

**Chapitre**

**4**

## PROPAGATION DES PHENOMÈNES TRANSITOIRES SUR LE RESEAU DE DISTRIBUTION

### IV-1 INTRODUCTION

Les ondes de courant et de tension se propagent à travers tout le réseau. Les phénomènes s'y rattachant évoluent et se répartissent donc dans toutes les branches. L'effet des distorsions des ondes peut alors être ressenti en tout point du réseau et provoque des perturbations au niveau des récepteurs.

Dans ce chapitre, on établira la théorie et le mode de propagation des ondes perturbées dans les installations de production, de transport et de distribution d'énergie électrique.

### IV-2 EQUATIONS GENERALES DE PROPAGATION

Les ondes de courant se propagent à travers la ligne suivant les équations :

$$\nabla^2 \vec{E} = \varepsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (4-1)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = \varepsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (4-2)$$

avec •  $\vec{E}$  : vecteur champ électrique  
•  $\vec{H}$  : vecteur champ magnétique

Pour la recherche de solution des deux équations, considérons que l'onde est plane se propageant dans une seule direction, soit suivant y.

On obtient alors l'équation de d'ALEMBERT :

$$\frac{\partial^2 X}{\partial y^2} = \varepsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} \quad (4-3)$$

qui a pour solution

$$X = f\left(t - \frac{y}{v}\right) + g\left(t + \frac{y}{v}\right) \quad (4-4)$$

avec :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} : \text{vitesse de phase}$$

$f\left(t - \frac{y}{v}\right)$  : onde se propageant vers y croissant

$g(t + \frac{y}{v})$  : onde se propageant vers y décroissant

Comme nous l'avons vu au chapitre II, on distingue deux types de lignes :

- ligne à constantes localisées
- ligne à constantes réparties

Pour les lignes à constantes localisées, les variables électriques (courants et tensions) sont fonction du temps uniquement. Mais pour les lignes à constantes réparties, ces grandeurs électriques sont fonction du temps et du déplacement en même temps.

Les ondes électriques se propagent le long de la ligne, donc on se consacrera à l'étude des lignes à constantes réparties car il y a déplacement d'ondes en fonction du temps.

### **IV-3 ETUDE DE LA PROPAGATION DES ONDES ELECTRIQUES SUR UNE LIGNE A CONSTANTES REPARTIES**

#### **IV-3-1 Propagation sur une ligne sans perte**

Les équations de propagation (2-1) et (2-2) nous donnent les relations liant la tension et le courant pour une ligne sans perte :

$R'=0$  et  $G'=0$  d'où

$$\frac{\partial}{\partial y} U(y,t) = -L' \cdot \frac{\partial}{\partial t} I(y,t) \quad (4-5)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} I(y,t) = -C' \cdot \frac{\partial}{\partial t} U(y,t) \quad (4-6)$$

En dérivant une seconde fois l'équation (4-5), on obtient une autre équation de d'ALEMBERT et qui, à partir de laquelle, on tire l'expression du courant définie par :

$$I(y,t) = \frac{1}{Z_c} \left[ f_c(t - \frac{y}{v}) - f_d(t + \frac{y}{v}) \right] \quad (4-7)$$

avec :

$\overline{Z_c}$  : impédance caractéristique de la ligne

$v = \frac{1}{\sqrt{L' \cdot C'}}$  : vitesse de propagation des ondes

#### **IV-3-2 Propagation sur une ligne avec pertes**

Si une ligne admet des pertes alors  $R'$  et  $G'$  ne sont plus nulles.

De ce fait, les équations de propagation sont :

$$\frac{\partial}{\partial y} U(y,t) = -R' \cdot I(y,t) + L' \cdot \frac{\partial}{\partial t} I(y,t) \quad (4-8)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} I(y,t) = -G' \cdot U(y,t) - C' \cdot \frac{\partial}{\partial t} U(y,t) \quad (4-9)$$

### IV-3-3 Condition de propagation

Pour que les ondes de courant se propagent correctement à travers tout le réseau, il faut que les composantes de son spectre restent inchangées tout au long de la ligne et qu'elles se propagent :

- ◆ avec la même atténuation  $\alpha$
- ◆ avec la même vitesse de propagation  $v$
- ◆ sans qu'il y ait réflexion à l'extrémité de la ligne

Ces conditions ne seront remplies que si :

- $\alpha$  soit indépendante de la pulsation
- $v$  aussi soit indépendante de la pulsation
- à l'extrémité de la ligne, on a une charge  $\bar{Z}_L = \bar{Z}_C$  : impédance caractéristique.

## IV-4 PHÉNOMÈNES DE RESONANCE

Dans les centrales de production, l'effet de surtension et de surintensité provoque des phénomènes appelés résonance. A un certain niveau de fréquence du réseau, les grandeurs électriques telles que courant et tension croient considérablement quand la résonance est atteinte.

Cette paragraphe a pour but de détailler l'origine et le comportement du courant et de la tension lors des phénomènes de résonance.

### IV-4-1 LES DIFFERENTS TYPES DE RESONANCES

La résonance est un phénomène d'amplification des grandeurs électriques

Il existe, en général, trois types de résonances que l'on peut rencontrer dans les centrales :

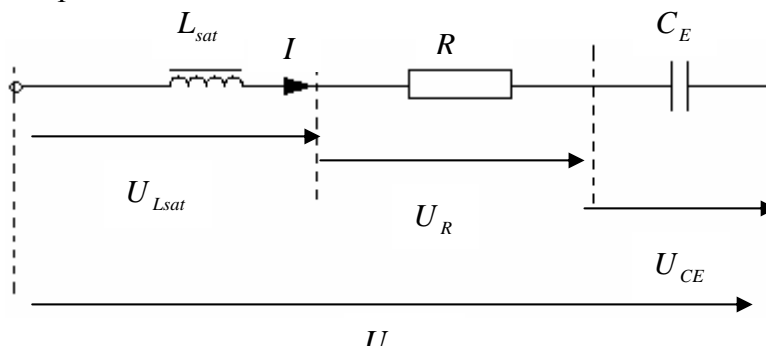
- la ferrorésonance
- la résonance

Ces différents types de résonances dépendent des caractéristiques du réseau et proviennent essentiellement des interactions entre les éléments du réseau.

#### a- La ferrorésonance

Le phénomène de ferrorésonance se manifeste au niveau des portions de réseau contenant une self-inductance non linéaire à caractère saturable en série avec une capacité et une résistance représentant la perte au niveau de la centrale.

La figure suivante représente une portion en ferrorésonance.



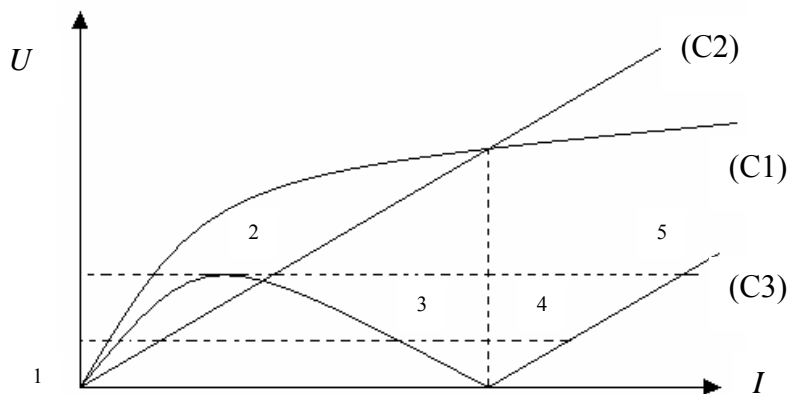
**fig(4-1) représentation d'un circuit RLC série en ferrorésonance**

En supposant que toutes les tensions soient assez voisines de la sinusoïde, on a la relation (4-10)

$$\overline{U}_{Lsat} + \overline{U}_R + \overline{U}_{CE} = \overline{U}$$

Sous forme complexe, on doit tenir compte des déphasages entre les éléments résistif, capacitif et inductif. Ainsi, si on représente les valeurs efficaces des trois tensions en fonction de la valeur efficace du courant  $I$  parcourant le circuit, on obtient la courbe (C1) pour  $|U_{Lsat}|$  et la courbe (C2) pour  $|U_{CE}|$ . La courbe de  $R$  n'est pas utile à représenter car le courant et la tension sont en phase.

En théorie, la tension du self et de la capacité sont en opposition de phase par rapport au courant  $I$ . Faisons la différence en valeur absolue entre les deux tensions. On obtient la courbe (C3) représentant  $|U|$  dite courbe de ferrorésonance.



**fig(4-2) courbe de ferrorésonance pour un self et une capacité en série**

### **Interprétation**

A un premier niveau de tension déterminé, on a trois points de fonctionnement : 1, 3 et 4 ;  
 a un autre niveau, on a deux points : 2 et 5.

Les points de fonctionnement 3 et 4 sont instables d'où la courbe passe directement par sauts au point 5 lorsqu'on élève progressivement la tension. Il y a une brusque montée de courant alors que la tension ne varie guère. Le phénomène de surintensité apparaît donc en ferrorésonance.

Le même phénomène apparaît lorsque le circuit RLC est en parallèle sauf que, cette fois ci, on observe des sauts de tension alors que le courant ne change pas. Il y a alors surtension.

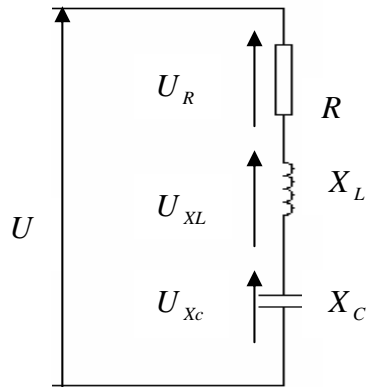
En somme, ceux-ci permettent d'affirmer qu'en ferrorésonance, on constate une surintensité et surtension au niveau des centrales de production.

### **b- Résonance**

On parle de résonance série ou de résonance parallèle suivant la disposition des éléments sur le réseau ou le circuit.

L'étude s'orientera uniquement sur la résonance série car les deux types de résonances sont valables mais, dans la pratique, c'est la résonance série qui est la plus souvent invoquée.

La résonance est série si ces éléments sont en série et parallèle si ces éléments sont en parallèle.



fig(4-3) représentation d'un circuit RLC série

L'impédance du circuit est exprimée par :

$$\bar{Z} = R + j(X_L - X_C) \quad (4-11)$$

La fréquence de résonance par :

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (4-12)$$

En module, on aura

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (4-13)$$

A partir de cette expression de Z, on en déduit les remarques suivantes :

- Z est minimale lorsque la différence  $(X_L - X_C)$  est nulle. Cela veut dire que  $X_L = X_C$ . A cette valeur de Z correspond la valeur maximale du courant qui circule dans le circuit. On dit alors que le circuit est en résonance et le circuit est appelé circuit résonant série.

- Lorsque  $X_L = X_C$  ceci équivaut à  $U_L = U_C$

- Z est maximale lorsque  $X_L = 0$  ou  $X_C = 0$

En résonance correspond une fréquence dite **fréquence de résonance**  $f_0$  donc à une période  $\omega_0$  dite **pulsation de résonance** dont les valeurs sont tirées de la relation  $X_L = X_C$

$$X_L = L \cdot \omega_0$$

$$X_C = \frac{1}{C \cdot \omega_0} \quad (4-14)$$

et  $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0$

On a alors

$$L \cdot \omega_0 = \frac{1}{C \cdot \omega_0}$$

$$\Leftrightarrow L \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_0 = \frac{1}{C \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_0}$$

à la fin on a :

$$f_0 = \frac{1}{2.\pi.\sqrt{L.C}} \quad (4-15)$$

Et les valeurs des tensions  $U_{XL}$  et  $U_{Xc}$  sont définies à partir du coefficient de surtension traduit par

$$Q = \frac{U_{Xc}}{U} = \frac{U_{XL}}{U} \quad (4-16)$$

Plus précisément,

$$Q = \frac{L.\omega_0.I}{R.I} = \frac{L.\omega_0}{R} \quad (4-17)$$

Ou

$$Q = \frac{1}{C.R.\omega_0} \quad (4-18)$$

**Remarque**

Pour l'étude, la résonance d'un circuit est créée en variant la fréquence, la réactance capacitive ou la réactance inductive.

Chapitre

5

**SIMULATION DE LA PROPAGATION  
DES PHÉNOMÈNES TRANSITOIRES  
SUR UN RESEAU**

**V-1 INTRODUCTION**

On sait que la non linéarité entre courant et tension provoque des oscillations sur une ligne.

Dans ce chapitre, on étudiera les phénomènes qu'engendre l'intégration d'un transformateur saturable dans un réseau électrique. La simulation est faite sur le réseau de distribution électrique de Morondava auquel on a placé un transformateur saturable en bout de ligne.

L'étude se rapporte donc aux perturbations que le transformateur provoque à travers le réseau tout entier.

