

**CONDUITE À TENIR FACE AUX VICTIMES
D'UN ACCIDENT DE CRITICITÉ**

par

Alain MIELE

Laurence LEBARON-JACOBS*

CEA CADARACHE

DIRECTION DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

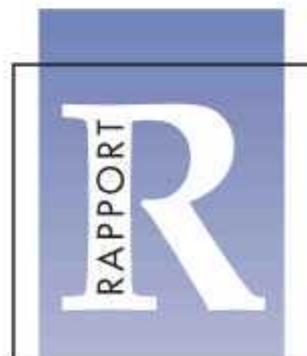
DÉPARTEMENT DE SOUTIEN EN SÛRETÉ ET
SÉCURITÉ

SERVICE DE SANTÉ AU TRAVAIL

DIRECTION DES SCIENCES DU VIVANT*

CELLULE CARMIN*

DIRECTION DES SYSTEMES
D'INFORMATION



**RAPPORT
CEA-R-6080**

2005

RAPPORT CEA-R-6080 – Alain MIELE, Laurence LEBARON-JACOBS

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

Résumé - 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 SST/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.

Les études de ce groupe de travail ont mis en évidence les difficultés de prise en charge de ce type d'accident à la fois dans le domaine de l'évaluation dosimétrique mais également dans le domaine de la thérapeutique à mettre en œuvre. Ces différents thèmes et perspectives d'action ont été développés. Des recommandations sont données sous forme de fiches de conduite à tenir opérationnelle pour les différentes phases de tri des victimes.

Ces fiches seront réactualisées en fonction de l'évolution des connaissances sur les effets à court et à long terme d'une exposition neutronique. La prise en charge médicale nécessite par ailleurs une coordination d'équipes spécialisées et la collaboration d'experts en matière de reconstitution dosimétrique.

2005 – Commissariat à l'Énergie Atomique – France

RAPPORT CEA-R-6080 – Alain MIELE, Laurence LEBARON-JACOBS

«Initial medical management of criticality accident victims»

Abstract -The extremely severe criticality accidents known to this day, and the subsequent deaths recorded (Sarov 1997 and Tokai Mura 1999), demonstrate the need for sustained surveillance and constant adapted training for the teams in charge of irradiated and/or contaminated victims.

The aim of this work group, composed of occupational health services and associated medical biology laboratories, is to present, in leaflet format, the essential data on the documentation and the conduct to be held when facing the victims of a criticality accident.

The studies of this work group confirm the difficulties involved in managing this type of accident, both from the dosimetric evaluation point of view and from the therapeutic management point of view. That is why several research themes and perspectives are developed.

During the different phases of victim triage, the recommendations given on these leaflets describe the operational conducts to be held. This work will have to be updated according to the evolution in knowledge and means : short and long term effects of exposure to neutrons, multi-competence hospital cooperation, expertise networks related to dosimetric reconstitution.

2005 – Commissariat à l'Énergie Atomique – France

- Rapport CEA-R-6080 -

CEA Cadarache
Direction de L'Énergie Nucléaire
Département de Soutien en Sûreté et Sécurité
Service de Santé au Travail
Direction des Sciences du Vivant *
Cellule CARMIN *

CONDUITE À TENIR FACE AUX VICTIMES
D'UN ACCIDENT DE CRITICITÉ

par

Alain MIELE
Laurence LEBARON-JACOBS*

- Mars 2005 -

CONDUITE À TENIR FACE AUX VICTIMES D'UN ACCIDENT DE CRITICITÉ

.....

RAPPORT DU GROUPE DE TRAVAIL CRITICITÉ DES SERVICES DE SANTÉ AU TRAVAIL ET DES LABORATOIRES D'ANALYSES DE BIOLOGIE MÉDICALE (SST/LABM)

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 défailtante donc une probabilité non nulle d'occurrence d'accident.

L'objectif du groupe de travail des SST/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, rassemblées dans un classeur et actualisées périodiquement, 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 contenu du classeur : 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...) implique 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.

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

GROUPE DE TRAVAIL CRITICITE

accident de criticité

SOMMAIRE

URGENCES RADIOLOGIQUES

Medecins a contacter	5
Liste des Hôpitaux parisiens specialises	6

FICHE HISTORIQUE DU GROUPE DE TRAVAIL CRITICITE	7
--	----------

FICHES I - INTRODUCTION A LA CRITICITE

I ₁ Phénoménologie d'un accident de criticité	9
I ₂ Les problèmes du problème	16

FICHES II - RADIOPATHOLOGIE

II ₁ Irradiation lors d'un accident de criticité	18
II ₂ Le syndrome Initial	19
II ₃ Conduite à tenir devant un syndrome Initial	20
II ₄ Prise en charge des victimes	21
II ₅ Evolution clinique	22
II ₆ Conduite à tenir lors de l'hospitalisation	23

FICHES III - FICHES POUR LE DIAGNOSTIC DOSIMETRIQUE

III ₁ Fiches d'aide aux décisions	
III _{1,1} Circuits	25
III _{1,2} Indications des prescriptions et orientation des victimes	26
A - Sensibilité des examens et orientation en fonction de la dose	
B - Examens a prescrire en fonction de la dose	
III _{1,3} Chronologie des résultats des examens	28
III _{1,4} Contribution des examens à la reconstitution de la dose	29
III ₂ Détermination de la dose absorbée lors d'un accident de criticité	30
III ₃ Fiches "Questionnaire"	
III _{3,1} Interrogatoire après l'accident (SPR)	34
III _{3,2} Observations cliniques	41
III ₄ Cytogénétique et PCC	44
III ₅ Indicateurs biologiques des dommages radio-induits	50
III ₆ Dosimétrie physique	
III _{6,1} Caractéristiques principales des dosimètres utilisés	52
III _{6,2} Estimation physique de la dose en cas d'accident de criticité	53

FICHE IV - FICHE DE TRI ET D'EVACUATION	57
--	-----------

FICHES V - FICHES DE PRELEVEMENTS

V ₁ Fiche récapitulative chronologique	61
V ₂ Fiche de prelevements spécialises	63

FICHE VI - FICHE ORGANISATION RENFORT	65
--	-----------

FICHES VII - FICHES COMMUNICATION

VII ₁ Information du personnel	
- accidenté faiblement exposé pris en charge secondairement	67
VII ₂ Information des médecins des Services Hospitaliers d'Accueil et de leurs collaborateurs	71
VII ₃ Information et liaisons avec les médecins généralistes	74
VII ₄ Fiche d'information pour les agents appelés à être suivis par leur médecin traitant	77

- Membres du Groupe de Travail Criticité
- Liste des accidents de criticité recensés
- Bibliographie de l'accident de Tokai Mura
- Liste des textes de référence

URGENCES RADIOLOGIQUES

INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SURETE NUCLEAIRE (IRSN)

BP 17 92262 FONTENAY-AUX-ROSES cedex
☎ 01 58 35 88 88 (standard)

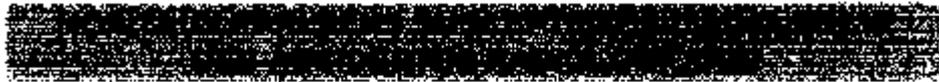
ingénieur d'astreinte de l'IRSN joignable 24h/24 7j/7 : 06 07 31 56 63

Liste de succession des médecins de la Direction de la radioprotection de l'homme (DRPH) à contacter en cas d'accident :

	☎ professionnel	☎ secrétariat	☎ personnel
Dr Patrick GOURMELON 40, avenue de la Division Leclerc 92320 CHATILLON	01 58 35 77 54	01 58 35 85 48	06 07 39 72 75
Dr Bénédicte ALLENET-LEPAGE 27, rue de la Petite Fontaine 91430 VAUHALLAN	01 58 35 91 28	01 58 35 72 60	01 69 33 11 91
Dr Catherine LUCCIONI 61, rue de Javel 75015 PARIS	01 58 35 90 64	01 58 35 85 48	06 88 48 44 45
Dr Cécile CHALLETON-DE VATHAIRE 27, rue Victor Hugo 92130 ISSY-LES-MOULINEAUX	01 58 35 95 45	01 58 35 90 53	01 41 90 96 80

SERVICE DE PROTECTION RADIOLOGIQUE DES ARMEES (SPRA)

1 bis rue du Lieutenant Raoul-Batany 92141 CLAMART
☎ 01 41 46 71 12



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)

HOPITAL SAINT-ANTOINE

184, rue du Faubourg Saint Antoine - 75012 PARIS

☎ standard : 01 49 28 20 00

Chef du Service des maladies du sang et de thérapie cellulaire

☎ 01 49 28 26 19 ou 01 49 28 26 20 (secrétariat)

Fax : 01 49 28 20 00

En dehors des heures ouvrables : ☎ 01 49 28 20 00 (BIP 312)

HOPITAL D'INSTRUCTION DES ARMEES 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

HISTORIQUE DU GT CRITICITE DES SST/LABM

LES GRANDES ETAPES

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 (Sv) : Dose équivalente puisque l'on multiplie par l'EBR

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

$$D (\text{Sv}) = 3 \cdot 10^{-8} \cdot A_0$$

Il manque toutefois dans ces consignes le groupage 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 – Edition 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 – Edition de la circulaire DGS 3A3B relative à la surveillance et au traitement des malades irradiés

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 – A 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 DCS 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 – Edition 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.

INTRODUCTION A LA CRITICITE

PHÉNOMÉNOLOGIE D'UN ACCIDENT DE CRITICITÉ

1. GENERALITES SUR LE RISQUE DE CRITICITE

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 : le risque de criticité. C'est le 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 [réf 1 à 4].

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.

2. LA PHÉNOMÉNOLOGIE 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'antreactivité 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 (figure 1)

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, la combinaison des phénomènes précédents avec les conditions initiales de l'accident peut entraîner trois types de comportement (figure 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 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.

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 β par les anglo-saxons.

3. CLASSIFICATION DES ACCIDENTS DE CRITICITÉ EN "FAMILLES" ET SPÉCIFICITÉS

3.1 CRITÈRES RETENUS POUR LA CLASSIFICATION

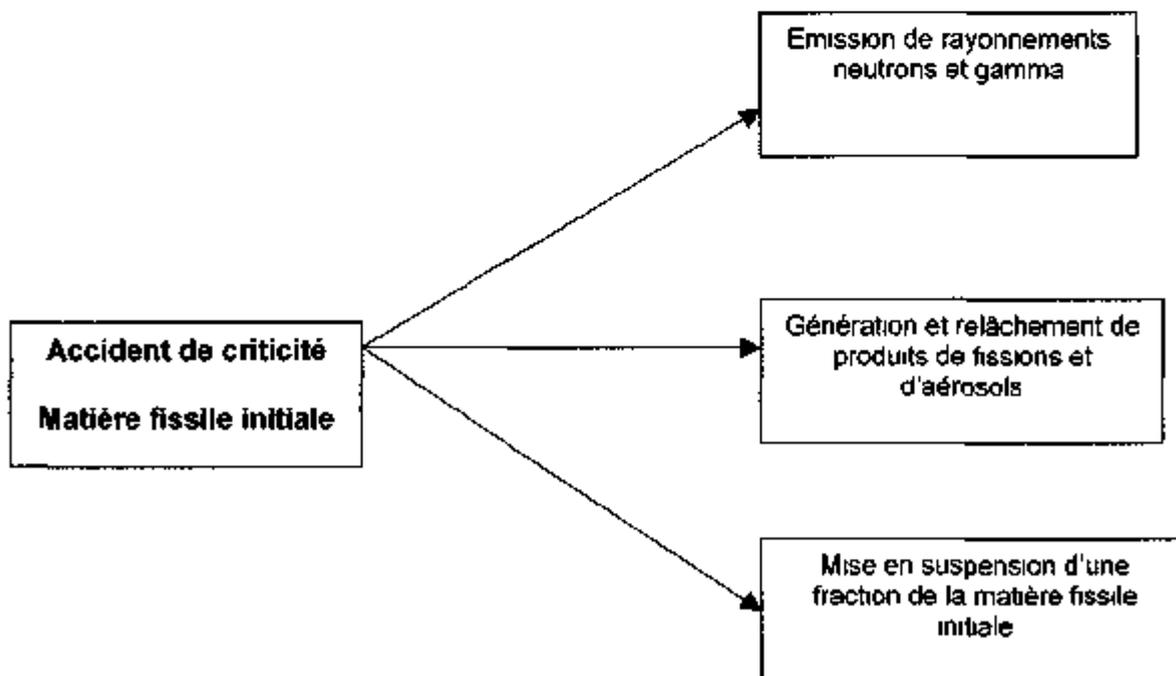
Afin de mieux appréhender les différentes situations accidentelles auxquelles il est possible d'être confronté on a cherché à classer les accidents en grandes "familles" en fonction de leurs caractéristiques et de leur spécificité. Cette démarche n'est pas aisée car les installations nucléaires sont 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 :

