

Radioprotection : secteur recherche

Accélérateurs de particules

L'ensemble de cette collection a été réalisé par un groupe de travail (cf. composition page 144) auquel ont participé notamment :

l'ASN (Autorité de sûreté nucléaire),
la DGT (Direction générale du travail),
l'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire),
et l'INRS (Institut national de recherche et de sécurité).

Cette fiche, qui fait partie d'une collection réalisée par type d'activité dans le secteur de la recherche, concerne l'usage des accélérateurs de particules (hors domaines industriel et médical). Elle est destinée aux personnes impliquées dans la radioprotection des travailleurs : salariés compétents pour la protection et la prévention des risques professionnels, assistants ou conseillers de prévention, conseillers en radioprotection, médecins du travail/de prévention¹ et responsables (employeurs...). Elle s'adresse aussi aux utilisateurs de ces techniques (chercheurs, ingénieurs, techniciens...).

Chaque fiche présente les différentes procédures, les types de dangers spécifiques, l'analyse des risques et leur évaluation, ainsi que les méthodes de prévention. Cette fiche est accompagnée d'une annexe (p. 145) et d'études de cas sur l'activation des matériaux (p. 149).

1. Dans la suite de la fiche, le terme générique médecin du travail sera retenu.

2. Code de la Santé publique, annexe 13-7.

1 DÉFINITION DES APPAREILS ET TYPES DE TECHNIQUES CONCERNÉS

Est dénommé accélérateur de particules tout appareillage ou installation dans lesquels des particules sont soumises à une accélération, et émettent des rayonnements ionisants d'une énergie supérieure à 1 mégaélectronvolt (MeV)².

Un accélérateur de particules comprend généralement les éléments suivants :

- une source de particules (électrons, protons, deutons, hadrons, ions divers) ;
- un dispositif générant des champs électriques / magnétiques / radiofréquences (RF) ;

- des dispositifs de focalisation ;
- une ou des chambre(s) d'accélération ;
- des aimants ;
- une ou des fenêtre(s) ;
- des dispositifs de mesure et de contrôle.

Les accélérateurs de particules se répartissent en trois grandes catégories :

- linéaire : les particules sont accélérées selon une trajectoire rectiligne (LINAC, Van de Graaff...) (figure 1 ci-dessous) ;
- circulaire : trajectoires circulaires ou en spirales (cyclotron, synchrotron...) (figure 2 page suivante) ;
- accélérateurs laser plasma / cible solide : création d'un champ accélérateur par interaction entre un laser

de haute puissance et un plasma ou une cible solide.

Liste (non exhaustive) des utilisations rencontrées :

- recherche en physique nucléaire, atomique et des particules ;
- production de radionucléides à des fins de recherche ;
- utilisation des rayonnements secondaires produits (rayons X, laser, synchrotron, neutrons).

2 PERSONNEL CONCERNÉ PAR LE RISQUE

- Toute personne travaillant dans une installation utilisant des accélérateurs de particules : chercheurs,

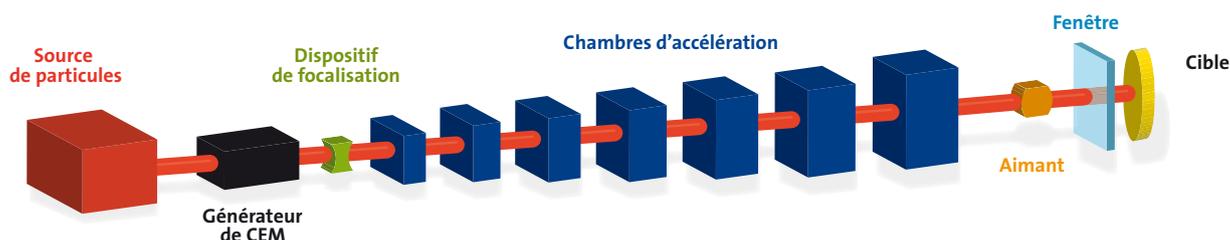
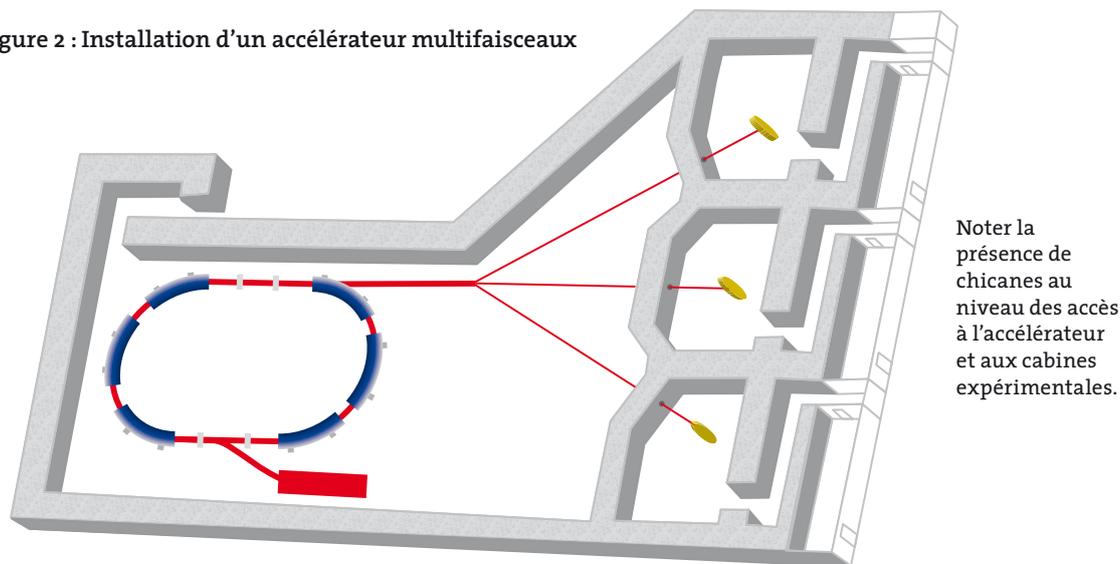


Figure 1 : Structure d'un accélérateur linéaire

Figure 2 : Installation d'un accélérateur multifaisceaux



Noter la présence de chicaneuses au niveau des accès à l'accélérateur et aux cabines expérimentales.

techniciens, ingénieurs, doctorants, post doctorants, étudiants, stagiaires...

■ Toute autre personne amenée à intervenir sur des accélérateurs de particules ou dans les locaux où ceux-ci sont installés : acteurs de prévention, services techniques, entreprises extérieures (personnel de maintenance, de contrôle et/ou de vérification...)

L'ensemble des dispositions ci-après, à mettre en œuvre par l'employeur ou son représentant, s'applique aux agents et salariés, y compris temporaires³, de l'établissement, aux salariés d'entreprises extérieures, aux stagiaires, ainsi qu'à toute personne placée à quelque titre que ce soit sous l'autorité de l'employeur. Elles s'appliquent également aux travailleurs indépendants et aux employeurs.

Dans le cas d'intervention d'entreprises extérieures, ces dispositions imposent une coordination des mesures de radioprotection pour les différents intervenants entre le chef de l'entreprise utilisatrice et celui de l'entreprise extérieure. Cette coordination est assurée par le chef de l'entreprise utilisatrice. Ces mesures sont formalisées dans un plan de

prévention, quelle que soit la durée de cette intervention.

3 DÉROULEMENT DES PROCÉDURES

Préalablement à l'acquisition ou à l'étude de conception d'un accélérateur de particules, l'employeur devra, avec l'aide du conseiller en radioprotection, réaliser l'évaluation des risques. Pour ce faire, il devra :

- obtenir les informations techniques spécifiques à l'appareil auprès du fournisseur ou des concepteurs ;
- identifier ses finalités et modalités d'utilisation ;
- s'assurer du respect des exigences associées au régime administratif⁴ (autorisation, classement en INB⁵) ;
- s'assurer de l'adéquation entre la conception de l'installation et les caractéristiques de l'appareil (se référer à la norme NF M62-105).

Suite à l'évaluation préalable des risques, l'employeur devra mettre en place une organisation de la radioprotection prévue par le Code du travail.

Il devra désigner au moins un conseiller en radioprotection (personne(s) compétente(s) en radioprotection (PCR) et/ou organisme compétent en radioprotection (OCR), pôle de compétences dans les établissements comprenant une installation nucléaire de base) bénéficiant du temps et des moyens nécessaires à ses (leurs) missions, et sur lequel (lesquels) il s'appuiera pour :

- analyser en amont les phases d'utilisation (mise en service, réglage, fonctionnement, maintenance) afin d'établir l'évaluation individuelle des risques, le programme des vérifications (type et périodicité) ainsi que les procédures en cas d'urgence ;
- définir les autorisations d'accès aux locaux concernés.

Au titre du Code de la santé publique, le conseiller en radioprotection conseille le responsable de l'activité nucléaire dans les domaines tels que les plans de l'installation, la gestion des déchets et effluents, les opérations de démantèlement, les impacts potentiels de l'installation sur l'environnement.

3. Il est interdit d'employer des travailleurs temporaires ou en contrat à durée déterminée à des travaux accomplis dans une zone où la dose efficace susceptible d'être reçue, intégrée sur 1 heure, est égale ou supérieure à 2 mSv (article D. 4154-1 du Code du travail).

4. De la responsabilité du responsable de l'activité nucléaire.

5. Articles R. 125-49 et suivants, article R. 593-3 du Code de l'environnement.

Le lecteur pourra se reporter au paragraphe 6 « *Stratégie de maîtrise de risque* ».

4 DANGERS ET IDENTIFICATION DU RISQUE RADIOLOGIQUE

4.1. Dangers

■ Émission de particules chargées, de rayonnements gamma, de neutrons.

■ Émission de rayons X (RX) (rayonnement de freinage).

Le danger d'émission de particules est présent lors du fonctionnement mais peut également l'être à l'arrêt de l'équipement (activation de matériaux, de l'eau et de l'air).

4.2. Risque

Les risques sont dépendants des paramètres suivants :

- type des particules ou rayonnements émis ;
- énergie des particules accélérées ;
- intensité des rayonnements ;
- durée d'émission ;
- fréquence de fonctionnement ;
- nature des matériaux irradiés (échantillon, cible, composants de l'équipement et de l'infrastructure).

Les risques en termes d'exposition externe et interne sont repris dans le **tableau I**.

5 ÉVALUATIONS DU RISQUE RADIOLOGIQUE ET DÉTERMINATION DES NIVEAUX D'EXPOSITION

La collaboration entre le médecin du travail et le conseiller en radioprotection est essentielle.

5.1. Éléments d'évaluation du risque

La première approche de l'évaluation du risque est documentaire (données issues du constructeur ou de la littérature portant sur des installations similaires).

Les éléments à rassembler sont *a minima* :

- les caractéristiques de l'accélérateur de particules (types et énergies des particules accélérées, réglage des paramètres...);
- l'analyse des différentes phases et configurations d'utilisation afin d'identifier celles comportant un risque d'exposition aux rayonnements ionisants. Elle prendra en compte les caractéristiques de

l'installation et la possibilité d'exposition suite à une activation de matériaux.

