

L'ingénierie de fiabilité

par T. Demler et W. Issler*

Les centrales nucléaires ont maintenant accumulé plus de 3000 années-réacteur d'expérience d'exploitation avec, dans certains cas, une disponibilité pendant la durée de vie atteignant 80%. On peut donc affirmer qu'il est possible d'exploiter les centrales de manière sûre et rentable sur la base des règlements et principes de conception existants. Toutefois si l'on veut garantir à l'avenir la sûreté et la fiabilité des centrales nucléaires, il faut absolument optimiser la conception des centrales et la technologie des matériaux, grâce notamment à l'assurance de la qualité et à des inspections en service fréquentes.

Un colloque international sur la fiabilité des composants sous pression des réacteurs, organisé par l'AIEA en coopération avec la Staatliche Materialprüfungsanstalt

* Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA) (Institut national d'essai des matériaux) de l'Université de Stuttgart (République fédérale d'Allemagne).

(MPA), s'est tenu en mars 1983 à l'Université de Stuttgart (un compte rendu a été publié dans le *Bulletin de l'AIEA* de septembre 1983, Vol.25, n° 3). Parallèlement au colloque une exposition a fait connaître aux participants l'expérience acquise avec des techniques et des méthodes propres à améliorer encore la sûreté et la fiabilité. L'exposition portait plus particulièrement sur les techniques de fabrication et de réparation et sur les méthodes d'essai non destructif. Quinze exposants venus de République fédérale d'Allemagne, des Etats-Unis d'Amérique, de France et du Royaume-Uni y ont pris part. Nous évoquerons ici quelques-unes des présentations les plus intéressantes.

Cuves façonnées par soudage

Il y a neuf ans, on a lancé des projets de construction de composants de toutes formes et de toutes dimensions en n'employant que des métaux soudés. A la place des

Participants à l'exposition sur l'ingénierie de fiabilité

Babcock & Wilcox Co., Lynchburg (Etats-Unis)/Brown Boveri Reaktor GmbH, Mannheim (République fédérale d'Allemagne)

Bopp & Reuther GmbH, Mannheim (République fédérale d'Allemagne)

Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin

Division de la production, des études et de la construction du Central Electricity Generating Board (CEGB), Barnwood (Royaume-Uni)

Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (Izfp), Saarbrücken (République fédérale d'Allemagne)

GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Geesthacht (République fédérale d'Allemagne)

Intercontrôle, Rungis, France

Kraftwerk Union AG, Erlangen (République fédérale d'Allemagne)

M.A.N. Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg AG, Nuremberg (République fédérale d'Allemagne), Gutehoffnungshütte GHH, Sterkrade (République fédérale d'Allemagne)

Gg.Noell GmbH, Würzburg (République fédérale d'Allemagne)

Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA), Université de Stuttgart (République fédérale d'Allemagne)

Technischer Überwachungsverein Bayern e.V., Munich (République fédérale d'Allemagne)

Technischer Überwachungsverein Stuttgart e.V., Stuttgart (République fédérale d'Allemagne)

Thyssen Schwerkomponenten GmbH, Düsseldorf (République fédérale d'Allemagne)

United Kingdom Atomic Energy Authority (UKAEA), Risley Engineering and Materials Laboratory, Risley (Royaume-Uni)

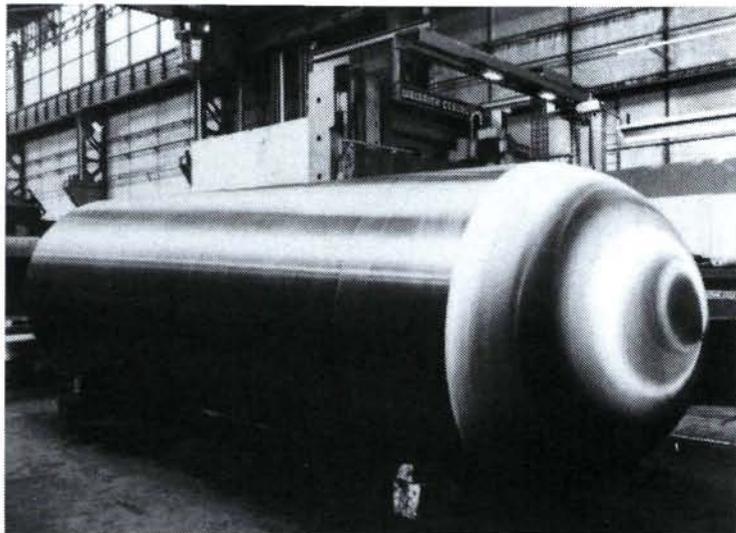


Figure 1. Cuve façonnée par soudage.

opérations de coulée et de forgeage ou de laminage, on peut obtenir un soudage multicouches au moyen du procédé de soudage sous flux électroconducteur. Cette méthode, appelée plus brièvement «façonnage par soudage», présente des avantages particuliers pour la fabrication de composants à parois épaisses très solides et résistantes au fluage et à la corrosion. Les pièces ainsi façonnées devraient satisfaire aux prescriptions de sûreté les plus rigoureuses et coûter moins cher que celles qu'on obtient par les méthodes traditionnelles.

L'un des principaux avantages de la méthode est qu'elle permet pour la première fois de varier systématiquement la limite d'élasticité apparente et la résistance à la traction ou au fluage en utilisant des matériaux différents pour une pièce à parois épaisses. On peut normalement résoudre les problèmes inhérents à la répartition des contraintes et de la résistance ainsi qu'à la fissuration par corrosion sous contrainte et à l'érosion en utilisant des produits d'apport optimisés. Des essais préliminaires ont aussi montré que le façonnage par soudage présente certains avantages sur les méthodes traditionnelles pour la fabrication, par exemple, de cuves à revêtement interne en acier inoxydable.

L'emploi du façonnage par soudage pour la fabrication de composants complexes en est encore à la phase de mise au point. La figure 1 montre une cuve sous pression de 58 tonnes fabriquée par ce procédé avec un dôme comprenant comme produit d'apport 10 MnMoNi 55, sans joint de soudure. Le diamètre extérieur est de 1811 mm, la longueur de la partie cylindrique de 4575 mm et la longueur totale de 5482 mm.

Les soupapes de sûreté et le concept de sûreté de base

Le concept de sûreté de base en vigueur en République fédérale d'Allemagne donne une importance particulière aux matériaux. Les facteurs déterminants de la sûreté de base d'un composant sont:

- l'emploi de matériaux de haute qualité possédant de bonnes propriétés, notamment la résistance;
- une limitation prudente des contraintes;

- l'optimisation de la conception, afin d'éviter la concentration des contraintes;
- la garantie de l'emploi de la meilleure technique possible;
- la connaissance et l'appréciation des défauts.

Lorsque ces exigences sont satisfaites, la sûreté de base du composant est assurée; on ne tient pas compte des défaillances résultant de défauts de fabrication.

Le fonctionnement des composants doit être testé sur banc d'essai. Avant le début de la fabrication, des prototypes de soupapes de sûreté sont testés dans des conditions de pression, de température, de débit massique, etc., proches de la réalité. Les résultats obtenus doivent être confirmés à nouveau par des essais ultérieurs sur les soupapes de série. En même temps, on détermine les valeurs initiales qui serviront aux inspections et aux essais de fonctionnement effectués par la suite, une fois les soupapes en service.

La figure 2 montre une soupape de sûreté, présentée à l'exposition, comportant une rondelle à ressort et un dispositif de commande pneumatique du type SIZ-DN 200 X 250 pour une pression de levée de 65 bar à une température de vapeur de 550°C et un débit de 200 tonnes par heure.

Postes de soudage et d'alésage télécommandés

La technique du soudage par impulsions a atteint un degré de perfectionnement tel que l'on peut maintenant souder des tubes quel que soit leur emplacement. La transistorisation de l'alimentation en énergie a eu des effets favorables car elle permet la reproductibilité exacte des paramètres de soudage.

Pour être utilisé dans les zones de haute activité du réacteur, le matériel doit être conçu de manière à pouvoir être le plus possible entretenu à distance. Le matériel de soudage exposé (figure 3) comprenait:

- des sources d'énergie à commande programmée;
- des systèmes de surveillance;
- une tête de soudage;
- un manipulateur de guidage de la tête de soudage;
- un dispositif de refroidissement;
- un dispositif de recuit (pour préchauffage).

Les paramètres de soudage peuvent différer pour chaque position autour d'une soudure circulaire; pour obtenir une couche uniforme, il faut que la commande du processus soit programmée. La tête orbitale exposée, guidée le long d'une bande sous tension au moyen d'un manipulateur, permet de souder des tubes d'un diamètre extérieur atteignant 120 mm. La tête est munie de caméras de télévision pour la surveillance précise du processus de soudage.

