

CONTROLE NON-DESTRUCTIF PAR CAPTEURS INDUCTIFS ET CAPTEURS A COURANTS DE FOUCAULT

par LÊ Minh-Quang, Docteur ingénieur en sciences, spécialiste en Contrôle Non Destructif,
e-mail : mq.le@sciensoria.fr

1 Introduction

Les *capteurs inductifs* et les *capteurs à courants de Foucault* sont largement utilisés dans le domaine de mesure/contrôle non destructif, non intrusif et sans contact.

Leur principe de fonctionnement est basé sur le phénomène d'induction magnétique. Le champ magnétique assure la « liaison » entre la cible (l'objet à contrôler) et le capteur. Il ne nécessite donc aucun contact mécanique pour que l'information sur la cible remonte jusqu'au capteur.

Les capteurs à courants de Foucault sont une sous-classe des capteurs inductifs. En effet, lorsque la cible n'est pas en matériau conducteur, comme le ferrite par exemple, il n'y a pas de courants de Foucault dans la cible. Seul la perméabilité magnétique du matériau intervient. Dans d'autres circonstances, même quand le matériau de la cible est conducteur, on ne cherche pas à étudier le signal correspondant aux courants de Foucault (la partie imaginaire du signal de sortie) mais s'intéresse uniquement au signal qui représente le circuit magnétique (la partie réelle du signal de sortie). Dans ces cas, le capteur en question est considéré comme inductif mais pas à courants de Foucault.

Le domaine d'application des capteurs inductifs est très large : mesure dimensionnelle (distance, épaisseur, ...), mesure de propriétés physiques de la cible (conductivité électrique), détection de défauts ou d'inclusions, détection de déformations dans une structure (par exemple impacts sur une plaque en composite carbone), etc.

Sciensoria est fabricant d'instruments de mesure/contrôle non destructif français. Grâce aux innovations apportées en matière de *conception de capteurs* et *en traitement du signal*, la société a su résoudre un certain nombre de problèmes techniques, qui restaient insoluble jusqu'à récemment, tel que la mesure de l'épaisseur à distance variable.



Modèle de poche Z-Scope v62™
(recherche & éducation)

Modèle de table Z-Scope v62 *Pro™
(activités de production & temps réel)

Conditionneurs pour capteurs inductifs fabriqués par Sciensoria

2 Principe de fonctionnement des capteurs inductifs

2.1 Qu'est-ce qu'un capteur ?

Notre perception de l'univers est basée sur nos cinq sens : la vue, l'odorat, l'ouïe, le goût, le toucher. Bien que ces sens suffisent amplement pour la vie courante, il reste des domaines interdits : on ne peut pas voir à travers une paroi opaque par exemple. On ne peut pas non plus voir dans l'obscurité, toucher des objets derrière une vitre, entendre un son de fréquence très haute (ultrason) ou très basse (infrason),...

Par ailleurs, le besoin de l'automatisation nécessite de remplacer nos sens par des dispositifs artificiels dans des contextes pénibles ou dangereux pour des humains. Ainsi, la caméra remplace l'œil, le micro remplace l'oreille, le palpeur remplace le toucher. Des nez et des langues électroniques sont en passe de pouvoir goûter les aliments et les alcools, ...

En bref, les dispositifs, qui nous aident à « sentir » le monde extérieur, soit pour remplacer nos sens existants, soit pour élargir nos capacités de perception sont appelés « **capteurs** ».

La caméra est un capteur optique car son fonctionnement est basé sur des principes de transmission de la lumière. Le palpeur est un capteur mécanique. Le nez électronique est un capteur chimique. Le capteur inductif, lui, fait partie de la famille des capteurs électromagnétiques basses fréquences, car ce sont les champs électrique et magnétique de basses fréquences qui transmettent les informations.

2.2 Phénomène d'induction

Une bobine parcourue par un courant alternatif de fréquence f génère autour d'elle un champ magnétique lui aussi alternatif. Le milieu entourant la bobine peut avoir des influences sur les propriétés de ce champ magnétique.

