

Intégré automatisme zur zerstörungsfreier Kontrolle und Datenerfassung von dünnen Rohren mit einfachem Verschiebungsantrieb.

Integrated Straight - Through Automatic Non-Destructive Examination and Data Acquisition System for Thin-Wall Tubes

ENSEMBLE INTEGRE AUTOMATIQUE DE CONTROLE NON DESTRUCTIF ET D'ACQUISITION POUR LES TUBES MINCES ENTRAINEES PAR SIMPLE TRANSLATION

A. Stössel, G. Boulanger, J. Furlan et R. Mogavéro

C.E.A. - C.E.N. Cadarache DDEC/SDEEC/SETE b⁵315 - BP1-13115 StPaul lez Durance

Die zerstörungsfreie Kontrolle der Hüllrohren des Schnellbrüters SUPER-PHENIX wird auf einer hochleistungs-Anlage durchgeführt die, moderne leistungsfähige Messtechniken mit hochentwickelten Datenerfassungs- und Auswertungsverfahren vereinigt.

Non-Destructive Examination of cladding tubes for the SUPERPHENIX fast breeder reactor is carried out in a high-speed facility that combines complementary advanced measurement techniques and state-of-the-art data processing and acquisition procedures.

Le contrôle non destructif des tubes de gainage du réacteur à neutrons rapides SUPERPHENIX est réalisé sur une installation à grande cadence associant des techniques de mesure performantes et complémentaires à des procédures d'exploitation et d'acquisition des résultats élaborées.

I. INTRODUCTION

L'ensemble intégré de contrôle présenté ici assure le supercontrôle à 100 % des tubes de gainage destinés au coeur du réacteur à Neutrons Rapides SUPER-PHENIX. Le niveau de qualité exigé pour ces tubes ainsi que leur nombre ont nécessité la conception d'une installation alliant de hautes performances à une grande cadence de contrôle et une automatisation complète.

En effet, les gaines des éléments combustibles constituent la première barrière de confinement du réacteur nucléaire, et de plus, elles sont soumises à des conditions sévères de fonctionnement. Les défaillances de ce composant doivent être aussi rares que possible d'où la nécessité de garantir une qualité élevée de ce produit tant du point de vue santé que dimensionnel. L'expérience acquise ¹ | ² sur le contrôle non-destructif des tubes de gainage en acier austénitique a permis la mise au point de procédés assurant cette qualité et faisant appel aux techniques suivantes :

- contrôle de santé par courants de Foucault,
- contrôle de santé par ultrasons,
- métrologie ultrasonore.

Le coeur du réacteur SUPER-PHENIX comporte une centaine de milliers d'aiguilles combustibles. La fabrication et le renouvellement de cette charge nécessitent une cadence de contrôle mensuelle de plusieurs milliers

de tubes. Ces impératifs de cadence ainsi que la mise en oeuvre de procédures de surveillance de la qualité du contrôle, imposées par les spécifications, rendent indispensable l'automatisation de l'exploitation du banc, de la sélection des tubes et de l'acquisition des mesures.

II. DESCRIPTION DE L'INSTALLATION

- La partie mécanique (fig. 1) assure les fonctions suivantes :

- . approvisionnement unitaire à partir d'une nappe de cinquante tubes,
- . entraînement en translation simple à une vitesse réglable entre 0 et 50 cm/s au travers des têtes de contrôle,
- . éjection du tube contrôlé en bon ou mauvais, suivant deux plans de déchargement.

L'ensemble des mouvements est piloté par un pupitre de commande qui permet un fonctionnement en cycle automatique ou manuel.

Pour une vitesse moyenne de défilement de 25 cm/s, la durée du cycle de contrôle d'un tube d'environ 3 m de longueur est de l'ordre de 30 secondes.

- Le contrôle de santé par courants de Foucault est réalisé au moyen d'un appareil DEFOSCOPE CF à deux voies, associé à une tête de mesure comportant deux capteurs différentiels.

