
**ETALONNAGE ET MESURE SANS CONTACT PAR
CAPTEUR A COURANTS DE FOUCAULT AVEC LE SYSTEME
Z-SCOPE V5 + WINEC v5.1**

1 Introduction



L'appareil Z-Scope V5™ est un appareil d'analyse d'impédance à technologie numérique. Il fournit un signal d'excitation sinusoïdal pour un capteur et reçoit en retour le signal de sortie du capteur. Branché sur le port USB d'un PC, il permet d'utiliser la plus part des capteurs qui fonctionnent sur le principe excitation/mesure, tels que les capteurs inductifs, capacitifs, pont de résistances, etc.

Le Z-Scope V5™ est piloté par le logiciel WinEC v5.1™. Ce logiciel gère la fréquence du signal d'excitation et reçoit les signaux R (partie réelle) et X (partie imaginaire) fournis par le Z-Scope V5. Il propose en suite différents traitement en affichage et mesure :

1. Affichage de R et X en suite sous formes de courbes temporelles et polaires.
2. Analyse et sauvegarde des données contenues dans les courbes polaires affichées à l'écran
3. **Étalonnage et mesure** des paramètres physiques en temps réel

Dans cette note d'application, nous nous intéressons au 3^{ème} aspect : l'étalonnage et la mesure des paramètres physiques en temps réel.

2 Etalonnage et mesure d'un paramètre physique de la cible

2.1 Introduction

WinEC v5.1™ peut calculer la valeur d'un paramètre de la cible à partir des signaux bruts fournis par le Z-Scope V5™. La portion de la fenêtre réservée à la mesure se présente comme suit :



Partie de la fenêtre réservée à la mesure

Le Z-Scope v5™ excite un capteur et reçoit en retour un signal qu'il décompose en 2 composantes : partie réelle R et partie imaginaire X. Cependant, R et X sont encore des signaux bruts qui ne donne pas directement la valeur du paramètre à mesurer.

Le paramètre à mesurer P peut être exprimé comme une fonction des signaux R et X : $P=f(R,X)$ ou une fonction de l'amplitude et de la phase M et Phi : $P=f(M, \text{Phi})$. M et Phi sont eux même déduits de R et X.

2.1.1 Modèle de calcul

WinEC v5.1™ utilise une représentation polynomial (modèle) pour calculer la valeur de P :

$$P= c_0 + c_1A + c_2B + c_3AB + c_4A^2 + c_5B^2 + c_6A^2B + c_7AB^2$$

Le modèle ci-dessus peut être incomplet, ce qui veut dire que certains coefficients ci peuvent être nuls. Par exemple, on peut utiliser des modèles simplifiés comme ci-dessous :

$$P= c_0 + c_1A + c_4A^2 \text{ (modèle d'ordre 2 selon A)}$$

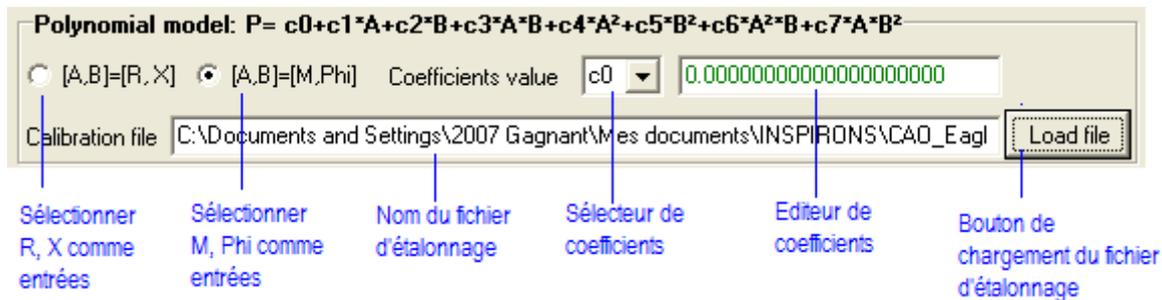
$$P= c_0 + c_2B + c_5B^2 \text{ (modèle d'ordre 2 selon B)}$$

$$P= c_0 + c_1A + c_2B + c_3AB \text{ (bilinéaire)}$$

$$P= c_0 + c_1A + c_2B + c_3AB + c_4A^2 + c_5B^2 \text{ (modèle d'ordre 2 selon A et B)}$$

Lors de la mesure, on charge les coefficients c_i à partir d'un fichier disque. Ils seront ensuite éditables par clavier.

