

Procédé amélioré de détermination de l'aimantation de la coque d'un navire et dispositif associé.

L'invention a pour domaine technique celui des procédés de régulation de la signature magnétique d'un navire.

5 La signature d'un navire est l'ensemble des valeurs du champ magnétique créée par le navire, évaluées dans un plan de référence. Lorsqu'il s'agit d'un navire de surface, ce plan de référence est généralement horizontal, situé sous la coque du navire environ à environ une fois la largeur du navire, soit typiquement 10 à 30 m.

10 FR 2 825 803 divulgue un procédé de régulation de la signature magnétique d'un navire.

Dans sa partie de détermination de la signature du navire, ce procédé prévoit l'acquisition d'une pluralité de mesures du champ magnétique, au moyen d'une pluralité de capteurs situés à l'intérieur de la coque du navire.

15 Puis, à partir de cette pluralité de mesures et de la valeur du champ magnétique terrestre local, il prévoit de calculer la distribution d'aimantation la plus probable à la surface de la coque en utilisant une première modélisation qui associe une distribution d'aimantation à une pluralité de mesures du champ magnétique, et une seconde modélisation qui couple l'aimantation en un point de la coque avec l'aimantation en un autre point de la coque.

20 L'aimantation dont il est question est l'aimantation totale en un point de la coque, correspondant à l'addition de l'aimantation permanente et de l'aimantation induite en ce point.

25 Enfin, la distribution d'aimantation ainsi calculée est utilisée pour estimer la valeur du champ magnétique créée par la coque dans le plan de référence, c'est-à-dire la signature du navire.

30 Dans sa partie de régulation, ce procédé prévoit de minimiser la signature du navire ainsi déterminée. Pour cela, la coque du navire est équipée de plusieurs boucles dites « d'immunisation magnétique », réalisées en un matériau conducteur du courant électrique, et le navire embarque des moyens de puissance électrique permettant de faire circuler des courants électriques adaptés dans chacune des boucles indépendamment. La circulation d'un courant dans une boucle génère un champ magnétique qui se superpose au champ magnétique terrestre local et au champ créé par la distribution d'aimantation sur la coque, sachant que cette dernière est modifiée par le champ magnétique généré par les boucles. Ainsi, en régulant les courants électriques circulant
35 dans les différentes boucles, la signature du navire est minimisée.

La précision de ce procédé repose sur la représentativité de la pluralité de mesures du champ magnétique au moyen de la pluralité de capteurs situés à l'intérieur de la coque

et sur l'aptitude des première et seconde modélisations à déterminer avec précision l'aimantation de la coque à partir des mesures issues des capteurs.

Lorsque les capteurs sont situés à l'intérieur de la coque, loin de celle-ci, le procédé permet de déterminer de façon satisfaisante l'aimantation de la coque correspondant aux
5 mesures effectuées.

Or, la mesure, dans l'air, du champ magnétique crée par la coque est perturbée. En effet, un navire renferme des sources magnétiques secondaires, telles que les masses ferromagnétiques que constituent ses moteurs. Ces sources magnétiques secondaires produisent des champs magnétiques secondaires qui se superposent au champ
10 magnétique crée par la coque. Les champs magnétiques secondaires constituent une forte perturbation pour l'information que l'on cherche à obtenir au moyen des capteurs. Aussi, les mesures ne sont pas bien représentatives du champ magnétique résultant de l'aimantation de la coque. De ce fait, l'aimantation de la coque calculée à partir des mesures faites à l'intérieur du navire n'est pas représentative, avec précision, de
15 l'aimantation réelle de la coque. Il en résulte que la signature du navire calculée ainsi peut être très différente de la signature réelle du navire.

Pour améliorer le rapport signal pertinent sur perturbation, il a été envisagé de rapprocher les capteurs de la coque, pour les disposer à proximité immédiate de celle-ci et les éloigner, autant que possible, des sources magnétiques secondaires.

Mais, lorsque l'on rapproche les capteurs de la coque, la signature déterminée par la mise en œuvre du procédé décrit dans le document FR 2 825 803 ne correspond plus à la signature réelle du navire.

L'invention a donc pour but de pallier ce problème en proposant un procédé de détermination de l'aimantation de la coque d'un navire permettant d'obtenir, à partir de
25 mesures de champ magnétique faites à l'aide de capteurs embarqués par le navire, une solution qui soit robuste et qui ne soit pas perturbée par des sources de champ magnétique parasite contenues dans la coque du navire.

L'invention a donc pour objet un procédé de détermination, en temps réel, de l'aimantation de la coque d'un navire, la coque du navire étant en matériau
30 ferromagnétique et soumise à une excitation magnétique inductrice et le navire étant muni d'une pluralité de capteurs du champ magnétique positionnés en des points déterminés par rapport à la coque, comportant les étapes consistant à : a) - acquérir une pluralité de mesures du champ magnétique au moyen de la pluralité de capteurs ; b) - évaluer l'excitation magnétique inductrice ; et, c) - déterminer, en résolvant un système
35 d'équations résultant de la modélisation des phénomènes physiques mis en jeu, à partir de la pluralité de mesures acquises et de l'excitation magnétique inductrice évaluée, une distribution de sources magnétiques probable à la surface de la coque, dans ladite modélisation, les sources magnétiques induites étant décrites par une distribution de

sources dipolaires et les sources magnétiques rémanentes étant décrites par une distribution de sources monopolaires.

Suivant des modes particuliers de réalisation, le procédé comporte une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prise(s) isolément ou suivant toutes les combinaisons possibles :

- ladite modélisation comporte :

- une première modélisation associant à des mesures du champ magnétiques, une distribution d'aimantation dans le matériau ferromagnétique ; et,

- une seconde modélisation relative au comportement du matériau ferromagnétique, décrivant le couplage entre une source magnétique en un point du matériau, avec une source magnétique en un autre point du matériau ;

- le procédé utilise une transformation T permettant d'associer à une distribution de sources dipolaires au moins une distribution de sources monopolaires et/ou une transformation T^* permettant d'associer à une distribution de sources monopolaires, au moins une distribution de sources dipolaires ;

- ladite modélisation utilise un modèle virtuel de la coque du navire comportant un maillage primaire constitué d'une pluralité de surfaces élémentaires planes et polygonales ;

- par surface élémentaire du maillage primaire, la distribution de sources dipolaires est uniforme et tangentielle à cet élément de surface ;

- la distribution de sources monopolaires est discrétisée au nœuds du maillage primaire ;

- ledit système d'équations à résoudre s'écrit :

$$\begin{pmatrix} A_M & A_M T^* \\ D_M \square Id & D_M T^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_i^{ind} \\ q_i^{rem} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m \\ S_M \end{pmatrix}$$

avec :

- m un vecteur dont la $j^{\text{ème}}$ composante est la différence $H(R_j) \square H_0(R_j)$ entre la mesure de l'excitation magnétique effectuée au point R_j par le $j^{\text{ème}}$ capteurs de champ magnétique et la valeur de l'excitation magnétique inductrice au point R_j ;

- A_M une matrice dont l'élément $A_{M_{ji}}$ est l'opérateur $\frac{1}{4\square} \int_{L_i} (u_i \cdot \vec{n}_i) \frac{R_i R_j}{R_i R_j^3} dL_i(R_i)$ associé à

une surface élémentaire S_i du maillage primaire ayant une pluralité d'arêtes L_i , présentant chacune une normale $\vec{n}_i$ dans le plan de la surface élémentaire S_i et orientée vers l'extérieur de cette surface élémentaire, et où u_i est un doublet de vecteur formant une base de la surface élémentaire ;

- S_M un vecteur dont la $i^{\text{ème}}$ composante est proportionnelle à l'excitation magnétique inductrice $e\chi H_{0i}$ en un point de la $i^{\text{ème}}$ surface élémentaire du maillage primaire ;

- D_M une matrice dont l'élément D_{Mji} est l'opérateur $-\frac{\chi e}{4\pi} \int_{L_i} (u_i \cdot \vec{n}_i) \frac{R_j R_i}{|R_j R_i|^3} dL_i(R_i)$; et,

- T une matrice de transformation telle que $(Q_i^{\text{rem}}) = T (\vec{p}_i^{\text{rem}})$, dont la pseudo-inverse est notée T^* ;

- la détermination de la distribution de sources magnétiques probable fait intervenir une procédure de préconditionnement. ;

- la détermination de la distribution de sources magnétiques probable fait intervenir une procédure de décomposition en valeurs singulières.

