

Fontenay-aux-Roses, le 28 février 2018

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

Avis/IRSN N° 2018-00052**Objet :** ESRF - Déchets activés de l'European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) à Grenoble**Réf.** [1] Lettre ASN CODEP-LYON-2017-027886 du 26 septembre 2017

[2] Lettre ASN CODEP-LYON-2017-038606 du 26 septembre 2017

L'European synchrotron radiation facility (ESRF) prévoit une modification notable de son installation qui consiste au renouvellement de l'« anneau de stockage » de son synchrotron, composé principalement d'aimants, de chambres à vide, de câbles et de tuyauteries, susceptibles d'avoir été activés par des réactions photonucléaires. Dans ce cadre, l'ESRF a transmis un dossier de proposition de classification radiologique des composants de l'accélérateur sur la base de laquelle il prévoit de gérer certains composants démantelés en filière d'élimination conventionnelle. La méthode de classification repose sur l'identification des composants susceptibles d'être activés par une simulation Monte-Carlo¹ avec le code FLUKA et la vérification, à l'aide de mesures de débit d'équivalent de dose, de l'activation réelle ou de l'absence d'activation des composants.

Par lettres en référence, vous avez demandé l'avis de l'IRSN sur la robustesse des hypothèses retenues pour la modélisation Monte Carlo visant à estimer l'activation des composants. Vous avez également sollicité l'avis de l'IRSN sur la pertinence de baser la vérification de l'absence d'activation sur une mesure de débit d'équivalent de dose, plutôt que sur la mesure d'autres grandeurs physiques comme l'activité surfacique, et sur la pertinence de la méthode de mesure envisagée.

L'ESRF est une installation classée pour la protection de l'environnement (ICPE), basée à Grenoble, qui vise à produire des rayons X destinés à des expériences de recherche. Pour produire les faisceaux de rayons X, l'ESRF est doté d'un synchrotron comprenant un anneau de stockage de 844 m de circonférence au sein duquel circulent des électrons d'énergie de 6 GeV (cf. figure 1). Cet anneau se compose de 32 cellules (cf. figure 2) comprenant notamment des chambres à vide et des aimants. L'ESRF a décidé de renouveler son anneau de stockage dans l'optique d'améliorer la qualité des faisceaux de rayons X créés. Il prévoit pour cela de remplacer 600 aimants, 400 chambres à vides, 200 supports d'équipements et 180 km de câbles. Une partie de ces composants est potentiellement activée. Il est à souligner que les aimants, les chambres à vide ainsi que leurs supports seront démontés et entreposés de façon à permettre leur réutilisation (par exemple en cas de problème technique imprévu et insurmontable). Ils ne seront considérés comme déchets qu'à partir d'août

Adresse courrierBP 17
92262 Fontenay-aux-Roses
Cedex France**Siège social**31, av. de la Division Leclerc
92260 Fontenay-aux-Roses
Standard +33 (0)1 58 35 88 88
RCS Nanterre B 440 546 018

¹ Une méthode Monte-Carlo désigne une méthode visant à calculer une valeur numérique approchée d'une grandeur en utilisant des techniques probabilistes.

2020, une fois le fonctionnement de l'ensemble du nouvel anneau de stockage validé, environ un an et demi après l'arrêt définitif de l'anneau de stockage actuel.

Du dossier transmis par l'ESRF et des compléments qu'il a apportés au cours de l'instruction, l'IRSN retient les principaux éléments suivants relatifs à l'identification par modélisation puis à la vérification par la mesure de l'activation des composants de l'anneau de stockage.

