

MODELISATION D'UN RESEAU DE TRANSPORT D'ENERGIE

II-1 INTRODUCTION

Une ligne électrique est le moyen de transport de l'énergie électrique à partir d'une source vers l'utilisation. Que ce soit à partir de l'alternateur d'une centrale vers un transformateur HT, entre deux transformateurs (HT/MT, MT/BT, BT/TBT), ou d'un transformateur vers l'utilisation. Pour faire l'étude d'un réseau électrique soumis aux phénomènes transitoires du transfo, il est indispensable de connaître le modèle mathématique d'une ligne à partir de ses éléments.

II-2 LES ELEMENTS DU RESEAU

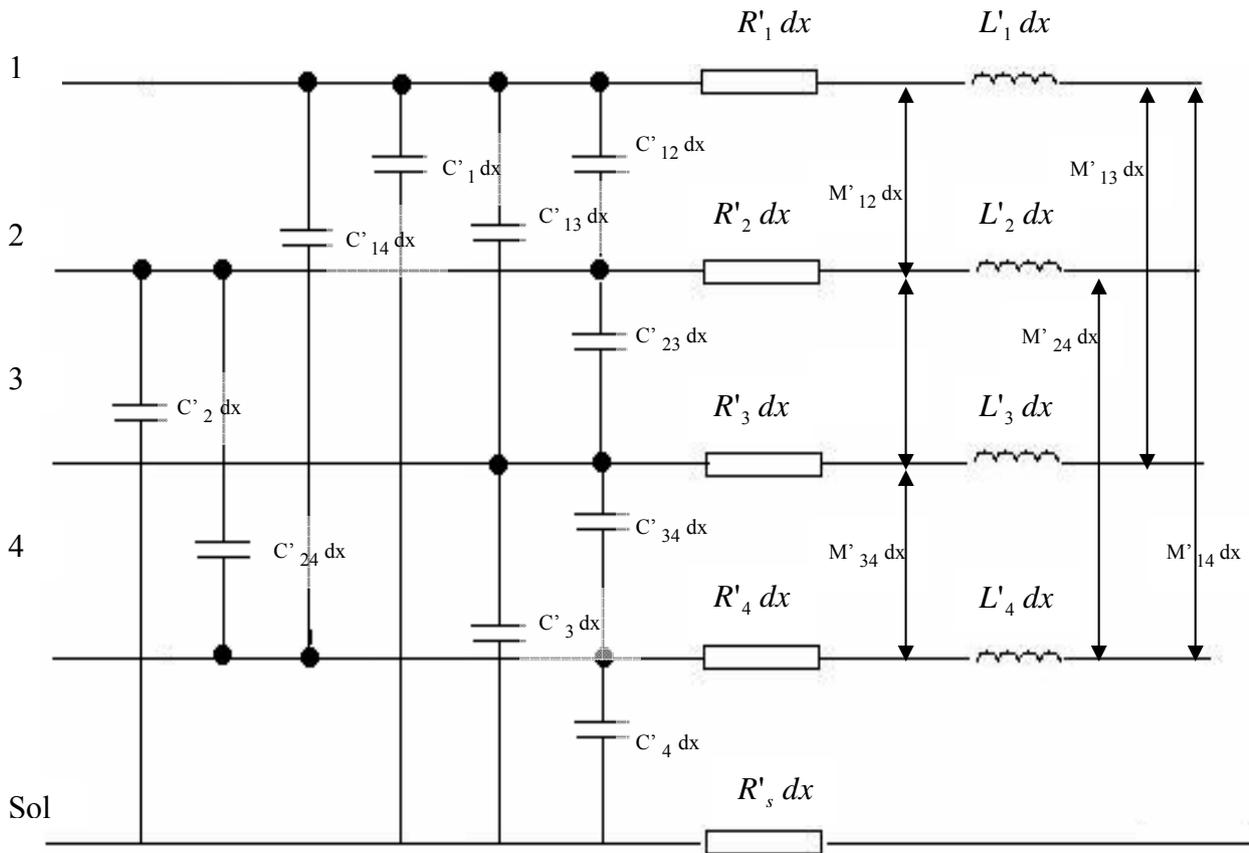
Un réseau de transport d'énergie se compose :

- des transformateurs de haute puissance se trouvant juste après la centrale délivrant les courants et tension de départ sur une ligne HT (tension aux bornes >220 KV)
- des lignes de transport d'énergie servant à distribuer l'énergie électrique à travers tout le réseau.
- des transformateurs de moyenne puissance (tension aux bornes de 63 à 150 KV)
- des transformateurs de distribution en basse tension (tension aux bornes de 5,5 à 13 KV)
- des dispositifs de protection comme les isolants électriques, les parafoudres et les éclateurs contre les surtensions.

II-3 LES PARAMETRES LINEIQUES

On utilise des lignes aériennes triphasées pour un réseau MT. La modélisation d'une ligne se fait à partir des éléments passifs R' , M' , C' , L' , G' qui constituent les paramètres linéiques.

Pour une ligne triphasée, le modèle général d'une portion de la ligne à un instant t est la suivante



fig(2-1) Représentation d'une ligne à retour par le sol

avec u_n : tension nominale

i_k : courant traversant un conducteur k

R'_k : résistance linéique du conducteur k

R_s : résistance du sol (retour par le sol)

L'_k : inductance linéique du conducteur k

M'_{kj} : inductance mutuelle linéique de 2 conducteurs k et j

C'_{ks} : capacité linéique transversale entre conducteur k et le sol

C'_{kj} : capacité linéique entre 2 conducteurs k et j

G'_{ks} : conductance linéique transversale entre conducteur k et le sol

G'_{kj} : conductance linéique transversale entre deux conducteurs

L'énergie électrique se propage à travers la ligne suivant les équations :

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = G' u + \frac{\partial}{\partial t} (C' u) \quad (2-1)$$

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = R' i + \frac{\partial}{\partial t} (L' i) \quad (2-2)$$

Pour une ligne sans perte :

$$R'=0 \quad , \quad G'=0$$

On a alors

$$\frac{\partial i}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial t} (C' u) \tag{2-3}$$

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial t} (L' i) \tag{2-4}$$

II-3-1 Paramètres transversaux

En généralisant l'équation (2-1), on a

$$-\frac{\partial i_l}{\partial x} = G' u_{nl} + C' \frac{\partial u_{nl}}{\partial t} \tag{2-5}$$

On a des chutes de courant dans chaque élément de la ligne à cause des résistances et des conductances linéiques.

Ces chutes de courant sont exprimées par

$$-[I]=[Y'] \cdot [U] \tag{2-6}$$

où $[Y']$: matrices des admittances linéiques

$[I]$: vecteur courant complexe des conducteurs

$[U]$: vecteur tension complexe simple

et

$$[Y']=[G'] + j \omega [C'] \tag{2-7}$$

où $[G']$: matrices des conductances linéiques

$[C']$: matrices des capacités linéiques

Par définition, les capacités linéiques sont données par

$$[C']=[K']^{-1} = \frac{1}{\det(K')} \cdot [K']^T \tag{2-8}$$

où $[K']$: matrice des coefficients des potentiels

Pour un sol parfaitement conducteur, chaque conducteur linéique admet une image par rapport au sol.

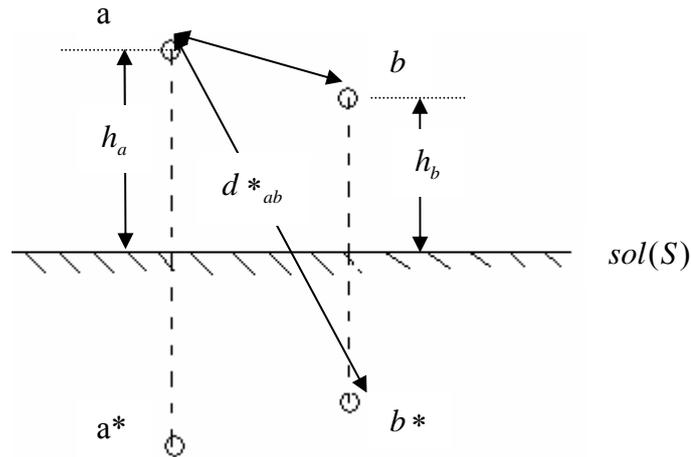


fig (2-2) 2 conducteurs a, b et leurs images

Les éléments de $[K']$ sont définis par

$$K'_{kk} = \frac{1}{2\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \ln \frac{2 \cdot h_a}{r} \quad (2-9)$$

$$K'_{kj} = \frac{1}{2\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \ln \frac{d^*_{ab}}{d_{ab}}$$

où r : rayon du conducteur
 k et j : indices relatives aux 2 conducteurs

• la réactance linéique

En considérant la résistivité du sol comme nulle ($\rho_{sol}=0$), l'inductance linéique d'un conducteur a est donnée par

$$L'_a = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{2h_a}{r} \quad (2-10)$$

L'inductance mutuelle entre 2 conducteurs a et b

$$M'_{ab} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{d^*_{ab}}{d_{ab}} \quad (2-11)$$

II-3-2 Paramètres longitudinaux

En généralisant l'équation (2-2) on a

$$-\frac{\partial u_{nl}}{\partial x} = R'_l \cdot i_l + L' \cdot \frac{di_l}{dt} \quad (2-12)$$

Les chutes de tension dans les éléments de la ligne sont exprimées par

$$-[U] = [Z'] \cdot [I] \quad (2-13)$$

où $[Z']$: matrice des impédances complexes linéiques
 $[I]$: vecteur des courants complexes dans les conducteurs
 $[U]$: vecteur des tensions complexes entre conducteur et sol

L'expression de Z' s'écrit

$$[Z'] = [R'] + j\omega [L']$$

avec $[R']$: matrice des résistances linéiques
 $[L']$: matrice des inductances mutuelles et propres linéiques

• la résistance linéique

En courant alternatif, l'effet de peau ou effet Kelvin agissant sur un conducteur doit être considéré. Il se manifeste par une variation de la densité de courant au voisinage de la surface du conducteur.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \mu \cdot f \cdot \sigma}} \tag{2-14}$$

