

Les rayonnements ionisants

Prévention et maîtrise du risque

L'Institut national de recherche et de sécurité (INRS)

Dans le domaine de la prévention des risques professionnels, l'INRS est un organisme scientifique et technique qui travaille, au plan institutionnel, avec la CNAMTS, les CRAM-CGSS et plus ponctuellement pour les services de l'État ainsi que pour tout autre organisme s'occupant de prévention des risques professionnels.

Il développe un ensemble de savoir-faire pluridisciplinaires qu'il met à la disposition de tous ceux qui, en entreprise, sont chargés de la prévention : chef d'entreprise, médecin du travail, CHSCT, salariés. Face à la complexité des problèmes, l'Institut dispose de compétences scientifiques, techniques et médicales couvrant une très grande variété de disciplines, toutes au service de la maîtrise des risques professionnels.

Ainsi, l'INRS élabore et diffuse des documents intéressant l'hygiène et la sécurité du travail : publications (périodiques ou non), affiches, audiovisuels, site Internet... Les publications de l'INRS sont distribuées par les CRAM. Pour les obtenir, adressez-vous au service prévention de la Caisse régionale ou de la Caisse générale de votre circonscription, dont l'adresse est mentionnée en fin de brochure.

L'INRS est une association sans but lucratif (loi 1901) constituée sous l'égide de la CNAMTS et soumise au contrôle financier de l'État. Géré par un conseil d'administration constitué à parité d'un collège représentant les employeurs et d'un collège représentant les salariés, il est présidé alternativement par un représentant de chacun des deux collèges. Son financement est assuré en quasi-totalité par le Fonds national de prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles.

Les Caisses régionales d'assurance maladie (CRAM) et Caisses générales de sécurité sociale (CGSS)

Les Caisses régionales d'assurance maladie et les Caisses générales de sécurité sociale disposent, pour participer à la diminution des risques professionnels dans leur région, d'un service prévention composé d'ingénieurs-conseils et de contrôleurs de sécurité.

Spécifiquement formés aux disciplines de la prévention des risques professionnels et s'appuyant sur l'expérience quotidienne de l'entreprise, ils sont en mesure de conseiller et, sous certaines conditions, de soutenir les acteurs de l'entreprise (direction, médecin du travail, CHSCT, etc.) dans la mise en œuvre des démarches et outils de prévention les mieux adaptés à chaque situation.

Ils assurent la mise à disposition de tous les documents édités par l'INRS.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'INRS, de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite.

Il en est de même pour la traduction, l'adaptation ou la transformation, l'arrangement ou la reproduction, par un art ou un procédé quelconque (article L. 122-4 du code de la propriété intellectuelle).

La violation des droits d'auteur constitue une contrefaçon punie d'un emprisonnement de deux ans et d'une amende de 150 000 euros (article L. 335-2 et suivants du code de la propriété intellectuelle).

© INRS, 2005. Illustration couverture Bernard Chadebec. Illustrations intérieur Illustratek. Maquette Catherine Picard.

Les rayonnements ionisants

Prévention et maîtrise du risque

Jean-Pierre Servent, INRS
Christine Gauron, INRS
Marie-Hélène Boulay, INRS

SOMMAIRE

Introduction	5
Avant-propos	7
La prévention en entreprise	8
Effets des rayonnements ionisants sur la matière	10
1. Prévention, radioprotection et méthodologie de la maîtrise du risque	13
1.1 Principes généraux de prévention définis par le code du travail	15
1.2 Principes de radioprotection issus de la CIPR	15
1.3 Maîtrise des risques	16
2. Démarche de prévention et de maîtrise du risque appliquée aux rayonnements ionisants	17
2.1 Identifier le danger et caractériser les situations dangereuses	19
2.2 Évaluer le risque et mettre en œuvre les mesures de prévention	22
2.2.1 Évaluation du risque <i>a priori</i> et mise en œuvre des mesures de prévention initiales ...	22
2.2.2 Maîtrise des mesures de prévention	32
2.2.3 Évaluation <i>a posteriori</i>	33
Fiches	35
Fiche 1. Évaluation de l'exposition externe E_{ext}	36
Fiche 2. Évaluation du risque de contamination	37
Fiche 2-A. Évaluation du risque de contamination par inhalation E_{inh}	38
Fiche 2-B. Évaluation du risque de contamination par ingestion E_{ing}	40
Fiche 3. Évaluation du risque de contamination par contact E_{cont}	41
Annexes	43
Annexe 1. Émissions radioactives et interactions des rayonnements avec la matière	45
Annexe 2. Analyse d'un accident dans une installation de traitement par ionisation en secteur industriel	54
Bibliographie	56

INTRODUCTION



Avant-propos

Ce document est le complément technique de la brochure ED 932, *Les rayonnements ionisants. Paysage institutionnel et réglementation applicable*.

Il présente une approche applicable à toute situation de travail susceptible d'entraîner une exposition aux rayonnements ionisants.

En premier lieu, la nature et l'énergie des rayonnements primaires et secondaires pouvant entraîner une exposition dans une situation de travail donnée doivent être identifiées. Il est alors possible de définir et mettre en œuvre les mesures de prévention qui permettent de maîtriser les expositions. Ces mesures de prévention se rapportent :

□ Pour ce qui concerne l'évitement des expositions aiguës aux rayonnements ionisants, à la maîtrise des événements et circonstances qui conduiraient à une défaillance du processus.

Les méthodes connues classiques (analyse des modes de défaillance et de leurs effets, arbre des causes, etc.), associées à la mise en œuvre des sécurités qui permettent de surveiller et maîtriser le processus avec la fiabilité nécessaire sont applicables dans ce cas. Le contexte de travail (charge, contraintes diverses, contexte de l'entreprise, facteur humain) joue également un rôle non négligeable dans la survenue de situations d'incidents ou d'accidents.

□ Pour ce qui concerne les expositions chroniques aux rayonnements ionisants :

- à la maîtrise des événements et circonstances (incorporation de radionucléides par inhalation, ingestion ou contact) qui conduiraient à une exposition interne aux rayonnements ionisants ou à une exposition externe. De telles expositions, lorsqu'elles ne peuvent pas être évitées, doivent être surveillées au poste de travail et réduites. La participation active de l'entreprise et de chacun des acteurs de terrain de la prévention est indispensable à ce stade.

- Les moyens utilisables pour prévenir les contaminations sont identiques à ce qui se fait dans le cadre de la maîtrise du risque d'exposition à un toxique chimique. Les moyens utilisables pour éliminer ou réduire les expositions externes sont similaires à ce qui se fait dans le cadre de la maîtrise du risque d'exposition à un bruit acoustique, puisqu'elles se rapportent à la mise en œuvre d'écrans adaptés à la nature des rayonnements, à l'éloignement par rapport à la source de rayonnement et à la réduction de la durée d'exposition.

Cette approche est applicable :

- que le processus concerné soit continu, manufacturier ou de laboratoire ;
- quelle que soit la phase au cours de laquelle une intervention humaine est nécessaire (conception, exploitation, maintenance, mise au rebut, démantèlement).

La prévention en entreprise

L'objet de ce document est de développer, dans le contexte décrit ci-dessous, les aspects de la prévention qui concernent les processus mettant en œuvre les rayonnements ionisants.

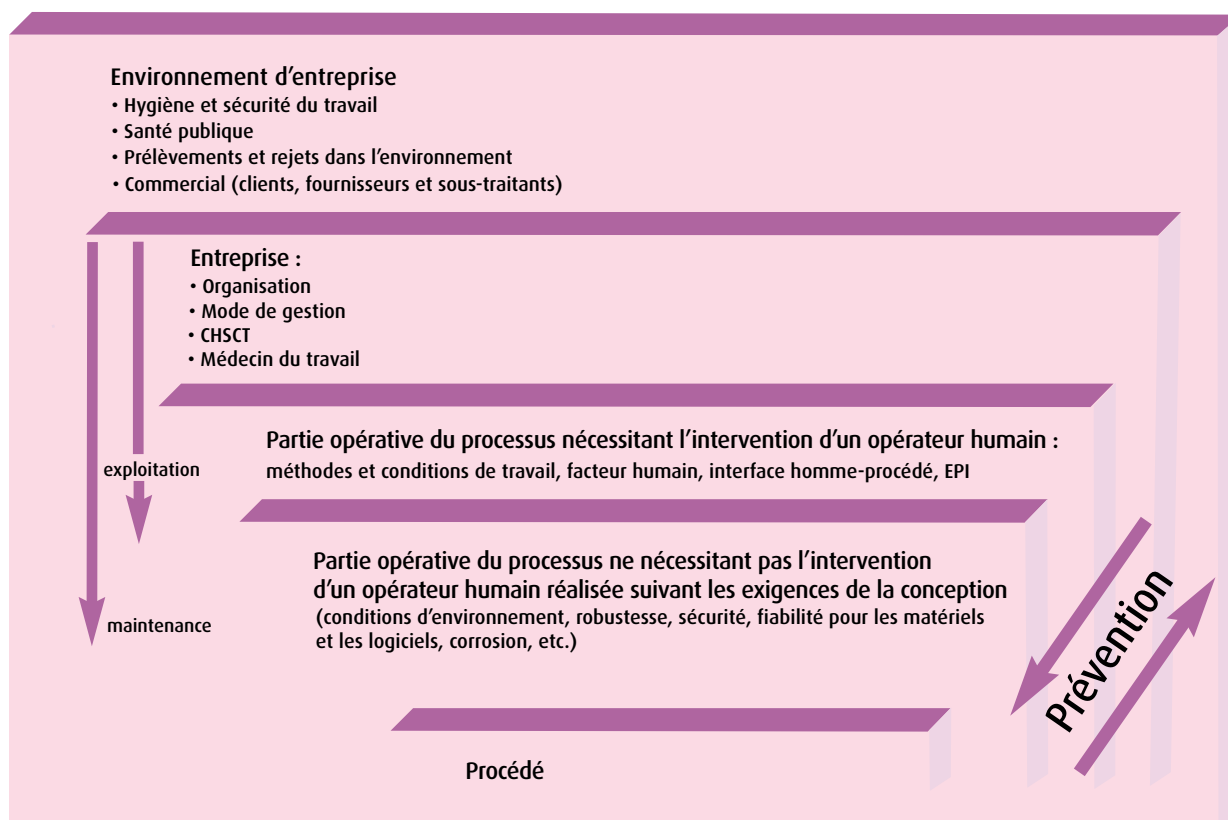
Ces processus, qui peuvent être de laboratoire, médical, industriel (manuel, manufacturier ou continu) sont construits pour mettre en œuvre un procédé et comprennent (voir figure 1) :

- **Une partie opérative ne nécessitant pas d'intervention humaine :** à ce niveau, c'est la prise en compte de considérations concernant la robustesse des installations, les conditions physico-chimiques du processus, la sécurité et la fiabilité intégrées aux matériels et aux logiciels, les conditions d'environnement, le vieillissement, la corrosion, etc., qui permet de concevoir, construire et maintenir la sécurité.
- **Une partie opérative nécessitant une intervention humaine :** à ce niveau ce sont les méthodes et conditions de travail, les interfaces homme/processus qui conditionnent la santé et la sécurité au travail.
- **L'ensemble prenant place dans une entreprise :** chaque entreprise a son organisation et son mode de gestion du personnel qui lui sont propres et qui influencent la sécurité du personnel. Le CHSCT et le médecin du travail participent aussi, à ce niveau, à la santé et à la sécurité du personnel.
- **L'entreprise est elle-même située dans un environnement d'entreprise :** cet environnement d'entreprise concerne la santé publique, l'hygiène et la sécurité au travail, les prélèvements et rejets dans l'environnement, les déchets industriels et bien entendu les relations commerciales avec les clients, fournisseurs et sous-traitants.

Dans ce contexte, l'entreprise exploite son processus industriel et en assure la maintenance. La maintenance nécessite une intervention profonde, au cœur même de l'installation qui réalise le processus.

La prévention agit sur tous les niveaux du modèle décrit ci-dessus afin de déterminer et mettre en œuvre les mesures les plus appropriées pour garantir la santé et la sécurité au travail, sans détriment pour l'environnement et la santé publique. Chacun peut se rendre compte, à partir d'exemples issus de sa propre expérience ou de ses connaissances, que toute action sur l'un de ces niveaux (analyse de sensibilité du modèle) a en général une influence sur un ou plusieurs des autres niveaux.

Figure 1. Prévention en entreprise



Effets des rayonnements ionisants sur la matière

Les effets des rayonnements sur la matière se rapportent aux interactions entre particules qui sont résumées en annexe 1 de ce document. La nature de ces interactions entre dans l'une ou l'autre des catégories suivantes :

- ❑ La matière diffuse les rayonnements incidents.
- ❑ Les rayonnements ionisants émis par une source (rayonnements primaires) transfèrent leur énergie en perturbant le cortège électronique des atomes (phénomènes d'excitation) qui sont sur leur passage ou en passant à proximité de noyaux atomiques. Ces interactions donnent lieu à l'émission de nouveaux rayonnements qui sont également ionisants.
- ❑ Dans des conditions dépendant à la fois de la nature et de l'énergie des rayonnements incidents, du nombre de masse des particules incidentes et du nombre de masse des noyaux impactés, ceux-ci sont eux-mêmes modifiés et portés dans un état instable (dans certains cas, formation de radio-nucléides de période élevée). Ils réagissent en émettant de nouveaux rayonnements. C'est le phénomène d'activation qui concerne en premier lieu les matériaux constitutifs des installations. Lorsque ce phénomène se produit, les rayonnements émis par la matière activée concernent aussi le personnel présent autour des installations. Lorsque les noyaux impactés captent ou émettent des particules chargées, il y a modification de leur nature chimique.
- ❑ Dans certains cas plus particuliers, la fission spontanée ou induite de certains noyaux lourds doit être prise en compte.

Ces rayonnements secondaires correspondent aux phénomènes dangereux dont la réalité, pour chaque situation de travail concrète, devra être recherchée lors de l'évaluation des risques.

L'énergie transférée par unité de masse de matière exposée est exprimée en gray (Gy), unité homogène à des joules par kilogramme (J/kg).

Les dommages correspondant à ces transferts d'énergie, lorsque le milieu traversé est un tissu biologique, sont exprimés dans une unité qui tient compte à la fois de la nature du rayonnement incident et de la radiosensibilité des tissus exposés, le sievert, également homogène à des J/kg.

La répartition non homogène de ces ionisations et la durée pendant laquelle une dose définie est délivrée dans les tissus biologiques, la récurrence de l'exposition dans le contexte du travail sont autant de paramètres qui influencent aussi l'appréciation du dommage.

Ces rayonnements proviennent (voir figure 2 page suivante) :

□ *De matières radioactives, qui peuvent :*

1. Contaminer des personnes par inhalation, ingestion ou contact, de par leur forme physico-chimique (gaz, vapeur, aérosol de particules). Une fois incorporée, une partie de cette contamination sera éliminée par l'organisme. Le reste se fixera sur des organes cibles. L'émission des rayonnements se poursuivra et les dommages aux cellules dus à cette exposition interne vont apparaître. La problématique de prévention consiste à éviter cette contamination, ou à la limiter, par les techniques de confinement des matières et d'assainissement des lieux de travail. On peut aussi agir sur le terme source en adaptant le choix et la quantité de matière radioactive au besoin strict du procédé. C'est une problématique dont le modèle conceptuel est celui du risque chimique. Cependant, l'évaluation du risque ne porte pas sur des ppm, mais sur l'évaluation de l'énergie déposée par ionisation sur les tissus après contamination.

2. Soumettre le personnel à une exposition externe.

La problématique de prévention est alors utilement comparable à celle du risque « bruit acoustique », puisque le modèle conceptuel de la prévention se résume en trois mots : écran, distance, temps. L'action sur le terme source doit être envisagée au même titre que ci-dessus. Bien évidemment, l'évaluation du risque doit permettre de caractériser toutes les composantes du rayonnement et la mise en œuvre des écrans doit prendre en compte tous les rayonnements qui résultent de cette caractérisation.

□ *D'émissions commandées de rayonnements, ce qui recouvre :*

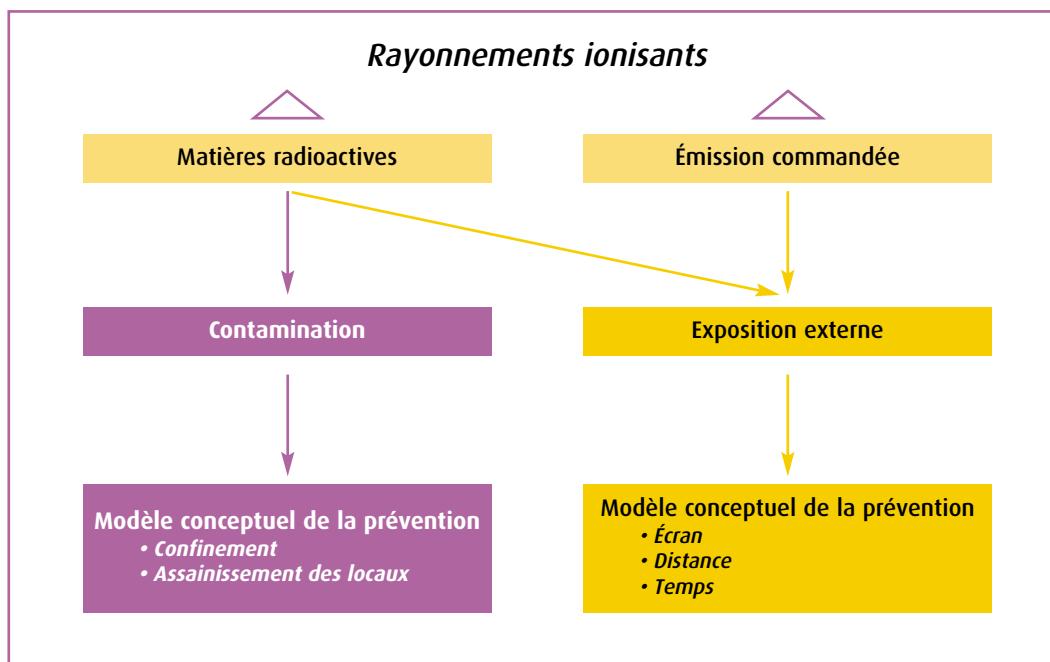
1. les générateurs électriques (de rayons X, de faisceaux d'ions, d'électrons, etc.) ;

2. les dispositifs mettant en œuvre des matières radioactives sous forme de sources scellées dont l'émission, permanente et confinée, peut avoir lieu vers l'extérieur après transfert de la source dans une position particulière et ouverture d'un obturateur.

On retrouve la même problématique de prévention d'une exposition externe. De plus, des possibilités de prévention permettant d'agir sur la sécurisation de la commande apparaissent.

