

Radioprotection : secteur recherche

Accélérateurs de particules

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 acteurs de la radioprotection des travailleurs : salariés compétents pour la protection et la prévention des risques professionnels, assistants ou conseillers de prévention, conseillers en radioprotection (CRP), services de prévention et de santé au travail (SPST) et responsables (employeurs...). Elle s'adresse aussi aux utilisateurs de ces techniques (chercheurs, ingénieurs, techniciens...).

Chaque fiche présente le déroulement des procédures, les dangers spécifiques, l'évaluation des risques ainsi que les méthodes de prévention, sans avoir vocation à se substituer aux textes réglementaires ni aux documents émanant de la Direction générale du travail (DGT) ou de l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR). Cette fiche s'accompagne de trois annexes traitant des phénomènes d'activation (p. 16).

La mise à jour de l'ensemble de la collection est réalisée par un groupe de travail associant des professionnels de terrain, l'ASNR et l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS). La composition du groupe de travail est présentée page 15.

Cette fiche annule et remplace la fiche FR 12 portant le même titre et publiée en juin 2020.

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 mégaelectronvolt (MeV) (Code de la Santé publique, annexe 13-7).

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 ;

- 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) ;
- circulaire : trajectoires circulaires ou en spirales (cyclotron, synchrotron...) (figure 2) ;
- 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 finalités d'utilisation 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

L'ensemble des dispositions à mettre en œuvre par l'employeur ou son représentant s'applique aux agents et salariés, y compris temporaires, de l'établissement, aux salariés d'entreprises extérieures (EE), aux étudiants stagiaires, ainsi qu'à toute personne placée à quelque titre que ce soit sous l'autorité de l'employeur. Il s'applique également aux travail-

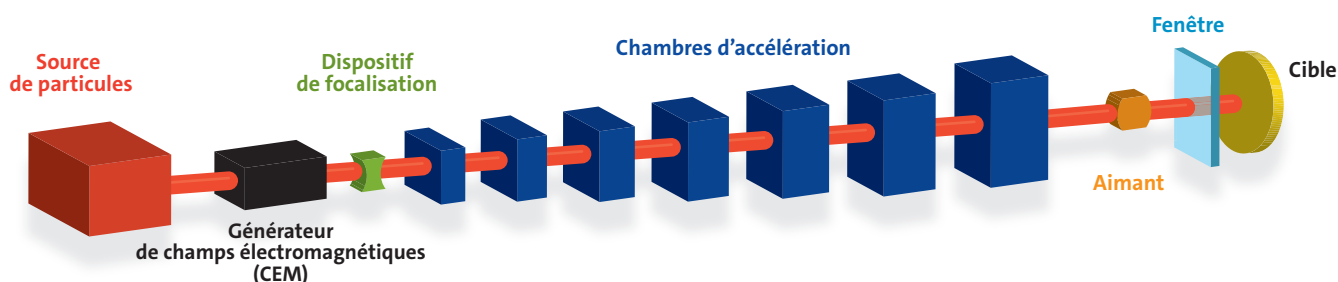
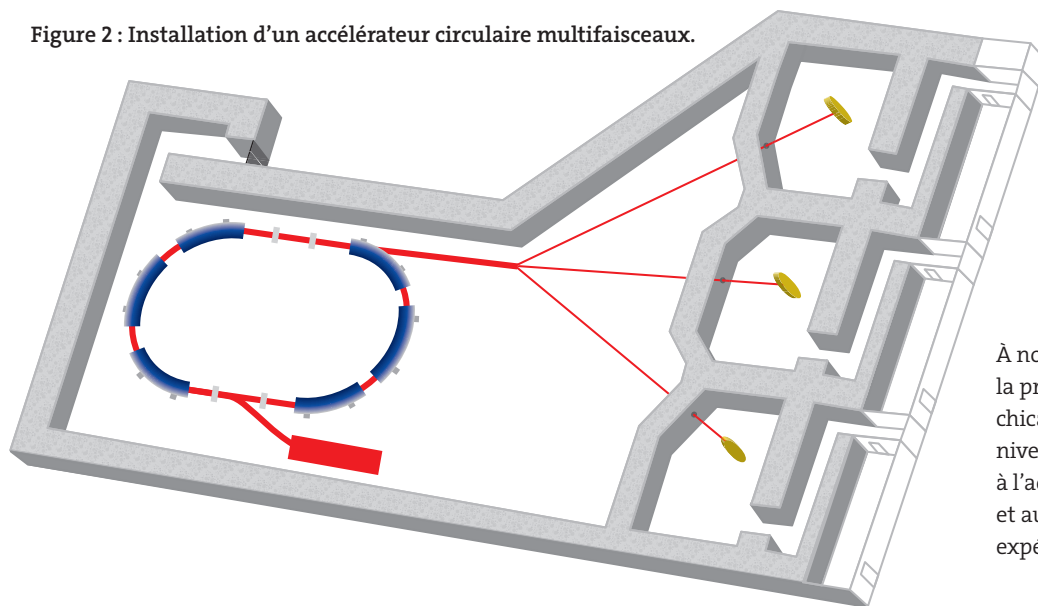


Figure 1 : Exemple de structure d'accélérateur linéaire.

Figure 2 : Installation d'un accélérateur circulaire multifaisceaux.



À noter : la présence de chicanes au niveau des accès à l'accélérateur et aux cabines expérimentales.

1. Relève du responsable de l'activité nucléaire.

2. Décret n° 2019-190 du 14 mars 2019 codifiant les dispositions applicables aux installations nucléaires de base, au transport de substances radioactives et à la transparence en matière nucléaire. Article L. 593-2 du Code de l'environnement.

3. Le Comité social et économique est consulté sur cette organisation.

4. Article R. 1333-158 du Code de la Santé publique et <https://sigis.fr/sigis-web-fo/irsn/login>.

leurs indépendants et aux employeurs.

Sont en particulier concernées par le risque radiologique :

- toute personne travaillant dans une installation utilisant des accélérateurs de particules : chercheur, technicien, ingénieur, doctorant, postdoctorant, étudiant stagiaire...

- toute autre personne amenée à intervenir sur des accélérateurs de particules ou dans les locaux où ceux-ci sont installés : acteur de la prévention, service technique, EE (société de maintenance, organisme assurant les vérifications réglementaires...)

Dans le cas d'intervention d'EE, une coordination doit être mise en place entre le responsable de l'entreprise utilisatrice (EU) et celui de l'EE. Les mesures à prendre pour prévenir les risques identifiés pouvant résulter de l'interférence entre les activités concernent les installations et les matériels. La coordination en est assurée par le responsable de l'EU. Ces mesures sont formalisées dans un plan de prévention écrit, quelle que soit la durée de cette intervention (art. R. 4512-6 à R. 4512-12 du Code du travail - CT).

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, soit dans les zones contrôlées orange et rouge (art. D. 4154-1 du CT).

3 DÉROULEMENT DES PROCÉDURES PRÉALABLES À L'UTILISATION D'UN ACCÉLÉRATEUR DE PARTICULES

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

- obtenir la documentation technique et de sécurité spécifique à l'appareil auprès du fournisseur ou des concepteurs ;

- s'assurer du respect des exigences associées au régime administratif¹ (autorisation, classement en installation nucléaire de base - INB²) ;

- identifier les finalités et les modalités d'utilisation de l'accélérateur ;
- s'assurer de l'adéquation entre la conception du lieu de travail et les caractéristiques de l'appareil (se référer à la norme NF M62-105).

L'employeur devra mettre en place l'organisation de la radioprotection prévue par le Code du travail³. Il devra désigner au moins un CRP (personne(s) compétente(s) en radioprotection - PCR - et/ou organisme compétent en radioprotection - OCR) bénéficiant du temps et des moyens nécessaires à ses (leurs) missions.

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

L'inventaire des appareils émetteurs de rayonnements ionisants est transmis à l'ASNR tous les ans pour les appareils soumis à autorisation⁴.

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

4 DANGERS ET IDENTIFICATION DU RISQUE RADIOLOGIQUE

4.1 Dangers

Les dangers consistent en l'émission de :

- particules chargées, de rayonnements gamma, de neutrons ;
- rayons X (rayonnement de freinage).

Le danger d'émission de rayonnements ionisants est présent lors du fonctionnement de l'accélérateur mais peut également l'être après son arrêt (activation de matériaux, de l'eau et de l'air).

4.2 Identification du risque radiologique

Les risques dépendent 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) conditionnant leur activation (voir l'annexe 1 p. 16).

Les risques en termes d'exposition

externe et interne sont repris dans le [tableau I](#).

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

Le CRP mène l'évaluation du risque sous la responsabilité de l'employeur (ou de son représentant responsable de l'application des règles de santé et de sécurité). La mise en service puis l'exploitation des installations sont subordonnées à la réalisation des vérifications réglementairement prévues (voir § 6.4 à 6.6).

Dans le cadre de l'évaluation des risques, l'employeur doit :

- analyser en amont les phases d'utilisation (mise en service, réglage, fonctionnement, maintenance) ;
- caractériser les incidents raisonnablement prévisibles ;
- identifier les zones délimitées ;
- réaliser les évaluations individuelles d'exposition.

5.1 Éléments d'évaluation du risque radiologique

La première approche de l'évalua-

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

■ 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.

L'évaluation sera complétée par l'analyse, notamment :

- des incidents raisonnablement prévisibles ;
- des différents systèmes de sécurité (asservissement, supervision...) et d'alarme (systèmes de surveillance – balises...);
- de l'estimation des expositions par démonstration théorique (si-

➤ **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 (poussières...), 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), de l'air. - Rayonnements issus de sources radioactives cibles. 	Incorporation de radionucléides créés par l'activation de cibles, d'aérosols, de particules en suspension (poussières...), de l'air.

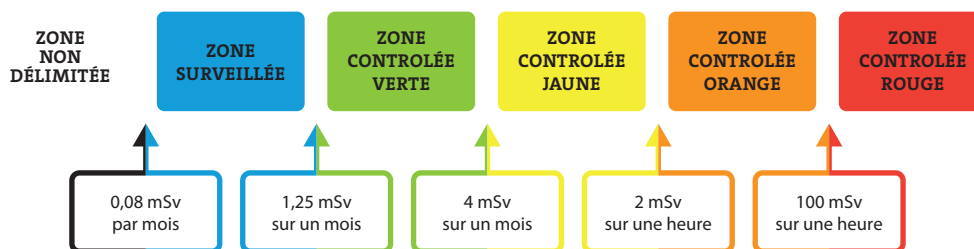


Figure 3 : Les différents types de zones délimitées en fonction de l'exposition de l'organisme entier, exprimée en dose efficace intégrée (d'après l'instruction N° DGT/ASN/2018/229 du 2 octobre 2018).

mulation, calcul...);

- des 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 (DUERP). Celui-ci, dans ses versions successives, est conservé par l'employeur pendant une durée minimale de 40 ans, et tenu à la disposition des travailleurs, des anciens travailleurs ainsi que de toute personne ou instance pouvant justifier d'un intérêt à y avoir accès (art. L. 4121-3-1 du CT). L'évaluation du risque et ses mises à jour peuvent être complétées en s'appuyant sur les résultats des mesurages obtenus lors des vérifications initiales effectuées par un organisme accrédité. Le médecin du travail ou l'équipe pluridisciplinaire du SPST sont informés des résultats de l'évaluation des risques et des mesurages.

5.2 Identification et signalisation des zones délimitées

La définition des zones est fixée par la réglementation et traduit la gradation du risque (figure 3).

L'identification et la délimitation de ces zones sont mises en œuvre par l'employeur ou son représentant, sur proposition du CRP, sur la base de l'évaluation préalable des risques radiologiques.

La démarche consiste à identifier les zones où les travailleurs sont susceptibles d'être exposés à des doses supérieures à :

- 0,08 millisievert/mois (mSv/mois) pour l'organisme entier ;
 - 4 mSv/mois pour les extrémités ou la peau. Une zone d'extrémités est définie lorsque la délimitation des zones pour l'organisme entier ne permet pas de garantir le respect des valeurs limites d'exposition réglementaires s'appliquant aux extrémités et à la peau (figure 4).
- La signalisation d'une source d'émission de rayonnements ionisants est obligatoire.

L'identification des zones se fait à partir des niveaux d'exposition potentiels, organisme entier et/ou extrémités et/ou peau :

- dans les situations représentatives des conditions normales d'utilisation les plus pénalisantes ;
 - en considérant le lieu de travail occupé de manière permanente (170 heures/mois) (instruction N° DGT/ASN/2018/229 du 2 octobre 2018) ;
 - en incluant les incidents raisonnablement prévisibles⁵ 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.

