

REPUBLIQUE ALGERINNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET

DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE DEPARTEMENT  
D'ELECTROTECHNIQUE

# Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en Électrotechnique

Option : Réseaux Electriques

## THEME

ETUDE DE L'INFLUENCE D'UNE  
CHARGE POLLUANTE SUR LES  
CHARGES SAINES

Proposé et dirigé par :

M<sup>r</sup>: RABHALLAH.S

Réalisé par :

M<sup>elle</sup>: HADJERAS Ghania

M<sup>r</sup>: MAGMOUN Amar

Promotion : 2012 /2013

## *REMERCIEMENT*

*Nous tenons à remercier M RABALLAH qui nous a suivi tout au long de ce travail :*

*Notre profonde gratitude va également à l'intention de M AIT SLMANE, chef du département d'unité technique au niveau d'ENEM, pour son sérieux, ses orientations, ses conseils précieux et son bienveillance tout au long de ce travail :*

*Nous voudrions exprimés toutes notre reconnaissance tout particulièrement à M<sup>me</sup> BELKASMI chef de département technique de SONALGAB pour sa modestie, sa large patience, pour tout les conseils qu'elle a su nous prodiguer tout au longue de ce stage, elle nous a encouragé dans les périodes de doute et a su se rendre disponible à tout moment, pour la bonne relation qu'elle entretient avec nous « Sœur », son suivi a été exemplaire :*

*Nous tenons à remercier très sincèrement les membres du jury, c'est pour nous un honneur que vous aient accepté de juger notre travail :*

*A l'issue de ce travail, nous tenons à exprimer toute notre gratitude à l'ensemble des personnes qui ont contribué, chacun à leur manière à l'accomplissement de notre formation.*

*A l'être qui m'a toujours  
encourager et a cru à ma réussite,  
qui m'a exhorter pour aboutir à  
notre rêve commun « être  
diplômé »: ma très chère  
MAMAN*

*AMAR*

# *Dédicaces*

*Encore une autre fois,  
exclusivement pour yama.*

*Et A toutes les personnes qui  
comptent ou qui ont comptés un  
jour dans ma vie*

**GHANIA**

---

<b>Introduction générale.....</b>	<b>01</b>
<b>Chapitre I : Généralité du concept et aspect théorique du phénomène harmonique .....</b>	<b>03</b>
Introduction.....	03
I-1-Explication du phénomène harmonique.....	03
I-2-Définition des harmoniques.....	04
I-3- Dégradation de la qualité de l'énergie électrique.....	07
I-4- Les différents rangs harmoniques existant dans les réseaux électriques.....	08
I-5- Aspect théorique du phénomène harmonique .....	09
I-6- Les principales perturbations électriques.....	20
I-7- Charges génératrices d'harmoniques.....	23
I-8- Emission harmoniques par catégorie d'utilisateur.....	26
Conclusion.....	27
<b>Chapitre II : Evaluation de l'impédance harmonique dans les réseaux de distribution.....</b>	<b>28</b>
Introduction.....	28
II.1.Définition de l'impédance harmonique.....	28
II-2.Mesure de l'impédance harmonique.....	28
II-3-Calcul de l'impédance harmonique.....	30
II-4-Propagation des harmoniques.....	30
II-5- La modélisation des réseaux en régime harmonique.....	31
Conclusion.....	39

---

<b>Chapitre III : Effets et remèdes</b> .....	40
Introduction.....	40
III-1- Effets dus aux problèmes harmoniques.....	40
III-2- Solutions traditionnelles de dépollution et moyens disponibles pour limiter les perturbations.....	43
III-3- Solution modernes.....	51
Conclusion.....	53
<b>Chapitre IV : Application sur un réseau industriel</b> .....	55
Introduction.....	55
IV-1-Présentation du système test.....	55
IV-2-Partie simulation.....	56
IV-3-Les relevés des courants des taux de distorsion harmonique en courant $TDH_i$ pour tous les jeux de barres.....	60
IV-4-Les relevés des tensions et des taux de distorsion harmonique en tension $TDH_u$ pour tous les jeux de barres.....	73
IV-5-Discussion des résultats.....	86
Conclusion.....	87
<b>Conclusion générale</b> .....	88
<b>Bibliographie</b>	

*INTRODUCTION*  
*GENERALE*

Maitriser la qualité de la tension sur les réseaux de distribution électrique est devenu un atout essentiel pour les entreprises dans un contexte industriel concurrentiel accru. Les perturbations électriques entraînent des pertes d'informations sur les équipements informatiques, des déclenchements intempestifs de disjoncteurs, des échauffements de câbles, des pertes électriques importantes ou encore la paralysie de l'outil de production.

Les courants harmoniques sont créés par des charges non linéaires raccordées au réseau de distribution.

Ces mêmes courants harmoniques, lorsqu'ils traversent l'impédance interne des générateurs, donnent naissance à des tensions harmoniques qui viennent s'ajouter ou se déduire, aux tensions fondamentales générées par le réseau d'alimentation du distributeur d'énergie électrique. De ce fait, la tension qui en résulte n'est plus sinusoïdale ; de plus elle est commune à tous les autres récepteurs du réseau.

L'évolution du phénomène de pollution harmonique dans un réseau électrique peut se faire par la connaissance de divers paramètres (impédance en fonction de la fréquence en différents nœuds du réseau, tension harmonique, distorsion harmonique...).

Il est important de préciser que la majorité des cas de pollution harmonique, à l'échelle industrielle, sont liés au phénomène de résonance dû à la présence des condensateurs sur le réseau électrique. Les condensateurs sont souvent présents pour effectuer le relèvement du facteur de puissance d'une installation (compensation de l'énergie réactive).

Pour certaines valeurs de fréquences harmoniques, ces charges capacitatives peuvent entrer en résonance avec des charges inductives et engendrer, ainsi, des surtensions et des surintensités destructives pour le matériel.

Ce problème, aujourd'hui clairement identifié, affecte sérieusement la qualité d'énergie du réseau électrique ainsi que la durée de vie des équipements électriques. L'analyse de ces perturbations doit permettre de déterminer le niveau de pollution harmonique du réseau considéré et de proposer des remèdes pour pallier ce problème.

Le but de notre travail est de visualiser les tensions et courants sur tous les jeux de barres du réseau industriel de l'étude concernée, et ensuite de bien voir la différence entre un réseau sain (sans pollueur harmonique) et un réseau pollué.

Pour bien mener notre étude, nous avons structuré et organisé notre travail de la manière suivante :

Dans le premier chapitre on a essayé de cerner les problèmes liés à la pollution et comprendre leurs origines et leurs effets et incidences. Afin de pouvoir résoudre les contraintes liées à cette pollution, il est nécessaire de connaître non seulement la cause, mais aussi la façon dont ces harmoniques évoluent et leur influence sur les tensions et les courants ;

Nous abordons dans le deuxième chapitre la notion de l'impédance harmonique, ainsi que les différentes méthodes de calcul et de mesure de cette dernière.

Dans le troisième chapitre nous traiterons la dépollution harmonique du réseau à l'aide des différentes solutions classiques et modernes ;

Le quatrième chapitre sera réservé pour l'application qui contient deux sections, dont la première portera sur la modélisation du réseau étudié, tandis que la deuxième est consacrée à la simulation du réseau étudié pour évaluer la distorsion harmonique dans le réseau industriel moyenne tension de 13 jeux de barres ;

Nous achevons notre travail par une conclusion générale.

# *CHAPITRE I :*

**Définition du concept et aspect  
théorique du phénomène harmonique**

### **Introduction :**

Depuis quelques années, le transport de l'énergie électrique du réseau jusqu'à son arrivée chez le consommateur, subit des dégradations, qui peuvent être créées par divers facteurs perturbateurs, surtout l'utilisation d'appareils électriques contenant des semi-conducteurs de puissance.

Ces dégradations sont, en général de deux natures :

- ◆ Ils s'agit, d'une part, de la pollution harmonique, en effet les dispositifs d'électronique de puissance absorbent des courants non sinusoïdaux, ces derniers induisent des déformations dans la tension du réseau.
- ◆ D'autre part ils consomment pour la plupart, de la puissance réactive qui a pour conséquence immédiate la dégradation du facteur de puissance global du réseau.

L'un des phénomènes, les plus influents, sur la qualité de l'énergie électrique distribuée aux consommateurs est le phénomène des harmoniques.

Dans ce chapitre, nous évoquons les différentes perturbations des réseaux électriques et plus précisément les perturbations harmoniques tout en illustrant leurs effets, origine et cause ainsi que les différentes caractéristiques d'un signal déformé.

### **I-1-Explication du phénomène harmonique :**

L'énergie électrique distribuée se présente sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé, qui possède quatre caractéristiques principales : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie.

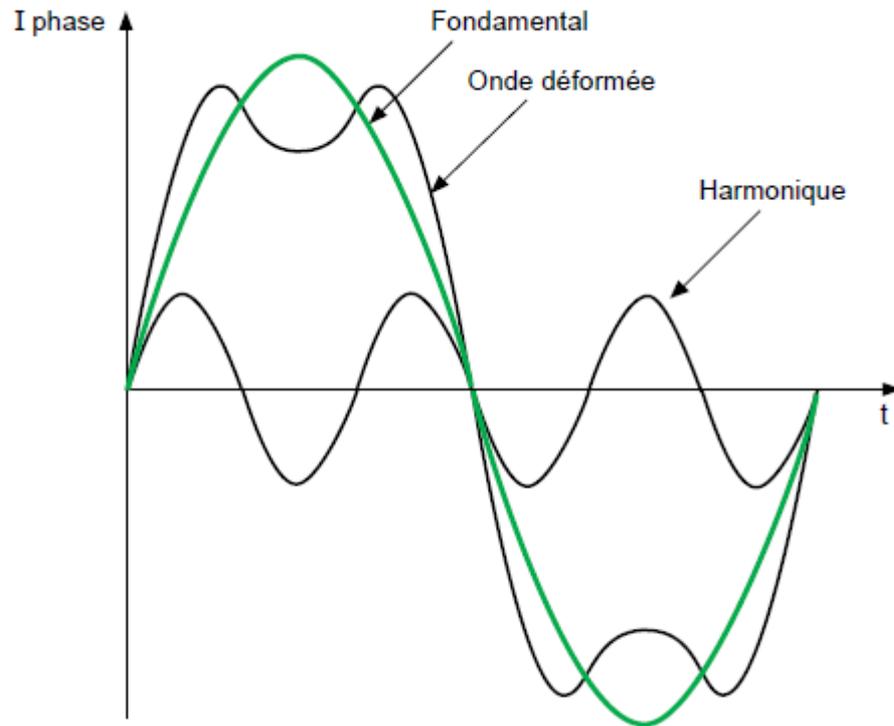
La qualité d'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de tension et de la qualité du courant. En effet la forme des ondes de courant et de tension relevée dans les réseaux industriels s'éloigne assez souvent de la sinusoïde pure théorique.

Cependant, tout signal  $S(t)$  périodique de pulsation  $\omega_0$  peut être décomposé en une somme de fonctions sinusoïdales, les amplitudes et les phases de ces différentes sinusoïdes sont données par la série de FOURIER :

$$S(t) = S_0 + S_1 \cdot \sin(\omega_0 t + B_1) + \sum_{h=2}^{\infty} S_h \sin(h\omega_0 t + B_h) \quad (\text{I-1})$$

**Signal périodique = composante continue + fondamental + harmonique.**

Une grandeur harmonique est l'une des composantes sinusoïdales d'une grandeur initiale, à une fréquence multiple de celle de la composante fondamentale, cette grandeur de rang  $h$  est la sinusoïde d'amplitude  $S_h$  de pulsation  $h\omega_0$  et de phase  $B_h$ . La figure (I-1) montre la superposition d'une composante harmonique de rang 3 à l'onde fondamentale



**Fig-I-1-Image d'une onde déformée**

## **I-2- Définition des harmoniques : [2]**

Ce sont les tensions et les courants sinusoïdaux ayant une fréquence multiple de celle du réseau électrique. L'onde déformée peut être décomposée en une somme de l'onde fondamentale et des harmoniques causées par la caractéristique non-linéaire des dispositifs au réseau ou celle des charges.

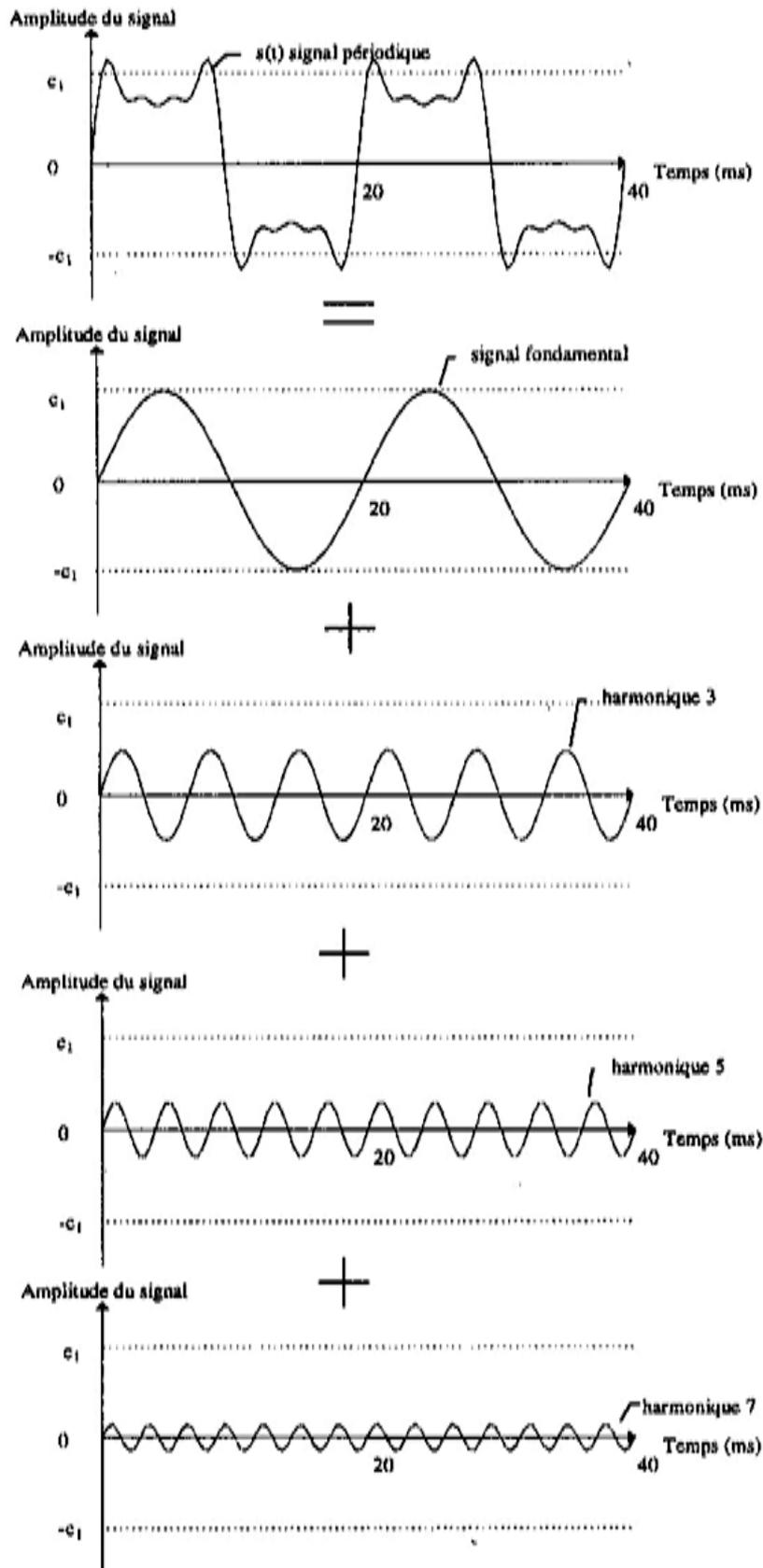


Fig-I-2-La superposition des composantes harmoniques de rang  $h$  à l'onde fondamentale

### **I-2-1- Le courant harmonique: [3]**

On dit qu'une charge est non linéaire quand, soumise à une tension sinusoïdale à 50 Hz, elle n'absorbe pas un courant alternatif sinusoïdale. Ces charges se comportent comme des sources de courant harmonique, c'est-à-dire que le courant harmonique est fixé par la charge et non par l'impédance ou la tension du réseau auquel elles sont raccordées.

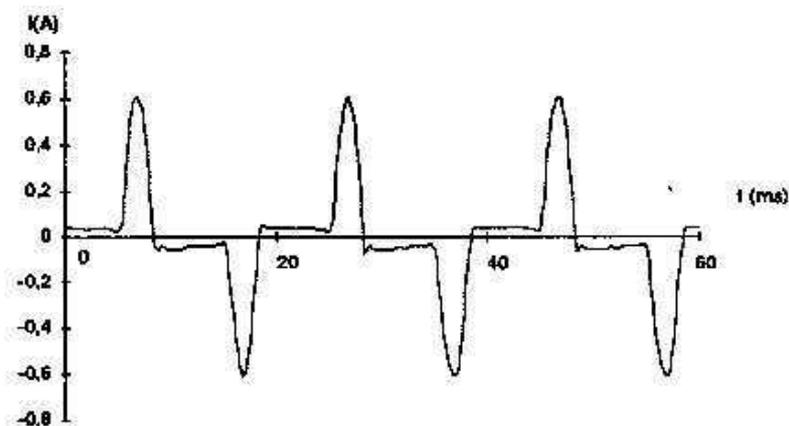
Certains récepteurs dits non linéaires ont pour effet de déformer l'onde sinusoïdale de courant et par conséquent celle de la tension.

Cette déformation s'analyse à l'aide de la décomposition en série de Fourier, qui fait apparaître des courants dits harmoniques qui se superposent à l'onde sinusoïdale initiale (le fondamental).

### **I-2-2-Impédance harmonique : [7]**

On peut définir en tout point d'un réseau une impédance harmonique  $Z_h$ , qui dépend du rang harmonique  $h$ . Elle représente la mise en parallèle de toutes les lignes qui convergent vers ce point.

La connaissance de cette impédance est importante, car même pour les faibles charges harmoniques, des surtensions harmoniques peuvent se produire dans le réseau, du fait que l'impédance harmonique peut être infinie (résonance).



**Fig-I-3-La forme du courant déformé par la charge**

### **I-2-3-Les tensions harmoniques :**

On peut également parler de sources de tension pour décrire l'état d'un réseau perturbé par une forte charge non- linéaire.

Les perturbations de tension comme les creux, les déséquilibres et les harmoniques de tension trouvent généralement leurs origines dans le réseau électrique lui-même mais parfois également dans les charges.

Ces effets peuvent aller des échauffements ou de l'arrêt des machines tournantes jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

Le produit des harmoniques de courants provenant des charges non-linéaires par l'impédance harmonique du réseau crée des harmoniques de tension selon la loi d'Ohm :

$$\vec{V}_h = \vec{Z}_h \vec{I}_h \quad (\text{I-2})$$

### **I-3- Dégradation de la qualité de l'énergie électrique [1]**

La variation en fonction du temps, des grandeurs électriques courant et tension des réseaux industriels alternatifs, s'éloigne significativement de la sinusoïde (d'onde de courant ou de tension).

Cette déformation est due à la dégradation de l'un ou de plusieurs paramètres caractéristiques des réseaux électriques (forme des tensions, équilibre des tensions, fréquence et amplitude...).

Les perturbations dégradant la qualité de la tension peuvent résulter de :

- Défauts dans le réseau électrique ou dans les installations des clients :
  - Court-circuit dans un poste, une ligne aérienne, un câble souterrain, etc.
  - Causes atmosphériques (foudre, givre, tempête...).
  - Matériels (vieillessement d'isolants...).
  - Humaines (fausses manœuvres, ...).
- Installations perturbatrices :
  - Fours à arc.
  - Soudeuses.
  - Variateurs de vitesse.
  - Toutes applications de l'électronique de puissance, téléviseurs, éclairage fluorescent, démarrage ou commutation d'appareils, etc....

## **I-4-Les différents rangs harmoniques existant dans les réseaux électriques :**

### **I-4-1- Les harmoniques de rang pair :**

Très souvent négligeables en milieu industriel, ils s'annulent en raison de la symétrie du signal. L'émission de courants harmoniques pairs des matériels polluants est faible, voire inexistante.

### **I-4-2- Les harmoniques de rang impair :**

Ils sont fréquemment rencontrés sur le réseau électrique. Dans le cas où il y a des variations périodiques ou aléatoires de la puissance absorbée (Ces variations sont provoquées par des machines telles que : fours à arc, cycloconvertisseurs et les variateurs de vitesse) par certains récepteurs, on notera qu'il existe d'autres composantes harmoniques qui sont :

### **I-4-3- Les inter-harmoniques : [2]**

Ce sont des composantes sinusoïdales qui ne sont pas à des fréquences multiples de celle du fondamental : 130 Hz, 170 Hz, 220 Hz ...

Les inters harmoniques sont souvent produits par des convertisseurs de fréquence statiques, des cycloconvertisseurs, des moteurs asynchrones et des dispositifs à arc électrique. Ils peuvent provoquer un papillotement des images sur les écrans. Les signaux d'information transmis par les lignes électriques sont aussi considérés comme des inter harmoniques.

### **I-4-4-Infra- harmoniques : [2]**

Ce sont des composantes sinusoïdales qui sont à des fréquences inférieures à celle du fondamental : 10 Hz, 20 Hz ...

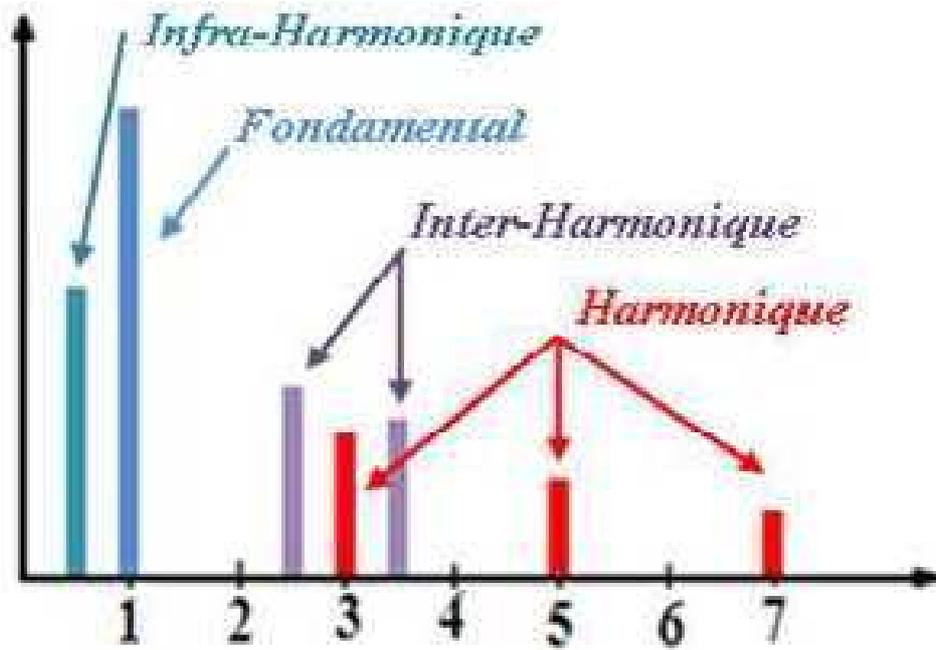


Figure (I.4) : Représentation spectrale d'harmoniques, d'inter et infra harmoniques.

La présence d'inter-harmoniques ou d'infra-harmoniques est due à des variations périodiques ou aléatoires de la puissance absorbée par certains récepteurs. Dans ce cas, le signal n'est pas périodique, ce qui explique l'apparition de composantes supplémentaires qui peuvent être développées en série de FOURIER.

## I-5- Aspect théorique du phénomène harmonique : [9]

### I-5-1- Décomposition d'un courant distordu périodique en série de FOURIER :

Avec les charges non-linéaires, les courants ne sont pas sinusoïdaux et peuvent être considérés comme la somme d'un courant sinusoïdal de 50/60Hz appelé fondamental et d'une série de courants sinusoïdaux de fréquences multiples de la fréquence fondamentale appelés harmoniques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique. Le courant alternatif périodique déformé absorbé par une charge non-linéaire peut être décomposé en série de FOURIER:

$$i(\omega t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} (a_h \sin h\omega t + b_h \cos h\omega t) \quad (\text{I-3})$$

Avec les coefficients de fourrier :  $a_0$  ;  $a_h$  ;  $b_h$

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) d\omega t \quad (\text{I-4})$$

$$a_h = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) \sin(h\omega t) d\omega t \quad (\text{I-5})$$

$$b_h = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) \cos(h\omega t) d\omega t \quad (\text{I-6})$$

L'expression du courant d'une charge non linéaire :

$$i(\omega t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_h \sin(h\omega t + \varphi_h) \quad (\text{I-7})$$

Avec  $h$  : un nombre entier

$\varphi_h$ : Est le déphasage de la composante harmonique à l'instant initial ( $t = 0$ ).

D'une autre manière :

$$i(\omega t) = I_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (\text{I-8})$$

$$I_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \quad (\text{I-9})$$

$$\varphi_h = \tan^{-1}\left(\frac{b_h}{a_h}\right) \quad (\text{I-10})$$

$a_0$  : Composante continue ou valeur moyenne du signal.

$h$  : Rang harmonique qui représente le rapport de la fréquence de l'harmonique à celle du fondamental.

$$h = \frac{f_h}{f_1} \quad (\text{I-11})$$

$a_h, b_h$  : Amplitudes efficaces des composantes harmoniques du rang  $h$ .

$h\omega_0$  : Pulsation du rang harmonique.

$I_h$ : Amplitude de l'harmonique de rang  $h$ .

### **I-5-2- Notion de phase [3]**

La phase d'un signal harmonique est une notion importante. Elle permet d'une part, de calculer la somme vectorielle de plusieurs courants harmoniques circulant dans un même conducteur, et d'autre part, d'identifier un sens de transit de l'énergie harmonique.

**A) Phase entre  $I_h$  et  $I_i$  (ou entre  $V_h$  et  $V_v$ )**

Il est facile de mesurer le déphasage entre le courant harmonique et le courant fondamental (noté  $\alpha_h$ ). L'analyse de Fourier du signal en courant suffit. En revanche, elle est insuffisante pour calculer la somme de deux courants venant de sources différentes.

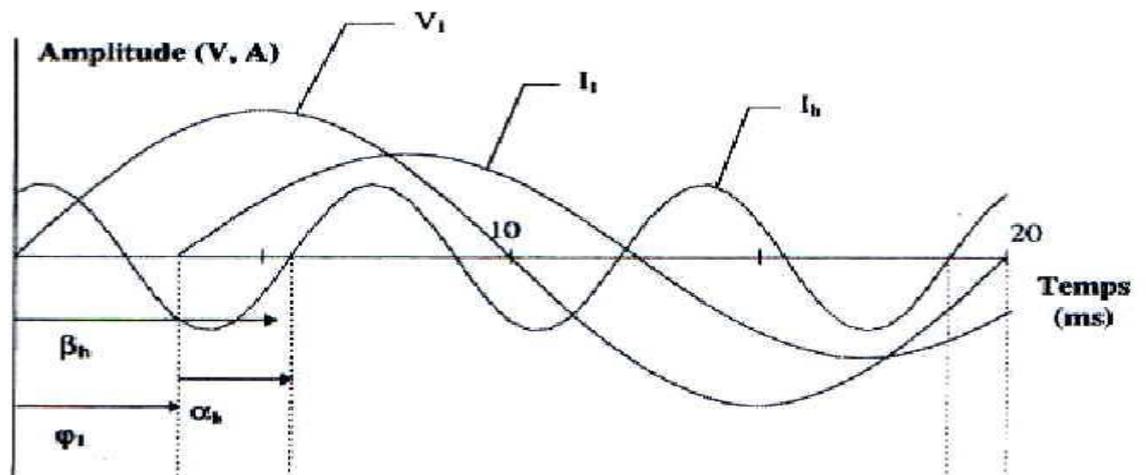
Lorsqu'on veut faire la somme de courants sur une portion donnée du réseau, il est alors nécessaire d'effectuer une correction qui tient compte du déphasage du courant fondamental par rapport à la tension fondamentale ( $\Phi_h$ ).

**B) Phase entre le courant  $I_h$  et la tension fondamentale  $V_h$ .**

Il est préférable de connaître l'angle entre les courants harmoniques  $I_h$  et une référence de tension  $V_1$  qui est beaucoup plus stable. La figure (I.5) montre le déphasage  $B_h$  entre le courant  $I_h$  et la tension fondamentale  $V_1$ .

**C) Phase entre la tension  $V_h$  et le courant harmonique  $I_h$ .**

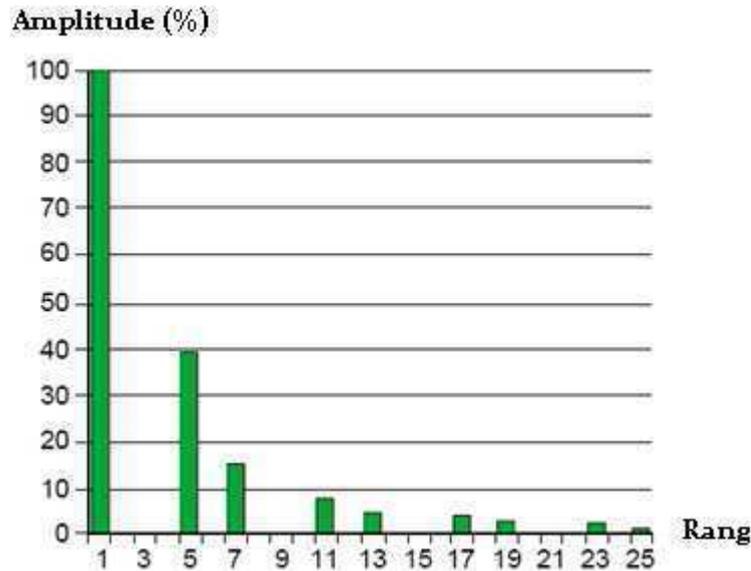
Afin de connaître les puissances actives et réactives harmoniques, il est utile de connaître le déphasage  $\varphi_h$  entre la tension et le courant harmonique de même rang.



**Fig (I.5) : Déphasage des courants harmoniques.**

**I-5-3-Spectre de fréquences [1]**

C'est la représentation graphique des amplitudes des harmoniques en fonction de leurs rangs. En général, la valeur de chaque harmonique est exprimée par son taux individuel (en pourcentage du fondamental).



**Fig (I.6) : Spectre d'amplitudes harmoniques.**

**I-5-4-Characterisation des harmoniques :**

Différentes grandeurs sont définies pour quantifier les perturbations harmoniques. Parmi celles-ci les plus utilisées sont :

**I-5-4-1-Taux de distorsion harmonique (TDH) [2]**

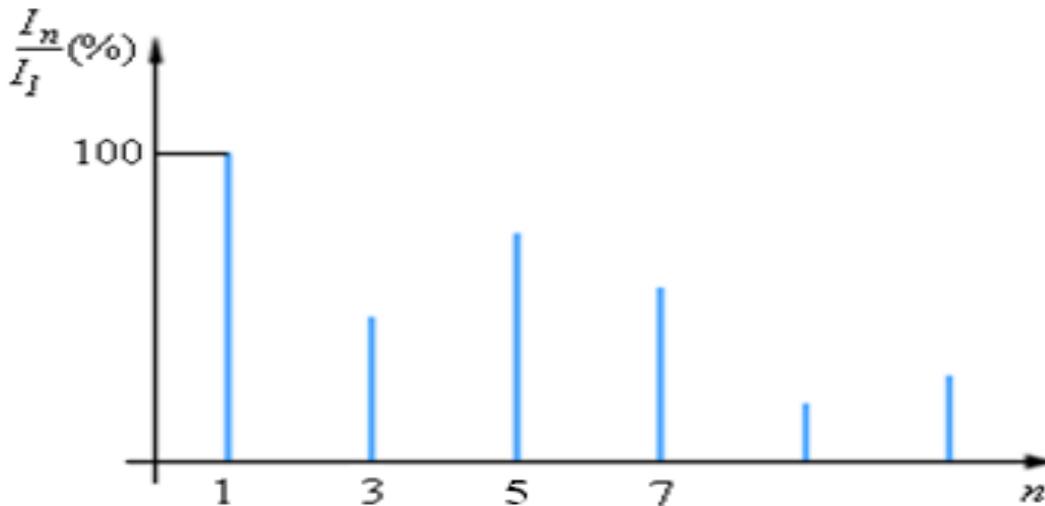
Plusieurs expressions peuvent être utilisées pour quantifier la déformation du signal. Il permet d'évaluer l'écart entre la forme de l'onde réelle et la forme de l'onde sinusoïdale pour un courant ou une tension.

**a)- Taux individuel :**

C'est le rapport entre la valeur efficace de l'amplitude de l'harmonique de rang h à celle du fondamental.

$$\text{TDH}_i(\%) = 100 \cdot \left( \frac{C_h}{C_1} \right) \quad (\text{I-12})$$

En général, l'amplitude de chaque harmonique est exprimée par son taux individuel (en pourcentage du fondamental) comme le montre la figure suivante :



**Fig (I-7) : Spectre de fréquences d'un courant non-sinusoidal.**

**b)- Taux de distorsion global TDH<sub>G</sub> % :**

C'est le rapport entre la valeur efficace des harmoniques et la valeur efficace du fondamental.

$$\text{TDH}_G(\%) = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n C_h^2}}{C_1} \quad (\text{I-13})$$

Plus le signal est déformé, plus le taux de distorsion harmonique est important, ce qui signifie que le niveau de richesse du signal en harmoniques est conséquent.

- **Taux de distorsion harmonique en courant TDH<sub>i</sub>**

$$\text{TDH}_i(\%) = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_1} \quad (\text{I-14})$$

- **Taux de distorsion harmonique en tension TDH<sub>v</sub>**

$$\text{TDH}_v(\%) = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n V_h^2}}{V_1} \quad (\text{I-15})$$

**Remarque :**

Il s'ensuit que les tensions et les courants sinusoïdaux ont un taux de distorsion nul.

**c)- Taux de distorsion pondéré [3]**

Afin de tenir compte de la spécification de certains types de matériels, tels que les condensateurs, les inductances ou les moteurs, des taux de distorsion pondérés en tension  $D_{\omega}$  sont définis de la manière suivante :

- **Pour les condensateurs :**

$$D_{\omega c} = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} h^2 U_n^2} \quad (\text{I-16})$$

Si  $I_{c1}$  est le courant circulant dans le condensateur,  $I_1$  correspond au fondamental (respectivement  $I_1$  et  $I_{L1}$  pour l'inductance), on a alors :

$$I_c = I_{c1} \sqrt{1 + D_{\omega c}^2} \quad (\text{I-17})$$

- **Pour les inductances**

$$D_{\omega L} = I_{L1} \sqrt{\sum_{h=2}^{50} h^2 \frac{h_h^2}{h^2}} \quad (\text{I-18})$$

**De même :**

$$I_L = I_{L1} \sqrt{1 + D_{\omega L}^2} \quad (\text{I-19})$$

- **Pour les moteurs**

$$D_{\omega M} = \sqrt{\sum_{h=2}^{13} \frac{U_h^2}{h}} \quad (\text{I-20})$$

**I-5-4-2- Valeur efficace :**

La valeur efficace d'un signal  $S(t)$  périodique de période  $T$  est donnée par la formule suivante :

$$f_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (f(t))^2 dt} \quad (\text{I-21})$$

Ou bien :  $f_{eff} = (\sum_{h=1}^{\infty} (f_h)^2)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{I-22})$

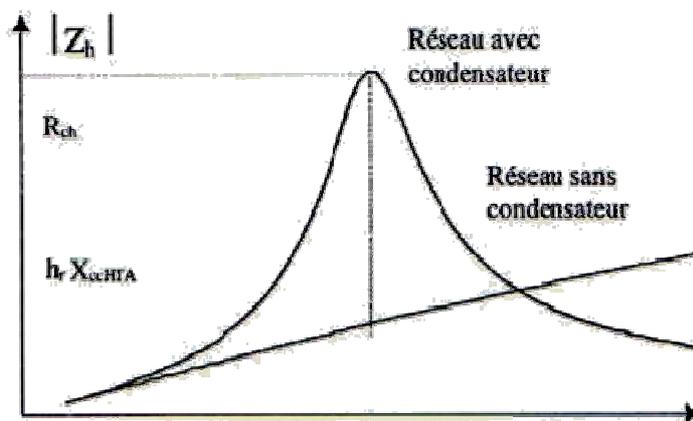
**I-5-4-3- Facteur d'amplification:**

A la fréquence de résonance, le rapport de module de l'impédance harmonique du réseau en présence et en l'absence de condensateur, définit le facteur d'amplification  $F$ . A la résonance le module de l'impédance est :

$$|Z_h| = U_n^2 / P_{ch} = R_{ch} \quad (\text{I-23})$$

Le facteur d'amplification de la résonance est défini par :

$$F = \frac{R_{ch}}{h_r X_{ccHTA}} = \sqrt{\frac{Q_c S_{ccHTA}}{P_{ch}^2}} \quad (\text{I-24})$$



**Fig (I.8) -Module de l'impédance harmonique du réseau et facteur d'amplification**

**I-5-4-4- Facteur de crête :**

Le facteur de crête est le rapport entre la valeur de crête du courant ou de la tension et la valeur efficace.