- ↳ 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)



A 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)

3.2 PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES DIFFÉRENTES "FAMILLES" D'ACCIDENT

Classe 1 milieux fissiles aqueux

- Nature solutions nitriques, fluorhydrique, 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 quelques 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

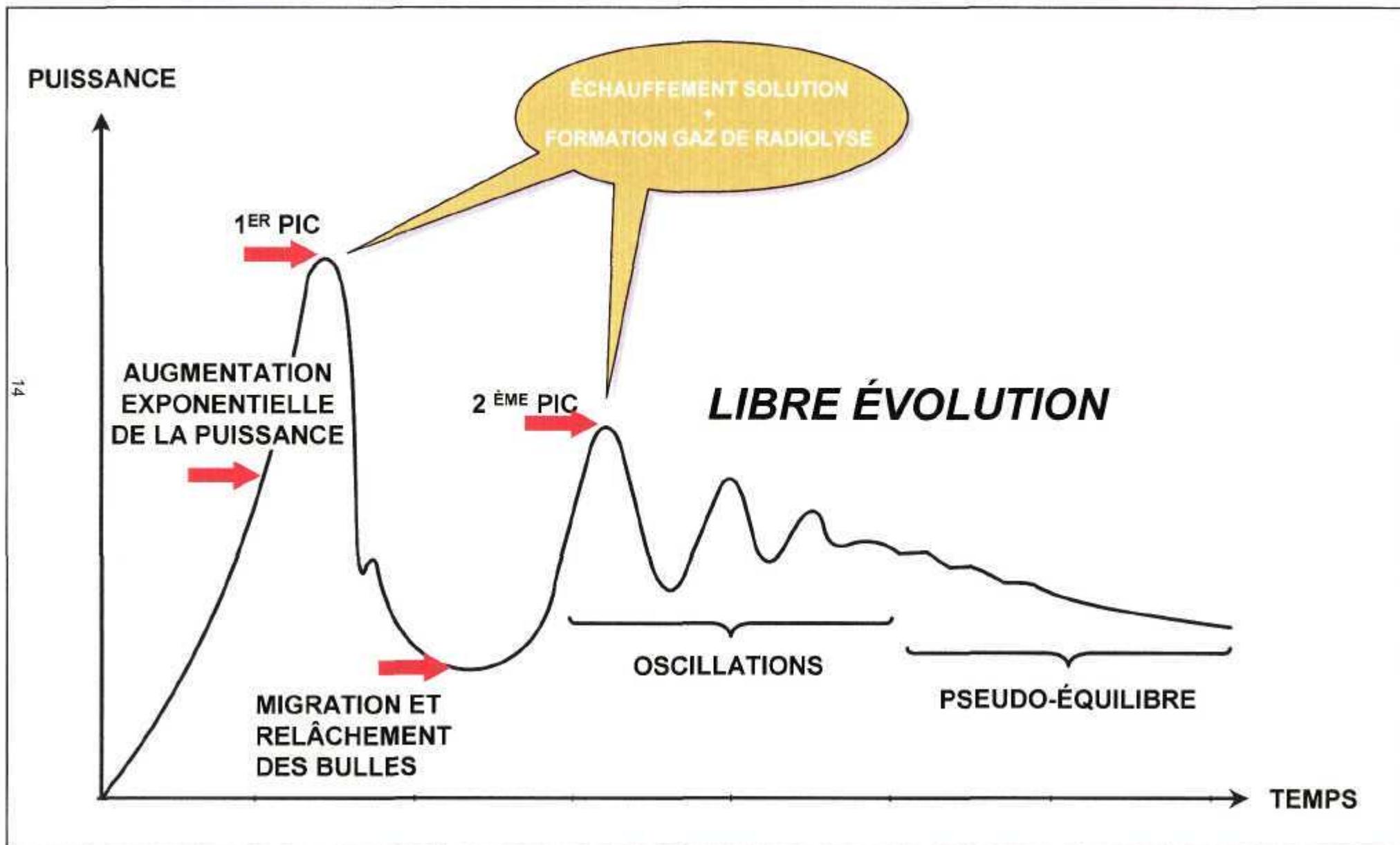
Classe 4 milieux mixtes solide/liquide

- 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

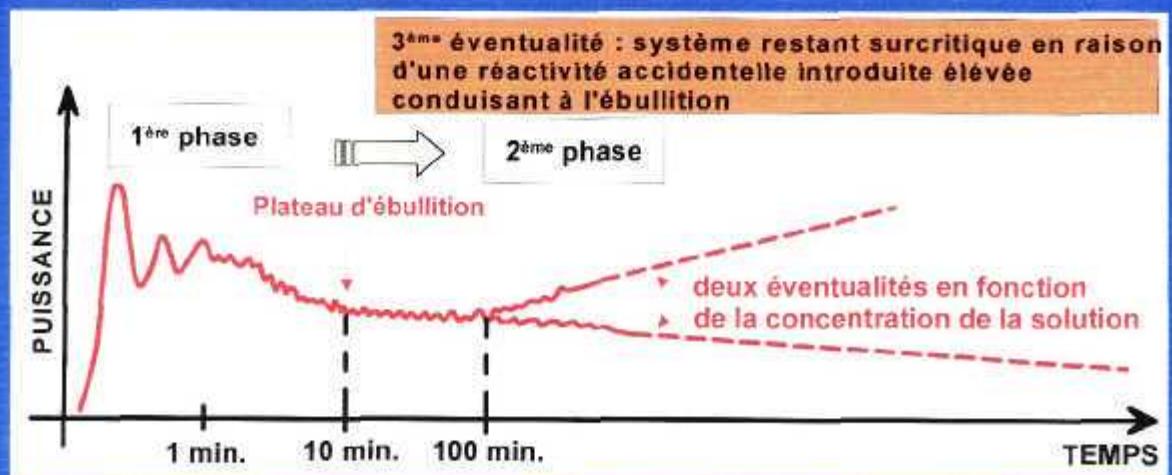
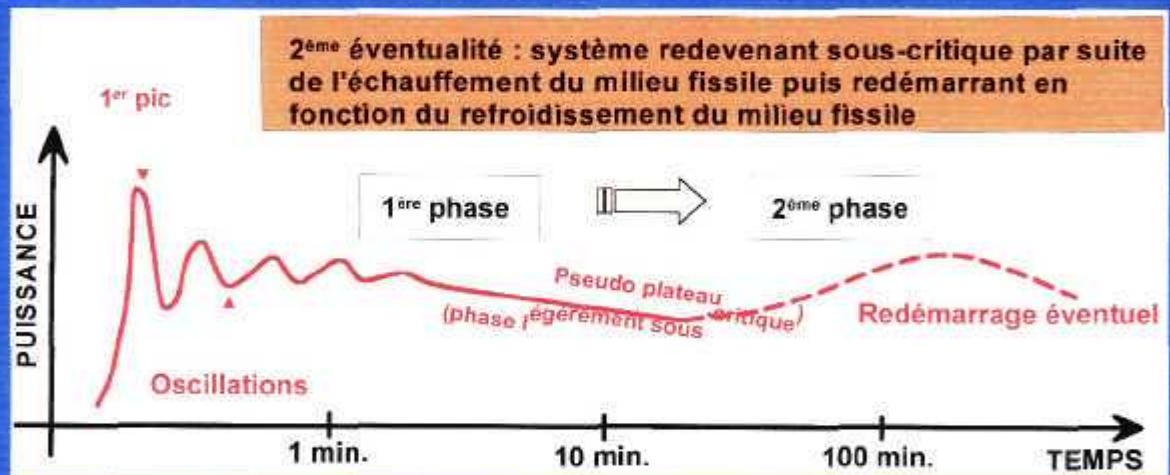
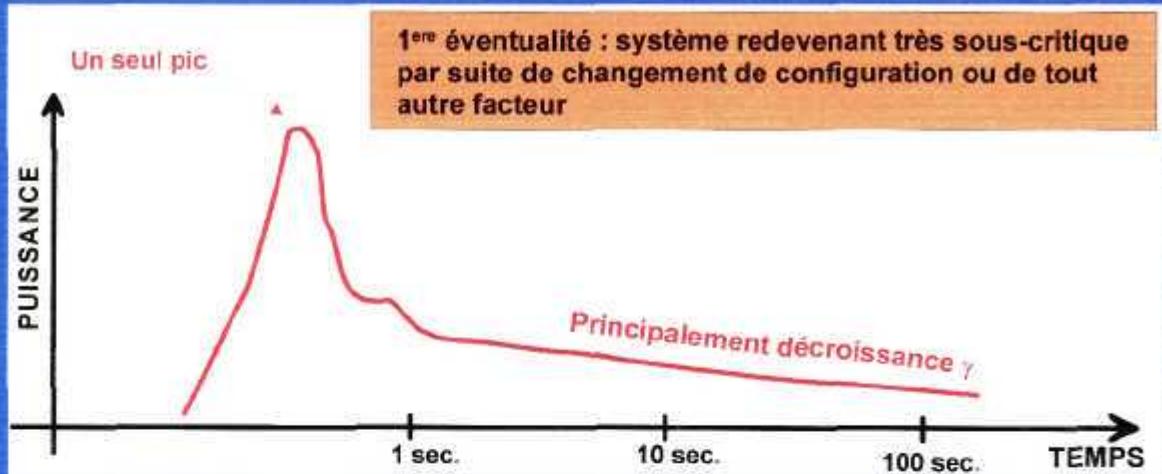
REFERENCES

- Réf 1 - CLEFS CEA – Physique nucléaire et sûreté n° 45 – Automne 2001
- Réf 2 - F BARBRY – Considérations générales sur l'étude de la phénoménologie des accidents de criticité
Note CEA/DAM/DRMN/SRNC 03-02 (juillet 2003)
- Réf 3 - H. CARROS - "Les accidents de criticité dans les usines et les laboratoires", rapport CEA-DSNQ-MSN 2001/007, mars 2001
- Réf 4 - A review of criticality accidents, 2000 révision, Los Alamos National laboratory report LA 13 638 (May 2000).

ACCIDENT DE CRITICITÉ DANS UNE SOLUTION FISSILE



EXCURSIONS DE PUISSANCE TYPE POUR UN ACCIDENT DE CRITICITE EN SOLUTION



ACCIDENT DE CRITICITE LES PROBLEMES DU PROBLEME

1. Leur probabilité d'occurrence n'est pas nulle. L'étude des cas accidentels renseigne sur les conditions de survenue de ces événements : 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 défailante.
2. 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^f/D^r . 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.
3. 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 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 qui 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).
4. Renforts et communication :

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

L'information programmée des différentes cellules de crise par les Services Médicaux du Travail, les Laboratoires d'Analyse de Biologie Médicale et les Services de Protection contre les Rayonnements, 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.

5. 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.

RADIOPATHOLOGIE

Irradiation lors d'un accident de criticité

Irradiation mixte par des neutrons et des rayonnements gamma : l'irradiation est donc hétérogène : les doses reçues par les différents organes dépendent de leur orientation par rapport à la source

◆ GRAVITE : dépend de

↳ la dose reçue :

- à très forte dose : la sidération du SNC 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 +++

◆ EVOLUTION : 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 A TENIR

↳ Evaluer 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 1^o 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, 1^ogestes de décontamination interne et externe.

Les premiers symptômes : le Syndrome initial (24 h)

3 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** (somnolence, asthénie), céphalées
- sécheresse buccale, douleurs parotidiennes
- douleur dans les régions surexposées
- nausées, vomissements isolés

↳ **à l'examen**

- fièvre, tachycardie, modification de la 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.