Suivant l'équation (2-14), L'effet Kelvin est déterminé par sa profondeur de pénétration avec

μ : perméabilité magnétique = $\mu_0 \cdot \mu_r$

σ : conductivité électrique = $\frac{1}{\rho}$

f : fréquence

II-4 HYPOTHÈSES

Pour parfaire la modélisation de la ligne, des hypothèses simplificatrices sont à considérer :

1. pour les 3 conducteurs portant les phases de la ligne, les paramètres linéiques sont égaux entre eux c'est-à-dire

$$\begin{aligned} R'_1 &= R'_2 = R'_3 \\ L'_1 &= L'_2 = L'_3 \\ M'_{12} &= M'_{23} = M'_{31} \\ C'_{12} &= C'_{23} = C'_{31} \\ G'_{1S} &= G'_{2S} = G'_{3S} \\ G'_{12} &= G'_{23} = G'_{31} \\ C'_{1S} &= C'_{2S} = C'_{3S} \end{aligned}$$

2. La résistance linéique du sol est nulle

$$R'_s = 0$$

3. La somme des courants de ligne est nulle

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

4. La somme des tensions simples entre conducteur et sol est nulle

$$u_{1S} + u_{2S} + u_{3S} = 0$$

Chapitre

3

MISE EN EQUATIONS DES PHENOMENES D'INSTABILITE DÛS AUX OSCILLATIONS PROVOQUEES PAR LE TRANSFORMATEUR DE PUISSANCE

III-1 INTRODUCTION

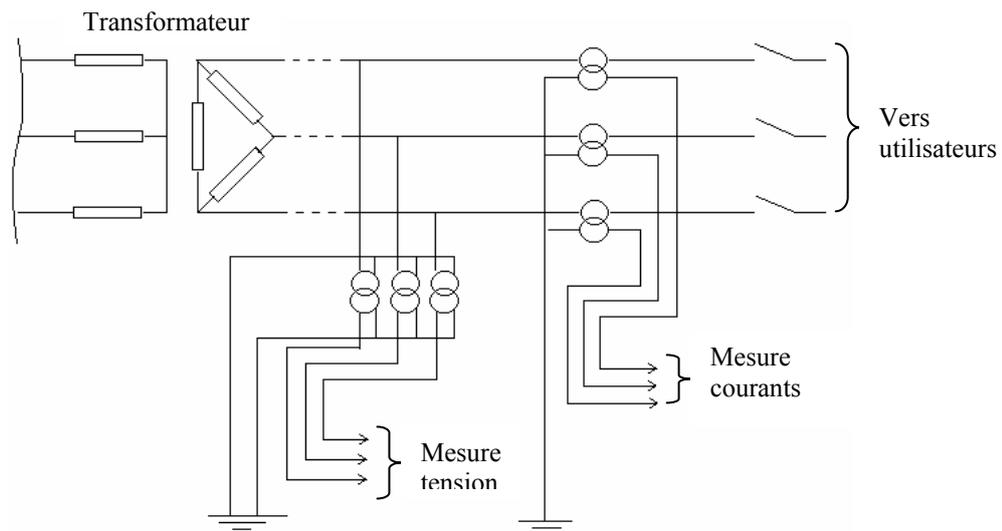
Dans un réseau de distribution d'énergie électrique, les transformateurs provoquent des oscillations harmoniques. Les phénomènes transitoires découlant de ces oscillations se propagent dans tout le réseau. Ces phénomènes apparaissent si la fréquence du réseau est la même que celle de l'une des harmoniques des sources de tension.

En réalité, la théorie établie décrivant ces phénomènes est purement descriptive. Mais, pour les analyser, les personnels d'exploitation peuvent les reproduire.

Dans ce chapitre, on va établir une méthode qui permettrait de prévoir les conditions nécessaires pour l'apparition de ces phénomènes. On proposera une modèle mathématique appropriée à une portion de réseau afin d'interpréter les résultats obtenus.

III-2 ANALYSE D'UNE PORTION DE RESEAU

Considérons une portion de réseau de la JIRAMA fonctionnant à faible charge :



fig(3-1) Schéma d'une portion de réseau atteinte par les oscillations

La méthode à adopter pour l'analyse sera la suivante :

- on définit les différentes interactions existant entre les éléments du réseau par des éléments fictifs
- on pose des hypothèses permettant de réduire le schéma et les équations obtenues
- on cherche un schéma équivalent qui peut représenter, aussi rigoureux que possible, la portion du réseau en tenant compte de chaque élément
- on établit le modèle mathématique de la portion

III-2-1 Interactions

Dans la portion de réseau, il y a interaction :

- entre les capacités des câbles et la terre
- de la capacité entre spires du primaire
- de l'effet capacitif du transformateur de courant sur le transformateur de tension car ces 2 types de transformateurs sont de même nature.

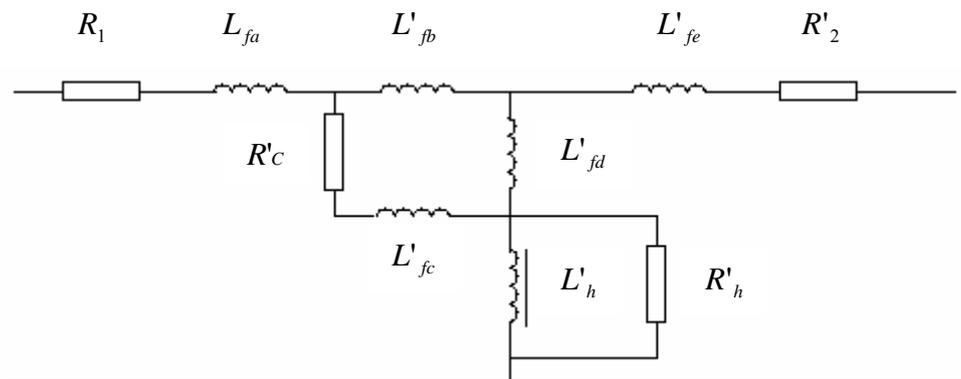
III-2-2 Hypothèses

Les hypothèses sont nécessaires à l'élaboration du schéma équivalent et du modèle car certains éléments sont négligeables devant d'autres. On considère alors que la source de tension est parfaitement sinusoïdale, ce qui entraîne à négliger l'impédance de court circuit du transformateur, l'effet des enroulements à savoir les flux de dispersion, les courants capacitifs et magnétisants

III-2-3 Schémas équivalents

Pour l'établissement du schéma équivalent, l'inconvénient principal est la représentation des transformateurs de tension pour la mesure de tension entre phase et terre. Ces transformateurs ont des enroulements de type à compensation (couplage Z) destinés à réduire les flux de dispersion entre les colonnes ayant un enroulement secondaire et un demi enroulement primaire, un second demi enroulement primaire lorsque le secondaire est fermé sur un appareil de mesure.

La représentation des transformateurs avec enroulement de compensation est la suivante



fig(3-2) schéma équivalent d'un transformateur avec enroulement de compensation rapporté au primaire

avec :

R_1 : résistance primaire

$L'_{fa}, L'_{fb}, L'_{fe}, L'_{fc}, L'_{fd}$: inductances de fuite entre les différents enroulements

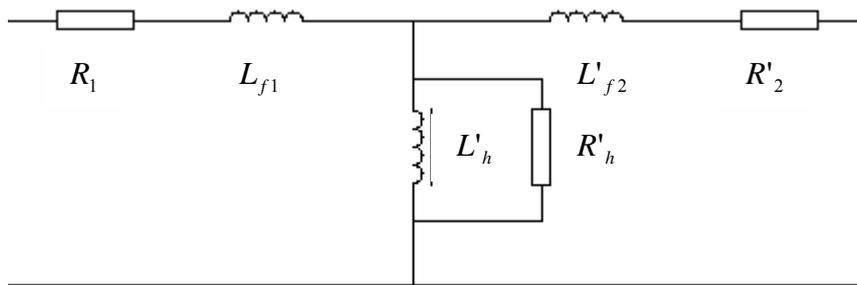
R'_2 : résistance secondaire rapportée au primaire

R'_c : résistance de l'enroulement de compensation rapporté au primaire

R'_h : résistance des pertes fer

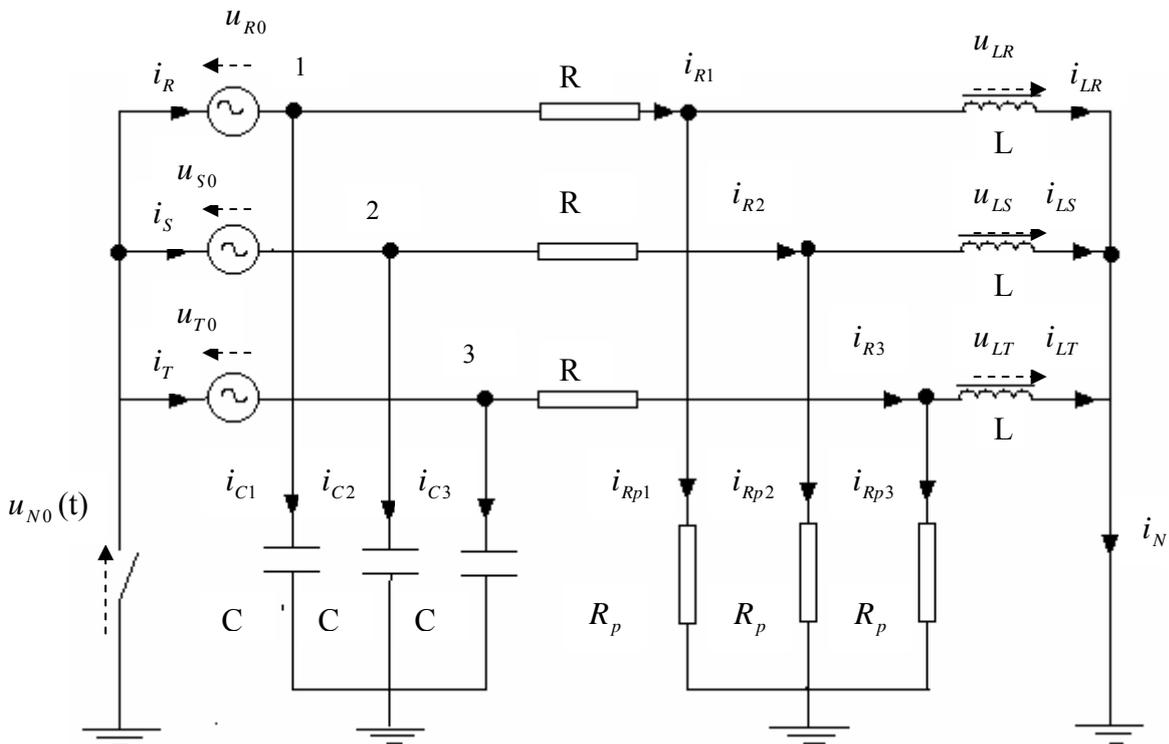
L'_h : inductance principale du flux commun à tous les enroulements

