

Symposium on remote handling equipment for nuclear
fuel cycle facilities

Harwell (UK)
CEA-CONF--7513

2-5 Oct 1984

2 -

**INSPECTION EN SERVICE DES REACTEURS NUCLEAIRES ELECTROGENES
Développements effectués au Commissariat à l'Energie Atomique**

M.ASTY

CEA- CEN SACLAY - GIF SUR YVETTE - France

R.SAGLIO

INTERCONTROLE - RUNGIS - France

L'arrêté du 26 février 1974, portant application de la réglementation des appareils à pression aux chaudières nucléaires à eau a joué un rôle de révélateur dans le domaine du contrôle non destructif. En effet, la nécessité de caractériser les indications obtenues lors du contrôle est devenue évidente et, de ce fait, les techniques et les matériels utilisés jusqu'ici se sont montrés insatisfaisants. Ainsi, le Commissariat à l'Energie Atomique a développé deux techniques originales, les ultrasons focalisés et les courants de Foucault multifréquences, qui sont capables de détecter et de mieux caractériser les défauts. Ces deux techniques ont été utilisées dans les matériels qui sont décrits ici. On présente successivement les dispositifs d'inspection en service des cuves de réacteurs REP adaptés au programme électrogène d'EdF et les ensembles d'inspection des tubes de générateurs de vapeur pour ces mêmes centrales.

Dans le domaine des réacteurs à neutrons rapides, la réalisation de Super-Phénix 1 a nécessité le développement de matériels spécifiques adaptés à l'environnement de ce réacteur pour effectuer, en cas de besoin, des examens tant sur la cuve principale que sur le faisceau tubulaire des générateurs de vapeur. On présente ici brièvement des matériels qui ont été développés.

The february 1974 French decree specifying the application of the pressure vessel regulation to nuclear light water reactors strongly influenced the development of some non destructive examination techniques. It then became obvious that the indications which were detected had to be characterised, emphasizing the inadequacy of the existing techniques and equipments. This led the Commissariat à l'Energie Atomique to the development of two new techniques, focused ultrasonics and multi-frequency eddy currents, which have been shown to allow a better detection and characterization of defects. We present here some of the in-service inspection devices which have been designed for field application of these techniques on the PWR reactors built by EdF.

As fast neutron breeder reactors are concerned, the construction of Super-Phénix 1 has led to the development of specific devices which take into account the environment of the reactor. Thus non destructive examination of the main tank and of the steam generator tubing can be performed when needed. We describe briefly the devices that have been developed.

1. INTRODUCTION

L'arrêté du 26 février 1974, portant application de la réglementation des appareils à pression aux chaudières nucléaires à eau a joué un rôle de révélateur dans le domaine du contrôle non destructif. En effet, la nécessité de caractériser les indications obtenues lors du contrôle est devenue évidente et, de ce fait, les techniques et les matériels utilisés jusqu'ici se sont montrés insatisfaisants. Ainsi, le Commissariat à l'Energie Atomique a développé deux techniques originales, les ultrasons focalisés et les courants de Foucault multifréquences, qui sont capables de détecter et de mieux caractériser les défauts. Ces deux techniques présentées par ailleurs, ont été utilisées dans les matériels qui sont décrits ici. On examinera successivement les dispositifs d'inspection en service des cuves de réacteurs REP adaptés au programme électrogène d'E.D.F., les ensembles d'inspection des tubes de générateurs de vapeur pour ces mêmes centrales, le dispositif en cours de développement industriel pour l'inspection des cuves de Super Phénix 1 et le matériel d'inspection des générateurs de vapeur à tubes hélicoïdaux de Super Phénix 1.

2. FILIERE A EAU LEGERE : INSPECTION EN SERVICE DES REACTEURS REP

L'inspection en service, ou plus précisément, l'inspection périodique des réacteurs à eau pressurisée est basée principalement sur les techniques de contrôle non destructif. Les conditions spécifiques de ces inspections, de même que les précautions particulières nécessaires pour se prémunir contre une rupture catastrophique associée à un dégagement important de produits radioactifs, ont conduit à de nombreux développements de matériel. Du fait des difficultés, pour ne pas dire de l'impossibilité qui existent, dans certains cas, d'effectuer une réparation, il est indispensable de caractériser le mieux possible les indications obtenues afin d'en évaluer la nocivité par tous moyens appropriés. La notion classique de seuil de rebut n'est plus utilisable, elle doit être remplacée. Des termes tels que probabilité de détecter un défaut ou erreur maximale commise sur l'estimation de la dimension des défauts, commencent à être utilisés grâce aux améliorations apportées par les techniques telles que les ultrasons focalisés ou les courants de Foucault multifréquences. La figure 1 qui est une schématisation du circuit primaire d'un réacteur REP montre l'ensemble des zones qui ont fait l'objet d'une étude de machine automatique et les techniques utilisées. Les exemples de réalisation industrielle qui suivent sont les plus significatifs.

2.1. MACHINE D'INSPECTION DE LA CUVE

La figure 2 est une vue schématique d'une cuve de réacteur qui présente l'ensemble des soudures à contrôler. Le contrôle ne peut s'effectuer que par l'intérieur : l'extérieur étant en grande partie inaccessible, seule la technique des ultrasons est utilisable pour l'examen de la totalité des soudures. La gammagraphie ne peut être utilisée que pour les soudures d'embout de sécurité pour lesquelles un accès à l'extérieur a été ménagé.

