Design & fabrication d'un calorimètre graphite et d'une CI de transfert



Contrôle qualité de dosimétrie en radiothérapie

Dosimétrie 3D par gels polymères, de Fricke ou FXG lus par IRM ou lecteurs optiques.

Dosimétrie ponctuelle à l'Alanine lue par RPE





■ Défis scientifiques – quelques exemples :

- Mesures d'échantillons solides émetteurs X
- Mesure de sources neutrons à base de radionucléides et application à la spectrométrie neutronique
- Réalisation de sources radioactives traçables à façon
- Développement de la spectrométrie photonique ultra-haute résolution avec des calorimètres métalliques magnétiques
- Développement d'instrumentation pour la métrologie des gaz radioactifs

Problématique : Dosimétrie en réacteur - Mesure d'activité par spectrométrie

Contexte : Support du LNHB aux activités de mesures d'échantillons solides émetteurs X (dans le cadre du projet INSNU)

Enjeux : Améliorer la qualité des mesures en termes de fiabilité des résultats et de quantification des incertitudes

Besoins : Connaissance des schémas de désintégration - Facteurs correctifs d'effets secondaires (auto-absorption, fluorescence)

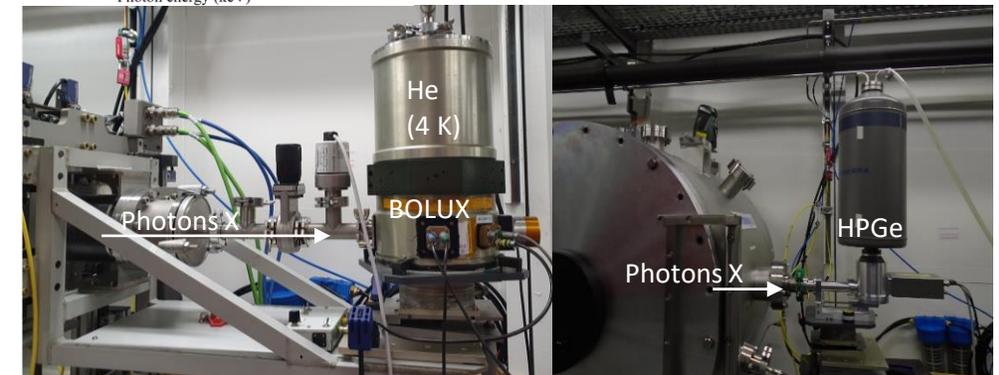
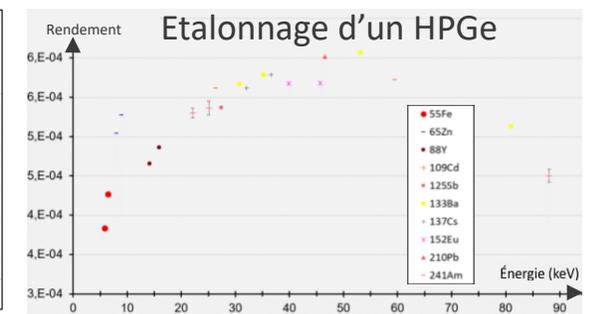
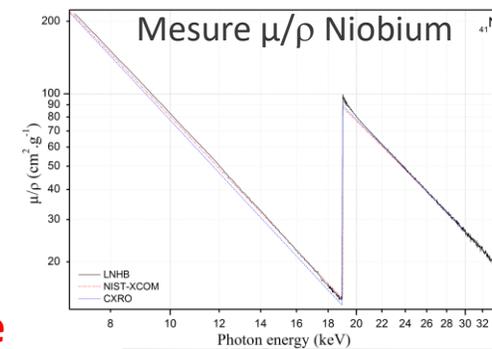
Mesure de coefficients d'atténuation massique de matériaux purs

Incertitude relative < 1 %, exemple : Niobium (ligne XDURS de SOLEIL)

Mesure "absolue" d'intensités d'émission photonique (indépendante des données du schéma de désintégration des radionucléides)

GeHP étalonné à l'aide de radionucléides: $u_r(I_X)$ [3 – 50 keV] ~ 2 %

-> $u_r(I_X) \leq 1 \%$: mesurer la courbe de rendement d'un GeHP au moyen d'un faisceau de photons monochromatiques (synchrotron SOLEIL) dont le débit de fluence aura été déterminé à l'aide d'un radiomètre cryogénique à substitution électrique.