- Le contrôle de santé par ultrasons utilise quatre appareils MESUS, associés à autant d'ensembles transducteur annulaire - miroir répartis en deux cuves (type JANUS)

- La métrologie ultrasonore se fait à l'aide d'un appareil MESUS3D; la cuve de contrôle à 6 transducteurs réalise une mesure suivant trois diamètres à 120°.

Les cuves à immersion de santé et métrologie sont alimentées en eau par un système fonctionnant en circuit fermé, comportant une cuve de rétention et une cuve à niveau constant |³|.

- L'acquisition des résultats se fait sous deux formes : d'une part l'enregistrement analogique de toutes les voies de mesure, d'autre part le stockage numérique sur disque souple des résultats de contrôle (sélection voie par voie en santé, extrema des valeurs métrologiques) et leur édition sur imprimante. L'ensemble de ces dispositifs occupe deux baies : une pour l'enregistrement analogique, l'autre pour l'acquisition numérique.

Les baies regroupant les électroniques de mesure et d'acquisition sont présentées sur la figure 2.

- L'identification des tubes se fait, après la séquence chargement, par lecture automatique d'un numéro codé en binaire inscrit sur chaque tube. Cette numérotation est réalisée électrolytiquement sur un banc de

de marquage (fig. 3).

III - TECHNIQUES DE CONTROLES

III.1 CONTRÔLE DE SANTÉ PAR COURANTS DE FOUCAULT

Le procédé employé est classique puisqu'il est basé sur la mesure des variations d'impédance d'un capteur encerclant constitué de deux bobines montées en différentiel et alimentées par un courant sinusoïdal à fréquence constante. Dans le but de différencier efficacement des défauts de natures différentes, on utilise en fait deux fréquences correspondant à deux voies de mesure distinctes. La première fréquence (quelques dizaines de kHz) est plus particulièrement destinée à la détection de défauts, dits métallurgiques, présentant un caractère ferromagnétique (type incrustations, inclusions ...), la seconde (quelques centaines de kHz) permet la détection des défauts, dits dimensionnels, à caractère volumique (manque de matière, incrustation de même nature que le métal de base ...).

L'analyse de phase, spécifique au procédé courants de Foucault, permet pour chacune des fréquences, de séparer les composantes magnétiques des composantes purement dimensionnelles des signaux, ce qui facilite donc l'identification de la nature des défauts détectés.

L'appareil délivre, d'une part 4 tensions analogiques proportionnelles à l'amplitude des signaux sur chacune des voies d'analyse (deux voies par fréquence), d'autre part 4 informations de dépassement de seuil.

III.2 CONTRÔLE DE SANTÉ PAR ULTRASONS

Le contrôle est réalisé en immersion, des ondes de Lamb sont générées dans le tube à la fréquence de 5 MHz à l'aide d'un appareil délivrant des trains d'ondes; ces paramètres sont classiques pour l'examen ultrasonore de tubes à parois minces. L'originalité du procédé réside dans le fait que le tube n'est animé que d'un mouvement de translation et que par ailleurs aucune pièce n'est mise en rotation; ceci est rendu possible par l'utilisation de transducteurs annulaires associés à des miroirs encerclants le tube $|^4|^5|^6|$;

- les transducteurs annulaires émettent un faisceau ultrasonore cylindrique dont l'axe est parallèle à celui du tube.
- les miroirs réfléchissant le faisceau vers le tube sont de deux types: **CONIQUE** pour la production d'ondes de Lamb se propageant le long des génératrices du tube et donc destinées à la détection de défauts à orientation transversale, **DE FORME HÉLICOÏDALE** pour la production d'ondes circonférentielles adaptées à la détection de défauts longitudinaux.

Cet ensemble de détection (longitudinal et transversal) est regroupé dans une cuve à niveau constant (type JANUS); l'installation comporte deux cuves symétriques assurant pour chaque orientation de défaut (L et T) le contrôle sous deux incidences opposées.

Chaque électronique de contrôle MESUS fournit une sortie analogique du signal de mesure ainsi que deux indications de dépassement de seuil.

