

Contrôle du risque d'exposition aux actinides lors d'un arrêt de tranche dans une centrale nucléaire

B. LE GUEN¹, A. ROUPIOZ², B. RABU³, A. BOUVY⁴, J.F. LABOUGLIE⁵,
Y. GARCIER²

(Manuscrit reçu le 15 novembre 2002, accepté le 8 avril 2003)

RÉSUMÉ

La maîtrise du risque d'exposition interne à des radionucléides émetteurs alpha, pour les travailleurs des chantiers de maintenance des centrales PWR d'EDF, repose sur l'identification et la quantification de la contamination des circuits primaires. Les moyens de protection sont adaptés en fonction de l'analyse de risque préalable. En 2001, une expérimentation réalisée sur le site de Cattenom lors d'un arrêt de tranche présentant des défauts d'étanchéité du combustible, basée sur des mesures de radionucléides émetteurs α , a permis de définir un facteur réaliste de mise en suspension des particules de 10^{-6} m^{-1} . Pour cet arrêt de tranche, une surveillance adaptée des travailleurs a été mise en place en collaboration avec les services de médecine du travail et de radioprotection. Elle était basée sur une estimation préalable du niveau de contamination alpha, confirmée par des mesures sur frottis, une surveillance atmosphérique par balise, la mise en place de protections individuelles et collectives, et le suivi collectif par l'analyse de mouchages sur des agents sélectionnés en fonction de leur poste de travail et des mesures individuelles complémentaires (surveillance de l'excrétion fécale). Cette surveillance a permis de valider un suivi de chantier approprié, les protections collectives et individuelles mises en œuvre, et de vérifier lors cet arrêt de tranche l'absence de contamination des agents surveillés.

ABSTRACT

Control of the risk of exposure to alpha-emitting radionuclides during an outage in a nuclear power plant.

Control of the risk of external exposure of EDF PWR plant maintenance workers by alpha-emitting radionuclides is based on identification and quantification of the contamination of the systems. Appropriate arrangements are made to ensure protection on the basis of the prior analysis of the risk. In 2001, an experiment carried out at Cattenom Power Plant during a unit outage in the presence of a leaking fuel, based on measurement of alpha-emitting radionuclides, made it possible to determine a realistic factor for the resuspension of particles. On the basis of the experimental results, a resuspension factor of 10^{-6} m^{-1} for operational radiological protection was adopted. In the case of this unit outage, an appropriate surveillance system using this resuspension factor for workers was set in place in

¹ EDF, Laboratoire d'Analyses Médicales et de Radiotoxicologie, Service Central d'Appui en Santé au Travail, bâtiment Becquerel, 6 rue Ampère, B.P. 114, 93203 Saint-Denis Cedex, France.

² EDF, Branche Énergies, Division Production Nucléaire, 1 place Pleyel, 93282 Saint-Denis Cedex, France.

³ CEA, Laboratoire de Transfert de Contamination, SCCC/DEC/DEN, Centre de Cadarache, 13108 Saint Paul-lez-Durance Cedex, France.

⁴ EDF, Service Médecine du Travail, CNPE de Cattenom, B.P. 41, 57570 Cattenom, France.

⁵ EDF, Service de Radioprotection, CNPE de Cattenom, B.P. 41, 57570 Cattenom, France.

collaboration with the occupational medicine and radiological protection department. It was based on prior estimation of the level of alpha contamination, and confirmed by swipe measurements, atmospheric surveillance by monitors, and collective analysis by nose blow samples from workers selected on the basis of their workstations, as well as supplementary individual measurements (monitoring of faeces). This surveillance made it possible to validate an appropriate work area monitoring system, as well as the means of individual and collective protection adopted, and to establish that there was no contamination of staff by actinides during the unit outage.

1. Introduction

La contamination par des radionucléides émetteurs alpha (α) sur les tranches nucléaires du parc EDF en exploitation résulte de la présence de matière fissile (combustible UO_2 ou MOX) dans le circuit primaire. Cette matière fissile soumise au flux neutronique entraîne la formation d'actinides dont les plus couramment rencontrés sont les plutoniums (Pu), les américiums (Am), les curiums (Cm).

La présence de matière fissile dans le circuit primaire a différentes origines :

1. *le combustible endommagé en cours de fonctionnement* (défauts d'étanchéité des gaines du combustible à l'origine ou apparus en cours de cycle). Ceci est la principale cause de contamination ;
2. *l'existence de matière fissile sur les crayons de combustible avant leur chargement*. Elle est due à la contamination résiduelle des gaines en usine (en particulier, poussières d' UO_2 au voisinage du bouchon supérieur créés lors du chargement des pastilles dans les gaines sur les tables vibrantes). Les valeurs mesurées sont toujours inférieures au seuil autorisé pour le transport du combustible neuf ($< 0,04 \text{ Bq/cm}^2$ en alpha total) ;
3. *uranium naturel présent dans les matériaux de gainage*. La quantité d'uranium présente peut être estimée, à partir des activités mesurées sur un cœur sain, à moins de 0,5 g pour l'ensemble des assemblages d'un cœur.