Pour le contrôle des soudures de la cuve, une Machine d'Inspection en Service (la MIS) a été développée. La MIS permet la manipulation sous eau et le positionnement précis et reproductible, à l'intérieur de la cuve du réacteur, de traducteurs ultrasonores, d'une source gammagraphique et de caméras de télévision. La MIS est conçue pour inspecter la totalité de la cuve en une seule opération. Elle est munie de tous les outillages de contrôle nécessaires. Elle peut être utilisée aussi bien pour les inspections sur réacteurs irradiés que pour les inspections sur réacteurs non irradiés. Ses caractéristiques générales sont les suivantes :

- la mécanique et les liaisons sont démontables par sous-ensembles pour faciliter le transport et l'introduction dans le bâtiment réacteur des différents sites,
- la MIS est conçue pour fonctionner en immersion dans l'eau des cuves, à une température comprise entre + 10°C et + 45°C,
- les matériaux utilisés dans la fabrication de la MIS sont résistants à la corrosion,
- la machine est entretenue dans un état de "propreté nucléaire" (exempte de graisse, de poussières, etc...),
- la MIS est prévue pour supporter le rayonnement lors des examens, coeur en place,
- les éléments constitutifs sont étudiés pour faciliter la décontamination (surfaces lisses, soudures étanches etc...),
- la précision de positionnement "absolue" mesurée au niveau des supports des traducteurs est de + 5 mm dans chacune des 3 directions.

Par ailleurs, divers dispositifs ont été prévus pour garantir la cuve contre les risques de dommages qui pourraient être causés par la MIS.

Les équipements de contrôle comprennent :

- trois caméras de télévision immergeables qui sont fixées sur les outillages de contrôle et permettent un examen visuel complet de la cuve et des tubulures,
- des platines de traducteurs ultrasonores focalisés, regroupant les différentes orientations de contrôle et adaptées au contrôle des diverses soudures,
- une source d'Iridium 192 de 100 curies qui peut être centrée dans l'axe des tubulures au niveau des soudures, les films étant posés manuellement à l'extérieur des tubulures.

Mécaniquement (figure 3), elle est composée des sous-ensembles suivants :

- un fût de guidage, avec treuil et trois pieds supports qui centrent la machine sur la bride supérieure de la cuve,
- une colonne verticale, démontable en trois éléments qui se déplace dans le

- fût de guidage et positionne en altitude les outillages de contrôle,
- un plateau fixe à la base de la colonne muni de trois bras de blocage qui maintiennent la colonne au centre de la cuve au cours des différents examens,
 - un plateau tournant qui oriente les outillages sur 360°,
 - un support d'outillage,
 - un chariot de translation radiale,
 - cinq outillages spécifiques permettant les différents contrôles (bride, soudures des viroles, soudures du fond de cuve, soudures des tubulures et gammagraphie, embouts de sécurité).

La MIS est pilotée à partir d'un pupitre de commande et d'une baie électronique de puissance. Le pupitre électronique (fig.4), regroupe toute la partie contrôle-commande et mesure nécessaire au fonctionnement manuel et automatique de la machine. Dans la baie électronique de puissance se trouvent les variateurs de vitesse des moteurs et les interfaces nécessaires à leur commande.

La motorisation de la machine est assurée par des moteurs à courant continu et des vérins hydrauliques. Le codage de position de la machine est absolu et est assuré par des résolveurs ou des potentiomètres multitours. Tous les mouvements sont équipés de fins de course de type microrupteur ou magnétique.

Le contrôle et la commande de la MIS sont assurés par un automate programmable. Un pupitre permet à l'opérateur de commander les différents contrôles et mouvements manuels ou automatiques et de le renseigner à tout instant sur l'état de la machine : coordonnées associées aux différents mouvements, autorisation ou interdiction des mouvements dont la gestion est assurée par l'automate.

Durant une inspection sur site, la totalité de l'électronique de commande et d'acquisition de données est regroupée dans une caravane située à l'extérieur du bâtiment réacteur. La MIS est envoyée sur site dans trois conteneurs étanches. Une inspection dure une dizaine de jours.

Depuis 1976, 70 inspections ont été réalisées à l'aide de quatre machines. Ce parc est suffisant pour exécuter toutes les inspections prévues en France jusqu'en 1990, au rythme d'environ 12 par an. Deux machines de même conception ont été vendues par INTERCONTROLE en Chine et en Belgique.

2.2. CONTROLE PAR RESSUAGE DES SOUDURES DE TUYAUTERIE

Une machine permettant à distance le contrôle par ressuage des soudures circulaires cuve/tubulures des réacteurs PWR 900, a été étudiée et développée au CEA en collaboration avec EDF. Elle a pour objectif de minimiser le temps d'intervention humaine en zone active tout en assurant une qualité de contrôle au moins équivalente à celle obtenue manuellement.

Le contrôle non destructif par ressuage est un procédé qui fait intervenir une suite d'opérations actuellement manuelles, nettoyage, séchage, pulvérisation des produits et examen visuel. Pour réaliser ce contrôle à distance, il a été nécessaire de mettre au point un dispositif permettant de réaliser ces différentes opérations en toutes positions : plat, corniche, plafond. Les essais ont montré qu'à l'aide de pistolets appropriés on pouvait obtenir en toutes positions, avec un seul réglage pour chacune des phases, des dépôts corrects et fiables et, de ce fait, des indications significatives.

Le positionnement de ce dispositif, par rapport aux soudures à contrôler, est réalisé par une machine spécifique (fig.5) qui permet une rotation autour de la tubulure, une translation suivant une génératrice, un codage incrémental des déplacements.

Le déroulement des opérations est piloté à distance à partir d'une baie de contrôle-commande pouvant être située à 50 mètres de la machine, en zone non active.

Après mise au point en laboratoire, le prototype de faisabilité a été essayé sur site : le temps d'intervention humaine en zone active se limite à 20% du temps nécessaire pour un contrôle manuel.