◆ **DOSIMETRIE** : 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 SCHEMA
- **les premiers gestes** :
 - NE RIEN JETER, TOUT ETIQUETER
 - Recueil des dosimètres disponibles
 - Recueil d'objets pour la dosimétrie
- **l'estimation rapide de la dose (SPR, ingénieur critiqueur)**

◆ **remplir la fiche TRI**

◆ **LES EXAMENS BIOLOGIQUES** : à effectuer toutes les 3 heures

les premiers résultats sont obtenus en ~ 3 heures

voir fiches n° V pour le choix et la chronologie des prélèvements qui sont HORODATES

Conduite à tenir devant un Syndrome initial

◆ Remplir la fiche TRI

◆ Les EXAMENS à pratiquer en urgence

- 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 n° V)
- **prélèvements sanguins REPETES, par ordre décroissant d'importance** (voir fiches n°V)
 - 1 - NFS, réticulocytes, plaquettes
 - 2- cytogénétique
 - 3- HLA I et II, groupe érythrocytaire, sérologie CMV, toxoplasmose
 - 4- TCA, TP, fibrinogène, facteurs II, VII, X
 - 5- Bilan biochimique et enzymologique
- Recueil des excréta et de prélèvements pour la radiotoxicologie (voir fiches n°V)

◆ L'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 1^o heure :
état de choc, troubles neurologiques (convulsions, prostration, désorientation), perte de connaissance, amnésie, fièvre élevée (41°), troubles digestifs (vomissements ++, hémorragie++, diarrhée)
- DIFFEREE 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

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 MEDICALE 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-pharyngée 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 OPH initial (examen en particulier de la face postérieure des cristallins)
 - un EEG si 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).

Evolution 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 alopécie 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 autre, 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.

Conduite à tenir lors de l'hospitalisation : effectuer

- ◆ **Un bilan clinique (symptomatologie, examen clinique) qui note toutes les modifications par rapport au bilan initial**
- ◆ **Un bilan biologique immédiat (noter HEURE) qui comprend** (voir fiches n° V) :
 - 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 n° V)
 - sérologie CMV, toxoplasmose si des transfusions de produits sanguins sont prévues
- ◆ **Un 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° V), **en particulier la surveillance hépatique, rénale et intestinale**
 - prélèvement spécialisé (voir fiche V₂)
 - prévoir si nécessaire un nouvel examen cytogénétique dans les 48h
 - poursuivre les examens radiotoxicologiques en liaison avec le médecin du travail
 - prévoir un bilan OPH (notamment bilan de la face postérieure des cristallins)
- ◆ **Un bilan du fonctionnement de la moelle hématopoïétique dans les différents territoires médullaires** est nécessaire en cas d'hypoplasie pour estimer les capacités de régénération spontanée.
 - 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 V₂
- ◆ **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 DOSIMETRIQUE

CIRCUITS

Au niveau de l'INB ou du site nucléaire

Le 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 d'un 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 phanère selon les niveaux estimés d'exposition,
- ↳ Bilan des situations et orientations sur les structures médicales appropriées,

Avec l'extérieur

Un certain nombre de situations fait 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 : en fonction du niveau de la dose neutron estimé en phase de tri

A - Sensibilité des examens et orientation en fonction de la dose

SEUILS DE SENSIBILITE DES TECHNIQUES	EXAMENS	DELAJ DE REPONSE	ORIENTATION
10^{-3} Gy	Anthropogammamétrie	H+3	
10^{-2} Gy	Mesure d'activation (SPP2, SPP3, DG5)	H+1	
10^{-1} Gy	Lecture des dosimètres DIC + ceintures ⁽¹⁾	H+6	Médecin traitant ⁽²⁾
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>			
1 Gy	Examen clinique	H+3	Hôpital

⁽¹⁾: en fonction du nombre

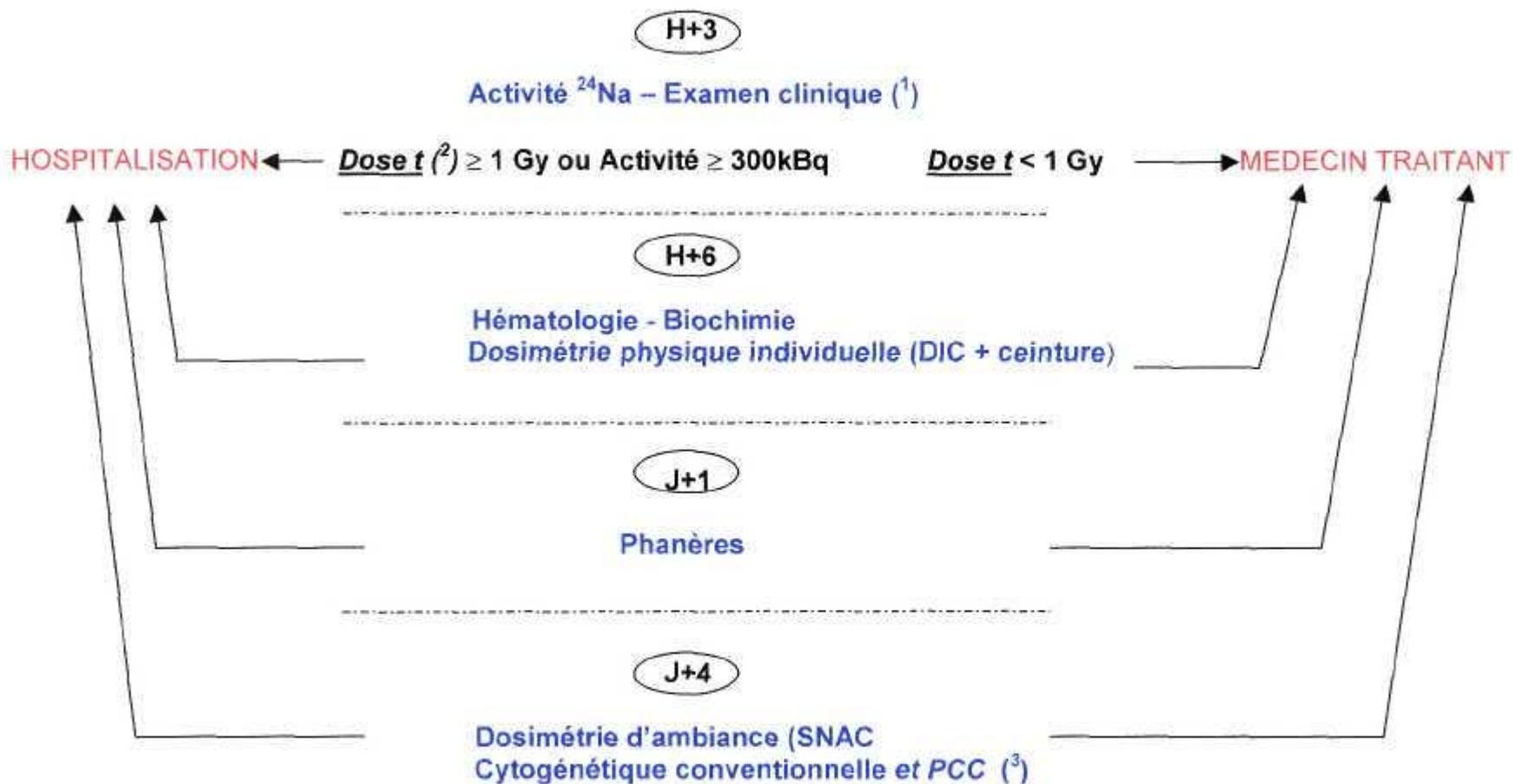
⁽²⁾: sauf urgences médico-chirurgicales ou problèmes cliniques et biologiques

B – Examens à prescrire en fonction de la dose

DOSES	EXAMENS A 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

Chronologie des résultats des examens (à titre indicatif)



- ⁽¹⁾ Cas particulier : urgences médico-chirurgicales
⁽²⁾ Dose Totale : Calcul de la dose totale (Cf annexe II.1)
⁽³⁾ PCC : Chromosomes Prématurément Condensés

SIGNES CLINIQUES ET BIOLOGIQUES	EXAMENS BIOPHYSIQUES	DOSIMETRIE PHYSIQUE	INDICATIONS SUR LA DOSE MESUREE
<p>Clinique (> 1 Gy)</p> <p>Hématologie - Biochimie</p> <p>Cylogénétique</p>	<p>Activité du ^{24}Na</p> <p>Phanères</p> <p>RPE ⁽³⁾</p>	<p>Dosimétrie individuelle</p> <p>Dosimétrie d'ambiance</p> <p>Reconstitution physique de la dose</p>	<p>► Niveau de dose</p> <p>► Dose neutron</p> <p>► Dose globale moyenne ⁽¹⁾</p> <p>► Orientation et distribution de la dose neutron</p> <p>► Dose globale moyenne et index d'hétérogénéité ⁽²⁾</p> <p>► Dose gamma essentiellement</p> <p>► Dose totale (n+γ) et orientation</p> <p>► Dose totale (n+γ)</p> <p>► Distribution de la dose et dose totale (n+γ)</p>

⁽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).

DETERMINATION DE LA DOSE ABSORBÉE LORS D'UN ACCIDENT DE CRITICITÉ

1/ INTRODUCTION

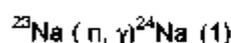
Lors d'un accident de criticité les personnes exposées sont soumises à une fluence mixte neutron gamma. Une trace « pathognomonique » demeure, celle due à l'activation de certains de leurs atomes par les neutrons, phénomène qui n'apparaît pas lors d'une exposition aux seuls rayons gamma à moins que ceux-ci 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

2/ ATOMES ACTIVES PRIS EN COMPTE

L'activation de deux isotopes stables, sodium-23 et soufre-32, 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 ²³Na et ³²S sont

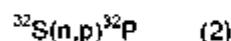


Le ²⁴Na décroît en émettant un β ($E_{\text{max}} = 1,39 \text{ MeV}$, $E_{\text{moy}} = 0,554 \text{ MeV}$) et 2 γ (1,369 et 2,754 MeV).

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

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

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



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

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 ³²S.

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 NIGA en anglo-saxon Neutron Induced Gamma Activity

² Le ³⁷Cl n'est pas retenu car peu abondant, de plus l'élément activé, le ³⁶Cl a une très courte période (37 minutes)

3/ METHODES DE MESURE DE L'ACTIVITE

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.

4/ EVALUATION DE LA DOSE DUE AUX NEUTRONS A PARTIR DU SODIUM-24.

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 Bq aux Gray ou aux Sievert.

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 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 $\delta(k)$, 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 .

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

La formule devient alors dans ce cas particulier .

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

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 $3 \cdot 10^{-6}$ Gy Bq⁻¹ en fonction de la nature du spectre de neutrons.

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

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.

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

Références :

Tabardel R, Ricourt A, Parmentier N. Rapport CEA-R 5276, 1984, Evaluation rapide de la dose due aux neutrons à la suite d'un accident de criticité à partir de l'activité du sodium 24 mesurée

Rapport du GT-criticité 1984. SMT-LABM CEA (document interne)

AIEA, Safety Series n°211, Dosimetry for Criticality Accidents, a Manual

CIPR-89, Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection - reference values

5/ EVALUATION DE LA DOSE DUE AUX NEUTRONS A PARTIR DU PHOSPHORE-32.

A 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, dans l'attente de publication à venir, une estimation du facteur de conversion d'après les expérimentations sur SILENE. Dans ce cas la dose neutronique totale est égale :

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

Références :

Lemaire G, Dhermain J, Remy M L, Masse R, 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, 1992, Vol 27, 17-34

ORNL/TM-12028, Oak Ridge National Laboratory, Determination of Neutron Dose from Criticality Accidents with Bioassays for Sodium-24 in Blood and Phosphorus-32 in Hair, Juin 1993

CIPR 89, Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection - reference values

L. Leberon-Jacobs, A. Miele and R. Follorino, Contribution of Hair Dosimetry following Criticality Accident (Congrès San Diego de l'American Nuclear Society, 5-9th June, publication soumise à Health Physics)

DETERMINATION DE LA DOSE ABSORBEE LORS D'UN ACCIDENT DE CRITICITE 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. A 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 :

$$R_t = 0,487 e^{-0,0815t} + 0,510 e^{-0,0513t} + 0,0027 e^{-0,0015t}, t \text{ étant exprimé en jours}$$

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

$A_{Na} = \lambda C F_s / 60 \times E_r V R_t (e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}) \text{ Bq ml}^{-1}$ où, dans cette formule :
 λ : constante de décroissance radioactive du ^{24}Na ($0,00077 \text{ minute}^{-1}$).
 C : nombre de coups par minute dû au ^{24}Na corrigé du bruit de fond.
 F_s : facteur de correction en cas de non flash
 E_r : 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

A titre d'exemple, lors d'un flash très bref ($F_s = 1$) produit par un spectre de fission pur, pour un volume de 20 millilitres de sang, une efficacité d'un détecteur HPGe égale à $4,92 \cdot 10^{-3}$ 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 $A = \text{Activité du } ^{24}\text{Na} \text{ dans le sang par millilitre} = 3,47 \text{ Bq ml}^{-1}$.