Les zones sont délimitées de façon continue, visible et permanente par une signalétique adaptée⁶. La présence, au niveau de chaque accès, d'un plan de l'installation sur lequel figurent les zones délimitées, peut répondre à cette exigence.

Lorsque les conditions d'utilisation le permettent, une zone surveillée ou contrôlée intermittente peut être définie. Un dispositif lumineux garantit la cohérence permanente entre le type de zone et sa signalisation (mise en place, sur les accès de la salle, d'un voyant lumineux signalant la mise sous tension de l'accélérateur et d'un voyant lumineux signalant une émission de rayonnements ionisants, et reports dans la salle, visibles en tout point). La délimitation des zones est consignée dans le DUERP.

5.3 Évaluation individuelle de l'exposition aux postes de travail et classement des travailleurs

5.3.1 Évaluation individuelle de l'exposition aux postes de travail

L'évaluation individuelle de l'exposition a pour objet de définir les mesures de prévention et de suivi individuel (suivi individuel de l'état de santé, surveillance dosimétrique individuelle - SDI -, for-

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

6. Annexe de l'arrêté du 15 mai 2006 modifié relatif aux conditions de délimitation et de signalisation des zones surveillées et contrôlées dites zones délimitées compte tenu de l'exposition aux rayonnements ionisants.

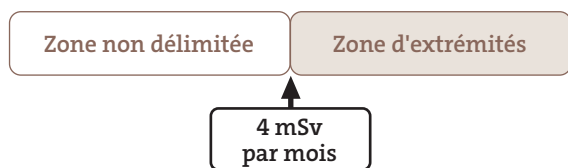


Figure 4 : Définition de la zone d'extrémités (en dose équivalente intégrée sur un mois pour les extrémités et la peau).

mation et information). Elle fonde le classement des travailleurs en référence aux niveaux de doses 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. Elle est communiquée au médecin du travail lorsque l'employeur propose un classement. L'évaluation individuelle de l'exposition :

- 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 (dans l'établissement et lors d'interventions ponctuelles dans d'autres établissements) ;
- intègre l'ensemble des tâches réalisées 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 ;
- vise à déterminer la dose effi-

cace, les doses équivalentes et les doses internes que le travailleur est susceptible de recevoir sur les 12 mois consécutifs à venir.

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 et/ou des mesures de dose intégrée sont réalisées à chaque poste de travail en zone délimitée pour évaluer l'exposition individuelle. Le cas échéant, les doses peuvent être évaluées par calcul. 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 protocoles, des conditions de travail ou de fonctionnement de l'installation nécessitera une actualisation de l'évaluation des risques et de l'exposition individuelle.

Dans le cadre du recours au travail temporaire, le responsable de l'EU doit indiquer les risques particuliers pour la santé et la sécurité inhérents au poste de travail dès la signature du contrat de mise à disposition. Il doit communiquer à

l'entreprise de travail temporaire les éléments permettant d'établir l'évaluation individuelle de l'exposition liée à la mission confiée avant la mise à disposition du travailleur.

5.3.2 Classement des travailleurs

Le classement s'applique à tout travailleur dont le résultat de l'évaluation individuelle d'exposition a montré un risque de dépassement de l'une des valeurs limites d'exposition fixées pour un travailleur non exposé au risque radiologique. Les valeurs limites d'exposition professionnelles (VLEP) et les niveaux de dose définissant les catégories de classement en A ou B sont définis respectivement aux articles R. 4451-6 et R. 4451-57 du CT. 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 CRP selon l'analyse de l'ensemble des expositions potentielles aux rayonnements ionisants de chaque travailleur. Un travailleur peut être classé en A ou en B du seul fait de sa dose aux extrémités.

➤ **TABLEAU II : VALEURS LIMITES D'EXPOSITION PROFESSIONNELLE (VLEP) ET NIVEAUX DE DOSE DÉFINISSANT 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 exposés (valeurs limites d'exposition)	≤ 1	≤ 50	≤ 15
VLEP ***	≤ 20	≤ 500	≤ 20
Travailleurs, catégorie B (niveaux de dose)	> 1 et ≤ 6	> 50 et ≤ 150	-
Travailleurs, catégorie A (niveaux de dose)	> 6	> 150	> 15

* : 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 B uniquement au titre de l'exposition du cristallin.

*** : des valeurs limites d'exposition s'appliquent spécifiquement aux jeunes travailleurs âgés de 16 à 18 ans. Pour les travailleuses enceintes, voir le § 7.5.

5.4 Choix de la surveillance dosimétrique individuelle

Une SDI adaptée aux caractéristiques des rayonnements ionisants est mise en place sur la base de l'évaluation individuelle de l'exposition si celle-ci conclut à la possibilité de dépassement des valeurs limites applicables aux travailleurs non exposés :

- **pour l'exposition externe corps entier** : dosimètre à lecture différée (passif), adapté, le cas échéant, aux neutrons ;
- **en cas d'exposition externe des extrémités et/ou du cristallin** : dosimètre bague pour les extrémités, dosimètre cristallin ;
- **pour l'exposition interne** : définie par le médecin du travail.

Les travailleurs non classés autorisés à intervenir en zone délimitée doivent bénéficier d'une surveillance radiologique.

6

STRATÉGIE DE MAÎTRISE DE RISQUE

6.1 Principes de prévention des risques

La maîtrise des risques au poste de travail repose sur l'application des principes généraux de prévention⁷ et sur les principes de radioprotection (justification, optimisation, limitation⁸), avec notamment :

- la suppression ou la limitation du risque ;
- la réduction du niveau d'exposition externe et interne (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, mise en décroissance des matériaux activés avant maintenance ou traitement, temporisation, durée, écran, distance, organisation du travail⁹, automatisation...);

- les vérifications réglementaires des accélérateurs, des lieux de travail, des appareils de mesure et des dispositifs de protection et de sécurité, de signalisation lumineuse et d'alarme. Leurs résultats font l'objet d'un enregistrement systématique. Toute anomalie doit être analysée, traitée et tracée ;

- la formation ou l'information de chaque travailleur sur les risques liés à la mise en œuvre des accélérateurs et sur les règles de radioprotection.

6.2 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 cette phase de conception qui anticipe également les contraintes du démantèlement de l'installation (facilité de démontage, connaissance des composants des matériaux...). Les règles de base de conception de locaux pour une utilisation donnée doivent être respectées, privilégiant les EPC.

Les prescriptions réglementaires relatives aux autres risques doivent également être prises en compte :

- risque électrique : armoires fermées à clé... ;
- risque de chute de plain-pied : aménagement des zones de passage et allées de circulation (encombrement, état des sols, éclairage...). Une attention particulière sera également portée sur l'encombrement des locaux (entreposage de matériel) ;
- risque mécanique : stabilité des équipements, périmètres de sécurité... ;
- risque incendie : circuits d'évacuation des personnes ;
- ...

La norme NF M62-105 décrit les éléments à prendre en compte

pour la conception des installations comportant un accélérateur de particules. La conception de la ventilation doit tenir compte du risque lié à la production d'ozone (Annexe D de la norme NF M62-105).

Le responsable de l'activité nucléaire consigne dans un rapport technique daté tous les éléments permettant de montrer le respect des exigences afférentes à la conception de l'installation.

6.2.1 Définition des protections radiologiques

Pour déterminer le dimensionnement et l'implantation des protections radiologiques, 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 par exemple).

Les données d'entrée sont à déterminer précisément le plus en amont 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 (équipements 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) ;

7. 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 <http://www.inrs.fr/demarche/principes-generaux/introduction.html>.

8. Article L. 1333-2 du Code de la Santé publique.

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

- les accès pour les travailleurs. Il est recommandé d'éviter les ouvertures en ligne de mire du faisceau ou d'un point de perte, et de privilégier la création d'angles (au moins deux angles de diffusion par chicane) (voir [figure 5](#));

- les ouvertures techniques. Il est recommandé d'éviter les ouvertures en ligne de mire du faisceau ou d'un point de perte, et de privilégier la création d'angles et/ou de placer les ouvertures à une hauteur différente de celle du plan du faisceau (voir [figures 6 et 7](#));

- 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), hétérogénéité du sous-sol (diffusion de rayonnements ionisants et zones de circulation ou ouvertures pour passage de réseaux), charge au sol, dimensionnement des toits, trémies, accès aux casemates, ouvertures dans le blindage (réservations).

6.2.2 Dispositifs de sécurité

Certaines conditions d'exploitation interdisent la présence de personne dans les locaux dès lors que l'émission de rayonnements ionisants ne peut pas être exclue. Dans ces 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 dispositifs ou systèmes, diversification);
- indépendance de fonctionnement.

Les accélérateurs autoblinchés 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 vise à informer sur l'état de fonctionnement de l'installation et à garantir la cohérence avec la délimitation des zones. 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.

6.2.3 Gestion des effluents et déchets¹⁰

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.

Le rejet d'effluents contaminés nécessite une demande d'autorisation à l'ASNR.

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...

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. Le choix de matériaux peu sensibles à l'activation est à privilégier (voir [annexe 2 p. 20](#)).

Quand il existe un risque impor-

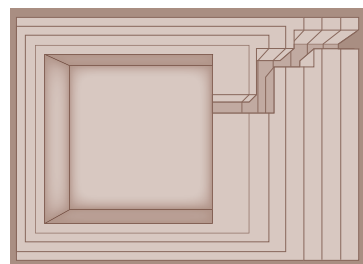
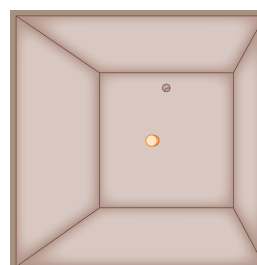
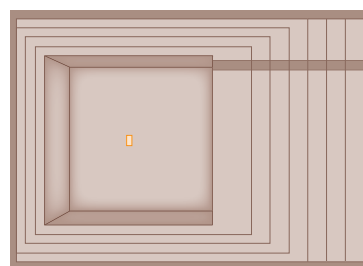


Figure 5 : Vue supérieure d'une modélisation d'accès pour un faisceau d'électrons de 100 MeV et une cible cylindrique en cuivre de 5 cm de diamètre et 5 cm d'épaisseur.



Figures 6 et 7 : Vue latérale en coupe et vue de face d'une ouverture technique placée à une hauteur supérieure à celle du plan du faisceau afin de réduire les risques de fuite de rayonnements ionisants vers l'extérieur de la casemate (modélisée pour un faisceau d'électrons de 100 MeV et une cible cylindrique en cuivre de 5 cm de diamètre et 5 cm d'épaisseur).

tant 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.

10. 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.

11. Si les paramètres de fonctionnement de l'accélérateur diffèrent de façon importante au cours de l'année, il est possible de mettre en place un protocole interne de vérification.

Le prélèvement d'échantillons des matériaux de construction (béton, ferrailage...) constitue une bonne pratique pour déterminer leur composition et avoir un « point zéro » radiologique, dans l'optique de faciliter la gestion des déchets activés. Ces échantillons peuvent être conservés en vue d'analyses ultérieures.

6.3 Contraintes de dose

L'employeur définit au préalable des contraintes de dose individuelles pour toute activité réalisée en zone contrôlée ou en zone d'extrémités. Ces contraintes constituent des seuils dosimétriques définis par l'employeur, elles permettent de piloter les mesures d'optimisation de la radioprotection. Elles sont définies en dose efficace :

- sur 12 mois pour une activité régulière en zone contrôlée ou en zone d'extrémités ;
 - sur la durée de l'intervention pour des travaux en zones contrôlées jaune, orange et rouge.
- Par la suite, les niveaux d'exposition et les contraintes de dose seront affinés par :
- les résultats des mesures effectuées lors des vérifications périodiques ;
 - les résultats de la SDI ;
 - les résultats de la dosimétrie opérationnelle le cas échéant ;
 - le REX d'utilisation ;
 - l'analyse des dysfonctionnements et événements significatifs de radioprotection (ESR).

En cas de dépassement d'une contrainte de dose, le CRP informe l'employeur. Il analyse les causes de dépassement, réévalue les moyens de prévention et la contrainte de dose le cas échéant.

6.4 Vérifications initiales

Les vérifications initiales sont effectuées par des organismes accrédités. Elles doivent être réalisées lors de la mise en service d'un

équipement, ou à l'issue de toute modification importante de l'équipement, des lieux, des méthodes ou des conditions de travail¹¹ susceptible d'affecter la santé et la sécurité des travailleurs.