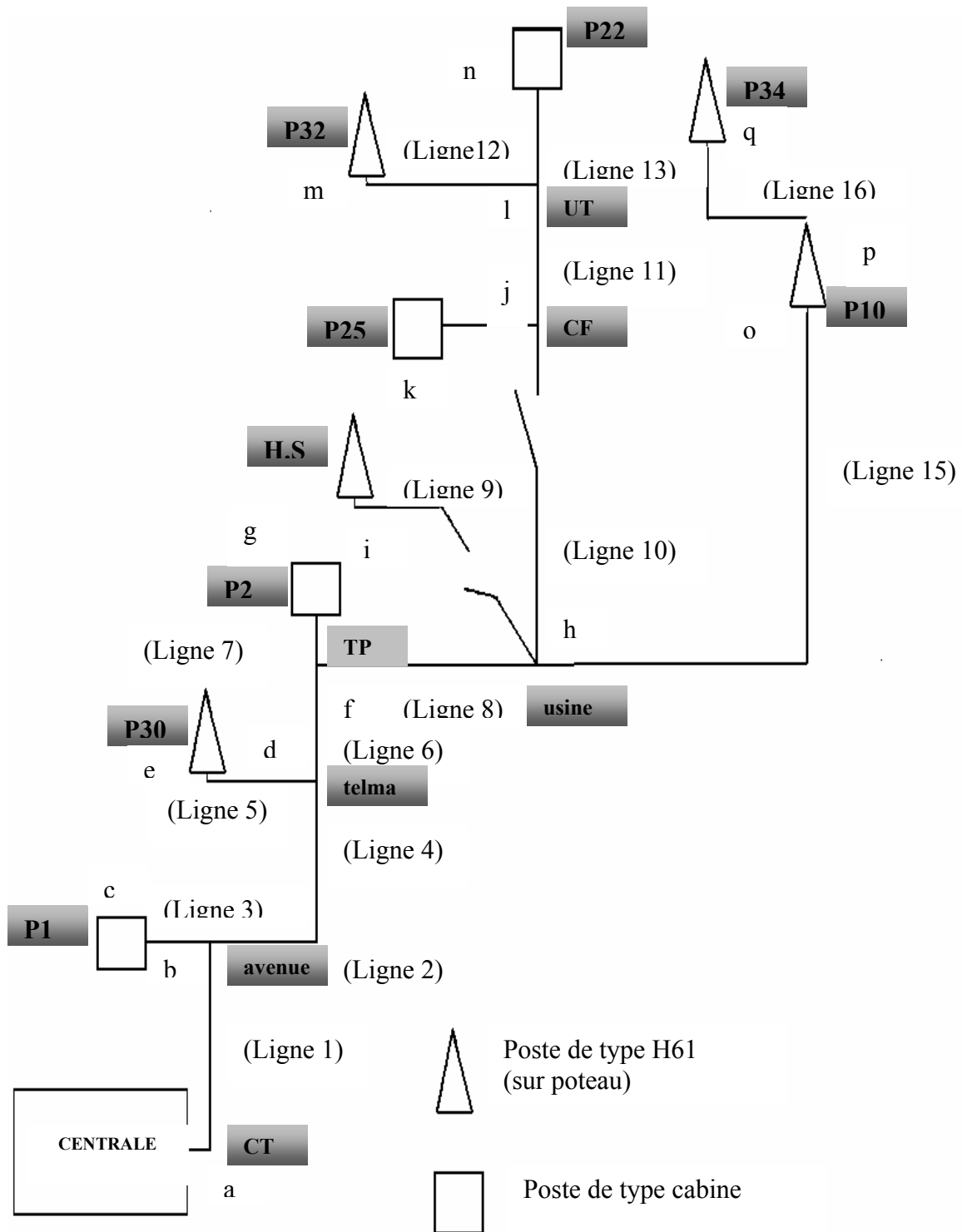
**V-2 PRESENTATION DU RESEAU D'ELECTRIFICATION A ETUDIER : RESEAU DE MORONDAVA**

Le réseau électrique de Morondava est un réseau radial. La centrale électrique est une station thermique fonctionnant au fuel. Il y a 3 départs à partir de la centrale. Le premier va vers l'Ouest, le second vers l'Est de la ville mais le troisième est hors service car l'avancée du niveau de la mer a englouti les supports.

Pour l'application, on a pris le réseau de distribution partant vers l'Est.

**V-3-1 Topologie du réseau**

La topologie électrique des lignes du réseau est la suivante :



fig(5-1) Topologie du réseau électrique (départ n°2) de Morondava



**V-3-2 Données correspondantes au réseau de Morondava**

**a- Données des lignes**

Numéro		Nature des conducteurs	Section [mm <sup>2</sup> ]	Longueur [m]	Lignes		Ohms [ $\Omega$ ]	
Départ	Ligne				Origine	Extrémité	Résistance	Réactance
1	1	A	34.4	450	CT	avenue	0.456	0.17152
	2	C	17.8	680	avenue	telma	0.0032	0.00121
	3	C	17.8	3	avenue	P1	0.7219	0.27418
	4	C	17.8	45	avenue	Telma	0.0478	0.01814
	5	A	34.4	15	telma	P30	0.0152	0.00572
	6	C	17.8	315	telma	TP	0.3344	0.12701
	7	C	17.8	3	TP	P2	0.0032	0.00121
	8	C	17.8	90	TP	usine	0.0955	0.03629
	9	A	34.4	20	usine	P23	0.0203	0.00762
	10	C	17.8	40	usine	CF	0.0425	0.01613
	11	S	50	40	CF	UT	0.0300	0.01478
	12	S	50	50	UT	P32	0.0375	0.01848
	13	S	50	90	UT	P22	0.0675	0.03326
	14	S	50	5			0.0037	0.00185
	15	A	34.4	540		P10	0.5472	0.20582
	16	A	34.4	3	P10	P34	0.0030	0.00114
	17	A	34.4	581	usine	P10	0.5887	0.22145
Longueur totale de lignes				2970[m]				

**Tableau(5-1) données des lignes du réseau de Morondava**

**b- Données des transformateurs du réseau  
JIRAMA / DGAE  
DTE / SGC**

Numéro		Poste		Puissance transformateur [kVA]	Tension [V]		Position commutateur	Ucc En [%]	Indice horaire	Rcc [ohms]	Xcc [ohms]	Pertes Transfo (à 19h00)	
Départ	Poste	Type	Abonnés		1aire	2aire						[KW]	[KVAR]
<b>1</b>													
	P1	Cab	J	200	4750	220	3	4	Dyn11	1,77	4,14	1,96	4,58
	P30	Cab	P	100	5000	380	2	4	Yzn11	5,57	8,30	0,14	0,21
	P2	Cab	J	63	4750	220	3	4		8,98	11,16	0,34	0,42
	P25	Cab	P	400	5000	380	2	4	Dyn11	0,24	2,48	0,12	1,19
	P22	Cab	P	250	5000	380	2	3.8	Dyn11	1,60	3,44	0,01	0,02
	P10	H61	J	100	4750	380	3	4	Yzn11	3,94	8,11	0,65	1,33
P34	H61	J	100	4750	380	3	4		3,94	8,11	0,13	0,27	

**Tableau(5-2) caractéristiques des transformateurs sur le réseau**

Le transformateur à coté de la centrale est un transformateur linéaire triphasé dont les caractéristiques sont données à l'annexe 2

Pour la mise en œuvre de la simulation, les récepteurs en bout de lignes sont des faibles charges donc les transformateurs sont en marche à faible charge.

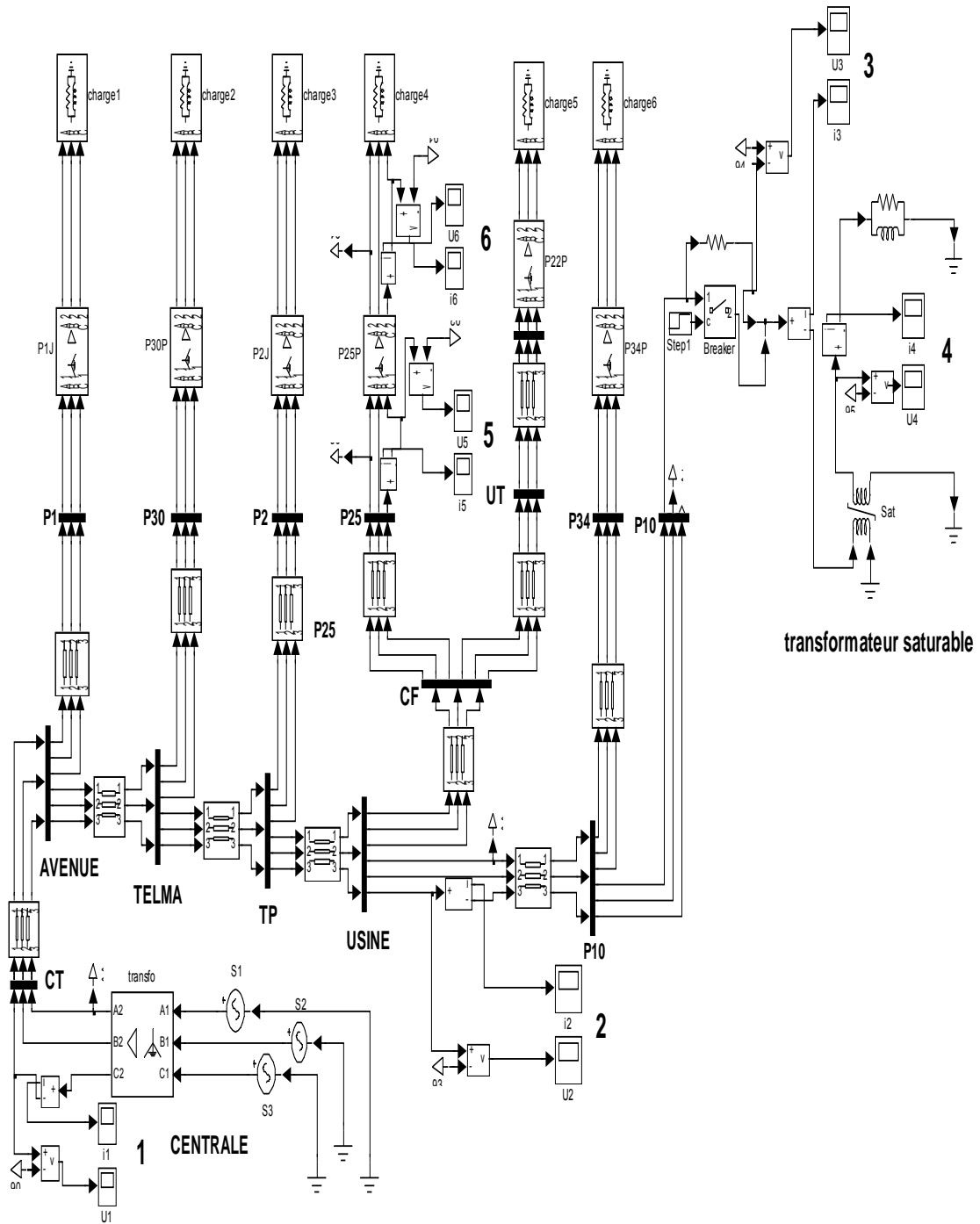
**c- Données des nœuds**

Noeuds	Zone	P. active (P <sub>[kW]</sub> )	P. réactive (Q <sub>[kVAR]</sub> )
Centrale	Est	-1579	-1265
avenue	Est	16	6
poste P1	Est	161	126
telma	Est	17	6
poste P30	Est	34	26
TP	Centrale	7	2
poste P2	Centrale	47	36
usine	Centrale	2	0
Poste P10	centrale	46	126
CF	centrale	1	0
Poste P34	Centrale	133	115
Poste P25	Ouest	177	137
Poste P22	Ouest	172	133
BTP1J	Est	220	165
BTP30P	Est	17	13
BTP2J	Centrale	56	42
BTP10J	Centrale	63	46
BTP34P	Centrale	106	89
BTP25P	Ouest	88	66
BTP22P	Ouest	84	63

**Tableau (5-3) caractéristiques des nœuds du réseau**

**V-4 MISE EN PLACE DU RESEAU SUR POWER SYSTEM**

Voici la disposition du réseau dans l'environnement de Power System :



fig(5-2) schéma du réseau électrique établi dans Power System

### Commentaires

La simulation consiste à placer un transformateur à caractère saturable en un bout de ligne du réseau afin d'analyser la propagation des phénomènes transitoires.

Pour cela, **on a placé des points de mesure sur le réseau. Ces points de mesure sont indiqués sur le schéma fig(5-2) par les numérotations 1, 2, 3, 4, 5 et 6**

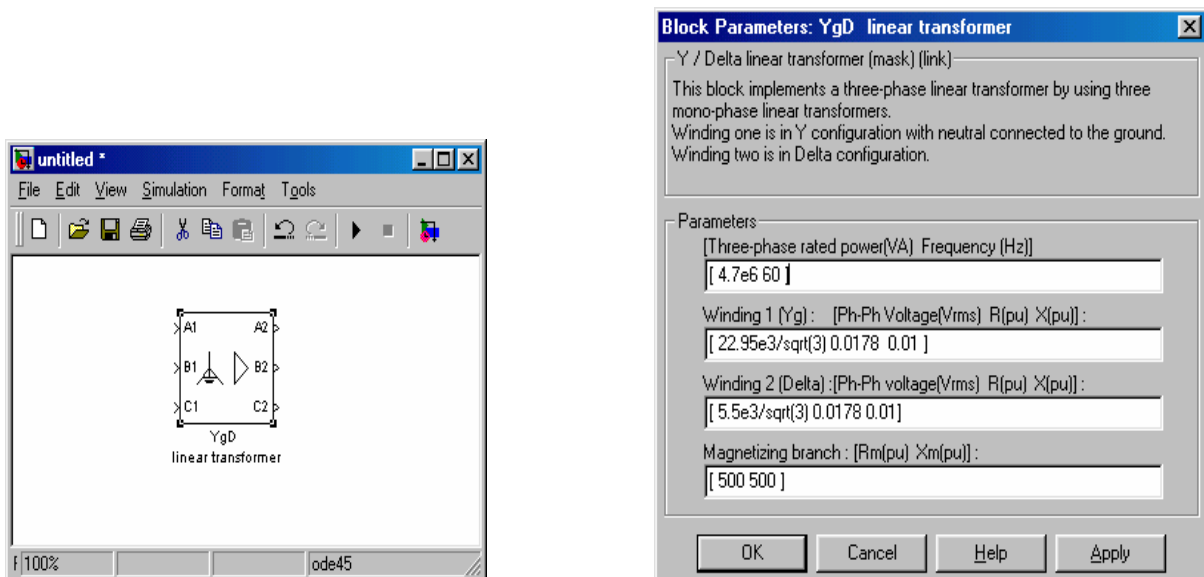
Il est à noter que les points 5 et 6 servent à prélever les tensions et courants allant vers un récepteur ou une charge du réseau (la « charge 4 »)

On prélève, alors, les allures de courant et de tension en ces différents points en vue de les analyser.

Les descriptions des éléments de la figure fig(5-2) sont les suivantes :

- Les sources de tension partant du centrale sont supposées sinusoïdales
- La modélisation des lignes se fait avec le 'Distributed Parameter Line' qui peut représenter des lignes triphasées symétriques ou asymétriques selon les charges.
- Le transformateur de puissance à coté du centrale est un transformateur triphasé linéaire
- En chaque bout de ligne est représentée une charge triphasée.
- Pour les lignes non-chargées, on branche à l'extrémité une impédance caractéristique de la ligne concernée pour qu'il n'y ait pas réflexion d'ondes incidentes qui pourrait perturber le comportement du réseau.