Problématique : Étalonnage de sources neutrons à base de radionucléides (ex. AmBe, ^{252}Cf , ^{244}Cm , ...)

Contexte : Métrologie des émissions neutroniques conjointement assurée par le LNHB (s^{-1}) et l'IRSN ($\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, $\text{Sv}\cdot\text{s}^{-1}$)

Enjeux : Développement d'un dispositif de mesure **complémentaire à la méthode de référence du « Bain de manganèse »**
 Etendre aux sources de faible débit d'émission ($\sim 10^3 \text{ s}^{-1}$), améliorer la connaissance spectrométrique et les incertitudes

Dispositif AQUASPEC → 12 mesures à différentes distances de thermalisation des n

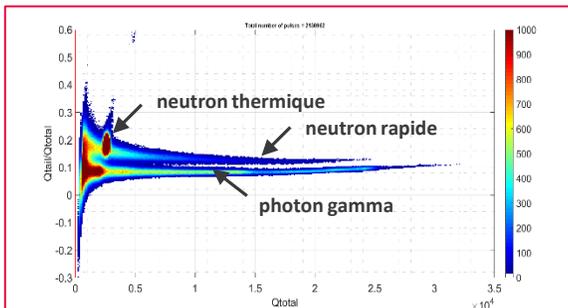
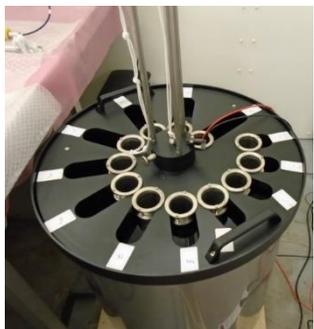


Diagramme de discrimination par la forme des impulsions (PSD)



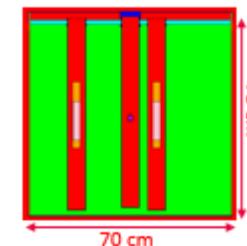
SP- ^6Li + PM
(n rapides & n thermiques)



Compteur ^3He
(n thermiques)

Calculs des fonctions de réponse du dispositif de mesure par MCNP6 (100 keV à 10 MeV)

→ Matrice de projection du problème pour la reconstruction du spectre



Reconstruction du spectre réalisée grâce à un algorithme itératif de type **ML-EM** ou **MAP-EM**

Approche traditionnelle : comptage des n thermiques (^3He à différentes épaisseurs de modération, approche similaire Sphères de Bonner)

✓ Faible nombre de mesures, problème sous dimensionné → nécessité d'utiliser des contraintes (*a priori*)

Approche alternative : détection des n rapides et thermiques SP- ^6Li (spectre des protons de recul pour n_r , réaction (n, α) sur ^6Li pour n_{th})

✓ Augmentation notable du nombre de mesures disponibles → reconstruction satisfaisante du spectre sans *a priori*

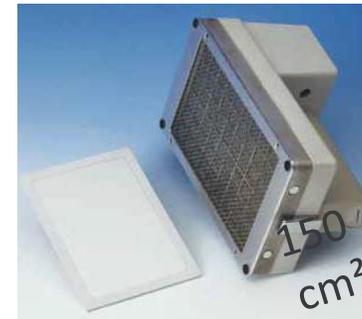
Problématique : Etalonnage et caractérisation des performances de détecteurs
(caméra γ , contaminamètres)



Contexte : Caractérisation radiologique de sites en assainissement ou démantèlement

