

Chapitre 31

Optimisation de la radioprotection et limitation des doses reçues par les travailleurs lors des interventions dans une centrale électronucléaire

Les principes de radioprotection sont présentés dans le chapitre 1 du présent ouvrage: ce sont la justification, l'optimisation et la limitation des doses dues aux rayonnements ionisants reçus par les travailleurs et les personnes du public.

Rappelons que, selon le principe d'optimisation dans la réglementation française, les expositions professionnelles individuelles et collectives aux rayonnements ionisants sont maintenues en deçà des limites prescrites au niveau le plus faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre (principe dit ALARA⁸⁶⁴).

Le but du présent chapitre est d'illustrer la mise en œuvre de ce principe par Électricité de France sur la base de quelques exemples d'interventions effectuées dans des centrales du parc électronucléaire français, ainsi que d'évoquer un certain nombre de dispositions retenues ou envisagées par Électricité de France pour réduire encore, dans les années à venir, les doses reçues par les travailleurs lors de certains

864. *As Low As Reasonably Achievable.*

types d'interventions. Quelques aspects de la démarche d'optimisation en radioprotection adoptée pour la conception du réacteur EPR seront aussi évoqués, de manière succincte.

L'optimisation de la radioprotection est à mener dans différents contextes: lors d'interventions pour une remise en conformité d'équipements, lors de modifications visant à renforcer la sûreté d'un réacteur, lors de travaux de maintenance et lors d'opérations de surveillance en service d'équipements.

La démarche ALARA a été mise en œuvre par Électricité de France depuis le début des années 1990, pour développer des efforts, tant de son personnel d'exploitation que de ses prestataires, de réduction des doses individuelles et collectives; celles-ci ont ainsi été en moyenne divisées par un facteur d'environ 2 à 3 en 20 ans⁸⁶⁵. L'évolution des doses collectives est représentée sur la figure 31.1 ci-après⁸⁶⁶.

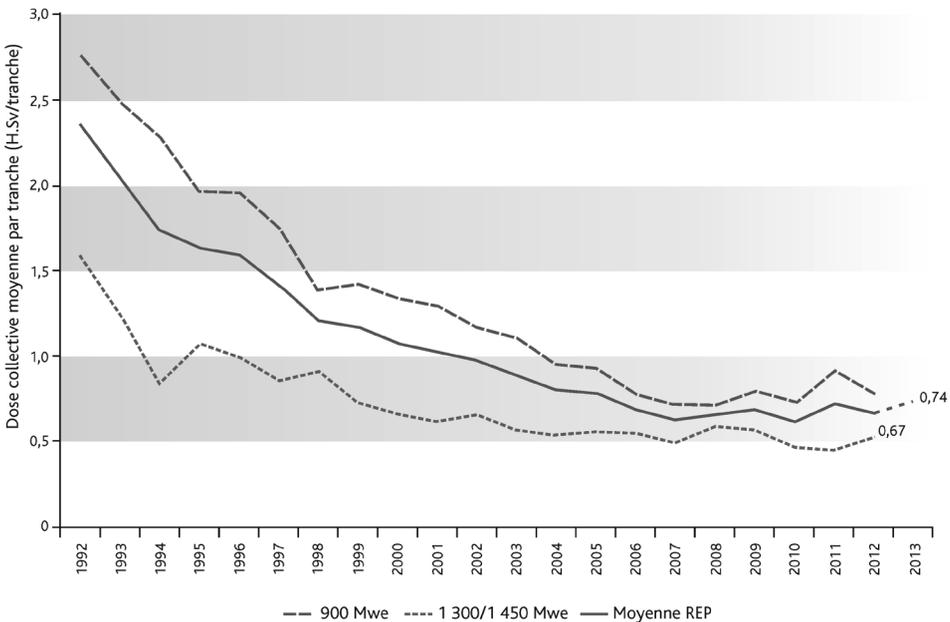


Figure 31.1. Évolution depuis 1992 (jusqu'au début des années 2010) de la dose collective moyenne par réacteur (homme.Sievert par réacteur) issue de la dosimétrie opérationnelle pour le parc et les tranches de 900 MWe et de 1 300 ou 1 450 MWe. IRSN.

865. Voir le « Mémento de la radioprotection en exploitation » d'EDF, édition de 2014.

866. Les doses collectives sont du même ordre de grandeur que celles relatives aux parcs de réacteurs à eau sous pression étrangers (Belgique, Allemagne, États-Unis...).