◆ Pour le transformateur principal de la centrale, la modélisation sur Power System est la suivante :



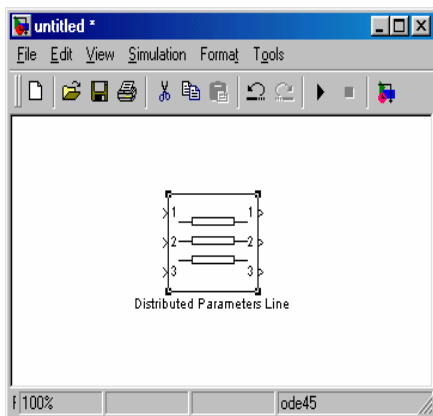
La première entrée concerne la puissance du grand transformateur de distribution et la fréquence du réseau

La deuxième concerne la tension primaire, la résistance et la réactance de l'enroulement primaire

La troisième décrit la tension, la résistance et la réactance secondaire

La quatrième entrée concerne la résistance et la capacitance magnétisante à vide

◆ Pour la modélisation des lignes, la représentation sur Power System est la suivante :



**Block Parameters: Line4**

Distributed Parameters Line (mask) (link)  
 Implements a N-phases distributed parameter line model.  
 The R, L, and C line parameters are specified by [N×N] matrices.

To model a transposed three-phase line you can either specify complete [N×N] matrices or simply enter the positive (1) and zero (0) sequence parameters.

To model a transposed six-phase line (two coupled three-phase lines) you can either specify complete [N×N] matrices or simply enter the positive (1) sequence, the zero (0) sequence, and the mutual (0m) zero-sequence parameters.

Parameters

Number of phases N

Frequency used for R L C specification (Hz)

Resistance per unit length (Ohms/km) [N\*N matrix] or [R1 R0]

Inductance per unit length (H/km) [N\*N matrix ] or [L1 L0 L0m]

Capacitance per unit length (F/km) [N\*N matrix] or [C1 C0 C0m]

Line length (km)

OK Cancel Help Apply

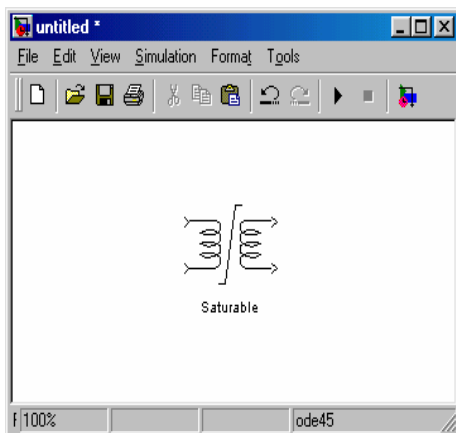
La première entrée donne le nombre de phases de la ligne

La seconde entrée indique la fréquence d'utilisation

La troisième, quatrième, cinquième concernent respectivement la résistance, l'inductance et la capacitance linéique de la ligne

La dernière entrée indique la longueur de la ligne

◆ La modélisation du transformateur à caractère saturable est la suivante :



**Block Parameters: Sat**

Saturable Transformer (mask) (link)  
 Three winding saturable transformer.

Parameters

Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz):]

Winding 1 parameters [V1(Vrms) R1(pu) L1(pu):]

Winding 2 parameters [V2(Vrms) R2(pu) L2(pu):]

Winding 3 parameters [V3(Vrms) R3(pu) L3(pu):]

Saturation characteristic [i1(pu) phi1(pu); i2 phi2; ...]:

Core loss resistance and initial flux [Rm(pu) phi0(pu)] or [Rm(pu)]

OK Cancel Help Apply

La première entrée indique la puissance du transfo et la fréquence

La deuxième concerne la tension primaire, la résistance et l'inductance de l'enroulement primaire.

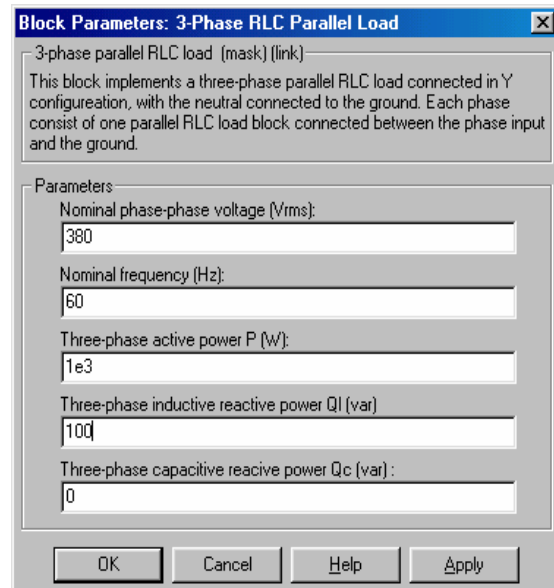
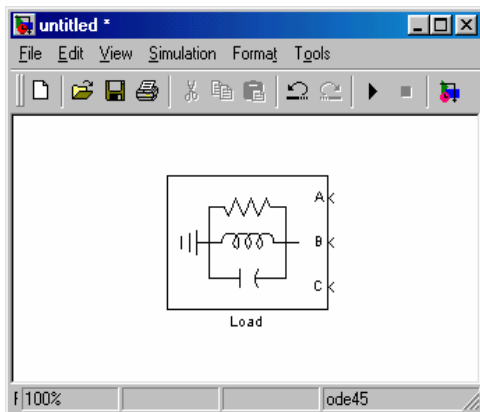
La troisième celles du secondaire.

La quatrième est équivalent à zéro car le transformateur admet deux enroulements

La cinquième entrée concerne les caractéristiques de saturation du circuit magnétique

Et la sixième entrée indique la perte magnétique à vide .

◆ La modélisation des charges est



La première entrée indique la tension nominale entre phase.

La deuxième entrée concerne la fréquence d'utilisation.

La troisième, quatrième et cinquième entrée indiquent respectivement les puissances active, réactive et capacitive consommées par la charge.

◆ La simulation dure 22 minutes environ pour tout le réseau.

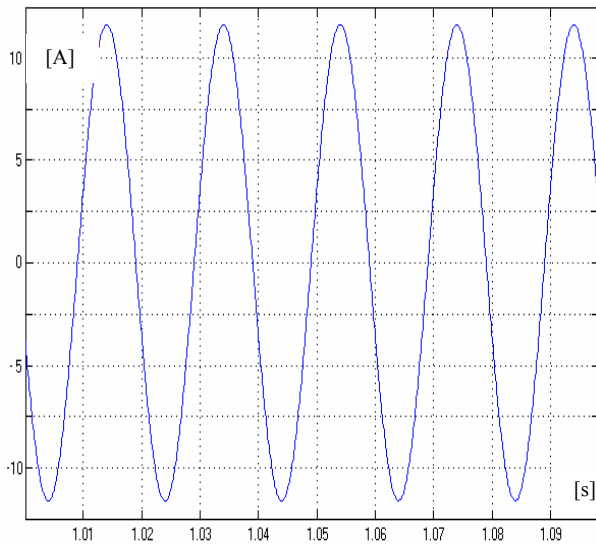
**V-5 RESULTATS ET INTERPRETATIONS**

**V-5-1 Courbes de résultats des phénomènes sur le réseau**

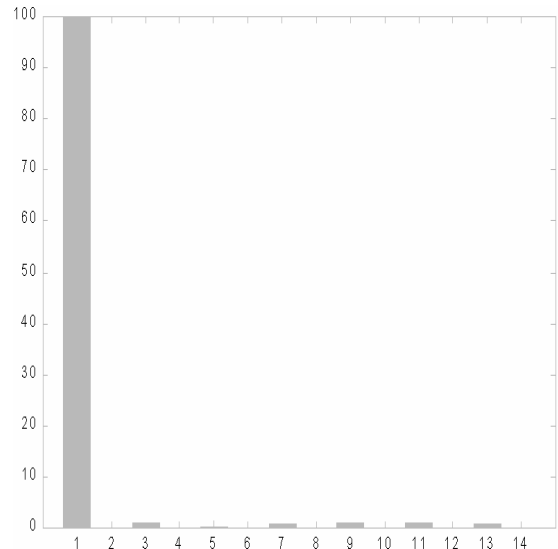
**a- transformateur saturable modélisé par les caractéristiques d'un circuit en tôle à cristaux orientés**

• point de prélèvement 1 ( au nœud CT ):

- courant :



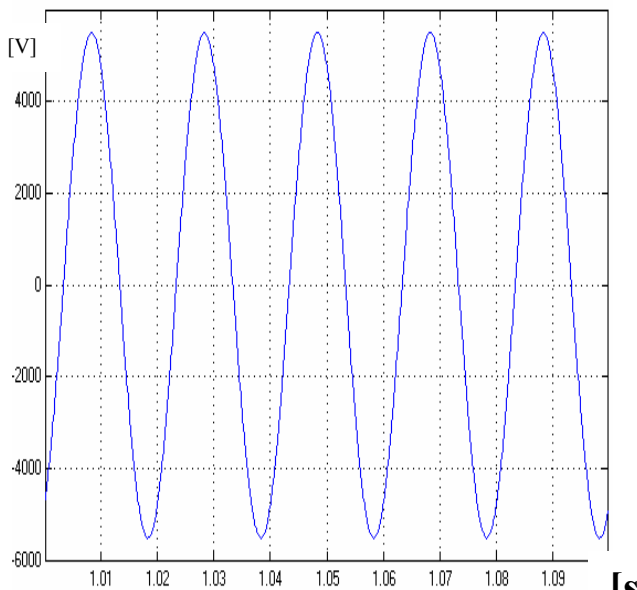
Forme de courbe



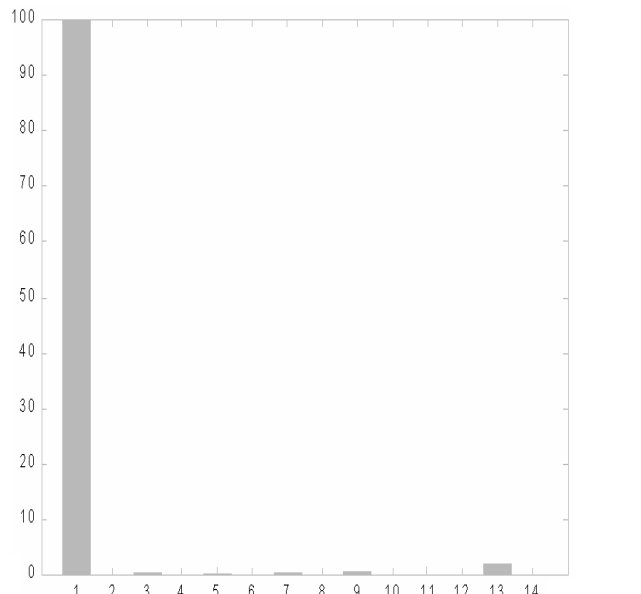
Graphe de spectres Rang h

Taux de distorsion harmonique :  $T = 2,19 \%$

- tension



Forme de courbe

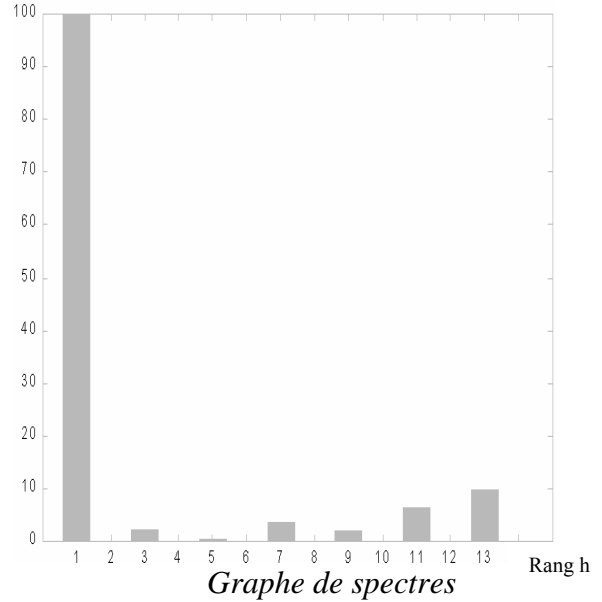
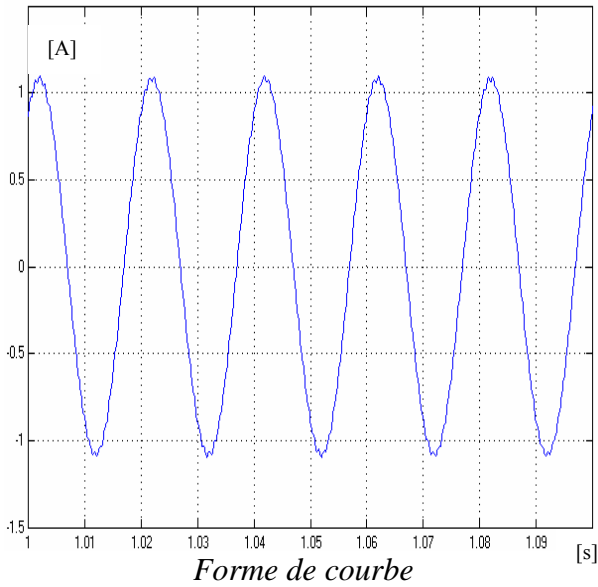


