

STRUCTURE MULTICAPTEUR ORIGINALE A COURANTS DE FOUCAULT POUR LA DETECTION EN VOIE DE DEFAUTS DE RAIL

L. Oukhellou, P. Aknin

INRETS, ARCUEIL-France

RESUME

Cet article détaille une structure multicapteur originale dédiée à la détection des défauts de rails dans l'environnement ferroviaire. La technologie courants de Foucault a été retenue et les principales options de conception et de réalisation du capteur sont exposées. Des essais sur site sur un réseau de type métro sont également présentés ainsi que les performances de ce procédé de mesure pour la classification des différents défauts identifiés lors des essais.

ABSTRACT

This article presents an original multisensor structure dedicated to the rail defect detection in the railway environment. The Eddy current technology has been chosen and the main design solutions are detailed. Some in-situ testings have been carried out in a subway network and the device performances in terms of defect classification capabilities have been evaluated.

1. INTRODUCTION

Jusqu'à présent, le contrôle non destructif des rails tel que les exploitants ferroviaires le pratiquent couramment s'effectue hors exploitation commerciale à l'aide de voitures spéciales d'inspection [1]. A l'aide de capteurs généralement à ultrasons, ils sont capables de détecter des amorces de fissures mais au prix d'une inspection avec contact.

La détection en voie des défauts majeurs de rail est assurée en temps réel par le conducteur. Le bruit de roulement jugé anormal dans le cas de délaminages importants du sommet du rail et le clignotement des feux de contrôle lorsqu'il s'agit de rail cassé, sont en effet détectés par le conducteur. Dans la perspective d'un passage à une conduite automatisée des métros à roulement fer et des évolutions induites sur les systèmes de signalisation, d'autres moyens de détection doivent être mis en oeuvre.

Le dispositif décrit dans cet article répond à un besoin de contrôle de rails en voie, sans contact, sur véhicule en exploitation commerciale et pour des vitesses d'auscultation pouvant atteindre 100km/h. Les distances de mesure préconisées sont comprises entre 20 et 30mm. Les deux défauts majeurs à détecter sont les fissures complètes ou partielles du champignon et les écaillages du champignon de

rail. L'existence du défaut et de son type suffit; son dimensionnement n'est pas demandé. Ces défauts sont dans un plan grossièrement perpendiculaire à la direction d'avancement.

2. CONTEXTE FERROVIAIRE ET CHOIX DE LA TECHNOLOGIE

L'utilisation du capteur dans un environnement ferroviaire très perturbant induit des contraintes de conception de différentes catégories. La température de fonctionnement peut varier dans une gamme allant de -20°C à 60°C , avec présence éventuelle d'eau, de givre ou de neige sur le capteur et sur le rail.

Le capteur sera fixé sous un châssis de bogie qui subit des accélérations pouvant atteindre $10g$. De plus, des qualités de robustesse sont requises pour résister aux impacts des morceaux de ballast qui sont parfois soulevés par le passage du véhicule. La dynamique propre du bogie induit également des contraintes : le capteur subira des décalages transversaux par rapport au centre du rail pouvant atteindre $\pm 30\text{mm}$, des variations de hauteur de $\pm 5\text{mm}$ et sera soumis aux trois degrés de liberté en rotation (roulis, tangage, lacet). Ces mouvements engendrent un déplacement rail/capteur qui doit influencer le moins possible la mesure des défauts.

A ces contraintes thermiques, mécaniques et de positionnement, des contraintes électriques viennent s'ajouter. La présence de forts courants hachés de traction, des signaux de contrôle-commande circulant dans les rails et éventuellement des signaux de pilotage automatique de la vitesse sont susceptibles de générer des champs électromagnétiques externes qui peuvent perturber la mesure.

Ce contexte ferroviaire relativement hostile a orienté notre choix vers la technologie "courants de Foucault" pour ses qualités de robustesse et de simplicité de mise en oeuvre. L'optimisation de la structure du capteur doit être menée afin d'obtenir un bon couplage capteur/cible et donc une grande sensibilité du capteur à l'apparition de défauts. La sensibilité de la mesure aux déplacements relatifs rail/capteur liés à la dynamique du châssis de bogie doit être minimisée conformément au cahier des charges.

