

PNGMDR 2022-26
**PIÈCES ACTIVÉES DES ACCÉLÉRATEURS
LINÉAIRES ET NON LINÉAIRES**
**(Article 48 de l'arrêté du 9.12.22
d'application du V^e PNGMDR)**

Identification
PPRNTASNS.23.0026

Juin 2023

Page : 1/10

SOMMAIRE

| | | |
|-----------|---|----------|
| 1. | Caractérisation des déchets activés issus d'accélérateurs non linéaires | 4 |
| 1.1 | <i>Contexte</i> | 4 |
| 1.2 | <i>Enjeux</i> | 5 |
| 1.3 | <i>Plan d'actions</i> | 5 |
| 2. | Point d'avancement pièces activées accélérateurs linéaires médicaux | 7 |
| 2.1 | <i>Rappel du contexte</i> | 7 |
| 2.2 | <i>Etude de la radioactivité induite dans les composants des accélérateurs linéaires médicaux :</i> | 7 |
| 2.3 | <i>Mise en œuvre sur le terrain :</i> | 7 |
| 2.4 | <i>Aspect conditionnement</i> | 8 |

1. Caractérisation des déchets activés issus d'accélérateurs non linéaires

1.1 Contexte

Une trentaine de cyclotrons sont exploités actuellement en France (cf. tableau 1 ci-dessous). Leur utilisation engendre la production de déchets activés radioactifs (issus de l'exploitation ou du démantèlement) qui demeurent dans les locaux d'entreposage des exploitants. Le volume des déchets d'exploitation actuellement entreposé représente plusieurs dizaines de m³. Les déchets de démantèlement (hors murs des casemates) représentent un volume de l'ordre de 5 m³ par cyclotron (soit quelques centaines de m³ au total).

Pour être évacués vers les installations de l'Andra, ces déchets nécessitent d'être caractérisés radiologiquement. Cependant, il y a dans ces déchets à la fois des radionucléides facilement mesurables (ex : Co60) mais également des radionucléides difficilement mesurables (ex : émetteurs bêta purs). Une caractérisation radiologique exhaustive de ces radionucléides difficilement mesurables apparaît complexe et coûteuse. Aussi, il est envisagé de procéder par des méthodes couplant modélisation et mesures.

| Entreprise | Nb Cyclotron | FABRICANT | REF FAB | PUISSANCE (MeV) |
|-------------------|--------------|---------------------------------------|----------------------|-----------------|
| AAA | 1 | General Electric (GE) | PET TRACE 880 | 16,4 |
| AAA | 1 | IBA | CYCLONE 18/18 (twin) | 18 |
| AAA | 1 | General Electric (GE) | PET TRACE 880 | 16,4 |
| AAA | 2 | General Electric (GE) | PET TRACE 880 | 16,5 |
| AAA | 1 | General Electric (GE) | PET TRACE 880 | 16,5 |
| ARRONAX | 1 | IBA | CYCLONE 70 | 70 |
| CEA SHFJ | 1 | IBA | CYCLONE 18/9 | 18 |
| CEA SHFJ | 1 | PMB | ISOTRACE 2 | 12 |
| CEMHTI | 1 | CNRS | Cyclotron isochrone | 60 (ions) |
| CERMEP | 1 | IBA | CYCLONE 18/9 | 18 |
| CHU Martinique | 1 | IBA | Cyclone KIUBE | |
| CHU TOULOUSE | 1 | IBA | CYCLONE 10/5 | 10 |
| CURIUM PET France | 1 | General Electric (GE) | PET TRACE 800 | 16,5 |
| CURIUM PET France | 1 | General Electric (GE) | PET TRACE 800 | 16,5 |
| CURIUM PET France | 1 | General Electric (GE) | PET TRACE 800 | 16,5 |
| CURIUM PET France | 1 | General Electric (GE) | PET TRACE 800 | 16,5 |
| CURIUM PET France | 1 | General Electric (GE) | PET TRACE 800 | 16,5 |
| CURIUM PET France | 1 | General Electric (GE) | PET TRACE 800 | 16,5 |
| CURIUM PET France | 1 (inactif) | CURIUM PET France (avant AIMA) | CHP14-001 | 15 |
| CURIUM PET France | 1 (inactif) | CURIUM PET France (avant THALES) | CHP14-002 | 15 |
| CURIUM PET France | 1 (inactif) | THALES | THC14 | 80 |
| CURIUM PET France | 1 | General Electric (GE) | PET TRACE System | 16,5 |
| CURIUM PET France | 1 | General Electric (GE) | PET TRACE System | 16,5 |
| CURIUM PET France | 1 | General Electric (GE) | PET TRACE System | 16,5 |
| CURIUM PET France | 1 (inactif) | General Electric (GE) | PET TRACE System | 16,5 |
| CURIUM PET France | 1 | IBA | CYCLONE 18/9 | 18 |
| CURIUM PET France | 1 | IBA | CYCLONE 18/18 (twin) | 18 |
| CURIUM PET France | 1 | General Electric (GE) | PET TRACE System | 16,5 |
| CYCERON | 1 | IBA | CYCLONE 18/9 | 18 |
| GIP CIMGUA | 1 | PMB | ISOTRACE 2 | 12 |
| GIP CYROI | 1 | General Electric (GE) | PET TRACE System | 16,5 |
| IPHC | 1 | Advanced Cyclotron Systems Inc (ACSI) | TR 24 | 24 |
| NANCYCLOTEP | 1 | PMB | iMiTRACE 1 | 12 |
| NEURATRIS | 1 | IBA | CYCLONE 18/18 (twin) | 18 |
| PETNET | 2 | SIEMENS | ECLIPSE HD | 11 |