Graphe de spectres Rang h

Taux de distorsion harmonique :  $T = 2,82 \%$

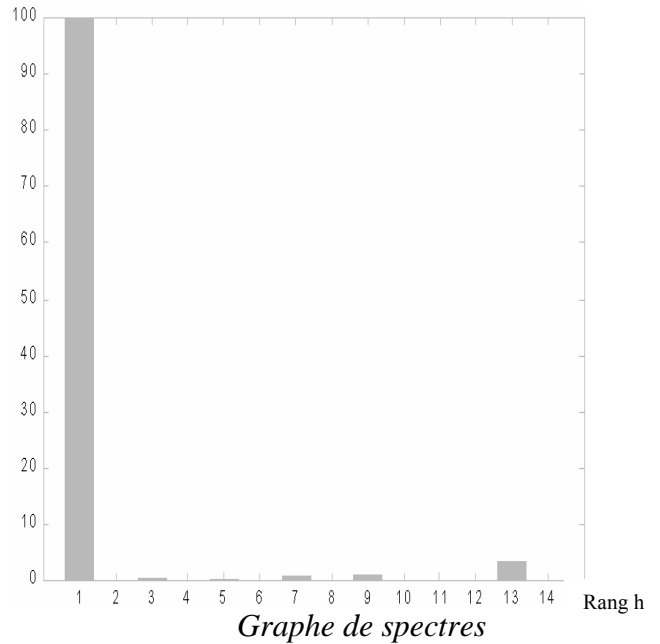
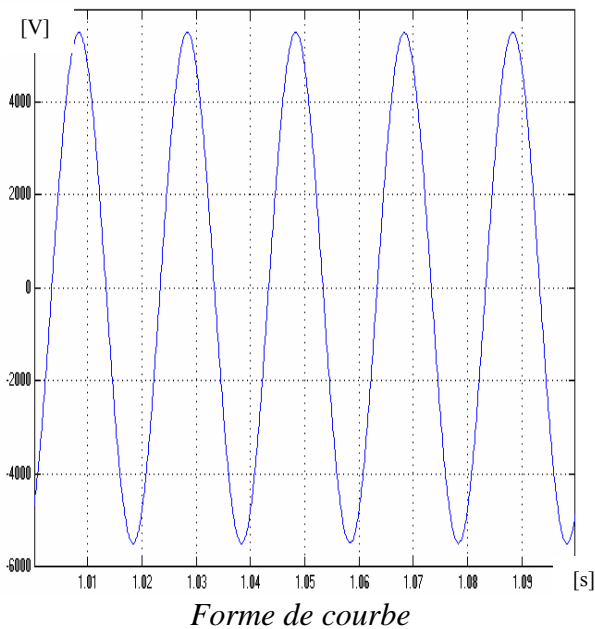
- point de prélèvement 2 ( **au nœud USINE** )

-courant



Taux de distorsion harmonique :  $T = 12,61 \%$

-tension



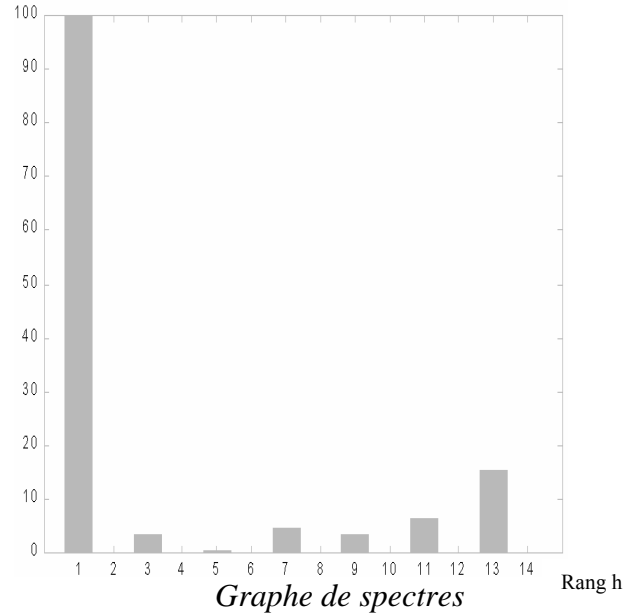
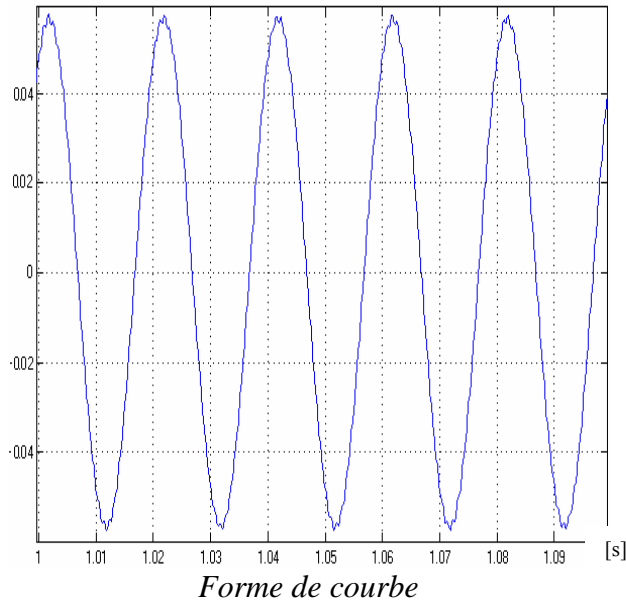
Taux de distorsion harmonique :  $T = 3,36 \%$



- point de prélèvement 3 : ( en amont du transformateur saturable au nœud P10)

- courant

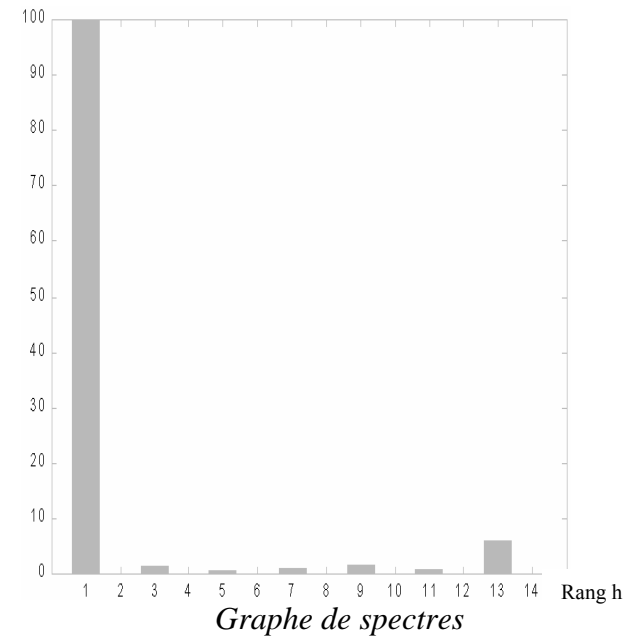
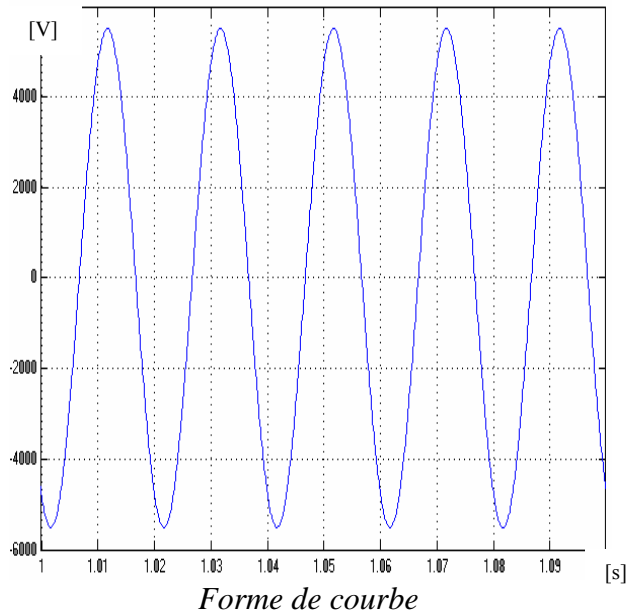
[V]



Taux de distorsion harmonique :  $T = 16,41 \%$

- tension

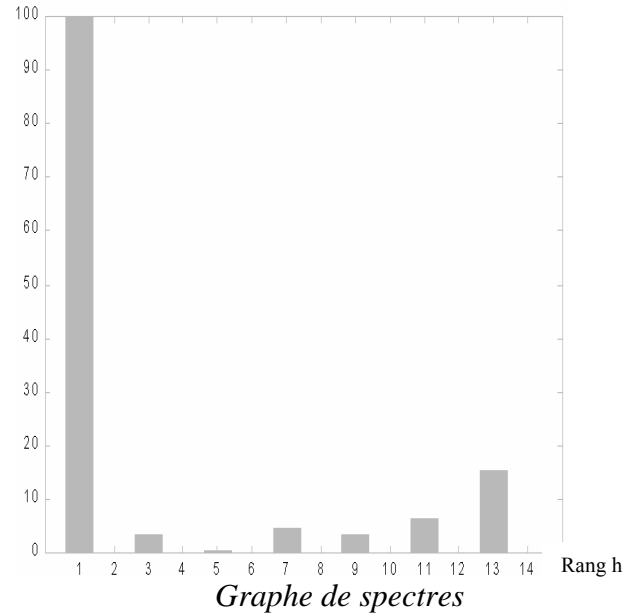
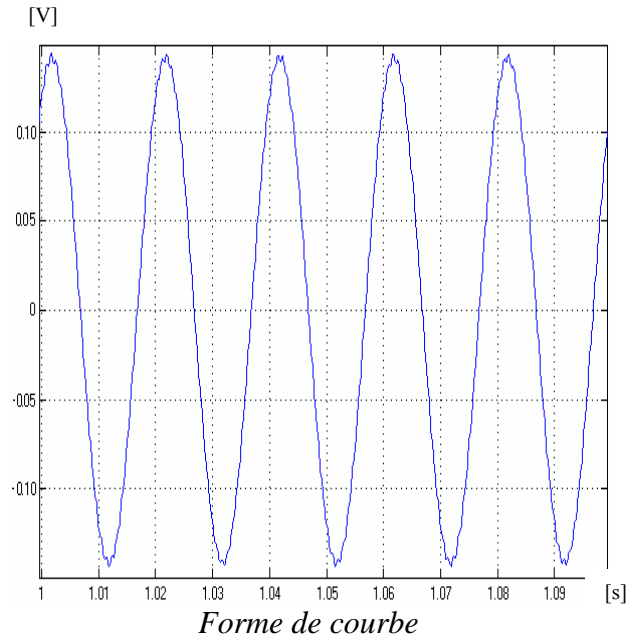
[V]



Taux de distorsion harmonique :  $T = 5,93 \%$

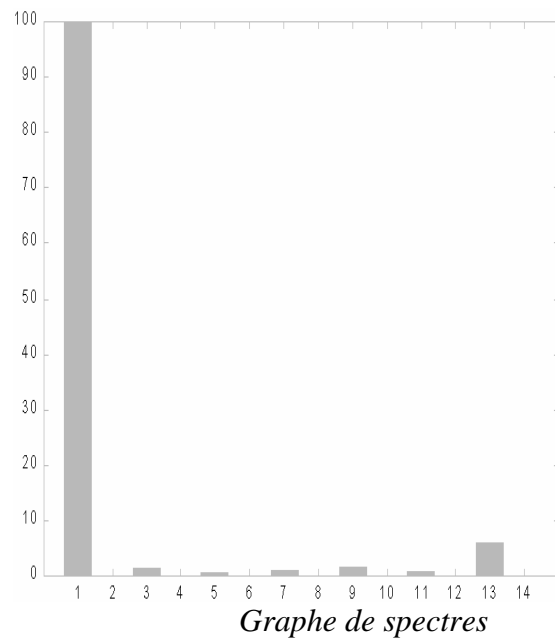
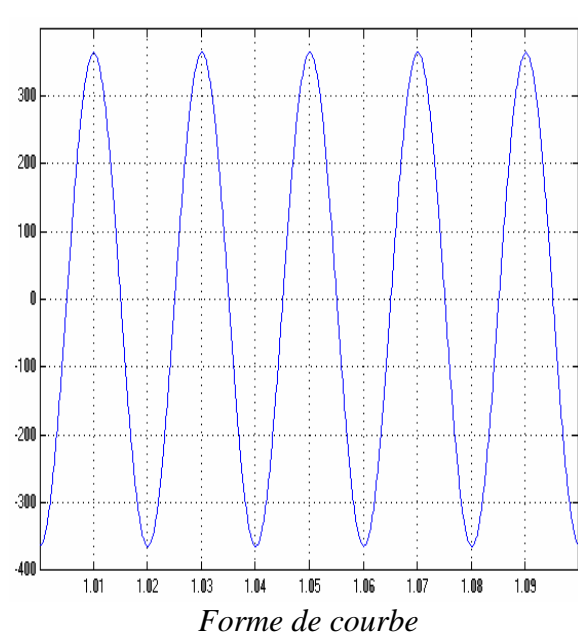
- point de prélèvement 4 : ( en aval du transformateur saturable )

- courant



Taux de distorsion harmonique :  $T = 16,41 \%$

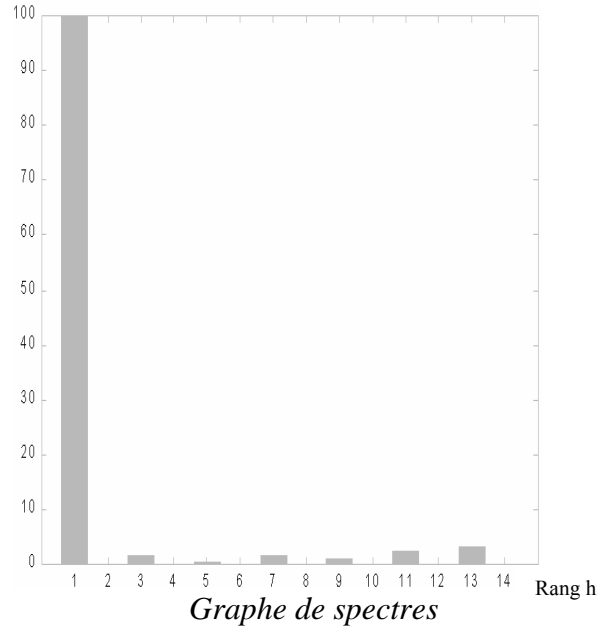
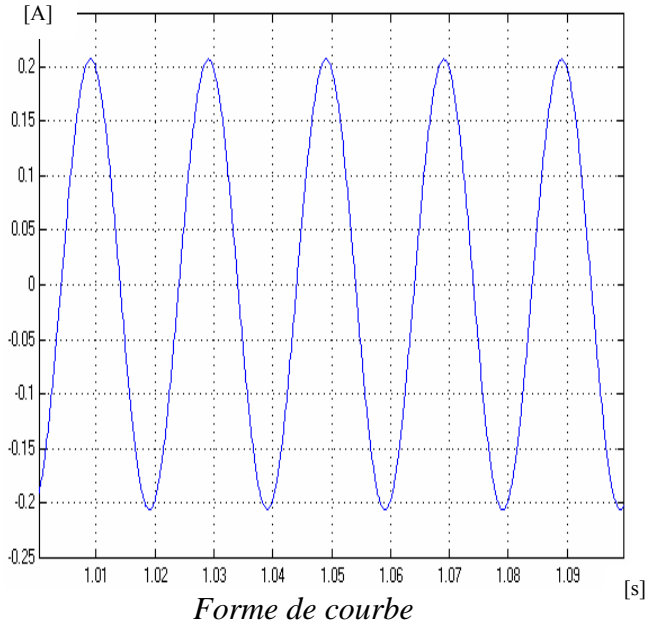
- tension