31.1. Les sources de rayonnements ionisants dans un réacteur électronucléaire

Dans un réacteur électronucléaire (à eau sous pression) en exploitation, les sources de rayonnements ionisants sont de trois types :

- **les produits issus des fissions des noyaux fissiles** que sont l'uranium 235, ainsi que le plutonium 239 dans les assemblages combustibles de type MOX (voir le chapitre 5 qui rappelle un certain nombre de notions de physique des réacteurs à eau sous pression) : ces produits de fission sont principalement l'iode 131, le xénon 133, le krypton 85, les césiums 134 et 137 ; ils peuvent être disséminés dans l'eau du circuit primaire en cas d'inétanchéité du gainage des crayons des assemblages combustibles. Les produits de fission sont émetteurs de rayonnements β et γ ;
- **les produits d'activation** d'éléments (structures métalliques et leurs produits de corrosion, eau du circuit primaire, air...) soumis au flux neutronique ; les produits de corrosion (activés) véhiculés par le fluide primaire et déposés sur les surfaces des composants des circuits primaire et auxiliaires sont principalement les isotopes 58 et 60 du cobalt et, dans une moindre mesure, l'argent 110 m et l'antimoine 124. Les produits d'activation sont émetteurs de rayonnements β et γ . Ils contribuent à plus de 90 % aux doses reçues par les travailleurs, notamment lors des périodes d'arrêt des réacteurs pour maintenance et rechargement du combustible dans le cœur ;
- **les actinides**, constitués de noyaux lourds qui sont présents dans le combustible introduit dans le cœur ou qui résultent de captures neutroniques successives : il s'agit principalement des isotopes 239 et 240 du plutonium, de l'américium 241, des isotopes 242 et 244 du curium. Ils peuvent être disséminés dans l'eau du circuit primaire en cas d'endommagement sérieux des gaines du combustible. Ils sont émetteurs de rayonnements α , β , γ et de neutrons.

31.2. Exemples d'optimisation de la radioprotection des travailleurs

Quelques aspects d'une démarche d'optimisation des expositions des travailleurs sont illustrés ci-après, de façon qualitative ou quantitative, sur la base de deux travaux réalisés dans les réacteurs du parc électronucléaire français ; il s'agit des travaux de remise en conformité des puisards et des caniveaux des bâtiments des auxiliaires nucléaires (BAN) et des bâtiments de traitement des effluents (BTE), ainsi que des travaux d'épaississement des radiers des réacteurs de la centrale nucléaire de Fessenheim.

Des travaux de remise en conformité des puisards et des caniveaux des bâtiments des auxiliaires nucléaires (BAN) et des bâtiments de traitement des effluents (BTE) ont été menés dans l'ensemble des 58 réacteurs du parc électronucléaire entre 2002 et 2006, en application de l'arrêté du 31 décembre 1999 fixant la réglementation

générale destinée à prévenir et limiter les nuisances et les risques externes résultant de l'exploitation des installations nucléaires de base⁸⁶⁷. La nécessité d'une réfection des puisards et des caniveaux était apparue à la suite de visites réalisées dans le cadre des programmes de base de maintenance préventive des ouvrages de génie civil (mise en évidence de défauts d'étanchéité). Ces travaux étaient de nature complexe en raison du nombre d'opérations nécessaires, d'un enjeu radiologique important et d'un délai souhaité de réalisation court. Les sources de rayonnements au niveau des puisards et des caniveaux étaient essentiellement contenues dans des boues.

Pour ces travaux, Électricité de France a mis en place une organisation spécifique sous le pilotage de la Division de la production nucléaire (DPN). Par ailleurs, les entreprises extérieures des différents corps de métiers concernés (assainissement, génie civil, mécanique, peinture) se sont organisées en groupement momentané d'entreprises (GME).

De façon générale, la préparation des travaux a été fondée sur :

- une décomposition et un ordonnancement des différentes opérations à effectuer,
- une estimation prévisionnelle des doses reçues par les intervenants lors de ces opérations,
- une démarche d'optimisation de la radioprotection,
- la mise en œuvre d'un processus de retour d'expérience au fil des travaux menés sur les différents sites.

