

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou

Faculté de Génie Electrique et de l'Informatique

Département d'Electrotechnique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat

En Electrotechnique

Option : Réseaux électriques

Thème

**Etude de l'effet de la distance de la charge polluante sur
la qualité de la tension dans un réseau électrique
industriel**

Proposé et dirigé par :

M^r : S.RABAHALLAH

Etudié par : M^{elle} : MANCEUR Taous

M^{elle} : MOUNSI Djedjiga

Promotion : 2010/2011

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH le tout puissant de nous avoir donné la foi et de nous avoir permis d'en arriver là.

Nos remerciements vont également à nos parents pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis pour nous permettre de suivre nos études dans les meilleures conditions possibles et n'avoir jamais cessé de nous encourager tout au long de nos années d'étude.

Nous tenons à remercier vivement monsieur S.RABAH ALAH pour l'encadrement de ce travail, ses conseils, les corrections qu'il a apporté, et sa grande disponibilité tout au long de ce travail.

Nous tenons également à remercier les membres du jury qui ont accepté de juger ce travail.

Enfin nous remercions toutes les personnes qui nous ont aidées de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Dédicaces



Je dédie ce mémoire à :

Mes très chers parents

Mon cher neveu Alenas

Mon cher frère Kamel

Ma chère sœur Dalila et son mari Toufik

Ma chère sœur Farida et son mari Djaffar

Mon cher Merzouk

Ma grand-mère paternelle

La mémoire de mes grands-parents maternels et mon grand-père paternel

Tous mes oncles et toutes mes tantes

Tous mes cousins et toutes cousines

Tous mes amis(es)

M.TAOUS

Je dédie ce mémoire à :

Mes très chers parents

Mes neveux Yanis et Ghilas

Ma cher sœur Hayat et son mari

Mon cher frère Lounis

Mon cher frère Hassan

Mon futur mari Kamel

Tous mes oncles et toutes mes tantes

Tous mes cousins et toutes cousines

Tous mes amis(es)



M.DJEDJIGA

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Généralités sue les harmoniques et les réseaux électrique perturbés

Introduction.....	2
I. Principales perturbations électriques.....	2
I.1. Creux de tensions et coupures.....	2
I.2. Variations et fluctuations de tension.....	3
I.3. Les surtensions.....	4
I.4. Déséquilibres.....	4
I.5. Le phénomène harmonique.....	5
I.5.1. Les harmoniques.....	5
I.5.2. Différents types d'harmoniques.....	6
I.5.2.a. Courant harmonique.....	6
I.5.2.b. Tension harmonique.....	6
I.5.2.c. Impédance harmonique.....	6
I.5.3. Caractéristiques d'un signal déformé.....	6
I.5.3.1. Rang harmonique.....	6
I.5.3.2. Décomposition en séries de FOURIER.....	6
I.5.4. Les grandeurs caractérisant un signal déformé.....	9
I.5.4.1. Valeur efficace.....	9
I.5.4.2. Taux de distorsion harmonique.....	9
I.5.4.2.a. Taux individuel.....	9
I.5.4.2.b. Taux de distorsion global TDH _G %.....	9
I.5.4.3. Facteur de crête.....	10
I.5.4.4. Expression des puissances	10
I.5.4.5. Facteur de puissance.....	11

I.5.4.6. Foisonnement des phases.....	11
I.5.4.7. Facteur d'amplification.....	12
I.5.4.8. Notion de phase.....	12
I.5.4.8.a. Phase entre I_h et I_1 (ou entre V_h et V_1)	13
I.5.4.8.b. Phase entre V_h et I_h (ϕ_h).....	13
I.5.4.8.c. Phase entre le courant I_h et la tension fondamentale V_1	13
I.5.5. Les inter-harmoniques.....	14
I.5.6. Les infra-harmoniques.....	14
I.5.7. Harmonique dans un système triphasé.....	15
I.5.8. Origine des harmoniques.....	16
I.5.8.a. Emission en tension.....	16
I.5.8.a.1. Les alternateurs	16
I.5.8.a.2. Les transformateurs	16
I.5.8.a.3. Les alimentations statiques ininterrompibles (ASI).....	16
I.5.8.b. Emission en courant.....	16
I.5.8.b.1. Les montages électroniques	17
I.5.8.b.2. Les charges non linéaires passives	17
Conclusion.....	18
Chapitre II : Effets des harmoniques et leurs remèdes	
Introduction.....	19
II.1. Effets des harmoniques.....	19
II.1.1. Effets instantanés.....	19
II.1.2. Effets à termes.....	19
II.2. Les remèdes.....	21
II.2.1. Solutions traditionnelles.....	21
II.2.1.1. Transformateurs spéciaux.....	22
II.2.1.1.a. Transformateur de mise à la terre	22

II.2.1.1.b. Transformateur de type K	22
II.2.1.1.c. Transformateur déphaseur	22
II.2.1.2. Inductance anti-harmonique.....	23
II.2.1.3. Equilibrage des charges non-linéaires.....	23
II.2.1.4. Raccordement de l'appareillage à un point de faible impédance.....	23
II.2.1.5. Filtres passifs.....	23
II.2.1.5.a. Filtres passifs amorti.....	24
II.2.1.5.b. Filtres passifs résonant.....	25
II.2.2. Solutions modernes.....	26
II.2.2.1. Les filtres actifs.....	26
II.2.2.1.a. Filtres actifs parallèles.....	28
II.2.2.1.b. Filtres actifs séries.....	28
II.2.2.1.c. La combinaison parallèle-série d'un filtre actif (UPQC).....	29
II.2.2.2. Filtre hybride.....	29
II.2.2.2.a. Filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.....	30
II.2.2.2.b. Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles	31
II.2.2.2.c. Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.....	31
II.2.2.3. Convertisseurs propres.....	32
II.2.2.3.a. Convertisseur source de tension.....	32
II.2.2.3.b. Convertisseur source de courant.....	32
Conclusion.....	33

Chapitre III : application

Introduction.....	34
III.1. Description du réseau étudié.....	34
III.2. Caractéristiques du réseau.....	34
III.3 Calcul des paramètres du réseau électrique étudié en unités réduites (Per Unit)....	38
III.3.1. Paramètres du générateur et de la source.....	38
III.3.1.1. Source.....	38

III.3.1.2. Générateur.....	38
III.3.2. Paramètres des transformateurs.....	38
III.3.2.1. Coté primaire.....	39
III.3.2.2. Coté secondaire.....	40
III.3.3. Paramètres des charges.....	41
III.5. Partie simulation.....	44
III.5.1. Paramètres de simulation.....	44
III.5.1.1. Alimentation.....	44
III.5.1.2. Transformateurs.....	44
III.5.1.3. Câble et lignes.....	44
III.5.1.4. Charges.....	44
III.5.1.5. Condensateurs.....	44
III.5.2. Résultats de simulation.....	46
III.5.2.1. Relevé des tensions et des taux de distorsion harmonique en tension (TDH_v) pour les jeux de bars 1, 5, 8 et 10 en fonction du rang harmonique h.....	46
III.5.2.1.a. Analyse harmonique du réseau sans la charge polluante.....	46
III.5.2.1.b. Analyse harmonique du réseau pour différentes réactances du câble reliant la charge polluante au jeu de barres principal (5).....	49
III.5.2.2. Etude comparative.....	94
III.5.2.2.a. Evolution des taux de distorsion harmonique pour les jeux de barres 1, 5, 8 et 10 pour différents rangs harmoniques.....	94
III.5.2.2.b. Evolution des taux de distorsion harmonique en tension en fonction du rang harmonique h pour les jeux de barres 1, 5, 8 et 10.....	94
Conclusion.....	98
Conclusion générale.....	99

Introduction générale

La sophistication croissante des processus industriels les rend de plus en plus sensibles à la qualité de l'alimentation en énergie électrique. En effet, de plus en plus de charges dans l'industrie, le tertiaire et même le domestique, sont des charges perturbatrices. Ils absorbent des courants non sinusoïdaux et, compte tenu de l'impédance des circuits, la tension prend aussi une forme non sinusoïdale. Ce type de perturbation s'appelle le phénomène harmonique.

Ce phénomène, dont les effets ne peuvent être négligés, est devenu aujourd'hui préoccupant.

Au début de ce mémoire nous exposons des généralités pour mieux comprendre les harmoniques.

Ensuite, une description des diverses perturbations pouvant affecter le réseau électrique est détaillée, où, on mettra l'accent sur la perturbation harmonique et ses effets néfastes ainsi que les différentes solutions à leurs traitements.

Puis, vient l'application qui contient deux parties dont la première portera sur la modélisation du réseau étudié, et dont la deuxième sera consacrée à la simulation en utilisant le logiciel MATLAB/Simulink, où nous allons étudier l'effet de l'éloignement de la charge polluante sur le reste du réseau étudié. Pour cela, on fera varier la réactance du câble reliant la charge polluante au jeu de barres principal.

Puis nous finirons en présentant les résultats obtenus et en concluant.

Introduction

L'énergie électrique est généralement distribuée sous la forme de trois tensions constituant un système sinusoïdal triphasé. Un des paramètres de ce système est la forme d'onde qui doit être la plus proche d'une sinusoïde.

La correction de la forme d'onde est rendue nécessaire si la déformation dépasse certaines limites, souvent atteintes dans les réseaux possédant des sources de perturbation harmonique tels que : fours à arc, convertisseur statique de puissance, ou encore certains types d'éclairage, etc.

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

I. Principales perturbations électriques

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 de l'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et de la qualité du courant.

Souvent les relevés des courbes de tension et de courant sur le réseau nous informent que ce dernier est soumis à un certain nombre de perturbations.

I. 1. Creux de tension et coupure [1][3]

Un creux de tension est une baisse brutale de la tension en un point d'un réseau d'énergie électrique, à une valeur comprise entre 90% et 1% selon (CEI 61000-2-1, CENELECEN 50160), ou entre 90% et 10% selon (IEEE 1159) d'une tension de référence suivit d'un rétablissement de la tension après un court laps de temps compris entre la demi période fondamentale du réseau et une minute.

Une coupure brève est un cas particulier du creux de tension.

Elle est généralement définie comme une baisse de tension de 100 % (absence de tension) pendant une seconde à une minute.

Si la durée de coupure est entre dix millisecondes et une seconde, dans ce cas on parlera de la coupure très brève.

Si la durée est de dix millisecondes, la coupure est généralement due à des phénomènes transitoires ou volontaires, par exemple à l'emploi de gradateurs.

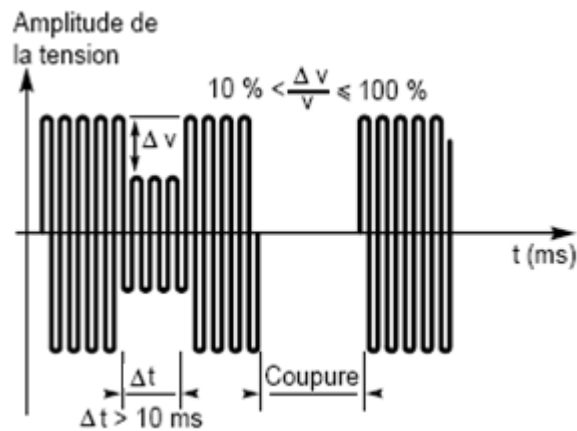


Figure I-1: Creux de tension et coupure

I.2. Variations et fluctuations de tension [1]

Les variations de tension sont des variations de la valeur efficace ou de la valeur crête d'amplitude inférieure à 10% de la tension nominale.

Les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou de variations cycliques ou aléatoires d'une enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation de l'amplitude.

- Les variations lentes de tension sont causées par la variation lente des charges connectées au réseau.
- Les fluctuations de tension sont principalement dues à des charges industrielles rapidement variables comme les machines à souder, les fours à arc, les laminiers.

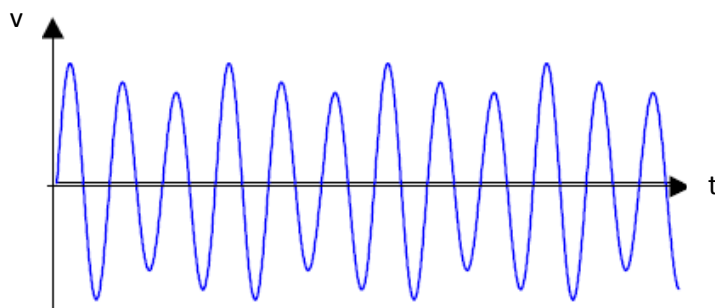


Figure I-2: fluctuation de tension

I.3. Les surtensions [1]

Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification est une surtension.

Les surtensions sont de trois natures :

- Surtensions temporaires (à fréquence industrielle).
- De manœuvre.
- D'origine atmosphérique (foudre).
- En mode différentiel (entre conducteur actif ph /ph-ph/neutre).
- En mode commun (entre conducteurs actifs et la masse ou la terre).

La figure suivante représente le cas où la tension est transitoire :

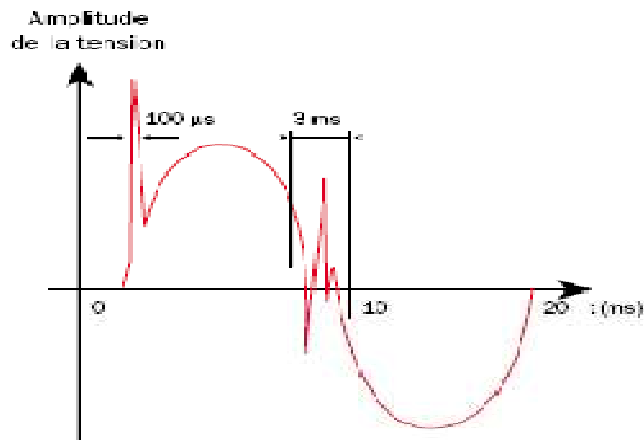


Figure I-3: surtension transitoire

I.4. Déséquilibre [1]

Que l'on appelle aussi dissymétrie du système. Un système triphasé est dit déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et / ou ne sont pas déphasés les uns par rapport aux autres de 120° .

- Le degré de déséquilibre inverse est le rapport entre la composante inverse du fondamental de la tension et sa composante indirecte :

—

- Le degré de déséquilibre homopolaire est le rapport entre la composante homopolaire du fondamental de la tension et sa composante directe :

—

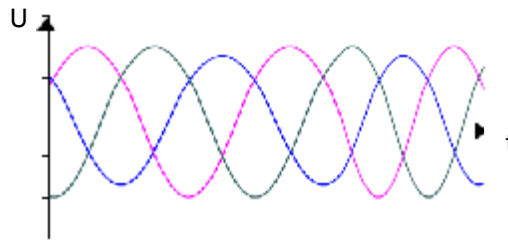


Figure I-4 : Déséquilibre des tensions triphasées

I.5. Le phénomène harmonique

I. 5.1. Les harmoniques [3]

Les courants ou tensions harmoniques sont des courants ou tensions « parasites » du réseau électrique. Ils déforment l'onde de courant ou de tension.

Un signal périodique alternatif se compose d'un fondamental et d'harmoniques. Un harmonique est une superposition sur l'onde fondamentale, ces fréquences sont des multiples entiers de la fréquence du réseau.

Pour qu'un signal déformé soit accessible à l'étude et à l'analyse, on peut le décomposer en une somme de signaux sinusoïdaux comprenant :

- Un signal sinusoïdal à la fréquence fondamentale : le fondamental
- Des signaux sinusoïdaux dont les fréquences sont des multiples entiers du fondamental : les harmoniques
- Une composante continue.

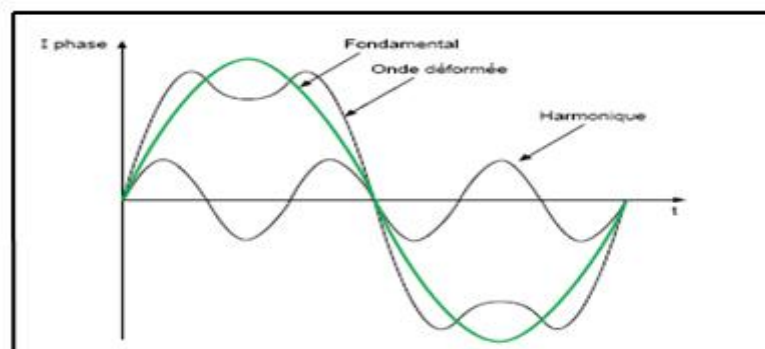


Figure I -5: signal déformé

I. 5.2. Différents types d'harmoniques

A. Courant harmonique [12]

Les courants harmoniques présents sur le réseau électrique proviennent de l'utilisation des charges non linéaires. Ces charges se comportent approximativement comme des sources harmoniques. L'amplitude de ces courants ne dépend que de la charge, elle est plus élevée si la charge est importante.

B. Tension harmonique [8]

Les courants harmoniques associés aux différentes impédances du réseau vont donner naissance, suivant la loi d'Ohm, à des tensions harmoniques, qui vont s'ajouter, ou se déduire, à la tension fondamentale générée par le réseau. La tension qui en résulte n'est plus sinusoïdale ; de plus cette tension est commune à tous les autres récepteurs du réseau.

C. Impédance harmonique [9]

L'impédance présentée par un réseau dépend de la fréquence à laquelle on la considère. Pour chaque rang donné, l'impédance harmonique peut se définir en tout point du réseau. Cette impédance représente la mise en parallèle de toutes les lignes qui convergent vers le point considéré.

I.5.3. Caractéristiques d'un signal déformé

I. 5.3.1. Rang harmonique :

Le rang harmonique est le rapport de sa fréquence à celle du fondamental.

$$h = \frac{f_h}{f_1} \quad (\text{I-1})$$

I .5.3.2. Décomposition en série de FOURIER [8][9]

Tout signal périodique de période T peut être décomposé en une série de sinusoïdes dont la fréquence est un multiple de la fréquence du fondamental du signal. Cette série se nomme série de Fourier.

Un signal périodique S(t) représente un courant ou une tension de période T, $f = \frac{1}{T}$ et de pulsation

$$\omega = 2\pi f$$

Ce signal se décompose de la façon suivante :

$$S(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega_h t + b_n \sin \omega_h t) \quad (\text{I-2})$$

Avec:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T S(t) dt \quad (\text{I-3})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} a_h = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \cos(\omega_h t) dt \end{array} \right. \quad (\text{I-4})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} b_h = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \sin(\omega_h t) dt \end{array} \right. \quad (\text{I-5})$$

et pour $h \geq 1$

Ou également :

$$S(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} C_h \sin(\omega_h t + q_h) \quad (\text{I-6})$$

$$\text{Avec : } q_h = \arctg \frac{a_h}{b_h} \quad (\text{I-7})$$

$$C_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \quad (\text{I-8})$$

a_0 : Composante continue ou valeur moyenne du signal.

a_h et b_h : Amplitudes efficaces des composantes harmoniques de rang h .

ω_h : Pulsation du fondamental.

La grandeur C_h est l'amplitude de l'harmonique de rang h .

Les harmoniques au delà du rang 25 sont négligeables.

La figure ci-dessous illustre un exemple de cette décomposition.

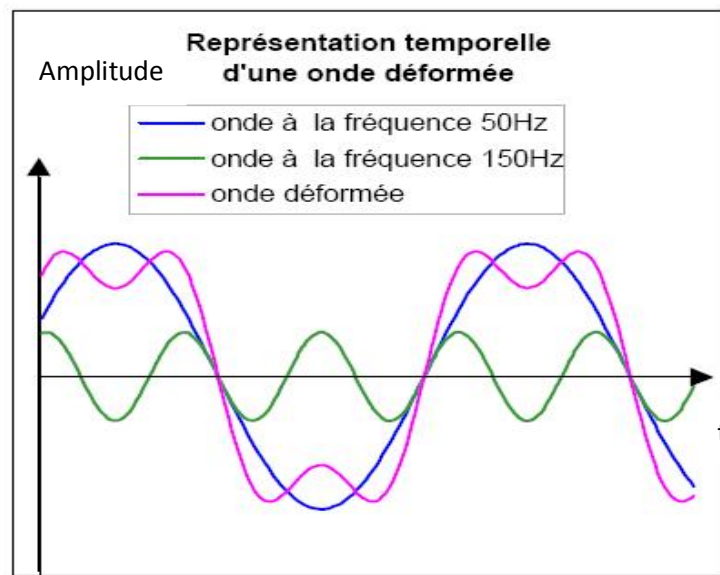


Figure I-6: Onde déformée et sa décomposition

Un autre moyen de traduire la notion d'harmonique sous forme d'histogramme, permet de donner une représentation de l'importance des harmoniques par rapport au fondamental en fonction du rang, on parle de spectre du signal.

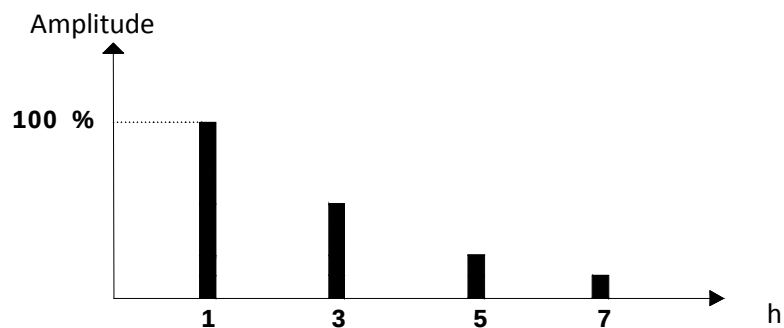


Figure I-9 : Représentation spectrale d'un signal déformé

I.5.4. Les grandeurs caractérisant un signal déformé [8][9]

I.5.4.1. Valeur efficace

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

$$S_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T S^2(t) dt} \quad (I-9)$$

I.5.4.2. Taux de distorsion harmonique (TDH)

Plusieurs expressions peuvent être utilisées pour quantifier la déformation d'un signal. Le taux de distorsion harmonique (TDH) est le plus employé. 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.

$$TDH_i(\%) = 100 \left(\frac{C_h}{C_1} \right) \quad (I-10)$$

b)- Taux de distorsion global $TDH_G\%$

C'est le rapport entre la valeur efficace des harmoniques et la valeur efficace du fondamental, qui est exprimé par la loi suivante :

$$TDH_G(\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} C_h^2}}{C_1} \quad (I-11)$$

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 TDHi**

$$TDHi (\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_1} \quad (I-12)$$

- **Taux de distorsion harmonique en tension TDHv**

$$TDHv (\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n V_h^2}}{V_1} \quad (I-13)$$

I.5.4.3. Facteur de crête :

Le facteur de crête est défini par le rapport entre la valeur de crête d'un signal et sa valeur efficace. Il caractérise la surtension ou la surintensité instantanée maximale subie par un appareil.

$$Fc = \frac{S_c}{S_{eff}} \quad (I-14)$$

S_c : valeur de crête

S_{eff} : valeur efficace

Pour une onde sinusoïdale, le facteur de crête a une valeur de $\sqrt{2} = 1,414$, une onde ayant un facteur crête inférieur à $\sqrt{2}$ sera plutôt aplatie. Par contre, si le facteur est supérieur à $\sqrt{2}$ l'onde est plutôt pointue.

I.5.4.4. Expression des puissances

$$P = V I \cos j \quad (I-15)$$

$$Q = V I \sin j \quad (I-16)$$

$$S = VI = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \text{ Puissance apparente} \quad (I-17)$$

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \text{ Représente la puissance déformante} \quad (\text{I-18})$$

I.5.4.5. Facteur de puissance

C'est le rapport entre la puissance P active du signal et la puissance apparente S aux bornes d'une charge.

$$F_c = \frac{P}{S} \quad (\text{I-19})$$

I.5.4.6. Foisonnement des phases

Différentes charges peuvent être connectées sur un même réseau, il en résulte que les courants qui les alimentent ne sont pas obligatoirement en phase.

Le courant total qui contribue à alimenter les divers appareils 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 et plus la résultante pourra devenir négligeable.

En effet, lorsque plusieurs charges non linéaires sont connectées à une même portion du réseau, les courants harmoniques qu'elles injectent s'additionnent vectoriellement.

Pour analyser la résultante des injections harmoniques émises par plusieurs charges non linéaires connectées au réseau, il faut utiliser un procédé mathématique et pour cela il faut procéder pour une méthode analytique qui consiste à déterminer la somme vectorielle de N courants (ou tensions) harmoniques de même nature à caractère aléatoire.

Cette analyse se base sur les hypothèses de la loi gaussienne que suivent les composantes des courants et phases pour déterminer le module du vecteur somme statistique à une probabilité de non dépassement p .

Puis il faut calculer le coefficient de foisonnement F_f en connaissant la valeur du module conduisant à cette probabilité.

Ce coefficient de foisonnement est défini par la formule suivante :

$$F_p = \frac{\text{Module du vecteur somme statistique non dépassé selon } p}{\text{Somme des modules maximaux des vecteurs composants}} \quad (\text{I-20})$$

En pratique, on définit ce coefficient selon une probabilité de 95% du temps de fonctionnement, à l'instar des recommandations relatives aux réseaux d'énergie en matière de compatibilité électromagnétique.

On note aussi que ce coefficient peut s'approcher par une fonction ayant la forme suivante :

$$F_f = AN^B \quad (\text{I-21})$$

N : nombre d'injecteurs

A et **B** sont des réels respectivement positif et négatif.

I.5.4.7. facteur d'amplification

Le facteur d'amplification est utilisé dans l'évaluation de l'effet d'une injection harmonique locale sur un réseau, il permet de calculer la tension harmonique et le courant harmonique dans les condensateurs et les transformateurs à la résonance.

