



Gestion INIS
Doc. Enreg. le 26/6/2002
N° TRN E.R.0203060

D O S S I E R D E P R E S S E

LE PROGRAMME D'INTERCOMPARAISON
INTERNATIONALE DE DOSIMÉTRIE
D'ACCIDENT
10 - 21 JUIN 2002

7 Juin 2002

Contacts :

Marie-Laure Féral - Mission Communication

☎ 01 46 54 91 27 - ✉ marie-laure.feral@irsn.fr

Jean-François Bottollier - Département de Protection de l'Homme et de Dosimétrie

☎ 01 46 54 78 62 - ✉ jeanfrancois.bottollier@irsn.fr

33 / 41

**LE PROGRAMME D'INTERCOMPARAISON INTERNATIONALE DE
DOSIMETRIE D'ACCIDENT
10 - 21 JUIN 2002**

SOMMAIRE

1. L'exercice d'intercomparaison 2002	1
A. Les motivations	
B. Le programme	
C. L'organisation	
D. Les résultats escomptés	
2. Bilan des accidents radiologiques	4
Un peu d'histoire...	
Plus de 500 accidents radiologiques	
La prévention	
3. Les effets des rayonnements ionisants à fortes doses	5
3.1. Symptomatologie	
3.2. Thérapeutique	
4. L'accident de criticité	7
4.1. Phénoménologie, moyens de prévention	
4.2. Historique des accidents jusqu'à celui de Tokai-Mura en 1999	
5. La dosimétrie de criticité	11
5.1. Dosimétrie physique	
5.2. Dosimétrie biologique	
LEXIQUE	15

1. L'exercice d'intercomparaison 2002

L'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) a élaboré un programme d'intercomparaison internationale de dosimétrie¹ d'accident pour permettre à des laboratoires venant du monde entier de tester leurs techniques de dosimétrie physique et biologique dans des conditions expérimentales simulant un accident d'irradiation. L'intercomparaison est organisée conjointement par l'IRSN et l'Agence de l'OCDE pour l'Energie Nucléaire (AEN), avec le soutien de la Commission Européenne et la collaboration du Centre CEA de Valduc. La précédente édition d'un tel exercice, organisée également par l'IRSN, s'était déroulée en 1993.

A. Les motivations

Cette expérimentation a été décidée à la suite de l'accident de criticité survenu le 30 septembre 1999 dans un atelier de fabrication de combustible nucléaire à Tokai-Mura au Japon. Considéré comme le plus grave survenu dans une installation nucléaire depuis la catastrophe de Tchernobyl en 1986, l'accident de Tokai-Mura, survenant seulement deux ans après celui de Sarov en Russie, a causé la mort de deux travailleurs des suites d'une forte irradiation et la surexposition d'un troisième et a rappelé toute les difficultés d'évaluation des doses reçues par les personnels irradiés dans de telles situations. Malgré toutes les précautions prises, un accident de criticité est toujours possible dans les installations où sont manipulées des matières fissiles, y compris dans les pays à la pointe de la technologie, à la suite de défaillances techniques ou à des erreurs humaines.

B. Le programme

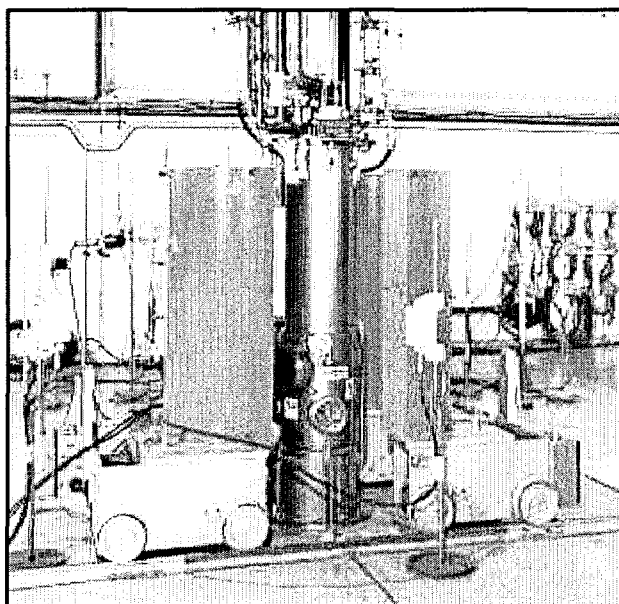
L'intercomparaison consistera en une série de quatre expériences étalées sur deux semaines, du 10 au 21 juin 2002. Les trois premières se dérouleront sur le Centre CEA de Valduc, autour du réacteur expérimental Silène. Ces expériences permettront de simuler différentes configurations d'accident de criticité entraînant une émission intense de rayonnements neutronique et gamma. La quatrième expérience se tiendra dans les installations de l'IRSN, à Fontenay-aux-Roses. Elle concernera les accidents radiologiques mettant en jeu de fortes doses de rayonnements gamma.

C. L'organisation

Une trentaine de pays d'Europe de l'Est et de l'Ouest, d'Amérique du Nord et du Sud et d'Asie participeront à cet exercice d'intercomparaison. Les systèmes mis en œuvre par chaque laboratoire participant (selon les cas, des dosimètres de zone, des dosimètres individuels ou encore des échantillons biologiques) seront exposés aux rayonnements du réacteur Silène ou aux rayonnements d'une source de cobalt 60. Les participants exploiteront leurs systèmes, sur place ou une fois de retour dans leurs propres laboratoires, et communiqueront aux organisateurs leurs résultats pour les différentes grandeurs dosimétriques mesurées (kerma, fluence, dose gamma, spectre des neutrons, etc...)². Un premier bilan sera tiré sur place à partir des premiers résultats obtenus par les différentes équipes en présence. Dans un deuxième temps, une synthèse des résultats définitifs sera préparée par l'IRSN et présentée lors d'un séminaire prévu au début de l'année 2003, avec les participants ainsi que la communauté scientifique.

¹ Dosimétrie : évaluation des doses de rayonnement reçues par un individu soumis à des rayonnements ionisants. Lorsque les rayonnements ionisants rencontrent de la matière, ils entrent en collision avec les atomes qui la constituent. Au cours de ces interactions, ils déposent une partie ou la totalité de leur énergie. La dose absorbée (exprimée en Gray) est définie par le rapport de cette énergie déposée sur la masse de matière. Un Gray correspond à une énergie déposée de un Joule dans un kilogramme de matière.

² Voir lexique.