Tableau 1 : liste des cyclotrons sur le territoire français hors INB

Aujourd'hui, en raison de la production de déchets d'exploitation, la place restante dans certains locaux d'entreposage est limitée. La fin d'exploitation des cyclotrons ne semble pas être à l'ordre du jour à court terme. Aussi, les déchets de démantèlement ne constituent pas un enjeu dans l'immédiat. Toutefois, lorsque cette question se présentera, il faudra avoir résolu la problématique des radionucléides difficilement mesurables. En conséquence, la priorité est donnée aux actions permettant l'évacuation des déchets d'exploitation vers les filières de gestion associées dont les stockages de l'Andra.

1.2 Enjeux

Pour répondre aux besoins des exploitants de cyclotrons ainsi qu'au PNGMDR 2022-2026- (Action DECPAR.4 et article 48 de l'arrêté du 09/12/22 pris en application du décret n° 2022-1547 : « l'Andra, en lien avec les détenteurs des déchets activés, poursuit ses travaux devant aboutir à la mise en place de filières de gestion définitives permettant la prise en charge des déchets activés issus des accélérateurs linéaires et non linéaires présents sur l'ensemble du territoire national. L'Andra transmet au ministre chargé de l'énergie et à l'Autorité de sûreté nucléaire, avant le 30 juin 2023, un plan d'actions accompagné d'un calendrier...), l'Andra et le CERN envisagent une collaboration afin de mettre en place une méthode de caractérisation simplifiée de ces radionucléides difficilement mesurables. Le développement de cette méthode est nécessaire afin d'évaluer l'inventaire radiologique de ces déchets et que puisse alors débiter la procédure d'acceptation de ces déchets dans les installations de stockage de l'Andra.

Le CERN dispose des outils (codes Monte Carlo, codes d'activation) et des compétences (expérience en matière de caractérisation de déchets activés) pour contribuer à la conduite de l'étude.

Cette méthode assez classique consisterait à déterminer des ratios entre des radionucléides facilement mesurables et des radionucléides difficilement mesurables afin de mesurer les premiers pour déterminer les seconds. Ces ratios devraient être raisonnablement majorants et couvrir le plus grand nombre et typologie de cyclotrons possibles.

Comme mentionné dans le contexte, une trentaine de cyclotrons sont actuellement exploités en France dont environ 60% sont exploités par Novartis et Curium Pharma.