Ces radionucléides émetteurs α peuvent se retrouver dans les circuits essentiellement sous 2 formes :

1. morceaux de pastilles de diamètres supérieurs à quelques microns et pouvant aller jusqu'à plusieurs millimètres. Ce cas se produit uniquement lors de ruptures totales de crayons combustibles. Compte tenu de leurs dimensions importantes, ces morceaux sont le plus souvent piégés dans les points singuliers des circuits (piquages, robinets et vannes) ou dans l'assemblage combustible lui-même. Ils vont provoquer des points chauds importants sur les circuits et seront parfaitement identifiables, par contre ils ne participeront que très peu à la contamination totale du circuit primaire ;

- particules très petites ($< 0,5 \mu\text{m}$) adsorbées sur les oxydes métalliques déposés sur le circuit primaire principalement dans les zones d'échanges thermiques et sur la surface des gaines des éléments combustible ou en suspension dans le fluide. Ces particules représentent le plus souvent la quasi-totalité de l'activité α du circuit primaire. Dans ces conditions, seule une partie des actinides est retenue sur les filtres du circuit de purification, l'autre partie reste présente dans le circuit primaire (effet mémoire) et est susceptible d'être relâchée longtemps après la pollution initiale (cas du démantèlement). Cet effet mémoire se traduit par un phénomène d'accumulation de la contamination au cours de la vie du réacteur, même pour de faibles disséminations à des cycles différents.

En fonctionnement normal, les radionucléides émetteurs α sous forme de particule sont pratiquement insolubles. Leur solubilité devient significative (quelques %) en phase de mise à l'arrêt (oxygénation).

Il y a donc lieu de distinguer deux types de contamination du circuit primaire :

- celle du fluide lui-même, dont le suivi radiochimique de l'eau du circuit primaire repose sur la recherche d'iode-134 (bon indicateur de présence de matière fissile) et des radionucléides α présents dans le circuit primaire ;
- celle des parois du circuit primaire hors flux, qui s'accumule au fur et à mesure de la vie de la centrale, et qui dépend donc tout autant de l'histoire de la tranche et des défauts survenus lors des cycles précédents que de l'état du gainage combustible dans le cycle en cours. La contamination « sous flux », quant à elle, est éliminée avec le renouvellement du combustible.

La tranche 3 de Cattenom a été déclarée en rupture de gaines sérieuse (RGS) définie par une activité alpha totale dans le fluide primaire supérieure à 4 Bq/l, avant son arrêt décennal qui a débuté le 24 janvier 2001.

Dès novembre 2000, un groupe de travail pluridisciplinaire (chimie, maintenance exploitation, radioprotection, communication et médecine du travail) sur le site, a mis en place une organisation pour atteindre plusieurs objectifs : pas de contamination interne du personnel par des actinides, pas de rejet de radionucléides émetteurs alpha, et éviter toute dissémination de ces radionucléides sur les autres tranches ou sur les autres sites.

2. Justification du facteur de mise en suspension

2.1. But de l'expérimentation et domaine d'application

La maîtrise du risque α sur les chantiers repose sur l'identification et la quantification de la contamination dont découlent les dispositions de protection

appropriées. Peu d'études existent sur ce sujet, aussi EDF a entrepris de valider le choix d'un facteur de mise en suspension par une expérimentation sur la tranche 3 du site de Cattenom et de permettre l'identification des radionucléides présents.

Cette expérimentation a permis la définition d'un facteur réaliste validé par un comité scientifique constitué d'experts.

Le site de Cattenom a été retenu pour sa représentativité liée :

- d'une part, à la quantité de radioéléments émetteurs « α » potentiellement présent sur les matériels traités lors du chantier,
- d'autre part, à la quantité d'aérosols potentiellement générée par l'activité du chantier.

Les expérimentations ont pu être menées en 3 emplacements :

- **le trou d'homme du pressuriseur** : ce chantier est confiné et est un bon indicateur de l'état de l'installation. De plus, il intervient très tôt pendant l'arrêt, il correspond à la première ouverture du circuit primaire et permet d'anticiper les actions à mettre en œuvre. Ces frottis ont été complétés par des frottis réalisés sur la face interne du couvercle de la cuve,
- **les boîtes à eau des générateurs de vapeur (GV)**,
- **les parois de la piscine du bâtiment réacteur (BR) après vidange.**

Le volume pris en compte a été le volume du BR. Une mesure a été faite en fond de piscine, à mi-hauteur puis en haut de la piscine.

Le **facteur de mise en suspension** (F_{susp}) est défini de la manière suivante : il s'agit du rapport de l'activité volumique à proximité d'une contamination surfacique sur l'activité surfacique source de l'activité volumique.

$$F_{\text{susp}} \text{ (m}^{-1}\text{)} = A_v \text{ (Bq m}^{-3}\text{)} / A_s \text{ (Bq m}^{-2}\text{)}$$

avec A_v : activité volumique (Bq/m³), F_{susp} : facteur de mise en suspension (m⁻¹) et A_s : activité surfacique (Bq/m²).