Du fait des exigences accrues en matière de sûreté, il faut, lors des inspections en service, procéder à des examens non destructifs, par ultrasons ou par rayons X, des soudures sous pression. Les examens par ultrasons de surfaces de soudure brutes peuvent induire en erreur lorsque la soudure présente des imperfections telles que la flexion ou la contraction du fond. On peut réduire considérablement l'apparition de fissures sur le fond des soudures circulaires faites d'un seul côté en les surfaçant. On peut désormais aléser l'intérieur des tubes avec une précision permettant de définir rapidement et exactement les indications provenant du fond de la soudure.

Un constructeur utilise actuellement avec succès une machine conçue à cet effet pour l'installation et le remplacement ultérieur des tubes dans toutes ses centrales. Un système de commande autorégulateur est utilisé pour aléser les soudures courbes. Jusqu'à présent, plus de 3000 soudures, la plupart situées dans des emplacements presque inaccessibles par d'autres moyens, ont été ainsi alésées sur place.

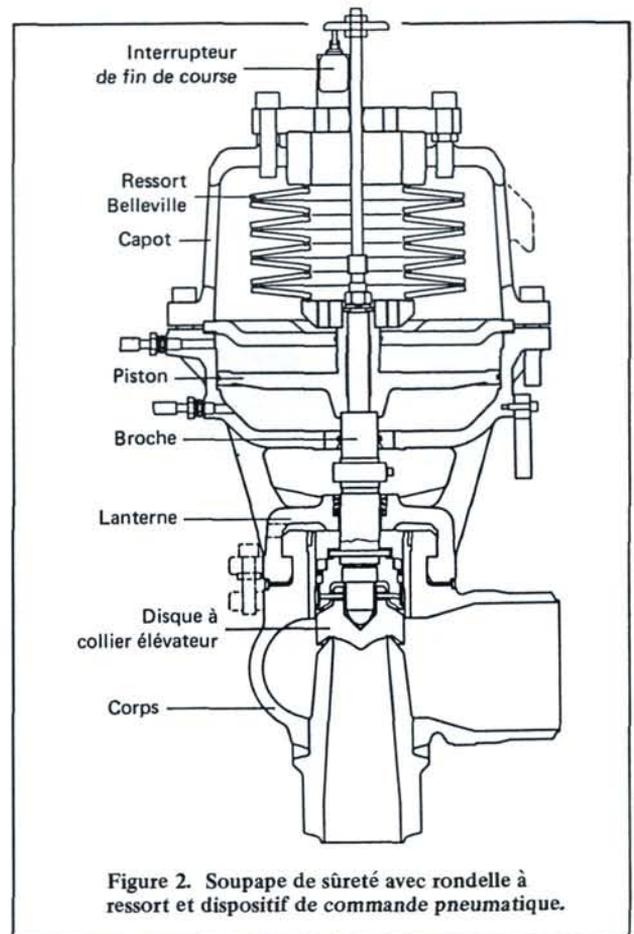


Figure 2. Soupape de sûreté avec rondelle à ressort et dispositif de commande pneumatique.

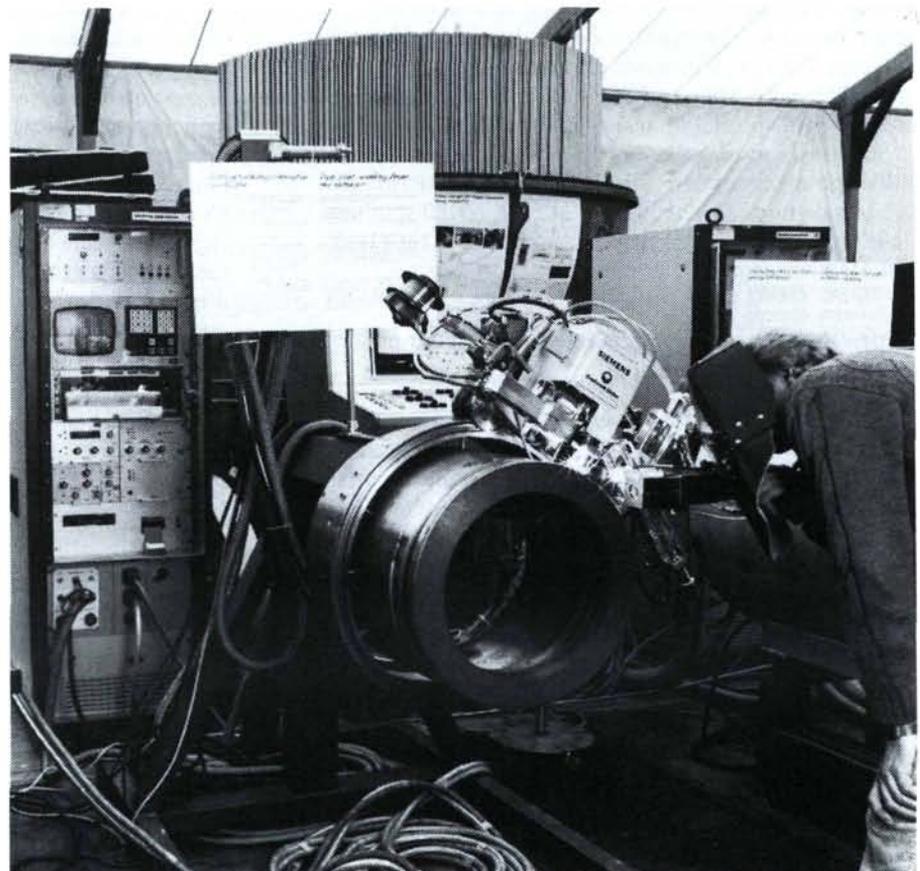


Figure 3. Poste de soudage télécommandé pour les raccords de tubes.

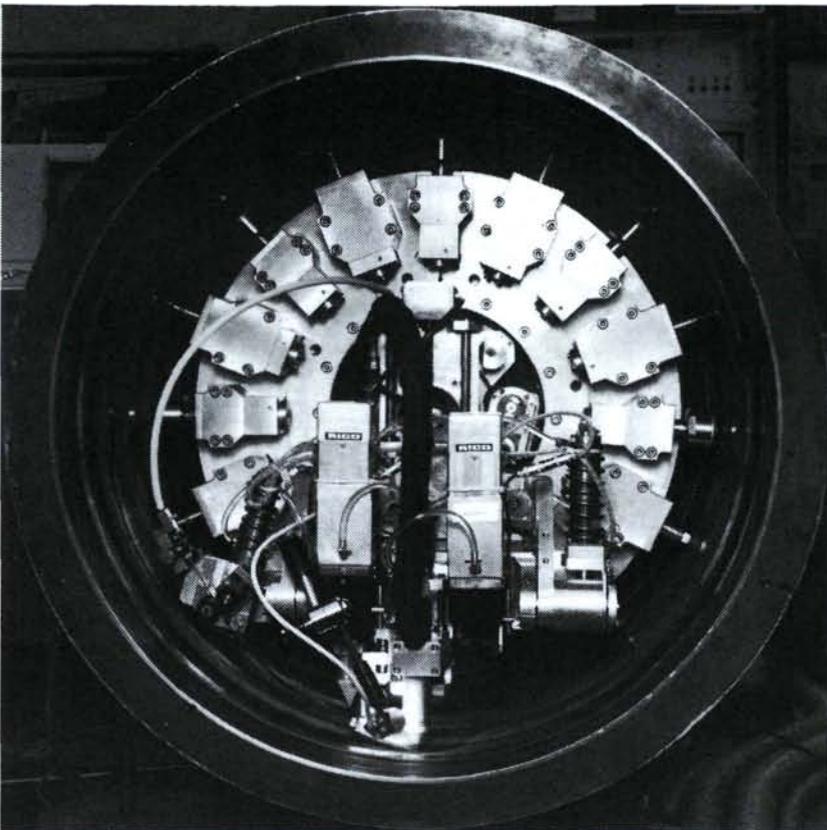


Figure 4.
Poste de soudage pour le gainage de l'intérieur
de tubes.

On a modifié cette machine à aléser l'intérieur des tubes pour pouvoir l'utiliser comme porteuse de tête de soudage et comme dispositif de positionnement pour le gainage télécommandé de l'intérieur des tubes et leur réparation. Le matériel de soudage que montre la figure 4 est pratiquement le même que celui qu'on emploie pour le soudage extérieur, mais il comporte en plus un dispositif de télévision pour la surveillance du processus de soudage et pour le positionnement. Il a été utilisé pour la première fois lors de la construction de la centrale nucléaire de Philippsburg 2, où 20 soudures de la tuyauterie du circuit primaire réalisées sur place ont été gainées par télécommande.

Réparation des tubes de générateurs de vapeur par introduction d'un manchon

Dans les réacteurs à eau sous pression, ce sont les générateurs de vapeur qui mettent en contact le circuit primaire et le circuit secondaire. Une longue expérience d'exploitation enseigne que les tubes des générateurs de vapeur sont exposés à des attaques corrosives qui entraînent des fuites dues aux entailles, à l'usure et à la fissuration par corrosion résultant de tensions intergranulaires.

