

LES ACCÉLÉRATEURS INDUSTRIELS ET MÉDICAUX DE PARTICULES DE 1 à 10 MeV

I - DESCRIPTION - LIMITES D'EXPOSITION

G. Hée, INRS - DA/RPM avec la collaboration de D. Dugrillon, service Prévention CRAM du Centre



PRINCIPES GÉNÉRAUX

Un accélérateur de particules est un générateur électrique de rayonnements ionisants au sens du décret modifié n° 86-1103 du 2 octobre 1986 relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants.

C'est un appareil ou une machine qui communique une énergie cinétique à des particules chargées électriquement grâce à un dispositif d'accélération spécifique qui les transfère du vide vers un autre milieu. C'est la mise en œuvre du système d'accélération avec transfert de particules vers l'extérieur de l'appareil qui permet de différencier l'accélérateur de particules des générateurs électriques de rayons X.

Ce document concerne les accélérateurs d'électrons de 1 à 10 MeV. Son contenu peut cependant être extrapolé aux installations comprenant des appareils d'énergie au moins égale à 500 keV et d'une puissance supérieure à 5 kW. Il ne décrit que les installations génératrices d'électrons utilisés sous forme de rayonnements β et X. Son objectif est de donner des règles de radioprotection en abordant d'autres risques tels les dangers dus à la présence de l'électricité.

Un accélérateur comporte une source de production de particules chargées, un tube d'accélération qui leur communique de l'énergie cinétique et un système de balayage ou scanner destiné à guider les particules pour les projeter sur une cible. En pratique, le faisceau de particules accélérées est utilisé principalement pour des expériences de physique, des traitements médicaux en radiothérapie, des contrôles non destructifs en radiographie industrielle, des traitements de matériaux plastiques, des stérilisations de matériels à usage médical et des traitements divers de produits consommables (fruits, légumes, viandes, etc.).

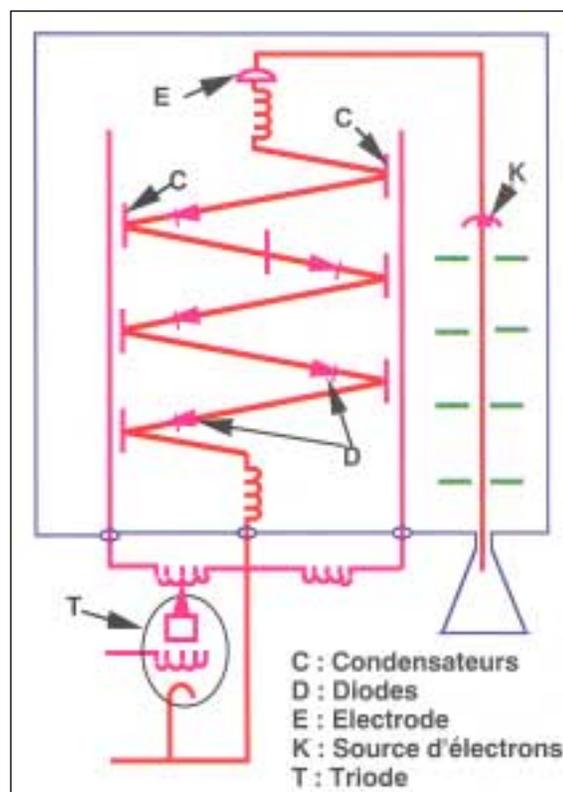


Figure 1 - Dynamitron

Note : Les auteurs remercient le Dr. G. ABADIA de l'INRS, G. BETTEBOURG, inspecteur du Travail DRTE Lorraine, J.C. ZERBIB, ingénieur CEA/UGSP et les experts du groupe M 60-1 du BNEN présidé par J. CHATELET pour l'aide apportée à la rédaction de ce document.

L'action du scanner sur le faisceau étroit d'électrons assure l'irradiation à des profondeurs plus ou moins importantes d'un objet fixe ou mobile. En sortie d'accélérateur, une fenêtre constituée d'une feuille de titane permet le passage des électrons vers l'extérieur et la cible sans affecter la qualité du vide des dispositifs de génération, d'accélération et de balayage.

On distingue trois catégories d'accélérateurs :

- les accélérateurs circulaires,
- les accélérateurs électrostatiques,
- les accélérateurs linéaires.