III.3 MÉTROLOGIE ULTRASONORE

Le contrôle est réalisé en immersion à l'aide de six transducteurs focalisés en ligne fonctionnant à 30 MHz . Les axes des faisceaux ultrasonores, situés dans un même plan correspondent à six directions radiales orientées à 60 ° les unes des autres. Deux transducteurs diamétralement opposés permettent la mesure simultanée de deux épaisseurs, un diamètre extérieur et un diamètre intérieur, avec une précision de quelques microns. La commutation électronique des trois couples de transducteurs permet l'exploration circonférentielle du tube.

Les résultats de mesure se présentent sous forme de 4 signaux analogiques (2 épaisseurs, diamètre extérieur, diamètre intérieur) proportionnels à un écart par rapport aux cotes nominales.

IV- IDENTIFICATION DES TUBES

Dans le but de conserver les résultats de contrôle et les données de fabrication caractérisant chaque aiguille combustible, le tube de gainage est repéré par un numéro individuel. Les conditions d'exploitation de la chaîne de contrôle et de fabrication imposent que ce numéro puisse être lu de façon automatique. Nous avons développé pour cela un procédé de numérotation et de lecture en codage BCD |⁷|.

La numérotation est réalisée sur un banc automatique (fig. 3), le marquage est constitué d'anneaux sombres obtenus par électrolyse superficielle du tube et régulièrement répartis en abscisse. La présence ou l'absence de l'anneau à une abscisse donnée fournit l'information binaire. L'installation permet la numérotation de 1 à 999999 sur une longueur d'inscription de 100 mm.

La lecture est assurée sur le banc de contrôle par un lecteur optique à déplacement incrémental (durée de lecture 6 secondes) associé à une électronique de décodage, cette dernière affiche le numéro lu et délivre les signaux logiques destinés aux dispositifs d'acquisition.

Ce système présente l'avantage de permettre l'approvisionnement des tubes sur le banc de contrôle dans un ordre quelconque.

Le marquage n'altère pas la qualité du tube et n'est pas détecté par les contrôles non-destructifs ni en santé ni en métrologie.

V - ACQUISITION ET TRAITEMENT DES RESULTATS

V.1 ENREGISTREMENT ANALOGIQUE

Un enregistreur optique UV équipé de 10 voies assure le tracé des signaux analogiques suivants :

courants de Foucault	{	- voies métallurgique et dimensionnelle à basse fréquence
	}	- voie dimensionnelle à haute fréquence
ultrasons	{	- voies longitudinales (2)
	}	- voies transversales (2)
métrologie	{	- voie diamètre extérieur
	}	- une voie épaisseur
	{	- voie diamètre intérieur

Ces informations peuvent être enregistrées soit en continu sur toute la longueur du tube, soit, par l'intermédiaire d'une mémoire numérique circulante, simplement au droit d'un défaut entraînant le rebut du tube.

V.2 ACQUISITION NUMÉRIQUE

L'ensemble d'acquisition, constitué d'un microprocesseur, d'une imprimante semi-graphique et d'une unité double de disque souple, permet la prise en compte, l'édition et le stockage des informations suivantes concernant chaque tube (fig. 4) :

- numéro de lot (ensemble de 5 000 tubes maximum provenant d'une fabrication homogène),
- numéro du tube,
- informations chiffrées de sélection du tube pour chaque voie de santé :
0 pour tube bon, 1 pour dépassement du seuil de rebut,
2 pour dépassement d'un seuil supérieur,
- valeurs minimales et maximales, exprimées en microns, des écarts par rapport aux cotes nominales pour chaque voie métrologique.

L'une quelconque de ces informations est imprimée en rouge lorsqu'elle traduit un rebut du tube.

V.3 TRAITEMENT DES RÉSULTATS

Après contrôle d'un lot de tubes, les traitements des informations stockées conduisent à l'édition des résultats suivants :

- données d'ensemble définissant le lot contrôlé et liste des résultats de contrôle sur tous les tubes de ce lot, classés par ordre numérique,
- pourcentages de tubes défectueux globaux et pour chaque type de contrôle (fig. 5),
- histogramme de chacune des mesures métrologiques en classes de 10 microns d'étendue (fig. 6).

