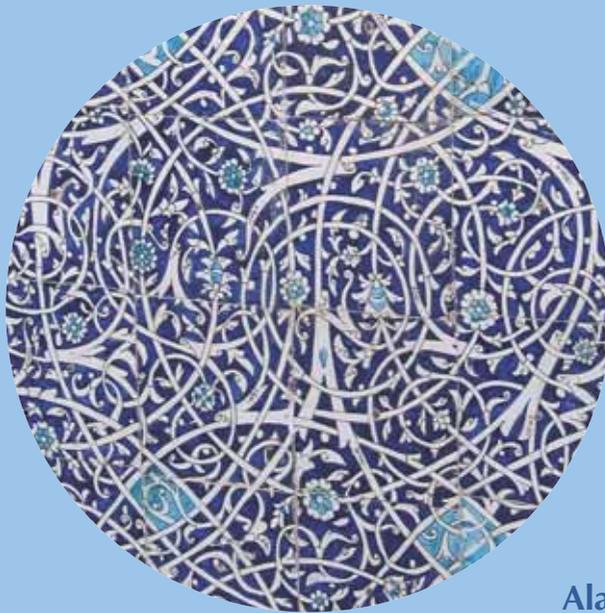


RADIOPROTECTION

Revue de la Société Française de Radioprotection

Conduite à tenir face aux victimes d'un accident de criticité



Alain Miele
Laurence Lebaron-Jacobs

Coordinateurs

Volume 40, Suppl. 2 (2005)

RADIOPROTECTION

Volume 40, Suppl. 2 (2005)

Conduite à tenir face aux victimes d'un accident de criticité

Alain Miele, Laurence Lebaron-Jacobs

Coordinateurs



17, avenue du Hoggar
Parc d'Activité de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Illustration de couverture : Photographie d'Elisabeth Miele, majolique de l'entrée de la mosquée d'été à Khiva, Ouzbekistan. De la flore stylisée aux traces de parcours neutroniques...

ISSN : 0033-8451

ISBN : 2-86883-868-5

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

Avant propos

Ce travail relatif à la conduite à tenir sur le terrain face aux victimes d'un accident de criticité fait suite à des études antérieures.

En effet, l'évolution des connaissances physiopathologiques, des moyens d'investigation et thérapeutiques, le retour d'expérience d'événements récents ont généré le besoin d'un guide à la portée très pragmatique pour les acteurs de terrain.

Ce travail est le fruit d'un groupe de travail mené par des médecins des services de santé au travail et des biologistes des laboratoires d'analyses de biologie médicale du CEA et de COGEMA aux quels se sont joints des praticiens d'EDF et du SPRA.

Il est le fruit d'une approche pluridisciplinaire exemplaire grâce à la contribution d'experts tant de l'IRSN que de la Direction des Sciences du Vivant du CEA (cellule Carmin).

Il s'articule avec les procédures des services de radioprotection et l'organisation nationale des soins médicaux en cas d'accident nucléaire ou radiologique.

J.M. GIRAUD

Conseiller Médical CEA

B. QUESNE

Conseiller Médical AREVA

Sommaire

Introduction	1
Phénoménologie d'un accident de criticité	5
1. Conditions de survenue d'un accident de criticité	6
2. Classification des accidents de criticité en « familles »	8
Fiche 1 - Principales caractéristiques des différentes « familles » d'accident	10
Pour en savoir plus	11
Radiopathologie	13
1. Prise en charge de personnes irradiées et/contaminées lors d'un accident de criticité	13
Fiche 2 - Estimation de la gravité d'une irradiation lors d'un accident de criticité	14
Fiche 3 - Les premiers symptômes : le syndrome initial (24 h)	15
Fiche 4 - Conduite à tenir devant un syndrome initial	16
2. Évolution clinique lors d'accidents de criticité	16
Fiche 5 - Bilans à effectuer lors de l'hospitalisation	18
Diagnostic dosimétrique	19
1. Détermination de la dose absorbée lors d'un accident de criticité	19
1.1. Atomes activés pris en compte	19
1.2. Méthode de mesure de l'activité	20
1.3. Évaluation de la dose due aux neutrons à partir du ^{24}Na	20
1.4. Évaluation de la dose due aux neutrons à partir du ^{32}P	21

2. Détermination de la dose absorbée dans le cas particulier d'une contamination externe	22										
3. Fiches d'aide aux décisions	23										
<table border="0"> <tr> <td>Fiche 6 - Circuits de prise en charge</td> <td>23</td> </tr> <tr> <td>Fiche 7 - Indications des prescriptions et orientation des victimes</td> <td>24</td> </tr> <tr> <td>Fiche 8 - Chronologie des résultats des examens</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>Fiche 9 - Interrogatoire après l'accident</td> <td>26</td> </tr> <tr> <td>Fiche 10 - Observations cliniques</td> <td>27</td> </tr> </table>		Fiche 6 - Circuits de prise en charge	23	Fiche 7 - Indications des prescriptions et orientation des victimes	24	Fiche 8 - Chronologie des résultats des examens	25	Fiche 9 - Interrogatoire après l'accident	26	Fiche 10 - Observations cliniques	27
Fiche 6 - Circuits de prise en charge	23										
Fiche 7 - Indications des prescriptions et orientation des victimes	24										
Fiche 8 - Chronologie des résultats des examens	25										
Fiche 9 - Interrogatoire après l'accident	26										
Fiche 10 - Observations cliniques	27										
4. Dosimétrie biologique par dénombrement des aberrations chromosomiques. Technique médico-légale	29										
4.1. <i>Quand utiliser la dosimétrie biologique</i>	29										
4.2. <i>Les différents types d'aberrations chromosomiques</i>	30										
4.3. <i>Dosimétrie biologique opérationnelle</i>	35										
4.3.1. Chromosomes prématurément condensés (PCC) par fusion	35										
4.3.2. Chromosomes prématurément condensés (PCC) par induction chimique	36										
4.4. <i>L'accident de Tokai-Mura</i>	36										
4.5. <i>Application à l'irradiation localisée</i>	37										
5. Indicateurs biologiques des dommages radio-induits	37										
5.1. <i>Le Flt3 ligand, marqueur de lésions de la moelle osseuse</i>	38										
5.2. <i>Le citrulline, marqueur de lésions de la muqueuse intestinale</i>	39										
5.3. <i>Les oxystérols, marqueurs du dysfonctionnement multiple des organes</i>	39										
6. Dosimétrie physique : fiches 11, 12	40										
<table border="0"> <tr> <td>Fiche 11 - Estimation de la dose en cas d'accident de criticité</td> <td>40</td> </tr> <tr> <td>Fiche 12 - Dosimètres utilisés</td> <td>43</td> </tr> </table>		Fiche 11 - Estimation de la dose en cas d'accident de criticité	40	Fiche 12 - Dosimètres utilisés	43						
Fiche 11 - Estimation de la dose en cas d'accident de criticité	40										
Fiche 12 - Dosimètres utilisés	43										
Pour en savoir plus	44										
Organisation des secours	45										
1. Tri des urgences pour l'évacuation des blessés	45										
2. Recommandations pour les SST et LABM	46										
<table border="0"> <tr> <td>Fiche 13 - Classification des blessés</td> <td>47</td> </tr> <tr> <td>Fiche 14 - Fiche de tri et d'évacuation</td> <td>48</td> </tr> <tr> <td>Fiche 15 - Examens à réaliser en cas d'accident de criticité</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>Fiche 16 - Prélèvements spécialisés</td> <td>52</td> </tr> </table>		Fiche 13 - Classification des blessés	47	Fiche 14 - Fiche de tri et d'évacuation	48	Fiche 15 - Examens à réaliser en cas d'accident de criticité	50	Fiche 16 - Prélèvements spécialisés	52		
Fiche 13 - Classification des blessés	47										
Fiche 14 - Fiche de tri et d'évacuation	48										
Fiche 15 - Examens à réaliser en cas d'accident de criticité	50										
Fiche 16 - Prélèvements spécialisés	52										
Communication	53										
1. Information du personnel accidenté faiblement exposé, pris en charge secondairement	53										

2. Information des médecins des services hospitaliers d'accueil et de leur collaborateurs	55
2.1. <i>Qu'est-ce qu'un accident de criticité ?</i>	55
2.2. <i>Comment ont été pris en charge par le service de santé au travail du site les agents impliqués dans l'accident de criticité ?</i>	55
2.3. <i>Quels ont été les critères d'hospitalisation ?</i>	56
2.4. <i>Comment ont été orientés les sujets nécessitant une hospitalisation ?</i>	56
2.5. <i>But de l'hospitalisation après irradiation globale</i>	57
2.6. <i>Évolution lors de l'hospitalisation</i>	57
2.7. <i>Où s'adresser ?</i>	58
3. Information et liaison avec les médecins généralistes	58
3.1. <i>Qu'est-ce qu'un accident de criticité ?</i>	58
3.2. <i>Comment ont été pris en charge par le service de santé au travail du site les agents impliqués dans l'accident de criticité ?</i>	58
3.3. <i>Quels ont été les critères d'hospitalisation ?</i>	59
3.4. <i>Quels ont été les critères de surveillance ambulatoire ?</i>	59
3.5. <i>Quels sont les critères de gravité devant orienter vers une hospitalisation ?</i>	59
3.6. <i>Où s'adresser ?</i>	60
4. Information pour les agents appelés à être suivis par leur médecin traitant	60
Pour en savoir plus	61
Annexes	63
– Urgences radiologiques	63
– Historique du GT Criticité des SST/LABM	64
– Accidents de criticité	65
– Bibliographie succincte de l'accident de Tokai-Mura	71
– Réglementation	75
À propos des auteurs	77

Introduction

L'extrême gravité des accidents de criticité et les décès qu'ils ont occasionnés encore récemment (Sarov en 1997 et Tokai Mura en 1999), témoignent de la nécessité d'une vigilance soutenue et d'une formation permanente adaptée. L'étude des accidents de criticité recensés à ce jour renseigne sur les conditions de survenue de ces événements. Malgré les procédures et organisations mises en place, les installations présentent une situation potentiellement défailante, donc une probabilité non nulle d'occurrence d'accident.

L'objectif du groupe de travail des services de santé au travail (SST) et laboratoires d'analyse de biologie médicale (LABM) est de présenter sous forme de fiches, des données essentielles en terme de documentation et d'éléments de conduite à tenir face aux victimes d'un accident de criticité. Sans prétention exhaustive, ces fiches, rapidement accessibles, sont une aide à la décision.

Ces fiches sont destinées aux SST, aux LABM et aux Services de Protection contre les Rayonnements (SPR), services chargés de mettre en œuvre les dispositions d'enquête et de prise en charge des personnes exposées puis de les orienter vers les structures médicales adaptées. Ces premières dispositions doivent contribuer à la reconstitution dosimétrique individuelle et au suivi ultérieur en fonction des différents niveaux d'exposition.

Parallèlement, d'autres mesures seront à prendre pour les personnes impliquées moins exposées et pour l'arrêt de tout risque de poursuite ou de reprise de criticité.

Ces fiches comportent les chapitres suivants :

- Les accidents de criticité : phénoménologie, circonstances, description succincte et principales caractéristiques.
- La radiopathologie : effets sur la santé, délai d'apparition en fonction de la dose reçue.
- La dosimétrie : évaluation de la dose reçue et de la répartition corporelle ; méthodes d'évaluation.
- Le tri : principaux critères pour orienter les personnes exposées vers un hôpital spécialisé, un hôpital général, la médecine générale ou la médecine du travail.
- Les prélèvements biologiques : à visée radiotoxicologique, dosimétrique, de diagnostic et de pronostic.
- Les procédures de renfort et d'assistance entre SST et LABM disposant d'installations et de techniques appropriées.
- Des fiches communication à l'attention des personnes du site faiblement ou non exposées, pour les services hospitaliers d'accueil et les médecins traitants.

Des annexes complètent le document : textes réglementaires, synthèses des précédents travaux du GT criticité, bibliographie, adresses utiles et liste des accidents recensés.

Les réflexions du groupe, étayées par l'analyse de l'accident de Tokai Mura, confirment les difficultés de prise en charge d'un accident de criticité, tant sur l'évaluation dosimétrique que sur la prise en charge thérapeutique.

La reconstitution dosimétrique se heurte à un certain nombre de problèmes :

- incertitude sur la topologie et la cinétique de l'accident,
- connaissance du terme source : rapport dose neutron/dose gamma et spectre énergétique,
- maintien de compétence en matière de mesures d'activation neutronique sur l'organisme ou sur ses prélèvements biologiques : sang et phanères,
- limites des dosimètres individuels et d'ambiance.

Sur le plan de la prise en charge médicale, la spécificité des effets à court et à long terme d'une exposition mixte neutron/gamma (*ipso facto* hétérogène) est insuffisamment appréhendée. Certaines manifestations, dont la gravité semble spécifique de l'irradiation neutronique (syndrome inflammatoire, hémorragique...) impliquent une thérapeutique complexe, difficile à anticiper et à conduire avec efficacité. Cette prise en charge médicale nécessite une coordination des équipes spécialisées. Le développement et l'interprétation d'indicateurs biologiques, cliniques et dosimétriques est un préalable à l'optimisation des traitements palliatifs et spécifiques en fonction des caractéristiques de l'irradiation : importance et distribution de la dose absorbée.

L'étude des accidents avec victimes renseigne sur les conditions de survenue de ces événements dont la probabilité d'occurrence n'est pas nulle. Malgré les procédures et protocoles construits pour les empêcher, la réalité se manifeste alors en dehors de ces constructions mentales. Les installations réalisées après études de sûreté et de sécurité ont potentiellement, de ce fait, une structure défaillante.

Le diagnostic dosimétrique modélisé à partir d'une situation théorique se heurte à différentes difficultés : encombrement des locaux, écrans divers, Kerma des neutrons, efficacité biologique relative, rapport D^n/D' . Le diagnostic dosimétrique rapide à partir de l'activation neutronique des victimes est tout aussi difficile : exposition de face, de profil, globale ou partielle, hétérogène. Dans la phase tri d'urgence, l'estimation dosimétrique ne peut être qu'approximative sur des signes de gravité : mesures d'activation et premiers signes cliniques éventuels. Ce n'est qu'ultérieurement que l'ensemble des résultats d'investigations et de mesures permettra une estimation dosimétrique et un pronostic.

Situation d'urgence et urgence de la situation : l'urgence n'est pas comparable à une situation de polytraumatismes avec ou sans contamination. Par contre, un certain nombre de points sont importants :

- Le groupage HLA, pour qu'il reste possible, doit être fait dans les premières heures. Son intérêt est double : son obligation médico-légale (note de la direction générale de la santé, DGS) et dans l'éventuelle indication ultérieure de greffe de moelle.
- La précocité et la répétition des bilans seront une aide précieuse pour le diagnostic dosimétrique et le pronostic.
- La réanimation doit prendre en compte la forte hétérogénéité de l'irradiation avec possibilité d'une lyse tissulaire massive au point d'incidence.

- Par ailleurs, pour les personnes faiblement exposées, les investigations réalisées seront des éléments indispensables pour la surveillance ultérieure et l'estimation du risque stochastique (cancer, effets génétiques éventuels).

Un premier bilan pourrait être établi dans les 3 premières heures.

L'information programmée des différentes cellules de crise par les SST, les LABM et les SPR, devrait diminuer leurs sollicitations extérieures, alléger ainsi leurs tâches en leur permettant de se concentrer sur leurs objectifs et de faire appel aux renforts nécessaires.

La prise en charge des victimes, le soutien psychologique nécessaire et les évacuations vont générer des besoins en liaison et en communication. L'évacuation vers les structures hospitalières ou le suivi par le médecin traitant doivent bénéficier de documents support pour la conduite à tenir.

En conclusion, à l'issue de ses travaux, « le groupe de travail criticité » des médecins et biologistes recommande aux médecins coordonnateurs et aux directions :

- Une actualisation pour chaque installation à risque de criticité des différents paramètres utiles : le terme source, le rapport dose neutron/dose gamma, le nombre de personnes potentiellement impliquées, le type et le nombre des dosimètres individuels et de zone, les courbes isodoses, la zone d'évacuation...
- Le maintien des compétences de toutes les structures impliquées dans l'évaluation dosimétrique et un retour d'expérience des cas accidentels.
- L'optimisation de la coordination entre les Centres pour l'exploitation dosimétrique.
- La création d'un protocole de coordination entre les équipes hospitalières et l'établissement de conventions avec les différents exploitants nucléaires.
- L'harmonisation des organisations et conventions entre exploitants nucléaires.
- Enfin, le développement de thèmes de recherche concernant les effets à court et à long terme d'une exposition neutronique.

Phénoménologie d'un accident de criticité

Les matières nucléaires fissiles (les principales sont ^{235}U et ^{239}Pu) présentent la propriété de pouvoir, dans certaines conditions, entretenir des réactions de fission en chaîne. C'est cette propriété qui est utilisée pour la production d'énergie dans les réacteurs nucléaires.

En dehors des réacteurs nucléaires, dans les laboratoires, les usines et les transports, les matières fissiles présentent donc un risque particulier de criticité : risque de réunir les conditions d'amorçage et d'entretien d'une réaction en chaîne. Ce risque apparaît par exemple dès que l'on rassemble plus de 60 kg d'uranium enrichi à 3,5 % en ^{235}U ou, sous certaines conditions, plus de 510 g de solution de plutonium ou 870 g de solution d'uranium très enrichi. Dans les réacteurs nucléaires, ce même risque peut conduire également à un accident de réactivité.

La prévention du risque de criticité impose de prendre des précautions particulières qui font l'objet d'études et d'analyses à tous les stades de la mise en œuvre des matières fissiles dans le cycle du combustible. Malgré toutes les mesures de prévention du risque de criticité, on ne peut pas totalement exclure la possibilité qu'un accident de criticité ne survienne souvent très brusquement et sans signe précurseur lorsque la quantité de matière fissile présente dépasse la masse critique. Que se passe-t-il alors et quels sont les risques encourus ? C'est pour répondre à ces questions que des programmes d'études des accidents de criticité ont été entrepris avec pour enjeu l'amélioration de la connaissance et de la modélisation des accidents dans le but d'en limiter les conséquences sur l'homme, l'environnement et les installations.

Rappelons en effet qu'à ce jour une soixantaine d'accidents ont été recensés dans le monde, pour deux tiers dans des installations de recherche et pour un tiers dans des installations du cycle du combustible provoquant le décès d'une vingtaine d'opérateurs (voir la section « Pour en savoir plus »).

En France, dans le cycle du combustible, grâce aux dispositions prises, aucun incident entraînant une irradiation aiguë d'opérateur n'a été à déplorer, mais des situations qui auraient pu conduire à un accident ont cependant été rencontrées. Pour les réacteurs de recherche, on doit noter que deux accidents se sont produits à Saclay, sans entraîner d'irradiation grave du personnel.

Les circonstances et les conséquences des accidents de criticité sont très diverses. On note en particulier que les accidents peuvent durer très longtemps lorsque les conditions d'une dispersion rapide de la matière fissile ne sont pas remplies lors du premier pic de puissance. Par ailleurs, il n'y a pas eu d'accident de criticité lors de transports.

1. Conditions de survenue d'un accident de criticité

L'accident de criticité résulte du déclenchement d'une réaction de fission en chaîne non contrôlée lorsque les quantités de matières nucléaires, uranium ou plutonium, présentes dépassent accidentellement un certain seuil appelé « masse critique » et dès lors qu'il existe une source de neutrons amorçant la réaction (en général la source interne de fissions spontanées suffit).

Pour ce qui concerne la neutronique, dès que l'état critique est dépassé, la réaction en chaîne devient divergente à caractère exponentiel avec une période qui dépend de la réactivité initiale du système. Il en résulte une évolution rapide du nombre de fissions produites au sein du milieu fissile, encore appelée « excursion de criticité ». Ce phénomène se traduit par un dégagement d'énergie que l'on retrouve essentiellement sous forme de chaleur, accompagné de l'émission intense de rayonnements neutroniques et gamma ainsi que du relâchement de gaz de fission. L'échauffement du milieu fissile se traduit en général, sur le plan de la neutronique, par l'apparition de mécanismes de contre-réaction qui viennent diminuer la réactivité présente jusqu'à rendre le système sous-critique, ne serait-ce que temporairement. Il en résulte l'apparition d'un pic de puissance.

Après le premier pic de puissance, les bulles de gaz de radiolyse ou de vapeur d'eau migrent vers la surface ; l'effet d'antiréactivité qui en résulte disparaît et l'excursion de puissance redémarre. C'est ce processus d'apparition puis de relâchement de ces bulles hors du système qui est à l'origine du phénomène oscillatoire généralement observé lors d'un accident de criticité en milieu liquide (Fig. 1).

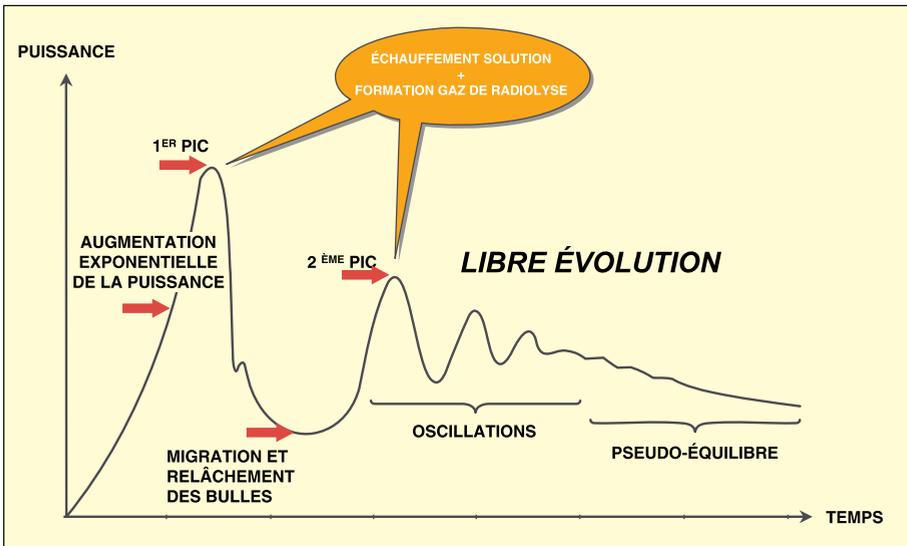


Fig. 1. Accident de criticité dans une solution fissile.

Le déroulement d'une excursion accidentelle de criticité est donc régi globalement par les paramètres principaux suivants :

- la nature physico-chimique du milieu fissile divergent ;

- la réactivité¹ du système ;
- la configuration lors de l'accident ;
- la source neutronique spontanée initiale à l'origine de l'amorçage de l'accident, qui est différente selon qu'il s'agit d'un milieu contenant de l'uranium enrichi non irradié, de l'uranium et du plutonium ou du plutonium.

Les contre-réactions neutroniques résultent des facteurs suivants :

- effets de température nucléaire (effets Doppler et de variation de spectre) ;
- effets d'expansion (effets de densité et effet de volume) ;
- effet de vide (bulles de gaz de radiolyse, vapeur d'eau...) ;
- l'environnement de l'installation (échanges thermiques avec l'extérieur, confinement du système divergent...).

Ainsi que cela est confirmé par les expériences réalisées dans le réacteur SILENE, de Valduc (CEA, centre de Valduc, France) la combinaison des phénomènes précédents avec les conditions initiales de l'accident peut entraîner trois types de comportement (Fig. 2) :

1. le système divergent redevient définitivement sous-critique par modification de la configuration (mélange, éjection ou dispersion de matière, modification de la géométrie...) ;
2. le système est provisoirement rendu sous-critique par l'échauffement de la matière fissile, dans ce cas la réaction divergente est appelée à redémarrer après un intervalle de temps plus ou moins long en fonction des échanges thermiques avec le milieu environnant ;
3. le système, par suite d'une réactivité initiale importante, atteint les températures d'ébullition du milieu et l'évolution de la puissance est alors fonction de la sous- ou de la sur-modération du milieu. L'ébullition du liquide, et la reconcentration de la solution fissile qui en résulte, peuvent en effet conduire à une augmentation ou à une diminution de la réactivité du système. Le comportement du système divergent durant la phase post-accidentelle est donc différent selon que l'on est en présence, soit d'un système « fermé », c'est-à-dire pour lequel la vapeur peut se recondenser et revenir dans la solution, soit d'un système « ouvert » auquel cas la vaporisation ou l'éjection de la solution permettront le retour à la sous-criticité.