10 L'invention a pour objet un procédé de détermination, en temps réel, de la signature magnétique d'un navire, comportant une étape de détermination, en temps réel, de l'aimantation de la coque du navire par le procédé précédent, permettant d'obtenir une distribution de sources magnétiques probable à la surface de la coque, puis une étape supplémentaire consistant à calculer la signature du navire à partir de ladite distribution

15 de sources magnétiques probable.

L'invention a également pour objet un procédé d'immunisation magnétique d'un navire, le navire étant muni d'une pluralité de boucles d'immunisation ayant des géométries déterminées par rapport à la coque du navire et des moyens d'alimentation en puissance électrique aptes à être commandés de manière à faire circuler dans les

20 boucles d'immunisation, indépendamment les unes des autres, des courants adaptés, comportant, en plus des étapes du procédé précédent de détermination, en temps réel, de la signature du navire, l'étape consistant à commander les moyens d'alimentation en puissance électrique de manière à modifier la signature du navire, et une étape consistant à commander les moyens d'alimentation en puissance électrique de manière à faire

25 circuler, dans les boucles d'immunisation, lesdits courants calculés.

L'invention a également pour objet un dispositif de détermination, en temps réel, de l'aimantation de la coque d'un navire, la coque du navire étant en un matériau ferromagnétique soumis à une excitation magnétique inductrice. Ce dispositif comporte : une pluralité de capteurs de champ magnétique positionnés en des points déterminés par

30 rapport à la coque ; des moyens de détermination de l'excitation magnétique inductrice ; et une unité de calcul reliée à la pluralité de capteurs et aux moyens de détermination de l'excitation magnétique inductrice, apte à exécuter les instructions d'un programme d'ordinateur pour la mise en oeuvre du procédé précédent de détermination, en temps réel, de l'aimantation de la coque d'un navire ou le procédé précédent de détermination,

35 en temps réel, de la signature d'un navire.

Suivant des modes particuliers de réalisation, le dispositif comporte une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prise(s) isolément ou suivant toutes les combinaisons possibles :

- au moins un capteur de la pluralité de capteurs est collé sur la coque ;
- 5 - au moins un capteur de la pluralité de capteurs est un capteur bi-axes mesurant les composantes du champ magnétiques tangentielles à la coque ;
- au moins un capteur de la pluralité de capteurs est placé à l'extérieur de la coque du navire.

10 L'invention a également pour objet un dispositif d'immunisation magnétique d'un navire du type comprenant une pluralité de boucles d'immunisation ayant des géométries déterminées par rapport à la coque du navire, des moyens d'alimentation en puissance électrique des boucles d'immunisation, et des moyens de commande des moyens d'alimentation en puissance électrique des boucles d'immunisation, les moyens de commande comprenant un dispositif de détermination, en temps réel, de l'aimantation de
15 la coque apte à calculer la signature du navire.

Les dispositifs précédemment présentés sont avantageusement embarqués à bord du navire dont on détermine l'aimantation de la coque.

20 L'invention et ses avantages seront mieux compris à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple, et faite en se référant aux dessins annexés, sur lesquels :

- la figure 1 est une représentation schématique de l'installation permettant de réguler la signature d'un navire ;
- la figure 2 est une représentation d'une portion du maillage de la coque et de son maillage dual ;
- 25 - la figure 3 est une représentation sous forme d'un organigramme du procédé de régulation ; et,
- les figures 4 et 5 sont des graphes donnant la valeur de la signature pour différentes positions longitudinales sous la coque du navire.

Dispositif

30 Le navire dont on cherche à réguler la signature magnétique comporte une coque 1 qui est réalisée par assemblage de tôles. Les tôles utilisées sont en un matériau ferromagnétique caractérisé par une susceptibilité magnétique réversible χ .

La coque présente une surface intérieure 3, orientée vers l'intérieur du navire, et une surface extérieure 5, orientée vers l'extérieur du navire.

35 Le navire embarque un dispositif, indiqué par la référence générale 6 sur la figure 1, de détermination, en temps réel, de l'aimantation de la coque d'un navire. Le dispositif 6 est propre à mettre en œuvre les procédés de détermination de l'aimantation de la coque

d'un navire, et détermination de la signature du navire et d'immunisation magnétique du navire.

Le dispositif 6 comporte une pluralité de capteurs du champ magnétique 7. Par exemple, 50 capteurs sont disposés dans le volume V2 délimité intérieurement par la surface intérieure 3 de la coque 1. Les capteurs 7 sont placés à proximité de la surface intérieure 3 et, de préférence, collés sur cette surface. D'un point de vue pratique, il s'agit d'un mélange entre capteurs bi-axes et tri-axes. Dans le cas présent, les capteurs 7 étant collés à la coque ou, tout au moins, très proches de celle-ci, seules les mesures des composantes de l'induction magnétique B tangentes à la coque sont prises en compte. En effet, la mesure de la composante normale de l'induction magnétique B présente un rapport signal sur bruit défavorable et l'inclure dans les modélisations peut se révéler catastrophique en termes de convergence vers une solution robuste, c'est-à-dire stable par rapport aux incertitudes de mesure. L'information ajoutée par cette composante normale étant peu représentative, il n'en est pas tenu compte dans le procédé selon l'invention. La position de chaque capteur 7 par rapport à la coque est connue.

Le dispositif 6 comporte également une pluralité de boucles d'immunisation 9 de circulation d'un courant électrique. Les boucles 9 sont réalisées en un matériau conducteur du courant électrique. Les boucles 9 sont indépendantes les unes des autres. Elles forment des circuits électriques de géométrie et de positionnement connus par rapport à la coque.

Le dispositif 6 comporte des moyens d'alimentation en puissance électrique 10 aptes à être commandés de manière à faire circuler des courants adaptés dans chacune des boucles 9 indépendamment les unes des autres.

La circulation d'un courant dans une boucle 9 génère une excitation magnétique H propre à induire une distribution d'aimantation dans la coque 1. Ainsi, les différentes boucles 9 permettent de modifier la valeur de l'excitation magnétique inductrice H_0 .

Le dispositif 6 comporte un moyen 11 d'évaluation de l'excitation magnétique inductrice H_0 . Il s'agit par exemple d'un moyen permettant d'évaluer, à l'instant considéré, à la fois l'excitation magnétique terrestre à l'endroit où se situe le navire, et l'excitation magnétique induite par les boucles d'immunisation en chaque point de la coque du navire.