La mise en suspension est due au balayage des particules contaminées non fixées par l'air ambiant. Les résultats regroupés dans le tableau I, ont permis de mettre en évidence la valeur du facteur de mise en suspension des particules radioactives à 10⁻⁶ m⁻¹ (Boulaud *et al.*, 2003).

Il est à noter, qu'il n'est pas tenu compte en radioprotection de ce facteur lorsque le risque de dispersion de contamination volumique est grand par exemple lors de la pénétration à l'intérieur de capacités (générateur de vapeur, ...) lors de travaux induisant de l'abrasion (meulage, brossage, soudure, ...) ou de visite

TABLEAU I

Mesures et rapports β/α lors de l'arrêt de tranche 3 de Cattenom (2001). Les valeurs indiquées sont des moyennes réalisées à partir de plusieurs mesures.

Measurements and β/α ratios during Unit 3 outage (2001). The values given are the averages of several measurements.

Point de mesure	Date	Contamination béta (Bq/cm ²)	Contamination alpha (Bq/cm ²)	Rapport β/α
Couvercle cuve	23/2	9000	50	180
GV boîte à eau (BE) côté sortie	5/4	3500	50	70
GV BE côté entrée	5/4	5200	80	65
Pressuriseur	23/3	6500	50	130
Piscine Bat réacteur	28/2	2500	50	50
Robinetterie (valeur moyenne)		3000	25	120

interne sur les robinets de diamètre ≥ 400 mm (bras mort, etc.). Dans ce cas, les protections du personnel sont systématiquement maximales.

2.2. Résultat complémentaire : étude de la granulométrie

Un *impacteur* utilisé sur un chantier (générateur de vapeur en phase sèche) a permis de connaître la taille des aérosols des prélèvements atmosphériques. Les particules majoritaires sont de taille inférieure ou égale à 1 μm tandis que les autres particules sont supérieures à 10 μm . Le diamètre aérodynamique médian en activité (DAMA) est de 1 μm . La répartition granulométrique des radioéléments émetteurs α est assez homogène avec celles des émetteurs γ , ce qui est cohérent avec l'hypothèse que ces radioéléments sont présents sur ces mêmes aérosols.

3. Classement d'un chantier à risque de contamination par des radionucléide émetteur α

Les analyses radio-chimiques réalisées en cours de cycle permettent de déclarer une tranche potentiellement dite à risque « α » (présence d'actinides).

La mesure de contamination labile réalisée sur le couvercle de cuve en début d'arrêt de tranche permet de confirmer la présence du risque dit « α ».

Lorsque cette contamination dépasse 8 Bq/cm² en alpha, on considère que tous les chantiers réalisés sur les circuits RCP (réacteurs circuits primaires), RCV (réacteur contrôle volumétrique et chimique), RRA (réfrigération du réacteur à l'arrêt) et PTR (traitement et réfrigération des piscines) sont des chantiers à risque « α ».

Une cartographie de la contamination α surfacique est réalisée sur les parties actives des circuits à leur ouverture ou sur les matériels en début de chantier.

Ces mesures serviront :

- à réaliser la cartographie « α » de la tranche,
- à confirmer ou infirmer le classement du chantier à risque « α »,
- à établir le rapport β/α ,
- à mesurer l'évolution de la contamination d'un arrêt de tranche à l'autre.

3.1. Présence d'actinide sur les installations REP en exploitation

À EDF, un chantier est confirmé à risque « α » lorsque l'activité surfacique α labile est susceptible d'entraîner une contamination atmosphérique égale à 1 LDCA. Dans ces conditions, les mesures de prévention du risque d'exposition interne sont à mettre en œuvre sur le chantier.

Le seuil d'activité surfacique non fixé est calculé à partir de la LDCA α la plus pénalisante (^{241}Am) en prenant 10^{-6} m^{-1} (IPSN, 1994, confirmé par l'expérimentation sur le site de Cattenom) comme facteur de mise en suspension, c'est-à-dire qu'une contamination surfacique non fixée de 1 Bq/cm^2 entraîne une contamination volumique de $0,01 \text{ Bq/m}^3$. Ainsi, la valeur de contamination surfacique non fixée entraînant le classement d'un chantier « présence α » est de 8 Bq/cm^2 . Dans ces conditions, les mesures de prévention du risque d'exposition interne sont à mettre en œuvre sur le chantier.

Ce seuil d'activité surfacique labile calculé à partir de la LDCA α la plus pénalisante (^{241}Am), est calculée sur les modèles de la publication 30 de la CIPR (ICRP, 1979). La directive européenne 96-29 (JOCE, 1996) est moins pénalisante pour l' ^{241}Am (31 Bq/cm^2 pour une granulométrie de $5 \mu\text{m}$ et 21 Bq/cm^2 pour une granulométrie de $1 \mu\text{m}$) et son application pourra amener EDF à une réflexion sur la modification de ce référentiel.