La portion de la fenêtre réservée au modèle de calcul se présente comme suit :



Partie de la fenêtre réservée au chargement des coefficients d'étalonnage

2.1.2 Quels paramètres choisir pour l'étalonnage ?

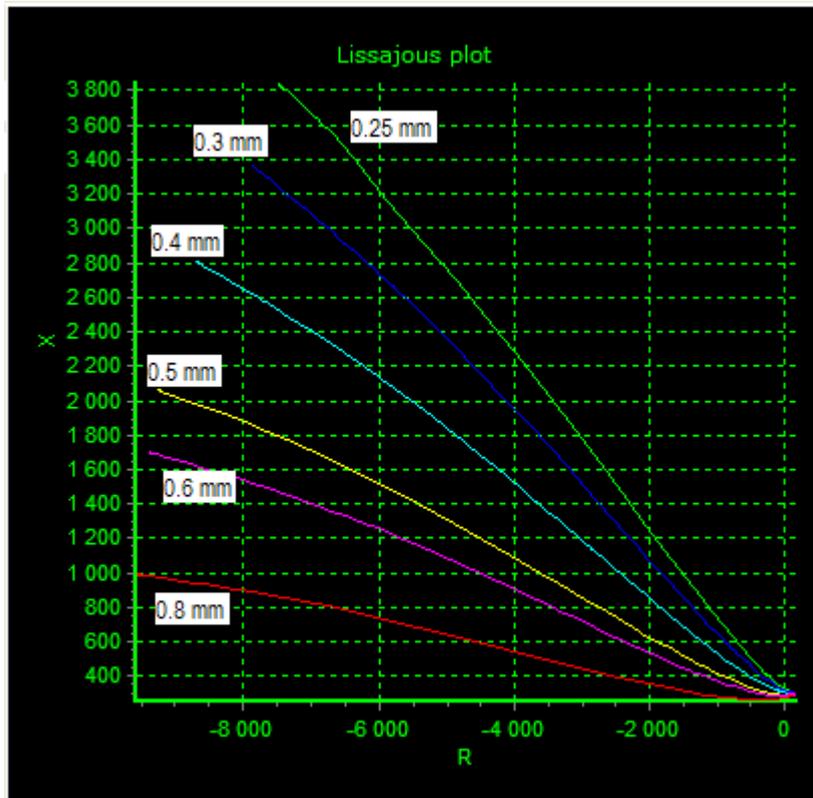
L'utilisateur peut utiliser R seul, X seul, R et X ou M seul, Phi seul, ou M et Phi pour étalonner le système de mesure.

Le choix dépend de l'analyse des signaux issus de situations différentes : variation du paramètre à mesurer, variations des autres paramètres qui peuvent perturber la mesure.

Pour l'exemple suivant, pour 3 valeurs différentes de l'épaisseur de feuille aluminium, on obtient 3 courbes distinctes lorsque la distance capteur-cible varie. La distance capteur-cible apparaît donc comme le principal paramètre perturbateur.

On peut remarquer que dans ce cas, l'angle de déphasage Phi reflète mieux la variation de l'épaisseur, alors que M représente plutôt la variation de la distance. R et X varient tous les deux en fonction des 2 paramètres et donnent plus difficilement une représentation de leur évolution que M et Phi.