On peut encore réduire ce schéma à l'aide de transformation triangle-étoile. On aura une représentation simple en T du transformateur.



fig(3-3) représentation en T d'un transformateur de tension

Compte tenu des interactions, des différentes hypothèses et du schéma équivalent du transformateur compensé, la représentation de la ligne sur la figure fig3-1 se simplifie



fig(3-4) schéma équivalent simplifié de la portion de ligne

avec :

$u_{N0}(t)$: tension aux bornes du sectionneur de terre du secondaire du transformateur

$u_{R0}(t), u_{S0}(t), u_{T0}(t)$: source de tension sinusoïdale

u_{LR}, u_{LS}, u_{LT} : tension aux bornes des inductances non linéaires

R : résistance primaire des transfo

R_p : résistance tenant compte des pertes fer et résistance de charge du transfo

L : inductance principale des transformateurs compensés variant au cours d'un cycle

C : capacité représentant

- la capacité entre spires au primaire

- la capacité entre câbles

- l'effet capacitif entre transformateur de courant et de tension

III-2-4 Mise en équation de la portion de ligne

Lorsque le sectionneur de terre est ouvert, on a

$$i_R + i_S + i_T = 0 \quad (3-1)$$

Le transformateur 22,95KV/5.5KV est à flux obligé car il comporte 3 colonnes, on en déduit que :

$$u_{R0} + u_{S0} + u_{T0} = 0 \quad (3-2)$$

A partir de la figure **fig3-4**, on peut écrire :

$$\begin{aligned} i_N &= -[(i_{Rp1} + i_{Rp2} + i_{Rp3}) + (i_{C1} + i_{C2} + i_{C3})] \\ &= -\left[\frac{1}{R_p} (u_{Rp1} + u_{Rp2} + u_{Rp3}) + C \frac{d}{dt} (u_{C1} + u_{C2} + u_{C3}) \right] \end{aligned}$$

avec

$$\begin{aligned} u_{Rp1} &= -R.i_{R1} + u_{R0} - u_{N0} \\ u_{Rp2} &= -R.i_{R2} + u_{S0} - u_{N0} \\ u_{Rp3} &= -R.i_{R3} + u_{T0} - u_{N0} \\ u_{C1} &= u_{R0} - u_{N0} \\ u_{C2} &= u_{S0} - u_{N0} \\ u_{C3} &= u_{T0} - u_{N0} \end{aligned}$$

En appliquant la formule (3-2)

$$\begin{aligned} i_N &= -\left[\frac{1}{R_p} (-3u_{N0} - R(i_{R1} + i_{R2} + i_{R3})) + C \frac{d}{dt} (-3u_{N0}) \right] \\ &= -\left[-\frac{3}{u_{Rp}} u_{N0} - 3C \frac{d}{dt} u_{N0} - \frac{R}{R_p} (i_{R1} + i_{R2} + i_{R3}) \right] \end{aligned}$$

En appliquant la loi des nœuds aux points 1, 2, 3

$$\begin{aligned} i_{R1} &= i_R - i_{C1} \\ i_{R2} &= i_S - i_{C2} \\ i_{R3} &= i_T - i_{C3} \end{aligned}$$

En appliquant la formule (3-1) on aura

$$\begin{aligned} i_N &= \frac{3u_{N0}}{Rp} + 3C \frac{du_{N0}}{dt} - \frac{R}{Rp} (i_{C1} + i_{C2} + i_{C3}) \\ &= \frac{3u_{N0}}{Rp} + 3C \left(1 + \frac{R}{Rp} \right) \frac{du_{N0}}{dt} \end{aligned}$$

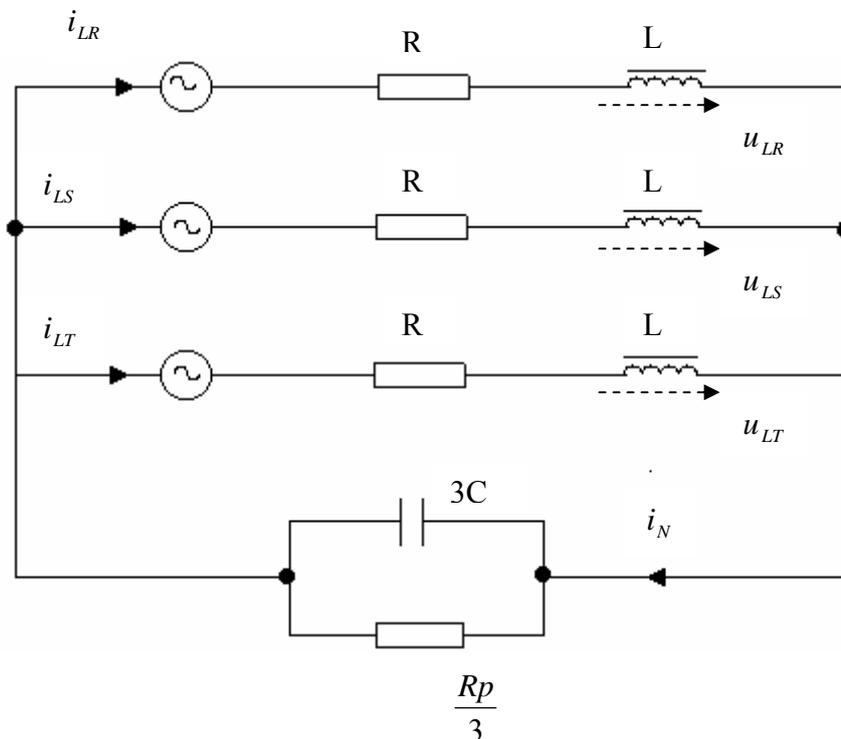
car

$$i_{C1} + i_{C2} + i_{C3} = -3C \frac{du_{N0}}{dt}$$

Généralement $\frac{R}{Rp} \ll 1$, d'où

$$i_N = 3 \cdot \frac{u_{N0}}{Rp} + 3C \frac{du_{N0}}{dt} \tag{3-3}$$

Avec cette expression de i_N , la figure **fig3-4** devient :



fig(3-5) Schéma équivalent permettant la modélisation mathématique

III-3 MODELISATION MATHÉMATIQUE

De ce schéma **fig3-5**, on peut tirer les équations suivantes :

$$u_{R0} = u_{N0} + R.i_{LR} + u_{LR} \quad (3-4)$$

$$u_{S0} = u_{N0} + R.i_{LS} + u_{LS} \quad (3-5)$$

$$u_{T0} = u_{N0} + R.i_{LT} + u_{LT} \quad (3-6)$$

$$i_N = i_{LR} + i_{LS} + i_{LT} = 3C \frac{du_{N0}}{dt} + 3C \cdot \frac{u_{N0}}{Rp} \quad (3-7)$$

On sait que :

$$\begin{aligned} u_{LR} &= \frac{d}{dt}(N\phi_R) = \frac{d}{dt}(N.b_R.S) = N.S. \frac{db_R}{dt} \\ &= N.S. \frac{db_R}{dh_R} \cdot \frac{dh_R}{dt} \\ &= N.S. \left(\frac{db}{dh} \right)_R \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{N}{l} . i_{LR} \right) \end{aligned}$$

On obtient ainsi les expressions de u_{LR}, u_{LS}, u_{LT}

$$u_{LR} = \frac{N^2.S}{l} \left(\frac{db}{dh} \right)_R \cdot \frac{di_{LR}}{dt} \quad (3-8)$$

$$u_{LS} = \frac{N^2.S}{l} \left(\frac{db}{dh} \right)_S \cdot \frac{di_{LS}}{dt} \quad (3-9)$$

$$u_{LT} = \frac{N^2.S}{l} \left(\frac{db}{dh} \right)_T \cdot \frac{di_{LT}}{dt} \quad (3-10)$$

avec :

S : section du circuit magnétique

l : longueur moyenne

N : nombre de spires au primaire

ϕ : flux embrassé par une spire au primaire représenté par la self non linéaire.

A partir des équations (3-4) à (3-10), on obtient le système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{du_{N0}}{dt} &= \frac{1}{3C} \cdot (i_{LR} + i_{LS} + i_{LT}) - \frac{1}{R_p \cdot C} \cdot u_{N0} \\ \frac{di_{LR}}{dt} &= \frac{(u_{R0} - u_{N0} - R.i_{LR})}{\frac{N^2.S}{l} \left(\frac{db}{dh} \right)_R} \\ \frac{di_{LS}}{dt} &= \frac{(u_{S0} - u_{N0} - R.i_{LS})}{\frac{N^2.S}{l} \left(\frac{db}{dh} \right)_S} \\ \frac{di_{LT}}{dt} &= \frac{(u_{T0} - u_{N0} - R.i_{LT})}{\frac{N^2.S}{l} \left(\frac{db}{dh} \right)_T} \end{aligned} \right. \quad (3-11)$$

$\left(\frac{db}{dh}\right)$ se détermine à partir de la caractéristique magnétique de tôles relevées en courant continu. On obtient alors des modèles de courbe de magnétisation. Pour extraire l'expression mathématique de chacun de ces courbes, on a utilisé le logiciel CURVE EXPERT qui permet de déterminer point par point chaque expression.