Pour un récepteur (R, L) relié à un réseau de puissance de court circuit S_{cc} et compensé par une batterie de condensateur de puissance Q_c provoquant une résonance.

Son expression approchée est :

$$F \approx \frac{\sqrt{Q_c S_{cc}}}{P} \approx \frac{R}{L\omega} \quad (\text{I-22})$$

Le facteur d'amplification peut atteindre des valeurs importantes sur les réseaux faiblement chargés, provoquant ainsi des destructions. Pour réduire l'amplification à la résonance, il faut éviter de laisser les condensateurs enclenchés.

I.5.4.8. Notion de phase [13]

La phase d'un signal harmonique permet de calculer la somme vectorielle de plusieurs courants harmoniques circulant dans un même conducteur et d'identifier un sens de transit de l'énergie harmonique.

I.5.4.8.a. Phase entre I_h et I_1 (ou entre V_h et V_1)

L'analyse de Fourier en courant suffit pour connaître le déphasage entre le courant harmonique de rang h et le courant fondamental, ce déphasage est noté (α_h).

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 j_1 .

I.5.4.8.b. Phase entre V_h et I_h (φ_h)

Cette notion est introduite lors du calcul des puissances harmoniques active (P_h) et réactive (Q_h). C'est l'angle entre la tension harmonique V_h et le courant harmonique I_h .

- **En monophasé**

$$\begin{aligned} P_h &= V_h I_h \cos j_h \\ Q_h &= V_h I_h \sin j_h \end{aligned} \quad (I-23)$$

- **En triphasé**

$$\begin{aligned} P_h &= 3V_h I_h \cos j_h \\ Q_h &= 3V_h I_h \sin j_h \end{aligned} \quad (I-24)$$

I.5.4.8.c. Phase entre le courant I_h et la tension fondamentale V_1

Il est préférable de connaître l'angle entre le courant harmonique I_h et une référence de tension V_1 qui est beaucoup plus stable en raison de la forme plus sinusoïdale du signal et de sa faible variation angulaire le long des réseaux de courte longueur.

Il est nécessaire que l'appareil mesure à la fois le courant et la tension harmonique.

Dans l'étude des harmoniques, on accorde beaucoup plus d'importance aux harmoniques de rangs impairs qu'à ceux de rangs pairs, ceci est dû au fait que sur le réseau on voit plus d'harmoniques de rangs impairs que pairs. L'émission d'harmoniques de rangs pairs par le matériel polluant est faible.

Les harmoniques de rangs pairs sont plus nocifs.

Les échauffements dus aux harmoniques pairs sont identiques à ceux causés par les harmoniques impairs. La présence sur le réseau de tensions et courants harmoniques pairs entraînent une difficulté pour l'utilisation des filtres passifs car le phénomène d'antirésonance produit une amplification des rangs directement inférieurs au rang d'accord du filtre, il est donc nécessaire de limiter au maximum les injections harmoniques de rang pairs.

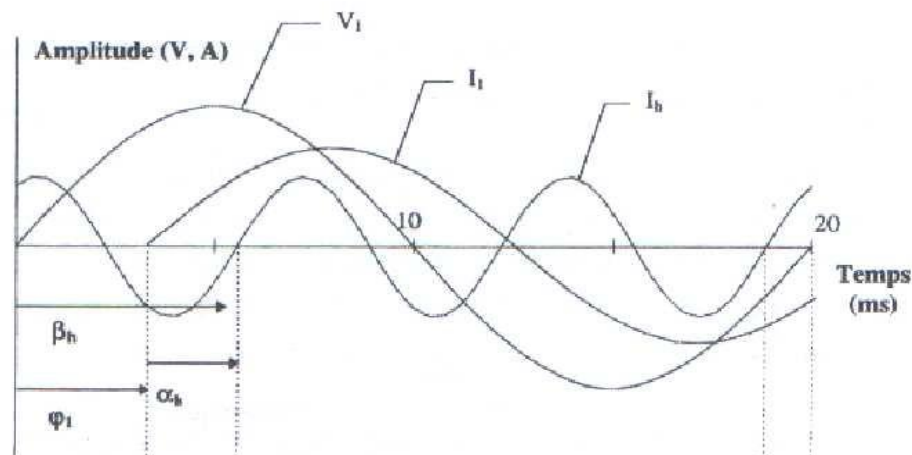


Figure I-8 : Déphasage des courants harmoniques

I.5.5. Les inter-harmoniques [3]

Ce sont des composantes sinusoïdales d'une grandeur qui ne sont pas des fréquences multiples entières de celle du fondamental. Elles apparaissent soit sous forme de fréquences discrètes, soit sous forme de spectre de large bande. Les sources principales des inter-harmoniques sont : les convertisseurs de fréquences, les fours à arc, les machines à souder....

I.5.6. Les infra-harmoniques [3]

Ce sont des composantes qui sont à des fréquences inférieures à celle du fondamentale.

Les harmoniques, les inter-harmoniques et les infra-harmoniques sont représentés dans le schéma qui suit :

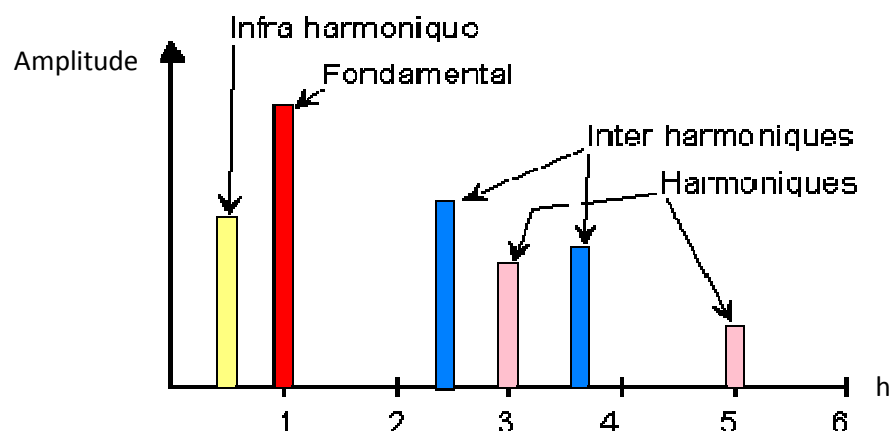


Figure I-9: Représentation des harmoniques, inter-harmonique et infra-harmoniques

I.5.7. Harmoniques dans un système triphasé

Lorsqu'un système de charges triphasé équilibré est alimenté par un système de tensions triphasé équilibré :

$$\begin{cases} \bar{V}_a = V_a \sqrt{2} \sin(\omega t) \\ \bar{V}_b = V_a \sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{2p}{3}) \\ \bar{V}_c = V_a \sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{4p}{3}) \end{cases} \quad (I.25)$$

Un système de courants triphasé équilibré y circule :

$$\begin{cases} \bar{I}_a = I_a \sqrt{2} \sin(\omega t) \\ \bar{I}_b = I_a \sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{2p}{3}) \\ \bar{I}_c = I_a \sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{4p}{3}) \end{cases} \quad (I.26)$$

Les expressions des courants harmoniques de rang h sont de la forme :

$$\begin{cases} \bar{I}_{h,a} = I_a \sqrt{2} \sin[h\omega t] \\ \bar{I}_{h,b} = I_a \sqrt{2} \sin\left[h\left(\omega t - \frac{2p}{3}\right)\right] \\ \bar{I}_{h,c} = I_a \sqrt{2} \sin\left[h\left(\omega t - \frac{4p}{3}\right)\right] \end{cases} \quad (I.27)$$

Pour $h = 3k + 1$; avec k entier, les harmoniques forment un système direct.

Pour $h = 3k - 1$; avec k entier, les harmoniques forment un système inverse.

Pour $h = 3k$; avec k entier, les harmoniques forment un système homopolaire. Dans le cas d'un réseau avec le neutre, les courants qui y circulent s'ajoutent arithmétiquement.

Dans le cas des systèmes déséquilibrés, on utilise la méthode de Fortescue, qui est basée sur la décomposition des courants harmoniques.

I.5.8.Origines des harmoniques [14][15]

La prolifération de dispositifs d'électronique de puissance et d'informatique dans le réseau électrique a pour conséquence la dégradation de l'énergie électrique. Ces dispositifs produisent des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale. Ainsi, des tensions harmoniques sont générées par la circulation de ces courants dans les impédances du réseau électrique.

I.5.8.a. Emission en tension

L'émission harmonique en tension est due aux imperfections de construction (dissymétrie, distribution non sinusoïdale du champ dans les alternateurs, saturation), elle contribue faiblement à la pollution du réseau.

Parmi les matériels contribuant à ce type d'émission on distingue :

I.5.8.a.1. Les alternateurs

Les harmoniques dans les alternateurs sont liés à la qualité des bobinages et des pièces polaires qui assurent la forme sinusoïdale de l'onde.

I.5.8.a.2. Les transformateurs

Une fois le régime saturé est atteint, les transformateurs génèrent des tensions harmoniques sur les réseaux.

I.5.8.a.3. Les alimentations statiques ininterrompibles (ASI)

La distorsion harmonique pour une ASI est de 4% si elle alimente une charge linéaire et elle est de 7% si elle alimente une charge non linéaire. Le taux de distorsion harmonique diminue avec l'augmentation de la puissance de l'ASI.

En charge, le taux harmonique est dû essentiellement aux courants créés par les charges non linéaires.

I.5.8.b. Emission en courant

L'émission en courant est due à la présence des charges non linéaires qui consomment un courant non sinusoïdale.

Parmi les charges non linéaires contribuant à ce type d'émission on distingue :

I.5.8.b.1. Les montages électroniques

a) Redresseur monophasé à filtrage capacitif

Ce montage est utilisé comme premier étage pour l'alimentation de certains dispositifs électroniques (téléviseur, ordinateur et variateur de vitesse des machines asynchrones).

L'injection des courants harmoniques des redresseurs à filtre capacitif ne contient que des harmoniques de rangs impairs à cause de la symétrie de l'onde du courant déformé.

b) Le gradateur monophasé

Ce type de montage est utilisé pour la commande de l'intensité de la lampe à incandescence et pour la commande de certains fours de cuisson, la régulation de la puissance de chaudière et les démarreurs des moteurs électriques.

On distingue deux types de commande pour un gradateur :

- La commande par « train d'onde ».
- La commande par « modulation de l'angle de phase ».

c) Le redresseur triphasé à thyristor

Les redresseurs triphasés à thyristors (pont de Graëtz) sont les principales sources harmoniques dans le secteur industriel.

Les seuls rangs présents dans l'émission harmonique de ces redresseurs sont de la forme : $h = 6k \pm 1$, avec K entier.

d) Le redresseur triphasé à diode et filtre capacitif

ce type de montage est utilisé pour la commande de vitesse des moteurs asynchrones.

Il génère un taux important d'harmoniques en comparaison des autres injecteurs rencontrés dans le réseau industriel.

Les seuls rangs présents dans l'émission harmonique de ces redresseurs sont de la forme : $h = 6k \pm 1$, avec K entier.

I.5.8.b.2. Les charges non linéaires passives

a) Les moteurs asynchrones

Dans le secteur tertiaire et domestique plusieurs appareils fonctionnent avec des moteurs asynchrones. En théorie, ces moteurs génèrent des ondes de courant sinusoïdales, mais en pratique ils génèrent certains harmoniques. Leur présence s'explique par le fait qu'ils ne sont pas optimisés par rapport au contenu harmonique en courant.

b) Les lampes

Les lampes produisant les courants harmoniques sont les lampes fluorescentes et lampes à haute pression. C'est la nature non linéaire du phénomène entraînant l'illumination et la présence de ballasts électroniques qui contribuent à la génération d'harmoniques dans ces lampes.

c) Les appareils à arc électrique

Ce sont les fours à arc à courant alternatif, dont la puissance peut atteindre une dizaine de MW, et les machines de soudure à l'arc à courant alternatif ou continu. Le spectre d'émission harmonique de ces appareils est continu et contient des inter-harmoniques d'amplitudes non négligeables. Le contenu harmonique est relativement modéré. On ne peut le négliger du fait que la puissance consommée est forte.

Conclusion

Dans cette partie du travail nous avons mis en évidence les différentes perturbations pouvant affecter le réseau électrique en mettant l'accent sur la pollution harmonique qui est l'une des perturbations majeures pouvant dégrader l'onde de courant ou de tension.

Introduction

Les courants harmoniques se propagent dans le réseau électrique, déforment l'allure du courant de la source et polluent les consommateurs alimentés par ce même réseau. Ils peuvent occasionner des incidents au niveau de l'appareillage du client et donnent lieu à des surcoûts de production d'énergie importants.

Un certain nombre de solutions ont été développées pour atténuer ou encore éliminer la présence des harmoniques dans le réseau et cela au moyen d'équipements adaptés.

II.1. Effets des harmoniques [5]

On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux types : Les effets instantanés et les effets à terme.

II.1.1. Effets instantanés

Les effets instantanés apparaissent immédiatement dans certains appareillages.

➤ Défauts de fonctionnement de certains équipements électriques

En présence d'harmoniques, la tension et le courant peuvent changer plusieurs fois de signe dans une demi-période. Les appareils dont le fonctionnement est basé sur le passage à zéro des grandeurs électriques peuvent être affectés.

➤ Troubles fonctionnels des micro-ordinateurs

Les effets sur ces équipements peuvent se manifester par la dégradation de l'image et par des couples pulsatoires des moteurs d'entraînement de disque.

➤ Erreurs dans les appareils de mesure

Certains appareils de mesure et les compteurs d'énergie à induction présentent des dégradations de mesure et des erreurs de lecture supplémentaires en présence d'harmoniques.

➤ Vibrations et bruits

Les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances et machines tournantes).

II.1.2. Effets à terme

Ils se manifestent après une exposition plus ou moins longue à la perturbation harmonique. L'effet à terme le plus important est de nature thermique, il se traduit par l'échauffement. Il conduit à une fatigue prématurée du matériel, des lignes et amènent un déclassement des équipements.

➤ Echauffement des câbles et des équipements

Ces effets peuvent être à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures) ou à long terme (de quelques heures à quelques années) et concernent les câbles qui peuvent être le

siègedusuréchauffementduneutreetlesmatérielsà bobinescommelestransformateursoules moteurs.

➤ **Echauffement des condensateurs**

L'échauffementestcauséparlespertesduesaucycle d'hystérésisdanslediélectrique. Les condensateurs sont aussi sensibles aux surcharges, qu'elles soient dues à une tension fondamentaletropélevéeouàlaprésenced'harmoniques.Ceséchauffementspeuventconduire au claquage.

➤ **Echauffement dû aux pertes supplémentaires des machineset destransformateurs**

Unéchauffementestcauséparlespertesdanslestatordesmachinesetprincipalement dansleurscircuitsrotoriques(cages,amortisseurs,circuitsmagnétiques)àcausedesdifférences importantes de vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor. Les harmoniquesgénèrentaussidespertessupplémentairesdanslestransformateurs,pareffetJoule danslesenroulements,accentuéesparl'effetdepeauetdespertesparhystérésisetcourantsde Foucault dans les circuits magnétiques.

Le tableau ci-dessous résume l'ensemble des matériels électriques perturbés par la pollution harmonique [6].

Nature dumatériel électrique	Effet dela «pollutionharmonique»
------------------------------	----------------------------------

Machines tournantes Moteurs triphasés, alternateurs	Echauffement supplémentaire (effet Joule) dans les enroulements statoriques. Couples oscillatoires. Augmentation du bruit
Transformateurs	Pertes supplémentaires dans le fer (par courants de Foucault) et dans les enroulements (par effet Joule). Risque de saturation en présence d'harmoniques pairs.
Câbles	Augmentation des pertes surtout dans le câble de neutre où s'ajoutent les harmoniques de rang 3 et multiples de 3. Pertes diélectriques supplémentaires.
Electronique de puissance (ponts redresseurs à thyristors, transistors,	Troubles fonctionnels liés à la forme d'onde (commutation, synchronisation).
Condensateurs de puissance	Pertes diélectriques supplémentaires aboutissant à un vieillissement prématuré des condensateurs
Ordinateur	Dysfonctionnement lié aux couples pulsatoires des moteurs d'entraînement des supports magnétiques
Dispositifs de protection (Fusibles. Disjoncteurs magnétothermique)	Fonctionnement intempestif
Compteur d'énergie	Erreurs de mesure
Téléviseurs	Déformation d'image
Lampes à décharge	Risque de vacillement sous l'effet de l'harmonique de rang 2

Tableau II-1 : Ensemble des matériels perturbés par la pollution harmonique

II.2. Les remèdes

Les solutions sont fonction du but recherché et des pollueurs. Dans la plus part des cas l'objectif est de diminuer le taux de distorsion en tension, au niveau d'un point de raccordement de plusieurs charges. Les solutions visent à dépolluer au niveau des appareils (dépollution à la source) ou au niveau du réseau (dépollution amont).

On peut regrouper les solutions visant à réduire les perturbations harmoniques en deux groupes : les solutions traditionnelles et les solutions modernes.

II.2.1. Solutions traditionnelles

Ces sont des techniques qui doivent être connues par tous les électriciens. Elles apportent une solution facile et rapide pour certaines cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation. Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des

harmoniques dans les réseaux électriques :

II.2.1. 1. Transformateurs spéciaux [2]

II.2.1.1.a. Transformateur de mise à la terre

Afin d'éviter le passage des courants harmoniques par le conducteur de neutre, l'ajout de transformateur de mise à la terre créant un neutre artificiel est une solution efficace. Ce type de transformateur fournit un chemin de faible impédance pour les courants harmoniques qui sont déviés dans son propre neutre. C'est donc dire, que seul le neutre du transformateur doit être en mesure de supporter ces courants.

II.2.1.1.b. Transformateur de type K

Les transformateurs qui doivent supporter des courants déformés sont sujets à des additionnelles élevées. Si ces conditions de fonctionnement perdurent, il y a possibilité de défaillance des transformateurs. Les organismes de normalisation ont reconnu ce phénomène et ont récemment introduit un facteur K qui permet de quantifier l'effet d'une charge sur un transformateur. Ce facteur K se définit comme suit :

$$K = \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 n^2 \quad (\text{II.1})$$

n : Rang de l'harmonique

I_n : Rapport entre le courant efficace à la fréquence n et le courant efficace total.

Une charge linéaire a un facteur k unitaire tandis qu'une charge non linéaire peut avoir un facteur qui dépasse 20. De la même manière on assigne un facteur k unitaire à un transformateur servant à alimenter une charge linéaire tandis qu'après essais, on assigne des facteurs k aux transformateurs spécialement conçus pour alimenter des charges non linéaires. Pour une application donnée, le facteur k du transformateur doit être supérieur au facteur k de la charge.

II.2.1.1.c. Transformateur déphaseur

Une autre solution pour la réduction des courants harmoniques est l'utilisation des transformateurs déphaseurs. L'utilisation du transformateur triangle-triangle et du transformateur triangle-étoile pour alimenter les charges non linéaires identiques a pour effet d'éliminer les courants du 5^{ème} et 7^{ème} harmonique produits par ces charges. L'élimination de ces courants harmoniques est due au 30° du déphasage entre les connexions des deux transformateurs.

Si les charges non linéaires sont identiques, les courants des 5^{ème} et 7^{ème} harmoniques sont éliminés au point commun de raccordement. Dans le cas contraire, un résidu de ces courants harmoniques sera toujours présent sur le réseau. D'autres connexions de transformateurs déphaseurs peuvent être employées pour éliminer les harmoniques de rangs plus élevés.

II.2.1.2. Inductance anti-harmonique

Ce dispositif a pour objectif essentiel de protéger les batteries de condensateurs d'une surintensité due aux harmoniques.

La self doit être calculée de façon à ce que la fréquence de résonance ne corresponde à aucun des harmoniques présents dans l'installation. Cette règle permet de supprimer les risques de forts courants harmoniques dans les condensateurs.

II.2.1.3. Équilibrage des charges non-linéaires [3][10]

Les charges non linéaires doivent être réparties sur les différents transformateurs de l'installation de façon à ce que l'équilibre dans les réseaux soit réalisé.

Pour une charge polluante de forte puissance : alimentation par une ligne séparée partant directement du transformateur ou par un autre transformateur MT/BT couplé primaire triangle ou étoile sans neutre et secondaire zig/zag ou étoile avec neutre. Dans ce cas, les courants harmoniques de rang 3 ne circulent pas au primaire.

II.2.1.4. Raccordement de l'appareillage à un point de faible impédance [3][10]

Cela implique le raccordement des générateurs d'harmoniques sur les jeux de barres principaux plutôt qu'en bout de ligne, à l'extrémité de câble de grandes longueurs qu'il faut généralement partager avec d'autres appareils. C'est-à-dire : séparation entre les circuits comportant des charges perturbatrices et les autres, au niveau le plus haut possible de l'installation BT, ce qui permet de bénéficier de l'affaiblissement des perturbations par l'impédance des câbles

Lorsque l'impédance de source est faible, la puissance de court-circuit est importante, ce qui réduit la puissance harmonique globale.

II.2.1.5. Filtres passifs [1]

Le filtre passif se compose d'un condensateur en série avec une inductance, ce circuit est accordé sur chaque fréquence d'harmonique à filtrer, en parallèle sur le générateur d'harmoniques.

Ce circuit de dérivation absorbe les harmoniques et évite que ceux-ci ne circulent dans l'alimentation.

En général, le filtre passif est accordé sur un rang d'harmonique proche de l'harmonique à éliminer. Plusieurs branches de filtres en parallèle peuvent être utilisées lorsque l'on souhaite une réduction forte du taux de distorsion sur plusieurs rangs.

Afin de concevoir ce type de filtre, une connaissance précise des caractéristiques et du

comportement du réseau sous l'effet des harmoniques est nécessaire. Une telle exigence de conception est généralement satisfaite à l'aide d'un logiciel de simulation. Les types de filtres passifs utilisés sont choisis en fonction de l'atténuation harmonique recherchée.

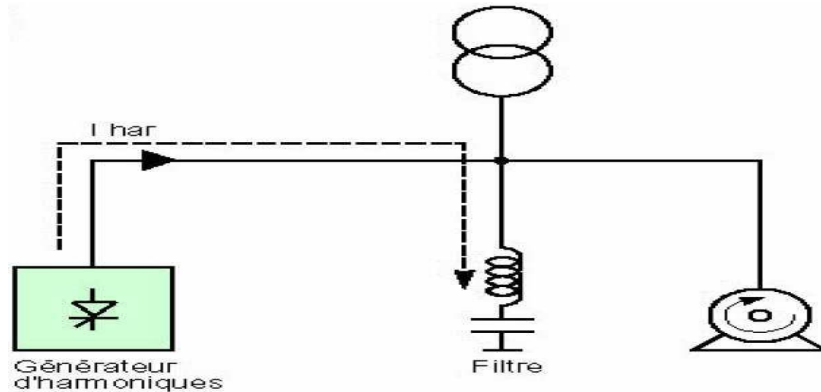


Figure (II.1) : Principe d'utilisation d'un filtre passif

Applications typiques

- Installations industrielles avec un ensemble de générateurs d'harmoniques de puissance totale supérieure à 200 kVA environ (variateurs de vitesse, alimentation sans interruptions, redresseurs, ...).
- Installation présentant un besoin de compensation d'énergie réactive.
- Nécessité de réduction du taux de distorsion en tension pour éviter la perturbation de récepteurs sensibles.
- Nécessité de réduction du taux de distorsion en courant pour éviter les surcharges.

Les filtres passifs peuvent se diviser en deux familles, soit les filtres séries qui sont utilisés généralement dans le cas des charges génératrices de tensions harmoniques et les filtres parallèles qui sont utilisés dans le cas des charges génératrices de courants harmoniques.

Le filtre parallèle est utilisé exclusivement du côté alternatif pour deux raisons :

- 1- Il porte uniquement le courant harmonique et est lié à la terre.
- 2- A la fréquence fondamentale, il possède l'avantage de fournir de la puissance réactive.

Pour une efficacité équivalente au filtre série, le filtre parallèle est beaucoup moins cher.

On distingue deux types de filtre parallèle :

II.2.1.5.a. Filtre passif amorti

Le filtre passif amorti se compose d'une capacité en série avec un ensemble constitué

de la mise en parallèle d'une inductance et d'une résistance, appelée

résistance d'amortissement. Il est généralement utilisé pour filtrer simultanément des harmoniques de rang élevé (supérieur à 11).

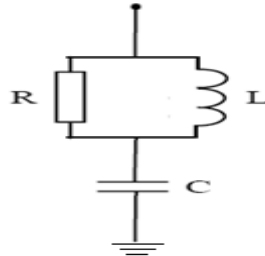


Figure (II.2) : Structure du filtre amorti

Les caractéristiques principales d'un filtre amorti sont :

1. Fréquence de résonance

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

2. Facteur de qualité :

$$F = \frac{R}{2\pi L f} \quad (\text{II.3})$$

On distingue trois types de filtres amortis :

➤ **Le filtre amorti de premier ordre**

Ils ne sont pas très utilisés car ils exigent une grande capacité et présentent une perte de puissance excessive à la fréquence fondamentale.

➤ **Le filtre amorti du second ordre**

Il fournit de meilleures performances de filtrage, mais avec des pertes plus élevées à la fréquence fondamentale que le filtre de troisième ordre.

➤ **Le filtre amorti du troisième ordre :**

Le principal avantage de ce filtre par rapport au second ordre est une réduction substantielle des pertes à la fréquence fondamentale.