Un facteur de crête très élevé signifie des surintensités ponctuelles importantes détectées par les dispositifs de protections. Elles peuvent être à l'origine de déclenchements intempestifs.

$$F_c = \frac{X_{\max}}{X_{\text{eff}}} \quad (\text{I-25})$$

Pour un signal sinusoïdal, ce facteur est donc égal à  $\sqrt{2}$ .

Pour un signal non sinusoïdal, il peut être soit inférieur, soit supérieur à  $\sqrt{2}$ .

▪ **Rang harmonique :**

Le rang harmonique est le rapport de la fréquence  $f_h$  à la fréquence du fondamental :

$$h = \frac{f_h}{f_1} \quad (\text{I-26})$$

**I-5-4-5- Facteur de puissance et facteur de déphasage :**

**a) Le facteur de puissance :**

Est le rapport de la puissance active P à la puissance apparente S

$$F_p = P/S \quad (\text{I-27})$$

**b) Le facteur de déphasage : [2]**

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad (\text{I-28})$$

Représente le cosinus de l'angle entre les fondamentaux de la tension et du courant.

Avec : P1 : puissance active de la composante fondamentale.

S1 : puissance apparente de la composante fondamentale.

**C) Le facteur de déformation :**

Représente le lien entre FP et  $\cos \varphi_1$

$$\mathbf{FD} = \frac{\mathbf{FP}}{\cos \varphi_1} \quad (\mathbf{I-29})$$

Donc:  $\mathbf{FP} = \cos \varphi_1 \mathbf{FD}$  (I-30)

Remarque : Sur une charge linéaire :

$$\mathbf{FP} = \cos \varphi_1 \quad (\mathbf{I-31})$$

**I-5-5-Le foisonnement :**

L'effet de foisonnement est une diminution du niveau de perturbation harmonique à cause de la multiplication des sources harmoniques.

En effet, s'ils ne s'additionnent pas algébriquement, les harmoniques foisonnent. Cela est possible lorsque les harmoniques de même rang produits par différentes charges sont déphasés les uns par rapport aux autres.

L'expérience permet d'adopter une loi de sommation assez générale. La tension harmonique résultante de rang h est donnée par :

$$U_h = \alpha \sqrt{\sum_t U_{hi}^2} \quad (\mathbf{I-32})$$

$U_h$  = Amplitude de la tension harmonique résultante (de rang h), pour les sources considérées (valeur probabiliste).

$U_{hi}$  = Amplitude des divers niveaux d'émission individuels (de rang h) à sommer

$\alpha$  = exposant dépendant principalement de deux facteurs :

- ◆ La probabilité choisie pour que la valeur effective totale n'excède pas la valeur calculée ;
- ◆ Le degré de variation aléatoire, en amplitude et en phase, des tensions harmoniques individuelles.

On distingue deux types de foisonnement :

- **Foisonnement temporel :**

Toute analyse harmonique doit alors tenir compte de la simultanéité de fonctionnement, c'est ce qui définit le foisonnement dans le temps.

- **Foisonnement angulaire :**

Le courant total qui contribue à alimenter les divers appareils connectés sur un même réseau est fonction de l'amplitude, à chaque instant, des courants qui en dérivent. Par conséquent, plus les courants sont nombreux et déphasés les uns par rapport aux autres, plus la résultante pourra devenir négligeable.

### **I-5-6-Expressions des puissances :**

- **Puissance active :**

$$P = \sum_{h=1, n=1}^{\infty} V_h I_n \cos(\varphi_{h,n}) \quad (\text{I-33})$$

Avec

$$\varphi_{h,n} = \alpha_h - \beta_n \quad (\text{I-34})$$

- **La puissance réactive :**

$$Q = \sum_{h=1, n \neq h}^{\infty} V_h I_n \sin(\varphi_{h,n}) \quad (\text{I-35})$$

- **Puissance apparente :**

$$\text{Sur une charge non linéaire: } FP \neq \cos \varphi_1 \quad (\text{I-36})$$

$$S = V \cdot I = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2 \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{I-37})$$

- **Puissance déformante :**

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2 \sum_{n=1, n \neq h}^{\infty} I_n^2} \quad (\text{I-38})$$

**I-5-7-Le phénomène de résonance :**

Les phénomènes de résonance proviennent de la présence dans les réseaux d'éléments inductifs et capacitifs, générant ainsi des amplitudes élevées sur certains rangs harmoniques.

En effet l'impédance d'une inductance augmente avec l'augmentation de la fréquence ( $Z_L=L\omega$ ) et celle qui diminue ( $Z_C=1/c\omega$ ), ainsi dans un circuit intégrant des inductances et des capacités, il y aura une fréquence  $f_r$  donnant l'égalité entre les deux **impédances, cette fréquence est la fréquence de résonance.**

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \Leftrightarrow Lc\omega^2 = 1 \tag{I-39}$$

Selon que les éléments capacitifs et inductifs sont associés en parallèle ou en série, on distingue deux types de résonance.

**I-5-7-1--Résonance en parallèle :**

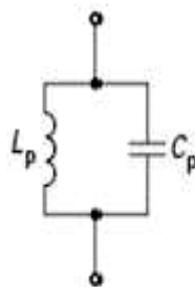
La mise en parallèle d'une capacité et d'une inductance constitue une impédance donnée par :

$$Z_{h,p} = \frac{jL_p\omega}{1-L_pC_p\omega^2} \tag{I.40}$$

A la résonance  $Lc\omega^2=1$ , ce qui annule le dénominateur, l'impédance  $Z$  tend alors vers l'infini. Ceci conduit à des surtensions importantes  $Z_h=V_hI_h$  donc la déformation de l'onde de tension. Et les condensateurs peuvent être soumis à de fortes tensions et se détériorer.

La fréquence de résonance est donnée par :

$$f_{rp} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_pC_p}} \tag{I.41}$$



**Fig-I-9-Résonance en parallèle.**

**I-5-7-2- Résonance en série:**

L'association en série d'une capacité et d'une inductance constitue une impédance.

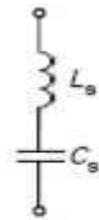
L'expression simplifiée de l'impédance globale est donnée par :

$$Z_{h,s} = \frac{1 - L_s C_s \omega^2}{C_s \omega} \quad (\text{I.42})$$

A la résonance le numérateur est égal à zéro, l'impédance Z est nulle. Ceci conduit à des surintensités importantes  $I_h = V_h / Z_h$ .

La fréquence de résonance est donnée par :

$$f_{rs} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}} \quad (\text{I.43})$$



**Fig (I-10) : Résonance série.**

**I-6-Les principales perturbations électriques : [3]**

**I-6-1-Chutes de tension ou de courant :**

C'est une diminution de la valeur effective de la tension ou du courant à la fréquence du réseau pour une durée allant d'une demie période jusqu'à 1 min. Une chute de tension de 10 % signifie que la tension de ligne ou le courant a diminué de 10 % de sa valeur nominale. Les valeurs typiques varient entre 0,1 et 0,9 pu.

**I-6-2- Interruptions :**

C'est une chute complète de la tension (en dessous de 0,1 pu) dans une ou plusieurs phases pendant un certain temps. Par des interruptions momentanées sont définies les interruptions d'une durée variant entre une demi-période et 3 secondes. Les interruptions temporaires sont d'une durée allant de 3 jusqu'à 60 secondes. Les interruptions prolongées sont d'une durée dépassant les 60 secondes.

**I-6-3-Augmentation de la valeur de tension ou celle du courant :**

C'est une augmentation temporaire de la valeur efficace de la tension ou du courant de plus de 10 % par rapport à sa valeur nominale et à la fréquence du réseau pendant une durée variant entre une demie période et 1 min. Les valeurs effectives typiques vont de 1,1 jusqu'à 1,8 pu.

**I-6-4-Surtension : [2]**

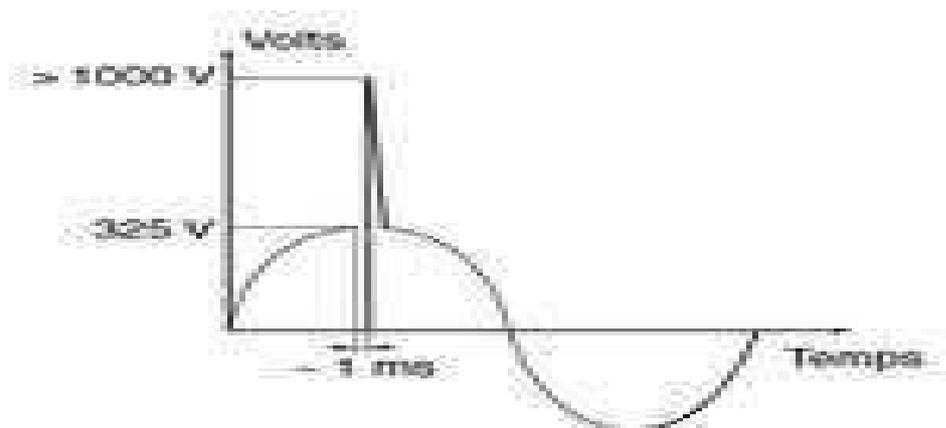
Toute tension qui dépasse la valeur de crête (amplitude maximale) de la tension de service est une surtension.

Elle peut apparaître sous forme de :

- **Surtension temporaire ;**
- **Surtension transitoire.**

Une surtension temporaire apparaît généralement lors d'un défaut sur le réseau de distribution publique ou dans une installation client et disparaît lors de l'élimination de ce défaut.

Les surtensions de durée inférieure à 10 ms sont appelées surtensions transitoires. Elles sont provoquées par des phénomènes d'origine atmosphérique (foudre) ou, plus fréquemment, par le fonctionnement d'équipements électriques.



**Fig (I.11) : Surtension transitoire.**

**I-6-5- Baisse de tension :**

Elle se réfère aux tensions de valeur inférieure à la valeur nominale pour une période de temps supérieure à 1 min. Les valeurs typiques varient entre 0,8 et 0,9 pu.

**I-6-6- Encoches :**

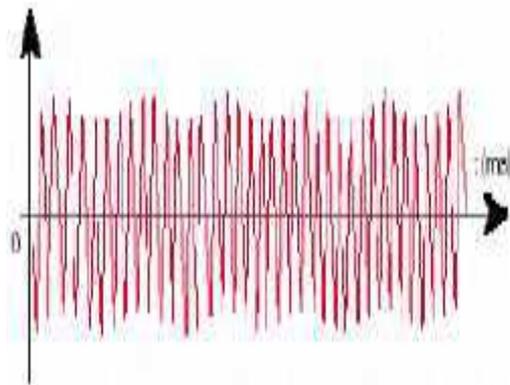
Ce sont des perturbations de très courte durée provoquées souvent par le phénomène d’empiètement dans les dispositifs à base d’électronique de puissance lors de la commutation du courant d’une phase sur une autre. Durant la commutation, un court-circuit entre les deux phases concernées aura lieu. Vu la durée de la commutation, les harmoniques liées au phénomène d’empiètement sont de très hautes fréquences, ce qui rend difficile leur mesure avec des instruments destinés à l’analyse spectrale.

**I-6-7- Fluctuation de tension : [2]**

Les fluctuations de la tension connues en anglais par le terme «flicker» sont des variations systématiques de l’enveloppe ou des séries aléatoires de changements de l’amplitude de la tension ne dépassant pas l’intervalle 0,9–1,1 pu. De telles variations de la tension se réfèrent souvent au flicker.

Le terme flicker est dérivé de l’impact visible sur les lampes (papillotement de la lumière) dû à la fluctuation de la tension.

Parmi les causes les plus fréquentes de la fluctuation de la tension dans les réseaux de transmission et distribution sont les fours à arc.



**Fig (I.12) : Fluctuation de tension.**

## **I-7- Charges génératrices d'harmoniques : [5]**

### **I-7-1- Charges génératrices d'harmoniques de tensions :**

#### **A)- Les alternateurs :**

Le contenu harmonique de la tension générée par les alternateurs est lié à la qualité du bobinage et des pièces polaires qui assurent la forme sinusoïdale de l'onde.

#### **B)-Les transformateurs de puissance :**

Ils peuvent être générateurs de tensions harmoniques lorsqu'ils fonctionnent en régime saturé par l'injection de courant continu dans sa connexion de neutre.

#### **C)-Les alimentations statiques interruptibles (ASI) :**

Elles servent à fournir le matériel, en général des charges non-linéaires comme du matériel informatique, contre les creux de tension et les coupures. Le taux de tension harmonique est dû essentiellement aux courants harmoniques créés par les charges non-linéaires alimentées en aval.

### **I-7-2- Charges génératrices d'harmoniques de courant :**

#### **I-7-2-1- Les montages électroniques :**

##### **A) -Le redresseur monophasé à filtre capacitif :**

Il est utilisé comme premier étage des alimentations de télévisions, d'ordinateurs, d'imprimantes, des variateurs de vitesse des machines asynchrones, des lampes à ballast électronique, des ballasts électroniques pour rampes d'éclairage, etc.

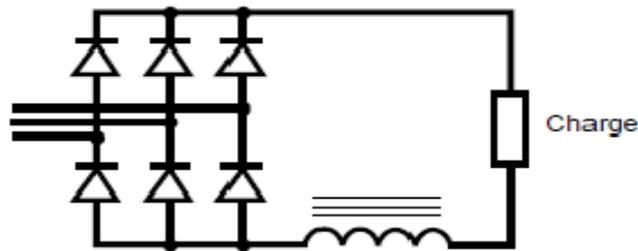
##### **B) - Le gradateur monophasé :**

Il est utilisé pour la commande de l'intensité des lampes à incandescence halogène, la commande de certains fours de cuisson, la régulation de puissance (chaudières), les démarreurs de moteurs électriques, etc.

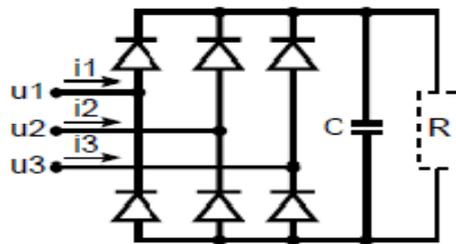
##### **C) - Le pont de Graetz : [6]**

Les ponts redresseurs et, en général, les convertisseurs (diodes et thyristors) sont générateurs de courants harmoniques. Avec le pont de Graetz le courant continu

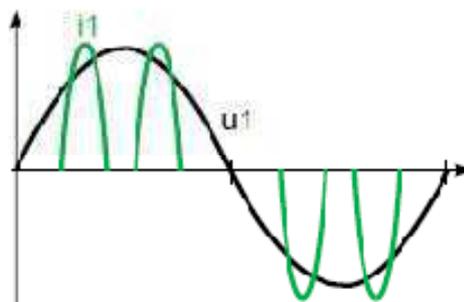
parfait débité impose un courant alternatif en crénom lorsque la charge est fortement inductive ou lorsque le pont de diodes est suivi d'un condensateur



**Fig (1.13) : Pont suivi d'une charge**



**Fig (I.14) : Pont suivi d'un condensateur**



**Fig (I.15) : L'allure du courant**

**D)- Le redresseur triphasé à thyristors :**

Il permet de réguler la tension appliquée aux bornes d'une charge en faisant varier l'angle de commande des gâchettes; il est utilisé pour la commande en vitesse variable des moteurs à courant continu, des machines synchrones (nous rencontrons des montages redresseurs suivis d'un onduleur pour commander la machine synchrone en vitesse variable),

les fours à induction lorsqu' ils sont régulés, etc. Les redresseurs triphasés à thyristors sont la principale source de pollution harmonique dans le secteur industriel.

### **I-7-2-2- Les charges non linéaires passives :**

#### **A)-les moteurs asynchrones :**

En théorie, ces moteurs génèrent des ondes de courant purement sinusoïdales; en pratique, les taux d'harmoniques mesurés sont variables.

#### **B)- Les lampes fluorescentes et lampes à vapeur haute pression :**

Elles représentent les deux tiers de la puissance consommée par l'éclairage dans le secteur tertiaire (bureaux, grands commerces, etc.).

#### **C)- Les appareils à arc électrique : [10]**

Ils regroupent les fours à arc à courant alternatif et les machines de soudure à l'arc à courant alternatif ou continu.

##### **➤ Cas du four à arc à courant alternatif : [6]**

L'arc est non linéaire, instable, induit des spectres possédant des raies impaires et paires et un spectre continu (bruit de fond de toutes les fréquences).

##### **➤ Cas du four à arc à courant continu :**

L'arc est alors alimenté par l'intermédiaire d'un redresseur, il est plus stable qu'en courant alternatif, et le courant absorbé se décompose d'un spectre semblable à celui d'un redresseur, et d'un spectre continu de niveau inférieur à celui d'un four à courant alternatif.

### **I-7-2-3- Les inductances saturées :**

De telles inductances ont leur impédance fonction de l'amplitude du courant qui les traverse, et de ce fait elles provoquent des déformations notables de ce courant. C'est le cas, dans une certaine mesure, des transformateurs à vide soumis à une tension permanente.

## **I-8- Emission d'harmoniques par catégorie d'utilisateurs :**

### **I-8-1-Utilisateurs domestiques : [10]**

Le secteur résidentiel contribue pour une part importante à la pollution harmonique observée sur les réseaux à cause de l'introduction de l'électronique dans les appareils électrodomestiques, l'un des principaux appareils perturbateurs est le poste de télévision dont l'alimentation est constituée d'un redresseur monophasé à filtre capacitif.

### **I-8-2- Secteur tertiaire : [2]**

Les activités les plus perturbatrices sont les bureaux, l'administration et les commerces, les institutions d'enseignement viennent occuper la troisième place. Les appareils injecteurs d'harmoniques sont essentiellement les redresseurs à filtre capacitif (informatique, bureautique), le froid alimentaire, la climatisation, les ascenseurs et les lampes fluorescentes.

### **I-8-3- Secteur industriel : [2]**

De fortes injections harmoniques sont constatées au niveau des installations relevant des secteurs de l'énergie ainsi que des transformations et de la mécanique. Parmi les appareils injecteurs d'harmoniques, on distingue les variateurs pour moteurs à courant alternatif qui remplacent progressivement les variateurs pour moteurs à courant continu et qui sont trois fois plus polluants. L'injection harmonique dépend également des périodes de l'année et des tranches horaires, un facteur de simultanéité peut être appliqué pour un nombre N d'utilisateurs homogènes, selon une tranche horaire spécifiée.

## **Conclusion :**

Comme nous l'avons constaté dans ce premier chapitre, les courants harmoniques ont des effets néfastes sur les équipements électriques, ces effets peuvent aller de l'échauffement et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

La pollution harmonique est l'un des problèmes majeurs qui dégrade la qualité d'énergie électrique dans les systèmes de distribution. Afin de lutter contre cette pollution résultante, tous les moyens présentés dans ce chapitre peuvent être employés seuls ou simultanément.

# *CHAPITRE II :*

**Evaluation de l'impédance harmonique  
dans les réseaux de distribution**

### **Introduction**

La connaissance de l'impédance harmonique est une donnée nécessaire pour évaluer l'impact d'une charge perturbatrice sur un réseau auquel elle est raccordée afin de déterminer si l'injection d'un certain niveau de courants harmoniques peut être autorisé ou tout simplement exiger un filtrage à un point à cause du dépassement des niveaux de compatibilité.

L'impédance harmonique est une quantité importante décrivant l'état du réseau électrique. Pour l'estimer, il est possible d'utiliser soit une méthode expérimentale, soit une méthode de calcul numérique de simulation, ou encore d'associer ces deux méthodes

#### **II.1. Définition de l'impédance harmonique : [7]**

On peut définir, en tout point d'un réseau électrique, une impédance harmonique  $Z_h$ , qui dépend du rang harmonique  $h$  considéré. Les courants harmoniques émis par une charge perturbatrice se propagent entre les différentes lignes. Les impédances harmoniques sont très variables dans le temps et d'un point à un autre du réseau électrique. Elles dépendent :

- De la puissance de court-circuit,
- De la longueur des lignes,
- De la présence de batteries de compensation d'énergie réactive,
- Du niveau de charge du réseau

#### **II-2-Mesure de l'impédance harmonique : [9]**

La mesure de l'impédance harmonique est assez difficile à mettre en œuvre, elle nécessite la présence à l'endroit où l'on désire la mesurer d'une source harmonique assez puissante. On distingue trois groupes de méthodes en fonction de l'origine des courants harmoniques et inter-harmoniques injectés sur les réseaux BT et HTA.

1. Courants harmoniques provenant d'installations existantes ;
2. Analyse des régimes transitoires lors de manœuvres sur le matériel du réseau ;
3. Injection directe de courants harmoniques ou inter-harmonique.

##### **II-2-1-Utilisation de courant harmonique provenant d'installation existante :**

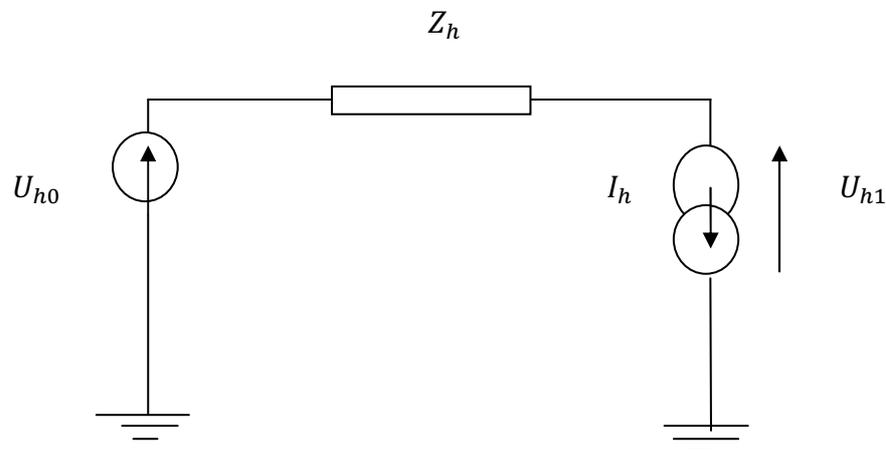
Cette méthode consiste à mesurer l'impédance harmonique à partir d'une installation existante (tension et courant existant), la loi d'Ohm peut être donc appliquée, mais son inconvénient est que les sources utilisées injectent des courants harmoniques à la même fréquence que les tensions harmoniques préexistantes. Pour différencier entre ces deux

courants on peut utiliser des sources de courant inter-harmonique (four à arc) importantes que celle préexistants sur le réseau.

Lorsqu'on utilise des sources de courant harmonique (redresseur) il est possible d'éliminer l'erreur liée aux harmoniques préexistants sur le réseau. Fig.-II-1 On note  $U_{h0}$  cette tension préexistante.

Lorsque la charge perturbatrice est connectée, un courant  $I_h$  circule et la tension harmonique aux bornes de la charge devient  $U_{h1}$ . L'impédance harmonique du réseau est alors donnée par :

$$\bar{Z}_h = \frac{\bar{U}_{h0} - \bar{U}_{h1}}{\bar{I}_h} \quad (\text{II-1})$$



**Fig. (II.1) : Mesure de l'impédance harmonique d'un réseau à partir d'une source de courant harmonique**

On peut donc également utiliser cette méthode sans interrompre le fonctionnement de la charge, mais en modifiant son point de fonctionnement. En enregistrant les variations de tension et de courant correspondantes on applique alors la formule suivante :

$$Z_h = \frac{\Delta U_h}{\Delta I_h} \quad (\text{II-2})$$

### **II-2-2-Utilisation des régimes transitoires lors d'un enclenchement**

Cette méthode permet d'enregistrer les tensions et les courants harmoniques durant le régime transitoire qui sont utilisés pour l'évaluation de l'impédance harmonique.

La source de courants harmoniques peut être déséquilibrée et même monophasée. La mesure sur la phase concernée donne une estimation correcte de l'impédance harmonique directe. A condition que les impédances directe et inverse soient égales et que n'y ait pas de courant homopolaire.

### **II-3- CALCUL DE L'IMPEDANCE HARMONIQUE : [10] [3]**

Dans le cas d'un réseau ou la structure est simple (réseaux de distribution arborescentes en moyenne tension) ; le calcul littéral des différentes grandeurs harmoniques est possible. On peut déterminer facilement les impédances harmoniques en différents points du réseau, ainsi que les autres grandeurs harmoniques (tension et courant). Si le nombre d'éléments constituant le réseau devient important, le recours à des programmes informatiques de simulation (logiciels) devient préférable.

### **II -4- PROPAGATION DES HARMONIQUES : [4]**

En règle générale sur un réseau de distribution comprenant un certain nombre de départ issus d'un même poste source, on peut considérer que les tensions harmoniques se propagent plus facilement dans le sens des niveaux des tensions décroissants (de HTB vers BT) que dans le sens inverse. Les courants harmoniques quand à eux circulent mieux en direction des tensions supérieurs.

Une tension émise à un niveau du réseau traverse un diviseur de tension constitué de l'impédance du transformateur et de l'impédance de sa charge.

$$V_h = e_h \frac{X_{charge}}{X_{charge} + X_{T1} + X_{T2}} \quad (\text{II.3})$$

$X_{charge}$  : Est généralement grand par rapport à  $X_{T1} + X_{T2}$ , donc  $V_h \approx e_h$

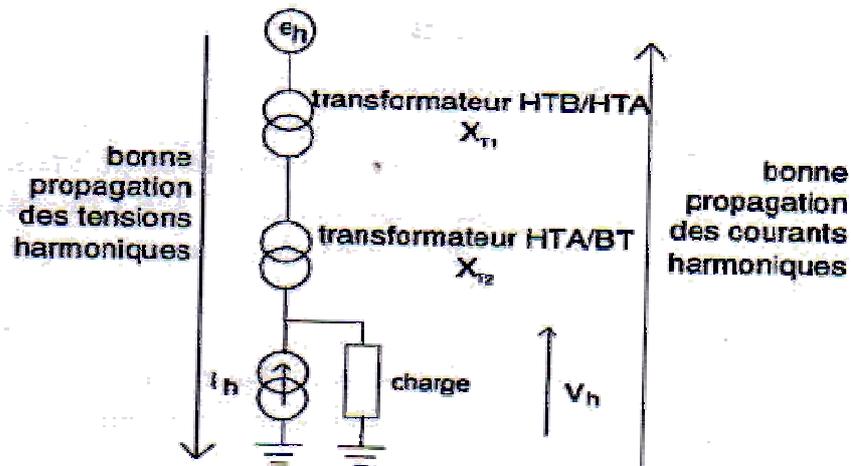


Fig (II.2) : Propagation des harmoniques

### II-4-MODELISATION DU RESEAU ELECTRIQUE :

Les problèmes de résonance sont dus à l'utilisation de batteries de condensateurs dans les réseaux industriels. Généralement, ces réseaux sont simplifiés en représentant le réseau en aval du transformateur principal (HTB/HTA ou HTA/BT) par une charge perturbatrice (injection harmonique), en parallèle avec une charge non perturbatrice (impédance inductive) et un condensateur représentant la puissance de compensation.

Les caractéristiques des éléments d'un tel réseau sont illustrées à travers la figure (II-2)

La modélisation permet :

- De dialoguer avec le client pour valider notre compréhension des dysfonctionnements du réseau ;
- D'analyser qualitativement les performances du réseau par le calcul des critères de sûreté de fonctionnement ;
- D'analyser qualitativement les performances du réseau, par la recherche des modes communs, des combinaisons les plus simples qui contribuent à l'événement.

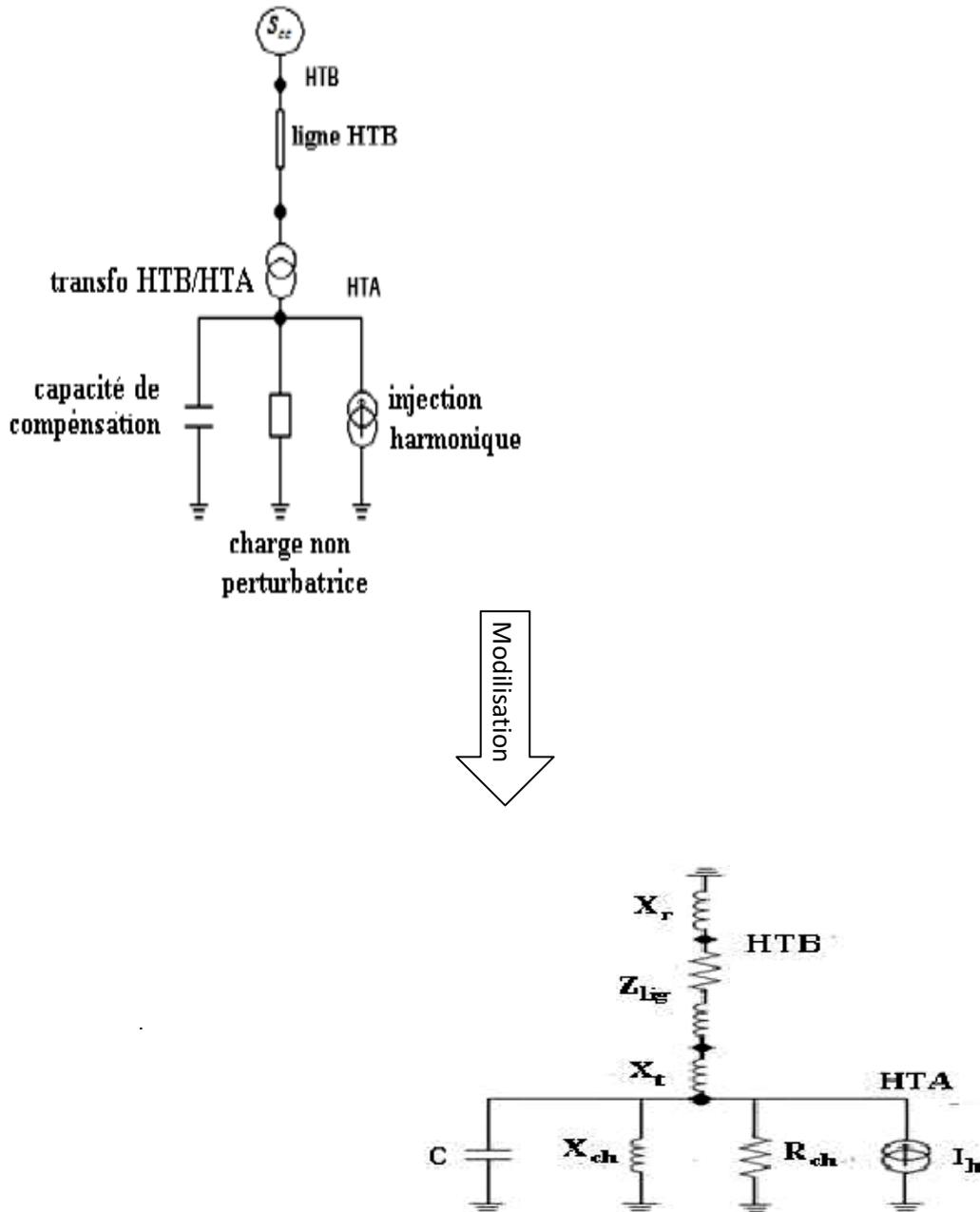


Fig. (II.3) : Modélisation du réseau électrique

◆ **Éléments de modalisation des réseaux HTA :**

Élément	Impédance harmonique
Réseau amont	$X_{rH} = H \cdot \frac{U_n^2}{S_{ccHTB}}$
Ligne	$Z_{lig,h} = I (R_{lig} + jh \cdot X_{lig})$
Transformateurs	$X_{T,h} = h U_{cc} \frac{U_n^2}{S_{nt}}$
Charge	$Z_{ch,h} = \left( \frac{P_{ch}}{U_n^2} + \frac{Q_{ch}}{jhU_n^2} \right)^{-1}$
Condensateurs	$Z_{c,h} = \frac{U_n^2}{jhQ_h}$

**Tableau II-1- Elément de modélisation des réseaux HTA**

Notons que pour les transformateurs, certains modèles prennent également en considération la résistance relative aux pertes Joule.

Les pertes Joule sont négligées dans les enroulements du transformateur HTB/HTA de sorte que celui-ci est représenté par sa seule inductance de fuite. La charge est représentée par une réactance  $X_{ch}$  en parallèle avec une résistance  $R_{ch}$  tel que :

$$\mathbf{Tg \varphi = \frac{X_{ch}}{R_{ch}}} \quad \mathbf{(II-4)}$$

### II-4-1- Méthodes simplifiées d'évaluations : [8] [10]

Des approches simplifiées de l'impédance harmonique dans un réseau de distribution existent et sont valables jusqu'à un certain degré de précision pour des cas particuliers (approches CEI).

### II-4-2 : Impédance harmonique directement proportionnelle à la fréquence :

Dans des installations simples ne comprenant aucun gros condensateur de compensation et aucun grand réseau de câbles (C négligeable), il est peu probable de rencontrer des résonances à des fréquences inférieures au rang 13. Dans ce cas, l'impédance harmonique est considérée inductive et évaluée approximativement par :

$$Z_h = h \cdot Z_1 \quad (\text{II-5})$$

Où  $Z_1$  représente la somme des réactances inductives ('lignes, câbles, transformateurs, charges, ...)

La fréquence de résonance parallèle est calculée à l'aide de l'expression suivante :

$$f_r = f_1 \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q_c}} \quad (\text{II-6})$$

$f_1$  : fréquence fondamentale.

$S_{cc}$  : puissance de court circuit de l'alimentation.

$Q_c$  : puissance réactive totale produite par les condensateurs et les câbles du réseau.

Il est possible d'utiliser cette approche avec une précision raisonnable ( $\pm 20\%$ ) si :

- ◆ Le jeu de barres HTA est alimenté à travers un transformateur dont la réactance  $X_t$  est élevée par rapport à celle de l'alimentation haute tension  $X_{HTB}$
- ◆  $X_t/X_{HTB} > 10$  s'il y a une possibilité d'une résonance sur le circuit HTB dans la gamme de fréquence étudiée.
- ◆  $X_t/H_{HTB} > 4$  s'il est peu vraisemblable de rencontrer une résonance des circuits haute tension dans la gamme de fréquence étudiée.

### **II-4-3- Impédance harmonique avec fréquence de résonance parallèle simple :**

Si on peut considérer que les éléments capacitifs sont raccordés aux jeux de barres HTA, la valeur résultante de  $Z_h$  vue du point de couplage commun est la mise en parallèle de L avec C.

Où L est l'inductance de phase correspondante à la partie haute tension (inductance de court-circuit de ligne HTB et du transformateur HTB/HTA de répartition).

Et C représente la capacité totale par phase si l'on tient compte des condensateurs de compensation et des capacités des câbles.

A proximité de la résonance, cette méthode donne une impédance harmonique  $Z_h$  beaucoup trop élevée (pas d'amortissement). Pour calculer la valeur correcte de  $Z_h$ , il est utile de tenir compte de l'effet d'amortissement des composants résistifs du réseau. Cependant, aux fréquences harmoniques, ces derniers sont difficiles à déterminer dans des cas pratiques. C'est pourquoi il est recommandé de calculer  $Z_h$  uniquement avec L et C en négligeant les composantes résistives et de limiter le résultat de façon à ce que le facteur d'amplification k à la résonance ne soit pas supérieur à 3.

La valeur la plus faible est valable pour les réseaux à forte charge présentant un amortissement important alors que la valeur la plus forte est valable pour les réseaux à faible charge.

En particulier, le facteur d'amplification à la résonance ne dépasse pas 5 dans les réseaux industriels à faible charge ou à charge purement inductive (moteurs à induction).

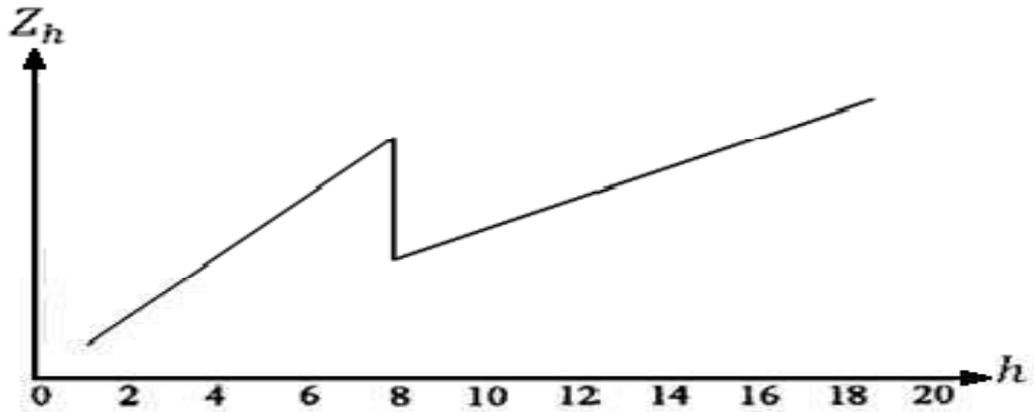
### **II-4-3- L'impédance harmonique avec l'approche de la courbe d'impédance la plus défavorable : [10]**

C'est une approche simplifiée définie, en effectuant plusieurs mesures (méthodes d'injections directes des courants inter-harmonique) sur les différents sites, les résultats obtenus montrent généralement peu de variations entre les postes c.-à-d. que l'impédance varie en fonction du rang selon une relation linéaire :

$$Z_h = h.Z_1 \quad \text{(II-7)}$$

Si les calculs donnent des résultats légèrement en dehors des limites, il faudra utiliser une approche plus fine.