□ *Les deux aspects « matières radioactives » et « émission commandée de rayonnements » se retrouvent par exemple dans les réacteurs nucléaires puisque le principe même du fonctionnement de ces réacteurs est que la réaction de fission du combustible est commandée (et contrôlée). On retrouve donc, dans ce type d'application, les deux aspects correspondants de la prévention.*


Figure 2. Rayonnements ionisants : modèle conceptuel de la prévention



Autres effets

- ❑ **Les matières radioactives sont des produits chimiques** (presque) comme les autres. Elles entrent donc dans des réactions chimiques dont les conditions peuvent être à l'origine de risques : association avec d'autres éléments susceptible d'entraîner une modification de phase, exotherme, endotherme, explosion ou inflammabilité. Des réactions primaires ou secondaires peuvent aussi apparaître avec les éléments chimiques les plus courants dans notre environnement (eau, oxygène, gaz carbonique, azote).
- ❑ **Des effets physico-chimiques**, lors des interactions des rayonnements avec le cortège électronique des atomes, entraînent la formation, par radiolyse, de nouvelles molécules et les conséquences éventuelles : formation de toxiques (ozone lors des interactions avec l'oxygène, acide fluorhydrique lors des interactions avec le téflon, etc.), fragilisation et déformation des matériaux. Ces effets doivent être évalués au cas par cas.
- ❑ **Des effets électriques** se produisent dans les matériaux semi-conducteurs, lorsque les rayonnements entrent en interaction avec les particules chargées de ces matériaux : des phénomènes de transport de charges électriques avec les conséquences possibles sur le fonctionnement des appareils électroniques sont induits. Ces conséquences doivent être mises en perspective avec la sécurité des applications dans lesquelles ces appareils sont impliqués.

Ces effets, lorsqu'ils ne sont pas maîtrisés, sont aussi à l'origine de risques.



1. PRÉVENTION,
RADIOPROTECTION
ET MÉTHODOLOGIE
DE LA MAÎTRISE
DU RISQUE

Principes généraux de prévention définis par le code du travail

1. 1

La loi 91-1414 a introduit dans le code du travail les principes généraux de la prévention. Quelle que soit l'exposition en cause, qu'elle soit radiologique ou non, il s'agit de :

- éviter les risques ;
- évaluer les risques qui ne peuvent être évités ;
- adapter le travail à l'homme ;
- tenir compte de l'état d'évolution de la technique ;
- remplacer ce qui est dangereux par ce qui n'est pas dangereux ou ce qui l'est moins ;
- planifier la prévention ;
- privilégier en priorité les mesures de protection collective par rapport aux mesures de protection individuelle ;
- donner les instructions appropriées aux travailleurs.

Le décret 2001-1016 du 5 novembre 2001 instaure par ailleurs le recensement des risques dans les entreprises et leur transcription dans le document unique. Cette obligation d'évaluation des risques est également rappelée dans le décret 2003-296 du 31 mars 2003 qui concerne l'exposition aux rayonnements ionisants en milieu professionnel.

La démarche d'évaluation des risques s'effectue sous la responsabilité de l'employeur, avec l'aide de différents acteurs de prévention tels que le médecin du travail et la personne compétente en radioprotection. Il s'agit d'une démarche active qui doit être renouvelée périodiquement afin de s'adapter aux évolutions du processus mis en œuvre et des situations de travail. Elle prend en compte l'exposition aux rayonnements ionisants, mais s'intéresse également à l'ensemble des risques auxquels sont soumis les travailleurs.

Principes de radioprotection issus de la CIPR

1. 2

En matière de radioprotection, la CIPR (Commission internationale de protection radiologique) a édicté les principes fondamentaux suivants :

- **Justification** : toute utilisation des rayonnements ionisants doit être préalablement justifiée au titre des avantages individuels ou collectifs qu'elle apporte par rapport aux nuisances qui peuvent en résulter.
- **Optimisation** : les matériels, les procédés et l'organisation du travail doivent être conçus de façon à réduire l'exposition au niveau le plus bas possible tout en maintenant l'objectif recherché.
- **Limitation des doses individuelles** : l'exposition individuelle doit être maintenue en dessous de limites déterminées.

L'évolution récente de la réglementation concernant les rayonnements ionisants a permis d'intégrer ces dispositions dans un ensemble cohérent du droit, régi par les principes généraux de la prévention.

Les bonnes performances obtenues tant en ce qui concerne la réduction de l'exposition des salariés que du public sont à l'image d'une prévention bien conçue. De mauvaises performances obtenues en radioprotection sont l'indication d'un processus mal maîtrisé du point de vue de la sécurité.

Les possibilités d'éviter le danger radiologique ou de le remplacer par un danger moindre doivent être explorées (principes de prévention en droit du travail) et l'utilisation des rayonnements ionisants doit être justifiée au préalable (principe de radioprotection). Ces étapes sont importantes et il convient de les conduire avec rigueur. Cependant, lorsque l'utilisation des

rayonnements ionisants est validée, il importe de maîtriser les risques qui résultent de cette utilisation.

La démarche de prévention et de maîtrise des risques qui va être exposée dans ce document concerne la sécurité intégrée au processus et la radioprotection. Cette démarche comporte les quatre étapes identifiées ci-dessous.

1. L'identification du danger a pour but de repérer les applications professionnelles mettant en œuvre les rayonnements ionisants ou les matières radioactives. Dans le cas des rayonnements ionisants, les applications professionnelles concernées sont celles qui mettent en œuvre :

- des matières radioactives sous des formes diverses ;
- des générateurs électriques de rayonnements ionisants.

2. La caractérisation des situations dangereuses s'intéresse aux circonstances qui peuvent entraîner ou accroître l'exposition d'un travailleur aux rayonnements ionisants ou aux matières radioactives :

- contamination par des matières radioactives impliquant une exposition interne aux rayonnements émis par ces matières ; dans quelques cas particu-

liers, la toxicité chimique résultant de cette contamination devra aussi être prise en compte ;

- exposition externe aux rayonnements.


Nota : les matières radioactives et les rayonnements dont il s'agit sont celles et ceux qui résultent de la prise en compte des phénomènes rappelés précédemment du paragraphe « Effets des rayonnements ionisants sur la matière ».

3. L'évaluation du risque définit le niveau de risque pour chaque situation dangereuse identifiée, en prenant en compte la gravité des conséquences lors de l'occurrence du risque. Dans le cas particulier des rayonnements ionisants, cette évaluation portera sur les risques de contamination (et donc d'exposition interne) et d'exposition externe.

4. La mise en œuvre de mesures de réduction du risque.

La finalité de l'évaluation est la hiérarchisation des risques et la détermination des actions à mettre en œuvre pour une prévention adaptée et efficace.

Nota : ce document ne traite pas de l'exposition aux rayonnements naturels ou industriels résiduels auxquels est soumise la population.



2. DÉMARCHE
DE PRÉVENTION
ET DE MAÎTRISE DU RISQUE
APPLIQUÉE AUX
RAYONNEMENTS IONISANTS

Identifier le danger et caractériser les situations dangereuses

2. 1

Notions préalables

Définitions :

Radioactivité : émission, par un élément chimique, d'un flux d'ondes électromagnétiques et/ou de particules, ayant pour origine une modification dans l'arrangement de son noyau ; l'émission peut être spontanée (radioactivité naturelle de certains atomes instables) ou induite (radioactivité artificielle). Lorsqu'un nouvel élément chimique apparaît, on dit qu'il y a désintégration du noyau initial. Ce processus aboutit par itération à la formation d'un noyau stable.

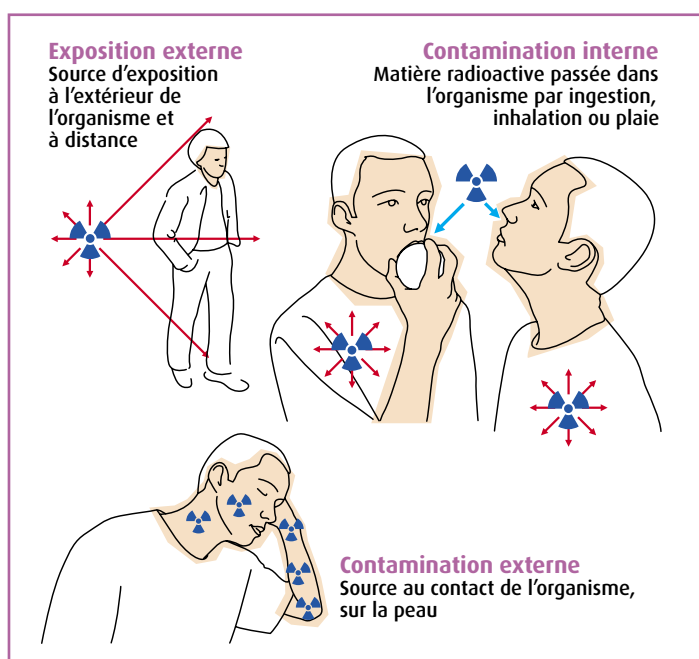
Activité : nombre de désintégrations par seconde. Elle est exprimée en becquerels (symbole : Bq). À chaque radionucléide est associée une activité spécifique (nombre de désintégrations par seconde et par unité de masse).

Période : durée au bout de laquelle l'activité d'une quantité donnée d'un radionucléide a diminué de moitié.

Modalités d'exposition aux rayonnements ionisants :

- **Par exposition externe** : la source d'exposition se trouve à l'extérieur de l'organisme et à distance.
- **Par contamination** :
 - externe : la source est au contact de l'organisme, sur la peau ;
 - interne : la matière radioactive est passée dans l'organisme après ingestion ou inhalation (voie la plus fréquente de pénétration des radionucléides en milieu professionnel) ou par l'intermédiaire d'une plaie souillée par des matières radioactives.

Ces différentes expositions peuvent être associées au cours d'une même utilisation.



Les étapes consistant à identifier le danger d'une part, et caractériser les situations dangereuses d'autre part, sont en pratique très imbriquées. C'est pourquoi elles sont présentées de façon simultanée.

Au cours de cette étape, on s'attache à rechercher les applications susceptibles de donner lieu à une exposition aux rayonnements ionisants. Ces applications sont les suivantes (voir figure 3) :

□ Applications qui mettent en œuvre des matières radioactives :

Les matières radioactives (ou radionucléides) émettent spontanément des rayonnements. On les classe en **sources scellées et sources non scellées** selon le risque de dispersion de la matière. Les sources scellées sont sous une forme n'entraînant pas, en principe⁽¹⁾, de risque de dispersion ; elles sont responsables d'une exposition externe. Les sources scellées peuvent être mises en œuvre dans des applications pour lesquelles l'émission du rayonnement est commandée ou non.

Par opposition, les sources non scellées, par exemple sous forme liquide ou gazeuse, peuvent entraîner, en plus du risque d'exposition externe, une contamination du fait de la dispersion possible de la matière sous forme liquide, gazeuse, vapeur ou aérosol de particules. Lorsque les phénomènes d'activation ou de fission sont impliqués (voir introduction, paragraphe « Effets des rayonnements ionisants sur la matière »), les matières radioactives qui en résultent doivent aussi être prises en compte à ce stade.

□ **Les générateurs électriques** de rayonnements correspondent à une émission commandée de rayonnement (électrons, positons, X, ions, etc.) qui a lieu seulement lorsque l'appareil est en fonctionnement. Il y a alors un risque d'exposition externe.

Les générateurs électriques qui mettent en œuvre des rayonnements de haute énergie sont aussi à l'origine d'une exposition externe aussi longtemps qu'un courant électrique subsiste.

Certains des appareils appartenant à cette catégorie peuvent être également concernés par le phénomène d'activation (voir introduction, paragraphe « Effets des rayonnements ionisants sur la matière »).

□ La radioactivité naturelle :

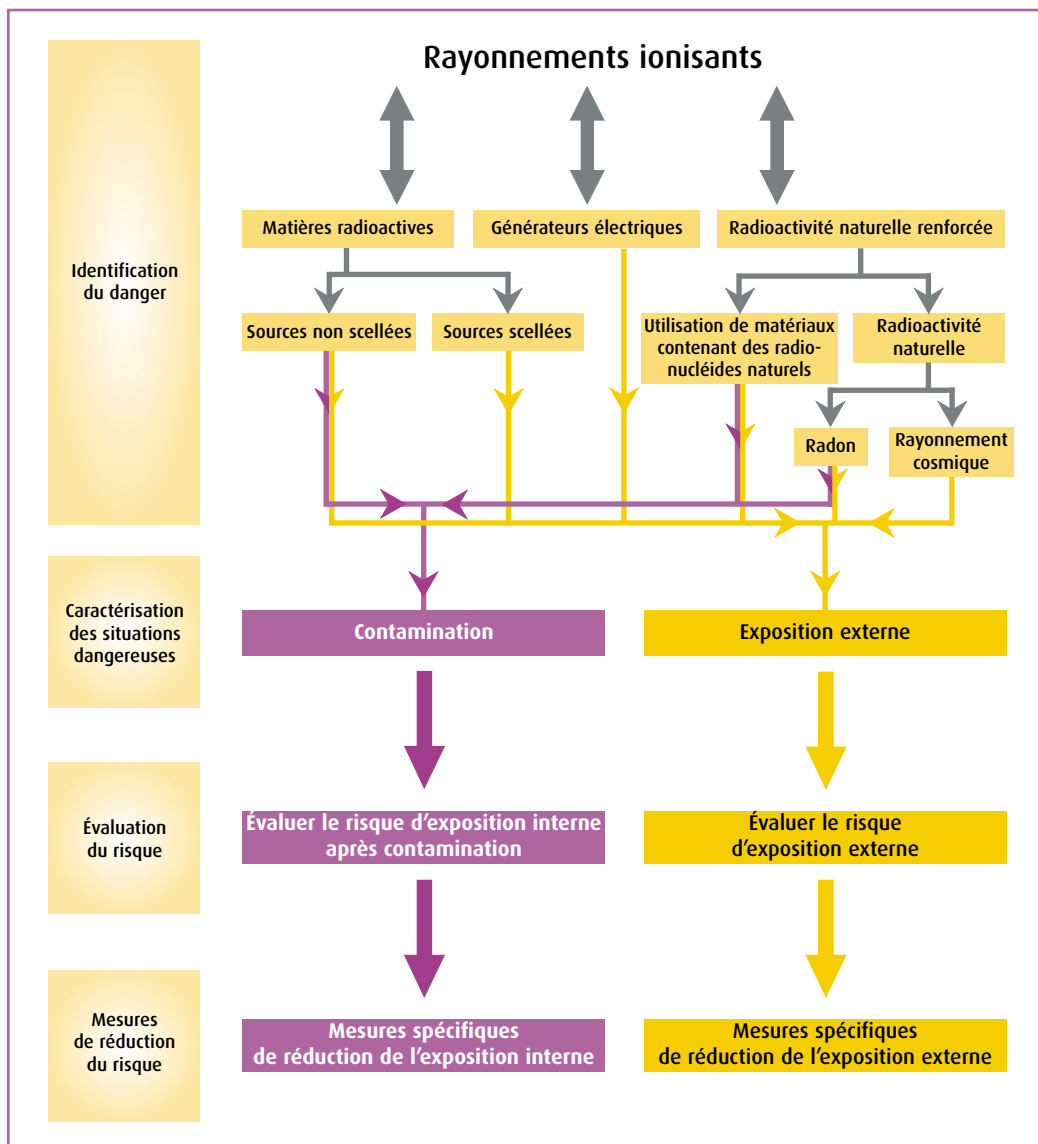
Les autres sources d'exposition en milieu de travail sont celles résultant :

- d'émanations de radon sur les lieux de travail ;
- des rayonnements cosmiques pour certaines professions (personnel navigant dans les avions) ;
- de la présence de matières radioactives dans les produits manipulés (exemple : engrais phosphatés) ;
- d'utilisation de matériaux contenant des radionucléides naturels pour d'autres propriétés que leur radioactivité (exemples : obtention de propriétés réfractaires, amélioration de la dureté, obtention d'une masse importante localisée, obtention de propriétés photophores, de couleurs, etc.).

Ces applications sont associées aux propriétés chimiques et physiques des éléments. Elles sont donc nombreuses et souvent inattendues. Elles peuvent donner lieu à des expositions non négligeables et non maîtrisées qu'il convient de circonscrire lorsque les matières radioactives impliquées sont sous (ou prennent du fait des conditions du procédé) une forme physico-chimique telle qu'elles peuvent donner lieu à incorporation par inhalation ou ingestion et donc contamination et exposition interne.

1. Si l'intégrité de la source n'est pas affectée et s'il n'y a pas de diffusion possible d'un radionucléide à travers le scellement.

Figure 3. Méthodologie d'identification des dangers et de maîtrise du risque appliquée aux rayonnements ionisants



Évaluer le risque et mettre en œuvre les mesures de prévention

Notions préalables

Quel que soit le type de rayonnement impliqué, la grandeur utilisée pour quantifier le risque est la **dose absorbée**. Elle permet de caractériser les interactions des rayonnements ionisants avec la matière. La dose absorbée est la quantité d'énergie déposée dans la matière par unité de masse. Elle s'exprime en gray (Gy). 1 Gy correspond à l'absorption d'un joule par kilogramme. Afin de quantifier les dommages occasionnés par les rayonnements ionisants dans les milieux biologiques, on utilise les notions de **dose équivalente** (délivrée à chaque organe) et de dose efficace. Ces grandeurs s'expriment en sievert (Sv). La dose équivalente tient compte de la nocivité différente des rayonnements ionisants en fonction de leur nature physique et de l'organe irradié, grâce à des facteurs de pondération radiologiques et tissulaires. La **dose efficace** est la somme des doses équivalentes délivrées à chaque organe. On peut garder en mémoire que 1 mGy correspond à environ $0,5 \times 10^{15}$ ionisations/kg (estimation fondée sur l'hypothèse qu'une ionisation « consomme » une énergie de l'ordre de $10 \text{ eV}^{(2)}$).

L'objectif de cette étape est d'évaluer le risque, en termes de dose efficace reçue, en tenant compte des caractéristiques de la source de rayonnement et des conditions d'exposition prévues et, parallèlement, de définir les moyens et actions prioritaires permettant de réduire le risque ainsi que la surveillance à exercer. À l'issue de cette étape, on peut définir quelles sont les actions prioritaires à mettre en œuvre ou les processus de travail à surveiller avec plus d'attention.

2.2.1 Évaluation du risque *a priori* et mise en œuvre des mesures de prévention initiales

2.2.1.1 Démarche d'évaluation

Notions préalables

Optimisation de la radioprotection : « l'optimisation de la radioprotection » est une démarche de prévention qui vise à réduire la survenue d'un effet sanitaire à long terme. Dans le cas où ce processus n'a pas été

2. 1 eV = $1,6 \times 10^{-19}$ joule

conduit, il en résulte une méconnaissance des conditions d'exposition qui les rend potentiellement dangereuses.

Incidents ou accidents : certaines expositions peuvent également résulter d'un incident ou d'un accident. De telles circonstances doivent être évitées par une prévention efficace :

- Les incidents ou accidents peuvent survenir lors du déroulement du processus :
 - non-maîtrise des conditions physico-chimiques du processus, de la commande du processus ;
 - absence ou non-utilisation de dispositifs de sécurité (interverrouillage, consignation) ;
 - non-prise en compte des effets des rayonnements sur la matière impliquant par exemple la fragilisation ou la déformation de matériaux, la modification chimique (radiolyse) des matières exposées avec formation de toxiques chimiques, etc. ;
 - intervention humaine sur une situation dégradée résultant d'une défaillance du processus.

