

**Projet de semestre  
Eté 2005-06**

**Laboratoire d'Automatique**

**Modélisation d'une boucle de mesure de  
courant utilisant un capteur de type  
« Fluxgate »**



Etudiant : Alejandro Rujas  
Assistant : Dr. Philippe Müllhaupt  
Professeur : Prof. Roland Longchamp



## Sommaire

<b>Sommaire .....</b>	<b>2</b>
<b>1 Introduction.....</b>	<b>3</b>
<b>2.- Structure du capteur .....</b>	<b>4</b>
<b>3.- Modèle existant pour le système « Flux-Gate ».....</b>	<b>8</b>
<b>4.-Modélisation de la bobine de contre-réaction .....</b>	<b>12</b>
<b>5.-Modélisation de détection de 2eme harmonique .....</b>	<b>15</b>
<b>6.- Validation du modèle de 2ème harmonique .....</b>	<b>19</b>
<b>7.- Fonctionnement de la boucle fermée.....</b>	<b>21</b>
<b>8.- Simulation en boucle fermée.....</b>	<b>25</b>
<b>9.- Conclusion .....</b>	<b>28</b>
<b>10.- Bibliographie .....</b>	<b>29</b>



# 1 Introduction

La mesure de courant électrique a beaucoup d'importance pour l'industrie. Normalement la solution est d'utiliser un capteur à effet Hall qui mesure le champ magnétique créé par le courant à mesurer. Par contre, il existe des applications pour lesquelles, la précision obtenue par le capteur à effet Hall n'est pas suffisante. Cette précision dans la mesure peut être améliorée en implémentant une boucle de contre-réaction. Le but est de créer un champ magnétique contraire à celui engendré par le courant à mesurer, de sorte à annuler le défaut entre les deux champs magnétiques. Ce défaut peut être amplifié pour arriver à une meilleure précision.

Ce projet est réalisé dans le cadre d'une collaboration entre le laboratoire d'automatique de l'EPFL et l'entreprise LEM SA. Le capteur complexe qu'on va étudier est basé sur la technologie « Flux-Gate ». Il est implémenté avec deux différents systèmes « Flux-Gate » remplaçant le capteur à effet Hall, un pour les basses fréquences et un autre pour les hautes fréquences. Une électronique de détection du deuxième harmonique et le système de la boucle de contre-réaction. Le but est de réaliser la modélisation et de l'implémenter sur un fichier Matlab Simulink permettant de simuler le fonctionnement du capteur. Dans ce projet on a réalisé la validation de trois modèles existants pour les systèmes « Flux-Gate ». On a modélisé sur Matlab Simulink le circuit de détection du deuxième harmonique et on a fermé la boucle de contre-réaction pour avoir une mesure précise du courant à mesurer.

## 2.- Structure du capteur

Si nous étudions la structure du « IT-type Fluxgate Transducteur » nous pouvons observer qu'il est constitué essentiellement de deux différentes parties. Une première partie qui a pour but mesurer les courants de basses fréquences et une autre partie, pour mesurer les courants de hautes fréquences. Nous allons travailler avec la partie de détection de basses fréquences, car le but du projet est de valider le modèle du système « Flux gate » et de modéliser l'électronique de détection du deuxième harmonique afin de fermer la boucle de contre-réaction, et ces deux éléments se trouvent dans la partie de détection de basses fréquences. La partie de hautes fréquences fonctionne avec le principe d'un transformateur linéaire et non selon le principe « Flux Gate ».

En regardant la structure de détection de courant à basses fréquences et pour comprendre son fonctionnement, nous constatons que il est constitué de deux boucles de détection de courant identiques. Chacune est constituée d'un noyau en matériau magnétique saturable, qui est traversé par le courant à mesurer et autour duquel sont enroulées deux bobines. La première bobine est alimentée par un générateur de tension carrée qui va créer des courants similaires à travers les deux noyaux pendant que le courant à mesurer est égal à zéro. Si le courant à mesurer est différent de zéro, on aura un défaut entre ces deux courants, duquel on parlera plus en détail après. Ces courants traversent un transformateur à point milieu lié à l'électronique de détection du deuxième harmonique, qui nous donnera une tension proportionnelle à ce défaut. Cette tension, en traversant un amplificateur, va créer un courant de contre-réaction à travers la deuxième bobine. Ce courant de contre-réaction sert à annuler le flux magnétique à l'intérieur du noyau créé par le courant que nous sommes en train de mesurer. En mesurant ce courant de contre-réaction au moyen d'une résistance de mesure on aura une valeur précise du courant que nous voulons mesurer.

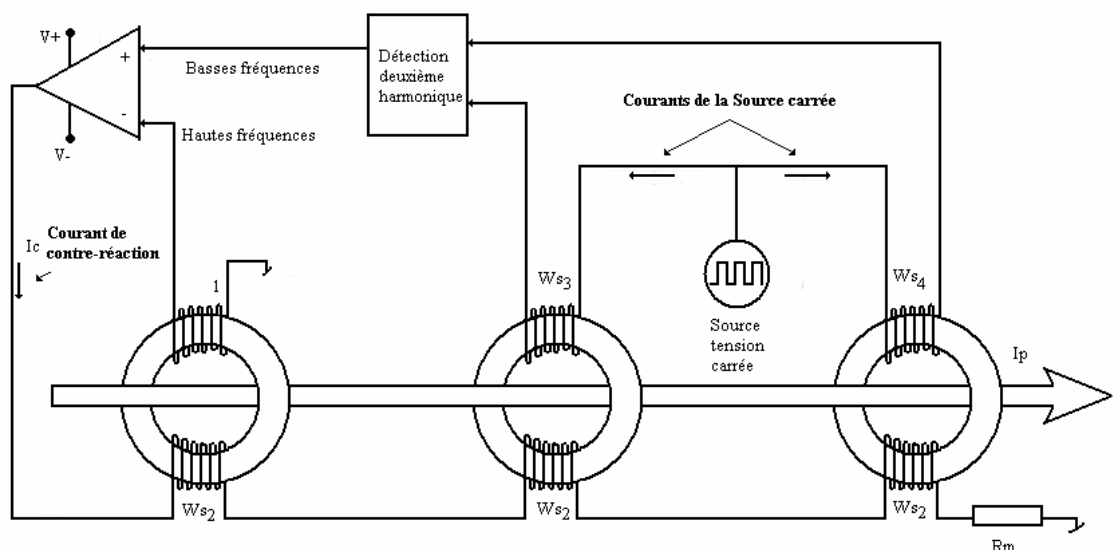


Figure 1 Schéma descriptif du IT-type Fluxgate Transducteur

## Le fonctionnement de l'électronique du détecteur du deuxième harmonique :

Sur le graphique suivant, nous pouvons voir un schéma simplifié de l'électronique du détecteur du deuxième harmonique.

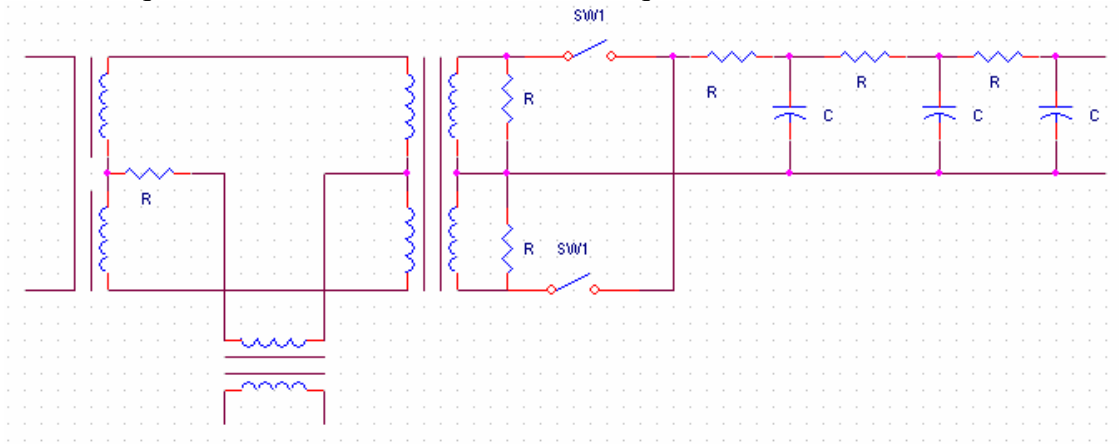


Figure 2 Schéma électrique du circuit de détection du deuxième harmonique

Comme nous avons avancé avant, les courants créés par la source de tension carrée, qui traversent les deux boucles de détection, sont exactement égaux pendant que le courant à mesurer est égal à zéro. Si un courant à mesurer est différent de zéro, les courants qui traversent les deux boucles auront un défaut entre eux. Ce défaut est dû à fait que sur une boucle de détection, le champ magnétique créée par le courant à mesurer s'additionne avec le champ magnétique créé pour le courant de la source carrée, pendant que dans le autre boucle de détection se soustrait ;

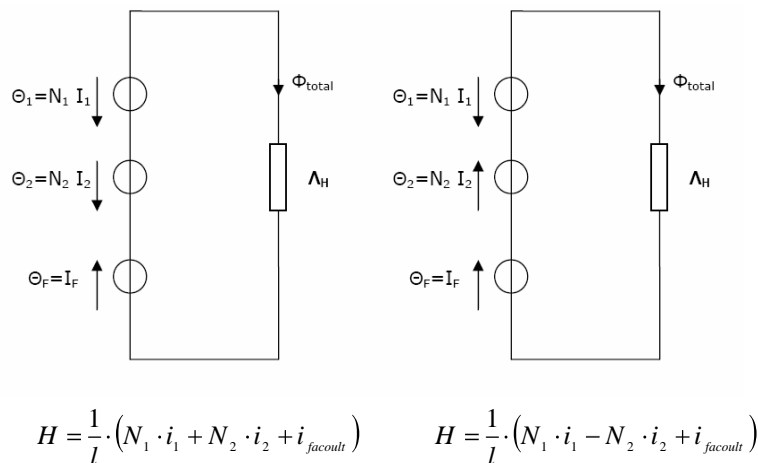


Figure 3 différence du champ magnétique entre les deux boucles de détection

Le but du circuit de détection du deuxième harmonique est d'avoir, à la sortie, une tension proportionnelle au défaut existant entre ces deux courants. Pour arriver à ce but, l'électronique de détection du deuxième harmonique fait la soustraction entre les deux courants générés par la source de tension carrée. Si nous observons ces courants nous pouvons voir que, pendant un quart de période, le défaut obtenu est plutôt positif et pendant l'autre



quart de période, le défaut est plutôt négatif. On peut mieux comprendre ceci, en regardant la figure suivante :