L'élaboration de la démarche d'optimisation a d'abord été menée pour le premier chantier réalisé dans le réacteur n° 1 de la centrale nucléaire du Tricastin en 2002. Cette démarche a permis d'établir un scénario optimum générique et de dégager des pistes d'optimisation supplémentaires. Trente-six options (ou « bonnes pratiques ») ont ainsi été examinées, dans quatre domaines :

- réduction des sources de rayonnements,
- protections biologiques,
- travail à distance,
- durée de l'intervention.

Parmi les 36 options examinées, dix ont été écartées car les gains escomptés en termes de doses aux opérateurs étaient faibles en regard des inconvénients. Voici, à titre illustratif, quelques options étudiées et les décisions qui en ont résulté :

- ouverture partielle des caniveaux pour intervenir plus facilement lors des opérations, mise en eau des puisards adjacents aux zones d'intervention ; ces deux options, de nature à réduire les débits de doses ambiants pour les opérateurs, ont été retenues ;

867. Abrogé depuis par l'« arrêté INB ».

- décontamination chimique des tuyauteries des circuits d'injection de sécurité (RIS) et de contrôle chimique et volumétrique (RCV), afin de réduire les débits de doses ambiants aux postes de travail; cette option n'a pas été retenue, pour des raisons de difficulté de mise en œuvre;
- humidification des boues, afin notamment d'éviter la dispersion de matière; cette option n'a pas été retenue, car elle aurait aussi entraîné l'humidification et la contamination du béton;
- utilisation de perches pour l'aspiration des boues; cette option, de nature à réduire les doses pour les opérateurs, a été retenue;
- décontamination robotisée de l'intérieur des puisards; cette option n'a pas été retenue en raison de difficultés de mise en œuvre (manipulation d'un système contaminé, entreposage d'un équipement irradiant, pas de gain de temps de présence à cause du pilotage...).

Un autre exemple peut être présenté, concernant les travaux d'épaississement de chacun des radiers des deux réacteurs de la centrale nucléaire de Fessenheim, sujet qui a fait l'objet en 2011 d'une prescription de l'Autorité de sûreté nucléaire dans le cadre d'une décision relative à la poursuite de l'exploitation de ces réacteurs après leurs troisièmes visites décennales (réacteurs de 900 MWe du premier groupe CPO, mis en service en 1978). En effet, il était apparu que, pour certains scénarios d'accident de fusion du cœur avec percée de la cuve, le radier de ces réacteurs pourrait être traversé par le corium dans un délai inférieur à 24 heures. La valeur d'épaississement retenue a été de 50 cm, portant l'épaisseur de chaque radier de 1,5 à 2 m. La solution retenue a de plus visé à permettre au corium de s'étaler dans un local adjacent au puits de cuve, par un tunnel de transfert.

Compte tenu des conditions radiologiques régnant dans le puits de cuve, cette opération ne pouvait être conduite qu'en état d'arrêt du réacteur concerné, après un déchargement complet du cœur.

Électricité de France a mis en œuvre une démarche d'optimisation qui a permis d'abaisser à 90 homme.millisievert la dose collective initialement estimée à 280 homme.millisievert. Les différentes opérations à réaliser et les temps d'intervention ont été précisés à l'aide d'une maquette à l'échelle 1 de la zone d'intervention dans un réacteur. Le choix d'un béton autolissant a permis de réduire le temps d'intervention dans le puits de cuve. Par ailleurs, pour éviter un endommagement du système d'instrumentation du cœur du réacteur (système RIC), dont les tubes de mesure cheminent en partie basse du puits de cuve, les sondes neutroniques ont été retirées pendant les travaux (cette opération de retrait s'accompagnait d'expositions supplémentaires, compensées par des gains dosimétriques pendant les travaux d'épaississement du radier). Les opérations réalisées dans chaque réacteur ont conduit à des doses collectives effectivement reçues par les opérateurs de 72 homme.millisievert.

31.3. Dispositions prises pour les opérations dites de grand carénage

En 2010, Électricité de France a décidé d'engager une opération de grande ampleur, aussi appelée grand carénage, destinée à rénover l'ensemble des réacteurs du parc électronucléaire, dans l'objectif d'une extension de leur durée de fonctionnement au-delà de 40 ans. L'objectif est double :

- d'une part anticiper et maîtriser le vieillissement des équipements par le suivi de leur état d'usure et leur remplacement si nécessaire ;
- d'autre part améliorer la sûreté des installations pour atteindre un niveau de sûreté comparable à celui visé pour les nouveaux réacteurs ; les objectifs de sûreté que s'est fixés Électricité de France portent principalement sur la réduction de la probabilité de fusion du cœur et la limitation des conséquences radiologiques en cas d'accident.

