



**PRINCIPE ET APPLICATIONS DES COURANTS DE
FOUCAULT IMPULSIONNELS**

*PULSED EDDY CURRENTS : PRINCIPLE AND
APPLICATIONS*



EDF

Direction des Etudes et Recherches

**Electricité
de France**

SERVICE ENSEMBLES DE PRODUCTION
Département Retour d'Expériences Mesures-Essais

Avril 1993

BERNARD A.
COUTANCEAU N.

**PRINCIPE ET APPLICATIONS DES COURANTS
DE FOUCAULT IMPULSIONNELS**

***PULSED EDDY CURRENTS : PRINCIPLE AND
APPLICATIONS***

Pages : 16

93NB00073

Diffusion : J.-M. Lecœuvre
EDF-DER
Service IPN, Département SID
1, avenue du Général-de-Gaulle
92141 Clamart Cedex

© Copyright EDF 1993

ISSN 1161-0611

SYNTHÈSE :

Après avoir rappelé brièvement le principe d'un contrôle non destructif par Courants de Foucault, méthode actuellement largement utilisée industriellement (contrôle des tubes d'échangeur), la note détaille les spécificités du contrôle liées au caractère impulsionnel et non entretenu des courants d'excitation. Les conséquences sur la réalisation des capteurs et l'analyse des signaux mesurés sont présentées.

Les applications de cette technique dans le domaine du contrôle non destructif sont divisées en deux parties ; pour chacune, on précise l'état d'industrialisation.

La première partie concerne la possibilité d'injecter des courants intenses pendant des temps très courts conduisant à des puissances instantanées élevées. Les applications en sont, d'une part la réalisation de capteurs focalisés permettant la détection de petits défauts (contrôle des gaines de combustible irradiées), d'autre part la possibilité de saturer des tubes ferromagnétiques pour permettre le contrôle de santé de l'intégralité de l'épaisseur du tube.

La deuxième partie concerne le contrôle des structures dites épaisses, pour lesquelles on exploite le riche contenu spectral de l'impulsion d'excitation (multifréquence et basse fréquence) pour la recherche de défauts non débouchants en surface. Les applications concernent les structures austénitiques (tubulures de réacteur nucléaire), les structures rivetées en aluminium (aéronautique) et le contrôle de structures multicouche de type manchette (pénétration des couvercles des réacteurs nucléaires à travers la manchette thermique).

3/4

EXECUTIVE SUMMARY :

Eddy currents are widely used as a non destructive testing technique specially for heat exchanger testing. The specificities of pulsed eddy current testing are analysed in terms of probe design and signal processing. The specific applications are detailed. They are divided in two parts.

First part, deals with the two main applications of the high peak energy supplied to the probe. One concerns the design of focused probes used for the detection of small defects in irradiate fuel rods. The other concerns the saturation of ferromagnetic materials in order to test the full thickness of the exchanger tubes.

Second part, deals with applications of the wide and low frequency spectrum generated by the pulse source. It enables the testing of thick materials, and the detection of sub-surface defects. It has been tested on austenitic steel (nuclear pressure vessel nozzle), multilayered structures of aluminium alloys (aeronautics) and sleeved structures (nuclear pressure vessel head penetrations through thermal sleeves).

INTRODUCTION

La communication concerne une méthode non conventionnelle de contrôle non destructif, utilisant les courants de Foucault en régime impulsionnel. Après un succinct rappel du principe, les différentes applications imaginées par les Laboratoires de Recherche sont détaillées en précisant la mise en œuvre, les performances, les avantages et inconvénients recensés dans les publications et l'état d'industrialisation.

PRINCIPE DE LA METHODE DE CONTROLE

A l'aide d'un bobinage (cf. fig.1) parcouru par un courant variable dans le temps des courants sont induits dans la pièce conductrice, et parfois magnétique, à contrôler. Ces courants induits qui s'opposent au courant d'émission sont les courants de Foucault.

