

La machine d'inspection en service pour le suivi des cuves de réacteurs nucléaires

Introduction : problématique

Les installations de production électrique par l'énergie nucléaire sont prévues pour être exploitées pendant plusieurs dizaines d'années avec un niveau de sécurité élevé. Des calculs préalables ont été conduits, sur la base des régimes thermomécaniques en exploitation et des essais, et surtout pour des situations accidentelles de référence. Ils ont permis de déterminer quelle est l'évolution naturelle et inévitable des défauts qu'on peut tolérer pour rester en deçà d'un état critique, défini par un "défaut enveloppe" qui ne devra jamais être dépassé.

En application de la réglementation, mais aussi par souci industriel, les matériels sont soumis à des séries d'examens non destructifs (END) lors des périodes de maintenance. L'élément le plus sensible, par son coût mais aussi par l'irradiation importante qu'il subit, est la cuve. Le suivi du comportement des aciers de cuve sous irradiation est donc absolument nécessaire.

La surveillance de l'intégrité et de l'évolution des aciers est donc effectuée périodiquement. La détection précoce de modifications éventuelles permet ainsi d'acquérir des informations, avant qu'une éventuelle dégradation significative (déformation permanente, perte d'épaisseur, fissure) ait un impact sur la sécurité de l'installation. C'est l'objet de ce dossier.

1. Les examens non destructifs (END)

1.1 Objectifs des études

Les END sont employés pour trois objectifs :

- La détection d'un défaut qui n'était pas encore recensé à la mise en service ;
- La définition des caractéristiques géométriques des défauts : situation, forme, orientation, dimensions ;
- Le suivi du défaut, ou la surveillance d'une zone présentant une singularité.

Il s'agit surtout de vérifier périodiquement l'hypothèse du "défaut enveloppe" proposée dans le rapport de sûreté (RDS).

Quand un élément nouveau est détecté, on fait donc de nouveaux calculs mécaniques, qui vont permettre de déterminer si le défaut, que l'on postule amorcé ou évolué pendant un ou plusieurs cycles d'exploitation, restera stable dans des conditions accidentelles de référence, et peut donc être toléré, au moins pendant un temps.

Ces calculs sont conduits sur la base :

- Des caractéristiques des matériaux (caractéristiques mécaniques, types d'aciers) ;
- Des hypothèses de changement de matériel, en cours d'exploitation et en situation accidentelle (maintenance préventive) ;
- De la situation, de la forme, et des dimensions du défaut dont la description est fournie par les examens non destructifs, en tenant compte des contraintes locales particulières.

La détection précoce diminue l'indisponibilité de l'installation, elle permet d'optimiser la programmation et la conception de la réparation. La sensibilité de cette approche conduit à mettre en évidence des défauts technologiques (inévitables) de fabrication, le plus souvent proche des seuils de détection des procédés d'examen employés. Les surfaces de configurations géométriques irrégulières sont fréquentes. Elles sont donc difficiles à traiter, en particulier si elles sont associées à des structures hétérogènes (soudures, joints de cuve, raccords, filetages).

1.2 Les principales méthodes d'examen employées

Plusieurs méthodes différentes sont donc à mettre en œuvre :

- Observations visuelles (directes ou non, selon l'environnement radioactif) ;
- Surfaciques : magnétoscopie (modification par des défauts d'un champ magnétique imposé) par exemple ;
- Volumiques : par gammagraphie (analyse de la réponse en transmission d'un flux de rayons gamma), ultrasons directs ou focalisés ;
- Pour certains éléments, par courants de Foucault (tubes des générateur de vapeur).

L'environnement radioactif limite le temps d'accès. Certains composants tel que la cuve, les tubes des générateurs de vapeur (GV), les brides des pompes de circulation, sont donc examinés par des moyens robotisés. Nous allons nous intéresser plus particulièrement au suivi de la cuve du réacteur, élément dimensionnant pour la durée de vie et, parce que soumis à une irradiation neutronique élevée et des contraintes thermomécaniques importantes, le plus sollicité.

1.3 Nature des aciers des cuves de réacteur

La cuve est un composant cylindrique de 4.4 mètres de diamètre et de plus de 12 mètres de haut. Elle est en acier de 23 cm d'épaisseur. C'est la "seconde barrière", entre la gaine qui retient le combustible (1^{ère} barrière) et l'enceinte de confinement du bâtiment réacteur en béton (3^{ème} barrière). La cuve est à considérer comme le composant principal du réacteur. Si elle devait se rompre brutalement, il serait difficile de maintenir l'intégrité du cœur. Le remplacement de cette cuve ne peut être envisagée pour des raisons économiques.

