

Capteur de courants innovant pour des systèmes polyphasés

Application aux câbles multiconducteurs

Menad BOURKEB

Université de Lyon, F-69622, Lyon, France ; Université Lyon 1, Villeurbanne ; CNRS, UMR 5005, Laboratoire Ampère.

43, Boulevard du 11 Novembre 1918, Villeurbanne, 69622, France

menad.bourkeb@univ-lyon1.fr

RESUME – Cette article porte sur l'étude et la réalisation d'un prototype de capteur de courants innovant pour des câbles multiconducteurs. Outre le caractère non-intrusif de ce capteur (i.e. mesure sans contact), il permet de réaliser une mesure sur un système polyphasé dont la position des conducteurs est inconnue. L'approche adoptée est basée sur la résolution d'un problème inverse. En effet, à partir d'une mesure de la signature des champs magnétiques autour du câble multiconducteur, des algorithmes de reconstruction appropriés permettent de remonter aux courants circulant dans le câble. En plus des résultats de simulation, un banc de tests a été conçu et une validation expérimentale de ce concept est présentée, notamment pour une structure comportant un blindage en matériau ferromagnétique pour atténuer les perturbations extérieures.

ABSTRACT – This paper presents the study and realization of an innovative currents sensor prototype for multi-core cables. The two main advantages of this sensor compared to existing devices on the electrical equipment market are: firstly, it is no longer necessary to interrupt the system's electrical power supply to install the sensor. This is due to contactless measure (non-intrusive sensor). Another feature of our device is its capability to measure the currents in a multi-core system with unknown positions of conductors. This currents sensor operates in a way to find firstly the conductor positions, and then reconstructing the currents using the retrieved positions. In order to meet specifications, simulation results, test bench measurements and experimental results are presented with a ferromagnetic shielding.

MOTS-CLES – capteur, courant, câble, multiconducteur, magnétomètre, magnétique, blindage.

1. Introduction

L'économie d'énergie électrique est souvent assimilée à l'utilisation d'appareils à basse consommation, ou à des travaux de rénovation coûteux. Mais ces considérations ne sont pas suffisantes si le dysfonctionnement de certains dispositifs ou si une consommation anormale n'est pas décelée rapidement. Plus particulièrement en industrie, un défaut électrique non décelé par les disjoncteurs ou les relais, ou un défaut de type mécanique, sont autant de sources de gaspillage d'énergie électrique non négligeables. De même, le facteur de puissance d'une installation électrique est crucial car son défaut est facturé pour l'industriel, et oblige le fournisseur d'énergie à surdimensionner la puissance de ses installations. Toutes ces défaillances peuvent perdurer dans le temps si aucune analyse énergétique n'est effectuée, et compromettre l'efficacité énergétique d'une installation. Il existe donc un fort potentiel d'économie d'énergie dans le domaine industriel, d'où la nécessité de la recherche d'une solution de mesure innovante et à bas coût, à même de répondre aux besoins d'efficacité et de suivi énergétique. Une analyse de la consommation ne sera pertinente que si une mesure durable, voir permanente, est mise en place.

En ce qui concerne la mesure des grandeurs électriques, les solutions existantes à ce jour permettent la mesure sur un seul conducteur à la fois. Actuellement, il est donc nécessaire d'intervenir dans les armoires électriques ou d'isoler les conducteurs d'un câble gainé afin d'avoir les mesures dans tous les conducteurs d'un câble. Ces opérations sont coûteuses car elles impliquent l'intervention de personnes habilitées à l'intérieur des armoires électriques, qui sont parfois dans l'obligation d'effectuer une coupure de l'alimentation électrique du système et donc d'interrompre le processus industriel.

Pour la plupart des instruments de mesure, la mesure de courant passe par la mesure du champ magnétique rayonné par les conducteurs, que ce soit par des principes classiques (transformateurs d'intensité, bobines de Rogowski) ou par des techniques plus élaborées utilisant des mesures ponctuelles de l'induction du champ magnétique. Cependant, aucune méthode n'existe actuellement pour la mesure non-intrusive des courants d'un système multiconducteur, dont on ne connaît pas forcément la configuration (les positions des conducteurs dans un câble).

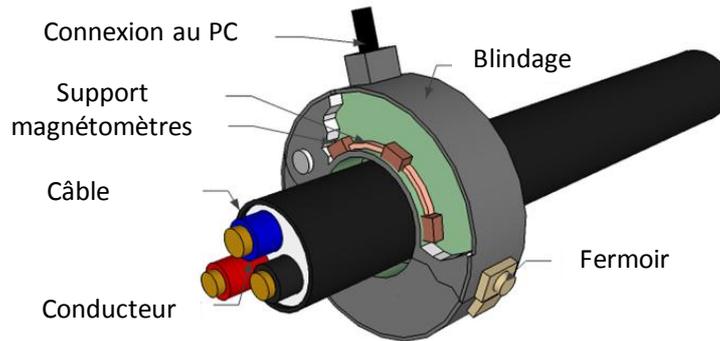


Figure 1.1 Dessin du capteur de courant à réaliser

D'Antona et al. proposent un nouveau principe réalisant la mesure simultanée de courants polyphasés circulant dans des conducteurs parallèles [1] ; les conducteurs sont des barres de cuivre (dont la configuration est bien connue) et des résultats expérimentaux satisfaisants sont présentés. Ce résultat a été étendu afin de prendre en compte des perturbations électromagnétiques [2]. Une analyse détaillée de plusieurs technologies non-intrusives est donnée dans [3-5]. Toutes ces méthodes sont basées sur une hypothèse : la connaissance de la position des conducteurs. Dans [6] est présenté un capteur de courant dédié à un dispositif électrique de géométrie connue avec des magnétomètres de type Fluxgate. [7-8] présentent de très bons résultats pour la mesure du courant, mais cela pour un seul conducteur. Enfin, des capteurs basés sur la technique de mesure du champ magnétique par fibre optique avec une très bonne précision (0.1% à 1 %) sont présentés dans [9-10] : l'inconvénient de ce type de capteurs, c'est le fait qu'ils soient étudiés pour un seul conducteur ainsi que leur coût très élevé due à l'utilisation de cristaux.

