

MÉTROLOGIE DES NEUTRONS ET MICROFAISCEAU D'IONS: DÉVELOPPEMENT DES RÉFÉRENCES ET INSTRUMENTATION ASSOCIÉE

Laboratoire de micro-irradiation, de métrologie et de dosimétrie des neutrons (LMDN)

Séminaire CNRS/IRSN - Atelier *Capteurs et Métrologie*
11 juin 2021

Sommaire

- La Métrologie des neutrons
- La plateforme d'irradiation neutrons du LMDN
- Instrumentation et méthodes de détermination des références
- Le μ -faisceau d'ions et instrumentation associée

Bureau International des
Poids et Mesures

Instituts Nationaux de Métrologie

PTB (All)

NPL (R.U)

LNE (Fr.)

...

NIST (USA)

NRC (Can)

...

KRISS (Cor.)

NMIJ (Jap.)

...

4 LNM



6 L.A.

LNE-LNHB

LNE · IRSN = LMD[N]

Chargé de la réalisation des références dans le domaine des Rayonnements Ionisants:

- Métrologie de la radioactivité
⇒ Neutrons : débit d'émission
- Métrologie de la dose (dosimétrie)

Chargé de définir, maintenir et transmettre (étalonnage), les grandeurs primaires fluence et équivalent de dose neutronique

- **Métrologie des neutrons**
- **Dosimétrie des neutrons**

Pour mettre en œuvre les unités de fluence et d'équivalent de dose, le LNE-IRSN doit

- **Développer, améliorer, maintenir et exploiter** des étalons de référence et de transfert
- **Mener des recherches pour améliorer les définitions**, les réalisations et les mises en pratique des unités citées ci-dessus,
- **Assurer, et éventuellement piloter**, toutes les comparaisons utiles afin d'assurer l'équivalence internationale des étalons nationaux et des méthodes des laboratoires nationaux de métrologie.
- **Etudier, développer et exploiter les moyens de transfert et d'étalonnage** pour raccorder les laboratoires français en vue d'assurer la traçabilité des étalonnages vers les utilisateurs.
- **Exécuter les prestations d'étalonnage** qui ne pourraient pas être assurées par des laboratoires accrédités notamment en raison d'une rentabilité directe insuffisante ou pour des raisons scientifiques, techniques ou stratégiques.
- **Participer à des actions de formations.**

La Métrologie des neutrons

Grandeurs à mettre en œuvre pour la dosimétrie des neutrons



Grandeur	Unité
débit de fluence : $\dot{\Phi}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
débit de kerma dans les tissus : \dot{K}_{tissus}	$\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$
débit d'équivalent de dose ambiant : $\dot{H}^*(10)$	$\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1}$
débit d'équivalent de dose individuel : $\dot{H}_p(d)$	$\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1}$



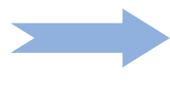
« Ce logo est reproduit avec l'accord du BIPM qui conserve l'intégrité des droits d'auteur, protégés internationalement, sur la forme et le contenu de ce document. »

Fluence $\Phi \text{ cm}^{-2}$



Sources radioactives \Rightarrow débit d'émission
Autres \Rightarrow mesures avec détecteurs (ex PLC)

Kerma ou E.D

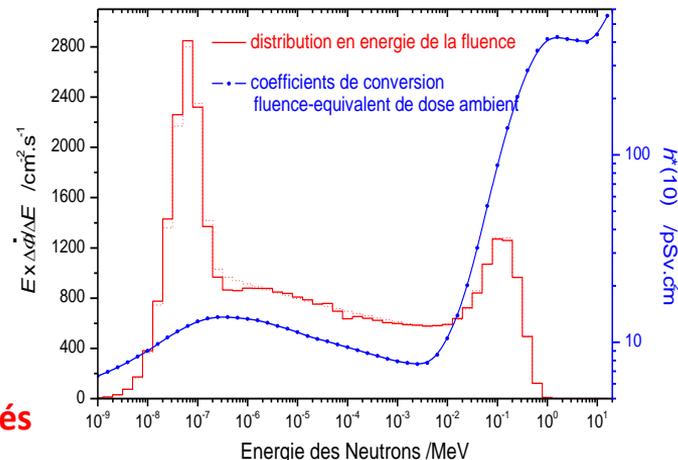


Coefficients de conversion ICRP 74
Connaître la distribution en énergie de la fluence neutronique :
Spectrométrie des neutrons