Cette description correspond à des situations typiques pour des solutions mais elle n'est en aucune mesure exhaustive car chaque accident de criticité peut présenter des spécificités particulières comme en témoignent les accidents survenus dans le monde et plus particulièrement le dernier accident de Tokai-Mura pour lequel un dispositif de réfrigération de la cuve qui « divergeait » a modifié le déroulement de la phase post-accidentelle.

L'accident de criticité est par ailleurs accompagné de l'émission de rayonnements neutroniques et gamma ainsi que de la production et du relâchement de produits de fission radioactifs gazeux et d'aérosols. Les programmes expérimentaux menés à

¹ La réactivité ρ est la valeur qui caractérise l'écart relatif, sur le plan de la criticité, du système entre le coefficient de multiplication effectif k_{eff} et l'état critique pour lequel $k_{eff} = 1$. La réactivité, s'exprime souvent « pour cent mille » (p.c.m = 10^{-5}). L'état critique « prompt » correspond à une réactivité $\rho = \beta$ (environ 640 p.c.m pour ^{235}U et 210 p.c.m pour le ^{239}Pu). β est encore appelé $\$$ par les Anglo-Saxons.

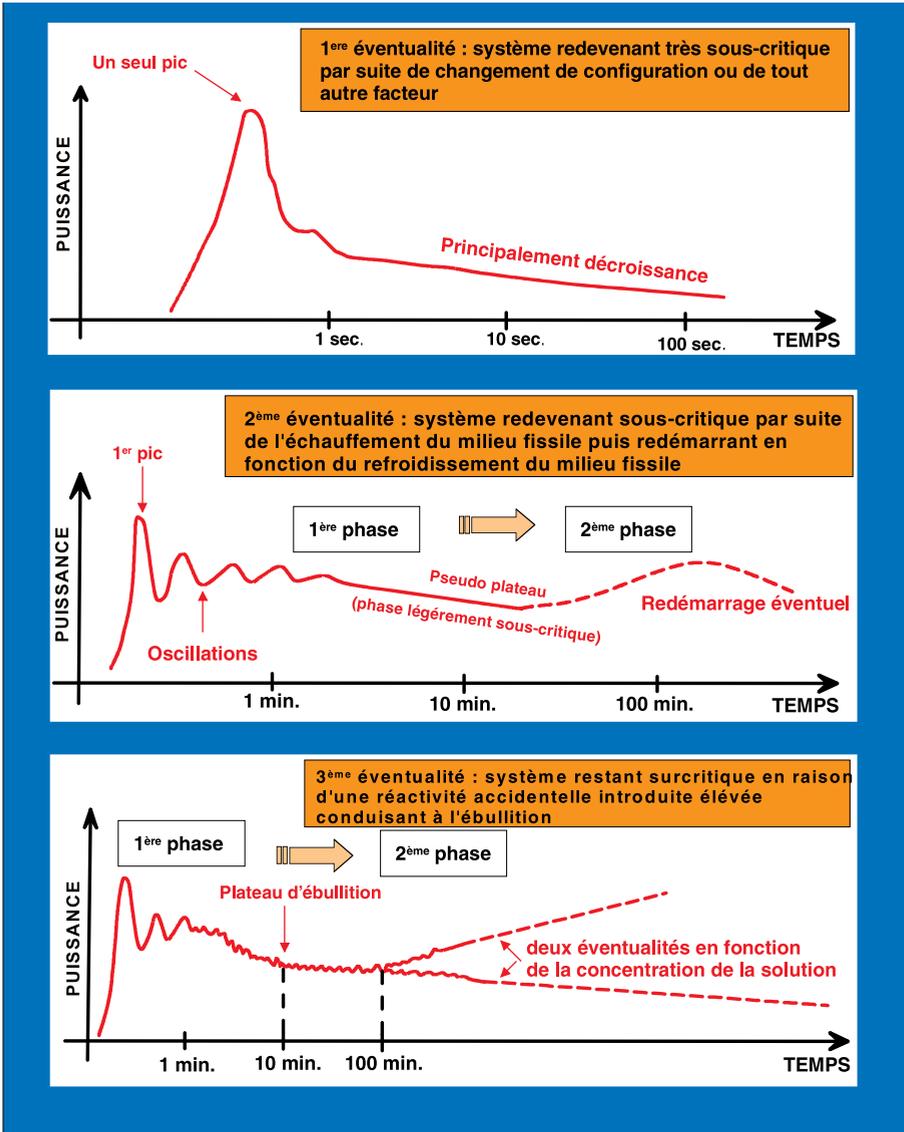


Fig. 2. Excursions de puissance type pour un accident de criticité en solution.

SILENE (Valduc) ont permis d'évaluer les risques d'irradiation et de contamination et de concevoir un système de détection capable notamment de suivre l'évolution de l'accident de criticité durant la phase post-accidentelle.

2. Classification des accidents de criticité en « familles »

Afin de mieux appréhender les différentes situations accidentelles auxquelles il est possible d'être confronté, on a cherché à classer les accidents en grandes

« familles » en fonction de leurs caractéristiques et de leur spécificité. Cette démarche n'est pas aisée car les installations nucléaires sont différentes tant sur le plan de leurs objectifs (fabrication, retraitement, stockage, transport...) que sur celui de la nature des matières nucléaires mises en œuvre (solutions, métal, poudre, fritté...).

L'analyse de sûreté-criticité, qui est réalisée dans le cadre de la prévention du risque de criticité, rend par ailleurs extrêmement improbable l'occurrence d'un accident. Il en résulte une réelle problématique sur le choix du scénario hypothétique susceptible de conduire à un accident.

La classification des accidents en grandes « familles » repose donc essentiellement sur le fait que la phénoménologie d'un accident de criticité et l'estimation de ses conséquences radiologiques potentielles sont étroitement dépendantes de la configuration où se produit l'accident (l'installation et son environnement) et de la forme physico-chimique sous laquelle se présente la matière nucléaire.

Les différents types d'exposition envisageables susceptibles de contribuer à l'estimation des conséquences radiologiques d'un accident de criticité sont les suivants (Fig. 3) :

- l'exposition directe aux rayonnements neutrons et gamma,
- l'exposition aux produits de fissions relâchés,
- l'exposition à la matière fissile initiale mise en suspension (isotopes déjà présents dans la matrice fissile avant l'accident).

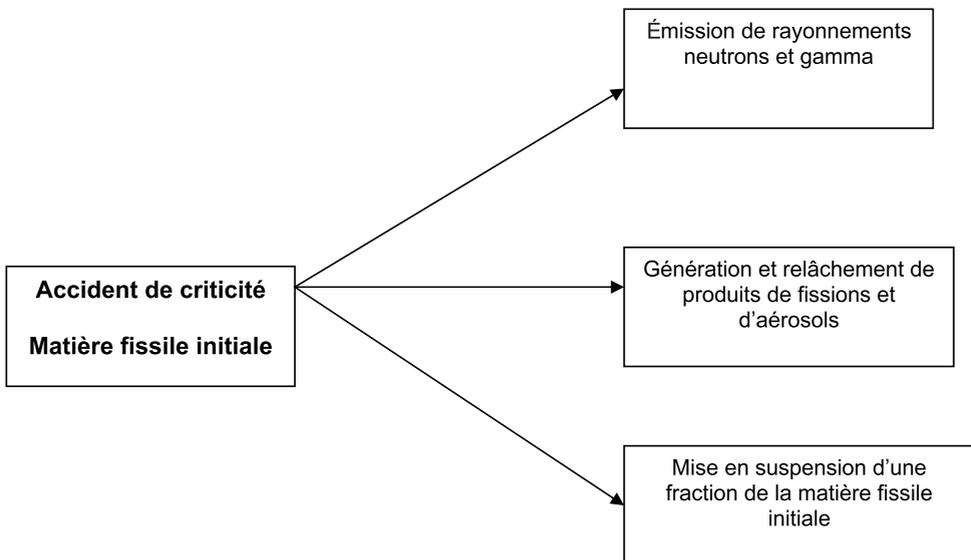


Fig. 3. Types d'expositions consécutives à un accident de criticité.

À partir de ces considérations et de l'analyse des accidents survenus dans le monde, il est possible de distinguer quatre grandes « familles » d'accident comme suit :

- Classe 1 : milieux fissiles aqueux ;
- Classe 2 : milieux solides ou métalliques secs ;
- Classe 3 : milieux « poudres » avec modération (modération apportée par de l'eau ou par du porogène) ;
- Classe 4 : systèmes solides/liquides (crayons combustibles + eau par exemple).

Principales caractéristiques des différentes « familles » d'accident

Classe 1 : milieux fissiles aqueux

- Nature : solutions nitriques, fluorhydriques, milieux aqueux organiques, ...
- Installation : génie chimique, stockage, effluents, ...
- Probabilité d'occurrence : élevée par rapport aux autres familles d'accident.
- Physique : durée pouvant se prolonger durant des dizaines d'heures ; nombre de fissions variable entre 10^{15} et quelque 10^{19} fissions.
- Détection : possible avec des détecteurs neutrons et gamma.
- Risque d'exposition directe élevé avec des rapports de dose neutrons/gamma très variables suivant la « modération » du milieu fissile et la configuration (dimensions de la matière, ...).
- Kerma neutrons/gamma variable approximativement entre 2 et 0,5 en l'absence de protection biologique.

Référence : champ de rayonnement du réacteur SILENE à Valduc.

Classe 2 : milieux solides ou métalliques secs

- Nature : lingots, pièces métalliques, ...
- Probabilité d'occurrence : faible.
- Physique : durée pouvant être très brève (un seul pic) si dispersion ou déformation mais pouvant également se prolonger ; nombre de fissions variable entre 10^{15} et 10^{17} fissions.
- Détection : possible avec des détecteurs neutrons et gamma.
- Risque d'exposition directe élevé avec un rapport dose neutrons/gamma plus proche de 10 que de 1 en l'absence de protections.

Référence : champ de rayonnements du réacteur CALIBAN à Valduc.

Classe 3 : milieux « poudres » avec modération

- Nature : massif de poudre + eau ou poudre + porogène, ...
- Installation : usines de fabrication, entreposages de poudre, ...
- Probabilité d'occurrence : faible.
- Physique : se rapproche des milieux fissiles aqueux ; nombre de fissions variable entre 10^{16} et 10^{19} fissions.
- Détection : possible avec des détecteurs neutrons et gamma.
- Risque d'exposition directe : intermédiaire entre les milieux aqueux et les milieux solides secs.

Classe 4 : milieux mixtes solide/liquide

- Nature : éléments combustibles + eau
- Installations : réacteurs de recherche et maquettes critiques, entreposages de combustibles sous eau, piscines, ...
- Probabilité d'occurrence : faible.
- Physique : très complexe et situation difficile à arrêter sur le plan de la criticité ; nombre de fissions variable de 10^{17} à 10^{21} fissions.
- Détection : difficile par méthodes classiques compte tenu de la présence d'un « écran » d'eau.
- Risque d'exposition directe : faible en raison de l'autoprotection apportée par l'eau.

Pour en savoir plus

Clefs CEA – Physique nucléaire et sûreté, n° 45, Automne 2001.

F. Barbry – Considérations générales sur l'étude de la phénoménologie des accidents de criticité, Note CEA/DAM/DRMN/SRNC 03-02 (juillet 2003).

H. Carros – Les accidents de criticité dans les usines et les laboratoires, rapport CEA-DSNQ-MSN 2001/007, mars 2001.

A review of criticality accidents, 2000 révision, Los Alamos National laboratory report LA 13 638 (May 2000).

Radiopathologie

1. Prise en charge de personnes irradiées et/ou contaminées lors d'un accident de criticité

- Un patient irradié ou contaminé n'est pas dangereux pour son entourage.

L'urgence médicale prime dans tous les cas sur les risques radiologiques.

Elle doit être traitée selon les règles médicales habituelles.

Il n'y a pas de risque radiologique pour le personnel soignant.

- Les règles à suivre sont celles pratiquées pour un malade hospitalisé présentant des brûlures, des traumatismes ouverts ou fermés, un déficit immunitaire, une aplasie médullaire, un syndrome inflammatoire. Il faut éviter au patient toute source d'infection (usage de matériel à usage unique, asepsie, ...).
- Le médecin du travail collabore avec l'équipe hospitalière sur tous les aspects spécifiques à l'irradiation :
 - sur l'estimation de la dose et l'étendue des zones surexposées au point d'entrée,
 - sur la prise en compte des risques particuliers : infection et hémorragie ++,
 - sur le traitement des contaminations (contamination du revêtement cutané, contamination interne) ; à faire s'il ne perturbe pas la réanimation ;
 - sur la surveillance qui porte en particulier sur l'évolution d'un syndrome inflammatoire+++ et sur les organes suivants :
 - le système cardio-vasculaire et la surveillance neurologique,
 - la sphère oro-pharyngé et pulmonaire (dyspnée++, œdème inflammatoire),
 - la sphère digestive (hémorragies digestives, déséquilibre hydro-électrolytique),
 - les paramètres hématologiques (éléments figurés, surveillance des troubles de la coagulation),
 - le revêtement cutané++ et les atteintes en profondeur (muscles),
 - la surveillance radiotoxicologique,
 - la réalisation d'un bilan ophtalmologique (OPH) initial (examen en particulier de la face postérieure des cristallins),
 - un ÉlectroEncéphaloGramme (EEG) s'il y a eu des troubles neurologiques en phase prodromique.

- En dehors de l'URGENCE, les décisions d'actes médicaux ou chirurgicaux sont prises en fonction de l'état clinique et de l'évolution prévisible qui tient compte de l'hétérogénéité et des estimations dosimétriques. En particulier, la lyse cellulaire massive dans les zones surexposées peuvent contribuer à la défaillance des organes (rein, foie, myocarde).

Fiche 2

Estimation de la gravité d'une irradiation lors d'un accident de criticité

En cas d'irradiation mixte par des neutrons et des rayonnements gamma, l'irradiation est hétérogène : les doses reçues par les différents organes dépendent de leur orientation par rapport à la source.

GRAVITÉ : dépend :

- de la dose reçue :
 - à très forte dose : la sidération du système nerveux central entraîne rapidement la mort ;
 - pour des doses > 1 Gy, l'irradiation diminue le renouvellement cellulaire avec un risque d'infection et d'hémorragie. Les conséquences les plus importantes sont observées au niveau des tissus suivants :
 - moëlle hématopoïétique : toutes les lignées sont atteintes, la diminution du nombre de cellules peut aller jusqu'à l'aplasie,
 - tissu cutané : brûlure radiologique avec atteinte profonde sous-cutanée et musculaire,
 - appareil digestif : destruction de la muqueuse : diarrhée, hémorragie ;
 - pour des doses < 1 Gy, il n'y a pas de conséquence clinique ;
- des traumatismes associés +++ ;
- la topographie de l'irradiation +++.

ÉVOLUTION : comprend 3 phases

- les signes initiaux : pendant quelques heures, suivis d'une phase de rémission s'accompagnant parfois d'euphorie, d'excitation ;
- la période de latence clinique, d'autant plus courte que la dose est élevée : de quelques heures à 3 semaines ;
- la phase clinique puis la phase de récupération.

CONDUITE À TENIR

- Évaluer la dose et la gravité, en notant l'heure des examens et la sévérité du retentissement clinique par :
 - l'interrogatoire +++ pour lequel on notera l'heure d'apparition des symptômes,
 - l'examen clinique,
 - les prélèvements biologiques,
 - le recueil d'éléments pour le calcul de dose avec la localisation de chaque prélèvement ;
- 2 situations différentes :
 - hospitalisation rapide après pose d'un cathéter et éventuellement les premiers gestes de décontamination si :
 - vision d'un flash bleu (effet Cerenkov),
 - blessures,
 - symptomatologie sévère ou s'aggravant rapidement ;
 - hospitalisation différée en fonction de la symptomatologie et de la dose : hospitalisation quand la dose estimée est supérieure à 1 Gy ;
 - en parallèle, premiers gestes de décontamination interne et externe.

Les premiers symptômes : le syndrome initial (24 h)

Trois éléments sont indispensables pour évaluer la gravité : clinique, conditions d'irradiation et résultats biologiques.

Au cours des premières heures, l'évaluation de la gravité repose avant tout sur les données cliniques et les premiers éléments dosimétriques.

CLINIQUE : la gravité est estimée à partir des éléments suivants :

- Précocité, sévérité des signes cliniques et des symptômes : vomissements, perte de connaissance, fièvre et fatigue intense.
- Topographie des lésions radiologiques.
- Rémission pouvant s'accompagner d'une phase d'euphorie, d'excitation.
- Examen clinique avec examen, schémas, photos dont on NOTE L'HEURE :
 - symptômes (par ordre décroissant de gravité)
 - état de choc, troubles neurologiques, cardio-vasculaires,
 - perte de connaissance brutale suivie d'un réveil vigile,
 - troubles digestifs graves : vomissements, nausées, diarrhées réflexes, hémorragies digestives,
 - phase d'excitation, trouble de vigilance (sommolence, asthénie), céphalées,
 - sécheresse buccale, douleurs parotidiennes,
 - douleur dans les régions surexposées,
 - nausées, vomissements isolés ;
 - à l'examen
 - fièvre, tachycardie, modification de la tension artérielle (TA),
 - signes de surexposition cutanée signant l'étendue des zones irradiées au point d'incidence : œdème, chaleur locale, érythème (fugace) en particulier de la face ++, douleurs.

DOSIMÉTRIE : les premiers éléments sont recueillis par le SPR et reposent sur :

- l'interrogatoire avec une description précise des conditions de l'accident
 - position du sujet par rapport à la source, à des repères fixes, aux autres personnes présentes lors de l'accident,
 - durée probable d'exposition et trajet d'évacuation,
 - faire un SCHÉMA.
- les premiers gestes :
 - NE RIEN JETER, TOUT ÉTIQUETER,
 - recueil des dosimètres disponibles,
 - recueil d'objets pour la dosimétrie,
- l'estimation rapide de la dose (SPR, ingénieur critiqueur)
- Remplir la fiche de tri (Fiche 14)
- LES EXAMENS BIOLOGIQUES : à effectuer toutes les 3 heures
 - les premiers résultats sont obtenus en ~ 3 heures
 - voir fiches n° 15 et 16 pour le choix et la chronologie des prélèvements qui sont HORODATÉS

Conduite à tenir devant un Syndrome initial

- Remplir la fiche de tri (14)
 - EXAMENS à pratiquer en urgence après l'anthropogammamétrie
 - étiqueter tous les prélèvements et tous les documents avec indication de l'heure, et éventuellement de leur localisation,
 - ne pas oublier schémas et photos,
 - prélèvements de phanères pour la dosimétrie (fiches 15 et 16),
 - prélèvements sanguins RÉPÉTÉS, par ordre décroissant d'importance (voir fiches 15 et 16)
 - 1. NFS, réticulocytes, plaquettes,
 - 2. cytogénétique,
 - 3. HLA I et II, groupe érythrocytaire, sérologie Cytomégalovirus (CMV), toxoplasmose,
 - 4. Temps de Céphaline Activée (TCA), Taux de Prothrombine (TP), fibrinogène, facteurs II, VII, X,
 - 5. bilan biochimique et enzymologique,
 - Recueil des excréta et de prélèvements pour la radiotoxicologie (voir fiches 15 et 16)
 - HOSPITALISATION
- La décision d'hospitalisation se base avant tout sur la symptomatologie clinique :
- en URGENCE
 - vision d'un flash bleu (effet Cerenkov),
 - traumatismes,
 - signes cliniques ++ dès la première heure : état de choc, troubles neurologiques (convulsions, prostration, désorientation), perte de connaissance, amnésie, fièvre élevée (41 °C), troubles digestifs (vomissements ++, hémorragie ++, diarrhée);
 - DIFFÉRÉE sur la base de la symptomatologie, des premiers résultats d'examen et de la dosimétrie :
 - symptomatologie ++ après quelques heures :
 - vomissements ++, diarrhée, hémorragie digestive, érythème, fièvre, trouble de la vigilance et asthénie,
 - signes de surexposition locale : œdème et/ou douleurs cutanées,
 - résultats biologiques + (après 2 à 3 bilans):
 - pic de granulocytes, chute lymphocytaire, abaissement du TP...
 - estimation dosimétrique > 1 Gy.

2. Évolution clinique lors d'accidents de criticité

L'irradiation est hétérogène : la dose reçue décroît du point d'entrée du rayonnement au point de sortie du rayonnement. Le maximum de la dose absorbée se situe au niveau du point d'entrée du faisceau incident.

La mortalité cellulaire et le syndrome inflammatoire, qui sont la conséquence d'une irradiation à dose élevée, ne seront pas répartis de manière homogène dans l'organisme et dans les organes irradiés. La restauration tissulaire dépend de la proportion de cellules survivantes qui sera recherchée en différents points du tissu :

- au niveau de la moelle hématopoïétique : les prélèvements de moelle sont effectués en différents sites pour estimer la probabilité d'une régénération spontanée ;

- au niveau du tissu cutané : au point d'entrée du rayonnement, l'atteinte tissulaire est majeure avec une dissociation dermo-épidermique précoce, suivie de l'apparition rapide d'une fibrose extensive et de la lyse des cellules musculaires. Une alopecie peut être observée quelques jours après l'irradiation, traduisant une dose locale élevée. Il est important pour la reconstitution dosimétrique de noter la date d'apparition, l'importance et la localisation précise de ces lésions ;
- au niveau digestif.

Les atteintes hématologiques et digestives sont souvent associées, caractérisées par :

- des troubles de coagulation atypique avec une diminution des plaquettes et une augmentation du fibrinogène ;
- une hypoplasie médullaire caractérisée par une régénération très rapide en fin de période clinique ;
- au niveau de l'appareil digestif, des troubles du transit et de malabsorption s'accompagnant parfois d'un syndrome hémorragique, touchant tous les organes (de la langue au colon) à l'exception de l'intestin grêle.

Syndrome oro-pharyngé, dyspnée et défaillance pulmonaire.

Les examens biologiques montrent :

- un pic granulocytaire (dans les 12 h), suivi d'une chute rapide des lymphocytes, polynucléaires, plaquettes ;
- des troubles de la coagulation (*cf.* ci-dessus) et modification des facteurs II, VII, X ;
- d'autres examens qui ne font pas partie de la pratique habituelle montrent un pic de différents facteurs de croissance et cytokines et de marqueurs de l'inflammation (IL6-IL8-G CSF-CRP (à J1) ...) ;
- l'augmentation de la protéine C réactive et du fibrinogène qui marquent un syndrome inflammatoire majeur et sont de mauvais pronostic.

La gravité de l'irradiation est estimée, entre autres, à partir de 2 examens spécifiques :

- cytogénétique : sur des lymphocytes, le taux d'aberrations chromosomiques précoces suit une relation dose-effet : il est possible de déterminer une dose absorbée globale et d'évaluer le degré d'hétérogénéité de l'irradiation ;
- EEG : l'irradiation neutronique entraîne des modifications spécifiques de l'EEG à type d'ondes rapides en fuseau (de type « benzodiazépine-like »). L'irradiation entraîne des modifications de l'EEG suivant une relation dose-effet (ralentissement du rythme de fond, modifications des potentiels évoqués) qui permet d'estimer d'une part l'irradiation globale, d'autre part le niveau de l'irradiation céphalique.