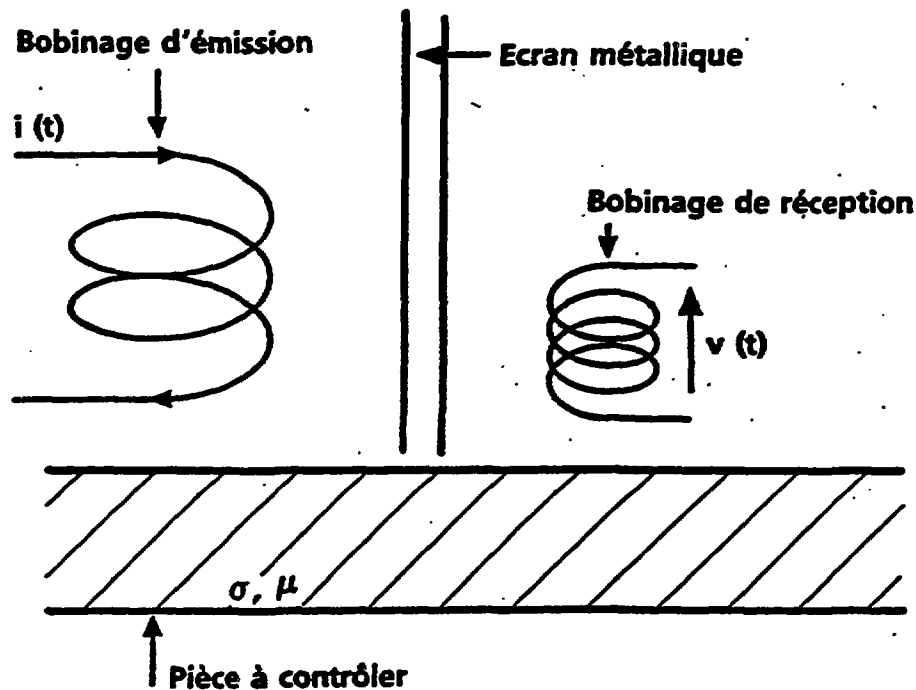


FIGURE 1 : PRINCIPE D'UN CAPTEUR A COURANTS DE FOUCAULT PULSES.

La perturbation des courants, en présence d'une anomalie de conductivité ou de perméabilité magnétique dans la pièce, est captée en surface par un ou plusieurs bobinage dit de réception. L'interprétation de la tension de réception doit permettre de détecter et caractériser les anomalies dans la pièce. Un capteur à courants de Foucault Pulsés (CFP) présente des spécificités suivantes :

- les fonctions émission et réception sont séparées ; chaque bobinage est optimisé par rapport à sa fonction.
- souvent ces deux fonctions sont séparées par un écran métallique ou blindage. Il permet d'une part de limiter le couplage entre l'émetteur et le récepteur et d'autre part de "focaliser" les courants induits [1].
- la forme du courant d'émission n'est pas une sinusoïde, comme pour le régime entretenu. Il prend des formes variées suivant les chercheurs, souvent une arche de sinusoïde [2] mais parfois des trains d'onde [3] ou des créneaux [4].
- la tension de sortie est une fonction de temps, dont l'enregistrement et les traitements nécessitent les moyens modernes de la numérisation.

LES APPLICATIONS DES COURANTS DE FOUCAULT IMPULSIONNELS AU CONTROLE NON DESTRUCTIF.

Ces applications sont divisées en deux ensembles dont la distinction n'est pas aussi catégorique qu'elle peut l'apparaître dans le tableau de synthèse n° 1.

Le premier, baptisé "PUISSANCE INSTANTANEE ELEVEE", exploite des impulsions de forte amplitude qui permettent, soit d'obtenir des capteurs focalisés, soit de saturer les matériaux à contrôler.

Le deuxième ensemble baptisé "UN RICHE CONTENU SPECTRAL", exploite la durée finie des impulsions de courant. Le caractère pénétrant des courants de Foucault impulsionnels est utilisé pour le contrôle des structures épaisses monocouche ou multicouches.