Elle sera complétée par l'analyse, notamment :

■ des moyens de protection collective (matériaux et épaisseurs des murs, sol, plafond, blindage, enceinte, casemates, systèmes de ventilation et filtration, de limitation des rejets, systèmes de surveillance - balises...);

■ des différents systèmes de sécurité (asservissement, supervision...);

■ de l'estimation des expositions par démonstration théorique (simulation, calcul...), retours d'expérience (REX) sur des installations similaires.

Les résultats de l'évaluation préalable des risques doivent être consignés dans le document unique d'évaluation des risques professionnels.

Le médecin du travail ou l'équipe pluridisciplinaire du service de santé au travail sont informés des résultats de l'évaluation des risques et des mesurages.

5.2. Identification et signalisation des zones délimitées

La démarche concerne les zones où les travailleurs sont susceptibles

➤ **TABLEAU I : RISQUES D'EXPOSITION EXTERNE ET INTERNE EN FONCTIONNEMENT ET À L'ARRÊT DE L'ACCÉLÉRATEUR**

	EXPOSITION EXTERNE	EXPOSITION INTERNE
EN FONCTIONNEMENT	<ul style="list-style-type: none"> - Particules et rayonnements secondaires : <ul style="list-style-type: none"> • issus de l'interaction entre le faisceau primaire et la matière (rayonnements parasites), • utiles (neutrons...). - Rayonnements générés par des équipements annexes (courant d'obscurité, klystrons). - Rayonnements issus de sources radioactives cibles. 	Incorporation de radionucléides créés par l'activation de cibles, d'aérosols, de particules en suspension, de l'air.
À L'ARRÊT	<ul style="list-style-type: none"> - Rayonnements issus de l'activation de matériaux (équipements, infrastructures, cibles, aérosols, particules en suspension, eau des circuits de refroidissement). - Rayonnements issus de sources radioactives cibles 	Incorporation de radionucléides créés par l'activation de cibles, d'aérosols, de particules en suspension, de l'air.

d'être exposés à des doses supérieures à 0,08 millisievert (mSv)/mois pour le corps entier ou à 4 mSv/mois pour les extrémités ou la peau.

La signalisation d'une source d'émission de rayonnements ionisants est obligatoire.

La délimitation des zones est fixée par la réglementation et traduit la gradation du risque. Elle est mise en œuvre par l'employeur ou son représentant, sur proposition du conseiller en radioprotection, sur la base de l'évaluation préalable des risques radiologiques.

La délimitation des zones se définit à partir des niveaux d'exposition potentiels, corps entier et/ou extrémités et/ou peau :

- dans les situations représentatives des conditions d'utilisation ;
- en considérant le lieu de travail occupé de manière permanente (170 heures/mois ou 2 000 heures par an)⁶ ;
- en incluant les incidents raisonnablement prévisibles⁷ inhérents au procédé de travail ou du travail effectué ;
- en tenant compte des moyens de protection collective.

Elle doit être réévaluée dans le temps en fonction des modalités d'utilisation des équipements (fréquence, intensité des émissions...) et du vieillissement de l'équipement.

Lorsque les conditions d'utilisation le permettent, une zone intermittente peut être définie le cas échéant.

Les zones sont délimitées de façon continue, visible et permanente.

La délimitation des zones est consignée dans le document unique d'évaluation des risques professionnels.

5.3. Évaluation individuelle de l'exposition aux postes de travail et classement du personnel

5.3.1. Évaluation individuelle préalable de l'exposition aux postes de travail

L'évaluation individuelle de l'exposition a pour objet de définir les mesures de prévention (surveillance dosimétrique individuelle, suivi en santé au travail, formation et information). Elle fonde le classement des travailleurs en référence aux niveaux de dose retenus pour chaque catégorie.

L'évaluation individuelle de l'exposition doit être réalisée préalablement à l'affectation au poste. Elle s'applique à tous les travailleurs accédant en zone délimitée, qu'ils soient classés ou non. Elle est communiquée au médecin du travail lorsque l'employeur propose un classement. L'évaluation individuelle préalable :

- prend en compte la nature du travail, les caractéristiques de l'exposition, l'existence d'autres sources de rayonnements ionisants, sur la base de la fréquence et de la durée des expositions sur l'ensemble des postes de travail occupés par le travailleur ;
- comporte des informations relatives à la dose efficace et, le cas échéant, aux doses équivalentes et internes que le travailleur est susceptible de recevoir sur les 12 mois consécutifs à venir ;
- intègre l'ensemble des tâches réalisées, extrapolées sur une année, en tenant compte de la variabilité des pratiques individuelles, des incidents raisonnablement prévisibles et des expositions potentielles en découlant ;
- prend en compte les équipements de protection collective (EPC) et les équipements de protection individuelle (EPI) utilisés ainsi que l'ergonomie des postes de travail.

Ses résultats doivent pouvoir être consultés pendant au moins 10 ans. Chaque travailleur a accès à l'évaluation le concernant.

Des mesures de débit d'équivalent de dose (en différents points représentatifs) et du temps d'exposition, ou des mesures de dose intégrée sont réalisées à chaque poste de travail pour évaluer l'exposition individuelle. Une attention particulière sera portée aux travailleurs assurant la maintenance (préventive et curative), notamment en présence d'une activation des matériaux. Toute modification significative des conditions de travail ou de fonctionnement de l'installation nécessitera une actualisation de l'évaluation des risques par l'employeur.

L'entreprise utilisatrice doit communiquer à l'entreprise de travail temporaire l'évaluation individuelle liée au risque avant la mise à disposition du travailleur.

L'employeur définit préalablement des contraintes de dose⁸ individuelles pour toute activité réalisée en zone contrôlée ou en zone d'extrémités.

Par la suite, les niveaux d'exposition et les contraintes de dose seront affinés par :

- les résultats des mesures (ambiance, fuite, contamination) lors des vérifications périodiques ou des contrôles périodiques sur les déchets et effluents ;
- les résultats de la surveillance dosimétrique individuelle ;
- le REX d'utilisation ;
- les événements significatifs pour la radioprotection (ESR)⁹ (incidents, accidents...).

5.3.2. Classement des travailleurs

Le classement s'applique à tout travailleur susceptible de dépasser, dans le cadre de son activité professionnelle, l'une des limites de dose fixées pour un travailleur non classé, dans les conditions habituelles de réalisation des opérations, incluant les incidents raisonnablement prévisibles et les expositions

6. Instruction DGT/ASN/2018/229 du 2 octobre 2018.

7. Défaillance potentielle du premier moyen de prévention (premiers systèmes de verrouillage de sécurité, non-respect d'une consigne de sécurité).

8. Instruction DGT/ASN/2018/229 du 2 octobre 2018, voir paragraphe 8.3.1. de la présente fiche.

9. Guide de l'ASN n° 11 : Événement significatif dans le domaine de la radioprotection (hors INB et transport de matières radioactives) : déclaration et codification des critères. Version du 7 octobre 2009. Mise à jour juillet 2015.

potentielles qui en découlent. Les valeurs limites d'exposition pour un travailleur non classé et les niveaux de dose déterminant les catégories du classement d'une part, les valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) d'autre part sont définis respectivement aux articles R. 4451-57 et R. 4451-6 du Code du travail. Ils sont présentés dans le **tableau II**.

Le classement est défini par l'employeur après avis du médecin du travail, à partir de l'exposition la plus pénalisante. Il est apprécié au préalable avec le conseiller en radioprotection selon l'analyse de l'ensemble des expositions potentielles aux rayonnements ionisants de chaque travailleur.

5.4. Choix de la surveillance dosimétrique

Une surveillance dosimétrique individuelle adaptée aux caractéristiques des rayonnements ionisants est mise en place sur la base de l'évaluation individuelle préalable d'exposition, du classement et de l'identification des zones délimitées :

- **pour l'exposition externe corporelle** : port de dosimètre à lecture différée (passif), adapté, le cas échéant, aux neutrons ;

- **en cas d'exposition externe des extrémités et du cristallin** : par exemple port de bague pour les extrémités, dosimètre cristallin ;

- **pour l'exposition interne** : définie par le médecin du travail.

Le port d'un dosimètre opérationnel est obligatoire :

- pour les travailleurs classés intervenant en zone contrôlée, d'extrémités ou en zone d'opération ;

- pour toute personne, même non classée, accédant en zone contrôlée verte ou jaune.

6 STRATÉGIE DE MAÎTRISE DE RISQUES

6.1. Principes de prévention des risques

La maîtrise des risques au poste de travail repose sur les principes de radioprotection (justification, optimisation, limitation) et sur l'application des principes généraux de prévention¹⁰, en particulier :

- la suppression ou la limitation du risque ;

- la réduction du niveau d'exposition externe et interne (organisation du travail¹¹, automatisation,

agencement des locaux et postes de travail, choix des matériaux par rapport au risque d'activation, choix des appareils ou pièces permettant une diminution de la fréquence des maintenances, blindage, ventilation-filtration, décroissance radioactive des matériaux activés¹², temporisation, écran, distance...);

- la connaissance par chaque travailleur des risques et des règles de radioprotection.

6.2. Mesures techniques concernant l'installation

6.2.1. Conception de l'installation

La conception de l'installation (locaux, accélérateur et équipements annexes) est un élément primordial pour optimiser la radioprotection et réduire la production des effluents et déchets. Les risques d'activation doivent être évalués dès la phase de conception des installations. Celle-ci anticipe les contraintes du démantèlement de l'installation (facilité de démontage, connaissance des composants des matériaux...).

Les prescriptions réglementaires sur les mesures d'organisation et les conditions d'utilisation des

10. Article L.4121-2 du Code du travail. Le lecteur pourra se reporter au dossier de l'INRS Démarches de prévention, accessible sur la page www.inrs.fr/demarche/principes-generaux/introduction.html.

11. Par exemple, pour les opérations de maintenance, planification après les week-ends, partage des tâches.

12. Par exemple, entreposage pour décroissance des pièces activées avant leur maintenance.

➤ **TABLEAU II : VALEURS LIMITES D'EXPOSITION PROFESSIONNELLE (VLEP) ET NIVEAUX DE DOSE DÉTERMINANT LES CATÉGORIES DE TRAVAILLEURS.**

	DOSES EFFICACES ET DOSES ÉQUIVALENTES (EN mSv SUR 12 MOIS CONSÉCUTIFS)		
	Organisme entier (dose efficace)	Extrémités et peau *	Cristallin **
Travailleurs non classés	≤ 1	≤ 50	≤ 15
VLEP (sauf travailleuses enceintes et travailleurs de moins de 18 ans)	≤ 20	≤ 500	≤ 20
Travailleurs catégorie B (niveaux de dose)	> 1 et ≤ 6	> 50 et ≤ 150	> 15
Travailleurs catégorie A (niveaux de dose)	> 6	> 150	—

* Pour la peau : dose moyenne sur toute surface de 1 cm², quelle que soit la surface exposée.