Les cuves des réacteurs à eau pressurisée (REP) français sont constituées de trois viroles cylindriques forgées, puis soudées entre elles. En partie basse, l'ensemble de ces viroles est fermée par un fond hémisphérique forgé. Les deux viroles inférieures sont placées en face du cœur et constituent la zone dite "de cœur". Ce sont elles qui subissent la fluence (flux de neutrons intégrés sur le temps) la plus élevée. Les neutrons, apportant une énergie cinétique parfois élevée, provoquent des déplacements d'atomes dans l'acier, et modifient progressivement ses propriétés mécaniques. La virole supérieure, moins sollicitée par les neutrons, comprend par contre les tubulures d'entrée (335°C) et de sortie du fluide primaire (285°C) vers le GV et les pompes. Elle est donc soumise à des écarts sensibles de température. En partie haute, une bride épaisse (figure 1) supporte le couvercle amovible de la cuve, sur lequel les dispositifs de commande des grappes d'absorbants traversent l'acier en de multiples points. Joints concentriques et goujons assurent l'étanchéité du tout.

Les aciers (alliages de fer avec moins de 1,7% de carbone) retenus sont les suivants :

- Pour la cuve, des aciers au carbone faiblement alliés, à faible teneur en cobalt (activation du cobalt entraînant des problèmes de radioprotection lors des END) ;
- Pour les viroles de cœur et les soudures associées, des teneurs réduites en éléments réputés fragilisants sous irradiation (Cu, P). C'est une zone où les écarts thermiques sont parfois importants ;
- Toute la surface intérieure de la cuve est revêtue d'un dépôt bicouche en acier inoxydable austénitique. Cet acier particulier (le fer est sous la forme γ cubique faces centrées) est obtenue par ajout de Ni, de Cr, et assure une ténacité exceptionnelle (résistance à la propagation des fissures, et à la rupture par traction) là où l'irradiation est maximale.

1.4 Définition des tailles de défauts

Sur la base des performances des contrôles, et de la fabrication soignée des aciers, une taille de défaut de "référence" a été retenue pour l'ensemble des études théoriques d'intégrité des cuves, défaut sous le revêtement, de 6 mm de profondeur et de longueur 60 mm. Les premières études qui ont été réalisées sur toutes les cuves du palier 900 MW électrique montrent qu'un tel défaut reste acceptable, quelle que soit sa position dans la zone de cœur et quel que soit le transitoire considéré, en intégrant le vieillissement théorique de la cuve sous irradiation. Ce retour d'expérience a été étendu aux paliers 1350 MW, plus récents.

Eventuellement il convient de prendre en compte les quelques défauts de profondeur supérieure à 6 mm qui pourraient être révélés par les contrôles. Ainsi, sur la cuve de Tricastin 1, on a pu démontrer l'acceptabilité de défauts de hauteur 12 mm et de longueur supérieure à 50 mm, pour des durées de fonctionnement de 40 ans, avec des marges satisfaisantes. Ce résultat est dû pour l'essentiel à la température de transition ductile fragile encore basse (limite de température en dessous de laquelle on risque une rupture par choc brutal)¹ de cette cuve. La température de la cuve doit toujours rester nettement supérieure à cette limite.

1.5 Inspection en service

A chaque visite décennale, le revêtement intérieur de la cuve est exploré visuellement pour recenser les défauts de surface, spécialement les défauts débouchants qui concentrent les contraintes. On relève également les points de corrosion qui ne sont pas rares.

L'objectif de l'inspection en service de la "zone de cœur" (figure 1) est surtout de vérifier qu'il n'existe pas de défaut, sous le revêtement de la cuve, qui pourrait en fin de vie accroître le risque de rupture brutale en situation incidentelle ou accidentelle. Cette éventuelle rupture "brutale" est contrôlée par des d'éprouvettes d'essais mécaniques, implantées en exploitation dans le cœur, que l'on relève lors de ces visites.

Basée essentiellement sur la technique des ultrasons focalisés en immersion (méthodes décrites plus loin), la méthode d'examen non destructive développée depuis 1987 permet d'explorer la zone des Trente Premiers Millimètres (TPM) de l'épaisseur de la cuve. C'est en

¹ La tenue mécanique d'une pièce est jugée à son comportement sous contrainte. Un matériau est dit ductile lorsqu'il est possible de le déformer plastiquement avant de le rompre. A l'inverse, un matériau est dit fragile s'il se rompt sans se déformer plastiquement.

effet cette zone qui est soumise aux neutrons les plus "rapides" (d'énergie cinétique élevée, causant donc le plus de dommages d'irradiation), et aux contraintes thermiques les plus fortes.