Les accélérateurs circulaires, mettant en œuvre des énergies considérables (supérieures à plusieurs dizaines de MeV), sont généralement classés en INB, "installations nucléaires de base". Ils sont réservés à la recherche scientifique et leur construction résulte souvent d'une coopération internationale. Ce type de matériel constitue le noyau de grands centres de recherches autour duquel s'affairent un certain nombre d'équipes spécialisées. Les cyclotrons et les synchrocyclotrons sont exclus de l'objet de ce document.

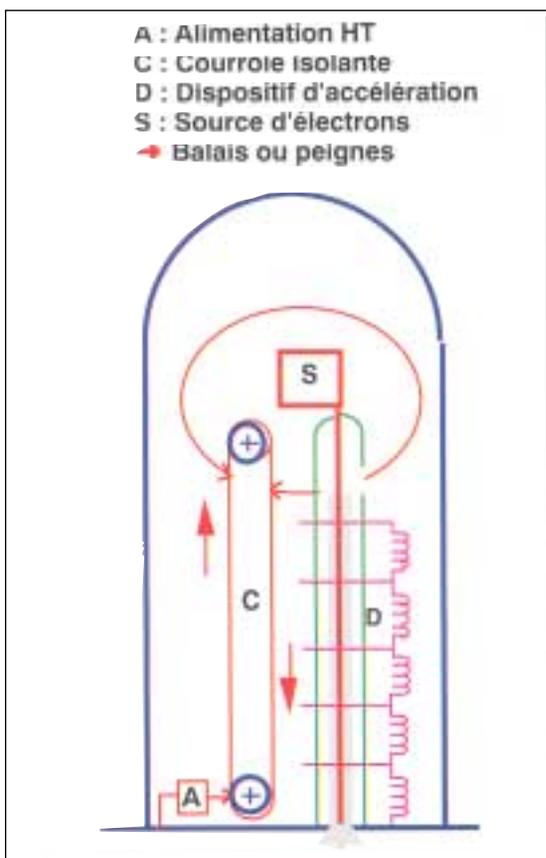


Figure 2 - Accélérateur «Van de Graaff»

2

FONCTIONNEMENT

2.1 ■ Les accélérateurs électrostatiques

Le principe du dynamitron (Figure 1) consiste à appliquer aux particules une tension constante obtenue par un système multiplicateur de potentiels. Dès 1930, Greinacher a développé un système où la production d'électrons est assurée par une triode T qui oscille à une fréquence de l'ordre de 200 kHz. Sous l'influence d'électrodes placées en face des condensateurs C, ceux-ci se chargent, le potentiel étant maintenu par des diodes D disposées entre les condensateurs successifs. Cette cascade de condensateurs protégés par les diodes produit une tension finale égale à la somme des tensions de redressement. Cette technologie a été exploitée industriellement grâce au développement des semiconducteurs de puissance. Il en a résulté des appareils des types Cockcroft et Walton.

Dans un accélérateur de type Van de Graaff (Figure 2), des charges électriques sont déposées, par influence ou effet de pointe, sur une courroie isolante qui les amène jusqu'à une électrode haute tension, le tube d'accélération se situant entre cette électrode et la masse. Pour éviter les possibilités de claquage dues à des tensions de l'ordre du million de volts, l'ensemble est disposé dans un diélectrique gazeux sous pression. Dans la configuration en tandem, les ions négatifs sont accélérés de la masse vers l'électrode haute tension où des électrons leur sont arrachés. Ils sont alors transformés en ions positifs pour être à nouveau accélérés de l'électrode vers la masse.

2.2 ■ Les accélérateurs linéaires

Les particules sont accélérées en ligne droite sous l'effet d'un champ électrique alternatif. Plusieurs variantes ont été développées (Figures 3 et 4).

La première consiste à maintenir un champ électrique alternatif entre des cavités cylindriques, appelées tubes de glissement. Leur longueur est calculée pour qu'il y ait synchronisation entre la phase du champ et la progression des particules. Celles-ci reçoivent une impulsion chaque fois qu'elles passent en paquet d'un tube à l'autre.