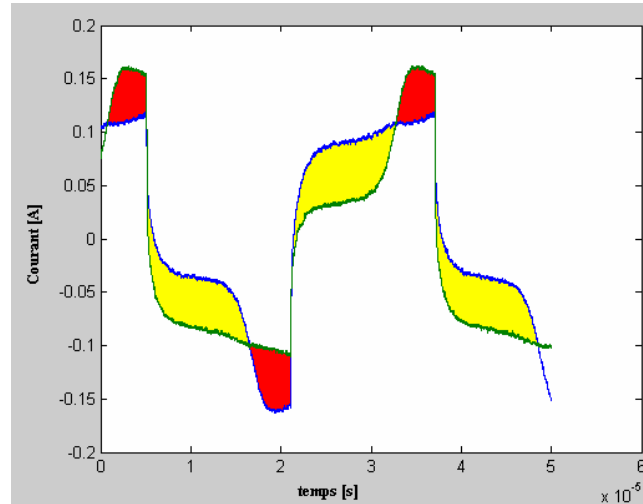


Figure 4 Défaut entre le deux courants

Sur la figure 4, nous observons le défaut existant, entre les deux courants créés par la source de tension carrée, dû à la mesure d'un courant valant 1 Ampère. Si on fait la soustraction de ces deux courants, pendant que le courant vert est plus grand que le courant bleu, nous obtenons un défaut positif (surface rouge). Par contre si le courant bleu est plus grand que le courant vert, le défaut obtenu est négatif (surface jaune). Pour avoir une meilleure image du défaut, les interrupteurs du circuit prennent comme référence le signal de la source de tension carrée et commutent à une fréquence double de la fréquence de ce signal. Les deux interrupteurs sont complémentaires. Quand l'un est fermé l'autre est ouvert et vis versa. De cette façon, nous allons obtenir à l'entrée du filtre passe bas, pendant un quart de période du signal de la source de tension carrée, la soustraction du courant vert par le courant bleu, et pendant l'autre quart de période, le courant bleu moins le courant vert. Et ainsi de suite. De cette façon, nous obtenons une image plus réelle du défaut entre les deux courants. Une fois que ce courant de défaut traverse le filtre passe-bas, nous aurons à la sortie une tension proportionnelle au défaut entre les deux courants de la boucle de détection. Le filtre RC n'a pas seulement le but d'avoir une tension constante proportionnelle à la surface de défaut (donc au défaut entre les deux courants), mais il sert aussi à générer une tension de consigne pour fermer la boucle de contre-réaction (but de régulateur). Cette tension va créer un courant de contre-réaction dans la deuxième bobine. Ce courant de contre-réaction produira un champ magnétique contraire à celui-ci créé par le courant que l'on mesure jusqu'à faire disparaître le défaut entre les courants de la boucle de détection, qui a été créé pour le courant que nous sommes en train de mesurer. Ce courant de contre-réaction, que l'on mesure au moyen d'une résistance shunt, nous donnera une image précise du courant à mesurer.

Le fonctionnement plus détaillé au niveau du schéma électrique du circuit sera montré plus loin dans ce travail.



Sur la figure suivante nous constatons l'ensemble représenté à l'aide d'un diagramme blocs :

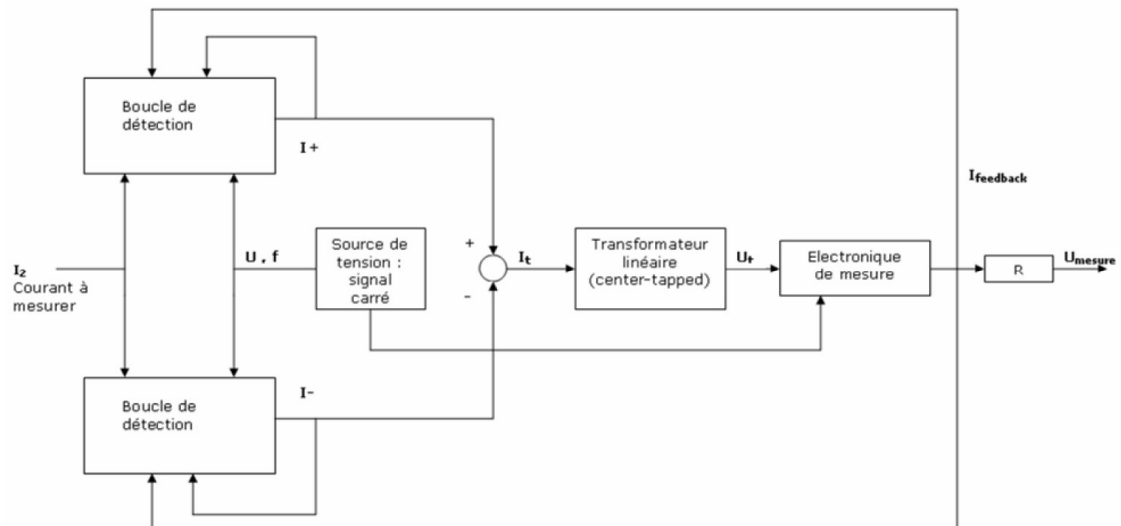


Figure 5 Schéma bloc du capteur à basses fréquences

### 3.- Modèle existant pour le système « Flux-Gate »

Nous partons d'un modèle du « flux-Gate » qui est constitué de trois parties fondamentales. Sur la figure suivante, il est décrit le schéma bloc du modèle existant « Flux-Gate » sur lequel nous pouvons constater ses trois parties.

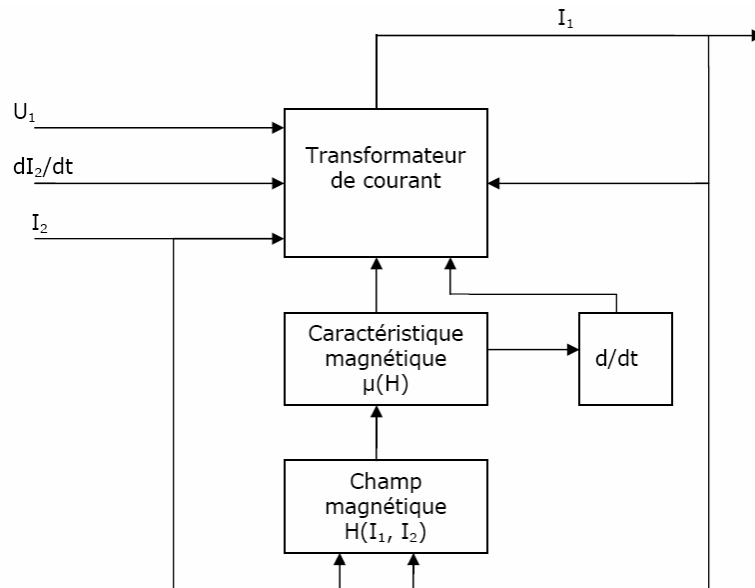


Figure 6 Schéma bloc de la boucle de détection

La structure de la boucle est prise comme un transformateur de courant, donc la première partie est modélisée par l'équation de tension induite du circuit électrique d'un transformateur.

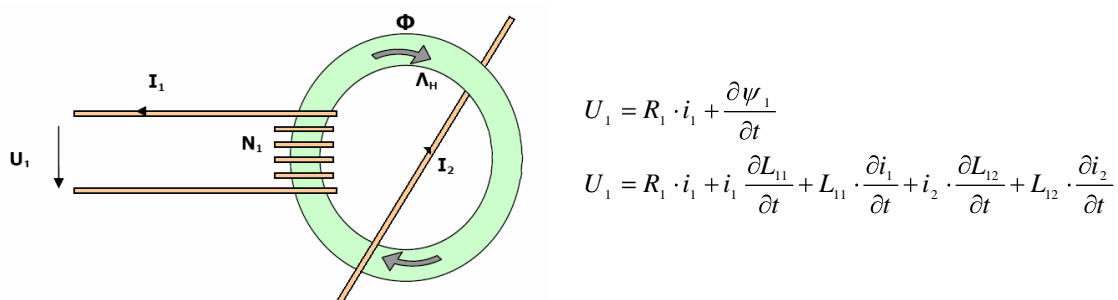


Figure 7 Tension induite dans la structure de la boucle

Le modèle ne tient pas compte la deuxième équation de tension induite parce que le nombre de spires de la partie primaire est beaucoup plus élevé que le nombre de spires de la partie secondaire (1 spire). Donc le modèle néglige les influences du courant I1 sur le courant I2. Fait qu'on trouve logique, car le courant I2 est le courant que nous voulons mesurer, et il ne doit pas être influencé par notre système.



Sur l'équation ci-dessus, nous pouvons voir que les termes  $L_{11}$  et  $L_{12}$  apparaissent. Ces termes se calculent à partir des formules suivantes :

$$L_{11} = N_1^2 \cdot \Lambda_H \qquad L_{12} = N_1 \cdot N_2 \cdot \Lambda_H \qquad \Lambda_H = \mu \cdot \frac{A}{l}$$

Nous devons nous rendre compte que les deux termes dépendent de  $\mu$ , et que ce dernier n'est pas linéaire, car justement le capteur se base sur la caractéristique de saturation et d'hystérésis du matériel ferromagnétique pour son fonctionnement. Par conséquent, il apparaît une deuxième partie qui modélise  $\mu$  en fonction de la valeur de  $H$  ;  $\mu(H)$ .

Finalement nous avons la troisième partie du modèle qui sert à calculer le champ magnétique  $H$  que nous avons besoin pour calculer  $\mu$  avec le modèle précédent. Il est calculé selon l'équation suivante :

$$H = \frac{1}{l} \cdot (N_1 \cdot i_1 \pm N_2 \cdot i_2 + i_{\text{Foucault}})^1$$

Comme nous avons vu, la partie du transformateur de courant et le calcul du champ magnétique sont modélisés avec les lois physiques d'électromagnétisme. Cependant, le calcul de  $\mu(H)$ , n'est pas possible à cause de la caractéristique de saturation et de l'hystérésis du matériel ferromagnétique, donc le modèle existant nous donne trois approximations mathématiques possibles ; la première est faite à l'aide de la fonction arc tangente, la deuxième avec une fonction rationnelle et la dernière avec le modèle de Preisach.

Finalement, le schéma bloc du modèle que nous devons arriver à valider reste comme le montre la figure suivante :

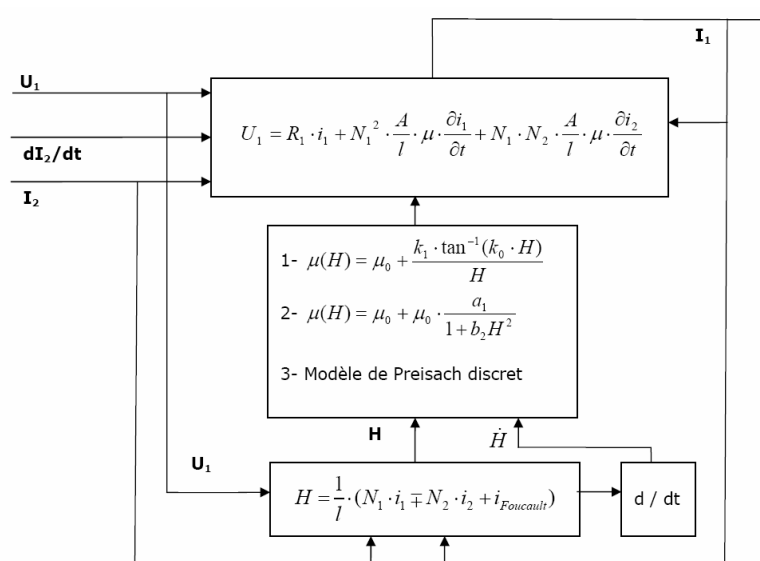


Figure 8 Schéma bloc de la boucle de détection

<sup>1</sup> Note:  $\pm$  selon la boucle de détection, comme nous avons fait référence dans la page 5

Avec les variables et paramètres suivants:

variables

$U_1$	Tension d'alimentation de la bobine de détection
$I_1$	Courant de détection
$I_2$	Courant mesuré

paramètres :

