

Montrouge, le 30/09/2021

Référence courrier :
CODEP-DCN-2021-042817

Monsieur le Directeur
Division Production Nucléaire
EDF
Site Cap Ampère – 1 place Pleyel
93 282 SAINT-DENIS CEDEX

OBJET : Corrosion accélérée du gainage en alliage M5 – Demandes complémentaires

RÉFÉRENCES :

- [1] Note EDF/UNIE GECC - D455021007964 du 7 juillet 2021 : « Déclaration d'un événement significatif pour la sûreté à caractère générique : phénomène de corrosion accélérée du gainage M5 – Réacteurs de Chooz B2, Civaux 2 et Cattenom 3 ».
- [2] Note EDF - D455021008473 ind. 1 du 7 juillet 2021 : « TF21.01 - Mesures compensatoires pour l'exploitation des tranches des paliers N4 et P4/P'4 vis à vis de l'aléa de corrosion accélérée sur l'alliage M5 ».
- [3] Note EDF - D455021009054 du 19 août 2021 : « TF21.01 - Aléa de corrosion accélérée sur l'alliage M5 - Mesures complémentaires sur le palier 1300 ».

Monsieur le directeur,

EDF a transmis en juillet 2021 une déclaration d'un événement significatif pour la sûreté à caractère générique relatif à de la corrosion accélérée du gainage en alliage M5 du combustible des réacteurs n° 2 de Chooz B, n° 2 de Civaux et n° 3 de Cattenom [1].

Ce phénomène de corrosion accélérée des gaines de combustible en alliage M5 est inédit en France. Néanmoins, il a déjà été observé à l'étranger sur des réacteurs exploités en Allemagne (en 2005, 2012, 2017 et 2019) et au Brésil (en 2020).

Sur la base des premiers éléments transmis par EDF et au vu des mesures compensatoires proposées pour les réacteurs concernés [2][3], l'ASN s'est prononcée favorablement sur l'acceptabilité, au plan de la sûreté, de l'exploitation des réacteurs de 1300 et 1450 MWe concernés par le phénomène de corrosion accélérée du gainage en alliage M5. Ces mesures compensatoires comprennent notamment une réduction de la manœuvrabilité des réacteurs concernés, des précautions en fin de cycle pour limiter la remontée de flux neutronique en haut du cœur, des contrôles télévisuels supplémentaires du haut des assemblages de combustible, avec le cas échéant des mesures des épaisseurs de corrosion observées, et une augmentation de la teneur en hydrogène du milieu primaire.

Dans le cadre des discussions techniques, EDF a présenté des éléments qui feront l'objet d'une transmission à l'ASN selon les processus adaptés.

Vous trouverez en annexe les demandes complémentaires de l'ASN relatives à la caractérisation du phénomène de corrosion accélérée du matériau M5, notamment pour ce qui concerne le domaine d'intérêt de l'évènement, la compréhension des phénomènes physiques et physico-chimiques ainsi que les mesures de surveillance du combustible que vous envisagez.

Je vous prie d'agréer, Monsieur le directeur, l'expression de ma considération distinguée.

Signé par le directeur de la direction
des centrales nucléaires,

Rémy CATTEAU

Demandes de l'ASN

A. Prise en compte du retour d'expérience (REX)

A.1. Prise en compte du REX international

La corrosion accélérée du gainage en alliage M5 a affecté plusieurs réacteurs en Allemagne ainsi qu'un réacteur au Brésil. Ces événements ont notamment fait l'objet de deux déclarations auprès de l'*information reporting system* (IRS) de l'agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) en 2017 et 2020 [4]. Par ailleurs, EDF dispose d'autres moyens d'information et de partage de REX. Au titre de son processus d'analyse du retour d'expérience, EDF a dû analyser ces événements.

Demande n° 1 : Je vous demande de préciser, dans le compte rendu d'événement significatif prévu pour le 7 octobre 2021, les analyses de ces événements que vous avez réalisées et de m'indiquer les actions que vous avez entreprises au vu de ce retour d'expérience ainsi que leur chronologie.