Pour la deuxième, l'émission d'une onde électromagnétique progressive qui se propage entraîne les particules par vagues. L'emploi de cavités supra-conductrices permet de produire des champs magnétiques plus intenses avec des longueurs de tubes et une puissance requise moindres. Un autre développement consiste à accélérer des électrons qui entraînent avec eux, grâce aux forces de Coulomb, des ions lourds qui atteignent des vitesses, donc des énergies cinétiques, considérables.

3

APPLICATIONS

- Radiologie et techniques connexes (radiothérapie, radiographie industrielle...)
- Ionisation agro-alimentaire (assainissement, conservation)
- Ionisation des produits médicaux et pharmaceutiques (stérilisation)
- Chimie sous rayonnement (polymérisation, vulcanisation, produits thermo-soudables ou thermo-retractables...)
- Traitements physiques, implantation ionique
- Production de radioisotopes
- Diagraphie en forage (pétrole, gaz naturel, géothermie, recherche minière...)
- Traitement de boues, déchets et effluents divers
- Traitement et durcissement de composants électroniques et d'équipements électriques.

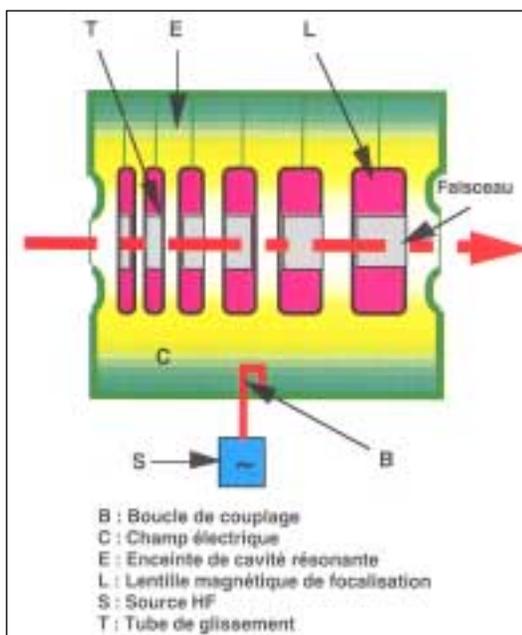


Figure 3 - Accélérateur à tubes de glissement

4

GRANDEURS PHYSIQUES

Un accélérateur, se trouvant à la frontière des théories des rayonnements électromagnétiques et des émissions corpusculaires, est caractérisé par l'énergie des particules du faisceau donnée en keV ou en MeV (kilo ou mégaélectronvolt).

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ joules (J)}$$

L'énergie du rayonnement dépend directement de la tension d'accélération. La dose absorbée par la matière est fonction de l'énergie et de l'intensité du faisceau.

La puissance électrique est le produit de la tension d'accélération par l'intensité du faisceau.

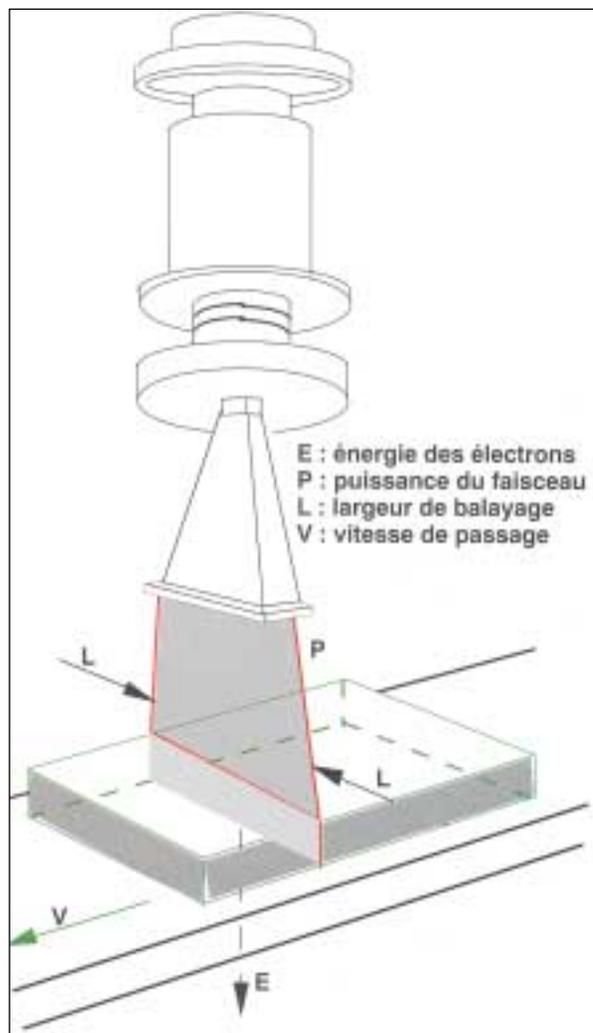


Figure 4 - Accélérateur en fonctionnement

5

UNITÉS D'EXPOSITION

Valables pour l'ensemble des rayonnements ionisants, elles se définissent par :