Bilans à effectuer lors de l'hospitalisation

- Bilan clinique (symptomatologie, examen clinique) qui note toutes les modifications par rapport au bilan initial
- Bilan biologique immédiat (noter l'heure) qui comprend (voir fiches 15 et 16) :
 - un examen hématologique (NFS, réticulocytes, plaquettes)
 - les examens suivants s'ils n'ont pas été réalisés avant l'hospitalisation :
 - groupe erythrocytaire, HLA I et II
 - cytogénétique
 - un bilan de la coagulation (TP, TCA, fibrinogène, facteurs II, VII, X...)
 - un bilan de marqueurs (cytokines, facteurs de croissance, CRP, fibrinogène...)
 - un bilan en biochimie (sang et urine) et enzymologie
 - prélèvements bactériologiques (en fonction du contexte)
 - prélèvements pour la radiotoxicologie (voir fiches 15 et 16)
 - sérologie CMV, toxoplasmose si des transfusions de produits sanguins sont prévues.
- EEG pratiqué dès que possible en milieu spécialisé (selon les méthodes classiques, en prévoyant une durée d'enregistrement de 1 heure, comportant des épreuves d'hyperpnée et de stimulation lumineuse)
- La surveillance ultérieure et la répétition des examens sont dictées par l'évolution clinique (voir fiche n° 15), en particulier la surveillance hépatique, rénale et intestinale :
 - prélèvement spécialisé (voir fiche 16)
 - prévoir si nécessaire un nouvel examen cytogénétique dans les 48 h
 - poursuivre les examens radiotoxicologiques en liaison avec le médecin du travail
 - prévoir un bilan OPH (notamment bilan de la face postérieure des cristallins).
- Bilan du fonctionnement de la moelle hématopoïétique dans les différents territoires médullaires, nécessaire en cas d'hypoplasie pour estimer les capacités de régénération spontanée :
 - pour la détermination quantitative de l'atteinte des cellules souches : mesure du nombre de cellules CD34+
 - les sites de prélèvement (au moins 2) sont choisis en fonction des estimations dosimétriques (avec au moins un site considéré comme relativement peu irradié)
 - pour pratiquer une étude morphologique : myélogramme et biopsie médullaire
 - pour estimer le fonctionnement au point prélevé : cultures de progéniteurs (prélevés au cours de la biopsie médullaire) sur 8 jours à 3 semaines
 - Flt3-ligand : voir fiche 16.
- Les principes de traitement reposent sur :
 - la prévention des vomissements (antisérotinergiques de type 3)
 - la prévention et le traitement de tout foyer infectieux potentiel, en particulier :
 - plaies, brûlures
 - sphère bucco-dentaire
- le traitement des lésions dont la nature ne peut être déterminée qu'après un bilan complexe (syndrome digestif, syndrome pulmonaire, hypoplasie médullaire, syndrome inflammatoire, ...)
- la prise en compte de l'évolution du syndrome inflammatoire (traitement difficile à codifier)
- la prévention du syndrome de défaillance multiple des organes.

Diagnostic dosimétrique

1. Détermination de la dose absorbée lors d'un accident de criticité

Lors d'un accident de criticité les personnes exposées sont soumises à une fluence mixte neutron gamma. Une trace « pathognomonique » demeure, celle due à l'activation de certains de leurs atomes par les neutrons, phénomène qui n'apparaît pas lors d'une exposition aux seuls rayons gamma à moins que ceux-ci n'aient une énergie très supérieure à 10 MeV, seuil énergétique des réactions nucléaires (γ, n).

C'est à partir de cette activation neutronique¹ que l'on pourra, entre autres, estimer la dose reçue lors d'un accident de criticité.

1.1. Atomes activés pris en compte

L'activation de deux isotopes stables, ^{23}Na et ^{32}S , a été retenue, du fait de leur relative abondance dans le corps humain² et de leur notable section efficace aux neutrons (σ), le nombre d'atomes activés pour une fluence neutronique donnée étant bien sûr proportionnel au nombre d'atomes présents (nombre de cibles).

Les réactions d'activation respectives des ^{23}Na et ^{32}S sont :



Le ^{24}Na décroît en émettant un β ($E_{\text{max}} = 1,39 \text{ MeV}$, $E_{\text{moy}} = 0,554 \text{ MeV}$) et 2 γ (1,369 et 2,754 MeV).

$T = 14,960 \pm 0,006$ heures,

$\sigma = 0,203$ barn pour les neutrons thermiques.

Dans le corps humain, il y a en moyenne 1,4 g de ^{23}Na par kilogramme de poids corporel.



Le ^{32}P est un émetteur β pur ($E_{\text{max}} = 1,7 \text{ MeV}$, $E_{\text{moy}} = 0,695 \text{ MeV}$),

¹ NIGA en anglais : *Neutron Induced Gamma Activity*.

² Le ^{37}Cl n'est pas retenu car peu abondant, de plus l'élément activé, le ^{38}Cl a une très courte période (37 minutes).

Seuil d'énergie neutronique de la réaction 2 : 2,5 MeV,

$T = 14,28$ (0,02 jours),

$\sigma = 0,530$ barn pour les neutrons rapides.

Dans les phanères de l'homme, il y a en moyenne 45 mg de soufre par gramme de phanère dont 95 % de ^{32}S .

La réaction 1 permettra, à partir de l'abondance des neutrons thermiques, une estimation de la dose moyenne due à l'ensemble des neutrons présents alors que la seconde est susceptible de donner deux sortes de renseignements :

- position du sujet lors du flash de criticité
- proportion des neutrons rapides c'est-à-dire d'énergie supérieure à 2,5 MeV dans la fluence radiative de l'accident de criticité. Cette détermination est essentielle car la dose absorbée de « recul » provient essentiellement de neutrons d'énergie supérieure à 100 keV.

1.2. Méthodes de mesure de l'activité

Les anthropogammamètres permettent une mesure précise de l'activité gamma due à la présence de ^{24}Na dans le corps humain³ même si celle-ci est très faible (de l'ordre de quelques dizaines de Bq). Il faut réaliser cette mesure précocement⁴ car la période du ^{24}Na est relativement courte : 14,96 heures. La mesure anthropogammamétrique sera préférée à toute autre pour l'estimation dosimétrique. Des appareils plus petits donnent aussi des indications mais ils seront davantage réservés au tri initial des individus supposés exposés.

Quant à la mesure de l'activité du ^{32}P radio-induit, elle fera appel à un comptage β à partir d'une quantité donnée de phanères dont on connaît à la fois le poids et la teneur en soufre. Elle peut s'effectuer de manière extrêmement précise et sensible par scintillation liquide. Physiquement, elle est moins urgente du fait de la période relativement longue du ^{32}P mais son intérêt est double comme nous l'avons vu précédemment en donnant des indications sur la distribution de la dose corporelle.

1.3. Évaluation de la dose due aux neutrons à partir du ^{24}Na

La relation entre le Kerma et l'activité radio-induite en ^{24}Na est une fonction complexe comme pratiquement chaque fois qu'il faut remonter des becquerels aux grays ou aux sieverts.

Dans le cas particulier des neutrons, il faut prendre en compte l'énergie des neutrons donc leur spectre d'émission car le rendement des réactions nucléaires (la section efficace σ) 1 et 2 dépend de cette énergie. Il faudra en outre, s'il s'agit d'un flash

³ Il est évident que toute contamination externe du sujet devra être éliminée. Dans le cas de très forte contamination, on sera obligé de recourir à la mesure du ^{24}Na dans le sang.

⁴ L'idéal est de commencer la mesure à H+4 heures dès lors que les quelques rares éléments à vie courte ont disparu.

de criticité très bref, prendre en considération à la fois l'orientation du sujet à ce moment précis et la diffusion des neutrons toujours très importante.

La dose totale en Gy ou en Gy équivalent peut être calculée de la manière suivante :

Soit A , l'activité de l'homme exposé, exprimée en Bq de ^{24}Na au temps $t = 0$ (moment du flash).

Soit δ (k), la valeur du Kerma en $\text{Gy}\cdot\text{Bq}^{-1}$ pour le spectre de neutron donné.

Soit $K = A \cdot \delta$ (k), la valeur du Kerma en Gy due à l'exposition aux neutrons.

Soit EBR = Efficacité Biologique Relative des neutrons pour le critère survie que l'on peut admettre égal à 1 dans ce cas particulier.

Soit $p = D_\gamma/K$ le rapport entre la dose gamma et le Kerma durant l'exposition.

Soit D_T , la dose totale reçue en Gy

$$D_T = K(1 + p).$$

En l'absence de tout renseignement, on recommande, pour un homme de 68 kg⁵, de prendre la valeur suivante, moyenne de quatre spectres neutroniques différents :

$$\delta$$
 (k) = $0,97 \times 10^{-6} \text{ Gy}\cdot\text{Bq}^{-1}$ (3,6 rad μCi^{-1}) et $p = 2$.

La formule devient alors dans ce cas particulier :

$$D_T$$
 (Gy) = $3 \times 10^{-6} A$ (Bq).

Du fait des approximations réalisées tout au long de l'estimation de la dose, l'exposition totale ainsi déterminée doit être considérée comme une évaluation provisoire car le Kerma pour les neutrons peut varier de 0,5 à $3 \times 10^{-6} \text{ Gy}\cdot\text{Bq}^{-1}$ en fonction de la nature du spectre de neutrons.

Le seuil significatif de détection est de l'ordre du milligray.

1.4. **Évaluation de la dose due aux neutrons à partir du ^{32}P**

À partir d'un comptage de l'activité β du ^{32}P par scintillation liquide, on pourra, à partir d'un échantillon de phanère de quelques centaines de milligrammes, estimer des doses absorbées significatives (au seuil de 95 %) de l'ordre de 0,05 Gy, pour des neutrons d'énergie supérieure à 2,5 MeV comme l'ont montré des expérimentations réalisées auprès du réacteur SILENE (Valduc, France). Les mesures réalisées sur des phanères répartis en différentes parties du corps permettent alors, en cas de flash, de positionner le sujet dans la fluence et donc de fournir aux médecins des indications précieuses tant du point de vue pronostic que thérapeutique (répartition de la dose corporelle).

D'un point de vue « pratique », en l'absence de renseignements précis quant à la nature du spectre, nous prendrons en compte une estimation du facteur de

⁵ Chez un sujet de poids P (kg), l'activité radio-induite est $A' = A P/68$.

conversion d'après les expérimentations sur SILENE. Dans ce cas la dose neutronique totale est égale :

$$\text{Dose neutron totale (Gy)} = 1,2 A \text{ (Bq.g}^{-1}\text{)}.$$

2. Détermination de la dose absorbée lors d'un accident de criticité dans le cas particulier d'une contamination externe du sujet

Dans ce cas, il n'est guère possible de déterminer l'activité du sodium radio-induite par le flux de neutrons à l'aide d'un anthropogammamètre. À moins d'une décontamination facile et rapide, il faudra déterminer l'activité du ^{24}Na dans le sang de l'individu.

Comme pour la détermination de l'activité du ^{24}Na par anthropogammamétrie, pour un flux donné de neutrons, celle-ci dépendra du spectre d'énergie des neutrons émis lors de l'accident de criticité.

De manière très pragmatique, on sait que, si le corps humain renferme en moyenne 1,4 g de ^{23}Na par kilogramme de poids corporel, le sang en renferme un peu plus, soit 1,91 mg par ml.

Si l'échantillon sanguin est prélevé plusieurs jours après l'accident, il faudra tenir compte de la période biologique du ^{23}Na . La fraction R_t retenue dans le corps est égale à :

$$R_t = 0,487 e^{-0,0815t} + 0,510 e^{-0,0513t} + 0,0027 e^{-0,0015t}$$

t étant exprimé en jours.

L'activité du ^{24}Na radio-induite est alors égale à⁶ :

$$A_{\text{Na}} = \lambda C F_a / 60 \times E_f V R_t (e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}) \text{ Bq.ml}^{-1}$$

où :

λ : constante de décroissance radioactive du ^{24}Na ($0,00077 \text{ min}^{-1}$).

C : nombre de coups par minute dus au ^{24}Na corrigé du bruit de fond.

F_a : facteur de correction en cas de non flash.

E_f : efficacité du détecteur dans la zone d'intérêt (gamma de 1,368 MeV).

V : volume de sang en ml.

R_t : fraction de ^{24}Na retenue dans le sang.

t_1 et t_2 : début et fin du comptage en minutes depuis le flash neutronique.

À titre d'exemple, lors d'un flash très bref ($F_a = 1$) produit par un spectre de fission pur, pour un volume de 20 millilitres de sang, une efficacité d'un détecteur germanium de haute pureté (HPGe) égale à $4,92 \times 10^{-3}$ dans la zone d'intérêt du pic (1,368 MeV), une mesure d'une heure effectuée quatre heures après le flash ($R_t = 1$), il vient si l'on a compté 1 000 coups dans la zone d'intérêt : $A =$ activité du ^{24}Na dans le sang par millilitre = $3,47 \text{ Bq.ml}^{-1}$.

⁶ Si l'accident en cause n'a pas été de type flash très bref, il faudra aussi tenir compte de la décroissance du ^{24}Na radio-induit par les neutrons durant le temps que dure l'exposition. On introduit pour ce faire un facteur de correction $F_c = \lambda t_a / 1 - \exp(-\lambda t_a)$ où t_a représente la durée de l'exposition en minutes et $\lambda = 0,00077 \text{ min}^{-1}$.

En admettant le facteur Dose/Activité égal à $3,13 \times 10^{-1}$ Gy.Bq⁻¹.ml pour ce spectre (détermination expérimentale à partir d'une source de ²⁵²Cf nue, voir référence), la dose neutron est alors égale à 1,09 Gy.

Pour un spectre de neutrons ralentis, le facteur D/A , déterminé expérimentalement, n'est plus égal qu'à $5,93 \times 10^{-3}$ Gy.Bq⁻¹.ml.

En l'absence de renseignements précis concernant la nature du spectre on prendra une valeur de 0,3 Gy.Bq⁻¹.ml comme valeur de référence et la dose neutron estimée sera alors égale à :

$$D \text{ (Gy)} = 0,3 A \text{ (Bq.ml}^{-1}\text{)}.$$

Remarques :

Pour un échantillon de 20 ml de sang, la sensibilité de la mesure varie entre 0,01 et 0,02 Gy de dose neutron totale pour les neutrons rapides et est inférieure à 0,005 Gy pour des spectres de neutrons « mous ». Ceci pour une mesure (comptage) qui dure entre 30 et 60 min.

La dose gamma associée à la dose neutron peut être estimée comme précédemment mais il faudra tenir compte en plus de la contamination externe du sujet.

3. Fiches d'aide aux décisions

Circuits de prise en charge

Fiche 6

Au niveau de l'installation nucléaire de base (INB) ou du site nucléaire

Le plan d'urgence interne (PUI) assure l'organisation et la mise en œuvre des moyens. Le principe général suit le schéma suivant :

- Les urgences médico-chirurgicales sont orientées directement sur les structures hospitalières après avis du médecin régulateur ;
- En dehors de la zone d'exclusion, l'évacuation des personnes de l'aire de regroupement permettra leur acheminement vers le centre de tri ;
- Des mesures d'activation neutron et de contamination permettent de définir l'ordre de prise en charge ;
- Puis l'acheminement secondaire, à partir du centre de tri, des personnes à prendre en charge au service médical est effectué pour bilan et décontamination fine éventuelle.

Au niveau du service médical de l'INB

Les consignes et fiches réflexes organisent les modalités de prise en charge et le rôle des différents membres du service médical, du laboratoire d'analyse et de l'assistance SPR. L'organisation locale définira le circuit :

- Les cas d'irradiations importants avec symptomatologie sont pris en charge directement en salles de soins ;
- Au SST, accueil après tri des irradiés, puis des impliqués ;
- Anthroporadiamétrie ;
- Bilan médical avec questionnaire et fiche suiveuse individuelle ;
- Examens complémentaires hématologiques et biochimiques, radiotoxicologiques et prélèvements de phanères selon les niveaux estimés d'exposition ;
- Bilan des situations et orientations sur les structures médicales appropriées.

Avec l'extérieur

Fiche 6, suite

Un certain nombre de situations font l'objet d'une planification (note DGS) et pour certaines, de conventions d'assistance :

- Suivi ultérieur ainsi que l'assistance éventuelle aux structures médicales : médecins traitants, services hospitaliers de médecine interne ou spécialisée ;
- Liaisons avec les différents intervenants et les autorités ;
- Renforts des équipes.

Indications des prescriptions et orientation des victimes

Fiche 7

En fonction du niveau de la dose neutron estimé en phase de tri

Tableau I. Sensibilité des examens et orientation en fonction de la dose.

Seuils de sensibilité des techniques	Examens	Délai de réponse	Orientation
10^{-3} Gy	Anthropogammamétrie	H+3	
10^{-2} Gy	Mesure d'activation appareils de radioprotection (SPP2, SPP3, DG5)	H+1	
10^{-1} Gy	Lecture des dosimètres Dosimètre individuel de criticité (DIC) + ceintures ⁽¹⁾	H+6	Médecin traitant ⁽²⁾
1 Gy	Examen clinique	H+3	Hôpital

⁽¹⁾ : en fonction du nombre.

⁽²⁾ : sauf urgences médico-chirurgicales ou problèmes cliniques et biologiques.

Tableau II. Examens à prescrire en fonction de la dose.

Doses	Examens à prescrire
10^{-3} Gy	Anthropogammamétrie
10^{-2} Gy	Activité ^{24}Na (tubes de sang ⁽¹⁾)
10^{-1} Gy	Hématologie - Biochimie Cytogénétique
5×10^{-1} Gy	Phanères
1 Gy	Typage HLA

⁽¹⁾ : En cas d'impossibilité des mesures physiques.

Fiche 7, suite

Tableau III. Examens permettant de mesurer les doses.

Signes cliniques et biologiques	Examens biophysiques	Dosimétrie physique	Indications sur la dose mesurée
Clinique (> 1 Gy)			► Niveau de dose
	Activité du ²⁴ Na		► Dose neutron
Hématologie - Biochimie			► Dose globale moyenne ⁽¹⁾
	Phanères		► Orientation et distribution de la dose neutron
Cytogénétique			► Dose globale moyenne et index d'hétérogénéité ⁽²⁾
	RPE ⁽³⁾		► Dose gamma essentiellement
		Dosimétrie individuelle	► Dose totale (n+γ) et orientation
		Dosimétrie d'ambiance	► Dose totale (n+γ)
		Reconstitution physique de la dose	► Distribution de la dose et dose totale (n+γ)

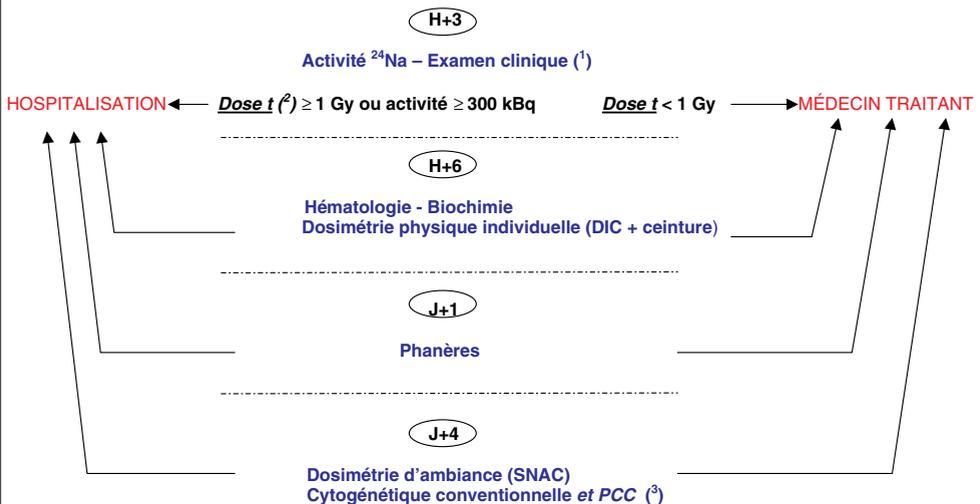
⁽¹⁾ Dose moyennée à l'organisme, ne tenant pas compte de la distribution hétérogène de la dose.

⁽²⁾ Distribution des anomalies des lymphocytes.

⁽³⁾ Résonance paramagnétique électronique – Mesure de la quantité d'espèces radicalaires créées dans l'hydroxyapatite (dents, os) par une irradiation. La RPE est une méthode de dosimétrie rétrospective (les espèces créées sont stables dans le temps).

Fiche 8

Chronologie des résultats des examens



⁽¹⁾ Cas particulier : urgences médico-chirurgicales.

⁽²⁾ Dose totale : Calcul de la dose totale (cf. annexe II.1).

⁽³⁾ PCC : chromosomes prématurément condensés.

Fiche 9, suite

- 14 Combien de temps sont-elles restées à vos côtés ?
Quelle était leur posture respective ?
– Debout, assis, couché, autre ? (précisez)
- 15 Décrivez avec précision ce que vous étiez en train de faire au moment de l'accident
- 16 Décrivez avec précision ce que, au moment de l'accident :
– vous avez-vu.
– vous avez entendu.
– vous avez senti.
- 17 Quelle a été la durée respective de chacune de vos actions depuis l'accident ?
- 18 Quel est le chemin que vous avez emprunté pour rejoindre le point de regroupement ?
Qui vous accompagnait ?
- 19 Quel est le temps que vous avez mis pour rejoindre le point de regroupement ?
- 20 Faire un schéma précis de votre itinéraire pour rejoindre le point de regroupement
(annexe IV)

Heure de la fin de l'interrogatoire et de l'examen :

Nom de la personne ayant effectué le questionnaire :

ANNEXE I

Schéma précis des lieux où vous vous trouviez au moment de l'accident avec localisation de votre position (marquage au sol) :

ANNEXE II

Schéma précis du positionnement de ces personnes par rapport à vous :

ANNEXE III

Faire un schéma précis de votre itinéraire :

ANNEXE IV

Placez sur un schéma ces différents éléments avec le plus de précisions possible et positionnez-vous au sol et dans l'espace :

Fiche 10

Observations cliniques

Identification du patient

NOM :

Prénom :

Date de naissance :

Date et heure du début de l'examen :

Pouls	
Tension artérielle	
Température	

Fiche 10, suite

N°	Question	Oui	Non	Commentaires
1	Le sujet présente-t-il un érythème, une brûlure, une plaie ? Depuis quand ? Le (la) localiser précisément : – Visage – Mains – Autre (schéma ou photo)			
2	Le sujet est-il asthénique, somnolent, euphorique ? Depuis quand ? Modérément, intensément ?			
3	Le sujet présente-t-il des nausées depuis l'accident ? Modérées, intenses ?			
4	Le sujet présente-t-il des douleurs abdominales ? Depuis quand ? Modérées, intenses ? – Localisation précise sur un schéma			
5	Le sujet présente-t-il des vomissements ? Depuis quand ? Modérés, intenses ? En jet ? Combien de fois depuis l'accident ? – Noter les heures			
6	Le sujet a-t-il la diarrhée ? Depuis quand ? Modérée, intense ? Combien de selles depuis l'accident ? – Aspect liquide ou moulé ? – Noter les heures			
7	Le sujet présente-t-il des troubles de la déglutition ? Aspect de la muqueuse oro-pharyngée : – normale ? – inflammatoire ?			
8	Le sujet présente-t-il des céphalées ? Depuis quand ? Modérées, intenses ? – Les caractériser			
9	Le sujet présente-t-il des vertiges ? Depuis quand ? Modérés, intenses ? – Les caractériser			
10	Le sujet a-t-il perdu connaissance ? Combien de fois ? – Les caractériser			
11	Le sujet présente-t-il une désorientation temporo-spatiale ? Modérée, intense ? – Préciser			
12	Le sujet présente-t-il une ataxie ? Modérée, intense ? – Préciser			
13	Examen cardio-vasculaire rapide			
14	Examen pulmonaire rapide			

Si cela est possible, reprendre :

Fiche 10, suite

Pouls	
Tension artérielle	
Température	

Heure de la fin de l'examen :

Identification de la personne ayant effectué l'examen clinique :

4. Dosimétrie biologique par dénombrement des aberrations chromosomiques. Technique médico-légale

La dosimétrie biologique par cytogénétique est une technique pour évaluer la dose reçue par une personne susceptible d'avoir été irradiée accidentellement. Elle repose sur le dénombrement des aberrations chromosomiques dans les lymphocytes circulants après prélèvement sanguin.

La fréquence des aberrations chromosomiques radio-induites est liée à la nature de la source d'irradiation, à la durée de l'exposition et au débit de dose.