$N_1$	Nombre de spires de la bobine de détection
$N_2$	Nombre de spires de la bobine à mesurer
$R_1$	Résistance équivalente du circuit de détection
$R_{\text{Foucault}}$	Résistance du matériau magnétique (responsable des courants de Foucault)
$A$	Section du circuit magnétique du transformateur
$l$	Longueur du circuit magnétique du transformateur
$\mu$ (H)	Perméabilité du matériau magnétique (fonction caractéristique)

## Validation du modèle existant

Après avoir changé différents paramètres du modèle de la fonction arc tangente, et de la fonction rationnelle, et partie du code du modèle de Preisach pour implémenter l'hystérésis et la saturation, voici les résultats pour la validation obtenus en réalisant plusieurs essais :

— } Simulation  
— }  
— } Système réel  
— }

} Courants de la boucle de détection

- Modèle avec l'approximation de la fonction arc tangente :

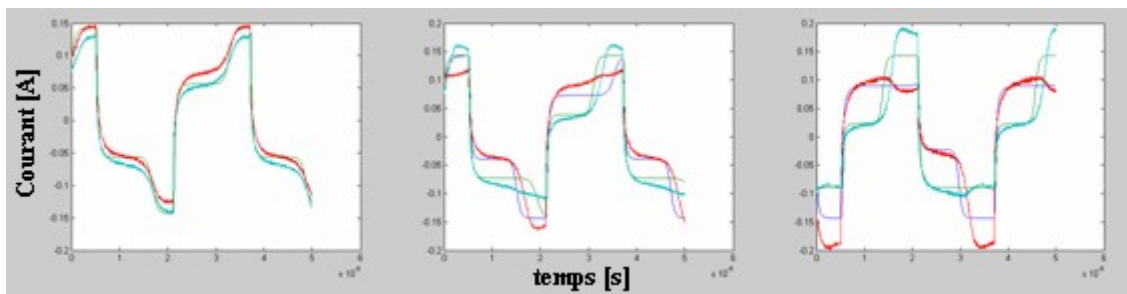


Figure 9 : a) 0 Ampère b) 1 Ampère c) 2 Ampères

- Modèle avec l'approximation de la fonction rationnelle :

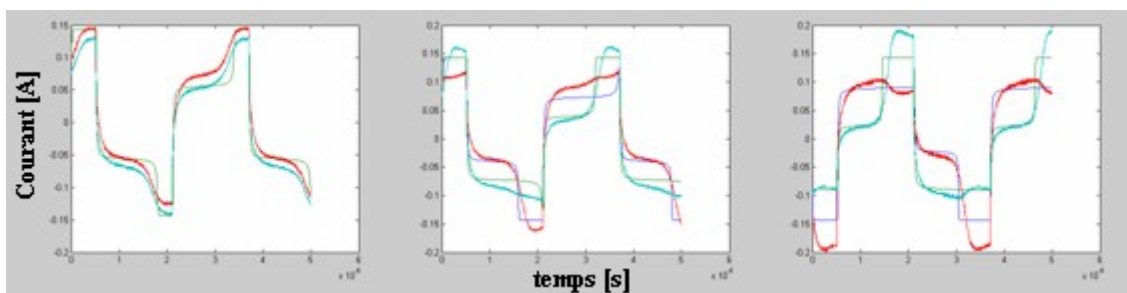


Figure 10 : a) 0 Ampère b) 1 Ampère c) 2 Ampères

- Modèle Preisach :

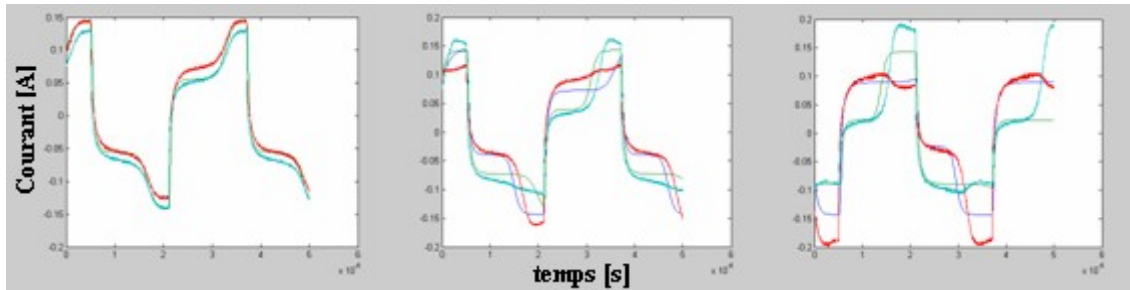


Figure 11 : a) 0 Ampère b) 1 Ampère c) 2 Ampère

Si nous observons les allures des courants sur les figures 9,10 et 11 obtenues respectivement avec le modèle de fonction arc tangente, rationnelle et Preisach, nous constatons que le modèle implémenté avec la fonction rationnelle est celui qui s'éloigne le plus du signal obtenu avec le système réel. En regardant les deux autres modèles nous arrivons à détecter une petite amélioration avec le modèle de Preisach en comparaison au modèle de la fonction arc tangente. Cette amélioration est minimale en comparaison avec tous les calculs en plus que nous devons faire par rapport à la simulation avec la fonction arc tangente. Pour cette raison, nous pensons que l'option la plus intéressante est l'approximation avec la fonction arc tangente.

## Valeurs gardé

Pour réaliser ces simulations dans la validation du modèle nous avons gardé les valeurs suivantes pour les paramètres du modèle :

N1 (nombre de spires de la bobine de détection).....	60 spires
N2 (nombre de spires de la bobine de mesures).....	1 spires
R_foucalt (Résistance de Foucalt) .....	négligeable
A (Section du circuit magnétique du transformateur) .....	$9 \times 10^{-7} \text{ m}^2$
L (Longueur du circuit magnétique du transformateur).....	0,21 m
Hystérèse.....	16

## 4.-Modélisation de la bobine de contre-réaction

Il faut maintenant compléter le modèle validé précédemment avec la bobine de contre-réaction comme le montre la figure 12 dans le but de pouvoir fermer plus tard la boucle de contre-réaction. Cette chapitre traite de l'implémentation réalisée sur le modèle du noyau ferromagnétique avec les deux bobines précédentes, plus une troisième bobine de contre-réaction.

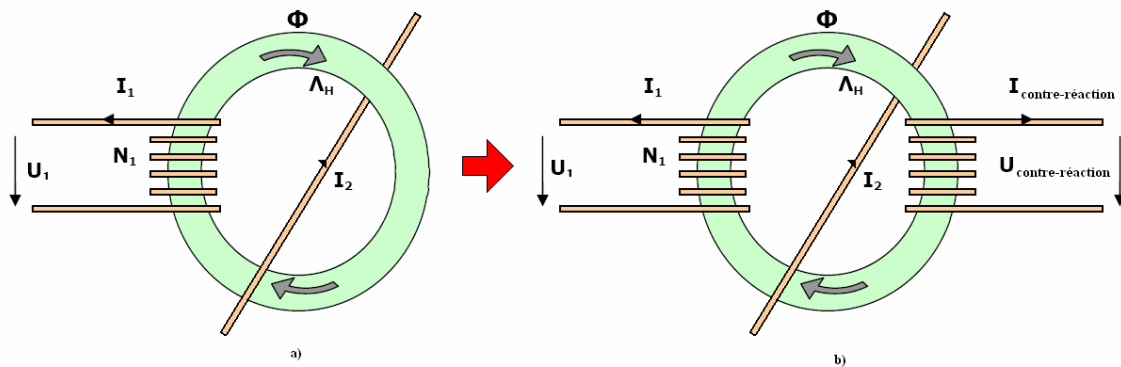


Figure 12 a) Structure physique du modèle validé b) Structure avec la bobine de contre-réaction

La structure de la boucle,est une fois de plus, identique à celle d'un transformateur de courant. À différence près que cette fois, le noyau magnétique est enroulé par trois bobines. Voici les équations de tension induite pour les trois circuits électriques du transformateur :

$$U_1 = R_1 \cdot i_1 + \frac{\partial \psi_1}{\partial t}$$

$$U_1 = R_1 \cdot i_1 + i_1 \frac{\partial L_{11}}{\partial t} + L_{11} \cdot \frac{\partial i_1}{\partial t} + i_2 \cdot \frac{\partial L_{12}}{\partial t} + L_{12} \cdot \frac{\partial i_2}{\partial t} + i_3 \cdot \frac{\partial L_{13}}{\partial t} + L_{13} \cdot \frac{\partial i_3}{\partial t}$$

$$U_2 = R_2 \cdot i_2 + \frac{\partial \psi_2}{\partial t}$$

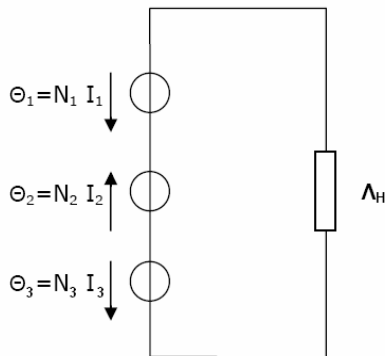
$$U_2 = R_2 \cdot i_2 + i_2 \frac{\partial L_{22}}{\partial t} + L_{22} \cdot \frac{\partial i_2}{\partial t} + i_1 \cdot \frac{\partial L_{12}}{\partial t} + L_{12} \cdot \frac{\partial i_1}{\partial t} + i_3 \cdot \frac{\partial L_{23}}{\partial t} + L_{23} \cdot \frac{\partial i_3}{\partial t}$$

$$U_3 = R_3 \cdot i_3 + \frac{\partial \psi_3}{\partial t}$$

$$U_3 = R_3 \cdot i_3 + i_3 \frac{\partial L_{33}}{\partial t} + L_{33} \cdot \frac{\partial i_3}{\partial t} + i_1 \cdot \frac{\partial L_{13}}{\partial t} + L_{13} \cdot \frac{\partial i_1}{\partial t} + i_2 \cdot \frac{\partial L_{23}}{\partial t} + L_{23} \cdot \frac{\partial i_2}{\partial t}$$

Les indices 1,2 et 3 indiquent le circuit électrique, où l'indice 3 est le circuit de contre-réaction. On maintient l'hypothèse que la modification de  $I_2$  par le courant  $I_1$  et  $I_3$  est négligeable puisque  $N_2 \ll N_1$  et  $N_2 \ll N_3$ , ce qui est logique, comme on a montré avant, car le capteur de courant ne doit pas ou peu modifier le courant qu'il mesure. On néglige donc l'équation du circuit 2.