** Il n'y a pas de classement en catégorie A uniquement au titre de l'exposition du cristallin. La VLEP pour le cristallin est de 20 mSv sur 12 mois consécutifs à compter du 1^{er} juillet 2023. Du 1^{er} juillet 2018 au 30 juin 2023, la valeur limite de la dose cumulée (sur ces 5 années) est de 100 mSv, pour autant que la dose reçue au cours d'une année ne dépasse pas 50 mSv.

équipements de travail doivent par ailleurs être mises en œuvre concernant :

- le risque électrique ;
- les passages et allées de circulation (déplacements, apport ou évacuation de substances...), l'état des sols. Une attention particulière sera portée sur l'encombrement des locaux (entreposage de matériel et de déchets) ;
- la stabilité des équipements ;
- l'ergonomie des postes de travail (incluant les opérations de maintenance) ;
- les circuits d'évacuation des personnes ;
- ...

Les règles de base de conception de locaux pour une utilisation donnée doivent être respectées, privilégiant les EPC.

La norme NF M62-105 décrit les éléments à prendre en compte pour la conception des installations comportant un accélérateur de particules.

6.2.1.1 Définition des blindages

Pour déterminer le dimensionnement et l'implantation des blindages, des codes de calcul adaptés (de type Monte-Carlo) et le REX doivent être utilisés. Le recours à des calculs analytiques est possible dans des cas simples (faisceau mono énergétique sur une cible de composition connue).

Les données d'entrée sont à déterminer précisément le plus rapidement possible. Elles font l'objet d'analyses itératives en fonction de l'avancée de l'application des codes de calcul. Sont ainsi à prendre en compte :

- l'implantation, les paramètres de fonctionnement et les finalités d'utilisation de l'accélérateur ;
- l'identification des termes sources et des points de perte (points de création de rayonnements secondaires) ;
- l'infrastructure existante (sols, toits...) et son environnement

(installations émettant des rayonnements ionisants à proximité, postes de travail contigus, circulations, voie publique...);

- les locaux techniques, circuits des fluides ;
- le choix des matériaux (réduction de la production de rayonnements secondaires et de l'activation des matériaux, contraintes thermiques sur les arrêteurs faisceaux) ;
- les accès d'exploitation (au moins deux angles de diffusion par chicane), passages, ouvertures. Il est recommandé d'éviter les ouvertures en ligne de mire du faisceau ou d'un point de perte, par exemple en privilégiant l'installation à une hauteur décalée par rapport au plan du faisceau et la création d'angles (voir schéma de l'installation d'un accélérateur multifaisceaux p. XX) ;

- les contraintes d'exploitation (en anticipant les évolutions éventuelles des protocoles).

Une vigilance particulière sera portée sur les points de faiblesse architecturaux : discontinuités dans les interstices (dessous de portes), structure du sous-sol (zones de circulation et possibilité de remontées), charge au sol, dimensionnement des toits, trémies, accès aux casemates, ouvertures dans le blindage (réservations).

6.2.1.2 Dispositifs de sécurité

Les dispositifs de sécurité recouvrent la gestion des accès, les dispositifs de signalisation et d'alarme.

Certaines conditions d'exploitation interdisent la présence de personne dans les locaux dès lors que l'émission de rayonnements ionisants ne peut être exclue. Dans ce cas, la conception d'un dispositif de gestion des accès doit obéir aux principes suivants :

- sécurité positive (la défaillance d'un élément du système de sécurisation des accès empêche l'accès) ;
- redondance (duplication de dis-

positifs ou systèmes, diversification) ;

- indépendance de fonctionnement.

Les accélérateurs autobloqués installés dans des locaux n'ayant pas la fonction de casemate doivent répondre à des exigences de sécurité de niveau équivalent pour ce qui concerne leurs accès.

La signalisation s'attache d'une part à informer de l'état de fonctionnement de l'installation et, d'autre part, à délimiter les zones définies au titre du Code du travail. La signalisation d'autres risques ne doit pas être omise mais clairement distinguée (risque électrique, champs électromagnétiques, laser). Les systèmes d'alarme doivent être visuels et sonores ; il convient de s'assurer qu'ils sont audibles quand l'installation est en fonctionnement et aisément visualisables. La présence d'un report de l'état des alarmes dans un local de contrôle est une bonne pratique.

6.2.1.3 Gestion des effluents et déchets¹³

■ La conception d'une installation vise, notamment, à réduire la production d'effluents et de déchets. Les modalités de collecte, de gestion et d'élimination font l'objet d'un plan de gestion des effluents et déchets.

■ Quand il existe un risque important d'activation, il convient de prévoir la réduction et/ou la mise en place de boucles fermées sur les circuits d'eau, de limiter la présence de matériel électronique.

■ Des dispositifs visant à limiter les rejets d'effluents gazeux peuvent être nécessaires, notamment en fonction des résultats des études d'impact, de prescriptions spécifiques, de normes...

■ Le choix de matériaux peu sensibles à l'activation est à privilégier.

■ La conservation d'échantillons des matériaux de construction (béton, ferrailage...) constitue une

13. Arrêté du 23 juillet 2008 portant homologation de la décision n° 2008-DC-0095 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 29 janvier 2008, fixant les règles techniques auxquelles doit satisfaire l'élimination des effluents et des déchets contaminés par des radionucléides, ou susceptibles de l'être du fait d'une activité nucléaire, prise en application des dispositions de l'article R. 1333-12 du Code de la Santé publique.

bonne pratique pour déterminer leur composition et avoir un « point zéro » radiologique, dans l'optique de faciliter la gestion des déchets activés.

La caractérisation de déchets activés requiert la réalisation de calculs, en plus de mesures d'activité et de spectrométries. À cette fin, la connaissance de la composition exacte des matériaux constitutifs de l'installation et de l'historique des utilisations (configurations, paramétrages, incidents) est nécessaire. En effet, de légères variations dans la composition des matériaux peuvent avoir une forte influence sur les niveaux d'activation.

6.2.2. Vérifications de l'installation¹⁴

Sur les conseils du conseiller en radioprotection, l'employeur définit le programme des vérifications. L'adéquation de l'installation avec l'utilisation qui va en être faite doit être vérifiée préalablement (EPC...). Un examen de réception est prévu par l'article R. 1333-139 du Code de la Santé publique.

Les résultats des vérifications font l'objet d'un enregistrement systématique, toute anomalie doit être analysée, traitée et tracée.

6.2.2.1 Vérifications initiales

Les vérifications initiales sont pratiquées par des organismes accrédités ou par l'IRSN. Elles doivent être réalisées lors d'une mise en service de l'installation ou à l'issue d'une modification importante des méthodes ou des conditions de travail susceptible d'affecter la santé et la sécurité des travailleurs. Elles doivent être renouvelées à chaque montée en puissance de l'accélérateur de particules jusqu'à atteinte de son fonctionnement nominal.

Une vérification du niveau d'exposition externe est réalisée dans les zones délimitées lors de la mise en service de l'installation. Elle est

complétée, le cas échéant, d'une vérification de la non contamination des locaux.

Les lieux de travail attenants aux zones délimitées ne font pas l'objet d'une vérification initiale par un organisme accrédité. Il appartient au conseiller en radioprotection d'y réaliser une vérification lors de la mise en service de l'installation.

6.2.2.2 Vérifications périodiques

Les vérifications périodiques des niveaux d'exposition (ambiance) comprennent les mesures de débits de dose ou de doses intégrées. Elles peuvent être réalisées périodiquement et/ou, le cas échéant, en continu. Elles sont mises en œuvre par le conseiller en radioprotection ou sous sa supervision.

Les vérifications périodiques relatives aux EPC doivent également être effectuées.

En cas d'anomalies et incidents, il appartient à l'employeur de faire réaliser les travaux nécessaires à la levée des non-conformités constatées.

6.3. Mesures techniques concernant l'instrumentation et les systèmes de protection et d'alarme

L'employeur doit s'assurer :

- de l'adéquation des types de détecteurs (y compris des dosimètres opérationnels) à la nature et à l'énergie des particules et rayonnements, aux fréquences et durées d'impulsions, et de la pertinence de leur emplacement ;
- du bon fonctionnement des instruments de mesure de radioprotection et de leur étalonnage ;
- de la vérification périodique du bon fonctionnement des dispositifs de protection, de signalisation et d'alarme. Les résultats de ces vérifications font l'objet d'un enregistrement systématique, toute anomalie doit être analysée, traitée et tracée.

6.4. Mesures techniques concernant l'utilisation des accélérateurs de particules

6.4.1. Vérifications des accélérateurs de particules

Les résultats des vérifications font l'objet d'un enregistrement systématique, toute anomalie doit être analysée, traitée et tracée.

6.4.1.1 Vérifications initiales

Les vérifications initiales sont pratiquées par des organismes accrédités ou par l'IRSN. Elles doivent être réalisées, dans les conditions normales d'utilisation, lors de la mise en service de l'accélérateur ou à l'issue de toute modification importante susceptible d'affecter la santé et la sécurité des travailleurs. Les vérifications initiales doivent être renouvelées à intervalle régulier si les équipements présentent un « risque particulier » au sens de la réglementation¹⁵. Ce renouvellement est prévu tous les 3 ans pour les accélérateurs de particules utilisés à poste fixe, et tous les ans pour les accélérateurs de particules mobiles.

6.4.1.2 Vérifications périodiques

Les vérifications périodiques sont réalisées par le conseiller en radioprotection ou sous sa supervision. Elles ont pour but la mise en évidence en temps utile de toute détérioration susceptible de créer un danger.

Elles sont réalisées selon une périodicité définie par l'employeur (maximum un an) ainsi que lors de la remise en service après toute opération de maintenance.

6.4.2. Exploitation des accélérateurs de particules

■ En amont de l'utilisation d'accélérateurs de particules :

- planifier son travail ;
- s'assurer de l'effectivité du fonctionnement des dispositifs de sécurité et de signalisation ;

14. Des dispositions transitoires sont applicables jusqu'au 1^{er} juillet 2021. Le lecteur peut se reporter à l'instruction DGT/ASN/2018/229 du 2 octobre 2018.

15. Arrêté prévu par l'article R. 4451-51 du Code du travail.

→ respecter les consignes de démarrage.

■ Pendant le fonctionnement des accélérateurs de particules :

→ respecter les protocoles établis.

■ À l'arrêt :

→ respecter les consignes d'entrée ;

→ respecter la temporisation, s'équiper d'un radiamètre, s'équiper des EPI (habillage) nécessaires (notamment en cas de risque de contamination) avant d'entrer dans la casemate ;

→ respecter la procédure de gestion des pièces activées (traçage et lieu d'entreposage) et des déchets activés (plan de gestion des déchets et effluents).