La méthode et l'étendue des vérifications initiales sont définies à l'annexe I de l'arrêté du 23 octobre 2020 relatif aux mesurages réalisés dans le cadre de l'évaluation des risques et aux vérifications de l'efficacité des moyens de prévention mis en place dans le cadre de la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements ionisants.

Les résultats des vérifications initiales sont conservés dans le registre de sécurité jusqu'au remplacement de l'équipement ou à la cessation de l'activité nucléaire.

Une réception de l'installation doit être réalisée sur la base d'un examen de réception défini à l'article R. 1333-139 du Code de la Santé publique, visant à vérifier la conformité des locaux. Tant qu'elle n'a pas été prononcée, l'autorisation est limitée à la détention de l'équipement et à son utilisation dans le cadre des vérifications initiales. La réception de l'installation est formalisée par un document signé par le responsable de l'activité nucléaire. Elle inclut les vérifications prévues par les prescriptions générales ou particulières émises par l'ASNR.

6.4.1 Vérification initiale de l'accélérateur

La vérification initiale de l'accélérateur permet de s'assurer qu'il est installé et utilisé conformément aux spécifications prévues, le cas échéant par la notice d'instructions du fabricant, et qu'il peut être utilisé en sécurité.

Elle est renouvelée :

- à l'issue de toute modification de l'accélérateur susceptible d'impacter la radioprotection, notamment celles résultant des mesures cor-

rectives importantes mises en œuvre à la suite d'une non-conformité détectée lors :

- d'une vérification périodique,
- ou d'une vérification après une opération de maintenance ;
- à chaque montée en puissance de l'accélérateur de particules jusqu'à atteinte de son fonctionnement nominal ;
- de façon systématique tous les 3 ans pour les accélérateurs de particules utilisés à poste fixe.

Cette vérification comporte la vérification de la présence et du bon fonctionnement des dispositifs de protection et de sécurité (systèmes d'arrêt d'urgence...), de signalisation lumineuse et d'alarme présents sur l'équipement.

6.4.2 Vérification initiale du lieu de travail

La vérification initiale du lieu de travail consiste à réaliser des mesures de doses intégrées et éventuellement de débits de dose dans les zones délimitées et les lieux de travail attenants à ces zones. L'objectif est de vérifier l'adéquation de la délimitation des zones avec le risque d'exposition, ainsi que l'absence de dépassement des limites applicables dans les lieux attenants, à savoir, pour l'organisme entier, une dose efficace de 0,08 mSv/mois (art. R. 4451-22 du CT). Cette vérification prend en compte, notamment, les protections mises en place.

La vérification du niveau d'exposition externe est complétée, le cas échéant, d'une vérification de l'absence de contamination des locaux.

La vérification initiale du lieu de travail doit être renouvelée à l'issue de toute modification importante susceptible d'affecter la santé et la sécurité des travailleurs. Sont considérées comme telles, notamment, celles pouvant remettre en cause :

- des éléments de la conception de l'installation ;

- des EPC ;
- les conditions d'utilisation.

Sont également concernées, les modifications résultant de mesures correctives mises en œuvre à la suite d'une non-conformité détectée lors d'une vérification périodique.

Ces vérifications comportent une vérification de la présence et du bon fonctionnement des dispositifs de protection et de sécurité (système d'arrêt d'urgence, d'asservissement...), de signalisation lumineuse et d'alarme existants.

6.5 Vérifications périodiques

Les vérifications périodiques visent à s'assurer du maintien en conformité des équipements et des lieux de travail, notamment eu égard aux résultats des dernières vérifications initiales¹². Réalisées par le CRP ou sous sa supervision, elles ont pour but de déceler toute situation susceptible d'altérer l'efficacité des mesures de prévention. La méthode, l'étendue et la fréquence des vérifications périodiques sont conformes aux instructions définies par l'employeur en adéquation avec l'activité radiologique. L'employeur en établit le programme sur les conseils du CRP et justifie le délai entre deux vérifications périodiques. Ce programme doit être conservé dans un document interne, accessible aux agents de contrôle compétents, au Comité social et économique (CSE) ou à la Formation spécialisée en matière de santé, de sécurité et des conditions de travail (F3SCT) ou à la Formation spécialisée de service en matière de santé, de sécurité et des conditions de travail (F4SCT) ou, à défaut, aux salariés compétents.

En cas d'anomalies ou incidents, il est nécessaire de s'interroger sur la nécessité de modifier en conséquence le contenu de ces vérifications. Les modifications résultant de mesures correctives mises en

œuvre à la suite d'une non-conformité détectée lors d'une vérification périodique donnent lieu à un renouvellement de vérification initiale.

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

La réalisation des vérifications périodiques est tracée dans le registre de sécurité.

6.5.1 Vérifications périodiques de l'accélérateur

Le délai entre deux vérifications périodiques de l'accélérateur ne peut pas excéder un an.

6.5.2 Vérifications périodiques des lieux de travail

Elles comprennent les mesures de doses intégrées et éventuellement de débits de dose dans les zones délimitées et les lieux de travail attenants. Elles sont réalisées à une fréquence définie par l'employeur ou, le cas échéant, en continu. Dans le 1^{er} cas, le délai entre deux vérifications périodiques ne peut excéder trois mois dans les zones délimitées. Il peut être différent dans les lieux de travail attenants. La vérification périodique comporte une vérification de la présence et du bon fonctionnement des dispositifs de protection et de sécurité (par exemple systèmes d'arrêt d'urgence), de signalisation lumineuse et d'alarme.

6.6 Vérification après remise en service de l'équipement

Cette vérification est réalisée après toute opération de maintenance, selon les mêmes modalités que la vérification périodique.

6.7 Vérifications de l'instrumentation en radioprotection

Sont concernés par ces vérifications, les instruments ou disposi-

tifs de mesurage, fixes ou mobiles, ainsi que les dosimètres opérationnels. Ces vérifications sont réalisées par le CRP ou sous sa supervision.

Elles ont pour objectifs :

- à la réception du matériel, de s'assurer de l'adéquation de l'instrument ou dispositif de mesurage (y compris les dosimètres opérationnels) à la nature et à l'énergie du rayonnement, au type de champ (pulsé ou continu), ainsi que de la pertinence de son emplacement et, le cas échéant, de la cohérence du mouvement propre¹³ ;
- avant chaque utilisation, de s'assurer du bon fonctionnement des instruments de mesure de radioprotection (alimentation électrique, cohérence du mouvement propre) ;
- périodiquement, de réaliser une vérification des performances de mesure de ces instruments dans la gamme d'émissions pour laquelle ils sont utilisés (par le CRP s'il dispose des compétences et des moyens nécessaires ou, à défaut, par un organisme extérieur). Le délai entre deux vérifications périodiques de l'instrumentation ne peut pas excéder un an. L'employeur tient compte de la notice d'instructions du fabricant et de l'usage qui est fait de l'instrument. En fonction de l'écart constaté, la vérification peut être suivie d'un ajustage ou d'un étalonnage.

6.8 Traitement d'une non-conformité

Lorsque l'organisme vérificateur constate une non-conformité, il en informe l'employeur sans délai par tout moyen permettant d'en assurer la traçabilité.

Les modifications résultant de mesures correctives mises en œuvre à la suite d'une non-conformité détectée lors d'une vérification périodique donnent lieu à la réalisation d'une vérification initiale. L'employeur consigne dans un registre les justificatifs des tra-

12. Arrêté du 23 octobre 2020 relatif aux mesurages réalisés dans le cadre de l'évaluation des risques et aux vérifications de l'efficacité des moyens de prévention mis en place dans le cadre de la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements ionisants.

13. Vérification que la valeur affichée en l'absence de source de rayonnements ionisants est cohérente avec les valeurs usuelles de ce type d'appareil.

vaux ou modifications effectués pour lever les non-conformités constatées lors d'une vérification périodique ou d'une vérification initiale.

6.9 Exploitation des accélérateurs de particules

L'exploitation des accélérateurs de particules nécessite :

- En amont de leur utilisation :
 - d'établir des protocoles ;
 - de planifier son travail ;
 - de s'assurer de l'effectivité du fonctionnement des dispositifs de protection et de sécurité, de signalisation lumineuse et d'alarme ;
 - de respecter les consignes de démarrage.
- Pendant leur fonctionnement :
 - de respecter les protocoles établis ;
 - d'éviter le travail isolé, à défaut l'encadrer (port de dispositif d'alerte pour travailleur isolé - DATI...).
- À l'arrêt :
 - de respecter les consignes d'accès ;
 - de respecter la temporisation (voir [annexe 3 p. 24](#)), s'équiper d'un radiamètre, porter les EPI (habillage) nécessaires, notamment en cas de risque de contamination, avant d'entrer dans la casemate ;
 - de respecter la procédure de gestion des pièces activées (traçage et lieu d'entreposage) et des déchets activés (plan de gestion des déchets et effluents).

La pratique d'opérations de maintenance préventive et curative nécessite :

- de réaliser une évaluation individuelle de l'exposition ;
- de définir des contraintes de dose pour une intervention en zone contrôlée ou en zone d'extrémités ;
- de prendre en compte la décroissance radioactive pour planifier les interventions et diminuer l'exposition ;

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

- de mettre en place des points d'arrêt pour le suivi de l'exposition ;
- de privilégier la réalisation des opérations de maintenance dans un lieu spécifique sans exposition aux rayonnements ionisants, type atelier en dehors de la casemate ;
- de ne pas entreposer les outils dans des lieux où il existe un risque d'activation ;
- de respecter les consignes internes de port des EPI.

Les situations où une désactivation complète ou partielle des systèmes de sécurité peut être autorisée doivent être déterminées et justifiées en fonction des modalités d'exploitation de l'installation¹⁴. 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.

6.10 Mesures concernant les travailleurs

La collaboration entre le médecin du travail et le CRP est essentielle.

6.10.1 Accès aux zones délimitées

L'accès aux zones délimitées est restreint aux travailleurs classés. Toutefois, les travailleurs non classés peuvent accéder en zones surveillée et contrôlée verte sous certaines conditions (autorisation de l'employeur, information adaptée, port de dosimètre opérationnel en zone contrôlée). Leur accès en zone contrôlée jaune doit, en outre, être préalablement justifié et s'accompagner

d'une information renforcée. L'employeur doit s'assurer par des moyens appropriés que l'exposition des travailleurs non classés accédant à des zones délimitées demeure inférieure aux limites de dose fixées pour les travailleurs non exposés au risque radiologique (voir [tableau II p. 5](#)).

6.10.2 Mesures techniques individuelles

Le choix des EPI doit prendre en compte plusieurs critères : risque d'exposition interne, type et énergie des rayonnements ionisants, morphologie du travailleur (ajustement du port), ergonomie. Il se fait en concertation avec le médecin du travail, qui recommande la durée maximale de port ininterrompu, et après consultation du CSE ou du F3SCT ou du F4SCT (ou en concertation avec les travailleurs concernés en l'absence d'instance compétente) (art. R. 4451-56 du CT).

Il convient de :

- porter les EPI nécessaires et appropriés au regard des risques radiologiques, conformément aux informations données par le fabricant et en respectant les instructions de l'employeur ou de son représentant ;
- vérifier le bon état des EPI.

6.10.3 Formation et information

Une information et, le cas échéant, une formation, appropriées, adaptées aux résultats de l'évaluation des risques, doivent être délivrées aux travailleurs.

6.10.3.1 Formation et information des travailleurs

Une attention particulière doit être portée sur les compétences techniques requises pour exploiter un accélérateur de particules (formations par les fabricants, tutorat) et sur le maintien du niveau des compétences.

14. Relève du responsable de l'activité nucléaire.

La formation et l'information sont organisées et délivrées avec le concours du CRP 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.

La formation spécifique à la radioprotection pour les travailleurs classés doit :

- être adaptée au poste de travail occupé ;
- être renouvelée en cas de changement de poste, création de poste, reprise après un arrêt de travail d'au moins 21 jours¹⁵, et au moins tous les 3 ans ;
- inclure une sensibilisation des femmes sur les risques pour l'enfant à naître et sur l'importance de la déclaration précoce des grossesses.

Une information doit être délivrée aux travailleurs non classés dûment autorisés à accéder en zone surveillée et contrôlée verte, renforcée en cas d'accès en zone contrôlée jaune. Elle inclut le REX, la 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 EE, une information adaptée, conforme aux dispositions prévues par le plan de prévention, doit être délivrée. EU et EE peuvent prévoir, par contrat, que les travailleurs de l'EE suivent des formations organisées par l'EU. La responsabilité de l'employeur de l'EE ne peut néanmoins pas être transférée à celui de l'EU.