3. CONCEPTION DU MULTICAPTEUR

3.1 SIMULATIONS NUMERIQUES PAR ELEMENTS FINIS

Les défauts à détecter sont dans un plan quasi perpendiculaire à la direction d'avancement du véhicule. Il est donc préférable que le champ magnétique généré soit principalement parallèle aux anomalies de telle sorte que les courants de Foucault créés soient perpendiculaires à la direction des défauts; on obtient ainsi une perturbation maximale des courants induits. Ceci nous a conduit à choisir une structure en "U" (cf. figure 1), qui par opposition aux structures à symétrie de révolution privilégie une direction particulière du champ émis.

La largeur inter-plots ($2a$) est le premier paramètre de structure à optimiser. Etant donné la distance de mesure importante, ce paramètre doit être réglé de manière à assurer le meilleur couplage possible entre le capteur et la cible.

Cette optimisation a été menée à l'aide de simulations par éléments finis de la structure géométrique présentée figure 1 qui ont permis d'estimer le coefficient de couplage en fonction de la largeur inter-plots. Il faut noter toutefois que seules des tendances peuvent être déduites de ces simulations étant donné que le problème initial tridimensionnel est résolu ici à l'aide d'un outil de simulation 2D (code Maxwell).

Pour estimer le couplage entre le capteur et la cible, on utilise le plan d'impédance normalisée [2]. Si Z désigne l'impédance complexe du capteur en présence de la cible, son impédance normalisée est définie par la relation :

$$Z_n = R_n + jX_n = \frac{Z - R_0}{X_0} \quad \text{où } Z_0 = R_0 + jX_0 \text{ est l'impédance à vide du capteur.}$$

Sur le diagramme d'impédance normalisée traçant l'évolution de X_n en fonction de R_n lorsque la fréquence varie, on montre que le point situé à fréquence infinie, a pour coordonnées $(0, 1-k^2)$ [2]. Pour la simulation, on se place fictivement en ce point de fonctionnement en réglant simplement une conductivité infinie pour le rail et une estimation du couplage k est alors possible.

La figure 2 présente l'évolution du couplage lorsque la largeur inter-plots ($2a$) varie entre 30mm et 80mm pour trois hauteurs de mesure 10, 20 et 30mm, le capteur étant centré sur le rail. Chaque point d'une courbe correspond à un résultat de simulation normalisé par le résultat de simulation à vide. Pour une hauteur de positionnement égale à 10mm, la courbe présente un maximum à $2a = 45$ mm. Pour des hauteurs supérieures, cette valeur n'est plus optimale mais l'augmentation du couplage capteur/cible reste faible au-delà de 45mm. Ceci nous a amené à choisir et tester cette largeur inter-plots.

3.2 DIMENSIONNEMENT DU DISPOSITIF

Les variations relatives d'impédance dues à la présence de défauts dans la cible sont très faibles par rapport aux valeurs d'impédances absolues mesurées sur une cible sans défaut. Pour les mettre en évidence, il est nécessaire d'effectuer une mesure par différence qui permet en plus une bonne réjection des différentes dérives (température, vieillissement...). Dans notre application où le capteur est sujet à des variations de positionnement continues, la différence est effectuée entre des capteurs espacés d'une distance L selon l'axe du rail. Dans ce cas, sous réserve que les capteurs élémentaires subissent la même variation de hauteur et/ou de déport latéral, la confusion avec un défaut ne peut avoir lieu. Le phénomène habituellement dénommé "lift-off" est alors minimisé.

La structure multicapteur est constituée de 5 capteurs élémentaires (cf. figure 3) qui permet de réaliser deux bobinages de mesure : un bobinage différentiel (avec un espacement de 120mm) et un bobinage double différentiel (avec un espacement de 30mm).

$$V_{diff}=(V_1+V_1')-(V_5+V_5') \quad \text{et} \quad V_{2diff}=(V_3+V_3')-V_2-V_4$$

Ces deux types de mesure possèdent une complémentarité qui sera mise à profit dans la partie traitement. L'espacement entre capteurs est adapté à la détection efficace des deux défauts : une valeur égale à 30mm pour les fissures et une valeur de 120mm pour les écaillages.

L'existence de blindages canalise le champ émis vers la cible et rigidifient la structure. On notera la présence de saignées latérales qui évitent la mise en court-circuit magnétique des plots en ferrite, dont la forme en "chicane" limite le flux de fuite [3].

3.3 CHOIX DES FREQUENCES D'ALIMENTATION

Dans un problème de contrôle où il s'agit de détecter les défauts de la cible et de les discriminer ensuite, les signaux issus du capteur doivent être riches en informations tout en étant complémentaires afin d'éviter la redondance. Une alimentation du capteur à plusieurs fréquences judicieusement choisies va dans ce sens. Une solution bi-fréquence a été retenue.