Les travaux de rénovation correspondants concernent de nombreux matériels et systèmes ; ils comportent notamment :

- la poursuite du remplacement des générateurs de vapeur équipés de tubes en alliage 600⁸⁶⁸ (réacteurs de 900 MWe et de 1300 MWe),
- les modifications retenues dans le cadre des réexamens périodiques associés aux visites décennales (VD4 pour les réacteurs de 900 MWe, VD3 pour les réacteurs de 1300 MWe et VD2 pour les réacteurs de 1450 MWe),
- des interventions liées à l'application de la réglementation concernant les équipements sous pression nucléaires (ESPN),
- des modifications résultant des évaluations complémentaires de sûreté (ECS) menées à la suite de l'accident survenu à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi au mois de mars 2011.

Ces travaux sont à mener aussi bien dans la partie conventionnelle que dans l'îlot nucléaire des centrales, et donc pour certains sur des systèmes véhiculant des fluides radioactifs ou à proximité de ces systèmes. Afin de déterminer l'impact de ces travaux sur la radioprotection des travailleurs (aussi bien ceux d'Électricité de France que ceux des entreprises prestataires), Électricité de France a évalué le contour et l'accroissement du « volume » des opérations à mener dans les locaux et leurs enjeux de radioprotection par rapport aux opérations et pratiques mises en œuvre jusqu'alors à l'occasion des arrêts de tranches.

Selon cette évaluation, réalisée en 2013, les travaux devaient se traduire par une augmentation significative du volume de maintenance sur la période 2015-2025, ainsi que des doses associées. Une mise à jour de cette évaluation, réalisée deux ans plus tard par Électricité de France, a montré une augmentation nettement moins significative des

868. Voir le paragraphe 27.3.

doses prévisionnelles (voir la figure 31.2), conséquence d'un étalement des travaux dans le temps et de la mise en œuvre de « leviers » d'optimisation de la radioprotection.

Les dispositions retenues par Électricité de France tant en matière organisationnelle que technique pour la mise en œuvre de l'optimisation de la radioprotection pour les opérations de rénovation des réacteurs ont été présentées et discutées en 2015 avec les organismes de sûreté. Ce fut l'occasion de faire un bilan des pratiques d'Électricité de France, ainsi que de ses performances et du retour d'expérience depuis le début des années 1990 en matière de radioprotection.

L'analyse a souligné l'importance pour la radioprotection des éléments organisationnels suivants :

- l'existence de processus réactifs :
 - de retour d'expérience des événements liés à la radioprotection,
 - de capitalisation, diffusion et mise à jour régulière des bonnes pratiques mises en œuvre sur les sites en matière de radioprotection,
 - d'intégration dans les analyses de risques des situations dégradées « prévisibles » et des situations de co-activité ;
- l'implication des prestataires dans les études d'optimisation ;
- la vérification, à l'issue des premiers arrêts de tranche du projet de rénovation des réacteurs, du caractère suffisant, en termes de nombre et de compétences, des personnes affectées à la fonction de « responsable de zone » (fonction récente d'appui et de conseil, à l'interface des domaines de la logistique et de la prévention des risques).

Sur le plan technique, les objectifs ou dispositions retenus concernent notamment :

- le remplacement autant que raisonnablement possible des matériaux revêtus de stellite⁸⁶⁹ (matériau dur à base de cobalt) ;
- la réduction des pollutions ponctuelles par l'argent 110m et l'antimoine 124⁸⁷⁰ ;
- le polissage électrochimique des boîtes à eau des générateurs de vapeur. Du fait de la diminution de la rugosité des surfaces, celles-ci « accrochent » moins des produits de corrosion activés ; cela entraîne un gain significatif sur les débits de doses dans les boîtes à eau et dans une moindre mesure sur les débits de doses au niveau des planchers des générateurs de vapeur. Tous les générateurs de vapeur de remplacement (matériels neufs) sont soumis à cette opération ;

869. Ce matériau est présent, sous forme de revêtements déposés ou sous forme de pièces massives dures, dans des zones de contact présentant des besoins fonctionnels forts d'étanchéité, de guidage avec frottement ou de glissement.

870. On trouve l'argent dans l'alliage neutrophage AIC (Ag-In-Cd) utilisé pour les grappes absorbantes ou dans des joints d'étanchéité Helicoflex ; l'antimoine est un constituant des « grappes sources » secondaires (ou anciennement dans des butées et paliers à base graphite de pompes de circuits auxiliaires).