L'organisation de la transmission des connaissances relatives à l'installation doit être prévue et anticipée.

6.10.3.2 Affichage et autres consignes

Il convient de prendre les mesures suivantes :

- afficher les consignes générales d'hygiène et sécurité ;
- signaler les zones délimitées au niveau des accès du local ;
- afficher les règles d'accès aux zones délimitées (autorisation, port de dosimètre opérationnel...);
- signaler, de façon spécifique et appropriée, chaque source de rayonnements ionisants (trisecteur noir sur fond jaune) ;
- mettre à disposition les notices d'utilisation des accélérateurs et des protocoles ;
- mettre à disposition les notices de fonctionnement des appareils de mesure et leurs consignes d'utilisation ;
- afficher les consignes de travail adaptées et la conduite à tenir en cas d'accident du travail, avec ou sans composante radiologique ;
- afficher les noms et coordonnées du CRP, du médecin du travail (SPST), des services de secours d'urgence et de l'agent de contrôle de l'Inspection du travail.

6.10.4 Évaluation individuelle de l'exposition aux rayonnements ionisants

Le lecteur se reportera au paragraphe 5.3.1 (p. 4) traitant de l'évaluation individuelle de l'exposition aux postes de travail préalable à l'affectation.

6.10.5 Surveillance dosimétrique individuelle

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 SISERI¹⁶ (CES) le cas échéant. La gestion de SISERI est assurée par l'ASNR.

L'ASNR établit un bilan annuel de l'exposition de l'ensemble des travailleurs faisant l'objet d'une surveillance dosimétrique individuelle¹⁷.

6.10.5.1 Mise en œuvre de la SDI externe

La mise en œuvre de la SDI répond aux exigences suivantes :

- assurée par un dosimètre à lecture différée (passif) ;
- obligatoire pour les travailleurs classés ;
- périodicité de port déterminée par l'employeur, ne pouvant excéder trois mois ;
- port au niveau du thorax ;
- mise en place :
 - chaque employeur (y compris le responsable de l'EE ou l'entreprise 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,
 - étudiants stagiaires : la dosimétrie à lecture différée est assurée par l'employeur de la personne sous l'autorité de laquelle ils sont placés ; la convention de stage peut préciser des modalités spécifiques ;

■ en fonction des résultats de l'évaluation individuelle d'exposition, une SDI des extrémités et/ou du cristallin peut s'avérer nécessaire.

6.10.5.2 Mise en œuvre de la SDI interne

Les examens de surveillance dosimétrique interne sont prescrits par le médecin du travail en fonction des radionucléides possiblement produits et de l'évaluation du risque de contamination.

6.10.5.3 Accès aux données dosimétriques¹⁸

Le travailleur a accès à toutes les données dosimétriques le concernant. Il peut solliciter le CRP (pour les résultats auxquels celui-ci a accès) ou le médecin du travail, ou demander à accéder directement à l'ensemble de ses résultats dosimétriques dans SISERI.

15. Formation sur la sécurité, à la demande du médecin du travail, article R. 4141-9 du Code du travail.

16. <https://siseri.irsn.fr>.

17. <https://expro.irsn.fr>.

18. Articles R. 4451-67 à R. 4451-72 du Code du travail. Arrêté du 23 juin 2023 relatif aux modalités d'enregistrement et d'accès au système d'information et de surveillance de l'exposition aux rayonnements ionisants «SISERI» et modifiant l'arrêté du 26 juin 2019 relatif à la surveillance individuelle de l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants.

Chaque employeur doit saisir dans SISERI des informations administratives concernant le médecin du travail et le CRP pour que ceux-ci puissent accéder aux résultats dosimétriques.

Le médecin du travail peut ouvrir l'accès à SISERI, en consultation et en saisie, aux professionnels de santé (collaborateur médecin, interne en médecine du travail, infirmier de santé au travail) qui participent à assurer un suivi individuel renforcé (SIR) sous son autorité. Il peut autoriser l'accès à SISERI d'un médecin du travail d'un autre SPST si ce médecin participe à assurer un SIR.

Le médecin du travail d'un établissement où interviennent des travailleurs temporaires ou des salariés d'une EE dispose d'un accès direct à l'ensemble des résultats dosimétriques de ces travailleurs.

Le CRP a accès aux résultats de la dose efficace et des doses équivalentes sur la durée du contrat de travail du travailleur. Ces résultats peuvent être consultés sur les 5 dernières années du suivi.

6.10.6 Dosimétrie opérationnelle

Le dosimètre opérationnel permet de mesurer le débit d'équivalent de dose individuel ou l'équivalent de dose individuel en temps réel. Il s'inscrit comme un outil d'alerte. Ses résultats peuvent en outre être comparés aux contraintes de dose et servir à l'optimisation des pratiques.

Il est obligatoire :

- pour les travailleurs classés intervenant en zone contrôlée, d'extrémités ;
- pour tout travailleur non classé accédant en zone contrôlée verte ou jaune, après y avoir été autorisé par l'employeur.

Il appartient à chaque employeur de fournir les dosimètres opérationnels adaptés (types de rayon-

nements, énergies...) aux salariés qu'il emploie :

- pour les EE : des accords peuvent être conclus entre le responsable de l'EU et celui de l'EE pour la fourniture des dosimètres opérationnels ;

- pour les entreprises de travail temporaire : la dosimétrie opérationnelle est à la charge de l'EU ;

- étudiants stagiaires : la dosimétrie opérationnelle est assurée par l'employeur de la personne sous l'autorité de laquelle ils sont placés ; la convention de stage peut préciser des modalités spécifiques. Les dosimètres opérationnels sont paramétrés par le CRP qui définit leurs seuils d'alarme et en analyse également les résultats.

Le CRP communique les résultats aux intéressés, à l'employeur, éventuellement au médecin du travail. 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'EU, le CRP de l'EU communique les résultats au CRP de l'EE.

6.10.7 Spécificités concernant le personnel de recherche extérieur au laboratoire

Une autorisation ASNR est nécessaire pour qu'une personne extérieure au laboratoire utilise un accélérateur de particules.

Une convention de mise à disposition définit les responsabilités de chacun, en particulier en matière de santé et de sécurité. Avant qu'une personne extérieure n'utilise l'accélérateur, 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 CRP de la structure d'accueil doit définir les modalités d'intervention (accès en zones délimitées, surveillance dosimétrique, formation, information...) en liaison étroite avec son homologue. Il est en effet essentiel que les CRP partagent les informations en leur possession. L'application de ces procédures doit être vérifiée avec une vigilance particulière.

7 SUIVI INDIVIDUEL DE L'ÉTAT DE SANTÉ

7.1 Visite d'information et de prévention

Les travailleurs non classés bénéficient de visites d'information et de prévention (VIP) réalisées par un professionnel de santé, c'est-à-dire le médecin du travail ou bien, sous son autorité, le collaborateur médecin, l'interne en médecine du travail ou l'infirmier de santé au travail. La VIP a notamment pour objet d'interroger le salarié sur son état de santé, de l'informer sur les risques éventuels auxquels l'expose son poste de travail ainsi que sur les modalités de suivi de son état de santé par le SPST, de le sensibiliser sur les moyens de prévention à mettre en œuvre. La périodicité de la VIP est fixée par le médecin du travail en prenant en compte les conditions de travail, l'âge et l'état de santé du salarié, ainsi que les risques auxquels il est exposé, sans que le délai entre deux visites ne puisse toutefois excéder 5 ans.

7.2 Suivi individuel renforcé

Tout travailleur classé bénéficie d'un suivi individuel renforcé (SIR) ou d'une surveillance médicale particulière pour la Fonction publique. Il est de la responsabilité de l'employeur de s'assurer que les travailleurs bénéficient du suivi individuel de l'état de santé.

Le SIR 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 (médecin du travail, collaborateur médecin, interne en médecine du travail, infirmier de santé au travail) au plus tard deux ans après la visite avec le médecin du travail. Elle donne lieu à la délivrance d'une attestation de suivi.

Le SIR 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 également la surveillance des autres risques identifiés (§ 9 p. 15).

■ Examen clinique : dépistage et suivi :

- des diverses pathologies susceptibles d'être déclenchées ou aggravées, entre autres, par l'exposition aux rayonnements ionisants (examen ophtalmologique, cutané...);
- de pathologies augmentant le risque d'exposition interne par l'intermédiaire de brèches cutanéomuqueuses (pathologies cutanées, digestives...), ou occasionnant une gêne à l'élimination (insuffisance respiratoire, rénale, hépatique...) ou à la décontamination (pathologies cutanées, ORL...).

■ Surveillance dosimétrique individuelle :

Tous les résultats de la SDI sont communiqués et commentés au travailleur. Médecin du travail et travailleur échangent sur les doses reçues le cas échéant.

■ Examens complémentaires :

Il est possible de réaliser, notamment :

- une NFS (numération – formule sanguine) à l'embauche comme examen initial, puis de la renouveler en fonction de l'évaluation individuelle des risques ;
- une évaluation biologique des fonctions rénale et hépatique ;
- une exploration fonctionnelle respiratoire ;
- un bilan cardiovasculaire (par exemple en cas de contraintes liées au port des EPI).

■ Les femmes en âge de procréer doivent être informées de l'importance de déclarer au plus tôt leur grossesse.

Pour pouvoir assurer le SIR des travailleurs exposés, les professionnels de santé au travail ont l'obligation de suivre une formation spécifique sur les risques liés aux rayonnements ionisants et sur le dispositif de SDI (Art. R. 4451-85 du CT).

7.3 Surveillance post-exposition (SPE) et surveillance post-professionnelle (SPP)

Les travailleurs bénéficiant ou ayant bénéficié d'un SIR, ou qui ont bénéficié d'un suivi médical spécifique du fait de leur exposition à des risques particuliers, doivent être examinés par le médecin du travail au cours d'une visite médicale avant leur départ à la retraite (SPP) ou dans les meilleurs délais après la cessation de l'exposition (SPE) (Art. R. 4624-28-1 à R. 4624-28-3 du CT). Le SPST organise ces visites suite à son information par l'employeur ou directement à la demande du travailleur. Il s'assure que les conditions justifiant la visite sont remplies.

Lors de cette visite médicale, le médecin du travail établit une traçabilité et un état des lieux des expositions à certains facteurs de risque professionnels dits de « pénibilité » (Art. L. 4624-2-1 et L. 4161-1 du CT). Il se base sur le contenu du dossier médical en santé au travail (DMST), les déclarations du travailleur et des employeurs. À l'issue de la visite, il remet au travailleur un document dressant cet état des lieux, également versé au DMST.

Afin de mettre en place une SPE ou une SPP, le médecin du travail transmet, s'il le juge nécessaire et avec l'accord du travailleur, ce document et les éventuelles informations complémentaires au médecin traitant. Les documents transmis sont assortis de préconisations et de toute information utile à la prise en charge ultérieure. Le médecin du travail informe le travailleur des démarches à effectuer pour la mise en place de la SPE ou de la SPP.

L'attestation d'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants est établie par l'employeur et le médecin du travail (Art. D. 461-23 du Code de la Sécurité sociale).

19. <https://www.inrs.fr/publications/bdd/mp/tableau.html?refINRS=RG%206>.

20. <https://www.inrs.fr/publications/juridique/focus-juridiques/focus-juridique-dossier-medical-sante-travail.html>.

Le tableau des maladies professionnelles n° 6 est applicable pour les travailleurs du régime général¹⁹ et les agents de la Fonction publique.

7.4 Organisation du SIR pour les travailleurs des entreprises extérieures et les travailleurs temporaires

Cadre général pour les EE :

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

- les résultats sont communiqués au médecin du travail de l'EE qui déterminera l'aptitude au poste ;

- le responsable de l'EU doit faciliter l'accès du poste de travail au médecin du travail de l'EE.

En cas d'intervention durable d'une EE dans une EU, un accord est possible entre les entreprises et les médecins du travail pour que les examens périodiques soient assurés par le médecin du travail de l'EU.

Le SIR d'un travailleur temporaire est assuré par l'EU. Le médecin du travail de l'entreprise de travail temporaire est informé des résultats de ce suivi.