Cependant, dans de nombreuses applications, la distance reste rigoureusement fixe, l'utilisation d'un simple paramètre comme R ou X suffit pour un bon étalonnage.



Trajectoire du signal pour différentes épaisseurs lorsque la distance capteur-cible varie de l'infini au contact de la cible

2.2 Principe de l'étalonnage

Prenons cette forme simple

$$P = c_0 + c_1 A + c_4 A^2$$

A représente l'un des signaux R, X, M ou Phi. Il est connu car c'est l'un des signaux mesurés par le Z-Scope V5.

Les coefficients c_0 , c_1 , c_2 ne sont pas connus, de même que P, le paramètre à mesurer.

Le principe de l'étalonnage consiste à faire des mesures sur des cibles dont la valeur de P est connue. Ainsi, on obtient des valeurs différentes de A. Avec un nombre de mesures suffisantes, on pourra déterminer mathématiquement les coefficients c_i . Par exemple :

$$P_1 = c_0 + c_1 A_1 + c_4 A_1^2$$

$$P_2 = c_0 + c_1 A_2 + c_4 A_2^2$$

$$P_3 = c_0 + c_1 A_3 + c_4 A_3^2$$

Nous avons ainsi un système d'équations dont les coefficients sont des inconnues. Puisqu'il y a 3 inconnues et 3 équations, il est possible théoriquement de déterminer les c_i , à condition que P_1 , P_2 et P_3 soient vraiment des valeurs différentes, et que A_1 , A_2 et A_3 soient également des signaux différents. Plus le capteur est sensible, plus A_1 , A_2 et A_3 sont différents pour des valeurs différentes de P_1 , P_2 et P_3 .

La détermination des coefficients c_i s'appelle l'étalonnage.

Une fois les coefficients c_i sont déterminés, on peut les utiliser dans la formule initiale pour calculer P, connaissant A. Il s'agit du processus « mesure ».

2.3 Exemple d'un étalonnage et de mesure de l'épaisseur de feuilles en aluminium

Nous décrivons ci-dessous un exemple complet de mesure de l'épaisseur avec WinEC v5.1™.

Dans cet exemple, nous nous proposons de mesurer l'épaisseur des feuilles en aluminium. Les feuilles disponibles ont les épaisseurs nominales suivantes : 0,3 mm, 0,4 mm et 0,5 mm.

Il est important de noter que la mesure de l'épaisseur par la méthode des courants de Foucault n'est possible que si la conductivité électrique des feuilles est identique.

2.3.1 Capture des signaux

Poser le capteur successivement sur les feuilles aluminium de 0,3 mm, 0,4 mm et 0,5 mm. Capturer les signaux dans les courbes différentes. Pour ce faire, appuyer sur F3 pour créer une courbe nouvelle pour la capture de données et terminer ainsi la capture dans la courbe présente. Il faut assurer que chaque courbe ne contient que des données correspondant à une seule valeur d'épaisseur.

Il est possible d'introduire une variation de distance dans chacune de ces courbes en faisant varier légèrement la distance capteur-cible pendant la capture.

2.3.2 Sauvegarde des données

Cliquer sur une courbe pour la sélectionner, puis cliquer droit sur la fenêtre Lissajous pour ouvrir le menu contextuel. Sélectionner Save all pour sauvegarder toute la courbe.

Pour sauvegarder seulement une partie de la courbe, utiliser la zone A (menu Tools->A-area) pour entourer la partie désirée, puis choisir « Save data inside A-area » au lieu de « Save all ».

Donner un nom au fichier de manière à rappeler la valeur de l'épaisseur de la courbe. Cette épaisseur est considérée comme « Valeur cible », ou « Target » en Anglais.

2.3.3 Choix des signaux à utiliser et de la méthode d'étalonnage

Comme nous l'avons vu précédemment, l'angle Phi est représentatif de la variation de l'épaisseur de la cible. Avec WinEC v5.1, nous avons de plus la possibilité de choisir une nouvelle origine qui convienne le mieux.