Le dispositif 6 comporte une unité de calcul 13 apte à mettre en œuvre les différentes étapes des procédés de détermination de l'aimantation de la coque, de détermination de la signature du navire, et d'immunisation, décrits en détail ci-après.

De préférence, l'unité 13 comprend un processeur 15 et une unité de mémorisation 17, telle qu'une mémoire morte et une mémoire vive. Elle comprend également une

interface entrée/sortie 19 à laquelle sont connectés les capteurs 7, le moyen 11, ainsi que les moyens d'alimentation en puissance électrique 10.

A chaque pas de temps, l'unité de calcul 13 exécute un programme informatique dont les instructions sont mémorisées dans l'unité de mémorisation 17.

5 L'exécution de ce programme met en œuvre les différentes étapes du procédé d'immunisation magnétique du navire, représenté de manière schématique sur la Figure 3. Ce procédé comporte les étapes consistant à :

- a) - acquérir une pluralité de mesures du champ magnétique au moyen de la pluralité de capteurs ;
- 10 b) - évaluer l'excitation magnétique inductrice ;
- c) - déterminer, en résolvant un système d'équations résultant de la modélisation des phénomènes physiques mis en jeu, à partir de la pluralité de mesures acquises et de l'excitation magnétique inductrice évaluée, une distribution de sources magnétiques probable à la surface de la coque,
- 15 d) - calculer la signature du navire à partir de la distribution de sources magnétiques probable ; et,
- e) - commander les moyens d'alimentation en puissance électrique de manière à faire circuler des courants adaptés dans les boucles, pour modifier l'excitation magnétique des inducteurs et, par conséquent, réguler la signature du navire.

20 L'étape c) met en œuvre une modélisation des phénomènes physiques, un modèle virtuel de la coque du navire pour discrétiser cette modélisation et obtenir un système d'équations à résoudre, et des méthodes mathématiques de résolution de ces équations. Ces éléments vont d'abord être présentés.

Généralités

25 La signature magnétique du navire est donnée par l'ensemble des valeurs de l'induction magnétique en différents points d'une surface de référence. Pour un navire de surface, cette surface de référence est une portion d'un plan situé sous la coque, à par exemple environ 10 mètres. Pour un sous-marin, cette surface de référence est une portion d'un cylindre coaxial et extérieur à la coque sensiblement cylindrique.

30 L'induction magnétique sur cette surface de référence résulte de la superposition, d'une part, de l'induction magnétique terrestre et de l'induction magnétique créée par les boucles de courant équipant le navire et, d'autre part, par l'induction magnétique créée par l'aimantation M portée par la coque.

L'aimantation $M(P)$ en un point P de la coque ferromagnétique comprend une
35 composante induite M^{ind} , proportionnelle à l'excitation magnétique totale $H(P)$ au point P ($M^{ind} = \chi H$), et une composante rémanente M^{rem} , résultant de l'histoire magnétique de la coque.

L'excitation magnétique totale $H(P)$ en un point P de la coque ferromagnétique comprend une composante H_0 , dite inductrice, indépendante du matériau, provenant de l'excitation magnétique terrestre et de l'excitation magnétique créée par les différentes boucles de courant, et une composante H^{red} , dite réduite, dépendante du matériau, résultant de l'aimantation $M(P')$ en tous les autres point P' de la coque.

L'excitation magnétique réduite H^{red} possède des propriétés mathématiques qui sont analogues à celles d'un champ électrostatique. En particulier, H^{red} dérive d'un potentiel φ : $H^{red} = -grad\varphi$

Modèle de la coque

On considère que la coque est un milieu ferromagnétique mince, se réduisant à une surface S , d'épaisseur e .

Conditions de passage à travers la coque

La caractéristique principale des matériaux ferromagnétiques est leur capacité à canaliser le flux de l'excitation magnétique. Cette propriété est amplifiée lorsque l'épaisseur du matériau ferromagnétique est réduite par rapport aux autres dimensions caractéristiques du matériau et si la perméabilité magnétique χ du matériau est importante.

Ces conditions étant vérifiées dans le cas de la coque d'un navire, la composante normale H_n de l'excitation magnétique totale H est nulle, c'est-à-dire que l'excitation magnétique totale H dans le matériau est considérée comme tangente à la coque, et sa composante tangentielle H_t est constante dans l'épaisseur de la coque.

Les conditions de passage à la première interface entre le matériau de la coque et le volume situé à l'extérieur de la coque (indice 1 sur la figure 1), les conditions de passage à la seconde interface entre le matériau de la coque et le volume situé à l'intérieur de la coque (indice 2 sur la figure 1), et l'hypothèse que la coque se réduit à une surface S conduisent à écrire la continuité du potentiel φ et la discontinuité de la dérivée normale

$\frac{\partial \varphi}{\partial n}$ du potentiel φ au passage de la surface S :

$$\varphi_1 = \varphi_2$$

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial n} - \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} \neq 0$$

Modélisation des sources magnétiques

L'excitation magnétique réduite H^{red} se comportant comme un champ électrostatique, les sources de cette excitation réduite H^{red} sont modélisées soit par des

distributions de sources monopolaires, soit par des distributions de sources dipolaires, comme cela est connu de l'homme du métier pour modéliser les champs électrostatiques.

Les distributions de sources acceptables doivent répondre aux conditions de passages indiquées ci-dessus.

5 Distribution surfacique de charges

La première distribution satisfaisant aux conditions de passage est la distribution surfacique de charges ou distribution de sources monopolaires, notée $q(P)$.

Les conditions de passage s'écrivent alors :

$$\varphi_1 = \varphi_2$$

$$10 \quad \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} - \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} = -q(P)$$

Au passage de la surface S , l'excitation magnétique réduite H^{red} suit l'équation : $H^{red}_1 - H^{red}_2 = q(P) \cdot \vec{n}$, où les indices 1 et 2 font respectivement référence au volume extérieur et au volume intérieur délimité par la surface S de la coque, et $\vec{n}$ est le vecteur normal à la surface S , au point P de la surface S .

15 Cette équation vectorielle indique qu'il y a conservation de la composante tangentielle de l'excitation magnétique réduite H^{red} , et saut de sa composante normale, à la traversée de la surface S .

Une telle distribution de sources monopolaires crée, en un point R quelconque, un potentiel réduit et une excitation magnétique réduite :

$$20 \quad \varphi(R) = \frac{1}{4\pi} \iint_s \frac{q(P)}{|PR|} dS(P)$$

$$H^{red}(R) = \frac{1}{4\pi} \iint_s q(P) \frac{PR}{PR^3} dS(P) \quad (1)$$

où P est un point courant de la surface S de la coque ; et PR est le vecteur joignant les points P et R .

Distribution surfacique de dipôles tangentiels

25 La surface S de la coque porte une distribution surfacique de sources dipolaires, notée $\vec{p}(P)$ en un point P de la surface S . Les conditions de passage pour cette distribution s'écrivent :

$$\varphi_1 - \varphi_2 = p_n(P)$$

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial n} - \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} = -\text{div}_S \vec{p}_t(P)$$

où $p_n(P)$ et $\vec{p}_t(P)$ représentent respectivement la composante normale et la composante tangentielle à la surface S de la distribution $\vec{p}(P)$; et div_S l'opérateur divergence contraint sur la surface S .

Ainsi, une distribution surfacique de sources dipolaires $\vec{p}(P)$ qui sont tangentielles à la surface S de la coque satisfait aux conditions de passage à travers la surface S . Dans ce qui suit l'indice t sera omis.

