

DE LA POSSIBILITE DE MESURER DE FORTES EPAISSEURS EN METAUX FERREUX PAR LA METHODES DES COURANTS DE FOUCAULT

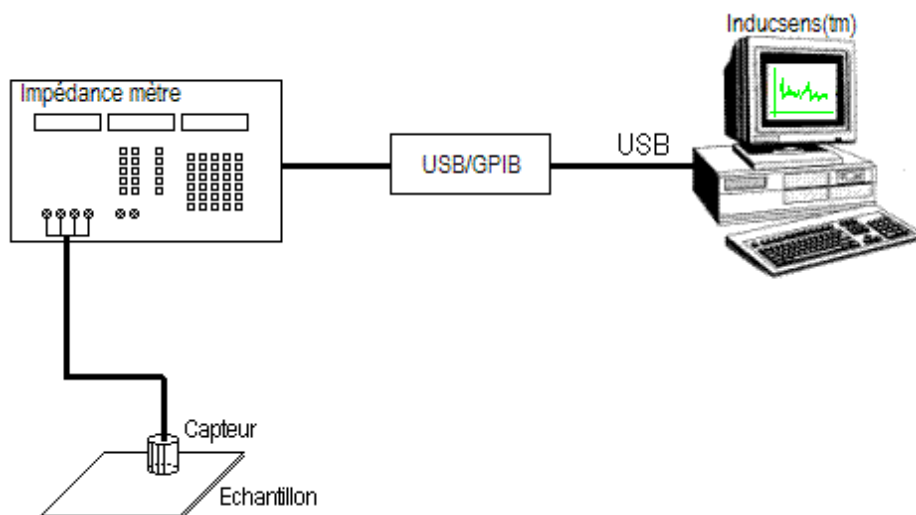
LÊ MINH-QUANG, SCIENSORIA
7, rue Ravel F-35170 BRUZ France
tél. : 02 99 57 19 71 fax. : 02 99 57 18 78
e-mail : info@sciensoria.fr, Internet : <http://www.sciensoria.fr>

Résumé – Dans un article précédent, nous avons abordé la mesure de la conductivité électrique des métaux ferreux. Pour rappel, la difficulté principale inhérente aux métaux ferreux réside dans une forte perméabilité magnétique, qui connaît, de surcroît, une variabilité extrême. Nos recherches sur la mesure de la conductivité électrique par courants de Foucault ont permis également de conclure sur la faisabilité de la mesure de l'épaisseur du matériau.

La méthode des courants de Foucault, si elle était applicable, permettrait de simplifier grandement la mise en œuvre d'une mesure de l'épaisseur d'une paroi :

- § mesure réalisable à partir d'une seule face,
- § mesure sans contact électrique, donc forcément non destructive,
- § temps de mesure très court, entraînant la possibilité de réaliser un grand nombre de mesure afin de « cartographier » la pièce à mesurer, etc.

Dans cet article, nous allons discuter des conditions qui permettent de réussir une mesure de l'épaisseur métallique ferreuse.



Synoptique du système Conducens™

1 Introduction

Les métaux ferreux tels que les diverses nuances d'acier et de fontes d'acier possèdent des caractéristiques magnétique et électrique extrêmement variables, ce qui empêche nombre d'applications du contrôle non destructif par courants de Foucault.

D'une part, la présence d'une perméabilité magnétique forte limite la pénétration des courants de Foucault à quelques millimètres sous la surface du matériau.

D'autre part, la variation de la perméabilité magnétique et de la conductivité électrique d'une pièce à l'autre, voire d'une zone à l'autre sur une même pièce provoque des erreurs considérables dans l'interprétation du signal en épaisseur.

Par exemple, pour un échantillon de fonte d'acier fourni par Véolia, la perméabilité magnétique relative, μ_r , a été estimée à 219. A cette valeur, la profondeur de pénétration du champ magnétique en fonction de la fréquence d'excitation du capteur est donnée dans le tableau ci-dessous (partie gauche) :

$\mu_r = 219$		$\mu_r = 3$	
Fréquence (f) en Hertz	Profondeur de pénétration (δ) en mm	Fréquence (f) en Hertz	Profondeur de pénétration (δ) en mm
5 000	1,2	5 000	10
6 800	1	6 800	8,8
9 260	0,85	9 260	7,6
12 600	0,73	12 600	6,5
17 150	0,63	17 150	5,6
23 330	0,54	23 330	4,8
31 750	0,46	31 750	4,1
43 200	0,4	43 200	3,5
58 790	0,34	58 790	3
80 000	0,29	80 000	2,6

Etant donné que l'épaisseur de l'échantillon est de 3,5 mm, il n'est pas possible de la mesurer à 5 000 Hz.