Ces tableaux résument les industries concernées ; l'industrie nucléaire pour le contrôle des gaines de combustible irradiées, des tubes d'échangeur et des tubulures revêtues des cuves, l'industrie chimique pour le contrôle des parois de réservoir en austénitique et finalement l'industrie aéronautique pour le contrôle des structures rivetées en alliage d'aluminium.

UNE PUISSANCE INSTANTANEE ELEVEE

	Application	Pays	Années	Laboratoire	Industriel ou Client de l'Etude
Capteur focalisé	Gaine combustible	USA	1955-1973	ANL ⁽¹⁾	96
Saturation des matériaux	Tubes ferromagnétiques	USA	1988	ORNL ⁽²⁾	Martin Marietta

(1) Argonne National Laboratory

(2) Oak Ridge National Laboratory

UN RICHE CONTENU SPECTRAL

	Application	Pays	Années	Laboratoire	Industriel ou Client de l'Etude
Contrôle des structures épaisses : - monocouches - multicouches - multicouches	Paroi réservoir Revêtement tubulaire	RFA	1977-1985	BAM ⁽³⁾	MRT ⁽⁴⁾
	Structures rivetées	FRA USA UK	1981-1983 1991 1992	BAM ⁽³⁾ U of Surrey	- STAVELEY M of Defence
	Structure manchette	F	1992	EDF/DER	SYSMAT

(3) Bundesanstalt für Materialforschung und-prüfung

(4) Ministère de la Recherche et de la Technologie allemand.

TABLEAU 1

Les pays impliqués par ces développements furent d'abord des Etats-Unis puis l'Europe. Le nom des laboratoires est précisé en 5ème colonne. La dernière colonne définit le client de l'étude ; dans le cas particulier de STAVELEY et SYSMAT, où le développement a été industrialisé, il s'agit du nom des sociétés qui commercialisent le produit.

UNE PUISSANCE INSTANTANEE ELEVEE

- **POUR CONTROLER DES GAINES DE COMBUSTIBLE IRRADIEES, AVEC DES CAPTEURS FOCALISES**

Cette première application s'inscrit dans un programme de recherche des effets de l'irradiation sur les gaines des assemblages de combustible, au début des années 1960, aux Etats-Unis. Des informations sur l'épaisseur de la gaine, la présence de corrosion à l'interface gaine/combustible ou de microfissures dans la gaine sont recherchées.

L'Argonne National Laboratory [5] avait démontré que la technique pulsée permettait de mesurer des épaisseurs de revêtement ou des variations d'épaisseur d'un matériau. Ces mesures pouvaient être indépendantes de l'entrefer capteur/pièce [6], dans certaines limites, en sélectionnant des instants d'échantillonnage particuliers.

La principale amélioration à l'utilisation des CFP fut l'idée et le développement de capteurs à masque, cf. fig. 2. Le bobinage d'émission est enroulé sur un noyau de ferrite, il est entouré d'un masque (ou blindage). Le masque est réalisé avec un matériau fortement conducteur, percé d'une petite ouverture. Ces capteurs avec masque présentent une meilleure résolution qu'en son absence.

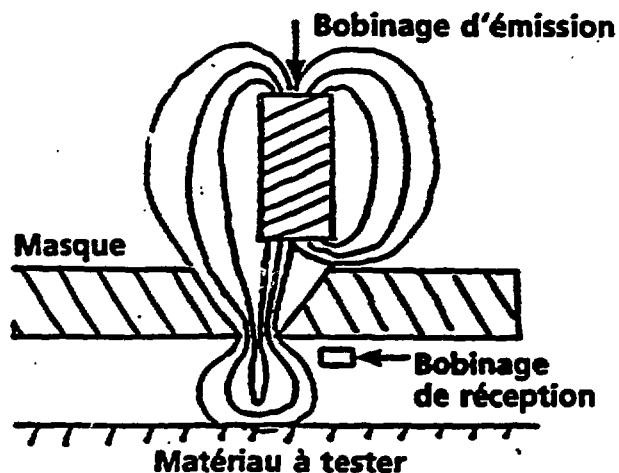


FIGURE 2 : CAPTEUR A MASQUE

Les pertes importantes dans le masque nécessitent d'utiliser des puissances crêtes importantes, environ 1 kW. Les performances atteintes concernent la détection de fentes longitudinales (longueur 1,6 mm ; profondeur 10 %) en peau interne et externe de la gaine d'épaisseur 0,4 mm [7].