Cette démarche de reconstruction du courant par la mesure du champ magnétique requiert la résolution d'un problème inverse. Il existe certains brevets déposés concernant cette application [11-16], mais aucun prototype n'a vu le jour actuellement. Nous avons déposé un brevet [17] contenant notre méthode de reconstruction des courants, et nous nous sommes lancés dans l'étude et la réalisation du prototype capteur de courants.

La reconstruction des courants dans un câble que nous proposons est fournie par des mesures simultanées des champs magnétiques en divers points autour du câble. Notre dispositif est destiné à être utilisé principalement en milieu industriel. L'une des contraintes est que la mesure soit établie autour d'un câble multiconducteur, qui est potentiellement positionné à proximité d'autres câbles de même catégorie émettant des champs magnétiques tout aussi importants (voir même plus importants). En effet, si l'on considère un chemin de câbles, les magnétomètres vont mesurer des champs magnétiques émis par le câble ciblé, mais aussi ceux des autres câbles du chemin de câbles. Le dispositif final doit donc être protégé par un blindage ferromagnétique qui rejettera en partie les perturbations extérieures à notre environnement de mesure. Au final, le capteur de courant souhaité devra ressembler à la **Figure 1.1** ci-dessus.

2. Problème inverse et méthode de reconstruction

Le schéma présenté sur la **Figure 2.1** montre la géométrie du système. Les magnétomètres sont représentés par des carrés répartis uniformément le long d'un cercle entourant le câble. Pour mieux illustrer ce repère, seul un conducteur est représenté dans le cercle représentant la section du câble :

- La position des magnétomètres est déterminée par le couple de paramètres (R_{cap}, θ_{cap}) , que nous supposons connus.
- La position des conducteurs du câble est déterminée par le couple de paramètres $(R_{cond}, \theta_{cond})$ sur le repère polaire, situé dans un plan perpendiculaire à l'axe du câble, et qui a pour origine l'axe du câble. Ces paramètres sont inconnus, et doivent être déterminés lors de la pose du capteur.

Si nous appelons N le nombre de magnétomètres et M le nombre de conducteurs du câble, la relation entre les champs magnétiques mesurés par les magnétomètres et les courants dans les conducteurs peut être exprimée de la manière suivante :

$$B_i = \sum_{j=1}^{j=M} \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_j}{r_{ij}} \quad (1)$$

Avec : $i \in \{1, \dots, N\}$ et $j \in \{1, \dots, M\}$ et :

- B_i : Induction magnétique mesurée par l'i-ème magnétomètre.
- I_j : Courant traversant le j-ème conducteur.
- r_{ij} : Distance qui sépare le magnétomètre i du conducteur j.

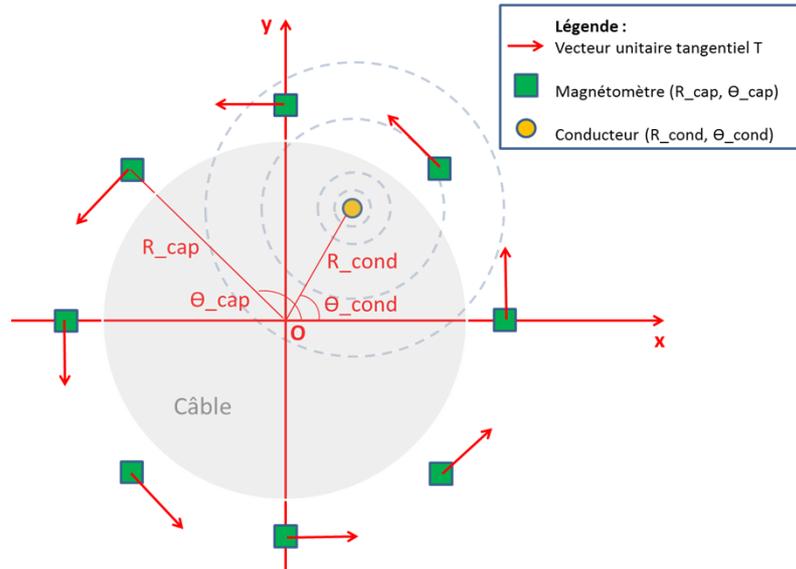


Figure 2.1 Schéma d'étude du capteur de courants – Représentation d'un seul conducteur et huit magnétomètres dans un repère de coordonnées polaires.

Chaque magnétomètre va mesurer la somme des inductions magnétiques créés par l'ensemble des conducteurs (pour l'instant on ne prend pas en compte d'éventuelles perturbations extérieures). Notre problème direct peut donc s'écrire de la manière suivante :

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ \vdots \\ B_N \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} k_{11} & \cdots & k_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{N1} & \cdots & k_{NM} \end{pmatrix}}_{[K]} \cdot \begin{pmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_M \end{pmatrix} \quad (2)$$

avec :

$$k_{ij} = \frac{\mu_0}{2\pi \cdot r_{ij}} \quad (3)$$

Ou encore, pour simplifier l'écriture :

$$\{B\} = [K] \cdot \{I\} \quad (4)$$

Observons que les paramètres $(R_{cond}, \theta_{cond})$ inconnus sont « cachés » dans le terme r_{ij} , et que le vecteur $\{B\}$ des inductions magnétiques mesurées dépend de manière non linéaire de ces paramètres. Nous allons appeler $[K]$ la matrice de configuration de notre capteur, dans le sens qu'elle est déterminée par la position des conducteurs $(R_{cond}$ et $\theta_{cond})$ et des magnétomètres $(R_{cap}$ et $\theta_{cap})$.