Par ailleurs, les chantiers où des travaux abrasifs (meulage, brossage, ...) sont réalisés sur le circuit primaire ou les circuits connexes, sont classés par défaut chantier à risque « α » et sont traités à risque potentiel d'exposition interne.

3.2. La prévention du risque « α » pour les travailleurs

Les intervenants peuvent être soumis à un risque de contamination interne, par des actinides, au cours des travaux sur les composants de l'installation. Ce risque de contamination apparaît essentiellement lors des opérations de maintenance, lorsque, les couches d'oxydes des circuits en contact avec le fluide primaire subissent des attaques mécaniques (par meulage, découpe, etc.) ou lorsque le balayage par l'air ambiant remet en suspension les particules non fixées de la contamination surfacique.

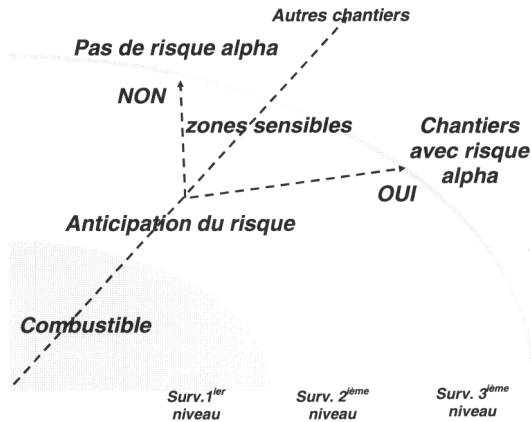


Figure 1 – Surveillance systématique des installations à trois niveaux d'investigation.
Facilities routine monitoring at three levels.

Lors d'intervention programmée, le risque d'inhalation, voire de contamination externe par ces particules, est exceptionnel car les intervenants sont protégés (heaume ou tenue étanche ventilée, ...). En situation incidentelle, ce double risque doit être pris en compte. D'autant plus que ces poussières sous forme d'aérosol peuvent se déposer sur d'autres parties de l'installation si le chantier n'est pas confiné, élargissant ainsi la zone à risque de contamination.

Toutes les installations ne présentent pas le même niveau de risque « α ». Celui-ci est en effet directement lié à l'historique du fonctionnement de l'installation et à la nature des travaux à réaliser. On estime que, pour un réacteur à eau sous pression (REP), le niveau moyen de contamination surfacique des circuits en contact avec le fluide primaire en radionucléides émetteurs α est de l'ordre de 0,5 à 1 Bq/cm² pour une tranche dite « propre ».

EDF a décidé de se doter à l'occasion de cet arrêt de tranche 3, d'un dispositif de surveillance systématique des installations à trois niveaux d'investigation (Fig. 1) :

- la surveillance en fonctionnement de l'eau primaire et des piscines, en tant que premier indicateur d'alerte et d'anticipation des dispositions particulières à prendre,
- la surveillance en début d'arrêt de tranche de certaines surfaces internes de l'installation particulièrement exposées, telles que le couvercle de cuve, afin de déterminer si un risque « α » est à prendre en considération de façon étendue,
- si ce deuxième niveau est positif, la surveillance de la contamination α des chantiers susceptibles de l'être est mise en place. Les dispositions courantes de

TABLEAU II

Tableau résumant les valeurs du coefficient de remise en suspension à Cattenom.
The average resuspension coefficient values obtained in Cattenom.

	Pressuriseur		Piscine		GV4	
	humide	sec	sec	humide	sec	impacteur sec
^{242}Cm	$4,93 \times 10^{-8}$		$3,30 \times 10^{-9}$	$4,88 \times 10^{-9}$		$6,21 \times 10^{-7}$
$^{243+244}\text{Cm}$	$9,39 \times 10^{-8}$			$8,67 \times 10^{-9}$		$3,67 \times 10^{-7}$
^{238}Pu	$8,97 \times 10^{-8}$	$3,94 \times 10^{-8}$			$5,45 \times 10^{-8}$	$3,94 \times 10^{-7}$
$^{239+240}\text{Pu}$	$1,56 \times 10^{-6}$		$3,09 \times 10^{-6}$	$8,81 \times 10^{-8}$	$1,26 \times 10^{-7}$	$1,06 \times 10^{-6}$

prévention d'une exposition interne sont alors décidées, en particulier, la mise en œuvre des moyens de protection individuelle et collective.

4. Surveillance radiologique de l'installation lors de l'arrêt de tranche 3

4.1. Contamination surfacique

Il est recommandé que les frottis soient réalisés sur une surface sèche. Le retour d'expérience montre que les frottis réalisés dès l'ouverture des circuits ne respectent pas toujours cette condition, certaines mesures peuvent être reprises plusieurs jours après le début du chantier (le rendement des frottis paraît très supérieur à 10 % sur une paroi humide).

Pour exemple, les mesures de frottis réalisées lors de l'arrêt de la tranche 3 de Cattenom (2001) sont indiquées dans le tableau II.