2.3. INSPECTION DES TUBES DE GENERATEUR DE VAPEUR

Chaque générateur de vapeur comporte plus de 3300 tubes de longueur moyenne 23 m ce qui représente 70 km de longueur et 4400 m² de surface d'échange entre les circuits primaire et secondaire.

L'inspection ne peut s'effectuer que par l'intérieur des tubes et les courants de Foucault constituent la seule méthode industrielle adaptée à ce contrôle. Les défauts qui peuvent apparaître en service intervenant essentiellement sous les plaques intercalaires, dans la plaque à tubes et aux abords des barres antivibratoires, les courants de Foucault multifréquences sont appliqués pour ce contrôle. La mise en oeuvre se fait par un dispositif automatique qui a été développé par le Commissariat à l'Energie Atomique et sa filiale Intercontrôle.

La sonde est positionnée en face du tube à contrôler par un dispositif "araignée" (fig.6), tandis qu'un tireur-pousseur (fig.7) permet d'injecter la sonde à vitesse contrôlée (0,5 m/s). Un microprocesseur associé à l'araignée, identifie le tube contrôlé et surveille en permanence l'injection de la sonde et l'état des équipements d'acquisition de données. Une caméra de télévision étanche et télécommandée assure une surveillance permanente de l'araignée suspendue à la plaque à tubes.

La première inspection utilisant ce dispositif a été faite en février 1976. A ce jour, plus de 40 centrales dans le monde ont été examinées une ou plusieurs fois à l'aide de cet équipement. Intercontrôle a commercialisé une cinquantaine d'araignées adaptées à plusieurs types de générateurs de vapeur et les dispositifs multifréquences sont utilisés dans le monde entier y compris en Chine et au Japon. Les performances très supérieures aux appareils monofréquence associées à la totale automatisation du système, font de cet ensemble d'appareillages, un outil précieux pour l'exploitant en lui apportant dans une durée réduite une information très complète.

3. FILIERE A NEUTRONS RAPIDES

Alors qu'aucune inspection en service n'a été imposée sur le réacteur Phénix, les Autorités de Sûreté ont demandé que la conception de Super Phénix 1 rende possible un examen des cuves et du faisceau tubulaire des générateurs de vapeur.

La présence permanente de sodium, à l'intérieur de la cuve principale, a nécessité le développement d'un matériel d'examen de la cuve tout à fait nouveau. Les conditions de température (180°C) et l'absence de rails de guidage ont fait un robot très sophistiqué. Le MIR, Module d'Inspection de réacteurs Rapides, a nécessité de nombreux développements tels que caméra TV refroidie, traducteurs ultrasonores fonctionnant en température, liquide de couplage utilisable à haute température, etc...

En ce qui concerne les générateurs de vapeur dont les tubes hélicoïdaux peuvent atteindre une longueur de 100m, un dispositif spécifique de contrôle a dû être développé.

3.1. INSPECTION DE LA CUVE PRINCIPALE ET DE LA CUVE DE SECURITE

La présence de multiples cloisons et de sodium à l'intérieur de la cuve principale de Super Phénix 1 interdit l'accès aux soudures. Celles-ci ne peuvent être contrôlées que par l'extérieur : le seul accès possible est constitué par l'espace intercuve entre cuve principale et cuve de sécurité. L'examen des soudures de la cuve principale a lieu durant les périodes de maintenance du combustible, la cuve principale étant alors à 180°C, la cuve de sécurité à 120°C.

Les deux cuves sont en acier austénitique dont l'épaisseur varie de 25 à 60 mm pour la cuve principale et de 25 à 30 mm pour la cuve de sécurité. Elles sont suspendues à la dalle qui comporte douze ouvertures de section ovale (700 x 440 mm) communiquant avec l'espace intercuve. Ces ouvertures permettent l'introduction du MIR. A la partie supérieure des cuves, une barrière thermique isole la dalle qui est maintenue à la température ambiante par l'intermédiaire d'un circuit de refroidissement à eau. Le MIR doit traverser cette barrière thermique pour accéder aux soudures des cuves. L'espace intercuve, en raison des dilatations thermiques et des écarts de fabrication, varie de 620 à 700 mm. Le MIR doit accepter cette variation sans dommage pour la qualité du contrôle. Il comprend :

- le véhicule muni de l'équipement de contrôle ultrasonore et télévisuel,
- un enrouleur de câble et une goulotte pour prévenir tous dommages à la barrière thermique,
- un contrôle-commande assisté par ordinateur,
- un câble composite de liaison pour amener au véhicule les fluides nécessaires à son évolution.

La figure 8 montre une vue en perspective du véhicule, qui consiste en deux roues tractrices et directrices reposant sur la cuve à examiner et deux bras éleevables comportant chacun une roue tractrice et directrice, prenant appui sur l'autre cuve par l'intermédiaire d'une suspension à vérin pneumatique. Toutes les roues sont indépendantes. Chacune d'entre elles comporte deux moteurs, l'un pour la traction, l'autre pour la direction. La direction de chaque roue est codée par l'intermédiaire d'un potentiomètre. La vitesse de chaque roue est contrôlée par une dynamo tachymétrique. Un dispositif de codage en contact avec la cuve inspectée permet de connaître à tous moments le chemin parcouru. Un potentiomètre associé aux bras d'appui mesure l'espace intercuve. Lors de l'introduction ou de l'extraction du véhicule, il est indispensable de minimiser les efforts appliqués sur la barrière thermique. Un dispositif assisté en secours par un câble assure le repliement du véhicule par la fermeture des bras d'appuis.

L'examen télévisuel est réalisé à l'aide de caméras de caractéristiques standard. La caméra destinée à l'examen télévisuel des surfaces est aussi utilisée pour visualiser des repères gravés sur la cuve de sécurité. Ces repères permettent de savoir, en cas de défaillance des systèmes de codage, où se trouve le véhicule. Ils sont représentatifs de la disposition des soudures sur les deux cuves.