2.1 Algorithme de reconstruction sans blindage

La solution que nous avons envisagée consiste en deux étapes :

- 1) Dans un premier temps, un problème inverse non linéaire est résolu afin de déterminer ces paramètres (en plus des courants dans les conducteurs). Ce problème non linéaire doit être résolu une seule fois, idéalement lors de la pose du capteur. Cette étape que nous avons appelée "Calibration du capteur" permet de résoudre le système (4) à l'intérieur d'une boucle d'optimisation non linéaire, qui a pour objectif de déterminer la configuration du système, et en particulier les deux paramètres R_{cond} et θ_{cond} en minimisant l'écart entre les mesures d'induction magnétique $\{B\}$ et les valeurs d'induction calculées avec notre modèle à partir des estimations des courants. Ce vecteur sera appelé aussi vecteur résidu et nous minimisons la norme de ce vecteur :

$$\hat{p} = \arg \min_p \left\| \{B\} - \{\hat{B}(p)\} \right\| = \arg \min_p \left\| \{B\} - [K(p)] \{\hat{I}\} \right\| = \arg \min_p \left\| \{B\} - [K(p)][K(p)]^+ \{B\} \right\| \quad (5)$$

Où : $\hat{p} = (R_{cond}, \theta_{cond})$ est le vecteur des paramètres de configuration du capteur. Cette étape peut être relativement lente, mais elle ne doit être exécutée qu'une seule fois, lors de la pose du capteur.

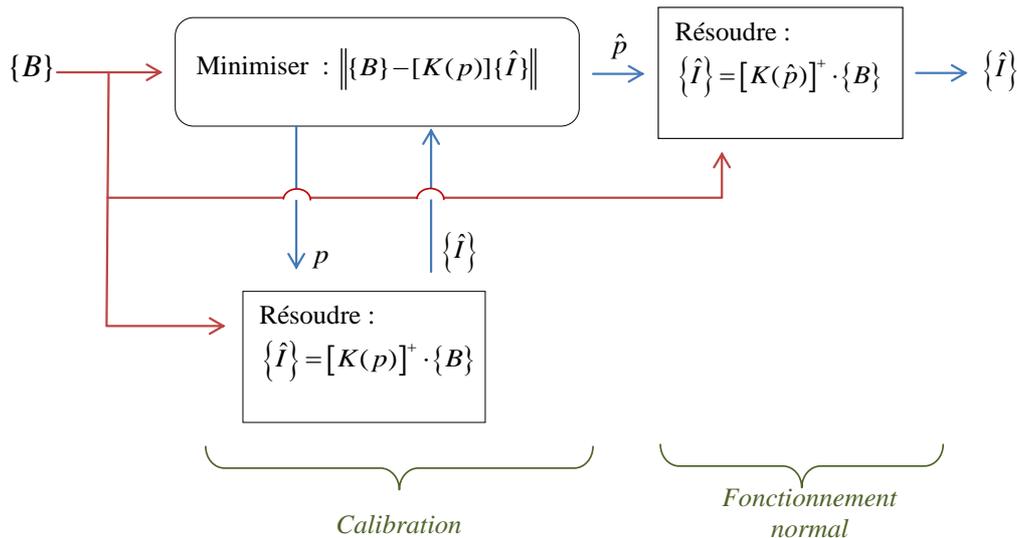


Figure 2.2 : Organigramme de la méthode de reconstruction des courants

- 2) Par la suite, la position des conducteurs issue de la première étape est considérée connue et constante : les courants dans les conducteurs sont alors déterminés au fil du temps par résolution d'un problème inverse linéaire, beaucoup plus simple que le premier. Dans cette partie (fonctionnement normal), la matrice de configuration $[K]$ étant fixée, les courants sont estimés en résolvant le système linéaire :

$$\{\hat{I}\} = [K]^+ \cdot \{B\} \quad (6)$$

Cette étape, très rapide, sera exécutée en temps réel.

2.2 Algorithme de reconstruction avec blindage

En pratique, vu les contraintes du milieu de la mesure industrielle auquel les capteurs de courants sont destinés, la mesure sera perturbée par des sources de rayonnement électromagnétique extérieures. La source des perturbations peut être la présence d'autres câbles et/ou des appareils électriques placés à proximité. Afin de rendre le dispositif de mesure moins sensible à une telle perturbation, nous avons opté pour l'utilisation d'un blindage ferromagnétique, qui est composé d'un matériau de perméabilité magnétique très élevée.

La présence de l'écran ferromagnétique invalide les hypothèses de notre modélisation précédente. L'effet le plus important sur les calculs est qu'il n'est plus possible d'utiliser la simple loi de *Biôt-Savart* pour calculer l'induction magnétique ; par contre, l'équation (4) reste valable, à condition de savoir calculer les coefficients de la matrice de configuration $[K]$. Il existe plusieurs méthodes numériques qui permettent de calculer avec précision le champ magnétique en présence de matériaux ferromagnétiques ; nous avons opté pour les logiciels Flux (commercial) et GetDP (libre). Dans nos modélisations, l'écran magnétique (ou blindage) est constitué d'un cylindre en mu-métal (perméabilité approximative : $\mu_r = 20000$) dont l'axe coïncide avec celui du câble multiconducteur. Les magnétomètres se trouvent bien évidemment entre le câble et l'écran magnétique.