Le rapport β/α total le plus contraignant a été identifié sur les parois de la piscine du réacteur (50) et sur les surfaces d'échange thermique (boîte à eau générateur de vapeur, GV) (65 et 70).

Ces valeurs ne sont spécifiques que de la tranche 3 de Cattenom et pour ce cycle de fonctionnement. Le rapport β/α pouvant varier d'une tranche à une autre en fonction de son histoire, de l'ancienneté de la rupture de gaine.

4.2. Contrôle du matériel utilisé, avant son transfert vers une autre zone contrôlée

Matériels radioactifs sortis en cellules chaudes

L'objectif de ce contrôle a été double, il s'agissait de ne pas contaminer les cellules chaudes et de ne pas transférer de contamination de radionucléides émetteurs α

vers d'autres tranches. La valeur de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ est la limite de contamination α imposée par la réglementation relative aux transports pour les conteneurs chargés. C'est cette valeur qui a été retenue pour considérer qu'un matériel n'est pas contaminé avec des radionucléides émetteurs alpha et qui peut être transféré vers la zone contrôlée d'une autre tranche.

4.3. Contamination volumique

La surveillance de la contamination atmosphérique se fait en temps réel et en continu au moyen de balises de surveillance des aérosols β/α installée dans l'enceinte du bâtiment réacteur (BR), à l'extérieur des chantiers confinés pour s'assurer que leur confinement est effectif. Cette surveillance autorise la présence d'intervenants sans protection respiratoire en dehors des chantiers confinés.

Un protocole définit la surveillance de ces moyens de contrôle et la conduite à tenir en cas d'alarme.

Lorsque la contamination radioactive atteint des enceintes de grand volume, type bâtiment réacteur, des balises de surveillance des aérosols α/β complémentaires sont installées dans l'enceinte pour surveiller la radiotoxicité de l'air de celle-ci. Cette surveillance peut être complétée par des appareils de prélèvement aérosols (APA prélèvement permanent et mesure différée) pour apprécier les évolutions lentes et permettre de détecter les faibles activités.

Pour une contamination récente, la LDCA équivalente calculée est très proche de celle du ^{242}Cm , qui est largement majoritaire dans le mélange. Mais la période du ^{242}Cm est de 165 jours : la LDCA du mélange va donc rapidement évoluer et tendre vers celles des éléments à vie longue : plutonium et américium.

5. Protections prévues pour les chantiers

5.1. Protection collective

En fonction de la nature des travaux, la zone à risque peut se limiter à :

1. *une délimitation surfacique avec saut de zone.* Une zone de travail potentiellement contaminable est matérialisée au sol avec saut de zone. À la sortie du chantier, un contaminamètre est en place pour contrôler l'absence de contamination des intervenants ;
2. *un confinement dynamique de la zone de travail.* Le confinement dynamique assure le captage de la contamination à la source par la mise en service d'un appareil déprimogène au plus près de la zone d'émission ;
3. *un confinement stato-dynamique de la zone de travail.* Le confinement stato-dynamique confine la contamination dans la zone de travail. L'accès à cette

zone de travail est réalisé par un sas. Un déprimogène en aspiration dans la zone de travail confinée assure sa mise en dépression pour prévenir d'une dispersion de contamination hors de la zone de travail. Le sas de chantier est le moyen de confiner la contamination au plus près de sa source. Il sépare la zone de travail, où se trouvent les chantiers, de la zone dans laquelle les intervenants ne réalisent pas de travail technique (appelée zone hors travail ou zone de circulation). Toutes ces zones sont en dépression étagée de la moins contaminée vers la plus contaminée. À la sortie du sas, un contaminamètre est en place pour contrôler l'absence de contamination des intervenants. Une zone de déshabillage est prévue dans le sas permettant la sortie de la zone de travail. Le retrait de la tenue étanche ventilée est réalisé avec l'aide d'un déshabilleur lui même équipé d'un heaume ventilé dans le sas de sortie. L'objectif est de garantir la non-dispersion de la contamination des radioéléments émetteurs α hors des zones de travail, particulièrement lors des interventions.

En conséquence, tout chantier dit à risque de contamination par des radionucléides émetteur α , quel que soit son niveau d'activité, fait l'objet de :

- contrôles en sortie de chantier (mains-pieds) sur détecteur β/α , en plus des contrôles habituels en service permanent sur les installations,
- contrôles sortie de zone contrôlée sur portique gamma en tenue de travail,
- contrôles corps entier, en sous-vêtement, en sortie de zone contrôlée sur portique β ,
- contrôles corps entier, en vêtements civils, sur détecteurs gamma (C3), en sortie de site.

5.2. Protection individuelle

Sur les chantiers confirmés à risque « α », le personnel doit s'équiper d'une protection vestimentaire.

