

**C. Birac, Ph. Benoist, J.C. Berger, P. Jardet, D. Villard,
EDF (France)**

Evolutions techniques induites par la qualification des procédés
d'examens non destructifs dans les réacteurs à eau sous pression

*Technical evolutions induced by the qualification process for non
destructive testing methods*

C. Birac, Ph. Benoist, J.C. Berger, P. Jardet, D. Villard
(Commission de Qualification END-CND d'EDF)

RESUME

La mise en application par EDF d'une nouvelle réglementation, l'Arrêté du 10 novembre 1999, a entraîné des évolutions significatives pour l'inspection en service des circuits primaire et secondaire des centrales nucléaires REP.

Ces évolutions concernent l'inspection en service depuis les exigences initiales jusqu'aux performances finales des procédés d'END.

De plus, une Commission indépendante, chargée de se prononcer sur leur qualification a également été créée.

L'objectif de la présente communication est de :

- décrire sommairement le processus mis en place par cette Commission pour examiner les procédés d'END à qualifier,
- dégager, à partir du bilan des qualifications prononcées, les évolutions techniques induites sur les procédés d'END.

En conclusion, il convient d'abord de souligner que cette démarche représente, pour l'ingénierie d'EDF et de ses sous-traitants, un effort industriel considérable.

Cette démarche renforce la connaissance des performances des procédés d'END et de leurs limites ainsi que la maîtrise de leurs modes opératoires.

En s'appliquant aussi bien aux zones sensibles aux dégradations qu'en dehors de celles-ci, ce processus de qualification conduit à une meilleure évaluation des dégradations et à un renforcement de la défense en profondeur.

Il participe ainsi au maintien d'un niveau de sûreté satisfaisant pendant toute la durée de vie des installations.

SUMMARY

The application by EDF of the new french regulation induced important evolution on the in-service inspection of the primary and secondary circuits of PWR plants.

These evolutions concern all the ISI process from the initial requirements to the final NDT performances obtained.

An inspection body, the Qualification Commission, has also been created in order to pronounce qualifications.

The aim of this presentation is to :

- *summarize the Commission working process to examine the qualification dossiers,*
- *bring out, from the pronounced qualification, the technical evolutions induces on NDT.*

To conclude we shall underline first the important industrial effort undertaken by EDF and its subcontractors in order to perform qualification trials and obtain the related dossiers.

Sensitive to degradations areas and non-sensitive ones are both concerned by this qualification process so that an adequate evaluation of the degradations and an enhancement of defence in depth lead to a sufficient safety level for all the plant life.

1. LA REGLEMENTATION : UNE NOUVELLE DONNE POUR LA SURVEILLANCE EN SERVICE

La garantie de l'intégrité des circuits primaire (CPP) et secondaire (CSP) principaux des réacteurs à eau sous pression (REP) repose sur plusieurs lignes de défense : la qualité de la conception et de la fabrication ainsi que la surveillance en service.

Pour ces circuits, une nouvelle réglementation, l'arrêté du 10 novembre 1999 [1], dit « Arrêté Exploitation » conduit à renforcer la surveillance en service, notamment :

- En identifiant de nouvelles zones sensibles résultant d'analyses systématiques de résistance à la rupture brutale avec des coefficients de marge renforcés ou résultant d'une meilleure prise en compte des modes d'endommagement, tels que la fatigue et la corrosion sous contrainte,
- En qualifiant toutes les applications d'examen non destructifs (END) préalablement à leur mise en œuvre sur les circuits primaire et secondaire,
- En faisant prononcer les qualifications par une Commission indépendante de l'exploitant et des entités conceptrices des procédés d'END.

L'Arrêté Exploitation prévoit trois types de qualification.

Dans les zones sensibles, les qualifications générales ou spécifiques sont menées avec démonstration de performances pour des endommagements présumés ou avérés.

Claude BIRAC et al., EDF (France)

Evolutions techniques induites par la qualification des procédés d'examen non destructifs dans les réacteurs à eau sous pression

En dehors des zones sensibles, dans le cadre de la défense en profondeur, les qualifications conventionnelles sont menées en explicitant les performances.