1.3 Plan d'actions

Le plan d'actions envisagé pour développer la méthode de caractérisation serait le suivant et se présente en 7 étapes :

- Etude bibliographique :
Cette première étape implique la collecte et l'analyse des informations existantes sur la modélisation des cyclotrons, les champs neutroniques, les mesures radiologiques, et les paramètres d'opération des cyclotrons. Cela fournira une base solide pour les étapes suivantes de l'étude.
- Simulations Monte Carlo :
Utiliser des outils de simulation Monte Carlo (FLUKA) pour modéliser les interactions de particules dans les matériaux considérés. Cela peut aider à prédire le niveau d'activation des matériaux sous irradiation et à identifier des spectres de particules représentatifs.
- Calculs d'activation :
Utiliser ActiWiz (code de calcul d'activation développé par le CERN) pour effectuer des calculs d'activation pour chaque type de déchet et pour chaque scénario d'irradiation envisagé. Cela inclut des facteurs tels que le temps d'irradiation et la décroissance, la composition chimique des matériaux, leur positionnement dans la casemate, le spectre des particules, et l'énergie du faisceau.

- Analyse de sensibilité :
Mener une analyse de sensibilité pour chaque paramètre d'activation, et effectuer une analyse statistique des résultats. Cela aidera à identifier les principales sources d'incertitude et à comprendre comment ces incertitudes peuvent affecter les résultats de l'étude.
- Liste de radionucléides :
Etablir une liste des radionucléides présents et de leurs ratios d'activité. Cela sera essentiel pour permettre la caractérisation radiologique complète des déchets.
- Méthodologie de caractérisation :
Développer une méthodologie pour caractériser les déchets radioactifs, en tenant compte des objectifs et des contraintes des mesures radiologiques, ainsi que des domaines d'application des ratios d'activité.
- Comparaison des résultats analytiques avec les mesures expérimentales :
Comparer les résultats obtenus à partir de l'analyse théorique avec les mesures expérimentales. Le niveau de confiance dans les résultats de l'étude dépendra de la disponibilité de valeurs expérimentales.

D'après le retour d'expérience du CERN, d'un point de vue statistique, il faudrait envisager au moins 20 échantillons par famille « importante » de déchets, qui devraient être analysés par spectrométrie gamma de laboratoire et par analyse radiochimique (typiquement, deux radionucléides par échantillon). Il est important de noter que, compte tenu du risque de ne pas détecter certains radionucléides d'intérêt dans certains échantillons (par exemple, en raison d'un niveau d'activité trop faible) ou du besoin de regrouper les résultats par machine, lieu d'irradiation ou intervalle de temps d'attente, une vingtaine d'échantillons pourrait rapidement se réduire à un petit nombre de valeurs expérimentales par scénario d'intérêt.

Il serait également judicieux de prévoir environ 10 mesures de spectrométrie gamma in situ, avec des seuils de détection comparables aux seuils de déclaration requis par l'Andra pour les principaux émetteurs gamma.

Cette étude pourrait ainsi faire l'objet d'une thèse, encadrée par le CERN qui mettrait à disposition ses outils de calcul (Fluka et Actiwiz) ainsi que son retour d'expérience sur l'élaboration de ratios pour des déchets activés.

Le CERN a donné un accord de principe pour cette collaboration dans la mesure où :

- les résultats de l'étude seraient mis à disposition libre au travers de la publication des travaux de thèse ainsi que des articles scientifiques y afférant;
- la collaboration ne pourra se faire qu'avec l'Andra (établissement public)

Dans le cadre de cette étude, l'Andra aurait quant à elle pour rôle de définir les types de déchets à étudier, et organiserait, auprès des détenteurs, la collecte des informations pour plusieurs cyclotrons. Ces étapes devraient être réalisées en amont de l'étude. L'Andra a d'ores et déjà contacté différents exploitants de cyclotrons et la société AAA, qui exploite 5 cyclotrons en France, s'est portée volontaire pour fournir les informations sur les cyclotrons et les déchets produits qui seront nécessaires pour l'étude.