II.2.1.5.b. Filtre passif résonant

Le filtre passif résonant qu'on appelle aussi shunt résonant est constitué d'un condensateur monté en série avec une inductance. Ces éléments sont placés en dérivation sur l'installation et accordés sur un rang d'harmonique à éliminer. L'impédance de cet ensemble est très faible pour sa fréquence d'accord, et se comporte ainsi comme un court circuit pour l'harmonique considéré.

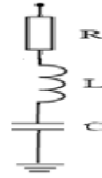


Figure (II.3) : Filtre passif résonant

L'élimination de plusieurs courants harmoniques consiste à associer un ensemble de filtres où chacun d'entre eux agit sur le rang harmonique à éliminer.

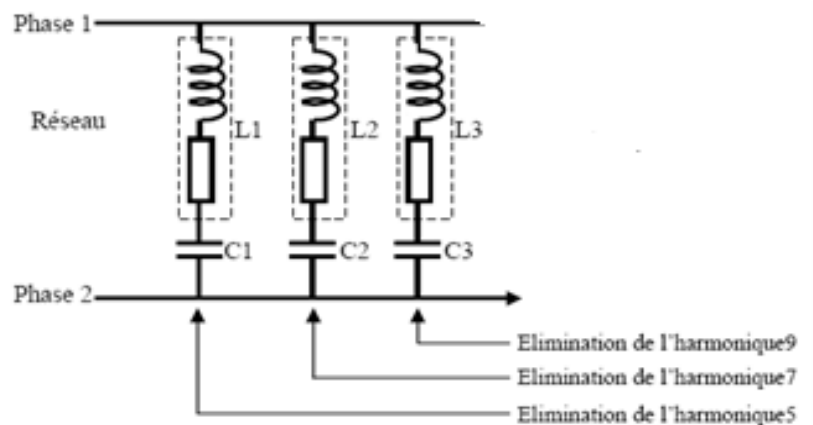


Figure (II.4): Filtres résonants agissant sur plusieurs rangs harmoniques

II.2.2. Solutions modernes

II.2.2.1. Les filtres actifs [1] [4]

Ces sont des systèmes d'électronique de puissance installés en série ou en parallèle avec la charge non linéaire, visant à compenser soit les tensions harmoniques, soit les courants harmoniques générés par la charge.

Lorsque l'onduleur qui contient le filtre actif est alimenté par une source de tension continue ou par une source de courant, il peut délivrer un courant ou une tension dont le contenu harmonique dépend uniquement de la loi de commande de commutation des interrupteurs. Les filtres actifs agissent donc comme des sources de tension ou de courant harmoniques en opposition de phase avec ceux du réseau afin de rétablir un courant de source quasi sinusoïdal.

Application typiques :

- Installation tertiaires avec générateurs d'harmoniques de puissance totale inférieure à 200 kVA (variateurs de vitesse,

alimentation sans interruptions, bureautique, ...).

- Nécessité de réduction du taux de distorsion en courant pour éviter les surcharges.

Avantages :

- S'adapte à n'importe quelle charge.
- Pas d'interaction entre filtres adjacents.
- pas de calcul préalable nécessaire.
- Large gamme de fonctionnement.
- Résistance à la surcharge.

Inconvénients: Économiquement, ces filtres sont très coûteux.

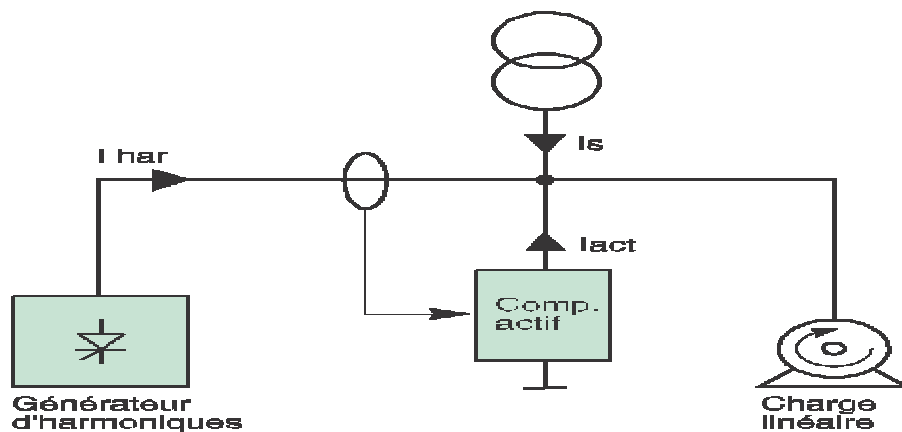


Figure (II.5): Principe d'utilisation d'un filtre actif

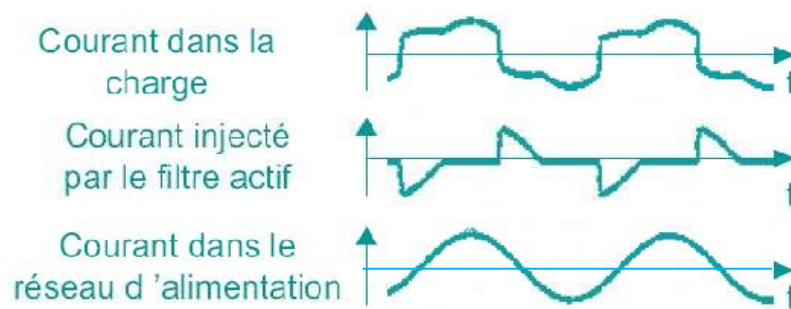


Figure (II.6) : Correction des formes d'ondes par addition des courants.

Les filtres actifs peuvent être classifiés à partir du type du convertisseur qu'ils utilisent, de leur topologie ou encore de leur nombre de phases. Nous nous limiterons ici à la classification selon leurs différentes topologies. Suivant leurs topologies les filtres actifs peuvent être en série, en parallèle, ou mixtes.

II.2.2.1.a. Filtre actif parallèle (compensation des courants harmoniques)

Le filtre actif parallèle (FAP) est surtout utilisé pour éliminer les courants harmoniques engendrés par les charges génératrices de courants harmoniques. Il peut, cependant, dans certaines conditions, être utilisé pour compenser la puissance réactive, pour amortir les résonances parallèle ou série. Le (FAP) est un onduleur modulé en largeur d'impulsion (MLI) qui est placé en parallèle avec la charge dans le but d'injecter un courant harmonique de même amplitude et de phase opposée que celui de la charge. Le (FAP) agit comme une source de courant harmonique réglable.

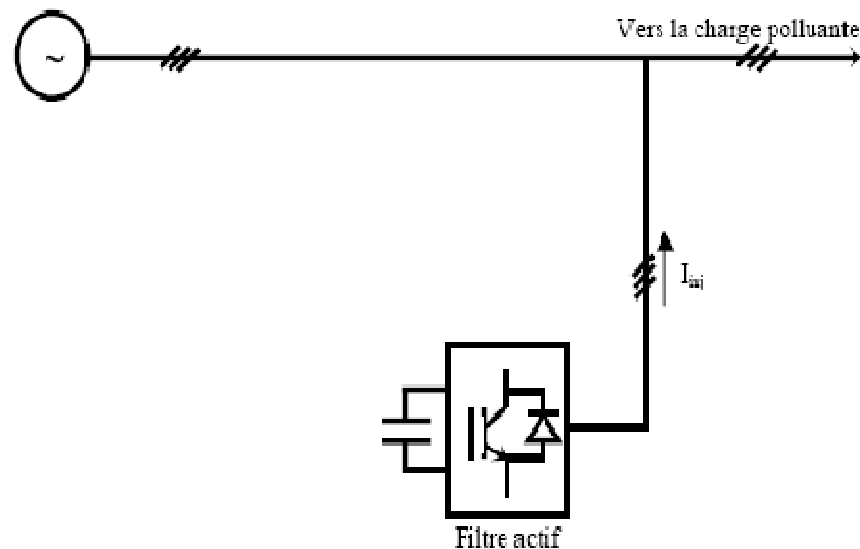


Figure (II.7) : Filtre actif parallèle.

II.2.2.1.b. Filtre actif série (compensation des tensions harmoniques)

Le filtre actif série (FAS) est placé en série entre la source et la charge non linéaire pour forcer le courant de la source à être sinusoïdal. Cette approche est basée sur le principe d'isoler les harmoniques par le contrôle de la tension de sortie du FAS. En d'autres termes, le FAS présente une impédance élevée au courant harmonique, ce qui isole ces courants, les empêchant, ainsi, d'aller vers la source ou vers la charge. Il se comporte donc comme une source de tension contrôlable. Le FAS est surtout utilisé pour filtrer les harmoniques générés par les charges non linéaires.

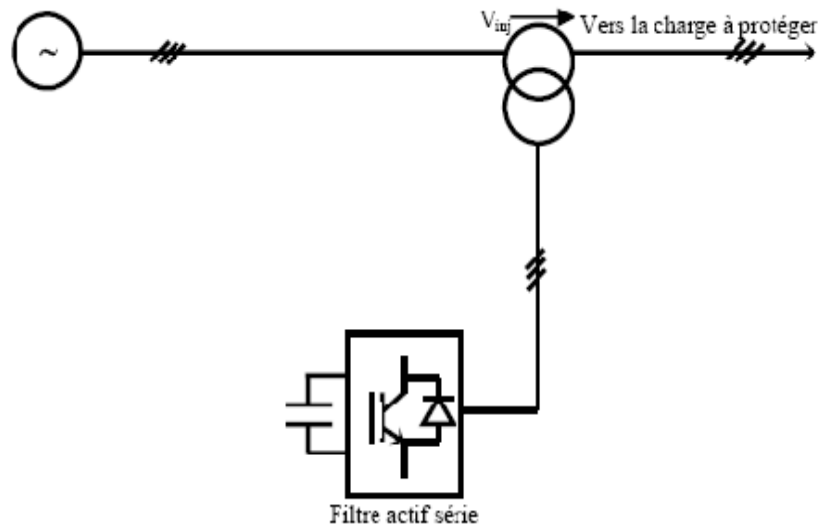


Figure (II.8) : Filtre actif série.

II.2.2.1.c. La combinaison parallèle-série d'un filtre actif (UPQC)

La combinaison d'un filtre actif série et d'un filtre actif parallèle se nomme : conditionneur universel de la qualité d'onde (UPQC), de son origine anglaise, 'Unified Power Quality Conditionner'. Cette structure permet d'aller chercher plusieurs fonctions simultanément servant à améliorer la qualité de la tension (compensation harmonique, de puissance réactive, régulation et stabilisation de tension...etc.). Le FAS a pour principales fonctions d'isoler les harmoniques entre la source et la charge polluante, de compenser la puissance réactive, et les tensions déséquilibrées. Le rôle du FAP est d'absorber les courants harmoniques, de compenser la puissance réactive, de compenser les courants de séquence négative et de faire la régulation de la capacité du côté courant continu entre les deux filtres actifs.

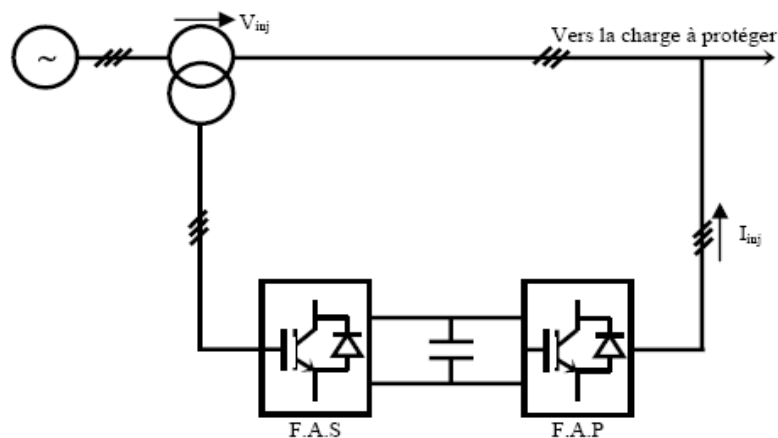


Figure (II.9) : Combinaison parallèle-série actifs (UPQC).

II.2.2.2. Filtre hybride

Les deux types de dispositifs précédents (filtre actif et filtre passif) peuvent être associés ensemble dans un même équipement et constituer un filtre hybride.

Cette nouvelle solution de filtrage permet de cumuler les avantages de solutions existantes et de couvrir un large domaine de puissance et de performance.

Applications typiques :

- Installations industrielles avec un ensemble de générateurs d'harmoniques de puissance totale supérieure à 200 KVA environ (variateurs de vitesse, alimentations sans interruptions, redresseurs, ...).
- Installation présentant un besoin de compensation d'énergie réactive.
- Nécessité de réduction du taux de distorsion en tension pour éviter la perturbation de récepteurs sensibles.
- Nécessité de réduction du taux de distorsion en courant pour éviter les surcharges.
- Recherche de conformité à des limites strictes d'émission harmonique

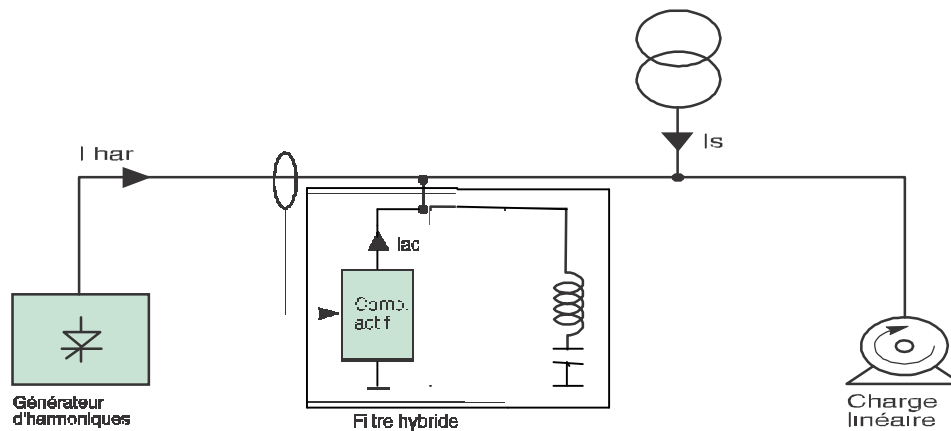


Figure (II.10) : principe de fonctionnement d'un filtre hybride.

Plusieurs combinaisons de filtre hybride sont possibles. Il est à noter que très peu de structures ont été réalisées au niveau pratique. Nous nous contenterons ici d'en exposer quelques-unes parmi les plus connues :

II.2.2.2.a. Filtre actif série avec des filtres passifs parallèles

Il empêche les courants harmoniques de circuler vers le réseau et les oblige à passer par les filtres passifs accordés à leurs fréquences.

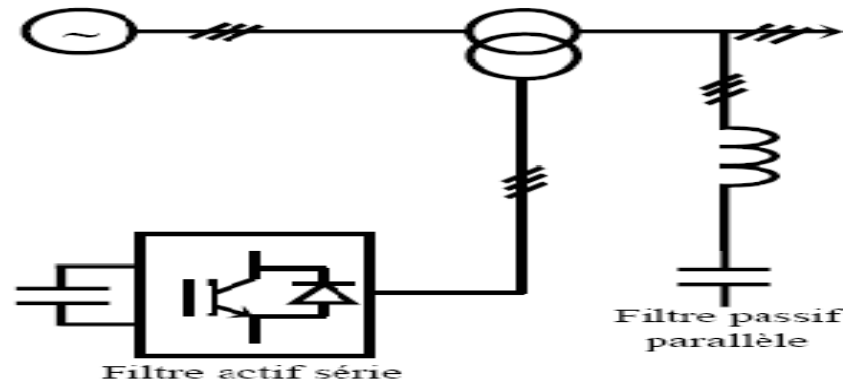


Figure (II.11): Filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.

II.2.2.2.b. Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

Il a le même principe que la combinaison d'avant avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du filtre actif série car le courant qu'il traverse est plus faible.

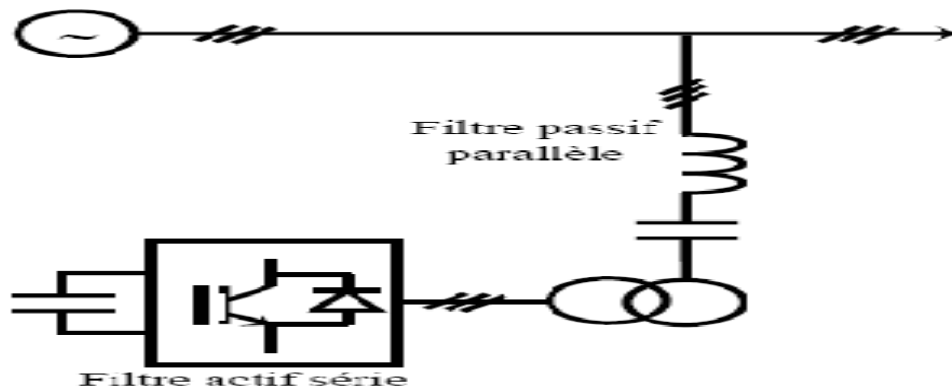


Figure (II.12): Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

II.2.2.2.c. Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

Le schéma de principe est donné sur la figure (II-13) montrant l'association en parallèle avec la charge et l'onduleur, des filtres passifs, selon le nombre d'harmoniques que l'on désire éliminer. Le rest étant pris en charge par le filtre actif. On peut dire que le filtre actif suit le travail des filtres passifs.

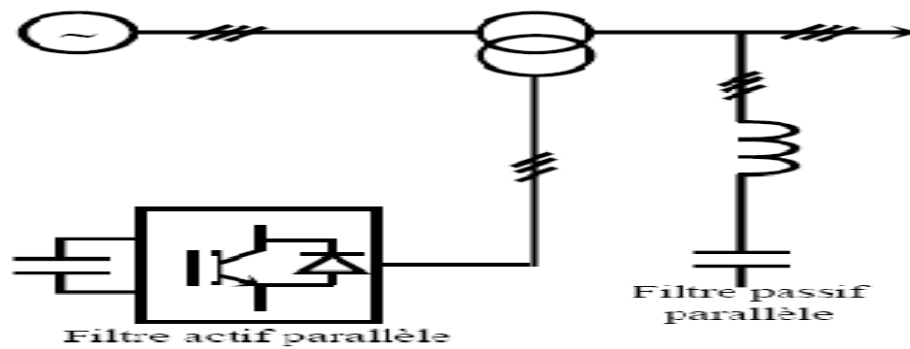


Figure (II.13): Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

II.2.2.3. Convertisseurs propres

Plutôt que d'éliminer les harmoniques sur le réseau, il est plus intéressant de chercher à ne pas les produire. En effet, toutes les alimentations électroniques génératrices de courants déformés possèdent des équivalents non polluants. Le principe de ces appareils est de contrôler les interrupteurs électroniques qu'ils contiennent de façon à ce qu'ils absorbent un courant à 50Hz rigoureusement sinusoïdal.

Deux grandes familles peuvent être distinguées, selon que le redresseur se comporte comme une source de tension (cas le plus général), ou une source de courant :

II.2.2.3.a. Convertisseur source de tension

Dans ce cas, le convertisseur se comporte vis-à-vis du réseau comme une force électromotrice, un 'générateur de tension sinusoïdal', et le courant sinusoïdal est obtenu en intercalant une inductance entre le réseau et la source de tension.

La modulation de la tension est obtenue par l'intermédiaire d'un asservissement visant à maintenir le courant au plus près de la sinusoïde de tension souhaitée. Même si d'autres charges non linéaires élèvent le taux de distorsion de la tension du réseau, la régulation peut agir de façon à prélever un courant sinusoïdal.

Les faibles courants harmoniques résiduels ont une fréquence qui est celle de la modulation, et de ses multiples.

II.2.2.3.b. Convertisseur source de courant

Dans ce cas le convertisseur se comporte comme un générateur de courant haché.

Un filtre passif relativement conséquent est indispensable pour restituer, coté secteur, un courant sinusoïdal.

Ce type de convertisseur est utilisé dans les applications spécifiques, par exemple pour fournir un courant continu très bien régulé.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons illustré les différents effets néfastes du phénomène harmonique sur les réseaux électriques, les dommages causés par la présence des harmoniques peuvent être plus ou moins importants selon la configuration du réseau et les équipements présents.

Nous avons aussi passé en revue les différentes solutions contribuant à l'atténuation de la pollution harmonique.

Parmi ces solutions nous avons cité le filtrage passif et le filtrage actif qui se sont clairement démarqués dans le monde industriel lors des dernières décennies. De part ses avantages sur le filtre passif, le filtre actif constitue la voie par excellence pour, non seulement compenser les harmoniques, mais pour améliorer la qualité de l'énergie du réseau électrique.

Introduction

Dans ce chapitre on s'intéressera à l'analyse de la qualité de la tension d'un réseau électrique de distribution à 13 jeux de barres sous MATLAB/Simulink, afin d'étudier l'effet de l'éloignement d'une charge polluante sur la tension des autres.

III.1. Description du réseau étudié [7]

L'étude se fera sur un réseau test, représentant un réseau électrique industriel de distribution de moyenne tension.

La tension de service qui alimente l'installation est de 69KV.

Le réseau de distribution local fonctionne à 13.8KV.

Le système est représenté par la figure (III.1). Les caractéristiques de ce dernier sont données dans les tableaux (III.1), (III.2), (III.3) et (III.4).

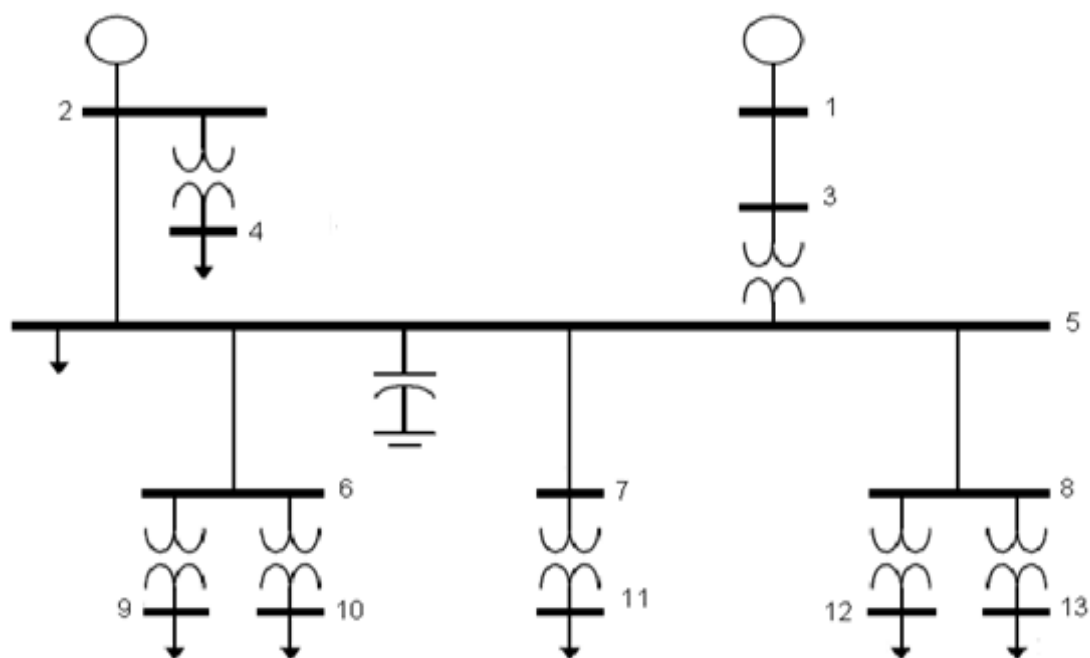


Figure (III.1) : Réseau industriel équilibré à 13 jeux de barres.

III.2. Caractéristiques du réseau

Valeurs de base : ($U_b=13,8$ KV, $S_b=10\ 000$ KVA).

	$R(pu)$	$X(pu)$
<i>ligne1 – 3</i>	0,00139	0,00296
<i>câble2 – 5</i>	0,00122	0,00243
<i>câble5 – 6</i>	0,00075	0,00063
<i>câble5 – 7</i>	0,00157	0,00131
<i>câble5 – 8</i>	0,00109	0,00091

Tableau (III .1) : Impédances de la ligne et des câbles en unités réduites

<i>Transformateur</i>	$S_n(KVA)$	$U_{n1}(KV)$	$U_{n2}(KV)$	$R(pu)$	$X(pu)$
3-5	15000	69	13,8	0,004698	0,079862
2-4	1500	13,8	0,48	0,009593	0,056694
6-9	1250	13,8	0,48	0,007398	0,044388
6-10	1725	13,8	4,16	0,007442	0,059537
7-11	1500	13,8	0,48	0,008743	0,056831
8-12	1500	13,8	0,48	0,008363	0,05436
8-13	3750	13,8	2,4	0,004568	0,05481

Tableau (III .2) : Données des transformateurs.

$N_{\text{æud}}$	$V_{\text{max}}(pu)$	$\delta(\text{deg})$	$P_{\text{Gen}}(KW)$	$Q_{\text{Gen}}(KVar)$	$P_{\text{ch}}(KW)$	$Q_{\text{ch}}(KVar)$
1	1,000	0,00	7450	540	—	—
2	0,995	−2, 39	2000	1910	—	—
3	0,999	−0,13	—	—	—	—
4	0,995	−3,53	—	—	600	530
5	0,994	−2,4	—	—	2240	2000
6	0,994	−2,4	—	—	—	—
7	0,994	−2,4	—	—	—	—
8	0,994	−2,4	—	—	—	—
9	0,980	−4,72	—	—	1150	290
10	0,996	−4,85	—	—	1310	1130
11	0,981	−4,16	—	—	810	800
12	0,979	−3,08	—	—	370	330
13	1,001	−4,69	—	—	2800	2500

Tableau (III.3) : Tensions des sources, des charges et des jeux de barres (Résultats de l'étude de l'écoulement de puissance).