Par exemple : 11 kV la courbe d'impédance la plus défavorable fig II-4 déduite de la puissance de court circuit  $S_{cc}$ , considérée comme s'élevant à partir d'une valeur à 50 Hz sur une droite de pente égale à deux fois le rang harmonique jusqu'à 400Hz,  $Z_h=2hZ_1$  puis elle chute jusqu'à la droite liée directement à l'impédance fondamentale par le rang harmonique  $Z_h=hZ_1$



**Fig. (II.4) : Courbe d'impédance la plus défavorable à 11kV pour un poste urbain**

Jusqu'à  $h=8$  :  $Z_h=2h.X_1$

Au dessus de  $t>8$  :  $Z_h = h.X_1$

#### **II-4-4- Autres méthodes de calcul manuel simplifié de $Z_h$ : [10]**

Dans cette partie, deux méthodes de calcul manuel de l'impédance harmonique des réseaux électriques de distribution (moyenne et basse tension) ne nécessitant pas un calcul matriciel intensif sont présentées.

Mais d'abord, définissons deux grandeurs importantes : la puissance réactive d'origine capacitive et la charge du réseau.

#### **A-Puissance réactive d'origine capacitive :**

La puissance réactive d'origine capacitive (dont la connaissance est nécessaire à l'évaluation des résonances) est une combinaison de la puissance réactive de la ligne  $\sum Q_l$  et de la puissance des batteries de condensateurs directement (sans inductance en série)  $\sum Q_{ca}$

$$Q_c = \sum Q_{ca} + \sum Q_l \quad \text{(II-8)}$$

#### **A. Charge du réseau PN :**

La valeur des impédances au voisinage de la première résonance dépend de l'amortissement induit par les éléments du réseau. Ces éléments résistifs peuvent provenir de charges et de la partie résistive du schéma équivalent sous les conditions de démarrage ensuite intervient en termes d'amortissement. En première approximation, il convient de ne pas tenir compte de leur puissance active afin de ne pas surestimer l'amortissement du réseau.

$P_{Nmin}$  peut être estimé dans les réseaux domestiques aux environs des deux tiers de la charge spécifiée en période de faible charge (1/3 de la charge représentée par des moteurs).

### **II-5- La modélisation des réseaux en régime harmonique : [4] [7]**

Le calcul de la tension harmonique sur les jeux de barres d'un réseau perturbé, ou du courant harmonique émis par un processus, se fait par des calculs rapides en utilisant des formules simplifiées dans le cas où le réseau comporte moins d'éléments (ligne, transformateurs, charges,...) .Au- de là, le recours à un outil de simulation devient nécessaire.

#### **II-5-1- Calcul de la puissance de court-circuit :**

Elle se calcule à partir de l'impédance à 50HZ du réseau amont  $X_c$

$$S_{cc} = \frac{U^2}{X_{cc}} \quad \text{(II-9)}$$

En aval d'un transformateur HTA/ BT ou HTB/HTA, on peut généralement négliger l'impédance du réseau amont.

On peut alors appliquer :

$$S_{cc} = \frac{100 * S_{ntransf}}{U_{cc} \%} \quad \text{(II-10)}$$

Avec :  $U_{cc}\%$  : tension de court-circuit du transformateur

$S_{cc}$  : la puissance de court-circuit triphasé MVA

$S_{ntransf}$  : la puissance nominale du transformateur MVA

HTA (moyenne tension) :  $1000 < HTA < 35\ 000\ V$

HTB (haute tension) :  $35000\ V < HTB \leq 300\ KV$

Lorsque la ligne électrique en aval du transformateur dépasse quelques dizaines de mètres en BT ou quelques kilomètres en HTA, il faut tenir compte de son impédance.

**II-5-2- Calcul du courant harmonique émis par un processus :**

**II-5-2-1-Emission harmonique des redresseurs :**

Les montages électriques utilisant un pont à thyristors en entrée pour le redressement du courant, ont une loi d'injection définie par :

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (\text{II-11})$$

C'est le cas des variateurs de vitesse pour les moteurs à courant continu.

Les redresseurs utilisant des ponts de diodes avec un filtre capacitif, ont une loi définie par :

$$I_h = \frac{3I_1}{h} \quad (\text{II-12})$$

C'est le cas des variateurs de vitesse pour moteurs alternatifs et tous les petits appareils électroniques (téléviseurs, ordinateurs,..)

**II-5-3- Calcul de la tension harmonique au jeu de barres : [4]**

**II-5-3-1-En l'absence de condensateurs :**

La tension harmonique au niveau du jeu de barres s'exprime selon la loi d'Ohm.

$$V_h = Z_h \cdot I_h \quad (\text{II-13})$$

Où  $Z_h$  est l'impédance harmonique du réseau vue du point d'injection du courant  $I_h$ .

Lorsqu'il n'y a pas de condensateurs sur le jeu de barres, il n'y a pas de risque de résonance.

**II-5-3-2- En cas de résonance : [4]**

En présence des condensateurs, le rang de résonance est fonction de la puissance de court-circuit et de la puissance des condensateurs installés :

$$h_r = \sqrt{\frac{S_{ccHTB}}{Q_c}} \quad (\text{II-14})$$

Et le facteur d'amplification peut s'exprimer par :

$$F = \sqrt{\frac{Q_c S_{ccHTB}}{P_{CH}^2}} \quad (\text{II-15})$$

**Conclusion :**

La détermination précise de l'impédance harmonique d'un réseau

## **Chapitre II      Evaluation de l'impédance harmonique dans les réseaux de distribution**

électrique est parfois indispensable, afin de détecter la présence de la pollution harmonique sur le système d'alimentation, mais on ne dispose d'aucune méthode de mesure ou de calcul qui soit à la fois, satisfaisante, simple et universelle.

En général, les méthodes de mesure et de calcul sont complémentaires. Les mesures sont utiles pour valider les calculs. Elles permettent de corriger le modèle du réseau.

# *CHAPITRE III :*

**Effets et remèdes**

**Introduction :**

La mauvaise qualité de l'énergie électrique est synonyme d'une distorsion inévitable soit en tension soit en courant, créant ainsi des dégâts considérables dans un réseau électrique.

Un certain nombre de solutions ont été développées pour atténuer la pollution harmonique au moyen d'équipements adaptés.

**III-1-Effets dus aux problèmes harmoniques : [7]****III-1-1- Problèmes causés par les courants harmoniques :****III-1-1-1-Surchauffe du neutre (effets à terme) :**

Dans un système triphasé, les tensions sont déphasées de  $120^\circ$  si bien que lorsque les charges sont égales, le courant résultant dans le neutre est nul. Lorsque les charges ne sont pas équilibrées, seule la résultante de la somme des courants de retour se retrouve dans le neutre.

**III -1-1-2- Effets sur les transformateurs (effets à terme) :**

Le premier concerne les pertes par courants de Foucault représentent environ 10 % de la perte totale à pleine charge et augmentent en fonction du carré du rang des harmoniques. En pratique pour un transformateur travaillant à pleine charge et alimentant des équipements informatiques, les pertes totales seront deux fois plus élevées que pour l'alimentation d'une charge linéaire.

Le résultat est une température beaucoup plus élevée réduisant d'autant la durée de vie du transformateur.

Le deuxième effet concerne les harmoniques de rang trois, Ils se retrouvent en phase dans le bobinage d'un transformateur raccordé en triangle. Ils seront absorbés par ce bobinage et ne seront pas distribués vers l'alimentation. Il est important de noter que les harmoniques impairs non multiples des harmoniques de rang trois passeront vers la distribution.

**III-1-1-3- Déclenchement intempestif des coupes- circuits (effets instantanés) :**

Un déclenchement intempestif peut survenir à cause des harmoniques pour deux raisons , l'une étant un module électromécanique, il ne peut additionner correctement les

composants à haute fréquence et se déclenche donc de façon erronée, l'autre les équipements créant des harmoniques provoquent un bruit dû à la commutation qui est filtré lors de la connexion au secteur.

#### III-1-1-4- Surcharge des condensateurs utilisés pour l'amélioration du facteur de puissance (effets à terme) :

Ils sont prévus pour compenser le déphasage du courant dû à une charge inductive tel qu'un moteur. L'impédance du condensateur diminue en fonction de l'augmentation de la fréquence, tandis que l'impédance de la source qui est généralement inductive augmente avec la fréquence. Il est donc probable que le condensateur supporte de très forts courants harmoniques et des dégâts peuvent en résulter s'ils n'ont pas été conçus pour les supporter.

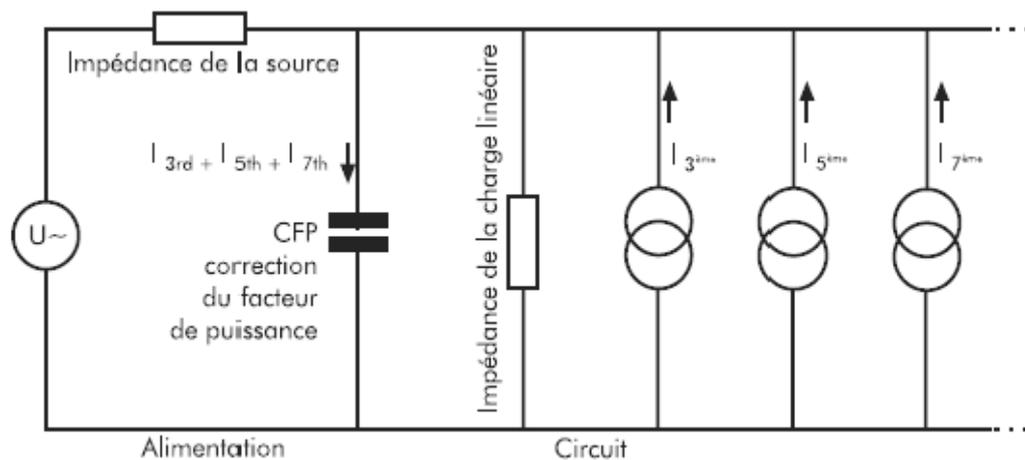


Fig (III.1) Circuit équivalent d'une charge non linéaire avec condensateur (CFP)

#### III-1-1-5-Effet de peau (effets instantanés) :

Le courant alternatif a tendance à circuler au périphérique du conducteur, c'est ce que l'on appelle l'effet de peau. Il est plus important pour les hautes fréquences. Cet effet est habituellement ignoré car il est faible pour les fréquences habituelles. Cependant aux fréquences de plus de 350 Hz soit à partir de la 7ième harmonique et au-delà, l'effet de peau devient de plus en plus important et les pertes par échauffement deviennent plus importantes.

**III-1-2- Problèmes causés par les tensions harmoniques (effets instantanés)**

En raison de l'impédance de la source, les courants harmoniques engendrent une tension harmonique qui déformera la tension de base.

L'impédance de la source est constituée de deux éléments : l'impédance du câblage à partir du point de couplage commun et celui de l'alimentation (le transformateur).

Le courant qui est déformé par la charge non linéaire, appliqué à l'impédance du câblage provoque une chute de tension déformée. La tension résultante est appliquée sur toutes les autres charges du circuit, les courants harmoniques y circuleront même si les autres charges sont linéaires.

**III-1-2-1- Les moteurs à induction (effets à terme) :**

Les tensions harmoniques entraînent dans les moteurs un accroissement des pertes par courants de Foucault comme dans le cas des transformateurs. De plus, des champs d'harmoniques sont générés au niveau du stator provoquant des pertes supplémentaires tendant à faire varier la vitesse ou même à changer le sens de rotation. Les courants à hautes fréquences induits au niveau du rotor augmentent les pertes.

Lorsque des tensions harmoniques sont présentes les moteurs doivent être redimensionnés afin de prendre en compte les pertes additionnelles.

**III-1-2-2- Bruit lors du passage à zéro (effets instantanés) :**

De nombreux appareils de mesure détectent le moment auquel la tension d'alimentation passe par zéro pour déterminer la mise en charge afin d'éviter les phénomènes transitoires lors de l'alimentation des charges inductives. Ceci réduit l'interférence électromagnétique ainsi que les contraintes au niveau des semi-conducteurs des interrupteurs.

Lorsque des harmoniques ou des phénomènes transitoires sont présents au niveau de l'alimentation le nombre de passage par zéro augmente et ceci conduit à des dysfonctionnements.

**III-1-2-3- Problèmes d'harmoniques affectant l'alimentation (effets instantanés) :**

Lorsqu'un courant harmonique est produit à partir de l'alimentation, il crée une chute de tension harmonique proportionnelle à l'impédance de la source au point de branchement.

Comme le réseau d'alimentation est généralement inductif, son impédance augmentera en fonction de la fréquence. La tension est déformée au PCC à cause des courants harmoniques produits par les autres utilisateurs et à cause des distorsions inhérentes au niveau des transformateurs. Les consommateurs ne sont pas autorisés à ajouter des pollutions dans le réseau au détriment des autres utilisateurs.

#### **III-1-2-4- Perturbation des systèmes de télécommande centralisée (effets instantanés) :**

La télécommande centralisée permet de piloter certains appareils au travers du réseau grâce à des signaux de 175 Hz superposés aux ondes de tension et de courant 50 Hz. Un taux d'harmoniques élevé peut entraîner l'enclenchement intempestif des relais commandé par ces signaux.

#### **III-2- Solutions traditionnelles de dépollution et moyens disponibles pour limiter les perturbations :**

##### **III-2-1- PFC passif : [11]**

Un PFC passif a comme avantage d'être très simple, très fiable puisque c'est juste un fil enroulé autour d'un noyau métallique, il est robuste et insensible aux pointes de courants ou au bruit électrique, son rôle est de générer une contre-réaction à la variation brutale du courant lors des cycles de charge du condensateur. (Le courant induit dans la bobine, à cause du champ magnétique créé lors du passage du courant issu du réseau, va s'opposer à la variation du courant qui lui a donné naissance).

##### **III-2-1-1- Correction active du facteur de puissance :**

Un PFC actif est un petit module intercalé à l'entrée de l'alimentation et géré par un contrôleur intégré qui analyse et corrige en temps réel l'allure du courant par rapport à la tension. Il en déduit les erreurs de forme par comparaison avec la sinusoïde redressée de la tension et il les corrige. Son rôle est d'obtenir un courant non déphasé et le plus sinusoïdal possible en entrée de l'alimentation.

Avec une alimentation avec un facteur de puissance égal à 1 (PFC actif), lors d'une coupure de courant, on peut tenir 10 min avec l'ordinateur allumé (150 W), changement

d'alimentation avec un même rendement mais avec un facteur de puissance égal à 0.6 (sans PFC), cela peut tenir seulement 6 minutes, dans les deux cas l'ordinateur consomme même une puissance utile. L'existence des harmoniques et du déphasage et du petit facteur de puissance a fait apparaître puissance réactive et déformante, et un courant plus élevé est tiré de l'onduleur, ce qui décharge plus vite la batterie.

### **III-2-1-2-Choix de l'emplacement : [10]**

#### **Coté source :**

Il est intéressant d'utiliser plusieurs câbles en parallèles de sections plus faibles que d'en utiliser un seul, si ces conducteurs sont suffisamment éloignés alors l'inductance apparente est divisée par le nombre de câbles en parallèles.

La position du branchement des charges déformantes au sein d'une installation revêt un double intérêt :

- ◆ Assurer la séparation des charges et bénéficier de la puissance de court-circuit la plus élevée, or en l'absence de tout phénomène de résonance, il apparaît que la perturbation harmonique globale croît lorsque la puissance de court-circuit diminue.
- ◆ Le branchement de la charge non linéaire doit être réalisé, si possible, sur la source présentant l'impédance la plus faible (transformateur le plus puissant par exemple).

### **III-2-1-3- Agir sur la structure de l'installation : [12]**

Eviter de connecter un récepteur sensible en parallèle avec un pollueur de forte puissance.

La séparation des sources qui consiste à attribuer un transformateur indépendant pour l'alimentation unique de la charge non linéaire (consiste à séparer les circuits qui alimentent des charges générant des harmoniques de ceux qui alimentent des charges sensibles aux harmoniques) c'est pour éviter les problèmes causés par les tensions harmoniques. Lors de leurs installations les transformateurs seront choisis de façon à avoir une impédance de sortie suffisamment basse (un transformateur le plus puissant possible) et permettant l'évacuation du surplus de chaleur ; en d'autres termes en sélectionnant un transformateur surdimensionné

Dans les convertisseurs d'énergie de type onduleurs ou variateurs de vitesse, on met en œuvre une inductance en série avec le récepteur déformant (d'inductance de ligne) dont l'impédance augmente avec la fréquence ; cette inductance qui est placée en amont du convertisseur polluant, on observe une diminution sensible des courants harmoniques générés

par l'équipement sur le réseau d'alimentation électrique et, par conséquent, du taux de distorsion harmonique en tension.

#### **III-2-1-4- Choix des éléments adéquats au réseau et leurs rôles :**

##### **A)- Transformateur triangle – étoile : [9]**

Les courants harmoniques de rang 3 circulant au secondaire d'un transformateur triangle – étoile ne sont pas transmis à la ligne d'alimentation du transformateur. Cette disposition est couramment utilisée en distribution, ce qui évite la circulation de courants harmoniques de rang 3 dans les réseaux de distribution et de transport.

##### **B)- Transformateur à secondaire en zigzag : [9]**

Les courants harmoniques de rang 3 circulant au secondaire d'un transformateur à secondaire en zigzag ne sont pas transmis aux enroulements primaires.

##### **C)-Transformateurs à deux enroulements secondaires, couplage triangle/triangle, étoile (Dyd) :**

Ce montage évite au primaire du transformateur la circulation des courants harmoniques H5 et H7 avec une charge égale sur chacun des secondaires.

On peut obtenir les même résultats par la mise en œuvre de deux transformateurs séparés avec les couplages respectifs (triangle /étoile) et (étoile/étoile) , mais pour ces deux solutions on a une augmentation de l'impédance de la ligne donc le taux de distorsion due aux autres courants harmoniques.

#### **III-2-1-5-- Rôle joué par les moteurs asynchrones :**

Les moteurs asynchrones présentent une impédance à la fois inductive et résistive. L'inductance de ces moteurs participe à la résonance avec la capacité du réseau. Dans certains cas il peut y avoir amplification des harmoniques.

Il est préférable d'enclencher les moteurs asynchrones avant ou en même temps que leurs batteries de condensateurs de l'énergie réactive afin d'éviter la résonance du réseau à des fréquences basses.

#### **III-2-1-6- Machines synchrones :**

Les limites à respecter sont données dans la norme CEI892 en fonction du type de moteur. Une règle pratique consiste à ne pas dépasser une distorsion de 10% pour l'alimentation de la machine. Au-delà on est amené à la surdimensionné.

**III-2-1-6- Surdimensionnement des équipements :**

Pour se prémunir des effets des harmoniques, une solution simple consiste à surdimensionner l'appareillage, et ce n'est pas toujours pratique surtout dans le cas de résonance.

**III-2-1-7- Choix judicieux des caractéristiques des redresseurs :****A) Redresseurs industriels :**

Consiste à réaliser les redresseurs avec un nombre de phases suffisant compte tenu de leur puissance, notamment en couplage hexaphasé ou dodécaphasé dans l'industrie, ce qui a pour effet d'éviter en grande partie les harmoniques de rang peu élevé et d'amplitude importante. Pour arriver à un couplage dodécaphasé bien équilibré.(on utilise actuellement des transformateurs à deux secondaires à couplages différenciés qui alimentent deux ponts avec sorties en série).

**B) Applications électrodomestiques :**

Le problème se complique avec les appareils électrodomestiques à régulation électronique, elles sont fabriqués en série, sont vendus partout en plus ou moins grand nombre et qu'il n'est pas possible d'en corriger les caractéristiques a posteriori en cas de besoin.

L'action de la CEI est de limiter la commercialisation d'appareils avec redresseur mono-alternance qui sont responsables d'harmoniques pairs très gênants pour certains réseaux.

Considérant le cas des gradateurs monophasés à thyristors provoquant une onde de courant lacunaire ou hachée, on tend à en proscrire l'emploi pour des applications qui ne justifient pas cette souplesse de réglage et dont la mise sur le marché ne risque pas de pâtir d'une réglementation.

**III-2-1-8- Interposition de selfs anti-harmoniques sur les batteries de condensateurs :**

Des selfs anti-harmoniques peuvent être installées en série avec les condensateurs pour ramener la fréquence de résonance parallèle en delà des fréquences de l'harmonique préoccupant. Les selfs anti-harmoniques ont un rôle passif par rapport à la source des harmoniques, elles n'éliminent pas les courants harmoniques primaires, mais évitent seulement une résonance avec les condensateurs.

Le calcul des selfs pose un problème, à savoir, que l'interposition de celles-ci entraîne un déplacement du point de résonance parallèle vers une fréquence plus basse.

Afin d'assurer un comportement inductif ; on s'imposera généralement de réaliser la résonance série entre 200 et 225 Hz, soit entre 4 et 4,5 fréquence nominale (Il arrive parfois qu'on doive la positionner entre 2 et 3  $f_n$  pour une raison discutée plus loin).

#### III-2-1-9- Limiter les courants harmoniques de certains convertisseurs :

Cela se fait en intercalant entre leur point de raccordement, à leur entrée une inductance dite de lissage .cette disposition est utilisée en particulier dans les redresseurs avec condensateur en tête. Cette solution a pour inconvénient de diminuer le taux globale de distorsion en tension en amont de l'inductance

#### III-2-2- Filtres passifs :

Un filtre est dit passif lorsque sa mise en fonction ne nécessite aucune source d'énergie. Composé essentiellement d'éléments capacitifs et inductifs ainsi que des résistances. Sa conception est fonction des harmoniques à atténuer ou à éliminer.

##### III-2-2-1- Filtre Passif Résonant :

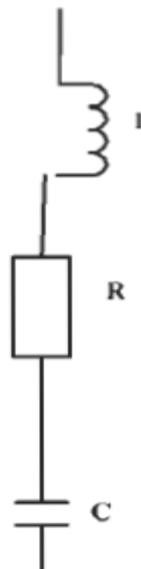


Fig (III.2) : Filtre passif résonnant

Utile pour filtrer les harmoniques d'ordre 5, 7, ou 11.

C'est un filtre très sélectif, il peut se placer en parallèle et en amont de la charge non linéaire ; de sorte à créer un chemin facile pour le courant harmonique dont la fréquence

correspond à celle sous laquelle le filtre a été accordé. Il peut en plus se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonants.

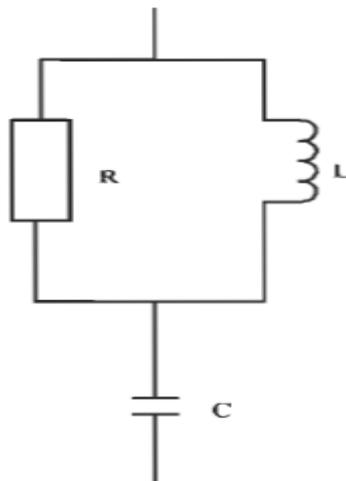
La fréquence d'accord peut être définie par:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (\text{III.1})$$

Et le facteur de qualité est déterminé selon :

$$f_q = 2\pi f_r \frac{L}{R} \quad (\text{III.2})$$

### III-2-2-2- Filtre Passif Amorti :



**Fig (III.3) : Filtre passif amorti**

Il a presque la même structure que le filtre passif résonant, à la seule différence que dans son cas la résistance et l'inductance sont en parallèle puis les deux en série avec la capacité.

Le filtre passif amorti est capable de filtrer plusieurs fréquences à la fois ; à savoir celle pour laquelle il est accordé, et en plus les fréquences au-dessus de celle-ci dans le diagramme spectral d'où son qualificatif de « filtre amorti passe-haut ».

Fréquence d'accord peut être définie par:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (\text{III.3})$$

Et le facteur de qualité est déterminé selon :

$$f_q = \frac{r}{L} \frac{1}{2\pi f_r} \quad (\text{III.4})$$

### III-2-2-3- Principe du filtre résonnant :

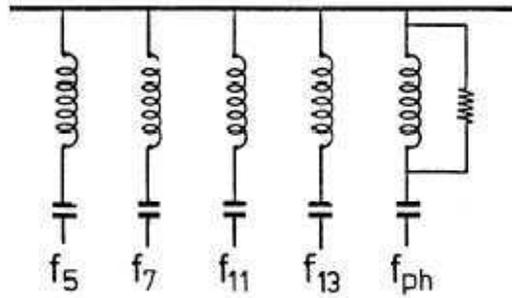
Tout en étant constituées qualitativement de la même façon que les selfs anti-harmoniques, des selfs mises en série avec les condensateurs peuvent être calculées de manière à réaliser des filtres d'harmoniques, en assurant un accord sur un harmonique gênant.

Le filtre d'harmonique présente la propriété de réaliser une sorte de court-circuit presque parfait sur la fréquence gênante, Il permet d'absorber le courant harmonique et d'éviter sa propagation dans le réseau.

Prévention de dérives : Si la puissance de court-circuit est très élevée par rapport à la puissance du filtre, le point d'antirésonance est très proche de celui de résonance, ce qui présente un danger de dérive intempestive de l'un à l'autre, si la fréquence varie ou à cause d'une variation de la capacité avec le temps. Pour limiter la pointe d'antirésonance et les surtensions auxquelles la dérive précitée donnerait lieu, le facteur de qualité de la self du filtre ( $L.\omega r / R$ ) est à limiter à une valeur modérée, généralement de 30 à 50, au prix d'une résistivité suffisante du fil de la bobine ou d'une résistance auxiliaire en série (au prix d'un surplus de pertes Joule).

### III-2-2-4- Autres données sur les filtres passifs et les séries de filtres :

A part les filtres LC série qui sont accordés sur une fréquence donnée, Il existe également d'autres types de filtres plus complexes, et si le problème à résoudre implique un spectre d'harmoniques jusqu'au-delà du rang 13, il arrive qu'on installe un filtre passe-haut pour absorber les fréquences supérieures, à côté de filtres de fréquence pour les rangs 5,7, 11 et 13.



**Fig(III.4) : filtre passif.**

La technique des filtres passifs est particulièrement sophistiquée. Elle est très encombrante sur le terrain. Sa fiabilité vis-à-vis des phénomènes transitoires exige des soins particuliers.

D'un point de vue énergétique, les selfs de filtrage entraînent des pertes d'énergie active dont les industriels ne réalisent pas toujours l'importance.

Par contre, un facteur important est à souligner au bénéfice des filtres passifs. Ils consistent habituellement à réaliser une disposition spéciale pour des batteries de condensateurs qui sont généralement nécessaires pour l'amélioration du facteur de puissance de la charge.

### **III-3- Solutions modernes :**

Ces solutions peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur.

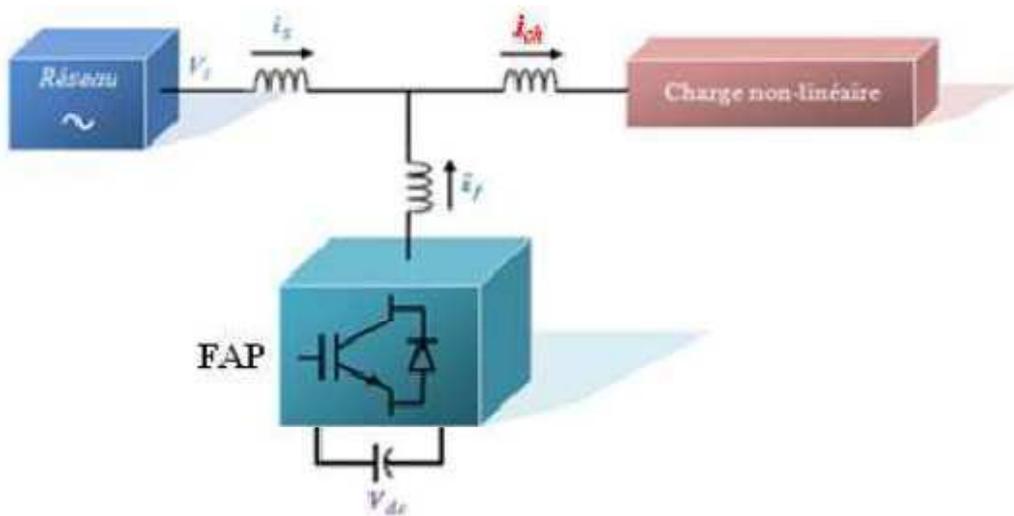
#### **III-3-1- Les filtres actifs :**

Pour faire face aux différentes perturbations (harmoniques, puissance réactive, fluctuations, creux de tension) affectant les systèmes électriques, parmi ces moyens modernes, nous pouvons citer :

- ◆ Les alimentations sans interruption ou de secours (ou *ASI*, ou en anglais *UPS*, *Uninterruptible Power Supply*) ;
- ◆ Les systèmes de transmission en courant alternatif flexibles "*Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS)*" ;
- ◆ Les filtres actifs de puissance "*Active Power Filters (APF)*" ;
- ◆ Les convertisseurs à prélèvement sinusoïdal.

### III-3-1-1- Le Filtre Actif Parallèle (FAP) :

Il est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant du côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du *FAP* consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés) produits par des charges polluantes de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif.

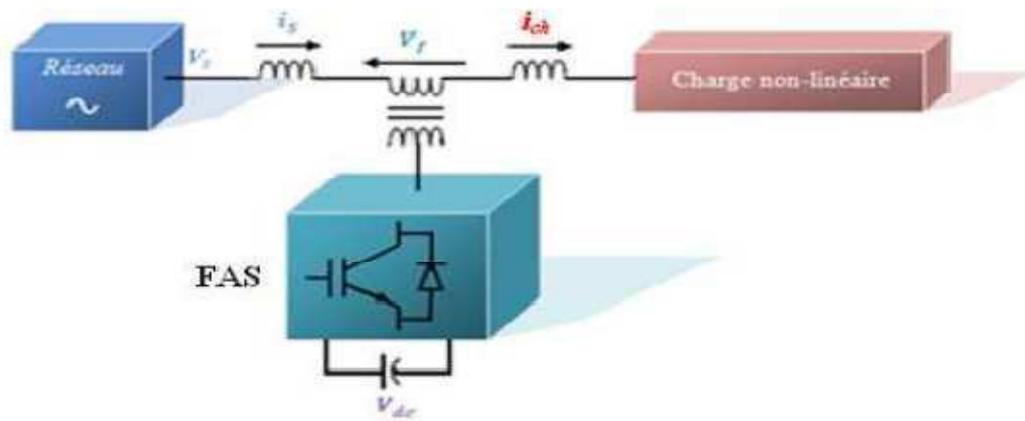


Fig(III.5) : Filtre actif parallèle.

Il est utilisé cas où les harmoniques à filtrer sont déjà connus, ou les harmoniques peuvent être approximativement estimés à partir de l'amplitude et de la phase du courant fondamental.

### III-3-1-2- Le Filtre Actif Série (FAS) :

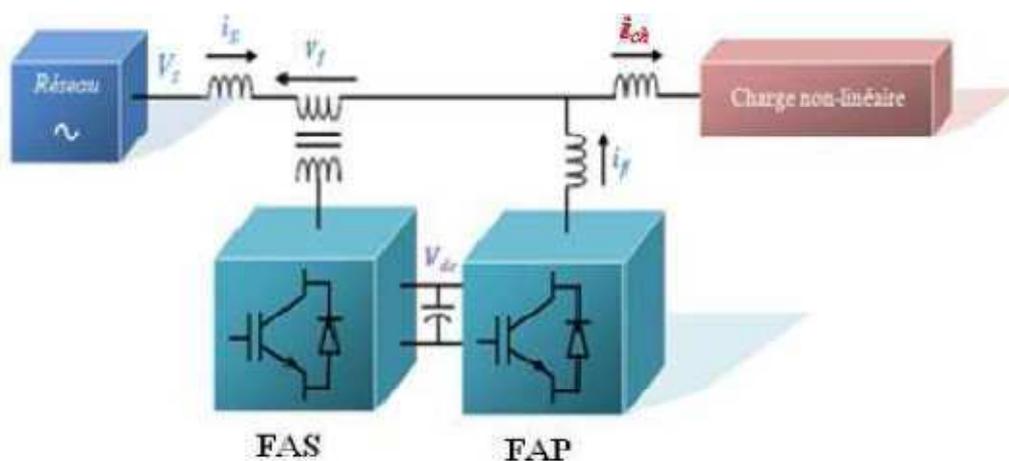
Est placé en série sur le réseau, Il se comporte comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale.



Fig(III.6) : Filtre actif série.

### III-3-1-3- La Combinaison Parallèle-Série Actifs (UPQC) :

(Unified Power Quality Conditioner *UPQC*), elle résulte de l'association des deux filtres actifs de puissance parallèle et série ; et elle permet d'assurer simultanément un courant sinusoïdal et une tension du réseau électrique également sinusoïdale.



Fig(III.7) : Combinaison parallèle-série des filtres actifs.

### III-3-1-4- Filtre Actif Hybride :

Ce filtre combine les avantages des filtres passifs et des filtres actifs, il est considéré comme l'une des meilleures solutions pour filtrer les harmoniques de courant des réseaux de distribution, il est lié au développement des semi-conducteur de puissance tels que les transistors de puissance de types *MOSFET* ou *IGBT*. De plus, du point de vue économique, le filtre hybride présente un atout majeur, il permet de réduire le coût de filtre actif, qui est actuellement l'obstacle majeur à l'utilisation de ce type des filtres.

On peut distinguer trois configurations du filtre actif hybride :

- ◆ Combinaison du filtre actif série et du filtre passif parallèle ;
- ◆ Combinaison du filtre actif parallèle et du filtre passif parallèle ;
- ◆ Filtre actif parallèle connecté en série avec un filtre passif.

**Conclusion :**

Bien que nous disposions de plusieurs solutions traditionnelles et modernes, on n'arrive pas à éliminer la pollution harmonique mais à la réduire, cela se fait par un choix des éléments adéquats au réseau et leurs rôles face aux harmoniques.

# *CHAPITRE IV :*

Application sur un réseau industriel

**Introduction :**

Connaissant les généralités théoriques sur les harmoniques du courant et de la tension, leurs causes et effets, ainsi que les conditions de leurs propagation sur les réseaux de distribution électrique, on s'intéresse à faire une comparaison entre un réseau sain et réseau avec une pollution harmonique.

**IV-1- Présentation du système test :**

Dans ce chapitre on s'intéressera à l'étude d'un réseau à 13 jeux de barres sous MATLAB / SIMULINK, le travail consiste à injecter une source des courants harmoniques dans un jeu de barres, et en les faisant déplacer dans tous les autres jeux de barres.

L'intérêt de cette analyse harmonique est d'arriver à comprendre le rôle et le comportement des différents éléments qui constituent ce réseau test.

L'installation est alimentée par une tension de service de 69Kv, et le réseau de distribution local à 13.8kV.



**Fig (IV.1) : réseau industriel équilibré à 13 jeux de barres.**

## IV-2- Partie simulation :

## IV-2-1-Paramètres de simulation :

## IV-2-1-1- Alimentation :

Source :  $U_1 = 69kV$

Générateur :  $U_2 = 13,8kV$

## IV-2-1-2- Transformateurs :

Transformateur	$S_n$	$V_1(kV)$	$V_2(kV)$	$R_1(pu)$	$L_1(pu)$
3-5	15000	39.83	7.96	0.003132	0.055324
2-4	1500	7.96	0.277	0.06395333	0.3797333
6-9	1250	7.96	0.277	0.059184	0.35504
6-10	1725	7.96	2.4	0.043142029	0.34510145
7-11	1500	7.96	0.277	0.0582886667	0.37886667
8-12	1500	7.96	0.277	0.055753333	0.3624
8-13	3750	7.96	1.385	0.012181333	0.14616

Tableau(IV .1) : Paramètres de simulation pour les transformateurs .

## IV-2-1-3- Câbles et lignes :

	$R(\Omega)$	$L(H)$
Ligne 1-3	0.02647116	0.0001496
Câble 2-5	0.02323368	0.00012282
Câble 5-6	0.014283	3.01841 E-05
Câble 5-7	0.02989908	6.6209 E-05
Câble 5-8	0.02075796	4.5993 E-05

Tableau (IV .2) : Paramètres de simulation pour la ligne et les câbles.