Le problème qui se pose est qu'il n'est pas possible d'embarquer un logiciel d'éléments finis dans un microprocesseur intégrable dans notre capteur – du moins, pas pour un capteur à bas coût et faible consommations. Une solution est possible grâce à l'hypothèse que le blindage magnétique n'est pas saturé : dans ce cas, il devient possible de réaliser hors ligne les calculs pour un certain nombre de positions d'un seul conducteur, et utiliser le principe de superposition pour calculer la matrice $[K]$ pour une configuration quelconque du capteur. Il n'est pas nécessaire de stocker les détails des calculs réalisés hors ligne : seule l'induction mesurée par les magnétomètres est importante : ainsi il est possible d'embarquer dans une mémoire de taille réduite l'ensemble des valeurs nécessaires pour calculer $[K]$ sous la forme d'un tableau de données (*lookup table*).

Grâce à ce modèle Eléments Finis du capteur, il est possible de calculer la réponse de tous les magnétomètres pour un couple de paramètres (R_{cap}, θ_{cap}) quelconque, et des conducteurs en nombre M quelconque, dans n'importe quelle position $(R_{cond}, \theta_{cond})$.

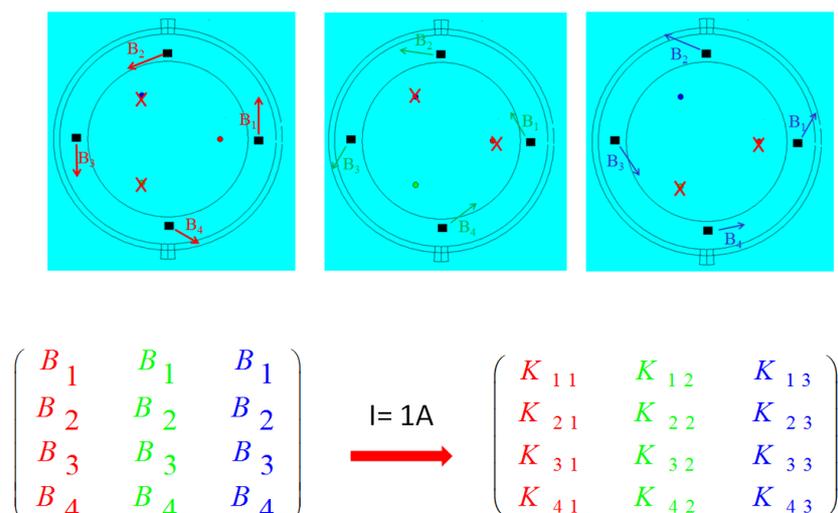


Figure 2.3 Exemple de calcul de $[K]$ à partir d'un capteur avec quatre magnétomètres (à chaque fois, les conducteurs non actifs sont marqués par une croix).

A titre d'illustration, un exemple de construction de la matrice $[K]$ à partir de valeurs d'induction stockées dans la *lookup table* est présenté sur la Figure 2.3. Chaque colonne de même couleur représente les résultats de calculs des champs pour un conducteur à une position donnée. Pour cet exemple, la matrice $[K]$ est de dimension $4 \times 3 = (\text{nombre de magnétomètres mesurant une composante du champ}) \times (\text{nombre de conducteurs})$. Puisque chaque conducteur actif est parcouru par un courant de 1 A, la matrice des coefficients $[K]$ contient les valeurs de l'induction magnétique calculées à l'emplacement de chaque magnétomètre.

3. Résultats de simulations

Ici, nous présentons les résultats de simulations obtenus lors de diverses modélisations réalisées à l'aide des algorithmes que nous avons précédemment décrit. Cette partie se décompose de la manière suivante :

- Dans un premier temps, nous présentons les résultats de reconstruction des courants en absence du blindage ferromagnétique autour du capteur.
- Ensuite, nous présentons les résultats de reconstruction de courant en présence du blindage ferromagnétique.

3.1 Modélisation du capteur de courants sans blindage

Tout au long de nos travaux de simulations du capteur de courants, les conducteurs sont considérés comme ayant une forme cylindrique, de longueur infinie, et parallèles les uns aux autres. Pour démontrer le fonctionnement de l'algorithme de reconstruction des courants, nous avons commencé par un cas idéal, où seuls les magnétomètres et les conducteurs du câble sont présents dans l'environnement de mesure (sans blindage), en absence de toute perturbation extérieure. Ayant obtenu des résultats de reconstruction parfaits, nous avons relancé une reconstruction en présence de bruit magnétique.

Nous avons additionné aux valeurs « exactes » d'inductions magnétiques une variable aléatoire Gaussienne, de moyenne nulle, dont l'écart-type représente 5% du maximum des inductions mesurées par les magnétomètres. Elle est égale à un pourcentage du maximum des inductions magnétiques calculées par les magnétomètres. La simulation avec ce bruit de $0.05 \times \max(B_i)$ est réalisée, avec les paramètres du Tableau 3.1 suivant et le résultat obtenu sur la reconstruction de la position est illustré sur la Figure 3.1.