Sur la figure ci-dessus, il est évident que la nouvelle origine O' est meilleure que l'origine naturelle O car la variation d'angle est plus importante. De plus, avec cette nouvelle origine, la variation du signal due à la distance capteur-cible est minimisée.

La différence de variation d'angle ici est faible, mais elle peut être très importante dans d'autres cas, le choix de l'« angle de vue » étant un problème classique.

Le choix de l'utilisation de M, Phi s'impose donc dans ce cas de mesure de l'épaisseur.

Pour sélectionner la nouvelle origine, cliquer sur le bouton « Origin » puis cliquer sur le point choisi sur l'écran Lissajous. Un point jaune apparaîtra à cet emplacement sur l'écran.

Pour sauvegarder ce point, cliquer sur le point pour le sélectionner (à la manière de sélectionner une courbe), puis cliquer droit pour ouvrir le menu contextuel, puis sélectionner « Save all ».

Pour recharger une origine, cliquer droit sur le bouton « Origin » et choisir « Load from *.dxt file » dans le menu contextuel.

Dans ce menu, il est également possible d'annuler tout changement d'origine (« No offset »), ou de spécifier les coordonnées exactes de la nouvelle origine (« Set to »).

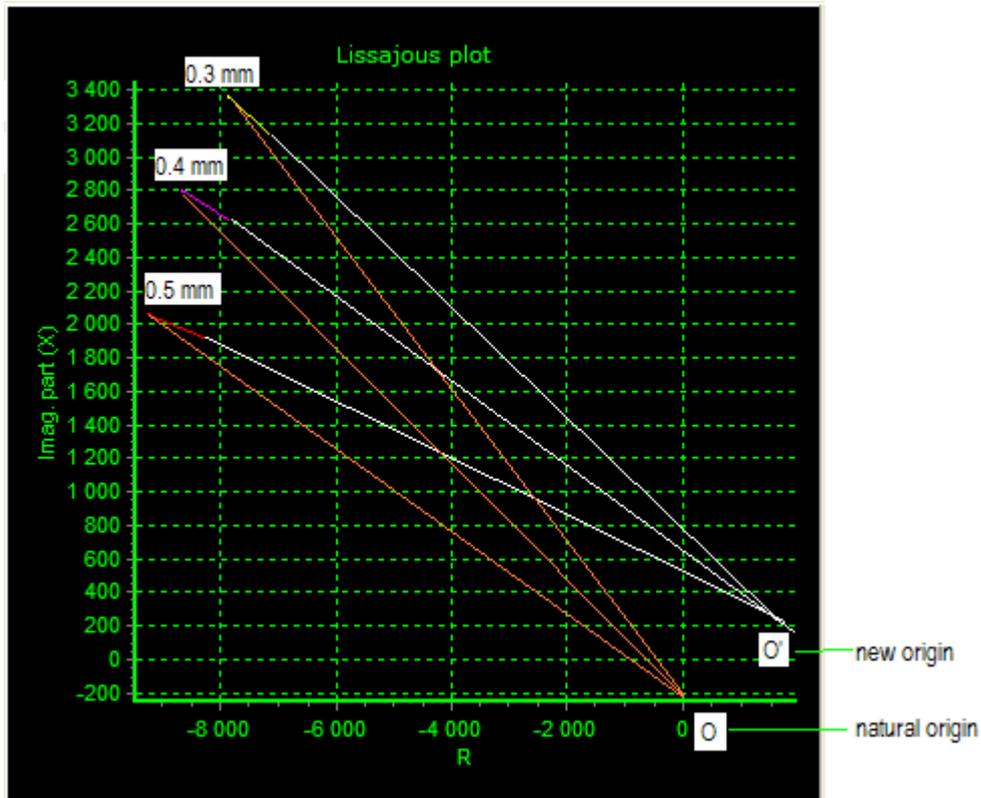
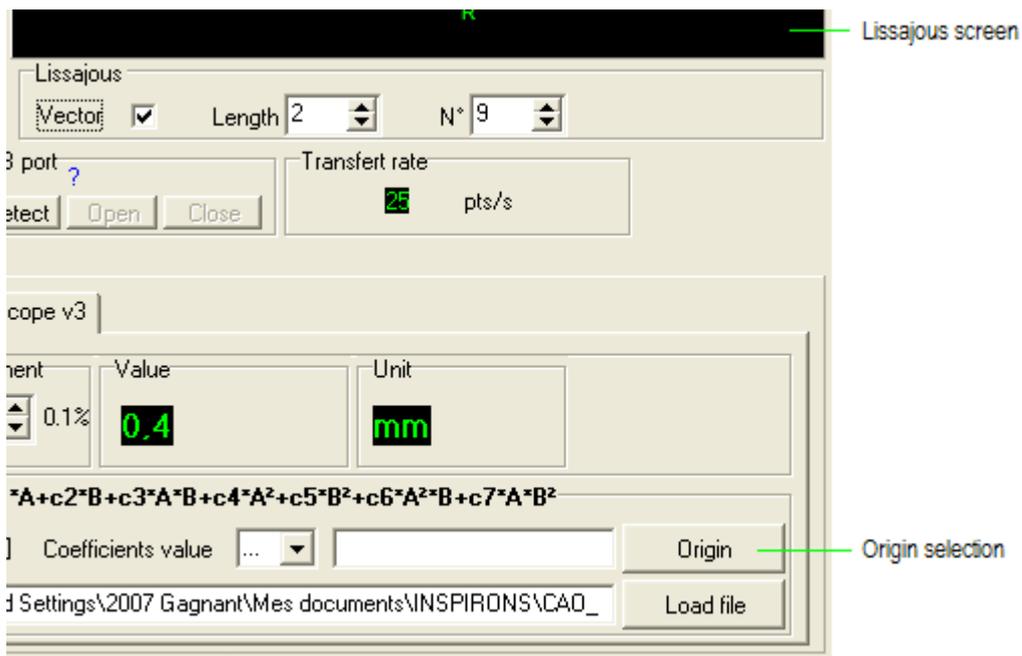