I. Identification par modélisation des composants activés

L'ESRF indique dans son dossier que les électrons ne sont pas capables de produire directement des radionucléides lors de leurs interactions avec les composants de l'anneau, mais qu'ils peuvent émettre des photons lors de leur freinage par la matière, à l'origine de réactions photonucléaires. Cette activation est localisée autour des endroits où ont lieu les pertes d'électrons² (parois des chambres à vide, aimants...). En outre, des neutrons plus ou moins énergétiques sont produits lors de certaines réactions photonucléaires. Néanmoins, l'activation par voie neutronique est due à la capture de neutrons thermalisés³. Or, dans un anneau de stockage d'électrons, il y a peu de matériaux légers responsables de cette thermalisation : celle-ci a lieu essentiellement dans les parois en béton (riches en composés hydrogénés) du tunnel qui accueille l'anneau de stockage. Par conséquent, la contribution de l'activation par voie neutronique des composants de l'anneau est considérée comme négligeable par l'ESRF. **Au vu des éléments présentés, l'IRSN estime que l'identification par l'ESRF de la source de rayonnement pouvant entraîner l'activation des éléments constitutifs de l'anneau de stockage est satisfaisante.**

Pour ce qui concerne le mécanisme d'activation par réactions photonucléaires, l'ESRF a utilisé le code de calcul FLUKA pour modéliser un tronçon de l'installation englobant deux cellules standard de l'ESRF, considérées comme représentatives de l'ensemble des cellules, afin de déterminer les taux d'activation dans les composants présents le long du tronçon. Cette modélisation repose sur une description détaillée des composants (connaissance des compositions, prise en compte des composants environnants) et tient compte de divers phénomènes comme par exemple l'évaporation ou de coalescence des particules. **L'IRSN considère que l'utilisation du code de calcul FLUKA est adaptée pour la simulation des interactions rayonnement-matière aux énergies d'électrons mises en jeu (jusqu'à 6 GeV) et que la démarche de modélisation retenue par l'ESRF est pertinente pour l'évaluation de l'activation des matériaux de l'anneau de stockage.**

A partir de cette modélisation, l'ESRF a présenté différents plans de coupe du tronçon permettant de visualiser les niveaux d'activité de chacun de ses composants (cf. exemple en figure 3). L'activation étant proportionnelle au taux de perte du faisceau, ces plans de coupe ont été réalisés pour différents taux, à savoir 1%, 10% et 100%, pour un temps de refroidissement d'un mois. A cet égard, il convient de souligner que les pertes maximales mesurées par l'ESRF (cf. figure 4) sont de l'ordre de 30% pour deux cellules particulières et inférieures à 10% pour les autres et que l'activation est également

² La circulation des électrons devant se faire idéalement de manière ininterrompue, la perte des électrons est involontaire et est due à l'effet Touschek, un phénomène d'élargissement du faisceau dû à la collision élastique entre les électrons. Les cascades électromagnétiques responsables des réactions photonucléaires gardent une distribution relativement étroite autour du faisceau.

³ La thermalisation des neutrons désigne la diminution de leur énergie cinétique jusqu'à une énergie de l'ordre de quelques meV. Après un certain nombre de collisions avec des noyaux (diffusion) dans un milieu modérateur de neutrons, les neutrons atteignent ce niveau d'énergie, à condition qu'ils ne soient pas absorbés. Les neutrons thermiques ont une section efficace d'absorption différente et souvent plus élevée, pour un nucléide donné, que les neutrons rapides, et peuvent donc être absorbé plus facilement par un noyau atomique.

proportionnelle à la charge de l'anneau. Au cours de l'instruction, l'ESRF a transmis des résultats de calculs supplémentaires fondés sur des hypothèses plus réalistes, à savoir des pertes locales de faisceau de 30%, le profil réel de charge en exploitation (pouvant différer de la valeur moyenne initialement retenue de 400 $\mu\text{C}/\text{an}$) et un temps de refroidissement d'un an et demi. **L'IRSN considère que cette étude de sensibilité de l'activation en fonction des pertes locales de faisceau, de la charge de l'anneau et du temps de refroidissement, qui tient compte d'hypothèses réalistes et/ou pénalisantes, permet bien d'identifier les composants potentiellement activés.**

Par ailleurs, l'IRSN constate qu'à partir des résultats obtenus par modélisation, l'ESRF a réalisé un zonage déchets fondé sur le caractère activé ou non des composants. Ainsi, les composants pour lesquels il apparaît une activation potentielle sont classés en zone à déchets nucléaires. Ces composants seront orientés vers le Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires) de l'Andra dédié au stockage des déchets TFA. Les autres composants seront orientés vers une filière conventionnelle après une vérification, par mesures, de l'absence d'activation.