Le réacteur SILENE

D. Les résultats escomptés

Les expérimentations permettent de tester les nouvelles techniques apparues depuis la précédente intercomparaison internationale et de confirmer ou d'améliorer les performances des techniques les plus anciennes. De plus, une telle manifestation donne l'opportunité aux participants :

- d'accéder à des dispositifs d'irradiation uniques (notamment le réacteur Silène) et qui constituent une référence sur le plan dosimétrique ;
- de comparer une large variété de méthodes physiques et biologiques d'évaluation des doses dans des conditions proches de celles d'un accident ;
- de s'assurer du bon fonctionnement des techniques mises en oeuvre ;
- d'échanger des informations avec les autres scientifiques et de discuter de nouvelles idées.

LE PROGRAMME D'INTERCOMPARAISON INTERNATIONALE DE DOSIMETRIE D'ACCIDENT
10 - 21 JUIN 2002

LISTE DES PARTICIPANTS

PAYS	NOMBRE DE REPRESENTANTS
Allemagne	3
Argentine	1
Belgique	2
Brésil	1
Canada	3
Chine	1
Corée du sud	2
Croatie	1
Espagne	2
Finlande	2
France	3
Hollande	1
Hongrie	1
Italie	4
Japon	2
Lituanie	2
Pologne	2
Roumanie	1
Royaume-uni	4
Russie	1
Slovaquie	2
Slovénie	3
Suède	1
Suisse	1
Taiwan	1
Tchéquie	1
Turquie	2
Ukraine	1
Uruguay	1
Usa	3

2. Bilan des accidents radiologiques

Un peu d'histoire...

Dès la découverte des rayons X à la fin du 19^e siècle, des accidents d'irradiation se sont produits, entraînant des effets néfastes chez l'homme. A partir des années 1940 et jusqu'en 1964, le développement des programmes de recherche et de mise au point de l'arme nucléaire ont provoqué une série d'accidents de criticité entraînant la mort de plus d'une dizaine de personnes. Dans la seconde moitié du siècle, le champ des applications des rayonnements ionisants s'est étendu au nucléaire civil et s'est diversifié de façon importante dans de nombreux secteurs tant médicaux qu'industriels.

Plus de 500 accidents radiologiques

560 accidents ont été recensés par l'IRSN sur la période 1945-2000. La figure 1 en présente la répartition par secteurs d'activité. Ces accidents ont provoqué au total la mort d'environ 180 personnes consécutivement à un *syndrome aigu d'irradiation*.

En dehors des accidents survenus dans des installations nucléaires civiles ou militaires, environ 300 accidents dus à des sources de rayonnement se sont produits dans le monde depuis la fin des années cinquante. Ils ont fait plus de mille accidentés et une soixantaine de morts. L'analyse des accidents radiologiques connus permet de constater que leur causes principales sont le manque de respect des règles de sécurité, l'erreur humaine ou l'ignorance du danger.

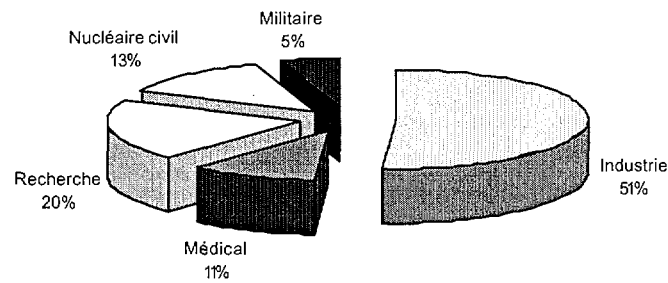
La multiplication des sources de petites dimensions à usage industriel et des erreurs dans l'utilisation de la radiothérapie ont contribué dans la seconde moitié du siècle, à une augmentation de la fréquence des accidents. Ils concernent donc des professionnels directement impliqués ou non par les sources de rayonnement (accident de Forbach, 1991), des patients (accident de Costa Rica, 1996) mais aussi des individus du public, à la suite de la perte d'une source industrielle (accident de Casablanca, 1984). La figure 2 présente la répartition des principales sources de rayonnements ionisants à l'origine des surexpositions accidentelles connues, depuis 1945.

La gamme d'accidents est variée. Dans le cas le plus simple, le blessé est unique, la source identifiée et le diagnostic est alors facile. La situation est souvent plus compliquée, en raison soit de problèmes médicaux (diagnostic et pronostic incertains, choix thérapeutiques difficiles), soit de problèmes de gestion (victimes en grand nombre), soit enfin de la dimension de l'accident, dont la maîtrise incombe alors en premier lieu aux pouvoirs publics (accident de Tokaï-Mura, 1999).

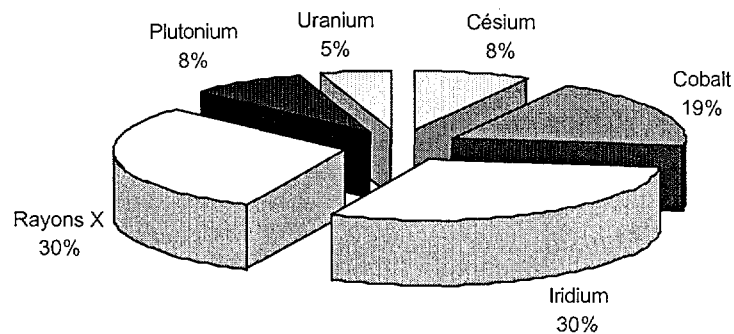
Le champ d'application des rayonnements ionisants ne cesse de croître dans les domaines de l'énergie, de la médecine et de l'industrie, et leurs utilisations nécessitent un effort et une vigilance accrues dans les domaines de la sûreté et de la protection afin de réduire au minimum le nombre et l'importance des accidents.

La prévention

L'expérience du passé montre que la prévention est essentielle et doit porter à tous les niveaux : réglementations adaptées (procédures de sécurité, contrôles,...), formation des personnels manipulant les sources, volonté de transparence pour éviter qu'un accident ne soit déclaré tardivement. Enfin, la gestion technique et médicale d'un accident nécessite des moyens adaptés à ce type de situation. Cela implique une parfaite organisation et coordination de différents spécialistes prenant en charge la situation dans toutes ses dimensions : médicale, technique et de communication.



Répartition des accidents radiologiques suivant les différents secteurs d'activité depuis 1945
(Source d'information IRSN, 2001)



Répartition des principales sources de rayonnements ionisants à l'origine des accidents radiologiques, depuis 1945
(Source d'information IRSN, 2001)

3. Les effets des rayonnements ionisants à fortes doses

D'un point de vue clinique, l'accident d'irradiation peut revêtir plusieurs formes, engendrant des problèmes médicaux et sanitaires différents et impliquant de ce fait divers spécialistes. Une irradiation aiguë du corps entier associe, selon l'intensité de l'irradiation, trois syndromes distincts (hématopoïétique, gastro-intestinal, et neurovasculaire) et nécessite une prise en charge médicale lourde. Une irradiation localisée se gère souvent comme les pathologies des brûlés et nécessite des actes de chirurgie spécialisée (accidents de Géorgie, 1997 et d'Afrique du Sud, 1998). Une pathologie mixte peut également survenir avec, par exemple une contamination interne³ associée à une blessure, l'urgence médicale classique primera donc dans ce cas. Par ailleurs, les dommages causés présentent certains caractères particuliers qui compliquent la situation et notamment, la période de latence du syndrome aigu d'irradiation peut inciter à un optimisme induisant en erreur.