## IV-2-1-4- Charges :

	$V_n(kV)$	P( kW)	Q(Kvar)
Nœud 4	0.277	600	530
Nœud 5	7.96	2240	2000
Nœud 9	0.277	1150	290
Nœud 10	2.4	1310	1130
Nœud 11	0.277	810	800
Nœud 12	0.277	370	330
Nœud 13	1.385	2800	2500

Tableau(IV.3) :Paramètres de simulation pour les charges .

## IV-2-1-5- Condensateur :

$$V_n = 7.96kV$$

$$Q_c = 6000 \text{ kVAR}$$

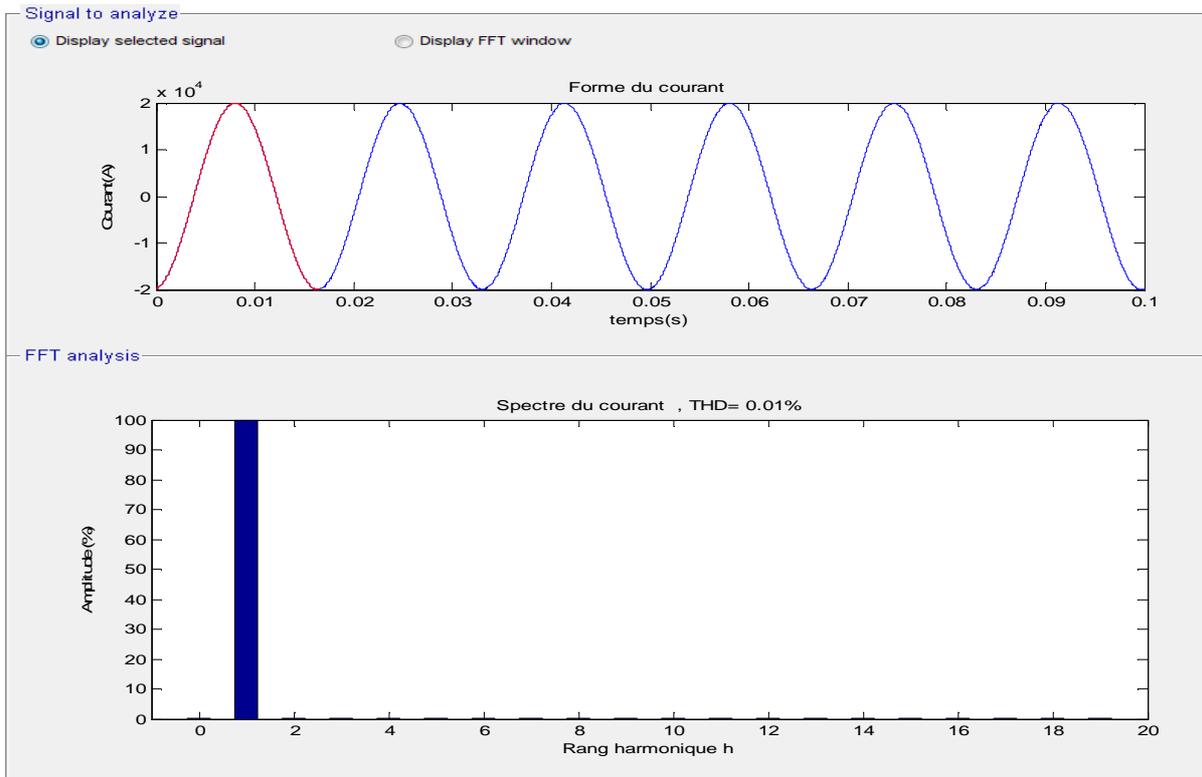
## IV-2-1-6- La source harmonique :

Rang harmonique	%	L'Angle
1	100.00	0.00
5	18.24	-55.68
7	11.90	-84.11
11	5.73	-143.56
13	4.01	-175.85
17	1.93	111.39
19	1.39	68.30

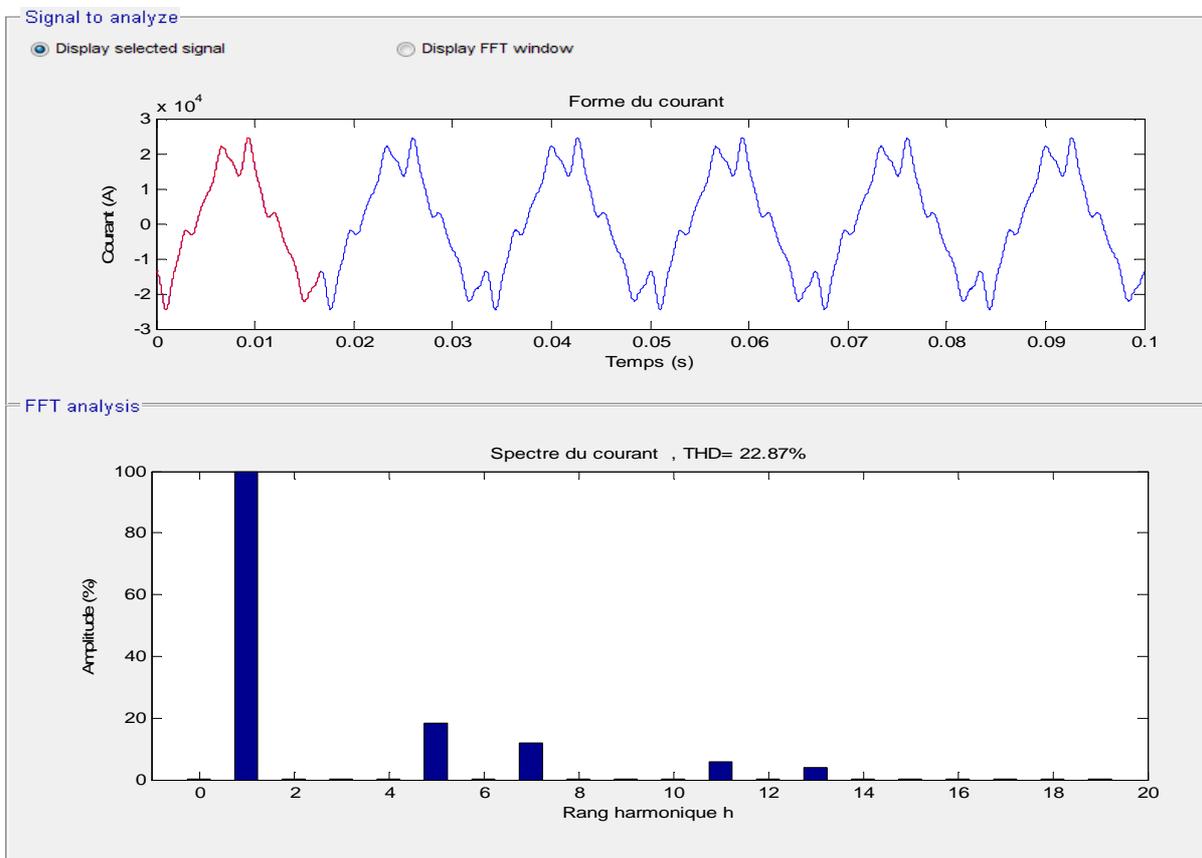
Tableau (IV.4) : Caractéristiques de la source harmonique.

IV-3- Les relevés des courants et des taux de distorsion harmonique en courant  $TDH_i$  pour tous les jeux de barres.

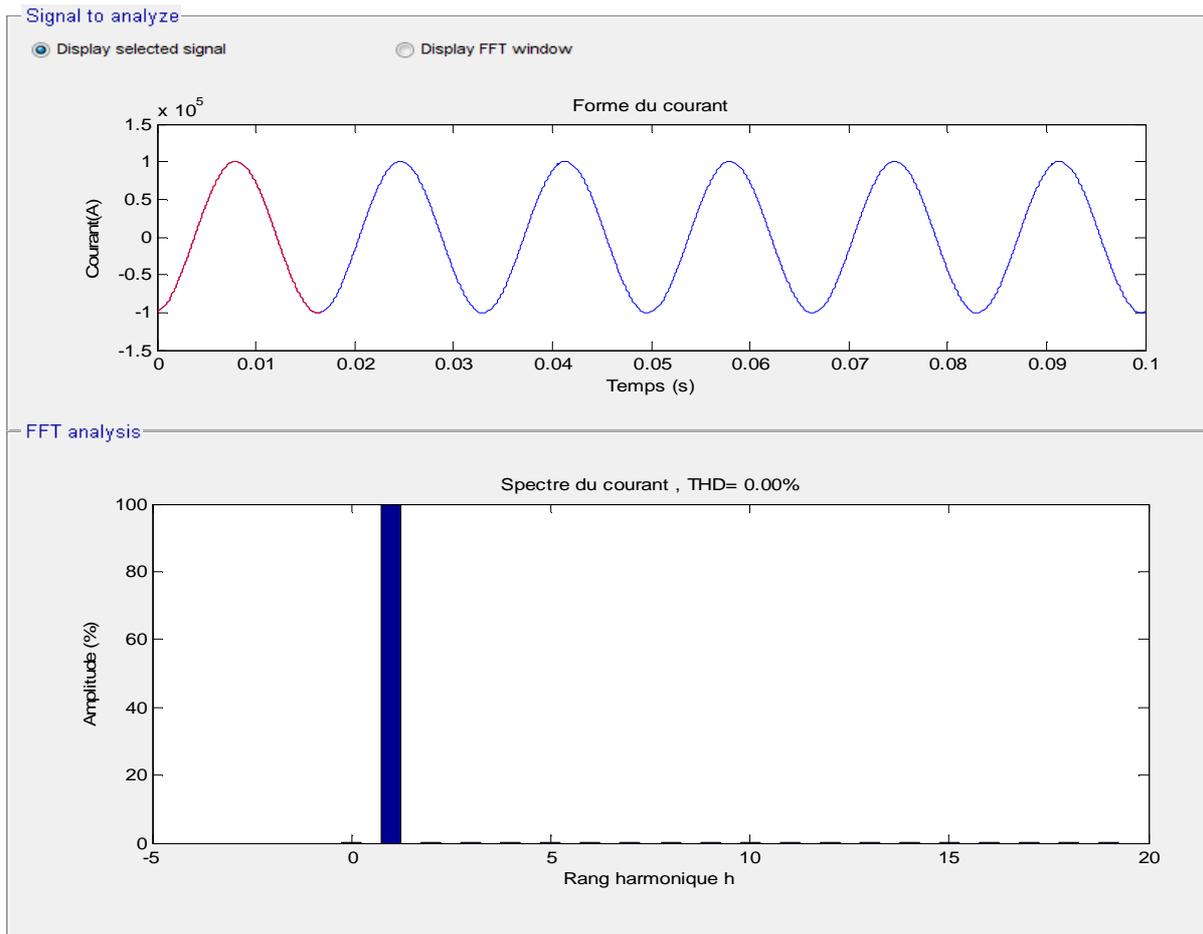
Jeu de barres 1 : (sain)



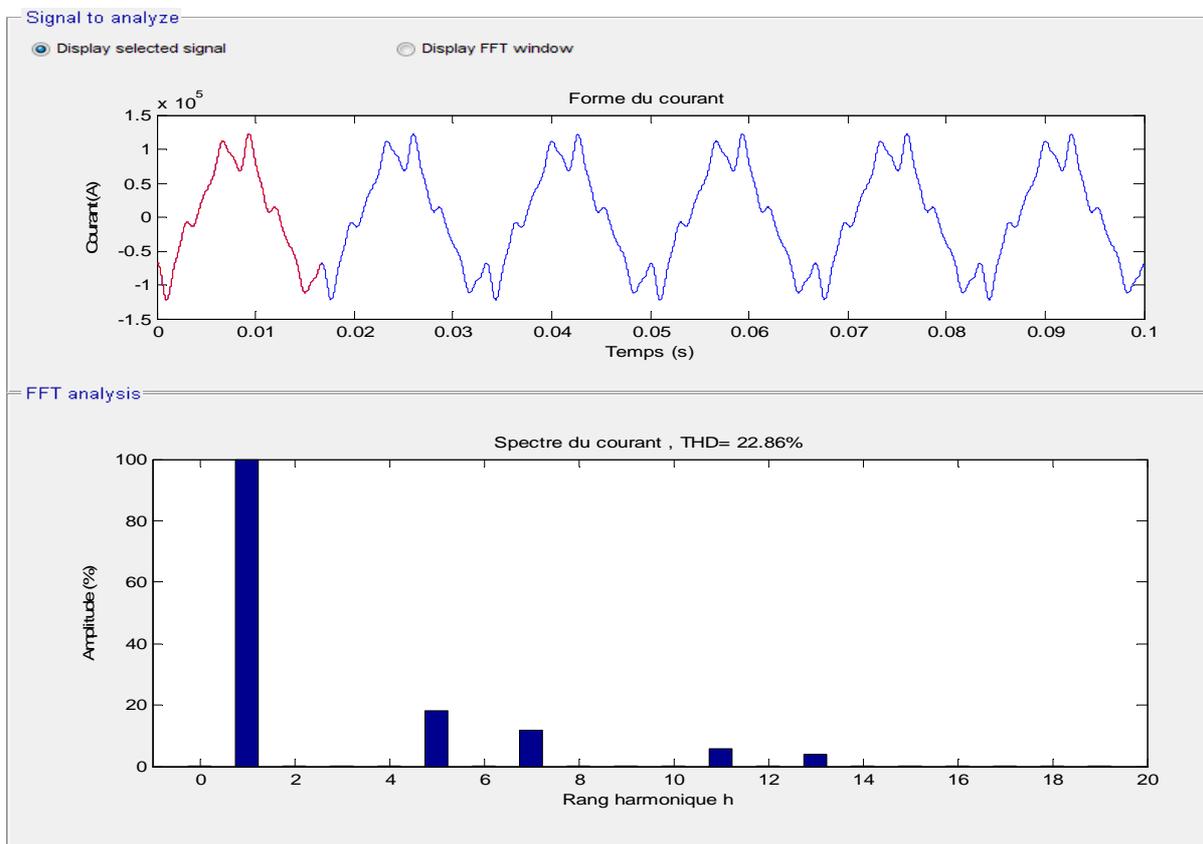
Jeu de barres 1 : (avec charge polluante)

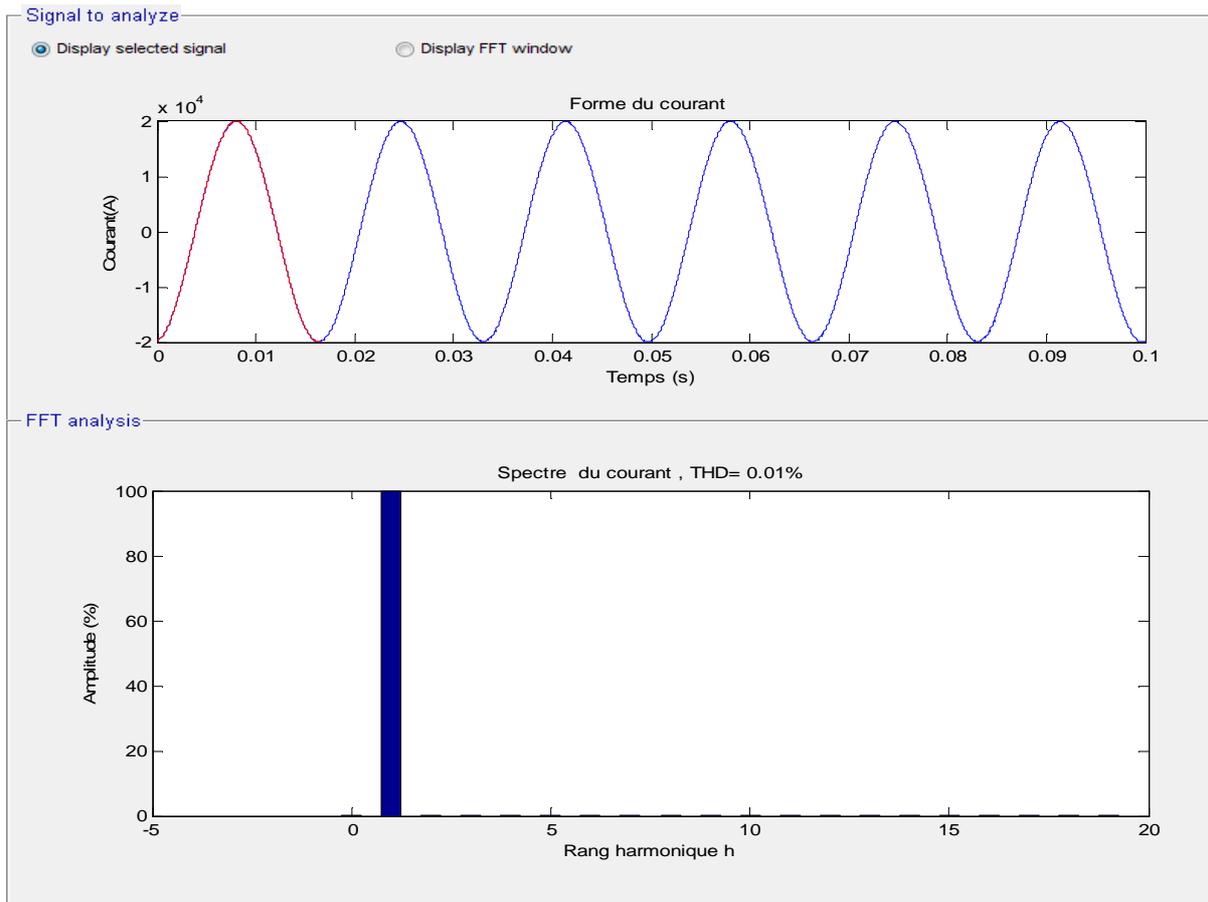


Jeu de barres 2 : (sain)

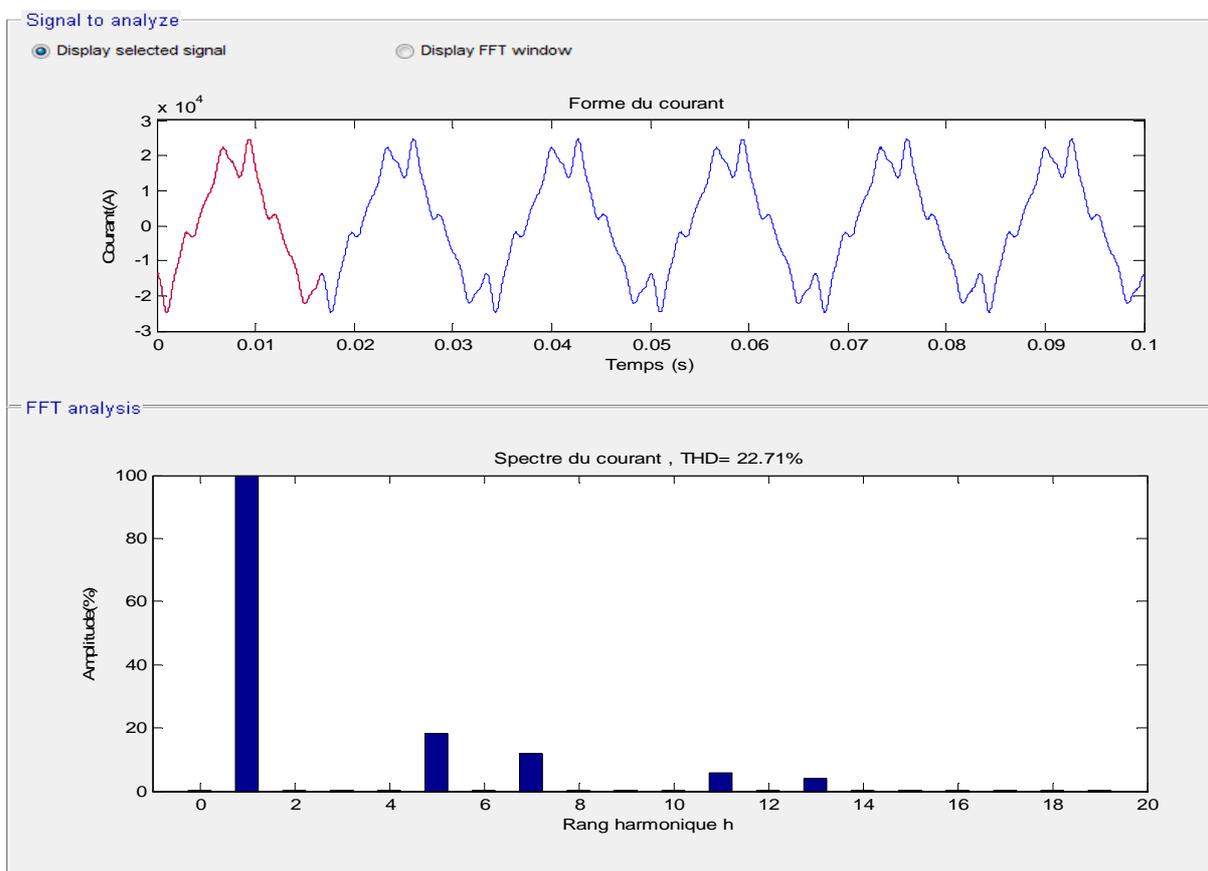


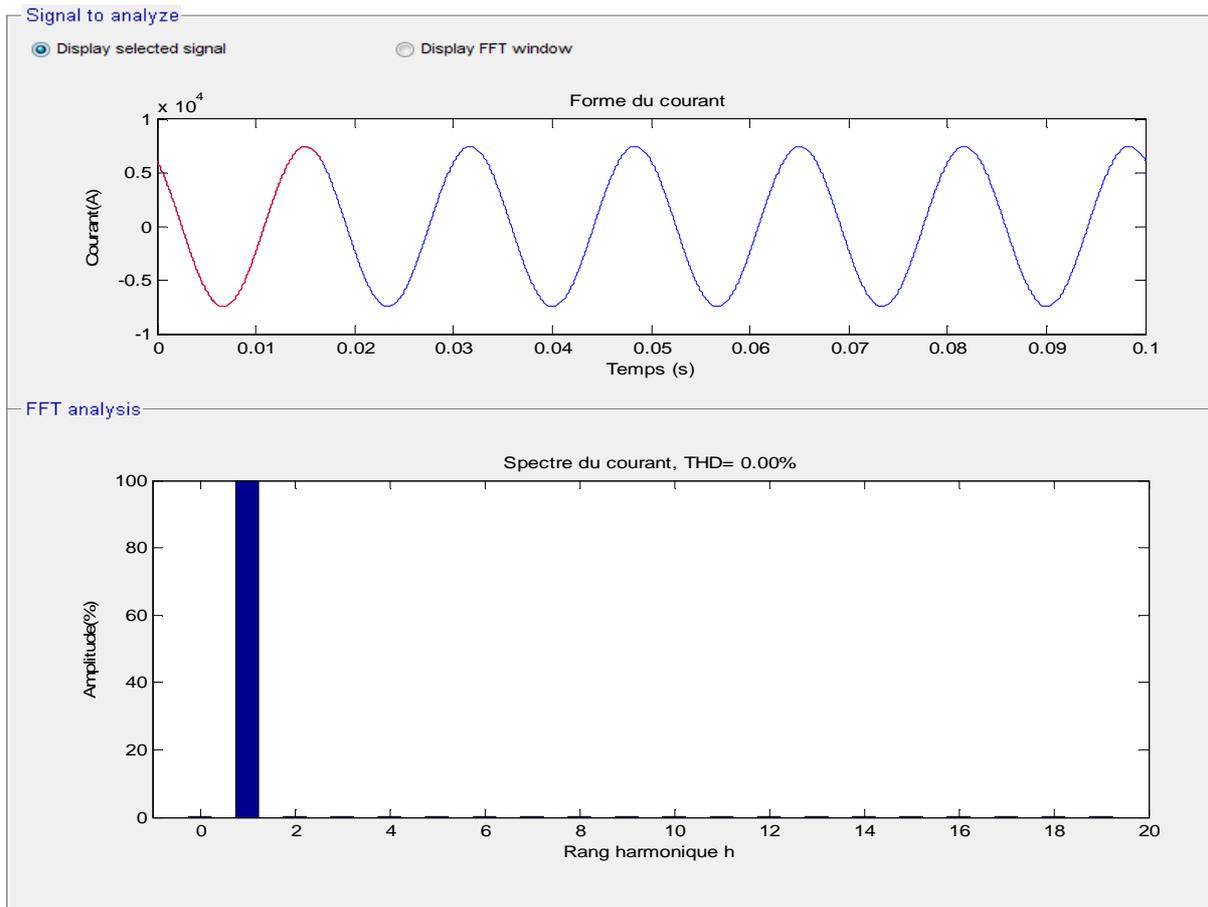
Jeu de barres 2 : (avec charge polluante)



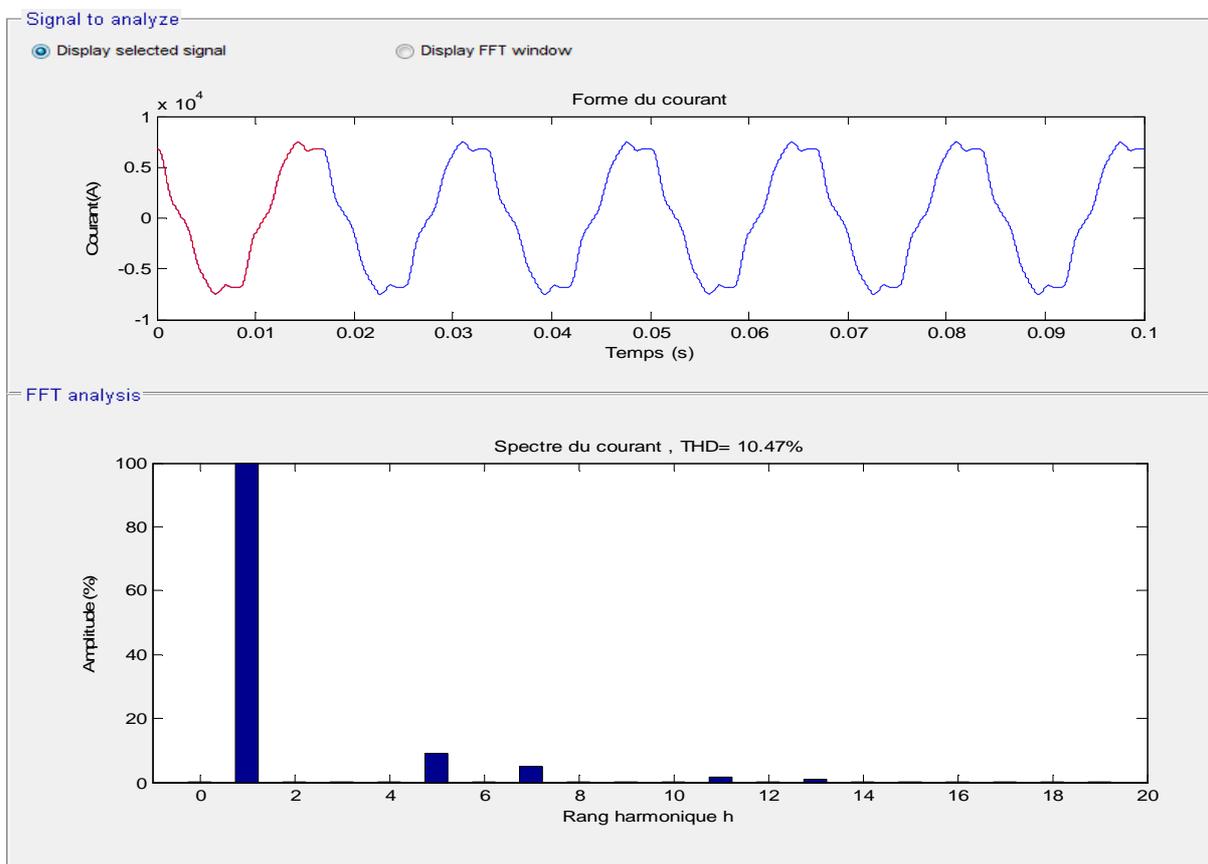


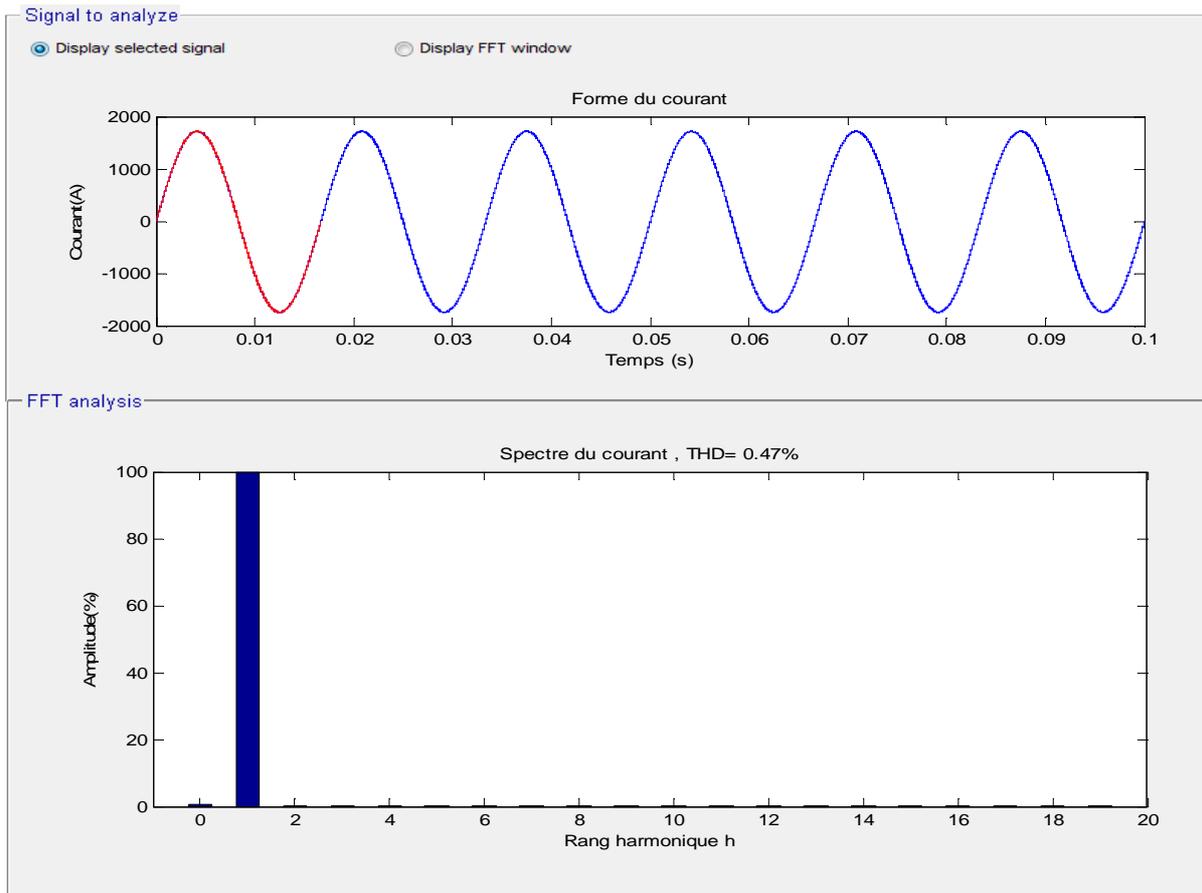
**Jeu de barres 3 : (avec charge polluante)**



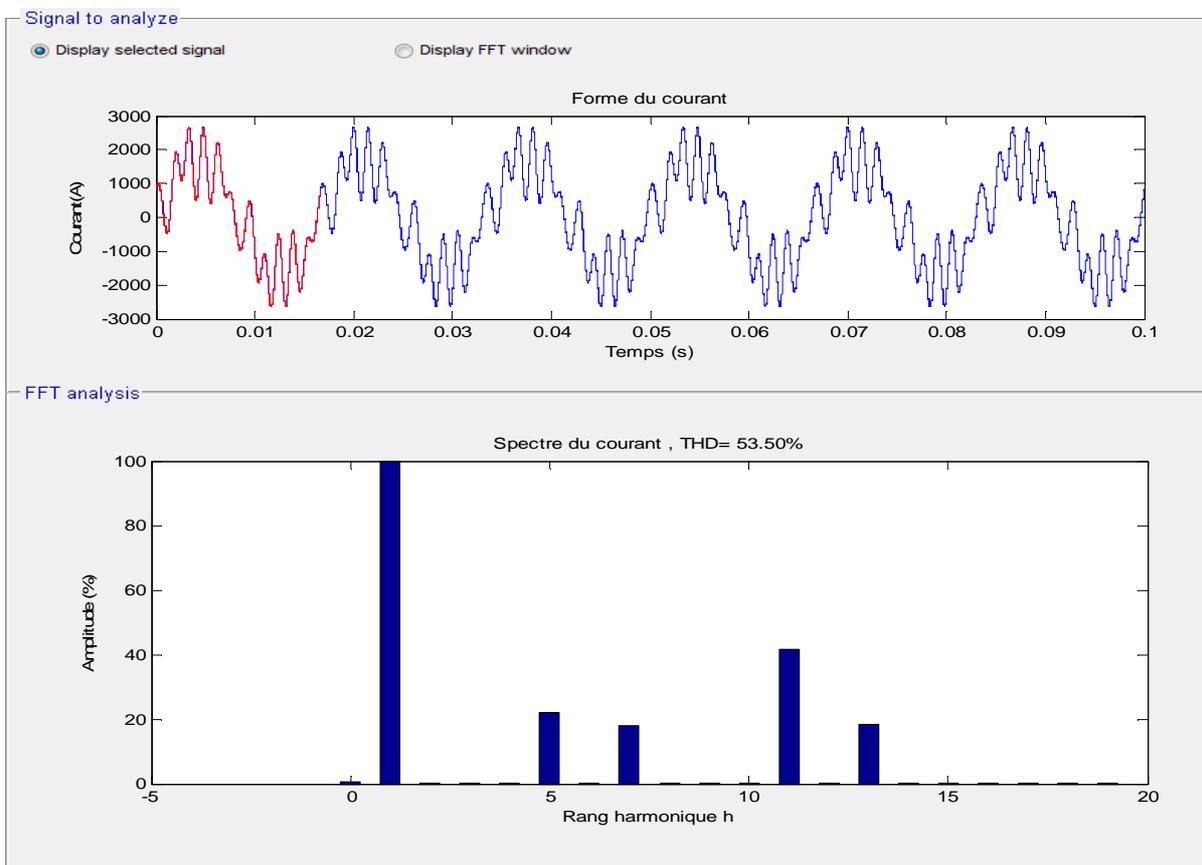


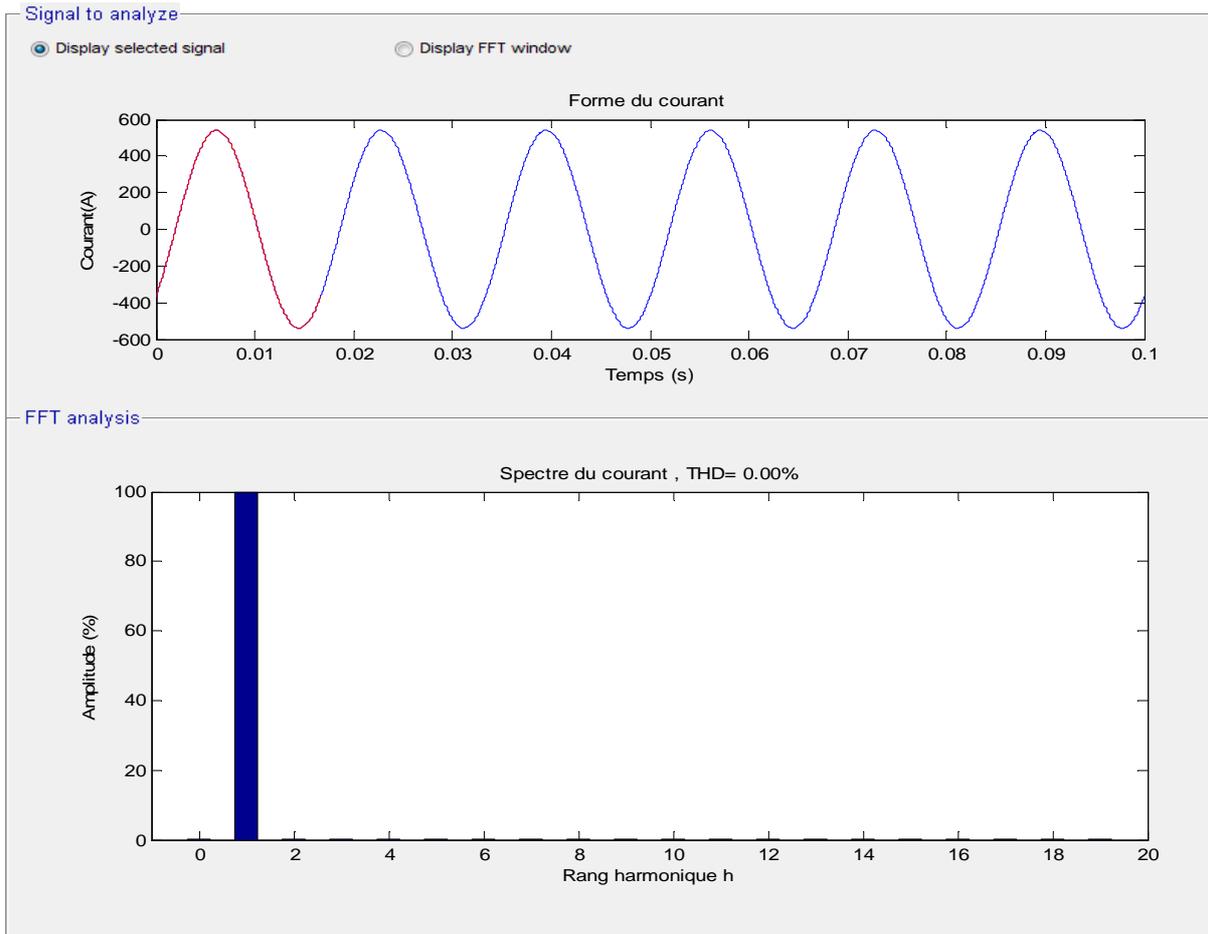
Jeu de barres 4 : (avec charge polluante)