Bien que l'activation ne concerne généralement qu'une partie limitée d'un composant, l'ESRF indique qu'afin d'éviter des opérations de découpe sur une pièce activée susceptible de générer des poussières pouvant contaminer d'autres composants non activés, il considère un composant comme activé dès lors qu'une de ses parties est susceptible de l'être. **L'IRSN considère que la mise en place d'un zonage déchets par l'ESRF pour identifier les éléments susceptibles d'être envoyés au Cires, fondé sur une modélisation et associé (cf. infra) à des mesures pour vérifier l'activation réelle des composants ou l'absence d'activation, est satisfaisante sur le principe.**

II. Vérification de l'activation des composants

L'ensemble des composants générés lors du démantèlement de l'anneau de stockage feront l'objet de mesures de contrôle d'activation.

S'agissant des composants considérés comme activés, il ressort de l'analyse des plans de coupe fournis par l'ESRF que seuls les aimants et les chambres à vide peuvent présenter des activités massiques significatives (au maximum de 10 $\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$ en fonction des taux de perte du faisceau). Les modélisations conduites montrent que l'activation des composants concerne une couche superficielle de très faible épaisseur (de l'ordre de quelques millimètres) et qu'elle se présente sous la forme de points chauds localisés. A cet égard, l'ESRF prévoit de réaliser des mesures fixes de débit d'équivalent de dose (DeD) au contact des points chauds identifiés par modélisation, complétées par des mesures par balayage sur le reste des surfaces. S'agissant des composants qui ne sont pas considérés comme activés (supports, chemins de câbles, câbles et tuyauteries), l'ESRF prévoit uniquement la réalisation de mesures de DeD par balayage sur toutes les surfaces. Si ces mesures sont indifférenciables du bruit de fond, les composants seront évacués en filière d'élimination conventionnelle.

L'ESRF indique que les valeurs de DeD mesurées seront converties en activité massique à partir des résultats des calculs FLUKA. Le tableau 1 présente les principaux radionucléides qui sont susceptibles d'être produits par activation d'après les modélisations effectuées. **Ceci n'appelle pas de commentaire de la part de l'IRSN.** L'IRSN note que l'ESRF n'a pas justifié le choix de la mesure de DeD au regard de celle d'autres grandeurs physiques. Néanmoins, au vu du type d'activation des

composants (sur plusieurs millimètres d'épaisseur), l'IRSN estime que la mise en œuvre de mesures surfaciques n'aurait pas été pertinente.

Pour ce qui concerne le matériel de mesure, l'ESRF prévoit de réaliser l'ensemble des contrôles des composants à l'aide de deux appareils. La majorité des mesures sera réalisée au moyen d'un Exploranium GR-130. Les mesures dans les espaces offrant un accès limité, comme les parties intérieures des culasses des aimants dipôles, seront effectuées avec un appareil moins encombrant, le RadEye PRD-ER-S⁴. L'IRSN relève que les calculs effectués par l'exploitant pour évaluer les niveaux susceptibles d'être mesurés sont établies sur la base d'une distance de 0,5 cm entre le détecteur NaI et la surface à mesurer, distance évaluée de manière approximative par l'ESRF. Néanmoins, d'après les caractéristiques techniques recueillies pour une version plus récente de l'Exploranium (GR-135G), l'IRSN observe que le détecteur pourrait être plutôt positionné à une distance de 1 à 1,5 cm de la surface à mesurer compte tenu de sa position par rapport à la face avant de l'appareil. Cette différence dans la position du détecteur NaI pourrait entraîner une modification significative des performances de détection de l'appareil (limites de détection (LD) et seuils de décision (SD) plus élevés)⁵ et ainsi remettre en cause leur adéquation vis-à-vis du critère « différenciable du bruit de fond » (cf. infra). **Aussi, l'IRSN recommande que l'ESRF vérifie la position précise du cristal de détection de l'Exploranium GR-130 avant la mise en œuvre des mesures et, si nécessaire, modifie en conséquence les LD et SD pris en compte.**