³ La contamination interne résulte de l'incorporation de substances radioactives dans l'organisme, par inhalation ou ingestion, voire lors d'une blessure cutanée.

3.1. Symptomatologie

Après une exposition à de fortes doses de rayonnements ionisants, différents syndromes apparaissent et se développent par étapes successives sur des périodes de temps s'échelonnant de plusieurs heures à plusieurs jours. Ils sont constitués par l'ensemble des manifestations cliniques et biologiques en relation avec les lésions morphologiques ou les atteintes fonctionnelles des différents organes exposés aux rayonnements ionisants. L'importance du syndrome dépend, non seulement de la dose totale absorbée, de l'intensité et de la durée de l'irradiation, mais aussi de la distribution de celle-ci dans l'organisme. Le syndrome aigu d'irradiation (SAI) est en fait une combinaison de syndromes apparaissant après une irradiation globale.

Les différents tissus de l'organisme présentent des sensibilités variables aux rayonnements ionisants. La moelle osseuse est le tissu le plus radiosensible, suivi par le système gastro-intestinal. Le système nerveux central se caractérise par une radiorésistance organique et une grande radiosensibilité sur le plan fonctionnel. Cette variabilité de la radiosensibilité explique les signes et les symptômes du SAI qui apparaissent en trois phases successives : un syndrome initial se développant dans les premières heures après l'exposition, une phase de rémission sans symptômes précis et une phase de manifestation clinique et biologique (phase d'état de la maladie). La mort ou la guérison survient dans les huit semaines après l'exposition en fonction de la dose délivrée et de la susceptibilité individuelle. Des séquelles peuvent se développer ultérieurement à moyen et long terme.

Le syndrome initial se caractérise par une fatigue qui est le premier signe qui apparaît, associée à des troubles du sommeil. L'anorexie, second symptôme, se développe très rapidement après irradiation. Les nausées et vomissements, dont le délai d'apparition, la durée et le nombre d'épisodes dépendent globalement de la dose reçue, apparaissent pour des doses supérieures à 1 Gy chez l'homme. La fièvre est également un paramètre significatif car elle se développe précocement aux doses supralétales.

La période de latence ou phase de rémission qui suit le syndrome initial est relativement asymptomatique. Elle peut s'étendre jusqu'au 20^{ème} jour après l'exposition. Cette phase de rémission traduit le délai entre le dommage cellulaire initial radio-induit et son expression clinique qui est sous la dépendance du renouvellement cellulaire de l'organe affecté.

La phase d'état du syndrome aigu d'irradiation est classiquement divisée en trois syndromes majeurs qui signent les dommages radio-induits au niveau de la moelle osseuse, de l'intestin et du système nerveux central. Les deux syndromes hématopoïétique et gastro-intestinal sont considérés comme étant à l'origine de la mort pour les doses inférieures à 20 Gy :

➤ le syndrome hématopoïétique apparaît pour des doses supérieures à 1 Gy et entraîne la mort chez 50 % des individus exposés à environ 3 Gy en l'absence de toute action thérapeutique. Ce syndrome se caractérise par une dépression du nombre périphérique des globules blancs, des plaquettes et des globules rouges, dont le degré et la durée dépendent de la dose. Les conséquences, hémorragies et infections opportunistes, peuvent être dramatiques pour la personne irradiée ;

➤ le syndrome gastro-intestinal apparaît pour des doses supérieures à 8-10 Gy. Il se caractérise par une dénudation progressive de la muqueuse intestinale car l'irradiation inhibe le renouvellement des cellules du tractus digestif qui ont une durée de vie brève et doivent donc être renouvelées rapidement. Il en résulte une rupture de la muqueuse et une ulcération de l'intestin entraînant un passage des bactéries dans la circulation générale, pouvant conduire à une septicémie ;

➤ le syndrome neuro-vasculaire est le moins bien connu des trois syndromes. Il se caractérise par la présence de signes neurologiques et une mort rapide (en 2 jours environ) avant que ne puisse s'exprimer l'atteinte des systèmes gastro-intestinal et hématopoïétique. On pense généralement qu'une dose de 50 Gy est nécessaire pour qu'un syndrome neuro-vasculaire apparaisse et qu'une dose de 100 Gy entraîne des dommages directs au cerveau.

Cas particulier des neutrons

Les effets radio-induits chez l'homme en cas d'irradiation neutronique restent difficiles à prévoir, tant les doses sont réparties de manière hétérogène dans l'organisme et tant l'expérience que l'on a de ce type d'accident reste relativement limitée. L'extrapolation des données humaines et de celles de l'expérimentation chez l'animal est particulièrement délicate sinon impossible. Dans le premier cas, les données dont on dispose proviennent essentiellement des applications des neutrons en radiothérapie, correspondant à des conditions d'irradiation très éloignées de celles qui existent lors d'un accident de criticité. Concernant les données expérimentales fondées sur le modèle du petit animal, les différences de morphologie sont trop importantes pour que l'extrapolation soit valable.

Une des caractéristiques des irradiations dans un flux mixte de neutrons et de rayonnement gamma est la possibilité d'apparition de brûlures radiologiques qui peuvent être très étendues en raison de la très grande hétérogénéité de la distribution spatiale de la dose. Les manifestations sont variables et dépendent de l'importance de la dose. Les signes physiques sont schématiquement ceux des brûlures thermiques : érythème entre 4 et 8 Gy, épidermite sèche à partir de 5 Gy (plus fréquemment 8 Gy), épidermite exsudative entre 12 et 20 Gy et nécrose à partir de 25 Gy.

Ces brûlures ont pour caractéristique d'être très profondes car elles intéressent non seulement la couche épidermique mais aussi les tissus sous-jacents, notamment les muscles. Les lésions produites par les protons de recul sur les masses musculaires entraînent une lyse cellulaire avec apparition de myoglobine⁴ dans le sang périphérique, entraînant une insuffisance rénale. Pour obtenir de telles brûlures avec une irradiation gamma, il faudrait que la personne subisse une irradiation globale à une dose incompatible avec sa survie.