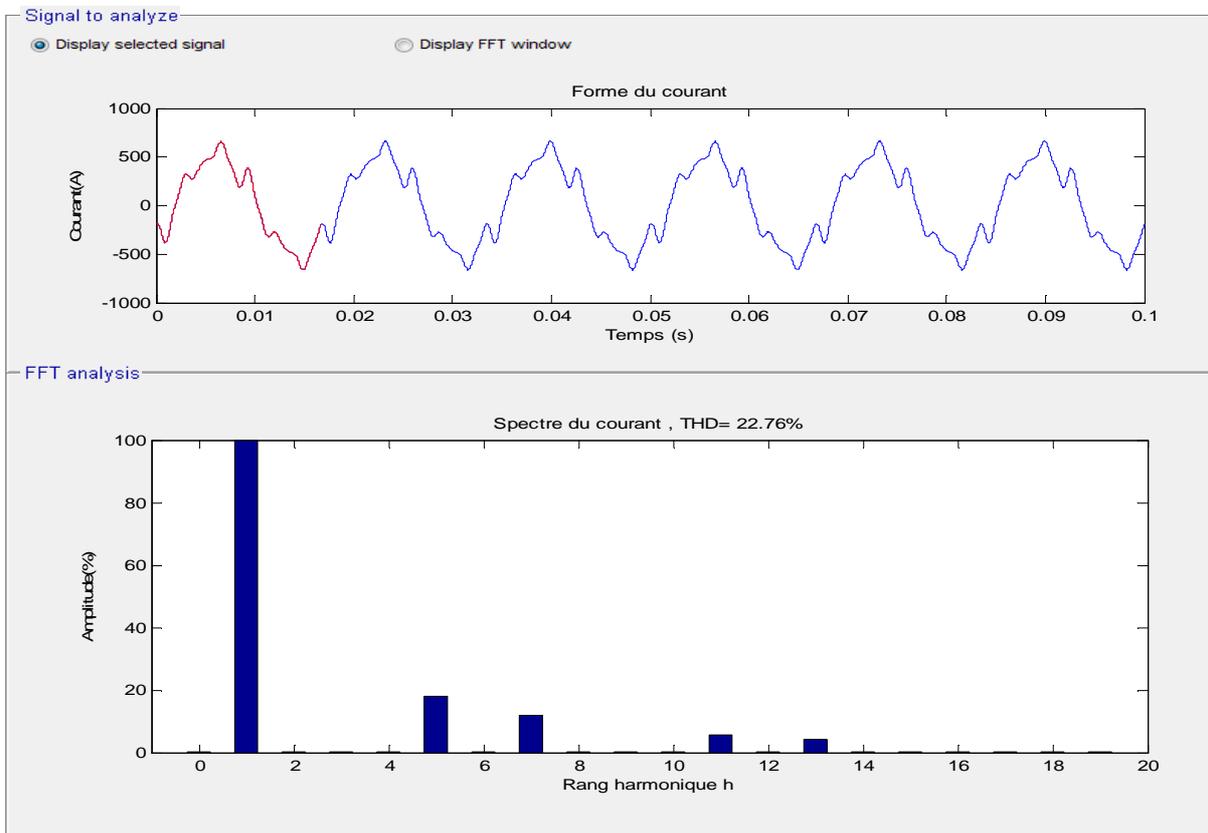


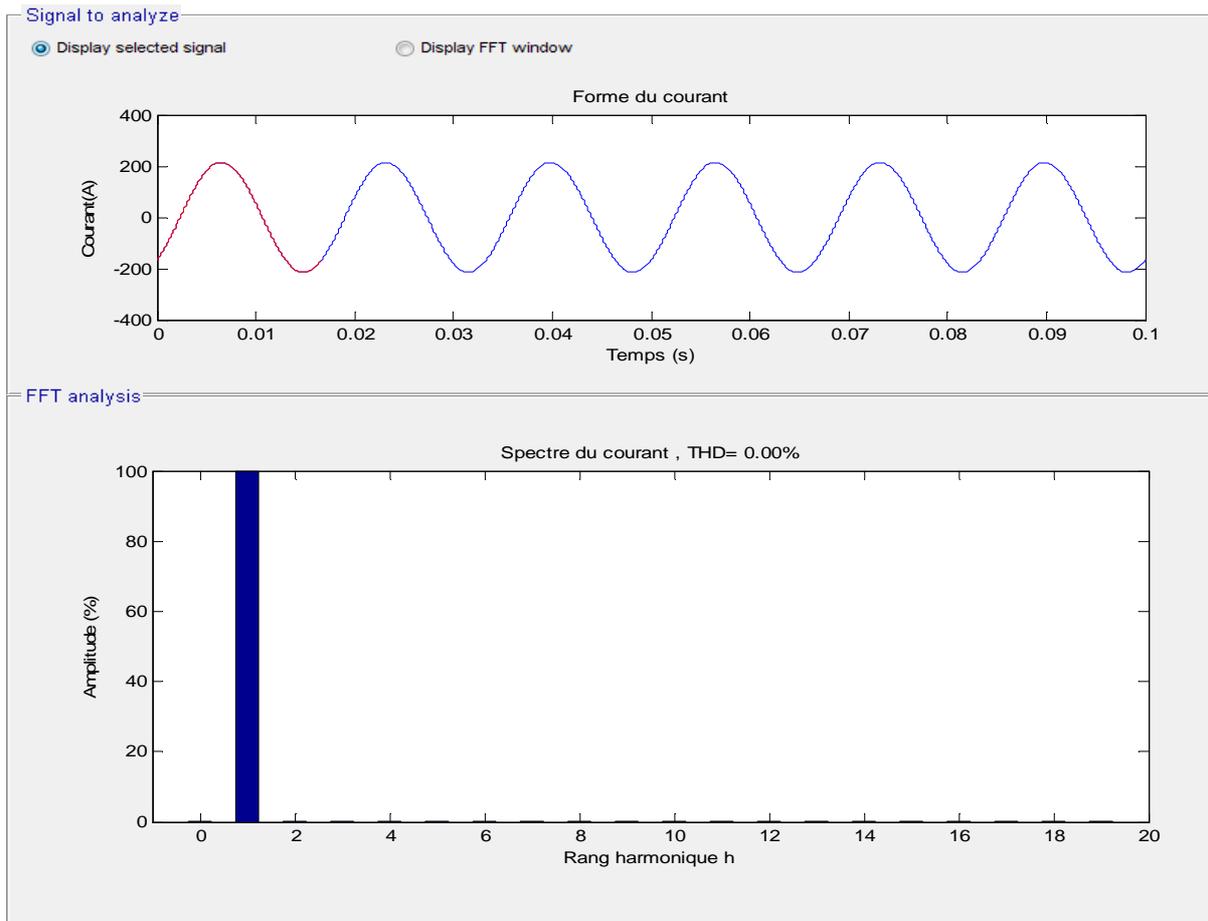
Jeu de barres 5 : (avec charge polluante)



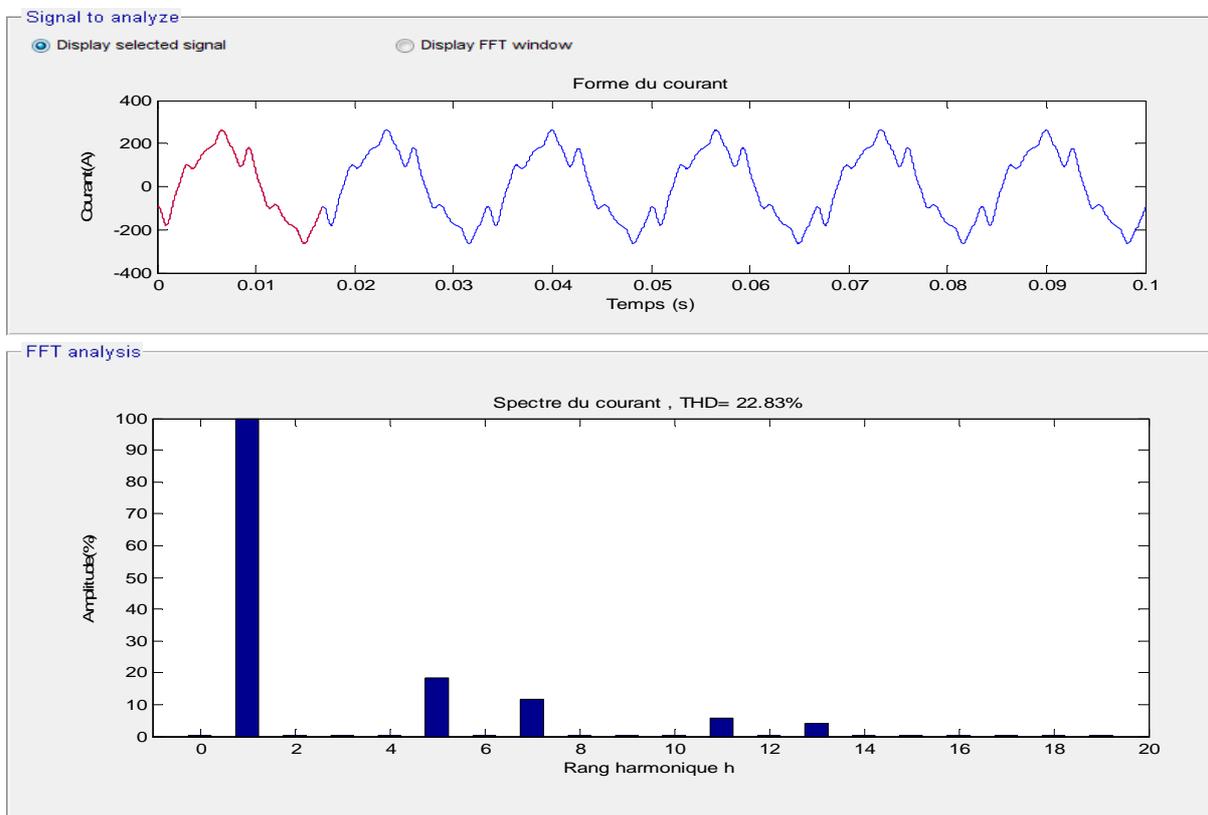


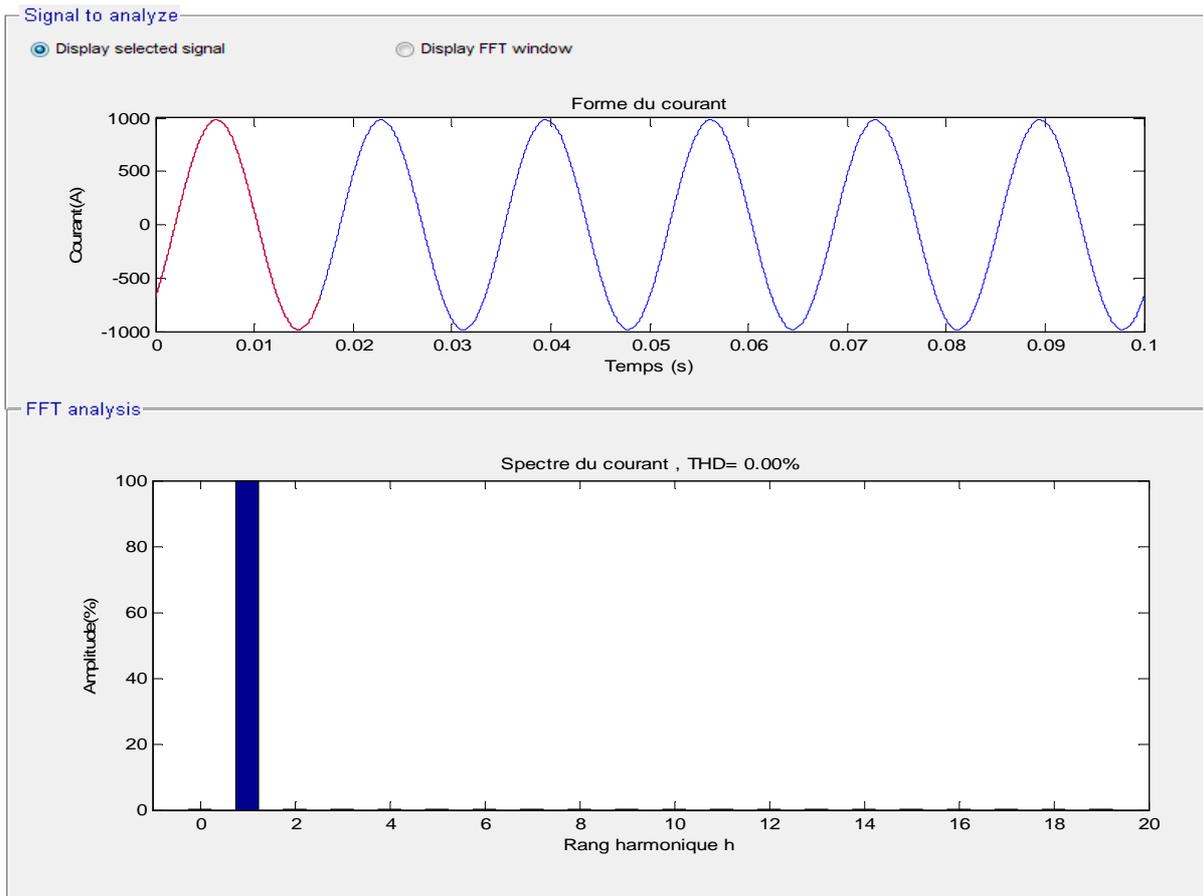
Jeu de barres 6 : (avec charge polluante)



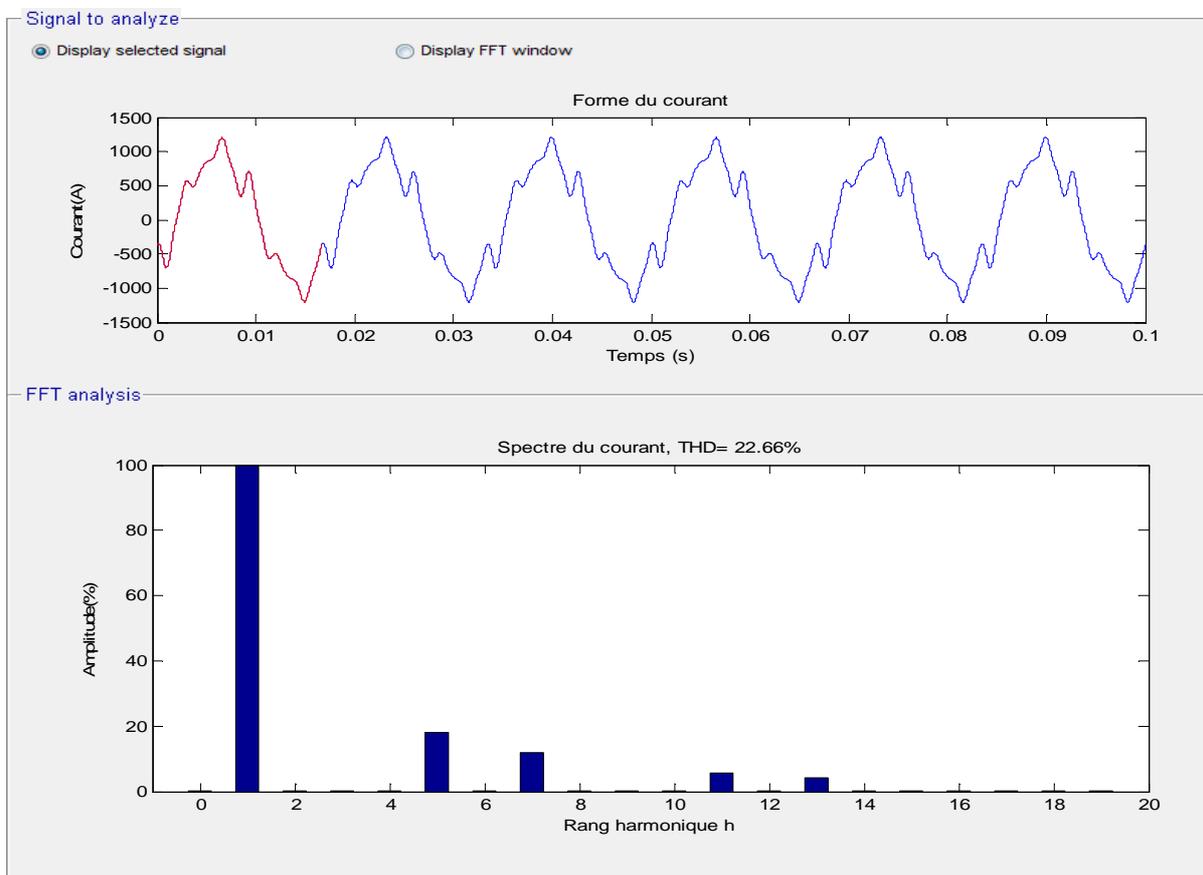


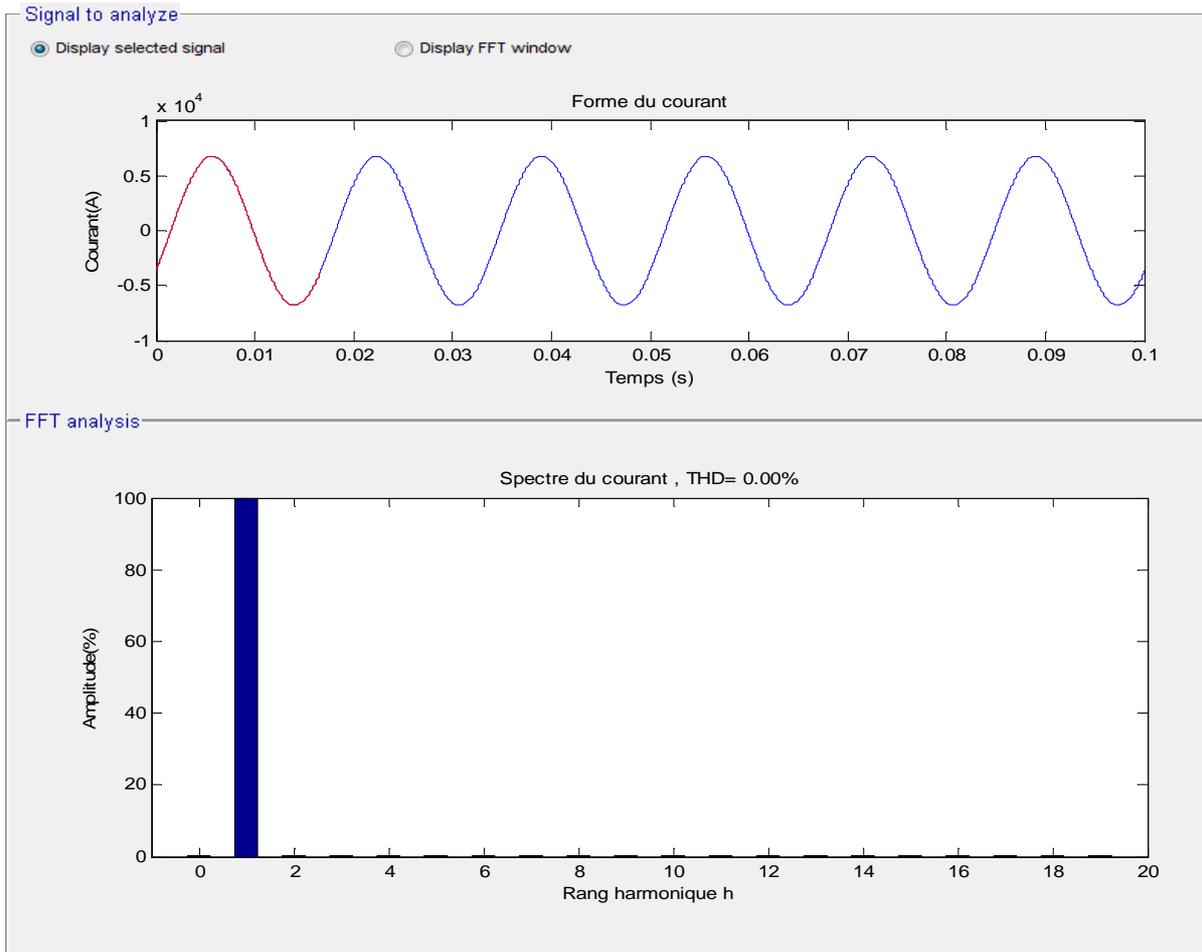
Jeu de barres 7 : (avec charge polluante)



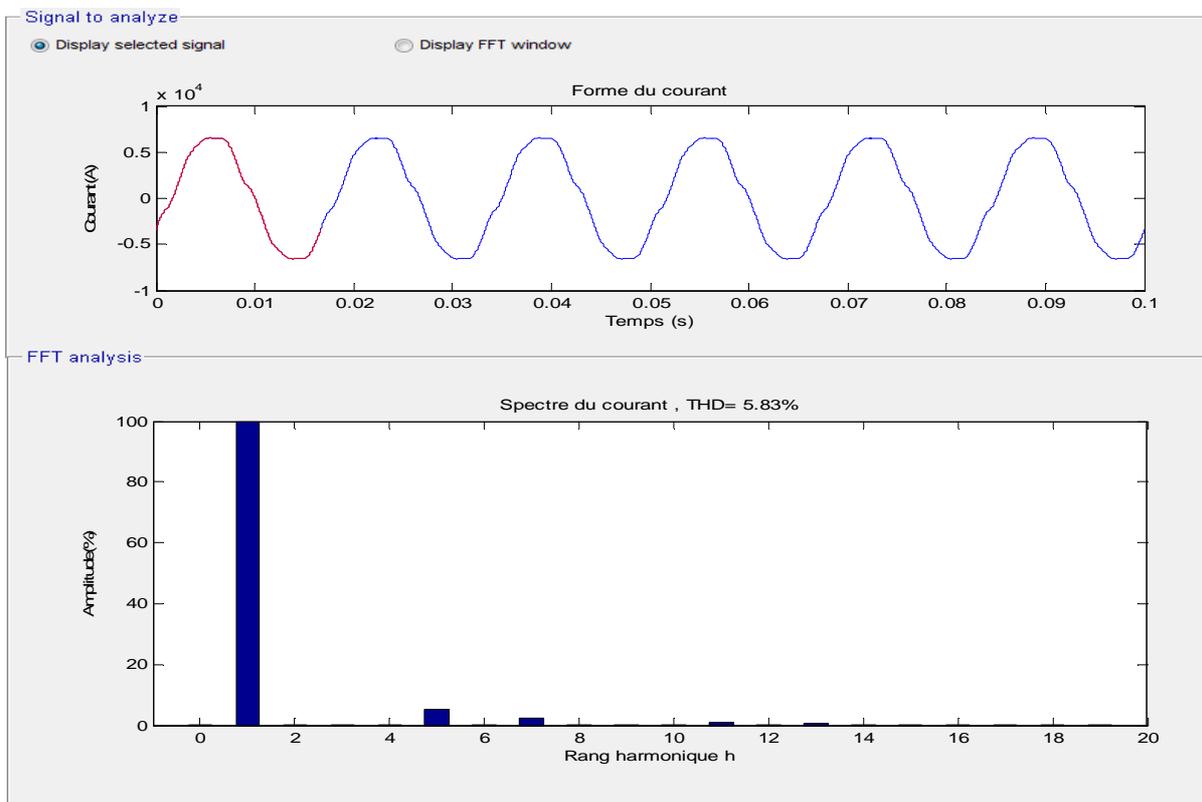


Jeu de barres 8 : (avec charge polluante)

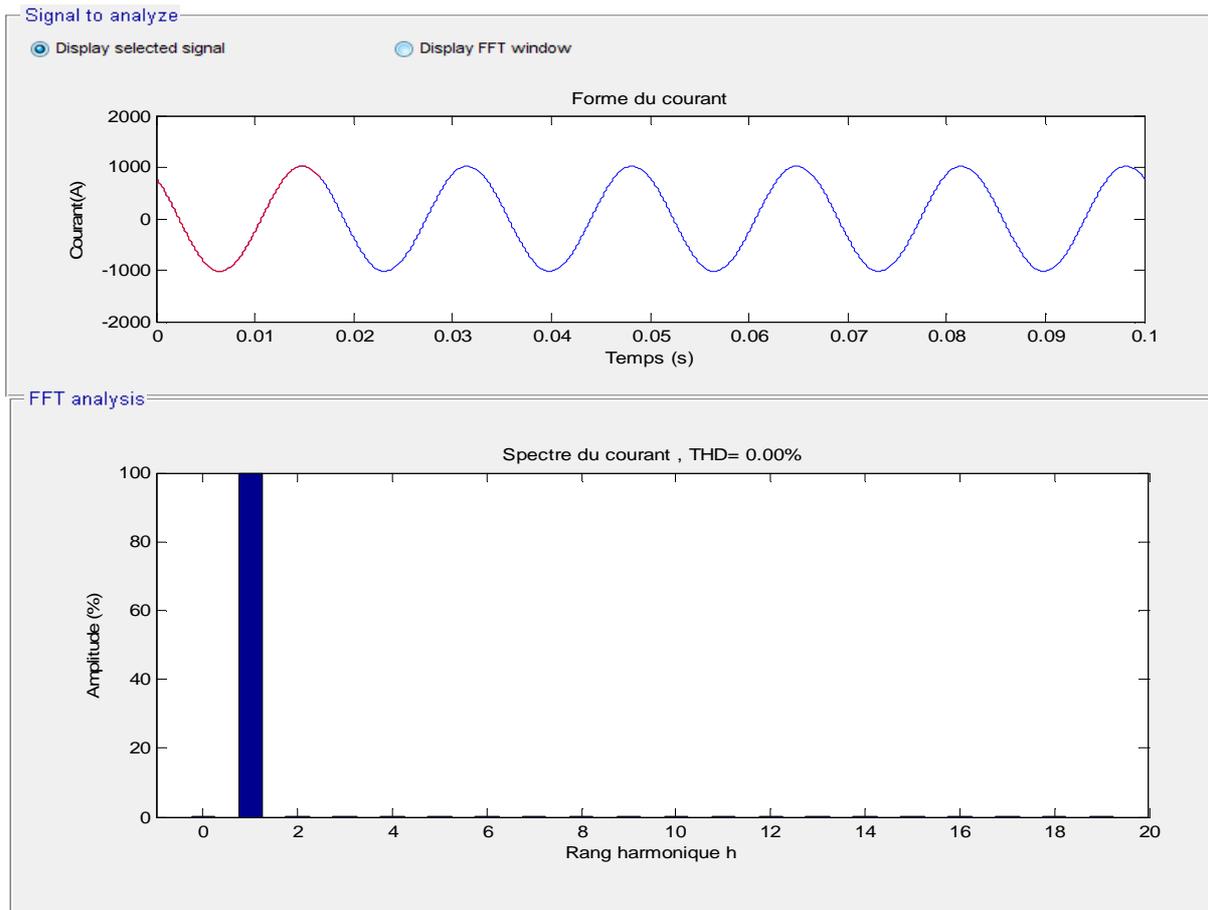




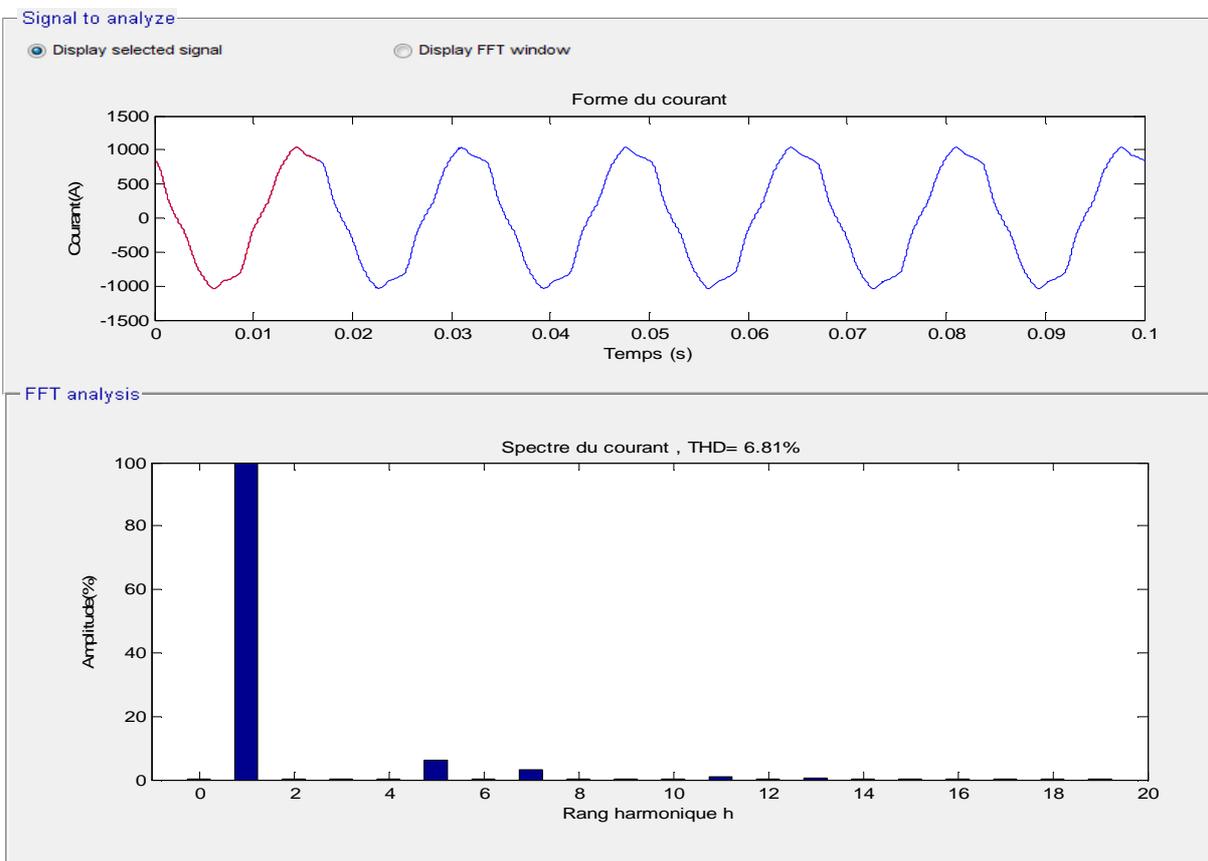
Jeu de barres 9 : (avec charge polluante)



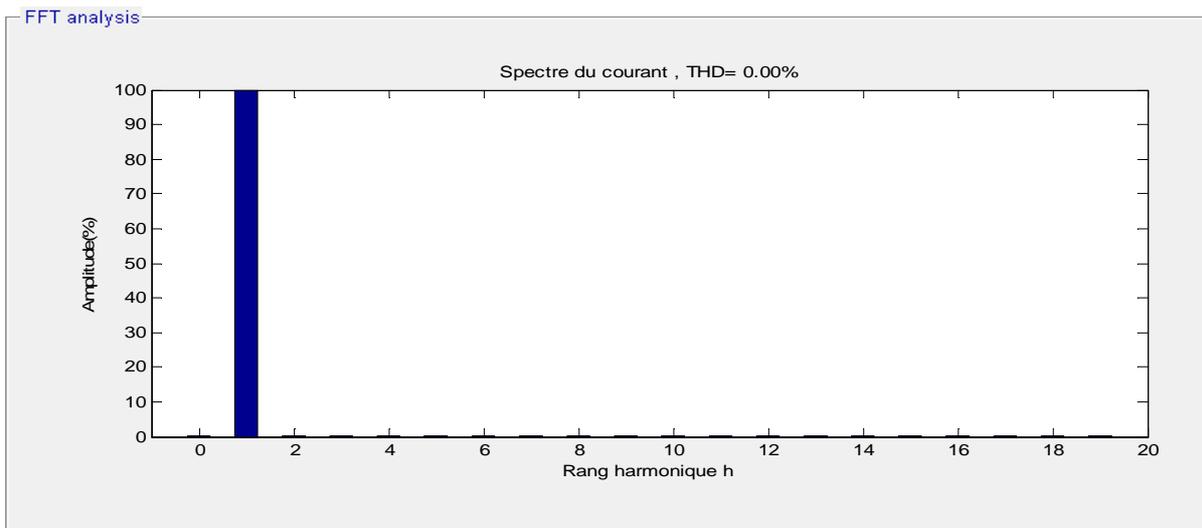
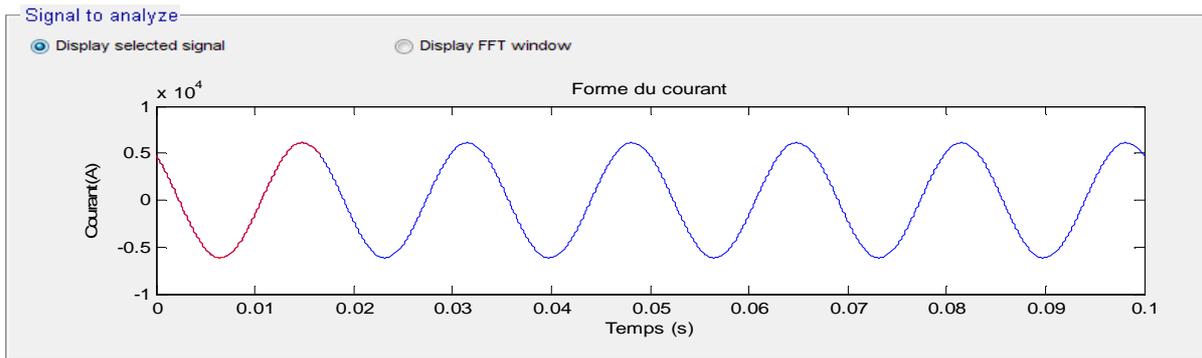
Jeu de barres 10 : (sain)



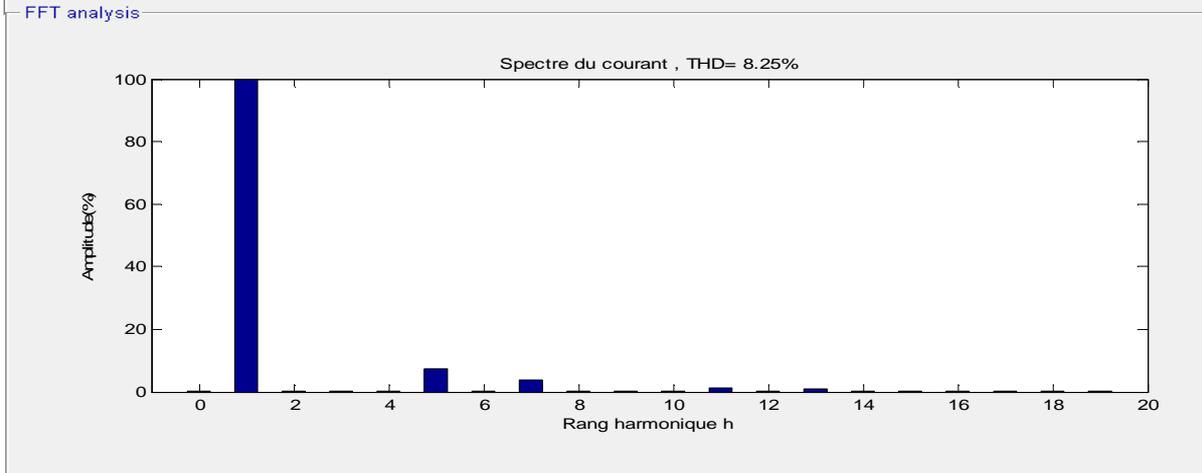
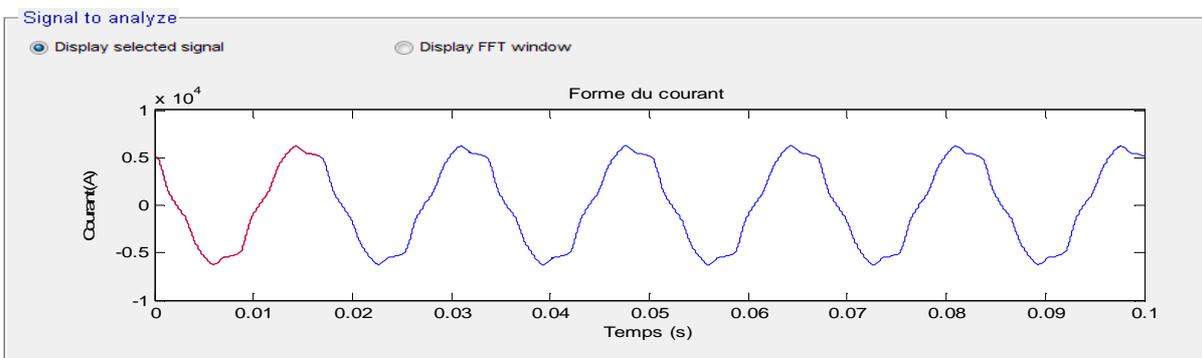
Jeu de barres 10 : (avec charge polluante)



