

212 FICHES RÉVISÉES

Radioprotection
Société Française de Radioprotection



À jour
des nouvelles
dispositions
réglementaires

Guide pratique

& Radionucléides & Radioprotection

D. Delacroix • J.-P. Guerre • P. Leblanc

Troisième édition

cea

edp sciences



Guide pratique

& Radionucléides & Radioprotection

D. Delacroix • J.-P. Guerre • P. Leblanc

Ce guide pratique est destiné aux utilisateurs de radionucléides travaillant au sein de laboratoires où sont mises en œuvre des substances radioactives. Il concerne tous les secteurs scientifiques et techniques, comme la médecine, la biologie, la recherche ou l'industrie. Il répond également aux besoins des personnels en charge de la radioprotection de ces laboratoires.

Un texte préliminaire rappelle les principales notions de physique des rayonnements et de radioprotection. Il introduit un corpus de plus de deux cents fiches traitant des radionucléides les plus couramment rencontrés. Ces données essentielles sur les caractéristiques nucléaires et la radioprotection aideront l'utilisateur dans sa démarche visant principalement à :

- quantifier les risques d'exposition interne ou externe liés à la manipulation ;
- optimiser la détection, les moyens de protection ainsi que les équipements et postes de travail.

Cet ouvrage a fait l'objet de plusieurs rééditions en langue française et anglaise principalement justifiées par l'évolution du cadre réglementaire. Ainsi, cette nouvelle édition révisée est établie à partir des législations françaises et européennes en vigueur.

www.edpsciences.org



9 782759 826360

ISBN : 978-2-7598-2636-0



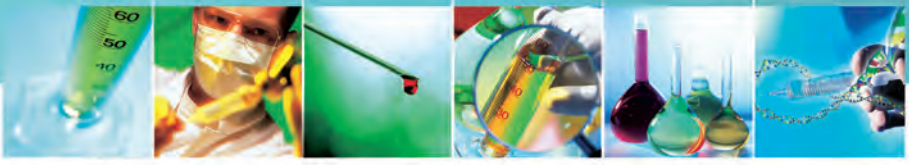
Guide pratique

& Radionucléides
Radioprotection

Troisième édition

À la mémoire de mes amis Jean-Paul Guerre et Paul Leblanc, deux grands professionnels de la radioprotection.

Daniel Delacroix



Guide pratique

& Radionucléides Radioprotection

Troisième édition

Manuel pour la manipulation
de substances radioactives
dans les laboratoires de faible
et moyenne activité

D. DELACROIX
J.-P. GUERRE
P. LEBLANC

À propos des auteurs :

D. DELACROIX, *Docteur en Physique, conseiller scientifique du CEA – DAM*

J.-P. GUERRE et **P. LEBLANC**, *Ingénieurs, ont exercé leurs activités professionnelles au Service de Protection contre les Rayonnements du CEA – Saclay*

Conception maquette et couverture : Beta Imprimerie (Espagne)

Mise en pages : Desk (53)

Illustrations : Francis Gullois CEA DIF/DASE

Imprimé en France

ISBN : 978-2-7598-2636-0 (papier) – 978-2-7598-2637-7 (ebook)

© 2022

EDP Sciences

17, avenue du Hoggar

91944 Les Ulis Cedex, France

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences, 2022



avant-propos

L'ouvrage *Radionucléides & Radioprotection* est principalement destiné aux utilisateurs de substances radioactives en milieu professionnel ainsi qu'aux personnels en charge de la radioprotection. Il est composé d'un texte préliminaire qui décrit les principales notions utiles dans le domaine de la protection contre les rayonnements ionisants et d'un ensemble de 212 fiches dédiées aux principaux radionucléides – soit plus de 20 000 données.

Cet ouvrage a fait l'objet de plusieurs rééditions en langue française et anglaise [1,2,3] essentiellement justifiées par l'évolution des recommandations internationales et de la réglementation en matière de radioprotection. Chaque nouvelle édition a été l'opportunité d'optimiser la forme de l'ouvrage et d'y introduire de nouvelles données tout en conservant le concept d'une page par radionucléide.

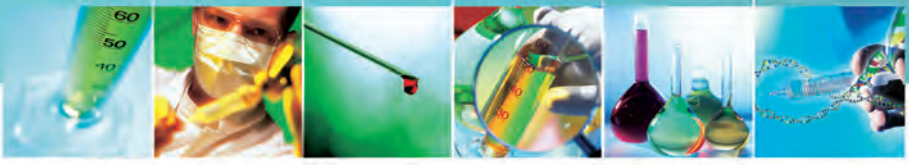
Ainsi, cette édition 2022 présente des évolutions significatives nécessitées par la transposition en droit français de la **dernière Directive Euratom 13/59 du 5 octobre 2013** ainsi que par les **nouvelles dispositions réglementaires** de ces dernières années. Celles-ci concernent par exemple les seuils d'exemption, les limites d'exposition, le zonage radiologique etc. Par ce fait, le texte introductif de l'ouvrage a été remanié en conséquence.