Tableau 3.1 Reconstruction des courants en présence d'un bruit magnétique σ

N	M	$I_1[A]$ réel	$I_1[A]$ retrouvé	$I_2[A]$ réel	$I_2[A]$ retrouvé	$I_3[A]$ réel	$I_3[A]$ retrouvé	σ
8	3	10	9.5	- 5	- 4.6	- 5	-4.5	$0.05 * \max(B_i)$

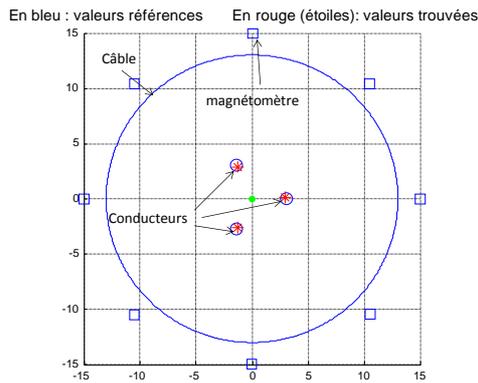


Figure 3.1 Reconstruction des positions des conducteurs

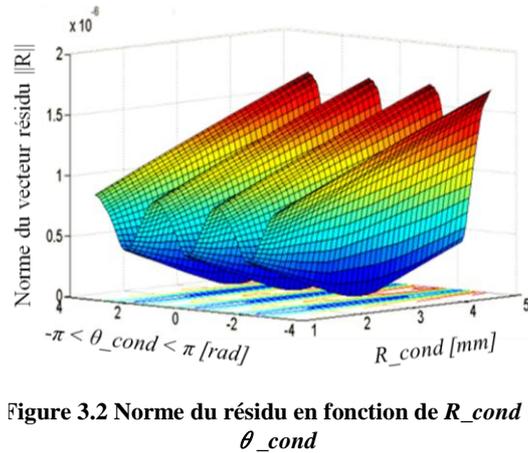


Figure 3.2 Norme du résidu en fonction de R_{cond} et θ_{cond}

On note que la reconstruction des positions est toujours valable mais avec une erreur relative sur l'estimation des courants efficaces qui peut atteindre 10 % (soit le double du bruit de l'induction magnétique B).

La recherche des positions des conducteurs \hat{p} se fait en identifiant le minimum de la fonction résidu :

$$\|R\| = \arg \min \left\{ \|B\| - [K(p)]\{\hat{I}\} \right\} = \left\| \{B\} - [K(p)][\hat{K}(p)]^+ \cdot \{B\} \right\| \quad (7)$$

Sur la **Figure 3.2** la norme du résidu R pour toutes les positions (R_{cond} , θ_{cond}) possibles est tracée.

Nous remarquons que cette courbe possède trois minimums qui se situent aux trois coordonnées correspondant aux positions des trois conducteurs :

$$\begin{cases} (R_{cond_1}, \theta_{cond_1}) = (3 \text{ mm}, 0^\circ) \\ (R_{cond_2}, \theta_{cond_2}) = (3 \text{ mm}, 120^\circ) \\ (R_{cond_3}, \theta_{cond_3}) = (3 \text{ mm}, 240^\circ) \end{cases} \quad (8)$$

3.2 Modélisation du capteur de courants avec blindage

Après avoir développé la *lookup table* qui sera utilisée aussi par le prototype expérimentalement, nous allons tester l'algorithme de reconstruction avec blindage afin de voir si la méthode est toujours valable en présence du blindage. Comme pour les simulations de reconstruction sans blindage, nous ne disposons pas à ce stade des mesures magnétiques nécessaires pour une reconstruction des courants. Donc les inductions magnétiques doivent être calculées au préalable en fixant les positions et les courants des conducteurs. Il est possible de rajouter aux inductions magnétiques pré-calculées du bruit magnétique qui reflète le bruit de mesure des magnétomètres.

Nous rappelons que la reconstruction avec blindage est aussi constituée de deux parties :

- 1) Recherche des positions des conducteurs estimées.
- 2) Calcul des courants estimés grâce aux positions préalablement obtenues en 1)

Pour valider la méthode de reconstruction avec blindage nous présentons l'exemple suivant :

Les courants traversant les conducteurs d'un câble triphasé ($M = 3$) sont utilisés pour la simulation de l'algorithme de reconstruction avec blindage. Ces courants sont équilibrés tel que :

$$\begin{aligned} i_{Max,1} &= i_{Max,2} = i_{Max,3} = 50 \text{ A} \\ i_{eff,1} &= i_{eff,2} = i_{eff,3} = 35,4 \text{ A} \end{aligned}$$

Cette situation de courants équilibrés reflète le cas où le câble serait la source de l'alimentation d'une charge triphasée équilibrée, avec 120° de déphasage entre les trois phases des courants. Huit magnétomètres ont été utilisés. Comme on pouvait s'y attendre, le résultat obtenu sans bruit magnétique est aussi bon que la méthode n'utilisant pas de blindage. Le fait d'ajouter un blindage ne dégrade pas les performances de l'algorithme. Donc nous avons rajouté le bruit blanc Gaussien pour mieux nous rendre compte de la robustesse de l'algorithme.

Le **Tableau 3.2** présente le résultat sur l'estimation des courants de cette simulation pour deux niveaux de bruit rajoutés. (Signal/Bruit = 3.3 et Signal/Bruit = 10).

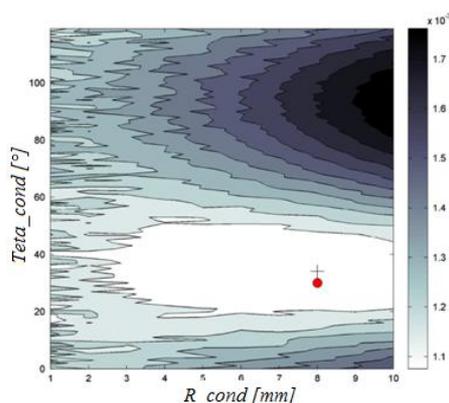


Figure 3.3 Variation de la norme du résidu $\|R\|$ en nuancé de couleurs en fonction des coordonnées des conducteurs R_cond et θ_cond . (+ position estimée, o = position réelle)

Tableau 3.2 : Résultat de reconstruction avec blindage et en présence d'un bruit magnétique

	$I_{eff,1}$ [A]	$I_{eff,2}$ [A]	$I_{eff,3}$ [A]
Courant réel efficace	35.4	35.4	35.4
Signal/Bruit = 10	36.1	35.8	35.8
Signal/Bruit = 3.3	36	38.9	39.2

Le résultat de reconstruction de la position apparaît sur la **Figure 3.3**. Elle représente la norme du résidu en nuancé de couleurs en fonction des positions des conducteurs. On note qu'il y a un minimum retrouvé par notre algorithme qui correspond aux valeurs des positions des conducteurs avec une bonne précision pour R_cond et 5° d'erreur pour θ_cond .

