

# Identification de l'état de corrosion d'une coque de navire par mesures en champ électrique proche : Une approche couplant optimisation et intégrales de frontières

François Tavernier<sup>(1)</sup>, Olivier Chadebec<sup>(1)</sup>, Olivier Pinaud<sup>(1)</sup>, Bertrand Bannwarth<sup>(1)</sup>, Arnaud Guibert<sup>(2)</sup> and Cédric Goëau<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Univ Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2Elab, 38000 Grenoble, France

<sup>(2)</sup> DGA Techniques Navales, 29200 Brest, France

E-mail: olivier.chadebec@g2elab.grenoble-inp.fr

**Résumé** — . Cet article présente une approche originale pour diagnostiquer l'état d'une coque de navire corrodée en utilisant des mesures du champ électrique dans son voisinage. Ce problème inverse est traité comme un problème d'optimisation avec une base de projection de la distribution des courants de corrosion adaptée. Les densités de courant localisées sont projetées sur une base de solution précalculée par équation intégrale de frontière tandis que les courants plus diffus sont projetés sur un modèle réduit de la matrice impédance.

## I. INTRODUCTION

Les navires sont sujets à la corrosion, un phénomène qui détériore leur coque et nécessite un diagnostic approprié. La corrosion naturelle se produit lorsque différentes parties immergées de la coque, chacune avec des matériaux différents et donc des potentiels électrochimiques différents, sont connectées galvaniquement par l'intermédiaire de l'eau de mer conductrice. La corrosion génère un courant électrique à proximité du navire, qui peut être mesuré et utilisé pour évaluer l'état de corrosion de la coque en résolvant un problème inverse. Des travaux antérieurs ont déjà abordé ce sujet.

Étant donné que les phénomènes dans l'eau de mer sont régis par l'équation de Laplace, le problème direct est traditionnellement résolu à l'aide de la méthode des intégrales de frontière (*Boundary Element Method* ou BEM) [1], [2]. Dans cette méthode, seule l'interface coque/eau de mer est discrétisée, et chaque élément du maillage est associé à une condition aux limites d'impédance (condition de Robin) qui relie le potentiel à sa dérivée normale qui est proportionnelle au courant entrant dans la coque. Cette condition aux limites est connue sous le nom de courbe de polarisation et constitue une donnée d'entrée du problème direct. Une fois le problème BEM résolu, les valeurs de potentiel et de courant sont obtenues pour chaque élément du maillage de la surface, et une étape de post-traitement peut être employée pour calculer la signature électrique.

L'approche inverse consiste à inverser la formulation BEM, c'est-à-dire à obtenir l'état de polarisation pour chaque élément du maillage à partir de mesures électriques. Le problème consiste à minimiser un résidu entre les données de champ électrique mesuré et le modèle qui est généralement paramétré par la densité de courant normale circulant de la coque à l'eau de mer. Il peut être résolu au sens des moindres carrés à l'aide d'un solveur linéaire [1] ou à l'aide de techniques d'optimisation non linéaires qui reposent sur le calcul de la sensibilité des paramètres [2]. Cependant, quelles que soient les techniques de résolution employées, le problème reste toujours mal posé, c'est-à-dire que la solution n'est pas unique. Il devient donc nécessaire de mettre en œuvre des techniques de régularisation de la

solution. Le problème de ces techniques est que la solution physique recherchée n'est pas toujours conforme au critère de régularité. Certaines zones de collecte des courants, telles que les hélices, les anodes sacrificielles et les propulseurs d'étrave, sont très localisées sur la coque. À l'inverse, d'autres zones, comme celles où la peinture isolante est détériorée, sont associées à des distributions de courant beaucoup plus régulières et diffuses. Dans cet article, nous proposons une méthode pour résoudre ce problème en projetant la solution du problème inverse sur des bases qui représentent mieux la physique des phénomènes.