Des traducteurs ultrasonores focalisés sont contenus à l'intérieur d'une mini cuve en acier, remplie d'un liquide de couplage et munie d'un joint spécial pour assurer l'étanchéité. Le liquide de couplage est du gilotherm RD dont la compatibilité avec l'acier austénitique a été vérifiée et qui a des propriétés physiques appropriées à son utilisation. En particulier, sa pression de vapeur est telle que le film liquide qui apparaît après le passage du véhicule s'évapore très rapidement. Les traducteurs ultrasonores se déplacent perpendiculairement à la soudure pendant la progression en crabe du véhicule effectuant ainsi un balayage en zig-zag. Un potentiomètre code le mouvement de balayage afin que la position des éventuels défauts puisse être déterminée. Le liquide de couplage est stocké en petite quantité sur le véhicule, cette réserve peut être renouvelée de temps en temps par l'intermédiaire d'une ligne d'alimentation incluse dans le câble mentionné précédemment.

A l'exception des traducteurs ultrasonores et des potentiomètres, les moteurs, codeurs, caméras, etc... doivent être refroidis et de ce fait chaque dispositif est contenu dans une enceinte isolée. De l'azote réfrigéré est amené dans chaque enceinte aux conditions de température et de débit exigées par chaque dispositif.

Le contrôle-commande est basé sur un fonctionnement hiérarchisé : un microprocesseur qui gère les tâches élémentaires, donne les ordres, et contrôle les performances. Un mini calculateur détermine et contrôle la séquence logique des ordres élémentaires qui est représentative du parcours imposé au véhicule.

Sur le site, le contrôle-commande est divisé en deux parties. A côté de l'enrouleur se situe l'équipement de puissance ; le dispositif de contrôle (fig.9) est placé à l'extérieur du bâtiment réacteur, dans une caravane qui regroupe tout le matériel d'acquisition des données.

Le câble composite de liaison assure l'alimentation électrique de l'ensemble des moteurs du véhicule, la transmission de tous les signaux nécessaires au contrôle commande, la transmission des signaux ultrasons et télévisuels, l'alimentation en fluides, azote froid pour la régulation de température, liquide de couplage pour la mini cuve, azote haute pression pour les vérins.

En conclusion, les dimensions des cuves et les conditions d'intervention propres à Super Phénix 1 ont conduit au développement d'un robot spécifique qui se déplace dans l'espace intercuve et permet le contrôle volumique et en surface de l'ensemble des soudures de la cuve principale et de la cuve de sécurité. Sa première intervention sur site est prévue pour le début de 1985.

3.2. INSPECTION DES GENERATEURS DE VAPEUR

Chaque générateur de vapeur de Super Phénix 1 comporte 357 tubes de longueur moyenne 100 mètres. Le sodium secondaire s'écoule à l'extérieur des tubes en incolloy, l'eau et la vapeur circulant à l'intérieur. Les tubes sont serpentinés et comportent des lyres de dilatation. La sonde à courants de Foucault qui est utilisée doit parcourir un chemin particulièrement tourmenté qui ne comporte pas moins de 7 soudures. Les études ont porté plus particulièrement sur la sonde, son câble et le dispositif d'injection. Le matériel électronique, quant à lui, est très semblable à celui utilisé pour l'inspection des générateurs de vapeur de réacteurs à eau pressurisée.

Comme les tubes sont serpentinés, il est évident que le câble de sonde doit avoir un coefficient de frottement aussi faible que possible pour que celle-ci ne reste pas bloquée dans le tube. Les études ont montré que seul un câble équipé de boules très rapprochées, pouvait circuler dans un tel tube, s'il était propulsé par de l'air comprimé. L'air joue le rôle de propulseur et de fluide de sustentation. Pour obtenir une progression régulière du câble, les paramètres suivants ont été étudiés : rigidité du câble, masse au mètre linéaire, forme des boules, matériaux des boules, pression et débit d'air. L'air comprimé est nécessaire à l'introduction comme à l'extraction. Le câble choisi permet l'introduction et l'extraction régulières de la sonde à la vitesse de 0,4 m/seconde : une longueur de tube est ainsi parcourue en 4 minutes et un tube contrôlé en moins de 10 minutes.

Afin d'éviter tout incident lors de l'introduction ou l'extraction de la sonde, un dispositif totalement automatique dénommé DISCAULT a été réalisé. La sonde est enroulée à l'intérieur d'un bidon (fig.10). La pression à l'entrée et à la sortie du tube en cours d'examen est contrôlée en permanence afin de s'assurer que les valeurs observées sont conformes à celles nécessaires à une progression régulière de la sonde. Cette progression est vérifiée par l'intermédiaire d'un dispositif "compteur de boules" situé dans le bidon de stockage de la sonde : la régulation de vitesse est obtenue par l'intermédiaire d'un dispositif de deux courroies réglées en vitesse qui enserrant la sonde.

Le matériel décrit ci-dessus a été utilisé lors de l'inspection en usine des quatre générateurs de vapeur de Super Phénix 1. Dès sa première utilisation, il a donné entière satisfaction, prouvant ainsi que des tubes au parcours aussi tourmenté peuvent être contrôlés industriellement par courants de Foucault.

5. CONCLUSION

Le programme électronucléaire français a amené le Commissariat à l'Energie Atomique à développer des méthodes de contrôle non destructif plus performantes que celles qui étaient classiquement utilisées dans l'industrie. Cette nécessité de performances accrues et l'impossibilité fréquente due au rayonnement pour l'opérateur de s'approcher des structures à contrôler, ont conduit à réaliser des machines automatiques. Leur degré de complexité varie grandement avec l'environnement, comme en témoignent la MIS, automate programmé, et le MIR, véritable robot. La notion d'inspectabilité, c'est-à-dire la prise en compte, dès la conception d'une structure, des impératifs d'inspection en service, intervient de façon déterminante sur la complexité, et donc la fiabilité des outils à réaliser pour effectuer les tâches d'inspection.