Des courbes dose-effet permettent d'estimer, à partir de la fréquence des aberrations chromosomiques, la dose absorbée au corps entier. La dose minimale détectable dépend du nombre de cellules observées et du bruit de fond de la population (1 dicentrique pour 1 000 cellules); elle est de l'ordre de 0,1 Gy lorsque l'on observe 500 cellules.

4.1. Quand utiliser la dosimétrie biologique ?

Les accidents d'irradiation impliquent toutes les catégories de la population, public et travailleurs. La dosimétrie biologique aide à définir l'état du patient, en complément de la dosimétrie physique (dosifilm) et de l'examen clinique. Elle est particulièrement utile lorsque la personne susceptible d'avoir été irradiée ne portait pas de dosimètre au moment de l'exposition. Son premier rôle est de vérifier si l'exposition est bien réelle. Puis, si l'exposition est avérée, d'estimer la dose reçue en fonction du type de rayonnement.

Le dénombrement des aberrations chromosomiques de type instable (dicentriques, anneaux centriques) est considéré actuellement comme la méthode de dosimétrie biologique la plus spécifique et la plus sensible. Il a une valeur médico-légale (Fig. 5).

Le Laboratoire de Dosimétrie Biologique (LDB) de l'IRSN est le seul laboratoire en France pratiquant la dosimétrie biologique pour les cas d'exposition aux rayonnements ionisants. Il peut répondre à tout moment à une demande d'expertise venant d'un médecin. Deux cents cas ont été expertisés par le laboratoire entre 1992 et 2003.

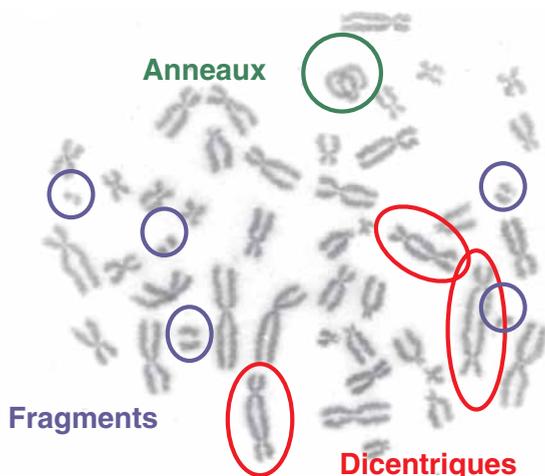


Fig. 5. Aberration chromosomiques de type instable.

Une procédure d'assurance qualité couvre les relations entre le LDB et le prescripteur notamment en ce qui concerne la confidentialité des informations médicales nécessaires à l'estimation de la dose.

Le LDB est agréé pour répondre en cas d'accident de grande envergure. De plus il fait partie d'un réseau international de laboratoires de même nature.

Institut de Radioprotection et Sûreté Nucléaire, DRPH/SRBE
 Chef du Laboratoire de Dosimétrie Biologique
 BP n° 17
 F-92262 Fontenay-aux-Roses cedex
 Tél. : 01 58 35 72 60 – Fax : 01 58 34 84 67

4.2. Les différents types d'aberrations chromosomiques

Les rayonnements ionisants provoquent des dépôts d'énergie au sein de la structure moléculaire de l'acide désoxyribonucléique (ADN). Malgré des mécanismes de réparation efficaces, certains dommages peuvent subsister et entraîner l'apparition d'aberrations chromosomiques observables au sein des lymphocytes sanguins lors de la division cellulaire (métaphase).

Le type d'aberration dépend de son mécanisme de formation (Fig. 6) :

- fragment, délétion : cassure non réparée d'un chromosome,
- inversion, anneau centrique : réparation incomplète du chromosome sur lui-même,
- dicentrique, translocation : échange de matériel génétique entre deux chromosomes.

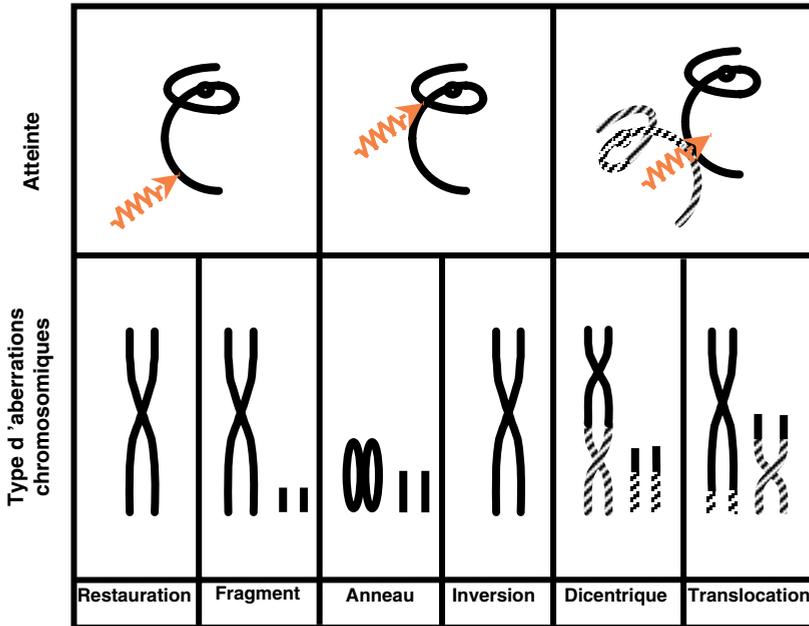


Fig 6. Les différents types d'aberrations chromosomiques.

Cas d'une irradiation hétérogène (Fig. 6)

La dose estimée par cette technique de dosimétrie biologique est une dose moyenne reçue par le corps entier. La technique est donc particulièrement adaptée pour une exposition globale et homogène. Dans ce cas, le nombre d'aberrations chromosomiques par cellule suit une loi de Poisson.

L'étude de la distribution des aberrations chromosomiques permet souvent de différencier les expositions globales des expositions hétérogènes.

En cas d'exposition hétérogène, l'utilisation de modèles mathématiques appropriés peut permettre de mieux définir la dose reçue par la partie du corps irradiée. Cependant la fraction corporelle atteinte doit être supérieure à 10 % du volume total du corps.

Stabilité des aberrations

Une altération grave de la forme du chromosome pose des problèmes à la cellule lors de la division cellulaire. Ainsi les cellules porteuses de dacentriques vont disparaître au cours du temps.

Les aberrations de type dacentrique, anneau centrique et fragment sont dites « instables ». En conséquence, la validité de l'estimation de dose par la technique médico-légale n'est valable que dans les quelques semaines qui suivent l'exposition.

Par opposition, les inversions et les translocations sont des aberrations qui ne modifient pas la forme globale des chromosomes. Elles peuvent être conservées par la cellule après division et pour cela, sont dites « stables ». Du fait de cette stabilité, elles peuvent être le signe d'une irradiation ancienne.

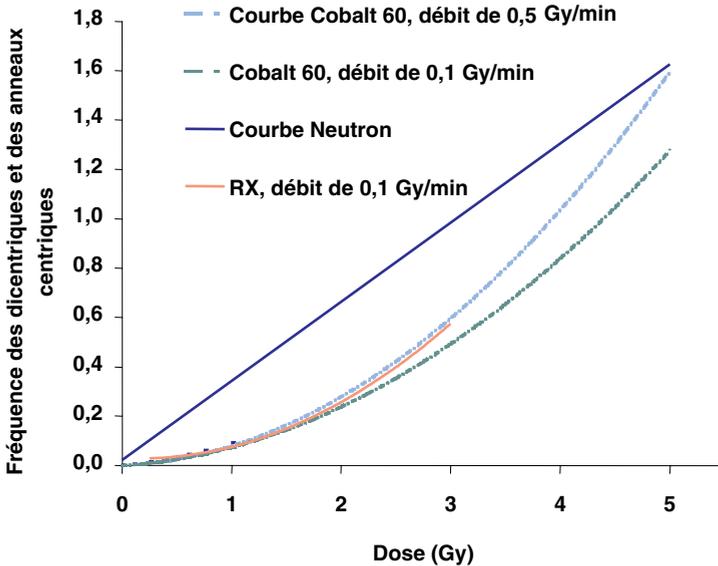


Fig. 7. Relation effet-dose.

Relation effet-dose

Si l'exposition aux rayonnements ionisants est avérée, il est intéressant de connaître la correspondance entre le nombre de dicentriques observés et la dose potentiellement reçue par la personne accidentée (Fig. 7).

Les courbes de référence sont établies en irradiant du sang *in vitro* avec une source de rayonnement définie. Elles varient en fonction de la qualité du rayonnement et le débit de dose.

Ces courbes sont propres à chaque laboratoire car elles doivent être réalisées dans les mêmes conditions méthodologiques que les expertises.

Précision de la mesure de la dose

La précision de l'estimation de la dose corps entier obtenue à partir du dénombrement des dicentriques dépend de plusieurs facteurs (Fig. 8) :

- Le nombre de cellules observées pour l'expertise. Généralement 500 cellules sont observées par expertise. Lorsqu'une plus grande précision est nécessaire, 1 000 à 2 000 cellules peuvent être examinées.
- La valeur du bruit de fond dans la population. Il est de 1 dicentrique pour 1 000 cellules, indépendamment du sexe et de l'âge de la personnes.
- La précision de la courbe de référence utilisée, notamment aux faibles doses.

C'est pourquoi il est nécessaire de compléter l'estimation de la dose par un intervalle de confiance qui prend en compte tous ces paramètres.

Intervalle de confiance de la dose (tableau IV)

Évaluation de la dose (D) en Gray et de son intervalle de confiance à 95 % (IC95) en fonction du nombre de dicentriques observés pour un nombre fixé de cellules.

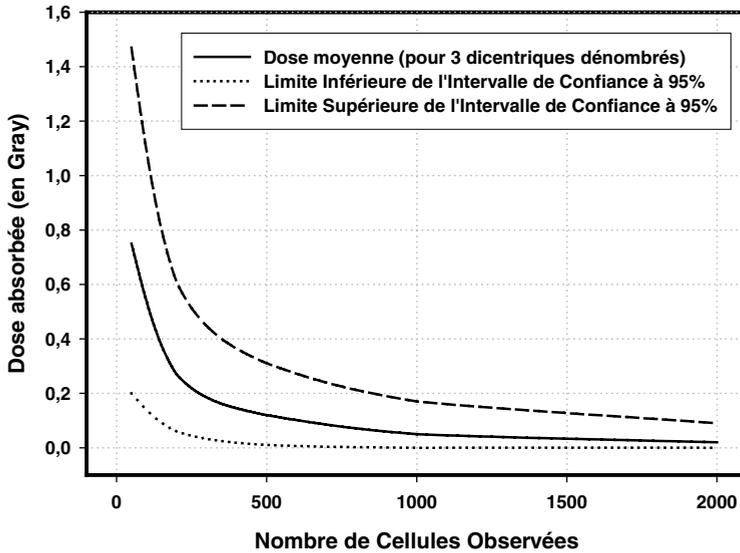


Fig. 8. Précision de la mesure de la dose.

Tableau IV. Intervalle de confiance de la dose.

Nombre de dicentriques	Nombre de cellules observées									
	50		200		500		1000		2000	
	D	IC95	D	IC95	D	IC95	D	IC95	D	IC95
0	0	[0-0.86]	0	[0 - 0.32]	0	[0 - 0.14]	0	[0 - 0.7]	0	[0 - 0.03]
1	0.34	[0- 1.12]	0.10	[0-0.44]	0.03	[0 - 0.21]	0	[0 - 0.11]	0	[0 - 0.05]
2	0.57	[0.1-1.31]	0.19	[0.01-0.53]	0.08	[0 - 0.26]	0.03	[0 - 0.14]	0	[0 - 0.07]
3	0.75	[0.2-1.47]	0.27	[0.06-0.61]	0.12	[0.01-0.31]	0.05	[0 - 0.17]	0.02	[0 - 0.09]
4	0.91	[0.4-.62]	0.34	[0.11-0.68]	0.16	[0.04 - 0.35]	0.08	[0.01- 0.20]	0.03	[0 - 0.1]
5	1.05	[0.5-1.74]	0.40	[0.16-0.74]	0.19	[0.06-0.38]	0.10	[0.02-0.22]	0.04	[0 - 0.11]
6	1.17	[0.6-1.86]	0.46	[0.21-0.79]	0.22	[0.09- 0.42]	0.12	[0.04-0.24]	0.05	[0.01- 0.13]
7	1.29	[0.7-1.97]	0.52	[0.26-0.85]	0.26	[0.11-0.45]	0.14	[0.05- 0.26]	0.07	[0.02- 0.14]
8	1.39	[0.8-2.07]	0.57	[0.30-0.90]	0.29	[0.14-0.48]	0.16	[0.06- 0.28]	0.08	[0.03- 0.17]

Ces calculs ont été réalisés, à partir de la courbe de référence du laboratoire, en assumant que la fréquence des dicentriques par cellule suit une distribution de Poisson: [fréq dic] = 0,0008 + 0,037 [Dose] + 0,055 [Dose]².

Cas des fortes doses

Lors de l'accident de Tokai Mura, les doses délivrées aux 3 patients ont été de quelques grays à plus de 10 grays. Dans ce cas, la technique de référence présente des limites car il existe une saturation au-dessus d'environ 5 grays.

Les anneaux centriques représentent 10 % des dicentriques et la saturation est observée pour des doses de l'ordre de 30 grays. Le nombre d'anneaux est donc un bon indicateur pour les irradiations les plus importantes (Fig. 9).

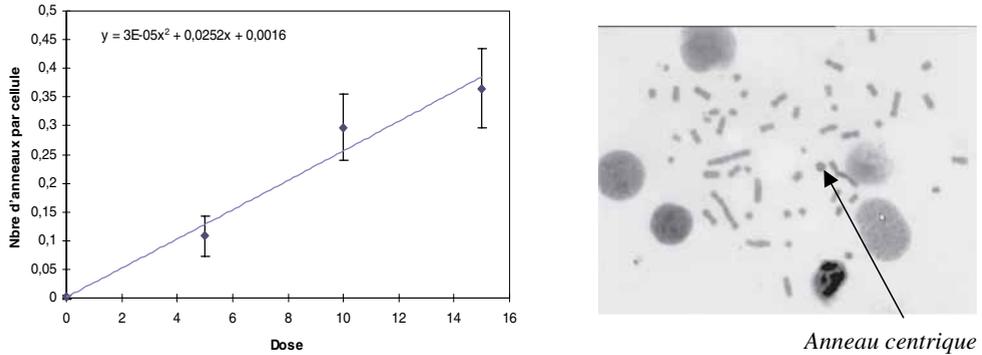


Fig. 9. Relation effet-dose en cas de forte irradiation.

Cas du tri de population

Si le nombre d'échantillons à analyser dépasse 10, ce n'est pas tant une grande précision sur la dose qui sera demandée mais le tri rapide des individus potentiellement exposés *versus* non exposés. La rapidité du test est alors un facteur primordial. Plusieurs stratégies ont été mises en place :

- l'analyse des dicentriques dans 50 cellules au lieu de 500 en cas d'expertise,
- une automatisation poussée qui accélère le temps de traitement,
- l'utilisation de la technique des micronoyaux (Fig. 10).

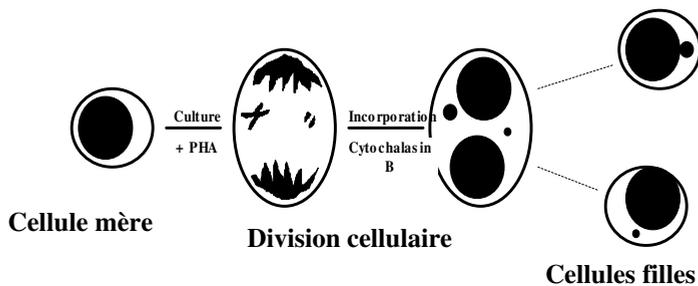


Fig. 10. Technique des micronoyaux.

Le délai nécessaire pour obtenir une dose et la limite de sensibilité, en fonction du nombre d'individus potentiellement impliqués et des techniques dosimétriques employées, est grossièrement précisé dans le tableau V.

Tableau V. Délais nécessaires en fonction du nombre d'individus.

Nombre d'individus	Dosimètre biologique	Délai nécessaire pour obtenir une dose	Limite de sensibilité
De 10 à 100	Dicentrique	1,5 semaine	1 Gy
De 101 à 200	Dicentrique	2 semaines	1 Gy
Plus de 300	Dicentriques ou micronoyaux	Appel à un réseau européen	1 Gy

La technique des micronoyaux

Les micronoyaux résultent de l'expulsion de matériel chromosomique endommagé, lors de la division cellulaire. Ils sont observés dans des cellules binucléées, obtenues par un traitement spécifique.

Les micronoyaux sont facilement identifiables et permettent un comptage plus rapide que les dicentriques mais sont moins spécifiques de l'irradiation du fait d'un bruit de fond plus élevé (1 pour 100 cellules). En conséquence, la limite de sensibilité de la technique est moins bonne, de l'ordre de 0,3 Gy pour 1 000 cellules binucléées observées.

4.3. *Dosimétrie biologique opérationnelle*

4.3.1. Chromosomes prématurément condensés (PCC) par fusion

Initialement, la technique des PCC repose sur les travaux de Johnson et Rao⁷, en 1970, qui ont mis en évidence la possibilité de visualiser les chromosomes sans culture préalable, par la fusion⁸ cellulaire. À partir d'un prélèvement sanguin, la technique des PCC consiste à fusionner des lymphocytes quiescents du sang périphérique avec des cellules en mitose d'une lignée d'ovaires d'hamster chinois (CHO). Les substances libérées par les cellules CHO induisent une réaction de type « prophase » (première étape de la division cellulaire) dans le lymphocyte en interphase. Il en résulte une dissolution de la membrane nucléaire et une condensation prématurée des chromosomes lymphocytaires sous forme d'un simple brin individuel, puisque la duplication de l'ADN n'a pas encore eu lieu. En dépit des processus de réparation consécutifs à l'irradiation, les lymphocytes conservent alors une partie des aberrations de type instable, sous forme de fragments excédentaires, ce qui conduit à un nombre d'objets supérieur aux 46 chromosomes présents dans une cellule normale. Il est alors possible de compter au microscope ces fragments dans la cellule hybride formée du CHO et du lymphocyte. Il existe une relation linéaire entre ce nombre de fragments excédentaires et la dose d'irradiation, mais sa pente diminue avec le temps en raison des mécanismes de réparation, ce qui rend son interprétation délicate. Contrairement à la cytogénétique conventionnelle qui, par la mise en culture, ne permet l'observation que des lymphocytes ayant atteint l'étape de la métaphase où les chromosomes peuvent être observés, la technique des PCC ne provoque pas de sélection artificielle des lymphocytes. Les cellules observées constituent donc un échantillonnage choisi au hasard. À l'inverse, un taux de fusion relativement faible, les délais de réparation de l'ADN et la nécessité d'avoir en permanence des CHO en culture rendent cette technique difficilement applicable en dosimétrie accidentelle.

⁷ Johnson R.T., Rao P.N., Mammalian cell fusion: induction of premature chromosome condensation in interphase nuclei, *Nature* (1970) May 23; 226 (5247): 717-722

⁸ Procédé chimique ou physique qui consiste à assembler sous la même enveloppe cellulaire le contenu de deux cellules de même nature ou de nature différente.

4.3.2. Chromosomes prématurément condensés (PCC) par induction chimique

Une nouvelle technique publiée récemment montre que plusieurs produits chimiques, tels que la calyculine A, l'acide okadaïque, la tauromycine, ajoutés aux cultures de lymphocytes, permettent de provoquer la condensation prématurée des chromosomes en n'importe quelle phase du cycle. Le mécanisme de cette condensation semble complexe et est relativement mal connue. On sait que l'accroissement de la concentration intracellulaire de MPF (*promoting mitotic factor*) durant le cycle cellulaire, est indispensable à la condensation des chromosomes précédant la mitose. Cette condensation est contrôlée par des protéines phosphatases. En inhibant l'action des protéines phosphatases, l'acide okadaïque ou la calyculine A permettent la condensation des chromosomes indépendamment du délai mitotique. D'un point de vue méthodologique, les lymphocytes sont cultivés durant 48 heures dont 24 heures en présence de colcémide. La calyculine A est ajoutée durant la dernière heure. Le reste du traitement est identique à celui de la cytogénétique conventionnelle. Dans ce cas, on ne peut plus observer de dicentriques mais uniquement des anneaux centriques et acentriques. Une relation dose-effet a été établie au Laboratoire de Dosimétrie Biologique de l'IRSN pour des doses entre 5 et 15 Gy, en utilisant le rayonnement gamma du cobalt-60. Même à 15 Gy, l'index mitotique est très élevé. Le désavantage majeur de cette technique est que la durée de la technique est similaire à celle de la cytogénétique conventionnelle puisqu'on observe des métaphases. D'autre part, nombre de ces métaphases restent compactes ce qui ne rend pas leur lecture toujours aisée. C'est pourquoi l'addition de la technique FISH (hybridation *in situ* fluorescente) sur la technique PCC a été entreprise, avec le marquage du chromosome 4.

4.4. L'accident de Tokai-Mura

Hayata (NIRS) a appliqué pour la première fois la technique d'induction chimique des PCC aux trois patients irradiés par un flux mixte neutron/gamma, lors de l'accident de Tokai-Mura, et les résultats ont été comparés à ceux fournis par la cytogénétique conventionnelles et par l'activation du ^{24}Na dans le sang). L'estimation des doses reçues a été calculée à partir d'une courbe de calibration établie pour le rayonnement gamma, il y a plusieurs années, par Sasaki (Université de Tokyo). On voit dans le tableau VI que les résultats sont tout à fait comparables entre eux, ce qui permet de proposer cette méthode pour des cas d'expositions à des doses très élevées.

Tableau VI. Comparaison des résultats obtenus chez les trois patients les plus irradiés de l'accident de Tokai-Mura, en utilisant l'activation du ^{24}Na dans le sang, le dénombrement des dicentriques et le dénombrement des anneaux-PCC dans les lymphocytes.

Techniques	Patient « O »	Patient « S »	Patient « Y »
^{24}Na	15,4	8,4	2,0
Dicentriques	(21)	> 6	2,4 – 3,2
PCC modifiés	> 20	7,8	2,6

4.5. Application à l'irradiation localisée

Afin d'améliorer le diagnostic et le pronostic de l'évolution du tissu après irradiation, la stratégie est basée sur la recherche d'indicateurs accessibles à partir de biopsie de peau. Ces bio-indicateurs doivent permettre de dresser une cartographie des zones atteintes, avec leur gravité et leur étendue.

Les techniques de cytogénétique utilisées nécessitent de travailler sur des cellules qui se divisent. Des cultures primaires de fibroblastes et de kératinocytes, obtenues à partir de biopsie de peau, ont été établies à l'IRSN et la détection des translocations par hybridation fluorescente *in situ* (FISH) a été adaptée au chromosome 4. Des relations dose-effet ont été obtenues pour les deux types cellulaires à des doses d'irradiation gamma comprises entre 0 et 10 Gy. Le délai d'obtention du résultat est de l'ordre de deux semaines, correspondant au temps de culture nécessaire pour obtenir un nombre suffisant de cellules en métaphase.

L'IRSN a été impliqué dans la gestion de l'accident survenu en Géorgie, en décembre 2001. Une des personnes accidentellement irradiées et présentant un syndrome cutané radio-induit important a été hospitalisée début 2002 au Centre de Traitement des Brûlés de l'hôpital militaire de Percy. Dans ce cadre, nous avons pu obtenir des biopsies de peau de ce patient et l'analyse par PCC-FISH a montré des doses comprises entre 5 et 21 Gy. Ces résultats sont en accord avec les données cliniques, mais aussi avec les données physiques établies à partir de simulation dosimétrique avec le code Monte-Carlo.