En admettant le facteur Dose/Activité égal à $3,13 \cdot 10^{-1} \text{ Gy Bq}^{-1}\text{ml}$ pour ce spectre (détermination expérimentale à partir d'une source de ^{252}Cf 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 $5,93 \cdot 10^{-3} \text{ Gy Bq}^{-1} \text{ ml}$

En l'absence de renseignements précis concernant la nature du spectre on prendra une valeur de $0,3 \text{ Gy.Bq}^{-1}\text{ml}$ comme valeur de référence et la dose neutron estimée sera alors égale à

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

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 minutes

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.

Référence :

ORNL/TM-12028, Oak Ridge National Laboratory, Determination of Neutron Dose from Criticality Accidents with Bioassays for ^{24}Na in Blood and ^{32}P in Hair. Juin 1993

CIPR 89, Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection - reference values

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 $F_s = \lambda L / (1 - \exp(-\lambda L))$ où L représente la durée de l'exposition en minutes et $\lambda = 0,00077 \text{ min}^{-1}$

SUGGESTION AUPRES DES SPR

FICHE A : "INTERROGATOIRE APRES L'ACCIDENT"

Identification du patient

NOM :

Prénom :

Date de naissance :

Date et heure du début de l'interrogatoire :Circonstances de l'accident**Attention** : si le sujet vomit, le préciser et noter l'heure

N°	Question	Oui	Non	Commentaires
1	Comment avez-vous eu connaissance de l'accident ? ↳ L'avez-vous vu ? ↳ Alarme ? ↳ Bruit d'explosion ? ↳ Alerté par un collègue ? Qui ?			
2	Où étiez-vous au moment de l'accident ?			
3	Etiez-vous dehors ?			
4	Etiez-vous dans un bâtiment ? lequel ?			
5	Etiez-vous dans une pièce ? laquelle ? ↳ Dans un bureau ? un labo ? en étage ? au rez-de-chaussée ?			
6	A quelle distance approximative du lieu de l'accident ?			
7	Schéma précis des lieux où vous vous trouviez au moment de l'accident avec localisation de votre position (marquage au sol) <i>(annexe 1)</i>			
8	Quelle était votre posture ? ↳ Debout ↳ Assis ↳ Couché ↳ Autre			

NOM :

Prénom :

Date de naissance :

N°	Question	Oui	Non	Commentaires
9	<p>Décrivez votre environnement proche :</p> <ul style="list-style-type: none"> ↳ Etiez-vous à proximité d'éléments de béton de forte épaisseur ? ↳ Etaient-ils situés entre vous et le site accidentel ? ↳ Etiez-vous à proximité d'éléments métalliques pouvant faire office d'écran entre vous et le site accidentel ? ↳ Pouvez-vous préciser leur taille approximative ? 			
10	<p>Placez sur un schéma ces différents éléments avec le plus de précision possible et positionnez-vous au sol et dans l'espace</p> <p style="text-align: right;"><i>Annexe N° 1</i></p>			
11	<p>D'autres personnes étaient-elles présentes et proches de vous ?</p> <ul style="list-style-type: none"> ↳ Combien ? ↳ Lesquelles ? (nom) 			
12	<p>Schéma précis du positionnement de ces personnes par rapport à vous</p> <p style="text-align: right;"><i>Annexe N° 1</i></p>			
13	<p>Pouvez-vous estimer leur éloignement par rapport à vous ?</p>			
14	<p>Combien de temps sont-elles restées à vos côtés ? Quelle était leur posture respective ?</p> <ul style="list-style-type: none"> ↳ Debout, assis, couché, autre ? (précisez) 			
15	<p>Décrivez avec précision ce que vous étiez en train de faire au moment de l'accident</p>			
16	<p>Décrivez avec précision ce que, au moment de l'accident :</p> <ul style="list-style-type: none"> ↳ vous avez vu ? ↳ vous avez entendu ? ↳ vous avez senti ? 			
17	<p>Quelle a été la durée respective de chacune de vos actions depuis l'accident ?</p>			

NOM :

Prénom :

Date de naissance :

N°	Question	Oui	Non	Commentaires
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 <i>(voir page 24)</i>			

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 B "OBSERVATIONS CLINIQUES"

Identification du patient

NOM :

Prénom :

Date de naissance :

Date et heure du début de l'examen :

Pouls	
Tension artérielle	
Température	

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			

NOM :

Prénom :

Date de naissance :

N°	Question	Oui	Non	Commentaires
5	<p>Le sujet présente-t-il des vomissements ?</p> <p>Depuis quand ?</p> <p>Modérés, intenses ?</p> <p>En jet ?</p> <p>Combien de fois depuis l'accident ?</p> <p>↳ Noter les heures</p>			
6	<p>Le sujet a-t-il la diarrhée ?</p> <p>Depuis quand ?</p> <p>Modérée, intense ?</p> <p>Combien de selles depuis l'accident ?</p> <p>↳ Aspect liquide ou moulé ?</p> <p>↳ Noter les heures</p>			
7	<p>Le sujet présente-t-il des troubles de la déglutition ?</p> <p>Aspect de la muqueuse oro-pharyngée :</p> <p>↳ normale ?</p> <p>↳ inflammatoire ?</p>			
8	<p>Le sujet présente-t-il des céphalées ?</p> <p>Depuis quand ?</p> <p>Modérées, intenses ?</p> <p>↳ Les caractériser</p>			
9	<p>Le sujet présente-t-il des vertiges ?</p> <p>Depuis quand ?</p> <p>Modérés, intenses ?</p> <p>↳ Les caractériser</p>			

NOM :

Prénom :

Date de naissance :

N°	Question	Oui	Non	Commentaires
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 :

Pouls	
Tension artérielle	
Température	

Heure de la fin de l'examen :

Identification de la personne ayant effectué l'examen clinique :

Dosimétrie Biologique par dénombrement des aberrations chromosomiques

Technique Médico-Légale

Qu'est ce que la dosimétrie biologique ?

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 1000 cellules); elle est de l'ordre de 0,1 Gy lorsque l'on observe 500 cellules.

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.

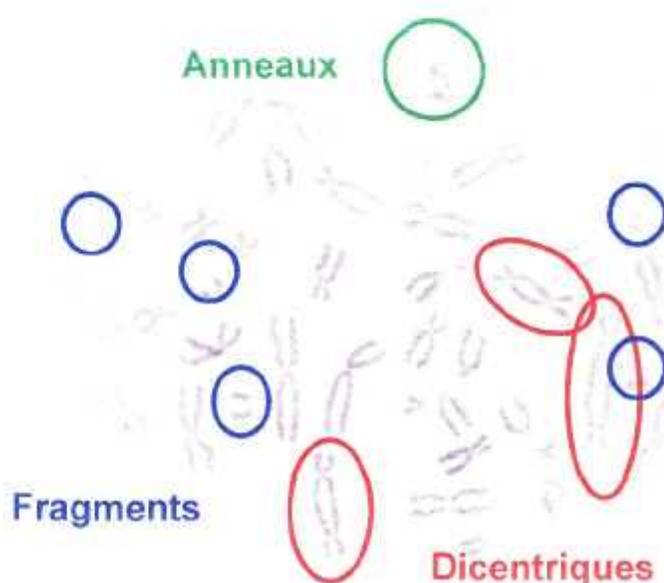
Le Laboratoire de Dosimétrie Biologique (LDB) de l'IRSN est le seul laboratoire en France pratiquant la dosimétrie biologique pour les cas d'exposition aux rayonnements ionisants. Deux cents cas ont été expertisés par le laboratoire entre 1992 et 2003.

La demande d'expertise en dosimétrie biologique

Le LDB peut répondre à tout moment à une demande d'expertise venant d'un médecin.

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



Pour tous renseignements :

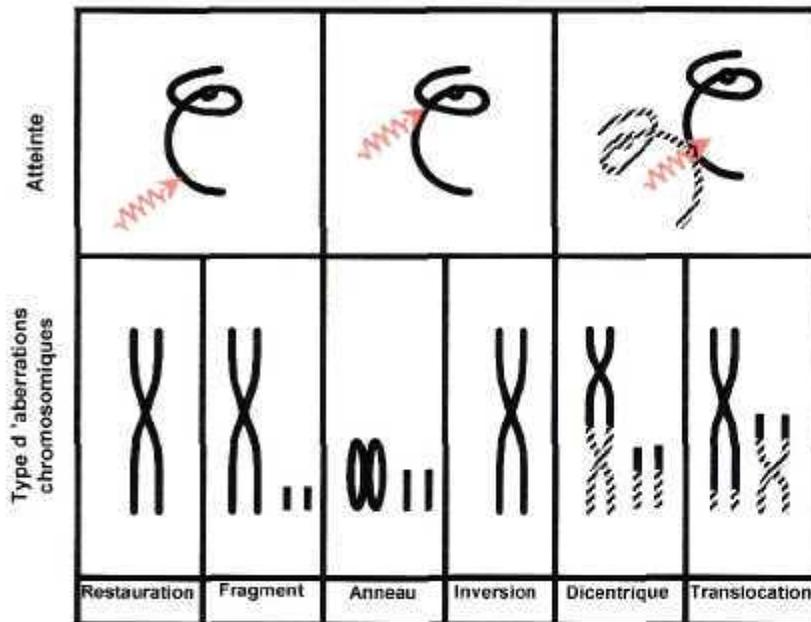
01 58 35 49 29 et 49 30 (hotline 24 heures sur 24)

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 (voir figure ci-dessous) :

- 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.



Cas d'une irradiation hétérogène

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 dicentriques vont disparaître au cours du temps.

Les aberrations de type **dicentrique**, **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.

Quelques éléments de bibliographie

International Atomic Energy Agency, Cytogenetic Analysis for Radiation Dose Assessment, Technical Reports series n° 405, Vienna, 2001.

Voisin P, Benderitter M, Chambrette V, Claraz M, Delbos M, Durand V, Paillole N, Roy L, Sorokine-Durm I. La dosimétrie biologique de l'accident d'irradiation, Radioprotection, 37, 27-40, 2002.

Voisin P, Lloyd D, Edwards AA. chromosome aberration scoring for biological dosimetry in a criticality accident. Radiation Protection dosimetry, 70, 467-470, 1997.

Sorokine-Durm I, Durand V, Le Roy A, Paillole N, Roy L, Voisin P. 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, 1997.

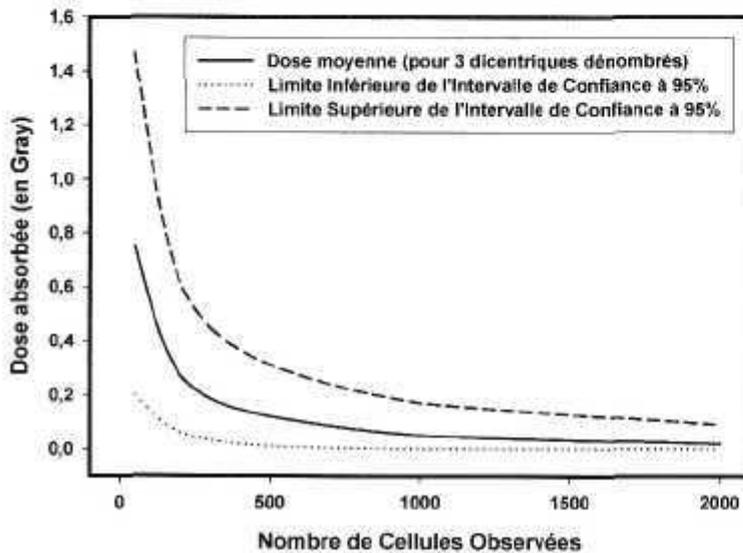
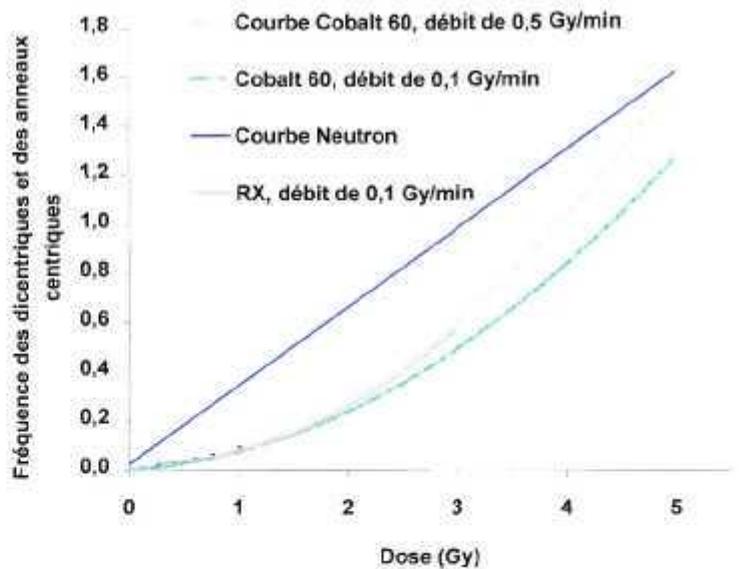
Voisin P, Barquinero F, Blakely B, Lindholm C, Lloyd D, Luccioni C, Miller S, Palitt F, Prasanna PGS, Stephan G, Thierens H, Turai I, Wilkinson D, Wojcik A. Towards a Standardization of Biological Dcsimetry by Cytogenetics. Cellular and Molecular Biology, 48, 501-504, 2002.