Suite au retour d'expérience, cette méthode a été perfectionnée par la suite sous l'appellation VPM (25 premiers millimètres), et est mise en œuvre sur toutes les cuves du parc EdF depuis 1991, lors des secondes visites décennales des chaudières nucléaires. Elle a pour but essentiellement de rechercher d'éventuels défauts générés par l'irradiation dont l'extension en profondeur serait supérieure ou égale à 5 mm. La présence de ces défauts pourrait préparer des fissures, concentrer les contraintes et donc fragiliser la cuve lors d'accidents ou même en exploitation. Rappelons qu'il s'agit d'examiner une surface d'environ 170 m² en la scrutant avec un pas de l'ordre de 2 mm. Les résultats obtenus par les contrôles TPM donnent donc une image exacte et précise des défauts dans la zone de cœur des cuves, et sur une profondeur de 20 à 30 mm.

2. La Machine d'Inspection en Service (MIS)

2.1 Présentation de la MIS

Depuis 1974, plus de 240 inspections de cuve ont été réalisées. La surveillance d'autres éléments sensibles est également entreprise comme les mécanismes de grappe (absorbants de contrôle dont les commandes traversent le couvercle) et la ligne de liaison au pressuriseur (fortes différences de températures) qui assure la régulation en pression du circuit caloporteur. L'inspection de la cuve comprend l'examen télévisuel à 100% de la surface interne de la cuve et du couvercle ainsi que divers examens gammagraphiques. Les goujons et écrous du couvercle sont contrôlés séparément par ultrasons et courants de Foucault. Des caméras couleur permettent, sans changement d'objectif, un examen panoramique systématique sur des zones larges (400 x 400 mm), ou encore des examens plus localisés sur des plages réduites (40 x 40 mm). Des pointeurs laser révèlent le relief de la surface examinée et permettent de distinguer les creux des bosses. Une véritable cartographie détaillée de la surface est ainsi réalisée.

Pour l'inspection en volume de la cuve, la technique d'examen par ultrasons focalisés a été retenue dès le départ à cause de sa résolution élevée et de sa capacité d'adaptation aux géométries des pièces. L'inspection comprend le contrôle volumique de toutes les soudures (corps et couvercle) et de la bride (entre la cuve et le couvercle), la recherche de défauts de surface dans la région du cœur (examen VPM).