III-3-1 Pour une tôle ordinaire au silicium

La forme générale de la courbe de magnétisation d'une tôle ordinaire au silicium est indiquée par la figure 3-6 suivante :

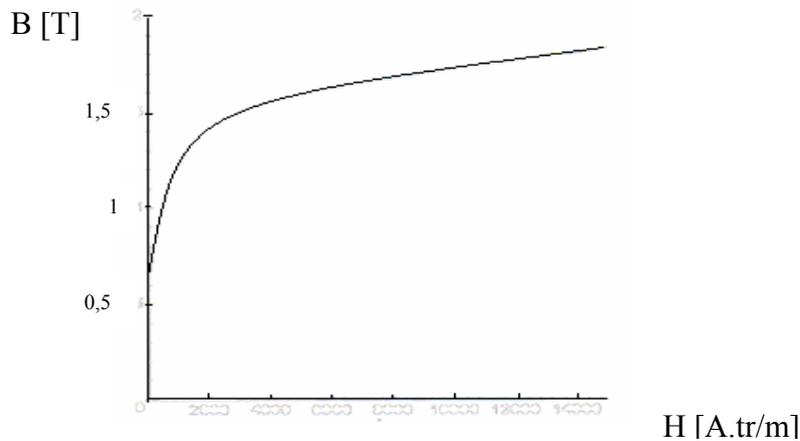


fig (3-6) courbe de magnétisation d'une tôle ordinaire au silicium

Après avoir prélevé plusieurs points, on passe à la modélisation mathématique de la courbe à l'aide de CURVE EXPERT. On obtient alors l'expression suivante :

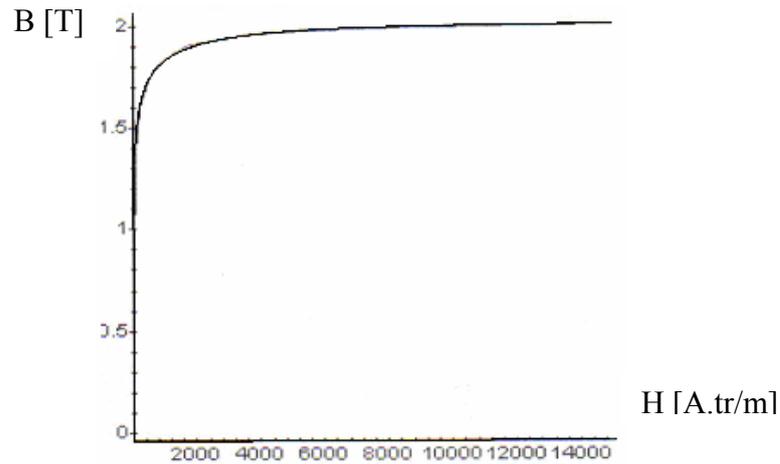
$$\mathbf{a-} \quad \frac{db}{dh} = \frac{A + B.i_{(k)}}{1 + C.i_{(k)} + D.i_{(k)}^2} \quad \mathbf{(3-12)}$$

avec :

| | |
|-----|--------------|
| A = | 0.0086613237 |
| B = | 34.055385 |
| C = | 3.0214863 |
| D = | -0.025035509 |

III-3-2 Pour une tôle laminée à froid dit 'à cristaux orientés'

La forme générale de la courbe de magnétisation d'une tôle laminée à froid est indiquée par la figure (3-8) suivante :



fig(3-7) courbe de magnétisation d'une tôle à cristaux orientés

En passant à la modélisation mathématique de la courbe par Curve Expert, on obtient l'expression suivante :

$$\frac{db}{dh} = \frac{A + B.i_{(k)}}{1 + C.i_{(k)} + D.i_{(k)}^2} \quad (3-13)$$

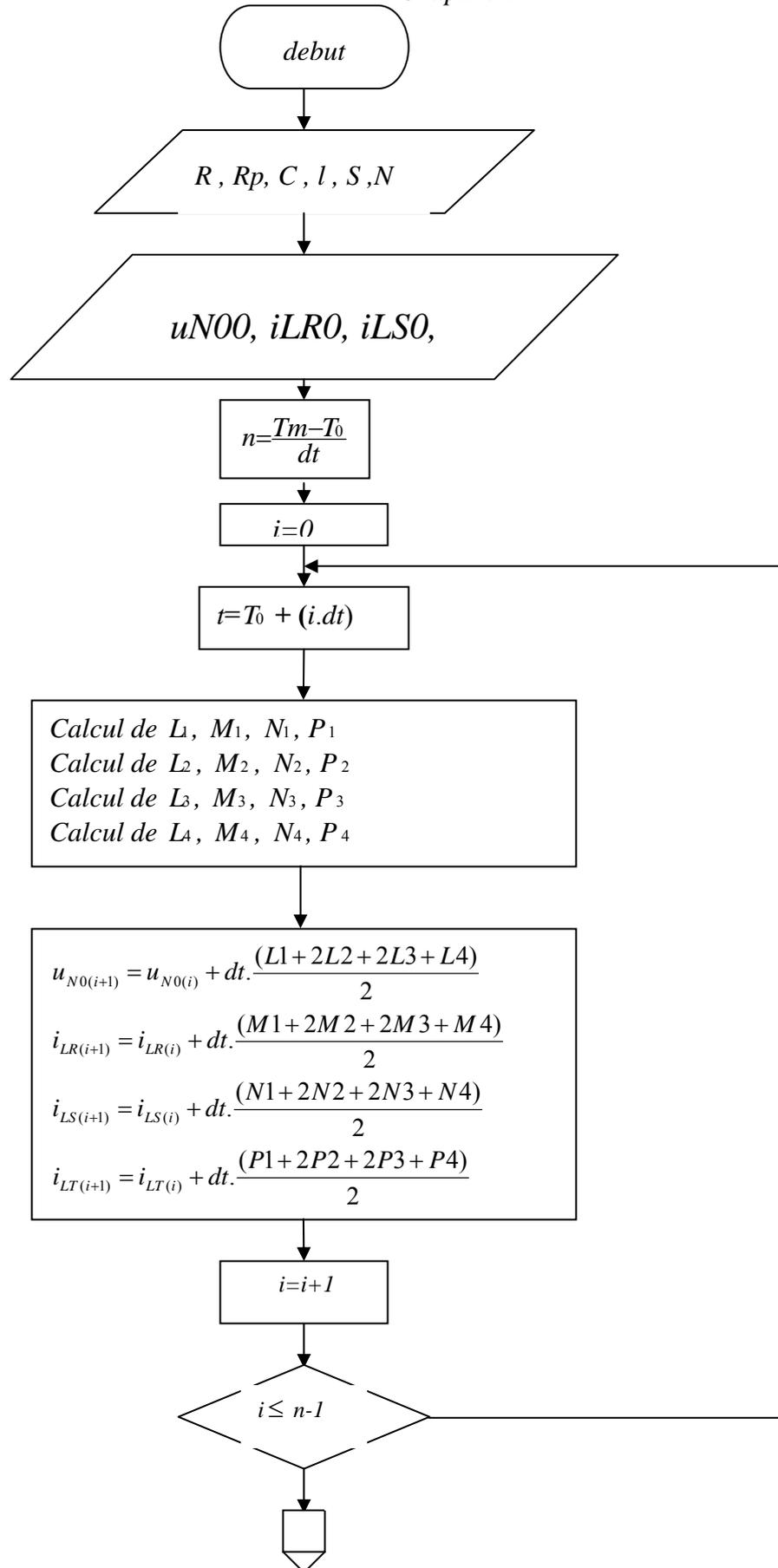
avec :

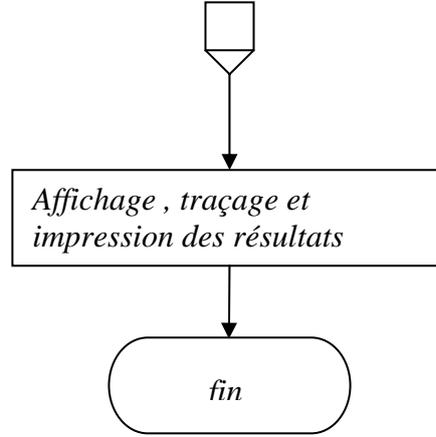
| | |
|-----|---------------|
| A = | 0,00038138516 |
| B = | 177,54913 |
| C = | 12.925393 |
| D = | -0.025292773 |

L'indice (k) les indices R ,S ,T.
 b étant l'induction magnétique
 h le champ magnétique

III-4 RESOLUTION

◆ Pour résoudre le système d'équations différentielles (3-11), on a utilisé la méthode de RUNGE KUTTA dont l'organigramme est le suivant :