## II. FORMULATION DU PROBLEME INVERSE

### A. Une base de snapshots pour les zones de collecte de courant localisées

Il est possible d'identifier à l'avance certaines zones spécifiques de la coque qui sont susceptibles de collecter du courant. Ces zones localisées, telles que l'hélice, les propulseurs d'étrave et les anodes sacrificielles, sont généralement petites par rapport à la surface totale de la coque. Notons que si la coque est totalement protégée par une peinture parfaitement isolée, les courants circulant dans l'eau de mer ne sont délivrés ou collectés que par ces zones. Une bonne stratégie consiste alors à projeter la solution du problème inverse sur un ensemble de snapshots (c'est-à-dire des solutions particulières du problème) représentant ces trajectoires de courant spécifiques, les paramètres du problème inverse à résoudre sont alors les coefficients pondérant chacune des solutions particulières. Chaque snapshot et sa signature électrique associée est calculée par la méthode des éléments de frontière (BEM). Pour garantir un équilibre entre toutes ces solutions particulières, chaque snapshot est calculé en imposant un courant de 1 A à la zone de collecte du courant et une tension de 0 V à l'infini. La solution du problème inverse est alors obtenue comme une combinaison linéaire des champs générés par toutes ces solutions, avec une équation supplémentaire qui impose que la somme des courants sur la coque soit nulle et donc que aucun courant ne se reboucle à l'infini.

### B. Base supplémentaire d'ordre réduit de la matrice impédance pour identifier les densités de courant diffuses

Considérons un scénario dans lequel, en plus des zones localisées de collecte du courant, celui-ci peut également être capté de manière plus uniforme à travers une zone plus large et diffuse. Ce phénomène peut se produire, par

exemple, en raison d'un défaut dans la peinture isolante de la coque que nous cherchons à diagnostiquer. L'équation dérivée de la méthode des éléments de frontière établit un lien entre le potentiel et la densité de courant. Cette équation peut être reformulée sous la forme d'une matrice d'impédance à l'aide de l'opérateur Steklov-Poincaré [3]. Un modèle d'ordre réduit de cette matrice d'impédance peut être alors construit à l'aide d'une décomposition en valeurs singulières tronquées. Seuls les vecteurs associés aux modes d'impédance les plus significatifs sont conservés (base de Steklov d'ordre réduit). Cette approche présente plusieurs avantages : elle limite les degrés de liberté pour le problème inverse et permet d'obtenir des vecteurs de distribution du courant qui sont déjà lisses sans nécessiter de technique de régularisation supplémentaire. Chaque vecteur de la base est associé à un champ électrique qui peut être calculé et qui complète la base des snapshots précédente. L'intégrale du courant est imposée égale à zéro en considérant le premier vecteur de la base réduite qui est le seul à posséder une intégrale du courant non nulle ainsi que les courants des snapshots.

### C. Résolution globale par optimisation conique

La base de courant hybride utilisée précédemment permet de résoudre le problème inverse. Classiquement, le problème peut être résolu au sens des moindres-carrés. Cependant, l'incorporation de contraintes supplémentaires peut améliorer la robustesse de la solution. Une approche efficace et pertinente consiste à imposer une intégrale positive du courant associé aux vecteurs de Steklov, car les défauts de peinture ne peuvent physiquement délivrer que du courant. Une autre contrainte consiste à minimiser le nombre de coefficients non nuls pour la base de snapshots (optimisation parcimonieuse). Pour traiter efficacement ce problème inverse contraint, un solveur conique tel que ECOS [4] peut-être choisi.

## III. EXEMPLE NUMERIQUE

Pour valider la méthodologie, un exemple numérique est présenté en utilisant la coque d'un navire comme objet d'étude. Le courant est fourni par deux anodes sacrificielles et deux propulseurs d'étrave (77% du courant total). Les 23% restants sont générés par un défaut de peinture diffus situé à l'avant de la coque. Tout le courant est collecté par l'hélice (Fig. 2.). Un calcul numérique du champ électrique est effectué sur un plan situé à 15 m sous la quille. Un bruit numérique de 5% est introduit sur les mesures (Fig.1.). Pour le problème inverse, un total de 45 paramètres est considéré qui comprend 5 coefficients pour les snapshots et 40 modes pour la base de Steklov réduite.