VI - PROCEDURE DE CONTROLE

Les spécifications définissent les techniques de contrôle et leurs paramètres essentiels ainsi que les défauts étalons associés à chacune d'elles |^o|. L'amplitude des signaux provoqués par ces derniers, lors du passage des tubes étalons dans les têtes de contrôle, permet de fixer les seuils de sélection sur chacune des voies d'analyse. Par ailleurs ces défauts de référence sont utilisés pour la surveillance de la stabilité des réglages au moyen de la méthodes des cartes de contrôle définie par la norme NF X 06 031. La procédure consiste à obtenir une bonne estimation de la moyenne et de l'écart-type de la réponse de chacun des signaux étalons sur 50 passages successifs. Ces valeurs conduisent à l'établissement de droites de contrôle et de surveillance pour les moyennes et les écarts-types. On effectue périodiquement un nombre restreint de passages des tubes étalons afin de vérifier que ces droites limites ne sont pas dépassées.

Le microprocesseur utilisé pour l'acquisition et le traitement des résultats de mesure comporte un programme spécifique permettant l'établissement automatique des cartes de contrôle et le test périodique de surveillance des réglages.

VII - CONCLUSION

A CE JOUR ENVIRON 80 000 TUBES DE GAINAGE SUPER-PHENIX ONT ETE CONTROLES SUR CETTE INSTALLATION. ON PEUT, A LA SUITE DE CETTE EXPERIENCE DRESSER LE BILAN SUIVANT :

- LES PERFORMANCES DE L'INSTALLATION - QUALITE DE CONTROLE ET CADENCE - CORRESPONDENT AUX OBJECTIFS FIXES ;

- LA FIABILITE DU PROCEDE DE MARQUAGE ET LECTURE AINSI QUE DU SYSTEME D'ACQUISITION ET DE SELECTION AUTOMATIQUE, CONDUIT A UNE GRANDE FACILITE D'EXPLOITATION DE L'INSTALLATION ;

- LA QUALITE DU PRODUIT CONTROLE EST EGALEMENT GARANTIE PAR LA MISE EN OEUVRE D'UNE PROCEDURE DE CONTROLE ELABOREE.

REFERENCES

- |¹| J.P. Dufayet, A. Samoël, A. Stössel et B. Spriet
DETECTION DES DEFAUTS DANS LES TUBES DE GAINAGE EN FONCTION DES
CONDITIONS DE FABRICATION ET DE CONTROLE
Bulletin d'information Scientifique & Technique CEA 211 fév.76 p.35
- |²| G. Boulanger, J.P. Dufayet, A. Samoël, B. Spriet anal. A. Stössel
AUTOMATIC NONDESTRUCTIVE TESTING SYSTEM FOR THIN TUBES.
Materials Evaluation XXXII janv. 74 p. 18
- |³| G. Boulanger, A. Samoël
INSTALLATION DE CONTROLE PAR ULTRASONS
Brevet EN 701 6042 30 avr 70
- |⁴| J. Perdijon
METHODE DE CONTROLE ULTRASONORE DES TUBES SANS MISE EN ROTATION
Communication à la 8ème Conférence Mondiale sur les Essais Non
Destructifs sept. 76
- |⁵| J.P. Dufayet, J. Perdijon, D. Dacosta
BANC INTEGRE DE CONTROLE AUTOMATIQUE DE TUBES EN TRANSLATION
Communication à la 8ème Conférence Mondiale sur les Essais Non
Destructifs sept. 76
- |⁶| J. Furlan, G. Boulanger, R. Mogavèro
NO ROTATING US TESTING OF THIN WALLED TUBES
Ultrasonics International 81 - Brighton UK - juin 81
- |⁷| G. Boulanger, G. Duret
DISPOSITIF ELECTROLYTIQUE DE MARQUAGE DE PIECES METALLIQUES
Brevet 753 8530 16 déc. 75
- |⁸| J. Perdijon
CALIBRATION AND SPECIFICATIONS FOR THE ULTRASONIC TESTING OF
THIN-WALL TUBES
N D T International oct. 77