Illustration du choix d'une nouvelle origine afin que les angles représentent mieux l'évolution du signal vis-à-vis de l'épaisseur



Bouton de changement d'origine.

2.3.4 Calcul des coefficients

2.3.4.1 Description du procédé

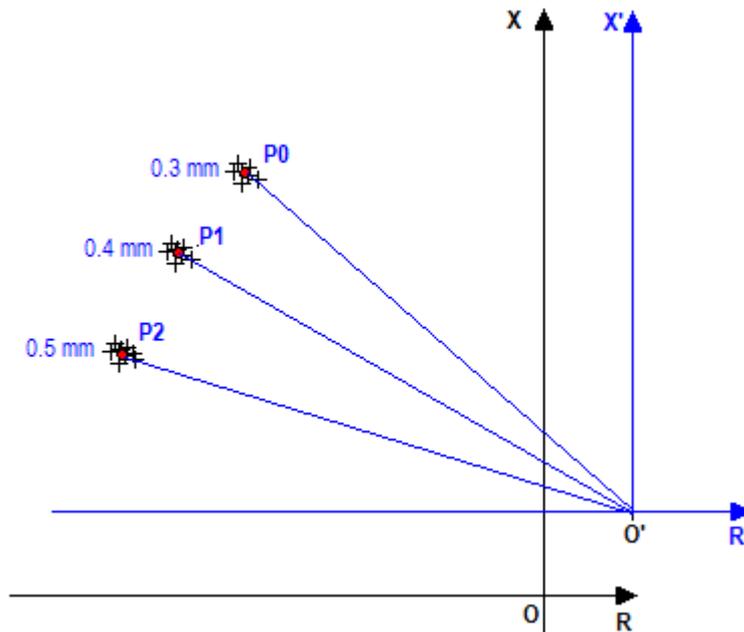


Illustration graphique du procédé d'étalonnage

1. Charger les 3 fichiers de données correspondant aux 3 valeurs de l'épaisseur. On obtient ainsi 3 nuages de points.
2. Calcul pour chaque nuage de points un point « moyen » P0, P1 et P2.
3. Déterminer les angles $\phi_0 = \angle P_0O'R'$, $\phi_1 = \angle P_1O'R'$ et $\phi_2 = \angle P_2O'R'$
4. Déterminer les coefficients de l'équation de 2^{ème} ordre épaisseur = $c_0 + c_1\phi + c_2\phi^2$ par la méthode des moindres carrés
5. Utiliser les coefficients c_i pour tester le modèle en l'appliquant sur le reste des données
6. Valider si les valeurs calculées par le modèle sont suffisamment proches des valeurs cibles (target).

2.3.4.2 Programme de calcul en Scilab™

```
Mes0=fscanfMat('satma_10kHz_shrk@0.3@mm.dxt'); // Mes0 contains measured data at 0.3mm
tmp=mean(Mes0(:,:),'r'); // tmp is the averaged values of the measured data
R0=tmp(:,1);X0=tmp(:,2);TRG0=tmp(:,3); // R0 and X0 are coordinates of P0, TRG0 is the corresponding target
Mes1=fscanfMat('satma_10kHz_shrk@0.4@mm.dxt'); // Mes1 contains measured data at 0.4mm
tmp=mean(Mes1(:,:),'r'); // tmp is the averaged values of the measured data ; tmp is re-used as temporary variable
R1=tmp(:,1);X1=tmp(:,2);TRG1=tmp(:,3); // R1 and X1 are coordinates of P1, TRG1 is the corresponding target
Mes2=fscanfMat('satma_10kHz_shrk@0.5@mm.dxt'); // Mes2 contains measured data at 0.5mm
tmp=mean(Mes2(:,:),'r'); // tmp is the averaged values of the measured data ; tmp is re-used as temporary variable
R2=tmp(:,1);X2=tmp(:,2);TRG2=tmp(:,3); // R1 and X1 are coordinates of P2, TRG2 is the corresponding target
tmp= fscanfMat('origin.dxt'); //load the origin which is most convenient for the thickness measurement
Ox= tmp(1,1); Oy=tmp(1,2); //Ox and Oy are respectively the coordinates of the origin
Angle0= atan(X0-Oy,R0-Ox); //Compute the angle P0O'R'
Angle1= atan(X1-Oy,R1-Ox); //Compute the angle P1O'R'
```

```

Angle2= atan(X2-Oy,R2-Ox); //Compute the angle P2O'R'
Angle=[Angle0;Angle1;Angle2]; TRG=[TRG0;TRG1;TRG2]; //Build the input data vector and the target vector
M=[ones(Angle) Angle Angle.*Angle]; //Build the data matrix