1. Un matériau magnétique, dont la perméabilité magnétique est plus grand que celle de l'air favorise le passage du champ.
2. Un matériau non-magnétique et conducteur, comme les métaux non ferreux, réagit de manière particulière. A cause du champ magnétique primaire, des courants induits, appelés courants de Foucault se développent dans le matériau. Ils créent à leur tour un champ magnétique secondaire, qui a tendance à s'opposer au champ primaire, selon des lois très complexes. Il s'agit du phénomène d'induction.
3. Sur un matériau qui est à la fois magnétique et conducteur, tels que les métaux ferreux, on observe en même temps les phénomènes 1 et 2.
4. L'air, l'eau, l'huile, les poussières n'ont quasiment aucune influence sur le champ magnétique.

Les courants induits dans le milieu concerné (la cible) dépendent très fortement des propriétés de cette dernière. Le champ magnétique issu de la composition du champ primaire et du champ secondaire a donc des propriétés dépendant des caractéristiques de la cible. Son amplitude et sa phase varient en fonction de plusieurs paramètres de la cible:

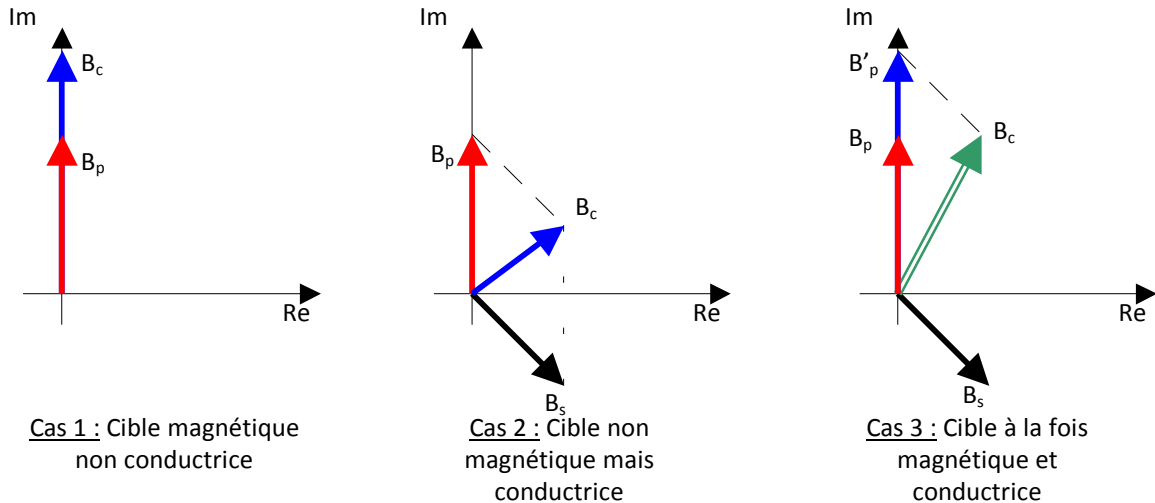
- distance capteur-cible (appelée aussi largeur d'entrefer ou *lift-off*)
- conductivité électrique et perméabilité magnétique de la cible,
- sa géométrie,
- son état interne (présence de défauts, fissures,...).

Le capteur inductif est donc très riche en informations.

2.3 Comportement du champ magnétique et des courants de Foucault

2.3.1 Comportement du champ magnétique

Les grandeurs électromagnétiques concernés dans le problème des capteur inductifs sont des grandeurs alternatives, elles sont caractérisées par une amplitude et une phase et peuvent être représentées par des vecteurs sur le plan complexe Réel - Imaginaire. On peut considérer les 3 cas différents selon la nature de la cible illustrés ci-dessous :



Dans le cas 1, la cible n'est pas conductrice mais magnétique (comme les ferrites, matériaux pour réaliser des transformateurs hautes fréquences). Dans ce cas, le matériau magnétique a pour effet d'augmenter le champ magnétique émis par la bobine excitatrice, le champ résultant B_c est d'une amplitude supérieure par rapport au champ initial B_p . Puisque la cible n'est pas conductrice, il n'existe pas de courants de Foucault. Il n'y a pas de déphasage entre le champ initial B_p et le champ résultant B_c .