5. Indicateurs biologiques des dommages radio-induits

L'estimation de la dose reçue (par dosimétrie physique et/ou biologique) est utile pour aider l'équipe hospitalière en charge du(des) patient(s) irradiés à définir l'étendue des dommages radio-induits. Elle reste insuffisante pour établir un diagnostic et ne permet pas de suivre l'évolution de la pathologie au cours du temps. En effet, pour une dose donnée, il existe une forte variabilité individuelle de la réponse à une irradiation. Par ailleurs, les situations accidentelles sont très majoritairement des irradiations hétérogènes. De ce fait, en fonction du nombre d'organes présents dans le champ de l'irradiation, les personnes exposées peuvent subir une atteinte multi-organes engageant leur pronostic vital. Il convient donc de rechercher des indicateurs biologiques et/ou biophysiques, permettant non seulement de préciser l'étendue des dommages subis par une personne irradiée accidentellement, mais aussi d'en préciser le décours. Le concept d'indicateurs de pronostic ou de diagnostic implique comme pour celui d'indicateur de dose, des caractéristiques intrinsèques : spécifique d'un organe-cible (structure) ou d'une fonction physiologique, sensible à l'état physiologique instantané et à son évolution, facilement accessible et utilisable en routine. La spécificité aux rayonnements ionisants n'apparaît plus comme une condition indispensable, dans la mesure où nombre de dérèglements structuraux ou fonctionnels observés suite à une irradiation peuvent aussi être initiés par d'autres maladies. Il n'en demeure pas moins que dans nombre de cas, ces mêmes dysfonctionnements créés par l'irradiation suivent une évolution particulière, différente de celle observée dans d'autres pathologies.

5.1. Le Flt3 ligand, marqueur des lésions de la moelle osseuse

Le syndrome hématopoïétique apparaît pour des doses d'irradiation comprises entre 1 et 10 Gy. Il se manifeste par une destruction de la moelle osseuse et la disparition progressive des cellules sanguines. Il est nécessaire de disposer d'un marqueur simple et sensible des lésions radio-induites à la moelle osseuse afin d'orienter la stratégie thérapeutique. Ceci montre que ce paramètre est un marqueur physiologique potentiellement utile pour la surveillance des lésions radio-induites de la moelle osseuse durant la gestion médicale d'un patient irradié.

Le Laboratoire de thérapie cellulaire et de radioprotection accidentelle (LTCRA) développe depuis plusieurs années l'utilisation du Flt3 ligand comme bio-indicateur de l'atteinte radio-induite à la moelle osseuse. Le Flt3 ligand est une cytokine de 17 Kd environ, découverte en 1994. Elle est produite de façon ubiquitaire dans l'organisme par les lymphocytes T, les cellules endothéliales et les cellules du microenvironnement médullaire. Cette cytokine agit essentiellement en induisant la prolifération des progéniteurs lymphoïdes et myéloïdes de la moelle osseuse et du thymus, mais aussi en induisant la différenciation des monocytes en cellules dendritiques.

Des études effectuées dans notre laboratoire sur le modèle de primate non humain ont permis de déterminer un niveau de base (en situation physiologique normale) de l'ordre de 132 pg/ml de plasma. Ce niveau de base ne varie pas en fonction de l'âge ni du sexe, ni en fonction du cycle circadien. Par la suite, nous avons pu montrer que la concentration de Flt3 ligand est augmentée après irradiation, en corrélation avec la dose d'irradiation. Par ailleurs, nous avons montré que la concentration de Flt3 ligand au 5^e jour après irradiation est prédictive de la sévérité de l'aplasie chez le primate non humain, et ce, quelle que soit la dose d'irradiation et la nature du rayonnement ionisant (rayonnement gamma pur ou flux mixte gamma/neutrons).

Différentes études chez l'homme ont permis de confirmer ces résultats. En effet, nous avons déterminé la concentration basale de Flt3 ligand dans une population de donneurs sains de 20 à 68 ans. Les résultats ont montré une concentration basale de 119 pg/ml, qui ne varie ni avec l'âge ni avec le sexe des donneurs. Par la suite, nous avons suivi l'évolution du Flt3 ligand chez des patients recevant une irradiation localisée dans le cadre d'un protocole thérapeutique anti-cancéreux. Cette étude a montré non seulement que la concentration de Flt3 ligand était augmentée après irradiation, mais également que cette augmentation est directement corrélée à la fois à la dose d'irradiation cumulée reçue et à la fraction de moelle osseuse irradiée. Cette étude a permis de démontrer que le suivi des variations de concentration du Flt3 ligand constitue un bon bio-indicateur de l'atteinte radio-induite à la moelle osseuse y compris dans des situations d'irradiation hétérogène et fractionnée.

Globalement, nos résultats démontrent que le Flt3 ligand est un bio-indicateur facile à doser (dosage ELISA à partir d'un millilitre de sang prélevé sur EDTA), induisant un stress minimum lors du prélèvement, fiable, spécifique de l'atteinte à la moelle osseuse et avec un rapport signal/bruit très élevé, ce qui rend son interprétation facile. Dans la pratique, il est cependant nécessaire de suivre le patient pendant plusieurs jours, voire pendant toute la durée de l'hospitalisation, avec un prélèvement de sang quotidien, réalisé sur anticoagulant EDTA.

5.2. La citrulline, marqueur des lésions de la muqueuse intestinale

Le syndrome gastro-intestinal apparaît dans les 4 à 5 jours qui suivent une exposition globale à des doses supérieures à 10-12 Gy. Il est associé à une diarrhée hémorragique et à la disparition de la muqueuse intestinale. Avant ce stade ultime létal, il convient d'apprécier l'étendue de l'atteinte de la muqueuse intestinale et des lésions radio-induites afin de les prendre en compte dans la stratégie thérapeutique. Le taux plasmatique de citrulline, un acide aminé produit presque exclusivement par les entérocytes (cellules de la muqueuse intestinale), est un marqueur de la masse entérocytaire fonctionnelle. De plus, Lutgens et coll. ont montré que le taux plasmatique de citrulline pouvait être utilisé comme bio-indicateur des lésions épithéliales de l'intestin grêle induites par les rayonnements ionisants. En effet, le taux plasmatique de citrulline est inversement proportionnel à la dose d'irradiation et à l'étendue des lésions épithéliales causées par les rayonnements au niveau de la muqueuse intestinale. Ces données suggèrent que le dosage de la citrulline plasmatique pourrait être appliqué en clinique pour l'évaluation et la surveillance de l'évolution des lésions de l'épithélium intestinal induites par les rayonnements.

5.3. Les oxystérols, marqueurs du dysfonctionnement multiple des organes

Les oxystérols sont des produits d'oxydation et d'hydroxylation du cholestérol par catalyse enzymatique issus de différents tissus comme le cerveau, les poumons et le foie. Les variations plasmatiques du taux de certains oxystérols ont récemment été proposées comme indicateurs physiologiques de différentes pathologies (maladies dégénératives du système nerveux ou les pathologies hépatiques) traduisant une atteinte fonctionnelle ou structurale spécifique de différents organes. On pourrait donc utiliser le suivi des concentrations plasmatiques de certains oxystérols tels que le 24S-hydroxycholestérol (24S-OH), le 27-hydroxycholestérol (27-OH) et le 7-hydroxycholestérol (7-OH) comme indicateurs spécifiques des lésions respectivement cérébrales, pulmonaires et hépatiques après une exposition aux rayonnements ionisants. Une technique simple et rapide par chromatographie liquide haute performance (HPLC) a été mise au point par l'IRSN pour détecter simultanément les concentrations plasmatiques de ces trois oxystérols. Des données préliminaires suggèrent l'existence de modifications du taux plasmatique de certains oxystérols après une exposition aux rayonnements. Les variations observées pour le 7-OH comme pour le 24S-OH pourraient être des indicateurs de l'atteinte respectivement cérébrale et hépatique reflétant certaines modifications du métabolisme du cholestérol dans ces organes. Ces variations ont été corrélées à des modifications fonctionnelles des tissus cibles. Une étude est actuellement en cours pour valider l'utilisation des oxystérols en pratique clinique pour le diagnostic des lésions induites par les rayonnements ionisants dans différents organes (radiothérapie).

6. Dosimétrie physique : fiches 11, 12

Fiche 11

Estimation physique de la dose en cas d'accident de criticité

1. Données nécessaires à la reconstitution physique de la dose

- Caractéristiques de la source de rayonnement :
 - a. Nature des particules émises (neutrons, photons)
 - b. Débit de fluence ou activité ou émission par seconde dans 4π
 - c. Distribution en énergie des particules émises
 - d. Distribution spatiale (si source non isotrope)
 - e. Éventuellement, caractéristiques de la géométrie (ou de la configuration) de la source (dimensions, matériau)

- Topologie de l'accident :
 - a. Positions relatives de la source et de la victime (un plan coté est souhaitable)
 - b. Posture de la victime et son orientation par rapport à la source de rayonnement
 - c. Dimensions et matériaux constitutifs des structures existantes (pouvant constituer des protections biologiques éventuelles)
 - d. Dimensions et matériaux constitutifs des murs et parois (sol et plafond) du local où a eu lieu l'accident

- Durée de l'exposition :
 - a. Durée de l'exposition
 - b. et Nombre de fissions en cas de criticité

- Ou possibilité de raccorder le calcul à un point physique où la dose est connue⁹ : *Point de normalisation à prévoir rapidement dans le cas d'une reconstitution par calcul Monte Carlo.*

Attention : Lors d'un accident de criticité, le champ de rayonnement produit est un champ mixte (neutron, gamma) dont les spectres en énergie peuvent être très variables, et dépendent, en chaque point de l'espace, des écrans potentiels présents et de la diffusion par les structures des bâtiments.

2. Coordination des approches

En fonction des caractéristiques de l'accident, la reconstitution dosimétrique s'orientera vers l'une et/ou l'autre des méthodes, le laboratoire de dosimétrie concerné doit être contacté dans les meilleurs délais :

- Source ponctuelle, courte distance source-victime, écrans peu importants → calcul analytique possible

⁹ La normalisation du calcul de la dose peut se faire par la connaissance du nombre total de particules incidentes. Cette donnée étant rarement connue, la normalisation peut alors se faire lorsque la dose en un point est connue, soit au niveau d'un dosimètre de zone ou individuel, soit en utilisant les résultats de la dosimétrie sur un tissu biologique.

Fiche 11, suite

Laboratoire à contacter rapidement : Service de protection radiologique de l'installation concernée

- Source étendue ou complexe, distance source-victime importante, écrans nombreux ou variés → simulation numérique préférable

Laboratoire à contacter le plus vite possible (le point de normalisation du calcul devant être choisi préalablement à la paramétrisation du calcul) :

IRSN/DRPH/SDE
 BP n°17 92262
 Fontenay-aux-roses cedex
 Tel : 01 58 35 78 62
 Fax : 01 47 46 97 77

3. Quelques repères

- Profil de dose dans un corps :
 - a. Forte hétérogénéité de la dose neutron, qui diminue rapidement le long de leur parcours du fait du ralentissement des neutrons. Entre la face d'entrée d'un fantôme et sa face de sortie, la dose neutron peut diminuer d'un facteur 4 à 10.
 - b. Relative constance de la dose due aux photons, en effet, la dose de sortie est généralement atténuée d'un facteur rarement supérieur à 2 (sauf effet géométrique majoritaire¹⁰).

L'hétérogénéité de la dose dans le tissu biologique peut provenir à la fois de l'atténuation des rayonnements incidents par le tissu, et aussi du facteur géométrique (effet de distance et effet d'écran).

- Exemple de valeurs du rapport « dose gamma » sur « Kerma neutron » mesuré auprès du réacteur SILENE de Valduc :

NB : la valeur du rapport dépend du type d'expérience et de la distance à la source.

- Sans écran $D_\gamma/D_n \approx 1$ à 1,5,
- Avec un écran de 10 cm de plomb autour du réacteur $D_\gamma/D_n \approx 0,1$ à 0,
- Avec un écran de 10 cm de polyéthylène autour du réacteur $D_\gamma/D_n \approx 6$ à 11.

Ces valeurs sont fournies à l'air libre. Étant donné l'atténuation des rayonnements dans le tissu, et les modes différents d'interaction des neutrons et des gamma dans le tissu, la valeur de ce rapport va bien évidemment évoluer en fonction de la profondeur dans le tissu.

4. Résultats attendus de la reconstitution physique de la dose

4.1 Calcul analytique

Le calcul analytique conduit à une valeur du Kerma tissu en un point, qui est généralement assimilable à la dose absorbée, pour les neutrons et les photons incidents. *Il ne donnera pas la dose absorbée due aux photons secondaires générés par les neutrons incidents.*

- Point fort : réalisé en quelques minutes en un point donné ;

¹⁰ Plus la distance entre la source et la victime est faible, plus le gradient de dose en fonction de la distance sera important.

Fiche 11, suite

- Points faibles : Le calcul analytique ne peut pas donner la dose due aux photons secondaires (mais simplement l'estimer à partir de la dose due aux neutrons primaires). Il ne donnera pas une cartographie complète. Son degré de précision peut être difficile à évaluer car il ne prend pas en compte le rayonnement diffusé. La contribution du rayonnement diffusé peut être évaluée en utilisant un facteur de build-up¹¹, avec dans ce cas une incertitude qui peut être importante sur la valeur obtenue.

4.2 Calcul Monte-Carlo

La méthode Monte-Carlo repose sur le caractère probabiliste des interactions fondamentales entre rayonnements ionisants et matière. Chaque particule est suivie tout au long de son histoire et de ses interactions dans la matière. Le résultat du calcul correspond à l'ensemble des événements élémentaires de chacune des particules.

Le code fournit ainsi les grandeurs recherchées :

1. Grandeurs globales : définies dans un volume donné, elles peuvent être soit de nature radiométrique (distribution des particules en énergie, ou distribution spatiale dans ce volume), soit de nature dosimétrique (dose absorbée dans ce volume).
2. Grandeurs ponctuelles : elles peuvent être définies en plusieurs points de l'espace et constituer des distributions (cartographie de la dose dans un volume permettant de construire des isodoses), ou en un seul point (distribution en énergie ou valeur de la dose en un point détecteur).
 - Points forts : cette méthode permet de travailler en géométrie complexe car elle traite l'ensemble des rayonnements directs et diffusés. Elle peut fournir une cartographie complète de la dose dans le corps. La précision du résultat dépend essentiellement de la précision avec laquelle est réalisée la modélisation géométrique, et du nombre de particules générées (histoires). L'incertitude sur le calcul est donc en théorie maîtrisable.
 - Points faibles : il faut disposer d'outils géométriques spécifiques (fantôme anthropomorphe adaptable en taille et en position, outil de géométrie pour la simulation de l'environnement). Le temps de paramétrage peut être prohibitif (plusieurs heures à quelques jours) si le laboratoire ne dispose pas des outils adaptés. Le temps de calcul dépend des codes mathématiques utilisés, et de la précision exigée. En particulier pour les fantômes « voxel », plus la segmentation est précise, plus les calculs seront longs. De même, le temps de calcul est proportionnel au nombre de particules générées. Un calcul de dose peut prendre de quelques heures à plusieurs jours. Enfin, en pratique, l'incertitude générée par les approximations géométriques n'est pas toujours quantifiable.

¹¹ Permet de prendre en compte la multi-diffusion dans la matière.

Fiche 12

Dosimètres utilisés

Tableau VII. Principales caractéristiques des dosimètres utilisés.

Dosimètres		de zone (z)		Limite de détection (Gy)		Incertitude		Délai (1)		Remarques	
Type	n ou γ	z	p	inférieure	supérieure	sur l'évaluation	d'exploitation				
SNAC2	n	z	p	0,1	> 10	(2)	50 %	(2)	1 SNAC2 ~ 5 heures		évaluation par spectrométrie gamma + code de calcul (spectre, fluence, dose)
DIC	n	p	p	0,1	> 10	(2)	facteur 2 au maximum		1 ensemble (DIC + ceinture)		spectrométrie gamma (pour cibles métalliques),
Ceinture	n	p	p	0,1	objectif : orientation		20 %		2 heures environ		comptage β (pour cible d'ébonite)
PB33	γ	z + p	p	0,02	>10 (si étalons)		30 %		20 PB33 ~ 1 heure		stable après 24 heures ; relectures possibles sensible aux neutrons thermiques
Al ₂ O ₃	γ	z + p	p	0,05	>10 (si étalons)		30 %		20 Al ₂ O ₃ ~ 2 heures		étalons souhaités ; effacement à la lecture ; faiblement sensible aux neutrons
Emulsion Photographique (4)	γ	p	p	2×10^{-4} 1×10^{-2}	5×10^{-2} 3 10	développement spécial	30 % (1 ^{re} émulsion) 30 % (2 ^e émulsion)		20 films ~ 2 heures		Informations qualitatives sur : - la forme du spectre gamma, - la présence de neutrons thermiques.
PGPI (5)	γ	p	p	2×10^{-4}	0,2		30 %		20 PGPI ~ 2 heures		effacement lors de la lecture
PGPDIN ou (5) CODEBADGE	n	p	p	5×10^{-4}	0,2		facteur 1 à 5		20 PGPDIN ~ 2 heures		effacement lors de la lecture <i>albedo : étalonnage par poste de travail</i>
PN3 (5)	n	z + p	p	$\sim 2 \times 10^{-4}$	$\sim 0,2$		20 % à 50 %		20 PN3 ~ 12 heures		détecteur à traces (0,2 MeV < E _n < 15 MeV). Insensibilité totale aux photons.

(1) Après l'arrivée au laboratoire d'exploitation.

(2) Limitation par le temps mort de l'appareil de mesure utilisé.

(3) Largement dépendante de la forme du spectre de neutrons.

(4) Pour les centres CEA le film AGFA a remplacé le film KODAK. CEA : films développés par IRSN/DRPH/ILSDOS/FAR; - COGEMA Films développés à La Hague ou à Marcoule.

(5) Non prévus pour la Dosimétrie de Criticité. Dosimètres mentionnés pour information.

Pour en savoir plus

- International Atomic Energy Agency (1982) *Dosimetry for Criticality Accidents, a Manual, Safety Series n° 211*, Vienna.
- CIPR 89, *Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection : reference values*.
- International Atomic Energy Agency (2001) *Cytogenetic Analysis for Radiation Dose Assessment*, Technical Reports series n° 405, Vienna.
- Lebaron-Jacobs L., Miele A., Fottorino R. (2005) *Contribution of Hair Dosimetry following Criticality Accident* (Congrès San Diego de l'American Nuclear Society, 5-9th June 2005 ; publication soumise à Health Physics).
- Lemaire G., Dhermain J., Remy M.L., Masse R. (1992) Estimation de la dose absorbée en cas d'exposition aux neutrons rapides à l'aide de la transmutation du soufre en phosphore dans le système pileux, *Radioprotection* **27**, 17-34.
- ORNL/TM-12028, Oak Ridge National Laboratory (1993) *Determination of Neutron Dose from Criticality Accidents with Bioassays for Sodium-24 in Blood and Phosphorus-32 in Hair*, juin 1993.
- Rapport CEA R6080 (2005) *Conduite à tenir face aux victimes d'un accident de criticité*.
- Rapport du GT-criticité (1984) SMT-LABM CEA (*document interne*).
- Revue Rayonnements ionisants (2005) *Techniques de Mesures et de Protection. Le tri au cours d'un accident de criticité. Rôle du SST et du LABM dans une INB-CEA*, *Revue ATSR*, 34.
- Sorokine-Durm I., Durand V., Le Roy A., Paillole N., Roy L., Voisin P. (1997) Is FISH-painting an appropriate biological marker for dose estimates of suspected accidental radiation overexposure? A review of cases investigated in France from 1995 to 1996, *Environmental Health Perspective* **105** (suppl 6), 1427-1432.
- Supplément du *British Journal of Radiology*, 27 (2005).
- Tabardel R., Ricourt A., Parmentier N., Rapport CEA-R 5276 (1984) *Évaluation rapide de la dose due aux neutrons à la suite d'un accident de criticité à partir de l'activité du sodium-24 mesurée*.
- Voisin P., Barquinero F., Blakely B., Lindholm C., Lloyd D., Luccioni C., Miller S., Palitti F., Prasanna PGS., Stephan G., Thierens H., Turai I., Wilkinson D., Wojcik A. (2002) Towards a Standardization of Biological Dosimetry by Cytogenetics, *Cellular and Molecular Biology* **48**, 501-504.
- Voisin P., Benderitter M., Chambrette V., Claraz M., Delbos M., Durand V., Paillole N., Roy L., Sorokine-Durm I. (2002) La dosimétrie biologique de l'accident d'irradiation, *Radioprotection* **37**, 27-40.
- Voisin P., Lloyd D., Edwards A.A. (1997) Chromosome aberration scoring for biological dosimetry in a criticality accident, *Radiation Protection Dosimetry* **70**, 467-470.

Organisation des secours

L'accident de criticité peut concerner de quelques sujets à une centaine de personnes environ au niveau de chaque installation. Sur l'aire d'évacuation et de regroupement, les premiers éléments utiles à la dosimétrie physique (dosimètres d'ambiance) sont recueillis par le personnel du bâtiment sinistré et donnés aux agents du SPR pour lecture. Les victimes sont orientées vers le « poste de tri » où leur état clinique est évalué : les irradiés présentant d'emblée des signes cliniques sont évacués vers les urgences médicales du SST.

1. Le tri des urgences pour l'évacuation des blessés

Au niveau du « poste de tri », pour permettre de distinguer les personnes exposées (irradiation externe et/ou contamination) de celles qui ont seulement été impliquées (faiblement ou non irradiées), le SPR effectue un tri en fonction des résultats de la lecture des dosimètres opérationnels individuels et de la mesure gamma corps entier d'activation du ^{24}Na . Il est évident que l'estimation dosimétrique à ce stade ne peut être qu'approximative : activation ou non-activation avec ou sans contamination, mais elle permet déjà de réaliser en urgence un tri des victimes. Les victimes irradiées sont rapidement dirigées par ordre d'importance vers le SST, où elles subiront un examen clinique, des prélèvements biologiques, une mesure d'activité du ^{24}Na au contact ou une anthropogammamétrie (selon l'état général), et surtout un traitement symptomatique en fonction de l'état clinique (choc...). Les troubles psychologiques classiquement présentés en situation accidentelle devront aussi être pris en considération. Un premier bilan biologique doit être réalisé dans les trois premières heures après l'accident. D'autres paramètres, à la fois biologiques et physiques, permettront d'estimer ultérieurement la dose reçue de façon plus précise (hématologie, cytogénétique, dosimètres), ainsi que l'hétérogénéité de la dose neutron (phanères), et d'évaluer le pronostic (biochimie) avec des temps variables d'obtention des résultats. D'autre part, les victimes impliquées sont conduites au SST, y subissent un examen médical et éventuellement une anthropogammamétrie dans le LABM. Ensuite, elles renseignent le questionnaire « entretien post-accidentel » (Fiche 9), qui permettra d'estimer la distance à laquelle elles se trouvaient au moment de l'accident, la durée de l'exposition et leur orientation par rapport à la source. En parallèle, doivent être pratiqués les premiers gestes de décontamination interne et externe.

C'est surtout l'urgence médico-chirurgicale qui prime dans tous les cas sur les risques radiologiques. Cette urgence doit être traitée selon les règles médicales habituelles. Enfin, en fonction des bilans cliniques, biologiques et dosimétriques, les victimes pourront être hospitalisées d'emblée ou de façon différée (si aggravation de l'état général), ou bien être prises en charge par leur médecin traitant. La décision d'hospitalisation en urgence sera prise en fonction :

- des premiers signes cliniques éventuels : si la victime a vu un flash bleu (effet Cerenkov), si elle est blessée ou si la symptomatologie est sévère ou bien si son état s'aggrave rapidement) ;
- du résultat de la mesure d'activation du ²⁴Na (dose de 1 Gy ou activité de 300 kBq en ²⁴Na). Pour chacune des victimes est rédigée une fiche « suiveuse » (Fiche 14) qui résume l'ensemble des observations et des actions effectuées par les agents SPR et le personnel du SST/LAM. Cette fiche accompagne le patient en cas d'évacuation vers une structure hospitalière et dans les cas de prise en charge par le médecin traitant.

2. Recommandations pour les SST et LABM

Pour chaque établissement concerné, les SST et LABM s'assurent :

- que leurs procédures internes sont à jour,
- que sont à disposition les consignes du PUI ainsi que les fiches de criticité et les courbes d'isodoses des installations concernées.