Des inspections en service périodiques sont indispensables pour connaître l'état des tubes. Suivant les résultats de ces inspections, on décide de laisser les tubes en service ou de colmater les fuites. Un excès de colmatage entraîne toutefois une réduction du rendement de la centrale: on a donc mis au point un «manchon scellable» expressément destiné à la réparation des tubes. La figure 5 montre schématiquement ce

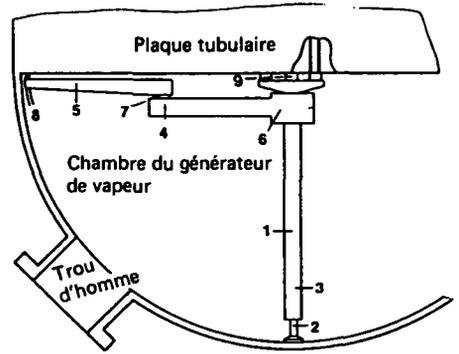
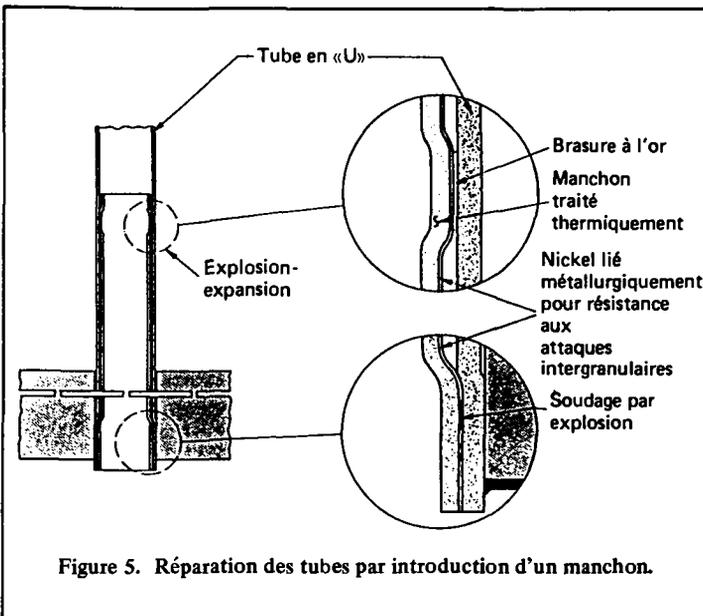
manchon. Il consiste en un tube d'Inconel-600 soumis à un traitement thermique et recouvert de Ni-200, d'une épaisseur d'environ 1 mm. Après nettoyage, on introduit le manchon dans le tube défectueux et on le fixe à la partie supérieure au moyen d'une brasure à alliage d'or. On commence par dilater par explosion la zone de brasage afin d'établir un contact entre le manchon et le tube. La brasure est retenue dans deux rainures peu profondes pratiquées sur le manchon, que l'on chauffe en y introduisant un dispositif à induction. La partie inférieure du manchon est soudée au tube par explosion. Une autre méthode, celle de la dilatation mécanique, a été abandonnée parce qu'elle risque d'entraîner des tensions résiduelles supérieures à celles que provoquent le soudage par explosion ou la dilatation hydraulique.

Cette technique de réparation des tubes de générateurs de vapeur présente plusieurs avantages:

- reconstitution de l'intégrité structurale du générateur;
- conservation de la totalité de la capacité d'échange de chaleur;
- restauration de la durée de vie théorique du générateur;
- exécution rapide et de bonne qualité.

La figure 6 montre un manipulateur utilisable comme instrument universel d'inspection des tubes en U des générateurs de vapeur avec une faible exposition aux rayonnements. Il peut servir:

- pour des essais non destructifs, par exemple les inspections par courants de Foucault, les essais par ultrasons, la profilométrie, les inspections visuelles;



- | | |
|--|------------------------------|
| 1 Jambe du manipulateur avec arbre de manœuvre | 5 Bras de la sonde |
| 2 Cylindre pneumatique | 6 Moteur du bras de la tête |
| 3 Moteur assurant le déplacement vertical | 7 Moteur du bras de la sonde |
| 4 Bras de la tête | 8 Sonde |
| | 9 Verrou de came |

Figure 6. Manipulateur télécommandé pour l'inspection et la réparation des tubes de générateurs de vapeur.

- pour le colmatage des fuites par bouchons soudés par explosion, bouchons mécaniques amovibles et bouchons soudés;
- pour des réparations, par exemple l'introduction de manchons dans les tubes et l'enlèvement de bouchons qui fuient;
- pour l'enlèvement de tubes pour examen ultérieur.

Une cuve sous pression de réacteur en vraie grandeur

Le clou de l'exposition a été une cuve sous pression de réacteur en vraie grandeur. L'expérience acquise en matière d'examen initial et périodique non destructif des cuves sous pression de réacteur n'est guère utilisable car les cuves qui sont en service ne présentent que rarement des fissures et, en général, les défauts de fabrication sont réparés. Dans le cadre d'un projet de recherche entrepris pour le compte du Ministère de la recherche et de la technologie de la République fédérale d'Allemagne, le MPA de Stuttgart a reçu une cuve en vraie grandeur présentant une large gamme de défauts, afin de déterminer et d'évaluer l'efficacité des procédures d'examen non destructif couramment employées.

La cuve sous pression du *réacteur à eau bouillante* a un diamètre intérieur de 5875 mm et une épaisseur de paroi de 146 mm dans sa partie cylindrique. L'épaisseur de la calotte est de 88 mm, celle du fond de 202 mm et la hauteur totale est de 17 500 mm. La cuve est construite pour l'essentiel en matériau A508 classe 2 d'état variable; elle présente des défauts de niveaux différents et est dotée de tuyères de diverses formes (figure 7).

Ce projet a pour but principal de démontrer et de vérifier l'efficacité des diverses méthodes traditionnelles et nouvelles d'examen non destructif en liaison avec l'emploi de systèmes de manipulation automatiques dans des conditions de fonctionnement simulées. Les principes et les procédures d'essai seront optimisés en fonction de l'analyse des défauts et des systèmes. La figure 7 montre les principales zones d'essai.

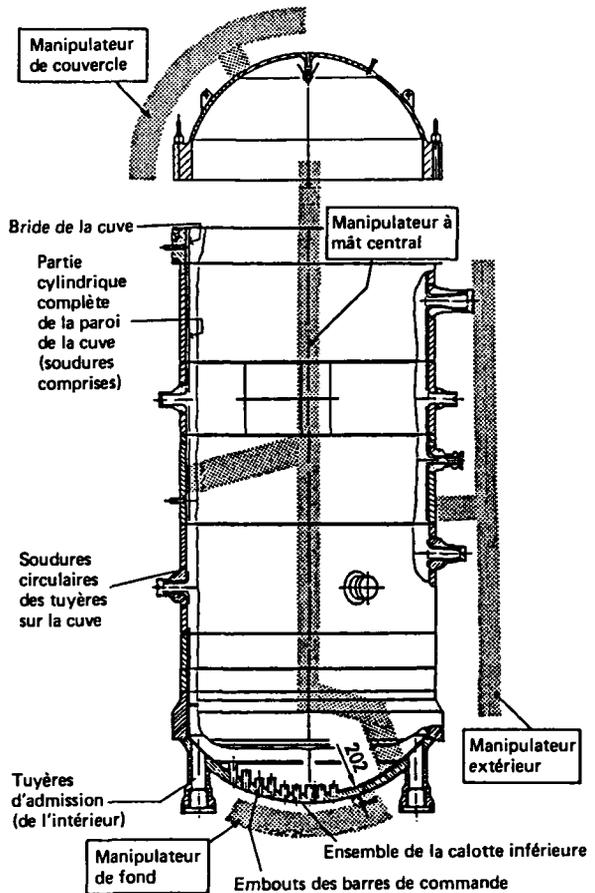


Figure 7. Zones d'essais sur la cuve en vraie grandeur.