Seule la composante tangentielle des magnétomètres est utilisée pour cette simulation aussi. Ce choix s'est établi car la matrice $[K]$ créée par l'analyse des inductions magnétiques en composantes tangentielles, fournit un conditionnement inférieur à celui calculé avec les composantes radiales.

4. Résultats expérimentaux

4.1 Le banc de tests

L'objectif du banc de tests est de mesurer, via des magnétomètres, les valeurs des inductions magnétiques expérimentales émises pour une configuration du câble. En effet, cela va nous permettre dans un premier temps, de tester les différentes versions des magnétomètres afin de choisir la plus adaptée à notre application et dans un deuxième temps, une fois ce choix effectué, de tester le capteur de courants, constitué de la couronne de magnétomètres. Initialement, nous avons réalisé la structure qui nous a permis de tester un seul magnétomètre à la fois pour réaliser la cartographie du champ magnétique autour d'un câble (cf.

Figure 4.1 Photo de la structure du banc de test.). Cette démarche nous a permis de finaliser d'abord la conception d'un magnétomètre inductif, puis nous avons lancé la production de la version finale du magnétomètre en huit exemplaires nécessaires au capteur de courants. Cette structure qui est illustrée sur la

Figure 4.1 Photo de la structure du banc de test., permet de faire passer un câble au travers de deux roulements disposés l'un en face de l'autre. Ainsi nous pouvons le faire tourner sur lui-même de manière précise et positionner un magnétomètre à la distance voulue du centre du câble.

Les magnétomètres que nous avons choisi d'utiliser pour notre application sont en effet de technologie inductive. Ce choix s'est orienté vers ce type de magnétomètre pour les raisons suivantes :

- Grâce au développement de l'électronique actuel, il n'est plus nécessaire de réaliser une grande section des bobines de ces magnétomètres pour obtenir une bonne sensibilité.
- La possibilité de faire une sonde à détection mixte du champ magnétique et du champ électrique en utilisant les bobines de détection semble intéressante.
- La conception du magnétomètre qui sert à notre prototype de capteur de courant, nous permet de l'adapter aux changements au cours de notre projet (notamment pour les composantes du champ magnétique à mesurer).
- La mesure qui est demandée dans le cahier des charges du projet est une mesure sur un réseau alternatif et à bas coût. Ces deux critères correspondent parfaitement aux magnétomètres inductifs.

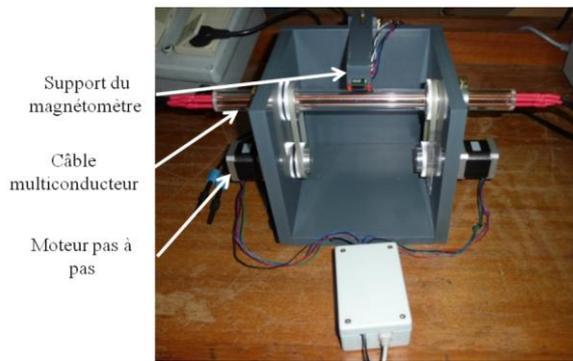


Figure 4.1 Photo de la structure du banc de test.

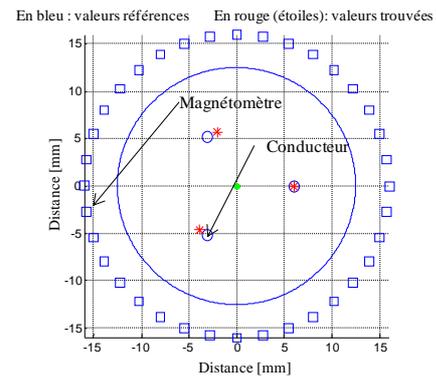


Figure 4.2 Reconstruction des positions des conducteurs.

Nous pouvons obtenir, grâce à ce dispositif (cf. Figure 4.1) qui est doté d'un seul magnétomètre et grâce à une acquisition des signatures de champs magnétiques à chaque pas de rotation du câble de 10° , des acquisitions sur 360 degrés, l'équivalent d'une mesure réalisée par un capteur de courants doté de 36 magnétomètres. La Figure 4.2 montre les résultats obtenus avec l'algorithme de reconstruction des positions des conducteurs.

Les courants retrouvés ainsi que leurs erreurs de reconstruction sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 4.1 Reconstruction des courants.

N	M	R_{cap} [mm]	I_1 [A]		I_2 [A]		I_3 [A]	
			Ref	retrouvé	Ref	retrouvé	Ref	retrouvé
36	3	16	11.5	12.7	11.5	11.6	11.5	13.54

Les courants retrouvés I_1 , I_2 et I_3 sont proches de la valeur de l'amplitude réelle du courant qui parcourt les conducteurs avec des erreurs relative respectives de 10%, 1% et 17%.