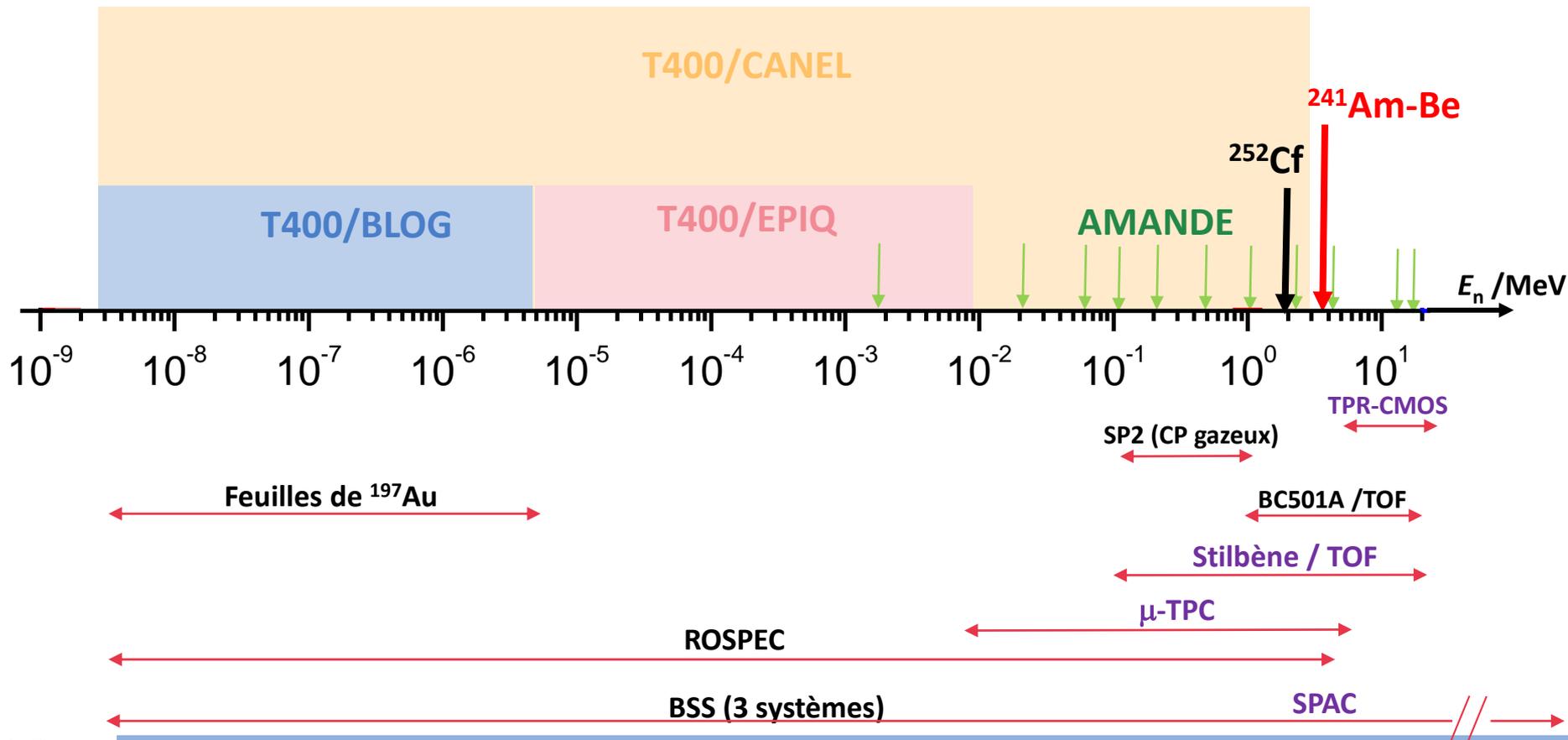


Sources radioactives \Rightarrow distributions recommandées par normes internationales + coefficients moyens de conversion + spectromètres

Autres \Rightarrow mesures avec des spectromètres, étalons de transfert (raccordés aux LNM PTB, NPL)