Au passage de la surface S , l'excitation magnétique réduite H^{red} suit l'équation :

$$H^{red}_1 - H^{red}_2 = -[div_S \vec{p}(P)].\vec{n}$$

Une telle distribution de sources dipolaires crée, pour un point R quelconque, un potentiel réduit et une excitation réduite :

$$\begin{aligned}\varphi(R) &= \frac{1}{4\pi} \iint_S \vec{p}(P) \cdot \frac{PR}{PR^3} dS(P) \\ H^{red}(R) &= \frac{1}{4\pi} \iint_S grad(\vec{p}(P) \cdot \frac{PR}{PR^3}) dS(P)\end{aligned}\quad (2)$$

où P est un point courant de la surface S de la coque ; et PR est le vecteur joignant les points P et R .

15 remarques

Ces deux distributions de sources, en charge et en dipôles, représentent le même phénomène physique et créent la même excitation magnétique en tout point R . Cela impose que : $div_S \vec{p}(P) = -q(P)$

De plus, un volume Ω aimanté crée un potentiel ayant pour expression :

$$20 \quad \varphi(R) = \frac{1}{4\pi} \iiint_{\Omega} M(P) \cdot \frac{PR}{PR^3} d\Omega(P)$$

où $M(P)$ est l'aimantation en un point P du matériau.

La grandeur $M(P)$ étant constante le long de l'épaisseur e de la tôle, l'intégrale volumique peut être remplacée par une intégrale surfacique. On passe d'une intégrale triple sur le volume élémentaire $d\Omega$ de la coque, à une intégrale double sur une surface élémentaire dS (qui n'est pas un vecteur).

La comparaison de l'expression du potentiel en fonction de $\vec{p}$ et de l'expression du potentiel en fonction de M conduit à : $\vec{p} = eM$, tandis que, la relation entre $\vec{p}$ et q conduit à : $q = -e div_S M$.

Modélisation continue des phénomènes physiques

30 Première modélisation

La distribution d'aimantation $M(P)$ dans la coque, qui est la somme de l'aimantation induite M^{ind} et de l'aimantation rémanente M^{rem} , génère une excitation magnétique en un point R dans l'air qui prend, d'après l'équation (2), la forme :

$$H(R) = H_0(R) + H^{red}(R) = H_0(R) + \frac{1}{4\pi} \iiint_{\Omega} grad(M(P)) \cdot \frac{RP}{RP^3} d\Omega(P) \quad (3)$$

- 5 En inversant cette relation, la première modélisation, couramment dénommée modélisation du problème inverse, permet de déterminer la distribution d'aimantation $M(P)$, à partir d'une pluralité de mesures de l'excitation magnétique en des points R déterminés et de la connaissance de l'excitation magnétique inductrice $H_0(R)$.

Seconde modélisation

- 10 L'aimantation induite M^{ind} en un point P de la coque est proportionnelle à l'excitation magnétique totale $H(P)$ en ce point P :

$$M^{ind}(P) = \chi H(P)$$

Soit :

$$M^{ind}(P) = \chi [H_0(P) + \frac{1}{4\pi} \iiint_{\Omega} grad(M(P')) \cdot \frac{PP'}{PP'^3} d\Omega(P')] \quad (4)$$

- 15 Cette relation traduit le comportement du matériau. Elle couple la réponse du matériau au point P , c'est-à-dire l'aimantation induite $M^{ind}(P)$ au point P , avec l'aimantation totale $M(P') = M^{ind}(P') + M^{rem}(P')$ en chacun des autres points P' de la coque.

Discrétisation des première et seconde modélisations

- 20 Les distributions surfaciques de sources magnétiques sont discrétisées.

Pour ce faire, un modèle virtuel de la coque est utilisé. Ce modèle comporte un maillage constitué par une pluralité de surfaces élémentaires qui constituent une approximation de la surface S .

Ce maillage comportant N surfaces élémentaires S_i polygonales et planes.

- 25 Chaque surface élémentaire S_i est limitée par une pluralité d'arêtes $L_{i,j}$. Les arêtes des différentes surfaces se rejoignent en N' nœuds k (cf. figure 2).

Sources dipolaires

La distribution de sources dipolaires $\vec{p}(P)$, où P est un point courant de la surface S de la coque du navire, est considérée comme uniforme sur chaque surface élémentaire

- 30 S_i du maillage. Elle est écrite $\vec{p}_i$.

Avec $\vec{p}_i = eM_i = eM_i^{ind} + eM_i^{rem} = \vec{p}_i^{ind} + \vec{p}_i^{rem}$, la discrétisation de l'équation (3) conduit à :

$$H(R) = H_0(R) + \frac{1}{4\pi} \sum_i^N \iint_{S_i} \text{grad}_s(\vec{p}_i(P) \cdot \frac{RP}{R^3}) dS_i(P)$$

où PR est le vecteur reliant le point P , de la surface élémentaire S_i , au point R .

Avec :

$$\iiint_{\Omega_i} \text{grad}(M_i(P) \cdot \frac{PR}{R^3}) d\Omega_i(P) = \iint_{S_i^{ext}} \text{grad}_s(\vec{p}_i(P) \cdot \frac{PR}{R^3}) d\vec{S}_i^{ext}(P)$$

- 5 Où Ω_i est un volume élémentaire de la coque obtenu par translation de la surface élémentaire S_i sur une longueur égale à l'épaisseur e le long d'une normale à la surface élémentaire S_i . S_i^{ext} est la surface extérieure fermée de ce volume élémentaire Ω_i , orientée de l'intérieur vers l'extérieur.

- 10 En considérant les différentes grandeurs comme constantes selon l'épaisseur e du volume Ω_i , l'expression précédente devient :

$$\iint_{S_i} \text{grad}_s(\vec{p}_i(P) \cdot \frac{PR}{R^3}) dS_i(P) = \sum_j \int_{L_{i,j}} (\vec{p}_i(P) \vec{n}_{i,j}) \frac{PR}{R^3} dL_{i,j}(P)$$

- où $\vec{n}_{i,j}$ est la normale le long de l'arête $L_{i,j}$, située dans le plan de la surface élémentaire S_i et orientée vers l'extérieur de cette surface élémentaire. Dans ce qui suit, pour plus de clarté, les indices j sur les différentes arêtes d'une même surface élémentaire sont omis, la somme sur les différentes intégrales linéaires devenant une intégrale de contour.
- 15

D'où,

$$H(R) = H_0(R) + \frac{1}{4\pi} \sum_i^N \int_{L_i} [(\vec{p}_i^{ind}(P) + \vec{p}_i^{rem}(P)) \vec{n}_i] \frac{PR}{R^3} dL_i(P) \quad (5)$$

Ou, sous forme matricielle :

$$(A_M \quad A_M) \begin{pmatrix} \vec{p}_i^{ind} \\ \vec{p}_i^{rem} \end{pmatrix} = m$$

- 20 Avec :

- m un vecteur dont la $j^{\text{ème}}$ composante est la différence $H(R_j) - H_0(R_j)$ entre la mesure de l'excitation magnétique effectuée au point R_j où est placé le $j^{\text{ème}}$ capteur, et la valeur de l'excitation magnétique inductrice au point R_j ; et,

- A_M la matrice dont l'élément $A_{M_{ji}}$ est l'opérateur associé à une surface élémentaire S_i :
- $$\frac{1}{4\pi} \int_{L_i} (u_i \cdot \vec{n}_i) \frac{R_i R_j}{R_i R_j^3} dL_i(R_i).$$
- 25

Où u_i est un doublet de vecteur formant une base associée à la surface élémentaire S_i de décomposition des $\vec{p}_i$

En utilisant l'équation (4), en un point P de la surface élémentaire S_i , on a :

$$\vec{p}_i^{ind}(P) = eM_i^{ind}(P) = e\chi H_{0i} + \frac{\chi}{4\pi} \sum_j^N \iint_{S_j} grad_s(\vec{p}_j(P') \cdot \frac{PP'}{PP'^3}) dS_j(P')$$

5 où il a été considéré que l'excitation inductrice $H_0(P)$ est uniforme sur la surface S_i et vaut H_{0i} .