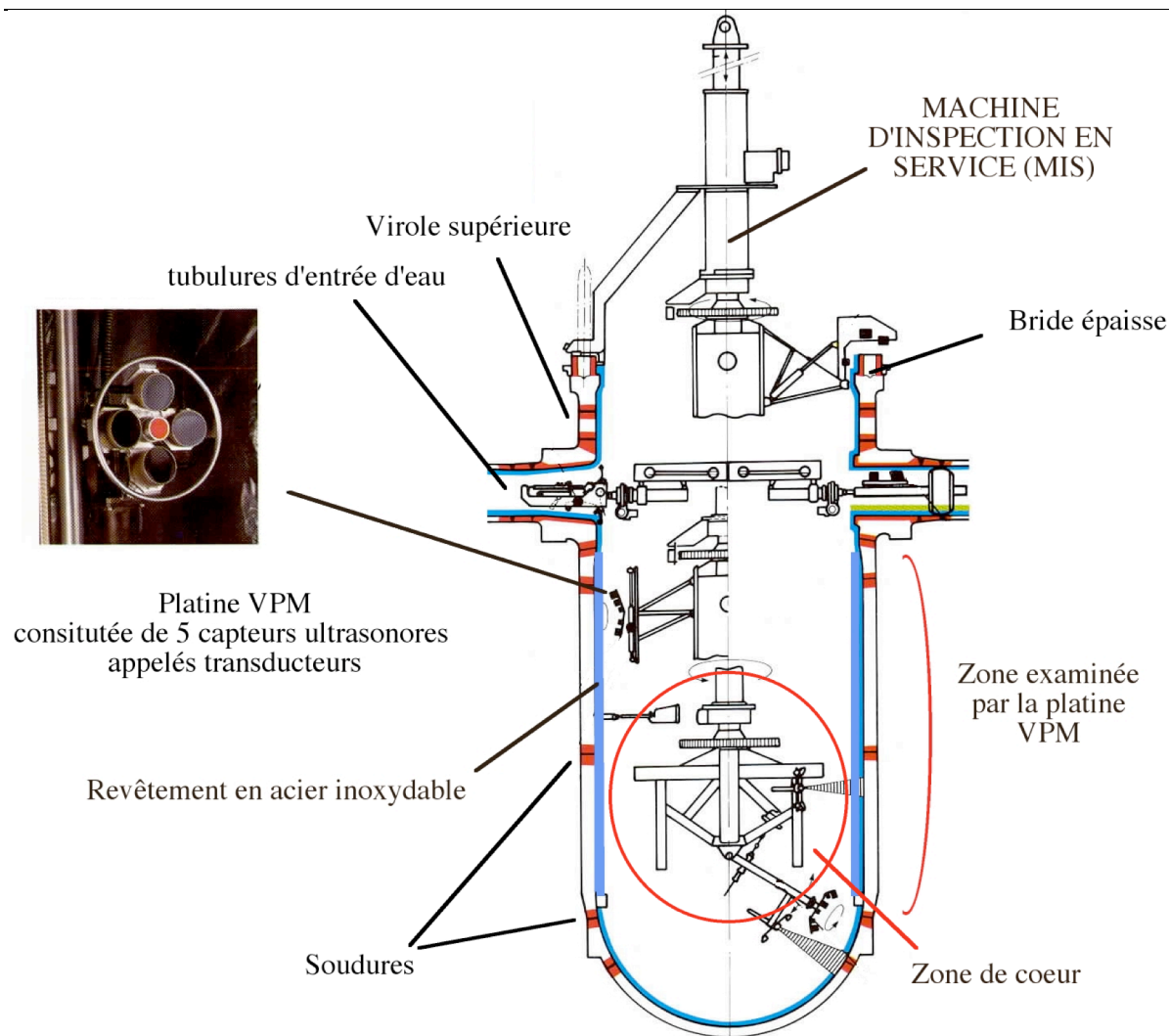


Figure 1 : Mise en place de la MIS dans la cuve, et détails de la platine à ultrasons

Différentes platines de contrôle, et leurs transducteurs, balayent toute la surface intérieure de la cuve, et l'explorent sur les vingt cinq premiers millimètres. Les orientations variables, les caméras, et la partie inférieure hémisphérique ont nécessité le développement d'outils très spécifiques. La machine est complétée par des outils spécifiques pour la surveillance de la partie haute de la cuve (bride, tubulures de circulation du fluide primaire).

L'examen des soudures s'effectue par gammagraphie. Pour cette méthode, un flux de photons gamma généré par une source d'iridium 192 est analysé en transmission pour détecter les défauts. La taille est appréciée, mais la résolution est moindre que par les ultrasons. L'activité de la source radioactive est de 200 curies (maximum toléré 220 Ci), et l'outil est conçu pour permettre des tirs fortement désaxés si la position du défaut le nécessite.

2.2 Gestion des mesures et simulation

La génération des ondes ultrasonores est réalisée par des transducteurs. Un logiciel de simulation, adapté pour ces mesures, intègre modélisation des champs d'ultrason, simulation de l'interaction champ défauts, et traitement et analyse du signal ultrasonore HF récupéré. Ce module calcule les valeurs du champ de pression ultrasonore produit par le transducteur dans la pièce à examiner. Le calcul du champ tient compte de tous les paramètres pertinents du contrôle : pièce, forme de l'interface, nature du matériau, couplage transducteur-fréquence, dimension de la surface émissive, amortissement. La modélisation précise du champ permet une optimisation de la détection des défauts, et une interprétation plus facile des résultats lors de la phase de caractérisation. Le logiciel permet surtout de définir la forme optimum de la lentille de focalisation pour la zone étudiée. Ces paramètres de forme ont d'ailleurs servi d'entrée à l'ordinateur de fabrication qui a piloté l'usinage du transducteur. De nombreux essais expérimentaux ont permis sa qualification.

Un logiciel calcule alors l'interaction du champ ultrasonore dans la pièce concernée, simulant des réflecteurs incorporés comparables à des défauts réels (fissure, inclusion, porosité). Cette interaction procède d'un modèle physique basé sur les lois de l'acoustique. Les conversions de faisceau de l'onde incidente sont prises en compte là où elles s'imposent. De même, les phénomènes de diffraction par les bords des fissures sont modélisés. Une forme d'onde standard est retenue pour le pulse d'émission, dont le contenu spectral est adapté à la fréquence et l'amortissement du transducteur utilisé.

3. Intérêt des ultrasons pour la surveillance des aciers, particularités

3.1 Production d'ultrasons : les transducteurs

Les ultrasons sont des ondes sonores de fréquence usuellement comprises entre 1 et 5 MHz. Ces ondes sont transmises à un matériau quelconque par l'intermédiaire d'une source vibrante produisant une succession de compressions et de tractions dans la matière.

Les transducteurs permettent de convertir, lors de l'émission, de l'énergie électrique en énergie mécanique et, lors de la réception, de l'énergie mécanique en énergie électrique. Ce sont des éléments qui convertissent un signal électrique incident en un signal acoustique au moyen d'une couche piezo-électrique déposée sur l'une des faces planes d'un barreau de saphir métallisé. Cet élément est accolé à un bloc amortisseur destiné à absorber les ondes émises

également par les faces latérales et arrière de l'élément actif (d'où un signal bien monodirectionnel). Il sert également à atténuer les vibrations propres à celui-ci, diminuant ainsi le temps de vibration de la pastille (signal aller), ce qui permet de bien mesurer le signal réfléchi (signal retour atténué).