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.

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 :

- le nombre de cellules observées pour l'expertise. Généralement 500 cellules sont observées par expertise. Lorsqu'une plus grande précision est nécessaire, 1000 à 2000 cellules peuvent être examinées.

- La valeur du bruit de fond dans la population. Il est de 1 dicentrique pour 1000 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 ci-dessous)

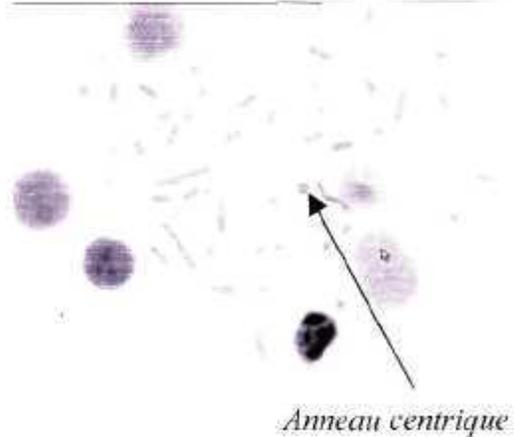
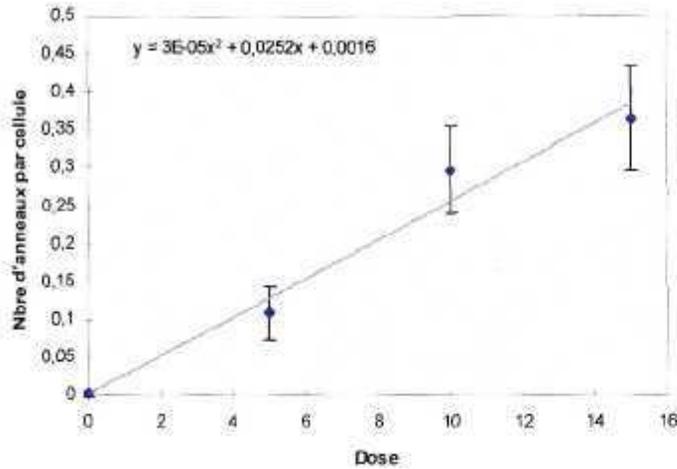
Evaluation de la dose (D) en Gray et de son intervalle de confiance à 95 % (IC95) en fonction du nombre de dicentriques observés pour un nombre fixé de cellules. Ces calculs ont été réalisés, à partir de la courbe de référence du laboratoire, en assumant que la fréquence des dicentriques par cellule suit une distribution de Poisson : $[\text{fréq dic}] = 0,0008 + 0,037 [\text{Dose}] + 0,055 [\text{Dose}]^2$

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	[0,4-1,62]	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]

Cas des fortes doses

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

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



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 (voir ci-dessous)

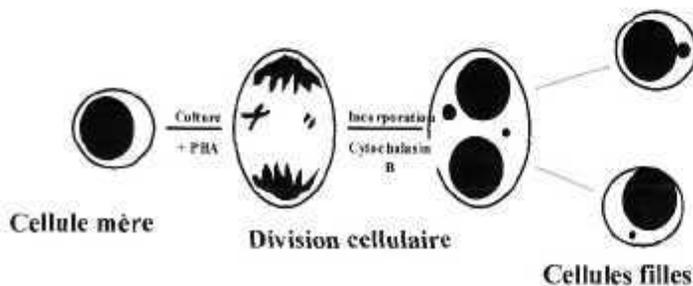
Le délai nécessaire pour obtenir une dose et la limite de sensibilité, en fonction du nombre d'individus potentiellement impliqués et des techniques dosimétriques employées, est grossièrement précisé dans le tableau suivant :

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 1000 cellules binucléées observées.



Les PCC par induction chimique en dosimétrie biologique opérationnelle : leçons tirées de l'accident de Tokai-Mura

Chromosomes Prématurément Condensés (PCC) par fusion

Initialement, la technique des PCC repose sur les travaux de Johnson et Rao, en 1970, qui ont mis en évidence la possibilité de visualiser les chromosomes sans culture préalable, par la fusion¹ cellulaire. A 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. A 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.

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 colcemid. 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.

¹ 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.

L'accident de Tokai-Mura

Le Dr 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 le Prof Sasaki (Université de Tokyo). On voit dans le tableau ci-dessous 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.

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

Tableau – 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.

Application à l'irradiation localisée

Afin d'améliorer le diagnostic et de 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 Monte Carlo.

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 spécifiques 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 imités 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.

Le Flt3 ligand, marqueur des lésions de la moelle osseuse

Le syndrome hémato-poïétique 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^{ème} jour après irradiation est prédictive de la sévérité de l'aplasie chez le primate non humain, et ce, quelque 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.

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.

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).

DOSIMETRES UTILISES : CARACTERISTIQUES PRINCIPALES

Dosimètres Type	n ou y	de zone (z) ou portés (p)	Limite de détection (Gy)		Incertitude sur l'évaluation	Délai d'exploitation ⁽¹⁾	Remarques
			inférieure	supérieure			
SNAC2	n	z	0,1	> 10 ⁽²⁾	50 % ⁽²⁾	1 SNAC2 ~ 5 heures	évaluation par spectromètre gamma + code de calcul (spectre, fluence, dose)
DIC	n	p	0,1	> 10 ⁽²⁾	facteur 2 au maximum	1 ensemble (DIC + ceinture) 2 heures environ	spectrométrie gamma (pour cibles métalliques), comptage β (pour cible d'ébonite)
Ceinture	n	p	0,1	objectif orientation	20 %		
PB33	γ	z+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	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	2 · 10 ⁻⁴ 1 · 10 ⁻² 2	5 · 10 ⁻² 3 10	30 % (1 ^{ère} émulsion) 30 % (2 ^{ème} émulsion) développement spécial	20 films ~ 2 heures	Informations qualitatives sur : - la forme du spectre gamma - la présence de neutrons thermiques
PGPI ⁽⁵⁾	γ	p	2 · 10 ⁻⁴	0,2	30 %	20 PGPI ~ 2 heures	effacement lors de la lecture
PGPDIN ou ⁽⁵⁾ CODEBADGE	n	p	5 · 10 ⁻⁴	0,2	facteur 1 à 5	20 PGPDIN ~ 2 heures	effacement lors de la lecture albedo, étalonnage par poste de travail
PN3 ⁽⁵⁾	n	z+p	~ 2 · 10 ⁻⁴	~ 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 dépendants 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/LSDOS/FAR, - COGEMA : films développés à La Hague ou à Marcoule.

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

ESTIMATION PHYSIQUE DE LA DOSE EN CAS D'ACCIDENT DE CRITICITE

FICHE REFLEXE

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. Eventuellement, 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 connue¹ : 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 → [Laboratoire de dosimétrie](#)

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

¹ 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.

- 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 majoritaire²).

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 Silène de Valduc :

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

- Sans écran $\frac{D_\gamma}{D_n} \approx 1 \text{ à } 1,5$
- Avec un écran de 10 cm de plomb autour du réacteur $\frac{D_\gamma}{D_n} \approx 0,1 \text{ à } 0,3$
- Avec un écran de 10 cm de polyéthylène autour du réacteur $\frac{D_\gamma}{D_n} \approx 6 \text{ à } 11$

Ces valeurs sont fournies à l'air libre. Etant 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.*

² Plus la distance entre la source et la victime est faible, plus le gradient de dose en fonction de la distance sera important

- **Point fort** : réalise en quelques minutes en un point donné .
- **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 diffuse La contribution du rayonnement diffuse peut être évaluée en utilisant un facteur de build-up³, 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 direct et diffusé 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

³ Permet de prendre en compte la multi-diffusion dans la matière

FICHE DE TRI ET D'EVACUATION

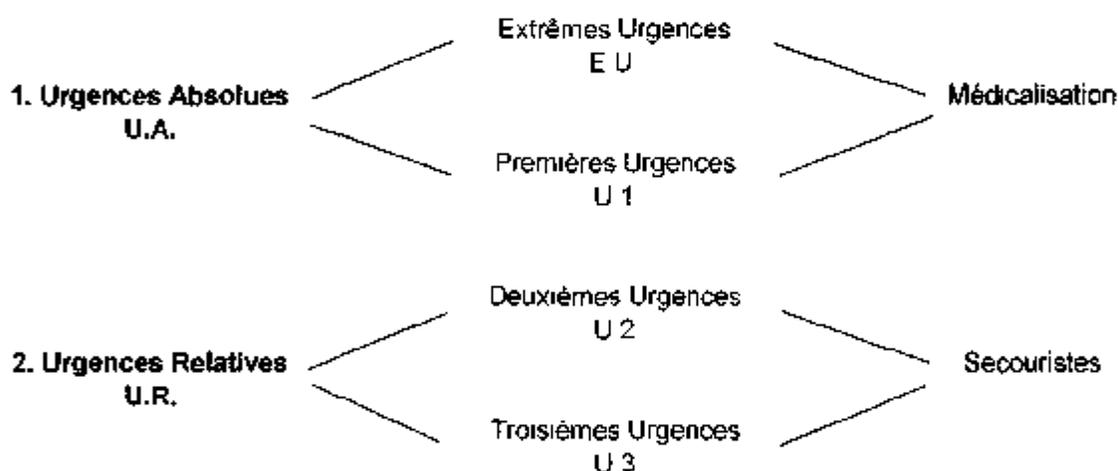
FICHE DE TRI ET D'EVACUATION

NOTICE D'ACCOMPAGNEMENT

La fiche de tri et d'évacuation sera utilisée dans tous les types d'accidents graves avec ou sans déclenchement du PUI, avec ou sans élément radiologique : il suffira alors d'ôter la partie droite du document

La fiche est en trois exemplaires autocopiants .