Le choix des fréquences s'est effectué sur deux cibles étalons représentatives des deux défauts type (fissure transversale et écaillage majeur du champignon de rail). Il s'agit de déterminer le couple de fréquences qui permet de détecter et de séparer au mieux les deux classes de défauts. Notre démarche a consisté dans un premier temps à déterminer la fréquence qui permet de discriminer au mieux les deux défauts. Dans un second temps, le choix de la seconde fréquence est effectué en minimisant la redondance avec la fréquence principale.

Pour la première phase, l'estimation de la pertinence des mesures à séparer les défauts, est effectuée à l'aide de l'observation du conditionnement de la matrice de mesures M [4]. Cette matrice qui varie avec la fréquence f est définie ci-dessous. Pour la seconde phase, l'estimation de la complémentarité de deux fréquences f_1 et f_2 utilise le conditionnement d'une seconde matrice N .

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{Cible 1} & \text{Cible 2} \end{matrix} \\ \begin{matrix} R_n \\ X_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} R_n & R_n \\ X_n & X_n \end{bmatrix} \end{matrix} \quad N = \begin{matrix} & \begin{matrix} f_1 & f_2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} R_n \\ X_n \\ R_n \\ X_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} R_n & R_n \\ X_n & X_n \\ R_n & R_n \\ X_n & X_n \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{Cible 1} \\ \text{Cible 2} \end{matrix} \end{matrix}$$

Les résultats obtenus (pour la gamme de fréquence autorisée par la cahier des charges) sont $f_1=10\text{kHz}$ et $f_2=100\text{kHz}$.

4. ESSAIS SUR SITE ET RESULTATS

A l'aide de ce multicapteur, des essais sur site avec des conditions de mesure d'une exploitation commerciale ont été menés. Ces essais ont eu lieu sur une ligne de métro de la RATP; le capteur était monté sous un bogie à 20 ou 30mm du rail avec des vitesses d'auscultation jusqu'à 70km/h. Ces essais ont permis de valider les options de réalisation du blindage et de vérifier que le choix des fréquences d'alimentation est compatible avec l'environnement électromagnétique d'un réseau.

Par ailleurs, les différentes classes de défauts ont pu être d'identifiées . En plus des défauts déjà cités, le capteur est en effet capable de distinguer d'autres types d'inhomogénéités comme les soudures de rails ou les appareils de voies moulés en acier amagnétique. Une banque de données de défauts représentative de 4 classes a pu être constituée (fissures, joints soudés, passage sur appareils de voie, écaillages).

Des travaux théoriques sur leur Paramétrisation [5] et leur Classification à l'aide de Réseaux de Neurones a d'ores et déjà permis d'obtenir des performances supérieures à 95% en termes d'attribution de classe.

5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : Duverger C. Prasil B. *Un nouvel engin d'auscultation des rails à la SNCF*. Revue Générale des Chemins de Fer. pp. 1-12. Ed. Bordas-Dunod. 1984.
- [2] : Ouvrage collectif. *Nondestructive Testing Handbook. Vol. 4 Electromagnetic Testing*. Ed American Society for Nondestructive Testing. 1986
- [3] : Aknin P. Oukhellou L. *Procédé et dispositif pour détecter des défauts transversaux en surface d'une pièce oblongue conductrice*. Brevet français (n°9508799), RATP, INRETS. 1996
- [4] : Ciarlet P.G. *Analyse numérique matricielle et optimisation*. Ed. Masson. 1985
- [5] : Oukhellou L. Aknin P. *Modified Fourier Descriptors : A new parametrization of eddy current signatures applied to the rail defect classification*. III intern. Workshop on Advances in Signal Processing for Non Destructive Evaluation of Materials. Quebec. 1997

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier la RATP pour avoir soutenu cette recherche et pour sa participation à la réalisation des essais sur site.