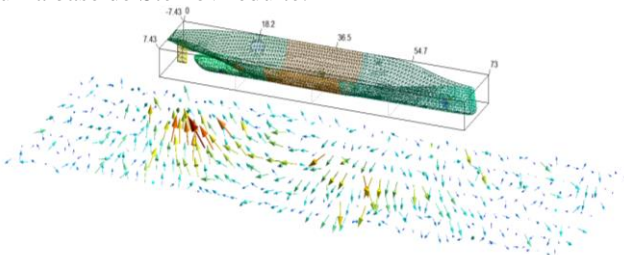


Fig. 1. Champ électrique bruité calculé sous quille.

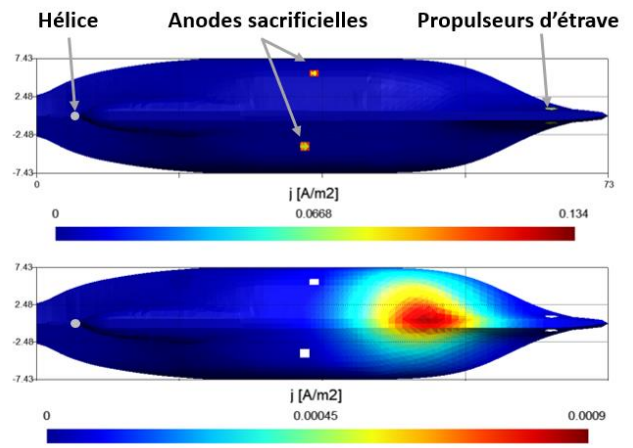


Fig. 2. Modélisation directe de la coque pour la génération des mesures (en haut : zones de courant localisées, en bas : densité de courant due à un défaut de peinture).

Les résultats, présentés en tableau I., montrent que tous les coefficients sont déterminés avec un niveau de précision satisfaisant c'est-à-dire avec un taux d'erreur d'environ 25 %. La zone de défaut de peinture est trouvée avec une définition moins précise mais elle demeure convenablement localisée (Fig. 3.). Cette première validation numérique démontre l'intérêt de la méthode et de sa potentialité.

TABLEAU I. COMPARAISON ENTRE LES VALEURS DE COURANTS REELLES ET LES VALEURS IDENTIFIEES POUR LES ZONE LOCALISEES.

	Hélice	Anode A	Anode B	Propulseur A	Propulseur B
Valeur réelle (A)	-0,722	0,134	0,109	0,160	0,160
Valeur identifiée (A)	-0,719	0,154	0,129	0,119	0,174

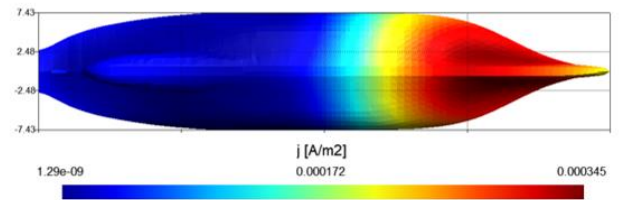


Fig. 3. Densité de courant identifiée sur la coque.

## REFERENCES

- [1] Guibert, A., Chadebec, O., Coulomb, J. L., & Rannou, C. (2009). Ships hull corrosion diagnosis from close measurements of electric potential in the water. *IEEE Transactions on magnetics*, 45(3), 1828-1831.
- [2] Chung, H. J., Yang, C. S., Jeung, G. W., Jeon, J. J., & Kim, D. H. (2011). Accurate prediction of unknown corrosion currents distributed on the hull of a naval ship utilizing material sensitivity analysis. *IEEE transactions on magnetics*, 47(5), 1282-1285.
- [3] Zemzemi, N. (2013). A steklov-poincaré approach to solve the inverse problem in electrocardiography. In *Computing in Cardiology 2013*, 703-706. IEEE.
- [4] Domahidi, A., Chu, E., & Boyd, S. (2013, July). ECOS: An SOCP solver for embedded systems. In *2013 European control conference (ECC) (pp. 3071-3076)*. IEEE.