Les variables d'intégration sont définies par :

$$L1 = A(u_{N0(i)}, i_{LR(i)}, i_{LS(i)}, i_{LT(i)})$$

$$M1 = B(u_{N0(i)}, i_{LR(i)}, i_{LS(i)}, i_{LT(i)})$$

$$N1 = X(u_{N0(i)}, i_{LR(i)}, i_{LS(i)}, i_{LT(i)})$$

$$P1 = Y(u_{N0(i)}, i_{LR(i)}, i_{LS(i)}, i_{LT(i)})$$

$$L2 = A \left[\left(u_{N0(i)} + \frac{dt.L1}{2} \right), \left(i_{LR(i)} + \frac{dt.M1}{2} \right), \left(i_{LS(i)} + \frac{dt.N1}{2} \right), \left(i_{LT(i)} + \frac{dt.P1}{2} \right), \left(t(i) + \frac{dt}{2} \right) \right]$$

$$M2 = B \left[\left(u_{N0(i)} + \frac{dt.L1}{2} \right), \left(i_{LR(i)} + \frac{dt.M1}{2} \right), \left(i_{LS(i)} + \frac{dt.N1}{2} \right), \left(i_{LT(i)} + \frac{dt.P1}{2} \right), \left(t(i) + \frac{dt}{2} \right) \right]$$

$$N2 = X \left[\left(u_{N0(i)} + \frac{dt.L1}{2} \right), \left(i_{LR(i)} + \frac{dt.M1}{2} \right), \left(i_{LS(i)} + \frac{dt.N1}{2} \right), \left(i_{LT(i)} + \frac{dt.P1}{2} \right), \left(t(i) + \frac{dt}{2} \right) \right]$$

$$P2 = Y \left[\left(u_{N0(i)} + \frac{dt.L1}{2} \right), \left(i_{LR(i)} + \frac{dt.M1}{2} \right), \left(i_{LS(i)} + \frac{dt.N1}{2} \right), \left(i_{LT(i)} + \frac{dt.P1}{2} \right), \left(t(i) + \frac{dt}{2} \right) \right]$$

$$L3 = A \left[\left(u_{N0(i)} + \frac{dt.L2}{2} \right), \left(i_{LR(i)} + \frac{dt.M2}{2} \right), \left(i_{LS(i)} + \frac{dt.N2}{2} \right), \left(i_{LT(i)} + \frac{dt.P2}{2} \right), \left(t(i) + \frac{dt}{2} \right) \right]$$

$$M3 = B \left[\left(u_{N0(i)} + \frac{dt.L2}{2} \right), \left(i_{LR(i)} + \frac{dt.M2}{2} \right), \left(i_{LS(i)} + \frac{dt.N2}{2} \right), \left(i_{LT(i)} + \frac{dt.P2}{2} \right), \left(t(i) + \frac{dt}{2} \right) \right]$$

$$N3 = X \left[\left(u_{N0(i)} + \frac{dt.L2}{2} \right), \left(i_{LR(i)} + \frac{dt.M2}{2} \right), \left(i_{LS(i)} + \frac{dt.N2}{2} \right), \left(i_{LT(i)} + \frac{dt.P2}{2} \right), \left(t(i) + \frac{dt}{2} \right) \right]$$

$$P3 = Y \left[\left(u_{N0(i)} + \frac{dt.L2}{2} \right), \left(i_{LR(i)} + \frac{dt.M2}{2} \right), \left(i_{LS(i)} + \frac{dt.N2}{2} \right), \left(i_{LT(i)} + \frac{dt.P2}{2} \right), \left(t(i) + \frac{dt}{2} \right) \right]$$

$$L4 = A \left[\left(u_{N0(i)} + dt.L3 \right), \left(i_{LR(i)} + dt.M3 \right), \left(i_{LS(i)} + dt.N3 \right), \left(i_{LT(i)} + dt.P3 \right), \left(t(i) + dt \right) \right]$$

$$M4 = B \left[\left(u_{N0(i)} + dt.L3 \right), \left(i_{LR(i)} + dt.M3 \right), \left(i_{LS(i)} + dt.N3 \right), \left(i_{LT(i)} + dt.P3 \right), \left(t(i) + dt \right) \right]$$

$$N4 = C \left[\left(u_{N0(i)} + dt.L3 \right), \left(i_{LR(i)} + dt.M3 \right), \left(i_{LS(i)} + dt.N3 \right), \left(i_{LT(i)} + dt.P3 \right), \left(t(i) + dt \right) \right]$$

$$P4 = D \left[\left(u_{N0(i)} + dt.L3 \right), \left(i_{LR(i)} + dt.M3 \right), \left(i_{LS(i)} + dt.N3 \right), \left(i_{LT(i)} + dt.P3 \right), \left(t(i) + dt \right) \right]$$

Les équations à résoudre sont :

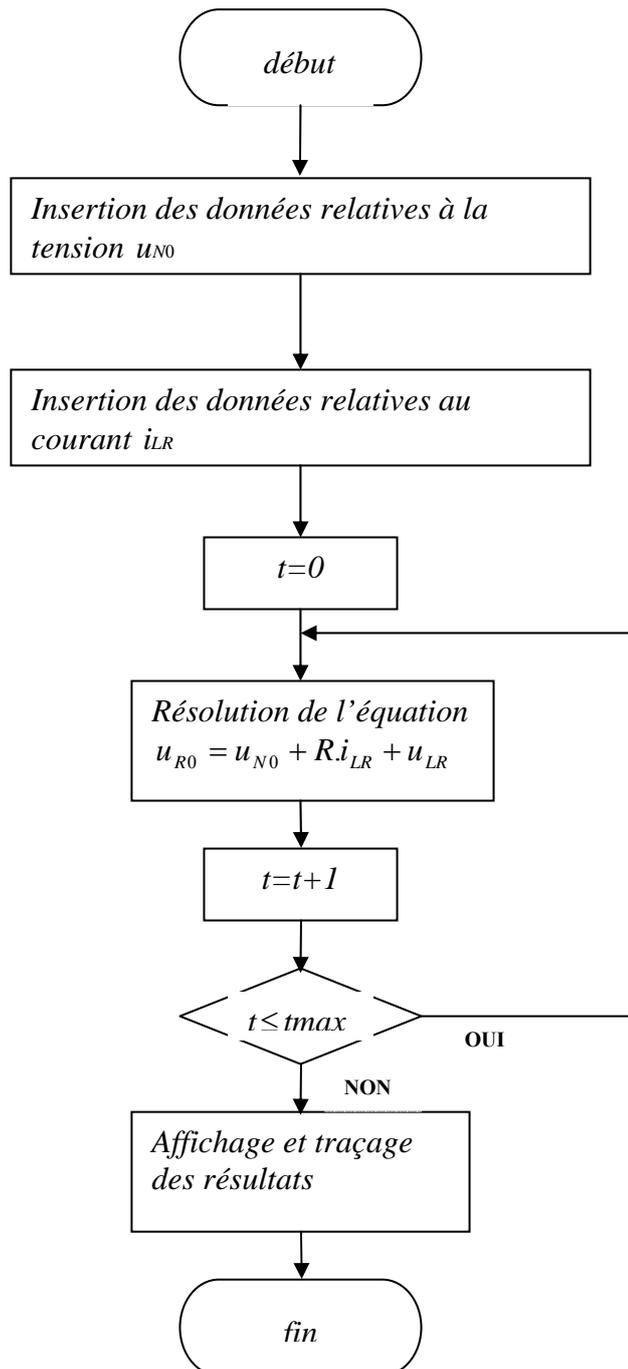
$$A = \frac{1}{3C} \cdot (i_{LR} + i_{LS} + i_{LT}) - \frac{1}{R_p \cdot C} \cdot u_{N0}$$

$$B = \frac{(u_{R0} - u_{N0} - R \cdot i_{LR})}{\frac{N_2 \cdot S}{l} \cdot \left(\frac{db}{dh} \right)_R}$$

$$X = \frac{(u_{S0} - u_{N0} - R \cdot i_{LS})}{\frac{N_2 \cdot S}{l} \left(\frac{db}{dh} \right)_S}$$

$$Y = \frac{(u_{T0} - u_{N0} - R \cdot i_{LT})}{\frac{N_2 \cdot S}{l} \left(\frac{db}{dh} \right)_T}$$

♦ Pour le calcul de la tension aux bornes de l'inductance primaire u_L , on résout l'équation (3-4) à l'aide de l'organigramme suivant :

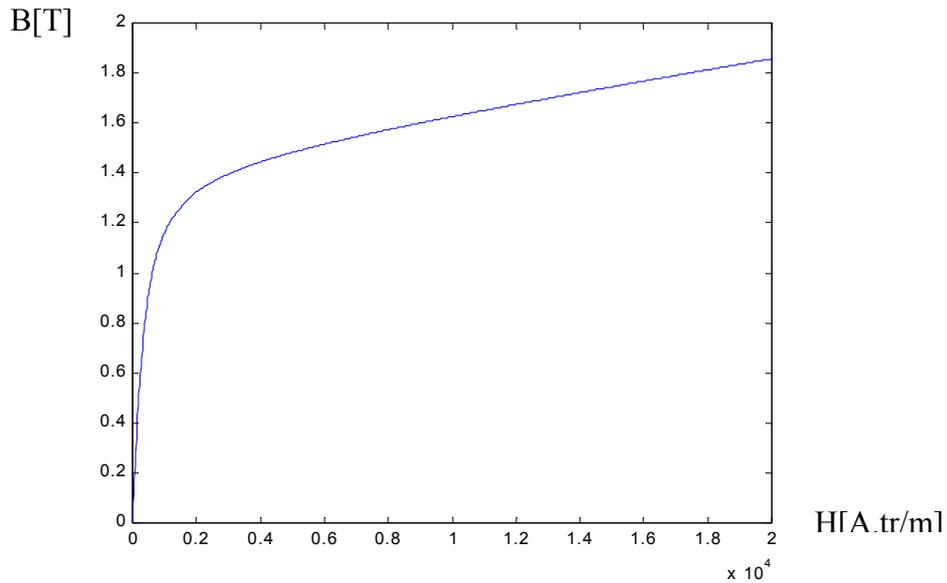


III-5 RESULTATS

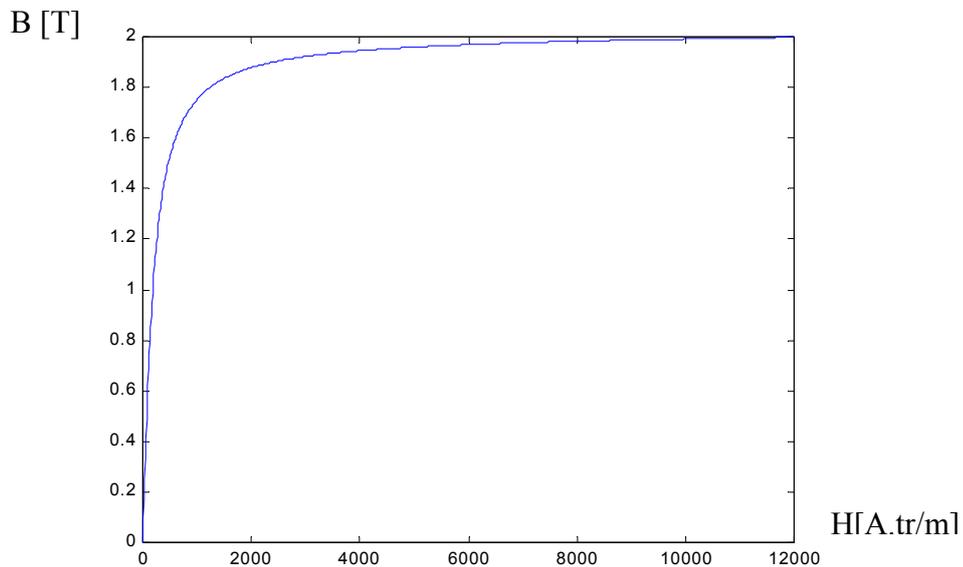
III-5-1 Circuits magnétiques

Après modélisation du circuit magnétique, on a obtenu les formes de courbes de saturation suivantes.