■ Opérations de maintenance préventive et curative :

→ réaliser une évaluation individuelle de l'exposition ;

→ définir des contraintes de dose pour une intervention en zone contrôlée ou en zone d'extrémités ;

→ prendre en compte la décroissance radioactive pour planifier les interventions et diminuer l'exposition ;

→ réaliser des mesures immédiatement en amont d'une intervention de maintenance curative prévue ;

→ mettre en place des points d'arrêt pour le suivi de l'exposition ;

→ privilégier la réalisation des opérations de maintenance dans un lieu spécifique sans exposition aux rayonnements ionisants, type atelier en dehors de la casemate ;

→ ne pas entreposer les outils dans des lieux où il existe un risque d'activation ;

→ respecter les consignes internes de port des EPI ;

→ éviter le travail isolé, à défaut l'encadrer (port de DATL...).

■ Situation impliquant une désactivation complète ou partielle des systèmes de sécurité :

→ les situations où une désactivation des systèmes de sécurité peut être autorisée doivent être déterminées et justifiées en fonction des modalités d'exploitation de l'installation¹⁶. Il est recommandé de

mettre en place une surveillance renforcée des opérations durant le temps de la désactivation, d'enregistrer les dérogations, de les analyser pour REX. Il est nécessaire de s'assurer de la réactivation effective des systèmes de sécurité avant tout retour en mode normal. Un mode de fonctionnement dégradé ne doit en aucun cas se prolonger dans le temps.

6.5. Mesures concernant les travailleurs

Tout travailleur accédant à une zone doit y être préalablement et individuellement autorisé par l'employeur. Le classement vaut autorisation.

Les travailleurs non classés peuvent accéder en zones surveillées, contrôlées vertes et contrôlées jaunes sous certaines conditions (évaluation préalable de l'exposition individuelle, information adaptée, voire renforcée). L'employeur doit s'assurer par des moyens appropriés que l'exposition en dose efficace des travailleurs non classés accédant à des zones délimitées demeure inférieure à 1 mSv sur 12 mois consécutifs.

6.5.1. Mesures techniques individuelles

■ Vérifier le bon état des EPI.

■ Porter les EPI nécessaires et appropriés au regard des risques radiologiques et conformément aux informations données par le fabricant.

6.5.2. Formation et information

Une information ciblée et, le cas échéant, une formation adaptée doivent être délivrées aux travailleurs concernés par le risque, identifiés au paragraphe 2.

6.5.2.1 Formation et information des travailleurs

■ Attention particulière à porter sur les compétences techniques requises pour exploiter un accélérateur de particules (formations

par les fabricants, tutorat) et sur le maintien du niveau des compétences.

■ Formation et information sont organisées et délivrées avec le concours du conseiller en radioprotection qui exerce ses missions en lien avec le médecin du travail et le salarié compétent pour la prévention des risques professionnels, ou l'assistant (ou conseiller) de prévention le cas échéant.

■ Formation spécifique à la radioprotection pour les travailleurs classés :

→ adaptée au poste de travail occupé ;

→ adaptée à l'utilisation des accélérateurs de particules ;

→ renouvelée en cas de changement de poste, création de poste, reprise après un arrêt de travail d'au moins 21 jours¹⁷, et au moins tous les 3 ans ;

→ sensibilisation des femmes sur les risques pour l'enfant à naître et sur l'importance de la déclaration précoce des grossesses.

■ Information :

→ pour les travailleurs non classés dûment autorisés à accéder en zone délimitée, renforcée en cas d'accès en zone contrôlée jaune ;

→ dans certains cas particuliers : retours d'expérience, sensibilisation des femmes sur les risques pour l'enfant à naître et sur l'importance de la déclaration précoce des grossesses.

■ Pour les travailleurs des entreprises extérieures : information adaptée, rattachée au plan de prévention.

■ Organisation de la transmission des connaissances relatives à l'installation.

6.5.2.2 Affichage et autres consignes

■ Affichage des consignes générales d'hygiène et sécurité.

■ Signalisation des zones délimitées.

■ Signalisation spécifique et appropriée de chaque source de rayonnements ionisants.

16. De la responsabilité du responsable de l'activité nucléaire.

17. Information et formation sur la sécurité, à la demande du médecin du travail.

- Affichage des consignes de travail adaptées et de la conduite à tenir en cas d'accident du travail et/ou radiologique.

- Affichage des coordonnées du conseiller en radioprotection, du médecin du travail (service de santé au travail), des services de secours d'urgence et de l'agent de contrôle de l'inspection du travail.

- Mise à disposition des notices de fonctionnement des appareils de mesure et consignes d'utilisation.

6.5.3. Évaluation individuelle de l'exposition aux rayonnements ionisants

Le lecteur se reportera au paragraphe 5.3.1 *Évaluation individuelle préalable de l'exposition aux postes de travail*.

6.5.4. Mise en œuvre de la dosimétrie

Avant toute demande de dosimètre, chaque travailleur classé est inscrit par son employeur dans le Système d'information et de surveillance de l'exposition aux rayonnements ionisants (SISERI) par l'intermédiaire du Correspondant de l'employeur pour SISERI (CES). La gestion de SISERI est assurée par l'IRSN.

6.5.4.1 Dosimétrie à lecture différée (passive)

- Obligatoire pour les travailleurs classés.

- Mise en place :

- chaque employeur (y compris des entreprises extérieures ou de travail temporaire) est responsable de la mise en œuvre de la dosimétrie à lecture différée des salariés qu'il emploie ; à ce titre, il est tenu de leur fournir les dosimètres adaptés ;
- stagiaire : la dosimétrie à lecture différée est assurée par l'employeur de la personne sous l'autorité de laquelle il est placé ; la convention de stage peut préciser des modalités spécifiques.

- Communication des résultats :

- le médecin du travail commu-

nique et commente les résultats dosimétriques individuels au travailleur ;

- le conseiller en radioprotection a accès aux résultats de la dose efficace et des doses équivalentes sur la durée du contrat de travail du travailleur.

6.5.4.2 Dosimétrie opérationnelle

L'utilisation de la dosimétrie opérationnelle s'inscrit dans le cadre de la gestion de la contrainte de dose définie par l'employeur. Le dosimètre opérationnel se positionne comme un outil de pilotage des mesures de prévention.

- Obligatoire en cas d'entrée en zone contrôlée.

- Mise en place :

- il appartient à chaque employeur de fournir aux salariés qu'il emploie des dosimètres opérationnels adaptés (types de rayonnements, énergies...);

- entreprise extérieure : des accords peuvent être conclus entre les employeurs de l'entreprise utilisatrice et de l'entreprise extérieure pour la fourniture des dosimètres opérationnels ;

- entreprise de travail temporaire : la dosimétrie opérationnelle est à la charge de l'entreprise utilisatrice ;

- Stagiaire : la dosimétrie opérationnelle est assurée par l'employeur de la personne sous l'autorité de laquelle il est placé ; la convention de stage peut préciser des modalités spécifiques.

- Paramétrage :

Les dosimètres opérationnels sont paramétrés par le conseiller en radioprotection, qui définit des seuils d'alarme.

- Communication des résultats :

Le conseiller en radioprotection communique les résultats aux intéressés et à l'employeur. Dans les établissements comprenant une installation nucléaire de base, l'employeur transmet périodiquement les niveaux d'exposition mesurés à SISERI. En cas de mise à disposition de dosimètres opérationnels par

l'entreprise utilisatrice, le conseiller en radioprotection de l'entreprise utilisatrice communique ces résultats au conseiller en radioprotection de l'entreprise extérieure.

6.5.5. Spécificités concernant le personnel de recherche extérieur au laboratoire

Une autorisation ASN est nécessaire pour qu'une personne extérieure au laboratoire mette en œuvre un accélérateur de particules (mise en marche). Le responsable de la structure d'accueil vérifie que la personne extérieure a bien une connaissance des règles de sécurité et des obligations réglementaires concernant les rayonnements ionisants, adaptée au type d'appareil utilisé. Un plan de prévention écrit précise, notamment, les phases d'activité dangereuses et les moyens de prévention spécifiques correspondants, les instructions à donner aux travailleurs extérieurs, l'organisation mise en place pour assurer les premiers secours en cas d'urgence.

Dans tous les cas, le conseiller en radioprotection de l'établissement doit définir les modalités d'intervention (accès en zones délimitées, suivi dosimétrique, formation, information...) en liaison étroite avec son homologue. Il est en effet essentiel que les conseillers en radioprotection partagent les informations en leur possession.

L'application de ces procédures doit être vérifiée avec une vigilance particulière.

7 SUIVI MÉDICAL EN SANTÉ AU TRAVAIL

7.1. Suivi individuel renforcé

Tout travailleur classé bénéficie d'un suivi individuel renforcé (régime général) ou d'une surveillance médicale particulière (Fonction publique). Il est de la responsabilité de

l'employeur de s'assurer que les travailleurs bénéficient des examens prévus en santé au travail.

Le suivi individuel renforcé comprend un examen médical d'aptitude, effectué par le médecin du travail préalablement à l'affectation sur le poste. Cet examen d'aptitude a notamment pour objet de s'assurer de la compatibilité du poste avec l'état de santé du travailleur avant qu'il n'y soit affecté, afin de prévenir tout risque grave d'atteinte à sa santé ou à sa sécurité, à celles de ses collègues ou des tiers évoluant dans l'environnement immédiat de travail.

Les travailleurs classés en catégorie A bénéficient d'un suivi de leur état de santé au moins une fois par an par le médecin du travail, lequel délivre un avis d'aptitude à l'issue de chaque visite. Pour les travailleurs classés en catégorie B, la périodicité des examens d'aptitude est déterminée par le médecin du travail et ne peut être supérieure à quatre ans. Une visite intermédiaire est effectuée par un professionnel de santé au plus tard deux ans après la visite avec le médecin du travail et donne lieu à la délivrance d'une attestation de suivi.

7.2. Orientation du suivi médical

Le suivi médical s'appuie notamment sur les données de l'évaluation individuelle d'exposition. Il comprend un examen clinique et des examens complémentaires dont la nature et la fréquence sont déterminées par le médecin du travail. Il intègre la surveillance des autres risques identifiés (§ 9).

■ Examen clinique :

Dépistage des diverses pathologies susceptibles d'être déclenchées ou aggravées, entre autres, par l'exposition aux rayonnements ionisants (examen ophtalmologique, cutané...) ou de pathologies augmen-

tant le risque d'exposition interne (cutanées, ORL...).

■ Surveillance dosimétrique individuelle :

Les examens de surveillance dosimétrique interne seront prescrits en fonction des radionucléides possiblement produits et de l'évaluation du risque de contamination.

■ Examens complémentaires :

Une NFS (numération formule sanguine) à l'embauche est préconisée comme examen de référence, puis sa fréquence sera adaptée au suivi individuel, en fonction de l'évaluation des risques au poste.

7.3. Organisation du suivi individuel renforcé pour les travailleurs des entreprises extérieures

■ Cadre général :

→ le médecin du travail de l'entreprise utilisatrice assure, pour le compte de l'entreprise extérieure, la réalisation des examens complémentaires rendus nécessaires par la nature et la durée des travaux effectués par les salariés de l'entreprise extérieure dans l'entreprise utilisatrice ;

→ les résultats sont communiqués au médecin du travail de l'entreprise extérieure qui déterminera l'aptitude au poste ;

→ le chef de l'entreprise utilisatrice doit faciliter l'accès du poste de travail au médecin du travail de l'entreprise extérieure.