Avec

$$\iint_{S_j} grad_s(\vec{p}_j(P') \cdot \frac{PP'}{PP'^3}) dS_j(P') = \int_{L_j} (\vec{p}_j(P') \cdot \vec{n}_j) \frac{PP'}{PP'^3} dL_j(P'),$$

il vient finalement :

$$10 \quad \frac{\vec{p}_i^{ind}(P)}{e} - \frac{\chi}{4\pi} \sum_j^N \int_{L_j} (\vec{p}_j(P') \cdot \vec{n}_j) \frac{PP'}{PP'^3} dL_j(P') = e\chi H_{0i}$$

Que l'on peut écrire sous forme matricielle :

$$(Id + D_M \quad D_M) \cdot \begin{pmatrix} \vec{p}_i^{ind} \\ \vec{p}_i^{rem} \end{pmatrix} = S_M$$

Avec :

- S_M un vecteur dont la $i^{ème}$ composante est proportionnelle à l'excitation
15 magnétique inductrice $e\chi H_{0i}$ en un point de la $i^{ème}$ surface élémentaire du maillage ; et,

- D_M la matrice dont l'élément $D_{M_{ji}}$ est l'opérateur $-\frac{\chi e}{4\pi} \int_{L_i} (u_i \cdot \vec{n}_i) \frac{R_j R_i}{|R_j R_i|^3} dL_i(R_i)$,

où R_i est la position du barycentre de la surface élémentaire S_i .

Ces équations sont vectorielles. En considérant uniquement sa projection dans le plan de chaque surface élémentaire, cela conduit à un système de 2N équations à 2N
20 inconnues. Ces équations relatives au comportement magnétique du matériau constituent ce que nous appelons la seconde modélisation.

Sources monopolaires

Dans la description monopolaire, les charges sont sensiblement proportionnelles au flux magnétique s'échappant à l'interface entre la tôle et l'air. Or, l'excitation magnétique
25 dans la tôle étant orientée tangentiellement, le flux magnétique tend à s'échapper majoritairement par les arêtes du modèle de coque. Le procédé prévoit la réalisation d'un bilan du flux magnétique sur chacune des arêtes d'un maillage dual associé aux surfaces élémentaires S_i du maillage primaire. Les éléments relatifs à ce maillage dual seront

primés dans ce qui suit. Le maillage dual comporte N' surfaces élémentaires S'_k , chacune étant associée à un noeud k du maillage primaire.

Comme cela est représenté sur la figure 2, une surface élémentaire duale S'_k est associée à un noeud du maillage primaire. Chaque surface élémentaire duale S'_k est construite à partir des barycentres des différentes surfaces élémentaires S_i contenant le noeud k considéré et les milieux des arêtes partant de ce noeud i .

La charge Q_k condensée au noeud k est définie par :

$$Q_k = \iint_{S'_k} q dS'_k$$

où S'_k est la surface élémentaire duale associée au noeud k du maillage primaire.

La discrétisation de l'équation (1) conduit à :

$$H(R) = H_0(R) + \frac{1}{4\pi} \sum_k^{N'} Q_k(R_k) \frac{R_k R}{R_k R^3}$$

Où le point R_k correspond à la position du noeud k .

En distinguant charge induite et charge rémanente dans la charge totale Q_k , c'est-à-dire $Q_k = Q_k^{ind} + Q_k^{rem}$, il vient :

$$H(R) = H_0(R) + \frac{1}{4\pi} \sum_k^{N'} (Q_k^{ind}(R_k) + Q_k^{rem}(R_k)) \frac{R_k R}{R_k R^3} \quad (6)$$

ou encore, sous une forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} A_Q & A_Q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_i^{ind} \\ Q_i^{rem} \end{pmatrix} = m$$

Avec :

- m un vecteur dont la $j^{\text{ème}}$ composante est la différence $H(R_j) - H_0(R_j)$ entre la mesure de l'excitation magnétique effectuée au point R_j où est placé le $j^{\text{ème}}$ capteur et la valeur de l'excitation magnétique inductrice au point R_j ; et,

- A_Q la matrice dont le coefficient $A_{Q_{ki}}$ est l'opérateur associé à une surface élémentaire duale S'_k : $\frac{1}{4\pi} \frac{R_k R_i}{R_k R_i^3}$.

Pour la discrétisation de la seconde modélisation couplant les charges monopolaires entre elles, on a :

$$q = -\text{div}_s M$$

$$Q_k = \iint_{S'_k} q dS'_k = -e \iint_{S'_k} \text{div}_S M dS'_k$$

$$Q_k^{ind} = -e \iint_{S'_k} \text{div}_S M^{ind} dS'_k$$

En utilisant l'équation (4), on a :

$$Q_k^{ind} = -e \iint_{S'_k} \text{div}_S [\chi H_0(P) + \chi H^{red}(P)] dS'_k(P)$$

5 Puis, en injectant l'équation (6) dans l'équation précédente, on a :

$$Q_k^{ind} + \frac{e\chi}{4\pi} \left(\sum_l^{N'} (Q_l^{ind} + Q_l^{rem}) \iint_{S'_k} \text{div}_S \left[\frac{R_l P}{R_l P^3} \right] dS'_k(P) \right) = -e \iint_{S'_k} \text{div}_S [\chi H_0(P)] dS'_k(P)$$

Enfin, en appliquant la formule d'Ostogradski à un volume élémentaire correspondant à l'extrusion, sur une épaisseur e , de la surface élémentaire S'_k du maillage duale associée au nœud k , soit :

$$10 \quad -e \iint_{S'_k} \text{div}_S V dS'_k = -e \int_{L'_k} V \cdot \vec{n}'_k dL'_k$$

où $\vec{n}'_k$ est une normale à l'arête L'_k se situant dans le plan de la surface élémentaire associée, il vient :

$$(7) \quad Q_k^{ind}(R_k) + \frac{e\chi}{4\pi} \left(\sum_l^{N'} (Q_l^{ind}(R_l) + Q_l^{rem}(R_l)) \int_{L'_k} \frac{R_l R_k}{R_l R_k^3} \cdot \vec{n}'_k \cdot dL'_k(R_k) \right) = -e\chi \int_{L'_k} H_0(R_k) \cdot \vec{n}'_k dL'_k(R_k)$$

15 ou sous une forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} Id + D_Q & D_Q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_i^{ind} \\ Q_i^{rem} \end{pmatrix} = S_Q^2$$

Avec :

- S_Q un vecteur dont la $k^{\text{ème}}$ composante est donnée par l'expression

$-e\chi \int_{L'_k} H_0(R_k) \cdot \vec{n}'_k dL'_k(R_k)$ relative à la $k^{\text{ème}}$ surface élémentaire duale S'_k ; et ;

20 - D_Q la matrice dont le coefficient $D_{Q_{ji}}$ est l'opérateur $\frac{e\chi}{4\pi} \int_{L'_j} \frac{R_i R_j}{R_i R_j^3} \cdot \vec{n}'_j dL'_j(R_j)$.