5.1 ■ La dose absorbée et le débit de dose

La dose absorbée D est l'énergie transmise à l'unité de masse de la matière irradiée. Le débit de dose d est l'énergie absorbée par unités de masse et de temps (généralement en h ou s).

D s'exprime en grays (Gy)

pour

$$D = 1 \text{ gray} \rightarrow D = 1 \text{ joule par kilogramme}$$

5.2 ■ L'équivalent de dose et son débit

L'équivalent de dose H est le produit de la dose absorbée par un facteur Q qui tient compte de l'impact de chaque type de rayonnement (α , β , γ , X et n) dans la matière. Le débit d'équivalent de dose h est l'équivalent de dose par unité de temps (en h ou en s).



LIMITE D'EXPOSITION EXTERNE

H s'exprime en sieverts (Sv)
pour $H = 1 \text{ Sv} \rightarrow H = 1 \text{ Gy} \cdot Q$
 $Q = 1$ (β , γ et X) ; $Q = 20$ (α) ; $Q = 2$ à 11 (n)

La limite du débit d'équivalent de dose qui peut être reçue par l'organisme pour 12 mois consécutifs est actuellement de 50 mSv. Les limites sont moins sévères en cas d'exposition partielle, des mains et des avant-bras, par exemple.

Note : La directive 96/29/Euratom du Conseil a été adoptée le 13 mai 1996. Elle fixe "les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants" et est publiée au Journal officiel des Communautés européennes, N° L.159 du 29 juin 1996 - pp. 1-114.



Figure 5 - Accélérateur industriel

Rhodotron (source) : Société NACRE, 78000 - Conflans-Sainte-Honorine.

LES ACCÉLÉRATEURS INDUSTRIELS ET MÉDICAUX DE PARTICULES DE 1 à 10 MeV

II - INSTALLATION - PRÉVENTION

G. Hée, INRS - DA/RPM avec la collaboration de D. Dugrillon, service Prévention CRAM du Centre

7

NORMALISATION FRANÇAISE

Il existe un fascicule de documentation édité par l'AFNOR (Tour Europe - 92049 - Paris-La Défense Cedex) sous l'indice C 74-209 concernant les accélérateurs médicaux d'électrons de 1 à 50 MeV.

Le groupe de travail **M 60/1** du **Bureau de Normalisation de l'Équipement Nucléaire (BNEN)** élabore un projet de norme française relative à l'installation d'accélérateurs industriels.

Sous réserve d'une adoption définitive et de son homologation, cette proposition «Accélérateurs industriels - Installations» sera classée sous l'indice :

M 62 - 105

8

INSTALLATION

8.1 ■ Affectation des locaux

8.1.1 - Zone de rayonnement

Elle renferme, en tout ou partie, l'accélérateur et le système de défilement des produits ou matériaux à traiter. L'accès dans cette zone est interdit pendant l'irradiation.

8.1.2- Zone hors rayonnement

Elle comprend généralement :

- les dispositifs de commande ,
- la partie hors rayonnement du système de défilement du produit à traiter.



Figure 6 - Accélérateur médical

8.2 ■ Réalisation des locaux

Toutes les parois et la géométrie du local d'irradiation sont calculées, conçues et réalisées de manière à respecter les règles en vigueur en ce qui concerne la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants. En particulier, ce local est muni de plusieurs dispositifs de sécurité raccordés dans une " chaîne de sécurité ". La rupture d'un " maillon de la chaîne ", (ouverture intempestive de porte, par exemple) arrête l'accélérateur.

Les sas, les orifices techniques et toute autre ouverture doivent être conçues de manière à assurer la bonne application des règles de radioprotection.