FIG. 1 - BANC DE CONTROLE - vue côté approvisionnement



FIG. 2 - ENSEMBLE DES BAIES DE MESURE ET D'ACQUISITION

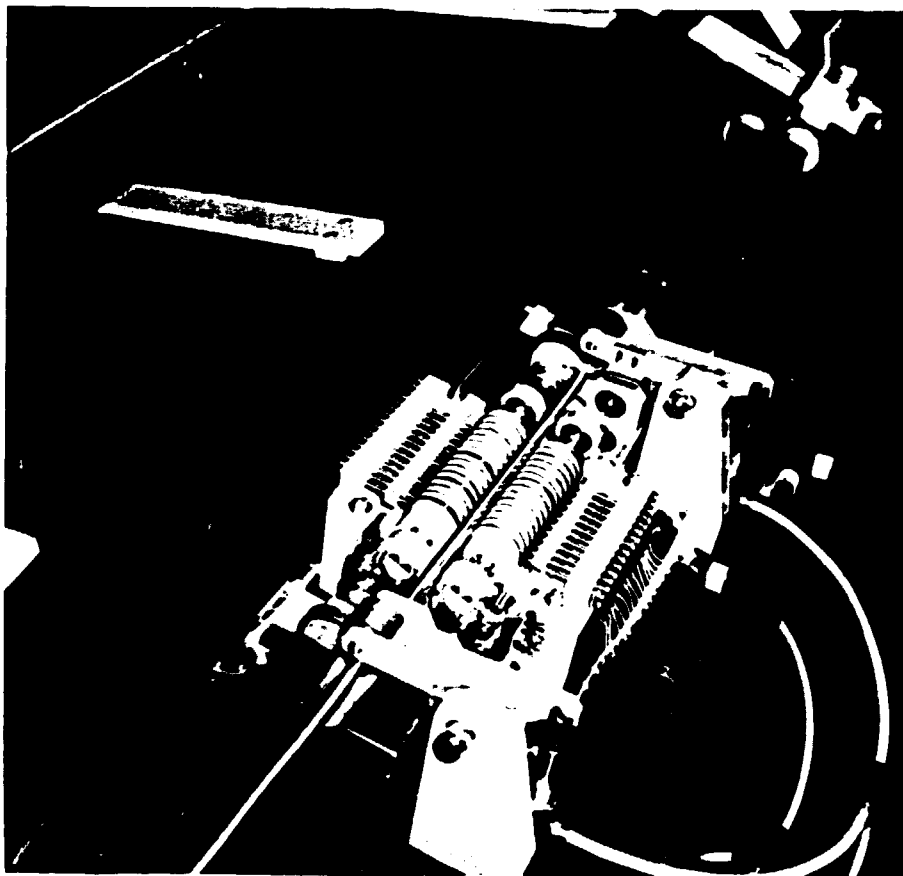


FIG. 3 - BANC DE NUMEROTATION - Vue de la tête de marquage

```

**PROGRAMME D'ACQUISITION**
.....
* LABEL DISQUE
.....
* FICHIER DISQUE OUVERT
* DATE PREMIERE ACO: 15 05 81
* NUMERO DE LOT: 0082
* PREMIER TUBE DU LOT: 093406
.....

```

```

NUMERO DE LOT: 0082
EST-CE UN ULTIME CONTROL DU LOT?N
LECTURE DIRECTE DU NUMERO DE TUBE ?0

```

TABLEAU DES ACQUISITIONS

* REPERAGE DU TUBE *		SANTÉ						METROLOGIE												
* N LOT/N DE TUBE		* C	* D	* E	* U	* S	* J	* U	* S	* 2	* DELTA	* DELTA	* DELTA	* DELTA	* DELTA					
		* M	* E	* D	* E	* T	* T	* E	* L	* L	* E	* MAX	* E	* MIN	* E	* MAX	* E	* MIN	* E	* MAX
* 0082	* 094250	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* +06	* -01	* +01	* -10	* +11					
* 0082	* 094245	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* -00	* -25	* +09	* -19	* +11					
* 0082	* 094233	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* +07	* -00	* +02	* -10	* +12					
* 0082	* 094242	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* -00	* -10	* -00	* -19	* +10					
* 0082	* 094273	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* +50	* -10	* +00	* -50	* +06					
* 0082	* 094236	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* 0	* -00	* -14	* -00	* -10	* +09					