Daniel Delacroix



s o m m a i r e

Avertissement	3
Introduction	4
1] Notions de base : radioactivité et radioprotection	5
2] Risques liés à la manipulation des radionucléides	12
2.1] Risques à prendre en compte	12
2.2] Protection contre l'exposition externe et interne	13
2.3] Mesure de l'exposition externe et de la contamination	15
3] Description des fiches de radioprotection	15
3.1] Caractéristiques physiques	18
3.2] L'exposition externe	20
3.2.1] Exposition externe à distance	20
3.2.2] Exposition externe au contact de récipients	21
3.2.3] Exposition de la peau lors d'une contamination corporelle	21
3.3] L'exposition interne	22
3.3.1] Dose efficace engagée par unité d'incorporation	23
3.3.2] Limites Pratiques de Contamination dans l'Air (LPCA)	24
3.4] Écrans de protection, détection et contamination des surfaces	26
3.4.1] Écrans de protection contre l'exposition externe	26
3.4.2] Sonde(s) de détection préconisée(s)	27
3.4.3] Expositions dues à une surface plane uniformément contaminée	27
3.4.4] Limites Pratiques de Contamination Surfaccique (LPCS)	27
3.5] Activités Maximales Manipulables (AMM)	30
3.5.1] Le modèle de calcul	30
3.5.2] Activités Maximales Manipulables en fonction des équipements et des zones de travail	31
Références bibliographiques	33
Liste des radionucléides	35
212 fiches de radioprotection	40
Annexes	
Chaînes de filiations radioactives pour des éléments lourds	253



a v e r t i s s e m e n t

Issues des recommandations internationales appropriées et des réglementations européennes et françaises les plus récentes, les indications pratiques ou chiffrées proposées dans cet ouvrage peuvent être utilisées pour mettre à jour des consignes et des règles de travail qui seraient devenues obsolètes.

3

Cependant, elles ne peuvent, en aucun cas, se substituer aux décisions ou prescriptions des autorités réglementaires.



introduction

À la lumière d'une pratique quotidienne de la radioprotection et des différentes sessions de formation dispensées aux utilisateurs de substances radioactives dans les domaines de la médecine, de la biologie, de la recherche et de l'industrie, il est apparu nécessaire de rassembler les connaissances de base dans un guide destiné à ces divers utilisateurs.

Présenté sous forme de fiches spécifiques à chaque radionucléide, ce guide est un recueil de données scientifiques, techniques et médicales soit issues de diverses publications de référence soit déterminées par les auteurs à partir de modèles pertinents. Si le format retenu pour les fiches impose quelques contraintes – en particulier sur le choix des grandeurs à faire apparaître – il s'avère être un atout pour la facilité de lecture et d'accès à l'information. À cette fin, l'illustration et la présentation des données sous forme de tableaux ont été largement utilisées.

L'ensemble des informations contenues dans ces fiches correspond non seulement à des données théoriques indispensables pour évaluer les risques, mais fait également référence à une longue expérience des spécialistes en radioprotection « de terrain ».

Chaque fiche signalétique contient des informations présentées sous différentes rubriques fournissant successivement :

- des caractéristiques physiques du radionucléide et des valeurs de référence relatives à l'exemption de déclaration et à la réglementation des transports,
- des données de calculs de débits de dose pour différentes configurations de sources et de géométries y compris pour des contaminations cutanées,
- des données de calcul de limites pratiques de contamination surfacique et d'épaisseurs d'écrans et des indications relatives au choix des appareils de détection les plus adaptés,
- des valeurs de coefficients de dose par unité d'activité incorporée par inhalation ou ingestion ainsi que des valeurs dérivées et les organes les plus exposés,
- des recommandations sur les activités maximales manipulables dans les laboratoires de faible et moyenne activité en fonction de la classification de la zone de travail et des équipements utilisés (boîte à gants, hotte ventilée ou paillasse).

Il était également important que le contenu des fiches soit accessible – non pas aux seuls spécialistes en radioprotection – mais également à un public d'origine très diverse. À cette fin, le lecteur trouvera dans un texte préliminaire, les notions sur la radioactivité et la radioprotection nécessaires à la compréhension des données. Chaque rubrique présentée dans les fiches est ensuite explicitée (description du modèle, hypothèses retenues, paramètres, références, etc.).

Remarque : Certaines des valeurs « guides » présentées doivent être considérées comme indicatives et pourront être modulées en fonction des conditions « locales » de radioprotection.



1] Notions de base : radioactivité et radioprotection

RAPPELS : de la source radioactive à l'exposition !

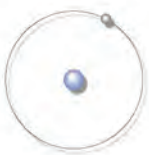
L'atome

La matière est constituée d'atomes. L'atome comprend un noyau autour duquel gravitent des électrons. Le noyau est lui-même constitué de protons et de neutrons – les nucléons – dont le nombre et la proportion varient selon l'élément (par exemple, le noyau d'hydrogène contient 1 proton, celui du plomb 210 contient 82 protons et 128 neutrons). Proton et électron portent une charge électrique égale mais opposée en signe, respectivement positive et négative. Le neutron n'est pas chargé électriquement.