Pour effectuer les analyses :

- Établir une procédure récapitulant les analyses à effectuer (d'après la fiche 5).
- Pour les analyses radiotoxicologiques, établir ou réactualiser un protocole d'assistance technique entre LABM ou SST de centres proches.
- Pour les analyses particulières, y compris les tests HLA, disposer d'un protocole de prise en charge avec des établissements compétents.

Pour hospitaliser les patients :

- Établir ou réactualiser une convention avec les structures hospitalières *ad hoc*.
- Adresser les documents d'information (p. 55) avec la fiche tri (Fiche 14) aux Centres Hospitaliers qui recevront les patients.

Pour les patients adressés à leur médecin traitant :

- Mettre à leur disposition les documents d'informations (p. 60).

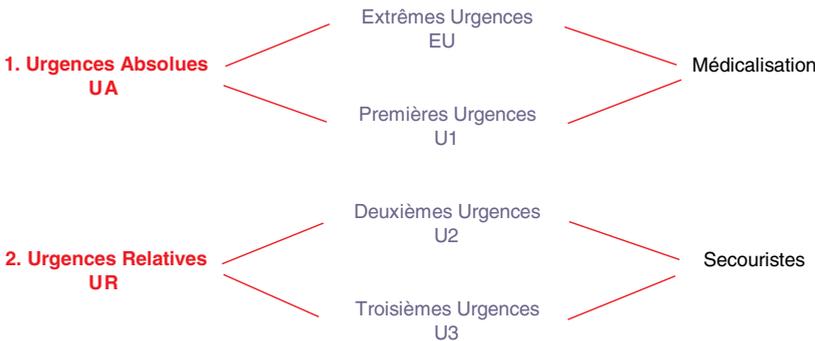


Fig. 11. Types d'urgence.

Classification des blessés

Critères de choix d'un PMA/CME

(Poste médical avancé, Centre médical d'évacuation)

- le plus près possible de l'accident,
- hors risque évolutif,
- à l'abri des intempéries,
- à proximité des voies d'accès,
- si possible Drop Zone à proximité,
- entrée et sortie distinctes,
- téléphone, eau, électricité, chauffage si possible.

Classification des blessés au PMA/CME

1. Urgences absolues (UA)

Extrêmes urgences (EU)

- asphyxie aiguë avec détresse respiratoire immédiate
- hémorragie difficilement contrôlable (gros vaisseaux).

Les EU nécessitent des gestes de réanimation immédiats, voire une intervention chirurgicale dans les plus brefs délais.

Premières urgences (U1)

- polytraumatisme
- lésion abdominale stable
- brûlés graves (> 40 %)...

Les U1 nécessitent des gestes de réanimation mais peuvent attendre une intervention chirurgicale dans un délai maximum de six heures.

2. Urgences relatives (UR)

Deuxièmes urgences (U2)

Les U2 ne présentent pas de pronostic vital (fracture diaphysaire), brûlures peu étendues, plaies non dilabantes des membres...) mais nécessitent immobilisation, pansements et autres soins avant le transport.

Troisièmes urgences (U3)

Les U3 sont les blessés légers auxquels on peut ajouter les traumatismes psychiques.

Fiche de tri et d'évacuation

NOM : _____ N° D'IDENTIFICATION DE LA VICTIME : _____

Prénom : _____ POSTE MEDICAL AVANCE : _____
 Médecin : _____
 Infirmier : _____

Date de naissance : ____ / ____ / 19 ____ Sexe : M F

Entreprise : _____

Accident le ____ / ____ / 20 ____
 à ____ h ____
 Examen le ____ / ____ / 20 ____
 à ____ h ____

URGENCE CLASSIQUE

ETAT CLINIQUE

Conscience normal patho
 Ventilation normal patho
 TA (cm Hg) Pouls/mn CHOC ? OUI NON

LESIONS	Crâne	Face	Cou	Rachis	Thorax	Abd.	Bassin	MSD	MSG	MID	MIG
FRACTURES *											
CONTUSIONS											
PLAIES											
BRULURES											

AUTRES RENSEIGNEMENTS : _____

* O = Ouvertes - F = Fermées

PRIORITE (entourer la case retenue)	Pas d'atteinte classique	(UA)		(UR)		DCD
		EU	U1	U2	U3	

SURVEILLANCE MEDICALE : EVOLUTION CLINIQUE - PRELEVEMENTS - THERAPEUTIQUE

Date	Heure	

TRANSPORT EVACUATION OUI NON

Couché • Accompagnement médical OUI NON
 Assis • Debout

DESTINATION

Moyen : _____ Indicatif : _____ Heure départ : _____

EXEMPLAIRE ACCOMPAGNANT LA VICTIME

Fiche 14-suite

IRRADIATION AIGUE GLOBALE

	γ	Neutrons(n)
Dosimétrie estimée Gy		
Au moyen de		

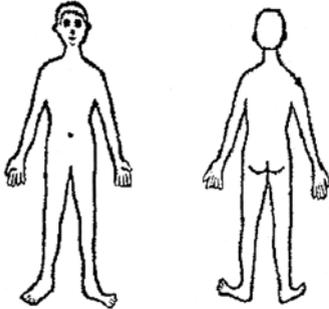
POSITIONNEMENT PAR RAPPORT A LA SOURCE :

Schémas :

DOSIMETRES ANALYSES OUI NON

- Céphalées et/ou troubles conscience OUI Heure : _____ NON
- Erythème précoce - Localisation : OUI Heure : _____ NON
- Nausées et/ou vomissements et/ou diarrhée OUI Heure : _____ NON
- Température °C OUI Heure : _____ NON

CONTAMINATION EXTERNE RESIDUELLE



CONTAMINATION INTERNE SUSPECTEE OUI NON

- Mesurée OUI NON
- au moyen de : _____
- Plaie contaminée OUI NON
- Radioélément(s) suspecté(s) : _____

DECONTAMINATION EXTERNE EFFECTUEE ?

OUI Heure : _____ NON

CONTAMINATION RESIDUELLE ? OUI NON

- Reporter les zones et les c/s sur le schéma ci-contre
- Détecteur utilisé : _____

MESURES - PRELEVEMENTS (joindre tout résultat éventuel)

Date	Heure		FAIT	A FAIRE
		Anthropogammamétrie(s) horodatée(s)	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON
		Radiotoxicologies horodatées : - urines	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON
		- mucus nasopharyngé ...	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON
		Prélèvements de phanères localisées ou horodatés	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON
		Prélèvements sanguins horodatés		
		- NF, plaquettes, réticulocytes	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON
		- Hémostase Biochimie Enzymologie	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON
		- 24 Na.....	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON
		- Groupe Erythrocytaire et HLA I et II	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON
		- Cytogénétique.....	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON

SOINS

- 1 cp de KI (= 100 mg d'Iode) OUI Heure : _____ NON
- D.T.P.A. (gélule au spinhaler = 40 mg) OUI Heure : _____ NON
- D.T.P.A. IV (1/2 ampoule IV = 500 mg) OUI Heure : _____ NON
- Autres (à préciser) OUI Heure : _____ NON

ORIENTATION

- Dose totale (γ + n) < 1 Gy Surveillance par
- Dose totale (γ + n) ≥ 1 Gy Hôpital

Examens à réaliser en cas d'accident de criticité

Fiche 15

Tableau VIII. Prélèvements systématiques.

BIOLOGIE MÉDICALE (tubes de sang et urines)		RADIOTOXICOLOGIE
HEURE DE PRÉLÈVEMENT	NATURE ET NOMBRE DE TUBES DE PRÉLÈVEMENT/PERSONNE	EXAMEN
	5 tubes violets (EDTA 5 ml)	*NFS Plaquettes Réticulocytes (1 tube) Groupe érythrocytaire HLA 1 et 2 (4 tubes)
	1 tube noir (citrate 5 ml)	VS
	1 tube bleu (citrate 5 ml)	TP TCA Fibrinogène
*Hj BILAN INITIAL	2 tubes oranges (tube sec 5 ml)	Na K Cl Protéines (1 tube) TGO, TGP, amylase, LDH, fer, ferritine, Capacité saturation sidérophilline, cortisol, ACTH (1 tube)
*H+3	1 tube violet (EDTA 5 ml)	NFS Plaquettes Réticulocytes
	2 tubes verts (héparinate de Li 5 ml)	Cytogénétique
H+6	1 tube violet (EDTA 5 ml)	NFS Plaquettes Réticulocytes
	1 tube violet (EDTA 5 ml)	NFS Plaquettes Réticulocytes
H+9	2 tubes verts (héparinate de Li 5 ml)	Cytogénétique

- Anthroporadiamétrie ²⁴ Na Corps entier
 - Prélèvements des Phanères pour dosage du ³²P
 - ²⁴ Na dans le sang (2 tubes violets EDTA de 5 ml)
 - Urine miction selon prescription médicale
 - Prélèvements nasaux selon prescription médicale

Tableau V.III. (suite).

BIOLOGIE MÉDICALE (tubes de sang et urines)		RADIO TOXICOLOGIE	
HEURE DE PRÉLÈVEMENT	NATURE ET NOMBRE DE TUBES DE PRÉLÈVEMENT/PERSONNE	EXAMEN	
H+12	1 tube violet (EDTA 5 ml) 1 tube noir (citrate 5 ml) 1 tube bleu (citrate 5 ml) 2 tubes oranges (tube sec 5 ml)	NFS Plaquettes Réticulocytes VS TP TCA Fibrinogène Na K Cl Protéines (1 tube) Cortisol, ACTH (1 tube)	
H+15	1 tube violet (EDTA 5 ml)	NFS Plaquettes Réticulocytes	
H+18	1 tube violet (EDTA 5 ml)	NFS Plaquettes Réticulocytes	
H+21	1 tube violet (EDTA 5 ml) 1 tube violet (EDTA 5 ml)	NFS Plaquettes Réticulocytes NFS Plaquettes Réticulocytes	
H+24	1 tube violet (EDTA 5 ml) 1 tube noir (citrate 5 ml) 1 tube bleu (citrate 5 ml) 2 tubes oranges (tube sec 5 ml)	NFS Plaquettes Réticulocytes VS TP TCA Fibrinogène Cortisol, ACTH (1 tube) Na K Cl Protéines (1 tube)	<i>Examens spécialisés (voir fiche 16) - Urines de 24 heures selon prescription médicale - selles de 24 heures selon prescription médicale</i>

*H : heure de l'accident de criticité
 *Hi : heure de prélèvement du bilan initial
 *en gras : prélèvements prioritaires
 *en italique : prélèvements non systématiques réalisés en milieu spécialisé en fonction de l'état clinique du patient.

Prélèvements spécialisés

Fiche 16

Ces prélèvements spécialisés ne sont pas de pratique courante. Ils sont du domaine de la recherche et peuvent être réalisés éventuellement en milieu spécialisé lorsque la dose est supérieure à 1 Gy.

Leurs résultats constituent des éléments de pronostic complémentaires.

Tableau IX. Définitions.

MOLÉCULES DE L'INFLAMMATION	Fit3-LIGAND	CITRULLINE	OXYSTÉROLS
CRP IL-1 α et IL-1 β , IL-6, IL-8, IL6Rs RANTES TNF α , TNF- α Rs sICAM-1, sVCAM-1, - ELAM SE- Sélectine MIP-1 α	Marqueur des lésions de la moelle osseuse	Marqueur des lésions de la muqueuse intestinale	Marqueurs du dysfonctionnement multiple des organes

Tableau X. Prélèvement et conditionnement.

MOLÉCULES DE L'INFLAMMATION	Fit3-LIGAND	CITRULLINE	OXYSTÉROLS
SANG	SANG	SANG	SANG
5 ml sur EDTA	1-2 ml sur EDTA À l'admission	1 à 2 tubes de 4,5 ml sur EDTA	
Centrifuger	Chaque jour durant toute la durée de l'hospitalisation.	Centrifuger 10 min à 4 000 g à + 4 °C	
Congélation à – 80°C	Les prélèvements sont à conserver à température ambiante et à envoyer dans les 24 heures au laboratoire	1 ml de plasma dans 2 tubes Eppendorf blanc (1,5 ml) + (si possible) 50 μ l de BHT à 3 mg/150 ml méthanol (préparé extemporanément) dans chaque tube Eppendorf. Les prélèvements sont à conserver à – 80 °C, et à envoyer dès que possible au laboratoire	

Communication

Les paragraphes 1 à 4 sont destinés à servir de support d'information au personnel impliqué et aux différents intervenants.

1. Information du personnel accidenté faiblement exposé, pris en charge secondairement

DEFINITION DE LA CRITICITE

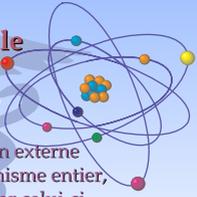
Les accidents de criticité correspondent au déclenchement d'une réaction de fission en chaîne : par exemple lors de la manipulation de produits fissiles Uranium ou Plutonium . Cette réaction expose les personnes proches du lieu de l'accident à une irradiation gamma et neutron.



CECI
Dr. Ch. BIASSE

Où commence le danger de l'irradiation?

Lors d'une exposition externe accidentelle de l'organisme entier, le dommage subi par celui-ci dépend essentiellement de la dose reçue.



CECI
Dr. Ch. BIASSE

L'irradiation naturelle

L'homme a toujours été soumis à une irradiation naturelle plus ou moins importante, provenant :

1. des rayonnements cosmiques
2. des radionucléides de l'air et du sol
3. des radionucléides du corps humain...



CECI
Dr. Ch. BIASSE

Quelques ordres de grandeurs...

En France l'Equivalent de dose moyen annuel dû à l'irradiation naturelle est d'environ : 2,4 mSv.



CECI
Dr. Ch. BIASSE

Quelques ordres de grandeurs...

En médecine, les doses nécessaires à l'éradication d'une tumeur sont en général de 30 à 80 Gray délivrées localement.

Dr. Ch. BIASSE

Lors d'un accident de criticité, l'interrogatoire des personnes impliquées plus ou moins directement dans l'accident est primordial...

Pour préciser leurs circonstances d'exposition et permettre l'estimation de la dose qu'ils ont reçue.



Dr. Ch. BIASSE

Éléments recueillis lors de l'interrogatoire

- La position de l'individu par rapport au lieu de l'accident (la dose reçue variant en fonction de l'inverse du carré de la distance par rapport à la source)
- La présence d'écrans éventuels entre la personne et le lieu de l'accident
- Le temps de présence dans le secteur de l'accident
- L'existence de signes cliniques



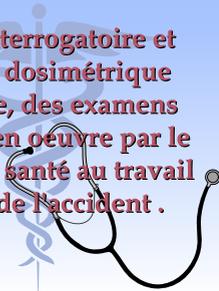
Dr. Ch. BIASSE

L'éloignement de la personne par rapport au lieu de l'accident, l'absence de signes cliniques, laissent supposer une exposition à une dose inférieure à 1 Gray.



Dr. Ch. BIASSE

Après interrogatoire et enquête dosimétrique physique, des examens sont mis en œuvre par le service de santé au travail du site de l'accident.



Dr. Ch. BIASSE

Examens entrepris par le service de santé au travail du site

- Prise de sang
- Examen clinique initial



Dr. Ch. BIASSE

L'exposition globale d'une personne à une dose inférieure à 1 Gray ne nécessite pas de prise en charge urgente...



Dr. Ch. BIASSE

Toutefois, compte tenu de l'incertitude sur la dosimétrie initiale de cette personne, sa prise en charge ultérieure par son médecin traitant est nécessaire, pour surveiller son état de santé...



Dr. Ch. BIASSE

Surveillance effectuée par le médecin traitant



- Examen clinique
- Examen sanguin :
1 jour , 3 jours, 21 jours après l'accident.

Dr. Ch. BEAUME

Cas de la femme enceinte



- Le risque est variable en fonction de la dose estimée reçue au niveau de l'abdomen
- Dans tous les cas, un avis spécialisé est nécessaire.

Dr. Ch. BEAUME

2. Information des médecins des services hospitaliers d'accueil et de leurs collaborateurs

2.1. *Qu'est-ce qu'un accident de criticité ?*

Les accidents de criticité correspondent au déclenchement incontrôlé d'une réaction de fission en chaîne lors de la manipulation d'éléments fissiles, uranium ou plutonium. Cette réaction expose les personnes proches du lieu de l'accident à une irradiation aiguë gamma et neutron.

L'irradiation externe a été reçue lors de l'accident. Le sujet irradié ne présente aucun risque radiologique pour l'entourage et en particulier pour le personnel soignant.

2.2. *Comment ont été pris en charge par le service de santé au travail du site les agents impliqués dans l'accident de criticité ?*

En dehors des victimes nécessitant des soins médico-chirurgicaux d'urgence ou de réanimation qui ont été évacuées directement vers des services hospitaliers, les agents ont effectué le circuit suivant :

- Recherche et prise en charge par le service de santé au travail du site de toute contamination associée :
 - En cas de contamination radioactive externe par dépôt cutané mise en évidence par des détecteurs de radioactivité, une décontamination a été effectuée en utilisant de l'eau, du savon liquide et des produits spécialisés (DTPA) selon le radio-isotope.
 - Un bilan de la contamination interne (recueil des urines, des selles, du mucus nasal pour analyse radiotoxicologique, spectrométrie) a été initié et doit être poursuivi en milieu hospitalier en liaison avec le service médical du travail.

- Si nécessaire, un traitement immédiat d'une contamination interne suspectée a été administré (Iode stable, DTPA).
- Examen clinique, traitement symptomatique, bilan biologique initial, prélèvements d'effets personnels et de phanères en vue d'une estimation des dosimétries neutrons, spectrométrie.

Au terme de ce bilan sur place, l'importance de l'exposition éventuelle de chaque agent a été évaluée pour permettre de décider de l'orientation ultérieure (hospitalisation, orientation vers le médecin traitant).

Pour chaque agent, une pochette suiveuse regroupant l'ensemble des observations et des actions faites lors de ce circuit a été constituée : fiche Tri et fiche Information. Cette fiche accompagne le patient en cas d'évacuation vers une structure hospitalière.

2.3. Quels ont été les critères d'hospitalisation ?

En dehors des urgences médico-chirurgicales, ont été évacués vers des structures hospitalières :

- les patients ayant reçu une irradiation externe globale avec au moins un des signes cliniques initiaux suivants laissant supposer une exposition supérieure à 1 Gy :
 - signes digestifs : nausées, vomissements, diarrhées, hémorragie,
 - signes cutanés : érythème, œdème ou douleur,
 - état de choc, signes neurovégétatifs et vasomoteurs (hyperthermie, troubles de la vigilance, tachycardie et troubles du rythme),
 - œdème douloureux des parotides, sécheresse buccale,
 - signes neurologiques : désorientation, obnubilation, convulsions, asthénie ;
- les patients dont l'exposition a été partielle, c'est-à-dire inférieure à 18 % de la surface corporelle, selon la règle des 9 avec localement un érythème, un œdème et des douleurs faisant suspecter une dose locale supérieure à 4 Gy.

2.4. Comment ont été orientés les sujets nécessitant une hospitalisation ?

En fonction de la dosimétrie estimée initialement à partir des données cliniques, biologiques et de l'enquête dosimétrie physique sur le lieu de l'accident :

- les patients exposés globalement :
 - à des doses comprises entre 1 et 2 Gy ont été adressés vers des services de Médecine,
 - à des doses estimées supérieures à 2 Gy ont été adressés vers des services d'Hématologie ;
- les patients dont l'exposition a été partielle ont été adressés vers des Centres de Brûlés.

2.5. But de l'hospitalisation après irradiation globale

L'urgence médico-chirurgicale prime.

La conduite à tenir lors de l'hospitalisation est développée dans les fiches 2 à 5 (Radiopathologie). Elle comprend :

- un bilan clinique,
- un bilan biologique,
- un bilan du fonctionnement de la moelle hématopoïétique en cas d'hypoplasie,
- le traitement symptomatique et préventif des signes cliniques initiaux, la prévention et le traitement de tout foyer infectieux potentiel. Les pathologies non liées à l'irradiation seront traitées conventionnellement.

La surveillance clinique et biologique en milieu hospitalier doit permettre d'affiner le diagnostic dosimétrique en vue du pronostic.

2.6. Évolution lors de l'hospitalisation

À la phase initiale (ou phase prodromique), va succéder une période de latence, de quelques heures à trois semaines, d'autant plus précoce que la dose absorbée est élevée puis une phase critique correspondant à une destruction cellulaire (peau, moelle osseuse, muqueuse intestinale) ou au dysfonctionnement d'organes critiques (système nerveux central).

- Pour les patients hospitalisés dans des services non spécialisés, il faudra assurer une surveillance clinique et hématologique : NFS, plaquettes à J3, J8, J15, J31, J40. La présence d'un des critères hématologiques suivants évoque une dose supérieure à celle estimée initialement et doit conduire à un transfert vers un Centre Spécialisé selon les recommandations du service de santé du travail du site :
 - Taux de lymphocytes inférieur à la moitié de celui du premier prélèvement de référence ou inférieur à $1\,000/\text{mm}^3$.
 - Taux de polynucléaires neutrophiles inférieur à $1\,500/\text{mm}^3$.
 - Taux de plaquettes inférieur à $5\,000/\text{mm}^3$.
- En milieu hématologique spécialisé, il faudra de plus :
 - Effectuer un bilan du fonctionnement de la moelle hématopoïétique.
 - Traiter symptomatiquement une éventuelle aplasie médullaire (transfusions de produits sanguins irradiés, CMV – si nécessaire, traitements des syndromes digestifs et pulmonaires).
 - Discuter de l'attitude thérapeutique en fonction des résultats des examens spécialisés (gravité de l'aplasie, hétérogénéité de l'atteinte médullaire) :
 - attente de la reconstitution médullaire spontanée,
 - greffe de moelle,
 - facteurs de croissance hématopoïétiques.

À noter que lors d'un accident de criticité, la dose sera hétérogène et les indications d'une greffe de moelle seront très limitées.

2.7. Où s'adresser ?

Dans tous les cas vous pouvez vous adresser :

- au service de santé du travail du site de l'accident
- au service spécialisé suivant :
 - Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN)
BP 17
92262 Fontenay-aux-Roses Cedex
☎ 01 58 35 88 88
Ingénieur d'astreinte de l'IRSN joignable 24 h/24, 7 j/7 : 06 07 31 56 63

3. Information et liaisons avec les médecins généralistes

3.1. Qu'est-ce qu'un accident de criticité ?

Les accidents de criticité correspondent au déclenchement incontrôlé d'une réaction de fission en chaîne lors de la manipulation d'éléments fissiles, uranium ou plutonium. Cette réaction expose les personnes proches du lieu de l'accident à une irradiation aiguë gamma et neutron.

L'irradiation externe a été reçue lors de l'accident. Le sujet irradié ne présente aucun risque radiologique pour l'entourage et en particulier pour le personnel soignant.

3.2. Comment ont été pris en charge par le service de santé au travail du site les agents impliqués dans l'accident de criticité ?

En dehors des victimes nécessitant des soins médico-chirurgicaux d'urgence ou de réanimation qui ont été évacuées directement vers des services hospitaliers, les agents ont effectué le circuit suivant :

- Recherche et prise en charge par le service de santé au travail du site de toute contamination associée :
 - En cas de contamination radioactive externe, par dépôt cutané, mise en évidence par des détecteurs de radioactivité, une décontamination a été effectuée en utilisant de l'eau, du savon liquide et des produits spécialisés (DTPA) selon de radio-isotope.
 - Un bilan de la contamination interne (recueil des urines, des selles, du mucus nasal pour analyse radiotoxicologique, spectrométrie) a été initié et sera poursuivi par le service médical du travail.
 - Si nécessaire, un traitement immédiat d'une contamination interne suspectée a été administré (Iode stable, DTPA).

- Examen clinique, traitement symptomatique, bilan biologique initial, prélèvements d'effluents personnels et de phanères en vue d'une estimation des dosimétries neutrons, spectrométrie.

Au terme de ce bilan sur place, l'importance de l'exposition éventuelle de chaque agent a été évaluée pour permettre de décider de l'orientation ultérieure (hospitalisation, orientation vers le médecin traitant).

Pour chaque agent, une pochette suiveuse regroupant l'ensemble des observations et des actions faites lors de ce circuit a été constituée : fiche Tri et fiche Information et lui a été confiée lors de son départ du site.