Ces conditions peuvent conduire à une exposition plus importante que prévue et dans certains cas dépassant la limite réglementaire ou contribuant à créer des risques nouveaux ou des co-expositions. Une illustration de ce type de problématique est donnée dans l'analyse d'un accident lié à la mise en œuvre d'un faisceau d'électrons dans une application de dépolymérisation du téflon (voir annexe 2). Cet accident est à lui seul représentatif de nombreuses erreurs qu'il convient de ne pas commettre pour exploiter correctement un processus industriel quel qu'il soit, et en particulier un processus industriel mettant en œuvre des rayonnements ionisants. Il n'est pas possible dans le cadre de ce document de développer cet aspect du sujet, puisqu'il prend une forme particulière pour chaque application. Toutefois, il convient de garder à l'esprit que la maîtrise du processus industriel est un point essentiel de la sécurité et de la prévention des risques. Les méthodes de la sûreté de fonctionnement (AMDEC⁽³⁾, AAP⁽⁴⁾...) peuvent être utilisées pour parvenir à maîtriser les défaillances du processus.

- Les incidents ou accidents peuvent survenir du fait du contexte de travail rendant possible une erreur sans qu'aucune barrière de sécurité permettant d'en limiter les conséquences ait été prévue : par exemple, contraintes de temps, contre-temps, éclairage inadapté, travail de nuit, environnement de travail complexe, etc.

3. AMDEC : analyse des modes de défaillance et de leurs effets critiques

4. AAP : analyse par arbre de panne

L'identification des caractéristiques de la source, l'évaluation de l'exposition et la définition des moyens de prévention sont en pratique très étroitement imbriquées dans la démarche d'optimisation de la radioprotection qui vise à réduire « autant que raisonnablement réalisable » le niveau d'exposition des personnes (principe ALARA⁽⁵⁾).

Les critères d'optimisation peuvent être d'ordre technique, pratique et économique. Nous illustrons ce propos par quelques exemples :

- Critères techniques :
La réduction de l'activité manipulée doit rester compatible avec le résultat attendu du procédé. On préférera parfois, afin d'obtenir la qualité attendue du procédé, accroître l'activité manipulée ou l'intensité du rayonnement tout en réduisant la durée de l'exposition.
- Critères pratiques :
Il peut s'avérer que la définition d'un écran de protection contre certains rayonnements γ particulièrement énergétiques conduise à une telle épaisseur de plomb que la manipulation de la source par l'opérateur soit compromise du fait du poids ou de l'encombrement, et aggrave le danger au lieu de le réduire.
- Critères économiques :
Il est clair que la diminution de l'objectif dosimétrique entraîne une amélioration de la prévention mais qu'au-delà d'un certain stade toute amélioration implique des investissements et des coûts disproportionnés par rapport à l'amélioration des conditions sanitaires que l'on peut en attendre.

Dans tous les cas, l'optimisation doit se faire dans le respect du principe de limitation des doses, ce qui signifie que le résultat de l'optimisation doit donner lieu à une exposition qui respecte les limites réglementaires. Toutefois, le respect des limites réglementaires n'est pas par lui-même suffisant pour considérer que le principe d'optimisation a été appliqué.

En particulier le critère économique ne peut être invoqué que lorsqu'un niveau élevé de protection est intrinsèque à la définition du poste de travail ou a déjà été obtenu.

Les paragraphes suivants apportent un éclairage sur les facteurs qui influencent cette étape d'évaluation *a priori* du risque et de mise en œuvre des mesures de prévention initiales. Les facteurs qui influencent cette étape sont essentiellement de deux types :
– les caractéristiques de la source ;
– les expositions résultant des conditions d'utilisation.

Les informations qui suivent doivent être utilisées parallèlement à la figure 5 (page suivante) qui illustre la démarche d'évaluation *a priori* du risque et la construction des mesures de prévention initiales.

5. ALARA : acronyme pour « as low as reasonably achievable »

Caractéristiques de la source

Notions préalables

Nature du rayonnement :
Un radioélément émet généralement plusieurs types de rayonnement. En fonction du risque que l'on cherche à maîtriser, on s'intéresse à celui qui est le plus dangereux :

- ❑ les rayonnements α ont un faible parcours dans la matière ; ils n'entraînent pas d'exposition externe, mais doivent être pris en compte en cas d'exposition interne ;
- ❑ les rayonnements β sont peu pénétrants en exposition externe ; ils sont plus dangereux en exposition interne ou par contact ;
- ❑ les rayonnements X, γ et les neutrons sont dangereux dans tous les cas.

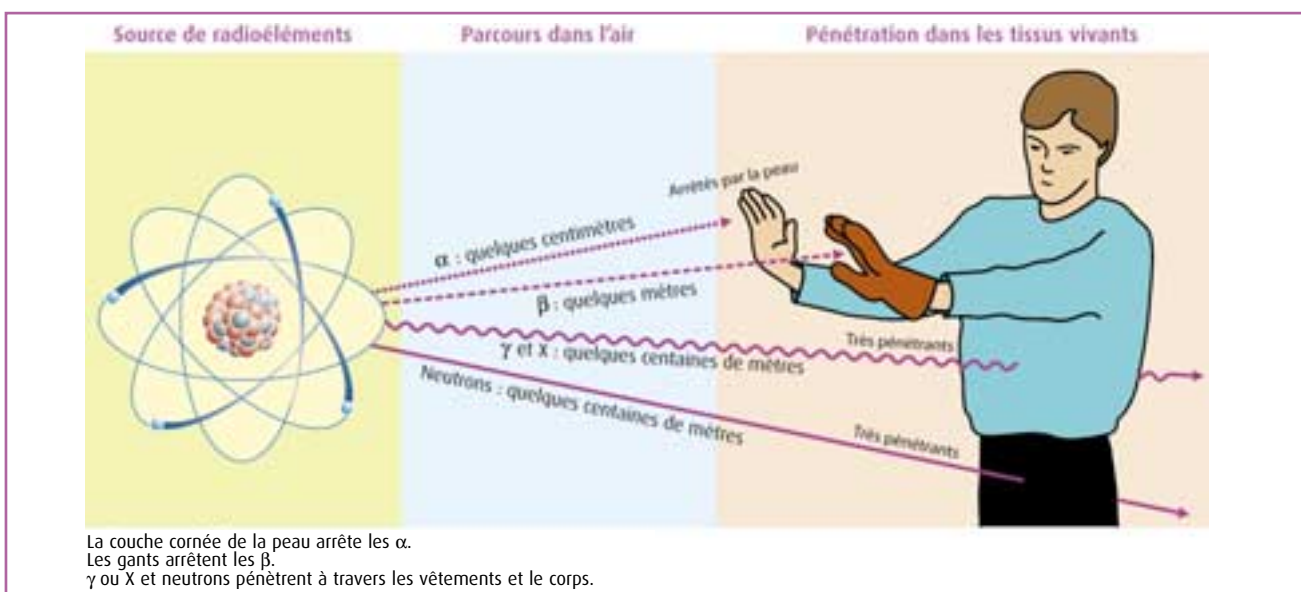
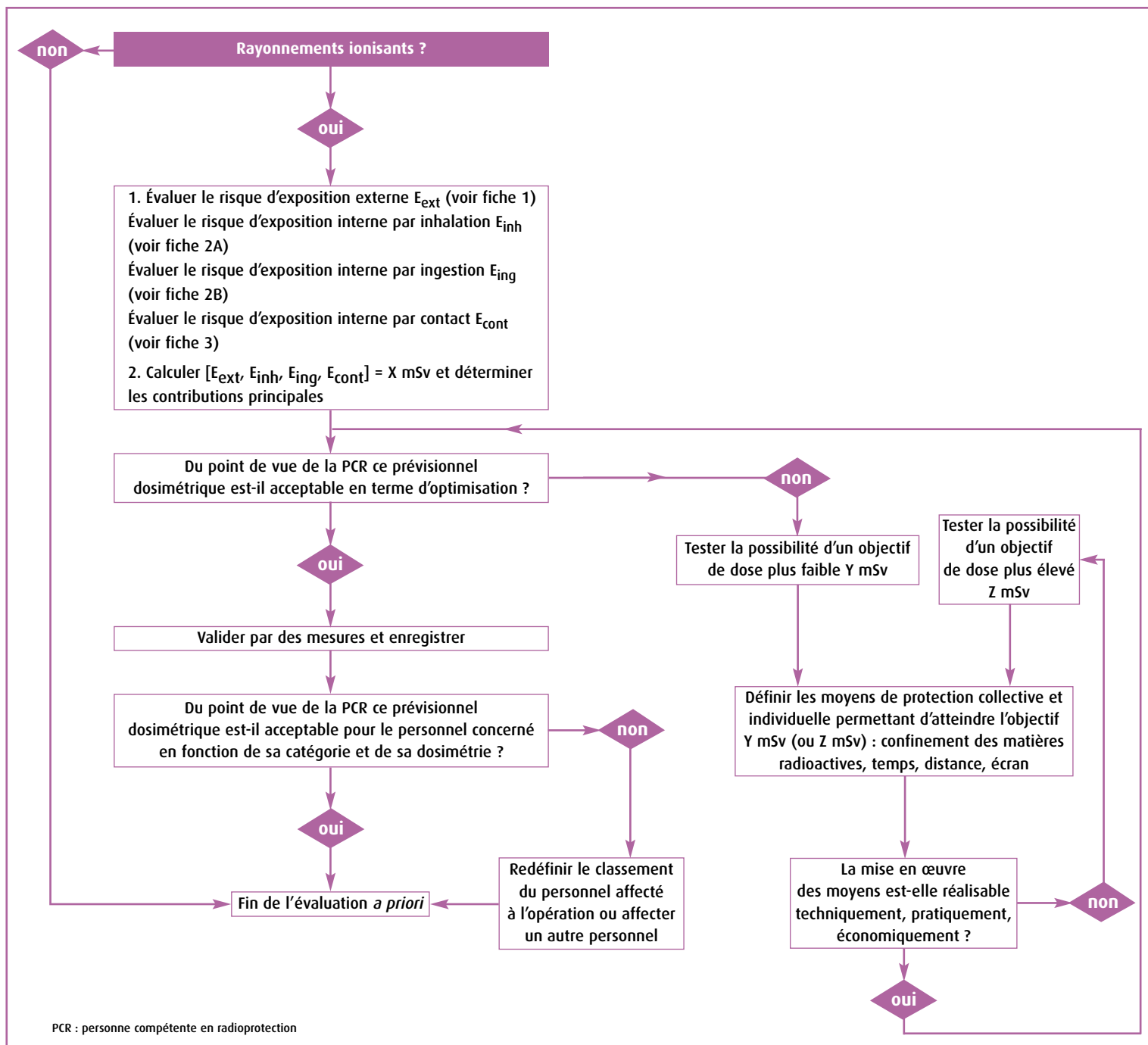


Figure 4. Pouvoir de pénétration des particules ionisantes

Figure 5. Évaluation des risques a priori



L'évaluation de la source de rayonnements ionisants est influencée par différentes caractéristiques :

- ❑ le **type de source** : source non scellée, scellée (commandée ou non), générateur électrique ;
- ❑ l'**activité** : elle s'applique aux radionucléides et est l'un des indicateurs de la dangerosité de la source ;
- ❑ la **période** des matières radioactives : cette notion permet d'évaluer l'activité (et donc la proportion) restante du radionucléide au bout de durées correspondant à une, deux, trois, etc., périodes ;
- ❑ la **nature des rayonnements émis** et pour chacun d'eux leur énergie ainsi que le pourcentage qu'ils

représentent dans l'activité globale de la source ; s'il s'agit d'appareils électriques émetteurs de rayonnements, les paramètres de fonctionnement qui permettent de régler l'énergie et l'intensité du faisceau doivent être adaptés à l'utilisation et le faisceau sera filtré et collimaté pour atténuer les rayonnements inutiles ; la commande à distance sera privilégiée ;

- ❑ les **propriétés physico-chimiques des matières radioactives** : il peut s'agir par exemple d'une présentation sous une forme chimique particulièrement volatile, entraînant un risque accru de contamination ou d'un radioélément ayant une affinité

particulière pour un organe ou un tissu, comme l'iode 131 pour la thyroïde.

- ❑ **les radionucléides « fils » résultant de la désintégration radioactive du radionucléide initial**, en tant que nouvelles sources d'exposition ayant leurs caractéristiques propres, quelquefois susceptibles d'apparaître dans un état physique distinct de celui du ou des radionucléides précurseurs impliquant un risque de contamination.

L'exemple le plus connu est celui du radon, qui apparaît sous forme gazeuse parmi les produits de filiation de l'uranium. Le radon a lui-même des descendants solides.

Ces caractéristiques doivent être choisies au mieux pour l'utilisation prévue et pour les expositions liées à l'utilisation.

L'exposition

Une fois définies les caractéristiques de la source, il est important de limiter l'exposition de l'utilisateur dans les conditions de travail. Plusieurs critères peuvent être pris en compte :

- ❑ **la durée et la fréquence d'utilisation** : l'exposition est proportionnelle à la durée de travail en présence de la source de rayonnements et au débit de dose au point d'exposition ;
- ❑ **la nature des expositions possibles** : interne, externe ou par contact ;
- ❑ **la distance source-utilisateur** : le débit de dose au point d'exposition est inversement proportionnel au carré de la distance ;
- ❑ **la quantité manipulée** : la réduction de la quantité manipulée et donc de l'activité manipulée, ou de l'intensité d'un faisceau de rayonnement, entraîne une diminution de l'exposition.

À partir des caractéristiques de la source et de l'exposition, il est possible d'évaluer :

- ❑ **la dose en profondeur** délivrée par les rayonnements les plus pénétrants (X, γ , neutrons) ;
- ❑ **la dose équivalente à un organe** en cas d'exposition localisée ;
- ❑ **la dose en surface** délivrée par les rayonnements les moins pénétrants (β , électrons) ;
- ❑ **la dose engagée par incorporation** ;

et d'en déduire par le calcul la dose efficace corps entier représentative de l'ensemble des expositions précédentes.

Ces évaluations introduisent des coefficients de pondération permettant de tenir compte de la nocivité des différents rayonnements et de la radiosensibilité particulière des différents tissus biologiques exposés.

Les conditions d'exploitation du procédé

Les conditions d'exploitation du procédé doivent être maîtrisées et en particulier :

- ❑ **Les conditions physico-chimiques** particulières à chaque procédé : température, pression, humidité, mise en œuvre de réactions chimiques modifiant la forme chimique des matières radioactives et donc, dans certains cas, leur état physique. Les caractéristiques propres de ces réactions chimiques et les interactions éventuelles des produits chimiques qui en résultent avec les éléments les plus courants (eau, carbone, hydrogène, oxygène...) doivent aussi être faire partie de l'évaluation du risque.
- ❑ **Les caractéristiques de sécurité du système de commande**, lorsque la source est commandée : obturateur, paramètres de réglage des générateurs électriques (énergie des rayonnements émis, intensité du faisceau et, pour certaines applications, interactions entre les particules émises et des matériaux de l'installation donnant lieu au phénomène d'activation), commande à distance et voyants lumineux de signalisation et d'alarme, fiabilité.

Les rejets et les déchets

Notions préalables

Les rejets correspondent à l'évacuation en continu de matières sous forme liquide, gaz ou vapeurs résultant de l'exploitation du procédé.

Les déchets correspondent aux résidus solides résultant de l'exploitation du procédé.

Les rejets d'effluents gazeux ou liquides (dans les locaux de travail ou l'environnement public) doivent être réduits (insertion de filtres avant le rejet), mesurés (activité résiduelle rejetée après les filtres) et maîtrisés.

Les déchets radioactifs solides doivent être gérés en fonction de l'activité et de la période des radionucléides mis en œuvre. Les radionucléides à vie courte (période inférieure à 100 jours) sont mis en décroissance radioactive jusqu'à atteindre une radioactivité résiduelle faible, puis évacués par une filière conventionnelle pour les toxiques chimiques.

Les autres doivent être évacués via une filière spécialisée pour les déchets radioactifs. Dans cette catégorie, on distingue :

- les déchets à haute activité et vie longue (HAVL) ;
- les déchets de faible et moyenne activités (FMA) ;
- les déchets à très faible activité (TFA) ;
- les déchets graphites et radifères à faible activité et vie longue.

Les personnels qui travaillent sur les installations de rejets de matières radioactives ou dans la filière des déchets sont concernées par ce document.



© T. Foulon / CEA

Figure 6. Utilisation d'une boîte de gants

Figure 7. Démantèlement d'une installation



© A. Gonin / CEA
© A. Gonin / CEA

2.2.1.2 Mesures de prévention initiales

Les techniques de protection

Ces techniques sont les suivantes :

□ Pour la contamination :

La contamination des lieux de travail est à l'origine de la contamination du personnel et de son exposition par inhalation, ingestion ou contact (peau, œil...). Il faut signaler ici le lien dynamique existant entre contamination de surface et contamination de l'air des lieux de travail. En effet, toute contamination de surface par des substances radioactives sous forme de poussières (ou par une substance volatile) entraîne une contamination de l'air des lieux de travail. Inversement, une contamination de l'air entraîne une contamination des surfaces. Toute contamination de surface ou volumique des lieux de travail doit être évitée ou réduite.

Le modèle de prévention est alors comparable à celui du risque chimique. Il s'agit de mettre en place les barrières de confinement des matières radioactives [par exemple, boîtes à gants (*voir figure 6*)] lorsqu'une dispersion possible des matières radioactives résulte de l'analyse de risque. Si ce confinement ne peut pas être total, il conviendra d'évaluer et de réduire le plus possible la contamination résiduelle en mettant en œuvre des moyens d'assainissement des locaux de travail (hotte ventilée, sorbonnes de laboratoire, plus

Figure 8. Chantier d'assainissement.
Opérateur en tenue vinyle ventilée
avec le port d'un appareil respiratoire isolant



généralement systèmes de ventilation). La mise en dépression des locaux dans lesquels des matières radioactives sont (ou pourraient être) en suspension peut aussi être envisagée pour éviter une contamination des locaux voisins.

Lorsque ces protections collectives présentent des limites techniques ou ne sont pas envisageables [par exemple lors de la maintenance ou du démantèlement d'une installation (voir figure 7)], des équipements de protection individuelle destinés à prévenir la contamination peuvent être utilisés : blouses, combinaisons, gants, masques, lunettes, tenues ventilées, etc. (voir figure 8).

Les bonnes pratiques de travail contribuent aussi à réduire le risque de contamination. Enfin, on prévoit des surfaces (sols, murs, plans de travail) lisses et facilement décontaminables (proscrire les carrelages car la contamination peut se fixer dans les joints).



Figure 9. Opérateur utilisant un outillage de télémanipulation

□ Pour l'exposition externe :

Le modèle de prévention est alors similaire à celui du bruit acoustique (bien que le risque soit de toute autre nature). La prévention repose sur les règles suivantes :

- la limitation de la durée du travail en présence de rayonnements ;
- l'éloignement par rapport à la source (utilisation d'outillages permettant la manipulation à distance ou la télémanipulation) (voir figure 9) ;
- l'utilisation d'écrans (voir figures 9 et 10) destinés à limiter les rayonnements auxquels un opérateur pourrait être exposé ; techniquement, ces écrans doivent être adaptés à la nature (α , β , γ ou X, neutrons, etc.) et à l'énergie des rayonnements (voir figure 11 et annexe I).

D'autres écrans doivent être mis en place en complément des précédents lorsque l'arrêt ou la limitation des rayonnements primaires implique l'apparition de rayonnements secondaires.

Si ces mesures sont insuffisantes ou ne peuvent pas être appliquées, on pourra envisager le port d'équipements de protection individuelle destinés à atténuer les rayonnements (cache-thyroïde, tablier en plomb, lunettes de protection, etc.). Le coefficient d'atténuation de ces protections doit être défini dans la gamme d'énergie des rayonnements incidents.