Les avantages de la méthode pulsée [9] par rapport au contrôle par ultrasons concernent la rapidité du contrôle et le caractère sans contact. Ils détectent des défauts d'aussi petite dimension.

Un prototype, en laboratoire chaud, a permis l'inspection de tubes irradiés et la définition de zones des crayons combustibles présentant des discontinuités dans la gaine. Des examens métallurgiques [8] ont confirmé la présence d'une phase de réaction dans le métal à l'interface gaine/combustible.

- **POUR CONTROLER LES MATERIAUX FERROMAGNETIQUES EN LES SATURANT**

Cette application concerne le contrôle des tubes d'échangeurs par sonde pulsée. L'excitation du bobinage d'émission par une impulsion courte et de puissance crête variant de quelques kW à quelques centaines de kW [10], permet simultanément d'engendrer des courants de Foucault dans le tube et de le saturer. La puissance nécessaire dépend de la nature et de l'épaisseur du tube. Les performances correspondent à la détection de fentes circonférentielles de profondeur égale à 10 % de l'épaisseur (4,80 mm) en peau externe d'un tube de générateur de vapeur (acier 2 1/4 Cr - 1 Mo). L'intérêt par rapport à un bobinage de saturation alimenté en courant continu est lié à la plus grande mobilité de la sonde.

UN RICHE CONTENU SPECTRAL

- **POUR CONTROLER LES STRUCTURES EPAISSES MONOCOUCHE**

Les premières applications de la technique pulsée pour le contrôle des structures épaisses furent proposées par les allemands du BAM à partir de 1977. Pour une géométrie de capteur telle que représentée sur la figure 3, des défauts non débouchants en surface (sous-cutanés) sont détectés jusqu'à des profondeurs de l'ordre de 10 mm, cf. fig. 4, dans des aciers austénitiques. La technique pulsée permet de caractériser le ligament (distance du défaut à la surface) avec une faible sensibilité à l'entrefer capteur/pièce (cf. fig. 4).

É : Emetteur
 S : Ecran
 M : Récepteur

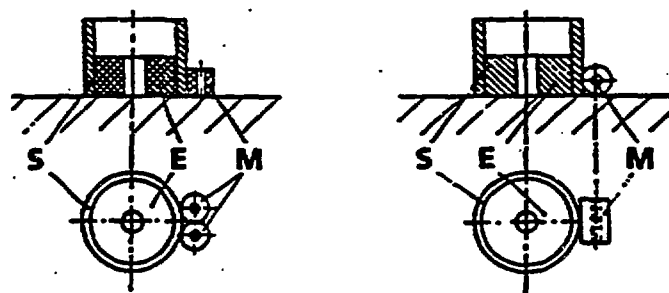


FIGURE 3 : GEOMETRIE DES CAPTEURS DEVELOPPES
 PAR LE BAM.