3.3. Quels ont été les critères d'hospitalisation ?

En dehors des urgences médico-chirurgicales, ont été évacués vers des structures hospitalières :

- les agents dont l'irradiation externe globale a été estimée supérieure à 1 Gy ;
- les patients dont l'exposition a été partielle, c'est-à-dire inférieure à 18 % de la surface corporelle selon la règle des 9 avec localement un érythème, un œdème et des douleurs faisant suspecter une dose locale supérieure à 4 Gy.

3.4. Quels ont été les critères de surveillance ambulatoire ?

Il a été demandé aux agents qui ne présentaient aucun signe clinique lors du bilan initial, ayant subi une exposition estimée inférieure à 1 Gy (irradiation globale suspectée compte tenu de leur localisation par rapport à la source d'exposition lors de l'accident) de consulter leur médecin traitant pour surveillance.

Cette surveillance doit comporter :

- Un examen clinique et une NFS initiale
- Le recueil de toutes les données médicales
 - résultats NFS sur le site,
 - résultats de l'enquête dosimétrique physique.
- Une surveillance clinique et hématologique à J3 et à J21.

3.5. Quels sont les critères de gravité devant orienter vers une hospitalisation ?

La dosimétrie estimée initialement comporte des incertitudes justifiant la surveillance ambulatoire. Les critères de gravité suivants doivent faire suspecter une dose supérieure à 1 Gy et orienter vers une hospitalisation selon les recommandations du médecin du travail du site :

- Apparition de signes cliniques :
 - signes digestifs : nausées, vomissements, diarrhées, hémorragie,
 - signes cutanés : érythèmes, œdème ou douleur,

- état de choc, signes neurovégétatifs et vasomoteurs (hyperthermie, troubles de la vigilance, tachycardie et troubles du rythme),
 - œdème douloureux des parotides, sécheresse buccale,
 - signes neurologiques : désorientation, obnubilation, convulsions, asthénie.
- Apparition d’anomalies sur les NFS. Pour des doses inférieures à 1 Gy, on peut toutefois observer une baisse discrète et transitoire des lymphocytes, dont le taux doit cependant rester dans les limites de la normale.

3.6. Où s’adresser ?

Dans tous les cas vous pouvez vous adresser :

- Au service de santé du travail du site de l’accident
- Au service spécialisé suivant :
 - Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN)
BP 17
92262 Fontenay-aux-Roses Cedex
☎ 01 58 35 88 88
Ingénieur d’astreinte de l’IRSN joignable 24 h/24, 7 j/7 : 06 07 31 56 63

4. Information pour les agents appelés à être suivis par leur médecin traitant

À la suite de l’accident de criticité survenu sur le site, l’enquête dosimétrique ainsi que les examens que vous avez subis au service de santé au travail du site n’ont pas retrouvé d’éléments justifiant une hospitalisation ou une surveillance spécialisée. En conséquence, vous avez été autorisé à rentrer à votre domicile.

Toutefois, il vous est conseillé de consulter votre médecin le lendemain de l’accident.

La fiche suiveuse résumant l’ensemble des observations et des actions faites sur le site doit lui être remise ainsi que les résultats des examens réalisés sur le site dont vous disposez éventuellement. Une fiche d’information intitulée : « Information et liaisons avec les médecins généralistes » vous a également été confiée à son attention.

Par ailleurs, en cas d’apparition d’un ou de plusieurs des signes suivants :

- nausées, vomissements, diarrhées,
- apparition au niveau de la peau d’une rougeur, d’un gonflement ou de douleurs,
- fièvre, troubles de la vigilance, palpitations,
- sécheresse buccale,
- fatigue, somnolence,

prenez contact rapidement avec votre médecin.

Pour en savoir plus

Circulaire DHOS/HFD/DGSR 277 du 2 mai 2002 relative à l'organisation des soins médicaux en cas d'accident nucléaire ou radiologique et annexe : guide national relatif à l'intervention médicale en cas d'événement nucléaire ou radiologique.

Circulaire DGS/3A/3B/514 du 6 décembre 1988 relative à la surveillance et le traitement des malades irradiés.

Urgences radiologiques

Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN)

BP 17 - 92262 Fontenay-aux-Roses Cedex

☎ 01 58 35 88 88 (standard)

ingénieur d'astreinte de l'IRSN joignable 24h/24 7j/7 : 06 07 31 56 63

Service de Protection Radiologique des Armées (SPRA)

1 bis rue du Lieutenant Raoul-Batany - 92141 CLAMART

☎ 01 41 46 71 12

Hopital d'Instruction des Armées Percy

101 avenue Henri Barbusse - 92141 CLAMART

☎ standard : 01 41 46 60 00

Heures ouvrables : ☎ 01 41 46 60 10 (Médecin chef)

01 41 46 60 12 (secrétariat du Médecin chef)

01 41 46 60 13 (secrétariat général)

01 41 46 64 91 (Fax)

En dehors des heures ouvrables : ☎ 01 41 46 63 85

Centre de Traitement des Brûlés (CTB) :

Médecin chef de service :

☎ 01 41 46 62 10 ou 01 41 46 62 11 (secrétariat)

Fax : 01 40 95 08 72

Institut Curie

26, rue d'Ulm - 75005 PARIS

☎ standard : 01 44 32 40 00

Chef du Service de Radiothérapie :

☎ 01 44 32 46 24 ou 01 44 32 46 22 (secrétariat)

Historique du GT criticité des SST/LABM

Les grandes étapes

Février 1984 – Conclusions du GT Criticité : Consignes à appliquer en cas d'accident de criticité.

Ce travail très important a le mérite, après un rappel de la phénoménologie, d'établir des consignes de tri avec des fiches prélèvements : le tri rapide s'exerçant sur les signes cliniques et sur l'activation du ^{24}Na . Une formule opérationnelle est indiquée :

$$D (\text{Sv}) = K \cdot A_0 \cdot \text{EBR}$$

EBR : Efficacité Biologique Relative

$D (\text{Sv})$: Dose équivalente puisque l'on multiplie par l'EBR

K = (Kerma moyen des neutrons estimé empiriquement) $10^{-6} \text{ Gy} \cdot \text{Bq}^{-1}$ de ^{24}Na

A_0 = Activité en ^{24}Na en Bq à $t = 0$ (moment de l'accident de criticité)

En admettant égal à 1 l'EBR de ces neutrons dans la gamme de dose neutron comprise entre 2 et 4 Gy et une composante gamma égale à deux fois celle des neutrons, il vient :

$$D (\text{Sv}) = 3 \times 10^{-6} \cdot A_0.$$

Il manque toutefois dans ces consignes le groupe HLA et des indications sur les renforts, les délais d'obtention de la dosimétrie physique, les services hospitaliers et spécialisés et des éléments de communication et d'information pour les différents acteurs.

29 septembre 1987 Édition de la circulaire DGS 3A3E/1102 Organisation des soins médicaux le premier jour en cas d'accident radiologique ou nucléaire (*abrogée en 2002*).

6 décembre 1988

Ces documents très complets avec les bilans et traitement à mettre en œuvre s'adressent aux services d'urgence et hospitaliers.

Ils apportent une fiche individuelle d'irradiation et des indications sur la surveillance par les médecins traitants ou les hospitalisations en fonction des niveaux d'irradiation. Un détail : le prélèvement des phanères (activation du ^{32}S en ^{32}P , utile selon l'énergie des neutrons et surtout l'orientation du sujet) n'est pas mentionné.

24 octobre 1991 – À la suite d'une demande du GT Criticité des SPR, le groupe des SMT/LABM est réactivé par le Conseiller Médical. Le thème en est le tri médical et la connaissance des besoins opérationnels en dosimétrie pour prévoir la stratégie d'exploitation. Cette stratégie est développée ainsi que les moyens de dosimétrie physique et ses délais.

Le niveau de dose retenu pour la dosimétrie à exploiter en urgence était de 2 à 4 Gy.

Un certain nombre de propositions sur des travaux à mener est adressé au directeur central de la sécurité avec les conclusions du GT Criticité.

- 17 janvier 1994** – La Note d’Instruction Générale 363 remplace la Note YS 446 du 3 août 1979.
Mesures à prendre par les services médicaux dans les cas d’exposition externe ou interne importante aux rayonnements ionisants.
- mars 1994** – Édition du compte rendu de l’exercice de dosimétrie criticité des SPR.
- 24 octobre 1995** – Lettre de mission du Conseiller Médical pour réactiver le GT Criticité des SMT/LABM.
- décembre 1998** – Dernière mise à jour par le GT n° 3 des SMT/LABM de la liste des hôpitaux parisiens susceptibles d’accueillir des accidents radiologiques.
- mars 2001** – Réactualisation du rapport suite au retour d’expérience de l’accident de Tokai Mura.

Accidents de criticité

Les tableaux XI et XII suivants recensent les accidents enregistrés par l’AIEA (Agence internationale pour l’énergie atomique), Vienne, Autriche.

Tableau XI. Accidents de criticité survenus sur les réacteurs de recherche et dans les laboratoires sur des assemblages critiques.

Date et lieu	Personnes irradiée	Nombre de fissions	Circonstances, déroulement et causes
11/02/45 Los Alamos	pas d’irradié	6×10^{15} fissions	Réacteur DRAGON (UH3 dans du styrex) ; réacteur fonctionnant en mode prompt-critique ; erreur de calcul.
06/06/45 Los Alamos	pas d’irradié	4×10^{16} fissions	Uranium enrichi à 79,2 % ; entrée d’eau.
21/08/45 Los Alamos	1 mort	10^{16} fissions	Plutonium pur, mise en place d’un réflecteur à la main.
21/05/46 Los Alamos	1 mort	3×10^{15} fissions	Plutonium pur, mise en place d’un réflecteur à la main.
12/49 Los Alamos	pas d’irradié	3×10^{16} fissions	Accident dans une solution de nitrate d’uranyle, retrait de 2 barres de contrôle.
1950 Chalk River (Canada)	pas d’irradié		Uranium naturel dans de l’eau lourde ; excès de modérateur.
16/11/51 Hanford	pas d’irradié	8×10^{16} fissions	Accident dans une solution de nitrate de plutonium, retrait trop rapide des barres de contrôle.
01/03/51 Los Alamos	pas d’irradié	10^{17} fissions	Uranium enrichi à 93 % ; mauvaise conception du système d’arrêt d’urgence.
18/04/52 Los Alamos	pas d’irradié	$1,5 \times 10^{16}$ fissions	Uranium enrichi à 93 % ; erreur de calcul.

Tableau XI. Suite.

Date et lieu	Personnes irradiées	Nombre de fissions	Circonstances, déroulement et causes
02/06/52 Argonne national lab.	pas d'irradié	$1,22 \times 10^{17}$ fissions	Éléments combustibles d'oxyde d'uranium enrichi à 93 % dans de la matière plastique ; instrumentation retirée et défaillance du système de vidange de l'eau.
12/12/52 Chalk River (Canada)	pas d'irradié	$1,2 \times 10^{20}$ fissions	Uranium naturel dans de l'eau lourde ; coefficient de vide positif.
09/04/53 VNIIEF	2 irradiés faiblement (~ 1 rem)	10^{16} fissions	Erreur d'un opérateur travaillant seul sur un assemblage critique (deux demi-sphères de plutonium de 10 cm de diamètre) ; fusion d'une partie.
1954 URSS		10^{16} fissions	Détails non connus
26/05/54 Oak Ridge	pas d'irradié	10^{17} fissions	Accident dans une solution de fluorure d'uranyle dans deux récipients cylindriques coaxiaux ; déplacement du cylindre interne dans le cylindre externe annulaire.
03/02/54 Los Alamos	pas d'irradié	$5,6 \times 10^{16}$ fissions	Uranium enrichi à 93 % ; erreur de manipulation
22/07/54 Idaho reactor testing area	pas d'irradié	$4,68 \times 10^{18}$ fissions	Uranium enrichi à 93 % dans de l'eau lourde ; erreur d'opérateur entraînant un transitoire trop rapide.
29/11/55 Argonne national lab.	pas d'irradié	4×10^{17} fissions	Réacteur FBR1 à neutrons rapides (éléments combustibles d'uranium enrichi, 52 kg, dans du Na K), retard de l'arrêt d'urgence dans un transitoire expérimental destiné à étudier le coefficient de puissance, fusion de la moitié du cœur.
01/02/56 Oak Ridge	pas d'irradié	$1,6 \times 10^{17}$ fissions	Accident dans une solution de fluorure d'uranyle dû à un changement de géométrie d'une barre d'arrêt d'urgence.
03/07/56 Los Alamos	pas d'irradié	$3,2 \times 10^{16}$ fissions	Réacteur à « puissance nulle » en nid d'abeille, éléments combustibles d'uranium enrichi à 93% dans du graphite ; approche critique trop rapide entraînant la prompt-criticité.
12/02/57 Los Alamos	pas d'irradié	$1,2 \times 10^{17}$ fissions	Uranium enrichi à 93 % ; déplacement d'équipement.
15/10/58 Vinca (Yougoslavie)	1 mort	$2,6 \times 10^{18}$ fissions	Uranium naturel dans de l'eau lourde ; mesure de la puissance défectueuse.

Tableau XI. Suite.

Date et lieu	Personnes irradiée	Nombre de fissions	Circonstances, déroulement et causes
18/11/58 Idaho reactor testing area	pas d'irradié	$2,5 \times 10^{19}$ fissions	Réacteur prototype de propulsion aérienne ; défaillance de l'instrumentation entraînant un défaut d'asservissement.
15/03/60 Saclay	pas d'irradié	3×10^{18} fissions	Retrait d'une barre absorbante dans une maquette critique (Alize) sous eau de barreaux d'oxyde d'uranium enrichi à 1,5 %.
17/06/60 Los Alamos	pas d'irradié	6×10^{16} fissions	Uranium enrichi à 93% ; addition de trop de matière.
03/01/61 Idaho reactor testing area	3 morts	$4,4 \times 10^{18}$ fissions	Éléments combustibles d'uranium enrichi à 93 % dans de l'eau ; retrait d'une barre de contrôle.
10/11/61 Oak Ridge	pas d'irradié	10^{16} fissions	Uranium enrichi à 93 % ; addition de trop de matière.
05/11/62 Idaho reactor testing area	pas d'irradié	10^{18} fissions	Éléments combustibles d'uranium enrichi à 93 % dans de l'eau ; transitoire trop rapide.
11/12/62 Los Alamos	pas d'irradié	3×10^{16} fissions	Assemblage critique d'uranium enrichi à 93 % dans du graphite ; erreur dans l'approche critique.
26/03/63 VNIIEF	6 irradiés	5×10^{15} fissions 370 à 500 rems (3,7 à 5 Sv)	Violation des consignes dans une expérimentation sur un assemblage critique (deux demi-sphères de plutonium de 135 mm de diamètre) ; pas de conséquence sur l'assemblage.
06/03/63 Livermore Laboratory	pas d'irradié	10^{18} fissions	Uranium enrichi à 93 % ; la partie supérieure de l'assemblage a chuté.
08/10/65 White Sands	pas d'irradié	$1,5 \times 10^{17}$ fissions	Uranium enrichi à 93 % ; erreur de manipulation.
30/12/65 Mol (Belgique)	1 irradié	4×10^{17} fissions	Oxyde d'uranium enrichi à 7 % dans de l'eau lourde et de l'eau ; erreur d'opérateur (oubli de vidanger l'eau avant d'intervenir sur le cœur).
06/09/68 Aberdeen	pas d'irradié	$6,1 \times 10^{17}$ fissions	Uranium enrichi à 93 % ; erreur de manipulation.
30/01/68 Oak Ridge	pas d'irradié	$1,1 \times 10^{16}$ fissions	Accident dans une solution de nitrate d'uranyle, augmentation de la masse de solution par injection de bulles d'air.

Tableau XI. Suite.

Date et lieu	Personnes irradiée	Nombre de fissions	Circonstances, déroulement et causes
14/10/68 Maquette Isis / Saclay	Irradiation faible de l'opérateur		Retrait d'un compteur utilisé pour des mesures de spectre alors que toutes les barres du réacteur n'étaient pas en position basse. Erreur de l'opérateur qui n'a pas cru à la lecture de la position des barres, qui indiquait que certaines barres étaient encore en position haute. La réaction en chaîne a été arrêtée par l'opérateur qui a laissé retomber le dispositif de comptage.
15/02/71 Kurtchatov institute	2 irradiés sévèrement aux pieds	2×10^{19} fissions	Maquette critique d'assemblages combustibles d'uranium enrichi à 20 % dans de l'eau utilisée pour l'approche sous-critique, avec un réflecteur en béryllium et des éléments absorbants ; remplissage de la cuve alors que la source de neutrons n'était pas en place et les barres de contrôle en position basse ; arrêt par évaporation de l'eau après l'arrêt de la pompe de remplissage.
26/05/71 Kurtchatov institute	50 pics successifs de puissance, 2 morts 2 sévèrement irradiés	5×10^{18} fissions 60 Sv et 20 Sv 700 à 800 rems (7 à 8 Sv)	Maquette critique d'aiguilles combustibles d'uranium enrichi à 93 % ; défaillance de la plaque de supportage des aiguilles entraînant leur chute dans la partie inférieure encore remplie d'eau alors que l'expérience était terminée et la cuve en cours de vidange et des techniciens étaient présents dans le local.
23/09/83 Buenos Aires	1 mort	4×10^{17} fissions	Réacteur de recherche à puissance « nulle » ; oubli de vidanger le réacteur avant d'intervenir sur le cœur.
17/06/97 VNIIEF	plusieurs heures 1 mort	2×10^{17} fissions	Mauvais assemblage manuel d'une expérience par un physicien travaillant seul.

Tableau XII. Accidents de criticité survenus sur les installations du cycle du combustible.

Date et lieu	Duree/personnes irradiées	Nombre de fissions expositions corporelles	Circonstances, déroulement et causes
16/06/58 Oak Ridge	20 minutes 8 irradiés	1,3 × 10 ¹⁸ fissions 20 à 400 rads (0,2 à 4 Gy)	Remplissage accidentel d'un fût de 200 l par du nitrate d'uranyle très enrichi ; arrêt par dilution.
30/12/58 Los Alamos	1 pic 1 mort	1,5 × 10 ¹⁷ fissions 12 000 rads (120 Gy)	Solvant contenant 3,27 kg de plutonium sur phase aqueuse ; réaction lors de la mise en route de l'agitateur ; arrêt par stoppage de l'agitateur.
16/10/59 Idaho	20 minutes sans conséquence	4 × 10 ¹⁹ fissions	30 kg d' ²³⁵ U dans une cuve de 19 m ³ ; arrêt par évaporation de l'eau et cristallisation du nitrate d'uranyle.
25/01/61 Idaho	1 pic sans conséquence	6 × 10 ¹⁷ fissions	40 l de nitrate d'uranyle très enrichi ; cause : injection d'air comprimé.
07/04/62 Handford	37 heures 3 irradiés	8 × 10 ¹⁷ fissions fortement irradiés sans lésions cliniques apparentes	45 l de solution ; arrêt par évaporation.
24/07/64 Wood River Junction	1 pic 1 pic 1 mort + 2 irradiés	1 × 10 ¹⁷ fissions 2 × 10 ¹⁶ fissions 10 000 rads (100 Gy) irradiés sans lésions cliniques apparentes	Arrêt par éjection de la solution. Arrêt, puis remise en solution de la solution.
24/08/ /70 Windscale	5 à 10 secondes		Introduction d'eau dans un bac de solvant chargé de plutonium (55g/l).
17/10/78 Idaho	25 minutes		Accumulation d'uranium très enrichi dans une colonne de lavage en raison de la dérive de la qualité de la solution.
15/03/53 Mayak	1 pic 2 irradiés	2,5 × 10 ¹⁷ fissions 1 000 et 100 rads (10 Gy et 1 Gy)	31 l ; lors d'une configuration intermédiaire ; arrêt par éjection de la solution.
21/04/57 Mayak	10 minutes 1 mort + 5 irradiés	2 × 10 ¹⁷ fissions lésions cliniques	100 l ; arrêt par vidange ; la cause est l'accumulation de matière fissile par défaut de nettoyage.
02/01/58 Mayak	1 pic 3 morts + 1 irradié	2,3 × 10 ¹⁷ fissions lésions cliniques	Lors de la vidange manuelle d'un conteneur, ayant modifié la géométrie et augmenté les réflexions par les opérateurs.
05/12/60 Mayak	2 pics plusieurs irradiés	10 ¹⁷ fissions 5 rads	40 l ; arrêt par éjection de la solution ; mauvaise appréciation de la masse de plutonium.

Tableau XII. Suite.

Date et lieu	Duree/personnes irradiées	Nombre de fissions expositions corporelles	Circonstances, déroulement et causes
14/08/61 Siberian chemical combine	2 pics 1 irradié	5×10^{15} fissions 10^{16} fissions 200 rads (2 Gy)	60 l ; arrêt par éjection de la solution ; accumulation de plutonium enrichi à 22,6 % dans le réservoir d'huile d'une pompe.
07/09/62 Mayak	sans conséquence	2×10^{17} fissions	100 l ; arrêt par éjection de la solution.
30/01/63 Siberian chemical combine	10 heures 4 irradiés	8×10^{17} fissions 6 à 17 rads (0,06 à 0,17 Gy)	Arrêt par transfert de la solution dans un récipient de géométrie sûre.
13/12/63 Siberian chemical combine	18 heures sans conséquence	2×10^{17} fissions	100 l ; arrêt par injection de cadmium.
13/11/65 Electrosta fuel fabrication plant	1 pic 1 irradié	10^{15} fissions 3,5 rads (0,035 Gy)	Poudre d'UO ₂ enrichi à 6,5% accumulé dans un carter de pompe suite à un percement de filtre; arrêt par dispersion de l'oxyde.
16/12/65 Mayak	7 heures avec 11 pics	7×10^{17} fissions 0,03 rad (3×10^{-4} Gy)	Masse trop importante d'uranium très enrichi introduite dans un dissolvant ; arrêt par injection de cadmium.
10/12/68 Mayak	2 pics 1 mort + 1 pers. amputée	10^{16} fissions puis 5×10^{16} fissions	3 vidanges manuelles successives d'une bouteille de 20 l dans une capacité de 60 l, malgré l'alarme sur le premier pic lors de la seconde vidange.
13/12/78 Siberian chemical combine	1 pic 1 irradié + 7 irradiés	3×10^{15} fissions 250 rads (2,5 Gy) 5 à 60 rads (0,05 à 0,6 Gy)	Introduction d'un nombre trop élevé de lingots de plutonium dans un conteneur. Éjection du quatrième lingot lors de son introduction. Extraction manuelle du troisième par l'opérateur.
15/05/97 Novosibirsk chemical plant	26 heures	10^{16} fissions	Solution d'uranium très enrichi (90%) dans un réservoir de 600 l (10 cm de large) ; arrêt par introduction d'une solution de bore, puis de chlorure de lithium ; causes actuellement évoquées : accumulation d'uranium sur les parois et le fond du réservoir, bouchage d'un orifice de vidange.

Tableau XII. Suite.

Date et lieu	Duree/personnes irradiées	Nombre de fissions expositions corporelles	Circonstances, déroulement et causes
30/9/99 Tokai-mura	17 heures 3 agents irradiés dont 2 décédés	$\approx 2,5 \times 10^{18}$ fissions	Solution de nitrate d'uranium enrichi à 18,8 %, application d'une procédure non autorisée ayant à remplir une cuve de plus de 16 kg d'uranium, alors que la limite autorisée était de 2,4 kg ; arrêt de la réaction par vidange de l'eau de refroidissement et empoisonnement neutronique par du bore.

Bibliographie succincte de l'accident de Tokai-Mura

Cette bibliographie concernant l'accident de criticité de Tokai Mura présente un double intérêt : sa documentation sur les victimes ainsi que la prise en charge secondaire de l'ensemble des personnes impliquées faiblement irradiées.