C=pinv(M,1e-12)*TRG; // compute the coefficients vector C by the pseudo inverse method
ERR= M*C-TRG; //compute the difference between measured data and the model (M*C)
// TEST OF CALIBRATION
R0x= Mes0(:,1);X0x=Mes0(:,2);TRG0x=Mes0(:,3); //put the remaining data in Mes0 in vectors
R1x= Mes1(:,1);X1x=Mes1(:,2);TRG1x=Mes1(:,3); //put the remaining data in Mes1 in vectors
R2x= Mes2(:,1);X2x=Mes2(:,2);TRG2x=Mes2(:,3); //put the remaining data in Mes2 in vectors
Angle0x= atan(X0x-Oy*ones(X0x),R0x-Ox*ones(R0x)); //Compute the angles of the new vectors for 0.3mm-
//thickness measured points
Angle1x= atan(X1x-Oy*ones(X1x),R1x-Ox*ones(R1x)); //Compute the angles of the new vectors for 0.4mm-
//thickness measured points
Angle2x= atan(X2x-Oy*ones(X2x),R2x-Ox*ones(R2x)); //Compute the angles of the new vectors for 0.5mm-
//thickness measured points
Mx=[Angle0x;Angle1x;Angle2x]; // Build the input data matrix
ESTIM= C(1) + C(2)*Mx + C(3)*Mx.*Mx; // ESTIM is the estimated values of thickness, computed by the model
TRG=[TRG0x;TRG1x;TRG2x]; // Build the targets values
plot(ESTIM-TRG) //plot the error of the model
// SAVE COEFFICIENTS
fprintfMat('C_angle@mm.cxt',C); //save model coefficients to hard disk, the string after the @ character indicates
//the measurement unit

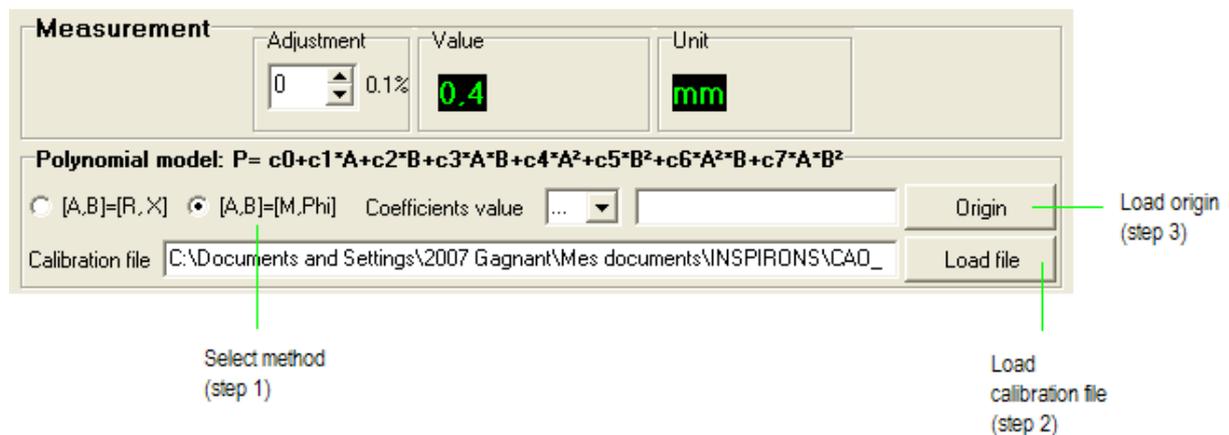
```

2.3.5 Utilisation des coefficients en vue d'une mesure de l'épaisseur

Pour lancer la mesure après un étalonnage, il suffit de 3 étapes :

1. Choisir la méthode de calcul ((R,X) ou (M,Phi)).
2. Charger le fichier de coefficients d'étalonnage
3. Charger l'origine utilisée dans le calcul de ces coefficients d'étalonnage

Une fois ces 3 étapes exécutées, la mesure correcte sera affichée sur l'écran.



Etapes à suivre lors du chargement d'un étalonnage

3 Conclusion

Nous avons présenté dans l'exemple ci-dessus les démarches complètes pour effectuer l'étalonnage et la mesure de l'épaisseur de feuilles aluminium. Bien entendu, ces démarches sont applicables pour la mesure d'autres paramètres physiques auxquels le capteur est sensible.

Les possibilités offertes par WinEC v5.1 (changement d'origine, sauvegarde de courbe d'étalonnage à l'aide de la souris, sélection de courbes à sauvegarder, etc.) facilitent grandement l'étalonnage. L'import directe de coefficients permet de transformer WinEC v5.1 en interface de mesure.

WinEc v5.1 peut être personnalisé pour s'adapter aux besoins spécifiques.