La figure 12 résume les modes d'exposition, les principes de prévention et les moyens d'action à prendre en compte pour prévenir une exposition aux rayonnements ionisants.

Figure 10. Mise en œuvre d'un écran de protection



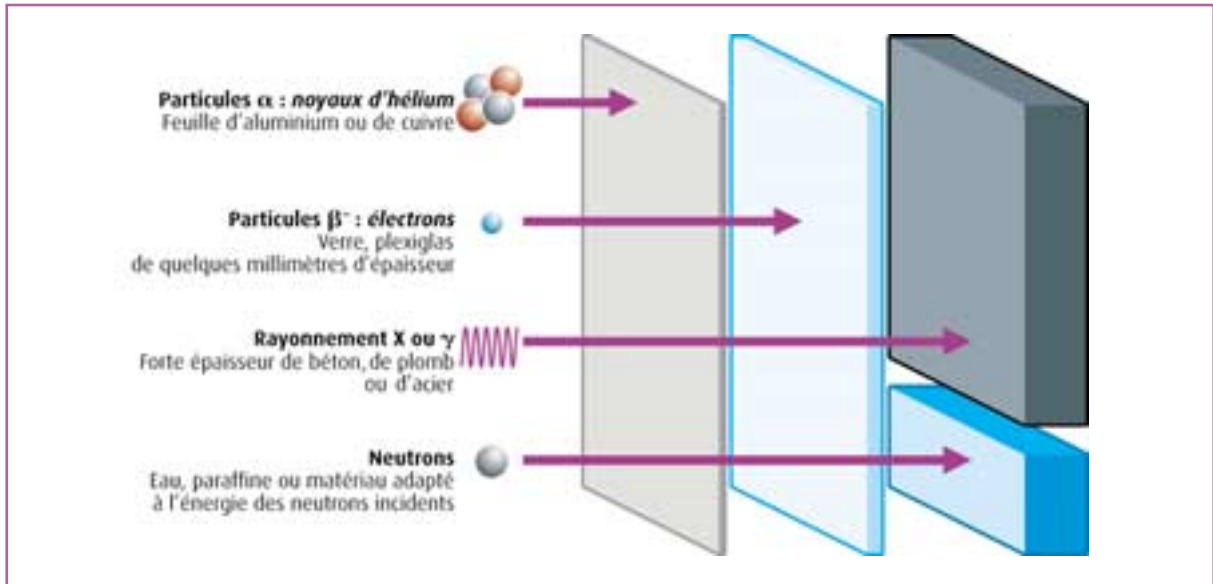


Figure 11. Matériaux de protection contre les rayonnements ionisants

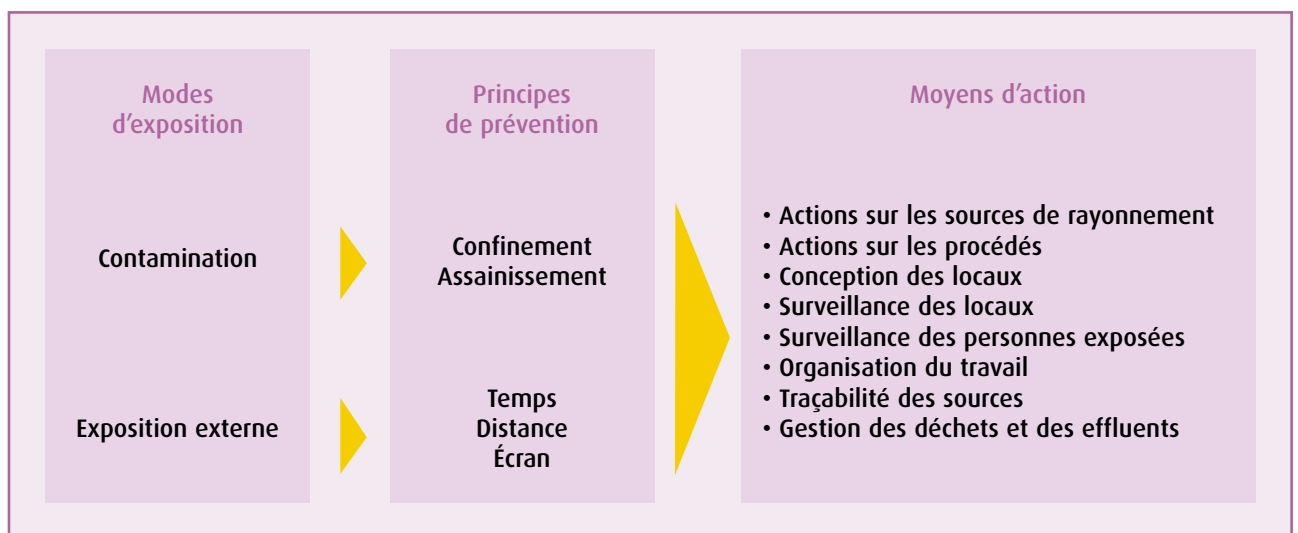


Figure 12. Moyens d'action pour l'application des principes de prévention

Mesures de prévention concernant les locaux et les processus

Dans les deux cas (contamination interne ou exposition externe), les moyens d'action à mettre en œuvre sont les suivants :

□ Locaux :

- Un zonage des espaces de travail, des dispositifs d'alarme lorsque la source est commandée ou mise en œuvre, des dispositifs de consignation et d'interverrouillage appropriés, des rondiers doivent être mis en place ; les zones de travail doivent être signalées ; les sources présentes dans ces zones doivent aussi être signalées, ainsi que les autres dangers ;
- la conception (matériaux de blindage constituant les murs, utilisation d'écrans mobiles) et l'exploitation de ces locaux doivent être adaptées aux matières qu'il convient de confiner et aux rayonnements à atténuer ; les locaux ne doivent pas être exploités à d'autres fins que celle pour laquelle ils sont prévus, notamment ils ne doivent pas servir de lieux de stockage d'objets divers ;
- un régime d'autorisation d'accès à ces locaux doit être instauré ;
- la conduite à tenir en cas d'incident et le nom des personnes à contacter doivent être affichés.

□ Contrôles :

- Des contrôles de contamination de l'atmosphère et des surfaces de travail (voir figure 13) doivent être prévus ; plusieurs techniques sont possibles pour évaluer les contaminations : utilisation d'un contaminamètre adapté à la nature et à l'énergie des rayonnements émis par les matières radioactives

Figure 13. Contrôle de contamination de surface



© Th. Brauzy/CEA



© E. Joly/CEA

Figure 14. Télémanipulation d'un robot assisté par ordinateur (bras à retour d'effort)

susceptibles de contaminer, analyse de frottis, surveillance de la contamination atmosphérique par un prélèvement en continu des aérosols et analyse de ce prélèvement, port par les salariés concernés de dispositifs personnels permettant de capter les aérosols et poussières pendant le travail et analyse de ce prélèvement ;

- surveillance des rayonnements : les moyens disponibles pour la surveillance des rayonnements sont des moyens de mesure adaptés à la nature (α , β , X , γ , neutron, etc.) et à l'énergie des rayonnements présents ; d'autres critères de choix doivent être considérés : installation à poste fixe ou non, portabilité, sensibilité aux autres facteurs d'influence, possibilité d'une exploitation informatique des mesures, etc.

□ Automatisation des processus et robotisation des interventions :

Ces évolutions techniques sont mises en place chaque fois que les mesures de réduction de l'exposition classiques ne permettent pas de réduire significativement les risques au poste de travail. Le seul moyen de réduire consiste alors à réaliser une automatisation de l'installation ou du processus ou une robotisation de l'intervention (voir figure 14).

Les interventions humaines sur le processus automatisé, que ce soit en situation normale ou dégradée, doivent être prises en compte dès la conception de l'automatisme ou du robot.

Mesures de prévention concernant les travailleurs

Notions préalables

Au préalable à l'affectation, une visite médicale doit être réalisée par le médecin du travail. Celui-ci recherche l'existence d'affections susceptibles de contre-indiquer une exposition externe ou un risque de contamination. Dans ce dernier cas, on peut citer :

- les affections qui peuvent faciliter la pénétration de radionucléides, comme par exemple une rupture de continuité cutanée (plaie, eczéma...) ou de la continuité digestive (maladie de Crohn, rectocolite hémorragique, ulcère évolutif...) ou une perforation tympanique... ;
- les affections qui peuvent ralentir l'élimination de radionucléides absorbés (affections hépatiques ou rénales) ;
- les affections qui peuvent entraîner une rétention importante de radionucléides au niveau respiratoire (asthme évolué, trouble ventilatoire obstructif important).

Les éléments à prendre en compte pour les personnes exposées sont :

□ L'homogénéité de l'exposition :

Les conditions d'utilisation peuvent impliquer une exposition prépondérante de certaines parties du corps, comme les extrémités ou l'œil. Ces expositions doivent aussi faire l'objet d'une évaluation *a priori* et les mesures de prévention correspondantes doivent être mises en œuvre, par exemple port d'équipements de protection individuelle pour la partie du corps concernée, port de dosimètres complémentaires pour surveiller ces expositions localisées.

□ Le nombre de personnes exposées :

Il doit être limité. En effet, seul le personnel concerné doit être habilité à pénétrer dans les zones réglementées.

□ Les coexpositions :

Les expositions professionnelles concomitantes, parfois prépondérantes par rapport à l'exposition aux rayonnements ionisants, doivent être prises en compte dans l'évaluation du risque, en particulier en tant que facteur aggravant des effets sur la santé. C'est le cas par exemple de la coexposition benzène/rayonnements ionisants ou de coexpositions résultant de la formation d'ozone, et plus généralement d'autres gaz toxiques résultant de la transformation chimique de matériaux sous l'effet des rayonnements. Il faut également penser aux autres risques, comme par exemple le risque électrique, les vibrations, le risque de chute de hauteur...

□ La surveillance médicale avant l'affectation au poste :

Elle doit permettre de rechercher l'absence de contre-indication au risque de contamination ou d'exposition externe, au port d'équipements de protection individuelle et aux autres risques. L'existence de facteurs de susceptibilité individuelle sera également prise en compte. On peut citer l'exemple de la grossesse, qui selon les conditions d'exposition peut nécessiter une adaptation de poste ou un reclassement à un poste non exposé.

□ Le personnel exposé doit être informé des risques et formé aux travaux qu'il devra effectuer. Il est affecté à l'une des catégories d'exposition (A ou B) prévues par la réglementation en fonction de l'exposition à laquelle il va être soumis. Dans les deux cas, il fait l'objet d'un suivi dosimétrique (voir figure 15) (dosimétrie passive en temps différé et dans certains cas dosimétrie opérationnelle en temps réel), conformément à la réglementation en vigueur. On consultera l'article BN 3490 paru dans les *Techniques de l'ingénieur*, traité Génie nucléaire, intitulé « Instrumentation pour la dosimétrie individuelle des travailleurs », pour avoir un aperçu rapide des principes de mesure mis en œuvre et des performances de cette instrumentation.

Figure 15. Lecture d'un dosimètre opérationnel en sortie de zone



© A. Gomin/CEA

❑ Les moyens, adaptés aux rayonnements impliqués, permettant de détecter une contamination éventuelle des locaux ou d'une personne doivent être disponibles (voir le paragraphe « Mesures de prévention concernant les locaux et les processus », p. 29). (voir figure 16).

❑ La fiche d'exposition :

Elle est établie pour chaque salarié et rend compte des caractéristiques de ses activités en termes de nuisances radiologiques (exposition externe, contamination) et non radiologiques.



© F. Vigouroux/CEA

Figure 16. Contrôle de contamination d'un salarié

2.2.2 Maîtrise des mesures de prévention

La maîtrise des mesures de prévention initiales pendant toutes les phases d'exploitation est fondée sur une mise

en commun de toutes les données disponibles relatives à un poste de travail (voir figure 18), c'est-à-dire :

Contrôles techniques	<ul style="list-style-type: none"> • Résultats des contrôles des installations (contrôles techniques de conformité de l'installation et des dispositifs de sécurité et d'alarme, contrôles de contamination de surface ou volumique, surveillance des rayonnements) • Résultats des contrôles des sources et appareils émetteurs
Suivi dosimétrique	<ul style="list-style-type: none"> • Dose efficace (donnée représentative de l'ensemble des résultats de la dosimétrie externe passive, des dosimétries complémentaires, des résultats des analyses radiotoxicologiques, des examens d'anthroporadiamétrie) • Résultats de la dosimétrie opérationnelle
Surveillance médicale	<ul style="list-style-type: none"> • Recherche de la survenue d'éventuels effets indésirables (manifestations pathologiques, incidents, accidents)

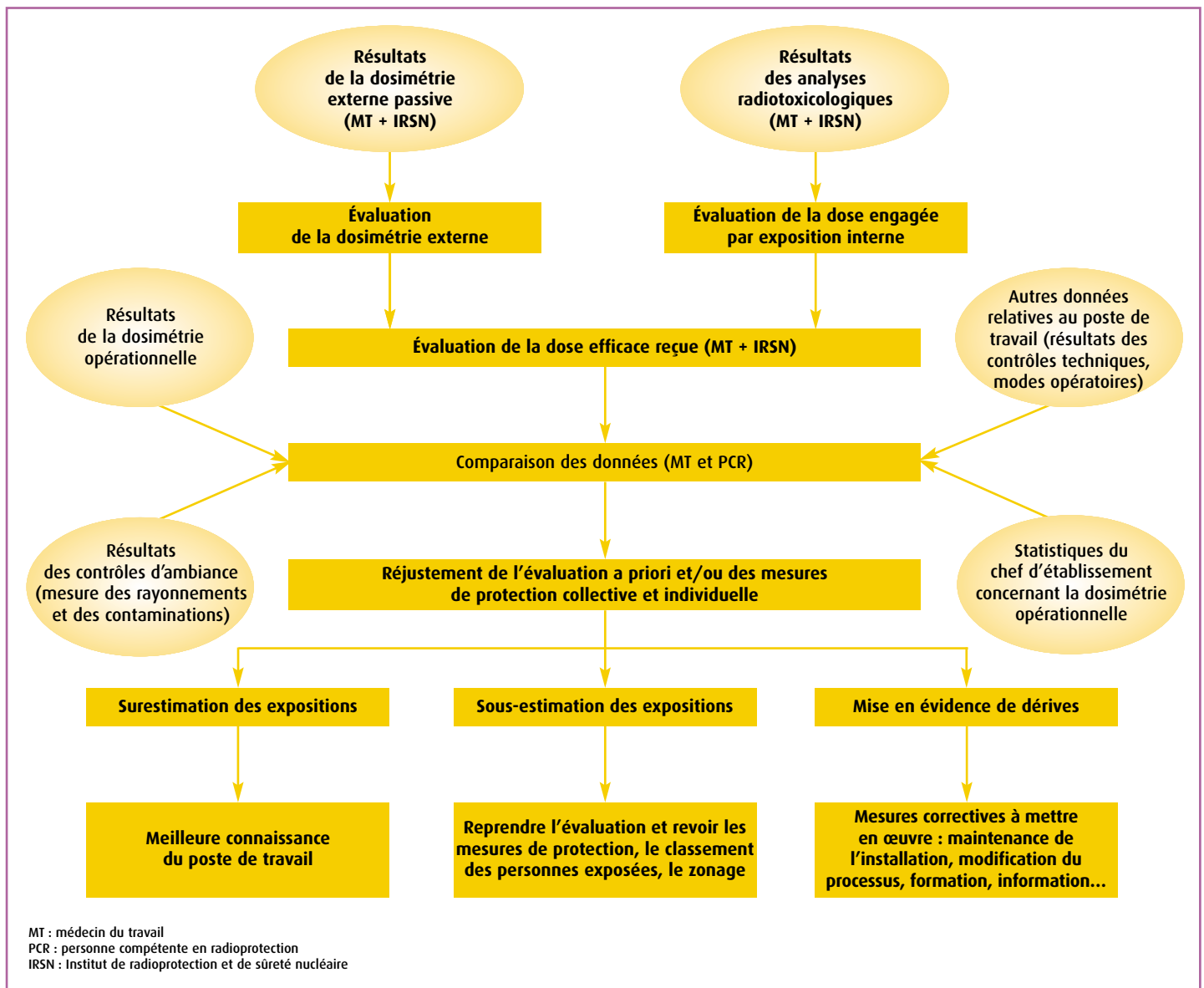


Figure 18. Maîtrise des mesures de prévention initiales

Notions préalables

Anthroporadiamétrie et radiotoxicologie des excréta : ces deux examens permettent de rechercher une contamination de l'organisme par des radionucléides.

- **L'anthroporadiamétrie** ou spectrométrie est un examen destiné à évaluer les contaminations internes particulièrement par les émetteurs X ou γ (voir figure 17).
- **Les examens radiotoxicologiques** peuvent être réalisés sur les urines, les selles ou les sécrétions nasales après mouchage. Ils sont plus particulièrement adaptés aux émetteurs α et β non détectés par l'anthroporadiamétrie.

Cette phase s'intéresse au travail réel (par opposition au travail prévu ou prescrit) et utilise plusieurs sources d'information. Les données résultant de l'étude des postes de travail (observation des pratiques opératoires, des situations de travail) et de l'écoute des travailleurs doivent être intégrées à ce stade.

2.2.2.1 Vérification et ajustement des mesures de prévention initiales

L'objectif est d'identifier les écarts significatifs entre les expositions réelles auxquelles donne lieu le poste de travail, et celles résultant de l'évaluation *a priori* et des mesures de prévention initiales.

L'analyse de ces écarts peut mettre en évidence différentes situations :

❑ **Une surestimation des expositions** lors de l'évaluation *a priori*, celles-ci étant moins importantes que prévues. Dans ce cas, on aboutit simplement à une meilleure connaissance du poste de travail et des expositions auxquelles il donne lieu.

❑ **Une sous-estimation des expositions** lors de l'évaluation *a priori*. Dans ce cas, il convient de reprendre l'évaluation et de revoir l'ensemble des mesures de protection.

2.2.2.2 Surveillance des installations et des moyens de protection

Les installations et les moyens de protection doivent être surveillés pendant toutes les phases de leur exploitation et, lorsque nécessaire, maintenues en état de conformité avec leur caractéristiques initiales. Par exemple, l'efficacité des filtres doit être vérifiée et il sera procédé à leur remplacement lorsque cela s'avérera nécessaire.

De même, les dosimètres ou les EPI défectueux doivent être signalés et remplacés.

À ce stade, il faut rappeler que l'entretien et la maintenance des installations sont des opérations à risques, et ce à deux titres :

– ces opérations impliquent généralement une intervention en profondeur sur les équipements de travail



Figure 17. Préparation à un examen d'anthroporadiamétrie

et il faut donc les préparer pour maîtriser les risques correspondants ;

– lorsqu'elles sont terminées, il importe de vérifier que l'installation est à nouveau en état et ne présente pas de risque, en particulier radiologique.

Dans un autre ordre d'idée, les installations doivent être utilisées dans les limites pour lesquelles elles sont qualifiées. Toute modification de l'installation ou de ses conditions d'exploitation doit faire l'objet d'une nouvelle qualification.

2.2.2.3 Maîtrise des écarts entre le travail réel et le travail prescrit

Ces écarts résultent :

- soit d'un défaut de maîtrise organisationnelle dans l'entreprise ;
- soit d'une dérive progressive dans l'application des modes opératoires ;
- soit d'un mode opératoire prescrit inadapté à la réalité du travail à effectuer.