FIG. 4 - VUE PARTIELLE D'UN TABLEAU D'ACQUISITION DES RESULTATS TUBE PAR TUBE

TABLEAU DES POURCENTAGES

NUMERI DE TUBE TRAITE : 0781

PARAMETRES	% TUBES BONS	% TUBES MAUVAIS
GLOBAL	99,49 %	00,51 %
H	100,00 %	00,00 %
U	100,00 %	00,00 %
L1	100,00 %	00,00 %
11	99,62 %	00,38 %
L2	100,00 %	00,00 %
12	99,86 %	00,12 %
DELTA E	100,00 %	00,00 %
DELTA I	100,00 %	00,00 %
DELTA E1	100,00 %	00,00 %
DELTA L2	100,00 %	00,00 %
METALLURGIQUE	99,49 %	00,51 %
DIMENSIONNEL	100,00 %	00,00 %
METROLOGIQUE	100,00 %	00,00 %

FIG. 5 - EXEMPLE D'EDITION DES POURCENTAGES DE TUBES BONS ET MAUVAIS POUR UN LOT

TRANCHE	MAX	MIN	TRANCHE
-105	0000	0000	- 95
- 95	0000	0000	- 85
- 85	0000	0000	- 75
- 75	0000	0000	- 65
- 65	0000	0000	- 55
- 55	0000	0000	- 45
- 45	0000	0000	- 35
- 35	0000	0000	- 25
- 25	0000	0000	- 15
- 15	0000	0173	- 05
- 05	0085	0607	+ 05
+ 05	0614	0000	+ 15
+ 15	0082	0000	+ 25
+ 25	0000	0000	+ 35
+ 35	0000	0000	+ 45
+ 45	0000	0000	+ 55
+ 55	0000	0000	+ 65
+ 65	0000	0000	+ 75
+ 75	0000	0000	+ 85
+ 85	0000	0000	+ 95
+ 95	0000	0000	+105

HISTOGRAMME DE DELTA E1 MAX

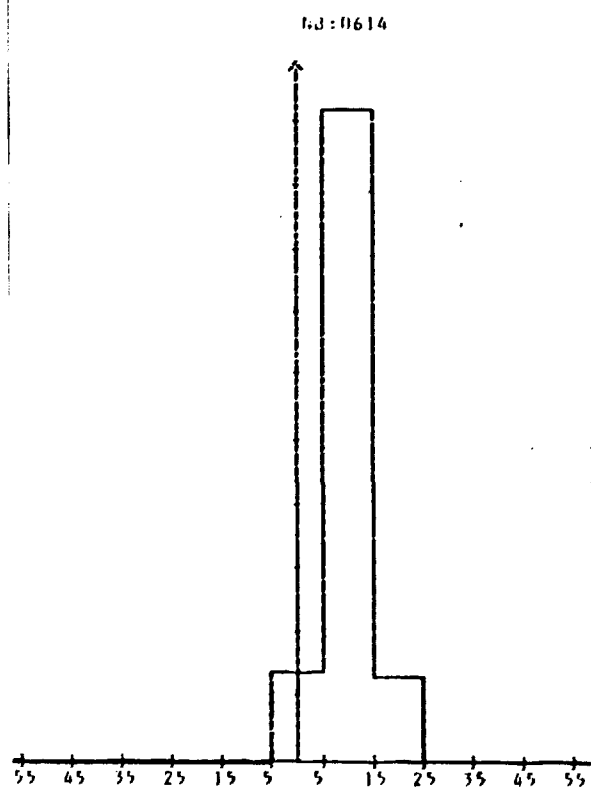


FIG. 6 - EXEMPLE D'HISTOGRAMME EFFECTUE, POUR UN LOT, SUR MESURE D'EPAISSEUR