Lorsque l'atome n'est pas ionisé, le nombre de protons est égal au nombre d'électrons ce qui en assure la neutralité.

La radioactivité

Hydrogène



Plomb 210

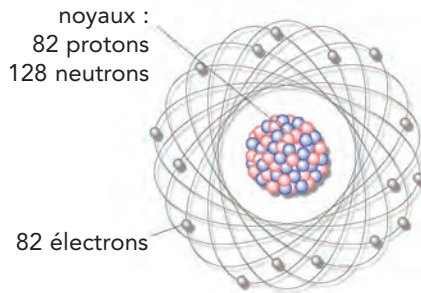
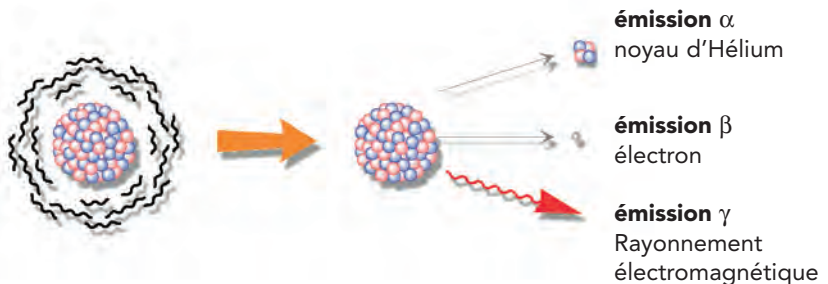


Schéma de l'atome

Dans la nature, les noyaux peuvent être stables ou instables. Les noyaux instables sont dits « radioactifs ». Ils vont tendre vers la stabilité en se désintégrant et en émettant des rayonnements (électromagnétiques, bêtas, alphas voire neutrons) qui emportent l'énergie libérée par la désintégration.

Désintégration d'un noyau instable



La radioactivité : un phénomène naturel ou artificiel



Enfin, la radioactivité sera dite « naturelle » ou « artificielle » selon qu'elle résulte d'un processus « technique » ou non (par exemple, l'irradiation, dans un réacteur nucléaire ou dans le faisceau d'un accélérateur de particules, peut transformer un élément stable en élément radioactif).

L'activité et le becquerel

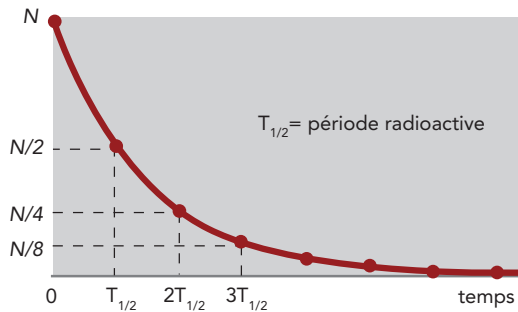
Une substance radioactive est caractérisée par son « activité ». Cette grandeur traduit le nombre de désintégrations qui se produit par unité de temps.

Avant l'introduction du Système International pour les unités de mesure (S.I.), l'activité était exprimée en curie (Ci). Le curie correspond au nombre de désintégrations par seconde produites par 1 gramme de radium à l'équilibre, soit 37 milliards de désintégrations par seconde.

Cette unité est remplacée depuis plusieurs années par le becquerel (Bq) qui est égal à 1 désintégration par seconde. Ainsi, 1 Ci équivaut à 37 milliards de Bq.

On utilise communément les multiples méga (MBq), giga (GBq) et térabecquerel (TBq) (respectivement, 1 million, 1 milliard et mille milliards de becquerels) ou plus rarement le sous-multiple milli-becquerel (mBq) pour les mesures liées à l'environnement.

La période radioactive



6

La période – notée $T_{1/2}$ – est le temps au bout duquel l'activité initiale est divisée de moitié. Ainsi, celle-ci sera divisée par 2 au bout d'une période, par 4 au bout de deux périodes etc. Les périodes peuvent être très différentes.

Exemples :

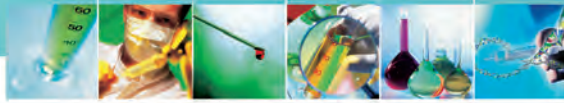
- 20 minutes pour le carbone 11,
- 8 jours pour l'iode 131,
- 5,3 ans pour le cobalt 60,
- 5730 ans pour le carbone 14,
- 4,5 milliards d'années pour l'uranium 238.

Les rayonnements γ , X, β , α , n

À chaque désintégration, le noyau radioactif peut générer simultanément des rayonnements de différentes natures :

- électromagnétique : photons γ issus du noyau ou X issus du cortège électronique de l'atome,
- particulaire : bêtas issus du noyau ou électrons issus du cortège électronique de l'atome, alpha (noyaux d'hélium) et parfois neutrons (cas du californium 252).

La nature électromagnétique ou particulaire confère aux rayonnements des modes d'interaction différents répondant à des lois physiques spécifiques (atténuation, parcours etc.).



L'énergie et le MeV

Les rayonnements sont caractérisés par leur énergie et leur pourcentage d'émission par désintégration.