7.5 Travailleuses enceintes ou allaitantes

De nombreuses substances utilisées en recherche peuvent être toxiques pour la reproduction. Aussi, il est nécessaire d'inciter les travailleuses à informer le médecin du travail de leur grossesse le plus tôt possible, 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 et le CRP, 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 au niveau le plus faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre et, en tout état de cause, rester inférieure à 1 mSv entre la déclaration de la grossesse et l'accouchement. En fonction de l'analyse de la situation, il est possible de proposer le port d'un dosimètre opérationnel au niveau de l'abdomen, tout en maintenant le port du dosimètre à lecture différée individuel au niveau de la poitrine si la travailleuse est classée. Il est interdit d'affecter ou de maintenir une travailleuse allaitante à un poste comportant un risque de contamination interne.

7.6 Dossier médical en santé au travail

- Le DMST comporte notamment²⁰ :

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

- le relevé dosimétrique avec les doses efficaces et les doses équivalentes, les doses internes ;

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

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

- Le travailleur a accès, à sa demande, aux informations contenues dans son DMST.

- Lorsque le travailleur relève de plusieurs SPST ou cesse de relever de l'un de ces services, son DMST est accessible au service compétent pour assurer la continuité du suivi, sauf refus du travailleur (Art. L. 4624-8 du CT).

- Le DMST est conservé par le SPST jusqu'au moment où le travailleur a ou aurait 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 aux rayonnements ionisants.

8

INCIDENTS IMPLIQUANT LE RISQUE RADIOLOGIQUE

8.1 Principes généraux

- Suivre les procédures d'urgence, qui doivent avoir été établies au préalable. Prendre immédiatement les dispositions pour arrêter l'exposition des personnes impliquées et, si nécessaire, assurer en priorité leur prise en charge médico-chirurgicale.

- Le CRP, le responsable du laboratoire, l'employeur et le médecin du travail doivent être prévenus **sans délai**. Si nécessaire, contacter le **dispositif d'urgence de l'ASNR disponible 24h/24 : 07 64 48 40 94, ou Asnr.crise@asnr.fr pour une assistance (reconstitution de la dose, prise en charge...)**.

- **Le médecin du travail ou le CRP peut demander à l'organisme de dosimétrie la lecture d'un dosimètre en urgence.**

- En cas de dépassement d'une valeur limite d'exposition suite à un événement, l'organisme de dosimétrie informe l'employeur, le médecin du travail, le CRP et l'ASNR. Le médecin du travail informe le travailleur.

8.2 Démarche d'analyse

- Une procédure d'analyse et de traçabilité des incidents doit avoir été établie.

- L'employeur recherche si l'événement remplit l'un des critères d'ESR définis par l'ASNR.

- En cas d'ESR (Art. R. 4451-74 à R. 4451-78 du CT) : l'employeur enregistre la date de l'événement, en effectue l'analyse et met en œuvre les mesures de prévention. Il en fait la déclaration à l'ASNR sous 2 jours ouvrés après détection de l'ESR, ou sans délai en cas de risque de constitution d'une situation d'urgence radiologique.

Il informe le CSE ou la F3SCT ou la F4SCT le cas échéant.

■ En cas de dépassement de l'une des valeurs limites réglementaires suite à cet événement : l'employeur prévient l'agent de contrôle de l'Inspection du travail ou équivalent, l'ASNR et informe le CSE ou la F3SCT ou la F4SCT le cas échéant.

■ Il est important de relever le maximum d'informations sur le déroulé de l'événement, les caractéristiques de fonctionnement de l'équipement, la configuration du et au poste de travail (distances, positionnements de la source et de l'opérateur...). Ces paramètres sont utiles pour affiner la reconstitution de la dose relevée par le dosimètre ou estimée.

■ Au terme de l'analyse de l'incident radiologique, le médecin du travail saisit, modifie ou valide directement dans SISERI la dose reçue par le travailleur.

■ Quelles que soient la nature et la gravité de l'incident, il est obligatoire d'en analyser les causes en vue de partager le REX et mettre en œuvre les actions permettant d'éviter son renouvellement.

Les procédures de déclaration des accidents du travail doivent être respectées :

■ Secteur privé : déclaration à la Caisse primaire d'assurance maladie ou inscription, pour les incidents mineurs, sur le registre des accidents bénins ;

■ Secteur public : déclaration à l'employeur (en général *via* les ressources humaines) et inscription sur le registre de santé et sécurité au travail.

9 RISQUES ASSOCIÉS

■ Risque radiologique lié à la manipulation de sources scellées (étalonnage), non scellées, exposition au radon.

■ Risques liés aux agents physiques : champs électromagnétiques, bruit, rayonnements optiques artificiels... Appareils sous pression (tests cuve DREAL).

■ Risque électrique.

■ Risque chimique : exposition à l'ozone, oxydes d'azote, hélium, hexafluorure de soufre (SF₆), utilisation de solvants, cytostatiques, substances cancérigènes, mutagènes ou toxiques pour la reproduction (CMR), nanoparticules... Oxydation et corrosion de composants.

■ Risques liés aux produits cryogéniques.

■ Risque d'incendie et d'explosion.

■ Risque allergique : latex, protéines animales, détergents, désinfectants...

■ Risque biologique : piqûre, 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...

■ Risques liés aux gestes répétitifs, aux manutentions et postures contraignantes, chutes de hauteur ou de plain-pied, écrasements...

■ Risques liés aux horaires atypiques.

■ Risques psychosociaux.

■ Travail isolé.

■ ...

10 ÉVALUATION DE LA MAÎTRISE DES RISQUES

Afin d'optimiser la radioprotection de l'installation et des travailleurs, 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 CRP informe l'employeur en cas de risque de dépassement d'une contrainte de dose ou de la dose estimée lors de l'évaluation indivi-

duelle d'exposition d'un travailleur. 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 CRP, ainsi que la consultation des relevés annuels des doses individuelles, permettent d'apprécier l'évolution de l'exposition des travailleurs. L'employeur communique au CSE ou à l'instance compétente (F3SCT, F4SCT, conseil de laboratoire...) le cas échéant :

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

■ le bilan statistique annuel des expositions non nominatives ;

■ le bilan des dysfonctionnements relevés ;

■ le bilan des vérifications initiales et périodiques des équipements et lieux de travail.

Composition du groupe de travail ayant réalisé la mise à jour de la fiche

ASNR

- C. Saccoccio

- A. Nadour

Institut national de recherche et de sécurité (INRS)

- A. Bourdieu

- R. Mouillseaux

Experts

- M.-L. Gaab, INSERM/GIP

CYCERON

- J.-M. Horodyski, CNRS/Physique/iRSD

- A. Rousselet, INSERM

- C. Thieffry, CNRS/IN2P3

Relecteurs

- Y. Billarand, ASNR

- M. Pultier, ASNR



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 générées 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, d'aérosols et de 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. Des photons secondaires sont générés par rayonnement de freinage, ils interagissent 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 neutroniques.

Les seuils des réactions photonucléaires sont de l'ordre de 10 mégaélectronvolts (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 en effet d'être vigilant en présence de certains éléments légers tels que le béryllium, dont le seuil de réaction photonucléaire 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 activation des matériaux environnants. Le recours à des modèles

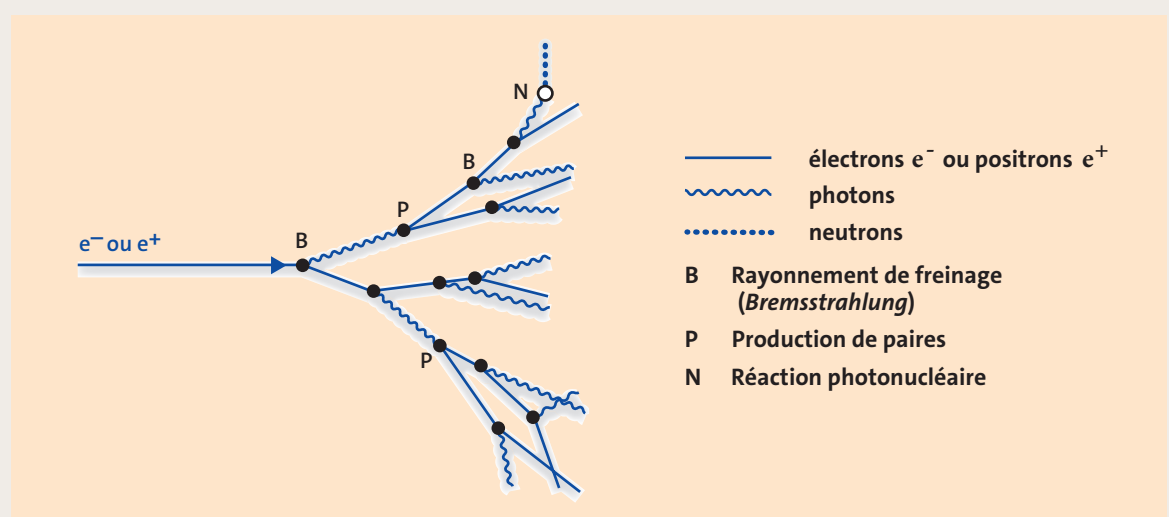


Figure A1 : Cascades électromagnétiques

physiques est nécessaire pour évaluer la probabilité de survenue 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 du faisceau avec les éléments présents sur son parcours) ;
- 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 prendre en compte :

- 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 nature des locaux adjacents (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 tels que 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 mono-énergétique 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

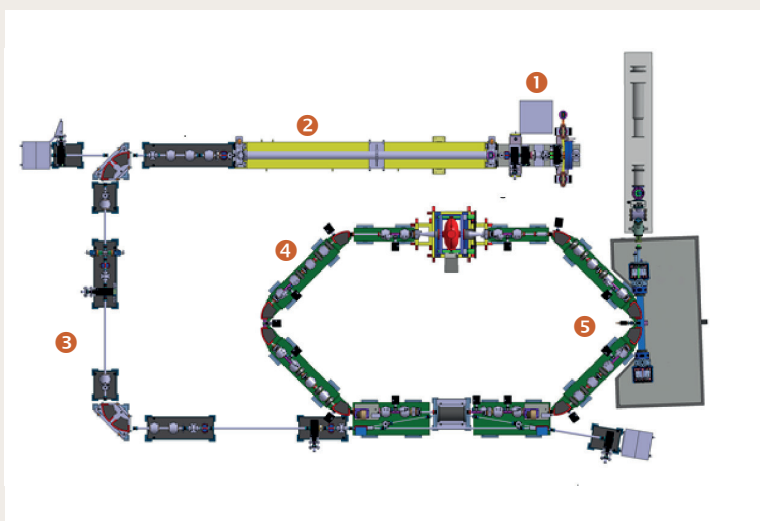
→ Modélisation géométrique (figures A2 et A3 p. 18)

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 transport et production 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.

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 paquets 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** où elles 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].

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

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 à 5]



Légende : Seuls les éléments critiques, correspondant à des points de pertes faisceau prépondérants, sont représentés : 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**) [6].

→ En radioprotection

La connaissance des débits d'équivalents de dose à l'arrêt du champ accélérateur permet la gestion des accès aux casemates en fonction des objectifs de radioprotection déterminés au préalable, par 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 p. 4).

→ Pour la gestion des déchets et effluents (voir § 6.2.3 de la fiche p. 7)

En amont de l'utilisation d'un accélérateur, les résultats du code de calcul permettent d'établir le plan de gestion des éléments activés 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 présents 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, mesures 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 - ThomX Technical design report. LAL / RT 14-21, LAL. Orsay : Centre scientifique d'Orsay. Laboratoire de l'accélérateur linéaire ; 2014: 164 p.
- 2 | VLACHOUDIS V - FLAIR : a powerful but user friendly graphical interface for FLUKA. In: International Conference on Mathematics, Computational Methods & Reactor Physics (M&C 2009). Saratoga Springs, New York, May 3-7, 2009. La Grange Park : American Nuclear Society ; 2009: 790-800, 2798 p.
- 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 | AHDIDA C, BOZZATO D, CALZOLARI D, CERUTTI F ET AL. - New Capabilities of the FLUKA Multi-Purpose Code. *Front Phys*. 2022 ; 9 : 1-14.
- 5 | BATTISTONI G, BOEHLEN T, CERUTTI F, CHIN P ET AL. - Overview of the FLUKA code. *Ann Nucl Energy*. 2015 ; 82 : 10-18.
- 6 | HORODYNSKI JM, WURTH S - (2016). Shielding design and radioprotection for Andromede and ThomX accelerators. ICRS-13 & RPSD-2016. 13th International Conference on Radiation Shielding & 19th Topical Meeting of the Radiation Protection and Shielding Division of the American Nuclear Society. *EPJ Web Conf*. 2017 ; 153 : 1-10.