En ce qui concerne la radioprotection, les chicanes sont considérées comme faisant partie du local d'irradiation.

Dans le cas des installations équipées d'accélérateurs, les calculs de radioprotection permettent la réalisation des locaux d'irradiation de manière à ce que les équivalents de dose potentiellement subits par le personnel reste inférieurs aux limites réglementaires.

A l'arrêt, le local d'irradiation est à considérer comme une **zone contrôlée** dont l'accès est réglementé. Il doit être clairement signalé et délimité par l'affichage conventionnel ou normalisé (Figure 7).



Figure 7 - Exemple d'affiche

En fonctionnement, le local d'irradiation est une zone interdite (prévoir l'affichage "ZONE INTERDITE" avec trèfle rouge).

8.2.1 - Environnement des locaux

Les locaux doivent être réalisés selon les spécifications techniques du constructeur des accélérateurs qui doivent tenir compte des règles de sécurité applicables.

Si le type de traitement effectué ou la nature du produit traité ne permet pas de respecter les spécifications du constructeur, le local d'irradiation peut être constitué de deux locaux :

- un local de traitement dans lequel est émis le rayonnement et où est installé le système d'approvisionnement des produits ;
- un local équipement où est implanté l'accélérateur.

Le local d'irradiation (local traitement et accélérateur) est ventilé de manière à extraire l'ozone formé par ionisation de l'oxygène de l'air. La concentration de l'ozone sera ainsi limitée à 0,1 ppm dans le local et 1 ppm en cheminée d'évacuation des effluents. Les liaisons équipotentielles avec mise à la terre doivent être efficaces pour éviter tout choc électrique dû à l'électricité statique.

8.2.2 - Choix des matériaux

Les matériaux synthétiques, tels que polymères et élastomères sensibles à la dégradation oxydante sous rayonnement, sont à exclure du local d'irradiation à fort débit de dose. Dans tous les cas, la limite d'acceptabilité est définie en tenant compte des débits de dose, des durées d'exposition et des durées de vie prévisibles des équipements.

Les pièces en plastique sont à remplacer de préférence par du métal, de la céramique ou du verre. Les tuyauteries sont métalliques et les câbles électriques sont isolés à la fibre de verre siliconé, par exemple.

Pour les métaux, il est utilisé de préférence des alliages inoxydables ou rendu peu oxydables par un revêtement de surface. Indépendamment de la cible, les matériaux activables sont à éviter.

8.2.3 - Implantation des équipements

Dans le local d'irradiation, les luminaires, les équipements électriques de mesures et de contrôles sont placés au plus loin de la source de rayonnement. Dans certains cas, les équipements sont protégés par blindages pour être étanches à l'ozone. Les lubrifiants des pièces mécaniques en mouvement doivent avoir une bonne tenue à l'effet combiné rayonnement-ozone. D'une façon générale, l'approche globale de la prévention doit être assurée selon les dispositions de l'article L.230-2 du Code du travail (loi du 31 décembre 1991 : risques électriques, chimiques, maintenance, etc).

8.3 ■ Sécurité d'accès - signalisations

Sept règles d'or sont à retenir :

 Le local d'irradiation est une zone contrôlée dont l'accès est réglementé. L'accès est strictement interdit quand l'accélérateur est sous haute tension, donc susceptible de délivrer un rayonnement. Tous les accès doivent comporter des obstacles et être réalisés pour qu'ils ne puissent pas être franchis par inadvertance. Ces accès sont matérialisés par une triple signalisation lumineuse :

- un signal fixe de couleur **verte** qui doit être automatiquement commandé lors de l'alimentation basse tension du circuit de sécurité de l'accélérateur,
- un signal **orange** qui est mis en service au début de la procédure de vérification préalable avant la fermeture du circuit haute tension,
- un signal clignotant de couleur **rouge** qui doit fonctionner dès que l'accélérateur est alimenté en haute tension et pendant toute la durée de l'émission du faisceau de rayonnement.

Pour éviter, à l'arrêt de l'accélérateur, le danger lié à la présence de "courant sombre", les alimentations de la source de particules et de la haute tension doivent être coupées (cf.: A.M. du 10/10/77).

Pour être efficace, une signalisation optique (Figure 8) doit être bien visible, attirer l'attention et présenter un fonctionnement sûr (plusieurs lampes).