<i>Rang harmonique h</i>	<i>Amplitude (%)</i>	<i>Angle correspondant</i>
1	100,00	0,00
5	18,24	−55,68
7	11,90	−84,11
11	5,73	−143 ,56
13	4,01	−175 ,58
17	1 ,93	111,39
19	1,39	68,30
23	0 ,94	−24,61
25	0,86	−67,64
29	0,71	−145,46
31	0,62	176,83
35	0,44	97 ,40
37	0,38	54, 36

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

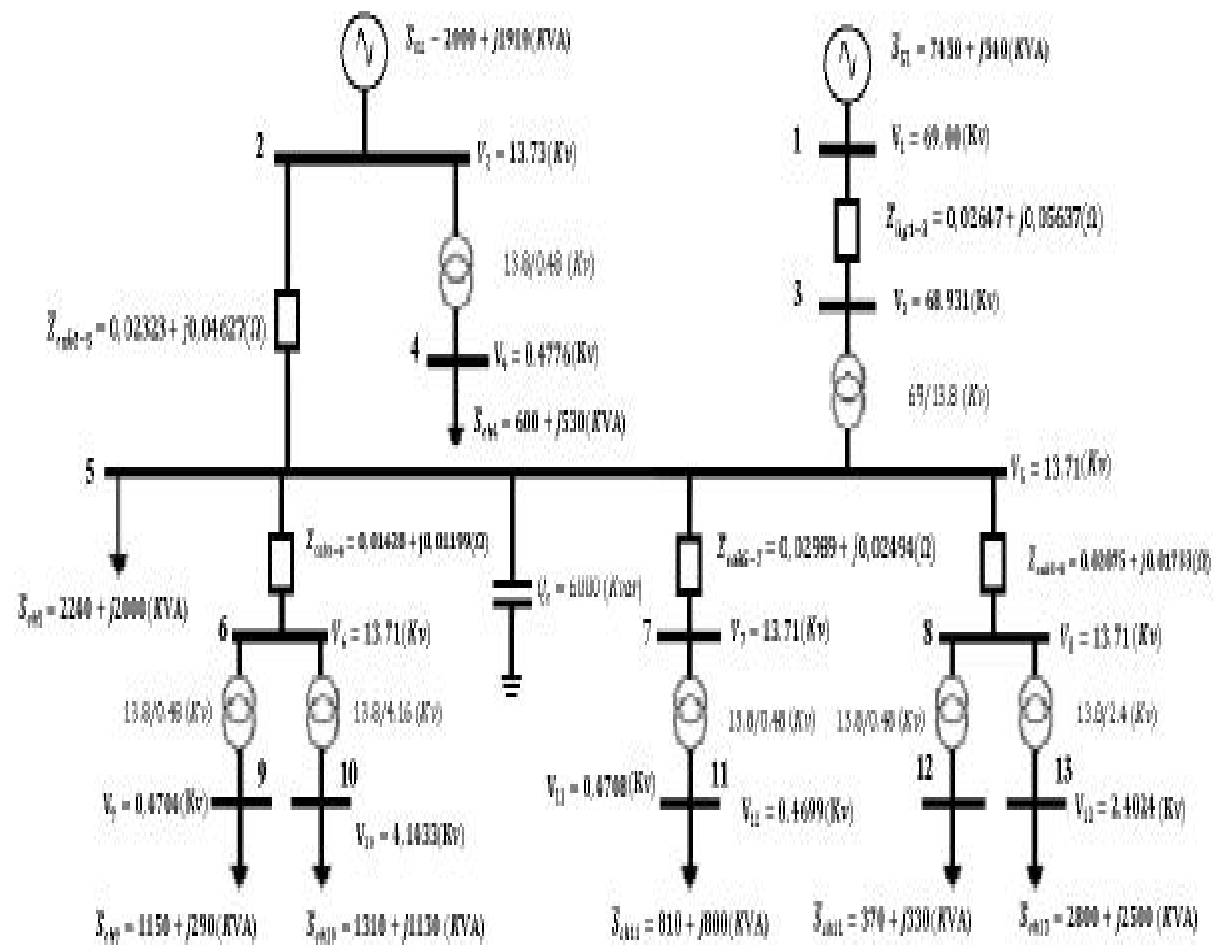


Figure (III.2) : Schéma équivalent du réseau étudié.

III.3. Calcul des paramètres du réseau électrique étudié en unités réduites (*Per Unit*)

Système de base choisi

$S_b=10\,000\text{ KVA}$, $U_{b1}=69\text{ KV}$, $U_{b2}=13,8\text{ KV}$, $U_{b3}=0,48\text{ KV}$, $U_{b4}=4,16\text{ KV}$, $U_{b5}=2,4\text{ KV}$.

III.3.1. Paramètres du générateur et de la source

Equations utilisées

$$X(\Omega) = \frac{U_n^2}{S_{cc}} \quad (\text{III. 1})$$

$$X(pu) = \frac{X(\Omega)}{Z_b(\Omega)} \quad (\text{III. 2})$$

$$Z_b(\Omega) = \frac{U_n^2}{S_b} \quad (\text{III. 3})$$

III.3.1.1. Source

Données : $U_n = 69\text{ KV}$, $S_{cc} = 1000\text{ MVA}$.

$$X_s = \frac{(69 * 10^3)^2}{10^3 * 10^6} = 4,761 (\Omega)$$

$$Z_b = \frac{(69 * 10^3)^2}{10 * 10^6} = 476,1(\Omega)$$

$$X_s = \frac{4,761}{476,1} = 0,01(pu)$$

Avec X_s : réactance de la source

III.3.1.2. Générateur

Données : $U_n = 13,8\text{ KV}$, $S_{cc} = 1000\text{ MVA}$.

$$X_G = \frac{(13,8 * 10^3)^2}{10^3 * 10^6} = 0,19044 (\Omega)$$

$$Z_b = \frac{(13,8 * 10^3)^2}{10 * 10^6} = 19,044(\Omega)$$

$$X_G = \frac{4,761}{476,1} = 0,01(pu)$$

Avec X_G : réactance du générateur

III.3.2. Paramètres des transformateurs

$$R_{transfnouv}(pu) = R_{transfanc}(pu) * \left(\frac{U_{banc}}{U_{bnouv}}\right)^2 * \left(\frac{S_{bnouv}}{S_{banc}}\right) \quad (III. 4)$$

$$X_{transfnouv}(pu) = X_{transfanc}(pu) * \left(\frac{U_{banc}}{U_{bnouv}}\right)^2 * \left(\frac{S_{bnouv}}{S_{banc}}\right) \quad (III. 5)$$

$$Z_b(\Omega) = \frac{U_b^2}{S_b} \quad (III. 3)$$

$$L_b(H) = \frac{Z_b}{2\pi f} \quad (III. 6)$$

$$X_{transf}(\Omega) = X_{transfnouv}(pu) * Z_b(\Omega) \quad (III. 7)$$

$$L_{transf}(H) = \frac{X_{transfnouv}(\Omega)}{2\pi f} \quad (III. 8)$$

$$L_{transf}(pu) = \frac{L_{transf}(H)}{L_b(H)} \quad (III. 9)$$

III.3.2.1. Coté primaire

Exemple de calcul (pour le transformateur 3-5)

Données : $R_{transfanc} = 0,004698 \text{ pu}$, $U_{banc} = 69 \text{ KV}$, $S_{banc} = 15.10^6 \text{ KVA}$,

$$X_{transfanc} = 0,079862 \text{ pu} .$$

$$R_{transfnouv} = 0,004698 * (1)^2 * \left(\frac{10 * 10^6}{15 * 10^6}\right) = 0,00313(pu)$$

$$X_{transfnouv} = 0,079862 * (1)^2 * \left(\frac{10 * 10^6}{15 * 10^6}\right) = 0,05324(pu)$$

$$Z_b = \frac{(69)^2}{10} = 476,1(\Omega)$$

$$L_b = \frac{476,1}{2\pi * 50} = 1,26353(H)$$

$$X_{transf} = 0,05324 * 476,1 = 25,34756(\Omega)$$

$$L_{transf} = \frac{25,34756}{2\pi * 50} = 0,06727(H)$$

$$L_{transf} = \frac{0,06727}{1,26353} = 0,05324(pu)$$

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau ci dessous :

	$R_{transfnouv}$ (pu)	$X_{transfnouv}$ (pu)	Z_b (Ω)	L_b (H)	X_{transf} (Ω)	L_{transf} (H)	L_{transf} (pu)
3 – 5	0,00313	0,05324	476,1	1,26353	25,34756	0,06727	0,05324
2 – 4	0,06395	0,37793	19,044	0,05054	7,19736	0,01910	0,37793
6 – 9	0,05918	0,35504	19,044	0,05054	6,76138	0,01794	0,35504
6 – 10	0,04314	0,34510	19,044	0,05054	6,57211	0,01744	0,34510
7 – 11	0,05828	0,37886	19,044	0,05054	7,21513	0,01914	0,37886
8 – 12	0,05575	0,3624	19,044	0,05054	6,90154	0,01831	0,3624
8 – 13	0,01218	0,14616	19,044	0,05054	2,78347	0,00738	0,14616

Tableau (III.5) : Paramètres des transformateurs coté primaire calculés en unités réduites.

III.3.2.2. Coté secondaire

Exemple de calcul (pour le transformateur 3-5)

Données : $R_{transfanc} = 0,004698 \text{ pu}$, $U_{banc} = 13,8 \text{ KV}$, $S_{banc} = 15.10^6 \text{ KVA}$,

$$R_{transfanc} = 0,079862 \text{ pu.}$$

$$R_{transfnouv} = 0,004698 * (1)^2 * \left(\frac{10 * 10^6}{15 * 10^6} \right) = 0,00313(\text{pu})$$

$$X_{transfnouv} = 0,079862 * (1)^2 * \left(\frac{10 * 10^6}{15 * 10^6} \right) = 0,05324(\text{pu})$$

$$Z_b = \frac{(13,8)^2}{10} = 19,044(\Omega)$$

$$L_b = \frac{19,044}{2\pi * 50} = 0,0505(H)$$

$$X_{transf} = 0,05324 * 19,044 = 1,013903(\Omega)$$

$$L_{transf} = \frac{1,013903}{2\pi * 60} = 0,002691(H)$$

$$L_{transf} = \frac{0,002691}{0,0505} = 0,05324(\text{pu})$$

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau ci dessous :

$transf$	$R_{transf\text{ nouv}}$ (pu)	$X_{transf\text{ nouv}}$ (pu)	Z_b (Ω)	L_b (H)	$X_{transf\text{ nouv}}$ (Ω)	L_{transf} (H)	L_{transf} (pu)
3 – 5	0,00313	0,05324	19,044	0,0505	1,013903	0,002691	0,05324
2 – 4	0,06395	0,37793	0,023	6E-05	0,008708	2,31E-05	0,377933
6 – 9	0,05918	0,35504	0,023	6E-05	0,00818	2,17E-05	0,35504
6 – 10	0,04314	0,34510	1,7306	0,0046	0,597219	0,001585	0,345101
7 – 11	0,05828	0,37886	0,023	6E-05	0,008729	2,32E-05	0,378866
8 – 12	0,05575	0,3624	0,023	6E-05	0,00835	2,22E-05	0,3624
8 – 13	0,01218	0,14616	0,576	0,0015	0,084188	0,000223	0,14616

Tableau (III.6) : Paramètres des transformateurs coté secondaire calculés en unités réduites.

III.3.3. Paramètre des charges

Equations utilisées

$$R_{ch}(\Omega) = \frac{U_n^2}{P_{ch}(1 + \tan^2 \varphi_{ch})} \quad (\text{III. 10})$$

$$\tan \varphi_{ch} = \frac{Q_{ch}}{P_{ch}} = \frac{X_{ch}}{R_{ch}} \quad (\text{III. 11})$$

$$X_{ch}(\Omega) = R_{ch} * \tan \varphi_{ch} \quad (\text{III. 12})$$

$$Z_b(\Omega) = \frac{U_b^2}{S_b} \quad (\text{III. 3})$$

$$R_{ch}(pu) = \frac{R_{ch}(\Omega)}{Z_b(\Omega)} \quad (\text{III. 13})$$

$$X_{ch}(pu) = \frac{X_{ch}(\Omega)}{Z_b(\Omega)} \quad (\text{III. 14})$$

Exemple de calcul (charge connectée au nœud 4)

Données : $U_n = 0,48 \text{ KV}$, $P_{ch4} = 600 \text{ KW}$, $Q_{ch4} = 530 \text{ KVar}$.

$$R_{ch4} = \frac{(0,48 * 10^3)^2}{600 * 10^3(1 + (0,88333)^2)} = 0,2157(\Omega)$$

$$\tan \varphi_{ch4} = \frac{530 * 10^3}{600 * 10^3} = 0,88333$$

$$X_{ch4} = 0,2157 * 0,88333 = 0,19053(\Omega)$$

$$Z_b = \frac{(0,48 * 10^3)^2}{10 * 10^6} = 0,02304(\Omega)$$

$$R_{ch4} = \frac{0,2157}{0,02304} = 9,36183(pu)$$

$$X_{ch4} = \frac{0,19053}{0,02304} = 8,26962(pu)$$

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau ci dessous :

<i>Nœud</i>	<i>$\tan \varphi_{ch}$</i>	<i>$R_{ch}(\Omega)$</i>	<i>$X_{ch}(\Omega)$</i>	<i>$Z_b(\Omega)$</i>	<i>$R_{ch}(pu)$</i>	<i>$X_{ch}(pu)$</i>
4	0,88333	0,2157	0,19053	0,02304	9,36183	8,26962
5	0,89286	47,3059	42,2374	19,044	2,48403	2,21789
9	0,25217	0,18837	0,0475	0,02304	8,17574	2,06171
10	0,8626	7,57445	6,53369	1,73056	4,37688	3,77548
11	0,98765	0,14399	0,14221	0,02304	6,24952	6,17236
12	0,89189	0,34682	0,30932	0,02304	15,0529	13,4255
13	0,89286	1,14464	1,022	0,576	1,98722	1,77431

Tableau (III.7) : Paramètres des charges calculés en unités réduites.

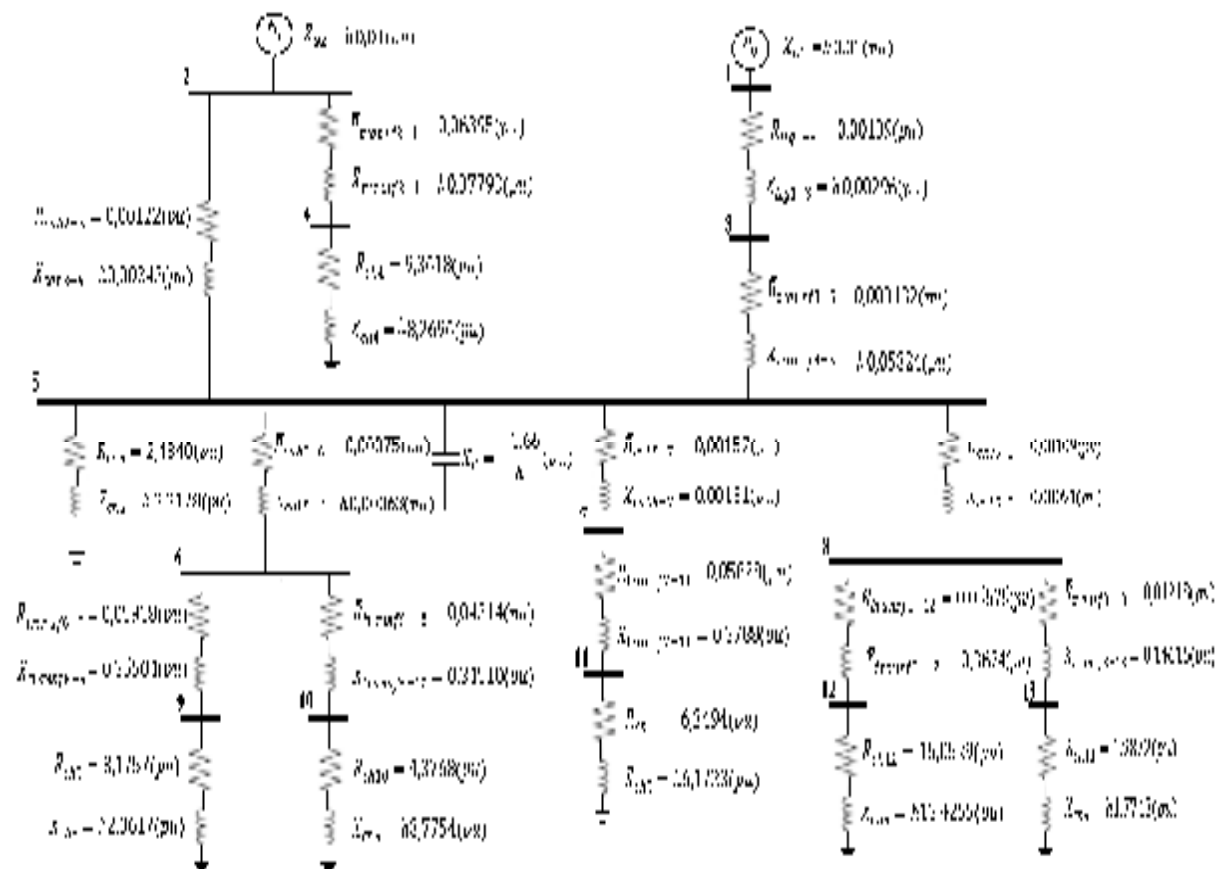


Figure (III.3) : Schéma de modélisation du réseau test.

III.5. Partie simulation

III.5.1. Paramètres de simulation

III.5.1.1. Alimentation

Source: $U_1=69$ KV Générateur : $U_2=13,98$ KV

III.5.1.2. Transformateurs

<i>Transf</i>	<i>S_n(KVA)</i>	<i>V1(KV)</i>	<i>V2(KV)</i>	<i>R1 (pu)</i>	<i>L1 (pu)</i>
3 – 5	15000	39 ,83	7,96	0,003132	0,05324
2 – 4	1500	7,96	0 ,277	0,063953333	0,37793333
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	0,058286667	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 (III.8) : Paramètres de simulation pour les transformateurs.

III.5.1.3. Câbles et ligne

Ils sont représentés par une résistance et une inductance en série.

	<i>R(Ω)</i>	<i>L(H)</i>
<i>ligne1 – 3</i>	0,02647116	0,0001496
<i>câble2 – 5</i>	0,02323368	0,00012282
<i>câble5 – 6</i>	0,014283	3,1841E-05
<i>câble5 – 7</i>	0,02989908	6,6209E-05
<i>câble5 – 8</i>	0,02075796	4,5993E-05

Tableau (III.9) : Paramètres de simulation pour la ligne et les câbles.

III.5.1.4. Charges

Elles sont représentées par une résistance et une inductance en série.

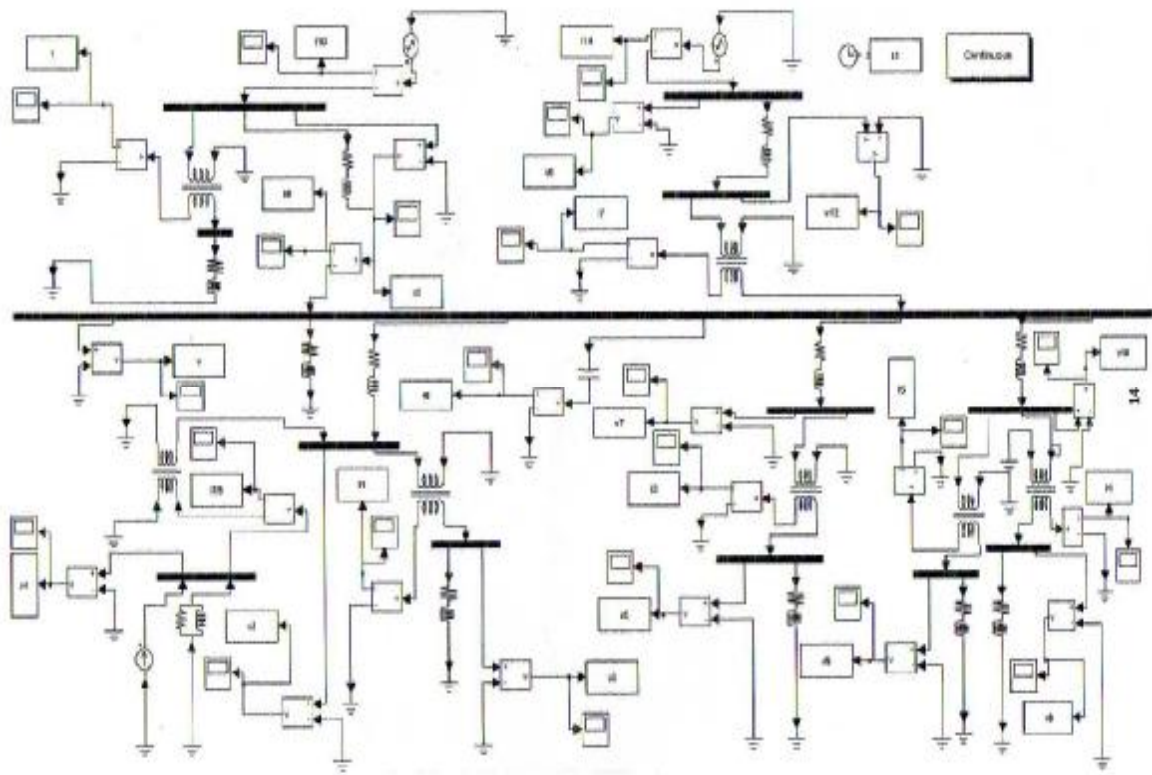
	<i>V_n (KV)</i>	<i>P(KW)</i>	<i>Q(KVAR)</i>
<i>nœud 4</i>	0 ,277	600	530
<i>nœud 5</i>	7,96	2240	2000
<i>nœud 9</i>	0,277	1150	290
<i>nœud 10</i>	2,4	1310	1130
<i>nœud 11</i>	0,277	810	800
<i>nœud 12</i>	0,277	370	330
<i>nœud 13</i>	1,385	2800	2500

Tableau (III.10) : Paramètres de simulation pour les charges.

III.5.1.5. Condensateur

$V_n=7,96$ KV

$Q_c=6000$ KVAR



Figure(III.7) : Représentation du réseau étudié sous MATLAB/Simulink.