Taux de distorsion harmonique :  $T = 5,93 \%$

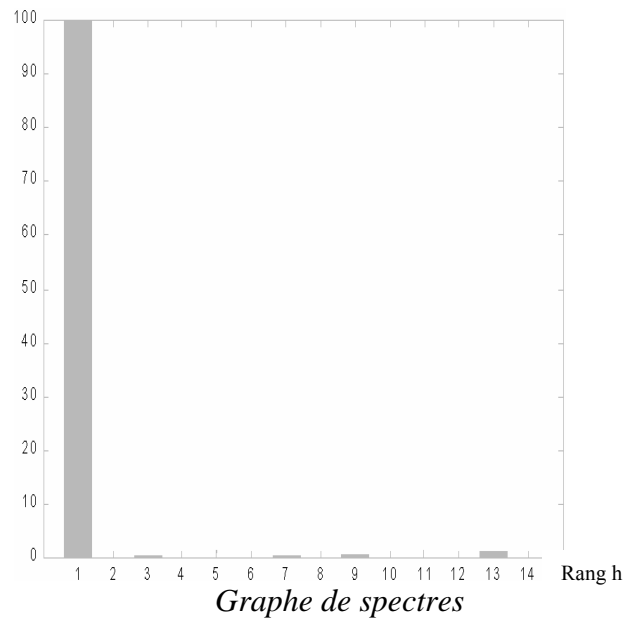
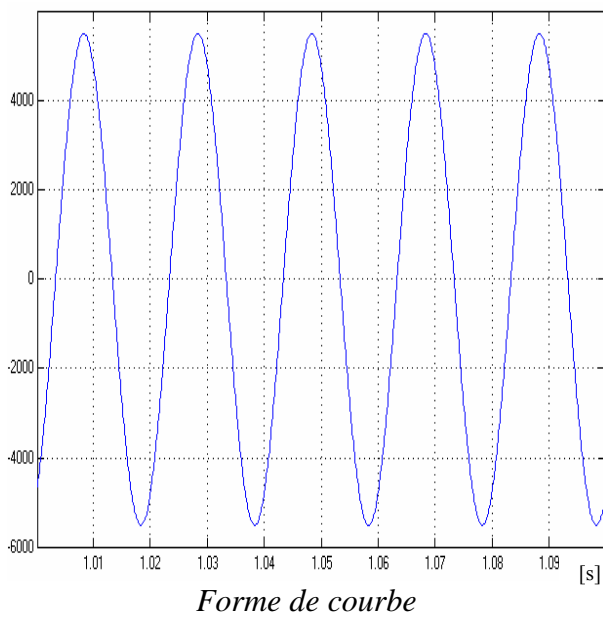
• point de prélèvement 5 : ( au nœud P25 )

- courant



Taux de distorsion harmonique :  $T = 6,10 \%$

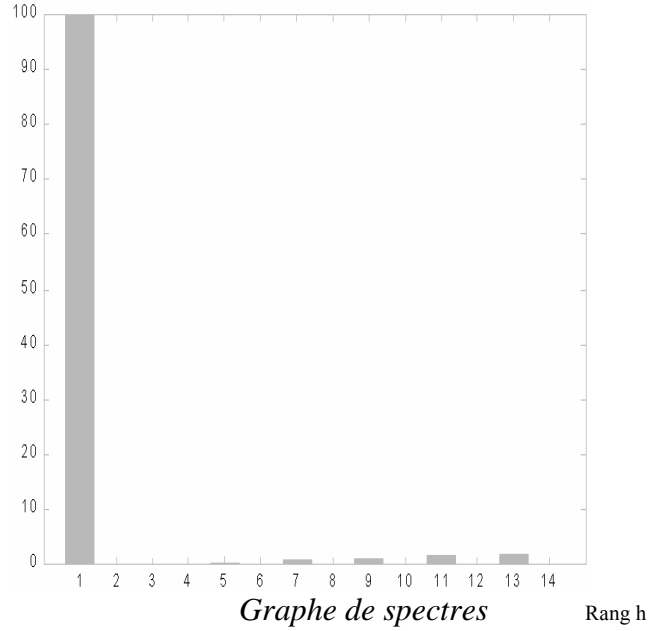
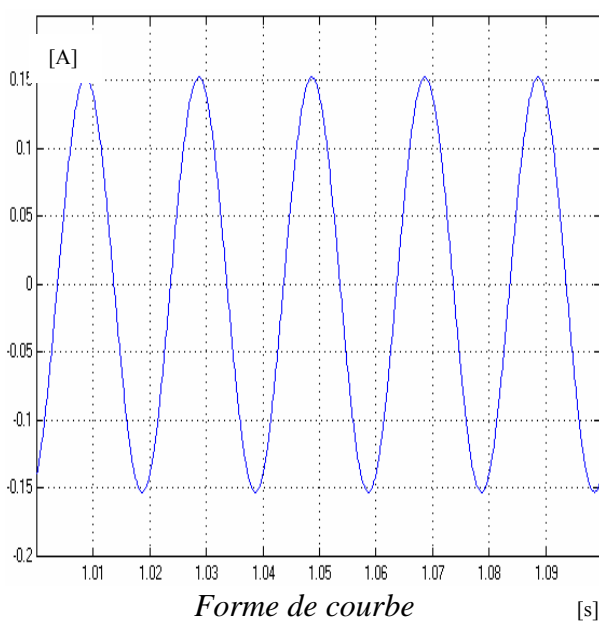
- tension



Taux de distorsion harmonique :  $T = 2,64 \%$

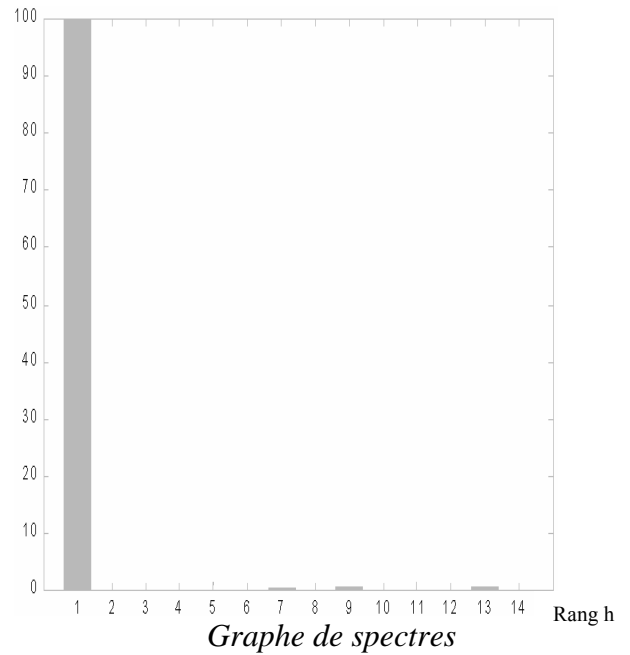
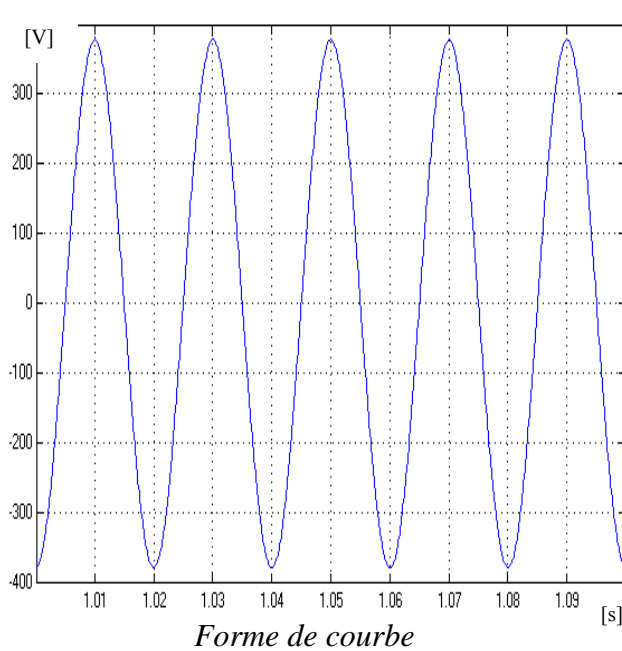
• point de prélèvement 6 : ( après le transformateur P25P )

- courant



Taux de distorsion harmonique :  $T = 3,17 \%$

- tension

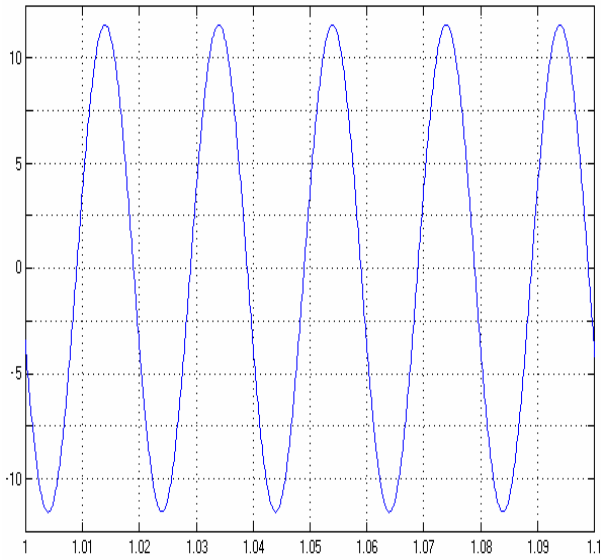


Taux de distorsion harmonique :  $T = 1,732 \%$

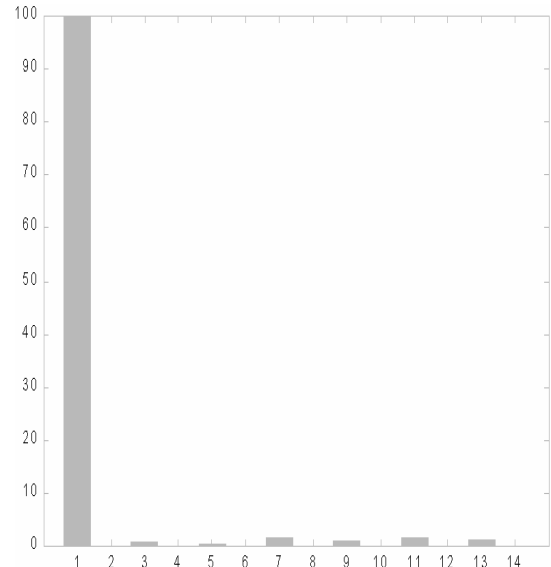
**b- transformateur saturable modélisé par les caractéristiques d'un circuit en tôle au silicium**

- point de prélèvement 1 : ( **au nœud CT** )

- courant



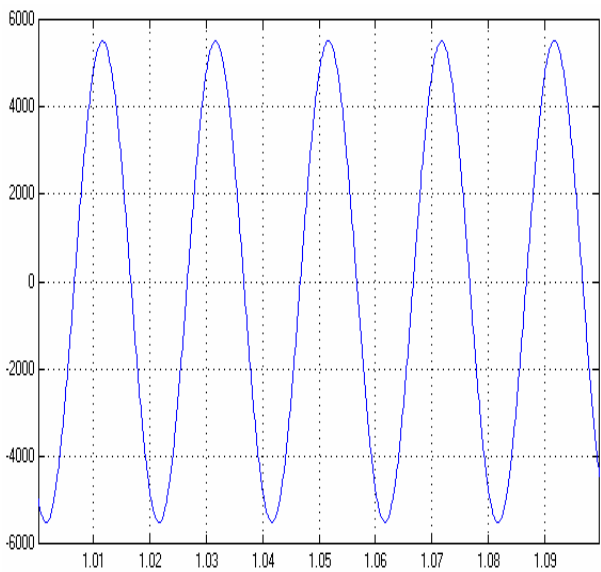
*Forme de courbe*



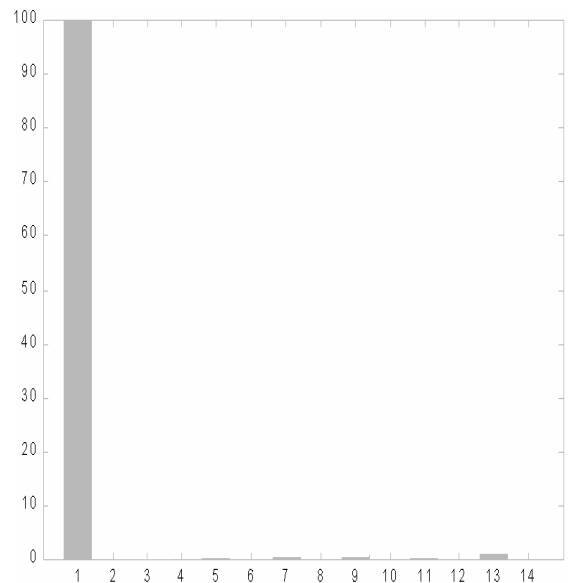
*Graphe de spectres*

Taux de distorsion harmonique :  $T = 2,42 \%$

- tension



*Forme de courbe*

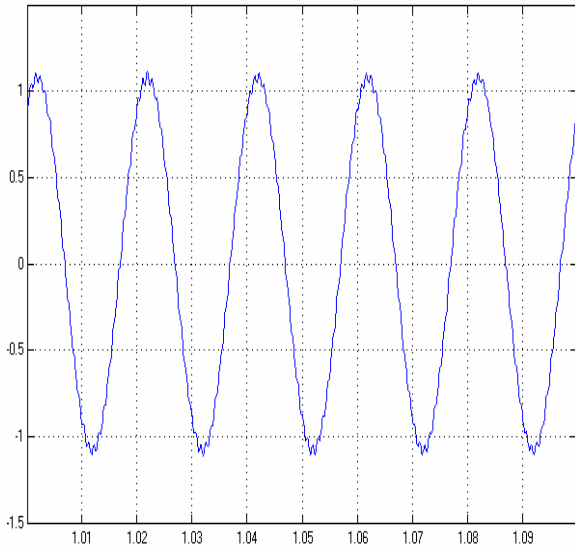


*Graphe de spectres*

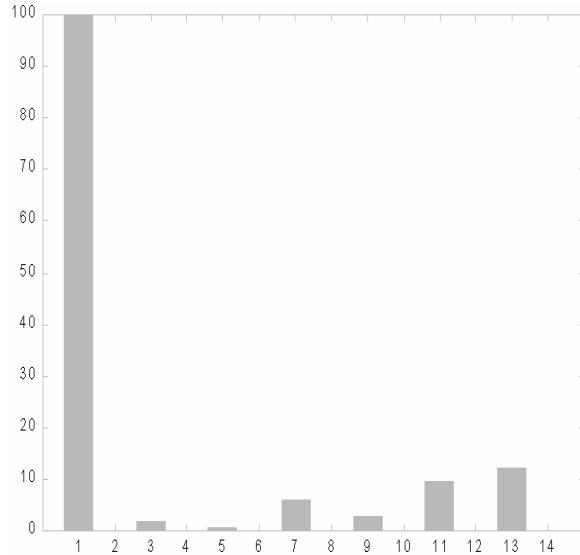
Taux de distorsion harmonique :  $T = 2,15 \%$