- A.E.N. *Bulletin de droit nucléaire* (2000) L'accident de Tokai-Mura au Japon. Aspects de responsabilité civile nucléaire et de réparation, n° 66.
- Akashi M. (2000) Initial symptoms of three victims in the Tokai-mura criticality accident, *The Medical Basis for Radiation-Accident preparedness*, Ricks R.C., Berger M.E., O'Hara F.M.Jr Eds, Washington DC, The Parthenon Publishing Group, pp. 303-311.
- Akashi M. (2001) Exposure to neutron irradiation in the criticality accident in Tokai-mura Chiba (Japan), *Japanese Journal of Cancer Clinics* 47 (1), 55-58.
- Akashi M., Hirama T., Tanosaki S., Kuroiwa N., Nakagawa K., Tsuji H., Kato H., Yamada S., Kamata T., Kinugasa T., Ariga H., Maekawa K., Suzuki G., Tsujii H. (2001) Initial symptoms of acute radiation syndrome in the JCO criticality accident in Tokai-mura, *J. Radiat. Res.* 42, Suppl. S157-166.
- Andurand R. (2000) Un risque peu connu : la « criticité », Première partie, *Préventive – Sécurité*, 50.
- Andurand R. (2000) Un risque peu connu : la « criticité », les Paramètres Déterminants, Deuxième partie, *Préventive – Sécurité*, 51.
- Andurand R. (2000) Un risque peu connu : la « criticité », Les conséquences biologiques, Troisième partie, *Préventive – Sécurité*, 52.
- Andurand R. (2000) Un risque peu connu : la « criticité », Le réacteur fossile d'Oklo, Quatrième partie, *Préventive – Sécurité*, 53.
- Barbry F. (2001) Ensemble de détection d'accident de criticité (EDAC), Méthodologie pour sa mise en œuvre et dispositions associées en matière d'intervention, Note technique DPEA/SRSC 01-02.
- Barbry F., Fouillaud P. (2001) Criticality accident studies and research performed in the Valduc Criticality Laboratory France, Rapport SRSC n° 01 233, Document

- présenté à l'International Conference On Topical Issues in Nuclear Safety, AIEA, 3-6 septembre 2001, Vienne.
- Blakely W.F. (2002) Multiple parameter biodosimetry of exposed workers from the JCO criticality accident in Tokai-mura, *J. Radiol. Prot.* **22** (1), 5-6. Review. No abstract available.
- Chiba S., Saito A., Ogawa S., Takeuchi K., Kumano K., Seo S., Suzuki T., Tanaka Y., Saito T., Izutsu K., Yuji K., Masuda S., Futami S., Nishida M., Suzuki G., Gale R.P., Fukayama M., Maekawa K., Hirai H. (2002) Transplantation for accidental acute high-dose total body neutron- and gamma-radiation exposure, *Bone Marrow Transplant* **29** (11), 935-939. Review.
- Clefs CEA (2001) La sûreté des installations vis à vis du risque de criticité, n° **45**, 54-90.
- Cross W.G. (1981) Neutron Activation of Sodium in Phantoms and the Human Body, *Health Physics* **41**, 105-121.
- Endo A. Yamaguchi Y. [Japan Atomic Energy Research Inst., Tokai, Ibaraki (Japan). Tokai Research Establishment], Ishigure N. [National Inst. of Radiological Sciences, Division of Radiotoxicology and Protection, Chiba (Japan)] (2001) Analysis of dose distributions for the heavily exposed patients in the criticality accident at Tokai-mura. Joint research program between JAERI and NIRS, Japan Atomic Energy Research Inst., Tokyo (Japan). Report Number : JAERI-Research 2001-035.
- Endo A., Yamaguchi Y. (2003) Analysis of dose distribution for heavily exposed workers in the first criticality accident in Japan, *Radiat Res.* **159** (4), 535-542.
- Endo A., Yamaguchi Y., Sakamoto Y., Yoshizawa M., Tsuda S. (2001) External doses in the environment from the Tokai-mura criticality accident, *Radiat. Prot. Dosimetry* **93** (3), 207-214.
- Fujimoto K. Ed. (2002) Final report on the dose estimation for three victims of the JCO accident, National Institute of Radiological Sciences, Chiba, Japan, NIRS-R-47.
- Goans R.E., Holloway E.C., Berger M.E., Ricks R.C. (2001) Early dose assessment in criticality accidents, *Health Phys.* **81** (4), 446-449.
- Hayata I., Kanda R., Minamihisamatsu M., Furukawa M., Sasaki S. (2001) Cytogenetical dose estimation for 3 severely exposed patients in the JCO criticality accident in Tokai-mura, *J. Radiat. Res.* **42**, Suppl. S149-155.
- Hirama T., Tanosaki S., Kandatsu S., Kuroiwa N., Kamada T., Tsuji H., Yamada S., Katoh H., Yamamoto N., Tsujii H., Suzuki G., Akashi M. (2003) Initial medical management of patients severely irradiated in the Tokai-mura criticality accident, *Br. J. Radiol.* **76** (904), 246-253.
- Hult M., Martinez Canet M.J., Johnston P.N., Komura K. (2002) Thermal neutron fluence from ultra low-level gamma-ray spectrometry of spoons activated during the JCO criticality accident at Tokai-Mura in 1999, *J. Environ. Radioact.* **60** (3), 307-318.
- IAEA (1982) Dosimetry for Criticality Accidents, A Manual, Technical Reports Series n° 211, Vienna.
- IAEA (1999) Report on the preliminary fact finding mission following the accident at the nuclear fuel processing facility in Tokaimura, Japan, 35 pages, Vienna.
- Imanaka T. (2001) Transport calculation of neutrons leaked to the surroundings of the facilities by the JCO criticality accident in Tokai-mura, *J. Radiat. Res.* **42**, Suppl. S31-44.

- Inaba J. (1999) Criticality Accident at Tokai-Mura, Institute for Environmental Sciences, Rokkasho-Mura, Japan, *Radiological Protection Bulletin*, **217**.
- Inaba J. (2000) Radiological and environmental aspects of the criticality accident in Tokai-Mura, *Radiation Protection Dosimetry* **92** (1-3), pp. 239-246.
- Ishigure N. [National Inst. of Radiological Sciences, Chiba (Japan)] ; Endo A., Yamaguchi Y., Kawachi K. (2001), Calculation of the absorbed dose for the overexposed patients at the JCO criticality accident in Tokai-mura, *Journal of Radiation Research* **42**, Issue: suppl. PBD.
- Ishigure N., Endo A., Yamaguchi Y., Kawachi K. (2001) Calculation of the absorbed dose for the overexposed patients at the JCO criticality accident in Tokai-mura. *J. Radiat. Res.* **42**, Suppl. S137-148.
- Ishii T., Futami S., Nishida M., Suzuki T., Sakamoto T., Suzuki N., Maekawa K. (2001) Brief note and evaluation of acute-radiation syndrome and treatment of a Tokai-mura criticality accident patient, *J. Radiat. Res.* **42**, Suppl. S167-182.
- Journal of Environmental Radioactivity* (2000) The Tokai-Mura Accident, Special Issue, vol. **50** (1-2), 174 p.
- Kanda R., Hayata I. Lloyd (1998) Easy biodosimetry for high-dose radiation exposure using drug-induced, prematurely condensed chromosomes, *Int. J. Radiat. Biol.* **74**, 457-462.
- Kanda R., Minamihisamatsu M., Hayata I. (2002) Dynamic analysis of chromosome aberrations in three victims of the Tokai-mura criticality accident, *Int. J. Radiat. Biol.* **78** (9), 857-862.
- Kojima S., Imanaka T., Takada J., Mitsugashira T., Nakanishi T., Seki R., Kondo M., Sasaki K.I., Saito T., Yamaguchi Y., Furukawa M. (2001) Determination of radionuclides induced by fast neutrons from the JCO criticality accident in Tokai-mura, Japan for estimating neutron doses, *J. Radiat. Res.* **42**, Suppl. S45-53.
- Komura K. (2001) Radiochemical approach to the JCO criticality accident in Tokai-mura, 1999, an overview of the radiochemistry group, *J. Radiat. Res.* **42**, Suppl. S17-29.
- Kugeler K., Brockmann H., Phlippen P.W., Scherer W., Singh J. (1999) Analysis of the Tokai-mura criticality accident, Informationen und Analysen zum Kritikalitaetsunfall in Tokai-mura, Institut fuer Sicherheitsforschung und Reaktortechnik, ATW, *Internationale Zeitschrift fuer Kernenergie (AIZKFE)* **44** (11), 630-634
- Mechitoua B. (2001) Tokai-Mura Criticality Accident : Point Model Stochastic Neutronic Interpretation, Commissariat à l'énergie atomique, Bruyères-Le-Chatel (FR), Conference : 2001, United States, 2001, Annual Meeting, Milwaukee, WI (US), 06/17/2001-06/21/2001 ; *Transactions of the American Nuclear Society* **84**, PBD : 17 Jun 2001, Published : June 17, 2001.
- Mijuin D. (2001) L'accident de criticité de Tokai Mura, *Clefs CEA* **45**, 76-79.
- Miyamoto K. *et al.* (2002) Reconstruction of two victims' posturing based on the induced radioactivities in their bones in the criticality accident in Tokai-Mura, Japan, *Health Physics* **83** (1), 19-25.
- Miyamoto K., Takeda H., Nishimura Y., Yukawa M., Watanabe Y., Ishigure N., Kouno F., Kuroda N., Akashi M. (2003) Validation and verification of the ICRP biokinetic model of ³²P : the criticality accident at Tokai-Mura, Japan, *Radiat. Prot. Dosimetry* **105** (1-4), 199-208.

- Momose T., Tsujimura N., Tasaki T., Kanai K., Kurihara O., Hayashi N., Shinohara K. (2001) Dose evaluation based on ^{24}Na activity in the human body at the JCO criticality accident in Tokai-Mura, *J. Radiat. Res.* **42**, Suppl. S95-105.
- Muramatsu Y., Noda Y., Yonehara H., Ishigure N., Yoshida S., Yukawa M., Tagami K., Ban-Nai T., Uchida S., Hiramata T., Akashi M., Nakamura Y. (2001) Determination of radionuclides produced by neutrons in heavily exposed workers of the JCO criticality accident in Tokai-Mura for estimating an individual's neutron fluence, *J. Radiat. Res.* **42**, Suppl. S117-128.
- Murata K., Akashi S. Eds. (2000) Report of Criticality Accident at the Uranium Processing Facility in Tokai Village. National Institute of Radiological Sciences, NIRS.M.143, Chiba (in Japanese).
- Murata Y., Muroyama T., Kawabata Y., Yamamoto M., Komura K. (2001) Activation of soil and chemical reagents exposed to the neutrons released by the JCO criticality accident in Tokai-Mura, *J. Radiat. Res.* **42**, Suppl. S55-74.
- Murata, Hajime (ed.) The report of the criticality accident in a uranium conversion test plant in Tokai-Mura, [National Inst. of Radiological Sciences, Chiba, Japan. Research Center for Charged Particle Therapy] ; Akashi, Makoto (ed.) [National Inst. of Radiological Sciences, Chiba (Japan). Research Center for Radiation Emergency Medicine].
- Nénot J.C. (2001) Les accidents d'irradiation, 1950-2000, leçons du passé, *Radioprotection* **36** (4), 431-450.
- Nishimura Y., Takeda H., Miyamoto K., Watanabe Y., Kouno F., Kuroda N., Kim H.S., Yukawa M. (2002) Determination of ^{32}P in urine for early estimation of the neutron exposure level for three victims of the JCO criticality accident, *J. Radiol. Prot.* **22** (1), 25-29.
- Nuclear Safety Commission Investigation Committee (1999) Report of the Criticality Accident at Uranium Processing facility, Dec 24, 1999, Nuclear Safety Commission, STA, Japan, Tokyo (in Japanese).
- Rapport de la Science and Technology Agency (STA) à propos de l'incendie et de l'explosion survenus le 11 mars 1997 à Tokai Mura, 27 pages, 16 mai 1997, Site Internet : www.sta.go.jp/nuclear/tokai/cyuh/index.htm
- RGN n° 5 (1999) L'accident de Tokai-Mura : erreur humaine et défaut de procédure, pp. 72-74.
- RGN n° 6 (1999) Après l'accident de Tokai Mura : les suites et les conséquences, pp. 54-56.
- Ronald E. Goans et al. (2001) Early dose assessment in criticality accidents, *Health Physics* **81** (4), 446-449.
- Sasaki M.S., Hayata I., Kamada N., Kodama Y., Kodama S. (2001) Chromosome aberration analysis in persons exposed to low-level radiation from the JCO criticality accident in Tokai-Mura, *J. Radiat. Res.* **42**, Suppl. S107-116.
- Sasaki, Masao S. [Kyoto Univ. (Japan). Radiation Biology Center], Hayata I., Kamada N., Kodama Y., Kodama S. (2001) Chromosome aberration analysis in persons exposed to low-level radiation from the JCO criticality accident in Tokai-Mura, *Journal of Radiation Research* **42**, Issue: suppl. PBD.
- Sasaki Y., Ando K., Komura K., Niwa O., Sasaki M.S., Susuki N. Ed. (2001), The Tokai-Mura criticality accident : biomedical and environmental effects, *J. Radiat. Res.* **42**, Suppl. S1-S186.

- Shiraishi K., Iwasaki M., Miyazawa C., Yonehara H., Matsumoto M. (2002) Dose estimation by ESR on tooth enamel from two workers exposed to radiation due to the JCO accident, *J. Radiat. Res.* **43** (3), 331-335, Tokyo.
- Shiraishi K., Iwasaki M., Miyazawa C., Yonehara H., Matsumoto M. (2002) Dose Estimation by ESR on Tooth enamel from Two Workers Exposed to Radiation due to the JCO accident, *J. Radia. Res.* **43**, 331-335.
- Takada J. (2001) External doses to 350 m zone residents due to anisotropic radiation from the JCO criticality accident in Tokai-Mura, *J. Radiat. Res.* **42**, Suppl. S75-84.
- Takada J., Suga S., Kitagawa K., Ishikawa M., Takeoka S., Hoshi M., Watanabe H., Ito A., Hayakawa N. (2001) Directional distribution of radiation around an accident at a uranium fuel factory in Tokai-Mura, 1999, *J. Radiat. Res.* (Tokyo) **42** (1), 47-55.
- Takagi J. and the Citizens' Nuclear Information Center (2000) Criticality Accident at Tokai-Mura, 80 pages, Translated by Hoerner G., Fukami A. Miwa T.
- Takeda H., Miyamoto K., Yukawa M., Nishimura Y., Watanabe Y., Kim H.S., Fuma S., Kuroda N., Kouno F., Joshima H., Hirama T., Akashi M. (2001) Bioassay for neutron-dose estimations of three patients in the JCO criticality accident in Tokai-mura by measuring beta-ray emitters, *J. Radiat. Res.* **42**, Suppl. S129-135.
- Tanaka S.I. (2001) Summary of the JCO criticality accident in Tokai-Mura and a dose assessment, *J. Radiat. Res.* **42**, Suppl. S1-9.
- Toohy R.E. (2000) Notes from Chiba, report on the Tokai-Mura, Japan criticality accident, *The Health Physics Society's Newsletter*, **XXVIII**, 21-25.
- Tsunoda Katsuya (2001), Public Response to the Tokai Nuclear Accident, *Risk Analysis* **21** (6), 1039-1046.
- Uchiyama G. Watanabe K. Miyauchi M. [Japan Atomic Energy Research Inst., Tokai, Ibaraki (JP)] *et al.* (2001) Analysis of a uranium solution for evaluating the total number of fissions in the JCO criticality accident in Tokai-Mura, *Journal of Radiation Research* **42**, Issue: suppl. PBD.

Réglementation

Notes DGS 3A/3B 514 du 06.12.88 du Ministère de la Santé.

Circulaire DHOS/HFD/DGSNR 277 du 2 mai 2002 : relative à l'organisation des soins médicaux en cas d'accident nucléaire ou radiologique et annexe : guide national relatif à l'intervention médicale en cas d'événement nucléaire ou radiologique.

Décret n° 2002-254 du 22/02/2002 relatif à l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire.

Décret n° 2002-255 du 22/02/2002 modifiant le décret n° 93-1272 du 01/12/1993 et créant une Direction Générale de la Sûreté Nucléaire et de la Radioprotection.

Décret n° 2003-296 du 31/03/2003 relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants.

Décret n° 2003-295 du 31/03/2003 relatif aux interventions en situation d'urgence radiologique et en cas d'exposition durable et modifiant le code de santé publique.

À propos des auteurs

Rapporteur du Groupe de Travail CRITICITÉ

Dr Alain MIELE

SST – CEA/Cadarache

☎ 04 42 25 71 01 – Fax 04 42 25 32 32

Secrétariat : Mme Françoise POHER

Membres du groupe de travail criticité

Francis Barbry, physicien nucléaire, a plus de trente années d'expérience professionnelle en criticité et plus particulièrement en ce qui concerne les études d'accidents (physique, neutronique, détection, dosimétrie). Il a travaillé au CEA, au Laboratoire de Criticité de Valduc dans le cadre du programme d'études d'accidents de criticité (CRAC). Aujourd'hui, après avoir été chef de projet du réacteur expérimental SILENE en 1974 et responsable du Laboratoire de Criticité de l'IPSN/Valduc durant 12 ans, il est expert Senior en criticité du CEA.

François Briot, pharmacien biologiste au Centre de Valduc depuis 1971, a participé à la fondation de l'association PROCORAD (intercomparaisons en radiotoxicologie) en 1995. Il en a été le Président (2002-2005) et en est aujourd'hui le trésorier. Au sein du groupe « criticité » du LABM de Valduc qui organise depuis l'origine l'intercomparaison concernant le tritium urinaire et la Thymidine tritiée, il a plus particulièrement travaillé aux intercomparaisons ^{24}Na (sang) et ^{32}P (phanères) sur le réacteur Silène (participation aux analyses et soutien logistique du LABM Valduc aux équipes intervenantes).

Cécile Challeton-de Vathaire, docteur en médecine, est chercheur à l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (DRPH/SDI). Ses travaux portent sur l'amélioration des modèles biocinétiques de la contamination interne et sur l'identification des paramètres biologiques à prendre en compte dans les études sur les incertitudes liées au calcul de la dose interne. Elle participe en tant que médecin-conseil à la cellule technique de crise de l'IRSN.

Robert Fottorino, entré au CEA en 1980 en tant que directeur du LABM du CEP/Mururoa, il occupa en 1995 le poste de directeur du LABM du centre CEA (direction des applications militaires, Ile-de-France, Bruyères-le-Châtel) et dirige depuis 1996

le LABM/Cadarache. Il est membre de PROCORAD et organisateur des intercomparaisons ^{24}Na et ^{32}P auprès du réacteur SILENE.

Emmanuelle Gaillard-Lecanu, ingénieur et docteur en physique, est chef de projet radioprotection/dosimétrie au sein de Carmin et expert ISO pour les installations de référence en dosimétrie externe. Elle a créé un réseau d'installations d'irradiation externe pour les biologistes, élaboré des sites Intranet/Internet CARMIN, et participé à l'élaboration d'un dossier web « rayonnements ionisants et santé ». Elle a également contribué à la rédaction du « dictionnaire des sciences et techniques nucléaires » du CEA enseignements dans les domaines de la dosimétrie et de la radioprotection.

Michèle Gonin, médecin biologiste, travaille à EDF depuis 1983. Elle a été responsable du Laboratoire EDF d'analyses de biologie médicale et de radiotoxicologie de 1983 à 1999 et est actuellement coordinateur technique pour les aspects santé en centrale nucléaire et expert technique COFRAC pour le domaine anthropogamma-métrie.

Laurence Lebaron-Jacobs, docteur en médecine, docteur en dosimétrie physique et médecin-chercheur au CEA depuis 1995, elle est depuis 2002 à la direction des sciences du vivant. Ses diverses missions : expert pour l'application de l'article 31 du traité EURATOM (Radioprotection des Travailleurs) et expert pour l'ESA (Agence Spatiale Européenne). Elle enseigne également dans les domaines de la radiobiologie, de la radiopathologie et de la radioprotection. Elle est membre du groupe de travail Criticité depuis 1995 et coordinatrice des intercomparaisons ^{32}P et ^{24}Na auprès du réacteur SILENE (Valduc).

Pierre Laroche, médecin, est spécialiste du service de santé des armées et docteur en sciences de l'université de Paris V. Médecin sous-marinier, il est affecté au service de protection radiologique des armées où il occupe actuellement les fonctions de chef de la division médicale et de chef du département d'expertise médicale des installations radiologiques de la Défense. Chargé d'enseignement auprès de l'Agence internationale de l'énergie atomique, il est expert auprès du Secrétariat général de la Défense Nationale pour ce qui concerne les menaces radiologiques et nucléaires.

Géraldine Lecoix, pharmacien biologiste depuis 1996 sur l'établissement COGEMA Marcoule, au Laboratoire d'Analyses Médicales (LAM) qui a pour mission d'assurer la surveillance des salariés travaillant sur deux sites, Marcoule et Tricastin. Elle a également participé aux groupes de travail « Criticité » et « tritium et carbone-14 ».

Jean Pierre Le Goff, médecin du travail au CEA/DAM/CEP de 1979 à 1981 puis à Valduc et chef du service de santé du CEA/Valduc depuis 1993. Il est membre du groupe « Criticité » depuis 1984.

Guy Lemaire, vétérinaire, radiobiologiste et docteur es sciences, a travaillé au CEA de 1970 à 1993 puis a terminé sa carrière en qualité de Professeur titulaire de la Chaire de Radioprotection au Conservatoire National des Arts et Métiers à Paris. Il a essentiellement étudié les effets biologiques des neutrons rapides sur 2 plans : cellulaire (cellules germinales du rat : EBR, Débit de dose, Restauration après irradiation) et de l'animal entier (porcs, DL/50-30, EBR, hématologie).

Roger Médioni, physicien, expert en dosimétrie et en radioprotection et spécialiste de la dosimétrie de criticité, est ingénieur de recherche à l'IRSN. Il a participé activement à différents groupes de travail au niveau international (EURATOM, EURADOS, AIEA) et national (CMS, GT criticité médecins, GT inter SPR) et a organisé deux intercomparaisons internationales de dosimétrie de criticité sur le réacteur SILENE de Valduc (1993 et 2002).

Alain Miele, médecin du travail au CEA depuis 1979, médecin chef de service à Valduc en 1982 puis à Cadarache depuis 1993. Il a été rapporteur du groupe plutonium en 1984 et 1985 et animateur du groupe accident de criticité depuis 1984. Il est actuellement animateur du groupe des médecins et biologistes CEA : méthodes dosimétriques de références en matière d'évaluation d'exposition interne.

Marie-Hélène Persico, médecin du travail depuis 1982 pour les entreprises extérieures, a rejoint en 1986 le service médical de COGEMA Marcoule. Elle a participé à de nombreuses études sur les tenues d'interventions avec le CRSSA et le groupe ergonomie.

Christine Riase, médecin du travail au CEA depuis 1980, successivement sur les Centres de Fontenay-aux-Roses, Saclay puis Bruyères-le-Châtel, elle s'intéresse plus particulièrement aux risques radiologiques et chimiques. Elle participe régulièrement aux sessions de formation des personnes compétentes en radioprotection pour le milieu médical, aux actions de sensibilisation sur notre centre, et est membre du Groupe « Criticité » depuis 1991. Par ailleurs, elle a travaillé à la mise au point d'un logiciel d'évaluation du niveau d'exposition au risque chimique pour la situation de travail (logiciel EGIRE) qui propose à présent une estimation du risque pour la santé (ERICS - Santé).

Elisabeth Rongier, pharmacien biologiste au CEA depuis 1982, a été directeur adjoint puis directeur du LABM CEA Pierrelatte. Depuis 15 ans, elle est animatrice du GT 10 Toxiques chimiques du CEA et est, depuis 2004, assistante du conseiller médical CEA.

Philippe Voisin, physiologiste et zoologiste de formation Radiobiologiste et radioprotectionniste à l'IPSN puis à l'IRSN depuis sa création, a été chef du Laboratoire de Dosimétrie Biologique (LDB) jusqu'en 2003 puis chef du Service de Radiobiologie et d'Épidémiologie (SRBE) de la Direction de la RadioProtection de l'Homme (DRPH). Il est coordinateur du Groupe de Travail ISO (WG18) sur la dosimétrie biologique.