Dès qu'ils sont détectés, ces écarts doivent faire l'objet d'une analyse approfondie et d'actions correctives. Ce sera en particulier le cas si un écart apparaît dans le suivi dosimétrique d'une personne, que cet écart soit observé soit dans le temps, soit par rapport au prévisionnel dosimétrique, soit en comparant avec une autre personne qui effectue le même travail.

2.2.3 Évaluation *a posteriori*

Elle prend en compte les données résultant de l'analyse d'incidents, d'accidents ou de maladies professionnelles survenus sur les lieux de travail ou sur des lieux de travail similaires, afin de remédier aux causes profondes de ces événements.

FICHES



Évaluation de l'exposition externe E_{ext}

Source scellée non blindée ou source non scellée d'un radionucléide

- Utiliser les données disponibles concernant les radionucléides⁽⁶⁾ pour faire l'évaluation de l'exposition externe en situation de travail réel.
- Valider systématiquement par des contrôles et les dosimétries externes passives et opérationnelles⁽⁷⁾.

Sources scellées blindées (irradiateur, projecteur de gammagraphie)

- Ces sources sont le plus souvent très énergétiques. Il conviendra de se conformer aux données fournies par le constructeur ou l'installateur.
- Le calcul du débit de dose est le plus souvent complexe dans les conditions réelles, du fait des diffusions et des réflexions multiples. Un calcul approché peut cependant être effectué à partir des données concernant les sources, par exemple les courbes isodoses fournies par le fabricant.
En situation réelle, l'utilisation d'un radiamètre permet une estimation du débit de dose à distance. Lorsqu'une cartographie du champ est nécessaire, elle ne pourra généralement être établie qu'en réalisant au préalable une instrumentation de la zone à cartographier.
- Valider systématiquement par des contrôles et les dosimétries passives et opérationnelles⁽⁷⁾. Prévoir aussi les mesures de débit de dose au contact obturateur fermé.

Générateur électrique

Les préconisations décrites au paragraphe précédent s'appliquent également. Toutefois, l'évaluation et la mesure sont plus critiques lorsque l'émission est impulsionnelle.

6. Guide pratique *Radionucléides et radioprotection*, EDP Sciences, 2004.

7. Pour ce qui concerne les principes et les caractéristiques des moyens utilisés pour les dosimétries passives, on se reportera à l'article BN 3490 paru dans les *Techniques de l'ingénieur*, traité Génie nucléaire, intitulé « Instrumentation pour la dosimétrie individuelle des travailleurs » (Jean-Claude Thévenin).

Évaluation du risque de contamination

- ❑ La CIPR a défini, pour chaque radionucléide, des coefficients dépendant de l'âge des personnes exposées, du type de population exposée (public ou travailleurs), du type d'incorporation (inhalation ou ingestion), de la forme physico-chimique du radionucléide (spéciation chimique, gaz, vapeur, aérosols de granulométrie variable).
- ❑ Pour chaque condition particulière, ce coefficient rend compte de l'exposition à laquelle vont donner lieu toutes les émissions de ce radionucléide aussi longtemps qu'il sera présent dans l'organisme. Cette exposition correspond donc à une dose cumulée sur la durée pendant laquelle ce radionucléide sera présent dans l'organisme (cette durée est fonction des périodes physique et biologique du radionucléide).
- ❑ Ce coefficient est appelé DPUI [dose (engagée) par unité (d'activité) incorporée] et s'exprime en Sv/Bq. Il est noté h(g) dans le tableau de l'arrêté du 01/09/2003.
- ❑ Il peut être utilisé soit dans le cadre d'une évaluation *a priori*, soit dans le cadre d'une évaluation *a posteriori* d'une contamination.

*L'évaluation d'une contamination par inhalation est explicitée à la fiche 2A.
L'évaluation d'une contamination par ingestion est explicitée à la fiche 2B.*

Évaluation de la dose engagée par inhalation E_{inh} (sauf radon et ses descendants)

La figure 20 ci-contre présente les modalités d'évaluation basées sur l'arrêté du 01/09/2003.

Il faut également signaler la possibilité de réaliser un comptage de l'activité de frottis réalisés sur des surfaces contaminées pour déterminer la contamination volumique à partir de l'activité de la contamination surfacique et de l'estimation d'un coefficient de remise en suspension T :

$$\text{activité volumique (Bq/m}^3\text{)} = T \text{ (m}^{-1}\text{)} \cdot \text{activité surfacique (Bq/m}^2\text{)}.$$

Une estimation pessimiste est évidemment obtenue en posant $T \text{ (m}^{-1}\text{)} = 1$. D'autres estimations plus réalistes peuvent être testées, en fonction des conditions réelles (on peut avoir $T = 10^{-3}$, 10^{-4} ou 10^{-5}), mais il faudra toujours les confronter à la mesure⁽⁸⁾.

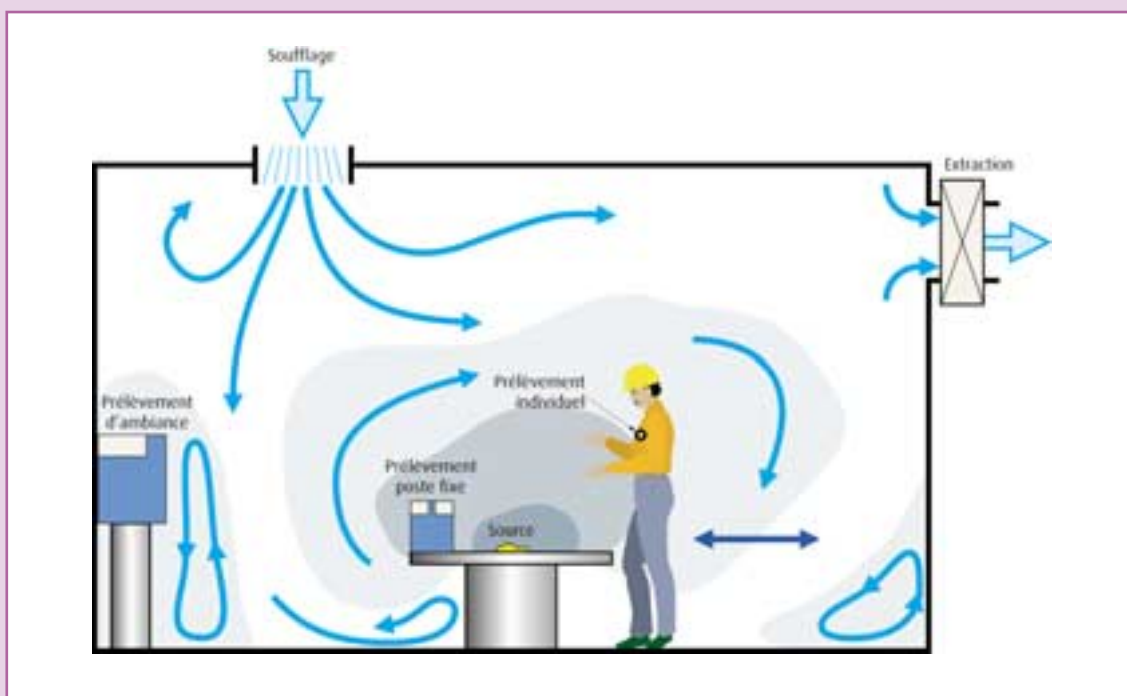
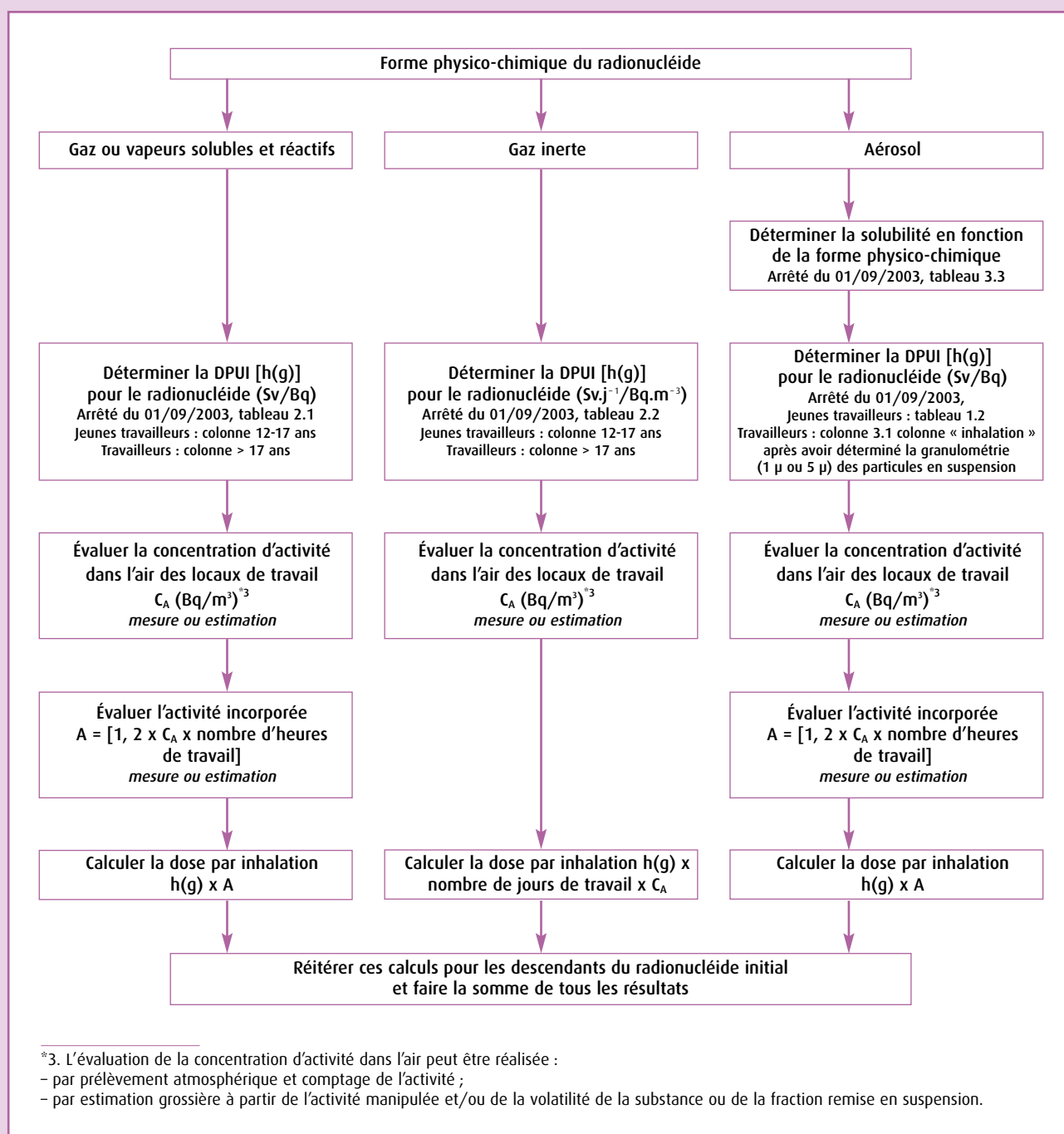


Figure 19. Dispersion de la contamination dans un local et mode de prélèvements correspondants

8. On consultera à ce sujet le rapport final (30 juin 2004) du projet européen SMOPIE (Strategies and Methods for Optimisation of Protection against Internal Exposures of workers from industrial natural sources) téléchargeable sur le site Internet du CEPN : www.cepn.asso.fr (le chemin d'accès est le suivant : cepn/publications/rapports 2004). On s'attachera en particulier au paragraphe 3.4.7 de ce rapport pour le choix du moyen de prélèvement et le paragraphe 3.5.8 en ce qui concerne la conclusion générale.

En raison de la nécessité de maîtriser de nombreux facteurs d'influence, cette évaluation doit être réalisée par des spécialistes de la métrologie des aérosols. De ce fait, la mise en œuvre de mesures efficaces de protection, de préférence collective et si nécessaire individuelle, sera préférée à cette évaluation complexe.

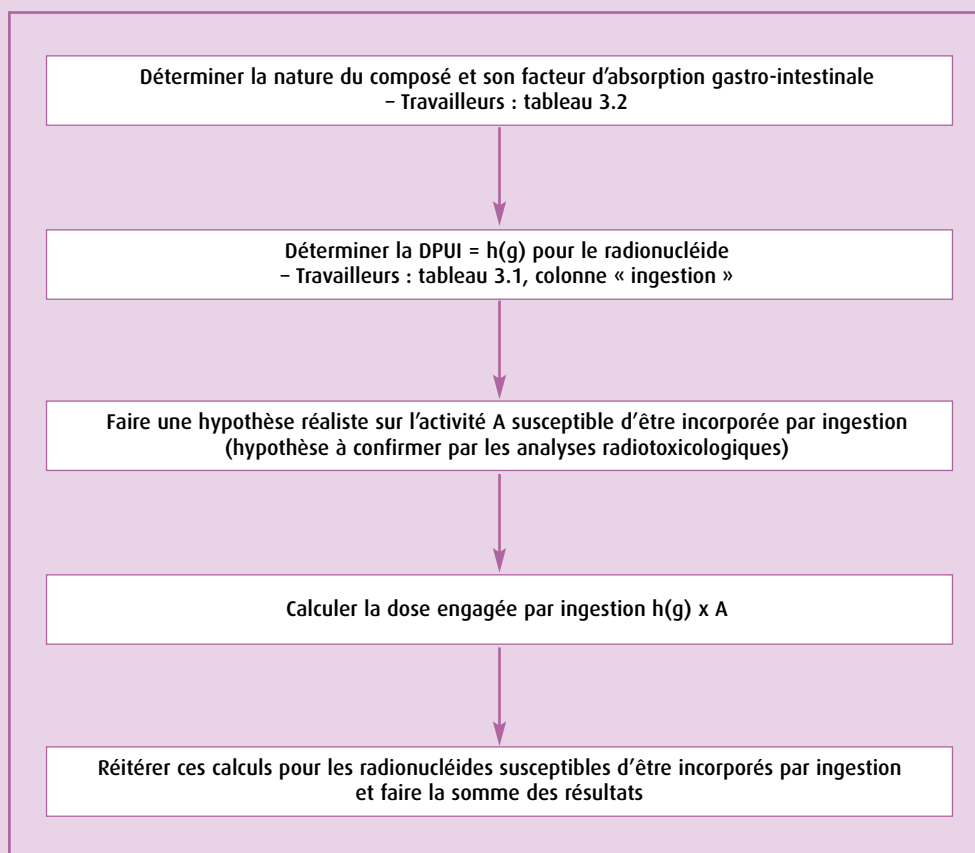
Figure 20. Évaluation de la dose engagée par inhalation (arrêté du 01/09/2003)



Évaluation du risque de contamination par ingestion E_{ing} (sauf radon et ses descendants)

En principe, les conditions de travail doivent être telles que l'ingestion n'est pas possible. Le tableau qui suit correspond donc en théorie à des situations d'incident ou d'accident. Il convient de valider systématiquement par des analyses de radiotoxicologie. La figure 21 présente les modalités d'évaluation basées sur l'arrêté du 01/09/2003. Il faut également signaler la possibilité de réaliser un comptage de l'activité de frottis réalisés sur des surfaces contaminées pour déterminer l'activité surfacique liée à la contamination (cf. paragraphe « Mesures de prévention concernant les locaux et les processus », p. 29).

Figure 21. Évaluation du risque de contamination par ingestion basée sur l'arrêté du 01/09/2003



Évaluation du risque de contamination par contact E_{cont}

En principe, les conditions de travail doivent être telles que la contamination par contact n'est pas possible.

- Il convient de faire une étude du poste de travail dans les conditions prévues pour confirmer qu'il en est bien ainsi.
- Si toutefois le risque est confirmé ou en cas d'incident ou d'accident, il faut essayer d'en déterminer l'importance sur la base des données disponibles concernant les radionucléides. On peut également s'appuyer sur des hypothèses pertinentes relatives à la quantité de radionucléide susceptible d'être incorporée par contact, en particulier en cas de rupture de la barrière cutanée.

En pratique, cette évaluation est très difficile et devra être systématiquement validée par des analyses de dosimétrie interne. Il faut par ailleurs signaler la possibilité de réaliser un comptage de l'activité de frottis réalisés sur des surfaces contaminées pour déterminer l'activité surfacique liée à la contamination (cf. paragraphe « Mesures de prévention concernant les locaux et les processus », p. 29).

ANNEXES



Émissions radioactives et interactions des rayonnements avec la matière

Annexe 1

Préliminaire

Cette annexe décrit les principales émissions spontanées de rayonnements qui sont liées à la radioactivité de la matière et les conditions dans lesquelles ces rayonnements, une fois émis, interagissent avec la matière environnante, donnant lieu à des émissions induites.

Les informations qui suivent ont uniquement pour objectif de rappeler les quelques notions utiles pour la compréhension des grandeurs et unités utilisées en pratique et d'illustrer les mécanismes les plus fréquents des interactions rayonnements/matière.

Ces mécanismes sont à la fois les principes mêmes des applications des rayonnements ionisants et, lorsque les interactions rayonnements/matière ont lieu avec les tissus biologiques, avec les phénomènes dangereux qui doivent être pris en compte lors de l'évaluation du risque.

Tous ne sont pas à prendre en compte systématiquement, et la première étape de l'évaluation sera de déterminer les rayonnements pertinents, leur énergie et leur débit.

Dans de nombreux cas, l'évaluation reste globalement assez simple et peut être largement simplifiée.

Dans les cas pour lesquels l'évaluation de phénomènes induits complexes doit être prise en compte, l'évaluation pourra se faire sur la base de normes, elles-mêmes fondées sur des résultats élaborés et publiés par la CIPR ; par exemple, émission de rayonnements secondaires en fonction de la nature (électrons, ions, neutrons) et de l'énergie des particules incidentes d'une part, et de la nature des matériaux impactés d'autre part.

Ce type d'évaluation prend en compte la nature et le nombre des particules par unité de surface et de temps pour la caractérisation du rayonnement incident, d'une part, et le numéro atomique des atomes qui constituent la matière impactée pour la caractérisation de la cible, d'autre part.

Émissions radioactives : généralités

Constitution de la matière – modèle simplifié (voir figure a)

La matière est constituée d'atomes.

L'atome est constitué d'un noyau et d'un cortège électronique.