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, même après arrêt de l'accélérateur.

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 mégaélectronvolt (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 de 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 cylindre, d'un rayon de 5 cm et d'épaisseurs différentes (5 mm, 1 cm et 5 cm), correspond à la cible, sa base est située au centre de la sphère. 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, il a une forme carrée de 1 mm de côté. La cible est irradiée par un faisceau de 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.

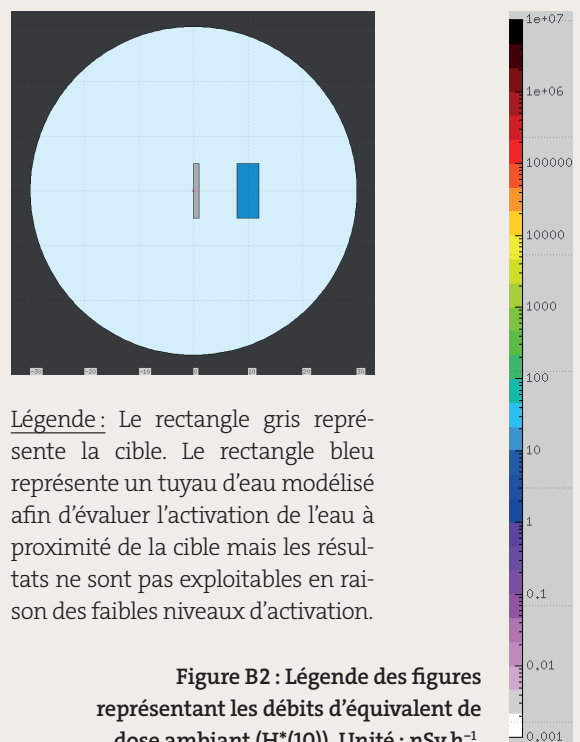
Le code de calcul FLUKA [1 à 3] est utilisé dans cette étude. Il est à noter que de nombreux autres codes de calcul existent (MCNP6 [4], PHITS [5], MARS-15 [6, 7], FISPACT-II [8, 9], TRIPOLI-4® [10], GEANT4 [11 à 13], RayXpert® [14]) et présentent des spécificités dans plusieurs domaines tels que le type de particules intégrées, les domaines d'énergie, les modèles physiques, l'interface graphique, la disponibilité du code... Une analyse préalable doit être réalisée afin de choisir le ou

les codes les plus adaptés 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. Les résultats obtenus ne doivent pas être extrapolés à d'autres cas d'irradiation car certains phénomènes n'ont pas été pris en compte (accumulation de l'activité des radionucléides par de multiples irradiations, création de radionucléides pour des flux de particules plus importants...). Afin de pouvoir comparer les résultats, la légende reportée en **figure B2** est valable pour l'ensemble des **figures B3 à B6** qui représentent les débits d'équivalent de dose ambiant ($H^*(10)$). L'unité utilisée est le nanosievert par heure ($nSv.h^{-1}$) car les valeurs de débits d'équivalents de dose ambiant calculées sont faibles. Suivant le seuil défini par la réglementation, un débit d'équivalent de dose ambiant supérieur à $470 nSv.h^{-1}$

Figure B1 : Vue en coupe et en deux dimensions du modèle simplifié utilisé.



Légende : Le rectangle gris représente la cible. Le rectangle 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 en raison des faibles niveaux d'activation.

Figure B2 : Légende des figures représentant les débits d'équivalent de dose ambiant ($H^*(10)$). Unité : $nSv.h^{-1}$.

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 23 500 nSv.h⁻¹.

Faisceau de protons

Des rayonnements ionisants produits par l'activation de la cible de cuivre (Cu) par le faisceau de protons sont présents à l'arrêt de l'accélérateur (figure B3). La décroissance de chaque radionucléide produit fait varier dans le temps sa contribution relative à l'exposition externe (principalement liée aux 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 zinc⁶⁵ (période de 244 jours) durant les deux premières 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 débit d'équivalent de dose à l'arrêt de l'accélérateur est plus rapide que dans le cas du cuivre (figure B4). En effet, un seul radionucléide présente une période radioactive supérieure à 1 jour, l'Al²⁶. 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, l'Al²⁸, a une période radioactive de 2,2 minutes.

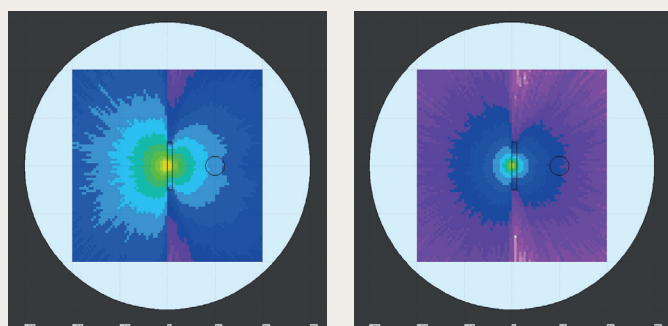
Les enjeux de radioprotection liés à l'activation des matériaux par un faisceau de protons ont été illustrés par deux cas simples. L'utilisation d'une cible d'aluminium permet de réduire les risques d'exposition en mettant en place une temporisation d'accès très courte (de l'ordre de deux minutes après 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.

Faisceau d'électrons

Cas général

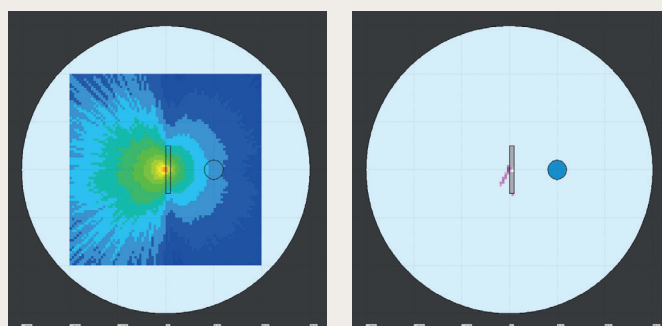
Pour une même énergie et une même intensité de faisceau, l'activation engendrée par un faisceau primaire d'électrons sera plus faible que pour un faisceau de protons. En effet, les protons cèdent la totalité de leur énergie dans de très faibles épaisseurs de matière

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.



Légende : À gauche, juste après arrêt de l'irradiation. À droite, 1 mois après arrêt de l'irradiation. (Couleurs : cf. Fig. 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.



Légende : À gauche, juste après arrêt de l'irradiation. À droite, 1 semaine après arrêt de l'irradiation. (Couleurs : cf. Fig. B2).

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 le long de leur parcours dans la matière, par interaction avec les noyaux et le cortège électronique, et sur une distance supérieure à celle des protons. Mais seuls les électrons qui possèdent une énergie supérieure à plusieurs MeV produiront, par rayonnement de freinage, des photons suffisamment énergétiques pour interagir avec les noyaux et ainsi les activer, mais également pour engendrer de nouveaux neutrons.

Le débit d'équivalent de dose ambiant 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). En effet, les niveaux d'activités des radionucléides produits par un faisceau d'électrons sont plus faibles d'un facteur 10 000. Certains radionucléides, tels que le zinc⁶⁵, ne sont pas produits car les flux de protons engendrés par les réactions nucléaires sont négligeables dans cette configuration.

Le radionucléide induisant le risque d'exposition externe à l'arrêt de l'irradiation est le Cu⁶². Compte-tenu de sa période (9,7 minutes), 1 heure de refroidissement de la cible permet de réduire considérablement le risque d'exposition.

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 garantir l'absence d'activation au sein de la matière, et qu'il convient de réaliser des analyses plus poussées afin de pouvoir évaluer l'activité des radionucléides.

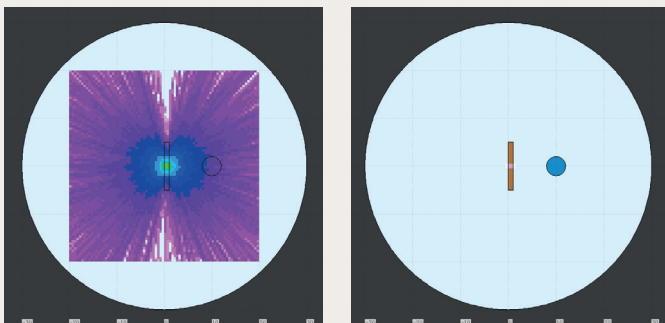
La production de radionucléides dans une cible d'aluminium par le faisceau d'électrons est très faible. En effet, ce matériau est reconnu pour sa très faible sensibilité à l'activation par des faisceaux d'électrons (figure B6). Le débit d'équivalent de dose ambiant résiduel en fin d'irradiation est dû aux quelques radionucléides de très courtes périodes qui ont été 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, si l'utilisation de cuivre n'est pas proscrite, elle demandera une évaluation des risques qui prenne en compte les 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

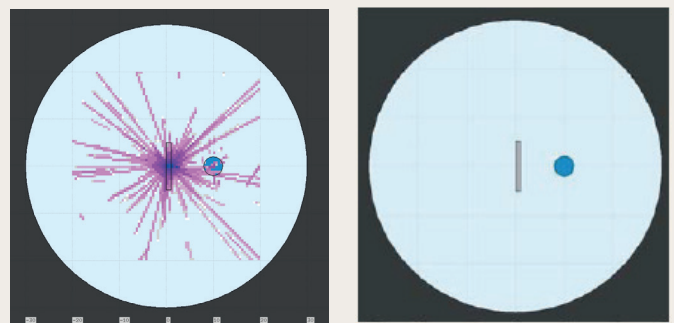
Les électrons interagissant avec la matière vont produire de nombreux photons par rayonnement de freinage. Ces photons, dont l'énergie maximale correspond à l'énergie initiale des électrons, interagissent également avec les noyaux et produisent des neutrons qui, majoritairement, seront responsables de l'acti-

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.



Légende : À gauche, juste après arrêt de l'irradiation. À droite, 1 semaine après arrêt de l'irradiation. (Couleurs : cf. Fig. B2).

Figure B6 : Débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ autour de la cible d'aluminium après irradiation par un faisceau d'électrons de 18 MeV (intensité moyenne = 0,16 picoampère) pendant 180 jours.



Légende : À gauche, juste après arrêt de l'irradiation. À droite, une heure après l'arrêt de l'irradiation. (Couleurs : cf. Fig. B2).

vation 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. En revanche, cette énergie seuil est plus faible pour certains éléments légers, tels que le béryllium. Or celui-ci 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 un modèle similaire à celui décrit 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 le nombre d'interactions avec les 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 Be^{10} dans les produits d'activation après irradiation est avérée, avec une activité très faible (de l'ordre de $3,5.10^{-13} \text{ Bq.cm}^{-3} \pm 2,4.10^{-13} \text{ Bq.cm}^{-3}$).

Par conséquent, les responsables d'études d'activation devront être vigilants concernant la mise en œuvre d'éléments légers tels que le béryllium, le deutérium, ou de matériaux à numéro atomique 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'évaluation du risque radiologique et de la production des déchets radioactifs. Elle passera le plus souvent par l'utilisation de codes de calcul 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 travailleurs, facilité de maintenance, prise en charge des déchets radioactifs) justifient leur intégration dans les processus de conception et d'exploitation des accélérateurs de particules.

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 | AHDIDA C, BOZZATO D, CALZOLARI D, CERUTTI F ET AL - New Capabilities of the FLUKA Multi-Purpose Code. *Front Phys*. 2022 ; 9 : 1-14.
- 3 | BATTISTONI G, BOEHLEN T, CERUTTI F, CHIN P ET AL - Overview of the FLUKA code. *Ann Nucl Energy*. 2015 ; 82 : 10-18.
- 4 | WERNER CJ (ED) - MCNP®. User's Manual. Code Version 6.2. October 27, 2017. Manual Rev. 0. Los Alamos : Los Alamos National Security, LLC ; 2017 : 746 p.
- 5 | 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.
- 6 | 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.
- 7 | MOKHOV NV, JAMES CC - The MARS Code System User's Guide Version 15(2016). FERMILAB-FN-1058-APC. Batavia : Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab) ; 2017 : 162 p.
- 8 | BAILEY G, FOSTER D, KANTH P, GILBERT M (EDS) - The FISPACT-II User Manual. UKAEA-CCFE-RE(21)02. Abingdon : United Kingdom Atomic Energy Authority (UKAEA) ; 2021 : 260 p.
- 9 | SUBLET JC, EASTWOOD JW, MORGAN JG, GILBERT MR ET AL - FISPACT-II: An Advanced Simulation System for Activation, Transmutation and Material Modeling. *Nucl Data Sheets*. 2017 ; 139 : 77-137.
- 10 | 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.
- 11 | 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.
- 12 | ALLISON J, AMAKO K, APOSTOLAKIS J, ARAUJO H ET AL - Geant4 Developments and Applications. *IEEE Trans Nucl Sci*. 2006 ; 53 (1) : 270-78.
- 13 | ALLISON J, AMAKO K, APOSTOLAKIS J, ARCE P ET AL - Recent developments in GEANT4. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*. 2016 ; 835 : 186-225.
- 14 | DRAY N, MARY N, DOSSAT C, BOURGOIN J ET AL - An overview of last decade's developments in RayXpert®, a 3D Monte Carlo code. *EPJ Nucl Sci Technol*. 2024 ; 10 : 1-10.