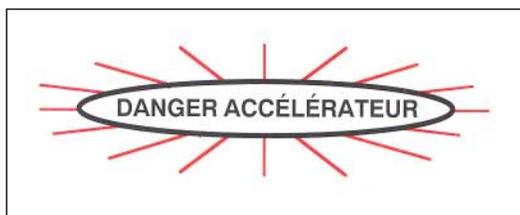


Figure 8 - Signalisation de danger

Toutes les portes d'accès au local d'irradiation doivent être équipées de dispositifs électriques à sécurité positive (microrupteurs à sécurité positive, par exemple) qui, à l'ouverture d'une de ces portes, coupent automatiquement l'alimentation haute tension. Lorsque cette dernière est coupée, seule la personne compétente en radioprotection peut autoriser l'accès dans le respect de procédures prévues à l'avance.

de rondiers temporisés disposés judicieusement dans le local d'irradiation. Ces contacts doivent être enclenchés dans un temps déterminé avant fermeture de la porte d'accès pour autoriser la mise sous haute tension de l'accélérateur.

Le verrouillage des portes d'accès doit déclencher un signal sonore indiquant la mise sous haute tension de l'accélérateur. Le local d'irradiation ainsi que ses accès doivent être équipés de dispositifs d'urgence, type coup de poing, qui mettent hors circuit tous les circuits électriques de l'accélérateur et de ses annexes.

Dans le cas particulier de fonctionnement de l'accélérateur en mode rayons X de freinage, la cible de conversion peut être activée. Dans ce cas, la cible est à considérer comme source radioactive. Il est alors nécessaire de définir une zone d'accès réglementée contrôlée ou surveillée au parage de la cible et un document affiché placé à proximité de cette zone indiquera la période d'activation de la cible.



SUIVI MÉDICAL

Le personnel de catégorie A doit tous les six mois faire l'objet d'un examen médical dont la teneur est déterminée par le médecin du travail. Une carte de suivi médical signée par le médecin du travail est à la disposition de chaque salarié.

ACTION	ETAT	SIGNAL	
		Accès	Pupitre
Alimentation BT du système de sécurité et des circuits annexes	Interdiction de la mise sous HT	Vert	Vert
Procédure : codes, clés prisonnières, cartes magnétiques, etc. Acquiescement rondier Fermeture des portes	Autorisation HT	Orange (vert éteint) et alarme sonore temporisée	Orange
Mise sous HT de l'accélérateur	Emission de rayonnement ionisant	Rouge (clignotant en phase réelle d'irradiation)	Rouge et alarme sonore temporisée
Arrêt de l'émission	Arrêt volontaire ou programmé	Orange (rouge éteint)	Orange
Ouverture des accès	Interdiction HT	Vert (Orange éteint)	Vert

Sécurité des interventions (accès locaux et pupitre)

L'ouverture des portes d'accès au local d'irradiation n'est possible qu'au moyen de clefs prisonnières au pupitre de commande de l'accélérateur en fonctionnement haute tension. L'enlèvement de l'une de ces clefs coupe automatiquement la haute tension. Tant que l'une des portes d'accès est ouverte, la clef reste prisonnière dans la serrure. De plus, l'ouverture d'une porte d'accès doit faire tomber automatiquement les contacts

Le dossier médical spécial doit comporter :

- la fiche des conditions de travail établie par la personne compétente ;
- le résultat des examens cliniques et de toutes analyses complémentaires (formule sanguine...) ;
- les résultats dosimétriques reportés sur une fiche d'exposition.

10

DISPOSITIONS ADMINISTRATIVES

Il y a lieu de procéder à la déclaration de détention d'un générateur électrique de rayonnements ionisants auprès de l'inspecteur du travail, une copie étant transmise au service Prévention de l'organisme de sécurité sociale compétent (CRAM, CGSS, MSA).

L'inspecteur du travail transmet à l'office central de protection contre les rayonnements ionisants les déclarations et informations dont il est détenteur.



En cas de transformation susceptible d'augmenter les risques d'exposition aux rayonnements ionisants du fait de transformations d'appareils ou installations émettrices ou d'installations constituant les dispositifs de protection, l'employeur doit renouveler la procédure de déclaration.