- ◆ circuit magnétique à tôle ordinaire



- ◆ circuit magnétique à cristaux orientés



Après simulation, on a obtenu les même allures de courbes de saturation comparées avec les courbes théoriques. Le circuit en tôle ordinaire au silicium se sature plus vite que celui en tôle à cristaux orientés, la tôle au silicium commence à se saturer pour un champ

magnétique $B \approx 1,5$ [T] pour la courbe théorique et la courbe obtenue après simulation. Pareillement pour la tôle à cristaux orientés, sa saturation commence à $B \approx 1,8$ [T]

III-5-2 Courbes théoriques de courants et tensions à partir des formules par simulation sur Fortran

Pour les courbes de résultat, on a recours à l'analyse spectrale pour mettre en évidence l'existence d'harmoniques dans les signaux électriques.

L'analyse spectrale des harmoniques se base sur la Transformée de Fourier Rapide en base 2.

Elle consiste à subdiviser le signal à analyser en 2^n échantillons égaux sur une période

entière. Ensuite les échantillons sont traités à l'aide de la Transformée de Fourier Rapide. Les résultats obtenus sont alors représentés et tracés en fonction des fréquences correspondant aux rangs des harmoniques h contenues dans le signal.

Pour bien indiquer la pureté spectrale de chaque onde de tension et de courant, on calculera, par la suite, le taux de distorsion harmonique de chacun des ondes.

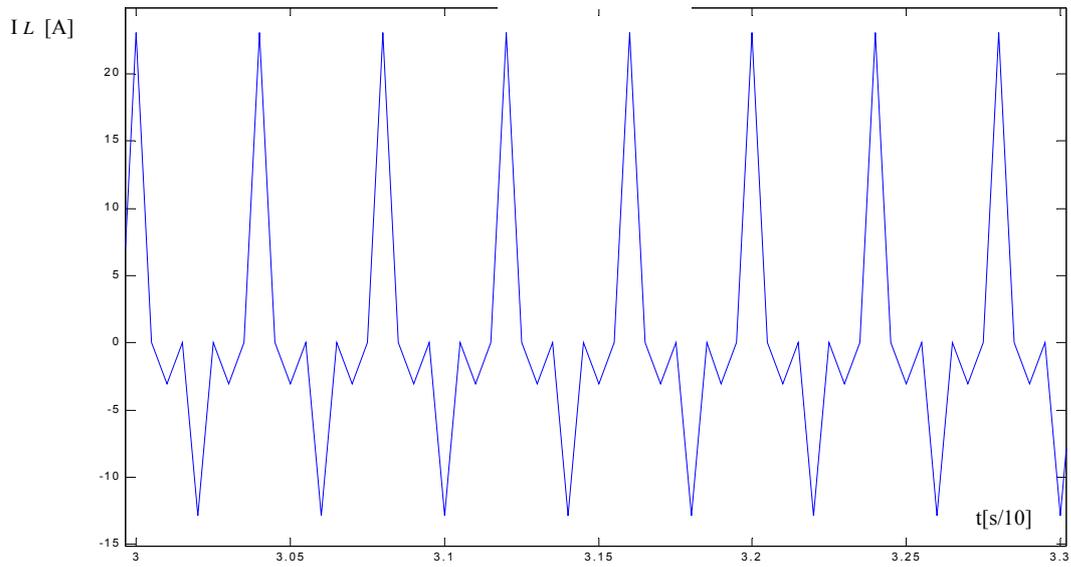
Le taux de distorsion harmonique T se définit par la formule :

$$T = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (3-14)$$

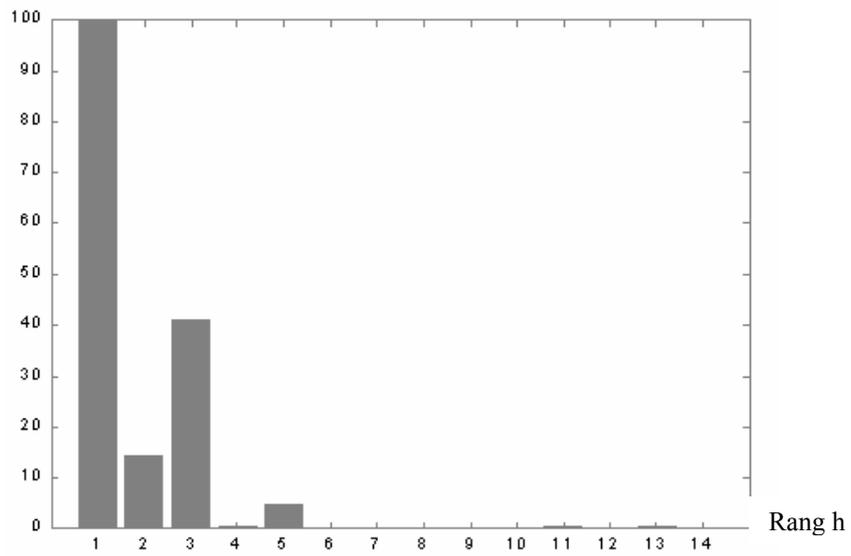
III-5-2-1 Courbes de résultats pour le circuit magnétique à tôle en silicium

◆ courbe de courant

Après avoir effectué la simulation, on a obtenu la forme des trois courants i_{LR} , i_{LS} et i_{LT} qui ont même allure mais seulement déphasés de $\frac{2\pi}{3}$ entre eux. Donc on ne représentera que l'un des trois courants et dont l'allure est la suivante.

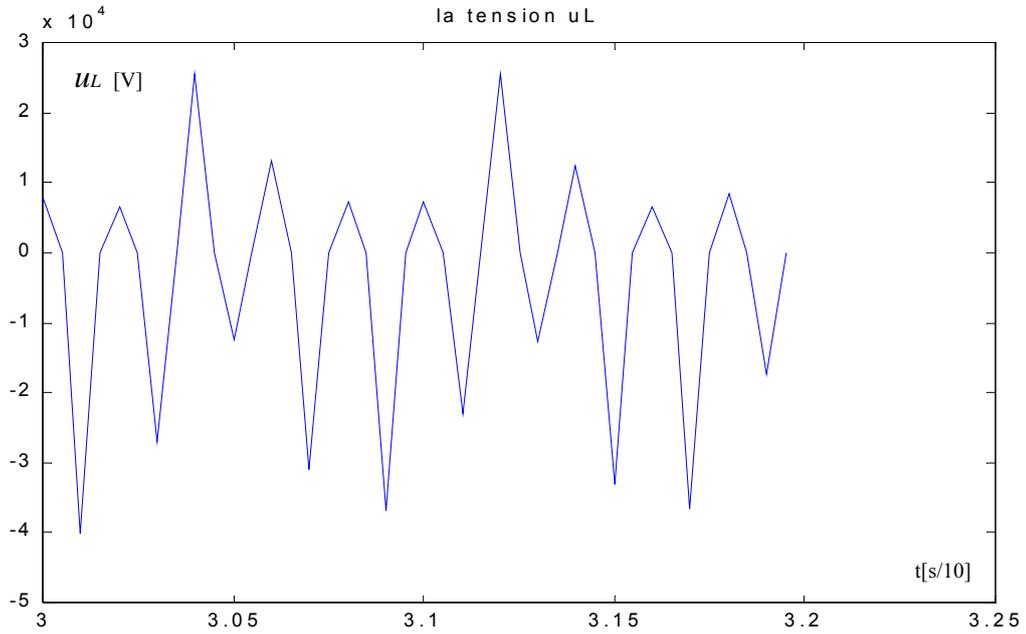


Le graphe de spectres correspondant est :

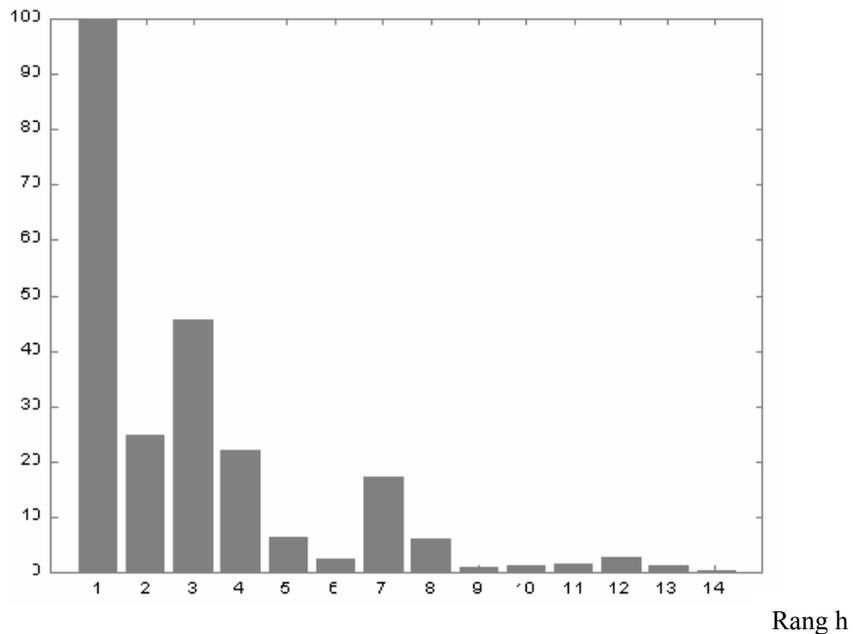


Taux de distorsion harmonique : $T = 42,36 \%$

◆ **courbe de tension**



Le graphe de spectres donne :