6. FIGURES

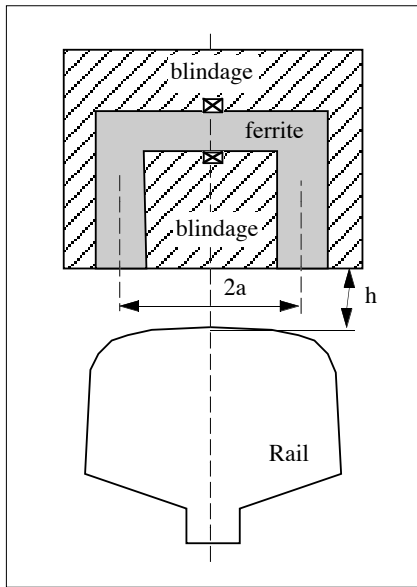


Figure 1 : structure 2D pour simulations électromagnétiques par éléments finis

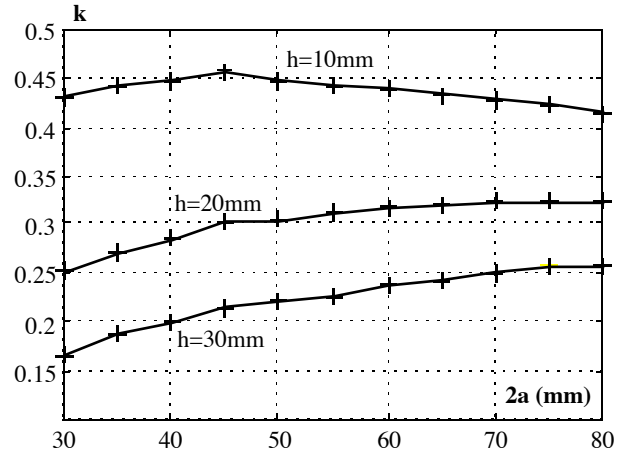


Figure 2 : évolution du coefficient de couplage avec la largeur interplots.

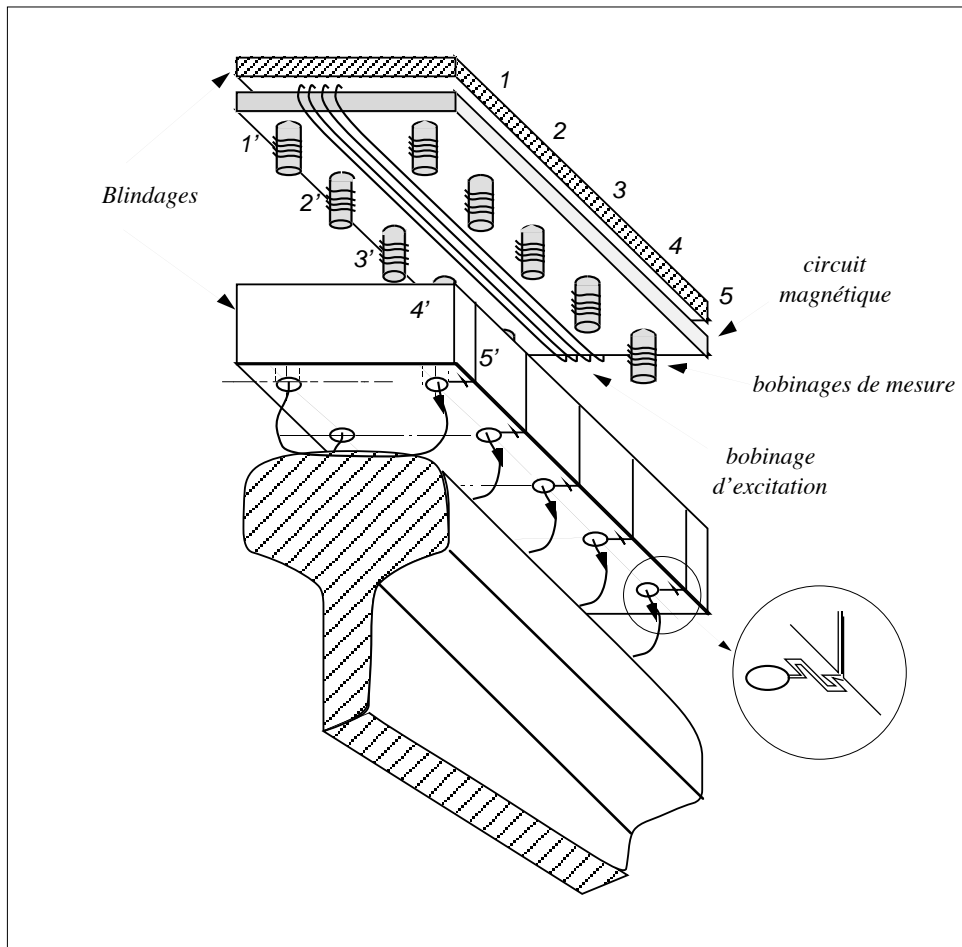


Figure 3 : structure complète du multicapteur