Les appareils seront utilisés en mode intégration sur des durées de 60 secondes pour l'Exploranium et de 297 secondes pour le RadEye PRD-ER-S. Les SD et les LD obtenus pour ces temps de comptage seront, selon l'ESRF, suffisamment bas pour appliquer le protocole de mesure basé sur le critère « différenciable/indifférenciable du bruit de fond ».

Pour ce qui concerne les mesures fixes, l'IRSN estime que les temps de comptage retenus par l'ESRF **sont suffisants pour garantir le respect du critère « différenciable/indifférenciable du bruit de fond ».**

Pour ce qui concerne les mesures par balayage, le mouvement engendre une surface de détection plus importante et donc une sensibilité plus faible des appareils de détection. **Aussi, l'IRSN recommande que l'ESRF démontre que les vitesses de balayage retenues permettent effectivement d'atteindre des LD et les SD cohérents avec le critère « différenciable du bruit de fond ».** De plus, les mesures par balayage seront réalisées à une vitesse maximale de déplacement de 5 cm.s⁻¹. Afin de garantir une vitesse constante, les appareils seront implantés sur un robot 6-axes. Or, l'IRSN relève que l'étude de l'ESRF ne précise pas si l'implantation des équipements sur ce robot permettra de garantir un maintien des appareils de mesure à une position de pseudo-contact des surfaces à contrôler, notamment dans le cas de surfaces non planes. **Par conséquent, l'IRSN recommande que l'ESRF démontre que l'utilisation du robot 6-axes permet bien de maintenir les appareils de détection au pseudo contact des pièces à mesurer.**

Enfin, l'ESRF précise que pour la plupart des mesures, les SD et LD sont adaptés pour réaliser des mesures avec un bruit de fond ambiant de l'ordre de 30 nSv.h⁻¹. Dans certains cas (certaines chambres

⁴ Ces deux appareils sont équipés de scintillateurs à l'iodure de sodium dopés au thallium [NaI(Tl)]

⁵ A titre indicatif, les valeurs de SD sont de 2,68 nSv.h⁻¹ pour l'Exploranium et de 2,9 nSv.h⁻¹ pour le RadEye PRD-ER-S, soit inférieures à 3,3 coups par seconde. Les limites de détection sont 4,54 nSv.h⁻¹ pour les aciers inoxydables et 5,78 nSv.h⁻¹ pour les culasses d'aimant, soit inférieures à 7 coups par seconde. Ces valeurs ont été données par l'exploitant.

à vide) et afin d'améliorer les performances métrologiques (diminution des LD et des SD), les mesures seront réalisées avec un bruit de fond ambiant maximum de 15 nSv.h⁻¹. Afin de respecter ces bruits de fond de référence, des protections biologiques en plomb pourront être mises en place au niveau du sol. Selon les informations communiquées par l'ESRF, des mesures du bruit de fond ambiant seront réalisées et consignées régulièrement pendant les phases de contrôle, **ce qui est satisfaisant.**

III. Conclusion

L'IRSN considère que la démarche de l'ESRF pour la classification radiologique des composants de l'anneau de stockage de son synchrotron, qui repose sur une identification préalable des composants activés par modélisation puis une vérification par la mesure du débit de dose de leur activation ou de l'absence d'activation, est satisfaisante. S'agissant du protocole de mesure retenu par l'ESRF, l'IRSN estime que celui-ci est pertinent sur le principe et émet un avis favorable à sa mise en œuvre, sous réserve de la prise en compte des recommandations formulées dans le présent avis et rappelées en annexe 2.