• point de prélèvement 2 : ( au nœud USINE )

- courant



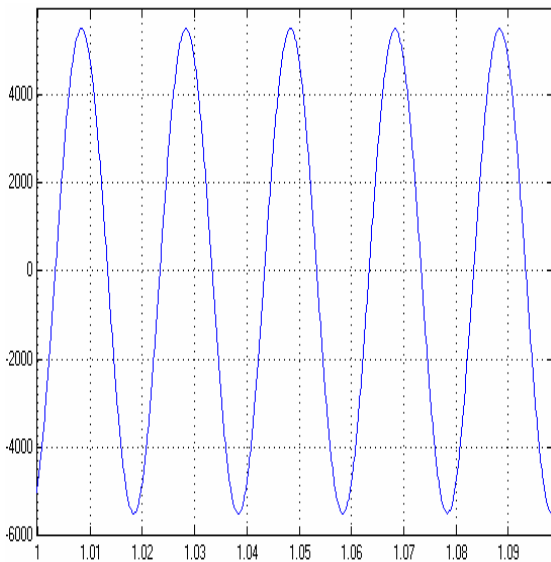
Forme de courbe



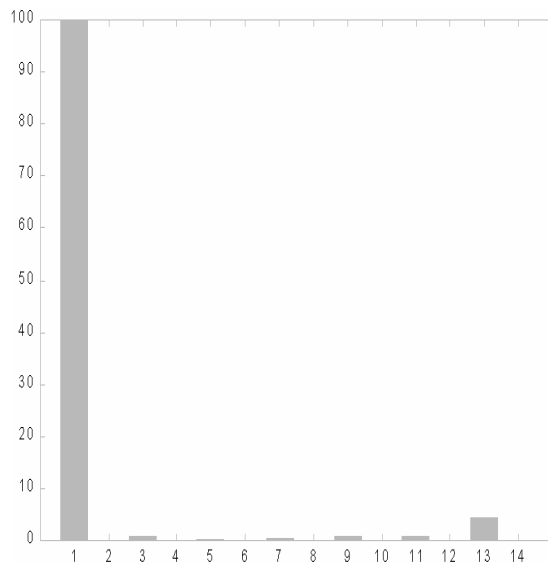
Graphe de spectres

Taux de distorsion harmonique :  $T = 17,12 \%$

- tension



Forme de courbe

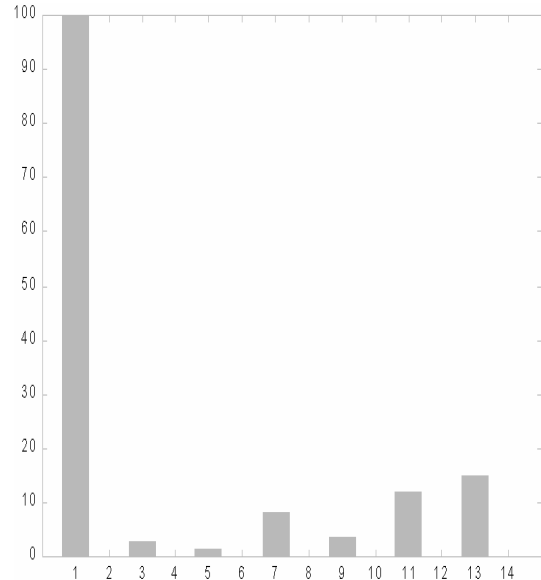
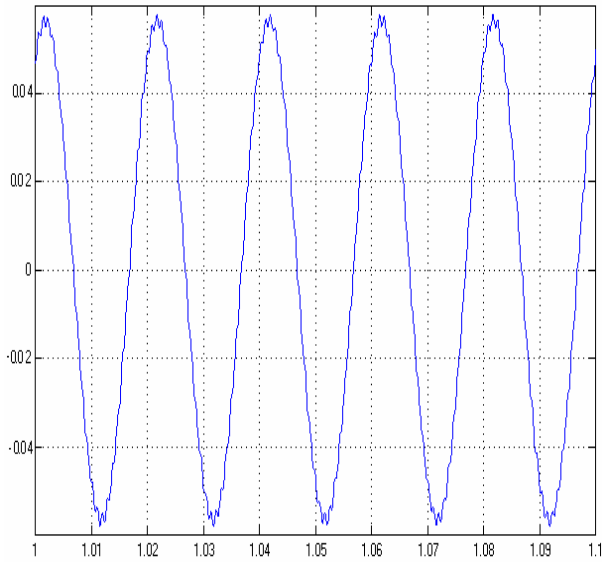


Graphe de spectres

Taux de distorsion harmonique :  $T = 4,39 \%$

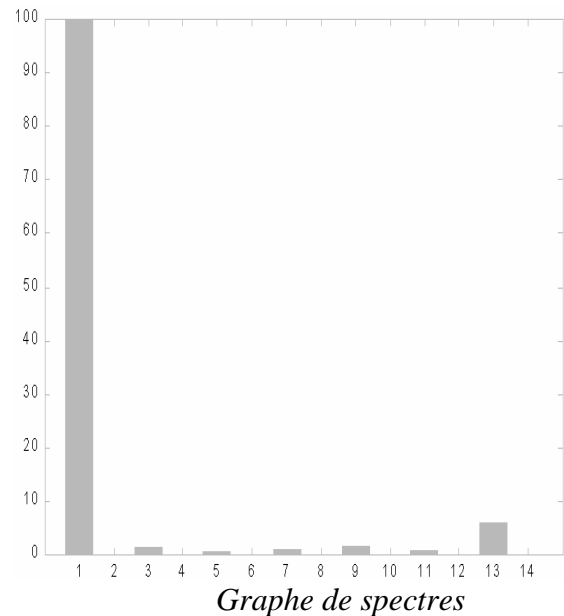
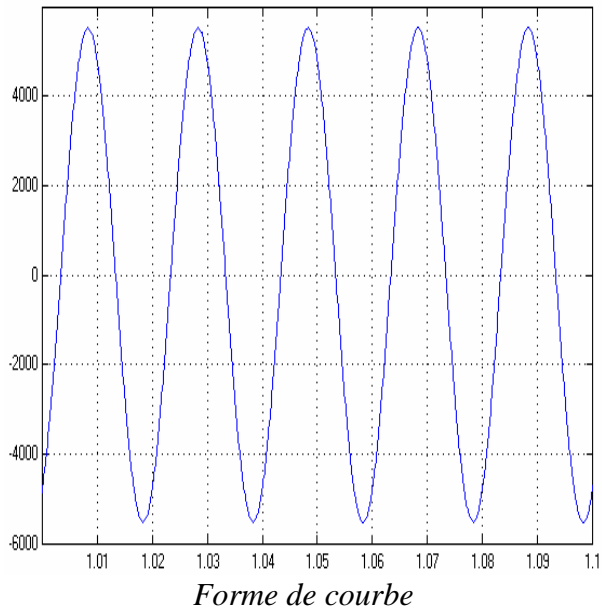
• point de prélèvement 3 : ( en amont du transformateur saturable )

- courant



Taux de distorsion harmonique :  $T = 22,75 \%$

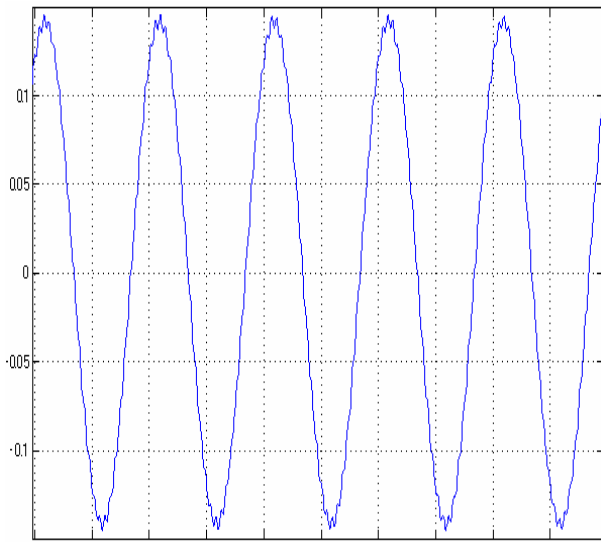
- tension



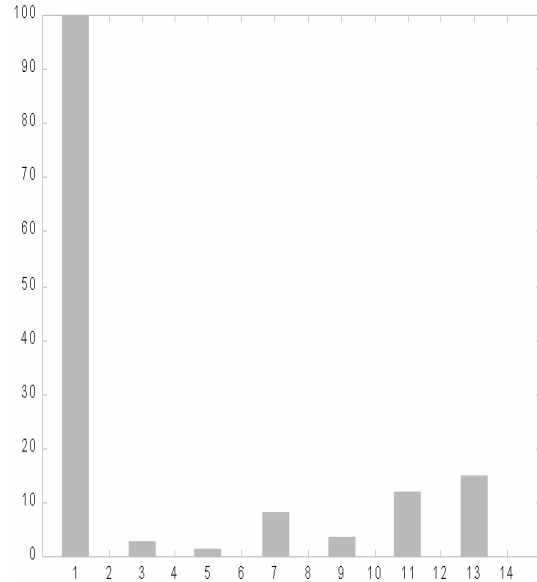
Taux de distorsion harmonique :  $T = 6,80 \%$

• point de prélèvement 4 : ( en aval du transformateur saturable )

- courant



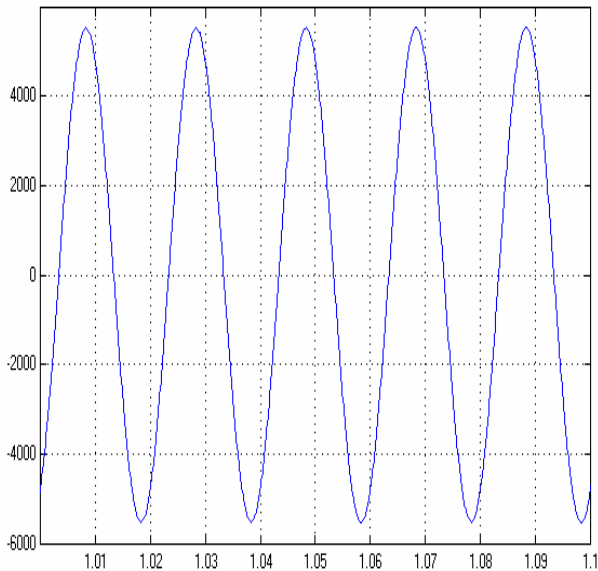
Forme de courbe



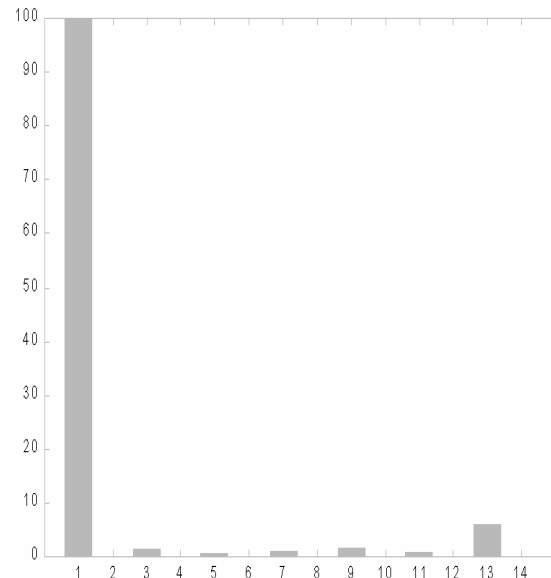
Graphe de spectres

Taux de distorsion harmonique :  $T = 22,75 \%$

- tension



Forme de courbe



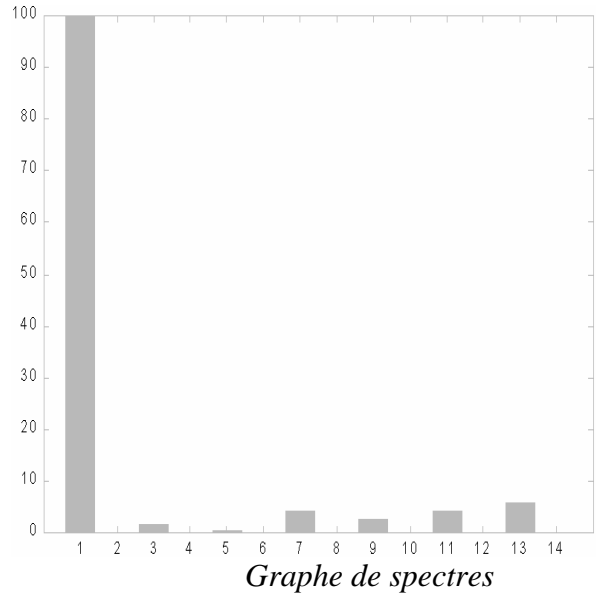
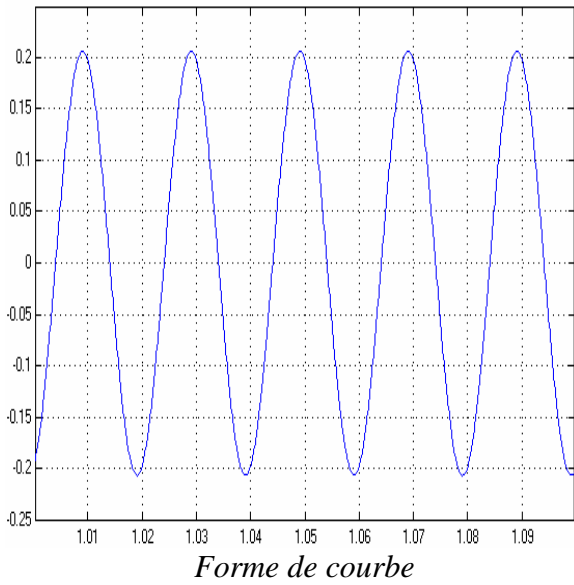
Graphe de spectres