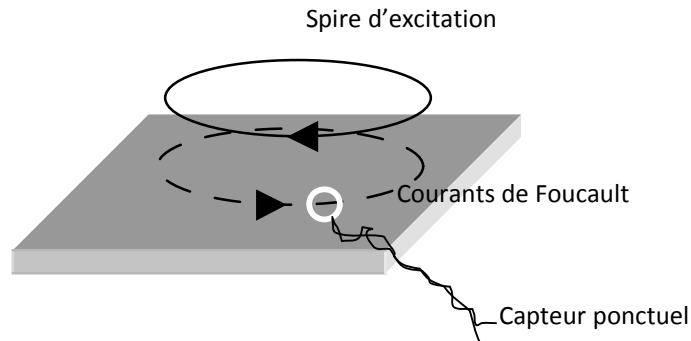
Dans le cas 2, la cible est conductrice mais non magnétique. C'est le cas des métaux amagnétiques comme le cuivre, l'argent, l'or, l'aluminium,... Dans ce cas, les courants de Foucault induits créent un champ secondaire (B_s) qui a pour effet de diminuer le champ initial et d'introduire un déphasage. Le champ résultant B_c est déphasé et plus faible en amplitude par rapport au champ initial B_p .

Dans le cas 3, la cible est à la fois conductrice et magnétique, comme la plupart des métaux ferreux. Dans ce cas, la réaction de la cible est plus complexe :

- Pour des fréquences relativement faibles, le caractère magnétique de la cible fait que l'amplitude du champ résultant est plus forte que celle du champ initial. Les courants de Foucault introduisent en même temps un déphasage.
- A mesure que la fréquence augmente, l'effet du magnétisme diminue, celui des courants de Foucault augmente. L'amplitude du champ résultant diminue de plus en plus, le déphasage augmente puis décroît selon une loi propre au matériau.

2.3.2 Distribution des courants de Foucault dans la cible

Pour une bobine d'excitation circulaire et une cible homogène, les courants de Foucault circulent parallèlement aux spires et dans le sens opposé du courant d'excitation.

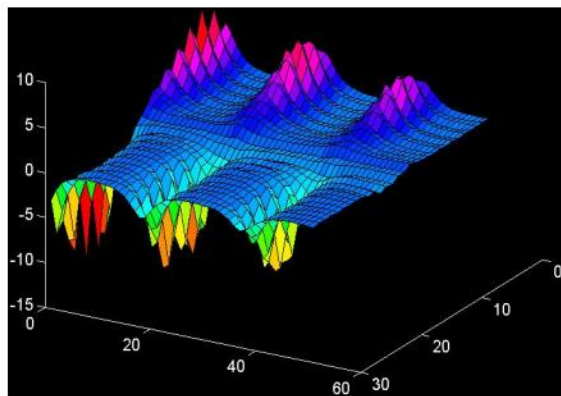
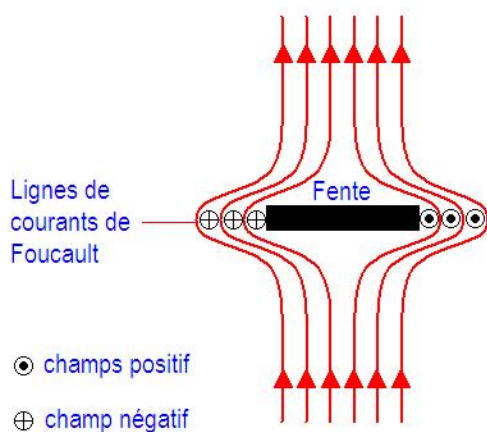


Lorsqu'il y a plusieurs spires dans la bobine d'excitation, les courants de Foucault forment une nappe d'une certaine largeur dans la cible.

La présence d'un défaut ou d'une fissure à la surface de la cible perturbe cette nappe. On peut détecter ces perturbations avec un capteur de champ magnétique ponctuel.