Pour le Directeur général et par délégation,
Didier GAY,
Adjoint au Directeur de l'Environnement

Tableaux et figures

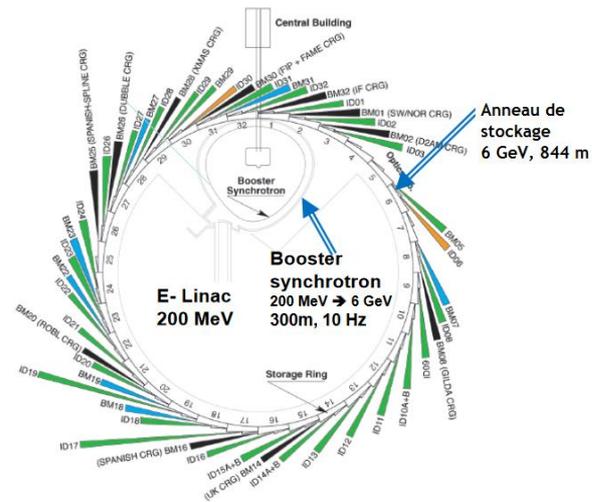


Figure 1 : Schéma de l'installation ESRF et de l'anneau de stockage

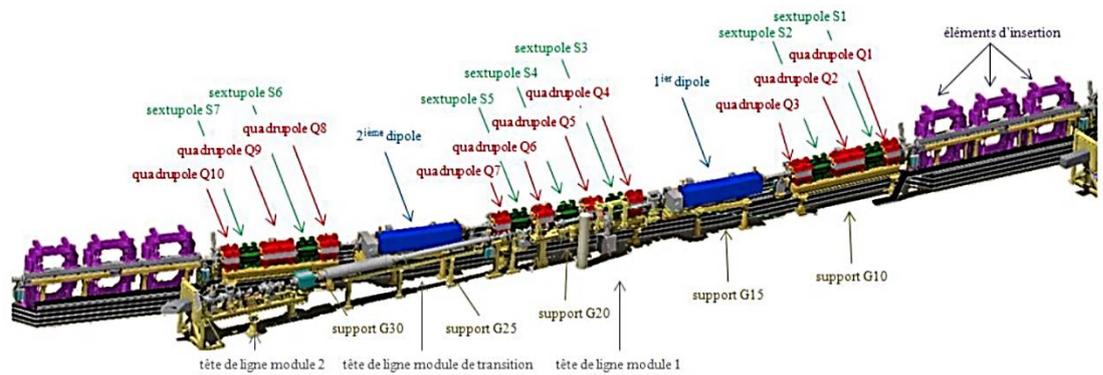


Figure 2 : Vue d'une cellule standard

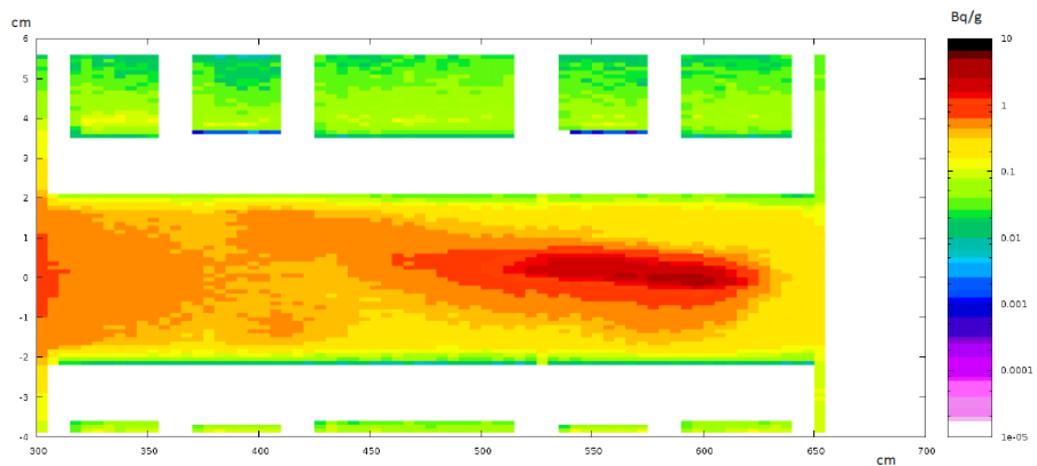


Figure 3 : Plan de coupe d'une chambre à vide (plage verticale 1,65 cm à 1,85 cm, charge totale de 400 μC , temps de refroidissement d'un mois)

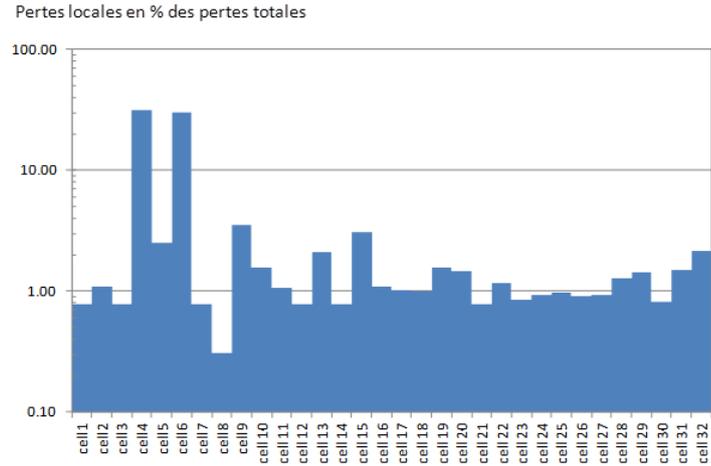


Figure 4 : Distribution des pertes d'électrons sur 2 mois

Tableau 1: Exemple d'activité totale (Bq) calculée, pour les 20 isotopes les plus importants, dans la chambre à vide n° 3 (1 mois après la fin de l'irradiation, perte faisceau 1 %, 400 µC de charge totale annuelle)

Radionucléides	Activité totale (Bq)	Radionucléides	Activité totale (Bq)