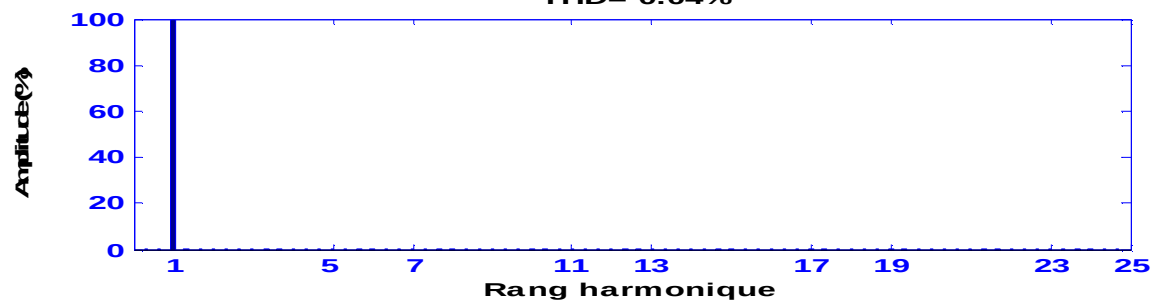
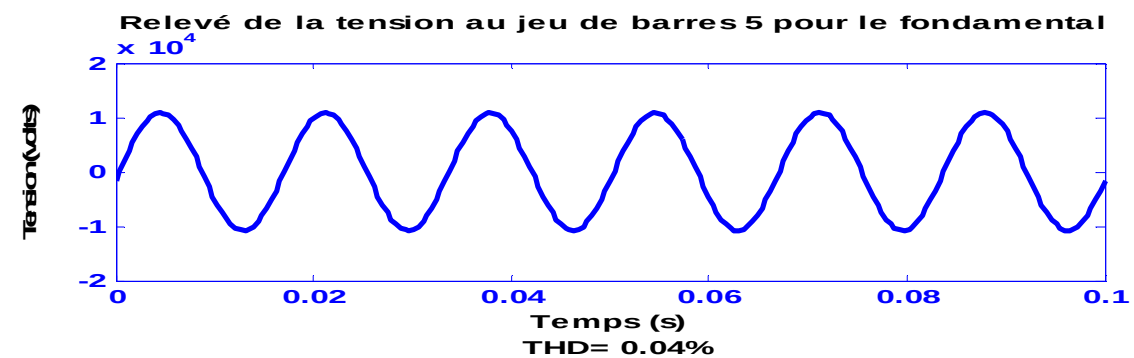
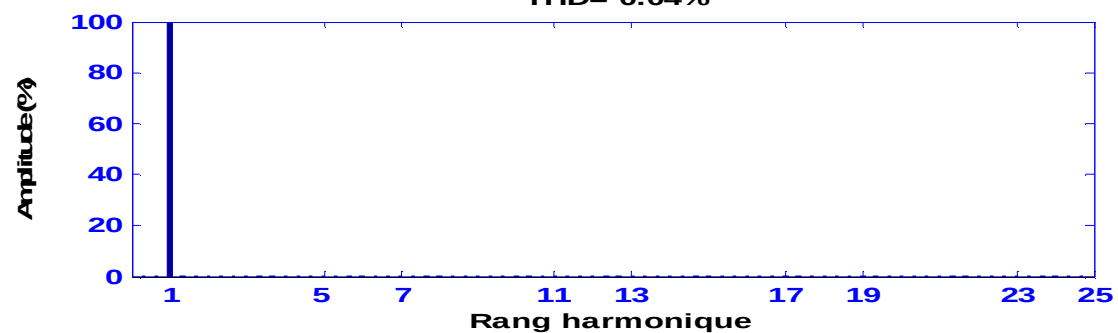
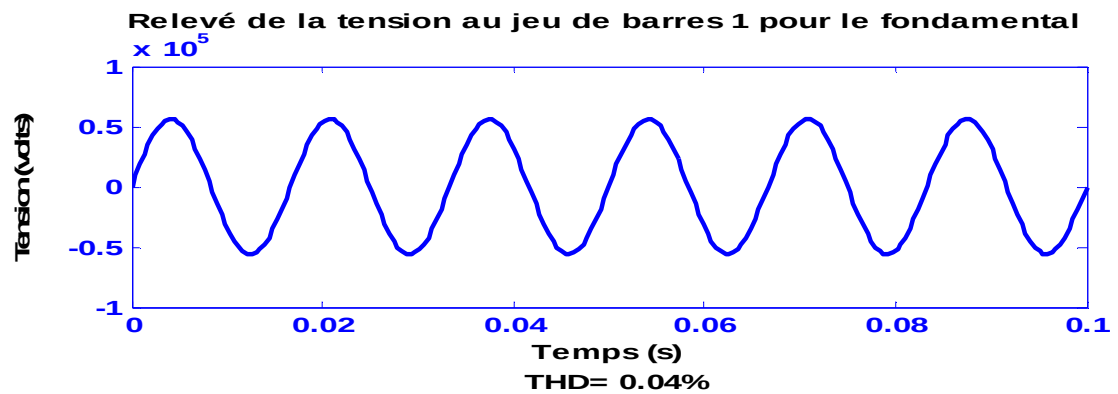
III.5.2. Résultats de simulation

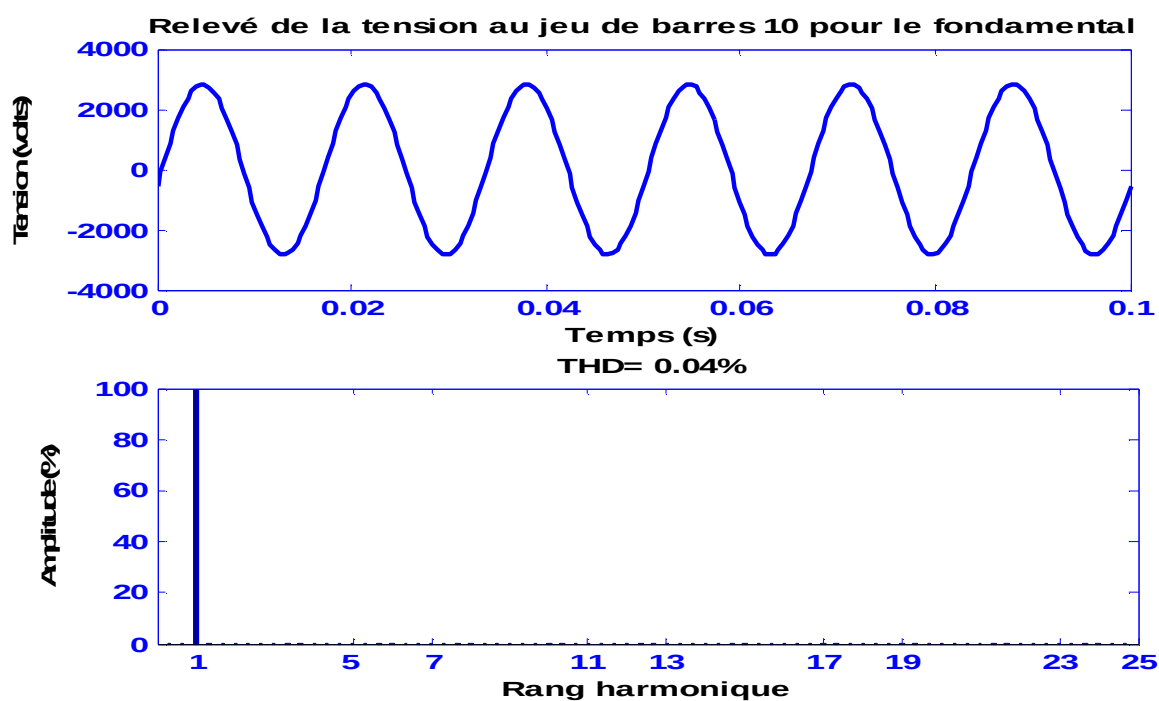
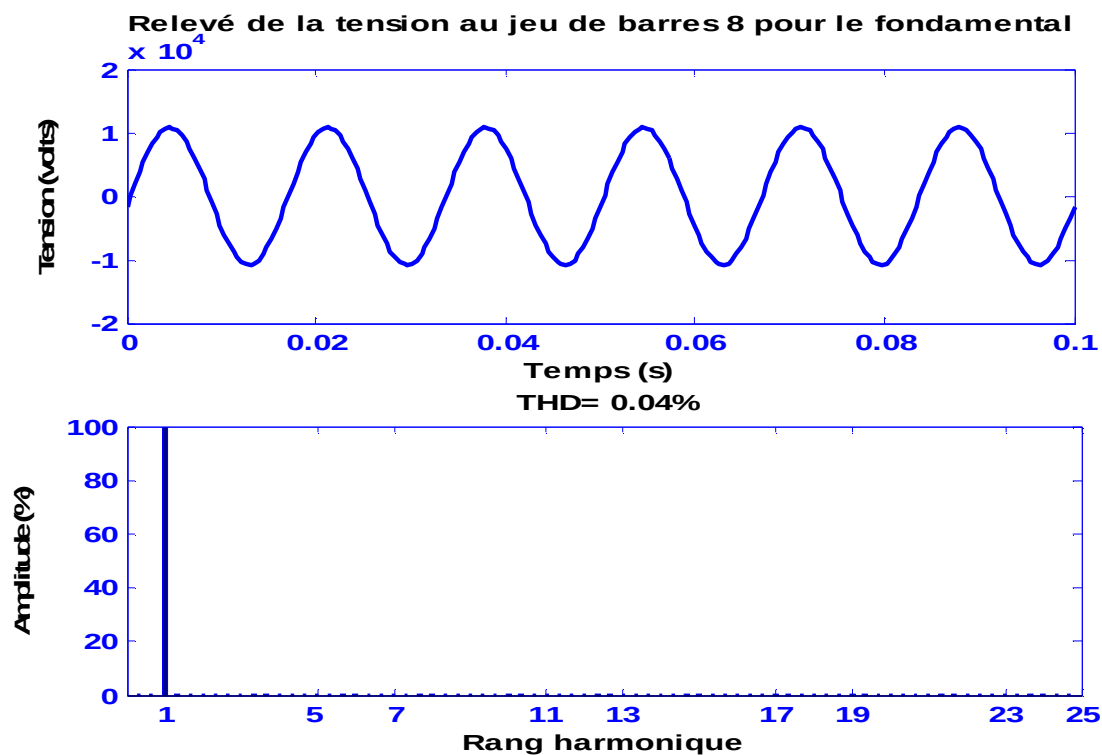
Le but de cette étude est de montrer l'effet de la variation de la réactance du câble reliant la charge polluante au jeu de barres principal sur le reste du réseau considéré.

Nous allons en premier lieu, considérer le réseau sans la charge polluante. Ensuite, l'étude se fera sur le réseau tel qu'il est « $x=3.2.10^{-5}H$ », puis on fera varier la réactance du câble dont la première valeur fera en sorte que la charge sera directement liée au jeu de barres principal « $x=0$ », et dont la deuxième valeur qui éloignera cette charge de ce dernier « $x=3.2.10^{-2}H$ ». A chaque étape de la simulation, on injecte les rangs harmoniques du 5^{ème} jusqu'au 23^{ème}.

III.5.2.1.Relevé des tensions et des taux de distorsion harmonique en tension (TDH_v) pour les jeux de bars 1, 5, 8 et 10 en fonction du rang harmonique h.

III.5.2.1.a.Analyse harmonique du réseau sans la charge polluante



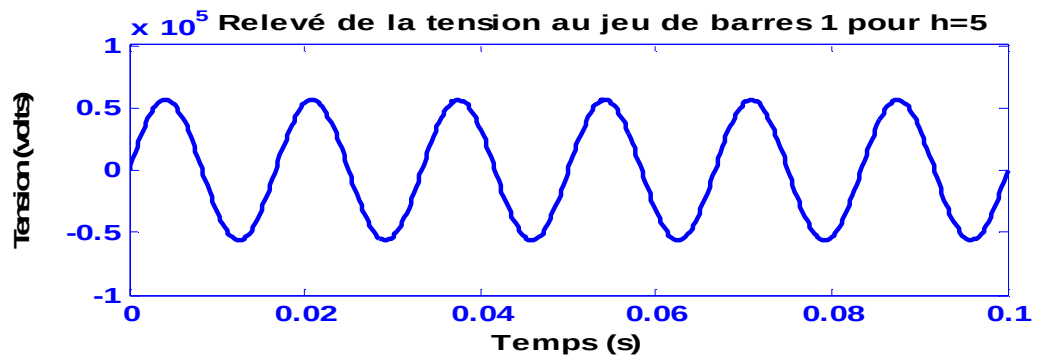


Discussion des résultats :

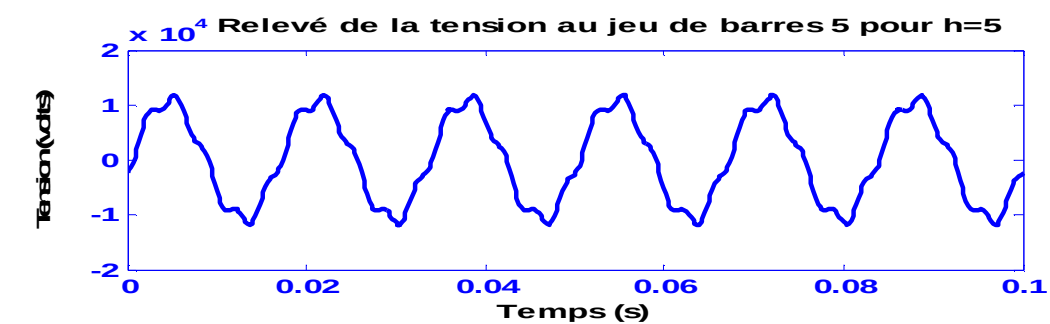
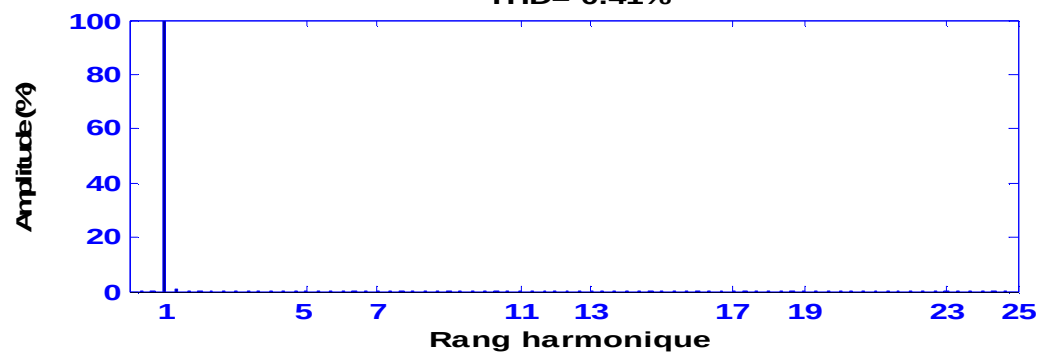
Pour le fondamental le forme du signal tension dans les jeux de barres (1, 5, 8, 10) est sinusoïdale, car leurs taux de distorsions harmonique en tension sont faibles (0.04%).

III.5.2.1.b. Analyse harmonique du réseau pour différentes réactances du câble reliant la charge polluante au jeu de barres principal (5)

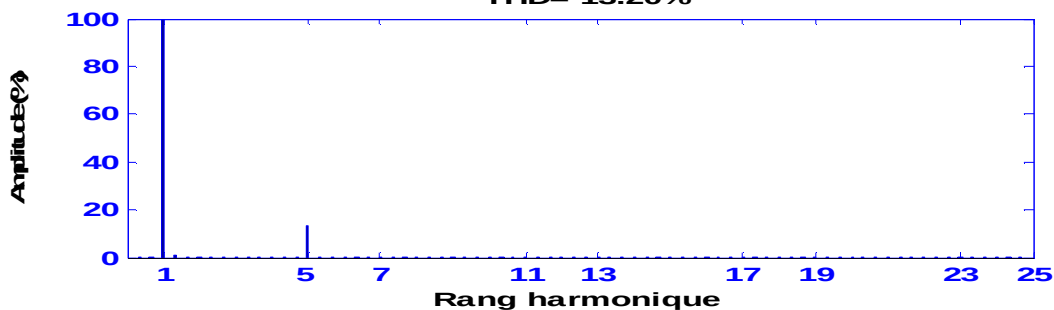
III.5.2.1.b.1. pour $X=3.2 \cdot 10^{-5}$ (cas initial)
pour $h=5$

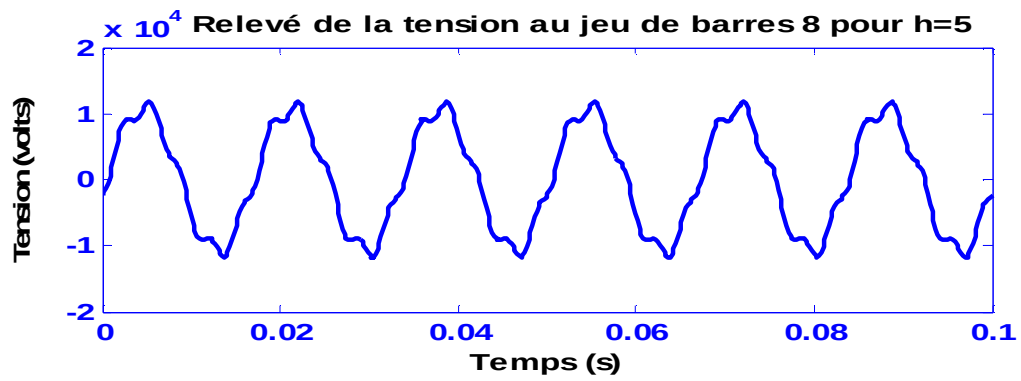


THD= 0.41%

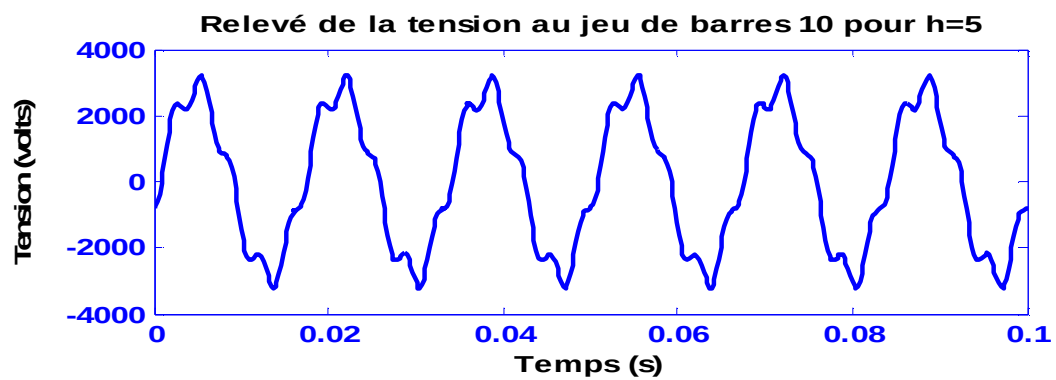
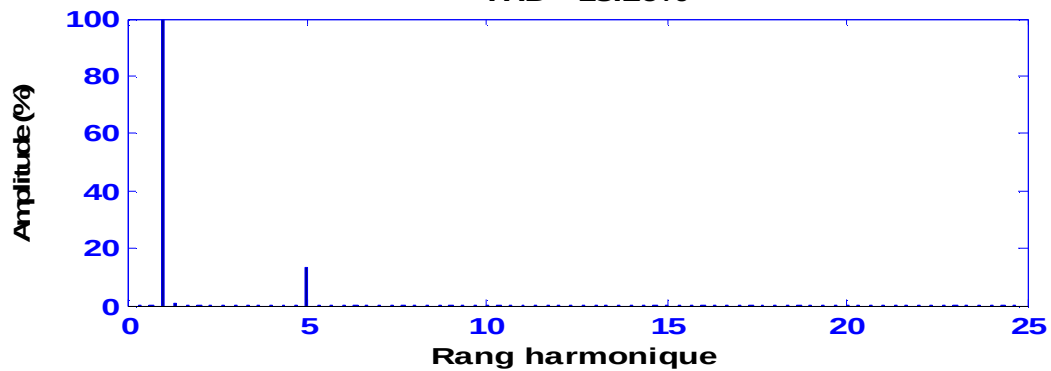


THD= 13.20%

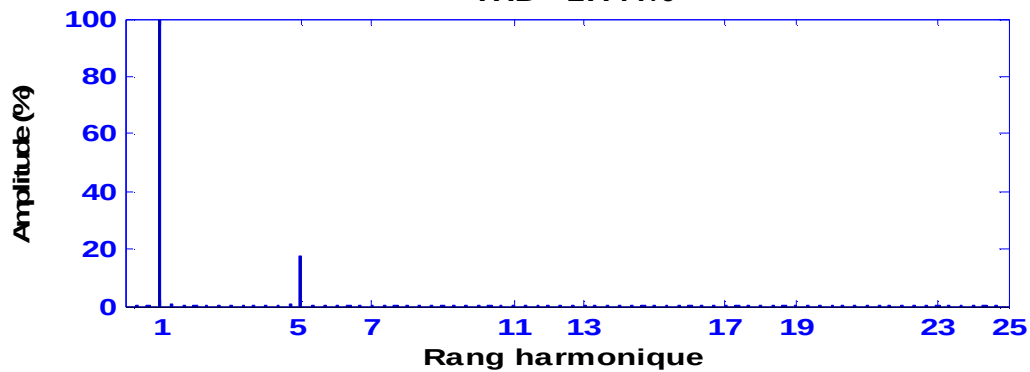




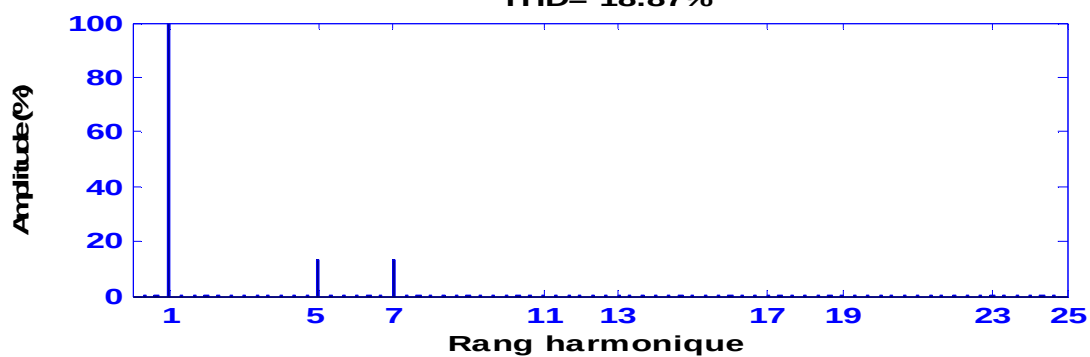
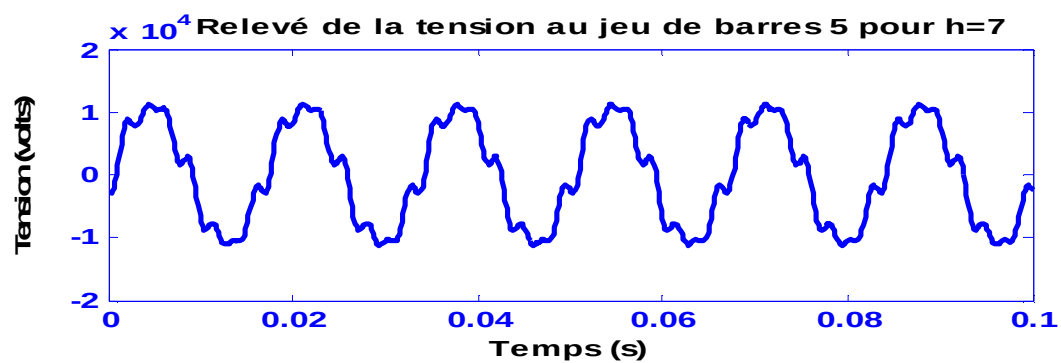
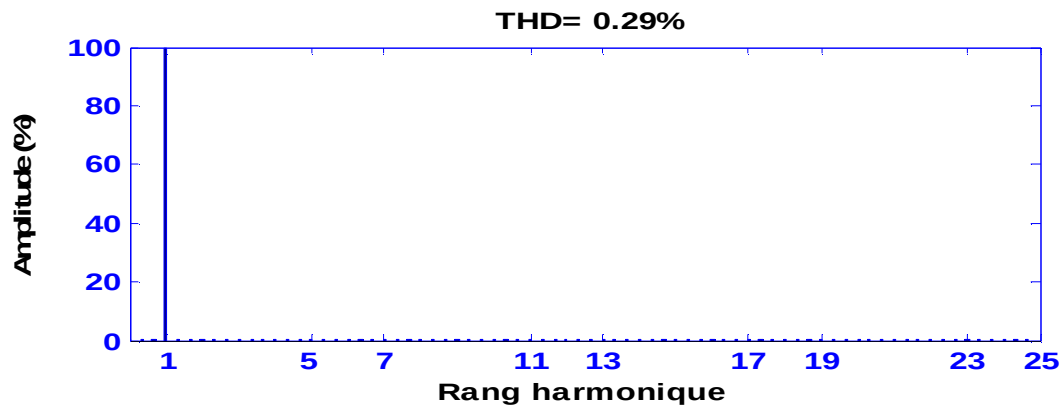
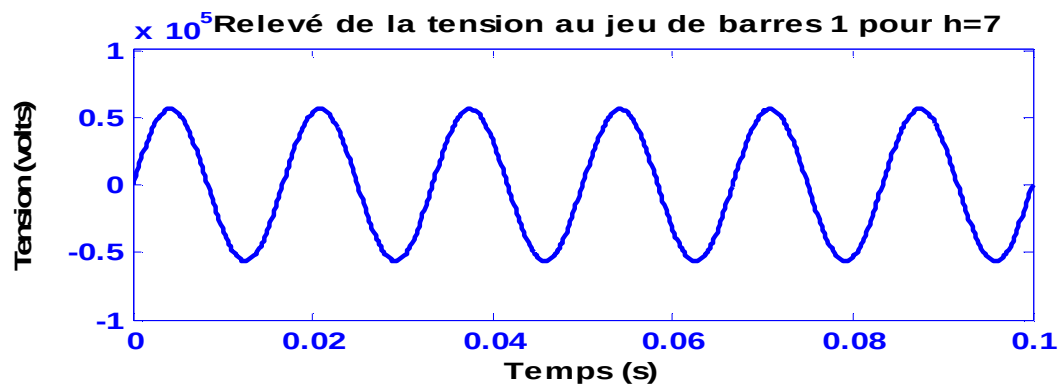
THD= 13.20%