D'après les conclusions que vous tirez de ce REX [1] et de votre REX d'exploitation, vous avez identifié des coulées dites hypersensibles (desquamation avérée) et sensibles (corrosion importante) vis-à-vis de la corrosion. Pour EDF, ces coulées pourraient se caractériser par de faibles teneurs en fer, ce qui jouerait un rôle prépondérant vis-à-vis de la corrosion [1].

Pour ce qui concerne la teneur en fer de l'alliage M5, EDF a fait évoluer en 2019 la spécification d'approvisionnement. Ainsi, EDF a fait passer la valeur spécifiée d'une teneur en fer inférieure à 500 mg/kg à une valeur dans l'intervalle de 200 à 700 mg/kg [7]. Le dossier de Framatome [8] apportait les justifications techniques de cette évolution, notamment pour ce qui concerne la corrosion. Selon les conclusions de ce dossier, les résultats des essais « normalisés » et en boucle ne semblaient pas montrer d'effet « significatif » de la teneur en fer, dans l'intervalle des teneurs en fer considérées. Seuls des essais en eau lithiée (70 mg/kg) pourraient montrer une influence bénéfique de cet élément d'alliage, pour des teneurs en fer supérieures à 400 mg/kg.

Demande n° 2 : Je vous demande de réexaminer votre processus de modification, au regard de la décision que vous avez prise concernant cette évolution de spécification de la teneur en fer. Vous transmettez vos conclusions quant au bon déroulement de ce processus (prise en compte du REX, exhaustivité des données, disponibilité des compétences adéquates...). Le cas échéant, vous préciserez les points que vous comptez améliorer. J'ai noté que vous transmettez ces éléments dans le compte rendu d'événement significatif prévu pour le 7 octobre 2021.

Désormais, à moyen terme, EDF prévoit de spécifier la valeur minimale de la teneur en fer à 450 mg/kg et la valeur nominale à 590 mg/kg, afin de limiter la corrosion de l'alliage M5 [1]. Cette évolution de la spécification sera mise en œuvre dès le cycle 20 du réacteur n° 2 de Chooz B.

Demande n° 3 : Je vous demande de me présenter, pour fin 2021, les éléments, notamment métallurgiques et relatifs à la corrosion, permettant d'étayer techniquement le choix de la

spécification de la teneur en fer de l'alliage M5, avec la valeur minimale à 450 mg/kg et la valeur nominale à 590 mg/kg.

A.2. Éléments de REX national

Surveillance en service

EDF prescrit une partie des modalités de la surveillance en service des assemblages de combustible dans les règles particulières de conduite (RPC) relatives au renouvellement du combustible [11][12][13]. Ces RPC prescrivent notamment la réalisation d'inspections télévisuelles (ITV) des assemblages de combustible lors des opérations de renouvellement du combustible, afin d'identifier et de caractériser d'éventuels désordres (pied d'assemblage, dégradation de grilles d'assemblages de combustible, plaque inférieure de cœur).

Afin de compléter votre démarche de contrôle par ITV des assemblages de combustible, l'ASN considère qu'EDF doit s'assurer que les ITV permettent de détecter des événements anormaux d'exploitation et notamment de caractériser un risque de corrosion. De plus, EDF doit s'assurer de la cohérence des examens par ITV avec d'éventuelles mesures d'épaisseur de corrosion qui seraient nécessaires.

Pour les coulées d'alliage M5 a priori sensibles vis-à-vis de la corrosion, notamment pour les réacteurs de 1450 MWe, l'ASN considère qu'EDF doit compléter son dossier en recherchant les ITV archivées pour ces coulées particulières, afin d'étayer son REX. Les réacteurs de 1300 et 1450 MWe bénéficient déjà d'éléments de REX formalisés contrairement aux réacteurs de 900 MWe. Des éléments de REX formalisés sont attendus pour l'ensemble des réacteurs d'EDF.