L'énergie est exprimée en électron-volt (eV) ou plus généralement en ses multiples : kilo (keV) ou méga (MeV) électron-volt. On retiendra que 1 MeV est égal à $1,6 \cdot 10^{-13}$ joule.

Ainsi, le cobalt 60 émet 2 raies gamma à 1,17 et 1,33 MeV associées chacune à un pourcentage d'émission de 100 %.

Attention ! Dans l'évaluation du risque, l'activité est un paramètre important. Pour un même radionucléide, le risque sera globalement proportionnel à l'activité. Mais il est lié également à la nature, à l'énergie et à la quantité de rayonnements émis. Ainsi, pour une même activité, le risque d'exposition externe associé à une source de tritium est négligeable comparé à celui d'une source de cobalt 60.

La dose absorbée et le gray

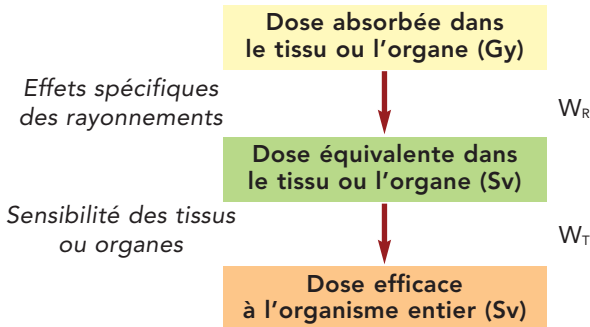
Les rayonnements déposent une fraction ou la totalité de leur énergie lorsqu'ils pénètrent dans la matière. La quantité d'énergie cédée par unité de masse de matière est appelée dose absorbée et s'exprime en gray (Gy).

$$\underline{1 \text{ Gy} = 1 \text{ Joule.kg}^{-1}}$$

L'effet des rayonnements et le sievert

L'effet des rayonnements sur l'organisme vivant dépend de la dose absorbée dans les tissus mais également de la nature du rayonnement et de la sensibilité des tissus ou organes irradiés.

Ainsi, la dose efficace qui rend compte de l'effet global des rayonnements sur l'organisme vivant résulte d'une modélisation du risque.



À partir de la dose absorbée, une double pondération est effectuée d'abord avec le facteur w_R prenant en compte la qualité du rayonnement puis avec le facteur w_T prenant en compte la sensibilité relative des tissus ou organes dans lesquels est répartie la dose absorbée.

Facteur w_R prenant en compte le type de rayonnement [4,5] :

Pour une même valeur de la dose absorbée, les photons, les neutrons ou les particules alpha n'ont pas la même « efficacité biologique ». La dose absorbée doit alors être pondérée en la multipliant par un facteur tenant compte de la qualité du rayonnement (« facteur de pondération w_R » défini dans le tableau ci-dessous). On parlera alors de dose équivalente qui sera exprimée en sievert (Sv).



Ainsi la « dose équivalente » H_T (Sv) au tissu ou à l'organe T sera égale à la dose absorbée par le tissu ou l'organe T pondérée suivant le type de rayonnement :

$$H_T (Sv) = \sum_R w_R \cdot D_{T,R} (Gy)$$

Enfin, la « dose équivalente engagée » pour un travailleur correspond implicitement à la dose équivalente intégrée sur 50 ans après incorporation si la durée d'intégration n'est pas précisée. Quand la durée est précisée, la dose équivalente intégrée est dite dose tronquée sur la période d'intégration considérée.

W_R pour différents types de rayonnements

W_T pour différents tissus ou organes

Types de rayonnements et énergies		W_R
X, γ (toutes énergies)		1
β , β^+ et électrons		1
Neutrons*	< 10 keV	2,5 à 3
	de 10 à 100 keV	3 à 10
	de 100 keV à 2 MeV	10 à 17,5
	de 2 MeV à 20 MeV	17,5 à 7
Protons (autres que protons de recul)	> 2 MeV	2
α , fragments de fission, noyaux lourds		20

Tissus ou organe	W_T
Gonades	0,08
Moelle osseuse (rouge)	0,12
Colon	0,12
Poumons	0,12
Estomac	0,12
Vessie	0,05
Sein	0,12
Foie	0,04
Œsophage	0,04
Thyroïde	0,04
Peau	0,01
Surface des os	0,01

8

*Fonction continue de l'énergie (CIPR 103)

Facteur w_T prenant en compte la sensibilité des tissus ou des organes [4,5] :

Pour considérer le détriment global des rayonnements agissant sur les différents tissus ou organes d'un individu, on définit la « dose efficace » à partir de laquelle sont fondées les limites de doses pour l'organisme entier.

La « dose efficace » est la somme des doses équivalentes délivrées aux différents tissus ou organes du corps, par exposition externe et interne, et pondérées par un « facteur de pondération tissulaire » w_T , propre au tissu ou à l'organe T, selon la formule suivante :

$$E (Sv) = \sum_T w_T \cdot H_T (Sv)$$

RAPPELS : les principes fondamentaux de la radioprotection

La protection des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants repose essentiellement sur les principes de justification, d'optimisation et de limitation [5,6].