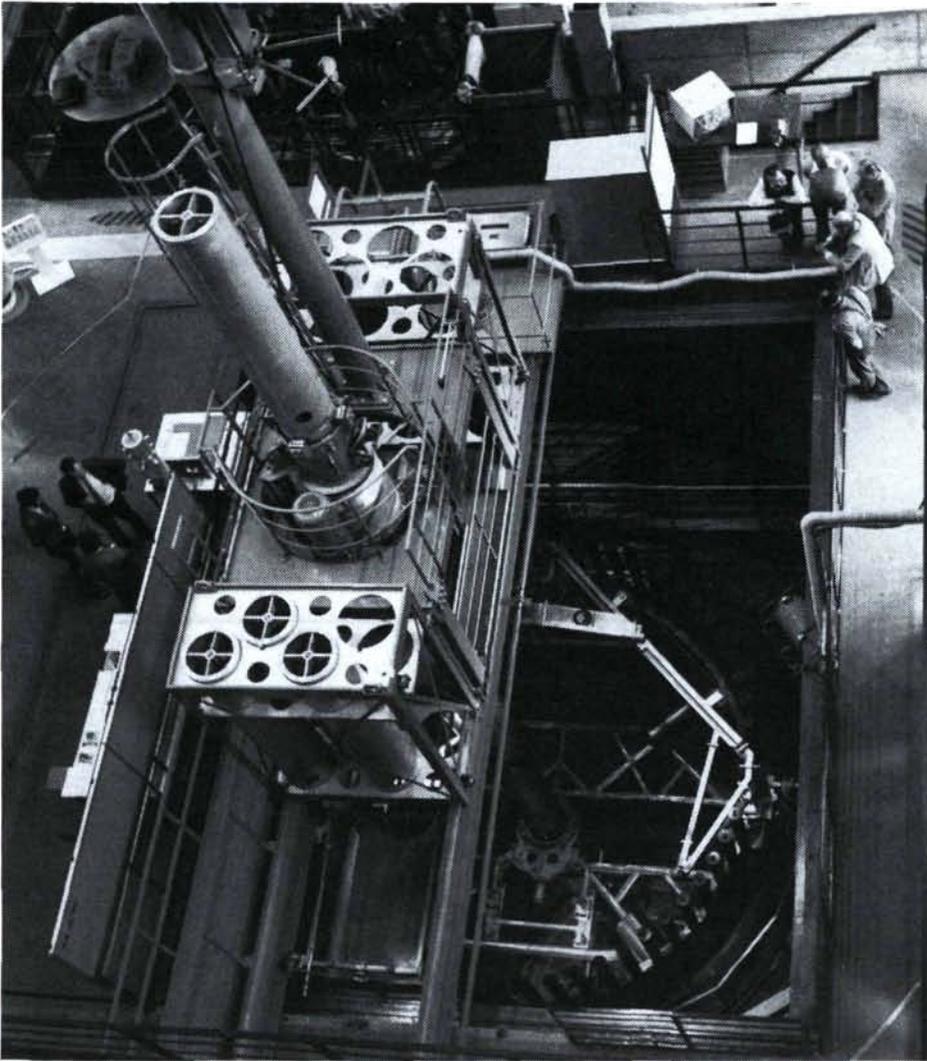


Figure 8.
Manipulateur à mât central
adapté à la cuve en vraie grandeur.

Manipulateur à mât central

Un manipulateur à mât central a été conçu pour l'inspection aux ultrasons de l'intérieur des cuves sous pression de réacteurs. On a particulièrement tenu à obtenir un maximum d'adaptabilité pour que l'appareil soit utilisable avec des cuves (principalement de réacteurs à eau sous pression) de diverses dimensions. Pour faire une inspection, on place le manipulateur à mât central sur un pont auxiliaire. Le mât est constitué par un ensemble de colonnes cylindriques centrées sur un dispositif placé au niveau des goujons. La partie inférieure porte les bras d'inspection (un bras horizontal pour le cylindre et les tuyères, un bras pivotant pour le fond). Le manipulateur étant équipé d'un palan, il ne dépend pas de celui du bâtiment.

Le manipulateur a été adapté à des ensembles de plus grandes dimensions pour permettre l'inspection de l'intérieur de la cuve de réacteur à eau bouillante en vraie grandeur (figure 8). Le dispositif de centrage peut être fixé à des hauteurs différentes à l'intérieur de la cuve, ce qui permet une inspection complète.

Manipulateur universel pour inspection des cuves sous pression de réacteurs à eau bouillante

Le manipulateur universel se déplace sur des rails verticaux fixes dans l'espace ménagé pour l'inspection entre la cuve et l'enveloppe de confinement. On peut inspecter complètement la partie cylindrique de la cuve et les tuyères, y compris leurs parties courbes. Il a fallu aménager spécialement les tuyères sur la cuve, perfectionner la conception du chariot du manipulateur et prévoir un assortiment limité de bras télescopiques adaptés aux diverses géométries.

La figure 9 montre le manipulateur universel sur une maquette de cuve sous pression avec un rail à l'échelle 1:1 et une simulation de la limitation du mouvement par une tuyère. On voit nettement le système à sonde multiple au-dessus de la tuyère simulée.

Manipulateur pour l'inspection des ligaments de la fermeture inférieure

Afin de téléguider les modules de sondage pour l'inspection périodique obligatoire des cuves sous pression de réacteur, on utilise désormais couramment

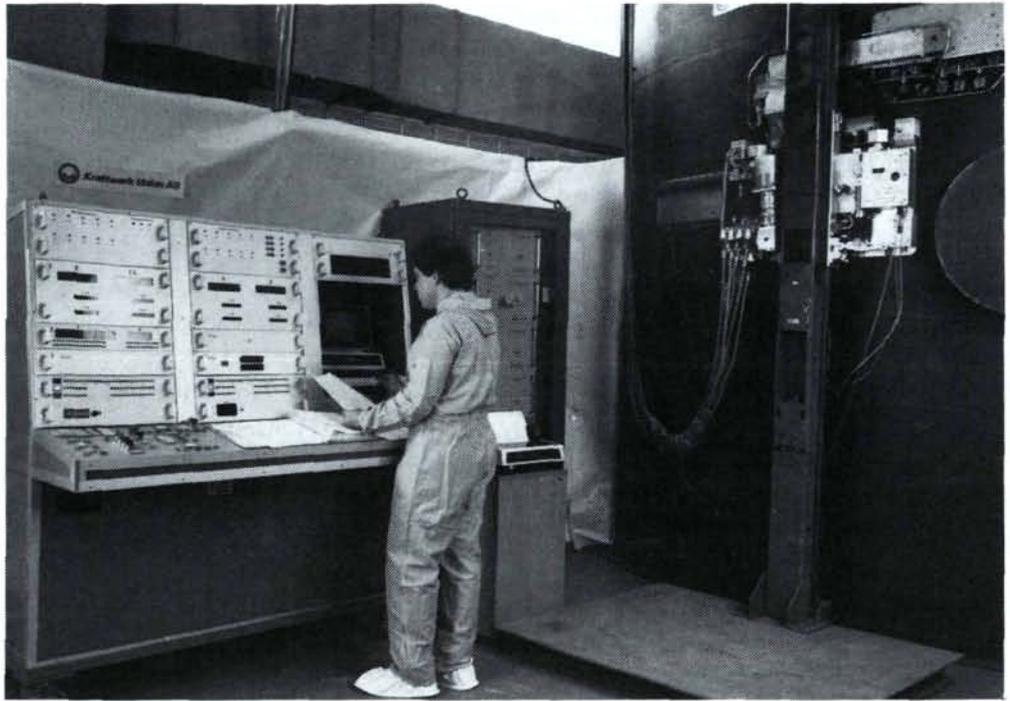


Figure 9.
Manipulateur universel sur
une maquette de cuve sous
pression.

des manipulateurs d'inspection normalisés qui, munis de tous les accessoires nécessaires, sont conçus pour l'exploration par balayage des zones à inspecter. De plus, il faut souvent utiliser des manipulateurs spécialement conçus pour inspecter des zones ou des composants particuliers, surtout lorsque les inspections doivent être faites depuis la surface extérieure. L'un de ces instruments est un manipulateur mis au point pour inspecter les ligaments de la fermeture inférieure; il est conçu pour

guider les modules de sondage à l'extérieur d'un réacteur à eau bouillante (figure 10).

Le manipulateur comporte de multiples éléments: rails de guidage, chariot de sondage, bâtis des modules de sondage, chariot de transfert, console de commande électrique et pneumatique. Le chariot de sondage, équipé de plusieurs modules de sondage interchangeables selon les besoins, se déplace sur un système de rails courbes