La manipulation et l'utilisation d'accélérateurs de particules sont effectuées sous la surveillance d'une personne compétente. Celle-ci, nommée par l'employeur, doit avoir suivi une formation agréée en radioprotection.

Un document, mis constamment à jour et tenu à la disposition de l'inspecteur du travail et des membres du CHSCT ou, à défaut, des délégués du personnel, indique pour chaque accélérateur :

- 1 - Les caractéristiques du générateur de rayonnements ionisants ;
- 2 - Toutes les modifications apportées aux matériel émetteur et dispositifs de protection ;
- 3 - La nature et la durée moyenne mensuelle des travaux exécutés ;
- 4 - Un exemplaire des consignes d'utilisation, d'intervention et de restriction d'accès ;
- 5 - Une copie des fiches des conditions de travail établies par la personne compétente ;
- 6 - La date des examens de contrôle réglementaires et les comptes rendus correspondants ;
- 7 - La désignation des travaux de réglage et de maintenance assortie des noms des personnes intervenantes.

11

BIBLIOGRAPHIE

11.1 ■ Rappels réglementaires

(Extraits de la publication du JO n° 1420)

- Décret n° 66-450 du 20 juin 1966 modifié par le décret n° 88-521 du 18 avril 1988 : Principes généraux de protection contre les rayonnements ionisants. (Cf. *Cahiers de notes documentaires*, 1988, **132**, pp. 519-523).
- Décret n° 86-1103 du 2 octobre 1986 modifié par les décrets n°88-662 du 20 mai 1988 et n° 91-963 du 19 septembre 1991 : Protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants.
- Arrêté du 19 avril 1968 modifié par l'arrêté du 30 septembre 1987 confirmant les conditions d'utilisation des dosimètres individuels destinés au contrôle des équivalents de dose reçus par les travailleurs directement affectés à des travaux sous rayonnements et exposés au risque d'irradiation externe.
- Arrêté du 10 octobre 1977 fixant des mesures particulières de sécurité pour certaines installations nucléaires de base pris en application du décret n° 75-308 du 28 avril 1975 (Protection des travailleurs en installations nucléaires de base).
- Arrêté du 25 novembre 1987 relatif à la formation des personnes compétentes.
- Arrêté du 1^{er} juin 1990 définissant les méthodes de contrôle prévues par le décret du 2 octobre 1986.
- Arrêté du 1^{er} octobre 1990 fixant les conditions et les modalités d'agrément des organismes habilités à procéder aux contrôles pour la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants ainsi que les modalités de l'autorisation prévue à l'article 29 du décret du 2 octobre 1986.
- Arrêté du 2 octobre 1990 fixant la périodicité des contrôles des sources scellées, des installations des appareils générateurs électriques de rayonnement ionisants et de leurs dispositifs de protection.
- Arrêté du 31 juillet 1991 fixant les modalités et le contenu de la carte de suivi médical.
- Arrêté du 28 août 1991 approuvant les recommandations faites aux médecins du travail assurant la surveillance médicale des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants.
- Décret n° 92-158 du 20 février 1992 complétant le Code du travail (deuxième partie : Décrets en Conseil d'Etat) et fixant les prescriptions particulières d'hygiène et de sécurité applicables aux travaux effectués dans un établissement par une entreprise extérieure.
- Arrêté du 19 mars 1993 fixant la liste des travaux dangereux pour lesquels il est établi un plan de prévention.
- Arrêté du 4 novembre 1993 relatif aux signaux de sécurité et de santé au travail.

11.2 ■ Documents CRAM et INRS (disponibles aux services Prévention des CRAM et à l'INRS)

- DUGRILLON D. - Contrôles non destructifs par rayonnements ionisants (décembre 1990), CRAM du Centre.
- Plaque informative «Radiations ionisantes, un risque invisible», 1987, CRAM du Centre.
- DUGRILLON D. - Éléments de radioprotection - Notions de physique atomique (février 1996), CRAM du Centre.
- Aide-mémoire de radioprotection. Paris, INRS, 1989, ED 483, 128 p. (mise à jour septembre 1992).
- Principes élémentaires de radioprotection. Paris, INRS, 1988, ED 658, 32 p.
- Signalisation de santé et de sécurité au travail. Réglementation. Paris, INRS, 1994, ED 777, 80 p.
- Électricité statique. Paris, INRS, 1993, ED 507, 84 p.