Cette étude sous la forme d'une thèse pourrait ainsi démarrer en 2024, mais son mode de financement reste aujourd'hui à définir.

Une fois cette étape de caractérisation effectuée et s'agissant des filières de gestion définitives pour ces déchets activés, celles-ci seront mises en place selon les procédures habituelles d'instruction des

demandes de prise en charge des déchets et au regard du respect des spécifications d'acceptation des colis de déchets dans nos centres en exploitation.

2. Point d'avancement pièces activées accélérateurs linéaires médicaux

Ce point d'avancement fait suite au précédent état des lieux réalisé par l'Andra dans le cadre du précédent PNGMDR dans la note PPRNTASN220016 (Déchets activés des petits producteurs hors électronucléaires), transmise par le courrier DG-22-0095.

2.1 Rappel du contexte

Dans de nombreux centres médicaux français, le traitement des tumeurs cancéreuses se fait par radiothérapie. Pour cela, des accélérateurs linéaires médicaux sont utilisés pour ce type de traitement.

Les accélérateurs utilisent généralement des électrons à des énergies pouvant atteindre une énergie d'environ 20 MeV. Ces électrons sont utilisés soit, pour traiter directement des cibles localisées à faible profondeur, ou dans un autre cas, pour obtenir un faisceau de photons par rayonnement de freinage. Dans ces derniers cas, ce sont les photons qui vont traiter les tumeurs profondes.

La prise en charge opérationnelle des déchets de pièces activées issues d'accélérateurs médicaux linéaires par l'Andra nécessite de connaître l'activité de chaque radio-isotope présent dans ces déchets. Du fait du processus générateur de l'activation, cette détermination d'activité doit se faire non seulement sur les radio-isotopes émetteurs gamma, mais aussi sur les émetteurs bêtas purs générés.

2.2 Etude de la radioactivité induite dans les composants des accélérateurs linéaires médicaux

L'Andra a fait appel au Commissariat de l'Energie Atomique (CEA-List) pour une étude technique sur la radioactivité induite dans les composants des accélérateurs linéaires médicaux par simulation numérique. Il s'agissait de disposer à travers cette étude, d'un inventaire radiologique complet de tous les éléments radioactifs dont les émetteurs Beta purs difficilement mesurables générés par activation lors du fonctionnement d'un accélérateur.

L'étude par simulation de l'activation des pièces, réalisée par le CEA, a permis de simplifier les informations à transmettre par le détenteur de pièces activées, notamment de se dispenser des opérations de caractérisations des émetteurs gammas difficiles à mesurer et/ou des bêta purs.

Les modélisations effectuées par le CEA visaient principalement à obtenir des spectres adaptés à des mesures précises par spectrométrie gamma, afin de déduire, à partir de rapports, des activités pour les émetteurs bêta purs. Une estimation de l'activité massique a également été faite, en considérant l'activité massique la plus forte sur 1 cm³ de la pièce.

Il est à souligner que des opérations de caractérisations et conditionnements restent requises pour respecter les exigences des lieux de stockage (TFA, FMA-VC ou FAVL).

2.3 Mise en œuvre sur le terrain

Deux centres de radiothérapie détenteurs de pièces activées ont été identifiées par l'Andra en 2022 pour une phase de mise en test pratique des résultats de l'étude d'activation. Ces deux centres présentaient l'avantage d'avoir déjà engagé des échanges avec des sociétés spécialisées pour la caractérisation de leurs pièces activées.

A ce jour, un seul des deux centres a contractualisé avec une société spécialisée afin procéder aux opérations de caractérisation. Cette phase de contractualisation a été longue, avec des premiers échanges qui ont commencé en juin 2022 pour une intervention qui a débuté seulement un an plus tard fin juin 2023.

D'une façon générale, cela met en évidence les difficultés rencontrées par les centres de radiothérapie pour trouver des financements pour la gestion de leurs déchets.