2. LE PROCESSUS D'EXAMEN DES QUALIFICATIONS PAR LA COMMISSION

Le rôle de la Commission de qualification est de se prononcer sur la conformité entre les performances atteintes par les procédés d'END et les exigences initiales acceptées par l'Exploitant.

La commission est constituée d'une douzaine d'experts dont certains sont externes à l'Entreprise.

D'une manière générale, la Commission travaille en séances au cours desquelles les experts examinent les dossiers de qualification présentés par les Entités Conceptrices des procédés d'END, selon un processus comportant trois étapes principales (cf. figure 1).

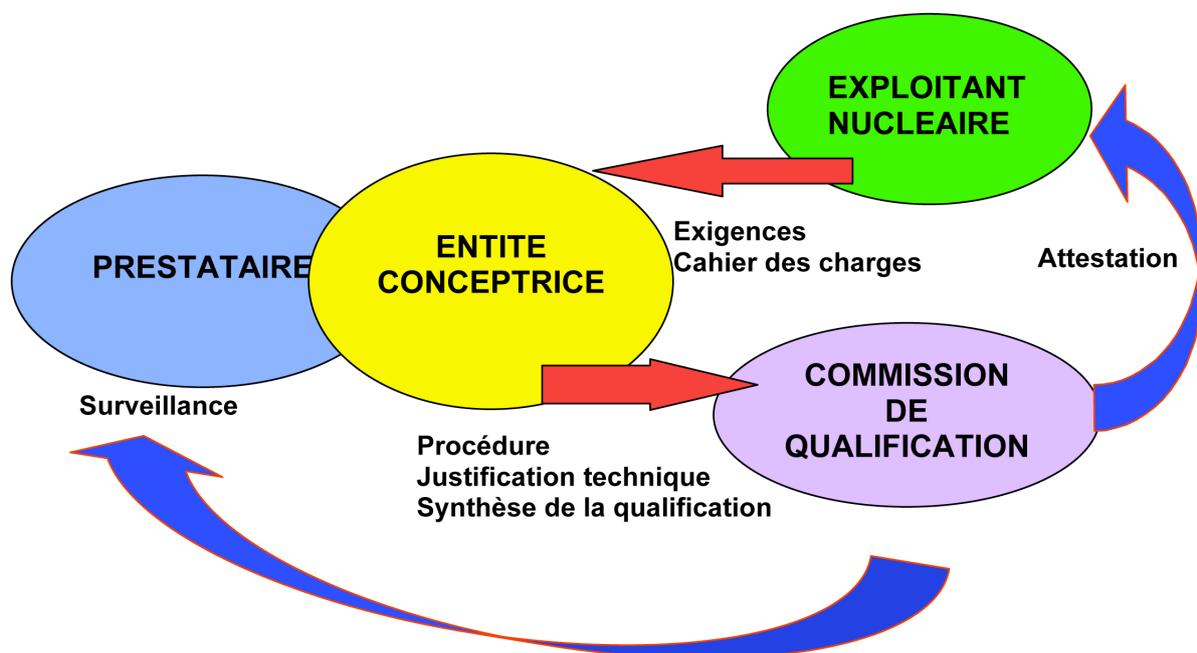


Figure 1 : La Commission de Qualification des procédés d'END

Claude BIRAC et al., EDF (France)

Evolutions techniques induites par la qualification des procédés d'exams non destructifs dans les réacteurs à eau sous pression

⇒ Première étape

L'Entité Conceptrice présente à la Commission :

- les exigences fonctionnelles de l'Exploitant : zone à inspecter, dimension du défaut à rechercher, ...
- la démarche de qualification pour atteindre ces exigences,
- les justifications techniques du procédé développé,
- les maquettes utilisées pour vérifier les performances sur la base d'essais de qualification.

⇒ deuxième étape

Quand la qualification comporte des essais de qualification et qu'elle est sous-traitée, ce qui est majoritairement le cas, les documents présentés sont essentiellement :

- la procédure d'examen et le programme d'essais de qualification, établis par le titulaire du contrat de sous-traitance,
- le programme de surveillance des essais, réalisé par l'entité conceptrice du procédé.

Pour sa part, la commission examine ces documents et vérifie l'efficacité de cette surveillance.