A une fréquence déterminée, l'émetteur délivre une impulsion électrique de très courte durée (inférieure à 10^{-7} s) à l'élément piézo-électrique par la décharge d'un condensateur. Le transducteur entre en résonance et génère à sa fréquence nominale une oscillation amortie qui pénètre alors dans le matériau. Simultanément, ou avec un léger décalage, on déclenche le balayage horizontal d'un l'écran de visualisation. Au fur et à mesure que les échos reviennent au transducteur, ils se visualisent sur l'écran par des déviations verticales d'autant plus importantes que les réflecteurs (défauts) situés dans le matériau sont grands et bien orientés par rapport au signal aller (figure 6).

Ces ondes sont caractérisées par : (1) la vitesse de propagation qui ne dépend que du matériau dans lequel les ondes se déplacent (5850 m/s en onde longitudinale, et 3250 m/s en onde transversale pour l'acier), (2) la longueur d'onde (λ), distance séparant deux zones comprimées, et (3) le mouvement parasite imprimé aux microcristaux du matériau par la fréquence (f) et qui absorbe une partie de l'énergie lors du passage de l'onde.

3.2 Principe général du contrôle de matériaux par les ultrasons

Lorsqu'une onde ultrasonore arrive à l'interface de deux milieux, une grande partie de cette énergie ultrasonore est réfléchiée, et seule une faible partie pénètre dans le deuxième milieu. Le couplage sonore est indispensable pour que l'onde arrive bien dans le matériau (pas de perte d'énergie mécanique). L'interface transducteur-acier s'effectue avec de l'eau. Toute discontinuité peut ainsi être mise en évidence pour peu que son orientation soit favorable, et ses dimensions suffisantes. L'émetteur envoie des impulsions, et fait récepteur entre deux émissions. Le train d'ondes se réfléchit sur le fond de la pièce, ou sur toute autre discontinuité donnant plusieurs échos. Connaissant la vitesse du son dans le matériau, la mesure du temps mis par l'onde pour parcourir deux fois le trajet entre la surface et le défaut renseigne sur la profondeur. Après réflexion dans le milieu à contrôler, le signal en retour doit être amplifié.

3.3 Focalisation des ultrasons

Afin d'augmenter la sensibilité du capteur, il convient de concentrer le faisceau ultrasonore dans une zone prédéterminée pour y détecter les défauts de petites dimensions. Focaliser les ultrasons signifie modifier les directions de propagation, à l'origine parallèles, pour les faire converger en un point appelé foyer. La focalisation est généralement obtenue à l'aide d'une lentille sphérique concave. L'association de plusieurs transducteurs, avec des lentilles de rayons de courbure différents, permet d'analyser une pièce épaisse sur toute son épaisseur (on distingue sur la figure 1 la platine et quatre transducteurs).