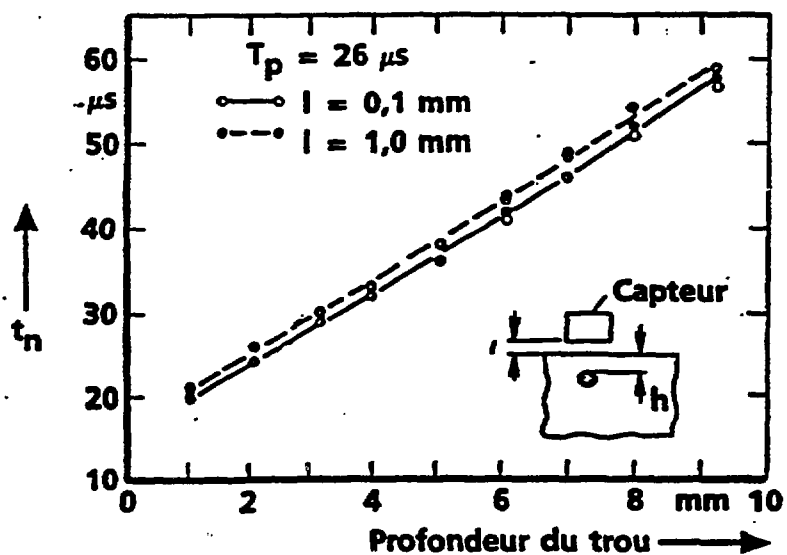


FIGURE 4 : INFLUENCE DE LA PROFONDEUR D'UN TROU SUR LE
 TEMPS DE PASSAGE PAR ZERO (t_n) DU SIGNAL PULSE -
 SENSIBILITE A L'ENTREFER (l)

Les applications proposées concernent l'industrie chimique et l'industrie nucléaire. Le contrôle externe des parois des réservoirs chimiques (8 mm d'acier austénitique) est développé pour détecter et caractériser le ligament (au mm près) de fissures de corrosion. Le même but est à atteindre dans l'inspection par l'intérieur du revêtement soudé des coudes des tubulures (cuves des réacteurs nucléaires).

Un prototype [12] a permis l'inspection in situ d'une tubulure soumise à une série de chargements (chocs thermiques), étalés dans le temps, et suivis de contrôles. Cette expérimentation a mis en évidence la croissance de fissures. La résolution limitée du capteur ne permet pas de déterminer le ligament lorsqu'il y a des fissures proches ou formant un réseau.

- **POUR CONTROLER LES STRUCTURES ÉPAISSES MULTICOUCHES**

Deux applications de la technique pulsée sont proposées (cf. Tableau 1), l'une pour l'industrie aéronautique et l'autre pour l'industrie nucléaire.

La première concerne le contrôle des assemblages rivetés de tôles en alliage d'aluminium. Deux sortes de dégradations sont recherchées :

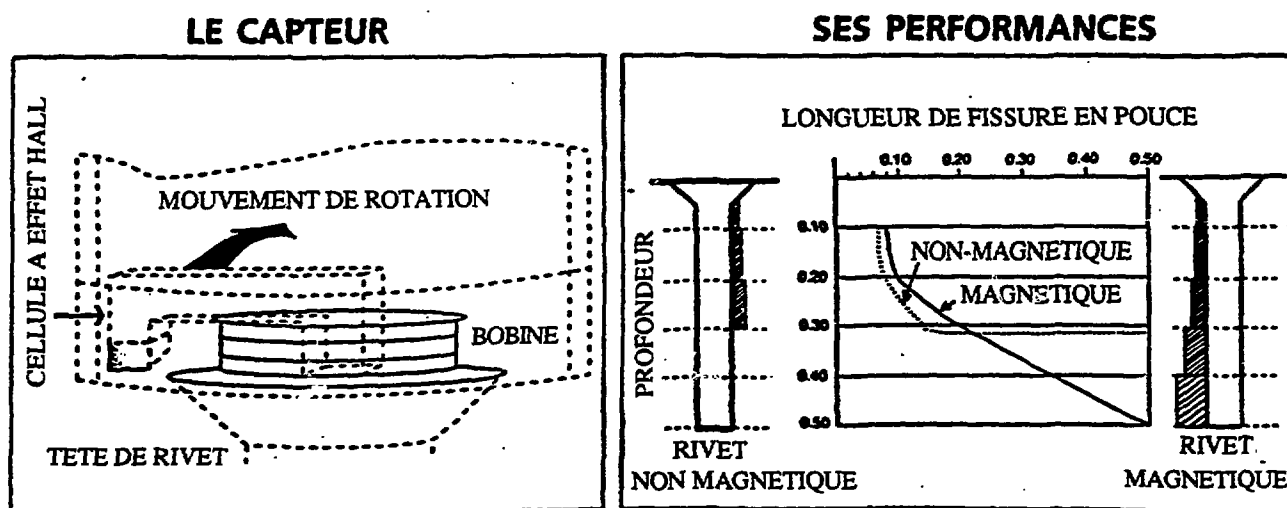
- la présence de corrosion traduite par la diminution d'épaisseur d'une des tôles,
- la présence de fissures de fatigue amorcées sur les trous de rivet dans la deuxième couche de l'assemblage, soit à 1,6 mm de profondeur [11].