Champs neutroniques et instruments associés





CARAT



VAN GOGH

Plateforme
d'irradiation
du LMDN



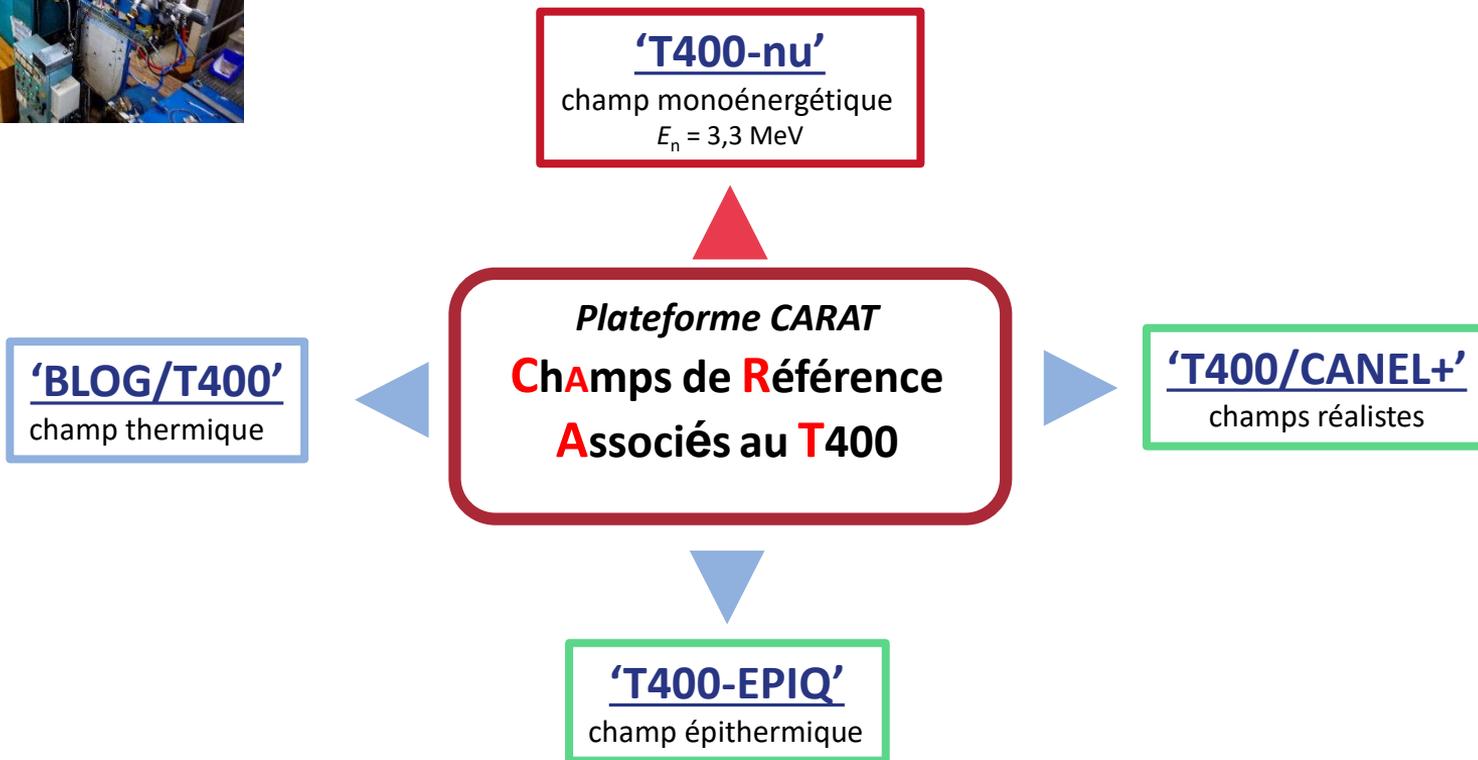
AMANDE



MIRCOM

Plateforme CARAT

ChAmps de Référence Associés au T400





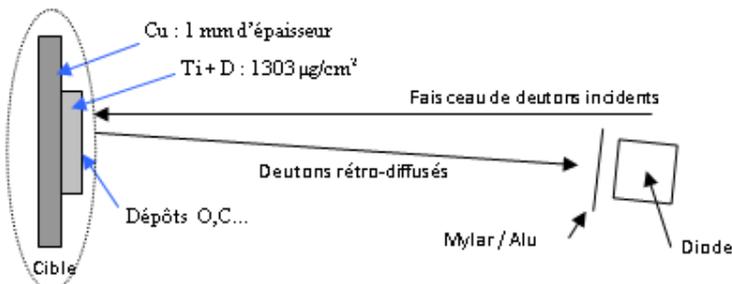
'T400-nu'