La solution consiste à soumettre l'échantillon à un champ magnétique externe. Comme conséquence, la perméabilité magnétique μ_r chute rapidement. Pour $\mu_r = 3$, on obtient des valeurs de la profondeur de pénétration dans la partie droite du tableau ci-dessus.

Il se pose alors le problème d'évaluer la perméabilité magnétique μ_r et de la conductivité électrique σ à chaque condition de magnétisation précise afin de déterminer, entre autres, la profondeur de pénétration du champ. Pour ce faire, traditionnellement, il faut monter des expériences assez lourdes dans les conditions d'un laboratoire.

Le système ConducSens™ comprenant un analyseur d'impédance associé à un capteur à courants de Foucault, et le logiciel EddySens™ permet de déterminer ces paramètres de manière *non destructive*.

2 Principe de fonctionnement du contrôle non destructif par courants de Foucault

Dans notre précédent article, nous avons décrit le principe de fonctionnement d'un capteur à courants de Foucault. La relation entre les grandeurs mesurables en sortie du capteur et les paramètres de la cible, échantillon sous test, est représentée par l'équation suivant :

$$Z = f(s, m, e, \text{lift-off})$$

Z est l'impédance complexe, $Z = R + jX$. R et X sont mesurables par un analyseur d'impédance.

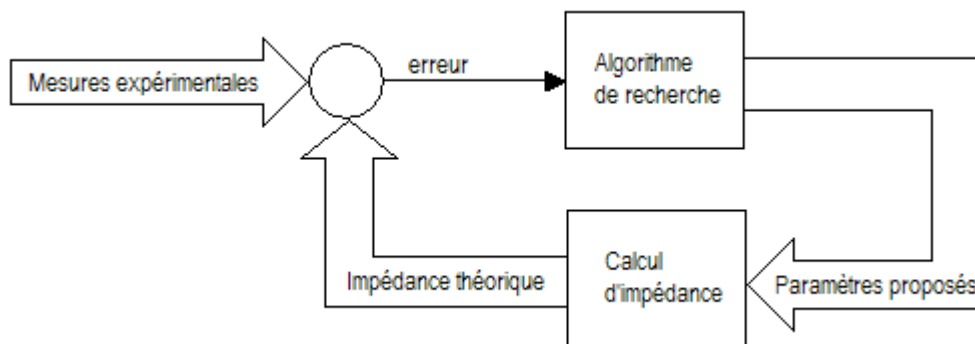
s : conductivité électrique de la cible

m : perméabilité magnétique de la cible

e : épaisseur de la cible

lift-off : distance capteur-cible

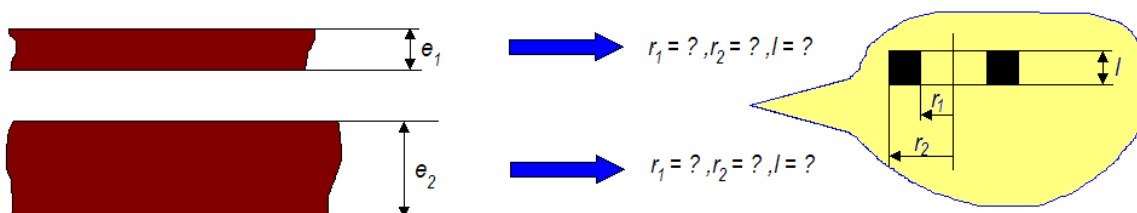
2.1 Procédé de détermination des paramètres de la cible par Eddysens™



Le procédé de détermination des paramètres de la cible par Eddysens™ a été expliqué dans l'article précédent. Il a été démontré qu'Eddysens™ a pu déterminer les paramètres s , μ_r et *lift-off* avec une précision appréciable lorsque μ_r est réduite par l'application d'un champ magnétique externe.

La possibilité de mesurer μ_r et s ouvre directement l'accès à l'estimation de l'épaisseur de pénétration du champ électromagnétique ou la possibilité de mesurer l'épaisseur e , en d'autres termes.

Nous présenterons plus loin que l'utilisation d'Eddysens™ permet de déterminer les dimensions nécessaires d'un capteur pour la mesure d'une épaisseur donnée.