- la poursuite de l’optimisation de la chimie du fluide primaire en vue de réduire la quantité et la radioactivité des produits de corrosion contenus dans le fluide primaire (injection d’acétate de zinc, purification à grand débit du fluide primaire en phase d’arrêt, augmentation de la teneur en hydrogène de l’eau pour réduire le risque de corrosion sous contraintes...)
- la mise en œuvre des dispositions curatives les plus efficaces en matière d’assainissement et de chasse aux « points chauds »⁸⁷¹ (que ce soit dans les réacteurs ou dans les piscines d’entreposage du combustible);
- une mise en œuvre accrue de téléopérations (y compris la technique de soudage de tuyauteries par téléopération pour les remplacements des générateurs de vapeur des réacteurs de 1300 MWe).

L’examen effectué en 2015 a également permis d’analyser les perspectives en matière d’optimisation et de réduction des doses pour les différents chantiers réputés les plus « dosants » et les « métiers » les plus exposés. Ces chantiers concernent notamment les remplacements :

- des générateurs de vapeur,
- des cannes chauffantes du pressuriseur,
- des broches des guides des grappes,
- des mécanismes de commande des grappes,
- de la partie en « té » du circuit de refroidissement du réacteur à l’arrêt (RRA).

Les « métiers » les plus exposés sont notamment ceux dont les activités concernent les calorifuges ou les échafaudages, ainsi que les mécaniciens, les soudeurs, les robinetiers et les contrôleurs par gammagraphie (qui effectuent les « tirs » radiographiques).

Les potentialités d’une utilisation plus générale du sélénium 75 pour les tirs gammagraphiques⁸⁷², à la place de l’iridium 192, ont par exemple été examinées – la qualité d’image étant par ailleurs meilleure avec le sélénium 75. Le sélénium 75 présente des avantages pour la radioprotection (à activité égale de la source, le débit de dose [en mGy/h] à 1 mètre est, pour une source de sélénium 75, divisé par 2,5 par rapport à celui d’une source d’iridium 192), mais l’emploi de ce radionucléide, de par ses caractéristiques, ne pourra pas être généralisé à l’ensemble des contrôles par gammagraphie : il ne peut en effet être utilisé de façon efficace que pour des structures métalliques dont l’épaisseur n’excède pas 30 à 40 mm. Si Électricité de France est moteur dans l’élargissement de l’emploi de ce radionucléide lors des contrôles gammagraphiques, les diffi-

871. Un « point chaud » est une source ponctuelle, généralement constituée de particules actives de cobalt 60, générant à sa proximité immédiate un débit de dose très largement supérieur au débit de dose ambiant du local. Électricité de France a établi des recueils de bonnes pratiques pour éliminer ces « points chauds ».

872. Le lecteur pourra aussi, sur ce sujet, consulter l’ouvrage « État des recherches dans le domaine de la sûreté des réacteurs à eau sous pression », J. Couturier & M. Schwarz, Collection sciences et technique, IRSN/EDP Sciences, 2017, paragraphe 10.1.2.

cultés d’approvisionnement et le coût important des sources, ainsi que les limitations liées au contexte normatif⁸⁷³ font que son utilisation reste encore limitée sur les sites.