3.2. Thérapeutique

Le bilan des accidents radiologiques des 20 dernières années montre que l'issue a été fatale pour la plupart des victimes irradiées à doses moyennes et fortes. La prise en charge médicale d'une personne irradiée accidentellement est difficile en raison des traumatismes autres que les effets de l'irradiation (brûlures radiologiques, contamination interne, traumatismes mécaniques). Les progrès en médecine de réanimation et dans les traitements du syndrome hématopoïétique ont aidé à la prolongation de la vie des victimes récentes (Tokai-Mura) et, à l'heure actuelle, la cause essentielle de complications est l'atteinte simultanée de multiples organes. L'étude des accidents d'irradiation montre plusieurs points communs : les victimes ont pour leur très grande majorité reçu une irradiation hétérogène, et présentent une combinaison des atteintes de plusieurs systèmes : hématopoïétique, gastro-intestinal, cutané, neuro-vasculaire et pulmonaire. D'autres dommages provenant d'une contamination interne ou des traumatismes mécaniques peuvent encore compliquer les traitements. Tandis que les traitements du syndrome hématopoïétique semblent être plus efficaces qu'auparavant, les dommages des organes qui sont en interface avec le milieu extérieur (tractus digestif, peau, poumons) restent toujours difficiles à traiter.

4. L'accident de criticité

4.1. Phénoménologie, moyens de prévention

L'accident de criticité est le déclenchement incontrôlé de réactions en chaîne de fissions au sein d'un milieu contenant des matières fissiles telles l'uranium 235 ou le plutonium 239. Un accident de criticité entraîne une émission intense de rayonnements gamma et neutroniques, ainsi que notamment un dégagement de gaz de fission radioactifs (isotopes de l'Iode, du Krypton, du Xénon, ...). La réaction se développe très rapidement et peut se prolonger si le phénomène se produit en milieu liquide.

⁴ Variété d'hémoglobine qui participe au transfert de l'oxygène dans le muscle.

Le risque de criticité est donc le risque spécifique qu'ont les matières nucléaires à déclencher une réaction en chaîne incontrôlée lorsque les quantités de matière mises en oeuvre dépassent accidentellement un certain seuil appelé "masse critique". Cette masse peut varier de quelques centaines de grammes à plusieurs tonnes en fonction de la forme physico-chimique de la matière et de son environnement.

Le déroulement d'une excursion accidentelle de criticité dépend des facteurs suivants :

- la réactivité du système (seuil à partir duquel la situation de surcriticité est atteinte)
- la nature du milieu fissile (poudre, liquide, métal...)
- les réactions physico-chimiques.

L'accident de criticité est caractérisé par une libération d'énergie qui croît exponentiellement mais est rapidement autolimitée par deux effets principaux :

- l'effet lié à la température (échauffement de la matière fissile)
- l'effet lié à la formation de bulles de vapeur (effet de vide).

Toutefois, les bulles de gaz migrant vers la surface, l'effet d'antiréactivité disparaît et l'excursion de puissance redémarre. Ce processus est à l'origine du phénomène oscillatoire observé lors d'un accident de criticité en solution liquide.

Les études de criticité des installations nucléaires de base françaises sont effectuées soit en utilisant les nombreuses valeurs critiques publiées sous forme de guides de criticité, soit, le plus souvent, en effectuant des calculs à l'aide de codes qualifiés. Cette qualification est obtenue à partir d'expériences réalisées entre autres par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire qui a, à ce jour, réalisé plus de 3000 expériences portant sur tous les domaines étudiés pour les usines et laboratoires.

Toute installation nucléaire de base où existe un risque de criticité doit faire l'objet, aux stades de la conception puis de l'exploitation, d'une analyse du risque de criticité. Celle-ci doit être développée dans les rapports de sûreté propres à cette installation. L'exploitant doit démontrer que chaque appareillage de l'installation demeure à l'état sous-critique même en cas de dysfonctionnement du procédé.

Cependant, malgré tout le soin apporté à la prévention du risque de criticité tant au stade des études de dimensionnement qu'à celui de l'exploitation et malgré les mesures de sécurité prises dans une installation, il n'est jamais possible d'affirmer que la probabilité d'un accident de criticité dans cette installation est nulle, dès lors que la quantité de matière fissile est suffisamment importante.

Importance des dispositifs de protection

Comme il n'existe aucun signe précurseur d'un tel accident, seul un dispositif de détection des rayonnements neutroniques et photoniques (émis dès l'amorce de la réaction de fissions en chaîne), déclenchant une alarme sonore et visuelle suivie d'une évacuation rapide du personnel, permet de limiter l'irradiation de celui-ci. L'expérience de plusieurs accidents de criticité survenus aux USA et en Grande-Bretagne a montré que de nombreux opérateurs devaient à ces dispositifs de détection d'accident de criticité, d'être encore en vie. De tels laboratoires sont en principe équipés de détecteurs de zone et de balises émettant un signal lumineux et sonore. Des chemins d'évacuation et des points de regroupement du personnel sont prévus et des plans d'urgence sont immédiatement mis en place en cas de besoin. De telles installations font l'objet d'exercices d'alerte réguliers.

4.2. Historique des accidents jusqu'à celui de Tokai-Mura en 1999

Entre 1945 et 1965, les accidents de criticité connus hors de l'ex-URSS ont causé 8 morts, y compris les 3 victimes du souffle de l'explosion d'un réacteur expérimental à IDAHO FALLS aux USA en 1961. Les principaux accidents de ce type sont survenus dans des réacteurs de recherche ont été :

- l'accident de VINCA en Yougoslavie, le 15 octobre 1958 : 8 opérateurs furent exposés dont 5 sévèrement, avec des doses létales et sublétales. Cet accident causa un mort ; 5 victimes reçurent la première transplantation médullaire allogénique jamais pratiquée pour traiter une aplasie radioinduite ;
- l'accident d'IDAHO FALLS aux USA, le 3 janvier 1961 : une explosion due à l'excursion critique du réacteur a tué 3 personnes qui auraient de toutes façons reçu des doses supralétales ;
- l'accident de MOL en Belgique, le 30 décembre 1965 : l'opérateur d'un réacteur de recherche (à la suite d'une erreur de manipulation de barre de contrôle) a reçu une dose très élevée ; la victime a survécu mais a dû être amputée de la jambe gauche.

D'autres accidents ont eu lieu suite à des excursions critiques sur d'autres types d'installations :

- les accidents de LOS ALAMOS (USA) les 21 août 1945 et 21 mai 1946, dans des assemblages critiques expérimentaux, et le 30 décembre 1958 dans un stockage de plutonium ; chacun de ces accidents a causé un mort ;
- l'accident de RHODE ISLAND (USA) le 27 juillet 1964, sur une cuve de nitrate d'uranyle, avec de l'uranium fortement enrichi en isotope 235 ; cet accident a causé un décès et a irradié fortement deux travailleurs.