Demande n° 4 : Je vous demande de vous assurer que les ITV permettent de détecter des événements anormaux d'exploitation et de la cohérence entre les examens par ITV des assemblages de combustible et les mesures d'épaisseur réalisées. Pour des coulées d'alliage M5 a priori sensibles vis-à-vis de la corrosion, notamment pour les réacteurs de 1450 MWe, je vous demande de compléter votre dossier en recherchant les ITV archivées pour ces coulées particulières, afin d'étayer votre REX. Ces éléments de REX formalisés sont attendus pour l'ensemble des réacteurs d'EDF, pour la fin de l'année 2021.

De plus, l'ASN considère qu'EDF doit réviser sa surveillance des assemblages de combustible, notamment au moyen d'ITV, au vu du REX récent [14], notamment celui de la corrosion excessive de l'alliage M5 [1], afin d'identifier et de caractériser l'ensemble des phénomènes mis en évidence par le REX (rupture de ressorts et d'ailettes, desquamation de couches d'oxyde, dépôts d'oxydes exogènes, colorations inhabituelles ou anormales des assemblages...).

Demande n° 5 : Je vous demande de tenir compte de l'ensemble des éléments mis en évidence par le REX pour les opérations de surveillance en service des assemblages de combustible. Votre plan de surveillance révisé est attendu pour l'ensemble des réacteurs d'EDF, pour la fin de l'année 2021.

Expertises de crayons corrodés en alliage M5

La justification de la maîtrise du phénomène de corrosion accélérée du M5, qui affecte notamment les réacteurs de 1450 MWe et de 1300 MWe, nécessite une caractérisation détaillée en vue d'identifier les causes phénoménologiques ainsi que sa cinétique. Dans ce cadre, EDF s'appuie sur une expertise de crayons corrodés en alliage M5 issus du réacteur n° 2 de Phillipsburg (KKP-2).

EDF a engagé un programme d'expertise de crayons affecté à Chooz qui a été interrompu. EDF a indiqué avoir demandé au CEA de réaliser l'expertise de crayons dont l'acheminement est prévu à compter du premier semestre 2022.

L'ASN considère important que la caractérisation du phénomène de corrosion accélérée soit fondée sur un programme suffisant d'expertise de crayons affecté.

Demande n° 6 : Je vous demande de présenter votre programme d'expertise de crayons de combustible affectés par le phénomène de corrosion accélérée et la justification de sa pertinence en vue de la caractérisation du phénomène et de sa cinétique (corrosion et hydruration).

B. État des lieux

B.1. Réacteurs en fonctionnement

Pour les réacteurs en fonctionnement de 1300 et 1450 MWe, EDF a fourni un premier état des lieux des assemblages comportant des gaines issues de coulées sensibles vis-à-vis de la corrosion, identifiées sur la base du retour d'expérience soit national soit international. Ces coulées comportent des teneurs en fer dans la plage basse de la spécification d'approvisionnement de l'alliage de type M5. Ces assemblages peuvent être présents soit dans le cœur des réacteurs soit dans les piscines d'entreposage des réacteurs.

Cet inventaire a été réalisé prioritairement pour les réacteurs de 1300 et 1450 MWe du fait de leur plus grande sensibilité au phénomène de corrosion en raison de l'étendue et de l'intensité de l'ébullition nucléé à l'origine du phénomène de corrosion. Pour les réacteurs de 900 MWe, EDF n'a toutefois pas encore fourni cet état des lieux. Par ailleurs, en complément des assemblages en exploitation, l'ASN considère nécessaire de disposer, rétrospectivement, de ces mêmes éléments pour les assemblages ayant eu des gaines en alliage M5 utilisés dans les réacteurs d'EDF. Ces informations sont nécessaires pour étayer vos constatations sur les réacteurs de 1450 MWe, qui visent à démontrer la concomitance de conditions pénalisantes exceptionnelles.