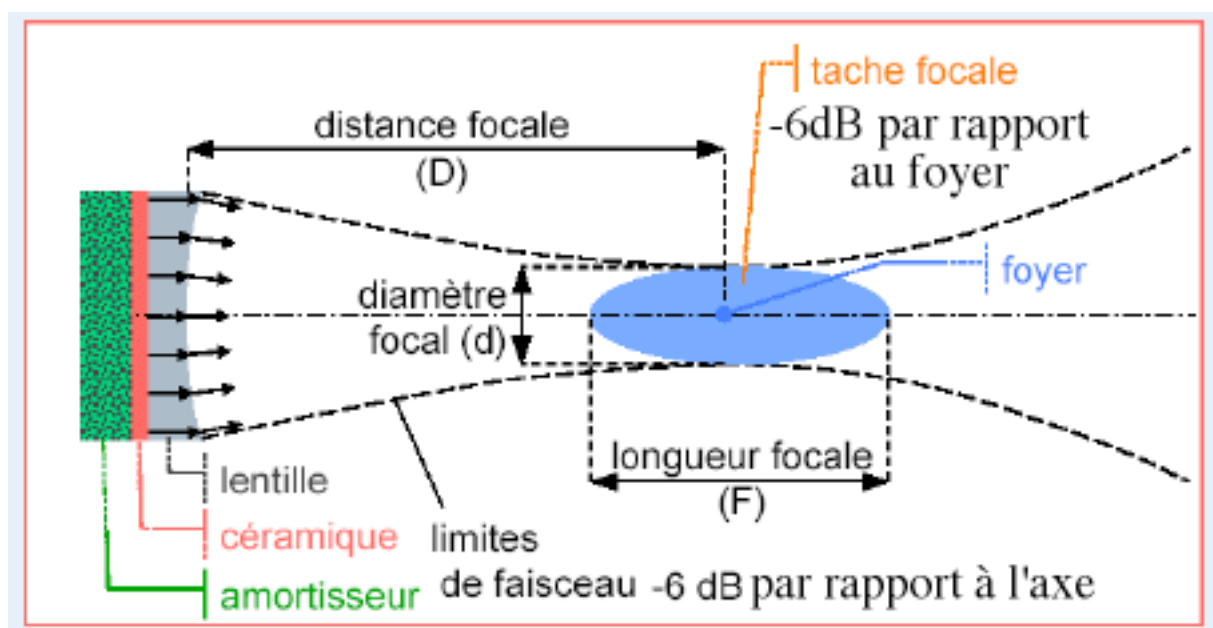


Figure 2 : Transducteur focalisé, et tache focale

Les dimensions transverses et axiales de la tache focale sont fonctions de caractéristiques géométriques du transducteur : distance focale et diamètre (angle d'ouverture). La tache focale est définie comme le domaine où plus de 50% de l'énergie est concentrée. Cette tache a un diamètre de l'ordre de la longueur d'onde, et une dimension axiale d'environ 8 longueurs d'onde. On est donc bien dans le domaine de défauts de référence pris en compte dans les calculs de sûreté, et la détection de tout élément de taille supérieure est possible. Les limites de faisceau indiqués sur la figure 2 sont déterminées en atténuation relative en dB par rapport à l'axe.

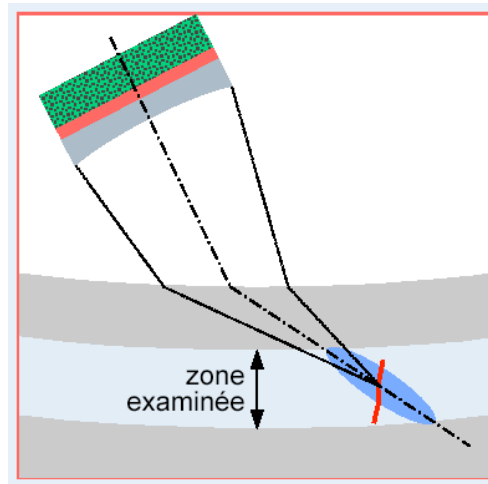


Figure 3 : Comparaison de la tache focale et de la taille des défauts

Le transducteur est placé dans l'eau pour assurer le couplage mécanique entre le transducteur et le métal (en grisé). Le traitement du signal prend en compte la surface du matériau (courbure éventuelle pour l'examen en fond de cuve) pour simuler le comportement théorique du signal en l'absence de défaut.

L'orientation des transducteurs permet de choisir la zone où l'on veut focaliser les ultrasons, de régler l'inclinaison du faisceau et donc de déterminer avec une bonne précision l'emplacement en profondeur, en volume du défaut rencontré. Un asservissement informatique gère la commande et le traitement des signaux diffractés.

3.4 Conversions de mode

Le capteur focalisé génère un faisceau acoustique fortement convergent qui va frapper la surface de l'objet. En acoustique l'onde incidente peut être longitudinale ou transversale, et il peut y avoir conversion de mode à l'interface : lorsque l'onde incidente est par exemple longitudinale, on observe deux ondes transmises, une longitudinale et une transversale, et deux ondes réfléchies, une longitudinale et une transversale. Il peut y avoir de plus, sur une surface libre, combinaison de ces deux types d'ondes et formation d'une onde de surface. Il existe donc trois principaux types d'ondes : (1) les ondes longitudinales ou de compression, (2) les ondes transversales et (3) les ondes de surface ou de Rayleigh.

a. les ondes longitudinales (ondes L)

Les particules constituant le milieu se déplacent parallèlement à la direction de propagation, ce qui provoque des contraintes de compression et de traction.

b. les ondes transversales (ondes T)

Le mouvement des particules est perpendiculaire au sens de propagation, les contraintes provoquées sont dites de cisaillement. Seuls les solides présentent une rigidité permettant la transmission des ondes transversales. On aura donc de telles ondes dans les aciers. Lorsqu'une onde longitudinale arrive avec un angle d'incidence (α) à l'interface de deux milieux, elle donne naissance à deux ondes réfractées : une longitudinale (L) et une transversale (T). Pour éliminer l'onde (L), on augmente l'angle (α) jusqu'à ce qu'elle devienne rasante. Il ne reste alors plus que l'onde transversale inclinée d'un angle (δ) par rapport à la verticale.