3 Estimation de l'épaisseur d'un échantillon de fonte d'acier

3.1.1 Rappel du procédé de mesure de la conductivité électrique avec Eddysens™

1. Déterminer l'épaisseur de l'échantillon
2. Placer le capteur au centre de l'échantillon. La largeur de l'échantillon doit être suffisamment grand par rapport au diamètre du capteur afin d'éviter les effets de bord.
3. Déterminer une plage de fréquence d'excitation du capteur qui permet de balayer une zone de fréquence suffisamment large afin de récolter des informations complémentaires sur le matériau.
4. Lancer la mesure en mode balayage en fréquence.
5. Lancer la procédure d'inversion pour calculer les 3 paramètres inconnus : *lift-off*, conductivité électrique s , perméabilité relative m . L'épaisseur e est entrée manuellement comme paramètre fixe (case « Var » correspondante décochée).

Var Paramètres			
P1 (e1)	<input type="checkbox"/>	3.5	mm <input type="radio"/>
P2 (lift-off)	<input checked="" type="checkbox"/>	0.1907962	mm <input type="radio"/>
P3 (cond1)	<input checked="" type="checkbox"/>	1705601.9	S/m <input checked="" type="radio"/>
P4 (perm1)	<input checked="" type="checkbox"/>	219.89950	- <input type="radio"/>
P5 (cond2)	<input type="checkbox"/>	0	S/m <input type="radio"/>
P6 (perm2)	<input type="checkbox"/>	1	- <input type="radio"/>

® **Remarque :**

Dans un cas réel où l'épaisseur ne peut être mesurée manuellement (cible accessible uniquement par une face) :

- § il faut utiliser un capteur spécialement conçu de telle sorte qui ne soit pas sensible à l'épaisseur nominale de la cible.
- § Il convient de répéter cette mesure sur différents endroits de l'échantillon afin de vérifier la validité de l'hypothèse sur l'épaisseur nominale.

3.1.2 Procédé de mesure de l'épaisseur d'un échantillon dont les propriétés s et m_r ont été mesurées par Eddysens

Supposons que nous ayons à mesurer l'épaisseur de l'échantillon à un autre endroit où la mesure de conductivité électrique a été faite.

1. Il est légitime de considérer que la conductivité électrique s et la perméabilité relative m_r soient inchangées ou peu différentes par rapport au 1^{er} endroit. On peut donc utiliser ces 2 paramètres comme paramètres fixes (cases « Var » correspondantes décochées).
2. Seuls les 2 paramètres « épaisseur » et lift-off sont à rechercher. Le lift-off doit être recalculé car le capteur a changé de position, et il n'est pas possible de lui garantir une distance capteur-cible identique. Les cases « Var » correspondantes seront cochées.
3. **Initialisation des paramètres à rechercher** : il suffit de leur donner des valeurs proches de leurs valeurs nominales.

Var Paramètres			
P1 (e1)	<input checked="" type="checkbox"/>	3.5	mm
P2 (lift-off)	<input checked="" type="checkbox"/>	0.1907962	mm
P3 (cond1)	<input type="checkbox"/>	1705601.9	S/m
P4 (perm1)	<input type="checkbox"/>	219.89950	-
P5 (cond2)	<input type="checkbox"/>	0	S/m
P6 (perm2)	<input type="checkbox"/>	1	-

4. Charger des nouvelles données correspondant à l'endroit nouveau (et non celles qui ont servi à la mesure de s et de μ_r).
5. Lancer la procédure d'inversion en cliquant sur le bouton « Inversion ».