On maintient également l'hypothèse de l'absence de fuites magnétiques. Donc le circuit magnétique est ainsi constitué d'une seule boucle avec trois potentiels magnétiques qui correspondent à chacune des bobines et une perméance principale. Donc les inductances sont calculées avec les expressions suivantes:



$$\begin{aligned} L_{11} &= N_1^2 \cdot \Lambda_H & L_{12} &= N_1 \cdot N_2 \cdot \Lambda_H \\ L_{33} &= N_3^2 \cdot \Lambda_H & L_{13} &= N_1 \cdot N_3 \cdot \Lambda_H \\ L_{23} &= N_2 \cdot N_3 \cdot \Lambda_H \end{aligned}$$

La perméance  $\Lambda_H$  du circuit magnétique est déterminée par la perméabilité  $\mu$ , la section  $A$  et la longueur  $l$  du circuit comme pour le modèle précédent

$$\Lambda_H = \mu \cdot \frac{A}{l}$$

En remplaçant les valeurs des inductances dans les équations de tension induite et en appliquant les hypothèses énoncées ci-dessus, le système qui reste est le suivant :

$$U_1 = R_1 \cdot i_1 + N_1^2 \cdot \frac{A}{l} \cdot \frac{\partial \mu}{\partial t} \cdot i_1 + N_1^2 \cdot \frac{A}{l} \cdot \mu \cdot \frac{\partial i_1}{\partial t} + N_1 \cdot N_2 \cdot \frac{A}{l} \cdot \frac{\partial \mu}{\partial t} \cdot i_2 + N_1 \cdot N_2 \cdot \frac{A}{l} \cdot \mu \cdot \frac{\partial i_2}{\partial t} + N_1 \cdot N_3 \cdot \frac{A}{l} \cdot \frac{\partial \mu}{\partial t} \cdot i_3 + N_1 \cdot N_3 \cdot \frac{A}{l} \cdot \mu \cdot \frac{\partial i_3}{\partial t}$$

$$U_3 = R_3 \cdot i_3 + N_3^2 \cdot \frac{A}{l} \cdot \frac{\partial \mu}{\partial t} \cdot i_3 + N_3^2 \cdot \frac{A}{l} \cdot \mu \cdot \frac{\partial i_3}{\partial t} + N_1 \cdot N_3 \cdot \frac{A}{l} \cdot \frac{\partial \mu}{\partial t} \cdot i_1 + N_1 \cdot N_3 \cdot \frac{A}{l} \cdot \mu \cdot \frac{\partial i_1}{\partial t} + N_2 \cdot N_3 \cdot \frac{A}{l} \cdot \frac{\partial \mu}{\partial t} \cdot i_2 + N_2 \cdot N_3 \cdot \frac{A}{l} \cdot \mu \cdot \frac{\partial i_2}{\partial t}$$

La partie du modèle existant pour le calcul de la caractéristique magnétique  $\mu(H)$  reste maintenue, car il est similaire pour le nouveau modèle parce que les caractéristiques ferromagnétiques du matériau du noyau ne changent pas. On a le même noyau.

Pour la partie de calcul du champ magnétique on doit ajouter aussi le champ magnétique créé pour le courant 3 ;  $H(I_1, I_2, I_3)$

$$H = \frac{1}{l} \cdot (N_1 \cdot i_1 \pm N_2 \cdot i_2 \pm N_3 \cdot i_3 + i_{\text{Foucault}}) \text{ II}$$

<sup>II</sup> Note:  $\pm$  selon la boucle de détection, comme nous avons fait référence dans la page 5



Sur la figure suivante on peut voir le schéma bloc final pour la boucle de détection avec la bobine de contre-réaction :

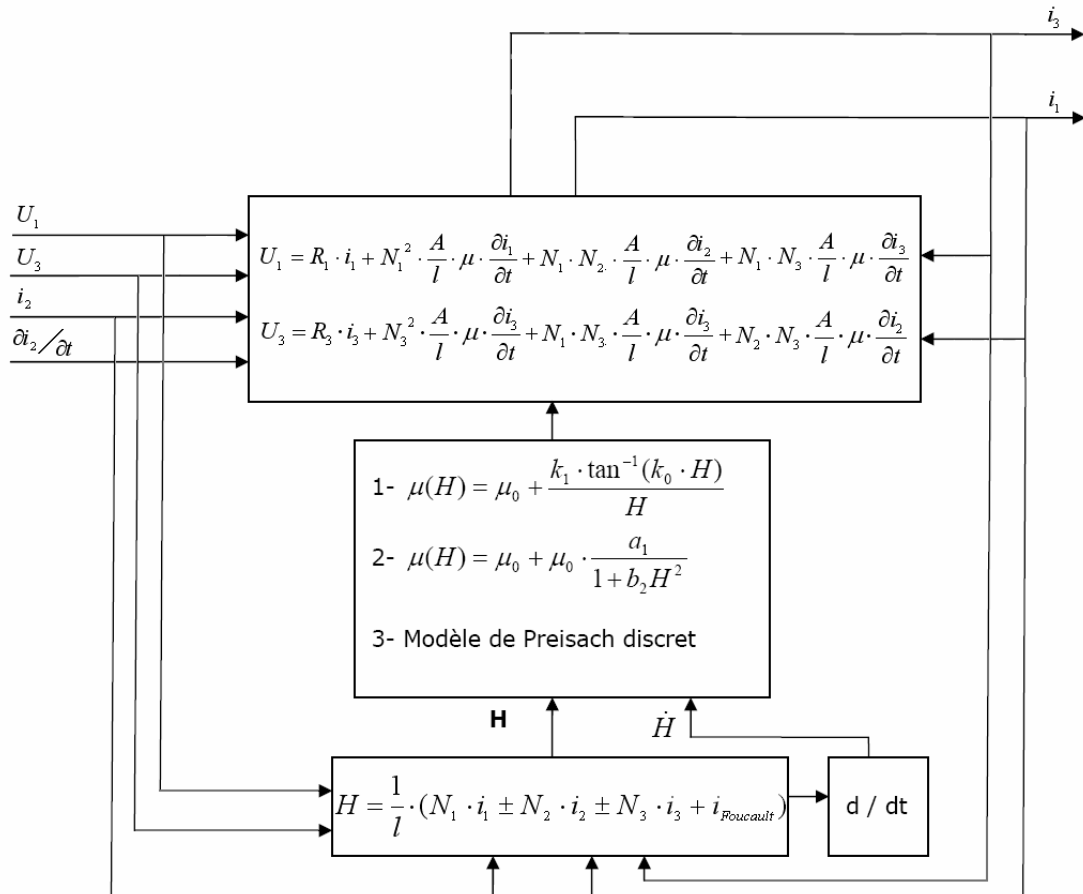


Figure 13 schéma bloc final

## 5.-Modélisation de détection de 2eme harmonique

Pour modéliser l'électronique du deuxième harmonique il faut d'abord bien comprendre le fonctionnement du circuit que nous avons dans la figure suivant :

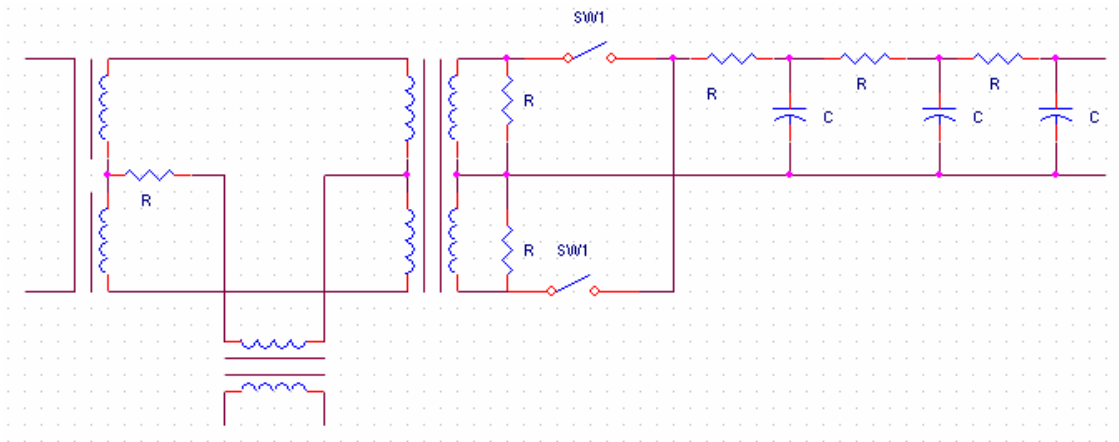


Figure 14 circuit de détection de 2<sup>ème</sup> harmonique

Le circuit est formé par un transformateur de point milieu avec lequel nous transmettons les courants qui viennent du premier circuit des noyaux. Il travaille avec deux interrupteurs qui sont complémentaires. Ce qui signifie que, pendant que le premier est ouvert le deuxième est fermé et vis versa. Finalement, une filtre passe bas est implémenté avec des résistances et capacitances.

Si nous faisons l'analyse du circuit nous pouvons voir que dans une première partie il fait la soustraction des deux courants qui arrivent du premier circuit des noyaux. Pour mieux comprendre cela nous allons montrer le flux de courant dans le schéma avec les graphiques suivants en fonction des différents états des interrupteurs.

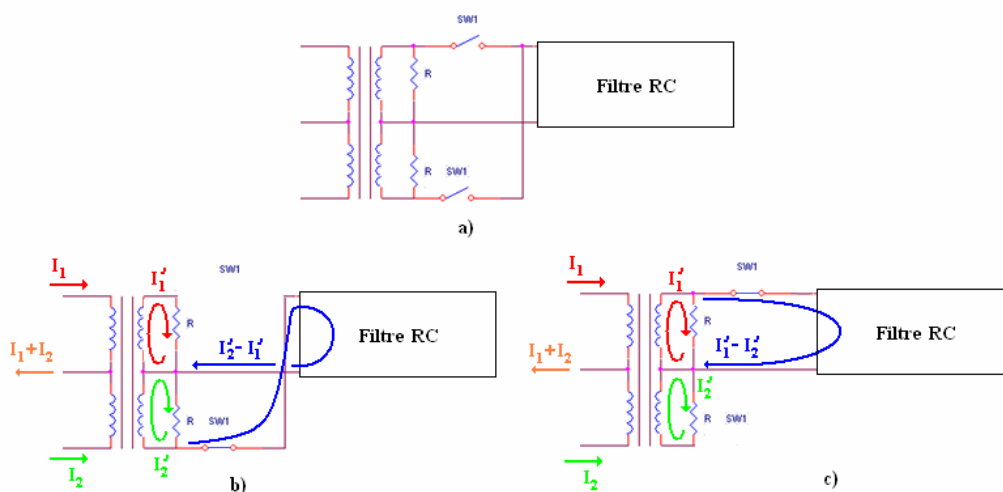


Figure 15 a) Circuit du deuxième harmonique simplifié b) premier interrupteur ouvert et le deuxième fermé c) premier interrupteur fermé et le deuxième ouvert

Comme nous pouvons observer dans la figure 15, pendant que le premier interrupteur est enclenché et le deuxième ouvert, le courant qui entre dans le filtre RC a la valeur de  $I_1 - I_2$  (figure 15 c). Par contre, lorsque le premier interrupteur est ouvert et le deuxième est enclenché le courant qui entre dans le filtre RC a la grandeur  $I_2 - I_1$ . Comme les interrupteurs commutent au double de la fréquence du signal de la source de tension carrée, on peut dire que nous aurons sur le filtre RC un courant avec une grandeur de  $I_1 - I_2$  pendant un quart de période du signal carré et un courant avec une grandeur de  $I_2 - I_1$  le quart de période suivant. Et ainsi de suite. Ce effet est montré sur les graphiques suivants.

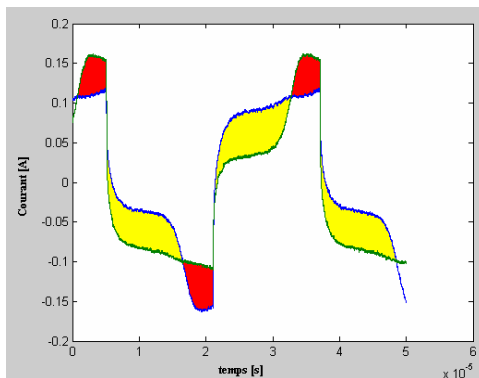


Figure 16 défaut de courants

Comme il a été mentionné précédemment, si nous faisons directement la soustraction des deux courants nous allons obtenir un défaut plutôt positif pendant un quart de période (surface rouge dans la figure 16) et un défaut plutôt négatif sur un autre quart de période (surface jaune dans la figure 16). Cela est dû à l'allure des courants à cause de l'hystérèse ; lorsque nous créons un défaut entre les deux courants, pendant un temps un courant sera plus grand que l'autre et au contraire. C'est la raison pour laquelle nous faisons la commutation à fréquence double de les interrupteurs.