4.2 Test du démonstrateur capteur de courants avec blindage

La configuration du câble pour les tests est la suivante :

- Les courants traversant les trois conducteurs $I = 7$ A efficace (triphase équilibré 9.87 A crête).
- Les trois conducteurs sont espacés de 120° .
- Les conducteurs sont à une même distance $R = 6$ mm du centre du câble.
- La position des conducteurs par rapport aux magnétomètres est inconnue

Le dispositif du capteur de courants avec blindage mis en place sur le banc de tests est montré sur la Figure 4.3.

Les résultats de mesures des inductions magnétiques émises par le câble sont comparés avec les résultats de simulation du modèle éléments finis que nous avons enregistré dans la *lookup table*. Ils sont présentés sur le graphique de la Figure 4.4. Nous avons réalisé la reconstruction des courants à partir de plusieurs mesures des inductions magnétiques correspondant à 17 positions aléatoires des conducteurs du câble aux caractéristiques connues. Ces positions sont fixées par la rotation du câble sur lui-même. La Figure 4.5 présente les différentes erreurs relatives obtenues sur la composante directe du système triphasé pour chacune de ces positions.

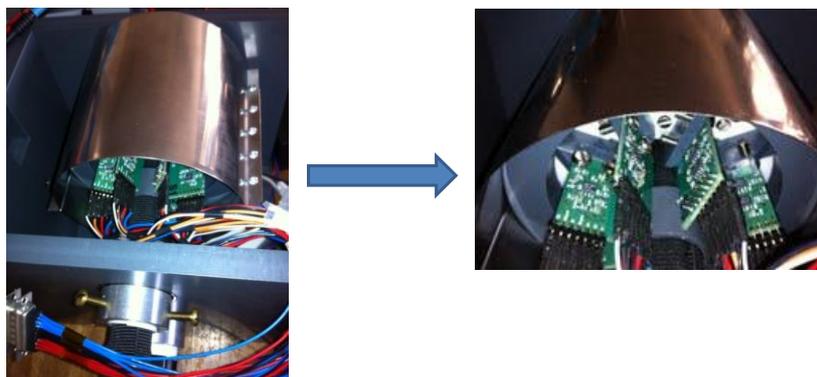


Figure 4.3 capteur de courants avec blindage monté sur le banc de test.

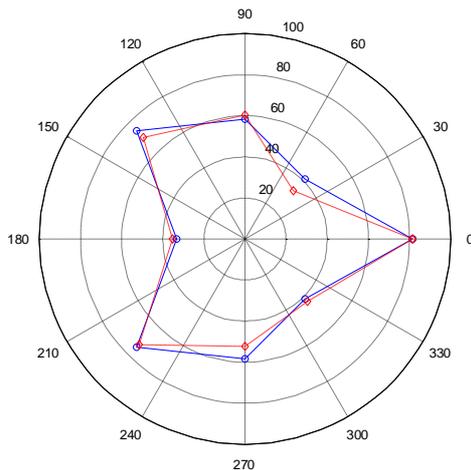


Figure 4.4 Comparaison entre les inductions mesurées (en rouge - -) et celles simulées (en bleu -) pour les trois conducteurs.

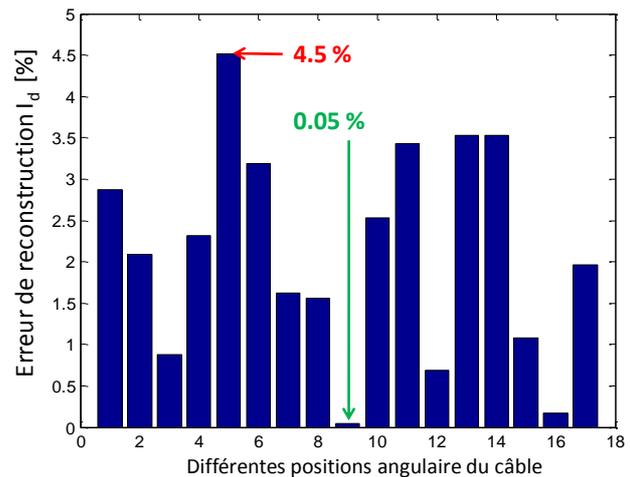


Figure 4.5 Erreur pour différentes positions du câble

Nous remarquons que malgré une calibration préalable des magnétomètres nous n'arrivons toujours pas à obtenir une superposition totale des points de mesure avec les points de simulation. Ces imperfections peuvent être dues à la structure non figée du capteur de courants (système de glissières) qui implique des changements de positions des magnétomètres qui ne sont pas maîtrisables.

Sur les 17 positions différentes aléatoires des conducteurs, il résulte une erreur moyenne de 1.83 % sur la reconstruction des composantes directes des courants. Ces résultats ne sont pas ceux attendus par le cahier des charges (1%) mais ils sont encourageants d'autant plus que la calibration du capteur peut être améliorée.

5. Conclusion

Le suivi précis des flux énergétiques est l'une des priorités pour les économies d'énergie dans un système industriel. C'est grâce à un suivi des flux énergétiques qu'il sera possible d'effectuer un bilan et d'identifier les surconsommations d'une installation. Le projet de recherche dans lequel s'inscrit notre travail a justement pour objectif de maintenir le meilleur point de fonctionnement d'une usine par la mesure des grandeurs physiques, parmi lesquelles le courant circulant dans les équipements électriques. Il existe plusieurs instruments dans le commerce permettant la mesure précise du courant, mais leur installation représente un coût élevé pour les industriels. Elle nécessite une ouverture du circuit électrique et donc une interruption de l'alimentation électrique (arrêt de la chaîne de production). Nous nous sommes donc intéressés à la mesure sans contact des courants dans un câble polyphasé.