Accélérateur de 400 kV – 2 mA

Champ monoénergétique

$$E_d = 330 \text{ keV}, E_n = 3,3 \text{ MeV}$$

- $D(d,n)^3\text{He}$: $d + D \rightarrow n + ^3\text{He} + Q=3,269 \text{ MeV}$
- $D(d,p)^3\text{H}$: $d + D \rightarrow p + ^3\text{H} + Q=4,032 \text{ MeV}$
- Etablissement du facteur n/p au moyen de diodes (protons) et du BC501A (neutrons)

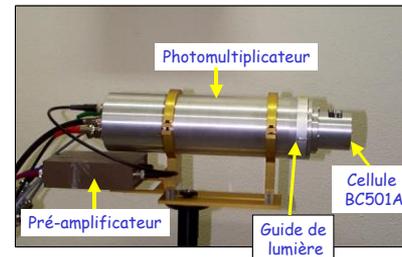


Remplacement nécessaire

- 1,5 M€ dont 700 k€ demandés dans cadre contrat plan état région : échos positifs, mais attente du retour officiel
- Intérêt et support de plusieurs instituts dont LNE

Détermination des références

Scintillateur liquide à proton de recul BC501A



- Référence en fluence et distribution en énergie avec des spectromètres
 - scintillateur BC501A,
 - sphères de Bonner (BSS)
 - multidétecteur ROSPEC.
- Etalonnage du monitoring effectué par trois diodes, détectant en angle arrière (175°) les protons de la réaction $D(d,p)^3\text{H}$



'BLOG/T400' champ thermique



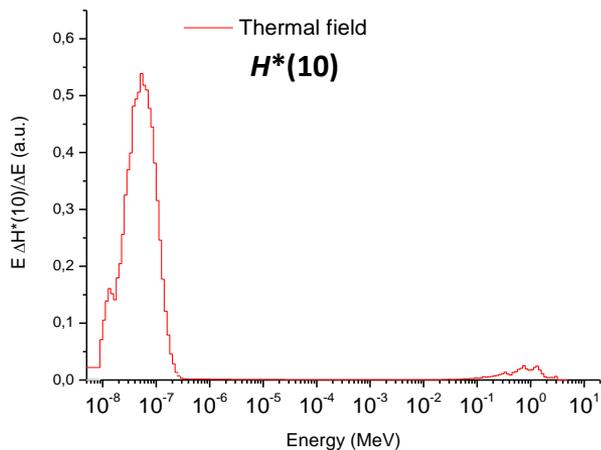
Détermination des références

Feuilles d'or et sphères de Bonner



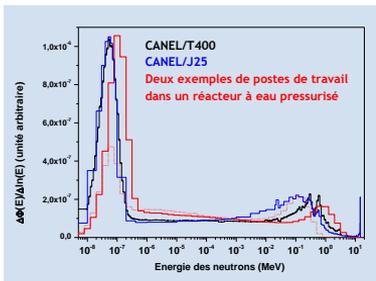
Nouveau champ thermique de référence

- Fiche projet LNE (2018-2019)
- Composante thermique : $\geq 99\%$ en fluence et $\geq 95\%$ en dose
- Caractérisation en cours



➤ Référence en fluence et distribution en énergie avec des spectromètres

- activation de feuilles ^{197}Au (E_{th})
- scintillateur BC501A,
- sphères de Bonner (BSS)
- multidétecteur ROSPEC
- MCNP



'CANEL/T400' champ réaliste

Détermination des références

Sphères de Bonner



■ Champ réaliste de référence au LNE-IRSN

- Norme ISO 12789 : CANEL en exemple
- CANEL/T400 ~ postes de travail en REP
- Remise en service en 2018 (T400)
- Nouveau banc d'étalonnage (2019)
- Modification du dispositif (2019-2020)

■ Nouvelles configurations (2021-2024) :