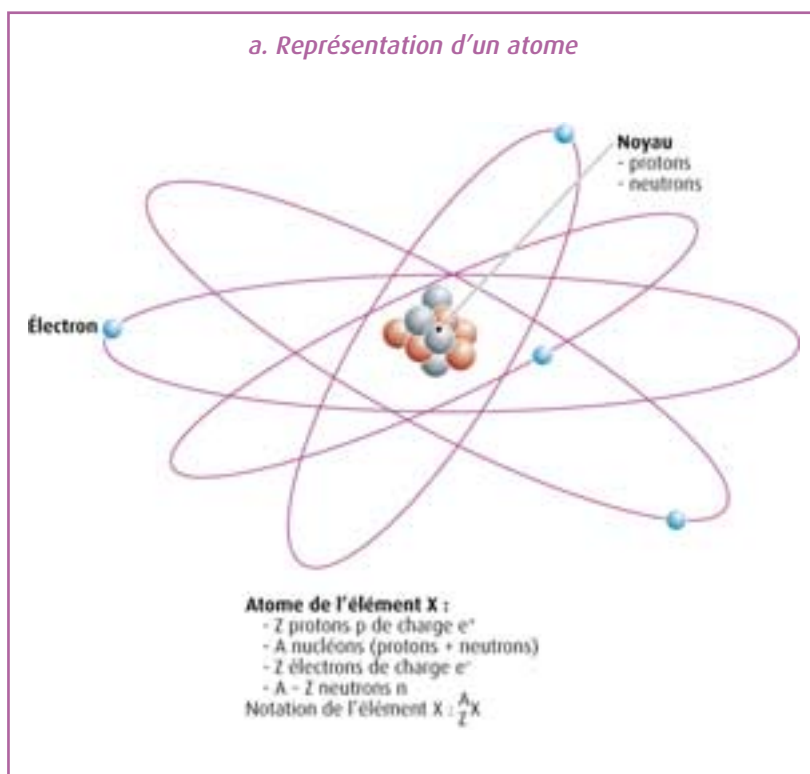
Le noyau est lui-même composé de deux sortes de nucléons :

- les protons : masse M , charge électrique e^+ ,
- les neutrons : masse M (en fait très faiblement supérieure à M), neutre.

Le nombre de nucléons (nombre de protons + nombre de neutrons) est par définition le nombre de masse de l'atome considéré, noté A .

Le cortège électronique est constitué de Z électrons de masse m (environ 1 800 fois plus faible que la masse M du proton ou du neutron) et de charge e^- . Z est par définition le numéro atomique de l'atome considéré.

L'atome est électriquement neutre car le nombre de protons est égal au nombre d'électrons.



Définition de la radioactivité

Il s'agit de l'émission, par un élément chimique, d'un flux d'ondes électromagnétiques et/ou de particules, ayant pour origine une modification dans l'arrangement de son noyau ; l'émission peut être spontanée (radioactivité naturelle de certains atomes instables) ou induite (radioactivité artificielle). Lorsqu'un nouvel élément chimique apparaît, on dit qu'il y a désintégration du noyau initial. Ce processus aboutit par itération à la formation d'un noyau stable.

Émissions

Les rayonnements spontanés sont fonction du radionucléide considéré et peuvent être de l'un des types suivants :

- alpha (α) : noyau d'atome d'hélium (2 protons, 2 neutrons, charge électrique $2 e^+$) ;
- bêta (β^+ ou β^-) : électrons relativistes, charge électrique e^+ ou e^- ;
- proton ;
- neutron.

L'émission de rayonnement électromagnétique (photons γ) à partir du noyau est aussi observée. Elle accompagne souvent l'une des émissions précédentes.

Ces émissions, sauf neutrons et photons γ , entraînent la modification chimique du noyau initial (par désintégration radioactive) qui revient progressivement à un état stable (décroissance radioactive).

Activité, période

L'activité est par définition le nombre de désintégrations par seconde dans une quantité donnée d'un radionucléide donné ; l'unité d'activité est le becquerel (Bq) :

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ désintégration par seconde}$$

Le nombre de noyaux du radionucléide initial qui disparaissent entre les instants t et $t + dt$ est statistiquement proportionnel au nombre de noyaux présents à l'instant T :

$$dN = -\lambda \cdot N \cdot dt$$

Le nombre de noyaux à un instant quelconque t est donc donné par intégration de la relation précédente.

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

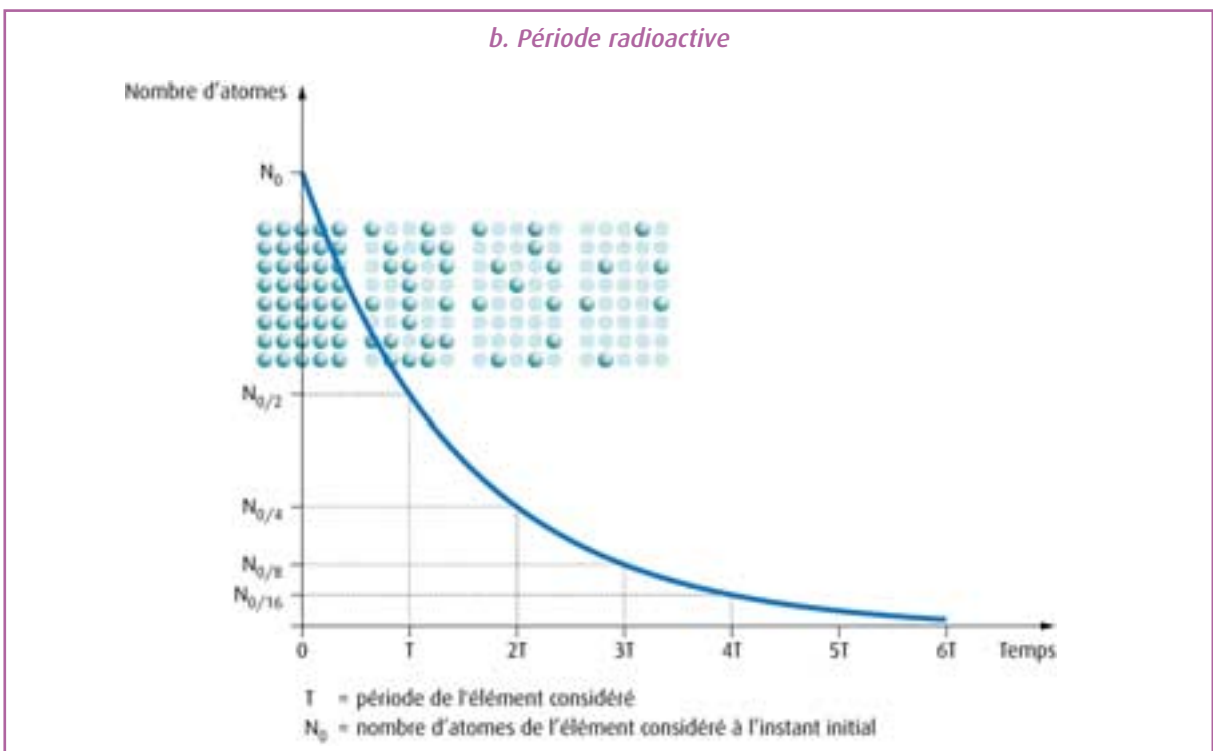
(N_0 : nombre d'atomes présents à l'instant initial)

On pose $\lambda = 1/\tau$, τ constante de temps de la décroissance radioactive.

Cette grandeur est caractéristique de chaque radionucléide mais n'est pas utilisée en pratique.

On lui préfère la notion de période physique, dont la signification physique est identique, et qui correspond à la durée T au bout de laquelle la moitié des atomes radioactifs initialement présents ont disparu et se sont transformés par décroissance radioactive. Lorsque n périodes (nT) se sont écoulées, l'activité restante est l'activité initiale divisée par 2^n :

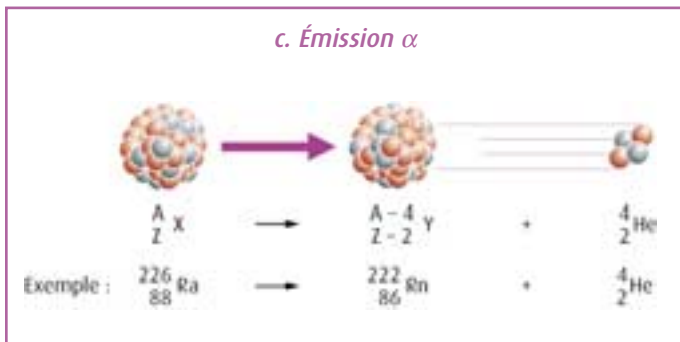
$$A_n = \frac{A_0}{2^n} \quad (\text{ou } N = \frac{N_0}{2^n}) \quad (\text{voir figure b}).$$



Interactions des rayonnements avec la matière

Particule α : émission, interactions (voir figure c)

La particule α est émise par les noyaux radioactifs de masse atomique élevée ($A \geq 208$). Elle est considérée comme très ionisante car l'énergie très élevée de ce type d'émission (de l'ordre de 4 à 10 MeV) est transférée sur un parcours très court (transfert linéique d'énergie, ou TLE, élevé) en raison de la forte électropositivité du noyau de l'atome d'hélium. Lors de l'émission, le noyau émetteur subit un recul (conservation de la quantité de mouvement).



Interactions avec le cortège électronique (voir figure d)

La particule α va perdre progressivement son énergie par des ionisations simples puis récupérer ses deux électrons périphériques lorsque son énergie aura suffisamment diminué pour enlever à un cortège électronique deux électrons et se transformer ainsi en atome d'hélium tout en provoquant la formation d'ions.

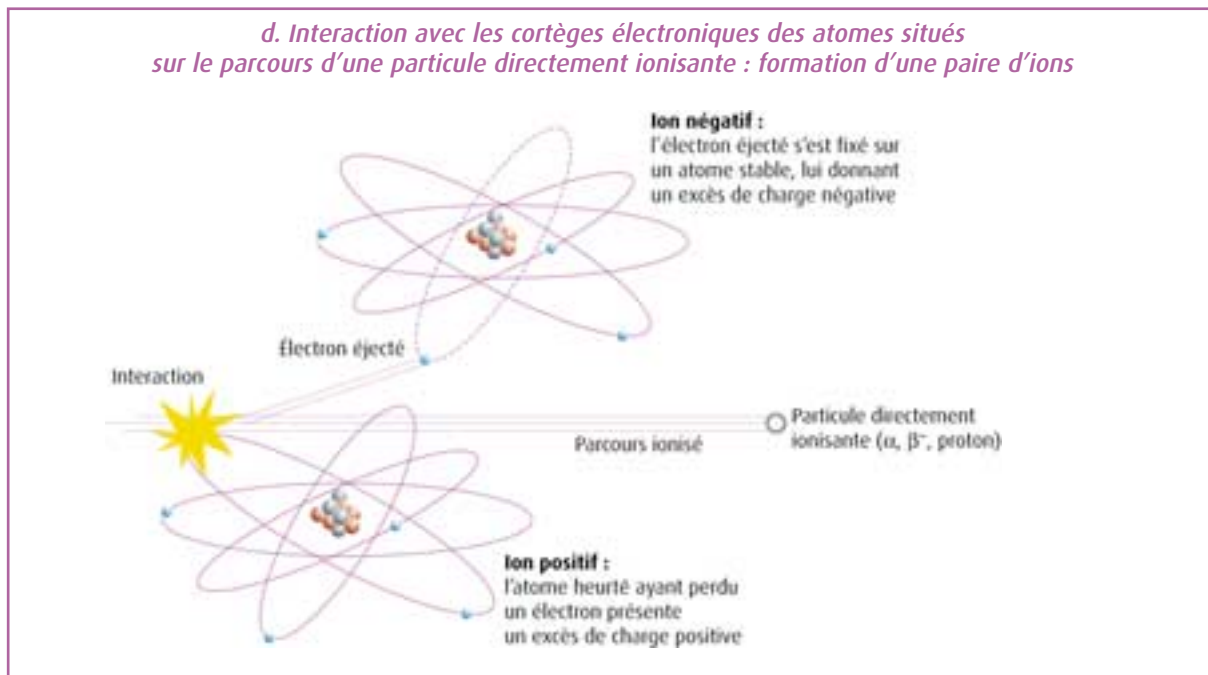
Elle peut aussi exciter dans un état métastable le cortège électronique d'un atome. Le retour à l'état fondamental occasionne l'émission d'une onde électromagnétique (visible, UV ou X en fonction des couches électroniques moins ou plus profondes qui ont été perturbées).

Interactions avec le noyau

D'autres interactions des particules α sont possibles, avec le noyau cette fois. La probabilité des interactions avec le noyau est faible, en raison du diamètre très faible de celui-ci.

Elles sont de deux sortes :

- diffusion (la particule entre dans la zone de répulsion électrostatique du noyau, qui subit alors un recul) ;



À retenir pour la radioprotection

Les radionucléides émetteurs α peuvent en fonction de leur état physico-chimique être inhalés (aérosols, vapeurs, gaz) ou ingérés (poudres). Si c'est le cas, ils vont se fixer sur un site privilégié de l'organisme qui va être irradié en exposition de proximité. Du fait des propriétés évoquées plus haut de la particule α et de la période biologique souvent importante du radionu-

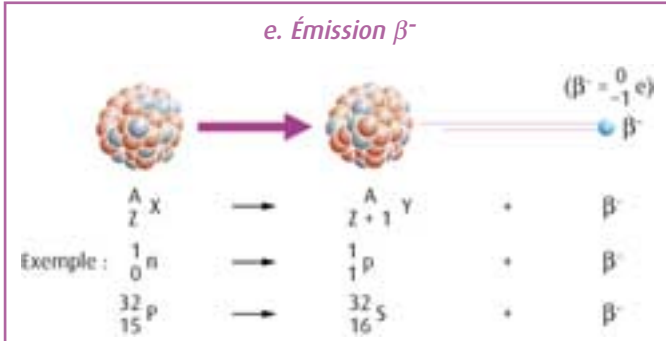
cléide, les dommages dus à cette exposition sont importants. C'est pourquoi la radioprotection doit mettre en œuvre les moyens de prévenir l'incorporation de radionucléides émetteurs α .

En exposition externe, la particule α n'a aucun impact sanitaire, du fait de son parcours dans l'air très faible. Au pire, elle est arrêtée par la couche cornée de la peau.

- capture en cas d'impact de plein fouet : la particule α franchit la barrière de potentiel par effet « tunnel » ; le nouvel élément chimique ainsi formé, ${}^A_{Z+2}Y$, est porté dans un état d'énergie tel qu'il devient lui-même le siège de fissions ou d'émissions. C'est le cas, par exemple, pour les couples (α, n) dans lesquels un radionucléide, émetteur α , est amalgamé à un noyau léger (Al ou Be). Les particules α émises sont capturées par le noyau léger. Le nouvel élément formé émet des neutrons.

Particule β^- : émission, interactions (voir figure e)

La particule β^- est en fait un électron (masse faible, charge électrique négative e^-) émis par les noyaux trop chargés en neutrons (un neutron se transforme en proton à l'intérieur du noyau ; cette transformation est suivie de l'émission d'une particule β^-) à une vitesse de l'ordre de la vitesse de la lumière et a donc un pouvoir de pénétration nettement supérieur à celui des particules α . L'énergie cinétique peut être considérable (plusieurs MeV). Les particules émises n'ont pas toute la même énergie et un rayonnement β^- est en fait constitué de nombreux électrons dont l'énergie s'étend sur un spectre continu.



Interactions avec le cortège électronique (voir figure d)

Il s'agit des phénomènes d'excitation et d'ionisation déjà vus avec les particules α .

La probabilité d'interaction est cependant plus faible, car la probabilité de rencontre ou d'approche de deux électrons est plus faible que celle d'une particule α et d'un électron et d'autre part deux électrons ont tendance à se repousser du fait du même signe de leur charge électrique. Le pouvoir ionisant des β^- est donc plus faible.

Lorsque toutefois l'interaction se réalise, il y a diffusion puisque les particules sont de masse identique.

Le pouvoir d'ionisation des β^- est élevé aux basses énergies, passe par un minimum puis croît à nouveau.

Interactions avec le noyau

Une particule β^- qui passe à proximité d'un noyau est fortement déviée par l'accélération créée par le champ électrique du noyau. La courbure de la trajectoire, et donc la modification de la vitesse de la particule, entraîne l'émission d'un photon (onde électromagnétique) aux dépens d'une partie de l'énergie cinétique : il s'agit du rayonnement électromagnétique de freinage. Ce rayonnement est d'autant plus important que l'énergie initiale est élevée. C'est le cas, par exemple, du rayonnement de freinage des électrons issus du rayonnement cosmique.

À retenir pour la radioprotection

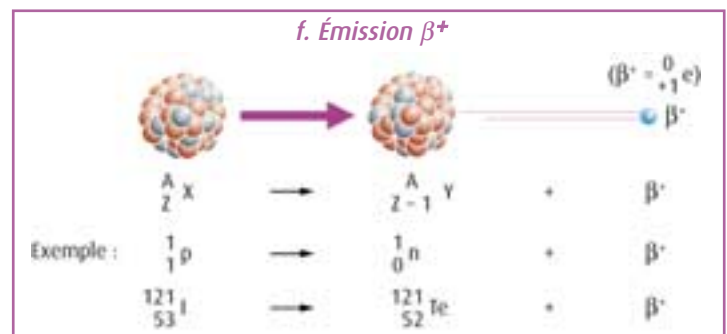
En exposition externe, la particule β^- peut induire des ionisations des tissus superficiels à une profondeur dépendant de l'énergie.

Les matériaux utilisés pour arrêter totalement une particule β^- sont le verre et le plexiglas. Pour limiter les ionisations dues au rayonnement secondaire de freinage des particules β^- , on disposera un écran supplémentaire en plomb.

En exposition interne, les particules β^- les plus nocives sont celles de basses et hautes énergies, pour la raison exposée ci-dessus. Il faut donc également prévenir l'incorporation de radionucléides émetteurs β^- .

Particule β^+ : émission, interactions (voir figure f)

La particule β^+ est en fait un positon (masse faible identique à celle de l'électron, charge électrique positive e^+) émis par les noyaux trop chargés en protons (un proton se transforme en neutron à l'intérieur du noyau ; cette transformation est suivie de l'émission d'une particule β^+) à une vitesse de l'ordre de la vitesse de la lumière et a donc un pouvoir de pénétration nettement supérieur à celui des particules α . L'énergie cinétique peut être considérable (plusieurs MeV). Les particules émises n'ont pas toute la même énergie et un rayonnement β^+ est en fait constitué de nombreux électrons dont l'énergie s'étend sur un spectre continu. Lorsque la particule β^+ entre en interaction avec un électron situé sur son parcours, elle s'annihile très rapidement pour donner deux photons d'énergie 0,511 MeV dans deux directions opposées.



Photon : émission, interactions

Le photon est la particule associée à une onde électromagnétique.

Un photon X, un photon γ et un photon de freinage sont de même nature électromagnétique. C'est leur origine qui les distingue : les photons X proviennent du cortège électronique (émis lorsqu'un électron passe d'une couche à une autre), les photons γ du noyau (lorsque le noyau évolue d'un état excité à un état moins excité) et les photons de freinage sont dus aux accélérations des particules chargées lorsqu'elles passent au voisinage d'un noyau.