- ↳ Un exemplaire accompagnant la victime
- ↳ Un exemplaire pour le Service Médical du lieu de l'accident
- ↳ Un exemplaire pour le Service Médical d'Urgence



3. D.C.D.

CRITERES DE CHOIX D'UN PMA/CME (Poste Médical Avancé : Centre Médical d'Evacuation)

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

CLASSIFICATION DES BLESSES AU PMA/CME

1/ Urgences Absolues (U A)

Extrêmes Urgences (E U)

- ↳ asphyxie aigue avec détresse respiratoire immédiate
- ↳ hémorragie difficilement contrôlable (gros vaisseaux)

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

Premières Urgences (U 1)

- ↳ polytraumatisme
- ↳ lésion abdominale stable
- ↳ brûles graves (> 40 %)

Les U 1 nécessitent des gestes de réanimation mais peuvent attendre une intervention chirurgicale dans un délai maximum de six heures

2/ Urgences Relatives (U R)

Deuxièmes Urgences (U 2)

Les U 2 ne présentent pas de pronostic vital (fracture diaphysaire), brûlures peu étendues, plaies non délabrantes des membres) mais nécessitent immobilisation, pansements et autres soins avant le transport

Troisièmes Urgences (U 3)

Les U 3 sont les blessés légers auxquels on peut ajouter les traumatismes psychiques

NOM

N° D'IDENTIFICATION DE LA VICTIME :

Prenoms

POSTE MEDICAL AVANCE

Medecin

Infirmier

Date de naissance / / 19 Sexe M F

Accident le / / 20
a h
Examen le / / 20
a h

Entreprise

URGENCE CLASSIQUE

ETAT CLINIQUE

Conscience normal patho
Ventilation normal patho
TA (cm Hg) Poids/mn GOC ? OUI NON

LESIONS	Crâne	Face	Cou	Pachis	Thorax	Abd	Bassin	MSD	MSG	MD	MIG
FRACTURES *											
CONTUSIONS											
PLAIÉS											
BRULURES											
AUTRES RENSEIGNEMENTS											

* O = Ouverté F = Fermeture

PRIORITE (autour de la case retenue) Pas d'attente classique

	(UA)		(UR)		DCD
	EU	U1	U2	U3	

SURVEILLANCE MEDICALE EVOLUTION CLINIQUE - PRELEVEMENTS - THERAPEUTIQUE

Date	Heure	

TRANSPORT EVACUATION OUI NON

Couché • Accompagnement medical OUI NON
Assis • Debout

DESTINATION

Moyen Indicateur Heure départ

EXEMPLAIRE ACCOMPAGNANT LA VICTIME

IRRADIATION AIGUE GLOBALE

Dosimétrie estimée Gy Neutrons(n)

Au moyen de

DOSIMETRES ANALYSES OUI NON

Céphalées et/ou troubles conscience OUI Heure NON

Erythème précoce Localisation OUI Heure NON

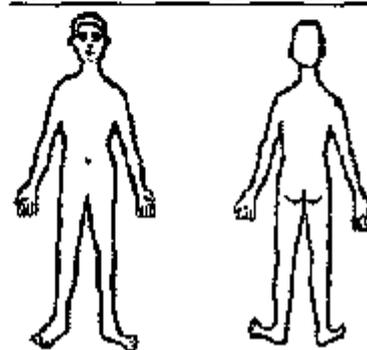
Nausées et/ou vomissements et/ou diarrhée OUI Heure NON

Température °C OUI Heure NON

POSITIONNEMENT PAR RAPPORT A LA SOURCE :

Schemas

CONTAMINATION EXTERNE RESIDUELLE



CONTAMINATION INTERNE SUSPECTEE OUI NON

Mesure OUI NON
au moyen de

Plaie contaminée OUI NON

Radioélément(s) suspecte(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
		Anthropogammatelle(s) horodatée(s) <input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/>
		Radionucléides horodatés - urines <input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/>
		- mucus nasopharyngé <input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/>
		Prélevements de phanères localisées ou horodatés <input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/>
		Prélevements sanguins horodatés	
		- NF, plaquettes, réticulocytes <input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/>
		- Hémostase Biochimie Enzymologie <input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/>
		- 24 Na <input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/>
		- Groupe Erythrocytaire et HLA I et II <input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/>
		- Cytogénétique <input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/>

SOINS

1 cp de KI (= 100 mg d'Iode) OUI Heure NON

DTPA (gélule ou sphaler = 40 mg) OUI Heure NON

DTPA IV (1/2 ampoule IV = 500 mg) OUI Heure NON

Autres (à préciser) OUI Heure NON

ORIENTATION

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

FICHE DE PRELEVEMENTS

FICHE EXAMENS A REALISER EN CAS D'ACCIDENT DE CRITICITE

			RADIOTOXICOLOGIE
HEURE DE PRELEVEMENT	NATURE ET NOMBRE DE TUBES DE PRELEVEMENT/PERSONNE	EXAMEN	
*H BILAN INITIAL	5 tubes violets (EDTA 5ml)	*NFS Plaquettes Reticulocytes (1 tube)	<ul style="list-style-type: none"> - Anthroporadiometrie ²⁴ Na Corps entier - Prelevements des Phaneres pour dosage du ³²P - ²⁴ Na dans le sang (2 tubes violets EDTA de 5 ml) - Urine miction selon prescription medicale - Prelevements nasaux selon prescription medicale
		Groupage erythrocytaire HLA 1 et 2 (4 tubes)	
	1 tube noir (citrate 5ml)	VS	
	1 tube bleu (citrate 5ml)	TP TCA Fibrinogene	
	2 tubes oranges (tube sec 5ml)	Na K Cl Protéines (1tube) TGO, TGP, amylase, LDH, fer, ferritine, Capacité seturation sidérophilline, cortisol ACTH (1 tube)	
*H+3	1 tube violet (EDTA 5ml)	NFS Plaquettes Reticulocytes	
	2 tubes verts (heparinate de Li 5ml)	Cytogenétique	
H+6	1 tube violet (EDTA 5ml)	NFS Plaquettes Reticulocytes	
H+9	1 tube violet (EDTA 5ml)	NFS Plaquettes Reticulocytes	
	2 tubes verts (héparinate de Li 5ml)	Cytogenétique	
H+12	1 tube violet (EDTA 5ml)	NFS Plaquettes Réticulocytes	
	1 tube noir (citrate 5ml)	VS	
	1 tube bleu (citrate 5ml)	TP TCA Fibrinogene	
	2 tubes oranges (tube sec 5ml)	Na K Cl Protéines (1tube)	
		Cortisol, ACTH (1 tube)	
H+15	1 tube violet (EDTA 5ml)	NFS Plaquettes Reticulocytes	
H+18	1 tube violet (EDTA 5ml)	NFS Plaquettes Réticulocytes	
H+21	1 tube violet (EDTA 5ml)	NFS Plaquettes Reticulocytes	

FICHE EXAMENS A REALISER EN CAS D'ACCIDENT DE CRITICITE

H+24	1 tube violet (EDTA 5ml)	NFS Plaquettes Réticulocytes	• Urines de 24heures selon prescription médicale - selles de 24heures selon prescription médicale
	1 tube noir (citrate 5ml)	VS	
	1 tube bleu (citrate 5ml)	TP TCA Fibrinogène	
	2 tubes oranges (tube sec 5ml)	Cortisol, ACTH (1 tube)	
		Na K Cl Protéines (1tube)	

***H : heure de l'accident de criticité**

***Hi : heure de prélèvement du bilan initial**

***en rouge : prélèvements prioritaires**

en vert : prélèvements non systématiques réalisés en milieu spécialisé en fonction de l'état clinique du patient

FICHE PRELEVEMENTS SPECIALISES

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.

1/ DEFINITION

MOLECULES DE L'INFLAMMATION	FI13-LIGAND	CITRULLINE	OXYSTEROLS
<ul style="list-style-type: none"> - CRP - IL-1α et IL-1β, IL-6, IL-8, IL6Rs - RANTES - TNFα, TNF-αRs - sICAM-1, sVCAM-1, - ELAM - SE- Sélectine - MIP-1α 	<p>Marqueur des lésions de la moelle osseuse</p>	<p>Marqueur des lésions de la muqueuse intestinale</p>	<p>Marqueurs du dysfonctionnement multiple des organes</p>

2/ PRELEVEMENT ET CONDITIONNEMENT

MOLECULES DE L'INFLAMMATION	FI13-LIGAND	CITRULLINE	OXYSTEROLS
SANG	SANG	SANG	SANG
<ul style="list-style-type: none"> - 5 ml sur EDTA - Centrifuger - Congélation à - 80°C 	<ul style="list-style-type: none"> - 1-2 ml sur EDTA - A l'admission - Chaque jour durant toute la durée de l'hospitalisation <p>Les prélèvements sont à conserver à température ambiante et à envoyer dans les 24 heures au laboratoire ci-dessous</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 1 à 2 tubes de 4,5 ml sur EDTA <p>Centrifuger 10 min à 4000 g à + 4°C</p> <p>1 ml de plasma dans 2 tubes eppendorf blanc (1.5ml) + (si possible) 50 μl de BHT à 3 mg/150 ml méthanol (préparé extemporanément) dans chaque tube eppendorf.</p> <p>Les prélèvements sont à conserver à - 80°C, et à envoyer dès que possible au laboratoire ci-dessous :</p>	
<p>Institut de Radioprotection et Sécurité Nucléaire, DRPH/SRBE Chef du Laboratoire de Dosimétrie Biologique B.P. n° 17 F-92262 Fontenay-aux-Roses cedex Tel : 01.58 35.72.60 - Fax : 01.58 34.84.67</p>			

FICHE ORGANISATION RENFORT

RECOMMANDATIONS POUR LES SST ET LABM

1/ 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.

2/ Pour effectuer les analyses :

- Établir une procédure récapitulant les analyses à effectuer (d'après la fiche V).
- 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.

3/ Pour hospitaliser les patients :

- Établir ou réactualiser une convention avec les structures hospitalières ad hoc.
- Adresser la fiche communication VII₂ avec la fiche tri aux Centres Hospitaliers qui recevront les patients.

4/ Pour les patients adressés à leur médecin traitant :

- Mettre à leur disposition les fiches communication VII₃ et VII₄.

FICHES COMMUNICATION

**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.



Dr. CLERMONT

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 .



Dr. CLERMONT

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...



Dr. CLERMONT

Quelques ordres de grandeurs...

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



Dr. CLERMONT

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. CLERMONT

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

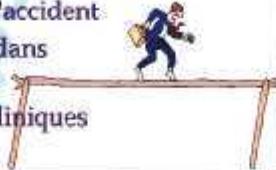
Pour préciser leurs circonstances d'exposition et permettre l'estimation de la dose qu'ils ont reçue.



Dr. CLERMONT

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



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.



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



Examens entrepris par le service de santé au travail du site

- Prise de sang
- Examen clinique initial



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



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...



Surveillance effectuée par le médecin traitant



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

Dr. CHENARD

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. CHENARD

FICHE INFORMATION DES MEDECINS DES SERVICES HOSPITALIERS D'ACCUEIL ET DE LEURS COLLABORATEURS

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/Comment ont été pris en charge par le service médical du 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 :

a/ Recherche et prise en charge par le Service Médical 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)

b/ 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 fiche suiveuse résumant l'ensemble des observations et des actions faites lors de ce circuit a été rédigée. Cette fiche accompagne le patient en cas d'évacuation vers une structure hospitalière.

3/ Quels ont été les critères d'hospitalisation ?

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

a/ 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

b/ 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.

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 :

a/ 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.

b/ les patients dont l'exposition a été partielle ont été adressés vers des Centres de Brûlés.

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 II – 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.

6/ Evolution lors de l'hospitalisation.

A 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).

a/ 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 $1000/\text{mm}^3$
- Taux de polynucléaires neutrophiles inférieur à $1500/\text{mm}^3$
- Taux de plaquettes inférieur à $5000/\text{mm}^3$

b/ 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.

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

7/ Dans tous les cas vous pouvez vous adresser :

a/ au service de santé du travail du site de l'accident

b/ au service spécialisé suivant .

- **INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SURETÉ 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

Références :

INFORMATION ET LIAISONS AVEC LES MEDECINS GENERALISTES

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/ 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 :

a/ 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)

b/ 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 fiche suiveuse résumant l'ensemble des observations et des actions faites lors de ce circuit a été rédigée et lui a été confiée lors de son départ du site.

3/ Quels ont été les critères d'hospitalisation ?

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

a/ les agents dont l'irradiation externe globale a été estimée supérieure à 1 Gy

b/ 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.

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

5/ Que doit comporter cette surveillance ?

a/ un examen clinique et une NFS initiale

b/ le recueil de toutes les données médicales

- résultats NFS sur le site
- résultats de l'enquête dosimétrique physique

c/ une surveillance clinique et hématologique à J3 et à J21.

6/ 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 :

a/ 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

b/ 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.

7/ Dans tous les cas vous pouvez vous adresser :

a/ au service de santé du travail du site de l'accident

b/ au service spécialisé suivant

- **INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SURETÉ 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

Références :

FICHE D'INFORMATION POUR LES AGENTS APPELÉS A ÊTRE SUIVIS PAR LEUR MÉDECIN TRAITANT

A 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.