Dans la pratique, les protections individuelles sont :

- pour les intervenants dans le sas de travail, une tenue étanche ventilée,
 - pour le déshabilleur dans le sas de sortie une sur-tenue, des gants vinyles, des sur-bottes et un heaume ventilé.
1. La protection du personnel intervenant est obligatoirement assurée par une protection des voies respiratoires lorsque la contamination surfacique α est susceptible d'entraîner une contamination atmosphérique de 1 LDCA avec un facteur de mise en suspension de 10^{-6} m^{-1} .
 2. Au-delà de 100 LDCA et pour les pénétrations en capacité, cette protection est obligatoirement assurée par une tenue étanche ventilée.

3. Cas particuliers : pour les chantiers en milieu humide, la sur-tenu est étanche à l'eau. Pour des chantiers de courte durée, une tenue vinyle peut être utilisée. Au-delà, elle est remplacée par une tenue étanche ventilée. Le médecin du travail fixe la durée limite d'intervention en tenue vinyle en fonction des conditions de température et de pénibilité du travail.

6. Arrêt de tranche 3 en 2001 sur le site de Cattenom

6.1. Surveillance des travailleurs exposés à un risque alpha

La surveillance radiotoxicologique des travailleurs exposés au risque actinides de type oxyde a deux objectifs :

- *à titre collectif*, garantir que dans les situations habituelles de travail sur l'ensemble de l'installation les expositions restent conformes aux recommandations de la publication 75 de la CIPR (ICRP, 1997). Pour ce faire, des analyses radiotoxicologiques sont réalisées sur un échantillonnage représentatif du groupe de travailleurs exposés, permettant de s'affranchir de toute surveillance individuelle pour le personnel non directement exposé. Cette surveillance complète les mesures d'ambiance (mesures de concentrations atmosphériques, frottis surfaciques...) qu'elle valide ;
- *à titre individuel*, avoir la possibilité d'estimations dosimétriques précises dans toutes les situations de travail (incident, chantier) où le risque d'exposition peut conduire à des doses supérieures à 1 mSv sur l'année. Le niveau d'enregistrement (NE) fixé à EDF, valeur consensuelle à partir de laquelle toute dose sera comptabilisée, est fixé à 0,5 mSv. Ce niveau est basé sur une contamination par des produits d'activation émetteurs γ dont les incertitudes de mesure et de reconstruction de dose lors d'une contamination sont plus faibles que pour les radionucléides émetteurs α . Il constitue le seuil « minimal » que les moyens de la surveillance individuelle doivent permettre de détecter.

Il s'agit donc d'un objectif opérationnel qui guidera le choix :

- du type d'examen(s),
- de sa(leur) périodicité,
- des conditions de recueil des échantillons biologiques (avec ou sans exclusion de la zone contrôlée).

La connaissance des postes de travail et l'évaluation des risques associés (risque potentiel ou avéré d'exposition aux radionucléides émetteurs α) sont essentielles pour guider les choix du type de surveillance à mettre en œuvre, en fonction de l'importance des niveaux d'exposition (Le Guen *et al.*, 2000).

6.2. Choix du type de surveillance

Les voies d'incorporation, portes d'entrées des substances, sont surtout l'inhalation dans le cas des travailleurs. En première intention, les paramètres physiques par défaut utilisés à EDF sont ceux de la publication 78 de la CIPR (ICRP, 1998) : un DAMA égal à $5 \mu\text{m}$ avec un écart-type de 2,5 et une densité des particules égales à 3 g cm^{-3} .

Le report des limites de détection usuelles des différentes analyses sur les courbes d'excrétion et de rétention correspondante, permet de choisir le/les type(s) d'examen(s) adapté(s) en fonction de l'objectif opérationnel retenu (NE = 0,5 mSv, Fig. 1).

Les mesures anthroporadiométriques pulmonaires pour un niveau faible de contamination par des radionucléides émetteurs α , ne permettent pas de mettre en évidence une incorporation d'actinide en raison de leur limite de détection trop élevée.

Si l'on compare, en cas d'inhalation d'oxyde, les valeurs d'excrétion urinaire et fécale, connaissant la limite de détection de la spectrométrie, il apparaît que la surveillance par les fécès est incontournable (Fig. 2). Pour être représentatif de l'excrétion fécale sur 24 heures, compte-tenu des fluctuations quotidiennes du transit, le prélèvement doit être effectué sur 3 jours consécutifs et le résultat moyenné sur ces 3 jours. Du fait du grand nombre d'intervenants et pour permettre un suivi en continu du chantier, le service médical a mis en place un principe de sélection des intervenants ayant fait l'objet d'investigation (examen radiotoxicologique des selles).

Les activités sources d'incidents de contamination sont :

- le déshabillage sans protection respiratoire dans les sas. Pour les chantiers mettant en œuvre le port de tenue ventilée, une assistance au déshabillage est donc préconisée à EDF,
- la manipulation de matériel initialement immergé après séchage,
- les interventions sur des circuits comportant des oxydes métalliques,
- et plus rarement le changement des filtres sur les déprimogènes.

6.3. Mouchages en sortie de zone

Dans le cas d'un chantier identifié à risque α , un suivi opérationnel par mouchage peut être mis en place qui complète la surveillance atmosphérique.