Enjeux : Amélioration de la traçabilité/représentativité des sources
utilisées pour la caractérisation des détecteurs

(sources commerciales sont non représentatives : métalliques, planes & rigides)



Besoins :

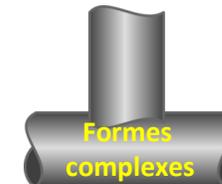
• **Sources de référence** à façon proches des **surfaces contaminées du terrain**

➤ Contamination de surface répartie
uniformément et non labile

➤ Planes, courbes, rugueuses

➤ Faible contamination ($\sim 0.4 \text{ Bq.cm}^{-2}$ pour les α et
 $\sim 4 \text{ Bq.cm}^{-2}$ pour les β/γ)

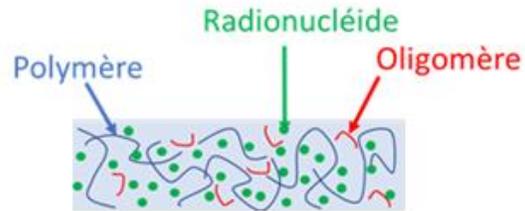
➤ Forme ou agencement : évaluer les performances des capteurs en condition de contamination surfacique, d'interférences α, β, γ , de points chauds,...





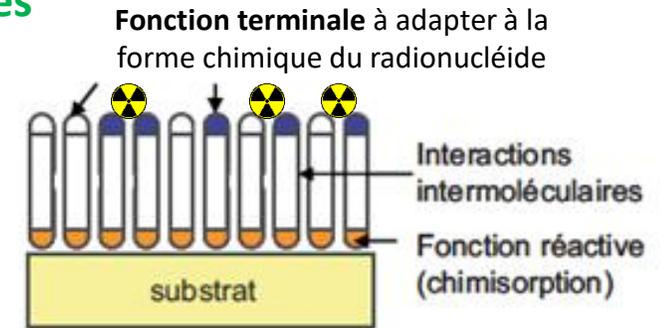
Verrou scientifique : Produire des sources (rigides, souples) fines et non-contaminantes

→ Voie 1 : encapsulation dans un polymère



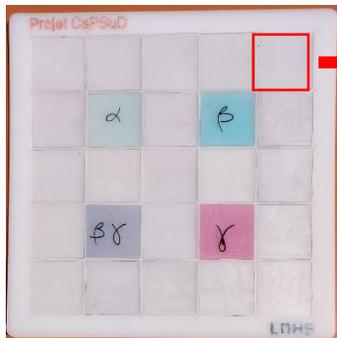
→ Voie 2 : fonctionnalisation

Formation de liaisons chimiques fortes



Projets :

- CEA : Carnot (sources pour évaluer les performances de capteurs), Thèse FocusDEM en cours, Bottom Up GRENade
- 3 projets européens (Métrologie ou H2020) dans le domaine du démantèlement

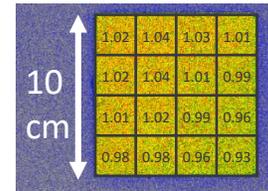


Forme modulable/Rugosité contrôlée --->

- Sources traçables au système international (SI)
- Non-contaminantes : activité labile $\ll 1$ Bq
- Tous radionucléides solubles en phase aqueuse
- Uniformité : $> 90\%$



autoradiographie



Etalonnage de Gampix (LCAE)