Equations à résoudre

De manière synthétique, les équations à résoudre sont les suivantes :

Dans la description en sources dipolaires :

$$25 \quad \begin{pmatrix} A_M & A_M \\ D_M + Id & D_M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_i^{ind} \\ p_i^{rem} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m \\ S_M \end{pmatrix} \quad (A)$$

Dans la description en sources monopolaires :

$$\begin{pmatrix} A_Q & A_Q \\ D_Q + Id & D_Q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_i^{ind} \\ Q_i^{rem} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m \end{pmatrix} \quad (B)$$

La solution de ces systèmes d'équations n'est pas unique puisque, dans la plupart des cas, le nombre de capteurs utilisés (i.e. le nombre de coordonnées du vecteur m) est moins important que le nombre de sources recherchées (i.e. N sources dipolaires et N' sources monopolaires). Pour obtenir une solution, une procédure de décomposition en valeurs singulières (acronyme SVD en anglais) est utilisée. Cet outil mathématique, connu de l'homme du métier, permet de déterminer, parmi toutes les solutions possibles, la solution de norme minimale. De préférence une norme quadratique est utilisée dans cette procédure de décomposition en valeurs singulières.

Une fois la solution obtenue, le champ magnétique sur la surface de référence est évaluée grâce aux équations (5), système d'équation (A), ou (6), système d'équations (B).

Transformation de passage de la description en sources dipolaires à la description en sources monopolaires

Selon le procédé de l'art antérieur, on résout un système d'équations conforme à l'un ou l'autre des systèmes d'équations (A) et (B). La solution obtenue est relativement précise dans le cas où les capteurs du champ magnétique sont suffisamment éloignés de la coque du navire. Dans le cas contraire, où les capteurs sont proches ou collés à la coque du navire, la solution obtenue est faussée et n'est par conséquent pas satisfaisante.

Le procédé selon l'invention résout un autre système d'équations (C). Le système d'équations (C) dérive de la combinaison des deux systèmes d'équation (A) et (B), de manière à modéliser de manière précise et robuste à la fois l'aspect vectoriel du problème, en particulier le lien entre les mesures du champ magnétique et les sources, et l'aspect scalaire du problème, en particulier le couplage mutuel entre les sources à la surface de la coque. La solution obtenue par la résolution du système d'équations (C) est précise, même lorsque les capteurs du champ magnétique sont positionnés à proximité de la coque.

Pour cela, le procédé selon l'invention utilise une transformation T permettant de passer de la distribution de sources dipolaires $\vec{p}_i$ à la distribution de sources monopolaires Q_k : $(Q_k) = T(\vec{p}_i)$.

Avec :

$$Q_k = \iint_{S'_k} q(P) dS'_k(P) \text{ et } q(P) = -\text{div}_s \vec{p}(P)$$

On montre que :

$$Q_k = \sum_l^{d_k} \vec{p}_l \cdot \int_{L'_{k,l}} \vec{n}'_{k,l} dL'_{k,l}(P) \quad (7)$$

Où :

- d_k est le nombre d'arêtes duales $L'_{k,l}$ associées à la surface élémentaire duale S'_k du nœud k ;

5 - $\vec{n}'_{k,l}$ la normale sortante à l'arête duale $L'_{k,l}$ considérée ; et ,

- $\vec{p}_l$ la valeur de l'aimantation dipolaire tangentielle le long de l'arête duale $L'_{k,l}$ considérée, cette aimantation étant constante le long d'une arête duale et correspondant à l'aimantation de la surface élémentaire S_i sur laquelle se trouve l'arête duale considérée.

10 En appliquant la relation (7) à tous les éléments du maillage, une matrice T est obtenue permettant de passer de la distribution en sources dipolaires à la distribution en sources monopolaires : $(Q_k) = T(\vec{p}_i)$

Les coefficients de la matrice T dépendent de la géométrie du maillage primaire choisi.

15 La pseudo-inverse T^* de la transformation T , c'est-à-dire la généralisation de la matrice inverse aux matrices qui ne sont pas carrées, permet de passer de la distribution en sources monopolaires à une distribution de sources dipolaires : $(\vec{p}_i) = T^*(Q_j)$.

En utilisant, de plus, la transformation T uniquement pour les aimantations rémanentes, le système d'équations (C) s'écrit :

$$20 \quad \begin{pmatrix} A_M & A_M T^* \\ D_M + Id & D_M T^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{p}_i^{ind} \\ Q_i^{rem} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m \\ S_M \end{pmatrix} \quad (C)$$

avec :

- m le vecteur dont la $j^{\text{ème}}$ composante est la différence $H(R_j) - H_0(R_j)$ entre la mesure de l'excitation magnétique effectuée au point R_j par le $j^{\text{ème}}$ capteurs de champ magnétique et la valeur de l'excitation magnétique inductrice au point R_j ;

25 - A_M la matrice dont l'élément A_{Mij} est l'opérateur $\frac{1}{4\pi} \int_{L_i} (u_i \cdot \vec{n}_i) \frac{R_i R_j}{|R_i R_j|^3} dL_i(R_i)$ associé à une surface élémentaire S_i du maillage primaire, ayant une pluralité d'arêtes L_i , présentant chacune une normale $\vec{n}_i$ dans le plan de la surface élémentaire S_i qui est orientée vers l'extérieur de cette surface élémentaire, et où u_i est un doublet de vecteur formant une base de décomposition de la surface élémentaire S_i ;

- S_M le vecteur dont la $i^{\text{ème}}$ composante est proportionnelle à l'excitation magnétique inductrice $e\chi H_{0i}$ en un point de la $i^{\text{ème}}$ surface élémentaire S_i du maillage ; et,

- D_M la matrice dont l'élément D_{Mij} est l'opérateur $-\frac{\chi e}{4\pi} \int_{L_j} (u_j \cdot \vec{n}_j) \frac{R_i R_j}{|R_i R_j|^3} dL_j(R_j)$; et,

- T la matrice de transformation, telle que $(Q_i^{\text{rem}}) = T (\vec{p}_i^{\text{rem}})$, dont la pseudo-inverse est notée T^* .

Les inconnues $\vec{p}_i^{\text{ind}}$ sont d'abord éliminées du système. On a :

$$(\vec{p}_i^{\text{ind}}) = (D_M + Id)^{-1} \cdot (S_M - D_M T^*) (Q_i^{\text{rem}}) \quad (8)$$

et, par conséquent :

$$(Q_i^{\text{rem}}) = ((-A_M \cdot (D_M + Id)^{-1} \cdot D_M + A_M) T^*)^* \cdot (m - A_M \cdot (D_M + Id)^{-1} S_M) \quad (9)$$

Un système d'équations similaire pourrait être écrit à partir des A_Q et des D_Q du système d'équations (B).

Rééquilibrage du poids des sources

Pour donner le même poids à toutes les surfaces élémentaires du maillage primaire lors de la résolution du système d'équations (C), et afin de ne pas biaiser la solution en favorisant une surface élémentaire se situant en regard d'un capteur 7 du champ magnétique par rapport aux autres surfaces élémentaires du maillage primaire, le procédé selon l'invention prévoit une procédure de rééquilibrage du système d'équations (C).