Le démonstrateur du capteur de courants que nous avons réalisé est composé d'une couronne de magnétomètres, enveloppée d'une coque ferromagnétique faisant office de blindage magnétique contre les émissions de champ extérieur. Ainsi, par la mesure d'une signature des champs magnétiques rayonnés par les conducteurs à l'intérieur du câble, ce dispositif associé à des algorithmes de reconstruction que nous avons développés, permet de remonter aux intensités et aux phases individuelles des conducteurs dans le câble totalement opaque. La méthode présentée ici est non intrusive et complètement indépendante des positions des conducteurs.

Comme nous l'avons vu dans cet article, la reconstruction des courants en présence d'un blindage ferromagnétique se fait par l'intermédiaire d'une *lookup table* : cette table est calculée hors-ligne par un modèle éléments finis, puis interpolée en temps réel afin d'avoir le plus de valeurs intermédiaires possibles. Avec cette table d'interpolation, nous pouvons envisager l'intégration de cette dernière dans un système embarqué aux capteurs de courant avec un algorithme de reconstruction, et ainsi obtenir une réalisation autonome du capteur de courant, avec un temps de calcul réduit, compatible avec les capacités d'un microcontrôleur.

Un banc de tests ainsi que les résultats expérimentaux du dispositif sont présentés. Les résultats que nous avons obtenus montrent qu'une reconstruction des courants est possible, avec des erreurs de reconstruction par rapport à la composante directe des courants comprises entre 0.05% et 4.5%, suivant le positionnement du capteur de courants.

Comme solutions pour améliorer le système, une méthode de calibration du capteur plus appropriée est prévue. Cette méthode devra permettre d'éliminer les erreurs dues aux positionnements des magnétomètres. La création d'un dispositif réalisé sur un support souple est aussi envisagée pour la suppression des problèmes dus à l'instabilité de la position des magnétomètres, mais aussi pour un gain en volume du capteur. Enfin, il est aussi possible de mesurer les courants continus en ajoutant des magnétomètres adaptés.

Références

- [1] G. D'Antona, L. Di Rienzo, R. Ottoboni, and A. Manara, "Processing magnetic sensor array data for AC current measurement in multiconductor systems", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol.50, No.5, pp. 1289-1295, Oct.2001.
- [2] L. Di Rienzo, R. Bazzocchi and A. Manara, "Circular arrays of magnetic sensors for current measurement", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 50, No 5, Oct. 2001, pp. 1093-1096.
- [3] P. Ripka. "Current sensors using magnetic materials ", *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, pp:587-592, June 2004.
- [4] C. Xiao, L. Zhao, T. Asada, W.G. Odendaal, and J.D. van Wyk, "An overview of integratable current sensor technologies, In Industry Applications", *Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting*. Conference Record of the, volume 2, pp.1251-1258 vol.2, Oct. 2003.
- [5] S. Ziegler, R.C. Woodward, H. Ho-Ching Iu, "Current Sensing Techniques: A Review", *Sensors Journal, IEEE*, April 2009 Vol. 9, p. 354-376.
- [6] A.M. Msaed, «Micro capteur magnétique de mesure de courant et traitement intégré», Thèse de Doctorat, Grenoble I, 2009.
- [7] P. Ripka, P. Kejik, P. Kaspar, K. Draxler, "Precise DC current sensors", *Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 1996. IMTC-96. Conference Proceedings. 'Quality Measurements: The Indispensable Bridge between Theory and Reality'., *IEEE* , vol.2, no., pp.1479-1483 vol.2, 1996.
- [8] Xisheng Li; Jia You; Xiongying Shu; Ruiqing Kang, "Electric current measurement using AMR sensor array," *Mechatronics and Automation*, ICMA 2009. International Conference on , Aug. 2009, pp.4085-4089.
- [9] Klaus Bohnerta and al, "Fiber-optic dc current sensor for the electro-winning industry" *Proc. Of SPIE* Vol. 5855 (SPIE, Bellingham, WA, 2005) 210-213.
- [10] Yong Wook Lee, Ilyong Yoon, Byoung-ho Lee, "A simple fiber-optic current sensor using a long-period fiber grating inscribed on a polarization-maintaining fiber as a sensor demodulator", *Sensors and Actuators*, Volume 112, Issues 2-3, May 2004, pp. 308-312.
- [11] Y. W. Joel M. Libove, Fremont, Calif. 94539; Jerome R. Singer, 2917 Avalon Ave., Berkeley, Calif. 94705, "Apparatus for measuring voltages and currents using non-contacting sensors," 1994.
- [12] G. I. Cavagnolo, Bottauscio, Oriano (IT), Crotti, Gabriella (IT), Zucca, Mauro (IT), Chiampi, Mario (IT), "Method and apparatus for measuring electric currents in conductors," Herholdt, Controls S. R. L. (IT) Patent, 2006.
- [13] Gerard L. Cullen; Michael V. Smith, "Current and voltage measurement device," Austin, TX (US) Patent, 2007.
- [14] Kun-Long Chen, Nan-Ming Chen. Taipei (TW), "Method and apparatus for current measurement using hall sensors without iron cores," 2008.
- [15] T. C. Joseph Yossi Harlev, TX (US); Leonard Johnson, Leander, TX (US); Rhad Veazey, Paradise, TX (US); Theo dore Konetski, Azle, TX (US), "optical sensor assembly for installation on a current carrying cable," 2012.
- [16] A. P. F. Wael El-Essawy, Thomas Walter Keller,, "Multi-conductor cable current and voltage sensors," 2012.
- [17] Menad BOURKEB et al, " device for measuring currents in the conductors of a sheathed cable of a polyphase network ", PCT Patent WO/2013/068360, FR2982672-A1 , 10 novembre 2011.