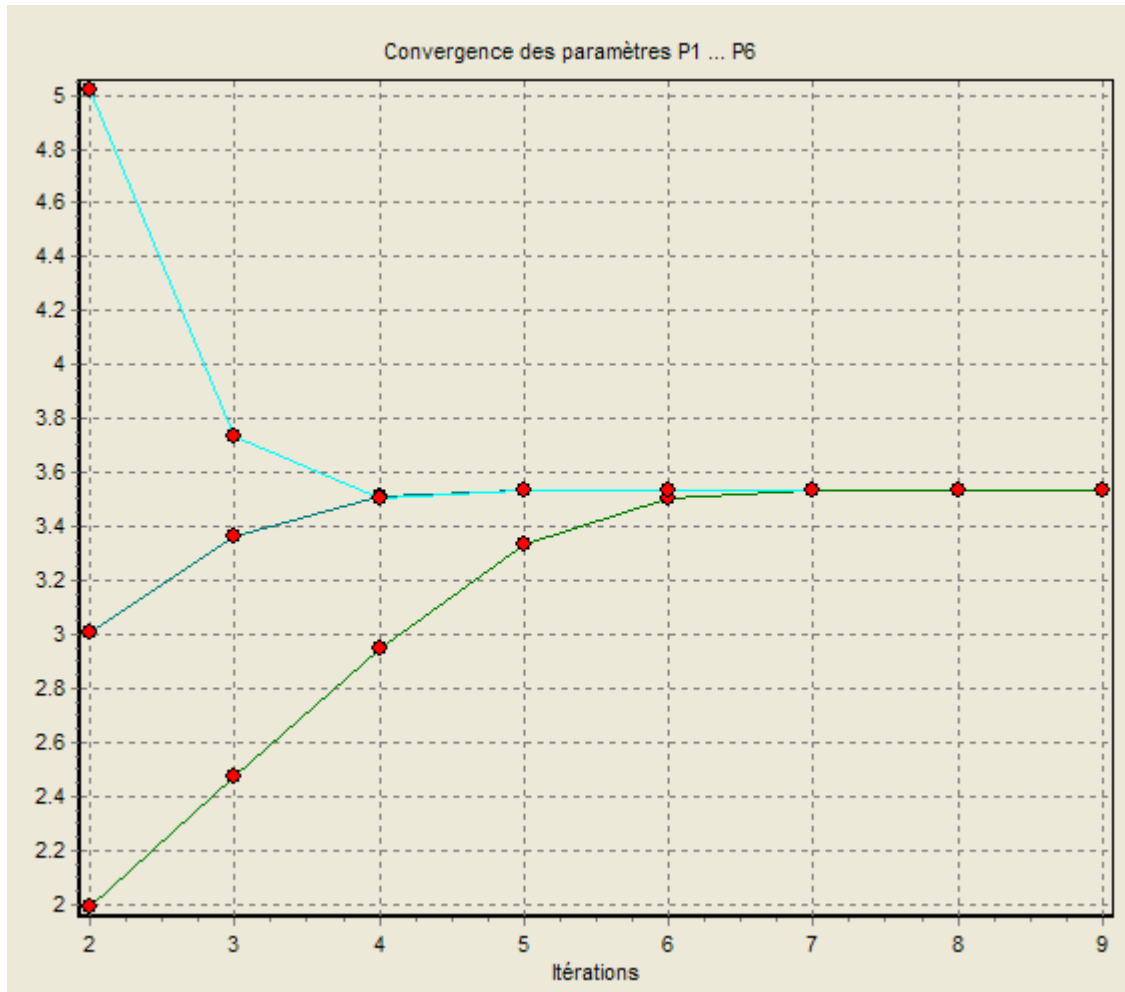
3.1.3 Résumé de la procédure de mesure de l'épaisseur de fonte d'acier

1. Etape n°1 : mesurer la conductivité électrique et la perméabilité magnétique du matériau avec un capteur adapté
2. Etape n°2 : utiliser les valeurs déterminées à l'étape n°1 pour déterminer l'épaisseur e et le *lift-off*.

4 Discussion des résultats

Les échantillons fournis par Véolia ont des épaisseurs allant de 2,41 mm à 5 mm. Nous présentons ci-dessous quelques cas typiques.