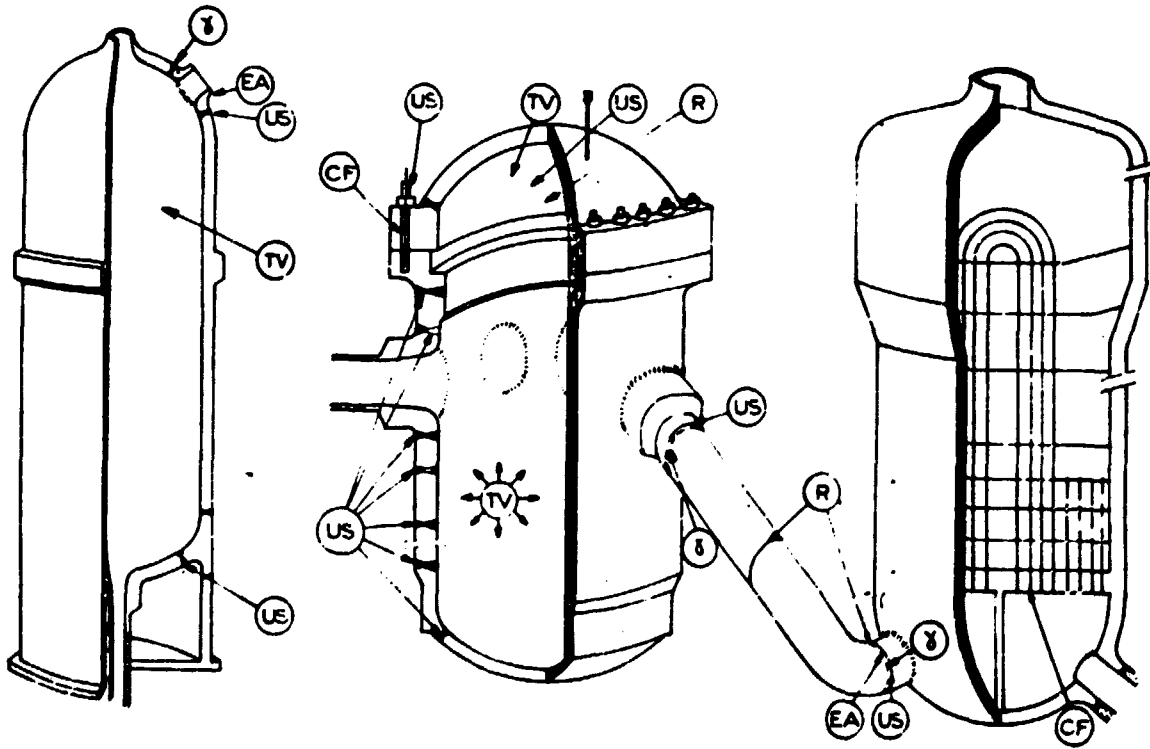


Figure 1 - Zones d'intervention sur le circuit primaire

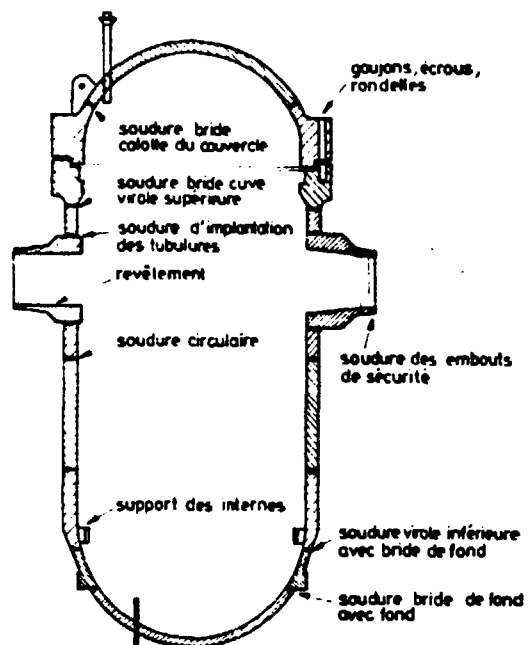


Figure 2 - Schéma d'une cuve REP

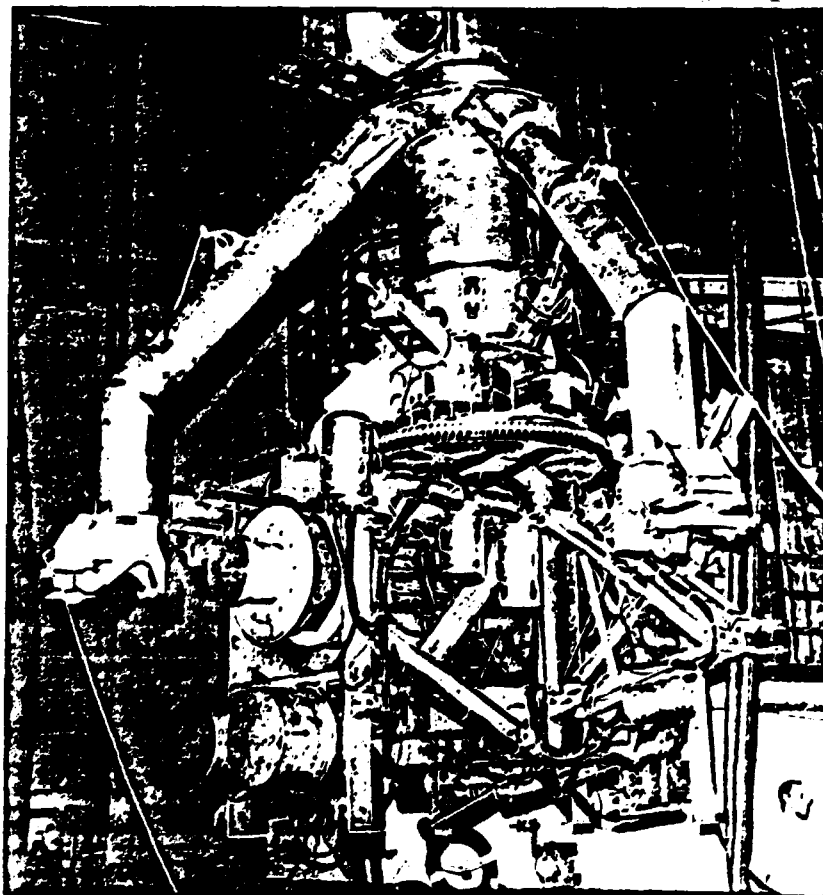