Avec les capteurs développés par les allemands du BAM (cf. fig. 3) la longueur minimale des fentes détectées est de 4 mm. La simulation de la corrosion par un amincissement de la première couche (épaisseur 2 mm) est détectable si la diminution d'épaisseur est au moins égale à 20 % de l'épaisseur. Dans les années 80, le BAM a donc montré que la technologie des contrôles par courants de Foucault pulsés développée pour le contrôle des aciers austénitiques (≈ 10 mm) était transposable au contrôle de matériaux 10 fois plus conducteurs et des profondeurs de défaut de l'ordre de 2 mm.

L'industrialisation récente [13] du contrôle par courants de Foucault pulsés a été réalisée par une société américaine STAVELEY-INSTRUMENTS.

Elle utilise un capteur de conception très différente (cf. fig. 5). L'excitation est réalisée par un électro-aimant en forme de U et la réception par une sonde à effet Hall. La position angulaire de la fissure par rapport au rivet est fournie ainsi qu'une estimation de sa profondeur et de sa longueur. Les performances dépendent de la nature magnétique ou pas du rivet installé comme le montre la figure 5. Cet appareil de contrôle paraît plus sensible que le système allemand.

magnétique ou pas du rivet installé comme le montre la figure 5. Cet appareil de contrôle paraît plus sensible que le système allemand.



Caractéristiques de la fissure : – position radiale
– estimation de la profondeur

**FIGURE 5 : CAPTEUR COMMERCIALISE PAR STAVELEY INSTRUMENTS
POUR LA DETECTION DE FISSURES DE FATIGUE DANS LES
STRUCTURES RIVETEEES DE TOLES EN ALLIAGE D'ALUMINIUM.**

La deuxième application concerne l'industrie nucléaire. Il s'agit de contrôler les traversées du couvercle des cuves des réacteurs électro-nucléaires, à travers la manchette thermique qui est concentrique à la traversée (cf. fig. 6). Les défauts recherchés sont des fissures longitudinales de corrosion sous contrainte amorcées en peau interne de la traversée. La géométrie de la manchette et de la traversée est détaillée sur la figure 6b, ces cylindres sont en alliage 600, non magnétique. La sonde introduite à l'intérieur de la manchette est portée par un robot. Les fissures détectées sont caractérisées par leur orientation, extension et position (radiale et axiale) par rapport à la traversée. La limite de détection du contrôle correspond, pour une fente électro-érodée de longueur 20 mm, à une profondeur minimum de 1 mm. La méthode

a été validée par comparaison avec des expertises réalisées par courants de Foucault sur la pénétration déséquipée de la manchette.

L'avantage de ce contrôle est qu'il ne nécessite pas de démonter la manchette (gain de temps), il est de plus relativement rapide (1 h 30 d'acquisition par traversée) et ne crée pas d'effluents.

Les performances de la technique sur fissures de corrosion sous contrainte sont en cours d'évaluation. Ce contrôle ne permet pas actuellement de fournir une estimation de la profondeur des fissures. L'appareil de contrôle est industrialisé par la société SYSMAT, d'après les développements réalisés par la Direction des Etudes et Recherches d'EDF.