⇒ troisième étape

Au cours de cette troisième étape, le dossier de qualification final est examiné. Il comprend notamment la synthèse de la qualification où figurent les principaux éléments de démonstration de performance, ainsi qu'une fiche (de performances) qui résume les performances atteintes et précise les principales limites du procédé d'END mis en œuvre.

Au final, la qualification est prononcée avec ou sans réserve ou refusée.

Ce Processus technique d'examen des qualifications constitue la méthode d'inspection de la Commission en tant qu'organisme d'inspection au sens des normes ISO 17020/EN 45004.

Depuis 2002, la Commission est accréditée par le COFRAC et reconnue par l'Autorité de Sécurité Nucléaire.

En début 2005, sans compter les révisions de qualifications, la Commission a émis une quarantaine d'attestations de qualification qui se répartissent en fonction des techniques d'inspection en service et des types de qualification de la manière suivante :

TECHNIQUES	TYPE DE QUALIFICATION		
	Spécifique	Général	Conventionnel
Ultrasons	4	6	6
Courants de Foucault	10		
Radiographie		3	2
Surfaciques	1		3
Total	15	9	11

Claude BIRAC et al., EDF (France)

Evolutions techniques induites par la qualification des procédés d'examen non destructifs dans les réacteurs à eau sous pression

3. LES EVOLUTIONS DES PROCÉDES D'END DUES A LA QUALIFICATION

3.1. La problématique des évolutions

Cette présentation s'attache principalement à traiter des apports techniques, induits par la qualification, des procédés d'END, au sens de l'Arrêté Exploitation. Auparavant, il convient de préciser un certain nombre de notions.

En premier lieu, la notion de « qualification » : la qualification garantit les performances d'un procédé sous certaines conditions (dites « limites de qualification ») dans la zone d'examen avec un personnel qualifié.

A cet égard, bien avant la parution de l'Arrêté Exploitation, EDF avait engagé une réflexion méthodologique dans le cadre du Code RSE-M [2] et participé à plusieurs programmes européens dont le PISC et l'ENIQ [3].

Pour mettre en pratique le résultat de ces réflexions, EDF a, notamment, créé en 1992 une entité d'ingénierie dédiée au développement des procédés d'END. Cette entité conceptrice a établi les dossiers de qualification en s'appuyant sur ses sous-traitants.

En second lieu, la notion d' « évolution d'un procédé d'END » : dès les débuts de l'Inspection en service les procédés mis en œuvre n'ont cessé d'être modifiés pour accroître leur efficacité : amélioration des procédés, réduction du temps d'inspection, diminution du nombre d'artefacts, ...

Pour les procédés qualifiés, ces évolutions sont généralement initiées par le titulaire du contrat de sous-traitance. Elles se traduisent, à terme, par une révision de la qualification. Le rythme de ces évolutions doit être adapté afin de ne pas déstabiliser le référentiel de qualification et provoquer des effets inverses à ceux initialement recherchés. A ce jour, le quart des procédés qualifiés a déjà fait l'objet d'une révision. Ces évolutions ne sont pas traitées dans le présent document.

Ces notions étant définies, il est maintenant possible d'aborder les évolutions des procédés d'END qui sont la conséquence directe de la mise en application de l'Arrêté Exploitation.

Pour respecter la réglementation, EDF a dû définir ou redéfinir les exigences fonctionnelles pour chaque procédé d'END.

Dans le cas de nouvelles zones à inspecter, EDF a développé de nouveaux procédés d'END qui font l'objet d'autres communications. [4] [5]

Dans le cas des zones pour lesquelles des méthodes de contrôle existaient déjà, la question de la conformité de leurs performances par rapport aux nouvelles exigences se pose :

Claude BIRAC et al., EDF (France)

Evolutions techniques induites par la qualification des procédés d'examen non destructifs dans les réacteurs à eau sous pression

- la zone à examiner est-elle totalement couverte par le procédé ?
- la sensibilité est-elle suffisante pour détecter les défauts qui présentent les caractéristiques requises (nature, forme, dimensions, ...) ?
- les critères de recette des capteurs permettent-ils de garantir la sensibilité requise ?
- les paramètres influant les performances – paramètres relatifs à la méthode d'examen utilisée, au défaut recherché, au composant (géométrie et état de surface -, etc.) - conduisent-ils à définir des limites en dehors desquelles les performances sont moindres que celles exigées ?