■ Entreprise extérieure intervenant dans une entreprise utilisatrice : accord possible entre les entreprises et les médecins du travail pour que les examens périodiques soient assurés par le médecin du travail de l'entreprise utilisatrice.

7.4. Femme enceinte ou allaitante

De nombreuses substances utilisées en recherche peuvent être toxiques pour la reproduction. Aussi, il est nécessaire que le per-

sonnel féminin informe le médecin du travail le plus tôt possible de sa grossesse, pour permettre la mise en place des mesures préventives nécessaires.

L'aménagement du poste de travail ou le changement d'affectation est laissé à l'entière appréciation du médecin du travail après concertation avec l'intéressée, mais aucune femme enceinte ne peut être affectée ou maintenue à un poste impliquant un classement en catégorie A. L'exposition de l'enfant à naître doit être maintenue aussi faible que raisonnablement possible et, dans tous les cas, rester inférieure à 1 mSv entre la déclaration de la grossesse et l'accouchement.

Il est interdit d'affecter ou de maintenir une travailleuse allaitant à un poste comportant un risque de contamination interne.

7.5. Dossier médical en santé au travail et suivi post-professionnel

■ Le dossier médical en santé au travail comporte notamment :

→ les données de l'évaluation individuelle de l'exposition aux rayonnements ionisants ;

→ le relevé dosimétrique avec les doses efficaces et les doses équivalentes ;

→ les expositions ayant conduit à un dépassement des valeurs limites et les doses reçues ;

→ l'ensemble des résultats des examens cliniques et complémentaires effectués.

■ Il est conservé jusqu'au moment où le travailleur atteint l'âge de 75 ans et, en tout état de cause, pendant au moins 50 ans après la fin de la période d'exposition.

■ Ce dossier est communiqué au médecin inspecteur du travail sur sa demande et peut être adressé, avec l'accord du travailleur, au médecin choisi par celui-ci.

■ Si l'établissement vient à disparaître ou si le travailleur change

d'établissement, l'ensemble du dossier est transmis au médecin inspecteur du travail, à charge pour celui-ci de l'adresser, à la demande de l'intéressé, au médecin du travail désormais compétent.

- Le travailleur a accès, à sa demande, aux informations contenues dans son dossier médical¹⁸.
- L'attestation d'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants est établie par l'employeur et le médecin du travail, conformément à l'arrêté du 28 février 1995 modifié¹⁹.

8 INCIDENTS ET DYSFONCTIONNEMENTS

8.1. Principes généraux

Prendre immédiatement les dispositions pour arrêter l'exposition des personnes impliquées et, si nécessaire, assurer en priorité leur prise en charge médico-chirurgicale. Suivre les procédures d'urgence, qui doivent avoir été établies au préalable. Les numéros d'urgence (ASN...) doivent figurer sur un document accessible au niveau de l'installation.

Le conseiller en radioprotection, le responsable de l'activité nucléaire et/ou l'employeur et le médecin du travail doivent être prévenus **sans délais**. Si nécessaire, contacter le **dispositif d'alerte de l'IRSN : 06 07 31 56 63 pour une assistance (reconstitution de la dose, prise en charge...)**.

Le médecin du travail ou le conseiller en radioprotection peuvent demander la lecture d'un dosimètre en urgence auprès de l'organisme qui a délivré ce dosimètre.

8.2. Volet administratif

- Prévenir les différents responsables concernés : l'employeur et/ou le responsable de l'activité nu-

cléaire, le conseiller en radioprotection, le salarié compétent pour la prévention des risques professionnels, l'assistant (ou conseiller) de prévention le cas échéant, ainsi que le médecin du travail.

- En cas d'événement significatif en radioprotection : prévenir l'ASN et déclarer l'ESR²⁰. Une copie est à adresser à l'IRSN.
- En cas de dépassement de l'une des valeurs limites réglementaires : prévenir l'agent de contrôle de l'inspection du travail ou équivalent, l'IRSN, l'ASN, et le Comité social et économique le cas échéant.
- Respecter les procédures de déclaration des accidents du travail :
 - Secteur privé : déclaration à la CPAM ou inscription, pour les incidents mineurs, sur le registre des accidents bénins ;
 - Secteur public : déclaration à l'administration (en général via les ressources humaines).
- Quelles que soient la nature et la gravité de l'incident²¹, il est obligatoire d'en analyser les causes en vue de faire progresser la radioprotection sur le site et de partager le retour d'expérience.

9 RISQUES ASSOCIÉS

- Risque radiologique lié à la manipulation de sources scellées (étalonnage), non scellées et d'échantillons radioactifs, exposition au radon.
- Risque électrique.
- Agents physiques : champs électromagnétiques, bruit, rayonnements optiques artificiels... Appareils sous pression (tests cuve DREAL).
- Risque d'incendie et d'explosion.
- Risque chimique : exposition à l'ozone, oxyde d'azote, hélium, SF₆, utilisation de solvants, cytostatiques, substances cancérigènes, mutagènes ou toxiques pour la reproduction (CMR), nanoparticules...

Oxydation et corrosion de composants.

- Risque biologique : piquûre, coupure, morsure, griffure et/ou projection (sang, urines, cellules tumorales d'origine humaine greffées chez l'animal...), aérosols produits à l'occasion du nettoyage des cages...
- Risque allergique : latex, protéines animales, détergents, désinfectants...
- Produits cryogéniques.
- Gestes répétitifs, manutention et postures contraignantes, chutes, écrasement...
- Travail isolé.
- ...

10 ÉVALUATION DE LA MAÎTRISE DES RISQUES

Afin d'optimiser la radioprotection des travailleurs et de l'installation, l'employeur établit l'ensemble des bilans nécessaires à l'évaluation de la maîtrise des risques. Les bilans font notamment état des dépassements des valeurs limites et des moyens mis en œuvre pour y remédier et les prévenir.

Le conseiller en radioprotection informe l'employeur en cas de risque de dépassement d'une contrainte de dose ou de l'évaluation individuelle d'exposition.

La consultation régulière de SISERI et des résultats de dosimétrie opérationnelle à des fins d'optimisation et d'information par le médecin du travail et par le conseiller en radioprotection, ainsi que la consultation des relevés annuels des doses individuelles, permettent d'apprécier l'évolution de l'exposition des travailleurs.

L'employeur communique au Comité social et économique, le cas échéant :

- le résultat de l'évaluation des risques et des mesurages ;

18. Article L. 1111-7 du Code de la Santé publique.

19. Pris en application de l'article D. 461-25 du Code de la Sécurité sociale fixant le modèle type d'attestation d'exposition et les modalités d'examen dans le cadre du suivi post-professionnel des salariés ayant été exposés à des agents ou procédés cancérogènes.

20. Site ASN : www.asn.fr, *cheminement : Professionnels/Les guides de déclaration des événements significatifs*.

21. Article L. 1333-13 du Code de la Santé publique.

- le bilan statistique des expositions ;
- le bilan des dysfonctionnements relevés ;
- le bilan des vérifications initiales et périodiques des équipements de travail et d'ambiance.

Les résultats des différentes vérifications sont intégrés dans le document unique d'évaluation des risques professionnels.

Composition du comité scientifique

Autorité de sûreté nucléaire (ASN)

- C. Andraud
- J. Fradin
- I. Koch

Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN)

- A. Cordelle

Ministère du Travail, Direction générale du travail (DGT)

- P. Guichane-Ramelet

Institut national de recherche et de sécurité (INRS)

- A. Bourdieu

Experts

- E. Chandon, ministère de la Culture
- P. Prot, INSERM
- M.L. Gaab, INSERM/GIP CYCERON
- J.M. Horodynski, CNRS/INP/IRSD
- Q. Lemasson, ministère de la Culture
- C. Thieffry, CNRS/IN2P3



Annexe 1

Éléments pour l'évaluation du risque d'activation

Définition de l'activation

L'activation est un processus par lequel des noyaux atomiques sont rendus radioactifs sous l'action d'un rayonnement (gamma, etc.), d'un flux de neutrons ou d'autres particules. Les rayonnements émis par les radionucléides créés sont persistants (selon leurs périodes radioactives) après l'interruption du champ accélérateur.

Dans le cas des accélérateurs, l'activation peut être provoquée par une exposition aux faisceaux primaires ou aux rayonnements ou particules générés lors de l'interaction entre les faisceaux primaires et les matériaux environnants. Les opérateurs sont susceptibles d'être exposés à ces rayonnements persistants lors d'un accès à la casemate après l'arrêt du champ accélérateur. Cette exposition peut également avoir une composante interne en cas d'activation de l'air et des poussières.

Éléments d'évaluation de l'activation

L'évaluation de l'activation est une étape indispensable pour la radioprotection des travailleurs, pour la gestion des déchets et effluents, et pour l'anticipation de la phase de démantèlement.

Types de particules accélérées et mécanismes

→ Électrons

L'interaction des électrons et des matériaux génère des cascades électromagnétiques (figure a1) en fonction des énergies, de l'épaisseur et de la nature des matériaux. Les photons secondaires, générés par rayonnement de freinage, interagissent alors avec les matériaux par réaction photonucléaire et peuvent ainsi générer des neutrons, des électrons, et créer des radionucléides. Les neutrons vont à leur tour interagir avec les noyaux. L'activation est principalement en lien avec ces réactions photonucléaires et neutro-niques.

Les seuils des réactions photonucléaires sont de l'ordre de 10 mégaelectronvolt (MeV) pour la plupart des matériaux. L'activation sera donc en général négligeable pour des électrons d'une énergie inférieure à 10 MeV, toutefois seule une analyse au cas par cas permettra de l'affirmer. Il conviendra d'être vigilant en présence de certains éléments légers tels que le béryllium, dont le seuil est de 1,67 MeV.