Figure 3 - MIS 3 en cours de mise en place à CHINON B1

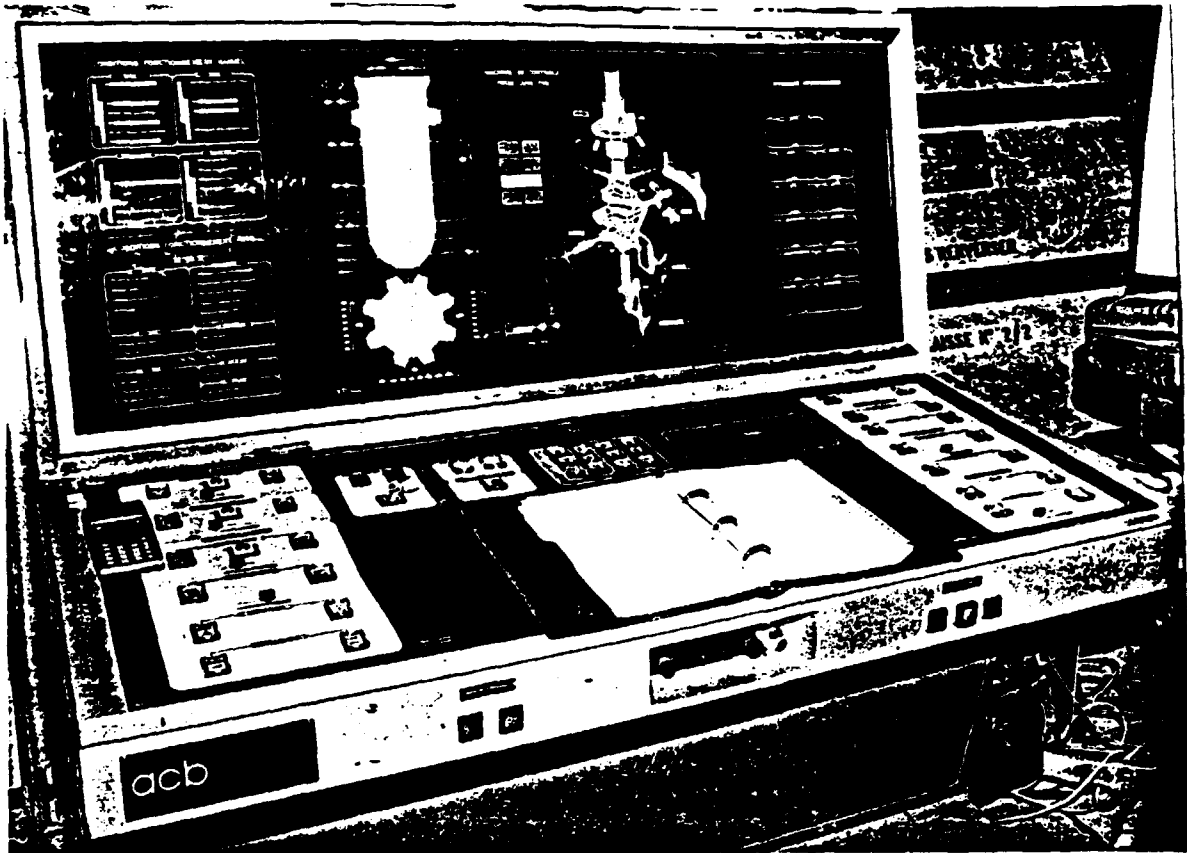


Figure 4 - Pupitre de commande d'une MIS

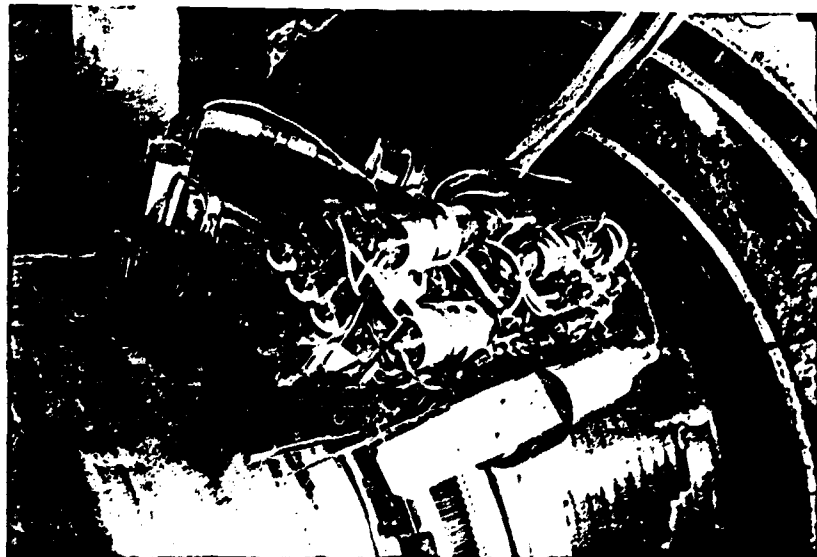


Figure 5 - Machine de ressuage automatique

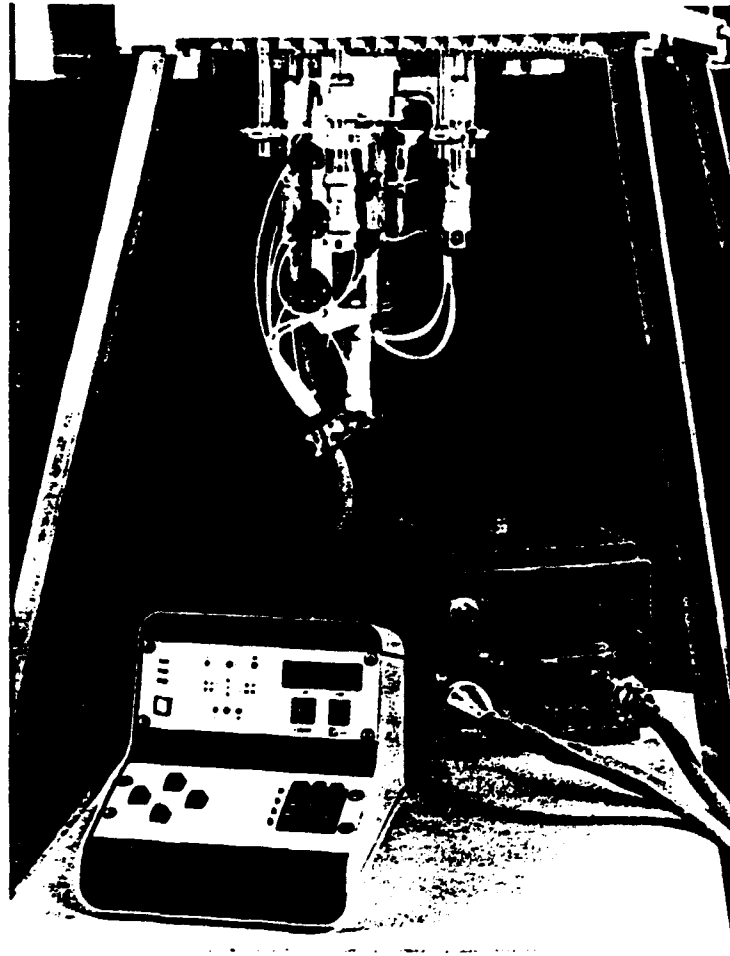