Demande n° 7 : Je vous demande de fournir un état des lieux des assemblages ayant eu ou ayant des gaines en alliage M5 issues de coulées sensibles vis-à-vis de la corrosion utilisés dans les réacteurs

d'EDF. Cet état des lieux tiendra compte des assemblages en cœur et en réserves de gestion. J'ai noté qu'il sera disponible pour la fin du mois d'octobre 2021.

EDF indique que depuis le début de l'année 2021 plus aucune coulée à basse teneur en fer n'est fabriquée. Un planning est en cours de constitution afin qu'EDF dispose, pour les réacteurs de 1300 MWe, d'assemblages neufs issus de coulées à haute teneur en fer.

Demande n° 8 : Je vous demande de me confirmer qu'EDF n'approvisionne plus d'assemblages comportant des crayons avec une basse teneur en fer. Je vous demande de préciser, avant la fin de l'année 2021, le calendrier de mise en œuvre de l'évolution de la teneur en fer de l'alliage M5, pour l'ensemble des réacteurs.

Demande n° 9 : Je vous demande d'informer les divisions territoriales de l'ASN au cas où vous envisageriez de recharger des assemblages avec des gaines issues de coulée d'alliage M5 sensibles vis-à-vis de la corrosion, en préalable à ces rechargements.

Certains réacteurs de 900 MWe pourraient comporter des assemblages ayant des gaines issues de coulées sensibles de conduire à une oxydation excessive en partie haute des assemblages. De plus, les réacteurs de 900 MWe utilisant du MOX font l'objet d'une anomalie liée au cumul de la remontée de flux neutronique aux extrémités de colonne fissile et de la présence d'amas de plutonium dans les pastilles de combustible. Chacun de ces phénomènes (corrosion excessive et remontée de flux neutronique) ayant lieu dans la même zone (fin de colonne fissile, plénum), l'ASN considère qu'EDF doit analyser l'effet d'une corrosion accélérée sur les études de sûreté du combustible MOX.

Demande n° 10 : Je vous demande d'analyser l'effet cumulé, sur les études de sûreté, d'une corrosion accélérée du gainage en alliage M5 et du phénomène de remontée de flux en haut de la colonne fissile des assemblages de combustible MOX, pour les réacteurs de 900 MWe.

B.2. Réacteur EPR de Flamanville

Pour le réacteur EPR de Flamanville, le risque de corrosion accélérée du gainage en alliage M5 doit être évalué, notamment sur la base d'un état des lieux des assemblages comportant des gaines issues de coulées potentiellement sensibles vis-à-vis de la corrosion.

Demande n° 11 : Je vous demande de fournir, avant la fin de l'année 2021, un état des lieux des assemblages comportant des gaines issues de coulées potentiellement sensibles vis-à-vis de la corrosion destinés au réacteur EPR de Flamanville.

Par ailleurs, l'apparition du phénomène de corrosion dépendrait de l'étendue et de l'intensité de l'ébullition nucléée, dues aux sollicitations thermohydrauliques locales. Vous avez retenu la valeur maximale du taux de production de vapeur (*steaming rate flux* ou SRF [6]) comme paramètre pour comparer les gestions de combustible entre elles. Ce paramètre a été utilisé pour des réacteurs étrangers qui ont présenté de la corrosion accélérée du gainage en alliage M5.

Demande n° 12 : Je vous demande, avant la fin de l'année 2021, pour le réacteur EPR de Flamanville, de m'indiquer votre évaluation de la sensibilité du réacteur au phénomène de corrosion accélérée du M5, notamment en comparant les caractéristiques de votre gestion de combustible prévisionnelle à celle de vos réacteurs en fonctionnement, en particulier ceux de 1300 et 1450 MWe, sur la base de paramètres que vous explicitez. Vous intégrerez aussi le REX de réacteurs étrangers.

C. Compréhension des phénomènes physiques et physico-chimiques

EDF indique, qu'au premier ordre, le risque de corrosion accélérée du gainage en alliage M5 dépend des sollicitations thermohydrauliques locales et de la teneur en fer de l'alliage. Les épaisseurs d'oxyde mesurées en partie courante des crayons sont conformes aux données calculées par les modèles prévisionnels.