Les entités conceptrices des procédés d'END sont nécessairement conduites à aborder cette dernière question au moment où elles élaborent la démonstration qui permet de garantir les performances dans la zone à examiner.

C'est au travers d'exemples relatifs aux principales méthodes d'examen (courants de Foucault, ultrasons et radiographie) que nous allons illustrer les évolutions techniques induites par le processus de qualification au sens réglementaire.

3.2. Les principales évolutions des procédés d'examen par courants de Foucault

Que ce soit dans le cadre de la qualification de procédés mis en œuvre industriellement depuis de nombreuses années ou, pour ce qui concerne le développement de nouvelles techniques, pour répondre à un besoin particulier, les principales évolutions induites par la démarche de justification ont porté sur les points suivants :

- maîtrise de la reproductibilité
- relation défaut usiné / défaut présumé ou avéré

L'aspect « maîtrise de la reproductibilité » s'est avéré central pour l'établissement des qualifications des procédés d'examen par courants de Foucault des tubes de générateur de vapeur existant, qu'ils reposent sur l'utilisation de sondes axiales ou de sondes tournantes. La reproductibilité concernée porte directement sur les signaux délivrés par l'équipement industriel au moment de l'examen (et non sur les caractéristiques des défauts déduites des signaux...). Les échanges avec la commission de qualification ont amené l'entité conceptrice à mettre en cohérence les grandeurs mesurées lors des différentes phases de recette des appareils et capteurs composant l'instrumentation et les critères d'acceptation associés, avec les performances globales affichées.

Ainsi, les modalités de recette des capteurs courants de Foucault (domaine peu couvert par la normalisation et l'état de l'art à ce jour) ont notablement progressé pour répondre aux objectifs.

Pour ce qui concerne le développement de nouveaux procédés dédiés à la recherche de défauts du type fissuration par corrosion sous contrainte ou par fatigue (cas des examens par sondes tournantes à fonctions séparées pour les zones de transition des tubes de générateur de

Claude BIRAC et al., EDF (France)

Evolutions techniques induites par la qualification des procédés d'examen non destructifs dans les réacteurs à eau sous pression

vapeur, ou de l'examen des manchettes de cannes chauffantes du pressuriseur), l'utilisation de défauts usinés implantés dans les maquettes dédiées aux essais de qualification a conduit à s'interroger sur leur représentativité vis-à-vis des dégradations recherchées. Pour répondre au problème posé, l'entité conceptrice a porté ses efforts sur l'établissement de relations entre les réponses de défauts usinés et de fissures de dimensions semblables.

La démarche retenue a consisté à exploiter les données expérimentales sur défauts réels ou représentatifs disponibles pour établir et justifier les relations. Ces relations se traduisent généralement par la prise en compte d'un facteur d'atténuation sur l'amplitude des signaux. Une fois les relations entre défauts recherchés et défauts usinés établies, la prise en compte des différents paramètres influant (état de surface, géométrie locale, présence de dépôts, de sur-épaisseur magnétique et/ou conductrice ...) dans les essais de qualification peut être menée de façon pertinente sur des maquettes comportant des défauts usinés.

3.3. Les principales évolutions des procédés d'examen par ultrasons

Le premier exemple concerne l'influence d'un état de surface dégradé sur les performances du contrôle ultrasonore.

C'est un phénomène qui est bien connu qualitativement ; mais une évaluation plus quantitative a été engagée pour les besoins de la qualification du contrôle ultrasonore de la virole de cœur des cuves des REP.

On rappelle que la surface interne des cuves est recouverte d'un revêtement d'acier inoxydable déposé par soudage. Sur certaines cuves, un usinage est ensuite effectué. Sur d'autres, la surface est meulée ou légèrement meulée : la surface comporte alors des sillons résiduels entre les bandes de revêtement. Le contrôle est réalisé au moyen de traducteurs focalisés en immersion pour vérifier l'absence de défauts sous le revêtement.