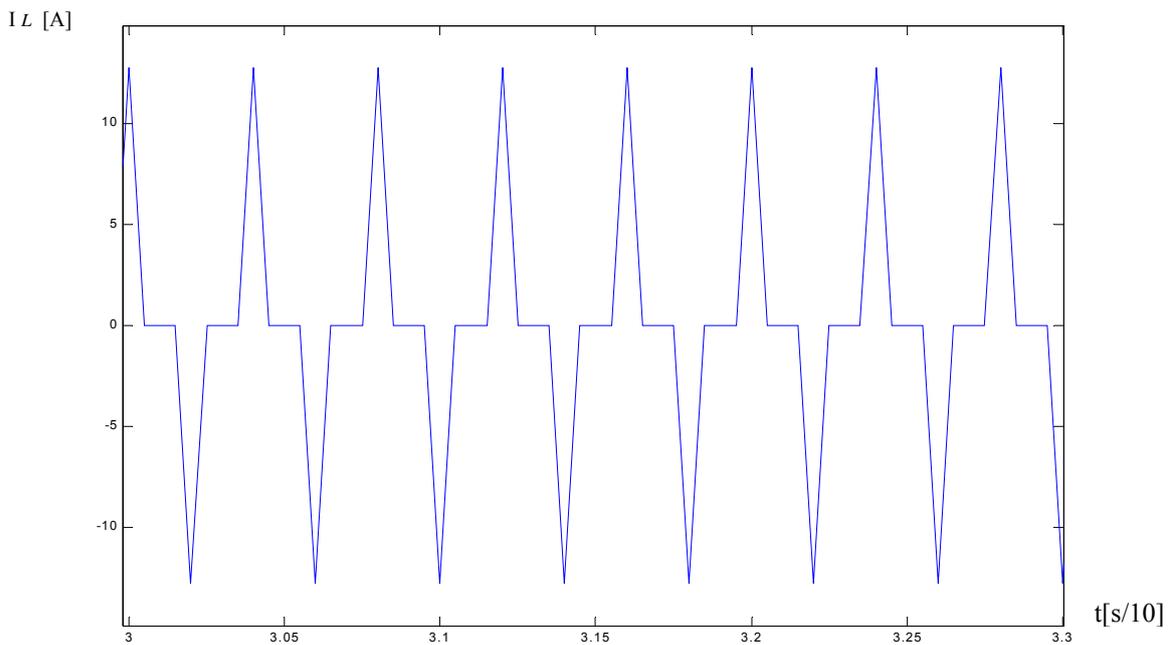
Taux de distorsion harmonique : $T = 59,81 \%$

On constate que les allures de courant et de la tension ne sont pas sinusoïdales. Sur le graphe de spectres du courant, l'harmonique de rang 3 est dominante. Cette harmonique est la principale cause des échauffements supplémentaires des machines tournantes et des transformateurs. Elle amplifie les bruits de fond des transformateurs et des lignes

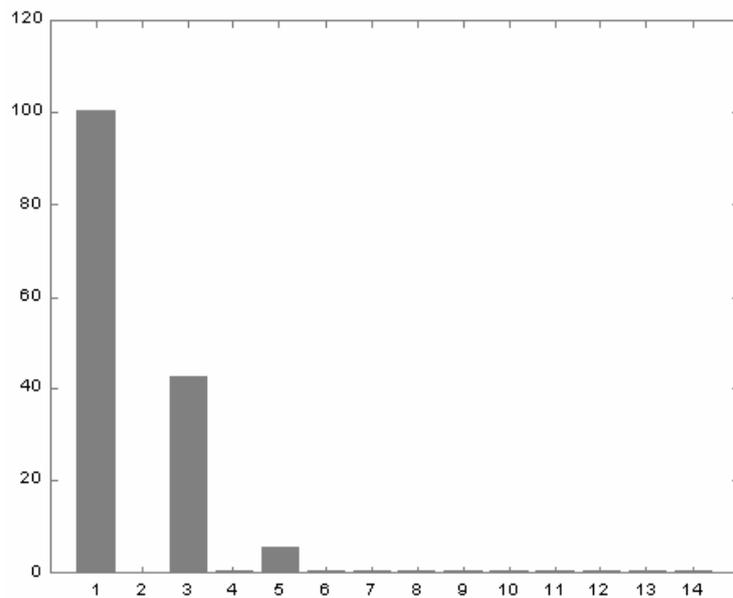
Concernant la tension aux bornes de l'inductance primaire, on constate la présence de tous les harmoniques. Alors, la courbe de tension n'est pas symétrique par rapport à l'axe des abscisses. L'harmonique de rang 3 est toujours dominante. Après viennent les harmoniques 2, 4 qui déforment directement l'onde. Ces harmoniques ont même effet que l'harmonique 3 car elles agissent directement sur l'alimentation en courant et tension des appareils récepteurs.

III-5-2-1 Courbes de résultat pour le circuit magnétique à tôle à cristaux orientés

◆ courbe de courant



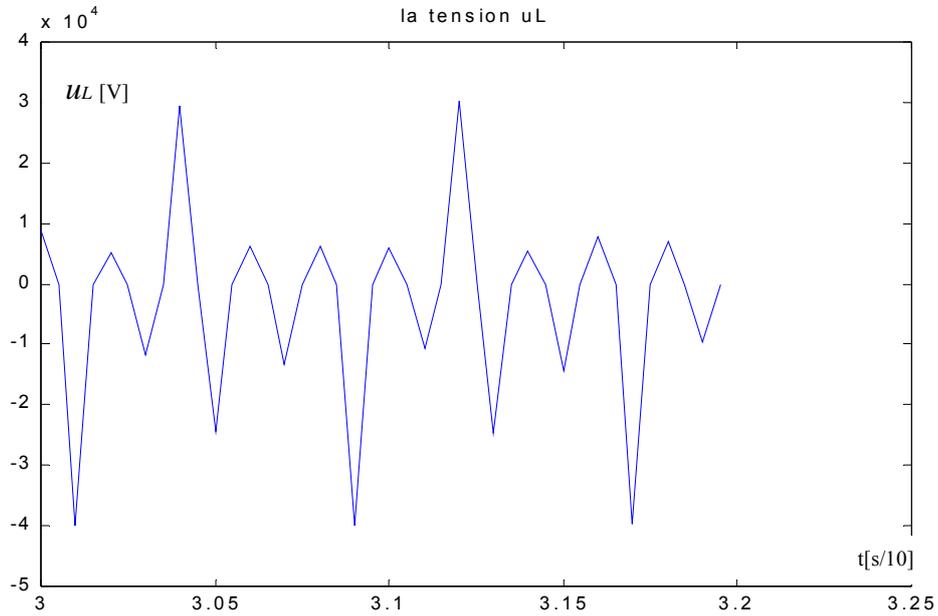
Le graphe de spectres est :



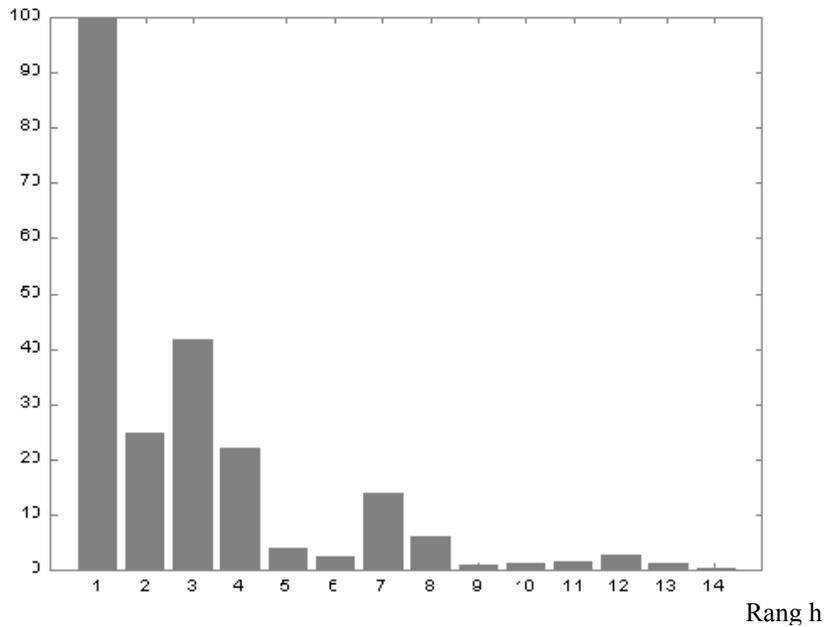
Taux de distorsion harmonique : $T = 41,55 \%$

Rang h

◆ courbe de tension



Le graphe de spectres est :



Taux de distorsion harmonique : $T = 57,72 \%$

Pour la tôle à cristaux orientés, l'allure du courant est aussi non-sinusoïdale. Les deux harmoniques 3 et 5 sont remarquables, les effets de deux harmoniques sont pareils comme ceux cités pour la tôle ordinaire. Seulement, le courant induit par le circuit à cristaux orientés admet moins de distorsion que celui de la tôle en silicium. Cela est due aux caractéristiques

de saturation de chacun de deux tôles : la tôle en silicium se sature plus vite que celle à cristaux orientés, donc admet plus rapidement les courants saturés

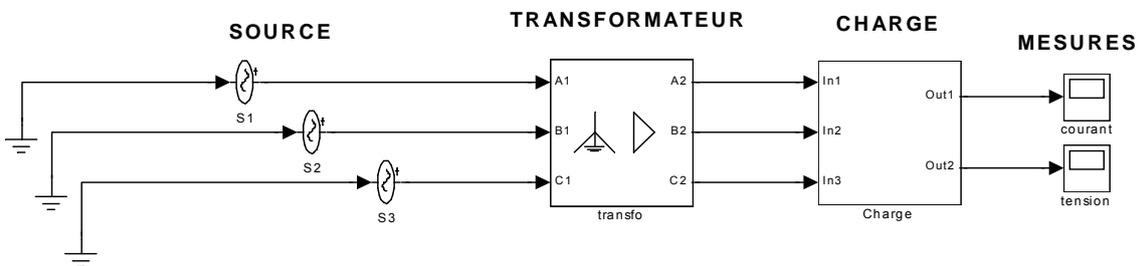
III-6 SIMULATION DU TRANSFORMATEUR SOUS POWER SYSTEM

III-6-1 Description du logiciel Power System de Matlab

Power System est un logiciel de simulation dans Matlab et utilise l'environnement Matlab comme espace de travail et compilateur.