Annexe 3

Évaluation de l'activation de l'air générée par un accélérateur de particules

Contexte

Lors du fonctionnement des accélérateurs de particules, le faisceau primaire peut interagir avec la matière environnante (composants de l'accélérateur, cibles...) et entraîner la production de particules secondaires : photons, neutrons, protons, particules alpha, électrons/positrons... Ces particules secondaires peuvent à leur tour interagir avec le milieu environnant. L'une de ces interactions est la radiolyse par ionisation des molécules d'air, ce qui entraîne notamment la production d'espèces réactives de l'oxygène et de l'azote dont certaines peuvent présenter une toxicité pour l'humain : ozone, oxydes d'azote. De même, les particules peuvent interagir par réactions nucléaires avec le noyau des atomes constituant l'atmosphère et ainsi créer des radionucléides. Ce phénomène constitue l'activation de l'air. Il est alors possible d'être exposé par voie interne et externe aux produits d'activation, même à l'arrêt de l'accélérateur de particules.

Une étude de cas est proposée afin d'illustrer des ordres de grandeur. L'activation de l'air suite au fonctionnement d'un accélérateur de particule simplifié est évaluée avec l'aide d'un code de calcul Monte-Carlo de transports et d'interactions des particules. Une estimation de l'exposition d'un travailleur accédant à la casemate après arrêt de l'accélérateur sera ensuite présentée, et des solutions d'optimisation discutées.

Activation de l'air

Les réactions d'activation de l'air obéissent aux mêmes règles que celles s'appliquant aux matériaux

> TABLEAU C1 : COMPOSITION DE L'AIR (SOURCE RAPPORT 95 DE L'ICRU).

ATOME	POURCENTAGE MASSIQUE
C (carbone)	0,01248
N (azote)	75,5267
O (oxygène)	23,1781
Ar (argon)	1,2827

constitutifs des équipements ou des structures environnantes.

La production de radionucléides dans l'air dépendra principalement des particules qui interagiront avec les atomes constitutifs de l'atmosphère (particules primaires si le faisceau est extrait de l'accélérateur, ou particules secondaires issues des interactions avec le milieu environnant), de leur énergie, de leur intensité, du temps d'irradiation et de la composition de l'atmosphère.

Un autre facteur important est la présence ou non d'une ventilation lors du fonctionnement de l'accélérateur. En effet, le renouvellement de l'air réduira l'activité à l'intérieur de la casemate.

L'utilisation de codes de calcul Monte-Carlo de transports et d'interaction des particules avec la matière permet de déterminer le terme source et ainsi de procéder à l'évaluation des risques pour les travailleurs, l'environnement et le public.

Méthodologie

Afin d'évaluer le niveau d'activation possible autour d'un accélérateur de particules, un modèle simplifié est utilisé dans un code de calcul Monte-Carlo, FLUKA.

Un faisceau d'électrons ou de protons de 100 MeV ou de 20 MeV est dirigé vers une cible de cuivre de 10 cm d'épaisseur qui arrête la totalité du faisceau primaire. L'ensemble est placé dans une sphère d'air. L'activité produite au bout de deux heures de fonctionnement pour une intensité de faisceau de 1 mA est alors calculée.

Modélisation

Une sphère d'air de 50 cm de rayon contient une cible de cuivre de 10 cm d'épaisseur et de 5 cm de diamètre. La composition de l'air retenue correspond à celle définie dans le rapport 95 de l'*International commission on radiation units and measurements* (ICRU) (tableau C1).

Le faisceau primaire de particules est placé au plus près de la cible (1 mm) afin de minimiser les interactions pouvant entraîner une activation de l'air.

Les faisceaux primaires de protons et d'électrons seront mono-énergétiques et sans dimension (type pinceau).

Résultats

Activité de l'air à l'arrêt de l'irradiation

Les calculs réalisés dans cette étude sont majorants car aucun effet de dilution issu d'une ventilation, même naturelle, n'est pris en compte. Dans le cadre d'une évaluation des risques en conditions réelles, il est nécessaire de tenir compte du taux de renouvellement de l'air dans l'installation.

Une durée d'irradiation de 2 h pour un faisceau d'intensité de 1 mA sera utilisée. La puissance moyenne du faisceau est égale à 100 kW pour un faisceau de 100 MeV, et à 20 kW pour un faisceau de 20 MeV. Les **tableaux C2 et C3 (p. 26)** présentent les radionucléides générés en fin d'irradiation dans la sphère d'air entourant la cible pour les faisceaux de protons d'énergie respectivement 100 MeV et 20 MeV. Pour chacun de ces radionucléides, ils fournissent le rapport de l'activité générée par le faisceau de protons, sur l'activité générée par un faisceau d'électrons de même énergie (A (protons)/A (électrons)). Seuls les radionucléides dont la demi-vie est supérieure à 1 min ont été pris en compte. Plusieurs points intéressants peuvent ainsi être identifiés.

À paramètres physiques identiques, un faisceau primaire de protons crée une variété de radionucléides plus importante qu'un faisceau primaire d'électrons, principalement en raison de la production plus importante de neutrons (**tableaux C2 et C3**).

À paramètres physiques identiques, l'activation engendrée par un faisceau primaire de protons sera plus importante que celle issue d'un faisceau primaire d'électrons, principalement en raison de la production plus importante de neutrons (**tableau C2**).

De plus, pour chacun de ces 2 types de faisceaux primaires (protons et électrons), l'activation augmente avec l'énergie (**fig. C1 et C2 p. 27**). La relation avec l'énergie des particules primaires n'est toutefois pas linéaire, principalement à cause d'effets de seuils tels que ceux affectant les réactions nucléaires ou les phénomènes physiques de production de particules secondaires.

Certains radionucléides sont produits seulement par le biais de réactions de spallation^a uniquement dans le cas du faisceau de protons : ¹⁷F, ¹⁸F, ³³P, ³⁷S, ⁴⁰K et ⁴⁰Cl.

Les courbes en pointillés des *figures C1 et C2* illustrent la contribution relative à l'activation de chaque radionucléide généré, en fonction du temps.

L'importance de l'activation de l'air dépend donc de plusieurs facteurs : types de particules primaires, énergie, intensité, types d'interactions avec la matière.

Dose efficace engagée par inhalation

Une évaluation de la dose efficace engagée par inhalation est réalisée sur la base des activités calculées dans la section précédente.

Le calcul de la dose engagée par inhalation repose sur les modalités fixées par l'arrêté du 16 novembre 2023 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants.

Les coefficients de dose engagée par unité d'incorporation pour les travailleurs sont issus des tableaux 2.2 (gaz inertes) et 3.2 de l'annexe III de l'arrêté du 16 novembre 2023 sus-cité. La valeur retenue correspond à celle définie pour les composés non spécifiés si la forme chimique n'est pas connue, et le diamètre aérodynamique médian en activité de 5 µm est retenu par défaut pour les travailleurs.

Comme attendu, eu égard aux différences d'activation liées au type de particules primaires (à énergie et intensité identiques), la dose efficace engagée est plus élevée pour un faisceau de protons que pour un faisceau d'électrons. Il est également important de noter que le ¹¹C, radionucléide qui contribue le plus à l'exposition interne, a une période radioactive relativement courte (environ 20 minutes). Ainsi, la mise en place d'une temporisation permet de réduire les doses efficaces engagées (**fig. C3 et C4 p. 27**).

Dose efficace par exposition externe

L'immersion dans une atmosphère activée entraîne également une exposition externe. Deux documents de référence fournissent une méthode pour estimer la dose reçue par immersion dans une atmosphère radioactive : le *Federal guidance report* n° 15 (FGR-15) de l'*Environmental protection agency* (EPA), et le rapport 144 de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR144). Le présent document se reposera sur les données issues de ce dernier.

a. Réaction nucléaire où la particule ou l'onde électromagnétique de haute énergie incidente crée des fragments de noyaux plus légers que le noyau cible.

➤ **TABLEAU C2 : RADIONUCLÉIDES (NATURE, ORIGINES ET DEMI-VIE) ET RATIO (A(PROTONS)/A(ÉLECTRONS)) ENTRE LES ACTIVITÉS GÉNÉRÉES PAR UN FAISCEAU DE PROTONS ET UN FAISCEAU D'ÉLECTRONS DE MÊME ÉNERGIE (EN FIN D'IRRADIATION DE LA CIBLE PAR UN FAISCEAU DE PROTONS D'ÉNERGIE 100 MeV).**

RADIONUCLÉIDES	ORIGINES	DEMI-VIE	A (PROTONS)/ A (ÉLECTRONS)
¹¹ C (carbone)	C/N/O/Ar, (γ, n), spallation	20,34 min	4,4
¹³ N (azote)	N/O/Ar, (γ, n), spallation	9,97 min	8,9
¹⁵ O (oxygène)	O/Ar, (γ, n), spallation	2,0 min	2
¹⁷ F (fluor)	Ar, spallation	1,1 min	-
¹⁸ F	Ar, spallation	109,7 min	-
³⁷ S (soufre)	Ar, spallation	5,1 min	-
³⁸ Cl (chlore)	Ar, (n, p), spallation	37,2 min	18,6
³⁹ Cl	Ar, (γ, p)	56,2 min	17,6
⁴⁰ Cl	Ar, (n, p)	1,4 min	-
⁴¹ Ar (argon)	Ar, (n,γ)	109,6 min	1,8

➤ **TABLEAU C3 : RADIONUCLÉIDES (NATURE, ORIGINES ET DEMI-VIE) ET RATIO (A(PROTONS)/A(ÉLECTRONS)) ENTRE LES ACTIVITÉS GÉNÉRÉES PAR UN FAISCEAU DE PROTONS ET UN FAISCEAU D'ÉLECTRONS DE MÊME ÉNERGIE (EN FIN D'IRRADIATION DE LA CIBLE PAR UN FAISCEAU DE PROTONS D'ÉNERGIE 20 MeV).**

RADIONUCLÉIDES	ORIGINES	DEMI-VIE	A (PROTONS)/ A (ÉLECTRONS)
¹¹ C (carbone)	C/N/O/Ar, (γ, n), spallation	20,34 min	-
¹³ N (azote)	N/O/Ar, (γ, n), spallation	9,97 min	0,9
¹⁴ O (oxygène)	N/O/Ar, (p, n), spallation	1,2 min	-
¹⁵ O	O/Ar, (γ, n), spallation	2,0 min	0
³⁷ S (soufre)	Ar, spallation	5,1 min	-
⁴¹ Ar (argon)	Ar, (γ, n)	109,6 min	1

γ = rayon gamma | n = neutron | p = proton | spallation = réaction nucléaire où la particule ou l'onde électromagnétique de haute énergie incidente crée des fragments de noyaux plus légers que le noyau cible | - = en l'absence de production d'électrons, le rapport A (protons) / A (électrons) n'a pas d'objet.

L'activation est plus faible pour les accélérateurs d'électrons que pour les accélérateurs de protons. Ainsi, l'exposition externe en lien avec les accélérateurs d'électrons est plus faible. Toutefois, ces résultats démontrent que l'exposition externe doit également être prise en compte dans l'évaluation du risque radiologique. En effet, la dose efficace en lien avec

l'exposition externe n'est pas négligeable. Il est également intéressant de constater que les contributeurs les plus importants à l'exposition externe (**fig. C5 et C6, p. 28**), ¹⁵O et ¹³N, ont une demi-vie inférieure ou égale à 2 min. Ainsi, leur contribution est négligeable à l'issue des 20 minutes suivant la fin de l'irradiation.