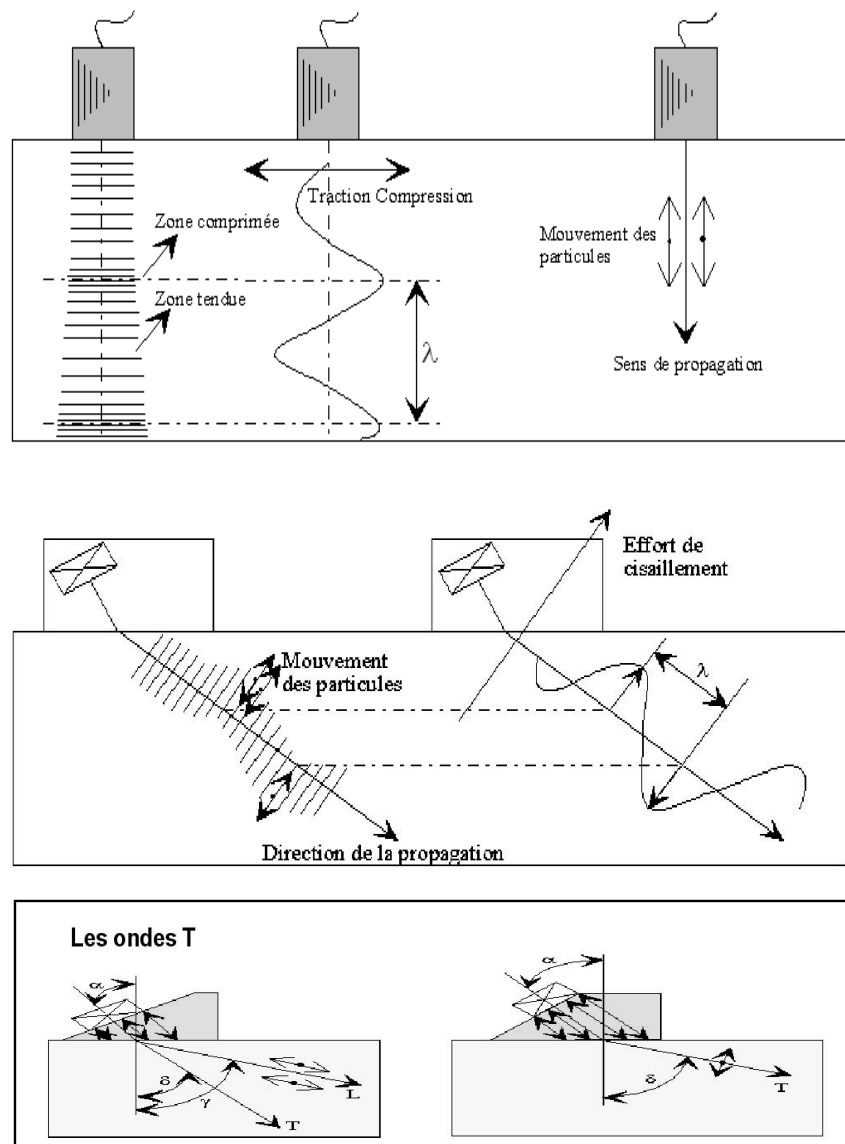


Figure 4 : Visualisation des faisceaux et de leur propagation selon l'inclinaison du faisceau

c. les ondes de surface ou de Rayleigh (T+L)

En inclinant suffisamment le transducteur, l'onde longitudinale est devenue rasante. Il est maintenant possible de combiner l'onde transversale avec l'onde longitudinale, en inclinant davantage encore le transducteur. Cette combinaison donne naissance à une onde de surface. Le mouvement des particules est la composition de deux vibrations de même fréquence déphasées de 90° . Ces ondes n'intéressent qu'une faible épaisseur du matériau, de l'ordre de la longueur d'onde. Elles sont utilisées pour la détection de défauts débouchants et nécessitent un état de surface exempt de toute salissure.

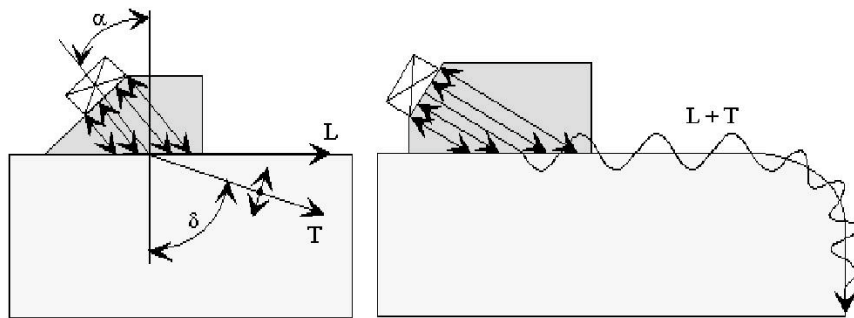


Figure 5 : Conversion des ondes transversales et longitudinales en onde de surface

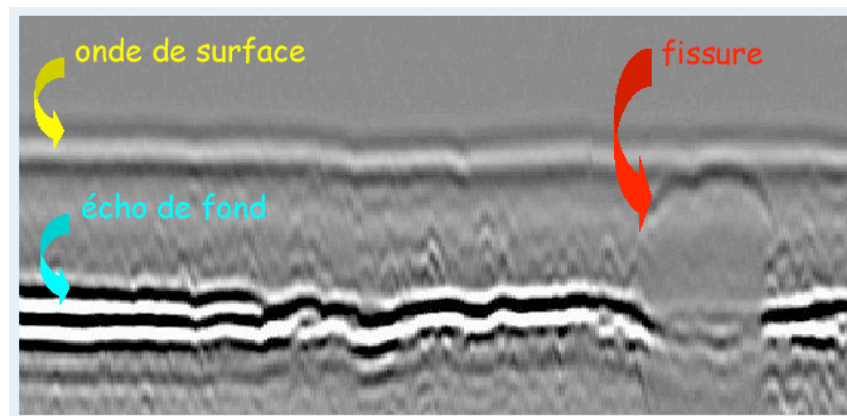


Figure 6 : Mise en évidence d'une fissure dans le signal retour

On distingue l'écho de fond de la pièce (épaisseur réduite ici, et l'onde de surface).