A partir de 1965, la meilleure connaissance et l'évaluation correcte des paramètres de criticité, l'élaboration précise de codes de calcul se sont traduites par une réduction drastique du nombre des situations qui peuvent conduire à des états critiques. Aucun décès par accident de criticité n'a ensuite été déploré pendant une période de 18 ans.

Le 23 septembre 1983, un accident est survenu en Argentine dans un réacteur de recherche près de BUENOS AIRES. L'excursion critique a été causée par des erreurs en chaîne pendant le changement de configuration du combustible et des barres de contrôle alors que le réacteur était à l'arrêt. Un opérateur, très fortement irradié, est mort au bout de deux jours.

D'autres accidents de criticité, d'origines diverses, ont été la cause d'irradiations à fortes doses, se soldant par des cataractes bilatérales ou des amputations de membres (trois accidents en URSS, dans les années 50), ou par des lésions moins graves (OAK RIDGE, USA, en 1958).

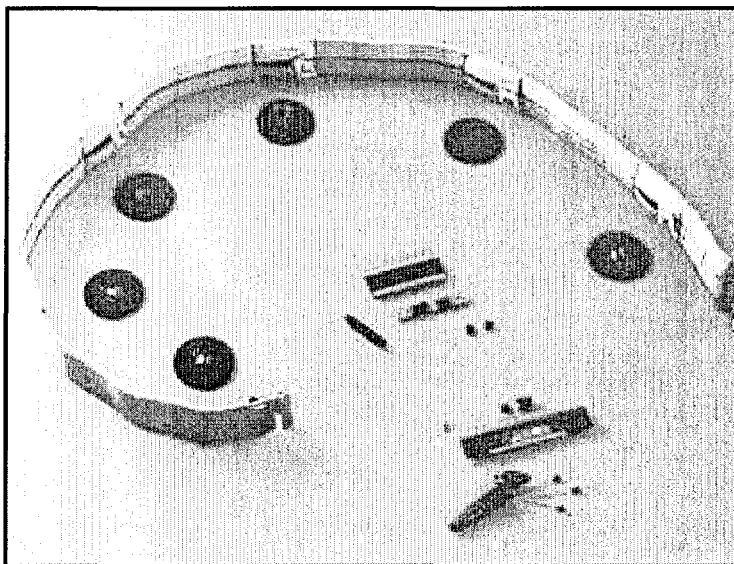
Accidents de criticité connus et ayant entraîné l'exposition de personnes

Date	Pays	Lieu	Source	Nb. Fissions	Exposés	Blessés	Décédés	Doses estimées
1945	E.-U.	Los Alamos I	Pu	1.10^{16}	2	2	1 (24j)	6 Sv
1946	E.-U.	Los Alamos II	Pu	3.10^{15}	7	7	1 (9 j)	jusqu'à 13 Gy
1952	E.-U.	Argonne			4	0	0	[0,1-1,6 Gy]
1953	URSS	ND	Pu	1.10^{16}	2	2	0	[3-4,5 Gy]
1953	URSS	Mayak	Pu	$2,5.10^{17}$	2	2	1 (7j)	10 Gy, 1 Gy
1955	URSS	ND			1	1	0	
1955	URSS	ND			1	1	0	
1957	URSS	ND			2		0	
1957	URSS	ND			1	1	0	
1957	URSS	ND			1	1	0	
1957	URSS	Mayak	U enrichi	2.10^{17}	6	6	1 (12j)	[7,5-10 Gy] pour le décès
1958	URSS	Mayak	U solut.	$2,3.10^{17}$	4	4	3	[10-20 Gy]
1958	E.-U.	Oak Ridge	U enrichi	$1,3.10^{18}$	8	5	0	[0,7-3,7 Gy]
1958	E.-U.	Los Alamos III	Pu	$1,5.10^{17}$	3		1 (35h)	[0,35-45 Gy]
1958	YOUGOSLAVIE	Vinca	U	$2,6.10^{18}$	6	6	1 (32j)	[2,1-5 Gy]
1960	URSS	Mayak	Pu	1.10^{17}	plusieurs		0	> 0,05 Gy
1961	URSS	Sibérie	UF6	5.10^{15} à 10^{16}	1		0	2 Gy
1961	E.-U.	Idaho Falls	U enrichi	$4,4.10^{16}$	12	6	3 (2:0J et 1:?)	jusqu'à 3,5 Gy
1962	E.-U.	Hanford	Pu	8.10^{17}	3	3	0	0,2-1,1 Gy
1962	E.-U.	Richland			22	2	0	
1963	URSS	Sibérie	U	8.10^{17}	4		0	[0,06-0,17Gy]
1963	URSS		Pu	5.10^{15}	6		0	[3,7-5 Gy]
1964	E.-U.	Rhode Island	U enrichi	1.10^{17} à 2.10^{16}	3	2	1 (46h)	[0,3-50 Gy]
1965	URSS	Electrostral fuel	UF6	1.10^{15}	1		0	0,035Gy
1965	Belgique	Moi	U enrichi	4.10^{17}	1	1	0	5 Gy (corps), 50 Gy (pied gauche)
1968	URSS	Mayak	Pu	1.10^{16} à 5.10^{16}	2	2	1	[1-1,5 Gy](corps)
1968	URSS	Chelyabinsk	U enrichi	6.10^{16}	2	2	2	30 et 10 Gy
1971	URSS	Kurtchatov	U enrichi	5.10^{18}	4	4	2	20 et 60 Gy (n°1 et 2), 7 et 8 Sv (n°3 et 4)
1971	URSS	Kurtchatov	U enrichi	2.10^{19}	2	2	0	
1978	URSS	Sibérie	Pu	3.10^{15}	8		0	2,5Gy (n°1) 0,05-0,6 Gy (n°2-8)
1983	Argentine	Constituyentes		4.10^{17}	7	1	1 (48h)	43 Gy (n°1)
1997	Russie	Arzamas-16	Pu	2.10^{17}	1	1	1 (3j)	[5-10 Gy] (corps)
1999	Japon	Tokai-Mura	U enrichi		39	3	2	Global : 1,2/6/9 Gy
TOTAL					> 166	65	19	

5. La dosimétrie de criticité

La dosimétrie de criticité doit permettre d'identifier rapidement les personnes irradiées, d'évaluer les doses reçues, de donner des informations sur la distribution spatiale de la dose dans l'organisme, autant d'éléments d'une importance capitale pour les médecins, s'agissant d'évaluer les risques encourus par l'accidenté et de décider du traitement le plus approprié.