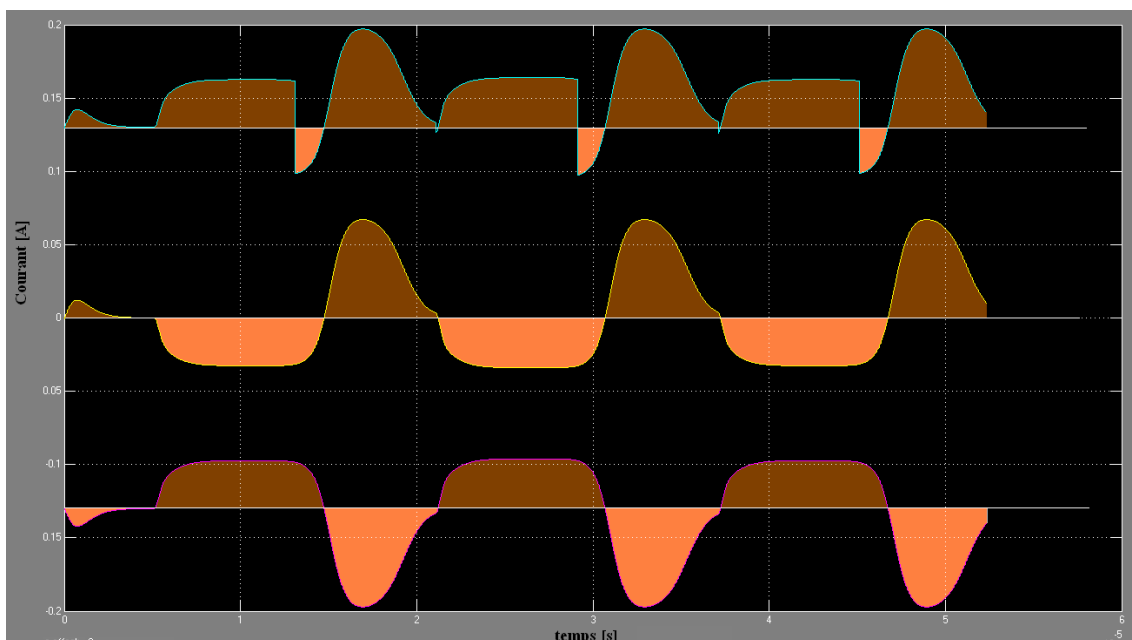


Figure 17 a) défaut avec la commutation b)  $I_1 - I_2$  c)  $I_2 - I_1$

Comme nous observons sur la Figure 17, sur le graphique b et c nous constatons que si nous calculons la surface nous ne pouvons pas savoir quel est le défaut parce que le défaut positif (surface marron) produit pendant un quart de période est presque



annulé par le défaut négatif produit pendant l'autre quart de période (surface orange). Par contre, avec la stratégie des commutations des interrupteurs, nous pouvons voir sur le figure 17 a), que la surface est proportionnelle au défaut entre les deux courants. Une fois que nous connaissons le fonctionnement, la façon de modéliser est triviale. Nous pouvons le faire avec deux blocs qui font la soustraction de  $I_1 - I_2$  et de  $I_2 - I_1$  et avec un bloc « signal routing » en choisissant bien l'une ou l'autre en fonction de quelle période il s'agit, comme il est montré dans la figure suivante :

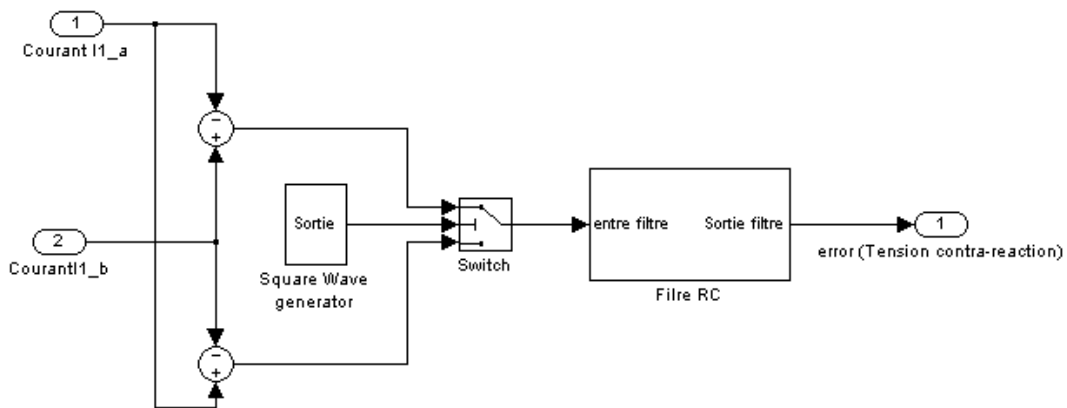


Figure 18 Modèle de la commutation

## Filtre RC

Le but du filtre est d'intégrer le courant qui arrive, Cela veut dire, calculer la surface de laquelle nous avons parlé avant et avoir par conséquent une tension proportionnelle au défaut des courants. Il a aussi le rôle de créer la consigne (tension de contre-réaction) que nous allons injecter dans la bobine de contre-réaction pour faire disparaître le défaut en créant le courant de contre-réaction, courant qui sera une image du courant à mesurer.

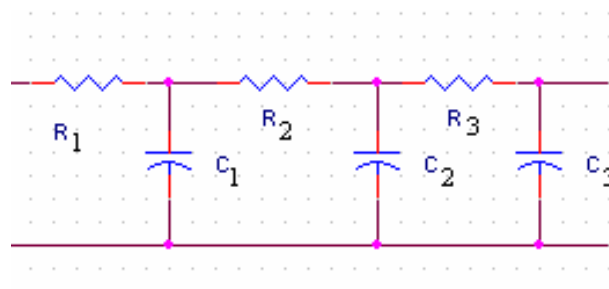


Figure 19 Schéma filtre RC

Nous avons modélisé le filtre avec une simple fonction de transfert qu'on a calculé comme nous montrerons ci-dessous :

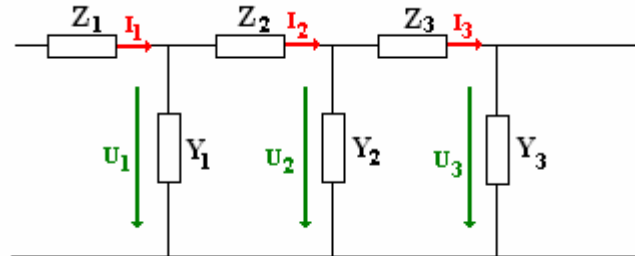


Figure 20 Circuit du filtre pour le calcul de la fonction de transfert

Nous posons les équations du circuit :

$$\begin{aligned} I_3 &= Y_3 \cdot U_3 \\ U_2 &= U_3 + Z_3 \cdot I_3 \\ I_2 &= I_3 + Y_2 \cdot U_2 \\ U_1 &= U_2 + Z_2 \cdot I_2 \\ I_1 &= I_2 + Y_1 \cdot U_1 \end{aligned}$$

En remplaçant chaque équation dans la suivante on arrive à :

$$\begin{aligned} I_1 &= I_2 + Y_1 \cdot (U_2 + Z_2 \cdot (I_3 + Y_2 \cdot (U_3 + Z_3 \cdot (Y_3 \cdot U_3)))) \\ I_1 &= I_3 + Y_2 \cdot U_2 + Y_1 \cdot (U_3 + Z_3 \cdot I_3 + Z_2 \cdot (I_3 + Y_2 \cdot (U_3 + Z_3 \cdot (Y_3 \cdot U_3)))) \\ I_1 &= Y_3 \cdot U_3 + Y_2 \cdot (U_3 + Z_3 \cdot Y_3 \cdot U_3) + Y_1 \cdot (U_3 + Z_3 \cdot Y_3 \cdot U_3 + Z_2 \cdot (Y_3 \cdot U_3 + Y_2 \cdot (U_3 + Z_3 \cdot (Y_3 \cdot U_3)))) \\ I_1 &= Y_3 \cdot U_3 + Y_2 \cdot U_3 + Y_2 \cdot Z_3 \cdot Y_3 \cdot U_3 + Y_1 \cdot U_3 + Y_1 \cdot Z_3 \cdot Y_3 \cdot U_3 + Y_1 \cdot Z_2 \cdot Y_3 \cdot U_3 + Y_1 \cdot Z_2 \cdot Y_2 \cdot U_3 + Y_1 \cdot Z_2 \cdot Y_2 \cdot Z_3 \cdot Y_3 \cdot U_3 \\ I_1 &= (Y_3 + Y_2 + Y_2 \cdot Z_3 \cdot Y_3 + Y_1 + Y_1 \cdot Z_3 \cdot Y_3 + Y_1 \cdot Z_2 \cdot Y_3 + Y_1 \cdot Z_2 \cdot Y_2 + Y_1 \cdot Z_2 \cdot Y_2 \cdot Z_3 \cdot Y_3) \cdot U_3 \\ \frac{U_3}{I_1} &= \frac{1}{Y_3 + Y_2 + Y_2 \cdot Z_3 \cdot Y_3 + Y_1 + Y_1 \cdot Z_3 \cdot Y_3 + Y_1 \cdot Z_2 \cdot Y_3 + Y_1 \cdot Z_2 \cdot Y_2 + Y_1 \cdot Z_2 \cdot Y_2 \cdot Z_3 \cdot Y_3} \end{aligned}$$

En sachant que :

$$\begin{aligned} Y_1 &= s \cdot C_1 & Z_1 &= R_1 \\ Y_2 &= s \cdot C_2 & Z_2 &= R_2 \\ Y_3 &= s \cdot C_3 & Z_3 &= R_3 \end{aligned}$$

Nous arrivons à l'équation suivante :

$$\frac{U_3}{I_1} = \frac{1}{s \cdot C_3 + s \cdot C_2 + s \cdot C_2 \cdot R_3 \cdot s \cdot C_3 + s \cdot C_1 + s \cdot C_1 \cdot R_3 \cdot s \cdot C_3 + s \cdot C_1 \cdot R_2 \cdot s \cdot C_3 + s \cdot C_1 \cdot R_2 \cdot s \cdot C_2 + s \cdot C_1 \cdot R_2 \cdot s \cdot C_2 \cdot R_3 \cdot s \cdot C_3}$$

En ordonnant les paramètres :

$$\frac{U_3}{I_1} = \frac{1}{s^3 \cdot (C_1 \cdot R_2 \cdot C_2 \cdot R_3 \cdot C_3) + s^2 \cdot (C_2 \cdot R_3 \cdot C_3 + C_1 \cdot R_3 \cdot C_3 + C_1 \cdot R_2 \cdot C_3 + C_1 \cdot R_2 \cdot C_2) + s \cdot (C_3 + C_2 + C_1)}$$