4.1 Echantillon n°1 – épaisseur $e_0= 3,5$ mm

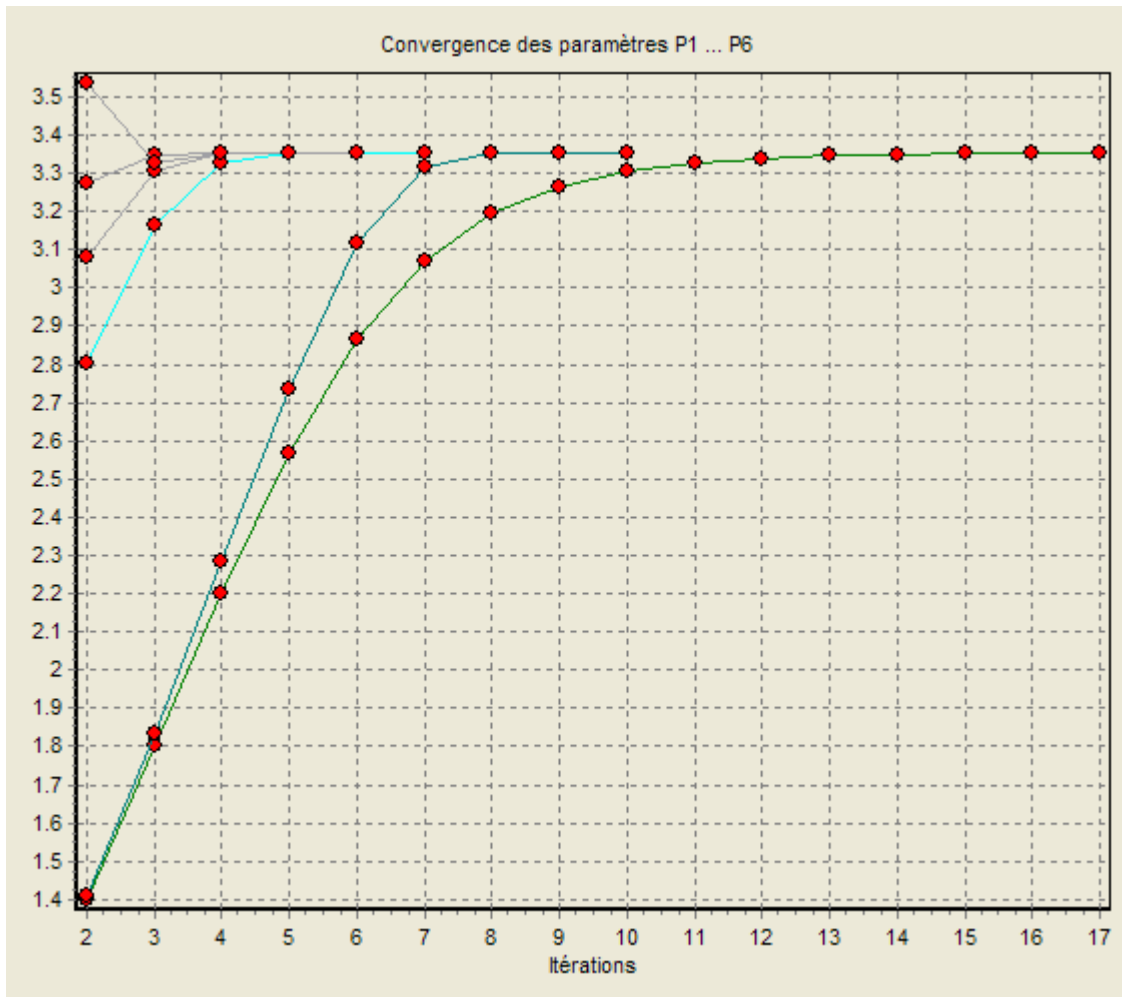


Rappel : la procédure de calcul de l'épaisseur est une procédure d'inversion itérative. On attribue une valeur choisie par hasard sur une plage située autour de la valeur nominale, et on réitère les calculs jusqu'à ce que les valeurs d'impédance calculées soient suffisamment proches des valeurs mesurées.

Conclusions :

- § Bonnes convergences vers l'épaisseur réelle 3,5 mm à partir de différentes valeurs d'initialisation.
- § Ceci montre que le capteur (capteur n°1) utilisé est adapté pour mesurer cette épaisseur (3,5 mm).

4.2 Echantillon n°10 – épaisseur $e_0= 5$ mm



Conclusions :

- § Convergences difficiles vers une valeur de 3,35mm à partir de différentes initialisations, alors que l'épaisseur réelle est de 5 mm (échantillon n°10).
- § Ceci montre que le capteur choisi (n°1) n'est pas adapté pour mesurer cette épaisseur.