En effet, le degré de gravité et l'importance des lésions induites sur l'organisme humain dépendent du type de rayonnement, de la dose reçue, de son débit de dose et de sa répartition (irradiation partielle ou totale). La connaissance de ces paramètres est donc de la plus haute importance et tous les moyens doivent être mis en oeuvre pour les connaître le plus rapidement possible.



Dosimètres individuels et ceinture individuelle de criticité

5.1. Dosimétrie physique

Les principales difficultés de la dosimétrie physique tiennent à différentes raisons :

- tous les rayonnements n'ont pas le même effet biologique sur l'organisme : il est donc nécessaire d'évaluer, aussi précisément que possible, la contribution à la dose globale des photons et des neutrons.
- les débits de dose peuvent être très élevés et pour cette dosimétrie, l'utilisation d'instruments de radioprotection électroniques classiques (dosimétrie active) est exclue,
- les détecteurs à activation⁵ qui composent les dosimètres neutroniques ne sont sensibles qu'à une gamme réduite sur l'ensemble du spectre en énergie des neutrons,
- la répartition de la dose dans le corps de l'individu irradié dépend fortement de l'orientation de celui-ci par rapport à la source de rayonnement.

En cas d'accident de criticité, des techniques particulières sont utilisées pour mesurer séparément les doses gamma et neutron. La connaissance du spectre en énergie des neutrons apporte une aide appréciable dans l'évaluation des doses. Les dosimètres individuels (associés à la ceinture de criticité) et les dosimètres de zone sont en général des détecteurs à activation. Des codes de calcul permettent, à partir de l'activité mesurée sur ces détecteurs, d'évaluer les spectres, et de calculer les grandeurs dosimétriques, fluence et kerma. Les informations données par l'activation du sodium sanguin et la mesure du phosphore des phanères recueillis sur l'accidenté peuvent compléter utilement les informations dosimétriques.

⁵ Cf. lexique.

En l'absence de tout dosimètre porté, comme ce fut le cas lors de l'accident de Tokaï-Mura, la mesure de l'activité du sodium de l'individu peut conduire à une estimation grossière de la dose reçue par l'individu. De même, la mesure de l'activation du soufre des phanères donne de précieux renseignements. L'analyse de petites quantités de phanères prélevées en différents points du corps, permet de donner une bonne approximation de la valeur de la dose reçue et de sa distribution en cas d'hétérogénéité.

La combinaison des résultats donnés, d'une part par le phosphore, d'autre part par le sodium, permet d'affiner les estimations finales des doses.

Des estimations rapides reposant sur une géométrie très simplifiée de l'accident, la connaissance de l'activité de la source, peuvent également donner des indications précieuses sur les doses reçues.

Le système français de dosimétrie de criticité repose sur deux ensembles de détecteurs :

- un Dosimètre Individuel de Criticité, le DIC, complété par une Ceinture de Criticité (CC2) ;
- un dosimètre de zone, constitué essentiellement d'un Spectromètre de Neutrons à Activation et Comptage, le « SNAC ».

Le dosimètre de zone permet de calculer la fluence des neutrons et de restituer la forme du spectre, informations à partir desquelles on peut évaluer les grandeurs dosimétriques.

Les dosimètres individuels permettent de situer la position de l'individu par rapport à celle du dosimètre de zone et de préciser son orientation par rapport à la source; ils fournissent aussi une première évaluation rapide de la dose reçue.

Dans une étape ultérieure, la reconstitution dosimétrique de l'accident, si elle est jugée nécessaire, sera menée expérimentalement et (ou) par le calcul et permettra de mieux préciser la dose reçue et sa distribution dans l'organisme. Des techniques particulières telles que la résonance paramagnétique électronique (RPE) ou la dosimétrie par thermoluminescence (TLD) peuvent également être utiles.

5.2. Dosimétrie biologique

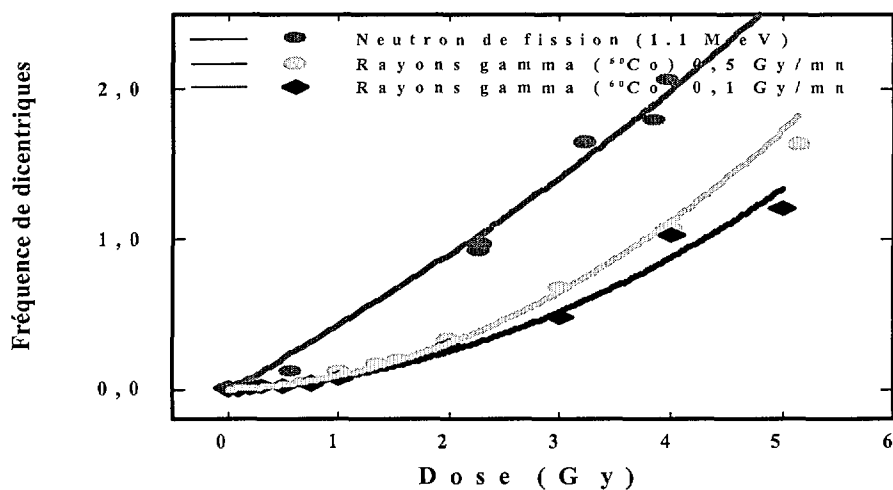
La dosimétrie biologique est l'estimation de la dose reçue par une personne potentiellement irradiée, à partir des variations radio-induites de certains paramètres biologiques. La dose est évaluée sur la base de ces données, grâce à l'utilisation de courbes de calibration « dose-effet » obtenues *in vitro*. La dosimétrie biologique est complémentaire à la dosimétrie physique et à la symptomatologie clinique dont elle utilise les informations pour mieux établir sa propre estimation. Elle est particulièrement utile dans les cas de perte de source, où des personnes du public peuvent être exposées à de fortes doses d'irradiation.

Depuis sa création en 1992, le Laboratoire de Dosimétrie Biologique Multiparamétrique (LDBM) de l'IRSN utilise une technique de cytogénétique appliquée depuis plus de 20 ans dans un petit nombre de laboratoires spécialisés : le dénombrement des aberrations chromosomiques de type instable (dicentriques et anneaux centriques), induits par les rayonnements ionisants dans les lymphocytes du sang périphérique, est considéré encore aujourd'hui comme la méthode la plus spécifique de l'irradiation et la plus sensible. Elle a d'ailleurs acquis en France comme dans d'autres pays une valeur médico-légale. L'IRSN continue d'améliorer cette technique depuis 1992 : en augmentant le nombre de courbes effet-doses, en l'adaptant au tri d'une large population par des exercices de simulation de crise, en appliquant une procédure d'assurance de la qualité par des intercomparaisons internationales, enfin en l'automatisant au moins partiellement à l'aide d'un système d'analyse d'images.