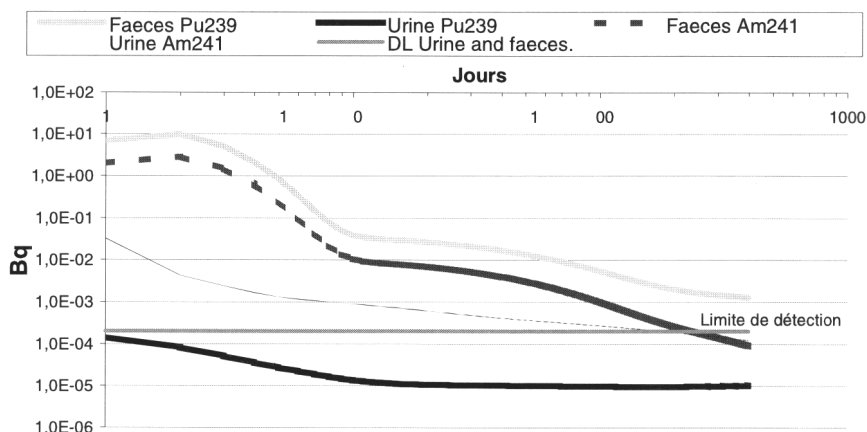


Figure 2 – Courbes d'excrétions et de rétention pour le ^{239}Pu de type S (forme oxyde) et ^{241}Am de type M et pour un AMAD de $5\ \mu\text{m}$, pour une inhalation unique correspondant à une dose efficace de $0,5\ \text{mSv}$.

Faeces and urine curves for ^{239}Pu (oxide form) type S and ^{241}Am type M for an AMAD of $5\ \mu\text{m}$ and a single inhalation corresponding to $0.5\ \text{mSv}$.

L'analyse de risque du chantier doit permettre d'éviter des mouchages systématiques pour tous les intervenants mais au contraire de cibler les intervenants en fonction de leur poste de travail.

En cas d'évacuation du bâtiment réacteur, suite au déclenchement d'une balise α , tout le personnel évacué doit faire un mouchage ainsi qu'une anthropogammamétrie. Les situations de contamination sont le plus souvent mixtes (mélange de produits d'activation, de fissions et d'actinides).

Sur le site de Cattenom, lors de l'arrêt de tranche réalisé en 2001, 665 prélèvements par mouchage ont été analysés en laboratoire correspondant à 470 intervenants différents. Une mesure β et α total a été effectuée.

- 219 prélèvements avaient une mesure positive en β . 177 prélèvements se situaient entre 0,1 et 0,5 Bq, 40 entre 0,5 et 1 Bq, 1 à 11 Bq et 1 à 110 Bq.
- 9 mouchages avaient une mesure α positive dont 6 à 0,03 Bq (seuil de détection) et les trois autres à 0,18, 0,20 et 0,22 Bq respectivement.

Tous les intervenants qui avaient des mouchages positifs en comptage α étaient positifs en comptage β .

6.4. Examens radiotoxicologiques des selles

La recherche d'une contamination interne par des actinides ne peut se faire que par une recherche de radionucléides émetteurs α dans les selles.

Les critères retenus pour faire réaliser des examens radiotoxicologiques des selles lors de l'arrêt de tranche sont les suivants :

- incident (déclenchement de balise aérosols α , évacuation du bâtiment réacteur, déclenchement des portiques de détection de sortie de zone contrôlée),
- détection d'une contamination interne par des radionucléides émetteurs γ ,
- présence de radioéléments émetteurs α sur mouchoir.

Pour ne pas risquer de majorer l'estimation de la dose à partir d'un résultat unique, les prélèvements ont été réalisés sur 3 jours après une période d'exclusion du poste de travail de 4 à 10 jours, ce qui a permis de s'affranchir de la période de décroissance rapide des courbes d'excrétion.

Par ailleurs, pour les analyses de fécès, soulignons le problème d'une majoration souvent importante des résultats du fait du transit digestif direct des plus grosses particules si l'on ne respecte pas une période d'exclusion minimale de 4 jours.

40 prélèvements ont été analysés par spectrométrie γ et α correspondant à 16 travailleurs. 4 analyses de selles se sont révélées positives en γ mais seuls des produits d'activation ont été retrouvés. Aucune selle n'a mis en évidence une contamination α .

7. Organisation mise en place et enseignements

Une organisation nécessite l'étude des postes de travail. Pour exemple, l'analyse de risque α a été aisée pour les chantiers très spécifiques comme la robinetterie, mais beaucoup plus difficile pour les entreprises de servitudes nucléaires dont les activités pour un même personnel pouvaient être très variées.