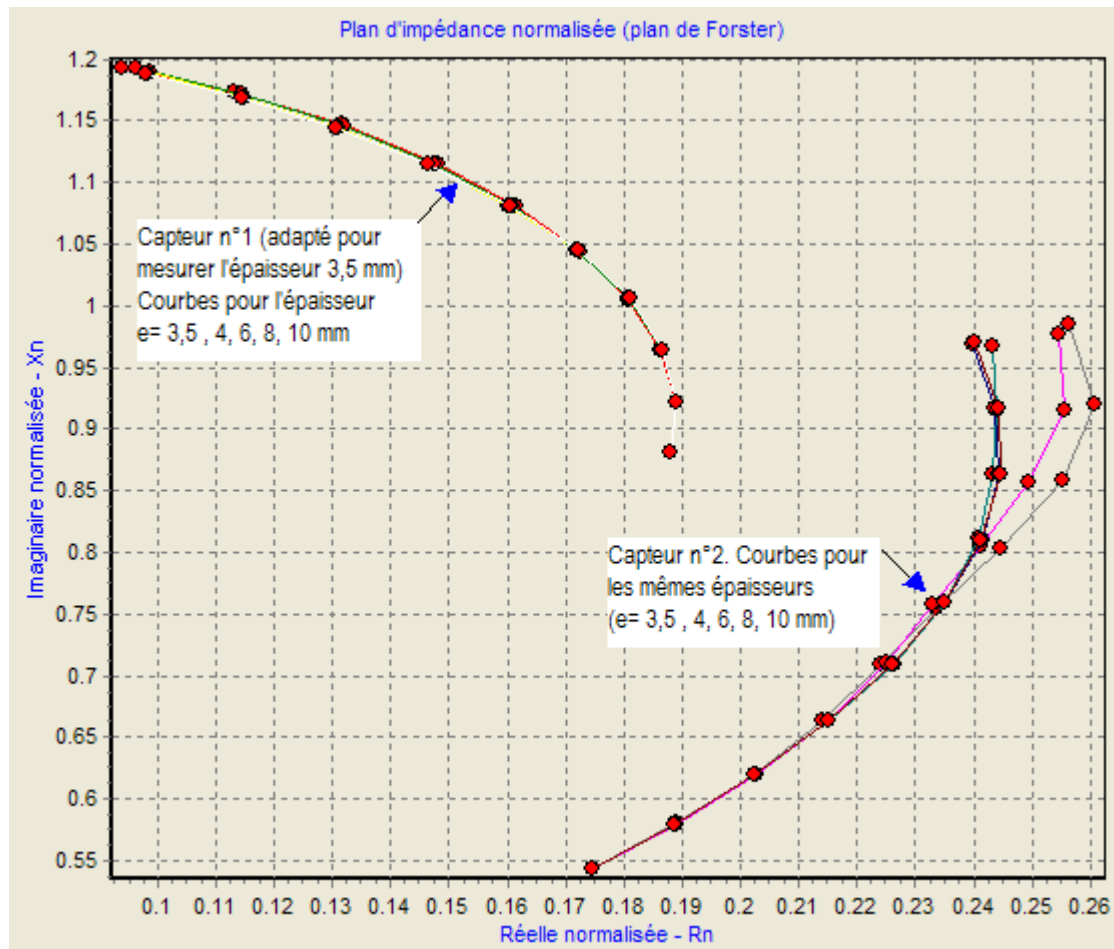
4.3 Echantillon fictif avec une épaisseur $e_0=10$ mm

Nous ne disposons pas d'échantillon de cette épaisseur. Nous avons donc simulé l'impédance Z d'un capteur pour cette épaisseur.

Nous avons essayé de trouver le capteur adapté qui puisse retrouver la valeur de e_0 (10 mm) à l'issue des itérations. Comme on a pu le voir plus haut, tous les capteurs ne conviennent pas pour retrouver la valeur de e_0 (à partir de données qui sont pourtant idéales car issues de la simulation).

La figure ci-dessous montre 2 familles de courbes générées par 2 capteurs différents. Le capteur n°1 a été utilisé pour mesurer réellement les épaisseurs de 3,5 et 4 mm avec succès. Le capteur n°2 est simulé afin de déterminer la possibilité de mesurer une épaisseur de 10 mm.