Sources ponctuelles
Activité : qq kBq - 13 MBq
 H^*_{10} @1m : nSv/h
à 10 μ Sv/h

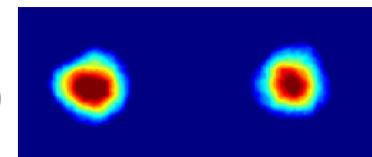


Image décodée de 2 sources ponctuelles

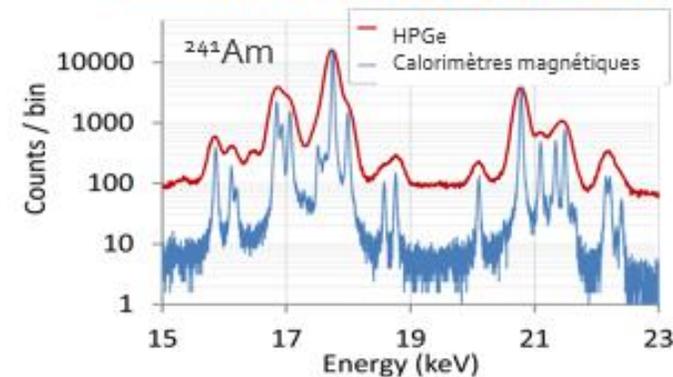
Compétences : Chimie, Radiochimie, Spéciation

Problématique : Développement de calorimètres métalliques magnétiques de très haute résolution en énergie

Contexte : Mesure de spectres hautement résolus pour la **détermination de paramètres fondamentaux**
 Mesure d'activité et l'analyse isotopique d'**actinides**

- Cas des spectres XL des actinides
- Mélanges isotopiques de Pu

Résolution de 30 eV jusqu'à 165 keV



$T^\circ < 50$ mK, $R_E(\text{MMC})$
 10 fois meilleure
 que celles des SC

Enjeux : Augmenter le taux de comptage en augmentant les surfaces de détection par l'utilisation de **détecteurs pixellisés ou multivoies**

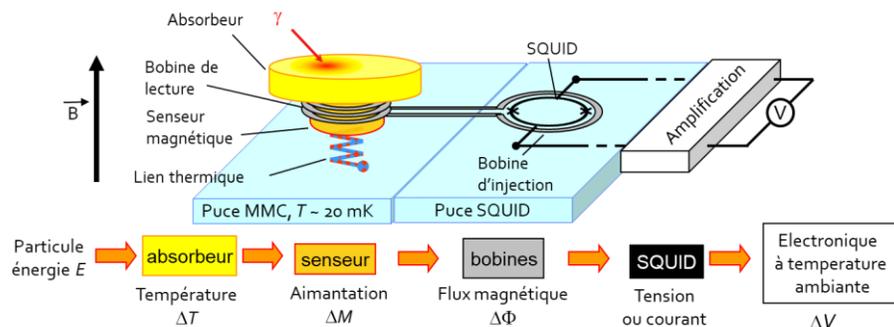
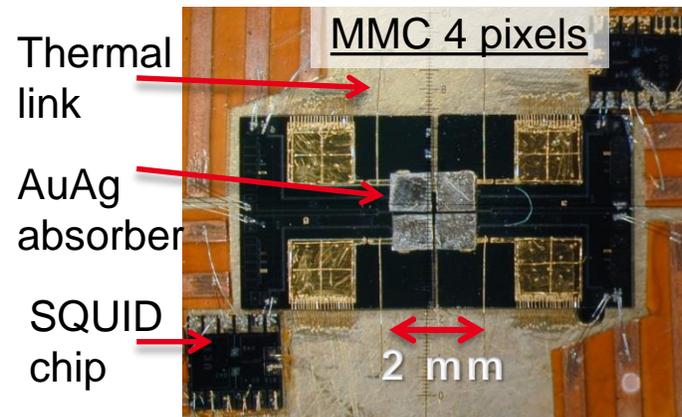


Schéma de principe d'un MMC couplé à un SQUID et à son électronique



4 absorbeurs de 1 mm² (50 μm Au, 17 μm Ag)
 Efficacité intrinsèque > 99% [10-25 keV]
 5 - 10 s⁻¹ ($\tau_d \approx 4$ ms)
 R_E FWHM de 22 - 40 eV

Besoins : Programmation de cartes d'acquisition multivoies et de traitement du signal en ligne spécifique (FPGA)