Taux de distorsion harmonique :  $T = 6,80 \%$



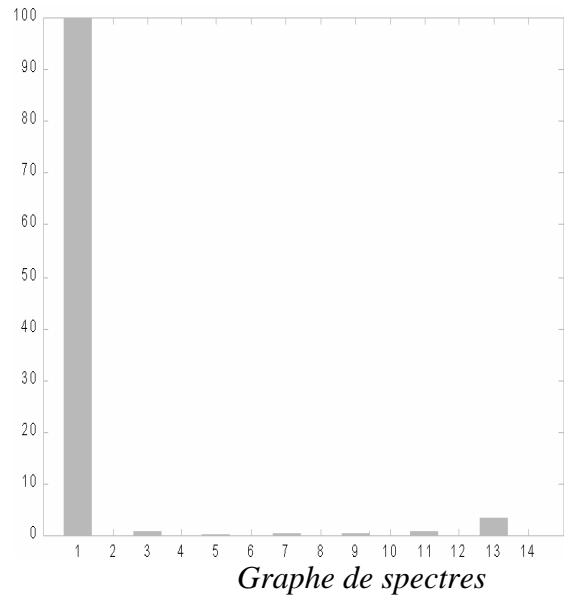
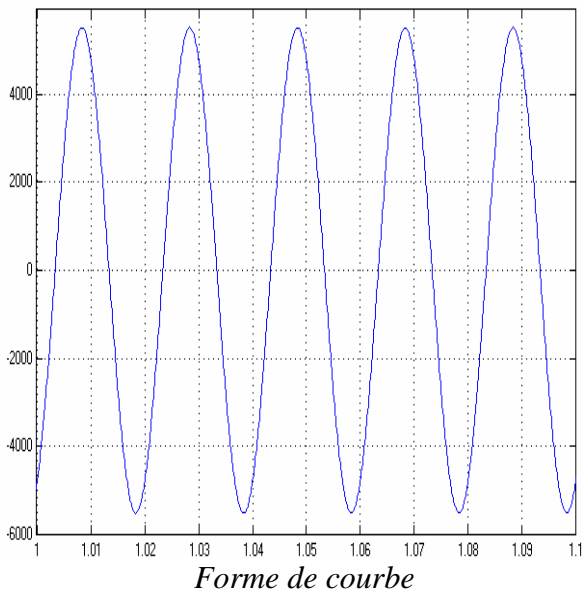
• point de prélèvement 5 : ( au nœud P25 )

- courant



Taux de distorsion harmonique :  $T = 8,26 \%$

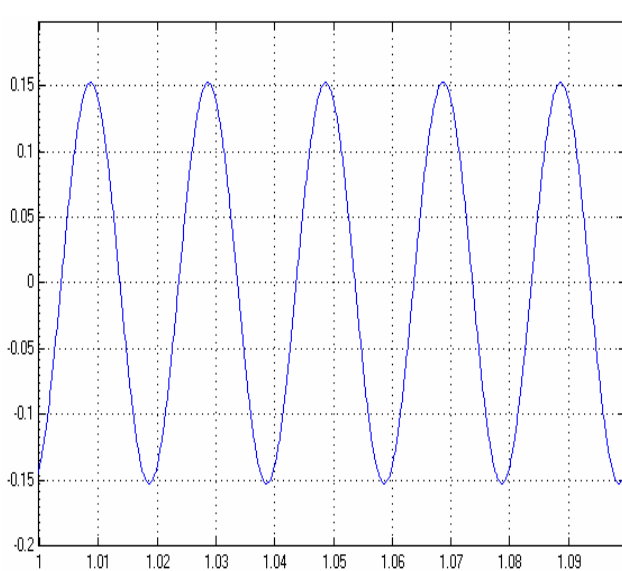
- tension



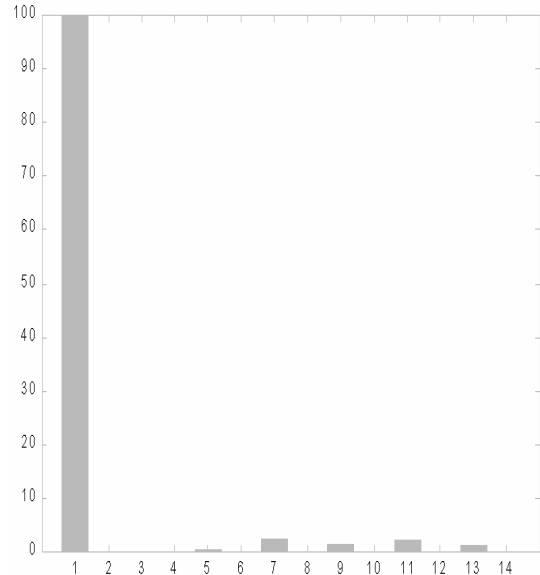
Taux de distorsion harmonique :  $T = 3,40 \%$

• point de prélèvement 6 : ( après le transformateur P25P )

- courant



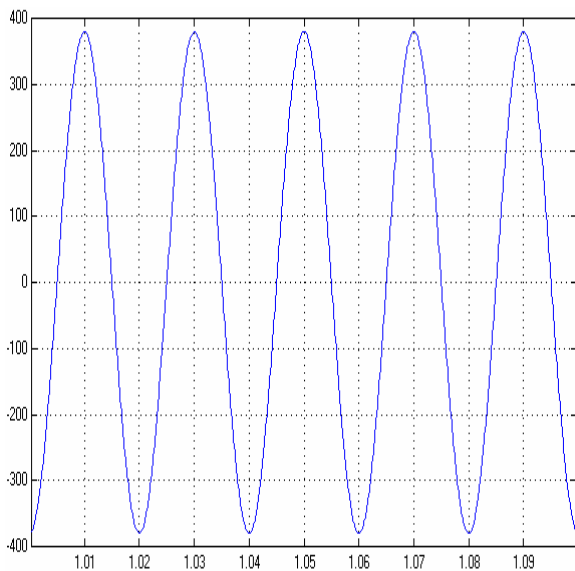
Forme de courbe



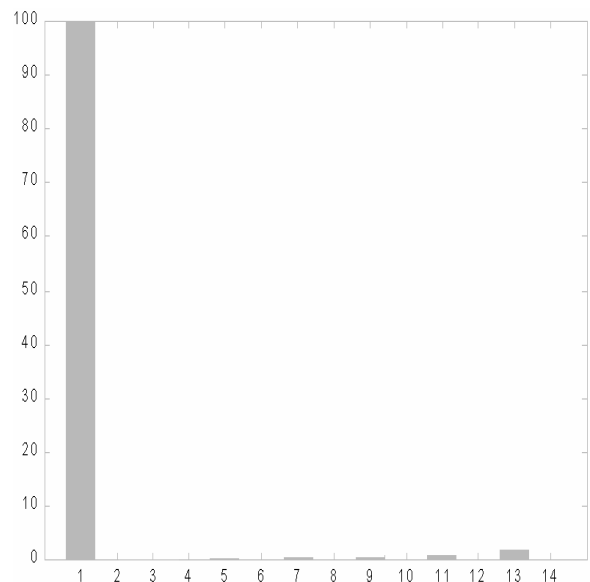
Graphe de spectres

Taux de distorsion harmonique :  $T = 4,52 \%$

- tension



Forme de courbe



Graphe de spectres

Taux de distorsion harmonique :  $T = 2,51 \%$

### **V-5-2 Interprétations**

▪ La propagation des oscillations harmoniques de courant provoquées par le transformateur saturable est concentrique . C'est à dire que les allures des courants en amont et en aval du transformateur sont les mêmes (dans la simulation, aux points de mesure 3 et 4). Les taux de distorsion T en ces points sont égaux.

▪ Pour les ondes de tension, les propagations des perturbations en amont et en aval du transformateur sont différentes car le transformateur est chargé. La charge se compose de résistance et de self en parallèle. De ce fait, certains rangs harmoniques sont affaiblis .

▪ La forme des courbes de courant et tension présentant les harmoniques (point 3 et 4) dépend des caractéristiques de saturation du fer constituant le circuit magnétique. Celui en tôle ordinaire propage plus d'oscillations que le circuit à cristaux orientés.

▪ Du point de mesure 3 jusqu'au point de mesure 2, les distorsions de courants et tensions sont à peu près les mêmes car, dans cette branche du réseau, il n'y a pas d'appareils ni de transformateurs de type capacitif. Mais seules les caractéristiques de la ligne et de l'interrupteur diminuent les amplitudes et les formes des courbes distordues générées par le transformateur saturable. Les taux de distorsions harmoniques diffèrent de quelques 5 % entre les deux points.

▪ Du point de mesure 5 jusqu'au point de mesure 6 dans la branche partant du nœud CF, les oscillations harmoniques diminuent. Au secondaire du transformateur P25, on n'observe plus d'harmoniques de rang 3, 5 et 7 traces, 9-11-13 sont minimales. Ceci est due au couplage du transformateur P25.

Le transformateur P25 a un couplage Ynd. Le couplage triangle au secondaire étouffe les harmoniques 3 Les flux de fréquence triple deviennent en phase dans les trois colonnes mais ne s'annulent pas dans les culasses et se ferment dans l'air. Il en résulte alors un trajet dont la réluctance est élevée, et les tensions et courants induits de rang 3 deviennent très réduits.

Ce sont surtout ces harmoniques qui causent des gênes de fonctionnement au niveau des récepteurs et des lignes : elles provoquent des surcharges thermiques dans les câbles et claquage des condensateurs de compensation d'énergie réactive.

Néanmoins, la forme des courbes de courant et tension présente encore des petites distorsions. On peut alors affirmer qu' un transformateur filtre les harmoniques. On dit qu'il constitue une isolation galvanique pour les pollutions harmoniques : il y a transfert d'énergie mais filtrage de parasites. Ceci est constaté par la différence des taux de distorsion harmonique aux deux points 5 et 6 pour les deux types de circuit magnétique.

- pour le circuit en tôle à cristaux orientés :

distorsion du courant

$$T(5) = T(\text{prélèvement } 5) = 6,10 \%$$

$$T(6) = T(\text{prélèvement } 6) = 3,17 \%$$

distorsion de la tension

$$T(5) = 2,64 \%$$

$$T(6) = 1,732 \%$$

- pour le circuit en tôle au silicium :

distorsion du courant

$$T(5) = 8,26 \%$$

$$T(6) = 4,52 \%$$

distorsion de la tension

$$T(5) = 3,40 \%$$

$$T(6) = 2,51 \%$$

Pour tous les cas, on a  $T(6) < T(5)$

Dans les réseaux électriques, les transformateurs en couplage Ynd sont fiables car ils agissent comme des filtres d'harmoniques.

- On constate que le taux de distorsion du courant et de la tension pour le circuit en tôle à cristaux orientés est inférieur à celui du circuit en tôle au silicium. Ceci s'explique par le degré de saturation des deux types de tôles : la tôle au silicium se sature plus vite que la tôle à cristaux orientés (chapitre 3 paragraphe III-5-1), donc elle est plus sensible aux perturbations harmoniques.

- Au point de mesure 1, à la sortie de la centrale, on constate encore une diminution des distorsions harmoniques ( $T(1) < T(2)$ ).

Donc, à mesure qu'on s'éloigne du transformateur saturable, les distorsions harmoniques s'affaiblissent, le courant et la tension tendent à devenir sinusoïdales.

Il existe un seuil maximal du taux de distorsion où en dessous duquel, les courants et tensions peuvent être considérés comme sinusoïdale. Ce seuil est de  $T_{\max} = 8 \%$  pour les réseaux MT et HT.

- Dans le réseau simulé, la période est de 20 [ms] pour une fréquence industrielle de 50 [Hz].

- Du point de mesure 2 jusqu'au point de mesure 1, les distorsions harmoniques tendent à disparaître. Ceci est constaté par la différence remarquable des taux de distorsion harmoniques des deux points. Donc, on peut en conclure que les caractéristiques des lignes jouent aussi le rôle de filtre.

En effet, les capacités des câbles contre terre en série avec les inductances linéiques constituent un filtre de type passe-bas et atténuent ou bloquent même la plupart des fréquences hautes du signal de courants et tensions.

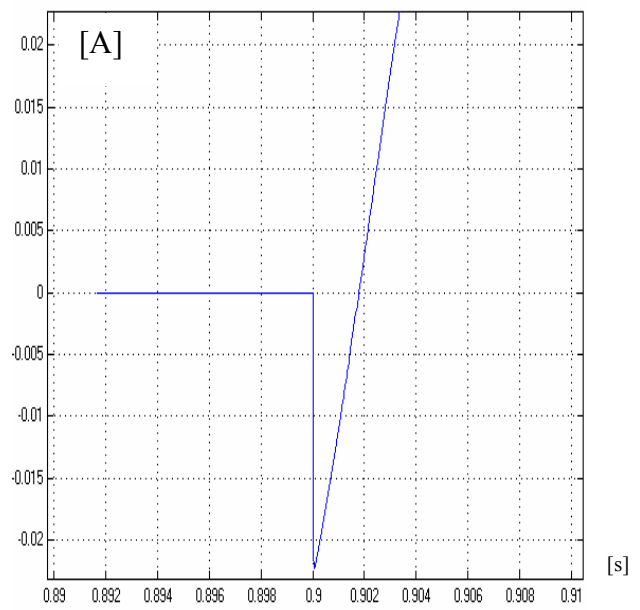
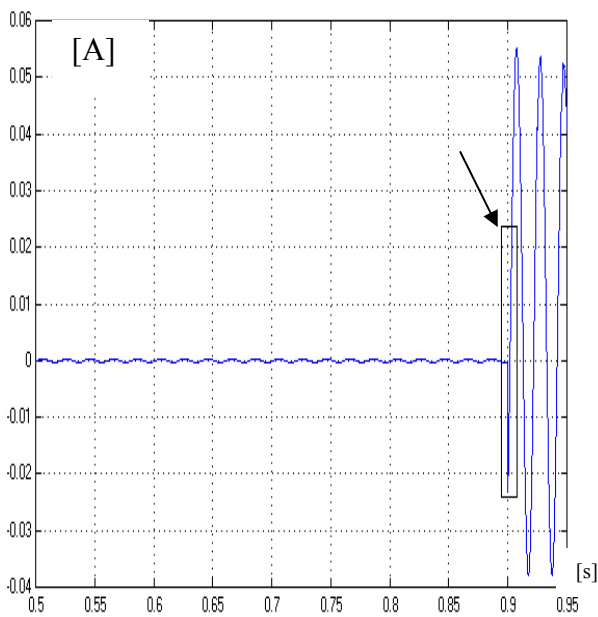
- D'après la simulation, on peut en déduire, que les perturbations harmoniques générées dans les différentes branches de réseau n'atteignent pas les centrales de production pour les réseaux de type radial

- La charge au niveau du transformateur saturable contribue à l'élimination de l'effet de saturation. Pour ces types de transformateur, il faut que le courant traversant les enroulements doit être supérieur au courant consommé par l'enroulement primaire lorsque le transformateur fonctionne à vide.