4.3.1 Résultat de simulation d'impédance normalisée

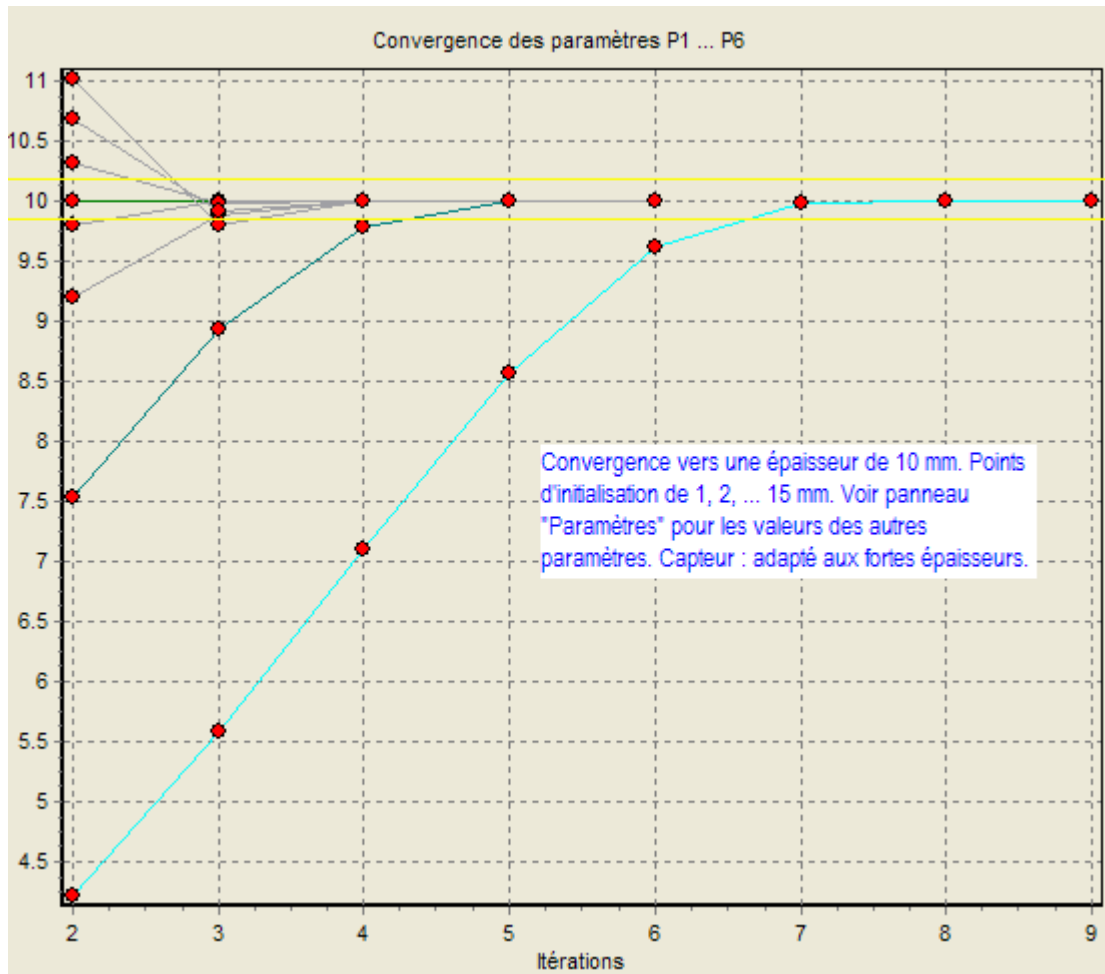


2 familles de courbes d'impédance normalisées correspondant aux capteurs n°1 et n°2

Conclusions :

§ On peut remarquer que le capteur n°2 génère des courbes plus distinctes que le capteur n°1.

4.3.2 Résultat d'inversion de données (impédance normalisée) pour retrouver l'épaisseur $e_0 = 10$ mm



Conclusions :

- § Avec différentes initialisations, que ce soit inférieur ou supérieur à 10 mm, les itérations convergent toutes vers 10 mm.
- § Pour rappel, le capteur n°1 n'a pas pu mesurer une épaisseur de 5 mm (voir page 7).
- § On peut donc conclure qu'il est possible de mesurer une épaisseur de 10 mm avec un capteur adapté (capteur n°2). Le capteur n°1 sera, lui, très adapté pour mesurer la conductivité électrique et la perméabilité magnétique.

5 Conclusions

Les travaux menés dans le cadre de cette étude montrent qu'il est théoriquement possible de mesurer une épaisseur de 10 mm en fonte d'acier par la méthode des courants de Foucault.

Le logiciel Eddysens™ en est l'outil principal, qui permet de déterminer les valeurs cruciales du matériau : la conductivité électrique et la perméabilité magnétique. Eddysens™ indique jusqu'où il faut appliquer le champ de polarisation externe, ce logiciel fera donc partie intégrante du dispositif de magnétisation.

Eddysens™ indique également quelles sont les dimensions adéquates du capteur pour déterminer une épaisseur donnée. Cet aspect est indispensable pour la construction d'un dispositif de contrôle non destructif.