## 6.- Validation du modèle de 2ème harmonique

Les mesures avec le système réel ont été faites et nous avons obtenu environ 1 Volt de tension quand nous mesurons un courant de 1 Ampère et environ 2 Volts de tension quand nous mesurons un courant de 2 Ampères. Les résultats obtenus avec la simulation sont montrés sur les figure suivants :

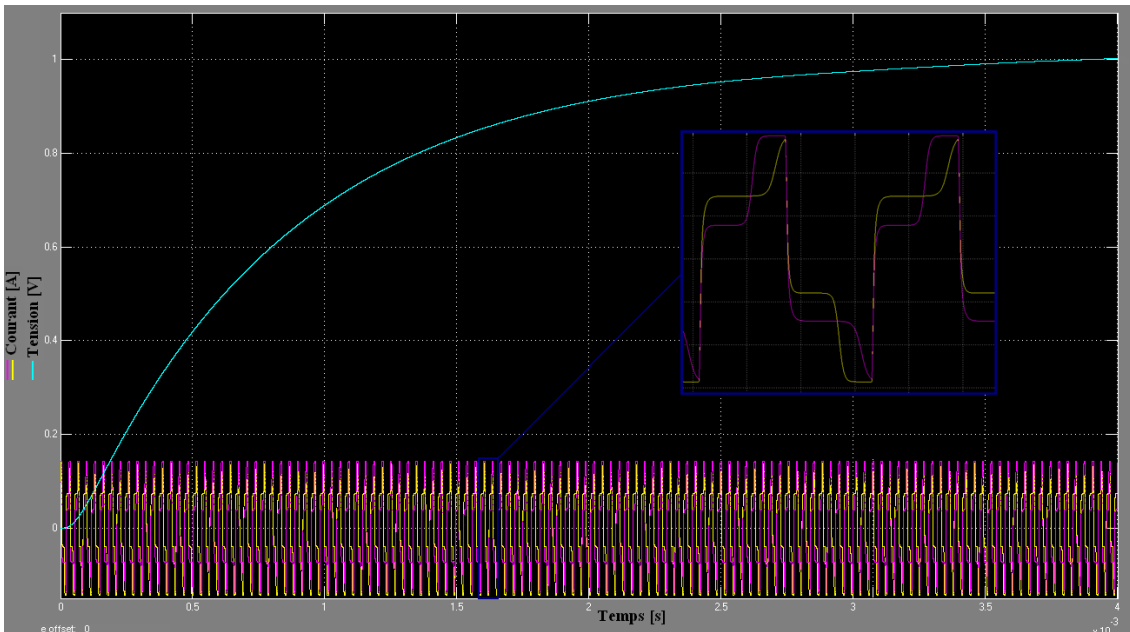


Figure 21 Sortie du filtre avec un courant à mesurer de 1 Ampère

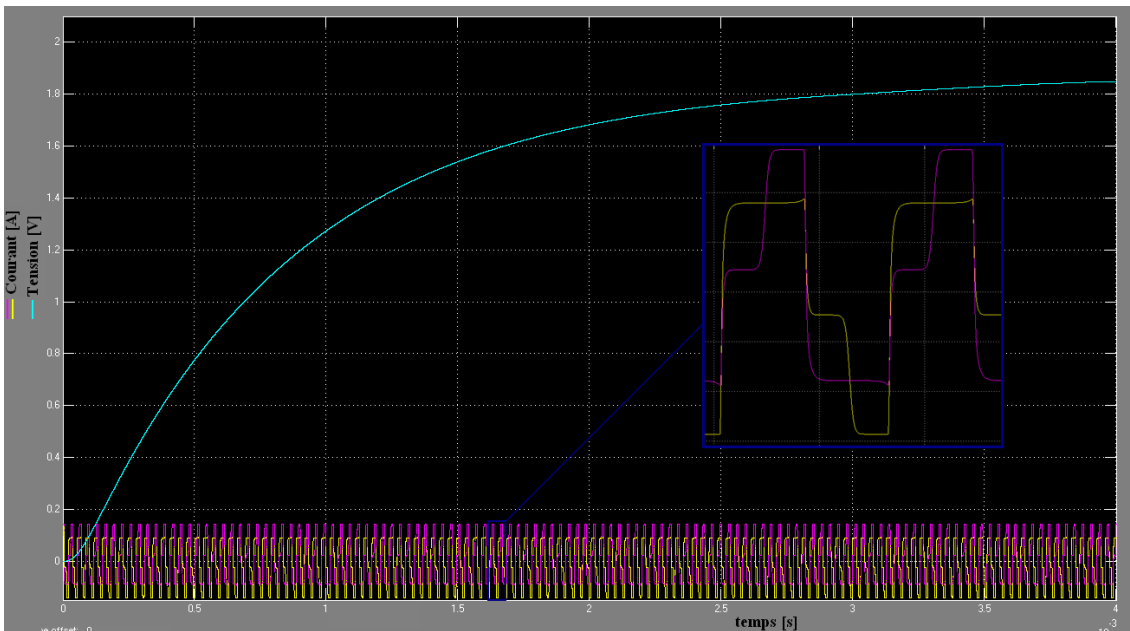


Figure 22 Sortie du filtre avec un courant à mesurer de 2 Ampères

On observe sur les figures précédentes que la tension de sortie du filtre RC dans la simulation s'approche des grandeurs que on a mesuré dans la réalité. Elles ne sont pas tout a fait exacts. Cela est dû au fait que les courants générés avec la source carrée de tension que l'on simule ne sont non plus toute a fait identiques aux courants dans le système réel.

## 7.- Fonctionnement de la boucle fermée

Une fois que nous avons validé le modèle de l'électronique de détection du deuxième harmonique, le pas suivant est de fermer la boucle pour arriver au but final : Mesure la courant que nous voulons avec plus de précision qu'avec un simple détecteur de champ magnétique à effet Hall.

Pour la suite de ce travail nous allons montrer avec plus de détail le fonctionnement de la boucle fermée de laquelle nous avons parlé auparavant.

### Fonctionnement de la boucle fermée

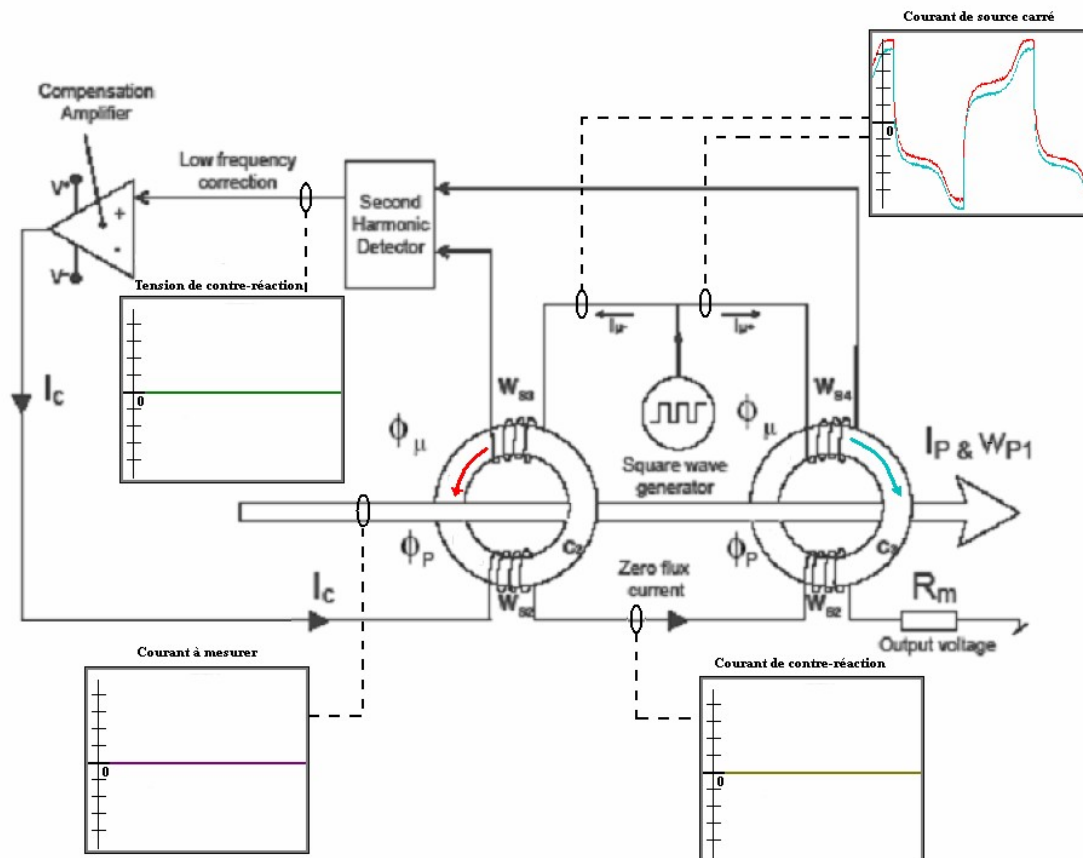


Figure 23 Boucle fermée du senseur avec un courant à mesurer de grandeur 0 Ampère

Sur la figure 23 est représenté le fonctionnement du circuit en boucle fermée quand le courant à mesurer a une grandeur nulle. La source de tension carrée crée des courants qui traversent des bobines autour des noyaux en créant un champ magnétique comme montre la figure 23. Comme les noyaux ont les mêmes caractéristiques physiques et aucun autre courant engendre d'autres champs magnétiques sur les noyaux, les deux courants qui traversent la première bobine restent identiques.

Comme ces deux courants sont identiques, le défaut entre le deux est inexistant. L'électronique de détection du deuxième harmonique donne une tension proportionnelle à ce défaut comme nous avons démontré avant, donc la tension mesurée sera nulle. Si la tension de contre-réaction est nulle on ne créera aucun courant de contre-réaction. S'il n'existe pas de courant de contre-réaction aucun champ magnétique supplémentaire sera créé sur les noyaux donc il n'y aura pas de changement sur les courants de la source carrée et le système restera en équilibre.

Par contre, sur la figure suivante nous observons qu'est ce qu'il se passe si nous mettons un courant dans le circuit de mesure.