- Variétés des champs aux postes de travail
- Modéliser des configurations (modularité)
- Proposer un catalogue de champs réalistes d'étalonnage
- Fiche Projet LNE + thèse **démarrant fin 2021**

➤ Référence en fluence et distribution en énergie avec des spectromètres

- sphères de Bonner (BSS)
- scintillateur BC501A,
- multidétecteur ROSPEC
- MCNP

'T400-EPIQ' champ épithermique

Etude d'un champ épithermique de référence (0,5 eV – 10 keV) – 2021-2024

- Aucun champ de référence existant en Europe (1 en Corée)
- Besoins existants : domaine en énergie ou les instruments de radioprotection ont les plus mauvaises réponses (notamment tous les débitmètres)
- Besoins émergents
 - ✓ mesure d'humidité dans les sols (CRNS = Cosmic Rays Neutron Sensor)
 - ✓ Champ épithermique utilisés dans le domaine médical (BNCT)
 - ⇒ être en mesure de caractériser les champs dans ces installations médicales (R&D système(s) de détection)
- Fiche Projet LNE + **thèse démarrant fin 2021 (directeur de thèse D. Santos, LPSC)**
- **Partenariat projet ANR Franco Russe avec CNRS/LPSC**

Détermination des références

- Référence en fluence et distribution en énergie avec des spectromètres
 - **Activation à seuils ?**
 - **sphères de Bonner (BSS)**
 - **multidétecteur ROSPEC**
 - **MCNP**
- **Méthodologie à développer (thèse)**



Plateforme VAN GOGH Irradiateur neutrons

Détermination des références

Bain de Manganèse



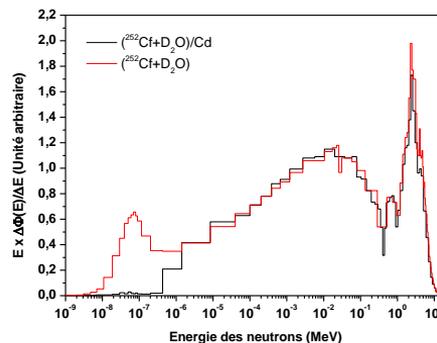
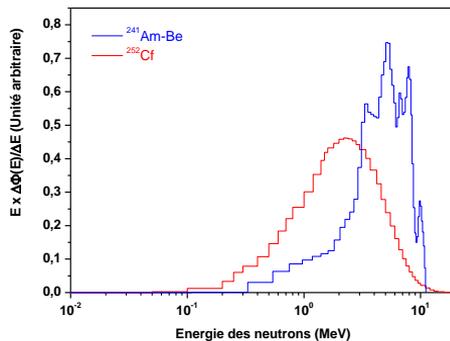
- 2 sources : $^{241}\text{Am-Be}$ ($3,5 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$) et ^{252}Cf ($3,5 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$)
- Etalonnage de routine et tests d'instruments (notamment radioprotection et dosimètres)
- 4 champs neutroniques : $^{241}\text{Am-Be}$, ^{252}Cf , $^{252}\text{Cf} + \text{D}_2\text{O}$ et $^{252}\text{Cf} + \text{D}_2\text{O}/\text{Cd}$
- Laboratoire accrédité par le COFRAC pour les grandeurs : fluence, équivalents de dose ambiant et individuel

Fluence :

- Etalonnage en débit d'émission par la méthode du bain de manganèse réalisée au LNHB
- Comparaisons internationales de métrologie

Energie :

- Vérification de la distribution en énergie de la fluence avec des scintillateurs



Plateforme AMANDE-MIRCOM

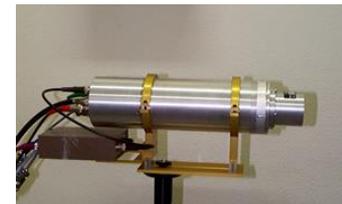
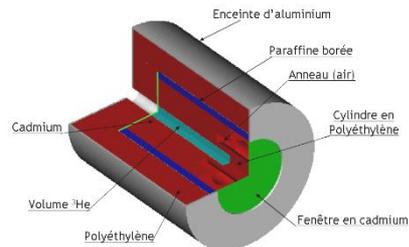
Détermination des références