L'information du personnel intervenant est fondamentale. Dans cette voie, une plaquette d'information a été réalisée avec le concours du service de la communication. Cette information sur le long terme a été très bénéfique pour rappeler les bases de la radioprotection, et surtout des techniques d'intervention en atmosphère contaminée. Il était fondamental de bien faire comprendre au personnel que l'incorporation d'une activité α avait des conséquences sanitaires plus pénalisantes que l'incorporation de la même activité en émetteurs β ou γ , mais que le risque de contamination n'était pas plus important qu'à l'habitude, si les règles de radioprotection élémentaires étaient respectées. Cette information ou ce rappel a permis de tenir le personnel en alerte et est une des raisons du succès de cet arrêt de tranche.

Lors de l'information, il est important de rappeler que le risque « α » ne doit pas faire oublier que le risque, depuis la chute des barres jusqu'à l'ouverture des circuits, est celui de l'iode et des gaz rares.

En raison du nombre d'intervenants important dans un bâtiment réacteur lors d'un arrêt de tranche et de la nécessité d'un suivi en continu, il a fallu définir des critères permettant de déterminer le personnel bénéficiant de mouchages :

- pour tous les intervenants sur des chantiers définis comme à risque « alpha »,
- tous les personnels des entreprises « servitude nucléaires »,
- les personnes choisies sur un groupe intervenant dans le bâtiment réacteur hors chantier à risque alpha,
- les personnes évacuées lors de déclenchement de balises,
- les personnes qui ont fait déclencher les portiques de sortie de zone contrôlée ou de sortie de site.

Par ailleurs le choix de l'échantillonnage pour les demandes de selles repose sur une bonne traçabilité des intervenants du chantier concerné. En cas de positivité d'un prélèvement de selles, l'objectif est de pouvoir contrôler tous les intervenants du même chantier.

L'identification et l'anticipation des phases à risque ont été prises en compte. Le but a été de limiter le nombre d'intervenants au minimum. Une information du personnel sur les résultats et le nombre de mouchages est importante. Elle permet d'optimiser la radioprotection. Une surveillance particulière de la restitution des mouchages des entreprises intervenantes et des services EDF avec relevé journalier donné à chaque réunion d'arrêt de tranche permet aux donneurs d'ordre de mesurer l'écart entre l'effectif présent et le nombre de mouchages réalisés et d'intervenir si nécessaire pour que l'entreprise respecte ses obligations.

8. Conclusion

Cette étude sur le risque « α » en centrale nucléaire avait pour objet de montrer comment EDF prenait en compte ce risque spécifique. Ces radioéléments émetteurs « α » sont plus insidieux car, plus difficile à détecter et plus radiotoxique à égalité d'activité incorporé que les radioéléments émetteur gamma.

En conséquence, les principes des dispositions qui ont été prises lors de l'arrêt de tranche 3 sur Cattenom ont été les suivantes :

avant le début du chantier :

- une analyse de risque,
- une information/formation des personnels intervenants sur les risques encourus,
- une mise en place d'un confinement du chantier ;

pendant le chantier :

- mise en place d'une surveillance radiologique spécifique (balises pour le contrôle volumique, frottis pour le contrôle surfacique),
- intervention en tenue ventilée étanche et par voie de conséquence, mise en place de sas d'habillage et de déshabillage,
- surveillance médicale spécifique des intervenants (mouchage, examens radiotoxicologiques des selles) ;

après le chantier :

- décontamination préalable du chantier avant démontage et décontamination du matériel avant sa sortie,
- contrôle de propreté par frottis.

L'expérimentation mise en place à Cattenom a permis de mettre en évidence l'efficacité de l'action combinée des équipes de radioprotection et du service de santé au travail, relayée auprès des intervenants en centrale par la communication. L'information grâce à une plaquette distribuée et la formation du personnel intervenant ont été fondamentales pour la réussite de l'arrêt de tranche 3. Cette organisation a pu être reprise en 2002 lors d'un arrêt de tranche sur le CNPE de Penly, de Paluel et de nouveau sur la tranche 1 et 3 de Cattenom.

REFERENCES

- Boulaud D., Gerasimo P., Martin G., Martinot L., Nourreddine A., Sens J.C. (2003) Évaluation du facteur de mise en suspension dans les installations nucléaires, *Radioprotection* **38**(4), à paraître.
- ICRP Publication 30 (1979) Limits for the Intakes of Radionuclides by Workers, *Ann. ICRP* **2**(3-4).
- ICRP Publication 75 (1997) General Principles for the Radiation Protection of Workers, *Ann. ICRP* **27**(1).
- ICRP Publication 78 (1998) Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers: Replacement of ICRP Publication 54, *Ann. ICRP* **27**(3-4).
- IPSN (1994) IPSN-report, Study of the transfer of radioactive material deposited in steam generator 3 of Chooz A Nuclear Power Plant, SERAC/LPMA/94-10.
- JOCE (1996) Directive 96/29 Euratom du conseil du 13 mai 1996 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants, JOCE n° 159.
- Le Guen B., Bérard P., Gonin M., Bailloeuil C., Carles M., Gibert B. (2000) Occupational monitoring and dosimetric uncertainty concerning actinides: experience feedback and optimisation, *IRPA* **10**(5-3), P-6a-306.