Pour ce qui concerne les sollicitations thermohydrauliques locales, selon EDF, globalement, les épaisseurs de corrosion maximales sont croissantes en fonction du taux de production de vapeur. L'ASN considère qu'EDF doit compléter son dossier en apportant les éléments permettant de démontrer la robustesse des calculs du taux de production de vapeur, compte tenu de l'état de validation actuel de l'outil de calcul de thermohydraulique utilisé. De même, EDF devra fournir les éléments permettant d'étayer le lien entre le taux de production de vapeur et les fortes épaisseurs d'oxyde mesurées, pour l'ensemble des réacteurs.

Demande n° 13 : Je vous demande d'apporter, avant la fin 2021, des éléments permettant de justifier la robustesse des calculs du taux de production de vapeur, compte tenu de l'état de validation actuel de l'outil de calcul de thermohydraulique utilisé. De plus, je vous demande d'apporter des éléments permettant de démontrer le lien entre le taux de production de vapeur et les fortes épaisseurs d'oxyde mesurées. Ces éléments devront être apportés pour l'ensemble des réacteurs.

Par ailleurs, compte tenu de la variabilité des épaisseurs d'oxyde mesurées dans un même assemblage, l'ASN considère qu'EDF doit se prononcer quant à la pertinence de retenir le paramètre de « taux de production de vapeur » à l'échelle de l'assemblage pour prédire la corrosion à l'échelle du crayon.

Demande n° 14 : Je vous demande de justifier, avant la fin 2021, la pertinence du paramètre de « taux de production de vapeur » à l'échelle de l'assemblage pour prédire la corrosion à l'échelle du crayon. Le cas échéant, EDF précisera les évolutions de modélisation envisagées.

Selon EDF, l'ébullition nucléée aurait des conséquences sur la chimie du milieu primaire. En effet, la présence d'ébullition à la paroi des gaines aurait pour conséquence de modifier localement la chimie de l'eau [9]. EDF décrit deux hypothèses, celle d'un milieu enrichi en lithium et celle d'un milieu oxydant.

Pour la première hypothèse, sous flux thermique, dans un système diphasique, la phase liquide à l'interface liquide/vapeur serait enrichie en lithium (espèce faiblement volatile provenant du conditionnement du milieu primaire par de la lithine). Cette première hypothèse repose sur l'effet

connu de la lithine sur l'accélération de la corrosion des alliages à base de zirconium ainsi que sur l'existence d'essais de corrosion de gainage en Zircaloy 4, en boucle avec différents taux de vide [10]. Avec un taux de vide supérieur à 25 %, une accélération très marquée de la cinétique de corrosion a ainsi été observée [10].

Pour la seconde hypothèse, la présence d'ébullition sous-saturée favoriserait la concentration d'espèces oxydantes issues de la radiolyse de l'eau du fait du mécanisme *d'hydrogen stripping* (transfert de masse de l'hydrogène présent dans la phase liquide vers la phase vapeur). Cette seconde hypothèse est privilégiée par EDF bien que des études soient toujours en cours. Cette hypothèse a conduit EDF à augmenter la teneur en hydrogène du milieu primaire en haut de la plage autorisée par les spécifications techniques d'exploitation. Cette augmentation de la teneur en hydrogène fait partie des mesures compensatoires liées à la corrosion excessive de l'alliage M5.

Demande n° 15 : Je vous demande d'apporter, avant la fin 2021, l'ensemble des éléments permettant d'étayer l'effet de l'ébullition nucléée sur la chimie du milieu primaire.

Une fois qu'EDF aura identifié et caractérisé l'effet de l'ébullition nucléée sur la chimie du milieu primaire, l'ASN considère qu'EDF pourrait réviser son modèle de corrosion de l'alliage M5 pour tenir compte de l'ensemble des conditions thermo-hydrauliques.