Figure 6 - Araignée positionneur de sonde à courants de Foucault



Figure 7 - Tireur pousseur pour l'introduction des sondes à courants de Foucault

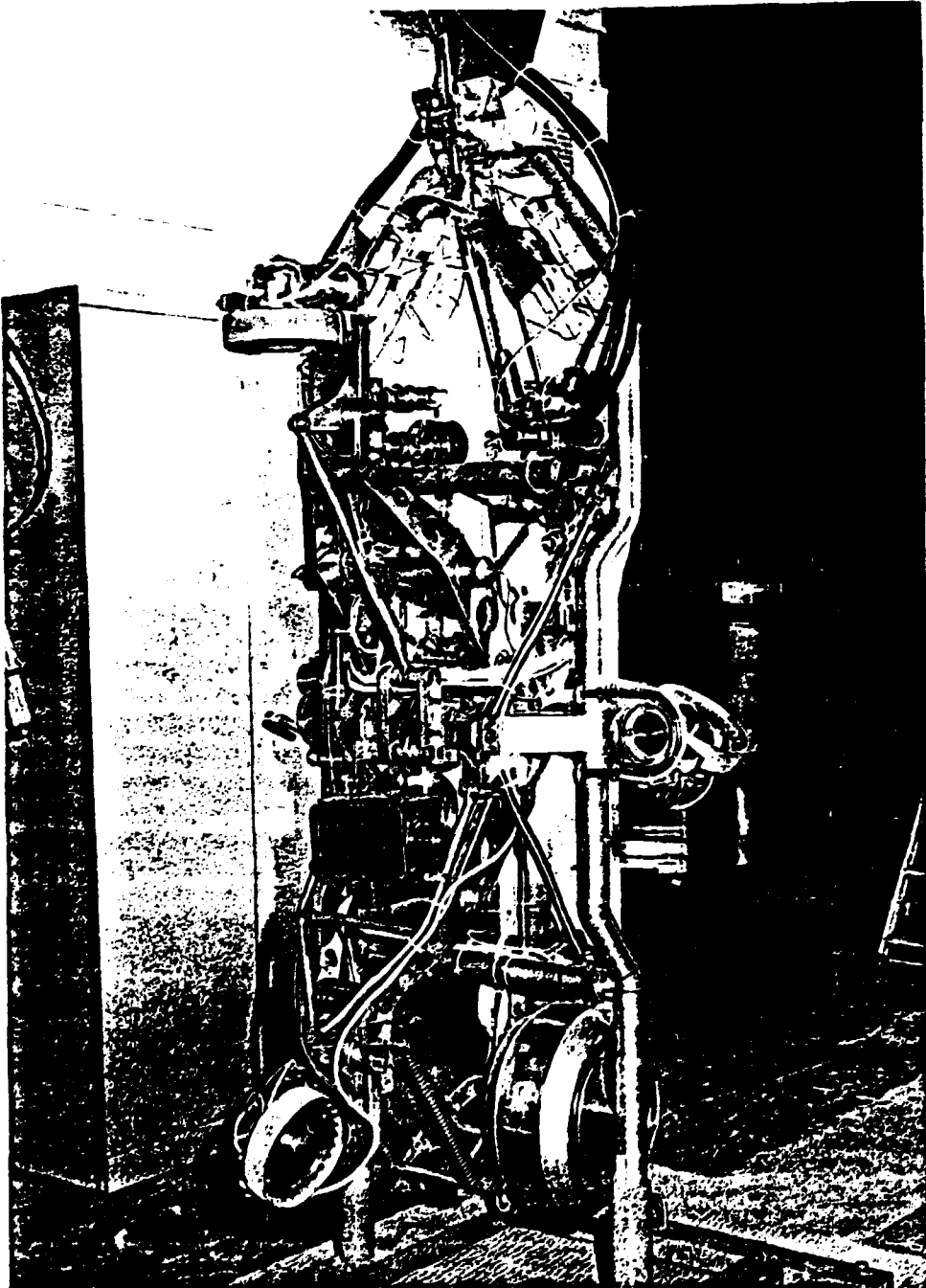


Figure 8 - Engin MIR : vue du véhicule