→ Ions

Les ions (protons, deutons, ions lourds) peuvent provoquer directement des réactions nucléaires susceptibles de créer des radionucléides. Ces réactions peuvent engendrer un flux de neutrons secondaires important, qui pourra lui aussi entraîner une

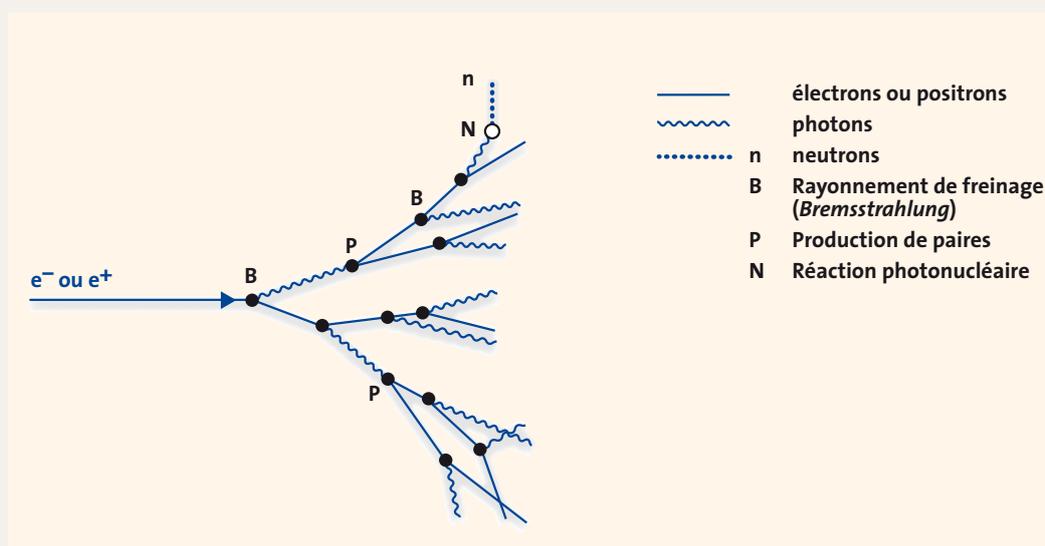


Figure a1 : Cascade électromagnétique

activation des matériaux environnants. Le recours à des modèles physiques est nécessaire pour évaluer les sections efficaces de ces réactions.

Comme dans le cas des réactions photonucléaires, ces réactions présentent des seuils, mais réputés plus faibles. Il convient en particulier d'être vigilant lors de l'utilisation de deutons, en raison de l'importance des flux neutroniques générés lors de leur interaction avec des éléments légers (béryllium, carbone...), même à des énergies inférieures à 1 MeV.

Conditions de fonctionnement

Les éléments suivants sont à considérer pour l'évaluation de l'activation :

- la durée d'irradiation et son fractionnement éventuel ;
- la nature du faisceau, son caractère continu ou pulsé, son énergie et son intensité ;
- la dynamique faisceau (propagation du faisceau et interactions avec les éléments de ligne) ;
- la finalité de l'installation (tir sur cible, production de lumière...) ;
- la nature de la cible et/ou de l'objet irradié.

Conception de l'installation

Les éléments suivants sont à considérer pour l'évaluation de l'activation :

- l'installation dans un bâtiment préexistant ou conçu en fonction de l'équipement ;
- la géométrie des bâtiments et les matériaux de construction ;
- le positionnement de l'accélérateur dans le local ;
- la destination des locaux annexes (bureaux, circulations...) ;
- les accès à l'installation, à l'équipement ;
- les réseaux de fluides (ventilation, circuits de refroidissement) ;
- les ouvertures en général (techniques, passages de câbles, lignes expérimentales) ;
- les matériaux constituant les divers éléments présents dans la casemate, notamment le cuivre, l'acier, l'aluminium (matériaux constitutifs de l'accélérateur, supports de cibles, balises...). La présence de matériaux novateurs (terres rares, niobium, composants électroniques...) doit être recherchée, notamment dans les aimants permanents.

Principe de gestion du risque

Le recours à des calculs analytiques est possible pour des cas simples (par exemple, un faisceau monoénergétique sur une cible de composition connue). Dans tous les autres cas, l'utilisation d'un code de transport et d'interaction de type Monte Carlo associé à un code d'évolution/activation est indispensable. Le choix du code de calcul doit se baser sur le type de particules, les gammes d'énergies mises en œuvre et sur le retour d'expérience issu des résultats de mesure sur des installations similaires existantes. Les données nucléaires du code doivent par ailleurs être en adéquation avec les conditions de l'expérimentation.

Détermination des termes sources

Elle se base sur les données d'entrée énumérées aux paragraphes précédents. La collaboration avec les concepteurs de l'accélérateur et des lignes de faisceau est primordiale.

Les points de perte prépondérants doivent être identifiés pour déterminer les éléments activés (arrêts faisceau, éléments d'insertion, éléments de déviation, optiques de faisceau, cibles...).

Modélisation

→ Modélisation géométrique (figures a2 et a3)

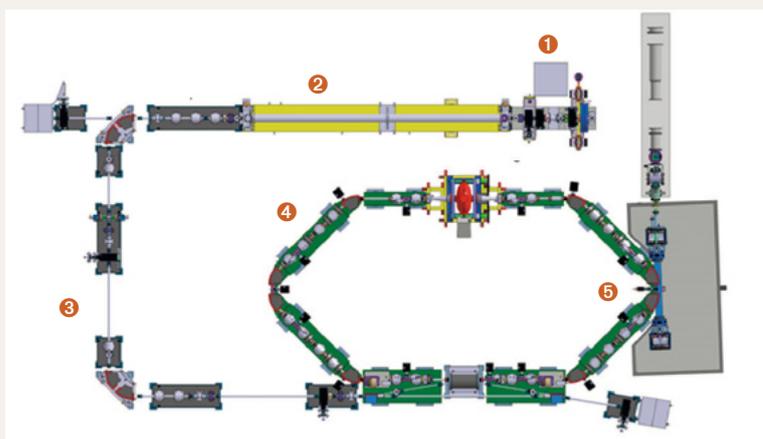
Son choix est dicté par le niveau de précision souhaité, notamment à des fins de radioprotection, et en fonction du niveau de risque. Les éléments constitutifs tels que chambres à vide, optiques... sont pris en compte, mais peuvent être représentés par des formes géométriques simples.

→ Modélisation physique

Les réglages des paramètres du code de calcul doivent permettre d'analyser l'ensemble des phénomènes d'activation en tenant compte du type de réactions nucléaires, des seuils d'énergie de propagation et d'interaction des particules. Pour évaluer l'activation de l'air, il faut mettre en œuvre une méthodologie particulière qui prend en compte la faible probabilité d'interactions avec les noyaux et les caractéristiques d'une ventilation le cas échéant.

L'analyse peut reposer sur la composition connue des matériaux présents, ou sur des compositions

Figure a2 : **Étape 1**, vue des éléments-machines constitutifs de l'accélérateur d'électrons ThomX (70 MeV - 1 nC - 50 Hz)



Légende : un canon à photocathode ① produit des électrons par interaction entre un laser et une cathode. Les particules sont groupées en paquet et sont ensuite accélérées au niveau d'une section accélératrice linéaire (LINAC) ② jusqu'à l'énergie maximale. Elles sont ensuite dirigées à travers une ligne de transfert ③ vers l'anneau de stockage ④ et vont interagir à chaque tour sur un laser de haute puissance au niveau du point d'interaction ⑤ pour produire des rayons X. Au bout de 20 ms, les électrons sont éjectés de l'anneau et dirigés vers un piège à faisceau et un nouveau paquet est alors injecté à l'intérieur de l'anneau [1].

standardisées, offrant un niveau de précision variable. Il convient de noter que certaines impuretés peuvent entraîner des phénomènes d'activation ayant un impact important (cobalt dans les aciers, europium dans les bétons...).

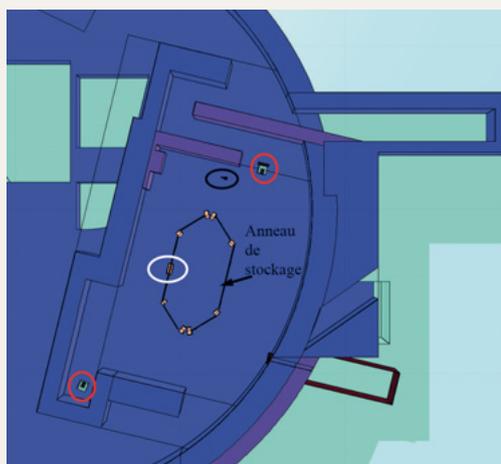
Exploitation des résultats

L'application d'un processus itératif pour évaluer l'activation au moment de la conception ou de la modification d'une installation permet d'optimiser la radioprotection (choix des matériaux, ajout de protections radiologiques, ajustement des paramètres du faisceau...) et la production des déchets et effluents.

→ En radioprotection

La connaissance des débits d'équivalent de dose à l'arrêt du champ accélérateur permet la gestion des accès

Figure a3 : **Modélisation de la casemate béton abritant l'accélérateur Thom X** utilisée pour les études par simulation numérique (visualisation par l'interface FLAIR [2] pour le code de calcul FLUKA [3, 4])



Légende : Certains éléments-machines n'ont pas été représentés (par exemple, l'accélérateur linéaire) car leur impact sur la radioprotection ou l'activation (pas ou très peu de pertes de faisceau) est négligeable. Les éléments-machines critiques représentés correspondent à des points de pertes de faisceau prépondérants : pièges à faisceau (**cercles rouges**), optique mécanique (**cercle noir**), section droite de l'anneau, éléments magnétiques pour l'injection/extraction du faisceau d'électrons entre la ligne de transfert et l'anneau de stockage (**cercle blanc**) [5].

aux casemates en fonction des objectifs de radioprotection déterminés au préalable (en application des principes généraux de prévention des risques), par la délimitation de zones et la définition d'une durée de temporisation le cas échéant.

Ces débits d'équivalents de dose devront être pris en compte pour l'évaluation individuelle suivant les caractéristiques de l'exposition (durée, distance...) (voir § 5.3.1 de la fiche).

→ Pour la gestion des déchets et effluents (voir § 6.2.1.3 de la fiche)

En amont de l'utilisation, les résultats du code de calcul permettent d'établir le plan de gestion des éléments actifs en fonction des activités et périodes radioactives. Il est alors possible d'estimer la quantité des déchets qui seront produits en exploitation, et donc de prévoir le dimensionnement des locaux d'entreposage. Les

résultats du code de calcul permettront également de quantifier les déchets qui seront produits lors de la phase de démantèlement.

Validation des résultats

La réalisation de mesurages permettra dans un deuxième temps de valider et d'affiner les évaluations réalisées par calcul (caractérisation radiologique, mesure des débits d'équivalents de doses, dosimètres d'ambiance, retour d'expérience des diagnostics faisceau, mesure de doses intégrées lors du fonctionnement de l'accélérateur...).

Des exemples d'évaluation du risque d'activation sont présentés en **annexe 2**.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 | VARIOLA A, HAISSINSKI J, LOULERGUE A, ZOMER F (Éds) - ThomX Technical design report. Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (LAL). Gif-sur-Yvette : Soleil Synchrotron ; 2014 : 164 p.
- 2 | VLACHOUDIS V - FLAIR: a powerful but user friendly graphical interface for FLUKA. International Conference on Mathematics, Computational Methods and Reactor Physics. (M&C 2009). Saratoga Springs, New York, May 3-7, 2009, American Nuclear Society, LaGrange Park. CERN, 2009 (http://flair.web.cern.ch/flair/doc/Flair_MC2009.pdf).
- 3 | BÖHLEN TT, CERUTTI F, CHIN MPW, FASSÒ A ET AL. - The FLUKA Code: Developments and Challenges for High Energy and Medical Applications. *Nucl Data Sheets*. 2014 ; 120 : 211-14.
- 4 | FERRARI A, SALA PR, FASSÒ A, RANFT J - FLUKA: a Multi-Particle Transport Code. (Program version 2005). Geneva : Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire (CERN) ; 2005 : 405 p.
- 5 | HORODYNSKI JM, WURTH S - Shielding design and radioprotection for Andromède and ThomX accelerators. *EPJ Web Conf*. 2017 ; 153 : 10 p.