ANNEXES

MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL CRITICITE

		☎	e-mail
M BARBRY	5, rue Coteau Bary 21240 TALANT	03 80 55 25 65	fy.barbry@laposte.net
M BRIOT	LABM CEA/Valduc	03 80 23 49 55	francois briot@cea.fr
Mme le Dr CHALLETON- de VATHAIRE	IRSN/DPRH/SDI BP 17 92262 Fontenay-aux-Roses cedex	01 30 15 52 00	cecile challetondevathaire@irsn.fr
Mme le Dr GONIN	EDF- SCAST - Pôle MAN 22/28, rue Joubert 75009 PARIS	01 55 31 47 10	michele.gonin@edf.fr
M FOTTORINO	LABM CEA/Cadarache	04 42 25 72 55	fottorino@ircad.cea.fr
Mme GAILLARD-LECANU	DSV/Cellule Carmin CEA/Fontenay-aux-Roses	01 46 54 71 48	egaillard@dsvdif.cea.fr
M. le Dr LAROCHE	SPRA 1 bis, rue du Lieutenant Battary 92140 CLAMART	01 41 46 71 12	spra.def@wanadoo.fr
Mme le Dr LEBARON-JACOBS	Cellule Carmin – DSV/DEV/DIR CEA/Cadarache	04 42 25 44 46	lebaronjacobs@dsvsud.cea.fr
Mme LECOIX	LABM COGEMA/Marcoule	04 66 79 50 92	gsquaglia@cogema.fr
M le Dr LE GOFF	SST CEA/Valduc	03 80 23 40 90	jean-pierre.legoff@cea.fr
M. LEMAIRE	23, rue Henn Régnauld 92210 Saint-Cloud	01 46 02 16 83	guy.lemaire@tele2.fr
M. MEDIONI	IRSN/DPRH/SDE BP 17 92262 Fontenay-aux-Roses cedex	01 58 35 75 39	roger.medioni@irsn.fr
Mme le Dr PERSICO	SAT COGEMA/Marcoule	04 66 39 09 47	mhpersico@cogema.fr
Mme le Dr RIASSE	SST CEA/DAM-Ile de France	01 69 26 49 51	christine.riasse@cea.fr
Mlle RONGIER	CEA Valrhô Bât Dir – bureau 148 BP 17171 30207 Bagnols-sur-Ceze cedex	04 66 39 75 50	eisabeth.rongier@cea.fr
M Philippe VOISIN	IRSN/DPRH/SRDE BP 17 92262 Fontenay-aux-Roses cedex	01 58 35 95 50	philippe.voisin@irsn.fr

Rapporteur du Groupe de Travail CRITICITE

Dr Alain MIELE

SST – CEA/Cadarache

☎ 04 42 25 71 01 – Fax 04 42 25 32 32

Secrétariat : Mme Françoise POHER

Tableau 1 :**Accidents de criticité survenus sur les réacteurs de recherche et dans les laboratoires sur des assemblages critiques**

DATE ET LIEU	PERSONNES IRRADIEES	NOMBRE DE FISSIONS	CIRCONSTANCES, DEROULEMENT ET CAUSES
11/02/45 LOS ALAMOS	pas d'irradié	$6 \cdot 10^{15}$ fissions	Réacteur DRAGON (UH3 dans du slyrex) ; réacteur fonctionnant en mode prompt-critique erreur de calcul.
06/06/45 LOS ALAMOS	pas d'irradié	$4 \cdot 10^{16}$ fissions	Uranium enrichi à 79,2 % ; entrée d'eau
21/08/45 LOS ALAMOS	1 mort	10^{18} fissions	Plutonium pur, mise en place d'un réflecteur à la main
21/05/46 LOS ALAMOS	1 mort	$3 \cdot 10^{15}$ fissions	Plutonium pur, mise en place d'un réflecteur à la main
12/49 LOS ALAMOS	pas d'irradié	$3 \cdot 10^{16}$ 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 HANDFORD	pas d'irradié	$8 \cdot 10^{16}$ 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	$1,5 \cdot 10^{16}$ fissions	Uranium enrichi à 93 %, erreur de calcul
02/06/52 ARGONNE NATIONAL LAB.	pas d'irradié	$1,22 \cdot 10^{17}$ fissions	Elements 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	$1,2 \cdot 10^{20}$ 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

DATE ET LIEU	PERSONNES IRRADIEES	NOMBRE DE FISSIONS	CIRCONSTANCES, DEROULEMENT ET CAUSES
03/02/54 LOS ALAMOS	pas d'irradié	$5,6 \cdot 10^{16}$ fissions	Uranium enrichi à 93 % ; erreur de manipulation
22/07/54 IDAHO REACTOR TESTING AREA	pas d'irradié	$4,68 \cdot 10^{18}$ 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	$4 \cdot 10^{17}$ 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	$1,6 \cdot 10^{17}$ fissions	Accident dans une solution de fluorure d'uranyte dû à un changement de géométrie d'une barre d'arrêt d'urgence.
03/07/56 LOS ALAMOS	pas d'irradié	$3,2 \cdot 10^{16}$ 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	$1,2 \cdot 10^{17}$ fissions	Uranium enrichi à 93 % ; déplacement d'équipement.
15/10/58 VINCA (Yougoslavie)	1 mort	$2,6 \cdot 10^{18}$ fissions	Uranium naturel dans de l'eau lourde ; mesure de la puissance défectueuse.
18/11/58 IDAHO REACTOR TESTING AREA	pas d'irradié	$2,5 \cdot 10^{19}$ fissions	Réacteur prototype de propulsion aérienne ; défaillance de l'instrumentation entraînant un défaut d'asservissement.
15/03/60 SACLAY	pas d'irradié	$3 \cdot 10^{16}$ 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	$6 \cdot 10^{16}$ fissions	Uranium enrichi à 93% ; addition de trop de matière.
03/01/61 IDAHO REACTOR TESTING AREA	3 morts	$4,4 \cdot 10^{16}$ fissions	Eléments 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^{16} fissions	Eléments combustibles d'uranium enrichi à 93 % dans de l'eau ; transitoire trop rapide.
11/12/62 LOS ALAMOS	pas d'irradié	$3 \cdot 10^{16}$ fissions	Assemblage critique d'uranium enrichi à 93 % dans du graphite ; erreur dans l'approche critique.

DATE ET LIEU	PERSONNES IRRADIEES	NOMBRE DE FISSIONS	CIRCONSTANCES, DEROULEMENT ET CAUSES
26/03/63 VVIIEF	6 irradiés	$5 \cdot 10^{15}$ fissions 370 à 500 rems (3,7 à 5 Sv)	Violation des consignes dans une expérimentation sur un assemblage critique (deux demi sphères de Pu 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	$1,5 \cdot 10^{17}$ fissions	Uranium enrichi à 93 % ; erreur de manipulation.
30/12/65 MOL (Belgique)	1 irradié	$4 \cdot 10^{17}$ 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 coeur).
06/09/68 ABERDEEN	pas d'irradié	$6,1 \cdot 10^{17}$ fissions	Uranium enrichi à 93 % ; erreur de manipulation.
30/01/68 OAK RIDGE	pas d'irradié	$1,1 \cdot 10^{16}$ fissions	Accident dans une solution de nitrate d'uranyle, augmentation de la masse de solution par injection de bulles d'air.
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 KURCHATOV INSTITUTE	2 irradiés sévèrement aux pieds	$2 \cdot 10^{19}$ 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 KURCHATOV INSTITUTE	50 pics successifs de puissance, 2 morts 2 sévèrement irradiés	$5 \cdot 10^{18}$ 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	$4 \cdot 10^{17}$ fissions	Réacteur de recherche à puissance " nulle " ; oubli de vidanger le réacteur avant d'intervenir sur le coeur.
17/06/97 VVIIEF	plusieurs heures 1 mort	$2 \cdot 10^{17}$ fissions	Mauvais assemblage manuel d'une expérience par un physicien travaillant seul.

Tableau 2 :**Accidents de criticité survenus sur les installations du cycle du combustible**

DATE ET LIEU	DUREE/PERSONNES IRRADIEES	NOMBRE DE FISSIONS EXPOSITIONS CORPORELLES	CIRCONSTANCES, DEROULEMENT 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 1000 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.

DATE ET LIEU	DUREE/PERSONNES IRRADIEES	NOMBRE DE FISSIONS EXPOSITIONS CORPORELLES	CIRCONSTANCES, DEROULEMENT ET CAUSES
02/01/58 MAYAK	1 pic 3 morts + 1 irradié	$2,3 \cdot 10^{17}$ 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.
14/08/61 SIBERIAN CHEMICAL COMBINE	2 pics 1 irradié.	$5 \cdot 10^{15}$ 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	$2 \cdot 10^{17}$ fissions	100 l ; arrêt par éjection de la solution.
30/01/63 SIBERIAN CHEMICAL COMBINE	10 heures 4 irradiés	$8 \cdot 10^{17}$ 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	$2 \cdot 10^{17}$ fissions	100 l ; arrêt par injection de cadmium
13/11/65 ELECTROSTAL' S 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	$7 \cdot 10^{17}$ fissions 0,03 rad ($3 \cdot 10^{-4}$ 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 $5 \cdot 10^{16}$ 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	$3 \cdot 10^{15}$ 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. Ejection du quatrième lingot lors de son introduction. Extraction manuelle du 3ème par l'opérateur.
15/05/97 NOVOSIBIRSK CHEMICAL PLANT	26 heures	10^{16} fissions	Solution d'uranium très enrichi (90%) dans un réservoir de 600l (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.
30/9/99 TOKAI-MURA	17 heures 3 agents irradiés dont 2 décédés	$\approx 2,5 \cdot 10^{18}$ 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 ACCIDENT DE TOKAI-MURA

- W.G Cross, Neutron Activation of Sodium in Phantoms and the Human Body, *Health Physics*, Vol 41 (July), 105-121, 1981
- Technical Reports Series n° 211, Dosimetry for Criticality Accidents. A Manual. IAEA, Vienna, 1982.
- Tebardel R., Ricourt A., Parmentier N, Rapport CEA-R 5276, 1984, Evaluation rapide de la dose due aux neutrons à la suite d'un accident de criticité à partir de l'activité du sodium 24 mesurée
- Lemaire G, Dhermain J., Remy M.L., Masse R., 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*, 1992, Vol 27, 17-34
- ORNL/TM-12028, Determination of Neutron Dose from Criticality Accident with Bioassay for Sodium-24 in Blood and Phosphorus-32 in Hair (Oak Ridge National Laboratory) (1993).
- Rapport de la Science and Technology Agency (STA) a propos de l'incendie et de l'explosion survenus le 11 mars 1997 a Tokai Mura, 27 pages, 16 mai 1997, Site Internet www.sta.go.jp/nuclear/tokai/cyuhou/index.htm
- 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]
- Kanda R, Hayata I and Lloyd, Easy biodosimetry for high-dose radiation exposure using drug-induced, prematurely condensed chromosomes, *Int J Radiat Biol*, 74, 1998, 457-462
- J. Inaba, Criticality Accident at Tokai-Mura, Institute for Environmental Sciences, Rokkasho-Mura, Japan, *Radiological Protection Bulletin*, n° 217, novembre 1999
- L'accident de Tokai-Mura : erreur humaine et défaut de procédure, *RGN*, n° 5, pp. 72-74, octobre – novembre 1999.
- Après l'accident de Tokai Mura : les suites et les conséquences, *RGN*, n°6, pp 54-56 , novembre - décembre 1999
- International Atomic Energy Agency, Report on the preliminary fact finding mission following the accident at the nuclear fuel processing facility in Tokaimura, Japan, 35 pages, Vienna, 1999.
- J.Inaba, Radiological and environmental aspects of the criticality accident in Tokai-Mura, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 92, n° 1-3, pp 239-246, 2000, Nuclear Technology Publishing
- Dr. Jinzaburo Takagi and the Citizens' Nuclear Information Center, Criticality Accident at Tokai-Mura, 80 pages, Translated by Gaia Hoerner, Akiko Fukami and Taeko Miwa, may, 2000
- Akashi M 2000, Initial symptoms of three victims in the Tokai-mura criticality accident, *The Medical Basis for Radiation-Accident preparedness* ed R C Ricks, M E Berger and F M O'Hara, Jr (Washington, DC The Parthenon Publishing Group) pp 303-311.
- Toohy R E 2000, Notes from Chiba, report on the Tokai-mura, Japan criticality accident, *The Health Physics Society's Newsletter*, XXVIII, 21-5
- Robert Andurand, Un risque peu connu la « criticité », Première partie, *Préventique – Sécurité*, n° 50, mars - avril 2000.
- Robert Andurand, Un risque peu connu la « criticité », les Paramètres Déterminants, Deuxième partie, *Préventique – Sécurité*, n° 51, mai - juin 2000.
- Robert Andurand, Un risque peu connu : la « criticité », Les conséquences biologiques, Troisième partie, *Préventique – Sécurité*, n° 52, juillet - août 2000.
- Robert Andurand, Un risque peu connu - la « criticité », Le réacteur fossile d'Oklo, Quatrième partie, *Préventique – Sécurité*, n° 53, septembre - octobre 2000.
- Journal of Environmental Radioactivity*, The Tokai-Mura Accident, Special Issue, Vol 50, n° 1-2, 174 pages, 2000
- L'accident de Tokai-Mura au Japon Aspects de responsabilité civile nucléaire et de réparation. A.E.N. Bulletin de droit nucléaire, 2000, n° 68
- 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)
- Murata, K. And Akashi, S Eds (2000) Report of Criticality Accident at the Uranium Processing Facility in Tokkai Village. National Institute of Radiological Sciences, NIRS.M.143, Chiba (in Japanese)

Mijun D., L'accident de criticité de Tokai Mura, Clefs du CEA, n°45, automne 2001, 76-79

La sûreté des installations vis à vis du risque de criticité, Clefs du CEA, n°45, automne 2001,54-90

Barbry F., Foullaud P., 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.