⁵⁵ Fe	3495	⁶⁰ Co	4,73
⁵⁷ Co	1054	⁸⁸ Y	3,13
⁵¹ Cr	848	⁷ Be	2,35
⁵⁴ Mn	436	⁸⁸ Zr	2,21
⁴⁹ V	190	³⁷ Ar	2,05
⁵⁶ Co	78,2	⁴⁵ Ca	1,52
⁵⁸ Co	75,1	³⁵ S	1,17
⁴⁸ V	17,3	⁵² Mn	1,08
³ H	16,4	⁶³ Ni	1,04
⁴⁶ Sc	9,23	⁸⁵ Sr	0,78

Annexe 2 à l'avis IRSN n° 2018-00052 du 28 février 2018
Recommandations

L'IRSN recommande que l'ESRF :

- R1.** détermine la position précise du cristal de détection de l'Exploranium GR-130 avant la mise en œuvre des mesures et si nécessaire modifie en conséquence les limites de détection et les seuils de décision retenus ;
- R2.** démontre que les vitesses de balayage retenues pour les mesures par balayage permettent effectivement d'atteindre les limites de détection et les seuils de décision calculés pour les mesures fixes ;
- R3.** démontre que l'utilisation du robot 6-axes permet bien de maintenir les appareils de détection au pseudo contact des pièces à mesurer.