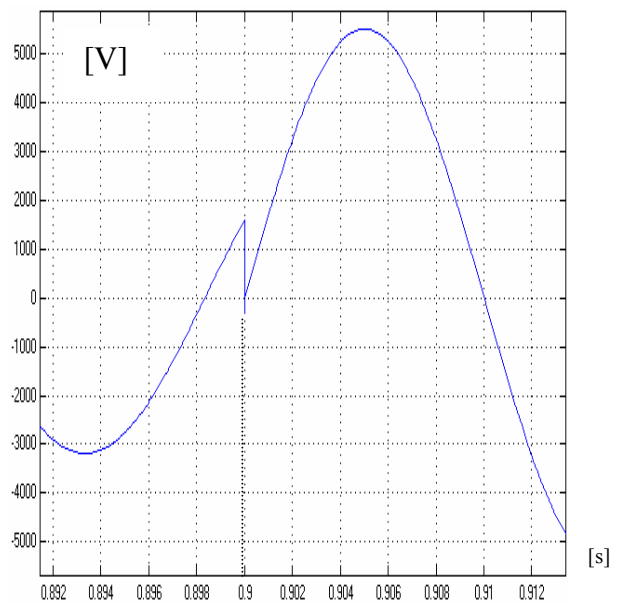
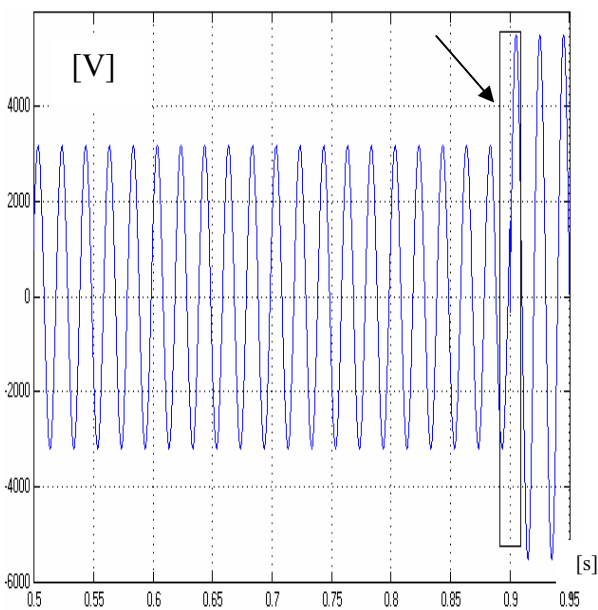
**V-6 ENCLENCHEMENT DU TRANSFORMATEUR**

L'utilisation de l'interrupteur permet de voir les phénomènes d'enclenchement du transformateur sur le réseau faiblement chargé. L'enclenchement est provoqué à  $t=0,9[s]$ . Les comportements des ondes de tension et courant lors de la fermeture de l'interrupteur sont représentés par les figures ci-après :

- point de prélèvement 3 ( en amont du transformateur saturable )



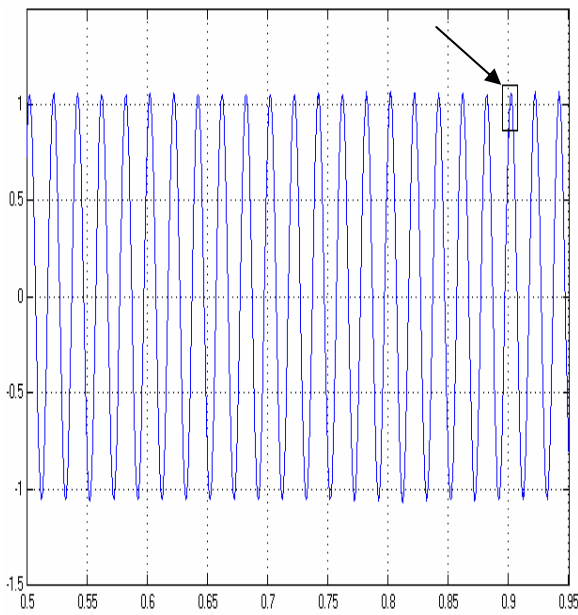
*comportement du courant*



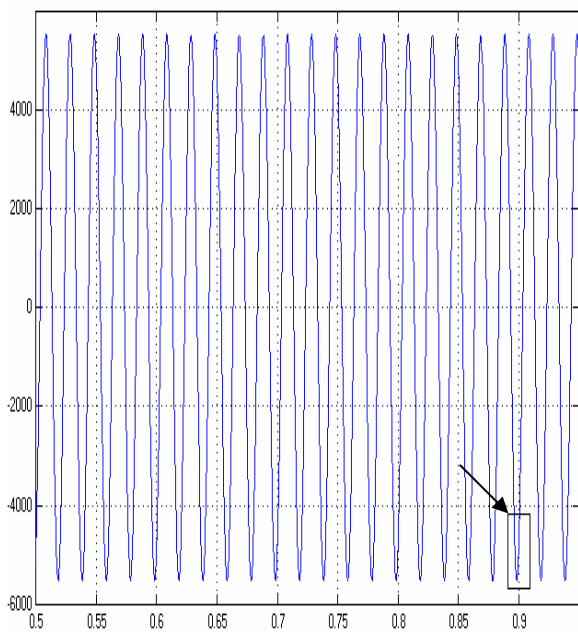
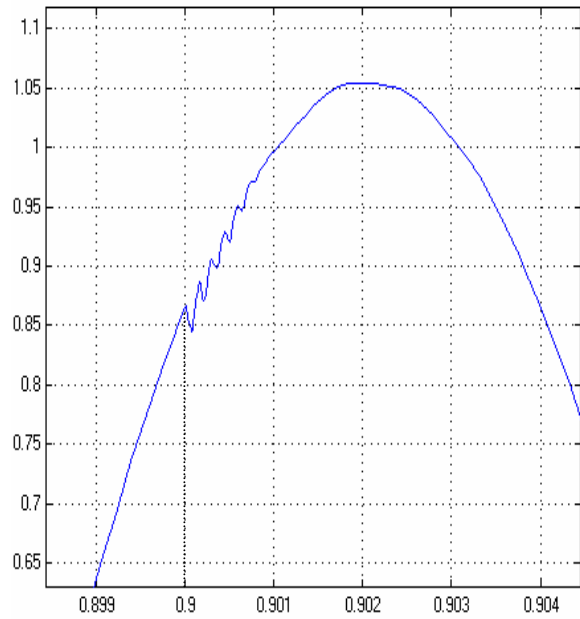
*comportement de la tension*

Le phénomène d'arcs électriques est constaté lors de la fermeture de l'interrupteur mais il est minime. En effet, le transformateur est alimenté sous faible charge et les arcs électriques ne se manifestent pas assez clairement qu'à un niveau de courant élevé et souvent lors de l'enclenchement des sources de tension et courant au départ des réseaux. Le sens des arcs des deux grandeurs électriques montrent qu'il se produit un appel de courant et tension au niveau de l'interrupteur.

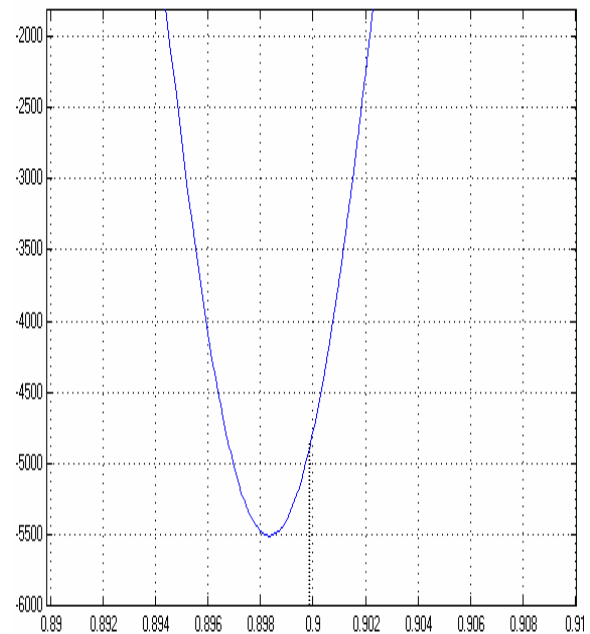
▪ point de prélèvement 2 ( au nœud USINE )



*comportement du courant*

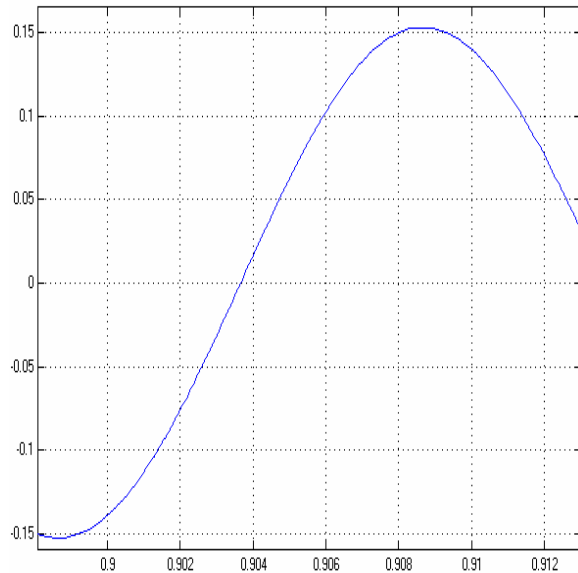
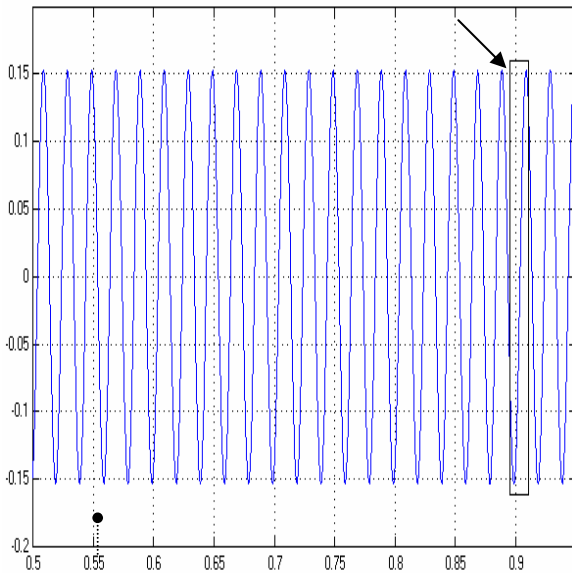


*comportement de la tension*

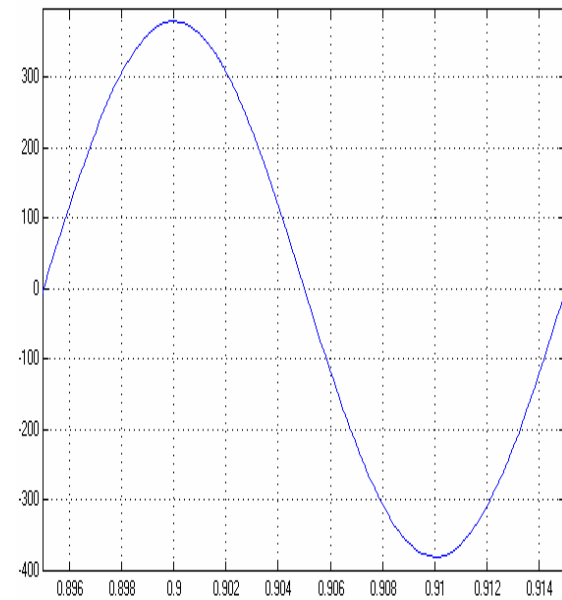
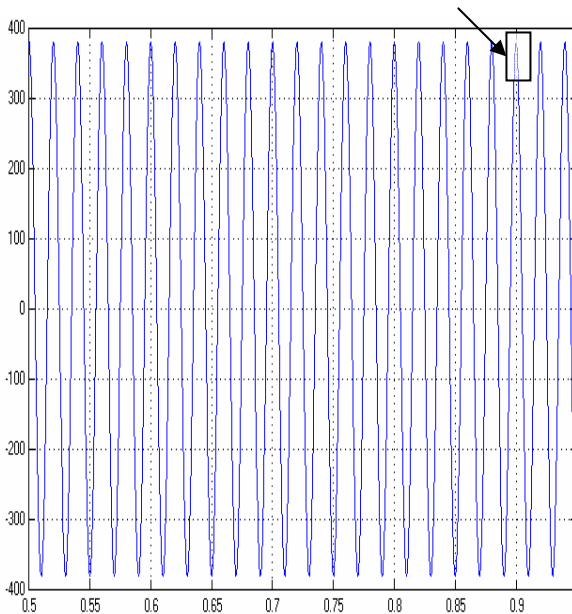


Au point de prélèvement 2, on constate une petite distorsion du courant mais aucun changement au niveau de la tension. Le phénomène d'arc électrique aux bornes de l'interrupteur se propage le long de la ligne sans transformateur mais s'atténue progressivement grâce aux caractéristiques des lignes qui peuvent jouer aussi le rôle de filtre.

▪ au point de prélèvement 6 ( au niveau d'un récepteur : charge 4 )



*comportement du courant*



*comportement de la tension*

Au niveau des charges, l'enclenchement n'est plus ressenti car le phénomène est bloqué par les transformateurs MT/BT. La caractéristique d'isolant galvanique du transformateur étouffe les distorsions dues à l'enclenchement. Seules les distorsions harmoniques du courant et de la tension provoquées par la non linéarité de ces derniers sont faiblement ressenties. Le phénomène d'isolation galvanique est expliqué dans la paragraphe précédent (V-5-2 Interprétations )