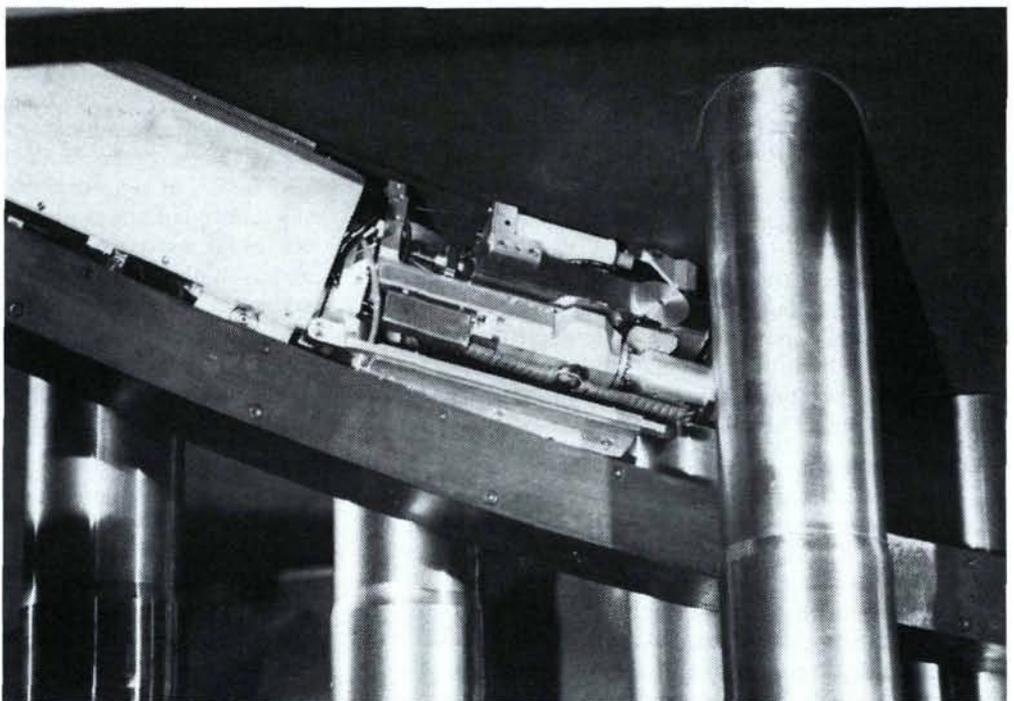


Figure 10.
Manipulateur pour
l'inspection des ligaments
de la fermeture inférieure.

posés en permanence dans les espaces entre les ligaments. Le chariot d'inspection et le bâti du module de sondage sont télécommandés à partir de la console de commande pneumatique et électrique, leur position étant retransmise instantanément aux fins d'information et d'enregistrement (avec les résultats des essais). Le chariot de transfert sert à faire passer le chariot de sondage d'un rail à l'autre.

Les rails ont une section en U et sont munis d'une crémaillère qui permet de déplacer le chariot et d'en surveiller la position. Le réseau de rails repose sur des montants rigides et des coussinets coulissants, ce qui le rend insensible à l'expansion thermique. Le réseau s'étend au delà de la zone de la fermeture inférieure afin que l'on puisse monter le chariot de sondage à l'extérieur de la zone de haute activité, faire tous les travaux d'entretien et procéder au changement des modules de sondage. Le chariot est équipé de son propre moteur et guidé sur les rails par un système à crémaillère. Il est conçu pour porter les modules de sondage ci-après, qui sont reliés par des joints articulés et qu'on peut changer selon les besoins: un dispositif de sondage à cristaux multiples, un porte-à-faux permettant de déplacer la sonde perpendiculairement à l'axe des rails, un module à trois sondes distinctes, une caméra et des projecteurs de télévision, et une perche pour la mesure des cotes.

Manipulateurs pour l'inspection des tuyauteries

Pour l'inspection en service des tuyauteries on utilise divers ensembles manipulateurs composés de modules. Chaque ensemble correspond à un dispositif modulaire d'essai par ultrasons et à un système de traitement des données.

La figure 11 montre un manipulateur à courroie. On monte une courroie de guidage autour du tuyau près de la zone à inspecter. Un chariot à bras télescopique permettant un déplacement perpendiculaire à la courroie transporte le système, qui peut être animé de mouvements en méandres. La hauteur du manipulateur étant relativement faible (environ 120 mm), on peut l'utiliser dans des installations déjà en service. Ce manipulateur permet d'inspecter des tuyaux d'un diamètre allant de 160 à 1500 mm.

Examen par courants de Foucault des tubes de générateurs de vapeur

Il est indispensable d'inspecter périodiquement l'état des tubes des échangeurs de chaleur des générateurs de vapeur pour s'assurer qu'il n'y a pas de fuite du caloporteur radioactif vers le circuit secondaire. Comme il y a de la radioactivité dans un générateur de vapeur, d'où un risque d'exposition du personnel d'entretien aux rayonnements, il faut que les examens nécessaires soient exécutés de façon très rapide et extrêmement fiable au moyen de dispositifs télécommandés.

Les défauts éventuels sont détectés grâce à des essais par courants de Foucault. On peut avoir recours à des procédures d'analyse spéciales pour décrire la position, l'importance et l'origine de tout défaut. On détermine les modifications des propriétés physiques des tubes endommagés en observant la résultante de la superposition de deux champs magnétiques alternatifs. Le premier est engendré par une sonde, qui induit des courants de Foucault dans le tube; ces derniers produisent

à leur tour le second champ magnétique alternatif de sens opposé à celui du champ initial. Il faut utiliser plusieurs fréquences d'essai en même temps pour que ni la structure du tube ni les dépôts conducteurs existant sur la surface du tube n'interfèrent avec l'écho de défaut et donc la détection du défaut.

Cette procédure d'examen permet de constater sans équivoque toute réduction de l'épaisseur de paroi égale ou supérieure à 20% et de savoir s'il s'agit d'un défaut intérieur ou extérieur. L'examen permet aussi de déterminer le niveau des dépôts dans le circuit secondaire.

Pour faire un examen par courants de Foucault, il faut disposer du matériel suivant:

- 1) Manipulateur comportant un dispositif de positionnement, un dispositif d'alimentation et un dispositif de commande;
- 2) Appareil d'essais par courants de Foucault à multi-fréquence, y compris la sonde;
- 3) Matériel de collecte et de traitement des données;
- 4) Boîtiers pour instruments et appareils de commande.

La figure 12 montre une maquette de calotte de circuit primaire avec le matériel d'essais par courants de Foucault, qui figurait à l'exposition.

Système à palpeurs actionnés successivement

Ce système a été mis au point par le Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (Izfp) pour les contrôles non destructifs, avant et après la mise en service, des cuves sous pression de réacteurs. Il consiste en 24 canaux commandés par micro-ordinateur. Des dispositifs à couplage de charge (DCC) servent à retarder les impulsions transmises et reçues. On peut faire varier la longueur des retards en modifiant les fréquences d'horloge. Chaque puce de DCC contient deux canaux. Le premier retarde comme il convient les salves d'ondes sinusoïdales qui excitent les palpeurs après amplification linéaire. Les échos préamplifiés sont retardés dans le deuxième canal des DCC, additionnés, et affichés sous forme de balayage A ou B. Les fréquences d'horloge sont produites par des modules synthétiseurs. Le micro-ordinateur calcule les fréquences d'horloge et règle la base de temps de l'affichage $x - y$. On peut faire varier la fréquence principale de 0,5 à 5 MHz et la durée d'impulsion de 1 à 20 cycles. Un échelonnement approprié permet de créer des ondes longitudinales, transversales et de surface, et l'on peut, au moyen d'une excitation appropriée des palpeurs, guider, focaliser et former le champ ultrasonique. La formation de faisceaux d'électrons rapides par les palpeurs actionnés successivement offre des possibilités nouvelles de reconstitution et de classement des défauts. On peut distinguer essentiellement trois modes d'examen:

- avec la sonde en position fixe, on peut balayer le défaut au moyen d'un faisceau sonore étroit (balayage de secteur);
- la sonde peut être déplacée par un manipulateur et on effectue un balayage de secteur pour chaque position. A l'affichage des données en mémoire tous les balayages de secteur sont superposés (balayage composite);

Figure 11.
Manipulateur à courroie pour
l'inspection des tuyauteries.