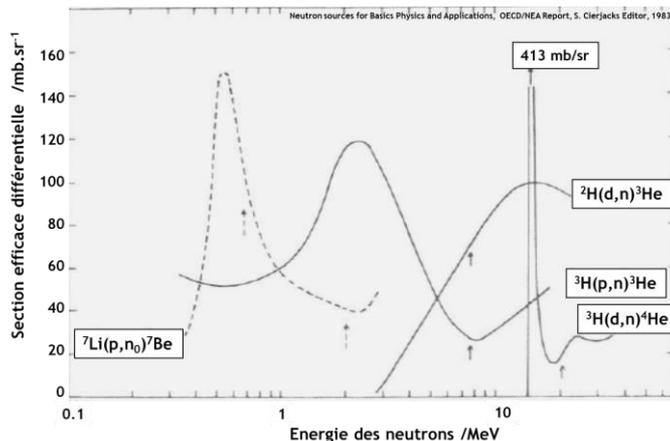
AMANDE



- Accélérateur Tandetron de 2 MV (2004)
- Hall expérimental dédié à production de **champs neutroniques monoénergétiques de référence (2 keV à 20 MeV) : AMANDE**
- Ligne microfaisceau et laboratoire de biologie associé (2016) : **MIRCOM**



Réactions	Energie des neutrons à 0°
$^{45}\text{Sc}(p,n)^{45}\text{Ti}$	5.6 keV à 52 keV
$^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$	120 keV à 650 keV
$\text{T}(p,n)^3\text{He}$	288 keV à 3.2 MeV
$\text{D}(d,n)^3\text{He}$	2.5 MeV à 7.3 MeV
$\text{T}(d,n)^4\text{He}$	14.6 MeV à 20.5 MeV



Fluence

- Long compteur IRSN étalonné sur Van Gogh
- Comparaisons internationales de métrologie

Energie

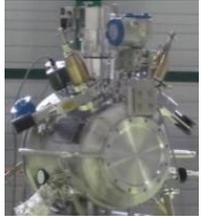
- Cinématique des réactions nucléaires
- Méthode du temps de vol avec des scintillateurs (BC501A, Stilbène)

Instrumentation à l'étude



➤ STILBENE

- Scintillateurs à réponse rapide (1 ns) et excellente discrimination neutron, gamma
- Objectif : mesure par temps de vol étendue vers les basses énergies (AMANDE, 100 keV – 20 MeV)
- Etalon secondaire pour la distribution en fluence et en énergie sur AMANDE-T400-VAN GOGH
- [Collaboration IRSN/CEA](#) et soutien LNE



➤ μ -TPC

- Télescope à noyaux de recul gazeux pour la mesure de l'énergie des neutrons entre 8 keV et 6,5 MeV
- Objectif : mesure primaire de la distribution en énergie de la fluence ([AMANDE](#))
- [Collaboration IRSN/LPSC](#) et soutien LNE depuis 2006



➤ TPR-CMOS

- Télescope à protons de recul pour la mesure de l'énergie des neutrons entre 5 MeV et 20 MeV
- Objectif : distribution en énergie sans déconvolution en fluence et en énergie ([AMANDE](#))
- [Collaboration IRSN/IPHC](#) et soutien LNE depuis 2006

➤ Optimisation du ROSPEC

- Multi-détecteur à compteurs proportionnels gazeux
- Objectif : ajout d'un scintillateur ([collaboration IRSN/Université de Cape Town](#)), extension du domaine en énergie en-deçà de 50 keV et déconvolution parallèle ([collaboration PTB](#))



Activités pour l'amélioration des performances des systèmes et de la détermination des références neutroniques