Début 2023, l'Andra s'apercevant des difficultés rencontrées par les centres a pris contact avec un troisième centre pour lui proposer une intervention gérée et financée à titre exceptionnel, dans le cadre de cette phase de tests, par l'Andra. Le but étant de récupérer les données radiologiques nécessaires pour finaliser l'étude filière, mais aussi pour guider au mieux les sociétés spécialisées sur le terrain, à l'avenir, dans les caractérisations nécessaires à la prise en charge (temps de comptage, limites de détection, nombre de pièces à caractériser, etc.) afin qu'elles puissent chiffrer au plus juste les interventions.

Il est à noter qu'en 2023, trois autres sites ont été mis en relations avec des sociétés spécialisées, pour donner suite à leur volonté d'évacuer rapidement leur lot de pièces activées.

Mesures in situ et premiers résultats

Des mesures de terrain sont en cours chez un détenteur et viennent de s'achever chez un autre.

La phase d'exploitation des données est en cours mais à ce stade, mais deux aspects importants ressortent :

- Les débits de doses les plus élevés mesurés au niveau des pièces sont finalement assez faibles après un temps d'entreposage court. Par exemple, sur un site dont l'accélérateur a été arrêté il y a 2 ans, la pièce la plus irradiante est à $2.8\mu\text{Sv/h}$ au contact (filtre égaliseur).
- Les zones activées sur les pièces sont très localisées (on observe une très grande disparité lors des mesures au contact d'un côté ou de l'autre d'une même pièce).

Si nous prenons l'exemple du filtre égaliseur (pièce la plus irradiante identifiée), les premiers résultats laissent supposer une activité assez faible, la pièce isolée (de 440g) présentant un IRAS de 17, dont 38% de la contribution proviendrait du Fe^{55} (bêta pur). Pour rappel, à l'échelle d'un colis TFA, la prise en charge est possible jusqu'à un indice IRAS de 10.

Sur cette pièce, avec une décroissance supplémentaire très courte de 2 ans, l'IRAS descendrait à une valeur inférieure à 10 compte tenu de la courte période du Mn^{54} et de sa présence significative au moment de la mesure (60% de l'activité).

Cette analyse reste à affiner avec une exploitation de l'ensemble des pièces mesurées, mais l'Andra est à ce stade confiante sur le caractère TFA de l'ensemble des pièces d'un accélérateur qui aurait été mis à l'arrêt depuis 2 ans.

2.4 Aspect conditionnement

Les premiers résultats laissent ainsi entrevoir une filière majoritaire TFA.

De nombreuses pièces sont lourdes et denses :

- Jusqu'à 150 kg pour le support de tête
- Pièces en tungstène (densité 19,25) et plomb (densité 11,33)

Le conditionnement en fûts métalliques de 120L ou de 200L apparaît peu adapté pour des pièces très dense, car la charge maximale des fûts sera atteinte très rapidement, avec des fûts quasiment vides incompatibles avec les critères de sûreté du stockage TFA.

Du fait du processus d'activation, il y a très peu de problématique de contamination au niveau de ces pièces. Cela associé à une faible activité présumée des pièces, plusieurs solutions de conditionnement sont en cours d'étude et de consolidation :

- Collecte dans des emballages navettes et constitution des colis finaux à leur arrivée sur le CIRES (Le Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage) ;
- Conditionnement en casiers parois pleine sur site pour stockage direct au TFA.

Ce type de conditionnement devrait limiter la manutention et simplifier le transport en permettant d'utiliser les moyens classiques de la collecte des producteurs non électronucléaires.

Dans les diverses pièces d'un accélérateur médical linéaire, il subsiste quelques DEEE (Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques) nécessitant un conditionnement particulier du fait de la présence de substances dangereuses entrant dans leur composition. Leur volume est très réduit : estimé à quelques centaines de cm³ par accélérateur. Une méthodologie de prise en charge et de conditionnement spécifique à ces faibles volumes de déchets DEEE devra donc être définie.



AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION
DES DÉCHETS RADIOACTIFS

1-7, rue Jean-Monnet
92298 Châtenay-Malabry cedex
Tél. : 01 46 11 80 00
www.andra.fr