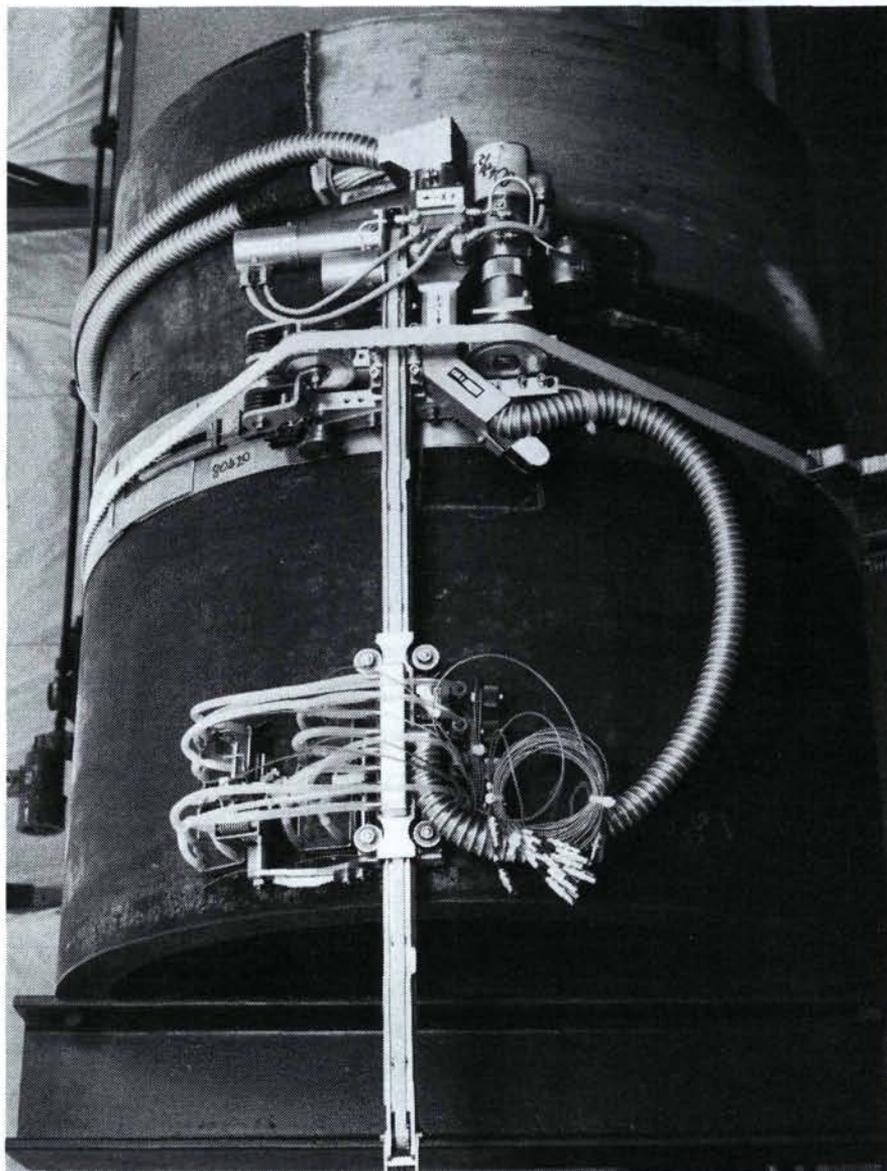


Figure 12.
Maquette de calotte de
circuit primaire
avec le matériel d'essai par
courants de Foucault.

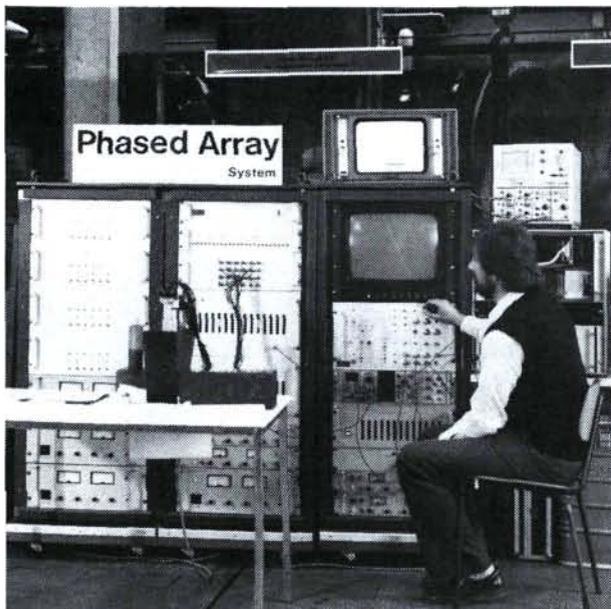


Figure 13. Système à palpeurs actionnés successivement.

- à chaque position de la sonde on peut effectuer un balayage de secteur au moyen d'un faisceau large et enregistrer la hauteur de l'écho maximal dans la direction de l'azimut. La courbe résultante d'amplitude du balayage composite représente directement l'orientation du défaut.

La figure 13 montre la configuration du système préparé en vue de l'examen d'une pièce.

Le système ALOK (courbe amplitude-temps de vol)

Le système ALOK a été mis au point par l'IzFP pour les inspections en service des cuves sous pression et des composants de réacteurs en vue de réaliser un système de

détection des défauts d'une haute capacité et d'un grand pouvoir de résolution. Il permet en outre de caractériser les défauts. La figure 14 montre la sonde ALOK et le manipulateur montés sur la cuve en vraie grandeur. Le système de transmission comporte, aux éléments d'entrée, des multiplexeurs HF qui envoient tous les signaux résultant de l'inspection à un dispositif de traitement des signaux. Un système compacteur détermine la valeur de pic du signal HF, et mesure ainsi le temps de vol, donnant la profondeur du défaut; en même temps le compacteur suit les indications du compteur de profondeur de défauts et effectue la réduction des données.

Les coordonnées locales du système de sondage et les valeurs de la courbe amplitude-temps de vol sont recueillies en blocs de données. Lorsque le bloc a atteint une certaine dimension, les données sont transférées à l'ordinateur ou à la mémoire de masse. Pendant l'examen, il est possible d'afficher le balayage A de chacune des fonctions de l'inspection avec ses courbes d'amplitude linéaire ou logarithmique.

Avec le système ALOK, un signal de défaut est mis en mémoire si un certain nombre de demi-ondes survenant avant ou après le maximum sont égales ou inférieures au maximum. La décision de mettre en mémoire dépend de la forme de signal du transducteur utilisé. Ce système permet de mettre en mémoire en fonction du temps de vol tous les signaux et même certains bruits. On peut séparer les indications utiles du bruit de fond stochastique et, en identifiant leurs caractères, des effets géométriques.

Holographie linéaire acoustique

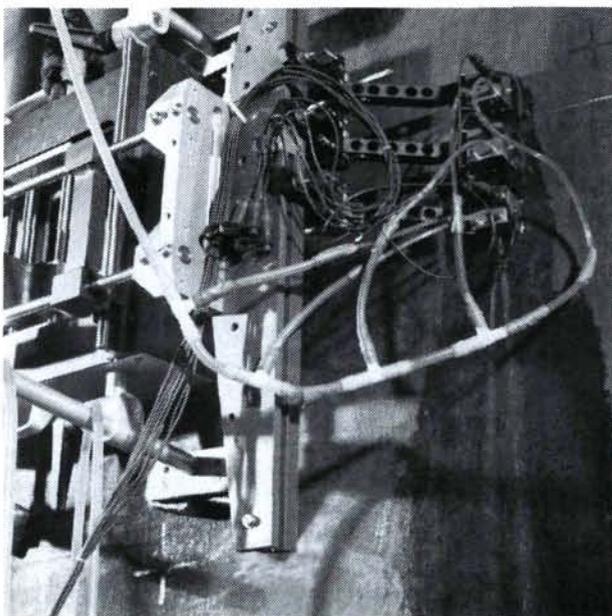
L'holographie linéaire acoustique consiste à analyser un défaut constaté en en déterminant les dimensions. Le défaut est «éclairé» par une sonde à ultrasons à faisceau divergent. Les amplitudes et les phases sont mesurées, stockées et superposées numériquement sur une onde de référence. L'hologramme ainsi obtenu peut servir de base pour reconstituer le champ ultrasonique dans le demi-plan situé sous la ligne d'ouverture.

En ce qui concerne les défauts plans orientés perpendiculairement à la surface, la meilleure technique est celle du tandem. La figure 15 montre l'analyse de l'un des quelque 120 défauts provoqués dans une maquette de cuve sous pression. Cette analyse nécessite un manipulateur spécial (exact et avec une précision du réglage de la position supérieure à 1/10 de la longueur d'onde). On peut le monter sur le manipulateur du mât central ou sur celui du circuit primaire.

Inspection visuelle à distance des réacteurs avancés refroidis par gaz

Les réacteurs industriels britanniques sont conçus pour une vie utile de plus de 25 ans. Une des méthodes qu'emploie le Central Electricity Generating Board pour s'assurer du maintien de leur intégrité consiste en une inspection visuelle périodique de l'intérieur du réacteur pendant les arrêts. La caméra de télévision modulaire TRIUMPH (figure 16) sert à la plupart des inspections visuelles. Elle a une longueur totale de 1000 mm, est refroidie par gaz et est mise en place au moyen de divers treuils et manipulateurs. Elle a déjà été utilisée avec une

Figure 14. Système de sondage ALOK avec manipulateur.



température ambiante de 120°C. Le champ de vision peut atteindre 6 mètres. Un prisme monté sur le module antérieur est inclinable sur un angle de 105°. Derrière ce module, un objectif à focale variable motorisé d'un rapport 6:1, avec grande latitude de mise au point, permet de filmer des objets très rapprochés de la caméra en utilisant l'éclairage frontal. Le module de prise de vues utilise un tube de 16 mm fonctionnant en lumière faible. Le module arrière abrite l'éclairage principal inclinable selon les besoins. On peut faire pivoter l'assemblage complet sur un angle de 180°. Toutes les fonctions de la caméra, de l'objectif et de l'éclairage sont télécommandées.

On a mis au point pour les réacteurs avancés refroidis par gaz de Hartlepool et de Heysham I des caméras et des manipulateurs supplémentaires pour inspecter la zone de fermeture supérieure et les tubes de la chaudière. Comme le montre la figure 17, chaque zone de fermeture de la chaudière est équipée en permanence de deux rails circulaires; on peut déplacer sur ces rails, au moyen d'un ensemble de chariots, une caméra compacte de 16 mm munie de son propre éclairage. La caméra est à mise au point télécommandée, peut pivoter de 180° et est refroidie par gaz.