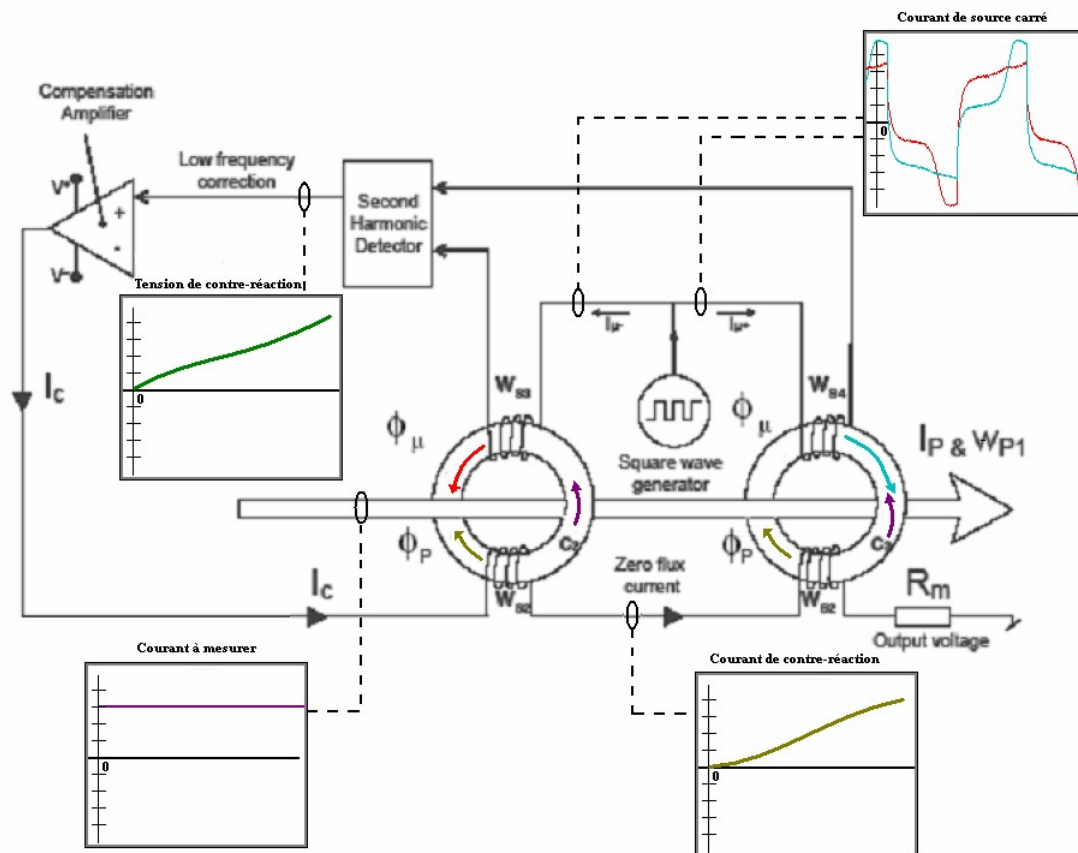


Figure 24 Boucle fermée du senseur avec un courant à mesurer de grandeur > 0 Ampère

Si le courant à mesurer a une grandeur supérieure à zéro comme, la figure 24 montre, l'équilibre se perd car il va créer des champs magnétiques supplémentaires sur les noyaux. Dans le premier noyau, ce champ magnétique s'additionne au champ magnétique créé par le courant de la source de tension carrée. Par contre, dans le deuxième noyau, ce champ magnétique est contraire au champ magnétique créé par l'autre courant de la source de tension carrée comme on peut constater sur le graphique 24. Pour cette raison les courants de la source de tension carrée vont réagir en sens contraire en faisant apparaître un défaut entre les deux. À cause de ce phénomène, l'électronique de détection du deuxième harmonique commencera à monter la tension pour arriver à donner une tension de contre-réaction proportionnelle à ce défaut. Par conséquent cette tension de contre-réaction commencera aussi à faire monter un courant

de contre-réaction qui traversera la troisième bobine autour des noyaux en créant un champ magnétique sur le noyau, contraire à celui créé par le courant que nous voulons mesurer. Si ce courant augmente, le champ magnétique créé augmente aussi en annulant le champ magnétique créé par le courant que l'on mesure, et par conséquent cela va diminuer le défaut entre les deux courants de la source de tension.

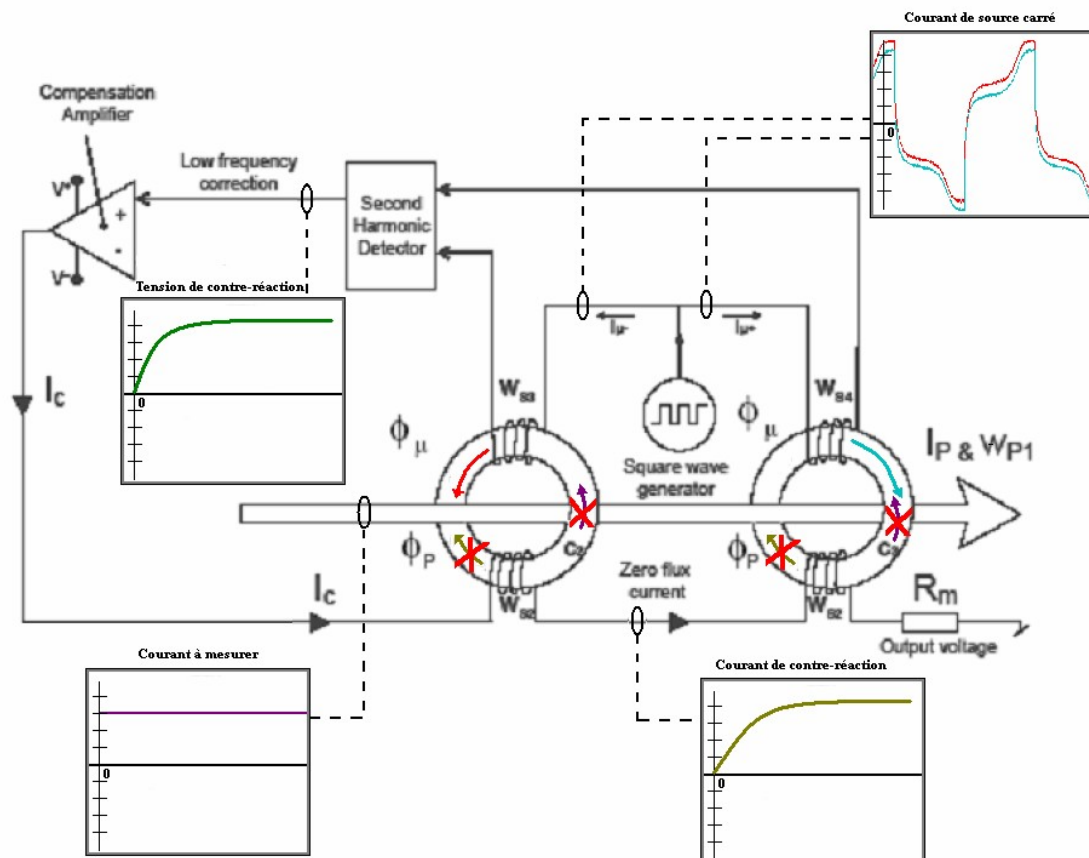


Figure 25 Boucle fermée du senseur avec un courant à mesurer de grandeur  $> 0$  A en équilibre

Comme déjà énoncé avant l'électronique de deuxième harmonique n'a pas seulement le but de trouver une tension proportionnelle au défaut des courants, mais il a aussi un rôle de régulateur. Quand il arrive à créer une tension de contre-réaction suffisante pour créer un courant de contre-réaction qui fait disparaître le défaut entre les deux courants de la source de tension carrée, le filtre RC a une constante de temps suffisamment grande pour la maintenir. De cette façon on peut dire qu'on a un système en boucle fermée avec un régulateur (montage en régulateur comme montre la figure suivante) qui arrivera à l'équilibre lorsque le défaut entre les courants de la source de tension carrée disparaît.

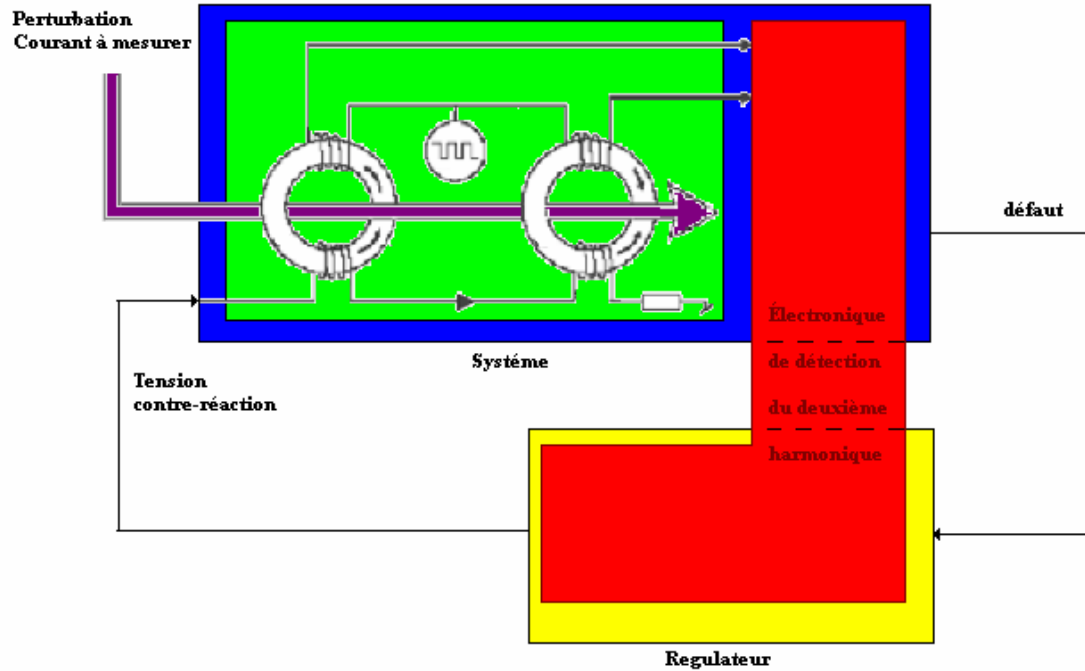
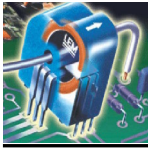
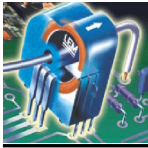


Figure 26 Mode régulation

Sur la figure 26 nous pouvons voir d'une façon plus claire le mode régulation de notre boucle fermée. Le carré bleu est le système que nous voulons régler. Il est formé par la boucle de détection de courant (carré vert) et de une partie de l'électronique de détection de deuxième harmonique (carré rouge). Le régulateur (carré jaune) est formé pour l'autre partie de l'électronique de détection du deuxième harmonique (carré rouge). Le courant à mesurer fait le rôle de la perturbation du système.





## 8.- Simulation en boucle fermée

Nous allons maintenant passer à la simulation en boucle fermée du modèle implémenté sur Matlab-Simulink . La simulation a été faite pour un courant à mesurer de 1 ampère. Dans la figure suivante, nous montrons sur quels points du circuit les mesures ont été prises:

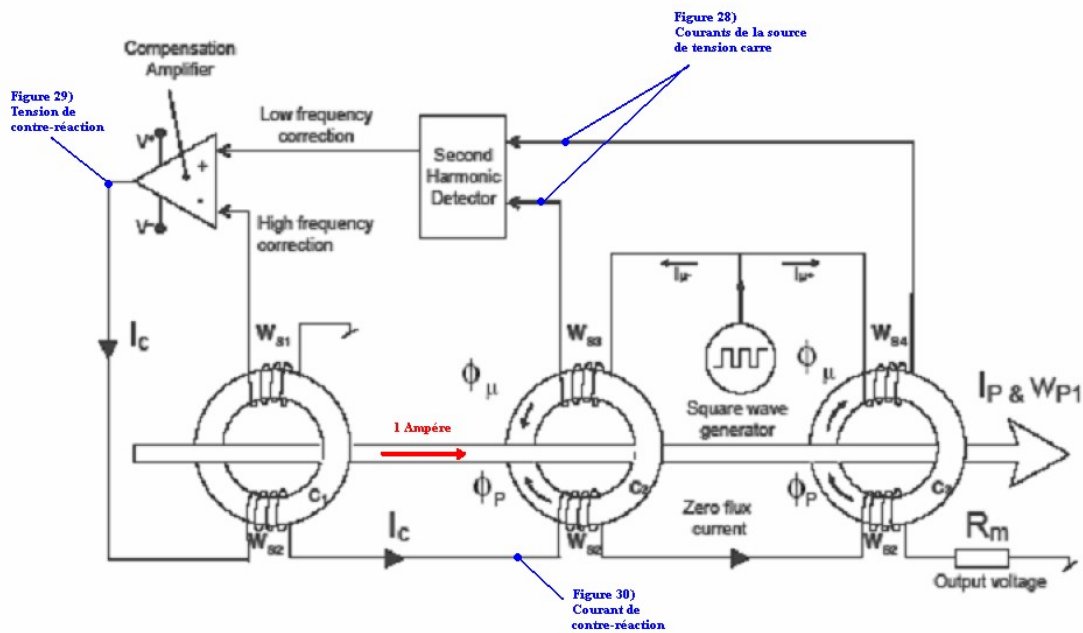


Figure 27 Points sur lesquels on les mesures dans la simulation ont été faites.