Pour cela, une procédure, par ailleurs connue en elle-même, de préconditionnement des matrices rectangulaires est utilisée.

D'une manière générale, soit A une matrice quelconque rectangulaire. On appelle W_g et W_d les matrices carrées diagonales dont les termes sont respectivement les inverses des normes des lignes et des colonnes de A . La matrice A_1 est alors définie par : $A_1 = W_g \cdot A \cdot W_d$

Cette procédure tend à diminuer l'influence des coefficients les plus importants de la matrice A .

Dans le cas de l'équation (9), la procédure de préconditionnement porte, de préférence, sur la matrice $-A_M \cdot (D_M + Id)^{-1} \cdot D_M + A_M) T^*$.

En appliquant la procédure de préconditionnement à ce dernier ensemble d'équations, on obtient :

$$(Q_i^{rem}) = W_d(W_g \cdot ((-A_M \cdot (D_M + Id)^{-1} \cdot D_M + A_M) \cdot T^* \cdot W_d)^* \cdot W_g \cdot (m - A_M \cdot (D_M + Id)^{-1} \cdot S_M))$$

Les inconnues Q_i^{rem} sont obtenues au moyen de l'expression précédente , puis les inconnues $\vec{p}_i^{ind}$ sont calculées à partir de l'équation (8).

5 Finalement, le champ magnétique créé par la coque du navire dans le plan de référence est calculé au moyen de la partie correspondante de l'équation (6) pour la contribution des sources monopolaires rémanentes Q_i^{rem} et au moyen de la partie correspondante de l'équation (5) pour la contribution des sources dipolaires induites $\vec{p}_i^{ind}$.

10 Les étapes précédentes du procédé de détermination de l'aimantation de la coque du navire et du procédé de détermination de la signature du navire constituent les étapes nécessaires d'un procédé d'immunisation magnétique du navire consistant à réguler, en temps réel, la signature magnétique du navire.

15 Pour réguler la signature magnétique du navire, de préférence pour minimiser la signature magnétique du navire, les moyens de calcul du navire déterminent une pluralité de courants électriques adaptés destinés à être respectivement appliqués aux boucles d'immunisation dont est équipé le navire.

Les moyens de calcul transmettent ces courants électriques adaptés en tant que consignes aux moyens d'alimentation des différentes boucles d'immunisation. Les moyens d'alimentation appliquent en entrée de chacune des boucles un courant correspondant au courant adapté requis.

20 En conséquence de quoi, les courants circulant dans les différentes boucles d'immunisation génèrent une excitation magnétique inductrice modifiant l'excitation magnétique totale H_0 .

25 Une fois les courants électriques établis, le procédé de détermination de l'aimantation de la coque du navire est exécuté à nouveau en prenant en compte cette modification de l'excitation magnétique H_0 , de manière à déterminer une nouvelle valeur de l'aimantation. Puis le procédé de détermination de la signature du navire est itéré avec la nouvelle valeur probable de la distribution de l'aimantation à la surface de la coque.

Par itérations successives, la signature magnétique du navire est minimisée.

30 Par ailleurs, dans une variante de réalisation du procédé de détermination de l'aimantation, la procédure de décomposition en valeurs singulières (SVD) est modifiée. Dans une SVD classique, on cherche une solution qui minimise un critère prédéfini utilisant une norme, telle que « les moindres carrés ». Dans la présente variante de réalisation, on cherche une solution dont l'écart avec une solution de référence minimise le critère choisi.

Cette distribution de référence est avantageusement la distribution de norme minimale déterminée lors d'une itération précédente du procédé de détermination de l'aimantation.

5 Cette distribution de référence peut également être une distribution de sources magnétiques mesurée au moyen d'un dispositif adapté à un moment de l'histoire magnétique du navire. Cette mesure peut par exemple être réalisée dans un chantier naval, avant que le navire prenne la mer, au moyen d'un dispositif fixe.

De cette manière, est transcrite l'idée qu'entre les instants $t - \delta t$ et t , la distribution d'aimantation à la surface de la coque a évolué à partir de la distribution d'aimantation à $t - \delta t$, c'est-à-dire la distribution de référence, et que la distribution à l'instant t ne doit pas être très « éloignée » de la distribution de référence.

Il est à remarquer que cette variante du procédé de détermination de l'aimantation de la coque est indépendante du système d'équations que l'on cherche à résoudre. Elle pourrait être mise en œuvre pour d'autres systèmes d'équations tels que les systèmes (A) ou le système (B).

15 Cette variante présente l'avantage de conduire à une distribution d'aimantation de norme minimale plus robuste que dans la procédure de décomposition en valeurs singulières classiquement utilisée. Il est à noter qu'il a été constaté que la solution obtenue par la mise en œuvre de la présente invention est beaucoup plus robuste que les solutions obtenues par les méthodes de résolution de l'art antérieur, et ceci quelle que soit la distance à laquelle se trouve les capteurs de la surface de la coque ferromagnétique. Par le qualificatif de « robuste », on entend classiquement le fait que la solution soit peu ou pas modifiée par des perturbations ou bruits.

25 La mise en œuvre du procédé de détermination de l'aimantation de la coque d'un navire selon la présente invention a été réalisée sur une maquette au $1/30^{\text{ème}}$ d'un sous-marin à double coque.

Les figures 4 et 5 sont des graphes permettant de comparer la signature de la coque calculée selon le procédé de l'art antérieur et selon le procédé de l'invention avec la signature réelle mesurée par un capteur. La signature est ici évaluée le long d'un axe parallèle à l'axe longitudinal de la coque et situé 10 mètres au-dessous de celle-ci, la position 0 correspondant à la verticale du centre de gravité de la coque. Le graphe de la figure 4 représente la composante longitudinale du champ magnétique tandis que le graphe de la figure 5 représente la composante verticale de ce même champ. Les capteurs du champ magnétique sont collés sur la paroi extérieure de la coque interne du sous-marin. On constate une très grande corrélation entre la signature calculée selon la présente invention et la signature réelle du navire.

Le procédé selon l'invention permettant de calculer précisément la signature en rapprochant les capteurs de la coque, ceux-ci sont avantageusement disposés à

l'extérieur de la coque ferromagnétique du navire. Par exemple, dans le cas d'un sous-marin comportant une coque interne ferromagnétique et une coque externe hydrodynamique, les capteurs sont avantageusement placés entre les deux coques. Cette disposition permet de réduire, à l'intérieur de la coque interne, l'encombrement causé par les capteurs et leurs connexions électriques. De plus, la coque interne constituant un blindage magnétique, elle permet de réduire considérablement, voir d'annuler, à l'extérieur de celle-ci, les champs magnétiques secondaires générés par les sources secondaires intérieures, telles que les moteurs. Les mesures de champ magnétique réalisées par des capteurs situés à l'extérieur de la coque interne se rapprochent ainsi davantage du champ magnétique d'intérêt, c'est-à-dire le champ magnétique généré par la distribution d'aimantation à la surface de la coque. La solution à laquelle conduit le procédé selon l'invention n'en est que plus juste.

Au sens de l'invention, les termes « proche de la coque » ou « collé à la coque » appliqués à un capteur du champ magnétique signifie que l'élément sensible au champ magnétique de ce capteur est placé entre 0 et 10 cm de la surface orientée vers l'extérieur du navire ou de la surface orientée vers l'intérieur du navire de la coque ferromagnétique dont on cherche à calculer la signature.