Efficace en cas d'irradiation globale et homogène, la cytogénétique conventionnelle ne permet pas de répondre complètement aux irradiations hétérogènes ou anciennes. C'est pourquoi un programme de recherches complémentaires a été établi pour trouver de nouveaux bioindicateurs de dose ou d'effet. Ces bioindicateurs sont d'abord recherchés en cytogénétique, sur les lymphocytes, en raison de l'effet connu des rayonnements ionisants sur le patrimoine génétique : le dénombrement des micronoyaux et la visualisation des aberrations chromosomiques stables par hybridation *in situ* fluorescente (FISH) sont deux des techniques actuellement développées à l'IRSN. Par ailleurs, d'autres paramètres biochimiques et biophysiques sont recherchés au niveau cellulaire ou au niveau tissulaire, afin de répondre plus spécifiquement aux atteintes hétérogènes. Ce sont des bio-indicateurs d'effet, dans la mesure où ils sont plus destinés à estimer l'atteinte radio-induite que la dose réellement reçue. Beaucoup de ces indicateurs biologiques ont déjà été validés *in vitro* et feront l'objet, dans un proche avenir, d'une validation sur l'animal puis sur l'homme. Ceci sera possible grâce aux nombreuses collaborations nationales et internationales du LDBM, notamment avec des structures hospitalières.

Spécificité des neutrons

Pour répondre à la question spécifique de l'accident de criticité, le LDBM utilise depuis 1993 le réacteur expérimental SILENE implanté sur le Centre de Valduc, afin de construire des courbes de calibration pour les neutrons et ainsi répondre aux problèmes d'estimation de dose liés à une exposition accidentelle à un flux mixte neutron/gamma. On peut obtenir des informations complémentaires sur l'hétérogénéité de la dose et sur les doses « neutrons » et « gamma » reçues lors d'un accident de criticité, par l'utilisation d'outils mathématiques, à partir d'informations simples venant de la dosimétrie physique.

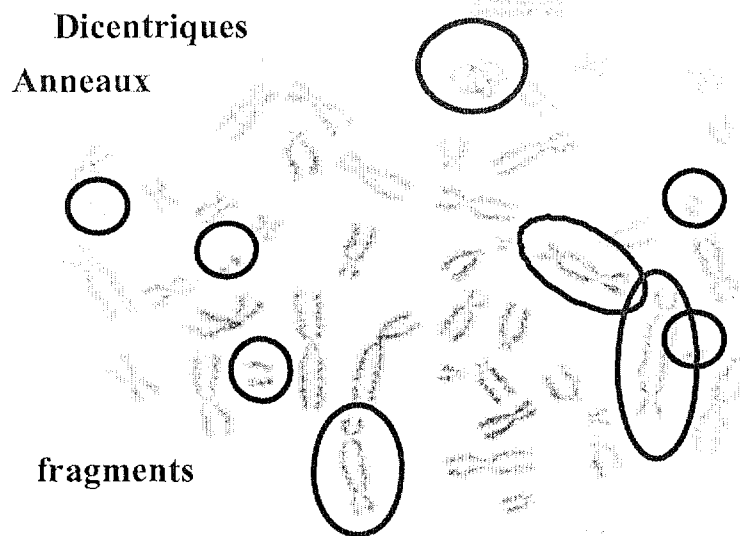


Une vérification expérimentale de cette estimation a été réalisée par l'IRSN en collaboration avec le NRPB (National Radiological Protection Board, Royaume-Uni), lors de l'intercomparaison internationale qui s'est déroulée auprès de SILENE en 1993, au cours de laquelle la comparaison entre la dose estimée par la biologie pour les composantes γ et neutron et la dosimétrie physique prise comme référence a montré un accord très satisfaisant dans toutes les configurations expérimentales. Ces résultats obtenus sur du sang irradié *in vitro* constituent une approche de ce qui se passerait *in vivo* lors d'un véritable accident de criticité.

Aussi l'intercomparaison internationale qui est programmée à Silène du 10 au 21 juin 2002, visera à répondre à un triple but :

- assurer une politique d'assurance qualité à l'échelon international en permettant à des laboratoires de dosimétrie biologique étrangers de comparer leurs techniques de dosimétrie biologique par l'échange de matériels biologiques soumis aux mêmes conditions d'irradiation ;
- permettre aussi à ces laboratoires d'accéder à des expositions calibrées de neutrons de fission, ce qui est particulièrement important compte tenu du nombre réduit de réacteurs expérimentaux permettant ce type d'irradiation ;
- confirmer les résultats obtenus lors de l'intercomparaison de 1993.

D'un point de vue pratique, des tubes de sang seront exposés autour du réacteur Silène, accrochés à un mannequin, pour simuler au mieux l'exposition corporelle. Les prélèvements sanguins seront traités sur place, les lymphocytes prélevés et fixés afin de faciliter leur transport vers les autres laboratoires. Les tests proposés pour l'intercomparaison sont des tests cytogénétiques : dénombrement des aberrations instables (dicentriques, micronoyaux) et aberrations stables (translocations). Le laboratoire de l'IRSN sera aidé dans cette tâche de préparation des prélèvements sanguins par un spécialiste du laboratoire de dosimétrie biologique du NRPB. Rappelons que le laboratoire du NRPB avait déjà participé avec celui de l'IRSN au précédent exercice organisé en 1993.



LEXIQUE

Aberrations chromosomiques

Anomalies de structure qui sont la conséquence de cassures chromosomiques suivies par un ou plusieurs recollements anormaux. Par définition les trisomies résultent de remaniements de structure. Elles peuvent être instables, c'est à dire disparaître en quelques mois (ex : dicentrique, anneau centrique) ou rester stables sur plusieurs années (ex : translocation).

Activation

Phénomène par lequel des noyaux atomiques sont rendus radioactifs sous l'action d'un flux de neutrons ou d'autres particules.

Activité

Nombre de désintégrations spontanées de noyaux atomiques par unité de temps. L'unité d'activité est le Becquerel (Bq).

ADN (acronyme de "acide désoxyribonucléique") :

Support de l'information génétique, constitué de quatre bases nucléiques : l'Adénine, la Cytosine, la Guanine et la Thymine (en abrégé ACGT)

Anneau Centrique

Il résulte d'une cassure à chaque extrémité d'un chromosome suivie par un recollement avec perte des segments distaux.

Anorexie

Perte de l'appétit.