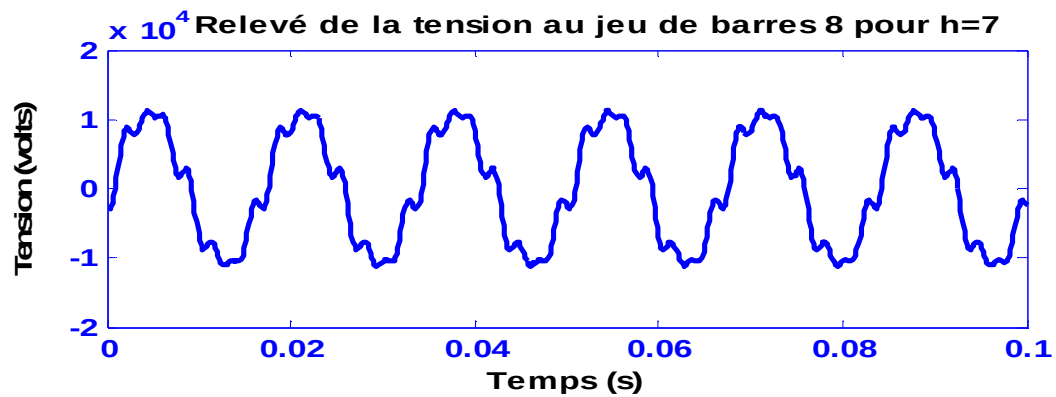


THD= 17.44%

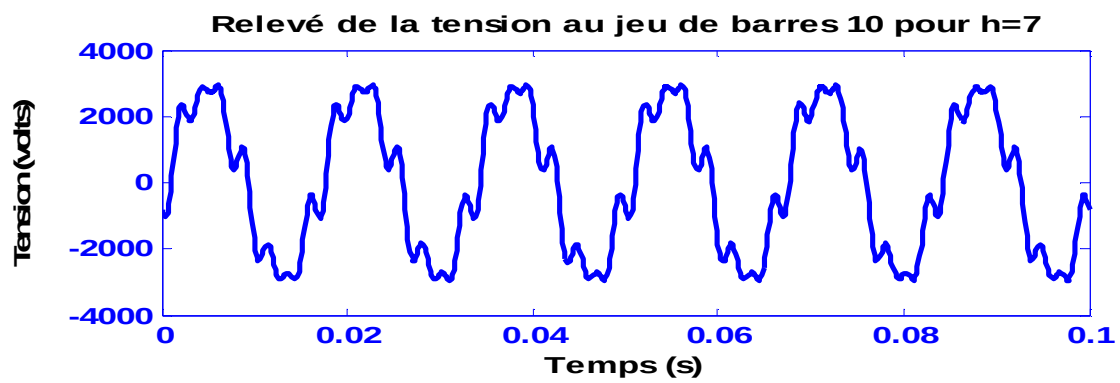
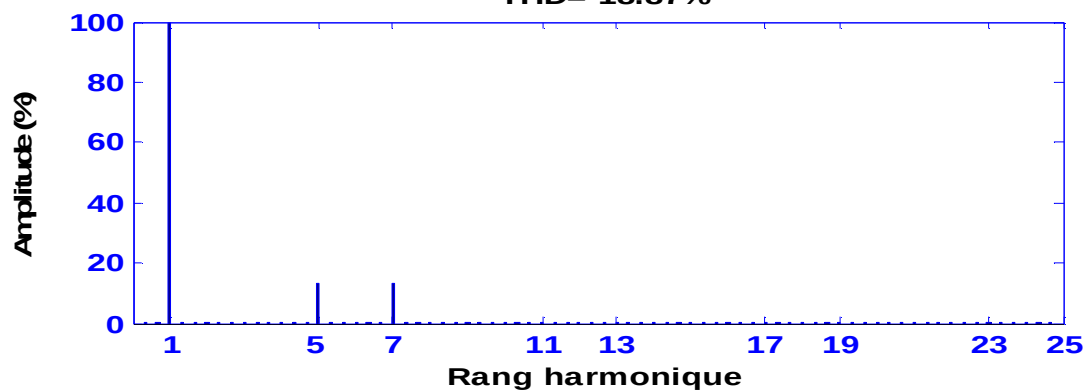


Pour $h=7$

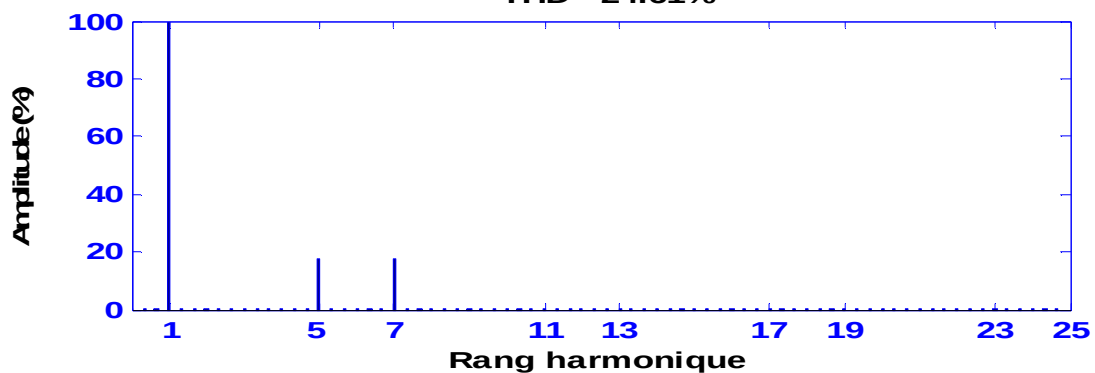




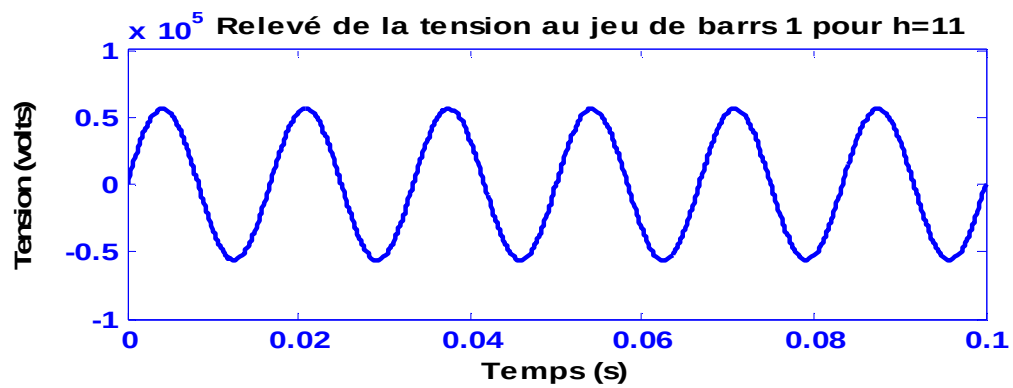
THD= 18.87%



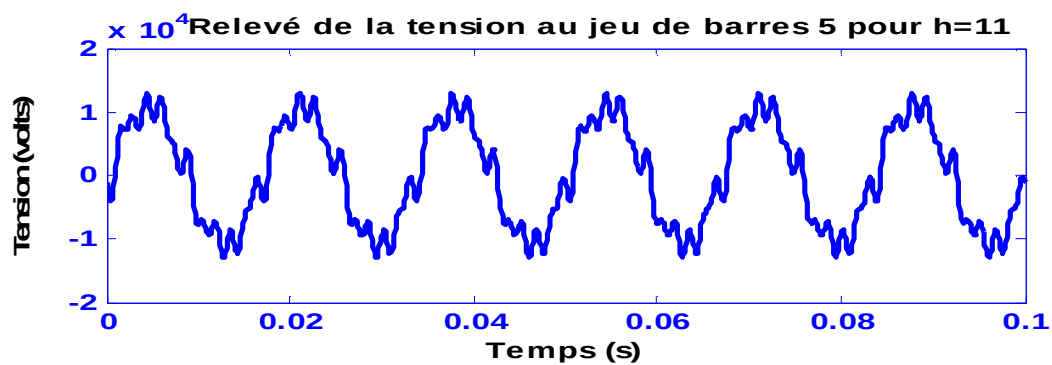
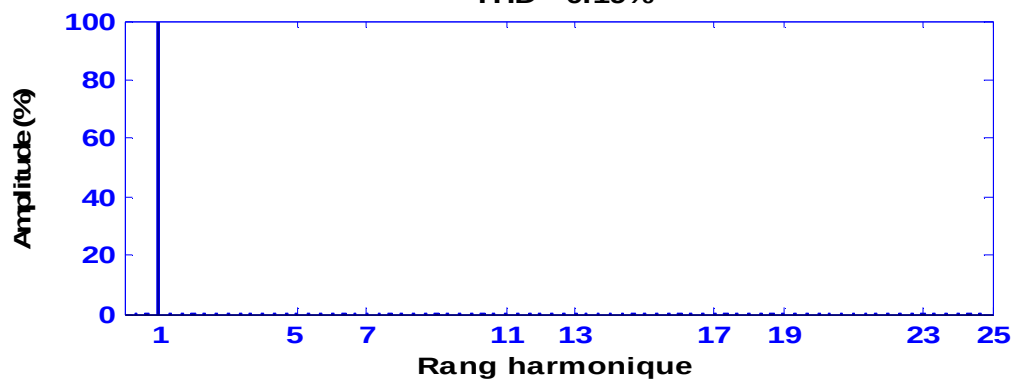
THD= 24.61%



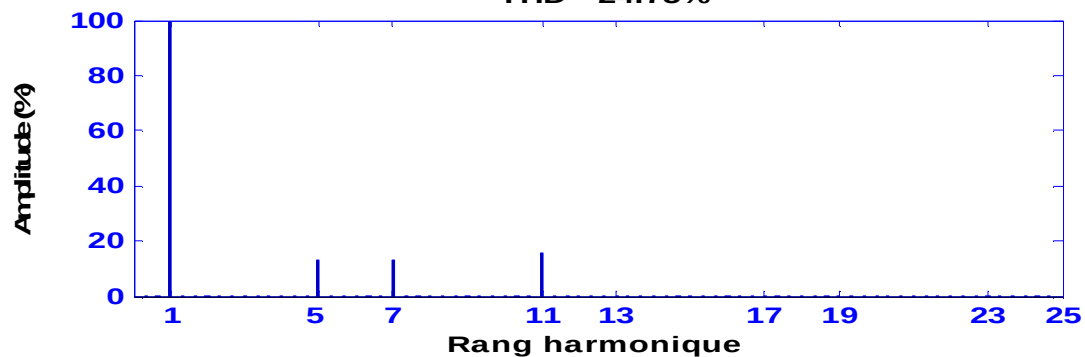
Pour $h=11$

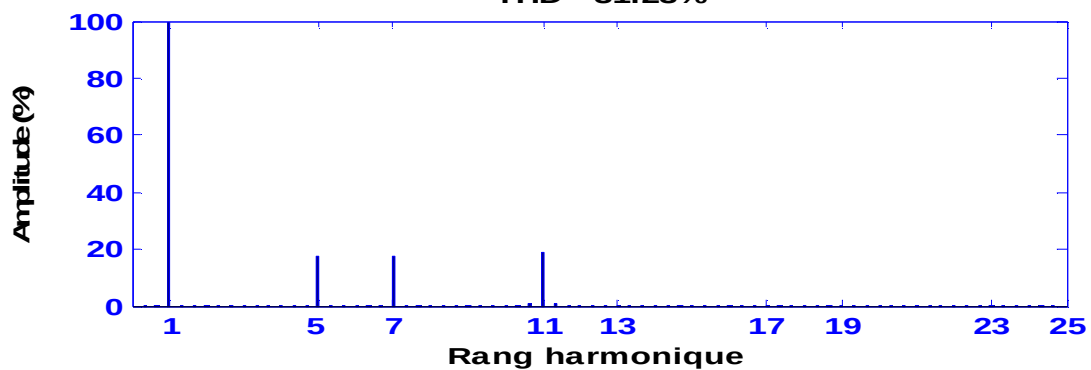
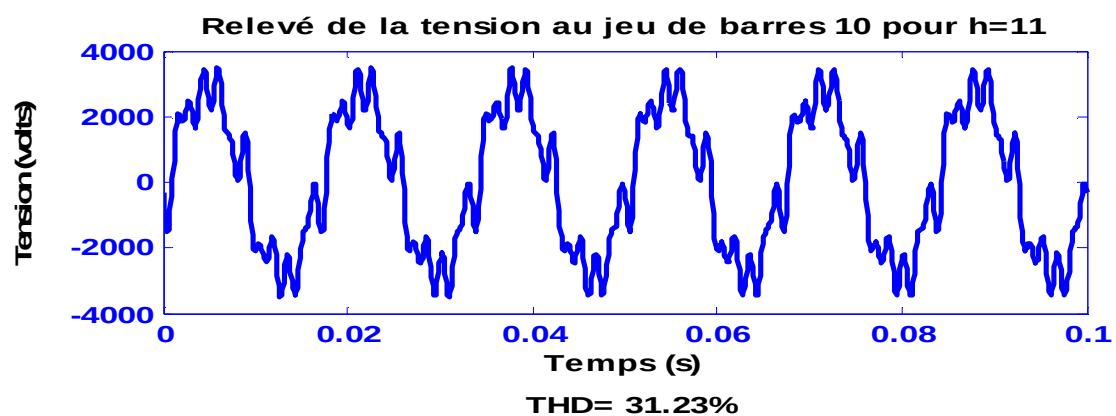
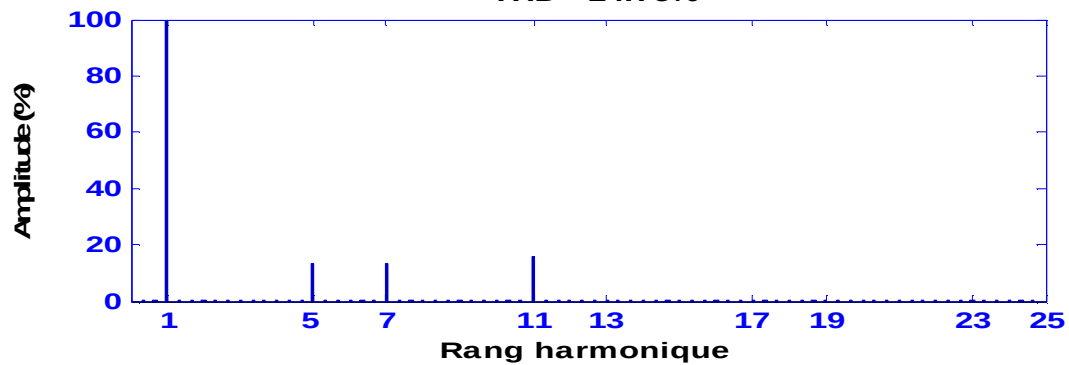
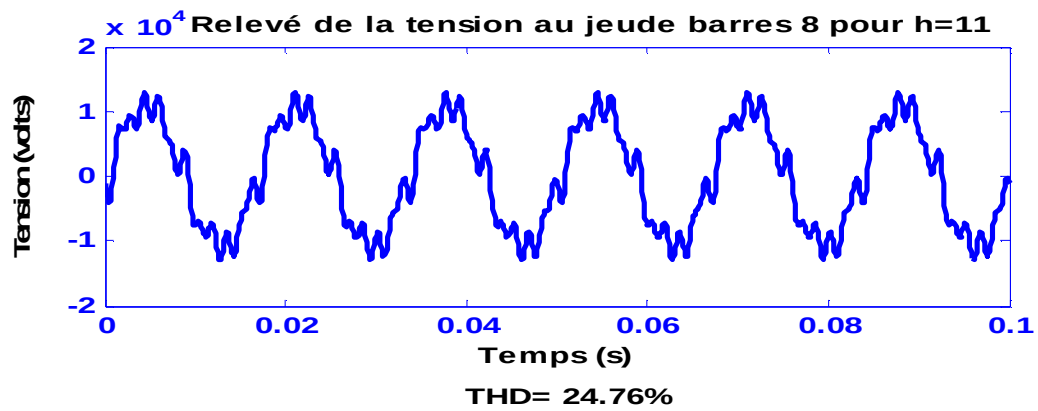


THD= 0.19%

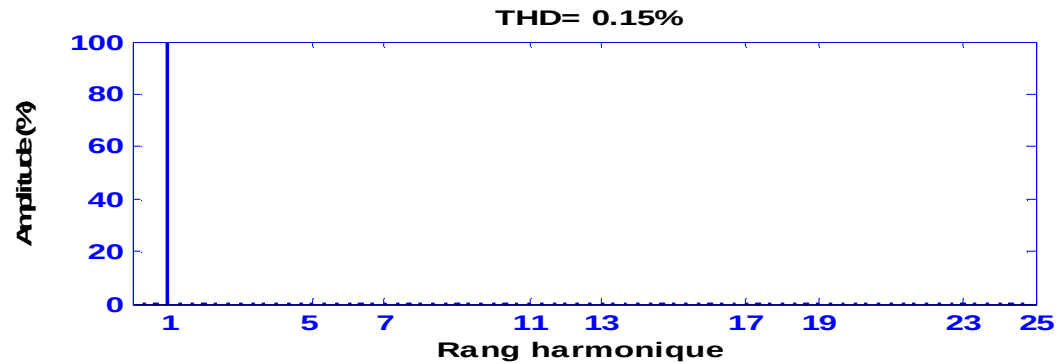
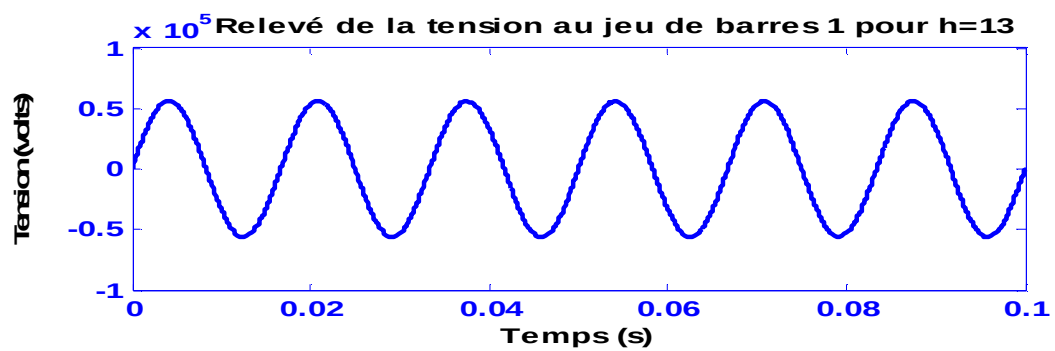
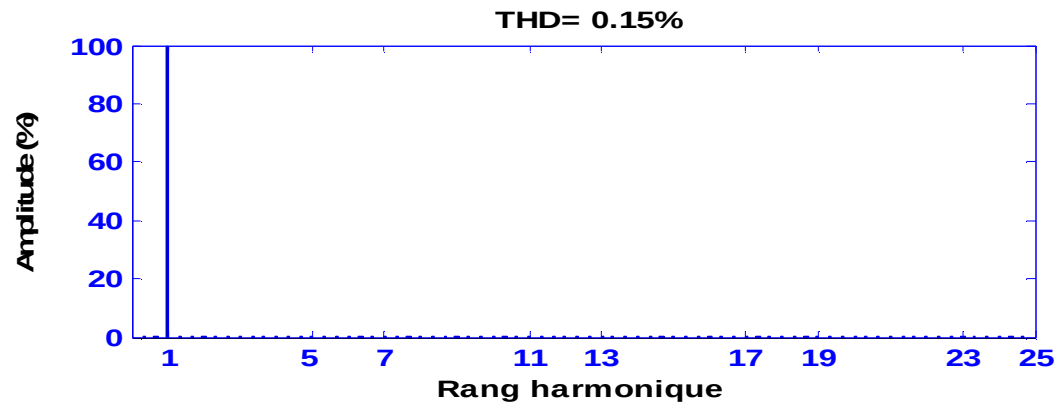
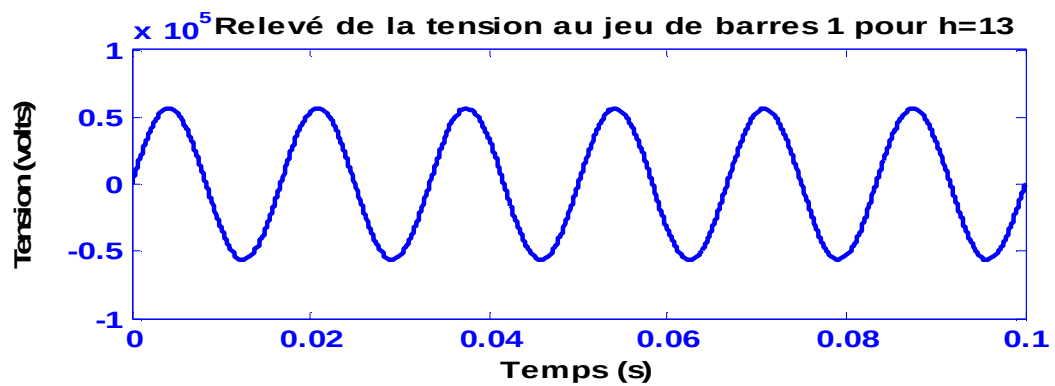


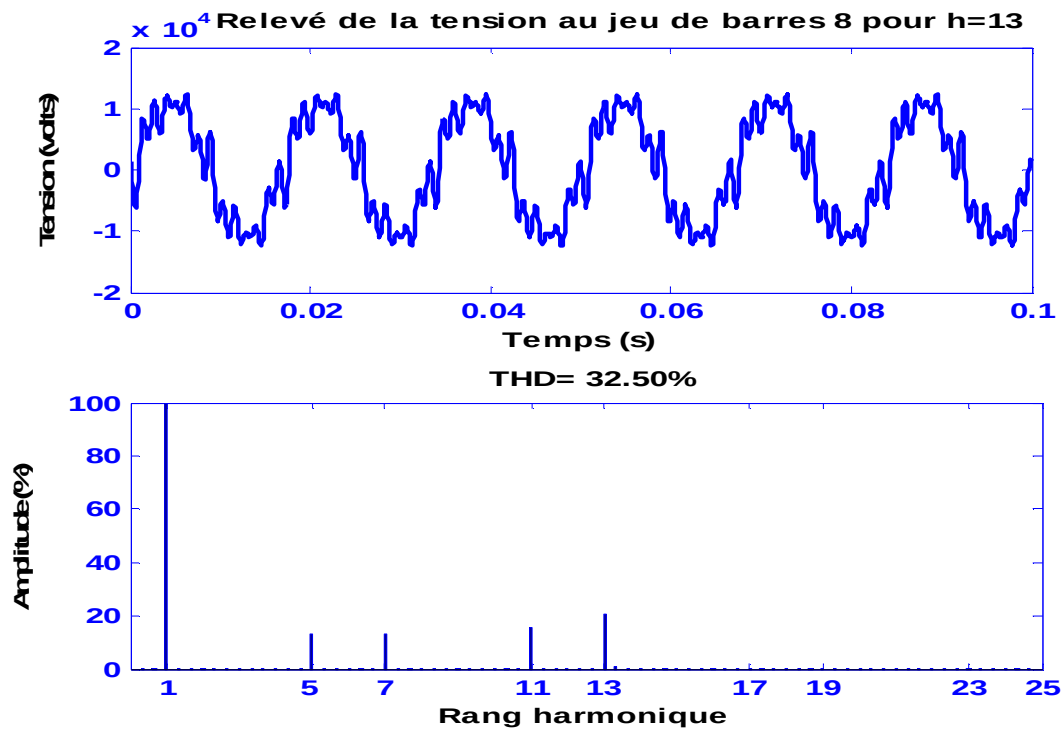
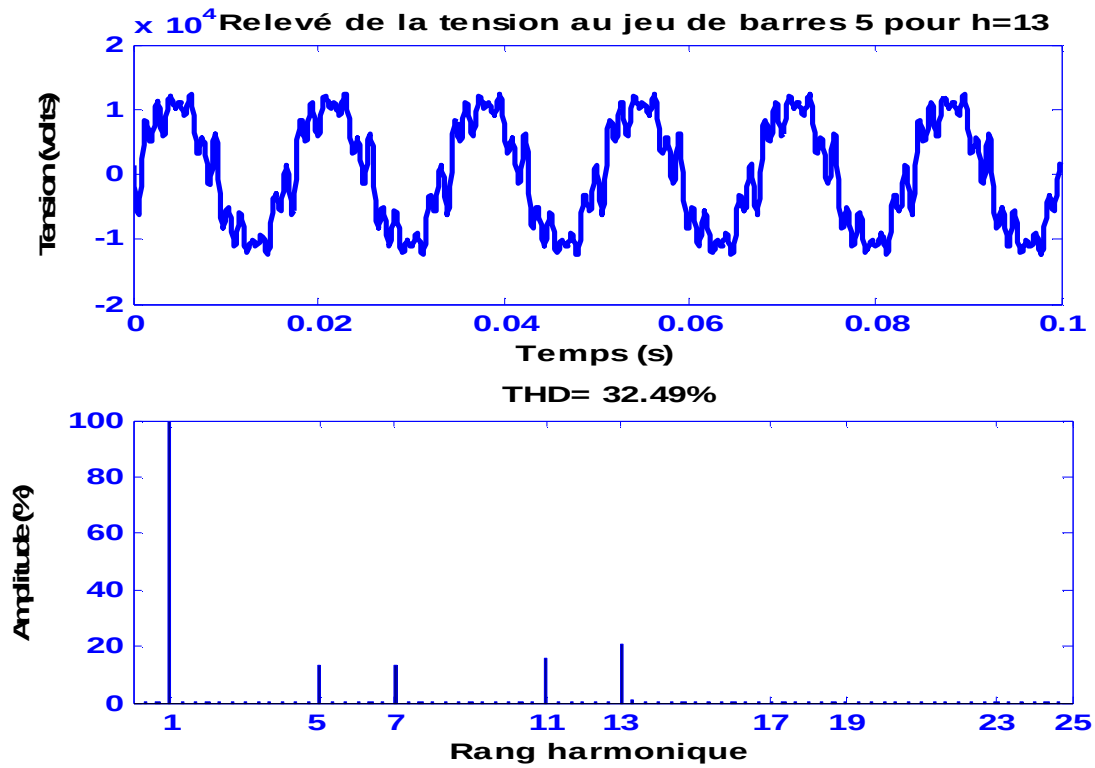
THD= 24.75%