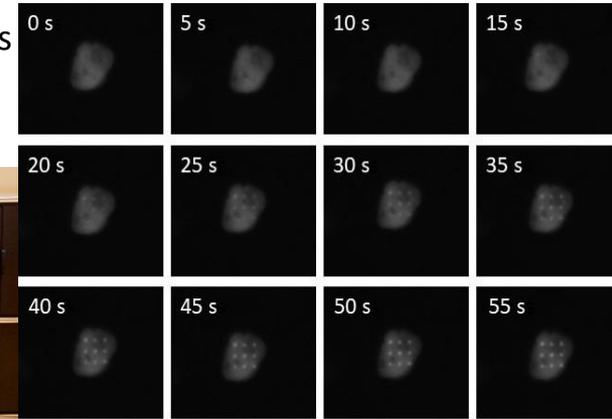
- Mise en place d'une chaîne de spectrométrie gamma de référence
 - mesures de l'activités des feuilles d'or (champ thermique, BSS passif)
 - nouveau spectromètre SPAC (champs pulsés, haute énergie)
- Déploiement des systèmes d'acquisitions numériques
 - stilbène
 - ROSPEC
 - HERMEIS (BSS haute énergie, bas flux)
- Moyens de calculs et de déconvolution
 - développement de EASY-PTRAC pour le tri des événements MCNP
 - couplage MCNP-GEANT4 pour la radiobiologie et la physique des détecteurs
 - déconvolution des données pour isoler les événements rares (PTB)
- Problématique des sections efficaces / quenching
 - section efficace (n,α) sur le carbone
 - diversifier les gaz pour étendre le domaine en énergie de la μ -TPC

II - Le microfaisceau d'ions et instrumentation associée

MIRCOM : un microfaisceau d'ions pour la radiobiologie

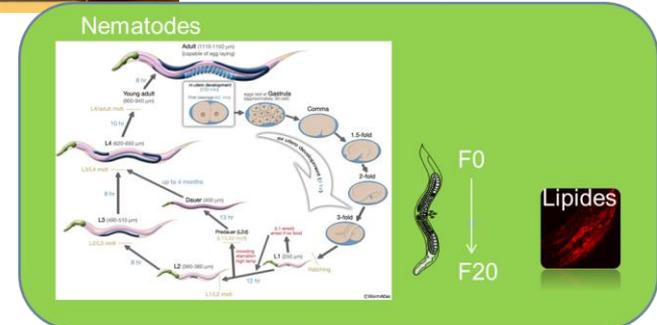
Faisceau d'ions focalisé extrait à l'air

- Ligne microfaisceau conçue par le CENBG (CNRS/IN2P3 – Université de Bordeaux) dans le cadre d'une collaboration
- Irradiation d'échantillons biologiques vivants avec un nombre définis d'ions
 - Précision et taille du faisceau de l'ordre de quelques μm
- Ions disponibles : p, a, B, C, O, etc.



Applications

- Radiobiologie à l'échelle cellulaire et subcellulaire
- Validation des codes de micro/nanodosimétrie (Geant4 DNA, ...)
- Étude de l'effet des faibles doses et des effets indirects
- Irradiation de petits organismes multicellulaires (C. elegans, ...)
 - Microfluidique



MIRCOM : un microfaisceau d'ions pour la radiobiologie

R&D en cours autour du faisceau d'ions

- Caractérisation des faisceaux d'ions fournis par l'installation
- Mise en place / caractérisation de détecteurs d'ions
 - Détecteur d'électrons secondaires pour les particules alpha et les ions plus lourds
 - Détecteur diamant pour les protons, avec étude d'une extension pour d'autres types d'ions

Modélisation d'une irradiation microfaisceau

- Modélisation complète de la ligne microfaisceau avec Geant4
- Intégration de modèles réalistes d'échantillons

Mise en place d'un système microfluidique

- Augmentation des capacités d'irradiation de MIRCOM : petits organismes multicellulaires (*C. elegans*, ...), cellules circulantes, ...

MIRCOM : un microfaisceau d'ions pour la radiobiologie

■ Collaborations passées et en cours avec le CNRS – Instrumentation de la ligne

- *Conception de la ligne*
 - Transfert de technologie entre l'IRSN et le CENBG (CNRS/IN2P3 – Université de Bordeaux)
- *Caractérisation du faisceau d'ions*
 - Collaboration avec le CINaM (CNRS – Aix-Marseille Université) depuis 2019 :
 - Thèse - directeur D. Tonneau (CINaM)
 - Détecteurs à résolution micrométrique pour mesurer le profil du faisceau

■ Collaborations en cours avec le CNRS – Radiobiologie

- Projet INCa avec l'Institut NeuroMyoGène (CNRS – INSERM – Université Claude Bernard Lyon 1) et l'IRSN/SERAMED
- Co-encadrement d'une thèse par S. Galas (CNRS – Université Montpellier) : « La neurotoxicité des rayonnements ionisants: rôle des altérations mitochondriales chez le nématode *C.elegans* »