Ronald E Goans and co, early dose assessment in criticality accidents, Health Physics, October 2001, Volume 81, Number 4, 446-449

Tsunoda Katsuya, Public Response to the Tokai Nuclear Accident, Risk Analysis, Vol 21, n° 6, 2001, 1039-1046

Barbry F., 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, décembre 2001

Sasaki, Y., Ando, K., Komura, K., Niwa, O., Sasaki, MS, and Susuki, N. Ed.(2001), The Tokai-mura criticality accident - biomedical and environmental effects J.Radia. Res., 42 - Suppl , S1-S186

Nénot J C , Les accidents d'irradiation, 1950-2000, leçons du passé, Radioprotection, 2001, Vol 36, n°4, 431-450

Voisin P and Co, La dosimétrie cytogénétique de l'accident d'irradiation, Radioprotection, 2002, Vol 37, n°1, 27-40

Kiriko Miyamoto and co ; Reconstruction of two victims'posturing based on the induced radioactivities in their bones in the criticality accident in Tokai-Mura, Japan, Health Physics, July 2002, Volume 83, n°1,19-25

Kunio Shiraishi, Midori Iwasaki, Chyuzo Miyazawa, Hidenori Yonehara, Masaki Matsumoto, Dose Estimation by ESR on Tooth enamel from Two Workers Exposed to Radiation due to the JCO accident, J. Radia. Res , 43, 331-335, 2002

Ishigure, Nobuhito [National Inst. of Radiological Sciences, Chiba (Japan)] ; Endo, Akira ; Yamaguchi, Yasuhiro , Kawachi, Kiyomitsu, Calculation of the absorbed dose for the overexposed patients at the JCO criticality accident in Tokai-mura , Journal of Radiation Research, Vol. 42 ; ISSUE : suppl ; PBD : sep 2001 , September 1, 2001

Sasaki, Masao S. [Kyoto Univ. (Japan) Radiation Biology Center] , Hayata, Isamu , Kamada, Nanao ; Kodama, Yoshiaki ; Kodama, Seiji ,Chromosome aberration analysis in persons exposed to low-level radiation from the JCO criticality accident in Tokai-mura, Journal of Radiation Research , Vol. 42 , ISSUE : suppl , PBD : sep 2001 , September 1, 2001

Uchiyama, Gunzo , Watanebe, Kazuo ; Mlyachi, Masakatsu [Japan Atomic Energy Research Inst , Tokai, Ibaraki (JP)] (and others) ,Analysis of a uranium solution for evaluating the total number of fissions in the JCO criticality accident in Tokai-mura , Journal of Radiation Research ; Vol. 42 , ISSUE : suppl ; PBD : sep 2001 , September 1, 2001

Endo, Akira ; Yamaguchi, Yasuhiro [Japan Atomic Energy Research Inst., Tokai, Ibaraki (Japan), Tokai Research Establishment] ; Ishigure, Nobuhito [National Inst. of Radiological Sciences, Division of Radiotoxicology and Protection, Chiba (Japan)] ,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), 22 refs , 71 figs., 5 tabs , PBD : mars 2001 Published : March 1, 2001 Report Number : JAERI-Research -2001-035

Mechitova, Boukhmes ,Tokai-mura Criticality Accident - Point Model Stochastic Neutronic Interpretation ,Commissariat a l'Energie Atomique, Bruyeres-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, Volume 84 ; PBD : 17 Jun 2001 Published June 17, 2001

Akashi, Makoto (National Inst. of Radiological Sciences, Chiba (Japan)). Exposure to neutron irradiation in the criticality accident in Tokai-mura Chiba (Japan), Japanese Journal of Cancer Clinics, Scope : 47 :1, Jan 2001, Page : 55-58

Kugeler, K ; Brockmann, H ; Phlippen, P W , Scherer, W ; Singh, J. (Forschungszentrum Juelich GmbH. (Germany) 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). Scope . 44 .11, nov 1999, Page : 630-634

Miyamoto K, Takeda H, Nishimura Y, Yukawa M, Watanabe Y, Ishigure N, Kouno F, Kuroda N, Akashi M.Validation and verification of the ICRP biokinetic model of ³²P - the criticality accident at Tokai-Mura, Japan. Radiat Prot Dosimetry. 2003 ; 105(1-4) :199-208.

Zdravkova M, Crokart N, Trompier F, Asselineau B, Gallez B, Gaillard-Leçanu E, Debuyst R Retrospective dosimetry after criticality accidents using low-frequency EPR : a study of whole human teeth irradiated in a mixed neutron and gamma-radiation field. Radiat Res. 2003 Aug ; 160(2) :168-73

- Hirama T, Tanosaki S, Kandatsu S, Kuroiwa N, Kamada T, Tsuji H, Yamada S, Kato H, Yamamoto N, Tsuji H, Suzuki G, Akashi M.
Initial medical management of patients severely irradiated in the Tokai-mura criticality accident. *Br J Radiol.* 2003 Apr ; 76(904) :246-53.
- Endo A, Yamaguchi Y.
Analysis of dose distribution for heavily exposed workers in the first criticality accident in Japan. *Radiat Res.* 2003 Apr ; 159(4) :535-42.
- Shiraishi K, Iwasaki M, Miyazawa C, Yonehara H, Matsumoto M
Dose estimation by ESR on tooth enamel from two workers exposed to radiation due to the JCO accident. *J Radiat Res (Tokyo).* 2002 Sep ; 43(3) :331-5
- Kanda R, Minamihisamatsu M, Hayata I. Dynamic analysis of chromosome aberrations in three victims of the Tokai-mura criticality accident. *Int J Radiat Biol.* 2002 Sep ; 78(9) :857-62.
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 RP, Fukayama M, Maekawa K, Hirai H. Transplantation for accidental acute high-dose total body neutron- and gamma-radiation exposure. *Bone Marrow Transplant.* 2002 Jun ; 29(11) :935-9. Review.
- Hult M, Martinez Canet MJ, Johnston PN, Komura K. 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.* 2002 ; 60(3) : 307-18
- Blakely WF. Multiple parameter biodosimetry of exposed workers from the JCO criticality accident in Tokai-mura. *J Radiol Prot.* 2002 Mar ; 22(1) :5-6. Review. No abstract available.
- Nishimura Y, Takeda H, Miyamoto K, Watanabe Y, Kouno F, Kuroda N, Kim HS, Yukawa M. 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.* 2002 Mar ; 22(1) :25-9.
- Momose T, Tsujimura N, Tasaki T, Kanai K, Kurihara O, Hayashi N, Shinohara K. Dose evaluation based on ^{24}Na activity in the human body at the JCO criticality accident in Tokai-mura. *J Radiat Res (Tokyo).* 2001 Sep ; 42 Suppl :S95-105.
- Takada J. External doses to 350 m zone residents due to anisotropic radiation from the JCO criticality accident in Tokai-mura. *J Radiat Res (Tokyo).* 2001 Sep ; 42 Suppl : S75-84.
- Murata Y, Muroyama T, Kawabata Y, Yamamoto M, Komura K. Activation of soil and chemical reagents exposed to the neutrons released by the JCO criticality accident in Tokai-mura. *J Radiat Res (Tokyo).* 2001 Sep ; 42 Suppl : S55-74.
- Kojima S, Imanaka T, Takada J, Mitsugashira T, Nakanishi T, Seki R, Kondo M, Sasaki KI, Saito T, Yamaguchi Y, Furukawa M. Determination of radionuclides induced by fast neutrons from the JCO criticality accident in Tokai-mura, Japan for estimating neutron doses. *J Radiat Res (Tokyo).* 2001 Sep ; 42 Suppl : S45-53.
- Imanaka T. Transport calculation of neutrons leaked to the surroundings of the facilities by the JCO criticality accident in Tokai-mura. *J Radiat Res (Tokyo).* 2001 Sep ; 42 Suppl : S31-44
- Komura K. Radiochemical approach to the JCO criticality accident in Tokai-mura, 1999, an overview of the radiochemistry group. *J Radiat Res (Tokyo).* 2001 Sep ; 42 Suppl : S17-29.
- Ishi T, Futami S, Nishida M, Suzuki T, Sakamoto T, Suzuki N, Maekawa K.
Brief note and evaluation of acute-radiation syndrome and treatment of a Tokai-mura criticality accident patient. *J Radiat Res (Tokyo).* 2001 Sep ; 42 Suppl : S167-82
- Akashi M, Hirama T, Tanosaki S, Kuroiwa N, Nakagawa K, Tsuji H, Kato H, Yamada S, Kamata T, Kinugasa T, Anaga H, Maekawa K, Suzuki G, Tsuji H.
Initial symptoms of acute radiation syndrome in the JCO criticality accident in Tokai-mura. *J Radiat Res (Tokyo).* 2001 Sep ; 42 Suppl : S157-66.
- Hayata I, Kanda R, Minamihisamatsu M, Furukawa M, Sasaki S. Cytogenetical dose estimation for 3 severely exposed patients in the JCO criticality accident in Tokai-mura. *J Radiat Res (Tokyo).* 2001 Sep ; 42 Suppl : S149-55.
- Ishigure N, Endo A, Yamaguchi Y, Kawachi K. Calculation of the absorbed dose for the overexposed patients at the JCO criticality accident in Tokai-mura. *J Radiat Res (Tokyo).* 2001 Sep ; 42 Suppl : S137-48
- Takeda H, Miyamoto K, Yukawa M, Nishimura Y, Watanabe Y, Kim HS, Fuma S, Kuroda N, Kouno F, Joshima H, Hirama T, Akashi M. Bioassay for neutron-dose estimations of three patients in the JCO criticality accident in Tokai-mura by measuring beta-ray emitters. *J Radiat Res (Tokyo).* 2001 Sep ; 42 Suppl : S129-35.
- Muramatsu Y, Noda Y, Yonehara H, Ishigure N, Yoshida S, Yukawa M, Tagami K, Ban-Nai T, Uchida S, Hirama T, Akashi M, Nakamura Y. 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 (Tokyo).* 2001 Sep ; 42 Suppl : S117-28.

Sasaki MS, Hayata I, Kamada N, Kodama Y, Kodama S Chromosome aberration analysis in persons exposed to low-level radiation from the JCO criticality accident in Tokai-mura J Radiat Res (Tokyo) 2001 Sep ; 42 Suppl S107-18

Tanaka SI Summary of the JCO criticality accident in Tokai-mura and a dose assessment J Radiat Res (Tokyo) 2001 Sep , 42 Suppl S1-9

Goans RE, Holloway EC, Berger ME, Ricks RC Early dose assessment in criticality accidents Health Phys. 2001 Oct , 81(4) 446-9

Endo A, Yamaguchi Y, Sakamoto Y, Yoshizawa M, Tsuda S External doses in the environment from the Tokai-mura criticality accident Radiat Prot Dosimetry 2001, 93(3) 207-14

Takada J, Suga S, Kitagawa K, Ishikawa M, Takeoka S, Hoshi M, Watanabe H, Ito A, Hayakawa N Directional distribution of radiation around an accident at a uranium fuel factory in Tokai-mura, 1999 J Radiat Res (Tokyo) 2001, Mar, 42(1) 47-55

Final report on the dose estimation for three victims of the JCO accident, Editor Kenzo Fujimoto, April 2002, National Institute of Radiological Sciences, Chiba, Japan, NIRS-R-47

Liste des textes de référence :

- 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.
- Réglementation
 - *Décret n° 2002-254 du 22/02/2002 relatif à l'Institut de Radioprotection et de Sécurité 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 Sécurité 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*