Justifier l'activité humaine susceptible d'accroître l'exposition des individus,

justification

Optimiser les expositions afin qu'elles soient maintenues au niveau le plus faible raisonnablement possible, compte tenu des facteurs économiques et sociaux ,

optimisation

et enfin limiter les doses afin qu'elles ne dépassent pas les limites fixées pour les travailleurs exposés etc.

limitation

Ces principes se déclinent au travers des actions de prévention suivantes [5,7] :

- l'évaluation préalable des risques radiologiques et la mise en œuvre d'une démarche d'optimisation de la radioprotection,
 - la classification des lieux de travail en différentes zones en fonction du risque d'exposition associé,
 - la classification des travailleurs en fonction de l'exposition susceptible d'être reçue,
 - la mise en œuvre d'une réglementation et d'une surveillance, adaptées aux différentes zones de travail et le cas échéant, d'une surveillance individuelle,
 - la surveillance médicale,
- et au travers des limites de doses rappelées dans le tableau suivant :

		Travailleurs	Apprentis et étudiants (de 16 à 18 ans)	Femmes enceintes (grossesse déclarée)
Dose efficace Exposition externe et interne		20	6	Les dispositions prises pour l'exposition de la femme, dans son emploi, doivent être telles que l'exposition de l'enfant à naître soit aussi faible que raisonnablement possible et en tout état de cause en dessous de 1 mSv.
Dose équivalente	Cristallin*	100 mSv/ 20 mSv	15	
	mains, avant-bras pieds et chevilles	500	150	
	peau (dose moyenne sur 1 cm ²)	500	150	

*Du 1^{er} juillet 2018 au 30 juin 2023, la valeur limite d'exposition pour le cristallin est fixée à 100 mSv cumulées sur 5 ans sans dépasser 50 mSv sur 12 mois consécutifs.

À compter du 1^{er} juillet 2023, la limite est fixée à 20 mSv sur 12 mois consécutifs.

**Limites de dose en mSv pour 12 mois consécutifs.
(Art. R. 231-76 du code du travail) [12]**

Nota : les femmes qui allaitent ne doivent pas être affectées ou maintenues à des postes de travail comportant un risque d'exposition interne.



Le cadre réglementaire

La réglementation en matière de protection contre les rayonnements ionisants repose essentiellement sur les normes et recommandations établies par différents organismes internationaux. Parmi ceux-ci, citons la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) qui existe depuis 1928 et qui publie régulièrement les avancées des travaux de ses experts. L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) établit également des standards pour l'ensemble des domaines de la sûreté et de la radioprotection. À l'échelle européenne, les Directives Euratom constituent la base de la réglementation nationale une fois transcrites en droit français (exemple, la Directive Euratom 96/29 de 1996 remplacée par la 13/59 de 2013).

Ainsi, la détention et l'utilisation de substances radioactives doivent répondre à des obligations réglementaires qui garantissent la protection des personnes et des biens. Ces dispositions visent principalement le statut de l'installation, l'organisation des zones de travail, la surveillance du personnel et des locaux, la nature et la fréquence des contrôles etc. Leur objectif est de maintenir l'exposition du personnel en dessous des limites réglementaires tout en suivant, en permanence, une démarche d'optimisation.

Ces dispositions évoluent régulièrement au gré de l'avancement des connaissances et des exigences sociétales. Elles figurent dans les Codes du travail, de la santé publique, de l'environnement, de la défense et de la sécurité publique. Notons qu'on y retrouve également des textes relatifs aux missions de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire (loi TSN), à l'information du public etc.

Le statut de l'installation

La situation administrative des établissements qui abritent des laboratoires où sont utilisées des substances radioactives doit être conforme à la réglementation française. En particulier, au-delà de certains seuils dits « d'exemption », la détention et l'utilisation de substances radioactives sont soumises à autorisation ou déclaration conformément aux dispositions du Code de la santé publique. Si les quantités de substances radioactives détenues ou manipulées dépassent certaines valeurs, l'établissement devra être soumis au régime des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) ou des Installations Nucléaires de Base (INB). Dans le cas où il ne relève ni du régime des INB, ni des ICPE, il appartient alors au nucléaire dit de « proximité ».

Un référentiel de radioprotection adapté au statut...

La conception des laboratoires, la qualité des équipements, l'organisation des zones de travail, la nature et la fréquence des contrôles, les contraintes nécessaires pour assurer la protection des personnes et des biens etc. vont dépendre du classement administratif de l'installation.

On distinguera globalement les installations qui comportent des laboratoires dits de « haute activité » (Installations Nucléaires de Base, certaines ICPE) de celles qui abritent des laboratoires de « faible et moyenne activité » et qui appartiennent souvent au nucléaire de « proximité ».

Les « laboratoires de haute activité »

La conception de l'installation et les équipements des laboratoires sont adaptés aux activités manipulées qui peuvent être très élevées. On y trouve généralement :

- des circuits de ventilation et de filtration raccordés à des émissaires de rejets gazeux ou cheminées,
- un contrôle continu de la contamination atmosphérique et de l'irradiation externe,
- des blindages pour la protection contre l'irradiation externe,
- des détecteurs pour la prévention contre les incendies et présence de « secteurs feu »,
- des vestiaires et sas d'accès aux zones de travail,
- etc.