III-6-2 Mise en place du transformateur dans Power System

La disposition du transformateur dans Power system est la suivante :

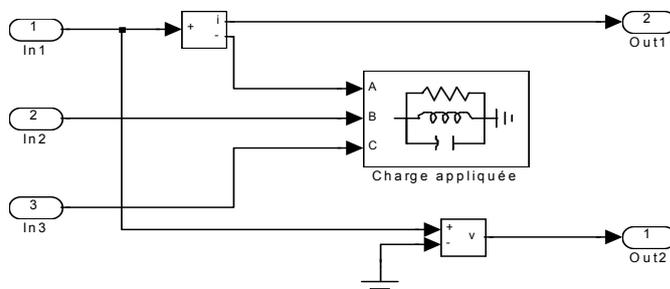


fig(3-8) mise ne place du transformateur dans Power System

Le transformateur est alimenté par trois sources de tension sinusoïdales. On branche une charge triphasée symétrique au secondaire.

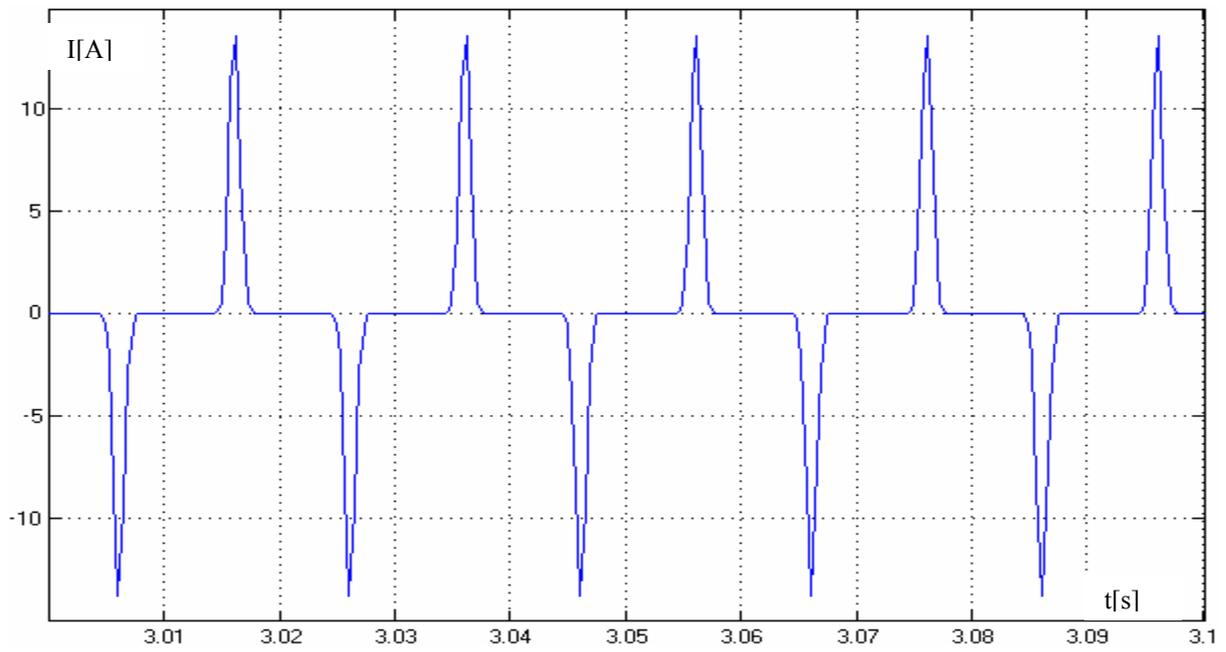
Au bout de l'installation, on prélève les allures de courants et tensions.

La disposition des éléments de la charge est comme suit :

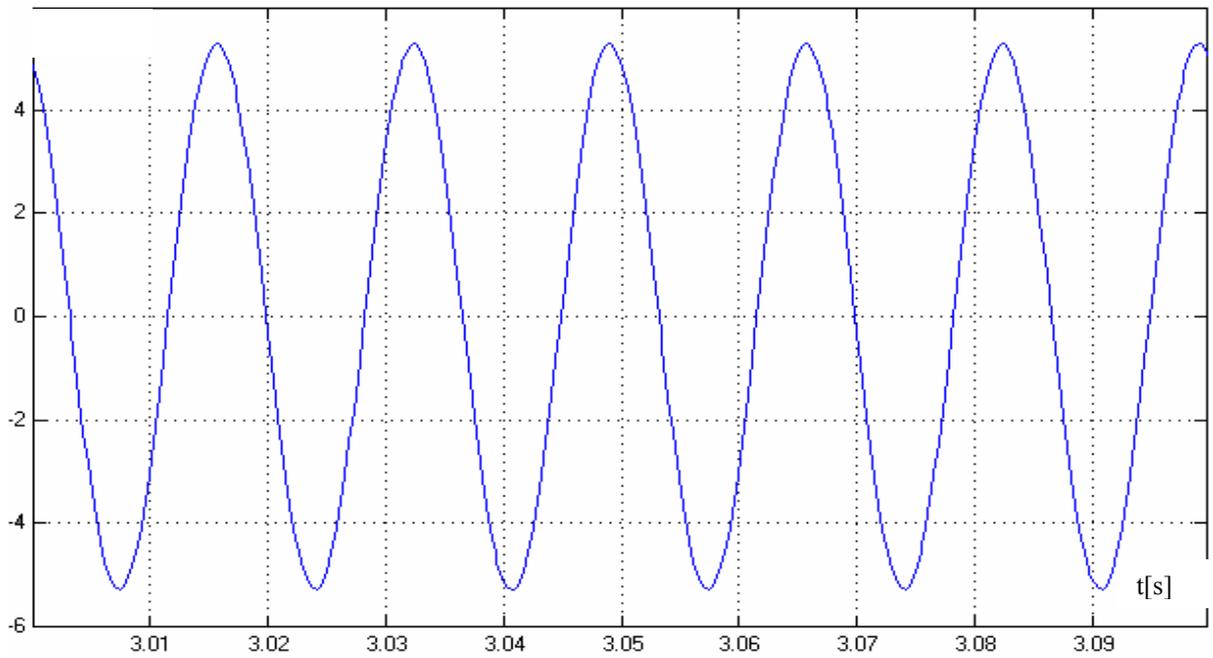


fig(3-9) disposition des éléments de la charge appliquée au transformateur

1-courbe de courant



2-courbe de tension



III-7 INTERPRETATIONS

- pour les courbes de courants

Nous voyons par ces courbes que l'allure des courants n'est pas sinusoïdale. Cela est due à l'interaction entre les inductances saturées des transformateurs de tension à caractère saturable et les capacités des lignes. Mais, néanmoins, elle est périodique et admet une période de 20 ms.

On retrouve les mêmes allures de courant par la modélisation mathématique et par la modélisation sous Power System. Cela signifie que le modèle proposé représenté par le système d'équations différentielles (3-11) permet bien de prévoir les perturbations dues à un transformateur de puissance.

Néanmoins, les allures de tension diffèrent un peu à cause des différentes hypothèses émises lors de la modélisation mathématique. Sous Power System, Le transformateur admet des caractéristiques bien précises telles que sa résistance primaire, sa caractéristique de saturation. La mesure de la tension dans la simulation se fait sur la charge car il n'y a pas moyen de faire la mesure aux bornes de l'inductance non-linéaire du transformateur.

- pour les courbes de tension

Les courbes de tension présentent des perturbations. Sur le graphe de spectre, on remarque que le signal de la tension admet tous les harmoniques et l'harmonique de rang 3 domine. Cette harmonique est courante en électrotechnique. Elle nuit directement au bon fonctionnement des machines car elle déforme l'onde électrique fondamentale

- Les deux types de tôles admettent, tous les deux, les mêmes allures de tension mais diffèrent par les ondes de courant. Ceci s'explique par les courbes de saturation des circuits magnétiques.

Le circuit magnétique à tôle au silicium se sature plus vite par rapport à celui à tôle à cristaux orientés. De ce fait, pour une même circulation de flux magnétique dans la carcasse, le courant induit dans l'enroulement secondaire du transformateur à carcasse en tôle ordinaire est plus grande que celui du transformateur à carcasse en tôle à cristaux orientés. Ceci explique aussi les valeurs des courants indiquées sur les résultats de simulation pour chaque type de tôles

- Sur les graphes de spectres des courants, les harmoniques de rang 3 et 5 dominent. Ces deux types d'harmoniques sont les plus gênants pour l'exploitation de l'énergie électrique. L'harmonique de rang 3 se trouve à une fréquence assez basse par rapport aux autres harmoniques. De ce fait, elle déforme directement l'onde fondamentale et peut entraîner l'éclatement des batteries de condensateur existant sur le réseau. A un certain niveau de puissance de l'harmonique par rapport à la fondamentale, elle provoque des surcharges thermiques dans les câbles pouvant aller jusqu'au claquage des isolants.

L'harmonique de rang 5, quand à elle, se trouve à 250 Hz par rapport à la fréquence industrielle d'utilisation. Elle provoque aussi les mêmes effets que l'harmonique d'ordre 3 mais elle s'attaque plus aux appareils de précision causant le déclassement et déviation des mesures, aux appareils électroniques comme la désynchronisation des compteurs et trouble de commutation des gâchettes des thyristors.

Alors, des solutions sont à proposer pour y remédier comme l'organisation des réseaux pour les harmoniques de fortes puissances et le filtrage qu'on va aborder au chapitre 7.