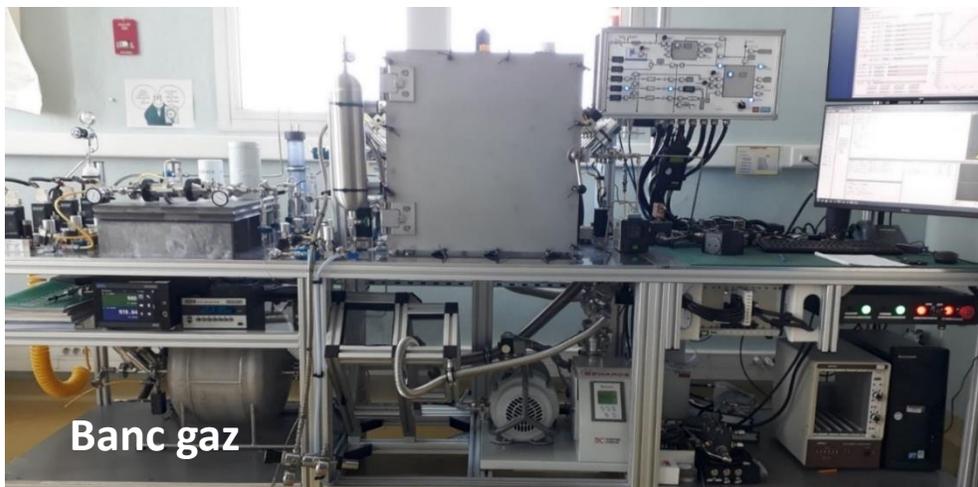
Compétences : En électronique numérique et traitement du signal

Problématique : Mesure de gaz et aérosols radioactifs

Contexte : Métrologie, surveillance de l'environnement et de l'industrie nucléaire, respect OTICE/CTBO, ^{222}Rn sur lune



Enjeux : Améliorer la qualité des mesures, fiabilité des résultats, développer de nouveaux matériaux et instrumentation



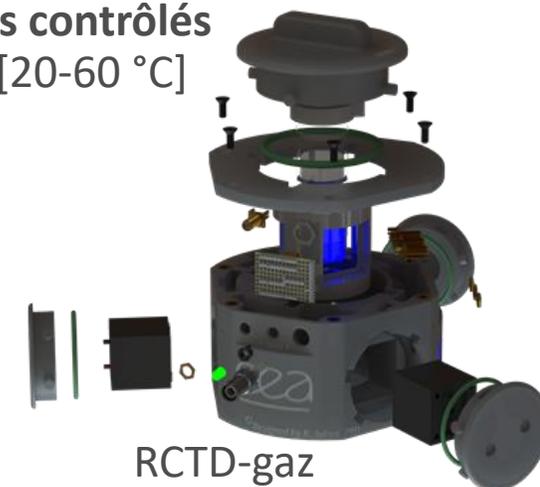
Banc gaz

Production d'atmosphères de gaz radioactifs

$^{220}\text{Rn}/^{222}\text{Rn}$, isotopes du Xe, ^{85}Kr , ^3H et mélanges contrôlés
 Activité [qq Bq.m⁻³ - qq MBq.m⁻³], HR [3-98 %], T [20-60 °C]

Instruments à base de détecteurs scintillants ou semi conducteurs

- Instrumentation de discrimination (PSD) des isotopes de gaz radioactifs
- Séparation des gaz par membrane polymère
- Dispositif de mesure de référence RCTD-Gaz



RCTD-gaz

Besoins : Nouveaux matériaux scintillants pour capturer les gaz radioactifs (par ex. des MOF, projet SPARTE)
 Caractérisation et marquage des aérosols (en cours de discussion avec IRSN et LNE)





Merci pour votre attention

Recherche
fondamentale



LNHB
Métrologie



Recherche
appliquée



Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Laboratoire national Henri Becquerel | Institut List | CEA SACLAY | BAT. 602 – PC111
91191 Gif-sur-Yvette Cedex - FRANCE
www.lnhb.fr

Établissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775 685 019