Pour ces installations, il est nécessaire de faire des études de radioprotection particulières ou d'établir des dossiers de sûreté assortis de prescriptions techniques. Le contrôle de bon fonctionnement des équipements y est, par exemple, obligatoire.

Les « laboratoires de faible et moyenne activité »

Les laboratoires ne comportent généralement que des équipements simples (paillasse, hottes ventilées ou boîtes à gants). En général, ces laboratoires ne possèdent pas de moyens de contrôle de radioprotection en continu, ni d'émissaire de rejets gazeux suffisamment surélevé pour éviter tout recyclage.

En contrepartie, les activités des sources non scellées manipulées y sont faibles et, très souvent, n'atteignent pas les limites supérieures des activités fixées pour les ICPE soumises à simple déclaration.

Les zones de travail

Dans une installation nucléaire il est nécessaire de fixer des règles techniques d'aménagement des locaux de travail et de réglementer l'accès aux zones où sont utilisés ou entreposés des radionucléides ou des appareils émettant des rayonnements [8,9].

Ainsi, il faut évaluer les niveaux d'exposition externe et, le cas échéant, interne, autour des sources de rayonnements ionisants et identifier toute zone où les travailleurs sont susceptibles d'être exposés à des niveaux de rayonnements ionisants dépassant :

- pour l'organisme entier, évalués à partir de la dose efficace : 0,08 mSv par mois,
- pour les extrémités ou la peau, évalués à partir de la dose équivalente : 4 mSv par mois,
- pour la concentration d'activité du radon dans l'air, évaluée en dose efficace : 6 mSv par an.

Avant le 1^{er} juillet 2018, la délimitation des zones était également exprimée en débit de dose instantané. Désormais, les niveaux d'exposition sont considérés sur une durée d'autant plus longue que le risque est faible. Par ailleurs, l'évaluation des niveaux d'exposition retenus pour identifier ces zones est réalisée en considérant que le lieu de travail est occupé de manière permanente. Si dans ces conditions, les niveaux d'exposition définis ci-dessus sont dépassés, alors on établira :

– une zone surveillée :

bleue : lorsque la dose efficace est inférieure à 1,25 mSv intégrée sur 1 mois ;

– une zone contrôlée :

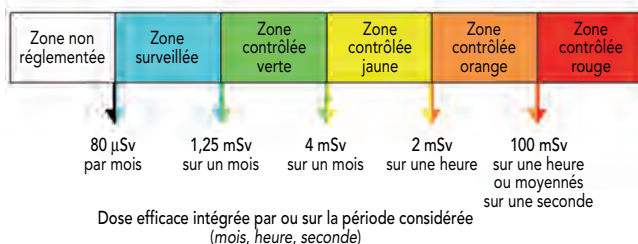
verte : lorsque la dose efficace est inférieure à 4 mSv intégrée sur 1 mois ;

jaune : lorsque la dose efficace est inférieure à 2mSv intégrée sur 1 heure ;

orange : lorsque la dose efficace est inférieure à 100 mSv intégrée sur 1 heure ou supérieure à 100 mSv moyennée sur 1 seconde ;

rouge : lorsque la dose efficace est supérieure à 100 millisieverts intégrée sur une heure ou que la dose efficace moyennée sur une seconde est supérieure à 100 mSv.

Zonage radiologique





Pour le risque d'exposition des extrémités et de la peau, une seule zone dénommée « zone d'extrémité » est désormais retenue pour matérialiser ce risque. Toutefois, cette zone n'est mise en place que lorsque la zone délimitée au titre de la dose efficace ne permet pas de garantir le respect des valeurs limites d'exposition professionnelle pour les extrémités et la peau.

La classification des travailleurs

En vue de déterminer les conditions dans lesquelles doivent être effectuées la surveillance radiologique et la surveillance médicale, on distingue deux catégories réglementaires de travailleurs susceptibles d'être exposés [10] :

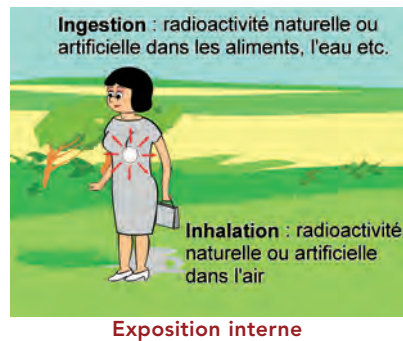
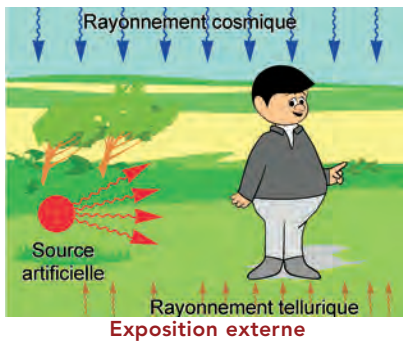
- les travailleurs de **catégorie A** qui sont susceptibles de recevoir, dans les conditions habituelles de travail, une dose efficace supérieure à 6mSv sur 12 mois consécutifs ou bien une dose équivalente supérieure à 150 mSv pour la peau et/ou les extrémités,
- les travailleurs de **catégorie B** qui sont susceptibles de recevoir sur 12 mois consécutifs une dose efficace supérieure à 1mSv et/ou une dose équivalente supérieure à 15 mSv pour le cristallin ou 50 mSv pour la peau et ou les extrémités.