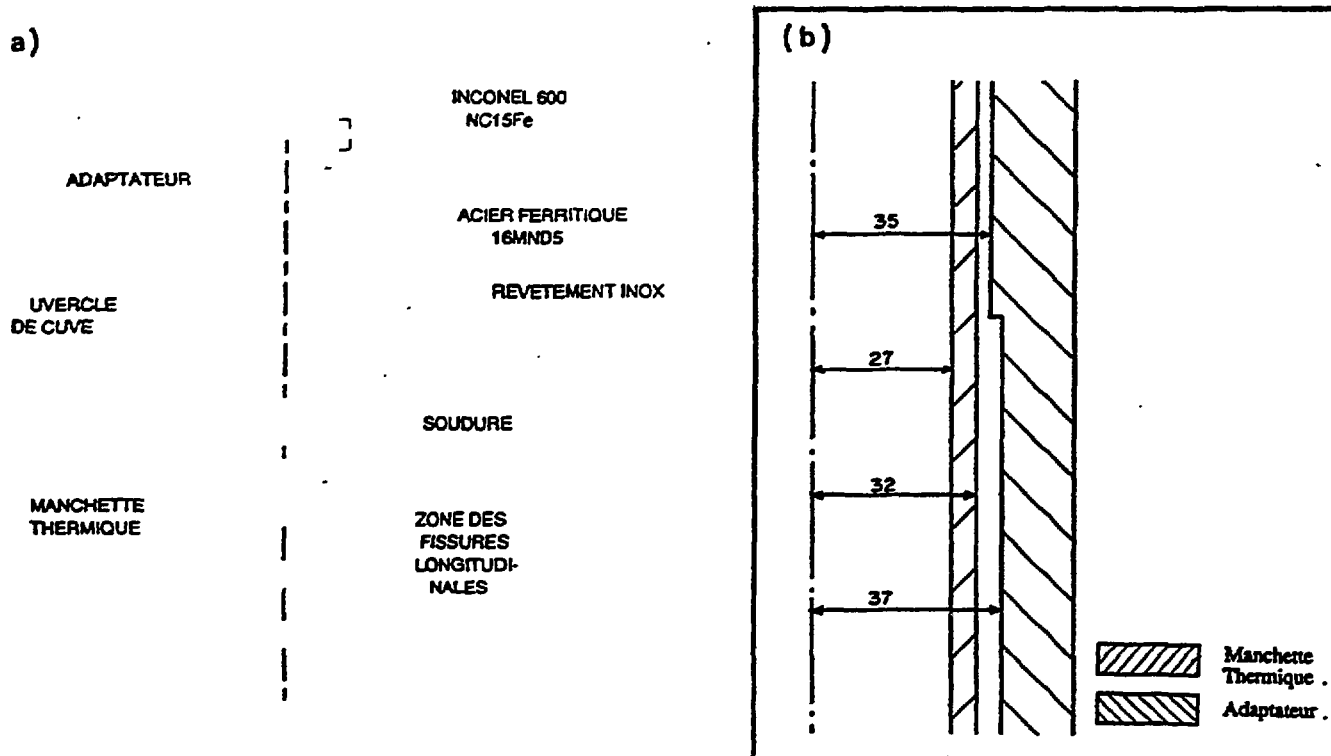


FIGURE 6 : GEOMETRIE DE L'ADAPTATEUR

CONCLUSION

Les différentes applications des contrôles par courants de Foucault pulsés présentées ont montré qu'ils permettaient de mesurer des épaisseurs (gaine, revêtement), de détecter des défauts de natures différentes (trou, fente, fissure) et de caractériser ces défauts (position, longueur, ligament).

Les matériaux contrôlés peuvent être des conducteurs métalliques austénitiques ou ferromagnétiques. La structure de ces matériaux peut-être monocouche ou multicouches (revêtement ou empilement).