Après enlèvement d'une soufflante à gaz, on guide la caméra d'observation des tubes de la chaudière dans l'espace de 25 mm qui sépare les tubes concentriques (figure 18). La section de la caméra est de 43 x 18 mm. Elle est à mise au point télécommandée, peut pivoter de 360° et est refroidie par gaz.

On ajoute des rallonges à la partie antérieure de la caméra lorsqu'on la fait avancer dans l'espace entre les tubes. On peut enlever le miroir de vision latérale monté à la partie antérieure de la caméra pour obtenir une vision frontale. On a aussi mis au point un appareil photographique de même section.

Pour pouvoir faire une inspection visuelle à distance au dessus de la calotte du déflecteur de gaz on a mis au point un manipulateur à chafnons (figure 19). Ce manipulateur permet de placer une caméra de télévision dans diverses positions. On peut en augmenter la longueur jusqu'à 7 m grâce à un orifice d'accès au réacteur qui n'a que 260 mm de diamètre. On en poursuit le perfectionnement afin de pouvoir faire des inspections visuelles au dessous de la calotte du déflecteur de gaz et dans la périphérie du circuit sous pression.

Manipulateurs de grande puissance pour opérations à distance

Les exemples ci-dessus de méthodes d'essais non destructifs attestent les succès remportés en matière de détection et de mesure des défauts, en même temps que la réduction de l'exposition aux rayonnements du personnel chargé des essais grâce à l'emploi de manipulateurs automatiques.

Pour d'autres tâches, telles que les réparations du blindage des cuves ou le démontage éventuel de la cuve sous pression, lorsqu'on a besoin d'un manipulateur capable de manier des outils automatiques différents dans un environnement très radioactif et de soulever ou de soutenir du matériel lourd, on a mis au point des

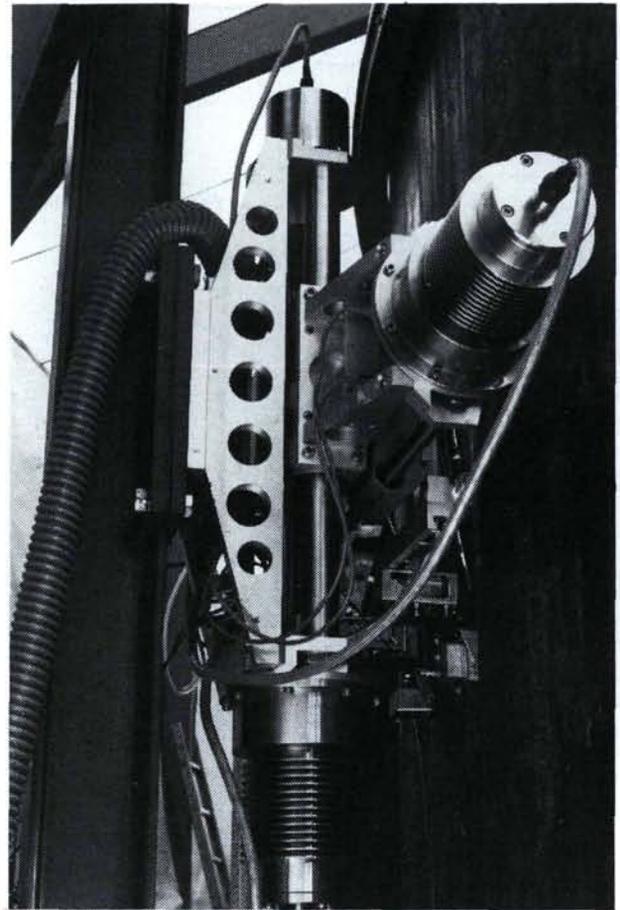
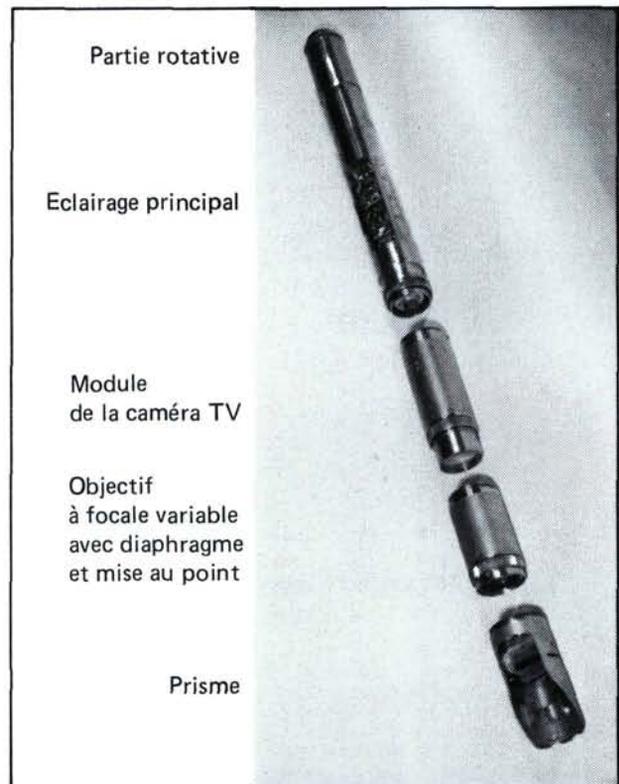
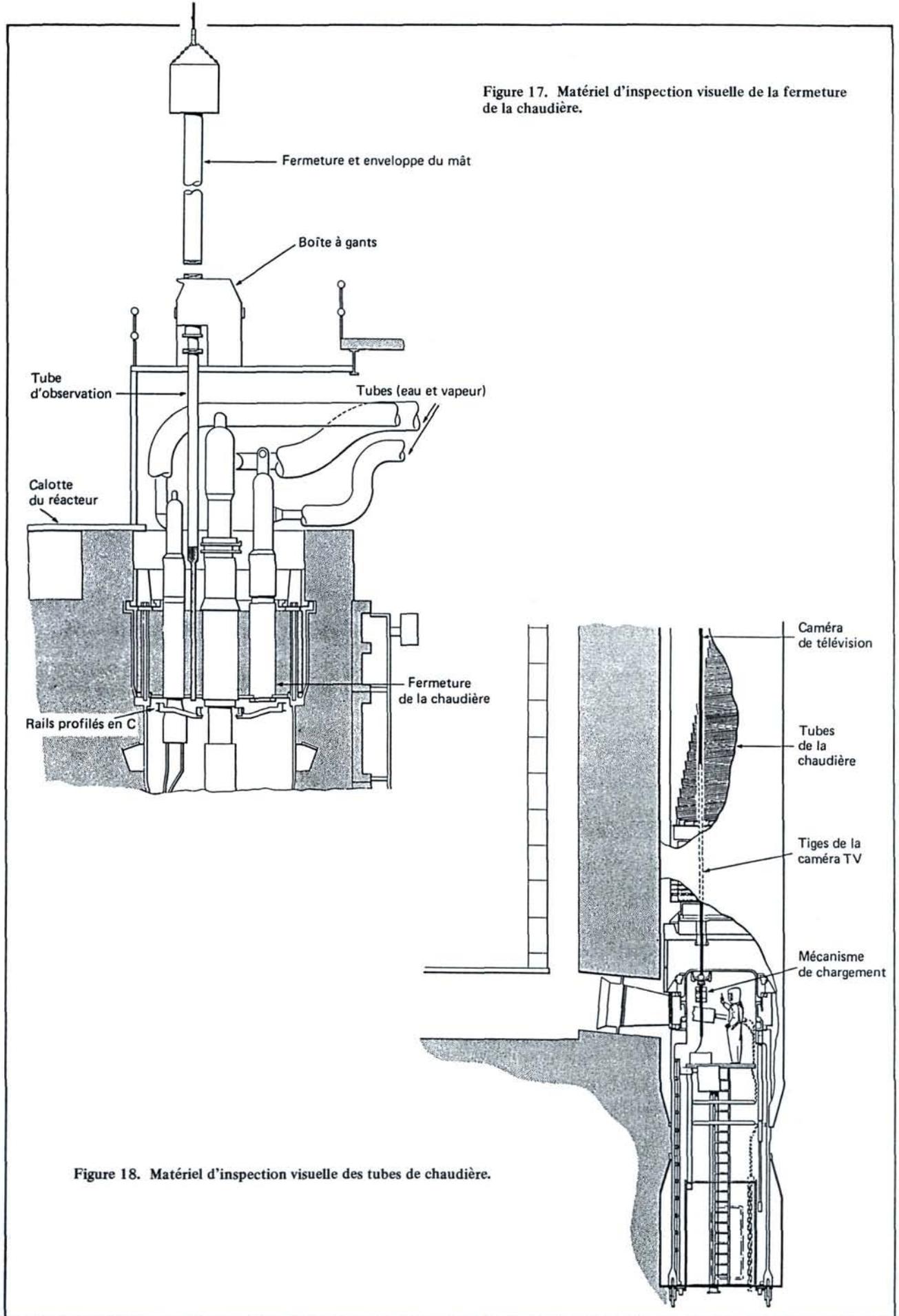


Figure 15. Manipulateur d'analyse pour holographie linéaire acoustique.