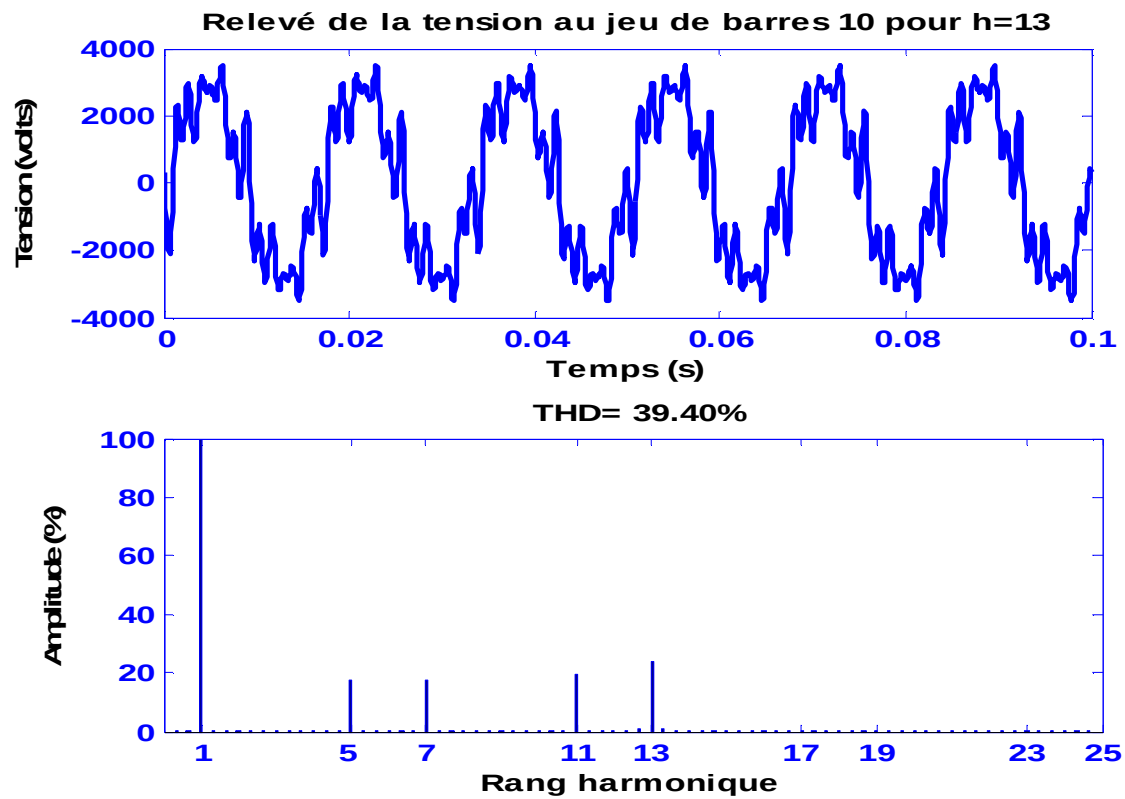




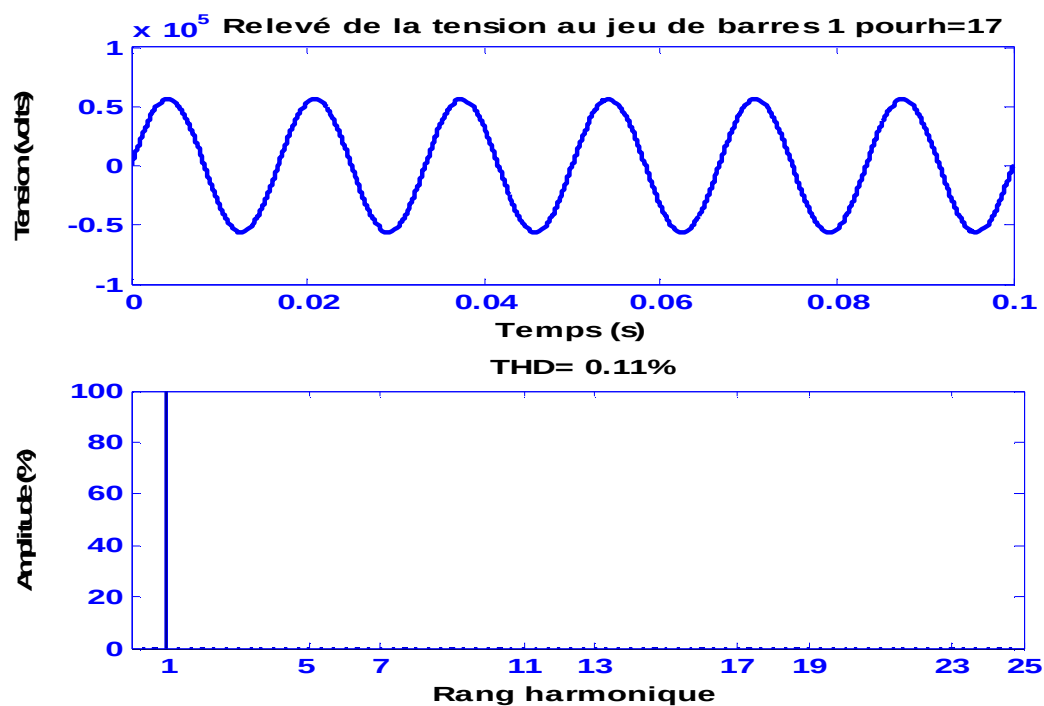
Pour $h=13$

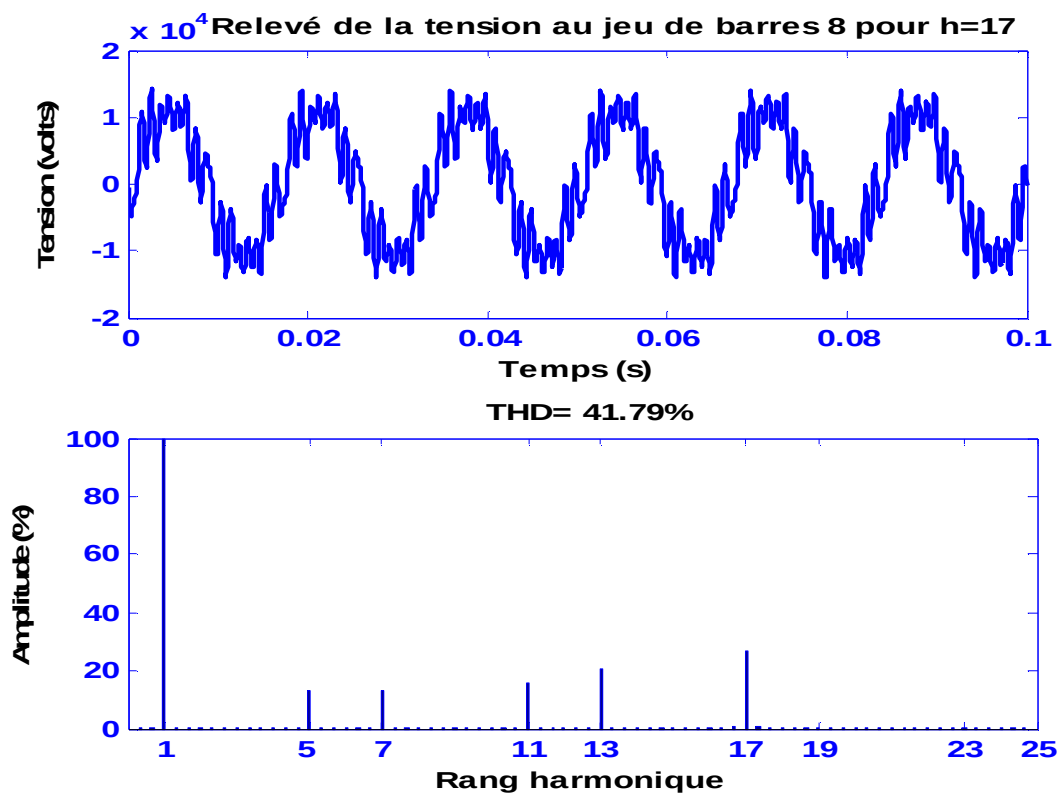
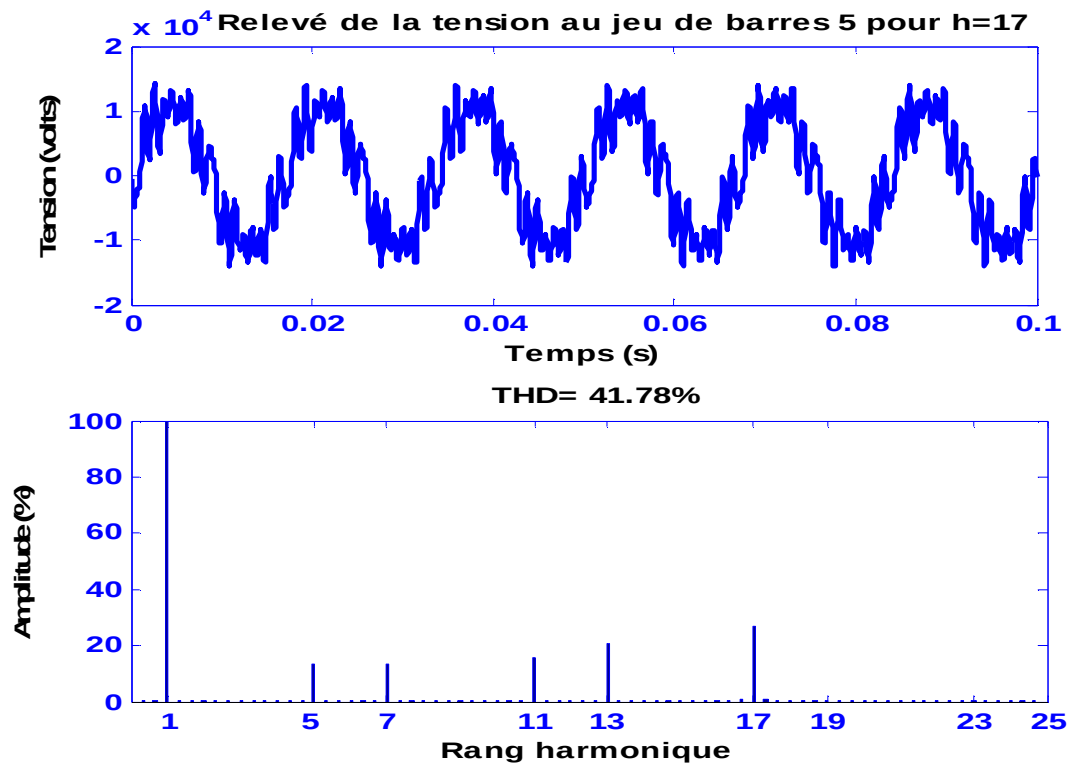


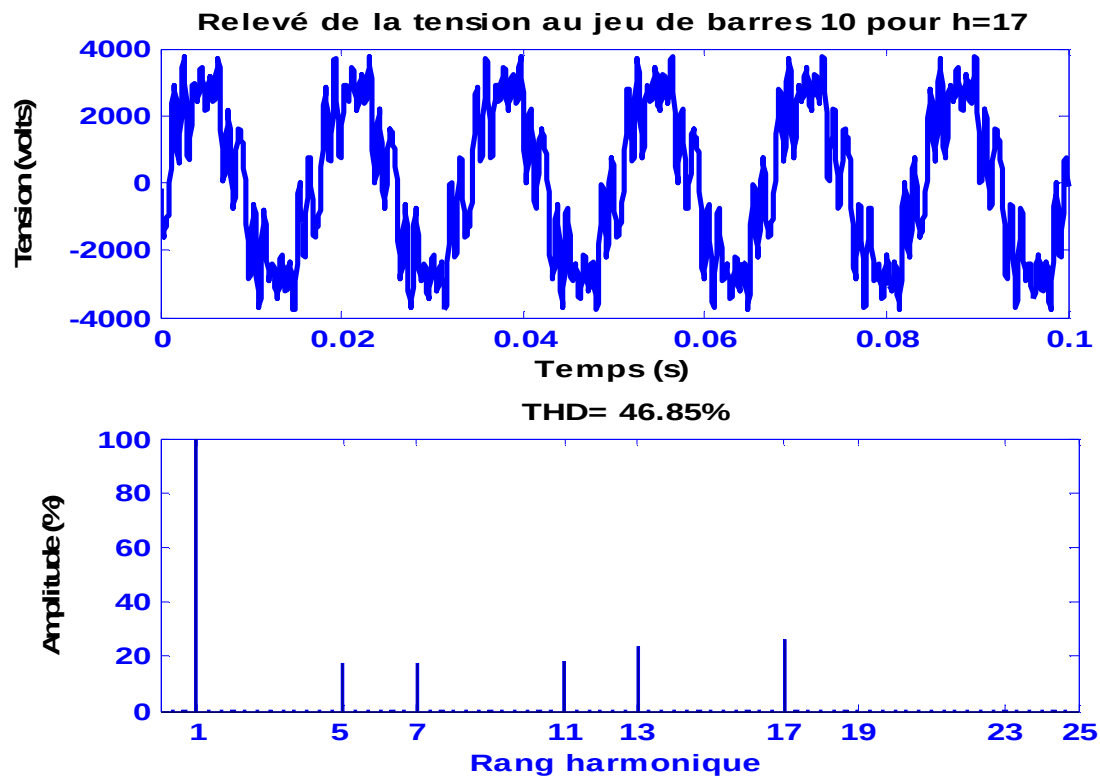




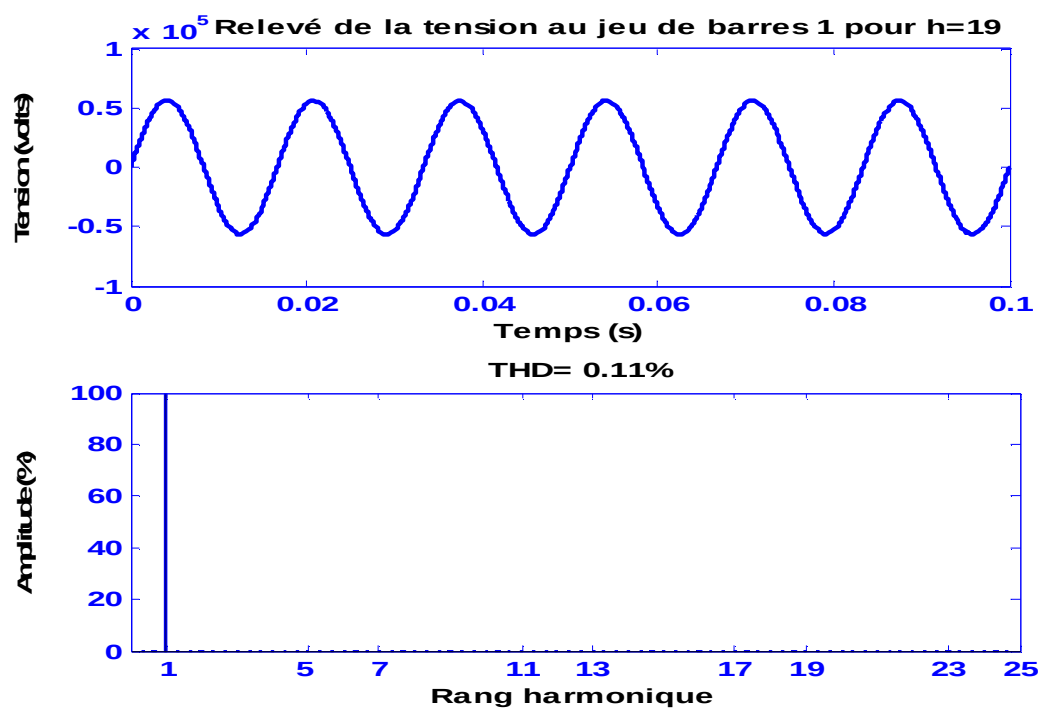
Pour h=17

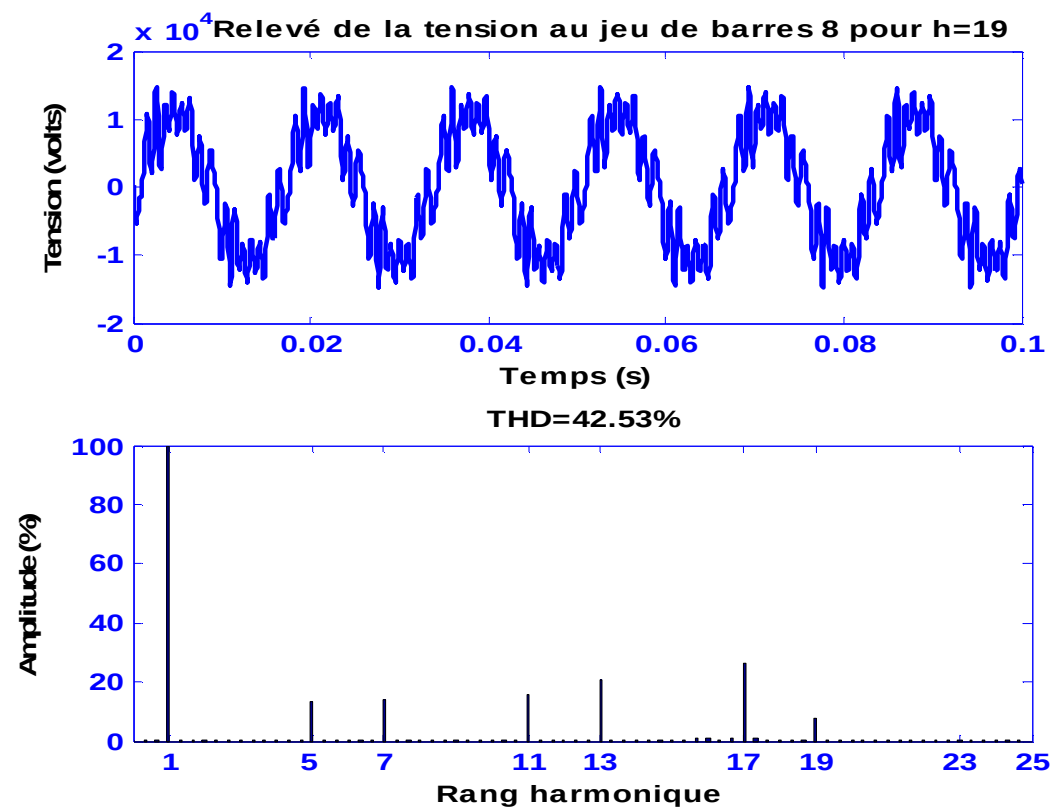
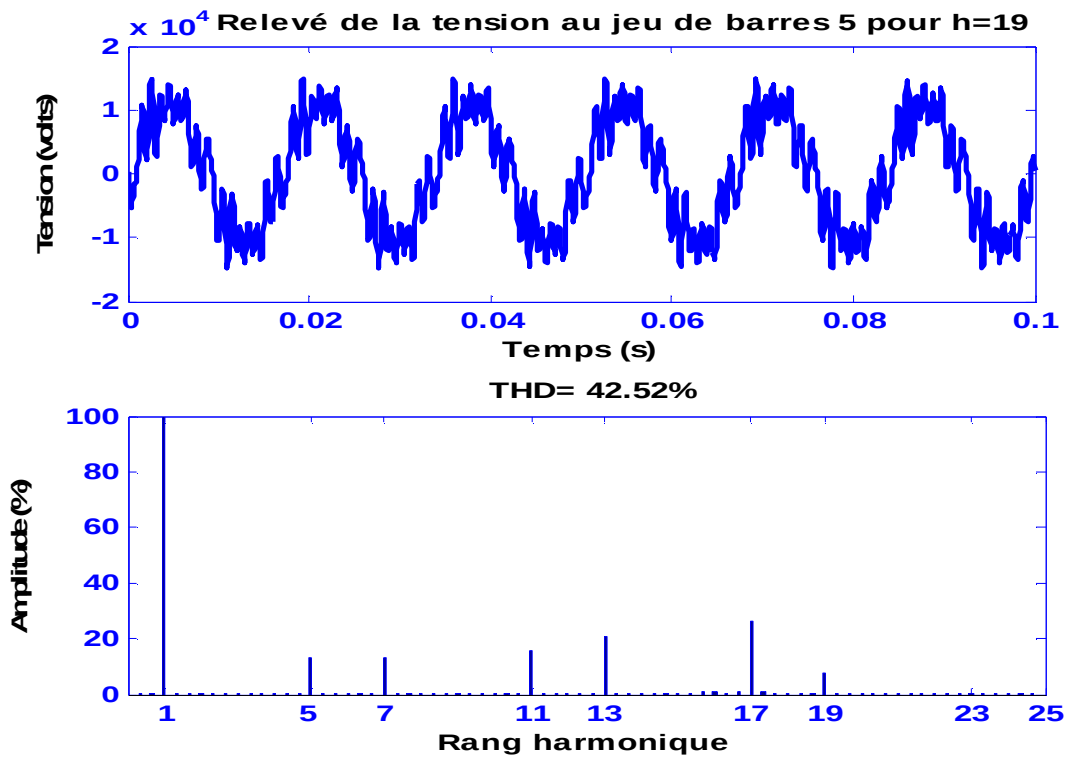