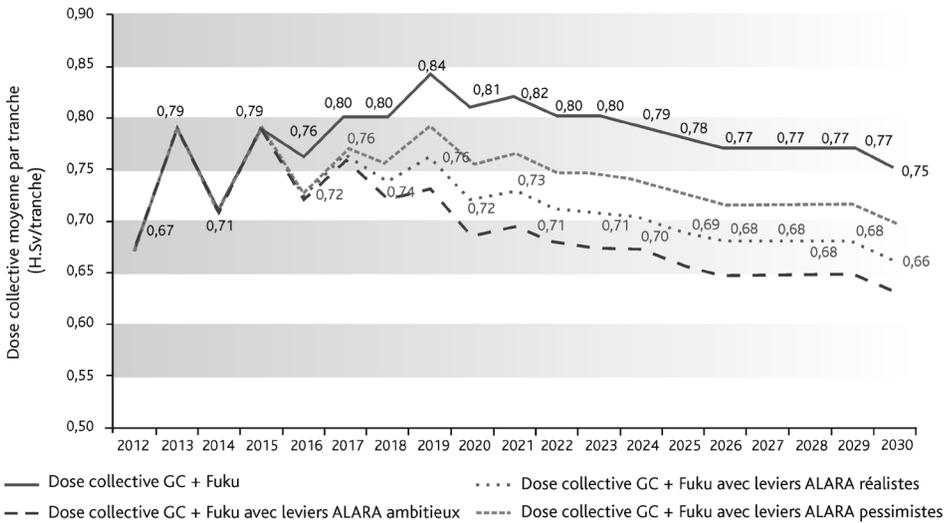


Figure 31.2. Représentation EDF des effets des «leviers» de radioprotection sur les trajectoires de dose collective estimées en 2015 («GC» désigne le grand carénage, «Fuku» désigne les dispositions post-Fukushima). IRSN (source EDF).

31.4. Démarche et objectifs adoptés pour le réacteur EPR

Concernant le réacteur EPR, des objectifs généraux de sûreté et de radioprotection ont été retenus dès les années 1990 pour la conception des réacteurs de la prochaine génération, rassemblés dans les directives techniques diffusées au début des années 2000 (voir le chapitre 18); parmi ces objectifs figure la réduction des doses collectives et des doses individuelles par rapport aux réacteurs du parc en exploitation. Une démarche d’optimisation a été mise en œuvre au stade de la conception de l’EPR, par le concepteur Areva-NP et par Électricité de France, sur la base des bilans dosimétriques du parc en exploitation, notamment ceux relatifs aux «meilleurs» réacteurs de 1300 MWe (palier P’4) et de 1450 MWe (palier N4). Un effort prioritaire a porté sur les activités contribuant aux doses collectives les plus élevées, par exemple :

- le montage et le démontage des éléments calorifuges,
- l’ouverture et la fermeture de la cuve,
- la préparation et les contrôles des générateurs de vapeur,

873. L’emploi du sélénium 75 n’est pas prévu dans le code de conception et de construction mécanique RCC-M.

- la logistique de chantier,
- les activités liées à la robinetterie,
- l'évacuation du combustible,
- le conditionnement des déchets radioactifs.

Électricité de France a ainsi estimé que l'objectif de dose collective pouvait être ramené d'une valeur initiale de référence (sur la base du retour d'expérience pour le parc en exploitation) de 440 homme.millisievert par réacteur et par an à 350 homme.millisievert, en tenant compte de la démarche d'optimisation à la conception réalisée pour ces activités; Électricité de France a par ailleurs retenu comme objectif que, en situation normale d'exploitation, le personnel ne soit pas soumis au risque d'exposition interne.

Des dispositions spécifiques de conception du réacteur EPR ont fait l'objet d'une attention particulière dans la démarche d'optimisation, comme le concept *two-rooms* destiné à permettre des interventions du personnel dans le bâtiment du réacteur en dehors des arrêts de tranche, notamment pour préparer ces derniers (sept jours avant l'arrêt). Afin de limiter l'exposition des intervenants, le bâtiment du réacteur est divisé en un « compartiment équipements » (composé des principaux éléments du circuit primaire) et un « espace de service » bénéficiant de protections biologiques adaptées et où l'atmosphère est compatible avec la présence de personnes, en fonctionnement.

Par ailleurs, le choix d'une instrumentation neutronique du cœur passant par le couvercle de la cuve et non par le fond de la cuve est un autre exemple de choix de conception qui contribuera à une réduction des doses reçues par les opérateurs.

La conception du réacteur EPR bénéficie également d'une réduction significative de l'inventaire en cobalt susceptible d'être activé en fonctionnement.

Pour ce qui concerne particulièrement la conception des équipements, outre la réduction de l'utilisation de revêtements durs pouvant générer du cobalt 60, la démarche d'optimisation mise en œuvre par Électricité de France a aussi conduit, par exemple, à concevoir des calorifuges à démontage et remontage rapides, à procéder à un électropolissage des boîtes à eau des générateurs de vapeur..., afin de limiter l'irradiation et les risques de contamination du personnel.

L'exploitation du réacteur EPR Flamanville 3 permettra d'apprécier si la démarche d'optimisation menée au stade de la conception (associée aux « leviers » d'optimisation en exploitation) a bien porté ses fruits, et éventuellement d'apporter des corrections ou des améliorations.

Vidéo pouvant être consultée pour compléter le chapitre



Zones contrôlées: la radioprotection dans les installations nucléaires