REVENDECATIONS

1.- Procédé de détermination, en temps réel, de l'aimantation de la coque d'un navire, la coque du navire étant en matériau ferromagnétique et soumise à une excitation magnétique inductrice et le navire étant muni d'une pluralité de capteurs du champ magnétique positionnés en des points déterminés par rapport à la coque, comportant les étapes consistant à :

a) - acquérir une pluralité de mesures du champ magnétique au moyen de la pluralité de capteurs ;

b) - évaluer l'excitation magnétique inductrice ; et,

c) - déterminer, en résolvant un système d'équations résultant de la modélisation des phénomènes physiques mis en jeu, à partir de la pluralité de mesures acquises et de l'excitation magnétique inductrice évaluée, une distribution de sources magnétiques probable à la surface de la coque,

caractérisé en ce que, dans ladite modélisation, les sources magnétiques induites sont décrites par une distribution de sources dipolaires et les sources magnétiques rémanentes sont décrites par une distribution de sources monopolaires, et en ce que ladite modélisation comporte :

- une première modélisation associant à des mesures du champ magnétiques, une distribution d'aimantation dans le matériau ferromagnétique ; et,

- une seconde modélisation relative au comportement du matériau ferromagnétique, décrivant le couplage entre une source magnétique en un point du matériau, avec une source magnétique en un autre point du matériau.

2.- Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que le procédé utilise une transformation T permettant d'associer à une distribution de sources dipolaires au moins une distribution de sources monopolaires et/ou une transformation T^* permettant d'associer à une distribution de sources monopolaires, au moins une distribution de sources dipolaires.

3.- Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce que ladite modélisation utilise un modèle virtuel de la coque du navire comportant un maillage primaire constitué d'une pluralité de surfaces élémentaires planes et polygonales.

4.- Procédé selon la revendication 3, caractérisé en ce que, par surface élémentaire du maillage primaire, la distribution de sources dipolaires est uniforme et tangentielle à cet élément de surface.

5.- Procédé selon la revendication 3 ou la revendication 4, caractérisé en ce que la distribution de sources monopolaires est discrétisée au nœuds du maillage primaire.

6.- Procédé selon les revendications 4 et 5 en combinaison, caractérisé en ce que ledit système d'équations à résoudre s'écrit :

$$\begin{pmatrix} A_M & A_M T^* \\ D_M + Id & D_M T^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_i^{ind} \\ Q_i^{rem} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m \\ S_M \end{pmatrix}$$

avec :

- m un vecteur dont la $j^{\text{ème}}$ composante est la différence $H(R_j) - H_0(R_j)$ entre la mesure de l'excitation magnétique effectuée au point R_j par le $j^{\text{ème}}$ capteurs de champ magnétique et la valeur de l'excitation magnétique inductrice au point R_j ;

- A_M une matrice dont l'élément $A_{M_{ji}}$ est l'opérateur $\frac{1}{4\pi} \int_{L_i} (u_i \cdot \vec{n}_i) \frac{R_j R_i}{R_j R_i^3} dL_i(R_i)$ associé à une surface élémentaire S_i du maillage primaire ayant une pluralité d'arêtes L_i , présentant chacune une normale $\vec{n}_i$ dans le plan de la surface élémentaire S_i et orientée vers l'extérieur de cette surface élémentaire, et où u_i est un doublet de vecteur formant une base de la surface élémentaire ;

- S_M un vecteur dont la $i^{\text{ème}}$ composante est proportionnelle à l'excitation magnétique inductrice $e\chi H_{0i}$ en un point de la $i^{\text{ème}}$ surface élémentaire du maillage primaire ;

- D_M une matrice dont l'élément $D_{M_{ji}}$ est l'opérateur $-\frac{\chi e}{4\pi} \int_{L_i} (u_i \cdot \vec{n}_i) \frac{R_j R_i}{|R_j R_i|^3} dL_i(R_i)$; et,

- T une matrice de transformation telle que $(Q_i^{rem}) = T(\vec{p}_i^{rem})$, dont la pseudo-inverse est notée T^* .

7.- Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que la détermination de la distribution de sources magnétiques probable fait intervenir une procédure de préconditionnement.

8.- Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que la détermination de la distribution de sources magnétiques probable fait intervenir une procédure de décomposition en valeurs singulières.

9.- Procédé de détermination, en temps réel, de la signature magnétique d'un navire, caractérisé en ce qu'il comporte une étape de détermination, en temps réel, de l'aimantation de la coque du navire par le procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 8 permettant d'obtenir une distribution de sources magnétiques probable à la surface de la coque, puis une étape supplémentaire consistant à calculer la signature du navire à partir de ladite distribution de sources magnétiques probable.

10.- Procédé d'immunisation magnétique d'un navire, caractérisé en ce que, le navire étant muni d'une pluralité de boucles d'immunisation ayant des géométries déterminées par rapport à la coque du navire et des moyens d'alimentation en puissance électrique aptes à être commandés de manière à faire circuler dans les boucles d'immunisation,

indépendamment les unes des autres, des courants adaptés, le procédé comporte, en plus des étapes du procédé de détermination, en temps réel, de la signature du navire selon la revendication 9, une étape consistant à calculer les différents courants à faire circuler dans les boucles d'immunisation de manière à modifier la signature magnétique du navire, et une étape consistant à commander les moyens d'alimentation en puissance électrique de manière à faire circuler, dans les boucles d'immunisation, lesdits courants calculés.

11.- Dispositif (6) de détermination, en temps réel, de l'aimantation de la coque (1) d'un navire, la coque du navire étant en un matériau ferromagnétique soumis à une excitation magnétique inductrice (H_0), caractérisé en ce qu'il comporte :

- une pluralité de capteurs de champ magnétique (7) positionnés en des points déterminés par rapport à la coque ;
- des moyens de détermination de l'excitation magnétique inductrice ; et,
- une unité de calcul (13) reliée à la pluralité de capteurs et aux moyens de détermination de l'excitation magnétique inductrice, apte à exécuter les instructions d'un programme d'ordinateur pour la mise en oeuvre d'un procédé de détermination, en temps réel, de l'aimantation de la coque d'un navire selon l'une quelconque des revendications 1 à 8 ou d'un procédé de détermination, en temps réel, de la signature d'un navire selon la revendication 9.

12.- Dispositif selon la revendication 11, caractérisé en ce qu'au moins un capteur de la pluralité (7) de capteurs est collé sur la coque (1).

13.- Dispositif selon la revendication 11 ou la revendication 12, caractérisé en ce qu'au moins un capteur de la pluralité de capteurs (7) est un capteur bi-axes mesurant les composantes du champ magnétiques tangentielles à la coque (1).

14.- Dispositif selon l'une quelconque des revendications 11 à 13, caractérisé en ce qu'au moins un capteur de la pluralité de capteurs (7) est placé à l'extérieur de la coque (1) du navire.

15.- Dispositif d'immunisation magnétique d'un navire du type comprenant une pluralité de boucles d'immunisation ayant des géométries déterminées par rapport à la coque (1) du navire, des moyens d'alimentation en puissance électrique (10) des boucles d'immunisation, et des moyens de commande des moyens d'alimentation en puissance électrique des boucles d'immunisation, caractérisé en ce que les moyens de commande comprennent un dispositif selon l'une quelconque des revendications 11 à 14 apte à calculer, en temps réel, la signature du navire.

16.- Dispositif selon l'une quelconque des revendications 11 à 15, caractérisé en ce qu'il est embarqué à bord du navire dont on détermine l'aimantation de la coque.