2] Risques liés à la manipulation des radionucléides

2.1] Risques à prendre en compte

Ces risques sont répertoriés selon les deux modes d'exposition aux rayonnements ionisants : l'exposition externe et l'exposition interne.

12



Les risques d'exposition externe

On distingue les modes d'exposition suivants :

- l'exposition externe « **AU CONTACT** ». La manipulation des substances radioactives amène à toucher les récipients qui les contiennent (bêchers, pipettes, seringues...), ou, en cas d'incident, les matériels qui ont pu être souillés par ces substances,
- l'exposition externe « **À DISTANCE** ». Toutes les parties du corps de l'opérateur restent éloignées des substances radioactives. Toutefois, les mains et les avant-bras peuvent être davantage exposés lors de manipulations avec ou sans pinces,
- l'exposition externe « **PAR IMMERSION** » dans un « nuage ». Ce type de risque, moins fréquent, se rencontre lors de la manipulation de sources radioactives gazeuses. Il doit être pris en compte dans les laboratoires qui jouxtent les cyclotrons pour la fabrication des radionucléides à vie courte (par exemple, ^{18}F , ^{14}C , ^{123}I , etc.).



Annexe 4

Filiations du Plutonium 241

Activités (en Bq) représentées par 1 Bq du radionucléide tête de chaîne en fonction de son âge.
Référence : RadDecay for Windows Version 1.13 GROVE (Kocher)

I - Tête de la filiation : Plutonium 241 (chaîne complète)

Radionucléides de la chaîne	Période	âge du Plutonium 241						
		0,1 j	1 j	10 j	100 j	1 an	10 ans	100 ans
Pu - 241	14,4 a	1	1	1	1	1	1	1
0,00002 Pu - 241 → U - 237								
0,99998 Pu - 241 → Am - 241								
U - 237	6,75 j	$2,50 \cdot 10^{-7}$	$2,39 \cdot 10^{-6}$	$1,57 \cdot 10^{-5}$	$2,45 \cdot 10^{-5}$	$2,45 \cdot 10^{-5}$	$2,45 \cdot 10^{-5}$	$2,45 \cdot 10^{-5}$
Np - 237	$2,14 \cdot 10^6$ a	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$2,76 \cdot 10^{-10}$	$3,59 \cdot 10^{-8}$	$9,87 \cdot 10^{-5}$
Pa - 233	27,0 j	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$2,24 \cdot 10^{-10}$	$3,52 \cdot 10^{-8}$	$9,86 \cdot 10^{-5}$
U - 233	$1,59 \cdot 10^5$ a	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$1,85 \cdot 10^{-8}$
Th - 229	$7,34 \cdot 10^3$ a	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$
Ra - 225	14,8 j	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$
Ac - 225	10,0 j	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$
Fr - 221	4,8 mn	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$
At - 217	32,3 ms	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$
Bi - 213	45,6 mn	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$
0,9784 Bi - 213 → Po - 213								
0,0216 Bi - 213 → Tl - 209								
0,9784 Bi - 213 → Po - 213								
Po - 213	4,2 µs	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$
Tl - 209	2,20 mn	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$
Pb - 209	3,25 h	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$
Activité totale pour 1 Bq de Pu 241 :		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	4,6

261

II - Tête de la filiation : Plutonium 241 (1^{er} descendants)

Radionucléides de la chaîne	Période	âge du Plutonium 241				
		1 an	10 ans	40 ans	70 ans	100 ans
Pu - 241	14,4 a	1	1	1	1	1
0,00002 Pu - 241 → U - 237						
0,99998 Pu - 241 → Am - 241						
U - 237	6,75 j	$1,64 \cdot 10^{-3}$	$2,04 \cdot 10^{-2}$	$1,87 \cdot 10^{-1}$	$8,61 \cdot 10^{-1}$	3,58
Np - 237	$2,14 \cdot 10^6$ a	$2,76 \cdot 10^{-10}$	$3,59 \cdot 10^{-8}$	$1,61 \cdot 10^{-6}$	$1,50 \cdot 10^{-5}$	$9,87 \cdot 10^{-5}$
Activité totale pour 1 Bq de Pu 241 :		1,0	1,0	1,2	1,9	4,6

III - Tête de la filiation : Neptunium 237 (1^{er} descendants)