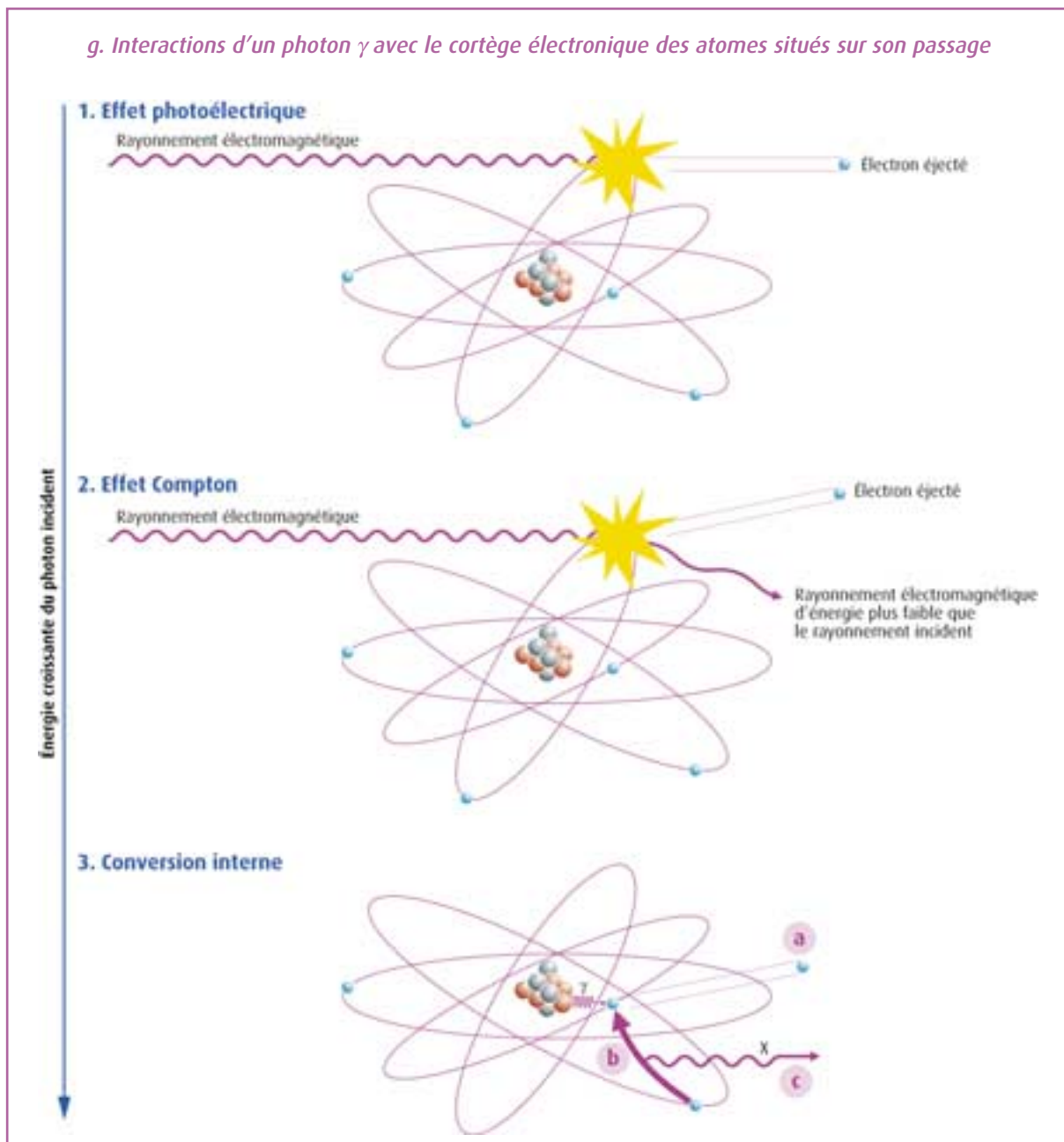
Interactions avec le cortège électronique

Effet photoélectrique (voir figure g, 1)

Les rayonnements électromagnétiques peuvent arracher

des électrons aux couches profondes des atomes qui se trouvent sur leur passage. Le photon disparaît alors en cédant toute son énergie sous forme d'énergie d'arrachement d'une part et sous forme d'énergie cinétique de l'électron arraché d'autre part. Les électrons arrachés constituent le rayonnement β photoélectrique et participent à leur tour à l'ionisation des atomes voisins.

De plus, l'électron arraché est immédiatement remplacé par un électron d'une autre couche, ce qui donne lieu à l'émission d'un rayonnement X caractéristique de l'atome et quelquefois à une transition « Auger » (un électron provenant de la couche électronique immédiatement supérieure vient remplacer l'électron expulsé initialement). Dans le plomb, l'effet photoélectrique est négligeable au-delà de 2 MeV. Dans les tissus biologiques, il est prépondérant pour les énergies inférieures à 50 keV.



Effet Compton (voir figure g, 2)

Le rayonnement électromagnétique incident communique une partie de son énergie à un électron faiblement lié (appartenant à une couche superficielle) ou libre sous forme d'énergie cinétique. Le reste de l'énergie apparaît sous forme d'un rayonnement électromagnétique moins énergétique (de longueur d'onde plus élevée). Dans le plomb, l'effet Compton est le facteur d'atténuation le plus important pour les photons d'énergie inférieure à 5 MeV. Dans les tissus, l'effet Compton est prépondérant pour les photons d'énergie supérieure à 50 keV.

Conversion interne

Le phénomène dit de « conversion interne » est une émission d'un rayonnement gamma par le noyau, suivie de l'éjection d'un électron du cortège électronique (voir figure g, 3, a), du réarrangement de ce dernier (voir figure g, 3, b), puis d'une émission d'un rayonnement X caractéristique (voir figure g, 3, c).

Interactions avec le noyau

Matérialisation de paires d'électrons (voir figure h, 1)

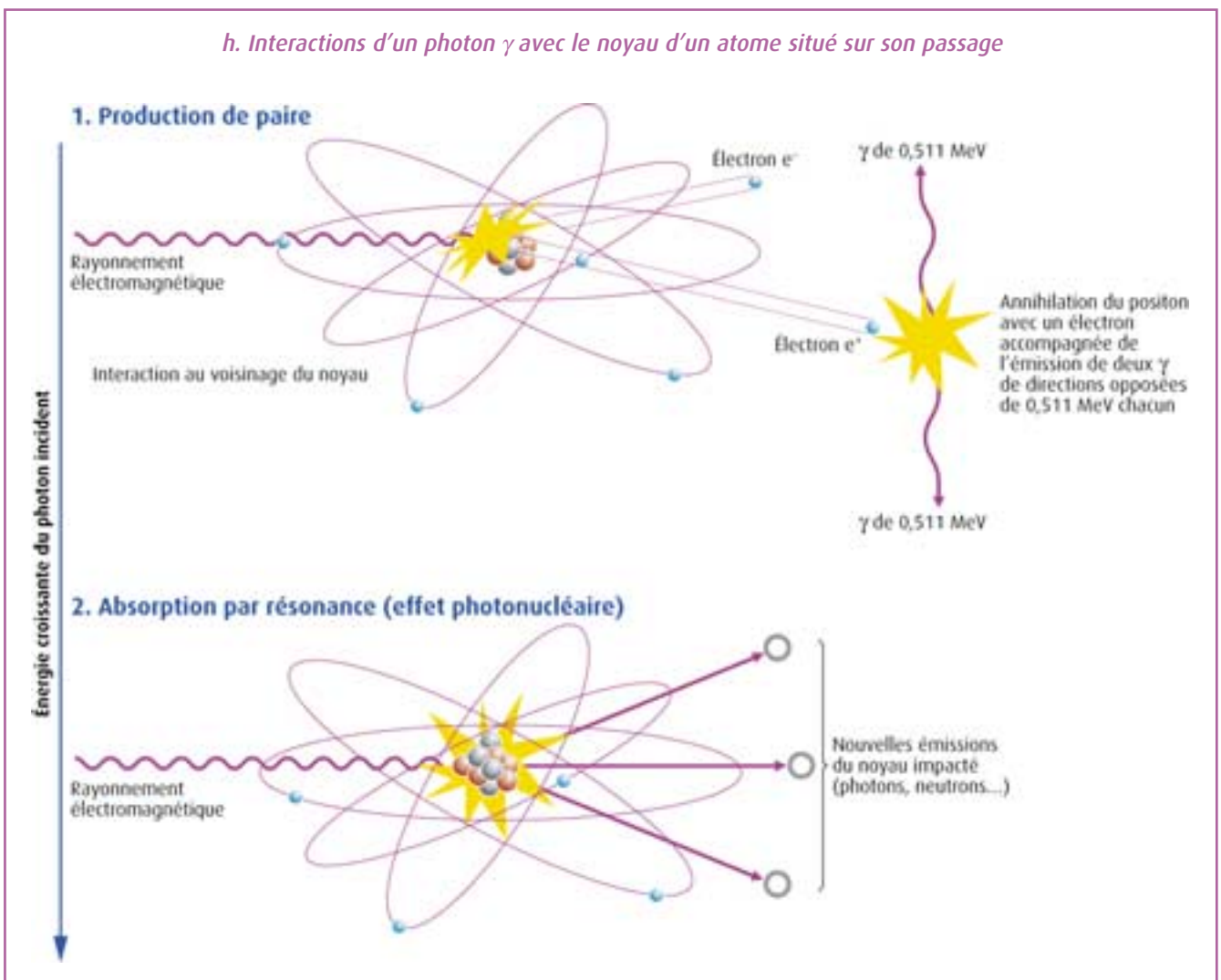
Lorsque un photon d'énergie suffisante ($>> 1$ MeV) s'approche d'un noyau de masse élevée, il peut se matérialiser en deux électrons de charges électriques opposées (un électron, un positon). Le positon s'annihile très rapidement avec un autre électron pour donner deux photons d'énergie 0,511 MeV dans deux directions opposées. Cet effet croît avec l'énergie initiale du photon incident et le numéro atomique de l'atome impacté.

Pour les rayons cosmiques, dont les photons sont très énergétiques, cet effet prime sur tous les autres.

Absorption par résonance (réaction photonucléaire) (voir figure h, 2)

Un photon incident peut être capturé par un noyau si son énergie est égale à une énergie de transition qui permet de porter le noyau impacté de son état fondamental à un état excité permis par sa quantification. Il y a absorption par résonance. Les photons dont l'énergie est différente ne sont pas capturés. Lorsqu'il y a capture, le noyau restitue l'énergie capturée sous forme de nouvelles émissions (photon, neutron).

h. Interactions d'un photon γ avec le noyau d'un atome situé sur son passage



À retenir pour la radioprotection

De façon générale, sauf l'effet Compton, les interactions du photon se font par tout ou rien : le photon ou bien cède son quantum d'énergie et produit une seule ionisation et disparaît, ou bien il passe sans changement. Il est essentiellement indirectement ionisant puisqu'il ne produit lui-même qu'une seule ionisation, et ce sont certaines des émissions secondaires créées par les phénomènes qu'il a occasionnés qui ont un pouvoir d'ionisation.

Son absorption par la matière est régie par une loi de probabilité. Il en résulte une atténuation exponentielle de l'intensité du rayonnement photonique en fonction de la profondeur de pénétration dans la matière.

Chaque matériau a un coefficient d'atténuation qui lui est propre. Les matériaux les plus adaptés pour atténuer les photons sont l'uranium appauvri, le plomb, l'acier et le béton.

En pratique, les matériaux atténuateurs sont caractérisés par une grandeur dite « épaisseur d'atténuation » moitié ou dixième (selon l'atténuation que procure cette épaisseur).

Le rayonnement mesuré après interposition d'un écran ayant une épaisseur d'atténuation donnée peut toutefois être plus important que celui attendu du fait de rayonnements induits dans le matériau d'atténuation. La mesure permet d'évaluer l'atténuation réellement obtenue.

Neutron : émission, interactions

Les neutrons sont émis par le noyau avec une énergie cinétique élevée. La masse (voisine de celle du proton) et les dimensions sont, à l'échelle atomique, élevées. Ils ne peuvent pas transmettre leur énergie par ionisation car, de charge électrique nulle, ils n'interagissent pas avec les particules chargées. Ils transmettent leur énergie par chocs élastiques ou inélastiques sur les noyaux des atomes environnants. Ils peuvent finalement être capturés par l'un de ces noyaux ou, s'ils ne sont pas capturés, se transformer spontanément au bout d'une dizaine de minutes en un proton et un électron.

Chocs élastiques (voir figure i, 1)

Dans ce type de choc, les lois de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement sont respectées. Le noyau impacté subit un recul, mais n'est pas modifié. L'énergie cédée au noyau impacté est d'autant plus élevée que ce noyau est léger. C'est pourquoi les atomes les plus légers (hydrogène, eau) sont utilisés pour ralentir les neutrons de préférence aux atomes lourds. En particulier, lors d'un choc de plein fouet avec un atome d'hydrogène, le neutron peut transférer toute son énergie. La liaison entre le proton et l'électron de l'atome d'hydrogène est alors rompue et deux particules ionisantes apparaissent donc : un proton et un électron.

Les tissus biologiques comportant de nombreux atomes d'hydrogène, le phénomène décrit ci-dessus est à la base des effets biologiques des neutrons d'énergie supérieure à 1 MeV.

Chocs inélastiques (voir figure i, 2)

Les chocs inélastiques correspondent aux interactions des neutrons d'énergie élevée (plusieurs MeV) qui

impactent des noyaux lourds. Ils sont alors captés et le noyau formé, de même nature chimique que le noyau impacté (isotope), est porté dans un état instable. Il revient à son état fondamental en émettant un neutron d'énergie plus basse puis un photon γ .

Capture des neutrons lents (voir figures i, 3 et i, 4)

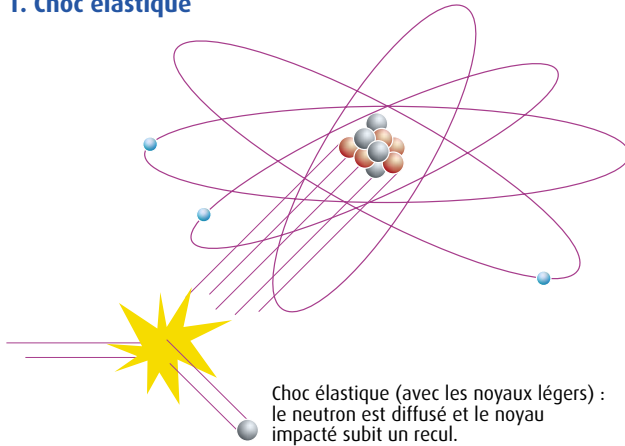
La capture des neutrons lents (énergie inférieure à 10 eV) par un noyau donne lieu à des réactions diverses du noyau :

- Capture donnant lieu à la formation d'un isotope du noyau avec émission d'un photon γ [réaction (n, γ)].
- Capture suivie de l'émission d'un proton [réaction (n, p)]. Cette réaction modifie la nature chimique de l'élément dont le noyau a été impacté.
- Capture suivie de l'émission d'une particule α [réaction (n, α)]. Cette réaction modifie la nature chimique de l'élément dont le noyau a été impacté.
- Capture suivie de la fission du noyau impacté [réaction (n, f)] avec émission de nouveaux neutrons et formation de deux noyaux plus légers appelés produits de fission. Cette réaction libère une énergie importante en raison de la perte de masse qui l'accompagne. Elle peut s'auto-amplifier lorsque des conditions dites de criticité sont remplies. Elle est exploitée dans les réacteurs nucléaires dans des conditions qui permettent de la réguler.

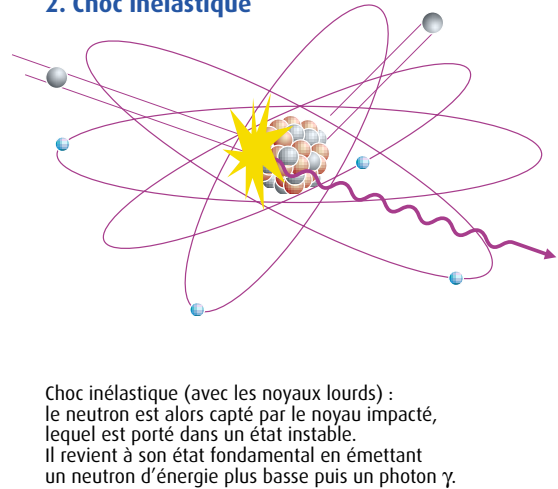
Ces phénomènes se réalisent pour des énergies très variables des neutrons incidents, mais le plus souvent pour des énergies inférieures à 10 eV. Pour certaines énergies des neutrons incidents, la capture est maximale ; on dit alors qu'il y a résonance. Ce sont ces phénomènes de capture qui permettent de comprendre pourquoi certains matériaux permettent d'arrêter les neutrons lents ou peuvent être utilisés pour la dosimétrie des neutrons.

i. Interactions des neutrons avec la matière

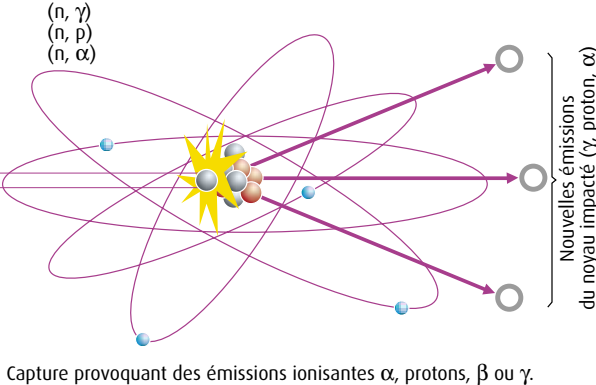
1. Choc élastique



2. Choc inélastique

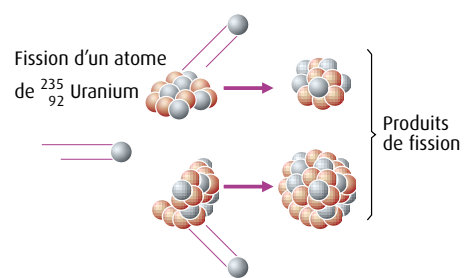


3. Réactions :



4. Fission

(n, f)



Capture d'un neutron lent par un noyau lourd, suivie de la fission de ce noyau et de la production de produits de fission (eux-mêmes généralement radioactifs) et de neutrons.

À retenir pour la radioprotection

Il faut prévenir l'exposition externe aux neutrons. Les phénomènes cités ci-dessus permettent de comprendre pourquoi certains matériaux permettent d'arrêter les neutrons.

Par exemple :

- le cadmium arrête les neutrons thermiques (d'énergie $< 0,5$ eV) ;
- l'indium arrête les neutrons de 1,45 eV (phénomène de résonance) ;

- l'eau, le polyéthylène, les matériaux très hydrogénés de façon générale atténuent les neutrons rapides suivant une loi exponentielle en fonction de l'épaisseur (on retrouve la notion d'épaisseur d'atténuation moitié ou dixième).

La mise en œuvre de ces matériaux doit être associée à celle des matériaux permettant d'arrêter ou limiter les rayonnements secondaires.

Proton : émission, interactions

Les protons sont émis dans les conditions évoquées lors de la présentation de l'interaction des neutrons avec la matière. Ce sont des particules ayant une masse très voisine de celle du neutron et électropositives (charge électrique e^+).

Les interactions avec la matière sont celles des parti-

cules α (ionisation, excitation et plus rarement interaction avec les noyaux). Cependant, les protons sont moins électropositifs que les particules α et donc moins ionisants. À énergie identique, leur parcours dans l'air ou dans l'eau est donc plus important.

Ce qui précède ne couvre cependant pas le cas des protons accélérés de haute énergie mis en œuvre dans certains accélérateurs de particules.

Émission et interaction des particules : conclusions

1. Une classification des particules peut être proposée :

Particules directement ionisantes	Particules chargées électriquement qui interagissent avec le cortège électronique des atomes qui sont sur leur passage. Au cours de ces interactions, les particules cèdent de façon certaine et progressive leur énergie. Appartiennent à cette classe : <ul style="list-style-type: none">• les particules α,• les particules β,• les protons.
Particules indirectement ionisantes	Particules non chargées électriquement, qui par leurs interactions avec la matière donnent lieu à la formation de particules directement ionisantes. Au cours de ces interactions aléatoires, l'énergie est cédée par tout ou rien à la matière. Appartiennent à cette classe : <ul style="list-style-type: none">• les photons X, γ et de freinage,• les neutrons.