Les essais de qualification sur maquette, ainsi que la modélisation ont montré :

- en ce qui concerne la détection, une baisse de sensibilité de l'ordre de quelques dB, au voisinage des sillons inter passes : cette baisse est sensible principalement pour les défauts perpendiculaires aux passes de revêtement,
- en ce qui concerne l'évaluation de la hauteur des défauts, une incertitude de mesure plus élevée lorsque le point d'impact du faisceau est situé sur un sillon inter-passes : l'incertitude peut alors atteindre 2,3 mm pour des défauts parallèles aux passes de revêtement, incertitude qui n'est que de 1 mm pour un état de surface régulier.

Ces résultats ont été pris en compte dans la démonstration de performances et ont permis d'afficher de manière plus précise les performances qui peuvent être garanties dans chaque configuration du contrôle : type de cuve, direction de sondage, position de l'indication. [6]

Le deuxième exemple concerne la difficile question de la représentativité des défauts pour le phénomène physique concerné. La Commission s'est interrogée sur la légitimité de représenter les fissures de fatigue par des entailles rectangulaires usinées pratique souvent utilisée pour des raisons de simplicité de réalisation et de reproductibilité. Mais les résultats sont-ils équivalents ?

Claude BIRAC et al., EDF (France)

Evolutions techniques induites par la qualification des procédés d'examen non destructifs dans les réacteurs à eau sous pression

Si l'on s'attache aux phénomènes de réflexion spéculaire ou à l'effet de coin (pour la détection des défauts, par exemple) toutes les études montrent que les résultats obtenus sur les entailles et sur les fissures sont très voisins. Mais si l'on s'intéresse aux phénomènes de diffraction, utilisés pour évaluer la hauteur des défauts par exemple, les conclusions doivent être nuancées car le profil du fond de la fissure devient un paramètre à considérer.

Il est en effet nécessaire que sa courbure soit assez faible pour que les contributions locales de l'écho de diffraction soient en phase sur une longueur suffisante. Les études menées lors de qualification ont conclu que le fond de la fissure peut être assimilé à une droite parallèle à la surface si les écarts de parcours ultrasonore dus à la courbure sont inférieurs au quart de la longueur d'onde, sur une longueur correspondant à la largeur du faisceau. Dans ces conditions, vis-à-vis du profil du défaut, les phénomènes de diffraction sur fissures et entailles peuvent être considérés comme équivalents.

Ces conclusions ont permis aux entités conceptrices de mieux définir les cas pour lesquels les performances évaluées sur des entailles rectangulaires, peuvent être garanties sur des fissures.

3.4. Les principales évolutions concernant les procédés d'examens par radiographie

Pour la qualification d'une application radiographique existante, l'apport technique de la démonstration ou l'explicitation des performances, porte essentiellement sur la justification technique. Elle consiste en l'analyse des paramètres influents, et précise les limites à l'intérieur desquelles la performance est revendiquée.

Ces limites sont la conjugaison des paramètres liés :

- à la pièce (matériaux, dimensions, forme),
- au défaut (forme orientation, dimensions, situation dans l'épaisseur),
- au procédé (fixés par la procédure qui précise les conditions de la mise en œuvre, telles que les caractéristiques requises pour le radiogramme, la densité, le recouvrement, les indicateurs de qualité d'image et d'efficacité du blocage),
- à l'environnement (accès, rayonnement parasite, température).

Associée au retour d'expérience, cette justification technique doit permettre de préciser les conditions indispensables pour atteindre la performance revendiquée dans la zone à surveiller.

Dans le cas de l'examen de la zone de liaison bimétallique des tubulures de cuve, des essais sont réalisés sur des maquettes qui prennent en compte le désalignement du rayonnement par rapport au défaut plan recherché et le gradient d'épaisseur.

Ces essais ont montré qu'un défaut plan, situé sur le cône déterminé par le chanfrein, est détecté avec une densité et un contraste suffisants, quelle que soit la position du défaut dans l'épaisseur de la paroi.