Annexe 2

Activation des matériaux et radioprotection Études de cas

L'exploitation des accélérateurs de particules peut engendrer, en fonction des faisceaux mis en œuvre et des matériaux utilisés, une activation des matériaux. Cette production de radionucléides aura pour conséquence de potentiellement entraîner l'exposition aux rayonnements ionisants des travailleurs à proximité de l'accélérateur de particules, même après arrêt de l'exploitation.

Une étude de cas simple est présentée afin de sensibiliser sur l'impact de l'activation des matériaux dans le domaine de la radioprotection des travailleurs. Un faisceau de particules (électrons et protons) d'énergie totale de 18 mégaelectronvolt (MeV) est dirigé sur des cibles constituées de différents matériaux. Un code de calcul de transport et d'interaction des particules de type Monte-Carlo est mis en œuvre pour obtenir une évaluation de l'activation des matériaux et de l'émission des particules après irradiation par les radionucléides produits dans la cible. Un cas particulier concernant le béryllium (Be) irradié par un faisceau d'électrons sera également présenté.

Modèle utilisé

Une sphère de 30 cm de rayon, remplie d'air, contient deux cylindres. Le premier correspond à la cible, dont la base est située au centre de la sphère, de rayon de 5 cm et d'épaisseurs différentes (5 mm, 1 cm et 5 cm). Un deuxième cylindre de 2 cm de rayon et de 10 cm de hauteur est placé à 5 cm du centre de la sphère (**figure b1**). Il permet de modéliser la présence d'un tuyau d'eau situé dans l'axe de la cible, sans prendre en compte le contenant. Le faisceau primaire est situé à 1 mm de la face de la cible, à hauteur du centre de la base et a une forme carrée de 1 mm de côté. La cible est irradiée par un faisceau de 1.10^6 particules par seconde pendant 180 jours. Un faisceau de protons puis d'électrons sera dirigé vers la cible afin de visualiser les différences de comportement des matériaux en fonction des particules mises en jeu dans les interactions.

Le code de calcul FLUKA [1, 2] est utilisé dans cette étude. Il est à noter que de nombreux autres codes de calcul existent (MCNP6 [3], PHITS [4], MARS-15 [5, 6], FISPACT-II [7, 8], TRIPOLI-4 [9], GEANT4 [10 à 12]) et présentent des spécificités dans plusieurs domaines tels que : le type de particules intégrées, les domaines d'énergie, les modèles physiques, l'interface graphique, la disponibilité du code... Une analyse préalable doit être réali-

sée afin de choisir le ou les codes les plus compatibles avec l'installation et le type d'études réalisées.

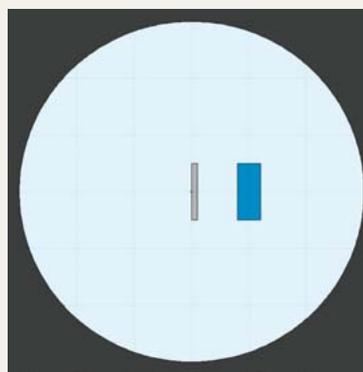
Résultat des simulations numériques

La suite de l'étude est seulement applicable à l'expérience présentée dans ce document. L'extrapolation des résultats obtenus sur d'autres types d'irradiation n'est pas conseillée car certains phénomènes n'ont pas été pris en compte (accumulation de l'activité des radionucléides par de multiples irradiations, créations de radionucléides pour des flux de particules plus importants...).

Les figures présentant les débits d'équivalent de dose ambiant ($H^*(10)$) ont une légende identique reportée en **figure b2** afin de pouvoir comparer les résultats. L'unité utilisée est le nanosievert par heure ($nSv.h^{-1}$) car les valeurs de débits d'équivalents de dose ambiants calculées sont faibles.

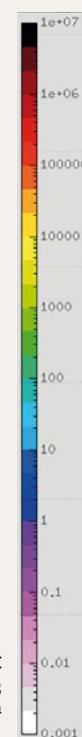
Suivant la valeur limite définie par la réglementation, un débit d'équivalent de dose ambiant supérieur à

Figure b1 : Vue en coupe et en deux dimensions du modèle simplifié utilisé



Le rectangle gris représente la cible. Le cylindre bleu représente un tuyau d'eau modélisé afin d'évaluer l'activation de l'eau à proximité de la cible ; mais les résultats ne sont pas exploitables dus aux faibles niveaux d'activation.

Figure b2 : Légende des figures représentant des débits d'équivalents de dose ambiants ($H^*(10)$). Unité : $nSv.h^{-1}$



500 nSv.h⁻¹ sur une durée d'occupation permanente des locaux de 170 heures par mois nécessite une délimitation du local au titre de la radioprotection (risque d'exposition externe). Une zone contrôlée jaune doit être mise en place pour un débit d'équivalent de dose ambiant supérieur à 2 000 000 nSv.h⁻¹.

Faisceau de protons

L'activation de la cible de cuivre (Cu) par le faisceau de protons entraîne bien un champ de rayonnements ionisants à l'arrêt de l'accélérateur (**figure b3**). L'intensité des rayonnements variera en fonction de la décroissance radioactive des radionucléides produits et de leur contribution à l'exposition externe (principalement par les émetteurs gamma).

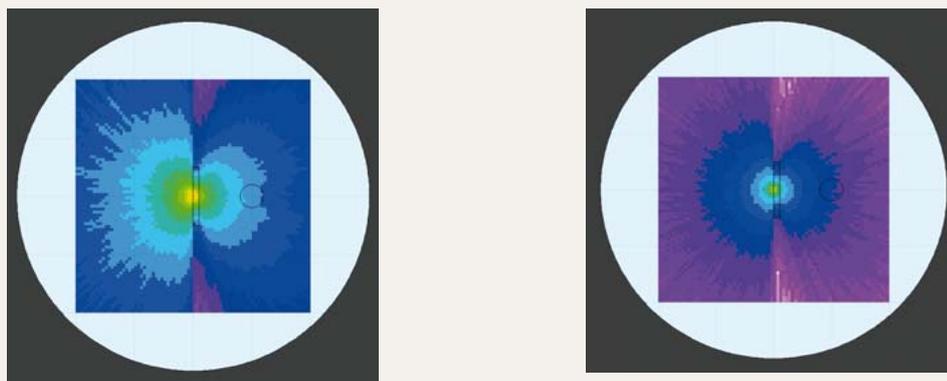
L'interaction entre les protons et la cible de cuivre produit principalement des radionucléides de périodes radioactives inférieures à 100 jours. Toutefois, le débit d'équivalent de dose ambiant engendré par l'activation a pour principale source le radionucléide ⁶⁵Zn (zinc) (période de 244 jours) au bout de deux heures. Par conséquent, dans le cas étudié, le débit d'équivalent de dose ambiant après irradiation n'est plus modifié de façon significative après une journée d'arrêt.

Dans le cas de la cible d'aluminium (Al), la diminution

du champ de rayonnements ionisants à l'arrêt de l'accélérateur est plus rapide que dans le cas du cuivre (**figure b4**). En effet, seul un radionucléide présente une période radioactive supérieure à 1 jour, le ²⁶Al. L'effet de la décroissance radioactive sur l'exposition externe est visible car le radionucléide produisant la plus importante partie du débit d'équivalent de dose ambiant à l'arrêt de l'irradiation, le ²⁸Al, a une période radioactive de 2,2 minutes.

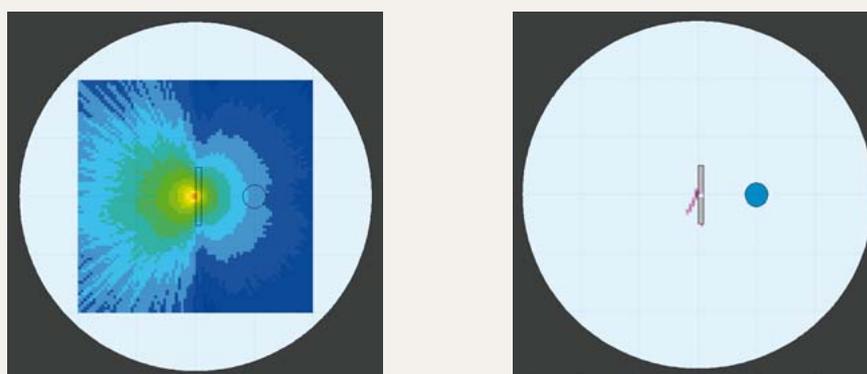
Les enjeux de radioprotection liés à l'activation des matériaux ont été illustrés par deux cas simples dans le cas d'un faisceau de protons. L'utilisation d'une cible d'aluminium permet de réduire les risques d'exposition en mettant en place une temporisation d'accès très courte (de l'ordre de deux minutes après la fin de l'irradiation). La mise en place d'un blindage radiologique autour de la cible de cuivre peut être envisagée, mais le choix des matériaux devra prendre en compte les risques d'activation du blindage afin de ne pas aggraver la problématique initiale. Dans un cas plus concret d'utilisation répétée et prolongée d'un accélérateur de particules, il sera nécessaire de prendre en compte l'effet d'accumulation des radionucléides de périodes longues qui pourront, sur de plus grandes périodes de fonctionnement, devenir un enjeu de radioprotection non négligeable.

Figure b3 : Débit d'équivalent de dose ambiant H*(10) autour de la cible de cuivre après irradiation par un faisceau de protons de 18 MeV (Intensité moyenne = 0,16 picoAmpère) pendant 180 jours



À gauche, juste après arrêt de l'irradiation. À droite, 1 mois après arrêt de l'irradiation.
(légende en figure b2)

Figure b4 : Débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ autour de la cible d'aluminium après irradiation par un faisceau de protons de 18 MeV (Intensité moyenne = 0,16 picoAmpère) pendant 180 jours



À gauche, juste après arrêt de l'irradiation. À droite, 1 semaine après arrêt de l'irradiation. (légende en figure b2)

Faisceau d'électrons

→ Cas général

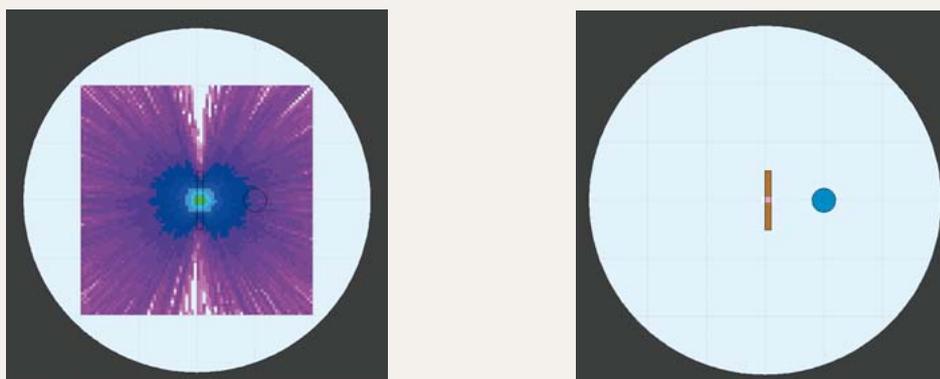
Pour une même énergie et une même intensité de faisceau, l'activation engendrée par un faisceau primaire d'électrons sera plus faible que par un faisceau de protons. En effet, les protons cèdent la totalité de l'énergie dans de très faibles épaisseurs de matière et interagissent avec les noyaux pour produire, entre autres, le flux de neutrons secondaires, responsable de l'activation. Les électrons, quant à eux, cèdent leur énergie par différentes réactions avec les noyaux ainsi que leur cortège électronique, au long de leur parcours dans la matière dont la portée est supérieure à celle des protons. Mais seuls les électrons qui possèdent une énergie supérieure à plusieurs MeV produiront, par rayonnement de freinage, les photons qui auront l'énergie suffisante pour interagir avec les noyaux et ainsi les activer, mais également pour engendrer de nouveaux neutrons.