Outre, les avantages communs aux contrôles par courants de Foucault (rapides, sans contact,...), on peut citer pour une sensibilité à l'entrefer capteur/pièce réduite, la possibilité de construire des capteurs focalisés (présentant une grande résolution), de saturer les matériaux inspectés et d'inspecter des structures épaisses (10 mm d'acier inoxydable austénitique). Le caractère multifréquence lui confère une grande richesse en information sur la structure contrôlée. Les études actuelles ont pour but d'optimiser la conception des capteurs par la compréhension des phénomènes physiques et de développer l'analyse du signal. Elles s'appuient sur l'expérimentation physique et la modélisation numérique bi et tri-dimensionnelle [14, 15, 16, 17].

BIBLIOGRAPHIE

- [1] C.W. Cox and C.J. Renken, "The use of the conducting mask in pulsed electromagnetic testing", April 1969, Argonne National Laboratory ANL-7172.
- [2] G.Wittig, H. M. Thomas: "Design of a Pulsed Eddy-Current test Equipment with Digital Signal Analysis", Eddy Current Characterization of Materials and Structures, ASTM STP 722, 1981, pp. 387-397.
- [3] H. Crostack, J. Nehring: "Development and application of pulsed eddy current testing using CS-technique" ; ASTM, 1985, Vol 1, Las Vegas (NE) 3-8/11, pp. 208-215.
- [4] M. Gibbs and J. Campbell, "Pulsed eddy current inspection of cracks under installed fasteners", Materials Evaluation, January 1991, pp. 51-59.
- [5] D.L. Waidelich, "Pulsed eddy currents gage plating thickness", Electronics Vol. 28, p. 146-147, November 1955.
- [6] D.L. Waidelich and S.C. Huang, "The use of crossing points in pulsed eddy current testing", Materials Evaluation, Vol. 30, pp. 20-24, January 1972.
- [7] C.J. Renken and A. Sather, "Pulsed eddy current test system for hot cell use : Manual of operation", Novembre 1972, Argonne National Laboratory, ANL-7973.
- [8] R.R. Asamoto, R.F. Bacon, A.E. Conti and G.P. Wozadlo, "Evaluation of irradiated fuel rods with pulsed eddy currents", Materials Evaluation, April 1973, pp. 67-72.
- [9] W. Francis: "Nondestructive examination of irradiated fuel rods by pulsed eddy current techniques", Idaho National Engineering Laboratory, ANCR-1282, NRC-3, February 1976.
- [10] C.V. Dodd, W.E. Deeds, L.D. Chitwood, "Eddy current inspection of ferromagnetic materials using pulsed magnetic saturation", Materials Evaluation, November 1988, pp. 1592-1597.

- [11] G. Wittig, H.M. Thomas and D. Maser, "Developments and Investigations for the application of the pulsed eddy current technique", *New Procedures in Non destructive Testing*, Editor P. Höller, Springer Verlag Berlin Heidelberg 1988, pp.480-488.
- [12] G. Wittig, H.M. Thomas, D. Maser, P. Hennig, "Application of the pulsed-eddy current techniques for the inspection of the austenitic cladding in a thermal shock loaded nozzle of a pressure vessel", 6th International Conference on NDE, Zurich, 28 Nov. 2 Dec. 1983, pp. 665-674.
- [13] M. Gibbs and J. Campbell, "Pulsed eddy current inspection of cracks under installed fasteners", *Materials Evaluation*, January 1991, pp. 51-59.
- [14] X. Dai, R. Ludwig and R. Palanisamy, "Numerical Simulation of Pulsed Eddy-Current Nondestructive Testing Phenomena", *IEEE transactions on magnetics*, Vol. 26, n° 6, pp.3089-3096, November 1990.
- [15] J. Bowler, "Transient eddy currents in layered media as a model of corrosion detection", *Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol 6, pp.315-322, 1992.
- [16] J. Penman and B. Thian, "Some characteristics of the pulsed eddy current method for nondestructive evaluation", *Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol.6, pp.297-314, 1992.
- [17] N. Coutanceau-Monteil, F. Billy, J. Cahouet and C. Chavant, "A complementary approach of 2D and 3D modeling for the understanding and the design of pulsed eddy current probes", 11th International Conference on NDE, 04-30/05-02-1992, pp.273-276.