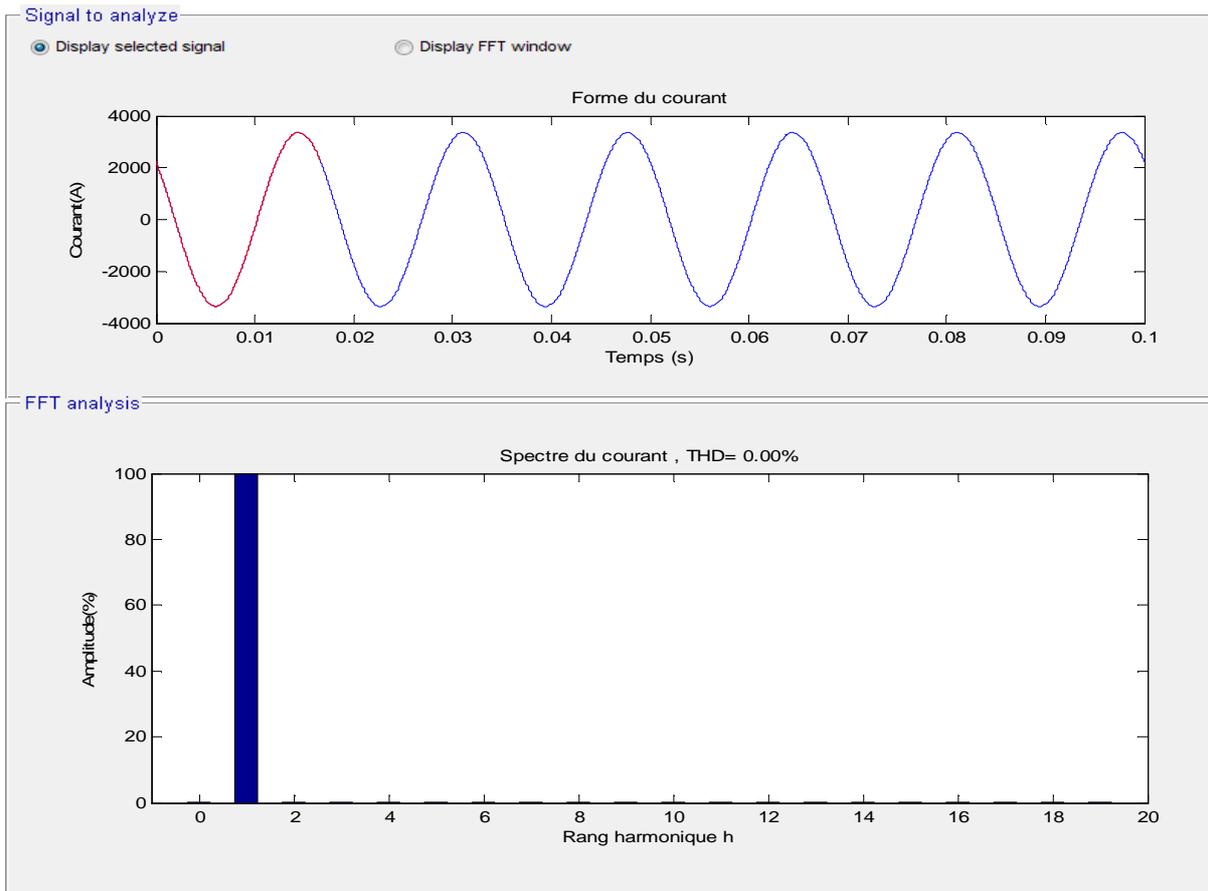
Jeu de barres 11 : (sain)



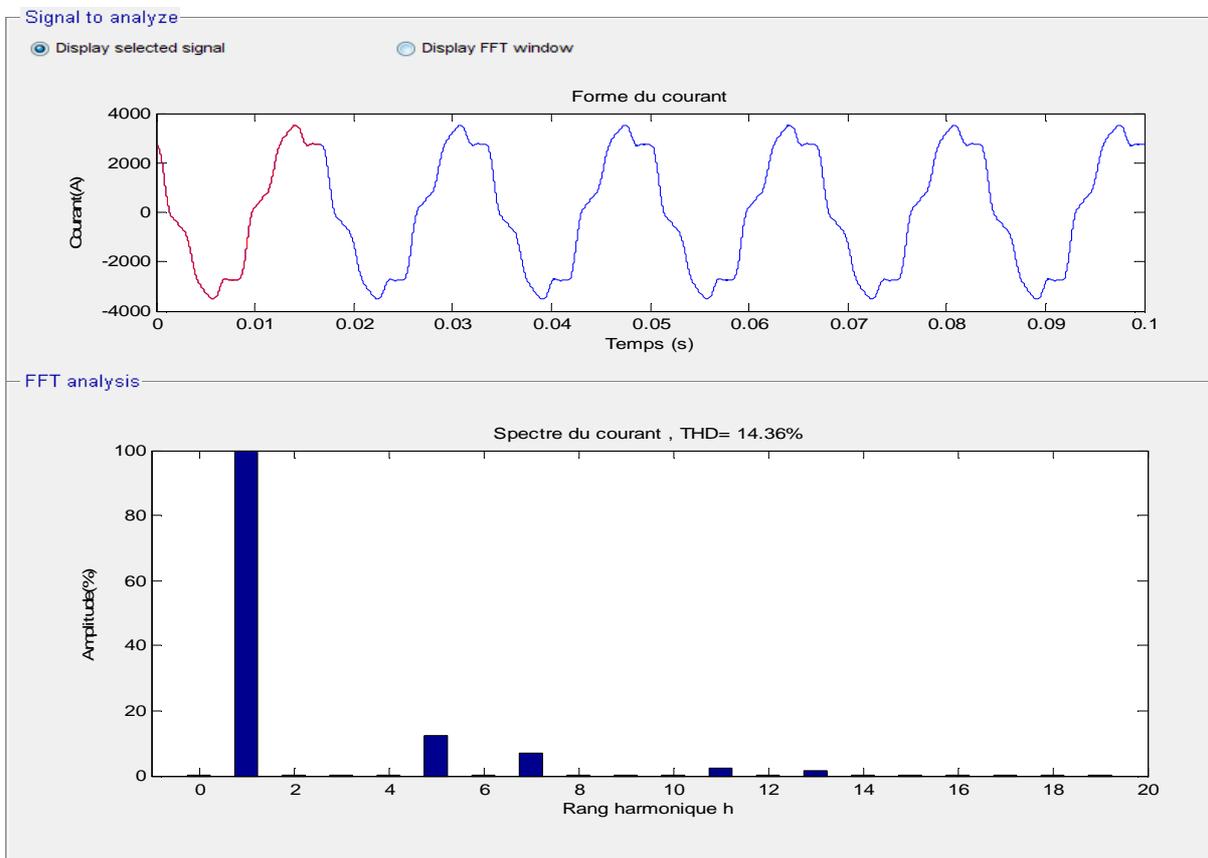
Jeu de barres 11 : (avec charge polluante)



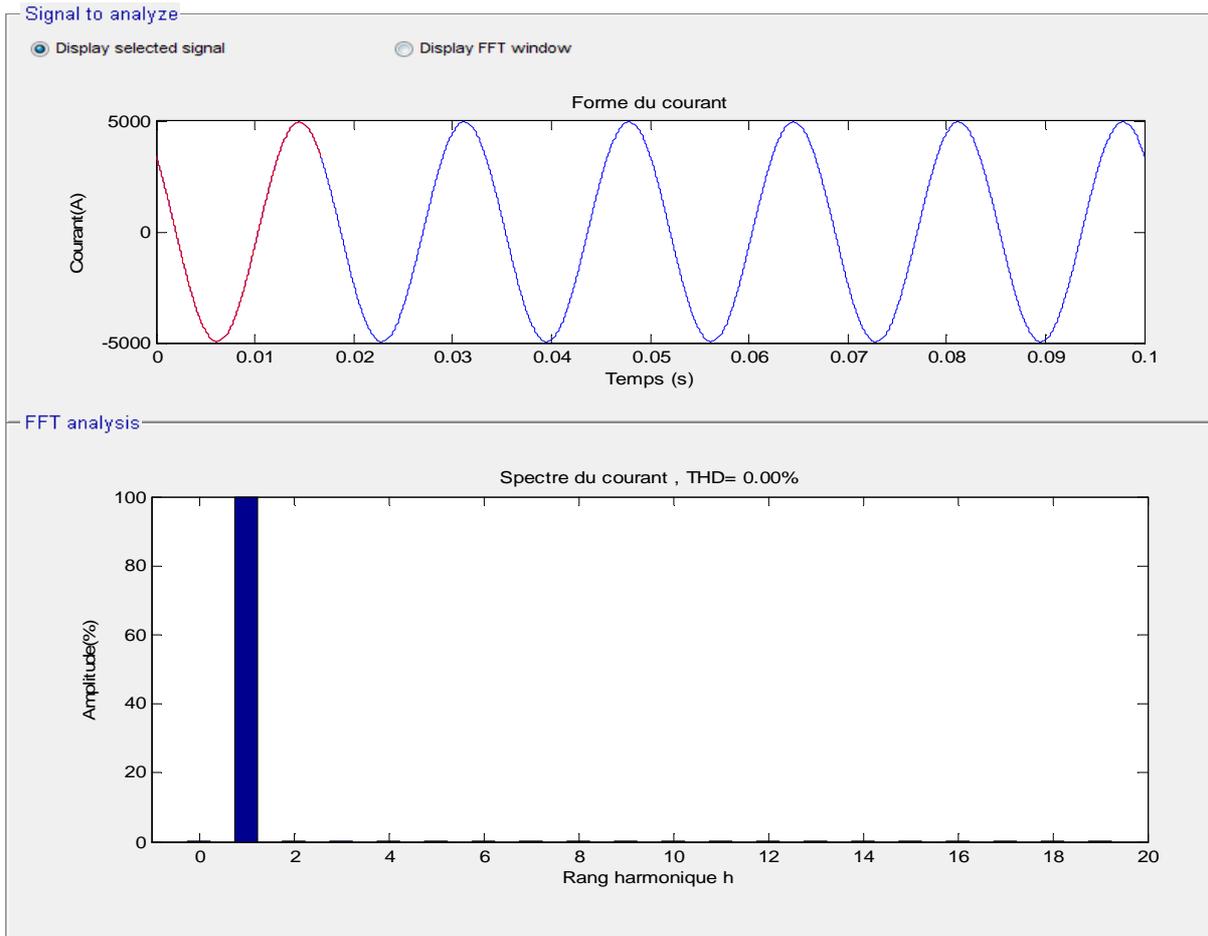
Jeu de barres 12 : (sain)



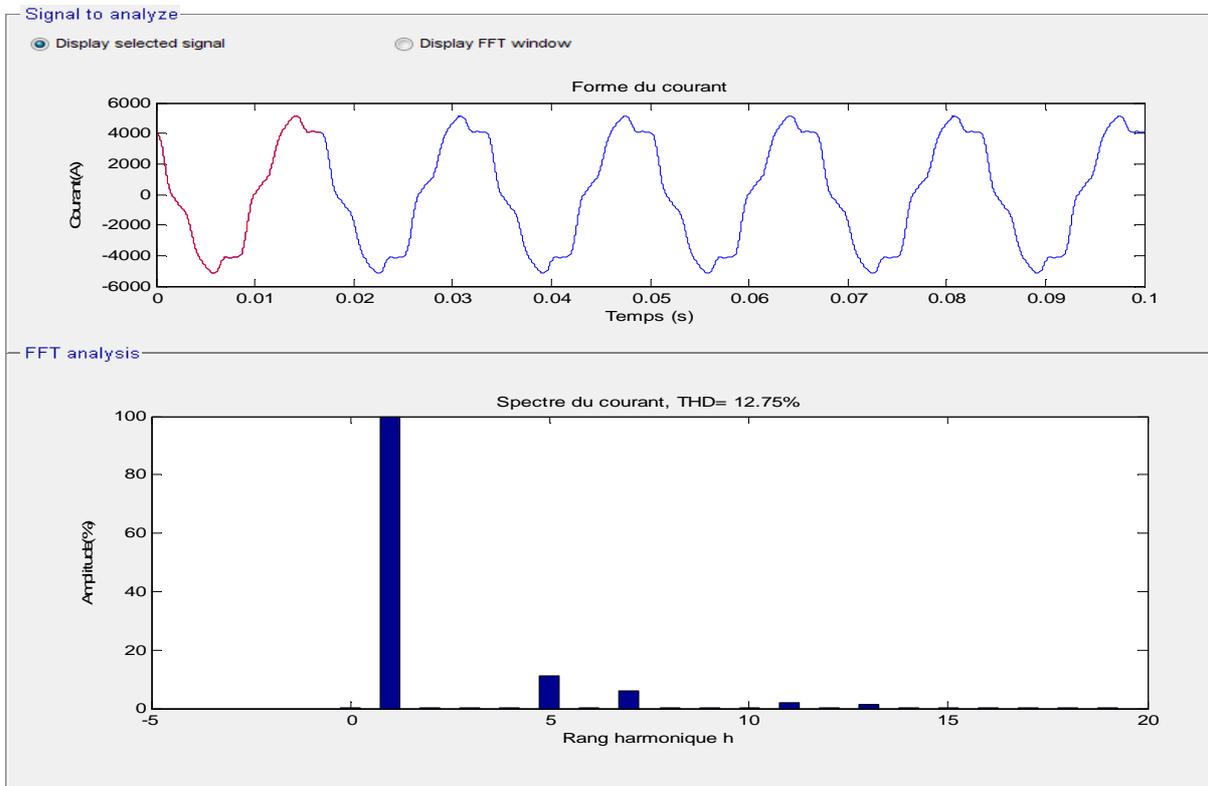
Jeu de barres 12 : (avec charge polluante)



Jeu de barres 13 : (sain)

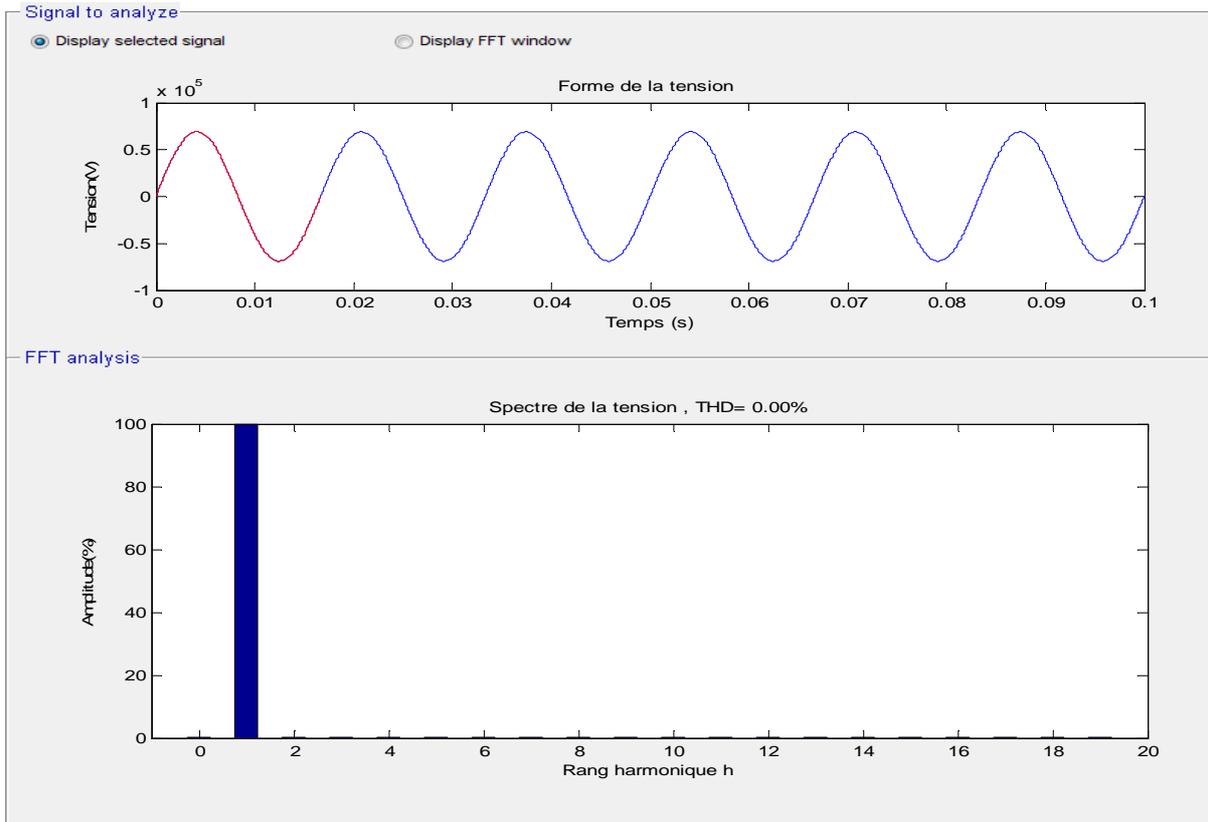


Jeu de barres 13 : (avec charge polluante)

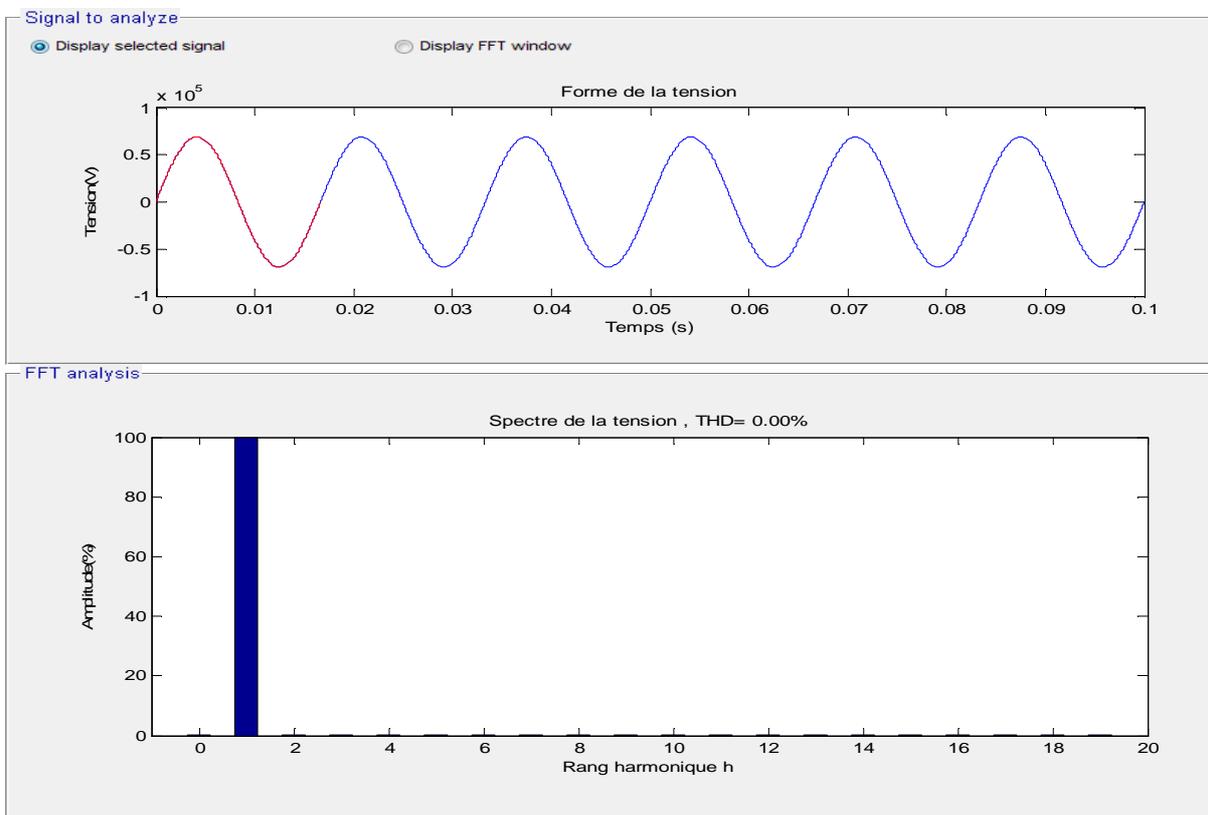


IV.4. Les relevés des tensions et des taux de distorsion harmonique en tension  $TDH_v$  pour tous les jeux de barres :

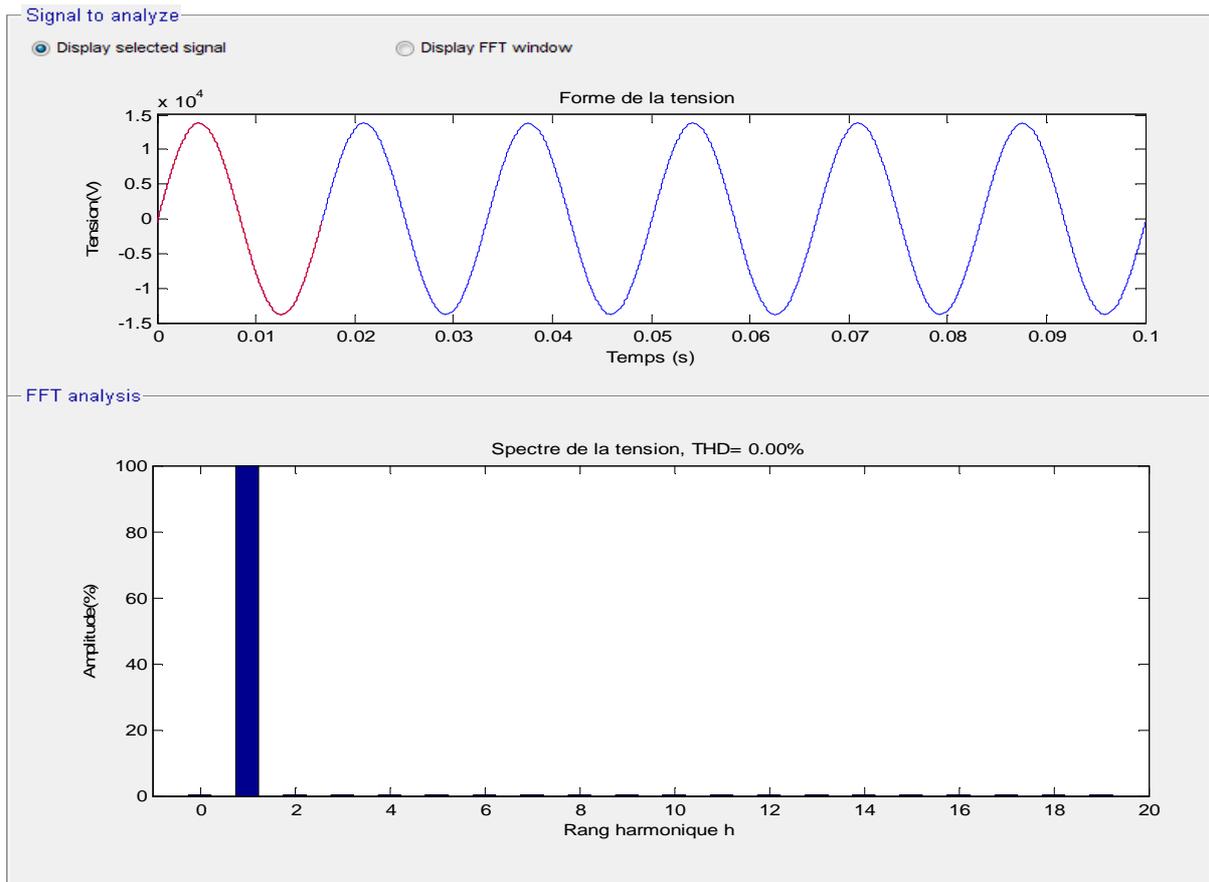
Jeu de barres 1 : (sain)



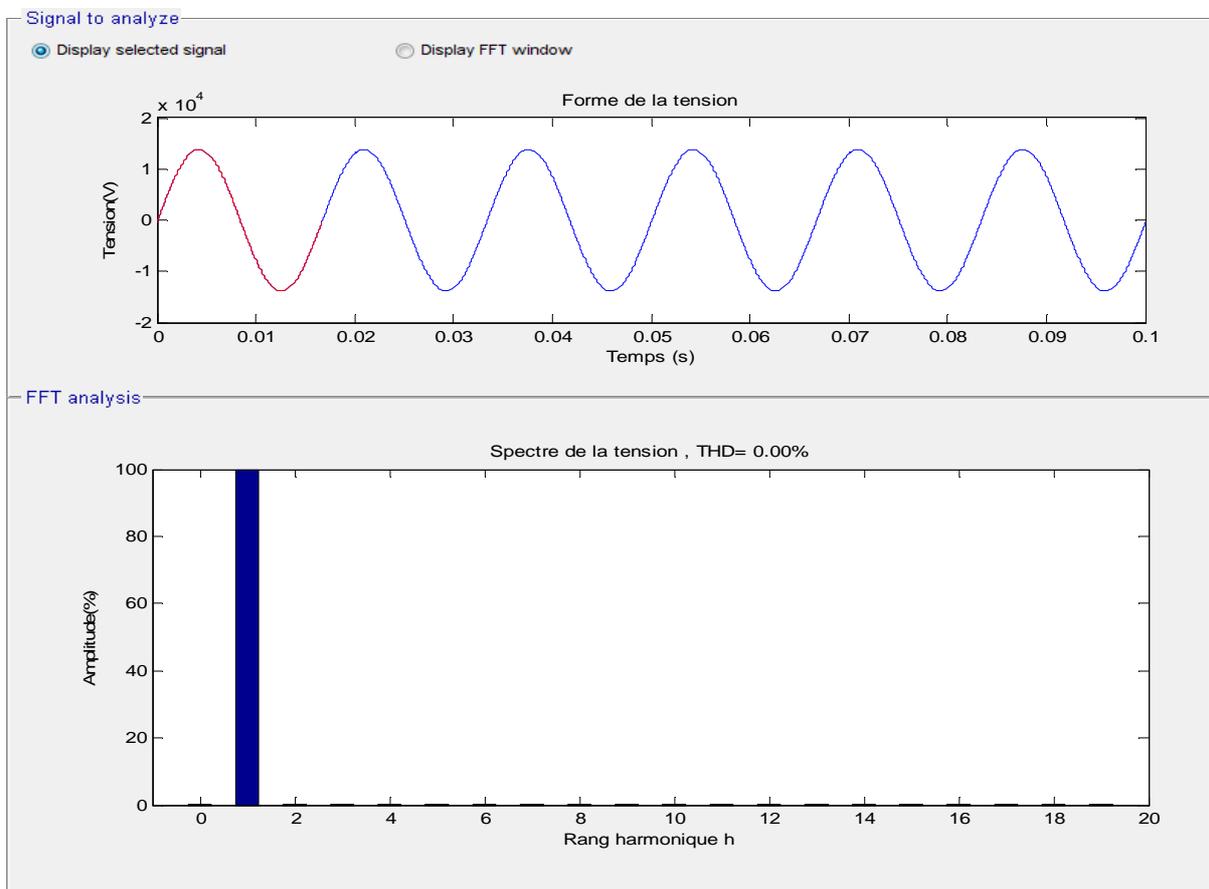
Jeu de barres 1 : (avec charge polluante)



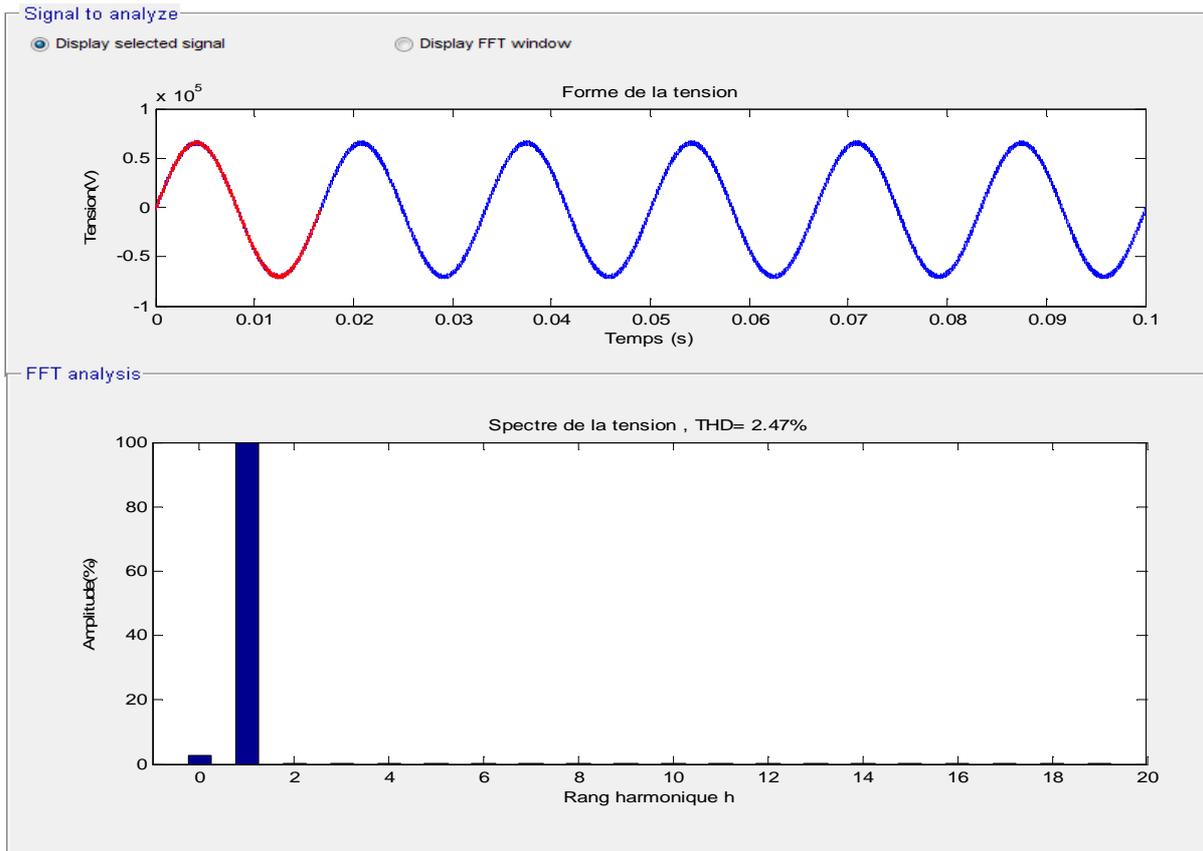
Jeu de barres 2 : (sain)



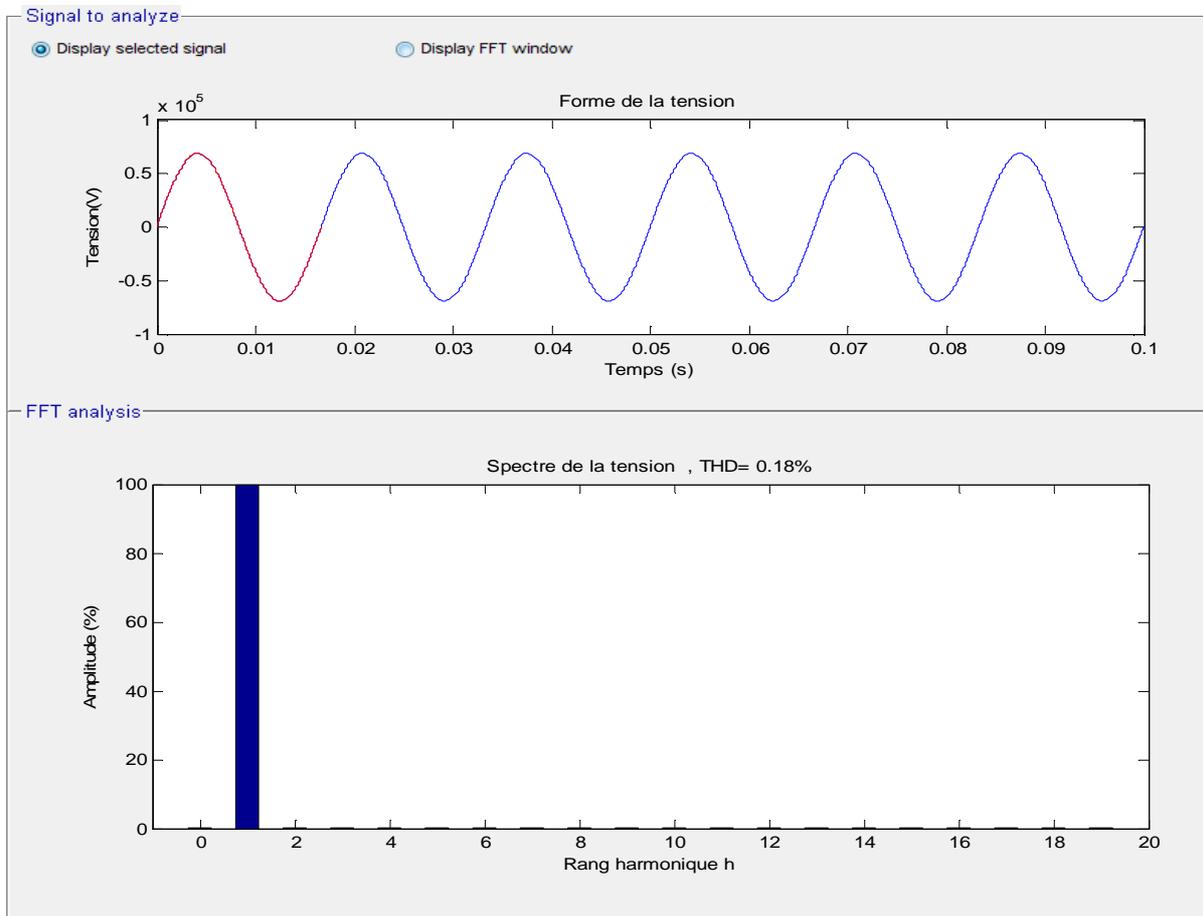
Jeu de barres 2 : (avec charge polluante)



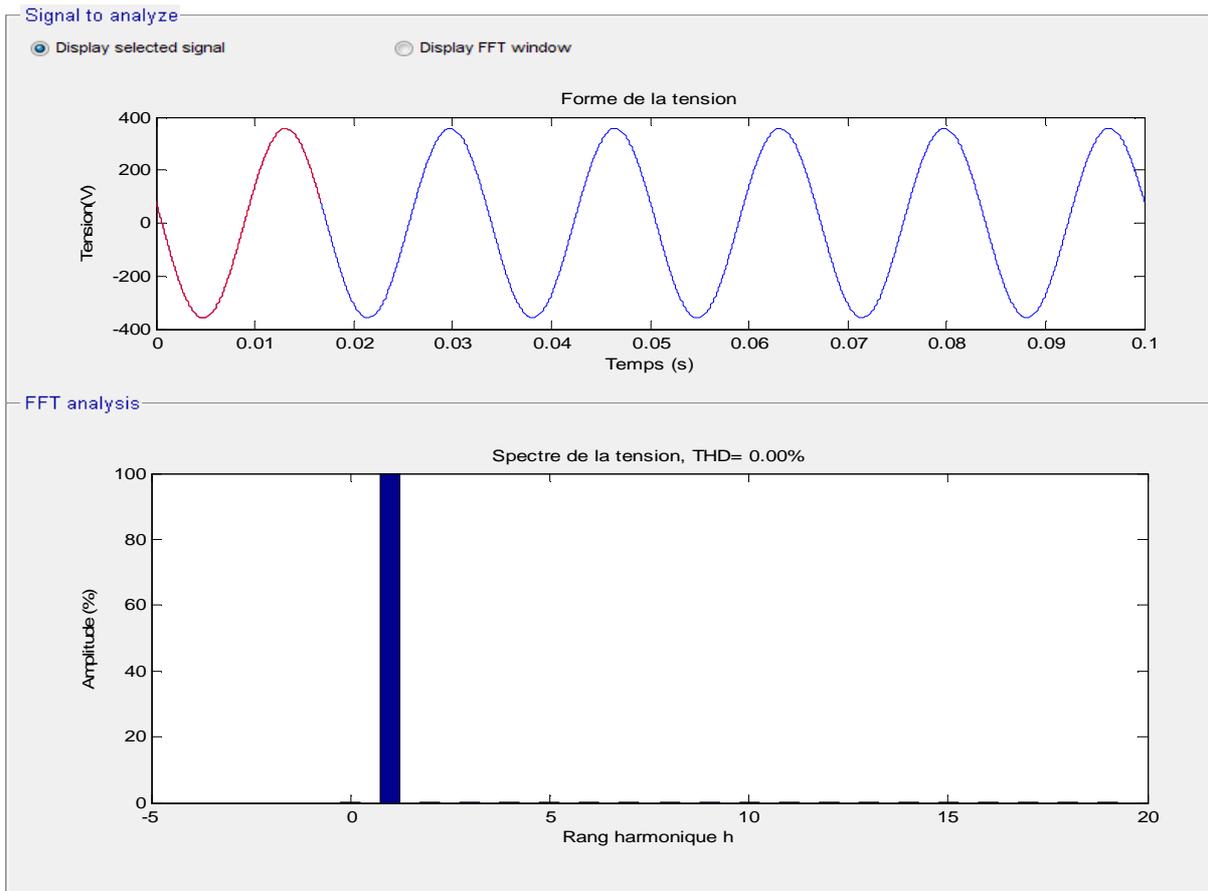
Jeu de barres 3 : (sain)