Selon le phénomène dominant, l'interaction globale :

- n'est pas régie par une loi de probabilité et il n'existe pas de loi exponentielle d'absorption des rayonnements dans la matière ; c'est le cas des particules directement ionisantes ;
- est régie par une loi de probabilité et il existe une loi exponentielle d'absorption des rayonnements dans la matière ; c'est le cas des particules indirectement ionisantes.

2. Fondamentalement, les interactions des particules émises sont de deux sortes :

- interactions avec les cortèges électroniques des atomes situés sur leur parcours, donnant lieu à des phénomènes d'excitation du cortège électronique, suivis du retour à l'état fondamental ;
- interactions avec les noyaux des atomes situés sur leur parcours, donnant lieu à des phénomènes d'activation, et dans certains cas (matières fissiles) à la cassure du noyau impacté.

Analyse d'un accident dans une installation de traitement par ionisation en secteur industriel

Annexe 2

L'accident décrit ci-dessous est le résultat d'une succession d'erreurs à l'origine de l'irradiation de trois personnes.

L'installation

L'équipement en cause est un accélérateur électrostatique d'électrons. Il était initialement destiné à la stérilisation de produits pharmaceutiques et de matériels chirurgicaux, ainsi que divers autres produits.

Cette installation a été rachetée par une autre société pour la destiner au traitement par ionisation de granulés ou de copeaux de téflon (PTFE – polytétrafluoroéthylène). Cette transformation permet un recyclage du téflon.

Le principe de traitement des granulés et des copeaux de téflon est le suivant : le téflon est placé dans des bacs en aluminium qui cheminent sur un convoyeur jusqu'à la zone où ils sont irradiés en passant sous un faisceau d'électrons. En fonctionnement, le débit de dose est particulièrement important : 80 000 grays par seconde. Ceci implique la présence de dispositifs de sécurité, afin d'interrompre le fonctionnement de l'appareil en cas d'intrusion dans la salle d'irradiation ou de bloquer sa mise en route tant que celle-ci n'est pas évacuée. Dans ce dispositif, la mise en marche de l'installation nécessite plusieurs étapes :

- L'activation d'un rondier et la fermeture des portes (détectée par des contacts de fin de course). Ces manœuvres doivent être effectuées en moins de trois minutes ou être reprises au point de départ.
- Le passage sur le pupitre de la position « arrêt » à la position « marche ».
- La mise sous tension (position « haute tension »). Dans cette position un courant résiduel faible conduit à un débit de dose de l'ordre de 0,1 gray par seconde.
- La commande de l'émission du faisceau (position « beam current »). Il y a alors une intensité de 16 mA sous une tension de $1,7 \times 10^6$ V.

À noter que, sous l'effet de l'irradiation, la dégradation du téflon libère du fluor qui donne naissance, en présence de l'humidité ambiante ou de l'humidité des tissus pulmonaires, à un acide puissant, l'acide fluorhydrique. Dans ces conditions, cet acide occasionne des brûlures graves.

La durée de mise à l'arrêt de l'installation est de

15 minutes pour permettre l'évacuation de l'ozone qui se forme sous l'action des rayonnements.

Des problèmes techniques dès l'installation

- Une cuve de SF₆ (hexafluorure de soufre), placée à l'origine sous une pression de 8 bars ne présente pas les poinçons attestant des contrôles réglementaires relatifs aux équipements sous pression. Pour contourner cette obligation, la société décide de faire fonctionner l'installation à une pression inférieure (4 bars).
- Plusieurs non-conformités électriques sont également constatées.
- Le convoyeur présente plusieurs anomalies : non seulement son tracé se prête difficilement à la configuration des locaux, mais il est constitué de matériaux qui se dégradent et se fragilisent sous l'effet conjugué des rayonnements et de l'ozone.

Un incident précurseur

Lors de l'exploitation, plusieurs événements se produisent et conduisent à un premier incident. Un bac en aluminium contenant des plaques en caoutchouc se bloque sous le scanner et un incendie se déclare, endommageant l'installation et entraînant un retard de production. Les défauts de conception du convoyeur, la taille trop petite des bacs et leur déformation sous l'effet du rayonnement en raison de leur faible épaisseur sont à l'origine de ce blocage.

Monsieur X, intérimaire, muni d'un masque de protection respiratoire contre l'acide fluorhydrique, pénètre dans la salle d'irradiation pour éteindre l'incendie en empruntant la sortie du convoyeur, alors que la clé du pupitre de commande est toujours en position « haute tension ». Il signale des malaises et des maux de tête pendant une semaine.

L'accident et ses conséquences

Un mois après cet incident, Monsieur Y va effectuer la réparation d'une gaine en aluminium, située à l'a-

plomb du scanner. Celle-ci a été très fragilisée par l'irradiation répétée et la réparation se révèle plus longue que prévue. Après 15 minutes, Monsieur Y est rejoint par Monsieur Z (durée 15 minutes) et par Monsieur X. Au cours de leur intervention, ils passent à plusieurs reprises les mains, les avant-bras, la tête et le dos sous le faisceau du scanner. Monsieur Y a également été exposé aux jambes lorsqu'il était accroupi.

La reconstitution des circonstances de cet accident a mis en évidence que les opérateurs sont entrés dans la salle d'irradiation, pupitre en position « haute tension » (impliquant une exposition externe dans des conditions où le débit de dose de l'accélérateur est de 0,1 Gy/s) en empruntant la sortie du convoyeur. Cette pratique était courante, dans l'objectif de ne pas entraîner un arrêt de l'installation de 15 minutes, ce qui aurait été le cas si l'entrée par une issue équipée d'un détecteur d'intrusion avait été, comme il se devait, imposée.

Il faut également signaler que l'une des entrées disposait d'un détecteur d'intrusion mais ne comportait pas de verrou. Dans un premier temps, elle était maintenue fermée par une caisse à outils puis par un balai.

Les premiers signes d'irradiation aiguë surviennent rapidement après l'accident : démangeaisons, coloration anormale des zones exposées (« coup de soleil »), perte des cheveux, puis apparition des signes de brûlures radiologiques plus graves. Monsieur Y a été brûlé sur une zone représentant 60 % de la surface corporelle. Il a été le plus irradié comme le montre la reconstitution des doses délivrées présentée dans le tableau ci-dessous. Cette reconstitution est probablement une sous-estimation des doses réelles car on se situe aux limites de noircissement total des films dosimètres. De plus les films n'ont pas été soumis au rayonnement primaire de l'accélérateur dans certaines positions des intervenants.

Nom	Juillet 1991		Août 1991	
	Peau	Corps entier	Peau	Corps entier
Monsieur X	150 mSv	150 mSv	5 000 mSv	?
Monsieur Y	-	-	40 000 mSv	1 000 mSv
Monsieur Z	-	-	9 000 mSv	250 mSv

Conclusion

Au final, l'analyse de cet accident met en évidence de nombreuses failles techniques, organisationnelles et réglementaires :

- Il y a eu un changement d'application de l'installation d'irradiation, sans étude préalable permettant de valider cette nouvelle utilisation.
- La chaîne des dispositifs de sécurité existante était inopérante puisque, pour éviter que l'installation ne soit arrêtée par le déclenchement d'une sécurité, les opérateurs entraient dans la salle de l'accélérateur par la sortie du convoyeur. Ce faisant, ils étaient exposés à l'ozone, au fluor (et donc à l'acide fluorhydrique) ainsi qu'au rayonnement de l'accélérateur et cela dans des conditions de travail que l'on pourrait qualifier d'ordinaires. Ceci met en évidence l'absence de mesures de prévention adéquates et le non-respect des règles de sécurité les plus élémentaires : absence de mesures techniques pour interdire ou

empêcher l'entrée dans la salle par la sortie du convoyeur, de consignes de sécurité, d'information et de formation du personnel sur les risques à ce poste de travail.

- La définition technique de l'installation n'était pas adaptée à l'application, qu'il s'agisse du bâtiment, du convoyeur ou des matériaux utilisés et de leur disposition sous le scanner.
- Des éléments qui ne sont pas impliqués dans la chaîne de causalité de cet accident sont tout de même révélateurs des conditions de travail qui avaient cours : moyens de fortune utilisés pour maintenir en position fermée une porte faisant partie de la chaîne de sécurité, non-conformités diverses de l'installation.
- Les risques chimiques et radiologiques inhérents à une installation de ce type auraient nécessité la désignation d'une personne compétente en radioprotection, l'étude de ce poste de travail et la mise en œuvre des mesures organisationnelles, techniques et humaines adaptées qui auraient rendu impossible un accident de cette ampleur.

Bibliographie

Documents généraux

- D. Delacroix, J.-P. Guerre, P. Leblanc, *Guide pratique radionucléides et radioprotection*, EDP Sciences, 2004
- J. Van der Steen, C. W. M. Timmermans, A. W. van Weers, J.-P. Degrange, C. Lefaire, P. V. Shaw, *Strategies and methods for optimisation of protection against internal exposures of workers from industrial natural sources (SMOPIE)*, Report NRG 20790/04.60901/P, CEPN – R – 285, june 2004 (Annex 1, Annex 2, Annex 3/1, Annex 3/2, Annex 3/3, Annex 3/4)
- J.-C. Thévenin, « Instrumentation pour la dosimétrie individuelle des travailleurs », *Techniques de l'ingénieur*, BN 3490
- V. Archambault, G. Le Roy, B. Prugnaud, « Dosimétrie passive : introduction d'un nouveau dosimètre basé sur la technologie OSL* », *Radioprotection*, 2005, vol. 40, n° 4, p. 503 à 507
- D.-J. Gambini, R. Granier, G. Boisserie, *Manuel pratique de radioprotection*, coédition TEC & DOC Lavoisier / Éd. médicales internationales

Réglementation

- Lien vers le site Internet de l'Autorité de sûreté nucléaire : http://www.asn.gouv.fr/textes/radiopro_legis_03.asp

Normes

Les normes peuvent concerner :

- les installations ;
- la conception et la construction d'équipements de travail (enceintes de confinement, télémanipulateurs et leurs composants, accélérateurs de particules, générateurs de rayons X, jauges d'épaisseur, de densité, etc.) ;
- les systèmes de ventilation ;
- la définition et le calcul des écrans de protection contre les différents types de rayonnements ;
- les sources scellées ou non scellées ;
- l'instrumentation de radioprotection ;
- les vêtements de protection individuelle contre la contamination radioactive ;
- les vêtements de protection individuelle contre les rayonnements.

Les locaux, les équipements de travail, les écrans de protection, les sources de rayonnement, l'instrumentation de radioprotection, les vêtements de protection individuelle doivent être conçus et réalisés suivant ces normes et maintenus conformes.

On pourra consulter les sites Internet de l'AFNOR, de l'UTE, du CEN, du CENELEC, de l'ISO et de la CEI sur les thématiques précédentes pour identifier les normes pertinentes.

Publications INRS

- Site de l'INRS <http://www.inrs.fr> : Dossiers/risques physiques/Prévention des risques liés à l'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants
- *Les rayonnements ionisants. Paysage institutionnel et réglementation applicable*, ED 932
- *Les rayonnements ionisants*, coll. « Le point des connaissances sur... », ED 5027
- Les publications de l'INRS concernant la ventilation des locaux de travail, les laboratoires de chimie, les sorbonnes de laboratoire, les équipements de protection individuelle contre la contamination peuvent aussi être consultées.

*OSL : Optically Stimulated Luminescence

Pour commander les films (en prêt), les brochures et les affiches de l'INRS, adressez-vous au service prévention de votre CRAM ou CGSS.

Services prévention des CRAM

ALSACE-MOSELLE

(67 Bas-Rhin)
14 rue Adolphe-Seyboth
BP 10392
67010 Strasbourg cedex
tél. 03 88 14 33 00
fax 03 88 23 54 13
www.cram-alsace-moselle.fr

(57 Moselle)

3 place du Roi-George
BP 31062
57036 Metz cedex 1
tél. 03 87 66 86 22
fax 03 87 55 98 65
www.cram-alsace-moselle.fr

(68 Haut-Rhin)

11 avenue De-Lattre-de-Tassigny
BP 70488
68018 Colmar cedex
tél. 03 89 21 62 20
fax 03 89 21 62 21
www.cram-alsace-moselle.fr

AQUITAINE

(24 Dordogne, 33 Gironde,
40 Landes, 47 Lot-et-Garonne,
64 Pyrénées-Atlantiques)
80 avenue de la Jallère
33053 Bordeaux cedex
tél. 05 56 11 64 00
fax 05 56 39 55 93
documentation.prevention@cramaquitaine.fr

AUVERGNE

(03 Allier, 15 Cantal, 43 Haute-Loire,
63 Puy-de-Dôme)
48-50 boulevard Lafayette
63058 Clermont-Ferrand cedex 1
tél. 04 73 42 70 22
fax 04 73 42 70 15
preven.cram@wanadoo.fr

BOURGOGNE et FRANCHE-COMTÉ

(21 Côte-d'Or, 25 Doubs, 39 Jura,
58 Nièvre, 70 Haute-Saône,
71 Saône-et-Loire, 89 Yonne,
90 Territoire de Belfort)
ZAE Cap-Nord
38 rue de Cracovie
21044 Dijon cedex
tél. 03 80 70 51 22
fax 03 80 70 51 73
prevention@cram-bfc.fr

BRETAGNE

(22 Côtes-d'Armor, 29 Finistère,
35 Ille-et-Vilaine, 56 Morbihan)
236 rue de Châteaugiron
35030 Rennes cedex
tél. 02 99 26 74 63
fax 02 99 26 70 48
www.cram-bretagne.fr

CENTRE

(18 Cher, 28 Eure-et-Loir, 36 Indre,
37 Indre-et-Loire, 41 Loir-et-Cher, 45 Loiret)
36 rue Xaintrailles
45033 Orléans cedex 1
tél. 02 38 79 70 00
fax 02 38 79 70 30
prev@cram-centre.fr

CENTRE-OUEST

(16 Charente, 17 Charente-Maritime,
19 Corrèze, 23 Creuse, 79 Deux-Sèvres,
86 Vienne, 87 Haute-Vienne)
4 rue de la Reynie
87048 Limoges cedex
tél. 05 55 45 39 04
fax 05 55 79 00 64
doc.tapr@cram-centreouest.fr

ÎLE-DE-FRANCE

(75 Paris, 77 Seine-et-Marne,
78 Yvelines, 91 Essonne,
92 Hauts-de-Seine, 93 Seine-Saint-Denis,
94 Val-de-Marne, 95 Val-d'Oise)
17-19 place de l'Argonne
75019 Paris
tél. 01 40 05 32 64
fax 01 40 05 38 84
prevention.atmp@cramif.cnamts.fr

LANGUEDOC-ROUSSILLON

(11 Aude, 30 Gard, 34 Hérault,
48 Lozère, 66 Pyrénées-Orientales)
29 cours Gambetta
34068 Montpellier cedex 2
tél. 04 67 12 95 55
fax 04 67 12 95 56
prevdoc@cram-lr.fr

MIDI-PYRÉNÉES

(09 Ariège, 12 Aveyron, 31 Haute-Garonne,
32 Gers, 46 Lot, 65 Hautes-Pyrénées,
81 Tarn, 82 Tarn-et-Garonne)
2 rue Georges-Vivent
31065 Toulouse cedex 9
tél. 05 62 14 29 30
fax 05 62 14 26 92
doc.prev@cram-mp.fr

NORD-EST

(08 Ardennes, 10 Aube, 51 Marne,
52 Haute-Marne, 54 Meurthe-et-Moselle,
55 Meuse, 88 Vosges)
81 à 85 rue de Metz
54073 Nancy cedex
tél. 03 83 34 49 02
fax 03 83 34 48 70
service.prevention@cram-nordest.fr

NORD-PICARDIE

(02 Aisne, 59 Nord, 60 Oise,
62 Pas-de-Calais, 80 Somme)
11 allée Vauban
59662 Villeneuve-d'Ascq cedex
tél. 03 20 05 60 28
fax 03 20 05 63 40
www.cram-nordpicardie.fr

NORMANDIE

(14 Calvados, 27 Eure, 50 Manche,
61 Orne, 76 Seine-Maritime)
Avenue du Grand-Cours, 2022 X
76028 Rouen cedex
tél. 02 35 03 58 21
fax 02 35 03 58 29
catherine.lefebvre@cram-normandie.fr
dominique.morice@cram-normandie.fr

PAYS DE LA LOIRE

(44 Loire-Atlantique, 49 Maine-et-Loire,
53 Mayenne, 72 Sarthe, 85 Vendée)
2 place de Bretagne
BP 93405, 44034 Nantes cedex 1
tél. 02 51 72 84 00
fax 02 51 82 31 62
prevention@cram-pl.fr

RHÔNE-ALPES

(01 Ain, 07 Ardèche, 26 Drôme,
38 Isère, 42 Loire, 69 Rhône,
73 Savoie, 74 Haute-Savoie)
26 rue d'Aubigny
69436 Lyon cedex 3
tél. 04 72 91 96 96
fax 04 72 91 97 09
preventionrp@cramra.fr

SUD-EST

(04 Alpes-de-Haute-Provence,
05 Hautes-Alpes, 06 Alpes-Maritimes,
13 Bouches-du-Rhône, 2A Corse Sud,
2B Haute-Corse, 83 Var, 84 Vaucluse)
35 rue George
13386 Marseille cedex 5
tél. 04 91 85 85 36
fax 04 91 85 75 66
documentation.prevention@cram-sudest.fr

Services prévention des CGSS

GUADELOUPE

Immeuble CGRR
Rue Paul-Lacavé
97110 Pointe-à-Pitre
tél. 05 90 21 46 00
fax 05 90 21 46 13
lina.palmont@cgss-guadeloupe.fr

GUYANE

Espace Turenne Radamonthe
Route de Raban, BP 7015
97307 Cayenne cedex
tél. 05 94 29 83 04
fax 05 94 29 83 01

LA RÉUNION

4 boulevard Doret
97405 Saint-Denis cedex
tél. 02 62 90 47 00
fax 02 62 90 47 01
prevention@cgss-reunion.fr

MARTINIQUE

Quartier Place-d'Armes
97210 Le Lamentin cedex 2
tél. 05 96 66 51 31
05 96 66 51 32
fax 05 96 51 81 54
prevention@cgss-martinique.fr

Ce document est le complément technique de la brochure ED 932 *Les rayonnements ionisants. Paysage institutionnel et réglementation applicable.*

Il présente une approche applicable à toute situation de travail susceptible d'entraîner une exposition aux rayonnements ionisants.

Les rayonnements pouvant entraîner une exposition dans une situation de travail donnée doivent être identifiés avec pour objectif de mettre en œuvre les mesures de prévention qui permettent d'obtenir la maîtrise des expositions.

Ce document souligne que la maîtrise des expositions nécessite la participation active de l'entreprise, des acteurs de terrain de la prévention et des salariés concernés.



Institut national de recherche et de sécurité
pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles
30, rue Olivier-Noyer 75680 Paris cedex 14 • Tél. 01 40 44 30 00
Fax 01 40 44 30 99 • Internet : www.inrs.fr • e-mail : info@inrs.fr

Édition INRS ED 958

1^{re} édition • février 2006 • 5 000 ex. • ISBN 2-7389-1316-4