Le débit d'équivalent de dose ambiant engendré après irradiation de la cible de cuivre par le faisceau d'électrons est beaucoup plus faible que pour une irradiation de mêmes caractéristiques par un faisceau de protons (figure b5 page suivante). En effet, les niveaux d'activités des radionucléides produits sont plus faibles d'un facteur 10 000. Certains radionucléides ne sont

pas produits, en particulier ceux issus du zinc, car les flux de protons engendrés par les réactions nucléaires sont négligeables dans cette configuration. Le radionucléide produisant le champ de rayonnements ionisants induisant le risque d'exposition externe à l'arrêt de l'irradiation est le ^{62}Cu , dont la décroissance rapide fait disparaître tout risque d'exposition au bout d'une heure de refroidissement de la cible. Dans le cadre de la gestion des déchets nucléaires, il est à noter que l'absence de rayonnements mesurables par des sondes utilisées en radioprotection ne peut justifier l'absence d'activation au sein de la matière et qu'il convient de réaliser des investigations plus poussées afin de pouvoir évaluer l'activité des radionucléides.

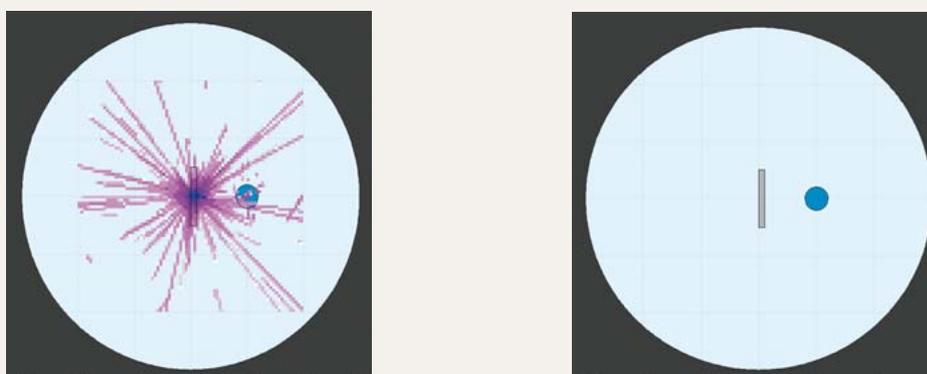
La production de radionucléides dans l'aluminium par le faisceau d'électrons est très faible, en effet ce matériau est reconnu pour sa très faible sensibilité à l'activation par des faisceaux d'électrons (figure b6 page suivante). Le débit d'équivalent de dose ambiant mesuré en fin d'irradiation est dû aux quelques radionucléides de très courtes périodes qui ont pu être produits mais qui disparaissent quasi instantanément. Dans le cas étudié, l'utilisation d'aluminium peut être une solution d'optimisation pour la radioprotection et la gestion des déchets radioactifs. Toutefois, l'utilisation de cuivre n'est pas proscrite mais demandera une évaluation des risques qui prend en compte les

Figure b5 : Débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ autour de la cible de cuivre après irradiation par un faisceau d'électrons de 18 MeV (Intensité moyenne = 0,16 picoAmpère) pendant 180 jours



À gauche, juste après arrêt de l'irradiation. À droite, 1 semaine après arrêt de l'irradiation.
(légende en figure b2)

Figure b6 : Débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ autour de la cible en aluminium après irradiation par un faisceau d'électrons de 18 MeV (Intensité moyenne = 0,16 picoAmpère) pendant 180 jours.



À gauche, juste après arrêt de l'irradiation. À droite, 1 heure après arrêt de l'irradiation.
(légende en figure b2)

spécificités du faisceau primaire, en particulier en cas de modification de son intensité ou du nombre d'irradiations réalisées (phénomène d'accumulation des radionucléides à vie longue).

→ Cas particulier – béryllium et faisceau d'électrons

Les électrons interagissant avec la matière vont produire de nombreux photons par rayonnement de freinage. Ces photons, d'énergie variant jusqu'à l'énergie initiale des électrons, interagissent également avec les noyaux en produisant des neutrons, qui majoritairement seront responsables de l'activation des matériaux. Par conséquent, les réactions photonucléaires sont la source indirecte d'activation des noyaux. Ces réactions se déroulent au-delà d'une énergie minimale de l'ordre de 8 MeV pour une grande majorité des noyaux. Toutefois, cette énergie seuil est plus faible pour certains matériaux légers, tels que le béryllium. Par conséquent, il est nécessaire de s'intéresser aux matériaux constitutifs mis en œuvre au sein d'un accélérateur de particules afin de ne pas oublier leur prise en compte. En particulier, le béryllium peut être utilisé comme fenêtre isolante entre des chambres de transports des particules, placées sous vide d'air, et l'extérieur (pression atmosphérique), car ses propriétés physiques (résistance mécanique et transparence aux rayonnements X) sont utiles dans certaines applications.

Une simulation numérique a été réalisée à l'aide du code de calcul Monte-Carlo FLUKA, sur le même modèle que dans les paragraphes précédents : une cible de béryllium pur de 1 cm d'épaisseur est irradiée par un faisceau d'électrons de 5 MeV. Toutefois, le nombre de particules par seconde a été modifié de manière à augmenter les probabilités d'interaction des noyaux. Pour cette énergie d'électrons, il est à noter qu'aucune activation n'avait été produite dans les cibles de cuivre et d'aluminium. Bien qu'aucun débit d'équivalent de dose ambiant ne soit mesurable après irradiation, la présence de ^{10}Be dans les produits d'activation après irradiation est avérée, avec une activité massique très faible (de l'ordre de $3,5 \cdot 10^{-23} \text{ Bq} \cdot \text{cm}^{-3} \pm 2,4 \cdot 10^{-23} \text{ Bq} \cdot \text{cm}^{-3}$).

Par conséquent, les responsables d'études d'activation devront être vigilants concernant la mise en œuvre de matériaux légers tels que le béryllium ou le deutérium ou de matériaux à numéro atomique Z élevé (tungstène, holmium...) qui présentent des énergies seuils de productions de neutrons inférieures à 10 MeV.

Conclusion

L'évaluation de l'activation est une étape obligatoire dans la démarche d'optimisation de la radioprotection et de la production des déchets radioactifs. Cette évaluation passera le plus souvent par l'utilisation de codes de calculs Monte-Carlo. Leur mise en œuvre nécessite des ressources importantes (personnels expérimentés, temps de calcul, ressources de calculs...), mais les gains sur le long terme (réduction de l'exposition aux rayonnements ionisants des personnels, facilité de maintenance, prise en charge des déchets radioactifs) méritent son intégration dans les processus de conception et d'exploitation des accélérateurs de particules.

REMERCIEMENTS :

Le groupe de travail remercie chaleureusement M. Jean-Michel Horodyski pour la réalisation de ces études et la communication de leurs résultats.

*Bibliographie
page suivante*

BIBLIOGRAPHIE

- 1 | BÖHLEN TT, CERUTTI F, CHIN MPW, FASSÒ A ET AL. - The FLUKA Code: Developments and Challenges for High Energy and Medical Applications. *Nucl Data Sheets*. 2014 ; 120 : 211-14.
- 2 | FERRARI A, SALA PR, FASSO A, RANFT J - FLUKA: a multi-particle transport code. CERN Editor : Geneva ; 2005 : 387 p.
- 3 | WERNER CJ (Ed) - MCNP® User's Manual. Code Version 6.2. October 27, 2017. Manual Rev. 0. Los Alamos National Security, 2018 (https://laws.lanl.gov/vhosts/mcnp.lanl.gov/pdf_files/la-ur-17-29981.pdf).
- 4 | SATO T, NIITA K, MATSUDA N, HASHIMOTO S ET AL. - Particle and Heavy Ion Transport code System, PHITS, version 2.52. *J Nucl Sci Technol*. 2013 ; 50 (9) : 913-23.
- 5 | MOKHOV N, AARNIO P, EIDELMAN Y, GUDIMA K ET AL. - MARS15 Code Developments Driven by the Intensity Frontier Needs. *Prog Nucl Sci Tech*. 2014 ; 4 : 496-501.
- 6 | MOKHOV NV, JAMES CC - The MARS Code System User's Guide Version 15 (2016). Mars Code System, 2017 (https://mars.fnal.gov/intro_manual.htm).
- 7 | FLEMING M, STAINER T, GILBERT M (Eds) - The FISPACT-II User Manual. UKAEA-R(18)001. UK Atomic Energy Authority, 2018 (https://fispact.ukaea.uk/_documentation/UKAEA-R18001.pdf).
- 8 | SUBLET JC, EASTWOOD JW, MORGAN JG, GILBERT MR ET AL. - FISPACT-II: An Advanced Simulation System for Activation, Transmutation and Material Modelling. *Nucl Data Sheets*. 2017 ; 139 : 77-137.
- 9 | BRUN E, DAMIAN F, DIOP CM, DUMONTEIL E ET AL. - TRIPOLI-4®, CEA, EDF and AREVA reference Monte Carlo code. *Ann Nucl Energy*. 2015 ; 82 : 151-60.
- 10 | AGOSTINELLI S, ALLISON J, AMAKO K, APOSTOLAKIS J ET AL. - Geant4—a simulation toolkit. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*. 2003 ; 506 (3) : 250-303.
- 11 | ALLISON J, AMAKO K, APOSTOLAKIS J, ARAUJO H ET AL. - Geant4 Developments And Applications. *IEEE Trans Nucl Sci*. 2006. 53 (1) : 270-78.
- 12 | ALLISON J, AMAKO K, APOSTOLAKIS J, ARCE P ET AL. - Recent developments in Geant4. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*. 2016 ; 835 : 186-225.