Radionucléides de la chaîne	Période	âge du Neptunium 237				
		1 j	10 j	50 j	100 j	équilibre
Np - 237	$2,14 \cdot 10^6$ a	1	1	1	1	1
Pa - 233	27,0 j	$2,53 \cdot 10^{-2}$	$2,56 \cdot 10^{-1}$	$7,23 \cdot 10^{-1}$	$9,23 \cdot 10^{-1}$	1,00
U - 233	$1,59 \cdot 10^5$ a	$1,52 \cdot 10^{-10}$	$1,41 \cdot 10^{-8}$	$2,60 \cdot 10^{-7}$	$7,63 \cdot 10^{-7}$	$4,31 \cdot 10^{-5}$
Activité totale pour 1 Bq de Np 237 :		1,0	1,2	1,7	1,9	2,0



Annexe 4

Filiations du Plutonium 241 (suite)

Activités (en Bq) représentées par 1 Bq du radionucléide tête de chaîne en fonction de son âge.

Référence : RadDecay for Windows Version 1.13 GROVE (Kocher)

IV - Tête de la filiation : Thorium 229 (chaîne complète)

Radionucléides de la chaîne	Période	âge du Plutonium 241				
		1 j	10 j	100 j	150 j	équilibre
Th - 229	7,34.10 ³ a	1	1	1	1	1
Ra - 225	14,8 j	4,58.10 ²	3,74.10 ¹	9,91.10 ¹	9,99.10 ¹	1,00
Ac - 225	10,0 j	1,56.10 ³	1,11.10 ¹	9,74.10 ¹	9,97.10 ¹	1,00
Fr - 221	4,8 mn	1,55.10 ³	1,11.10 ¹	9,74.10 ¹	9,97.10 ¹	1,00
At - 217	32,3 ms	1,55.10 ³	1,11.10 ¹	9,74.10 ¹	9,97.10 ¹	1,00
Bi - 213	45,6 mn	1,41.10 ³	1,10.10 ¹	9,73.10 ¹	9,97.10 ¹	1,00
Po - 213	4,2 µs	1,38.10 ³	1,08.10 ¹	9,52.10 ¹	9,76.10 ¹	9,78.10 ¹
Tl - 209	2,20 mn	3,04.10 ⁵	2,39.10 ³	2,10.10 ²	2,15.10 ²	2,16.10 ²
Pb - 209	3,25 h	9,56.10 ⁴	1,07.10 ¹	9,73.10 ¹	9,96.10 ¹	1,00
Activité totale pour 1 Bq de Th 229 :		1,1	2,0	7,8	8,0	8,0

V - Tête de la filiation : Radium 225 (chaîne complète)

Radionucléides de la chaîne	Période	âge du Radium 225				
		0,1 j	1 j	10 j	100 j	équilibre
Ra - 225	14,8 j	1	1	1	1	1
Ac - 225	10,0 j	6,92.10 ³	6,85.10 ²	6,21.10 ¹	2,76	3,08
Fr - 221	4,8 mn	6,59.10 ³	6,82.10 ¹	6,21.10 ¹	2,76	3,08
At - 217	32,3 ms	6,59.10 ³	6,82.10 ²	6,21.10 ¹	2,76	3,08
Bi - 213	45,6 mn	3,83.10 ³	6,53.10 ²	6,19.10 ¹	2,76	3,09
Po - 213	4,2 µs	3,74.10 ³	6,39.10 ²	6,08.10 ¹	2,70	3,02
Tl - 209	2,20 mn	7,98.10 ⁵	1,41.10 ³	1,34.10 ²	5,97.10 ²	6,68.10 ²
Pb - 209	3,25 h	6,29.10 ⁴	5,24.10 ²	6,14.10 ¹	2,79	3,12
Activité totale pour 1 Bq de Ra 225 :		1,0	2,0	4,7	17,6	19,6

VI - Tête de la filiation : Actinium 225 (chaîne complète)

Radionucléides de la chaîne	Période	âge de l'Actinium 225		
		1 h	3 h	équilibre
Ac - 225	10,0 j	1	1	1
Fr - 221	4,8 mn	1,00	1,00	1,00
At - 217	32,3 ms	1,00	1,00	1,00
Bi - 213	45,6 mn	5,51.10 ¹	9,30.10 ¹	1,00
Po - 213	4,2 µs	5,40.10 ¹	9,10.10 ¹	9,82.10 ¹
Tl - 209	2,20 mn	1,13.10 ²	2,00.10 ²	2,17.10 ²
Pb - 209	3,25 h	5,58.10 ²	3,18.10 ¹	1,02
Activité totale pour 1 Bq d' Ac 225 :		4,2	5,2	6,0

VII - Tête de la filiation : Bismuth 213 (chaîne complète)

Radionucléides de la chaîne	Période	âge du Bismuth 213		
		0,1 h	1 h	3 h
Bi - 213	45,6 mn	1	1	1
Po - 213	4,2 µs	9,78.10 ¹	9,78.10 ¹	9,78.10 ¹
Tl - 209	2,20 mn	2,16.10 ²	2,27.10 ²	2,27.10 ²
Pb - 209	3,25 h	3,74.10 ²	3,08.10 ¹	2,17
Activité totale pour 1 Bq de Bi 213 :		2,0	2,3	4,2