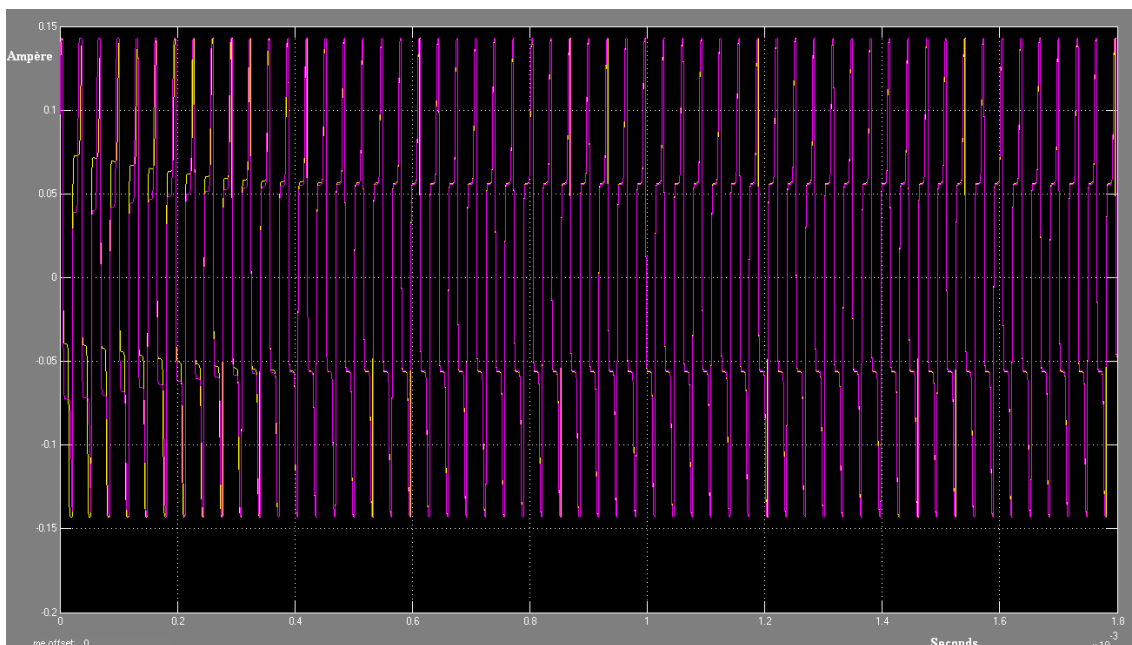


Figure 28 Courants de la source de tension carrée



Sur la figure 28 nous observons que lorsque nous mesurons un courant de 1 ampère, il apparaît au début un défaut entre les deux courants générés par la source de tension carrée. Par contre peu à peu ce défaut disparaît jusqu'à ce que nous ayons deux courants identiques. Ce défaut disparaît à cause de la tension de contre-réaction, créée par l'électronique de détection du deuxième harmonique, qui joue le rôle de consigne du système. (figure 29). Cette tension génère un courant de contre-réaction pour faire disparaître le champ magnétique créé par le courant que l'on mesure (figure 30).

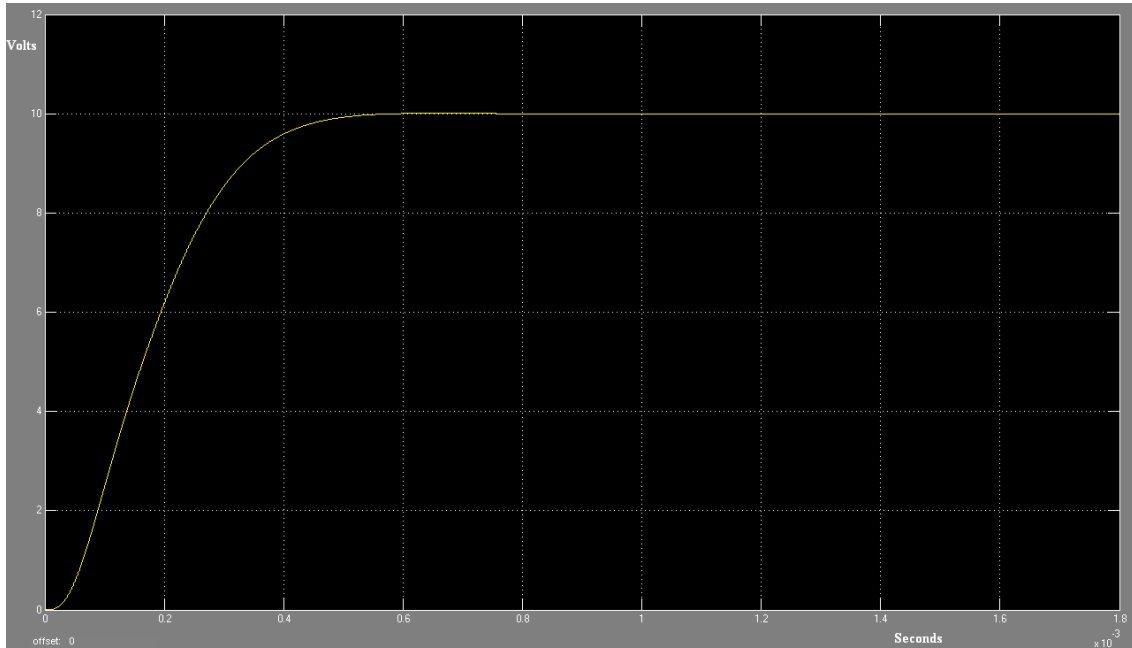


Figure 29 Tension de contre-réaction

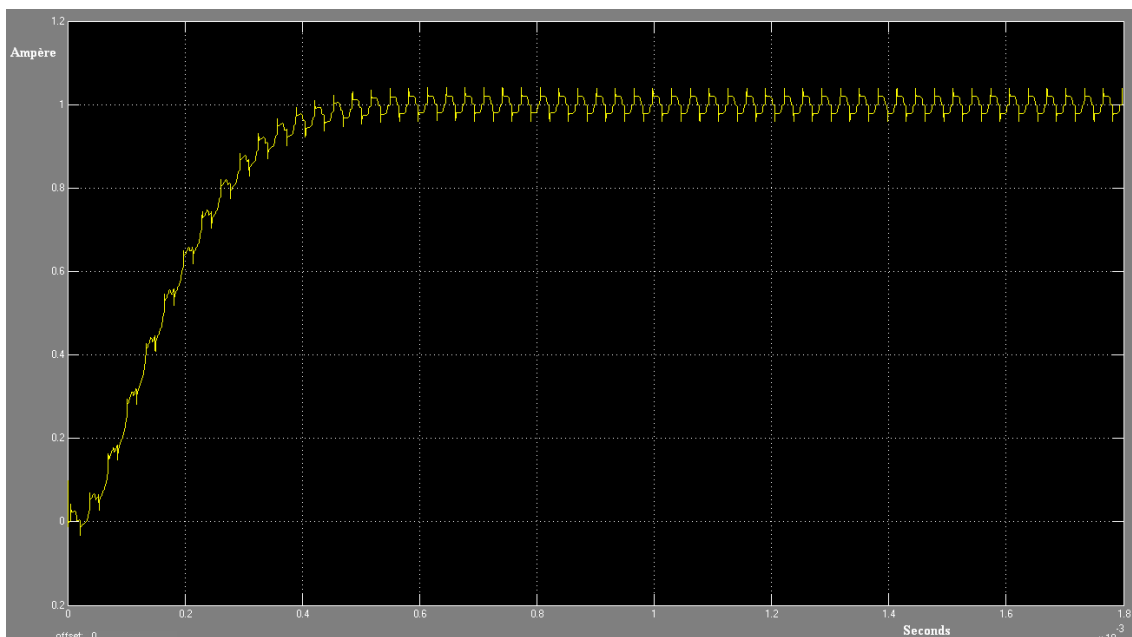


Figure 30 Courant de contre-réaction

Ce courant sera donc une image plus précise du courant que nous voulons mesurer que si nous faisons la mesure avec un capteur à effet Hall.

Cette simulation a été fait avec des valeurs qui ne correspondent pas à la réalité, au niveau de las caractéristiques des composantes électroniques. Le pas suivant à suivre sera, simuler le modèle fait, en utilisant les valeurs réels et valider le système complet.

## 9.- Conclusion

Un premier modèle pour la boucle de mesure de courant utilisant un capteur de type « Fluxgate » a été établi. Il est implémenté avec une structure de Simulink qui reproduit le fonctionnement de la construction de ce capteur. Les caractéristiques des noyaux ferromagnétiques, ce qui englobe la saturation et la hystérésis du matériel est implémenté avec une S-Function sous Matlab-Simulink. Le système a été simulé et nous avons validé la partie qui génère la saturation et la hystérésis avec des mesures du système réel. Il faut prendre des mesures sur le système réel pour valider les parties restantes du capteur : l'électronique de détection du deuxième harmonique et la bobine de contre-réaction (système de la boucle fermée), en regardant si les hypothèses faites lors de la simulation peuvent être maintenues, ou devront peut-être être revus.

Nous avons obtenu des résultats intéressants avec le modèle de Preisach discret et il est possible encore avoir une marge d'amélioration du modèle de la hystérésis comme nous avons constaté en la validation fait pendant le travail mais il faut cependant se demander si cette amélioration justifie des efforts supplémentaires et le nombre des calculs nécessaires, ou bien est déjà suffisante avec ces approximations.

Une fois que le modèle de la boucle de détection à basses fréquences aura été validé expérimentalement il faudra commencer avec la modélisation de la partie de hautes fréquences et la simulation de la structure complète du capteur.

Lausanne  
lundi, 19. juin 2006

Alejandro Rujas

## 10.- Bibliographie

### Ouvrages

- [1] « Electromécanique » traité d'électricité , Volume IX. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. M. Jufer.
- [2] « Filtres électriques » traité d'électricité, Volume XIX. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Martin Hasler et Jacques Neiryck
- [3] « Commande numérique de systèmes dynamiques ». Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Roland Longchamp.

### Articles

- [4] « Identification and Inversion of Magnetic Hysteresis for Sinusoidal Magnetization». Martin Kozek, Bernhard Gross. Vienna University of Technology

### Projet semestre

- [5] Modélisation d'une boucle de mesure de courant utilisant un capteur de type « Fluxgate », Sélim Mezari. Hiver 2006. Laboratoire d'automatique. EPFL

### Sites web

[http://scielo-test.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-07642004000300005&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://scielo-test.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642004000300005&lng=en&nrm=iso&tlng=es)



This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.  
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.  
This page will not be added after purchasing Win2PDF.