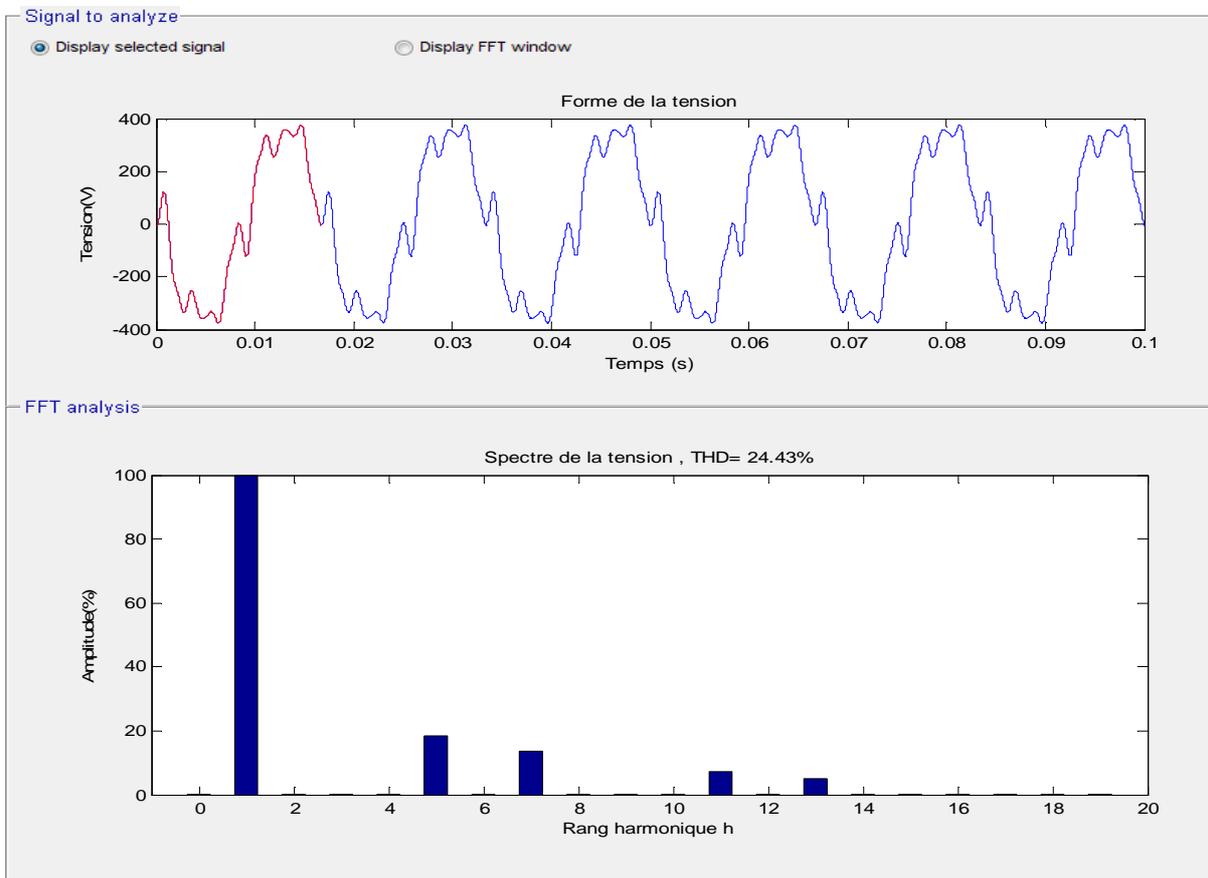
Jeu de barres 3 : (avec charge polluante)



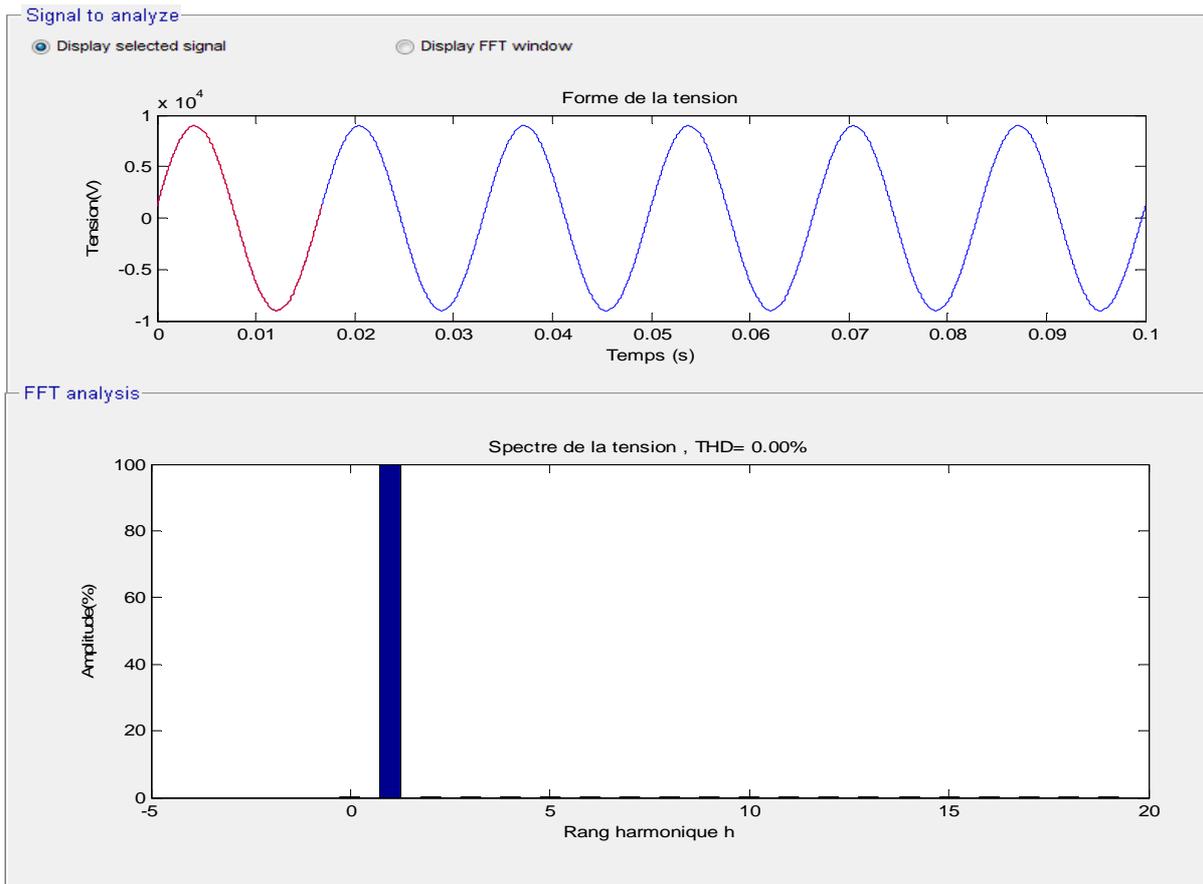
Jeu de barres 4 : (sain)



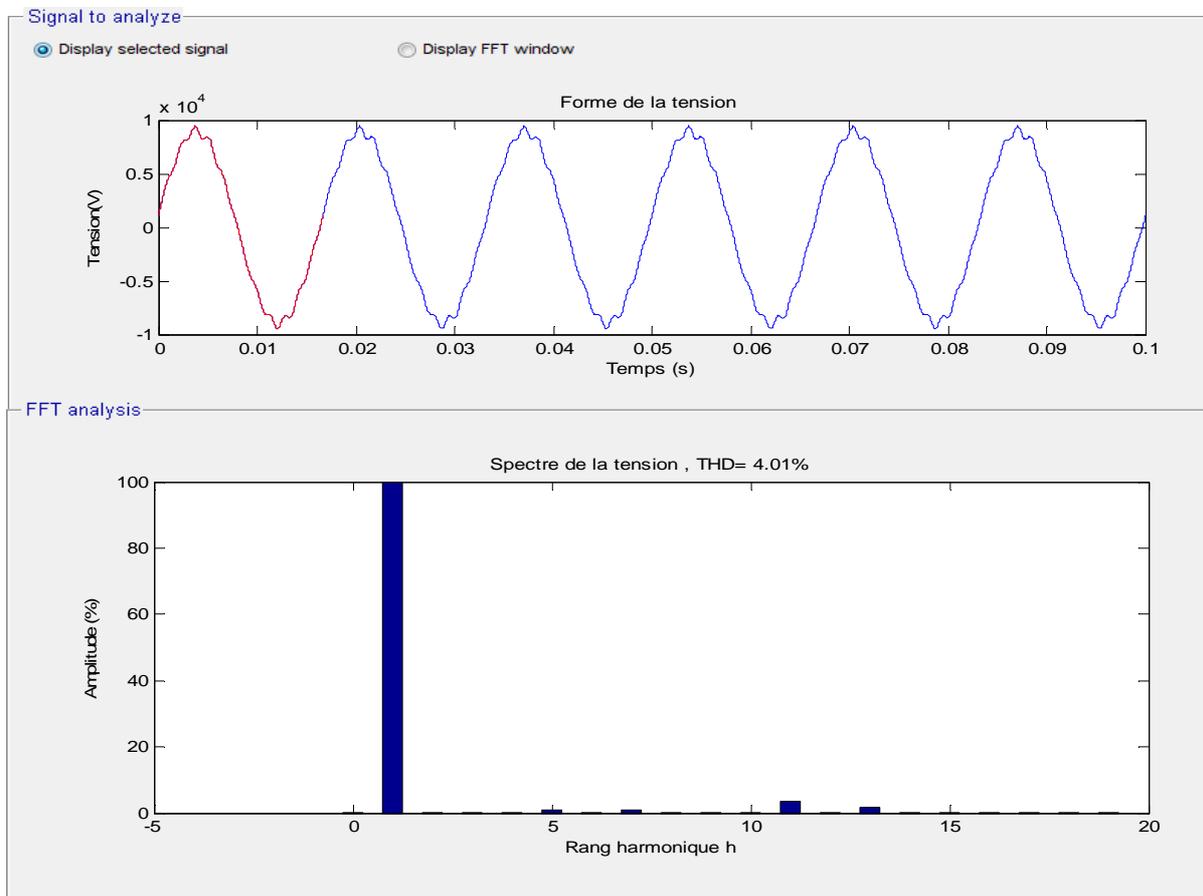
Jeu de barres 4 : (avec charge polluante)

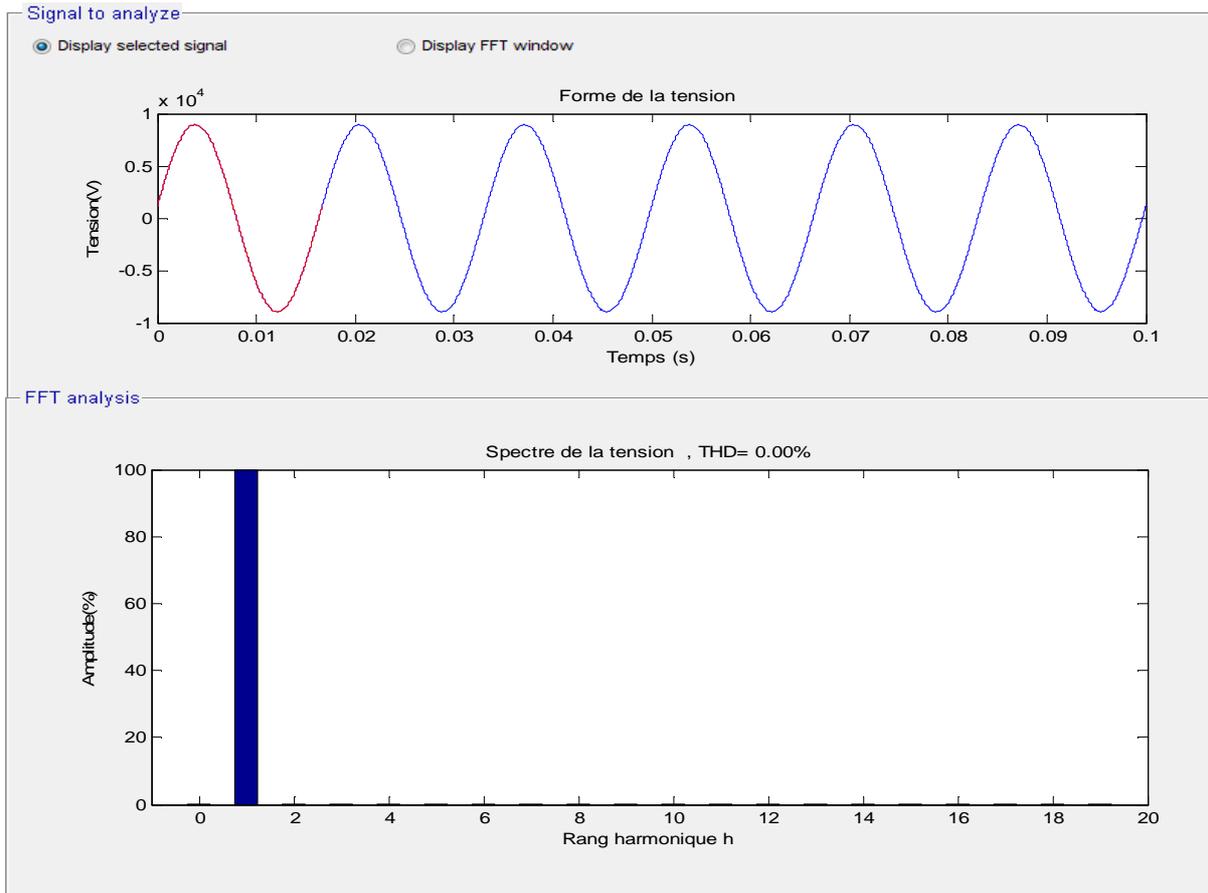


Jeu de barre 5 : (sain)

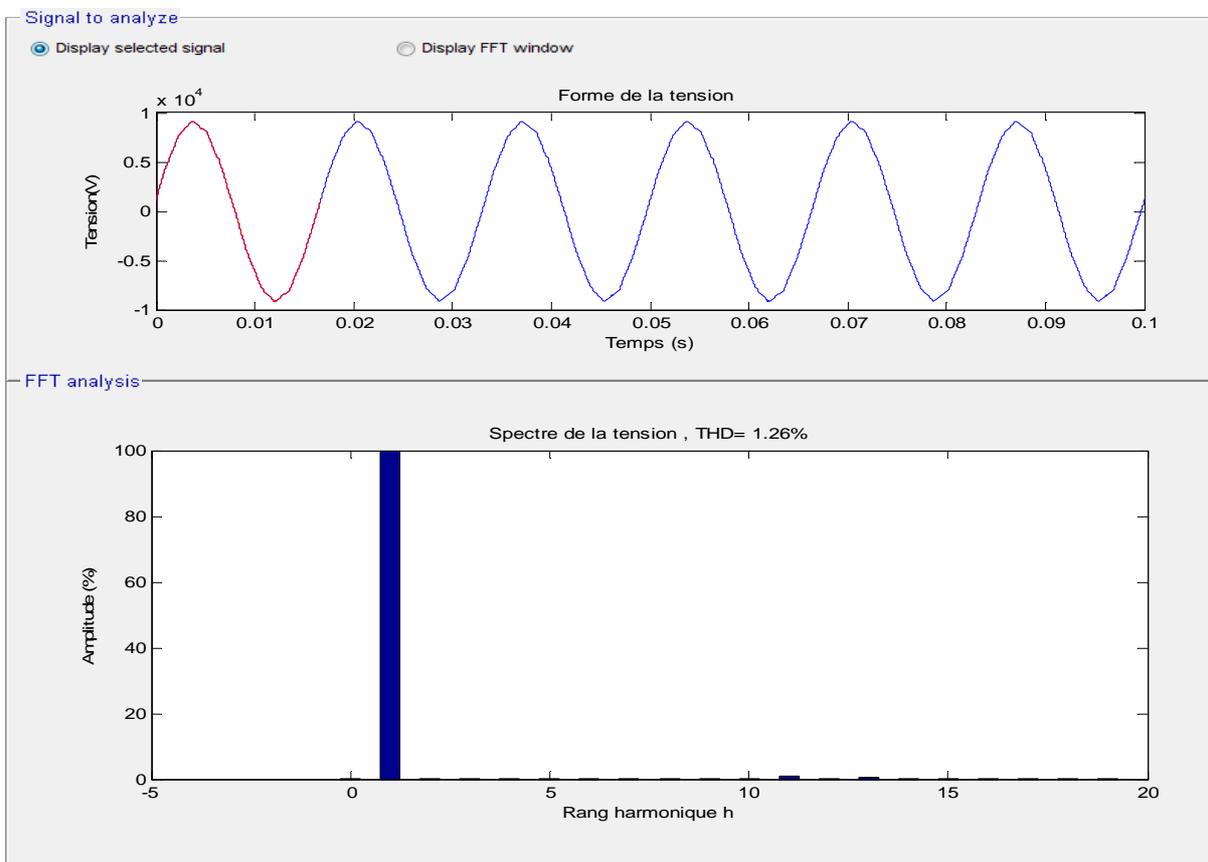


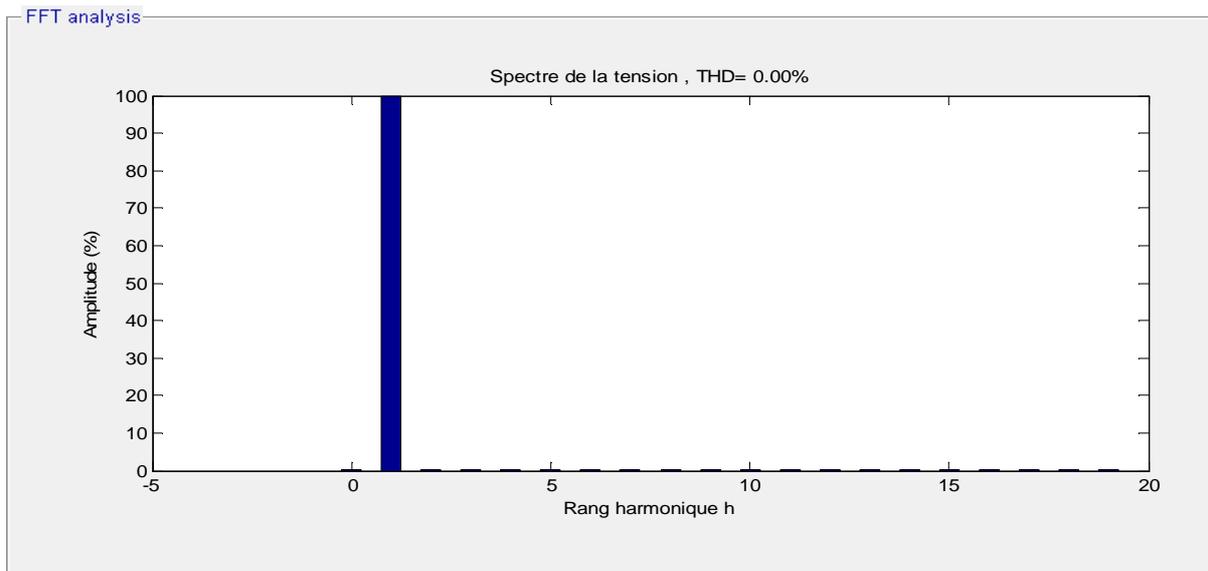
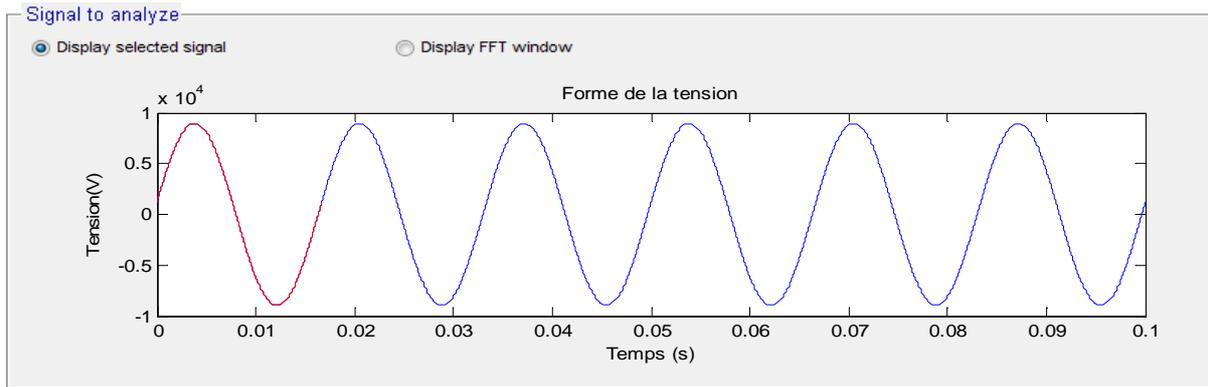
Jeu de barres 5 : (avec charge polluante)



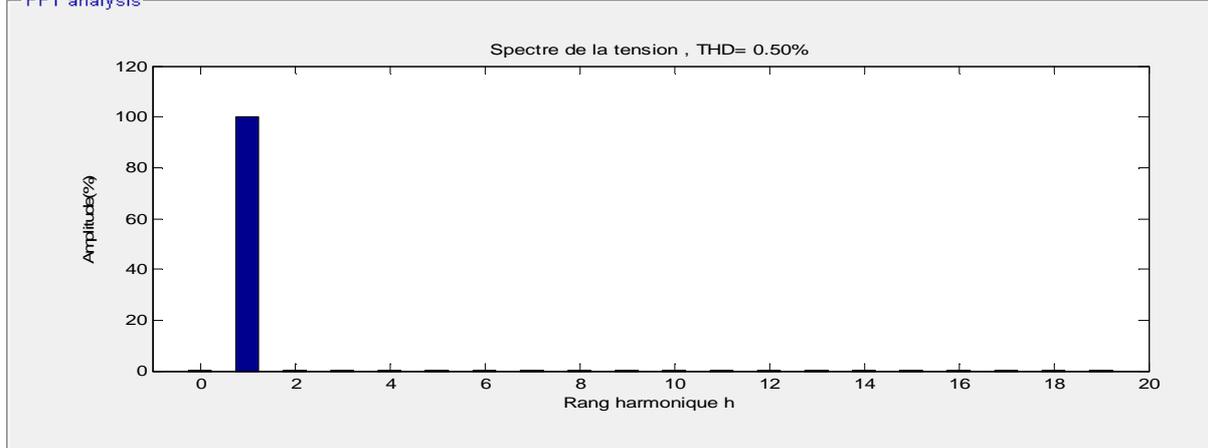
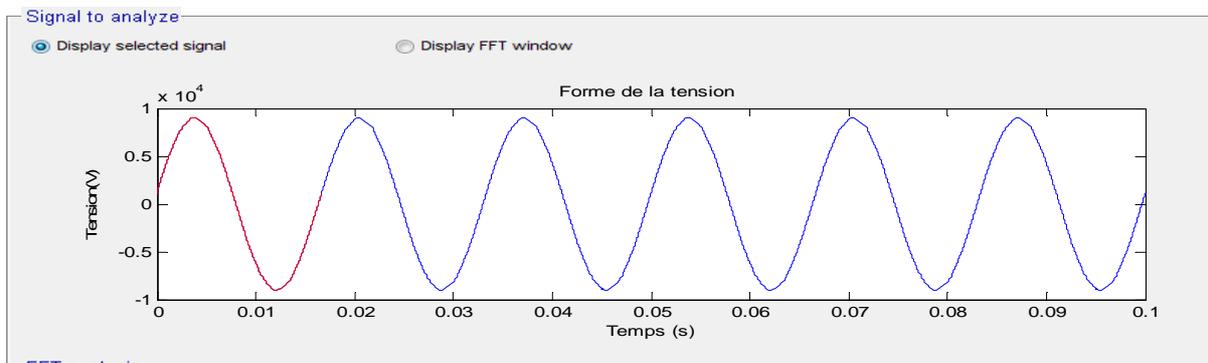


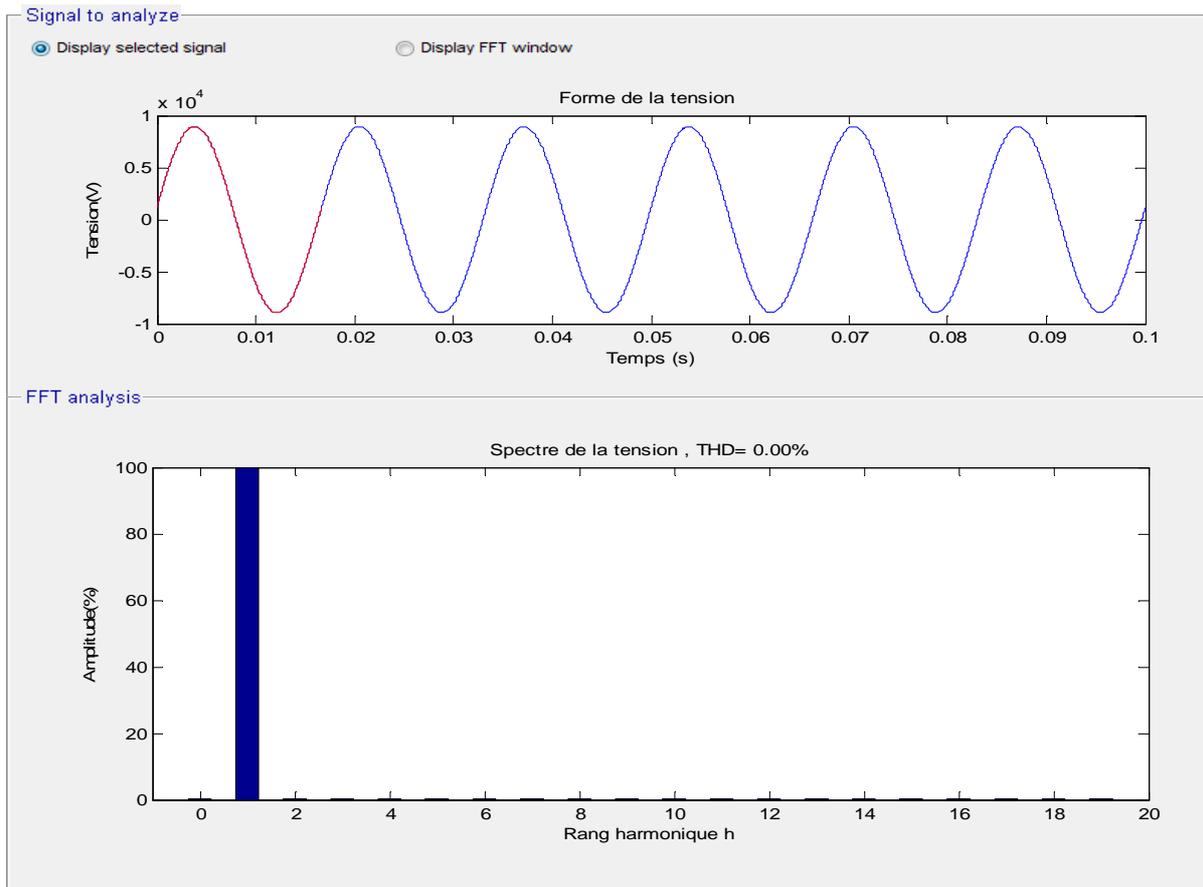
Jeu de barre 6 : (avec charge polluante)



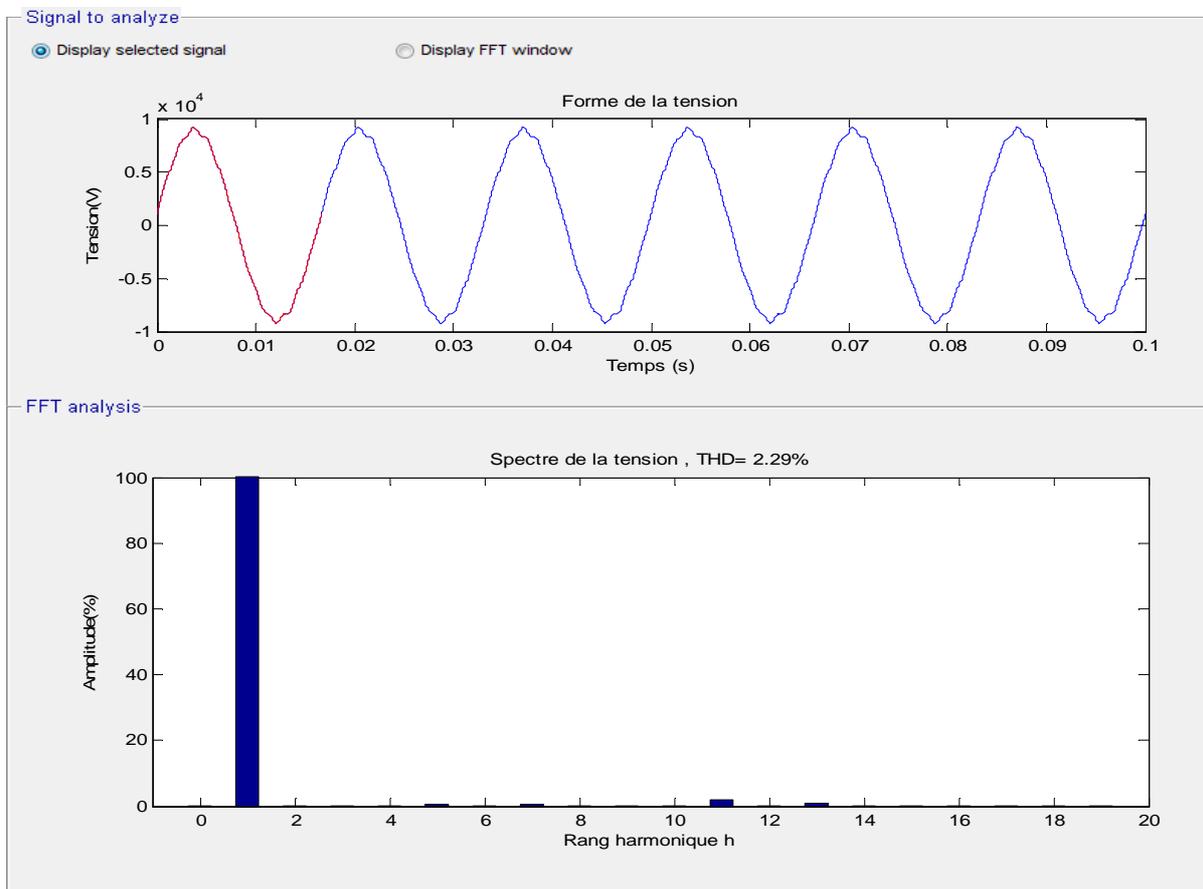


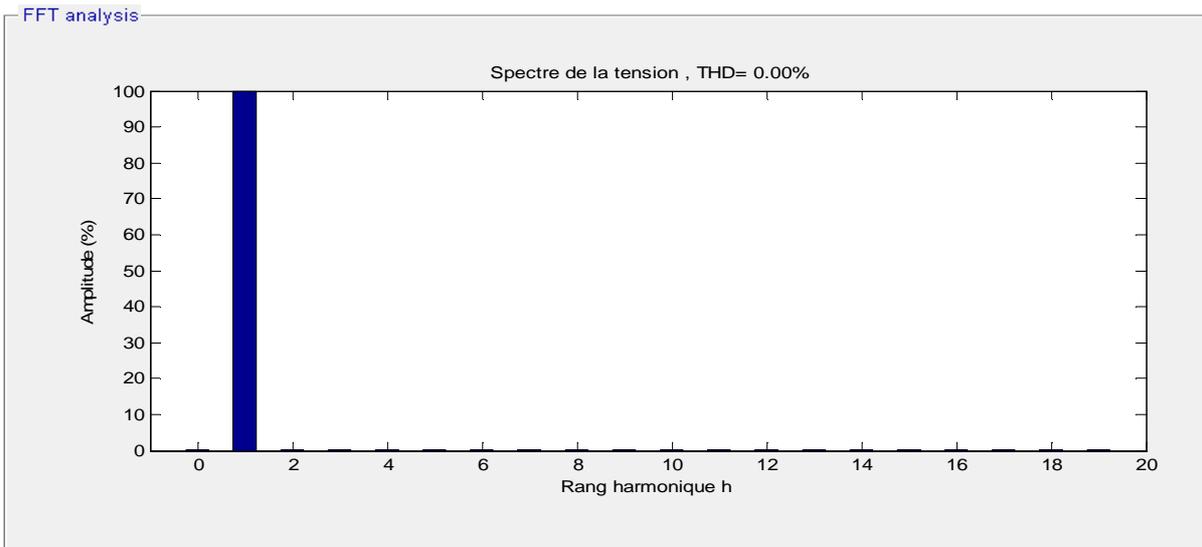
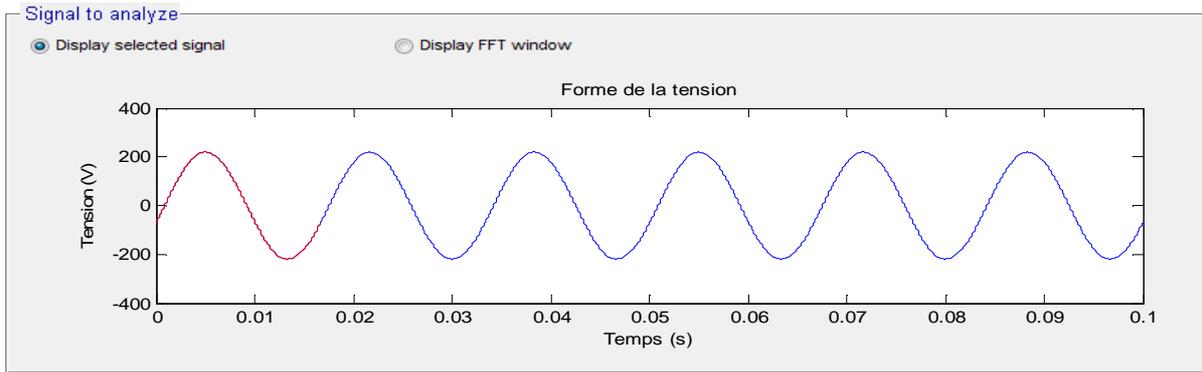
Jeu de barres 7 : (avec charge polluante)