Claude BIRAC et al., EDF (France)

Evolutions techniques induites par la qualification des procédés d'examens non destructifs dans les réacteurs à eau sous pression

Ils ont confirmé la nécessité d'une densité élevée du radiogramme pour la détection d'un défaut fin, et une importante sensibilité du désalignement entre le plan du défaut et le rayonnement.

D'autres applications ont fait appel au code de calcul MODERATO [7], lequel permet de prédire la formation d'une image (visible par l'opérateur) dans des conditions paramétriques choisies. Les essais peuvent ainsi être limités à ceux nécessaires à des validations ou des confirmations.

L'étude des paramètres influents a établi l'importance de la mise en œuvre dans les applications gammagraphiques, en particulier pour assurer la densité du radiogramme, et la précision de la position de la source en cours d'exposition.

4. DISCUSSION ET CONCLUSIONS

La mise en application par EDF d'une nouvelle réglementation, l'arrêté du 10 novembre 1999, a entraîné des évolutions significatives pour l'inspection en service des circuits primaire et secondaire des centrales nucléaires REP.

Ces évolutions concernent l'inspection en service depuis les exigences initiales jusqu'aux performances finales des procédés d'END.

Il a également été créé une commission indépendante chargée de se prononcer sur la qualification de ces procédés.

Depuis 2002, la Commission est accréditée par le COFRAC et reconnue par l'Autorité de Sûreté Nucléaire.

Début 2005, la Commission avait émis une quarantaine d'attestations de qualification sans compter les révisions de qualifications.

Sur le plan technique, il convient de souligner l'effort considérable accompli par EDF et ses sous-traitants, pour :

- a. réaliser les essais de qualifications,
- b. revisiter et élaborer les dossiers de qualifications, présentés à la Commission.

Cet effort s'est traduit principalement par les apports techniques suivants :

- une meilleure définition des objectifs des procédés d'END en termes de zones à examiner et de caractéristiques du défaut à rechercher,
- une meilleure maîtrise des modes opératoires des procédés de contrôle,
- un accroissement notable dans la connaissance des performances des contrôles et de leurs limites, garanties sur la base d'un dossier de démonstration.
- une validation technique de ces performances par des experts internes et externes à l'Entreprise.

Claude BIRAC et al., EDF (France)

Evolutions techniques induites par la qualification des procédés d'examen non destructifs dans les réacteurs à eau sous pression

Au final, la plupart des modes opératoires des procédés existants ont été reconduits et sont donc en mesure de garantir les performances exigées.

Simplement pour certains cas, dont des exemples ont été présentés dans cet article, les limites entre lesquelles les performances sont garanties, ainsi que certains modes opératoires ont dû être précisés.

Ce processus de qualification, qui s'applique aussi bien aux zones sensibles aux dégradations qu'en dehors de celles-ci, conduit à une meilleure évaluation des dégradations et à un renforcement de la défense en profondeur.

Il participe ainsi au maintien d'un niveau de sûreté satisfaisant pendant toute la durée de vie des installations.

Références

- [1] Arrêté du 10 novembre 1999, relatif à la surveillance en exploitation du circuit primaire principal et des circuits secondaires principaux des réacteurs à eau sous pression.
- [2] RSE-M Règles de surveillance en exploitation des matériels mécaniques des îlots nucléaires REP – AFCEN, 1997
- [3] European methodology for qualification, ENIQ, réf EUR 17299EN1997
- [4] Démarche de qualification selon RSE-M pour les END – exemple d'application à la détection de défauts de fatigue dans des tuyauteries en acier austénitique
B. Rotter, C. Birac, Ph. Benoist - Conférence SFEN, novembre 2000
- [5] L'optimisation de la maintenance des pompes primaires avec l'aide des END
E. Abittan, B. Pierrot, T. Allard - Revue générale Nucléaire, juin 2000
- [6] Contribution des END à la durée de vie des cuves des réacteurs nucléaires REP
J. Delemontez, A Gagnor – Revue générale nucléaire, juin 2000
- [7] Etudes paramétriques quantitatives en radiographie avec le logiciel de simulation MODERATO – Conférence COFREND, Beaune mai 2005

Claude BIRAC et al., EDF (France)

Evolutions techniques induites par la qualification des procédés d'exams non destructifs dans les réacteurs à eau sous pression