La modélisation permet de localiser et d'évaluer les dimensions du défaut.

4. Méthodes employant les ultrasons

4.1 Microscopie acoustique pour la surface

Pour détecter les couches d'oxydes sur la surface du revêtement interne, on utilise la microscopie dite acoustique. Ces appareils utilisent des transducteurs possédant un dioptre sphérique pour focaliser une onde mécanique plane en une tache focale la plus petite possible.

Ces "capteurs focalisés" permettent ainsi de sonder les propriétés mécaniques de très petits volumes dont le diamètre est donné en première approximation par le critère de diffraction de Rayleigh qui définit le pouvoir séparateur d'un instrument. Pour distinguer deux taches de diffractions issues de deux objets proches angulairement, Rayleigh a montré que les taches de diffraction peuvent être encore séparées, si la plus grande différence de marche sur le front d'onde n'excède pas le quart de la longueur d'onde (soit $\lambda/4$) . A 1MHz, la résolution spatiale, compte tenu de la vitesse dans les aciers, serait de l'ordre du millimètre.

L'image acoustique est réalisée point par point par le déplacement de la lentille acoustique parallèlement à la surface de l'échantillon suivant un mouvement de balayage. Chaque pixel correspondant à l'amplitude du signal réfléchi recueilli par le capteur est ensuite codé selon une échelle de gris. Lorsque l'onde acoustique est focalisée à la surface d'un échantillon plan, les niveaux de gris présents correspondent à la localisation de zones aux propriétés mécaniques différentes. On notera que la vitesse des ultrasons dans les solides est fonction du module d'élasticité (module d'Young, qui relie l'allongement relatif et la contrainte qui le provoque) et de la masse volumique du solide. Les défauts de surface diminuent la résolution du système.

4.2 Ultrasons focalisés, détection volumique

Lorsque le faisceau est focalisé par l'expérimentateur à l'intérieur du matériau, les contrastes obtenus sur les images dépendent alors principalement des conditions de réflexions rencontrées dans le plan de focalisation décrit lors du mouvement de balayage du capteur. Les effets de surface sont estompés, mais altèrent encore la résolution en profondeur.

Il faut noter que la propagation de sondes ultrasonores dans les solides est limitée latéralement dans un petit domaine du solide. Cette vitesse de propagation est alors fonction du coefficient de Poisson, traduisant la variation de dimension d'un corps dans la direction perpendiculaire à la force appliquée. Cet avantage permet de s'affranchir de multiples diffractions en cas de défauts proches. La sensibilité de la méthode en est améliorée.

Le contrôle par ultrasons des matériaux métalliques et plus particulièrement des assemblages soudés est bien adapté à la détection des défauts plans et à l'évaluation de leur longueur.

L'identification des défauts détectés n'est pas aussi riche qu'en radiographie. C'est, en revanche, le seul procédé qui permet d'évaluer l'épaisseur d'une indication dans le sens de l'épaisseur du matériau. Enfin le contrôle ultrasonore ne nécessite pas la mise en place d'un périmètre de sécurité comme la radiographie.

Conclusion et perspectives

On est en présence d'une multitude de phénomènes (irradiation, oxydation superficielle, influence de la contrainte et du gradient de température auquel la pièce est soumise) que ces méthodes permettent de discrétiser. D'une manière générale, les résultats obtenus ont permis de montrer que les paramètres acoustiques sont fonction de l'endommagement par irradiation. Les vitesses de propagation des ultrasons diminuent avec la fluence, alors que l'atténuation de ces mêmes ondes augmente. Les défauts observés confirment que l'usure des cuves actuellement en service reste tout à fait dans le domaine prévu par les études de sûreté, contribuant à confirmer la durée de vie minimale de 30 ans des unités de production.

Ces méthodes non destructives sont également utilisées pour les gaines des combustibles. En effet, du fait de l'usure neutronique du combustible (fissions, produits de fission, gonflement et fissuration, les interactions pastille d' UO_2 et gaine de zirconium) de fortes tensions apparaissent à l'interface pastille gaine, et la tenue de la première barrière est menacée. Il est donc intéressant de voir si on peut encore repousser les limites d'exploitation du combustible, toujours de manière à augmenter sa rentabilité, mais sans risque pour la sûreté, pour baisser le coût du KWh...