Demande n° 16 : Je vous demande de m'indiquer si vous considérez qu'il sera nécessaire de réviser votre modèle de corrosion de l'alliage M5 pour tenir compte de l'ensemble des conditions thermo-hydrauliques. Votre réponse sera précisée dans le compte rendu d'événement significatif prévu pour le 7 octobre 2021.

Enfin, lors de la mise à l'arrêt du réacteur n° 2 de Paluel à l'issue de son 23^e cycle de production (PA223), des dépôts de produits de corrosion ou CRUD (Chalk River Unidentified Deposit) ont été observés sur un grand nombre d'assemblages de combustible. Ces dépôts ont conduit au percement de trois gaines de combustible en raison d'une corrosion localisée accélérée, très vraisemblablement en raison de conditions d'échange thermique défavorables induites par ces CRUD.

Demande n° 17 : Je vous demande de présenter, avant fin janvier 2022, l'ensemble du REX acquis à la suite de la formation de CRUD sur les assemblage de combustible du réacteur n° 2 de Paluel à l'issue de son 23^e cycle de production (PA223) ainsi que les mesures que vous mettrez en œuvre pour prévenir toute formation de CRUD à l'avenir.

Au vu de la corrosion accélérée de l'alliage M5 et de ce cas de corrosion induite par du CRUD, l'ASN considère qu'EDF doit se prémunir de l'ensemble de ces types de corrosion et de leur concomitance afin de garantir l'intégrité de la première barrière.

Demande n° 18 : Je vous demande de m'indiquer, avant fin janvier 2022, les dispositions que vous envisagez afin de vous prémunir de l'ensemble des types de corrosion des gaines de combustible et de leur concomitance pour garantir l'intégrité de la première barrière.

D. Références

- [4] Rapport AIEA – IRS n° 8628 du 2 juin 2017 : « Excessive corrosion of fuel rod claddings ».
- [5] Rapport AIEA – IRS n° 9012 du 29 décembre 2021 : « Scaling of the cladding in rods of fuel assemblies of serie R observed during unloading of the Reactor of Angra 2 NPP ».
- [6] L. Monti et al., Top Fuel 2018, 30 September - 4 October 2018, Prague, Czech Republic, paper A0194 : « Usage of ARCADIA code system for neutronic and thermal-hydraulic core analyses to support the crud risk assessment of a three loop plant ».
- [7] Note EDF – D459019002009 du 28 mars 2019 : « Demande d’autorisation SAI Cœur - Combustible - évolution de la spécification de la teneur en fer du M5 ».
- [8] Note Framatome - FS1-0034952 rév. 2.0 du 4 mars 2019 : « Evolution de la spécification de la teneur en fer du M5_{Framatome} (200 à 700 ppm) ».
- [9] Note Framatome – FSI-0056396 rev. 2.0 du 16 juin 2021 : « Chooz B2 cycle 18 : évènement de corrosion. Analyse des causes et détermination des paramètres influents ».
- [10] Monographie du CEA - 2010 : « La corrosion et l’altération des matériaux du nucléaire ».
- [11] Note EDF/UNIE GECC - D455037083438 ind. 1 du 23 mai 2019 : « Règle particulière de conduite - Opérations de renouvellement du combustible tranches REP 900 – CPY ».
- [12] Note EDF/UNIE GECC – D4550.37-09/3499 ind. B du 30 mars 2015 : « Règle particulière de conduite - Opérations de renouvellement du combustible tranches REP 1300 – P4/P’4 – Lot PMC VD2 ».
- [13] Note EDF/UNIE GECC – D4550.37-13/4644 ind. 0 du 24 février 2015 : « Règle particulière de conduite - Opérations de renouvellement du combustible tranches REP N4- PMC VD1 en gestion ALCADE ».
- [14] Lettre de suite - CODEP-LYO-2021-018443 du 14 avril 2021 : « Contrôle des installations nucléaires de base (INB) - CNPE de Cruas-Meysse – INB 111 et 112 ».