Becquerel (Bq)

Unité de mesure de l'activité nucléaire (1 Bq = 1 désintégration de noyau atomique par seconde). L'activité nucléaire était précédemment mesurée en Curie (1 Curie = 37 milliards de Becquerels). (Voir Activité)

Bioindicateur (de dose ou d'effet)

Paramètre biologique, dont les variations (ici radio-induites) permettent de quantifier ou d'informer sur un certain état de la cellule, du tissu ou de l'organisme.

Caryotype

Aperçu des vingt-trois paires de chromosomes (pour l'Homme) qui constituent le génome.

Chromosome

Filament d'ADN (voir ADN) localisé dans le noyau de la cellule contenant une longue double hélice d'ADN, formant des structures en " bâtonnets " associées par paires (dans les cellules diploïdes) et portant les gènes qui contiennent notre patrimoine génétique. Il existe vingt-trois paires de chromosomes; le sexe masculin se caractérise par la présence d'un chromosome X et d'un chromosome Y, et le sexe féminin par deux chromosomes X. Les chromosomes sont visibles au moment de la division de la cellule.

Cytogénétique

Etude génétique des cellules somatiques; ou partie de la génétique appliquée à l'observation au microscope du noyau des cellules, en particulier des chromosomes.

Débit de dose absorbée

Dose absorbée par unité de temps (en Gray par heure). (Voir Dose absorbée)

Détecteurs

Appareils servant à détecter des rayonnements.

Dicentrique

Ce chromosome résulte de la fusion de deux chromosomes homologues ou non homologues, comportant chacun leur centromère.

Dose

Grandeur caractérisant l'exposition des personnes soumises à des rayonnements. (voir Dose absorbée)

Dose absorbée

La dose absorbée est définie comme étant l'énergie transmise à la matière par des rayonnements ionisants et par unité de masse de cette matière.

Dosimètre

Appareil permettant de mesurer des doses. (Voir Dose)

Dosimétrie

Détermination, par la mesure à l'aide de dosimètres ou par le calcul, de la dose de rayonnement absorbée par une substance ou un individu. (Voir Dose, dose absorbée)

Dosimétrie biologique

Évaluation de la dose d'exposition à un facteur chimique ou physique, à partir des modifications induites par ce facteur sur certains paramètres biologiques.

Epidermite

Lésions vasculaires dermiques apparaissent au bout de quelques mois après une irradiation.

Épithélium

Tissu formé de cellules jointives reposant sur une lame basale.

Érythème

Rougeur congestive de la peau qui disparaît sous la pression des doigts.

Fissile

Se dit d'un nucléide dont les noyaux sont susceptibles de subir une fission sous l'effet de tout apport d'énergie, aussi faibles soient-ils. Exemples : l'uranium 233, l'uranium 235, le plutonium 239, le californium 252. D'autres radionucléides se prêtent à la fission pour des énergies supérieures à une certaine valeur appelée seuil de fission (exemple: le thorium 232, l'uranium 238, le plutonium 240). L'adjectif fissile ne leur est pas applicable. Il ne s'applique qu'aux nucléides sans seuil de fission. (Voir Fission)

Fission

Éclatement, généralement sous le choc d'un neutron, d'un noyau lourd en deux ou trois noyaux plus petits, accompagné d'émission de particules telles que les neutrons, de rayonnements gamma et d'un important dégagement de chaleur. Cette libération importante d'énergie, sous forme de chaleur, constitue le fondement de la génération d'électricité d'origine nucléaire. (Voir Fissile, Neutron)

Fluence

Nombre de particules incidentes (neutrons) par unité de surface.

Gamma (rayonnement)

Rayonnement électromagnétique (symbole γ) de même nature que la lumière, émis par la plupart des noyaux radioactifs. (Voir Irradiation, Rayonnement ionisant)

Génome

Ensemble des gènes qui constitue le patrimoine héréditaire

Gray

Unité de mesure de dose absorbée. L'ancienne unité de dose absorbée était le Rad (1 Gray = 100 Rad). (Voir Dose absorbée)

Hématopoïèse

Formation des éléments figurés du sang.

Hybridation in situ fluorescente (FISH)

Opération qui consiste à marquer une portion de chromosome par une sonde fluorescente constituée à partir d'un fragment d'ADN fabriqué artificiellement. Cela permet d'observer et de dénombrer les anomalies stables (transmises au cours de la division cellulaire).

Irradiation

Action de soumettre un objet ou organisme à un rayonnement émis par une source externe.

Kerma (Kinetic energy releases in matter)

Quotient de la somme des énergies cinétiques initiales de toutes les particules chargées qui libèrent les particules indirectement ionisantes dans une substance donnée, par la masse de matière de cet élément. S'exprime en joule par kilogramme.

Lyse

Destruction.

Métaphase

Stade de la division cellulaire où les filaments d'ADN que contient le noyau sont individualisés sous forme de chromosomes.

Micronoyaux

Petites masses d'ADN résultant du rejet de portions anormales de chromosomes, dont le nombre est lié au niveau d'irradiation.

Muqueuse

Ensemble formé par un épithélium (voir ce mot) reposant sur du tissu conjonctif (voir tissu conjonctif).

Nécrose

Processus dégénératif aboutissant à la destruction d'une cellule ou d'un tissu.

Neutron

Particule fondamentale électriquement neutre qui entre, avec les protons, dans la composition du noyau de l'atome. C'est le neutron qui provoque la réaction de fission des noyaux dont l'énergie est utilisée dans les réacteurs nucléaires. Pour arrêter les neutrons, il faut plusieurs centimètres de béton ou d'eau. (Voir Fissile, Spectre)

Rayonnement ionisant

Rayonnement sous forme électromagnétique (photons X ou gamma) ou corpusculaire (particules alpha ou bêta, neutrons) capable de produire directement ou indirectement des ions en traversant la matière. Les rayonnements ionisants sont produits par des sources radioactives et certains générateurs électriques.

En traversant les tissus vivants, les ions provoquent des phénomènes biologiques pouvant entraîner des lésions dans les cellules de l'organisme, notamment au niveau de l'ADN. (Voir Irradiation, Gamma, neutrons, rayonnement neutronique)

Rayonnement neutronique

Rayonnement constitué de neutrons, capable de produire directement ou indirectement des ions en traversant la matière. (Voir Neutrons, Irradiation)

Réactivité

Rapport du nombre total de neutrons produits dans un milieu fissile donné au cours d'un intervalle de temps, au nombre total de neutrons perdus par absorption et par fuite au cours du même intervalle de temps. (Voir Fissile)

Spectre

Représentation de la contribution énergétique d'un rayonnement. Le spectre d'émission est la caractéristique d'un rayonnement émis par une source, représentant la contribution des différentes radiations le composant en fonction de leur énergie.

Tissu conjonctif

Tissu formé de cellules non jointives dispersées dans une substance fondamentale.