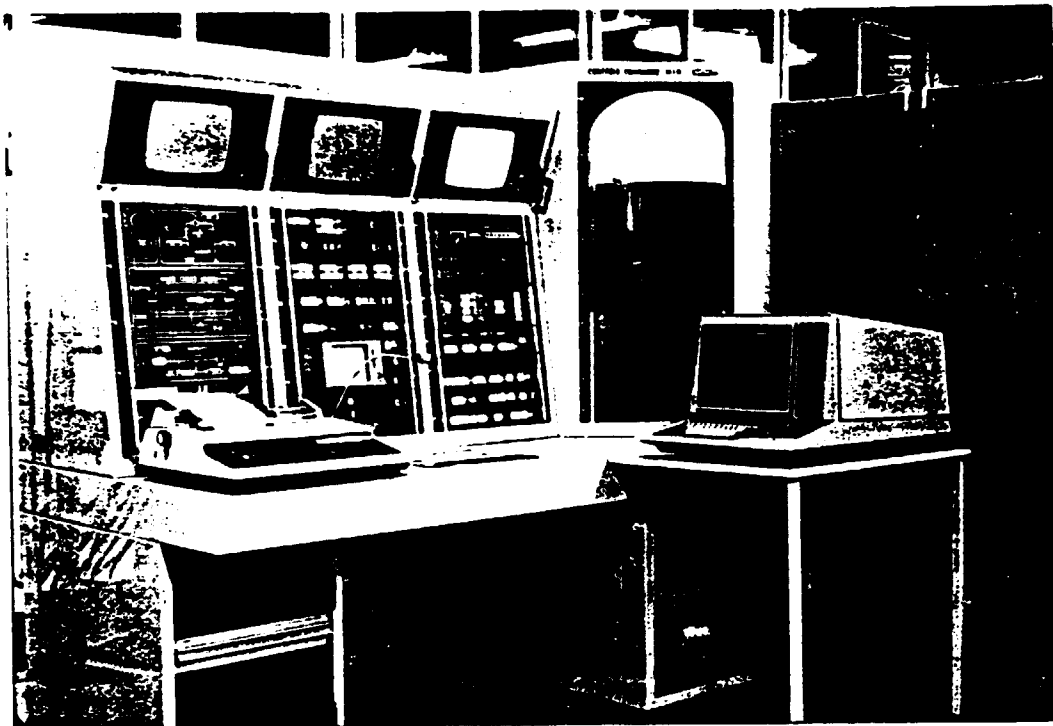


Figure 9 - Pupitre de commande de l'engin MIR

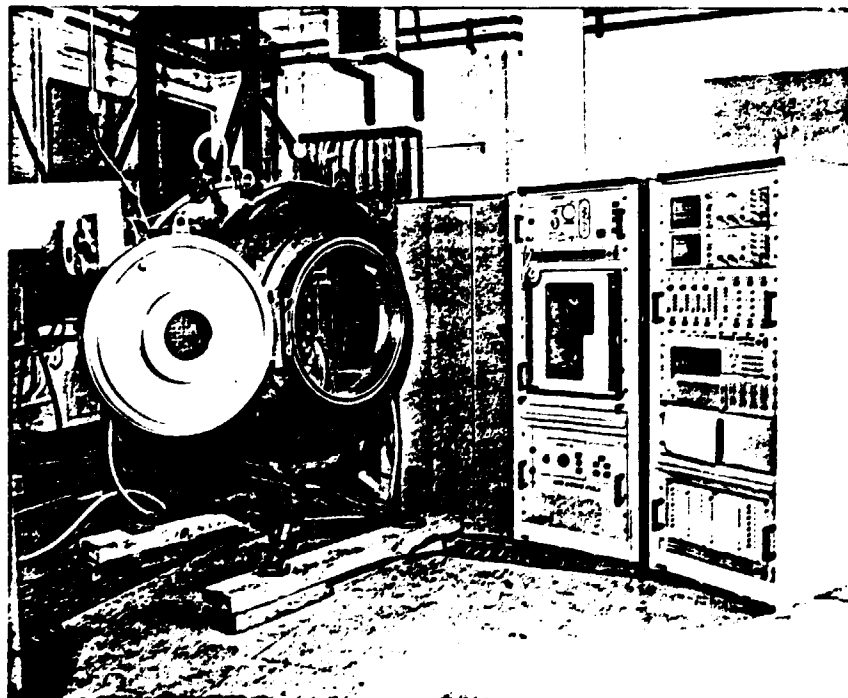


Figure 10 - Générateurs de vapeur de Super Phénix 1 : Bidon injecteur de sonde et ensemble DISCAULT