La figure ci-dessous illustre le comportement des courants induits vis-à-vis d'une fissure de surface. La nappe de courants étant « coupée » par la fissure, les courants induits contournent cette dernière par la droite et par la gauche. On observe des pics de champ magnétique près des extrémités de cette fissure, alors que la valeur du champ est quasiment nulle vers le milieu de la fissure (cartographie de droite). Par ailleurs, les pics de champs magnétiques aux extrémités de la fissure sont de sens opposés. On le comprend aisément en appliquant la « règle du tire-bouchon » sur les boucles de courants.

Il est à noter que la cartographie de droite correspond à 3 fissures transversales successives par rapport à la nappe de courants de Foucault.



*Comportement des courants de Foucault vis-à-vis d'une fissure transversale (figure de gauche).
Cartographie du champ magnétique de 3 fissures successives lorsqu'elles sont balayées par une nappe de courants de Foucault orientée perpendiculairement aux fissures (figure de droite).*

2.4 Exploitation des signaux

Lorsqu'une bobine est parcourue par un courant alternatif, elle présente une impédance complexe $Z = R + jX$. Cette impédance est le rapport entre la tension induite aux bornes de la bobine et le courant d'excitation.

La tension induite aux bornes de la bobine est directement liée au flux du champ magnétique Φ à travers la bobine. En fait, c'est sa dérivée : $V = d\Phi/dt$.

Le flux magnétique est par définition le produit du champ magnétique B et la surface de la bobine $\Phi = B \cdot S$.

Comme nous l'avons mentionné plus haut, le champ magnétique B dépend des propriétés de la cible. Donc, en mesurant la tension V ou l'impédance Z , on mesure indirectement les propriétés de la cible. Il s'agit de la méthode la plus simple pour exploiter les informations apportées par un capteur inductif.

Cette méthode a le mérite d'être simple et rapide. En une seule mesure, on accède à des informations globale comme la distance capteur-cible ou l'épaisseur d'une cible plane. Par contre, il est impossible de déterminer des propriétés locales de la cible avec une seule mesure.

Pour mieux déterminer des propriétés d'une cible, notamment des propriétés géométriques (état de surface, défauts, fissures, inclusions), on utilise des capteurs à excitation et mesure séparées : une bobine joue le rôle d'excitateur et « arrose » la cible de champ magnétique. Des petits détecteurs de champ magnétique sont placés à proximité des zones à prospecter afin de relever les valeurs locales du champ magnétique. Le but est de mesurer au plus près des zones d'intérêt. On peut même constituer une cartographie du champ magnétique à la surface de la cible. A partir de ces mesure, et en se basant sur des modèles mathématiques décrivant le comportement de la cible vis-à-vis d'une excitation, il est possible de remonter par le calcul aux propriétés internes de la cible, telle que la géométrie et la profondeur d'un défaut situé en dessous de la surface.

2.5 Applications principales

Les capteurs à courants de Foucault peuvent être utilisés dans de nombreuses applications. Ils sont sensibles à différents paramètres physiques ou géométriques : conductivité électrique, perméabilité magnétique, distance capteur-cible, épaisseur de la cible, forme de la cible, présence de défauts, d'inclusion, de fissures dans la cible.

Traditionnellement, pour mesurer un paramètre donné et de ne pas être perturbé par les autres paramètres, il faut s'assurer que seul le paramètre à mesurer varie dans l'application visée. Avant de faire une mesure, il faut étalonner l'appareil de mesure sur des étalons qui reproduisent les mêmes conditions dans la pratique. Ceci est très difficilement réalisable.



Capteurs inductifs divers fabriqués par Sciorsoria

Sciorsoria a mis au point des méthodes innovantes de traitement du signal qui sont basées sur la modélisation et le calcul intensif. Elles ont aboutit aux systèmes ConducSens™/TK-Sens™ qui permettent de mesurer simultanément plusieurs paramètres d'une cible : épaisseur, lift-off, conductivité électrique, perméabilité magnétique. L'étalonnage est fortement simplifié et tout simplement superflu dans de nombreux cas.