Figure 16. Ensemble TRIUMPH de 70 mm de diamètre.





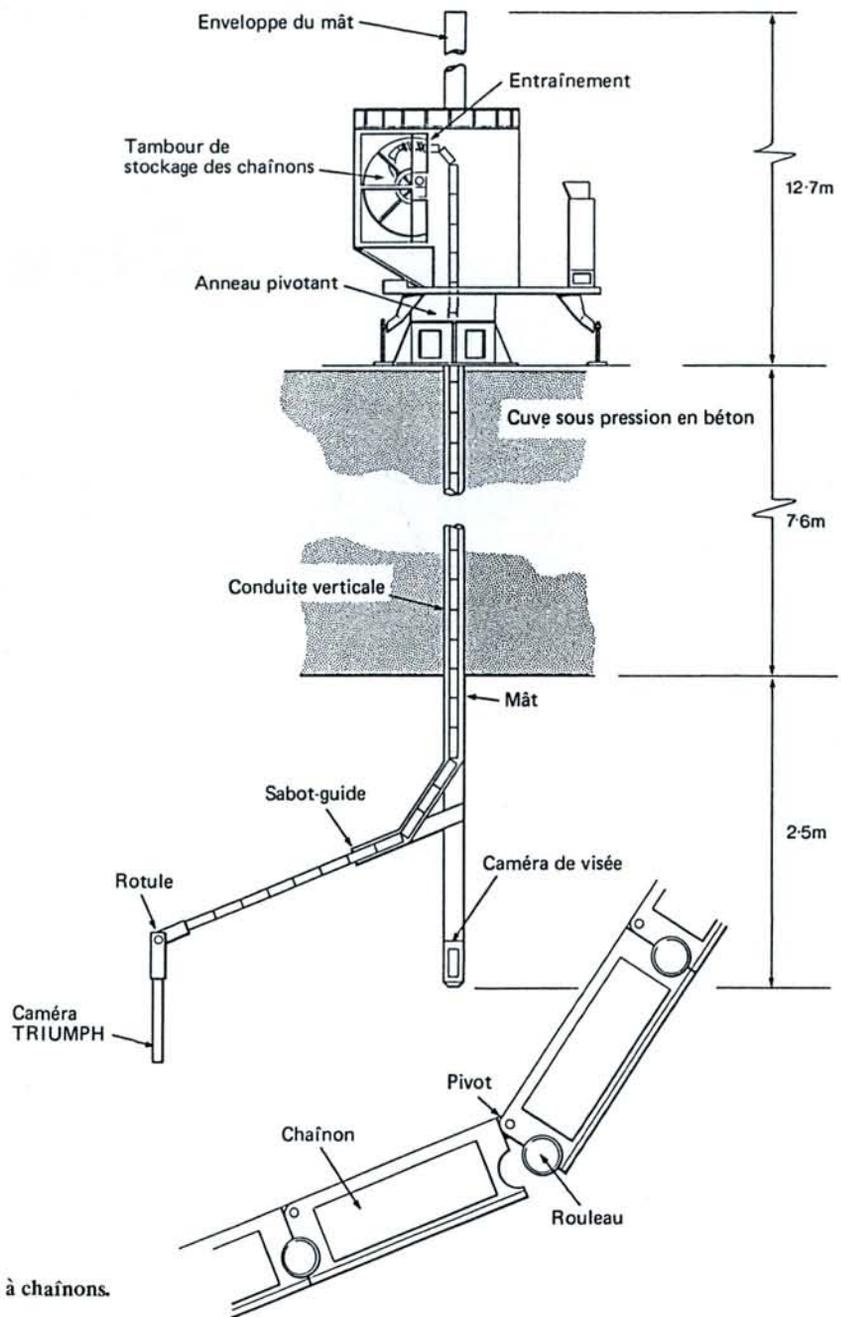


Figure 19. Schéma du manipulateur à chaînons.

manipulateurs télécommandés de grande puissance et plusieurs outils automatiques pour l'usinage mécanique et thermique des aciers au carbone ou inoxydables. La première application industrielle d'un tel manipulateur sera le démontage télécommandé d'un réacteur à tubes de force dans le cadre d'un contrat clés en main de mise à l'arrêt définitif de la centrale nucléaire de Niederaichbach.

La figure 20 montre, à l'échelle 1:15, un modèle entièrement opérationnel d'un manipulateur de ce genre, installé sur une maquette de la centrale de Niederaichbach.

Les mouvements pluridirectionnels du manipulateur comprennent une rotation de 360° d'une poutre annulaire, que l'on voit supportant le manipulateur en position sur le palier d'origine de l'appareil de manutention du combustible à l'étage supérieur du réacteur (figure 21), sur laquelle se déplace un chariot horizontal excentré. Le mât du manipulateur, qui peut lui aussi pivoter de 360° , est placé dans le chariot horizontal. Un chariot vertical, muni d'une griffe universelle et d'un adaptateur pour outils spéciaux, se déplace le long du mât. Dans une position précise, le chariot vertical peut passer

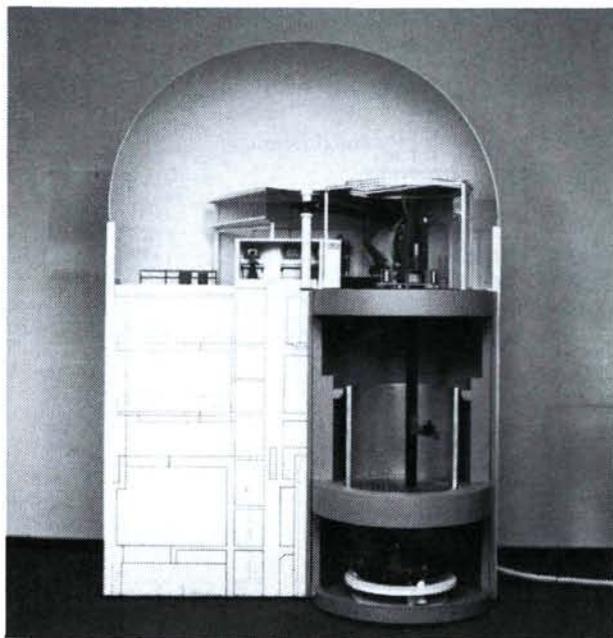


Figure 20. Modèle à l'échelle 1:15 d'un manipulateur de grande puissance télécommandé.

du dessous de la poutre annulaire jusqu'au sommet du mât. Ce système présente donc un avantage particulier lorsqu'il s'agit de faire passer des pièces ou des outils spéciaux de l'étage supérieur à la zone de travail située à l'intérieur de la cuve du réacteur ou inversement.

Le système a une grande surface de travail, égale à la surface délimitée par la poutre annulaire, et sa stabilisation ne nécessite aucune attache supplémentaire à l'intérieur de la cuve. Il est conçu pour lever des charges de trois tonnes.

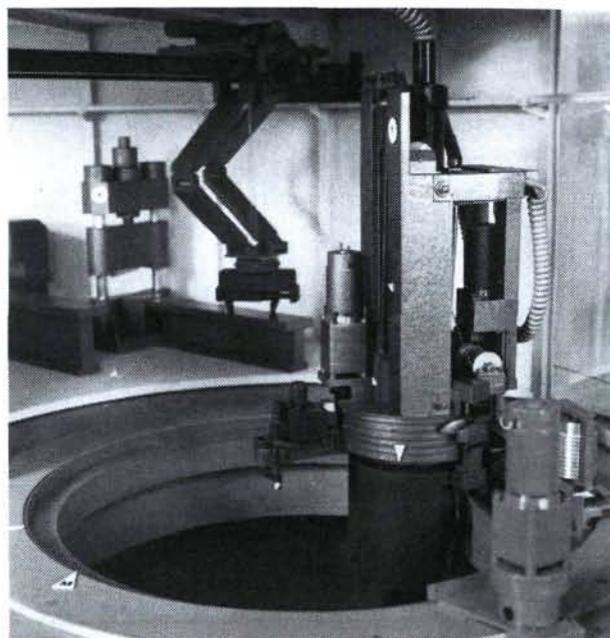


Figure 21. Vue du haut du manipulateur de grande puissance montrant l'ouverture de la poutre annulaire tournante.

Remerciements

La Staatliche Materialprüfungsanstalt tient à remercier de leur appui pour la préparation du présent rapport les sociétés Brown Boveri Reaktor GmbH et Bopp und Reuther GmbH, la Division de la production, des études et de la construction du Central Electricity Generating Board, le Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren, et les sociétés Kraftwerk Union AG, M.A.N. Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg AG et Gg.Noell GmbH.