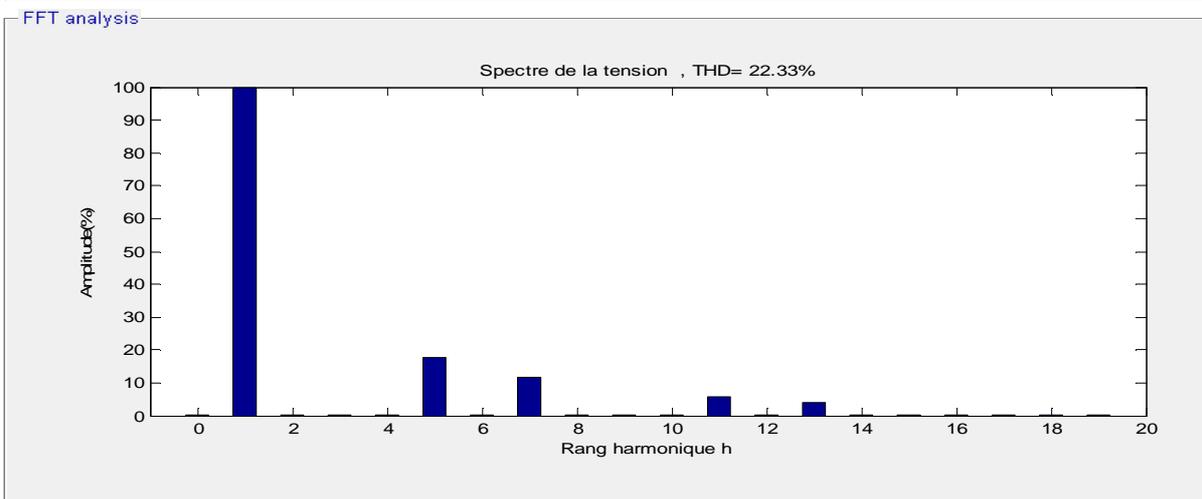
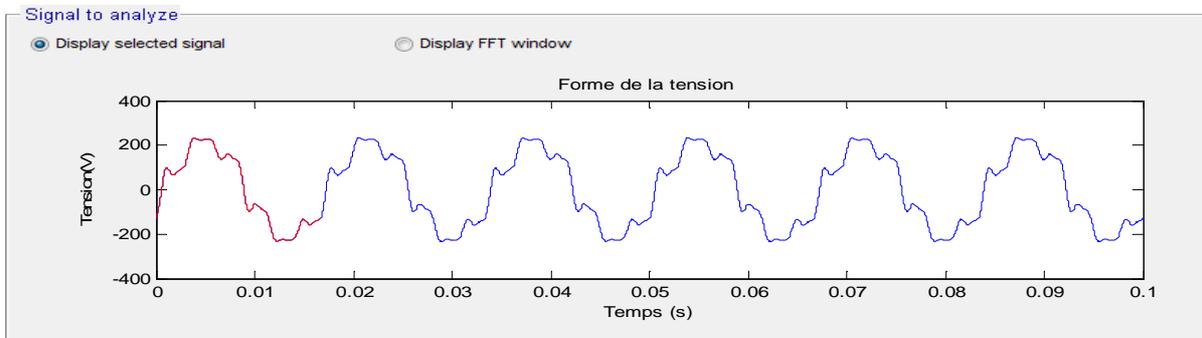


Jeu de barres 8 : (avec charge polluante)

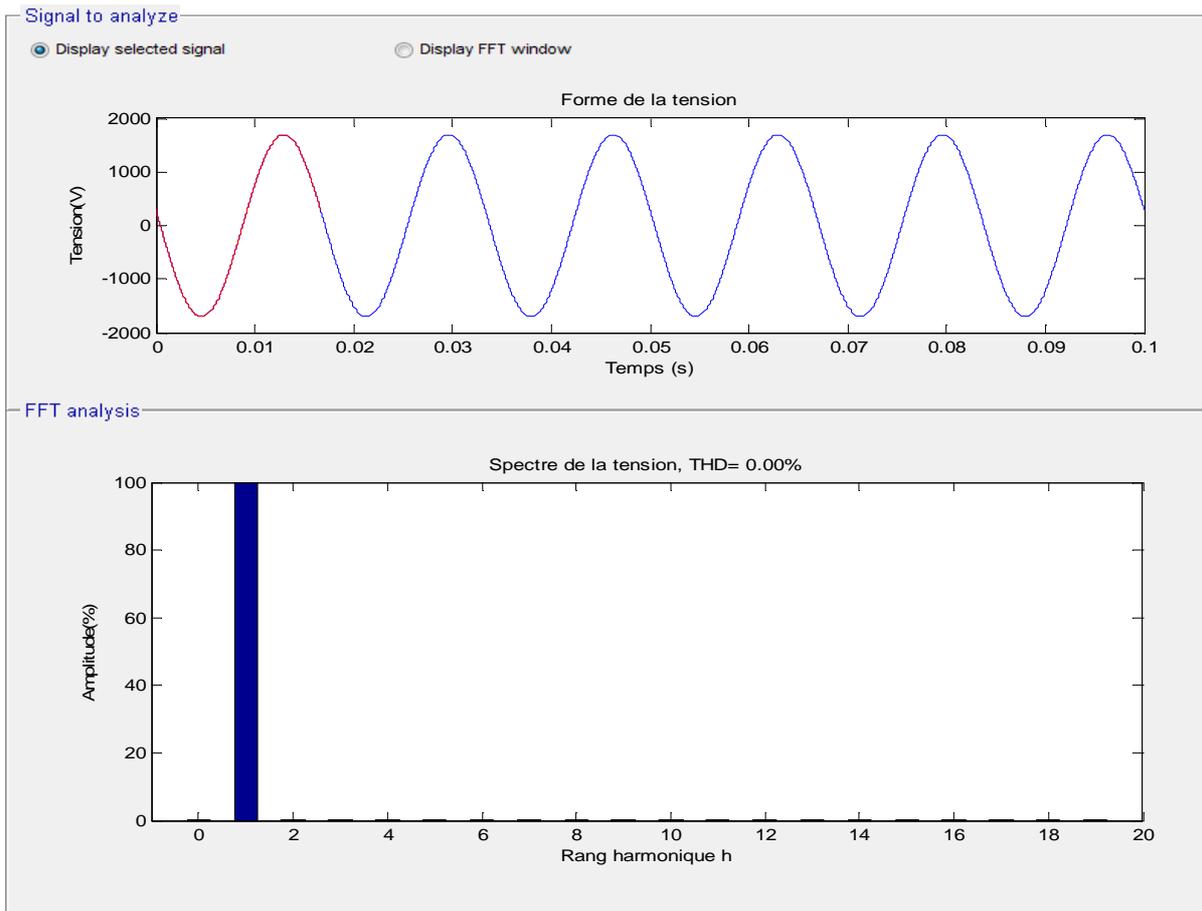




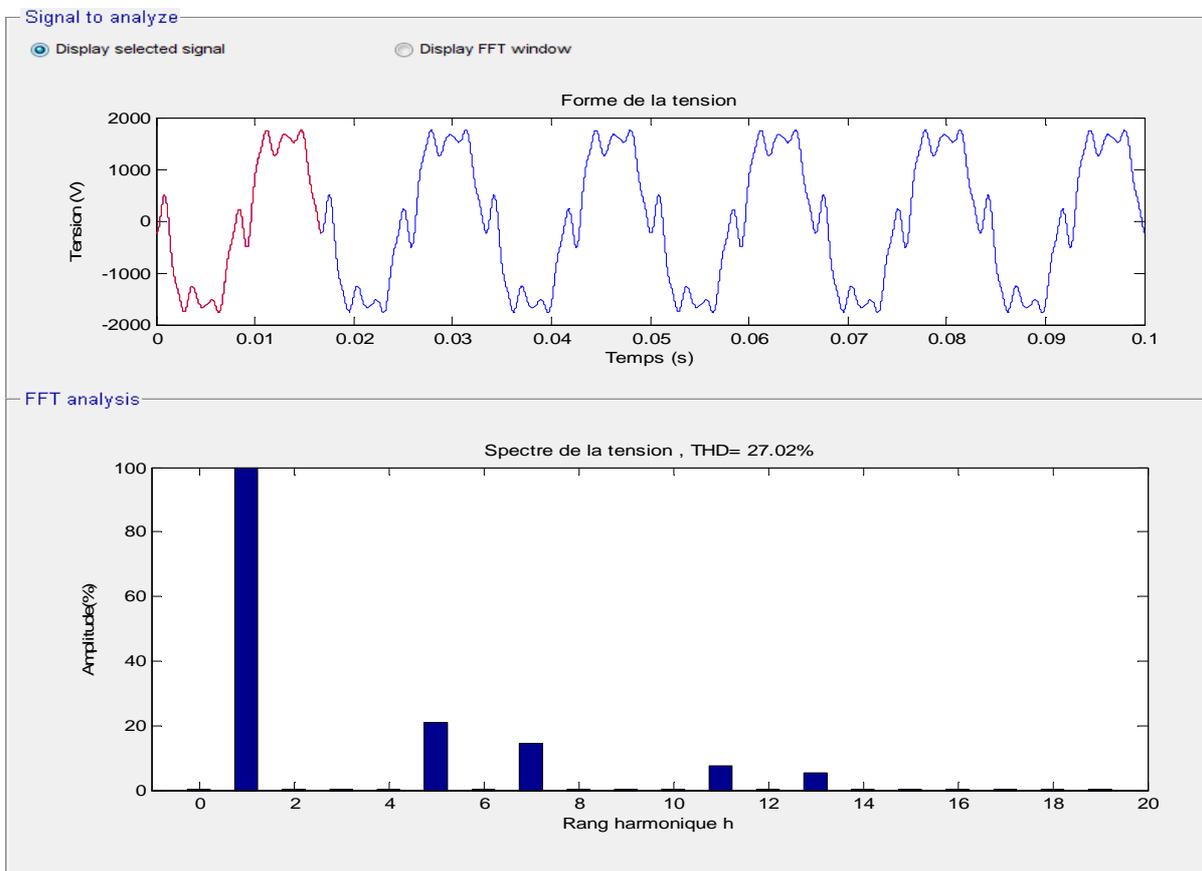
**Jeu de barres 9 : (avec charge polluante)**



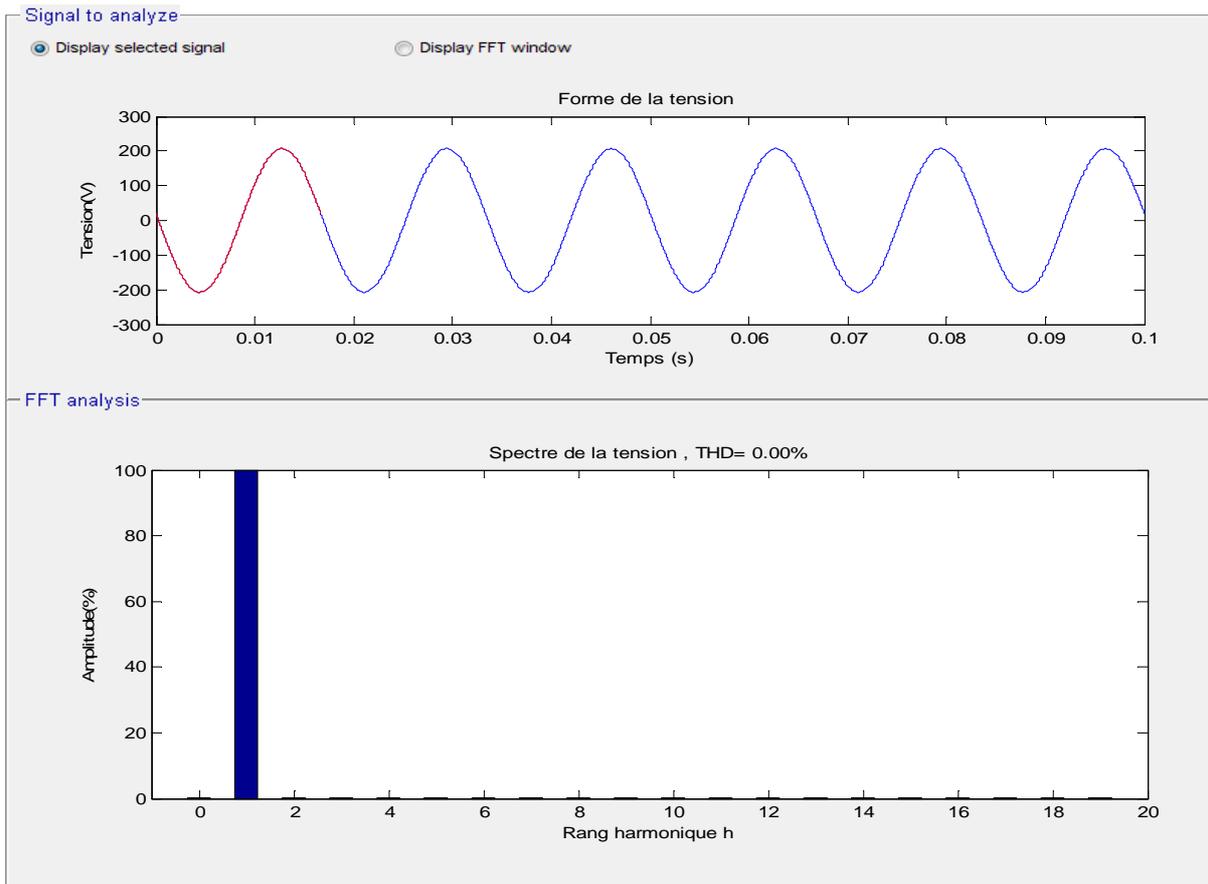
Jeu de barres 10 : (sain)



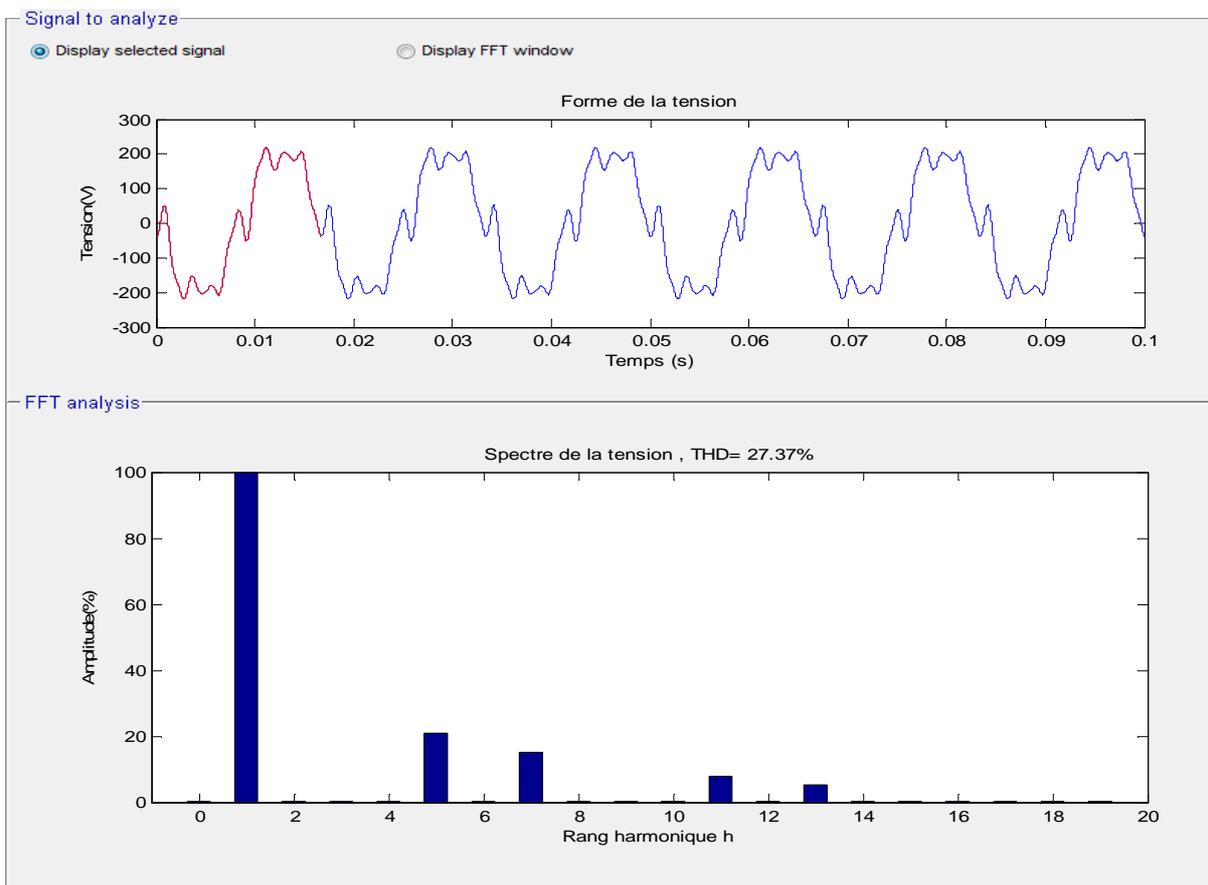
Jeu de barres 10 : (avec charge polluante)



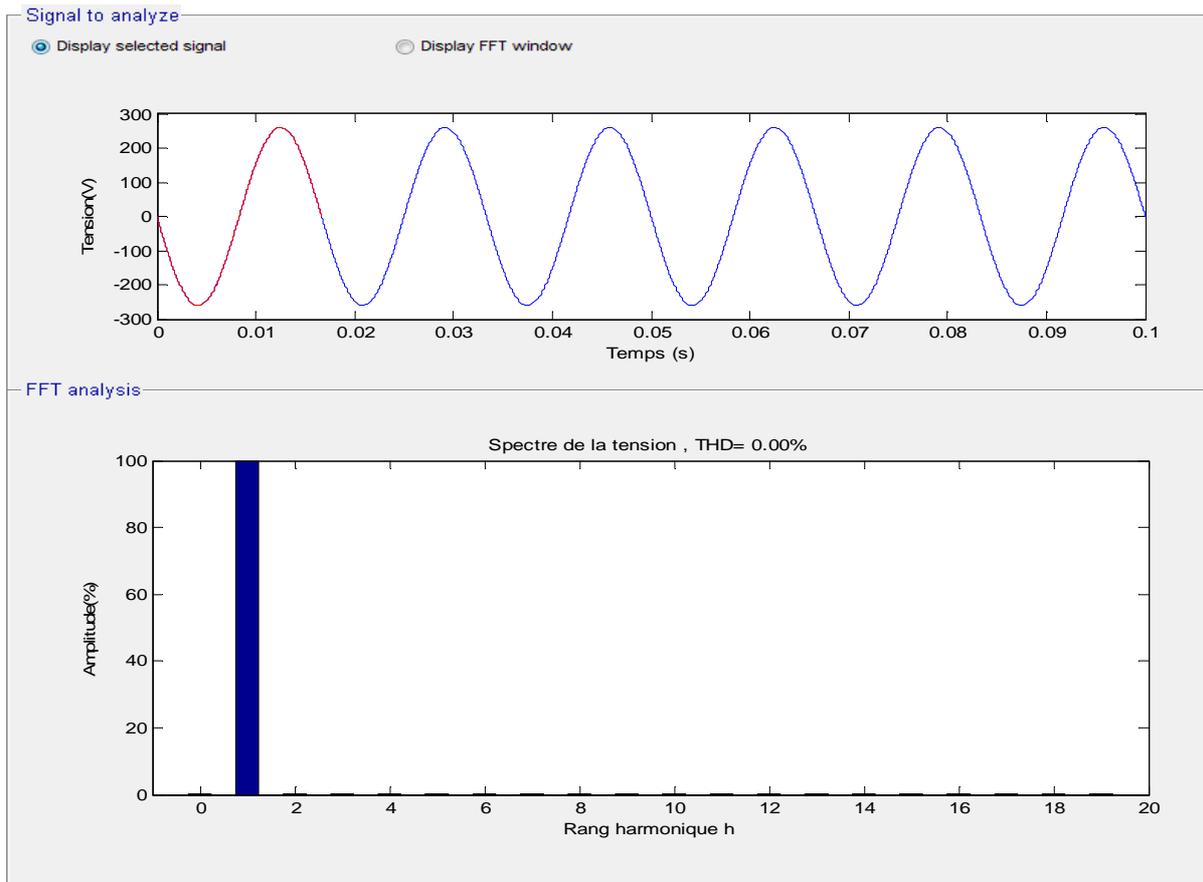
Jeu de barres 11 : (sain)



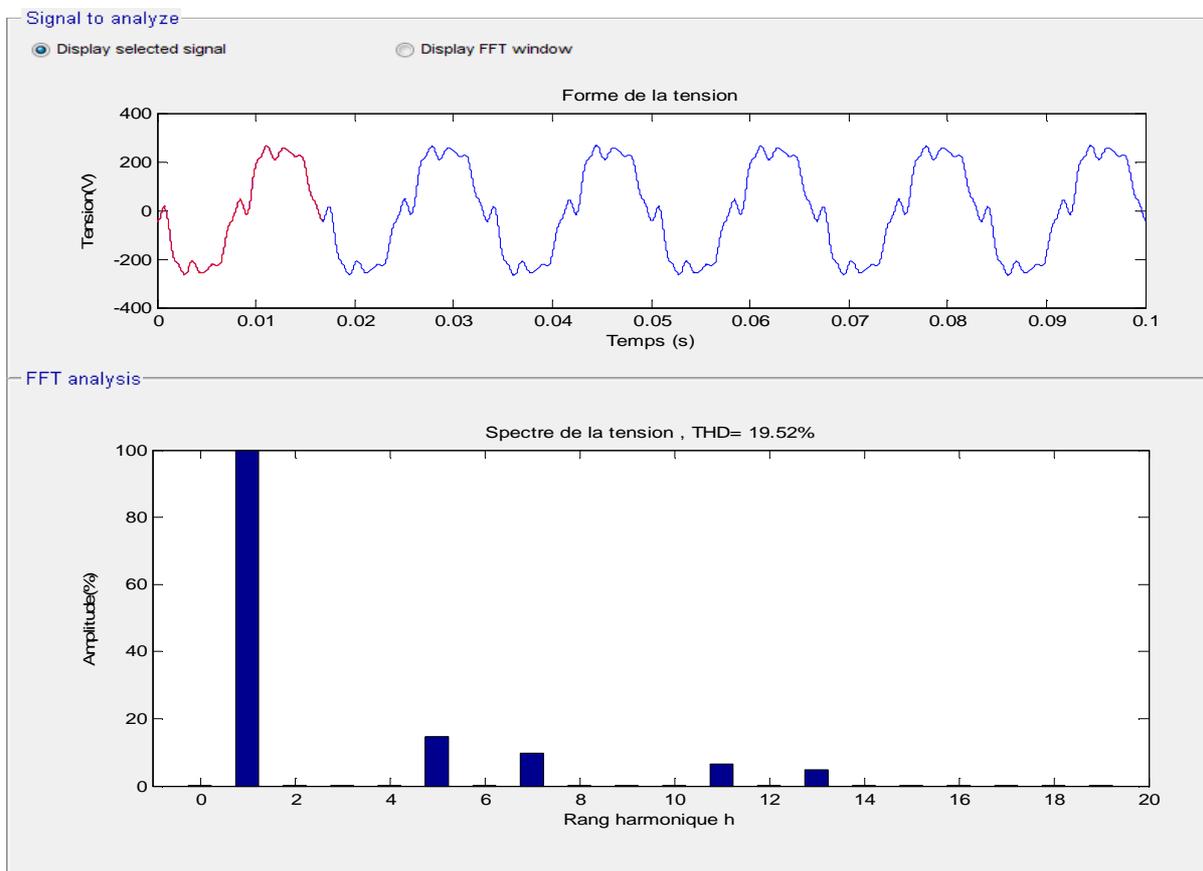
Jeu de barres 11 : (avec charge polluante)



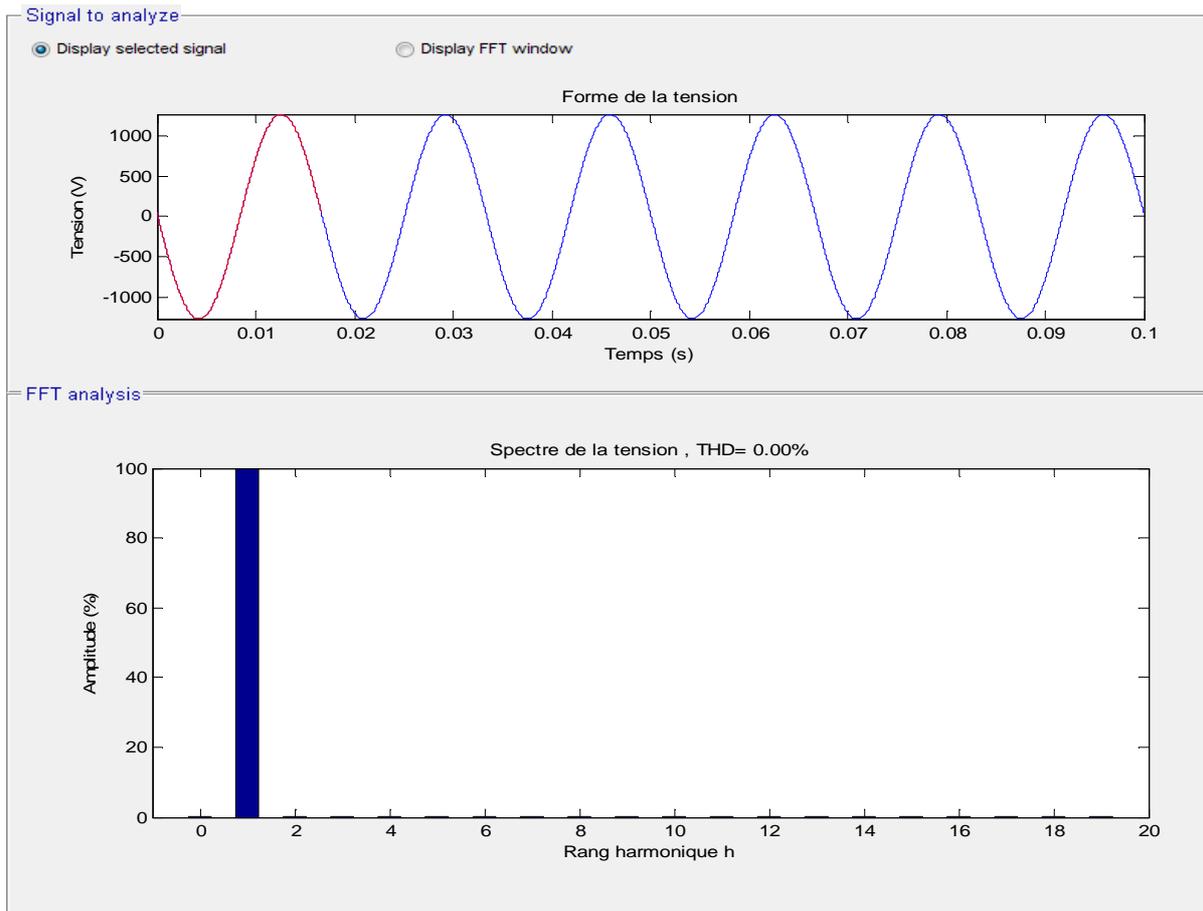
Jeu de barres 12 : (sain)



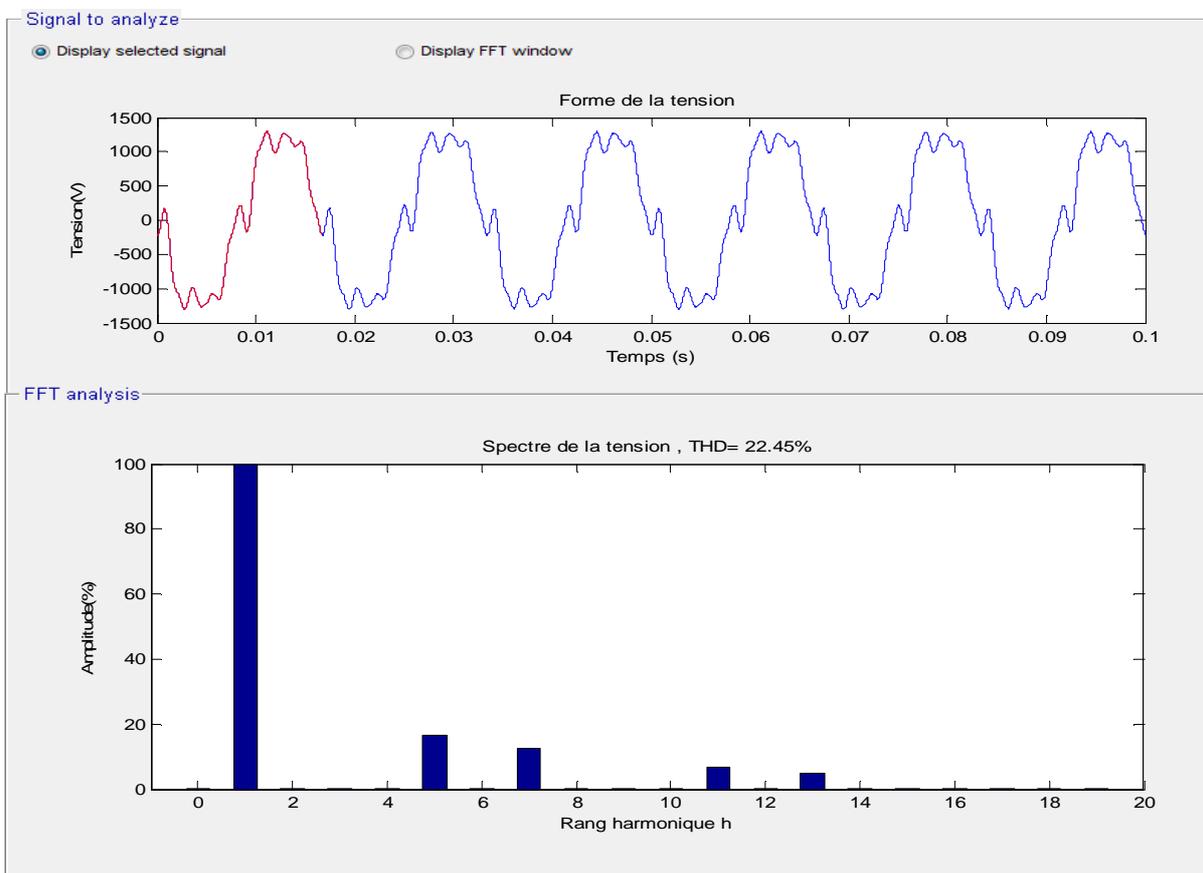
Jeu de barres 12 : (avec charge polluante)



Jeu de barres 13 : (sain)



Jeu de barres 13 : (avec charge polluante)



**IV-5- Discussion des résultats :****❖ Les courants du réseau sain :**

Dans tous les jeux de barres du réseau sain, la forme du signal courant est sinusoïdale, car leurs taux de distorsion harmonique en courant est nul (0.00 %).

**❖ Les courants du réseau pollué :**

Après l'injection de la charge polluante, la forme du signal courant est distordue, avec un taux de distorsion ( $TDH_i$ ) variant d'un jeu de barres à un autre.

Dans les jeux de barres (1, 2 et 3), le ( $TDH_i$ ) est presque identique et est égal à 22.87%, 22.86% et 22.71% respectivement, cette distorsion s'explique par le fait que les sources de tension de ce réseau n'atténuent pas les courants harmoniques.

La distorsion harmonique en courant la plus importante ( $TDH_i = 53.50\%$ ) se trouve au jeu de barres numéro cinq, car sur ce dernier un condensateur est connecté, et on voit bien l'amplification des courants harmoniques par le phénomène de résonance.

Dans les jeux de barres (6, 7 et 8) le ( $TDH_i$ ) est moins important.

Au niveau des jeux de barres (4, 9, 10, 11, 12, 13), la forme du signal courant s'éloigne peu de la sinusoïde d'une charge à une autre et avec un taux de distorsion très bas, cela explique que les charges participent à l'atténuation des courants harmoniques.

**❖ Les tensions du réseau sain :**

Sur tous les jeux de barres la forme du signal tension est sinusoïdale, sauf au jeu de barres numéro trois avec un  $TDH_v = 2.47\%$ , la forme d'onde distordue nous rappelle l'existence de bruit sur ce jeu de barres.

**❖ Les tensions du réseau avec le pollueur harmonique :**

Dans les jeux de barres (1 et 2) les tensions restent sinusoïdales et le  $TDH_v$  égale à 0.00 %, cela s'explique par le fait que les impédances des sources qui sont généralement inductives, sont très faibles même aux fréquences élevées, et leurs puissances de court-circuit  $P_{cc}$  sont trop importantes, ce qui réduit les problèmes dus aux harmoniques de tension.

Mais au jeu de barres numéro 3 on voit bien une baisse du  $TDH_v$ , qui est égale à 0.18%.

Dans les jeux de barres (5, 6, 7, 8), les taux de distorsion en tension sont très faibles, car suite à l'action d'injecter les courants harmoniques, sur un jeu de barres on en voit que le spectre du courant et pas celui de la tension, la loi d'Ohm n'est pas applicable (absence d'impédance).

Dans les jeux de barres (4, 9, 10, 11, 12, 13), on remarque des taux de distorsion assez considérable. On peut dire aussi que les charges par leur puissance active, diminuent les harmoniques de tension.

#### ❖ Du point de vu propagation :

Les courants harmoniques sont présents au niveau des sources de tension et sont très faibles au niveau des charges. On peut dire que la propagation de ces courants passe d'une basse tension à une tension plus élevée.

Par contre, les tensions harmoniques sont présentes au niveau des charges et elles sont nulles au niveau des sources du réseau. La propagation des harmoniques de tension dans ce cas passe de la haute tension à la basse tension.

#### **Conclusion :**

La tension harmonique se propage mieux de la haute tension vers la basse tension, et l'inverse pour le courant harmonique.

*CONCLUSION*  
*GENERALE*

A cause de la prolifération des charges non linéaires (Four à arc, lampes à décharge, l'électronique de puissance... etc.) la qualité de l'énergie électrique se dégrade de jour en jour, on peut s'attendre à un dépassement des niveaux de compatibilité si rien n'est réellement entrepris pour réduire les niveaux de pollutions [11].

L'arrivée sur le marché des composants d'électronique de puissance peut parfois avoir des effets négatifs, car elles sont dans la plupart des cas générateurs d'imperfections.

Durant l'étude nous avons affaire à un cas de redresseur, dont le rôle consistait à injecter les courants de ce dernier dans tous les jeux de barres du réseau industriel ; suite à cette injection, ces courants se propagent, et passent par les impédances du réseau créant des tensions harmoniques

On a constaté que les courants harmoniques se retrouvent bien dans la partie amont du réseau, tandis que les tensions harmoniques sont localisées au niveau des charges (jeux de barres 4, 9, 10, 11, 12, 13) ; on conclut que le sens de propagation des courants harmoniques va de la basse tension vers la tension plus élevée, à l'inverse des tensions harmoniques. Cette propagation n'est pas toujours garantie, si elle rencontre des condensateurs où on voit l'apparition des phénomènes de résonance .

Après l'analyse des spectres des courants et des tensions durant la simulation sur tous les jeux de barres on conclut que les éléments du réseau tels les sources de tension et les charges jouent un rôle atténuateur des harmoniques. Et le fait de déplacer la charge polluante dans tous les jeux de barres nous a amené à trouver l'une des solutions traditionnelles qui consiste à réduire les harmoniques, le branchement de la charge non linéaire doit être réalisé, si possible, sur la source présentant l'impédance la plus faible (transformateur le plus puissant par exemple).

Les filtres placés au niveau des sources harmoniques sont indispensables pour la dépollution harmonique d'un réseau.

# *BIBLIOGRAPHIE*

[1] : ANDRE DUCLUZAUX : « Tension et courants harmoniques dans les réseaux ».Document EDF, année 1970.

[2] :J.BARRAT, P.BORNARD, B.MEYER : « Simulation des réseaux électriques ».Edition Fyrolle.1997.

[3] :T.DEFLANDRE, J.MARTINON : « Guide sur les harmoniques à l'usage des responsables du suivi des contrats ».EMERAUDE. Notes d'EDF 1997.

[4] :T.DEFLANDRE, P.MAURAS : « Les harmoniques sur les réseaux électriques », collection de la direction des études et de recherches d'Electricité de France, EYROLLES, ISSN 0399-4198-1998.

[5] : CHRISTOPHE PREVE. « Réseau électrique industriel ».Tome2.Edition LAVOISER. Juin 2005.

[6] : CHAWVIN ARNOUX : « Document, perturbations BF, la qualité de la tension se mesure ».

[7] : ERIC FELICE. « Perturbation harmoniques, Effets, Origines, Mesure, Diagnostic, Remèdes. ».Edition DOUNOD 2001.

[8] : ERIC FELICE, PHILIPPE REVILLA, « Qualité des réseaux électriques et efficacité énergétique ».Edition DUNOD, Paris 2005.

[9] : MICHEL GUILLE, JEAN-CLAUDE GUIGRAND, JEAN SCHUBENEL : « Comprendre les harmoniques et leurs effets ».La revue 3 EI. N°49.Juin 2007.

[10] : Cahiers techniques Schneider Electric.

N°125 : « Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur trainement ».

N°199 : « La qualité de l'énergie électrique ».

[11] : JEAN MARTINON : « Propagation des perturbations harmoniques sur les réseaux d'énergie maillés de grandes dimensions ».Thèse de doctorat de l'université de PARIS XI.1995

[12] : MOHAMED MUFTAH ABDUSLAM : « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèles et hybride avec validations expérimentales ».Thèse pour l'obtention du titre doctorat. Université Poincaré-Nancy1, 2003.

[13] :H.BESSAI : « Etude déterministe de la programmation des harmoniques dans les réseaux d'énergie électrique ». Mémoire magistère de l'UMMTO. Promotion 2000.

[14] :K.Amarouche, K.Agouazi, F.Touchrift : « Analyse harmonique et évaluation de l'impédance harmonique d'un réseau de distribution industriel équilibré ». Memoires d'Ingénieur, UMMTO, 2010.

[15]: Test Systems for Harmonics Modeling and Simulation

Task Force on Harmonics Modeling and Simulation

Transmission & Distribution Committee

IEEE power Engineering Society