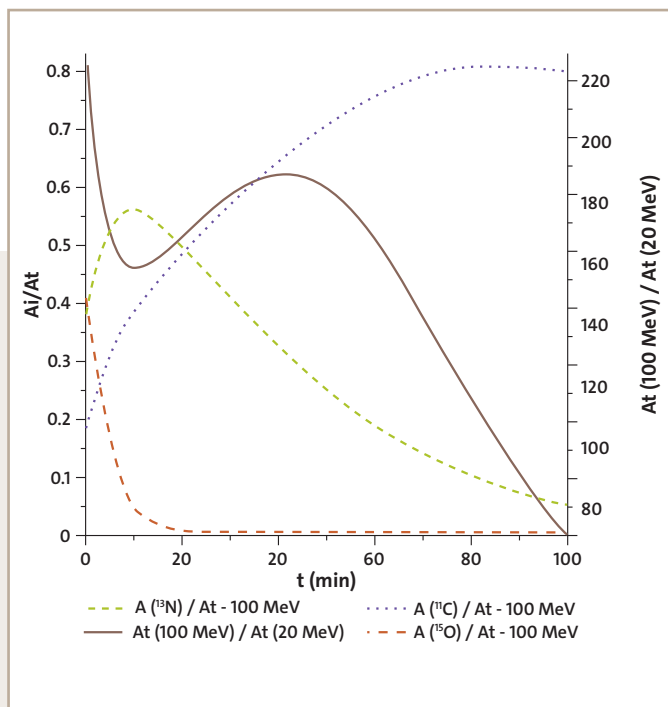


Figure C1 : Courbes pointillées : évolution dans le temps des rapports d'activité $A(i)/At$ dans l'air pour les principaux radionucléides (i) créés par activation, sur l'activité totale At (irradiation d'une cible de cuivre par un faisceau d'électrons d'énergie 100 MeV, d'intensité 1 mA pendant 2 h). Courbe pleine : évolution dans le temps du rapport d'activité totale dans l'air $At(100\text{ MeV})/At(20\text{ MeV})$ entre deux faisceaux d'électrons respectivement de 100 MeV et 20 MeV.

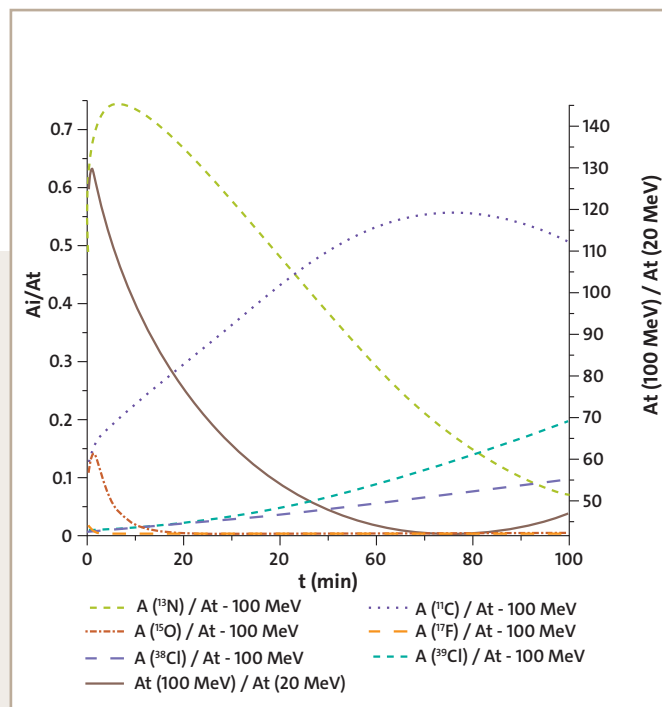


Figure C2 : Courbes pointillées : évolution dans le temps des rapports d'activité $A(i)/At$ dans l'air pour les principaux radionucléides (i) créés par activation, sur l'activité totale At (irradiation d'une cible de cuivre par un faisceau de protons d'énergie 100 MeV, d'intensité 1 mA pendant 2 h). Courbe pleine : évolution dans le temps du rapport d'activité totale dans l'air $At(100\text{ MeV})/At(20\text{ MeV})$ entre deux faisceaux de protons respectivement de 100 MeV et 20 MeV.

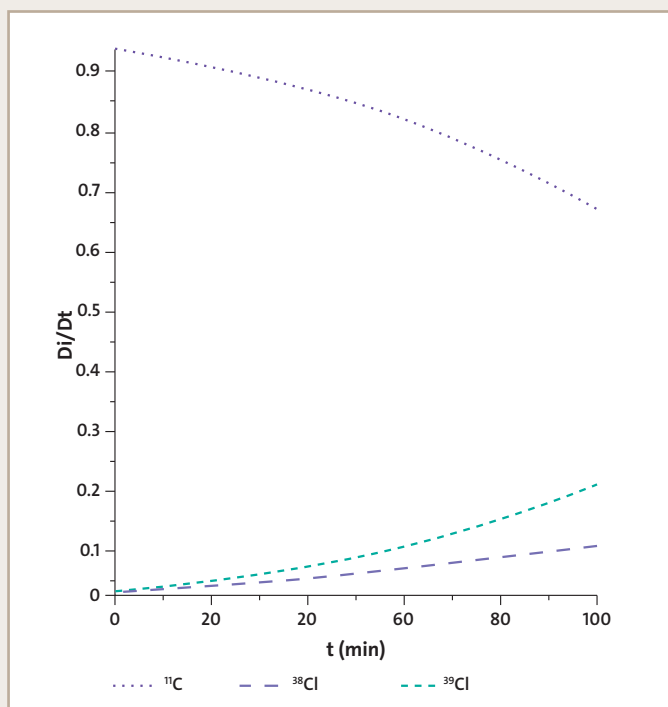


Figure C3 : Part relative de la dose efficace engagée par inhalation (D_i/D_t) pour chaque radionucléide, en fonction du temps (après 2 heures de fonctionnement d'un accélérateur d'électrons de 100 MeV et 1 mA, et en l'absence de ventilation).

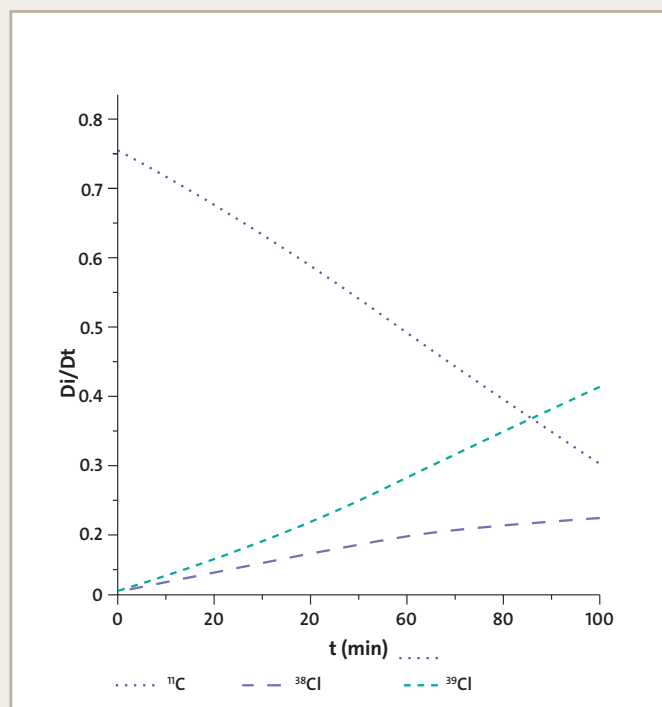


Figure C4 : Part relative de la dose efficace engagée par inhalation (D_i/D_t) pour chaque radionucléide, en fonction du temps (après 2 heures de fonctionnement d'un accélérateur de protons de 100 MeV et 1 mA, et en l'absence de ventilation).

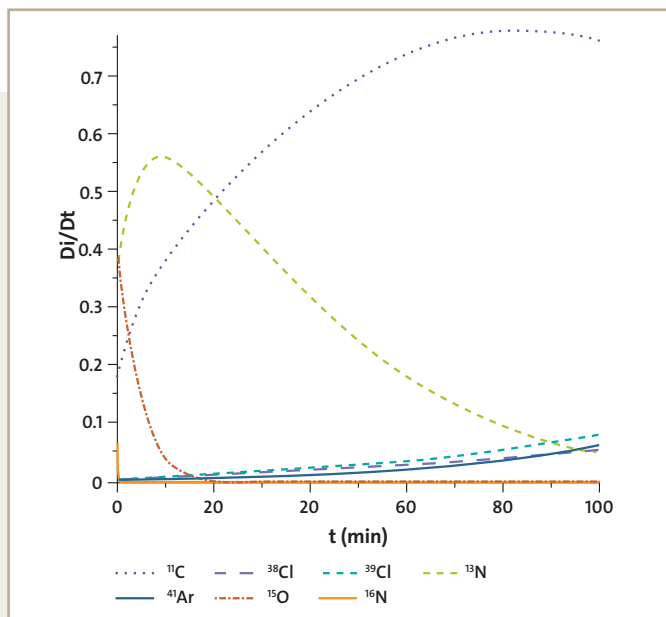


Figure C5 : Part relative de la dose efficace (D_i/D_t) par exposition externe à l'air activé, pour chaque radionucléide en fonction du temps (après 2 heures de fonctionnement d'un accélérateur d'électrons de 100 MeV et 1 mA, en l'absence de ventilation).

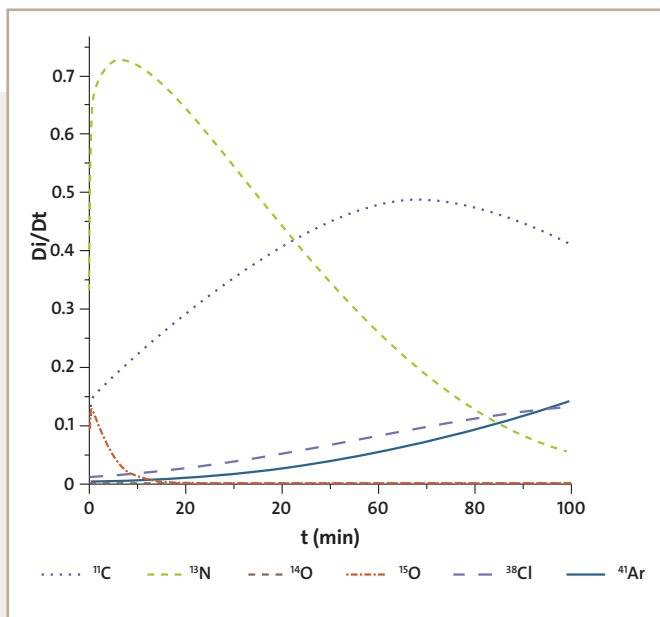


Figure C6 : Part relative de la dose efficace (D_i/D_t) par exposition externe à l'air activé, pour chaque radionucléide en fonction du temps (après 2 heures de fonctionnement d'un accélérateur de protons de 100 MeV et 1 mA, en l'absence de ventilation).

Réduction de l'exposition des travailleurs

Il est important d'optimiser les paramètres qui influencent l'activation (énergie, intensité, cibles, parcours du faisceau dans l'accélérateur).

Il est nécessaire de mettre en place une ventilation mécanique assurant un taux de renouvellement d'air qui permet de réduire efficacement l'activité volumique. Toutefois, il est nécessaire de réaliser une étude d'impact radiologique des rejets de radionucléides dans l'environnement.

La mise en place d'une temporisation d'accès à la casemate après arrêt de l'accélérateur permet de réduire l'activité volumique liée aux radionucléides à décroissance rapide. La réalisation d'une évaluation *a priori* de l'activation de l'air permet de déterminer la durée de temporisation nécessaire pour réduire l'exposition radiologique des travailleurs.

La réduction de l'activation de l'air est également possible avec la mise en place de protections radiologiques locales autour des principales sources de pro-

duction des particules secondaires. Dans cette étude par exemple, les fluences de particules secondaires peuvent être réduites en réalisant une protection radiologique locale autour de la cible, permettant d'arrêter la majorité des protons et de réduire les flux de photons (matériaux à numéro atomique et densité élevés) et de neutrons (matériaux à numéro atomique faible). Dans certaines configurations où les risques d'activation de l'air mais également de production de gaz toxiques sont importants, la possibilité de placer les éléments à l'origine des particules secondaires (cibles, collimateurs...) sous vide ou dans une atmosphère contrôlée (gaz rares par exemple) peut être envisagée, avec les difficultés techniques afférentes.

REMERCIEMENTS :

Le groupe de travail remercie chaleureusement M. Jean-Michel Horodyski pour la réalisation de ces études et la communication de leurs résultats dans ces 3 annexes.