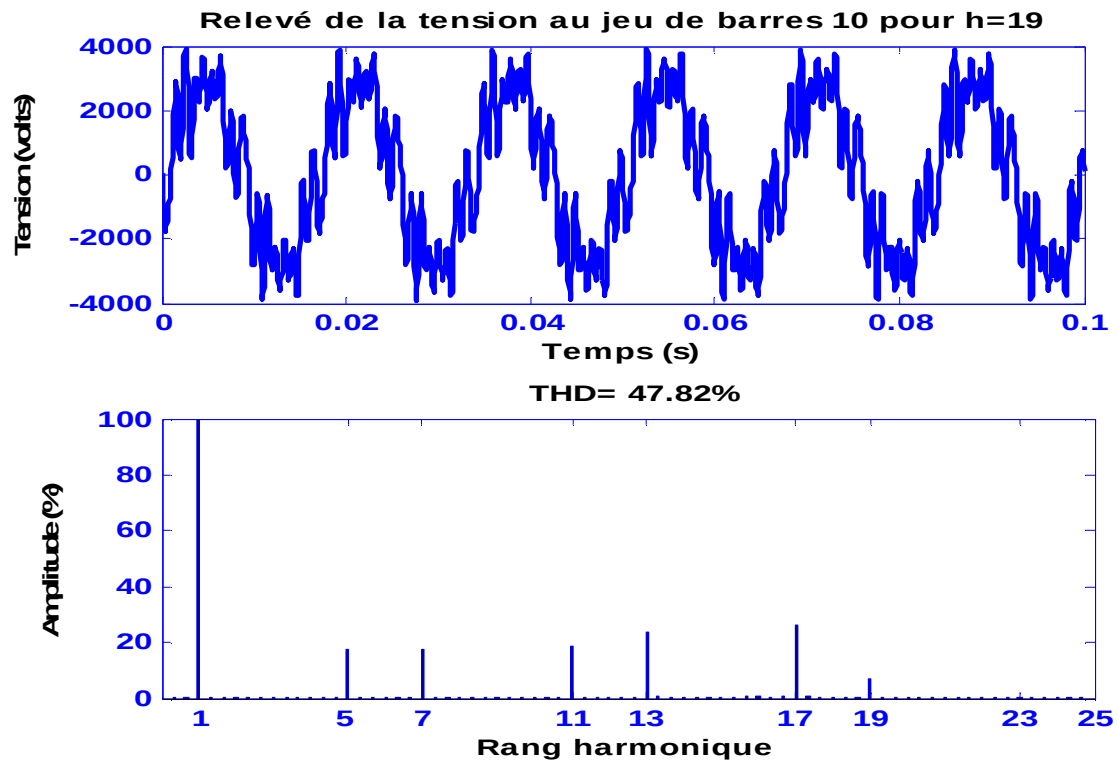




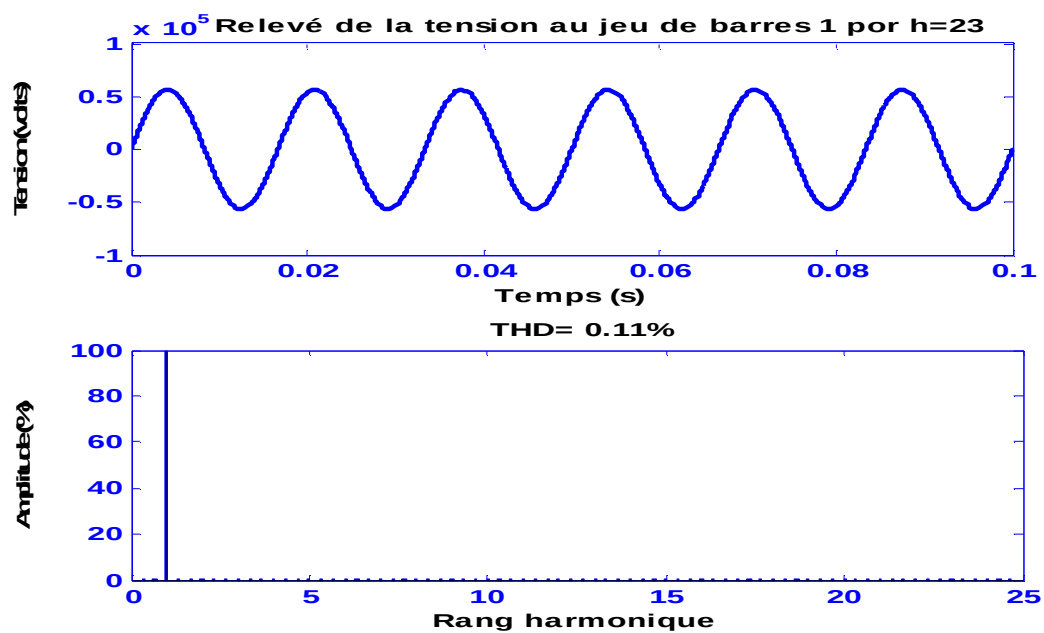
Pour h=19

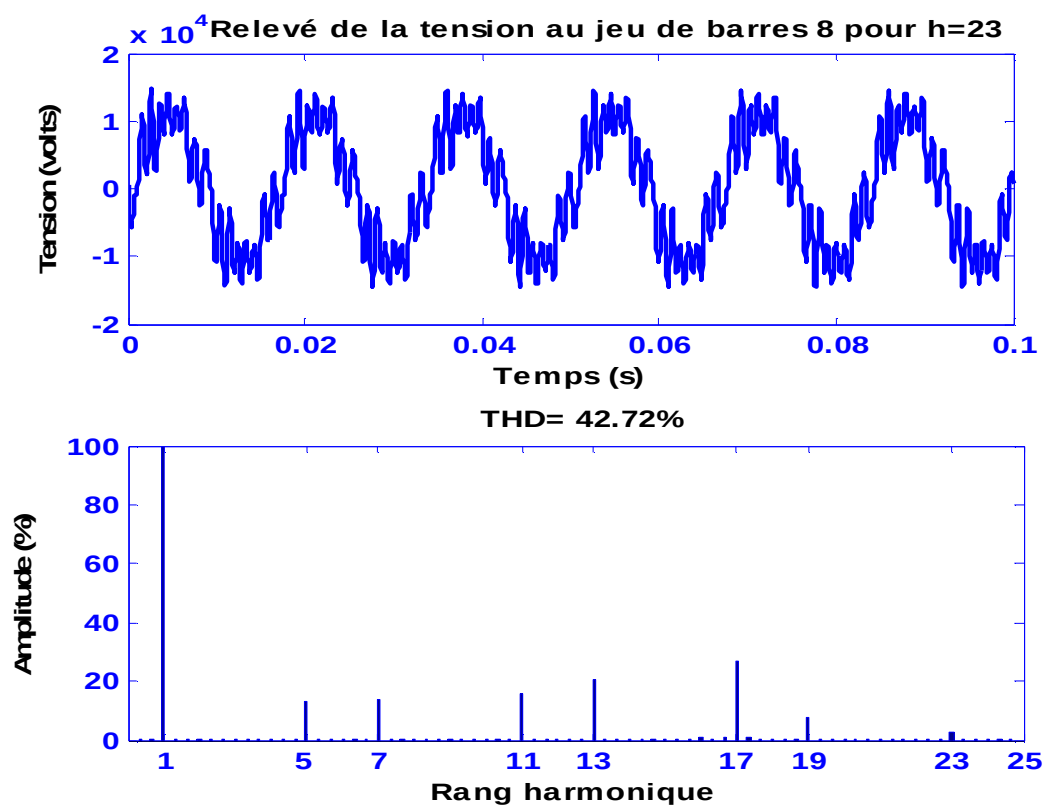
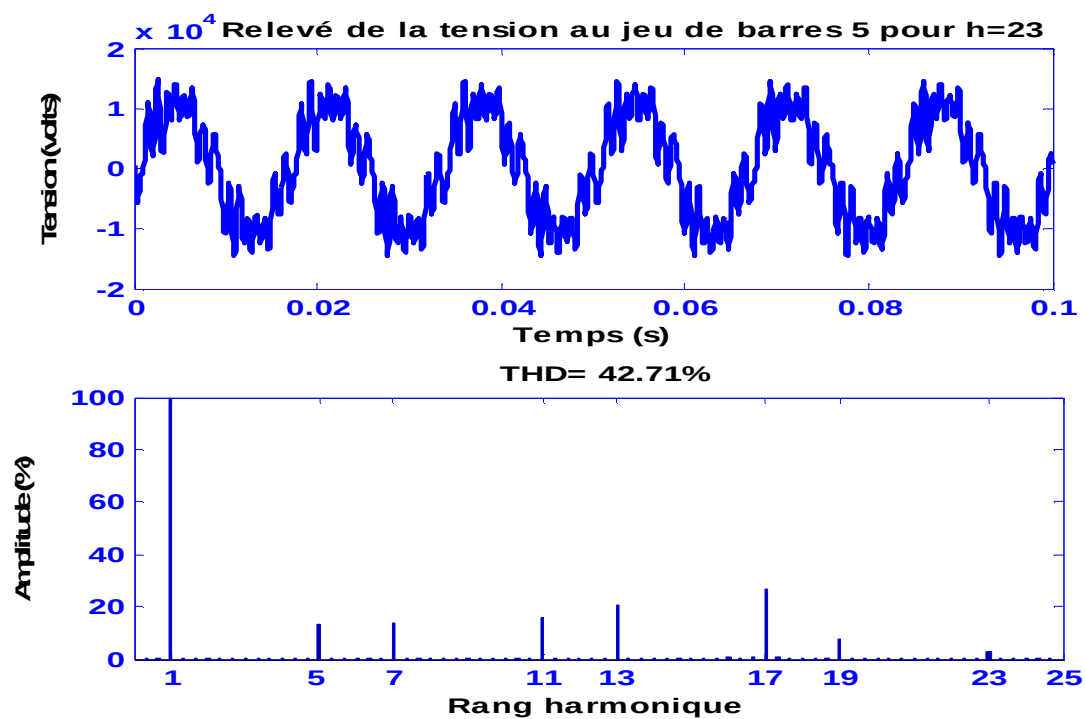


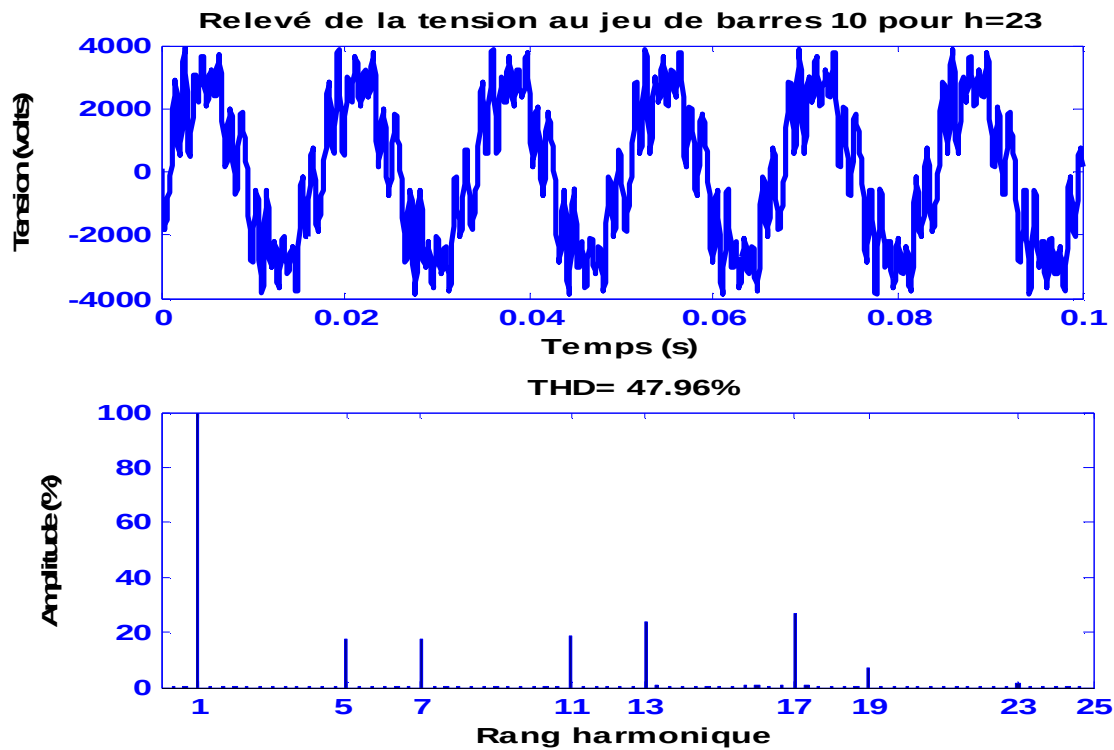




Pour h=23







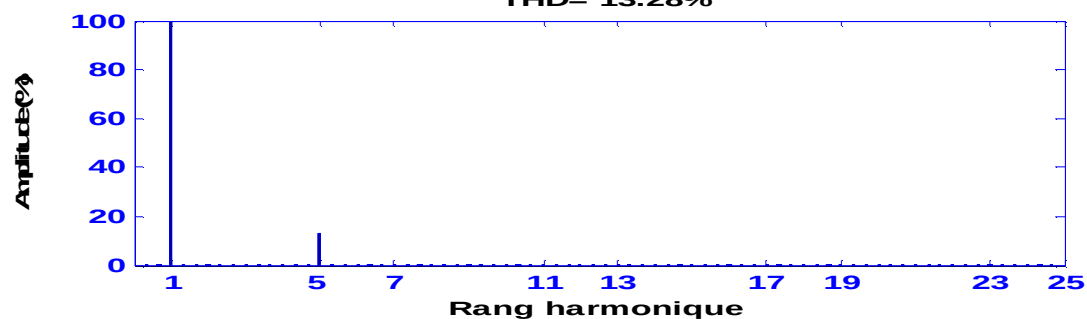
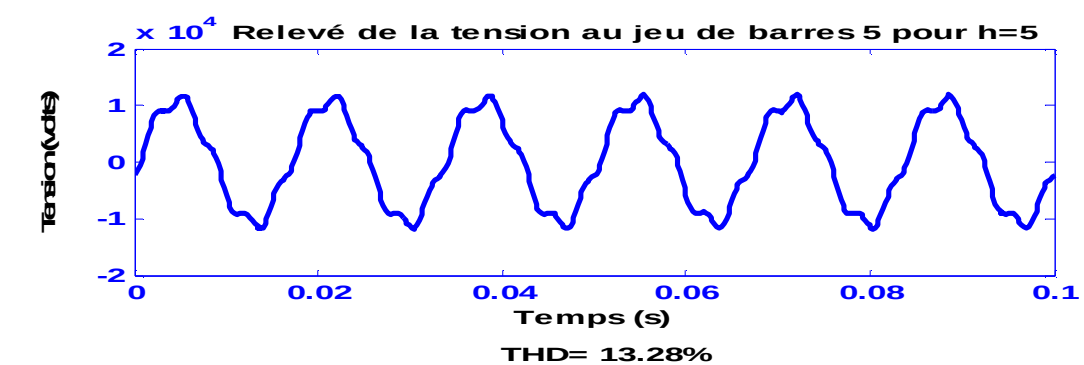
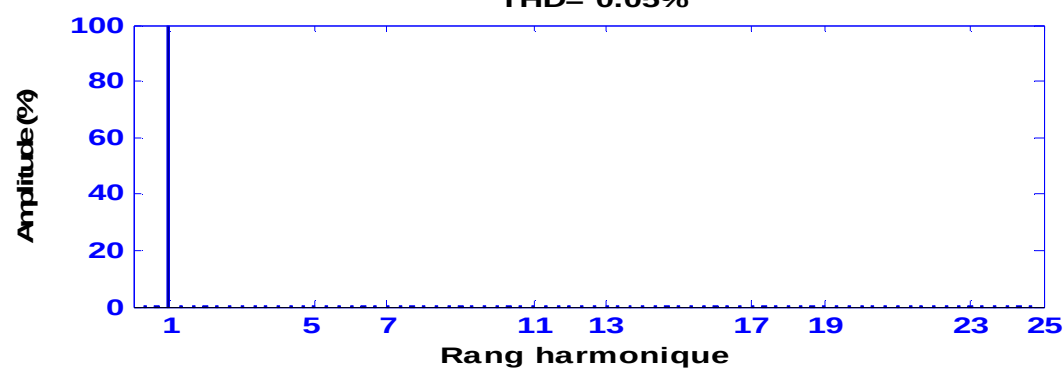
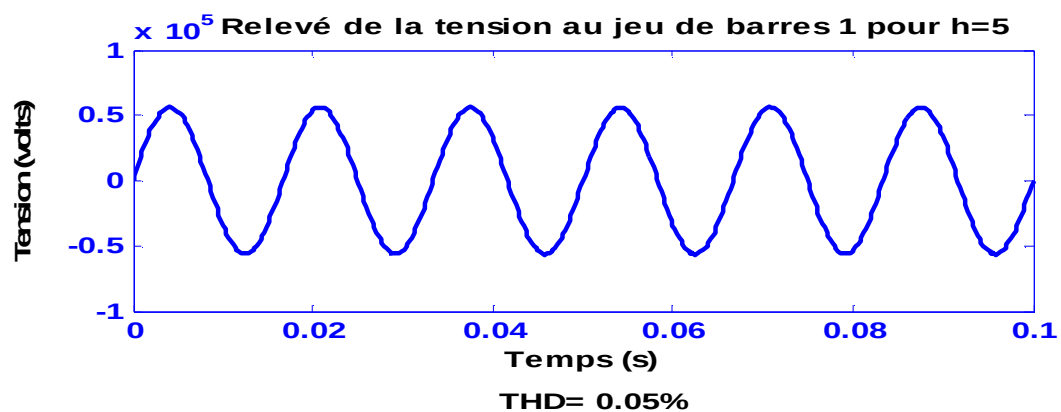
Discussion des résultats

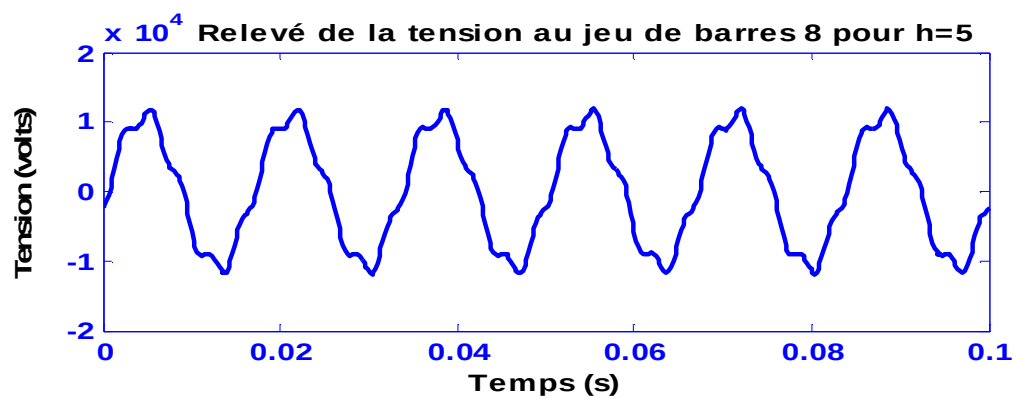
Pour le jeu de barres 1, la forme d'onde de tension n'est quasiment pas déformée pour les rangs harmoniques ($h=5, 7, \dots, 23$), à cause de l'éloignement de la source par rapport à la charge polluante. Pour cela, on peut conclure que la charge polluante n'a pas d'effet sur la source.

Pour les jeux de barres (5,8 et 10), on remarque que, plus le nombre d'harmonique augmente, plus les valeurs de TDH_V sont plus élevées. La forme de l'onde de la tension s'éloigne significativement de la sinusoïde. Ceci s'explique par le fait que les jeux de barres sont proches de la source polluante.

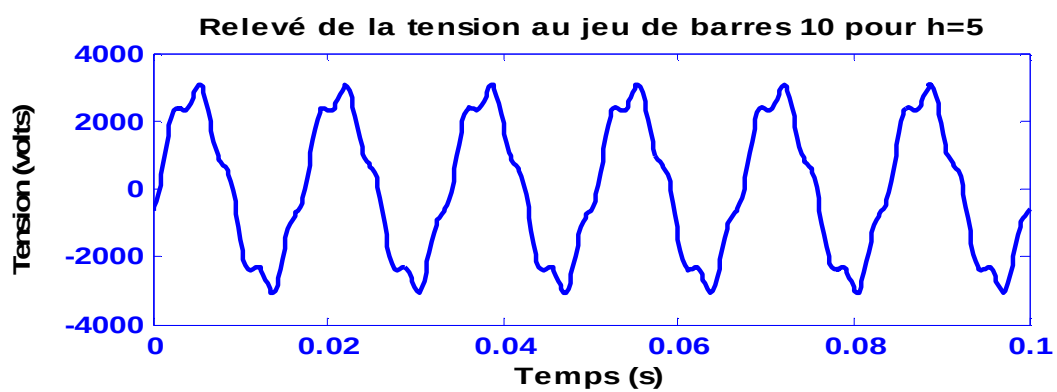
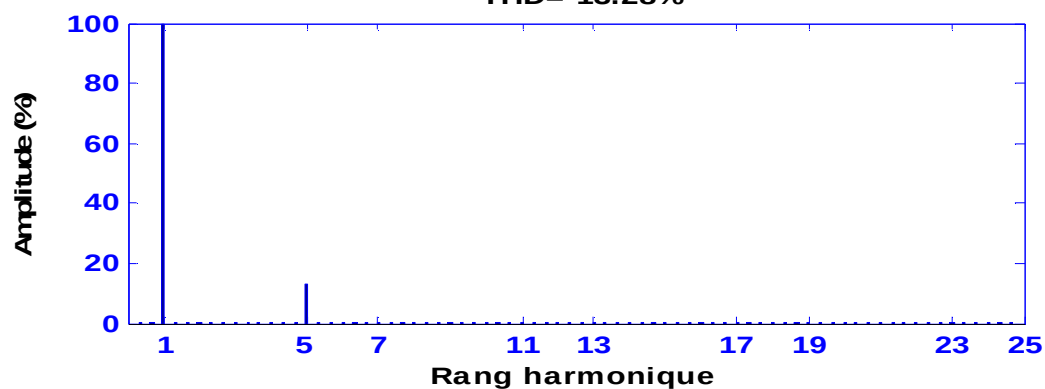
III.5.2.1.b.2. Branchement de la charge polluante sur le jeu de barres 5 (X=0H)

Pour h=5

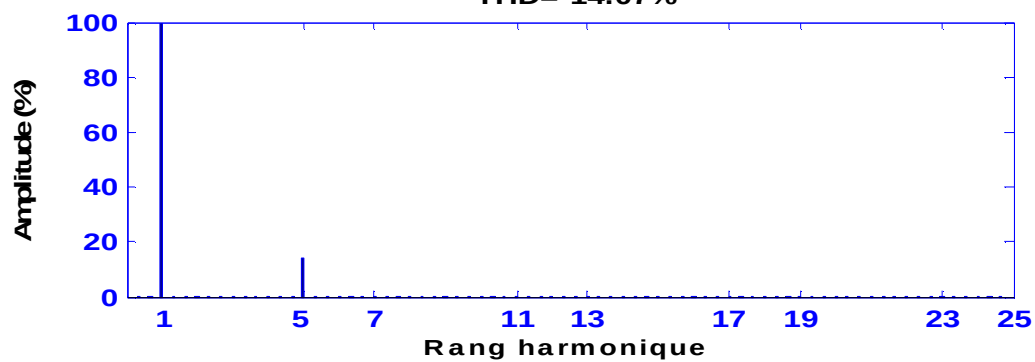




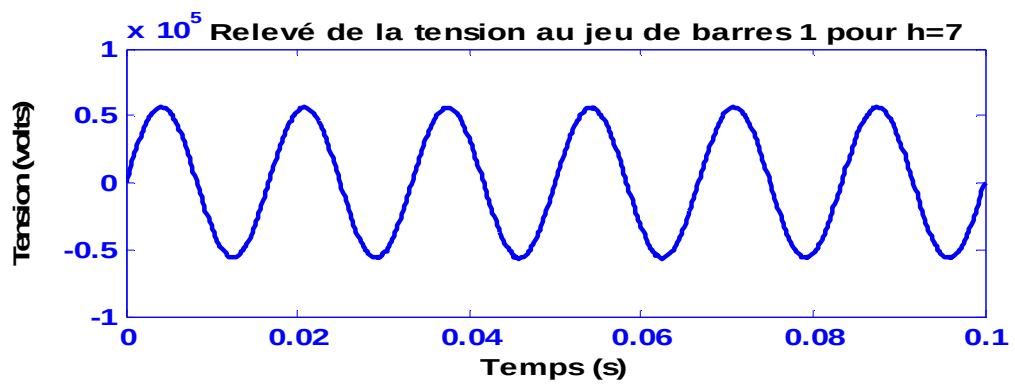
THD= 13.28%



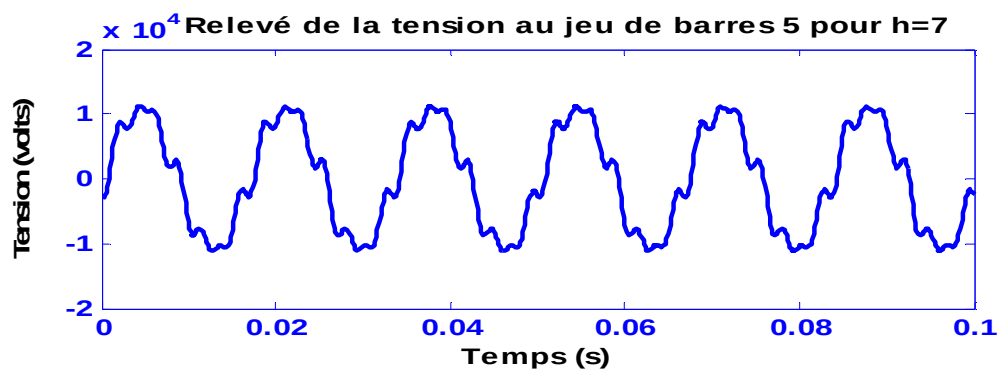
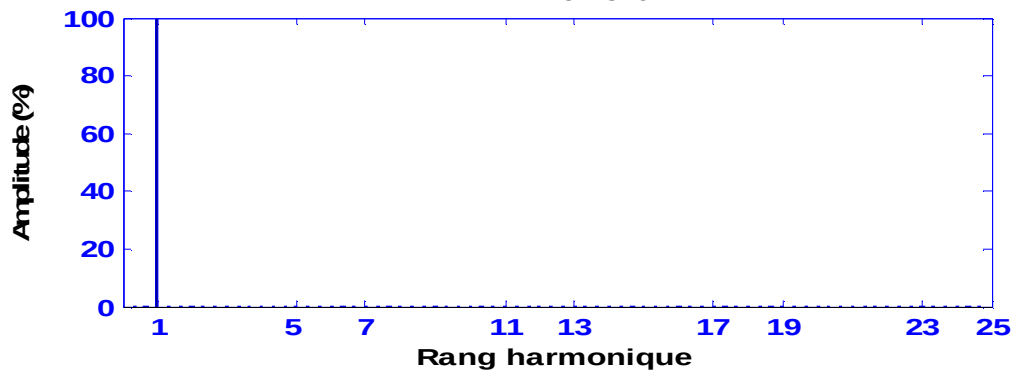
THD= 14.07%



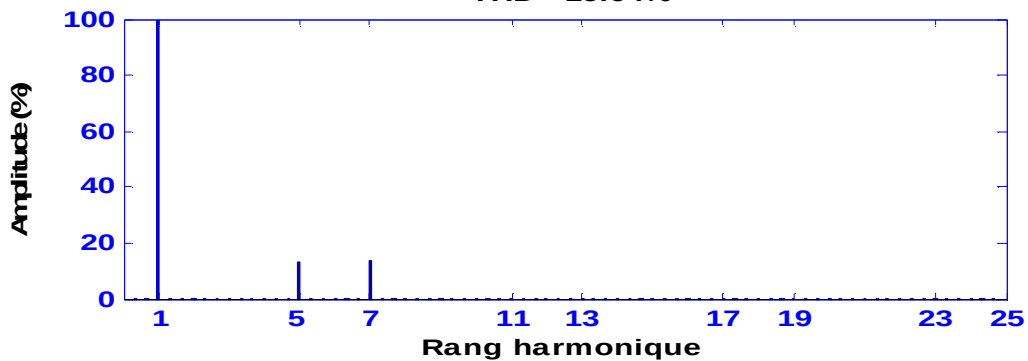
Pour $h=7$

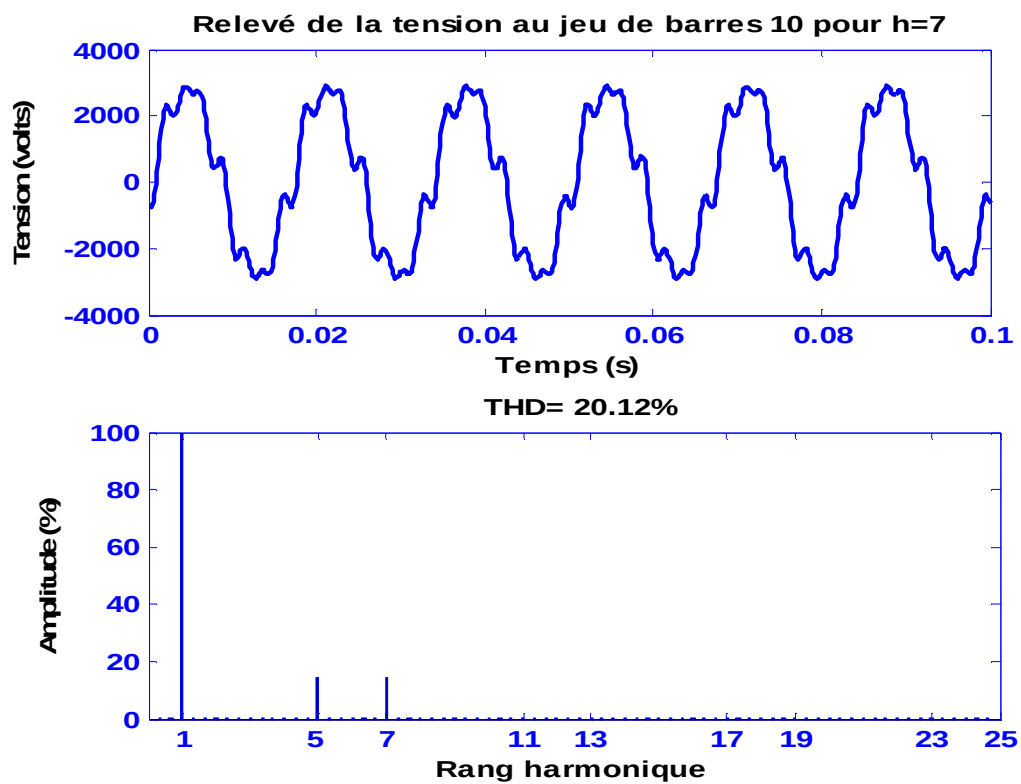
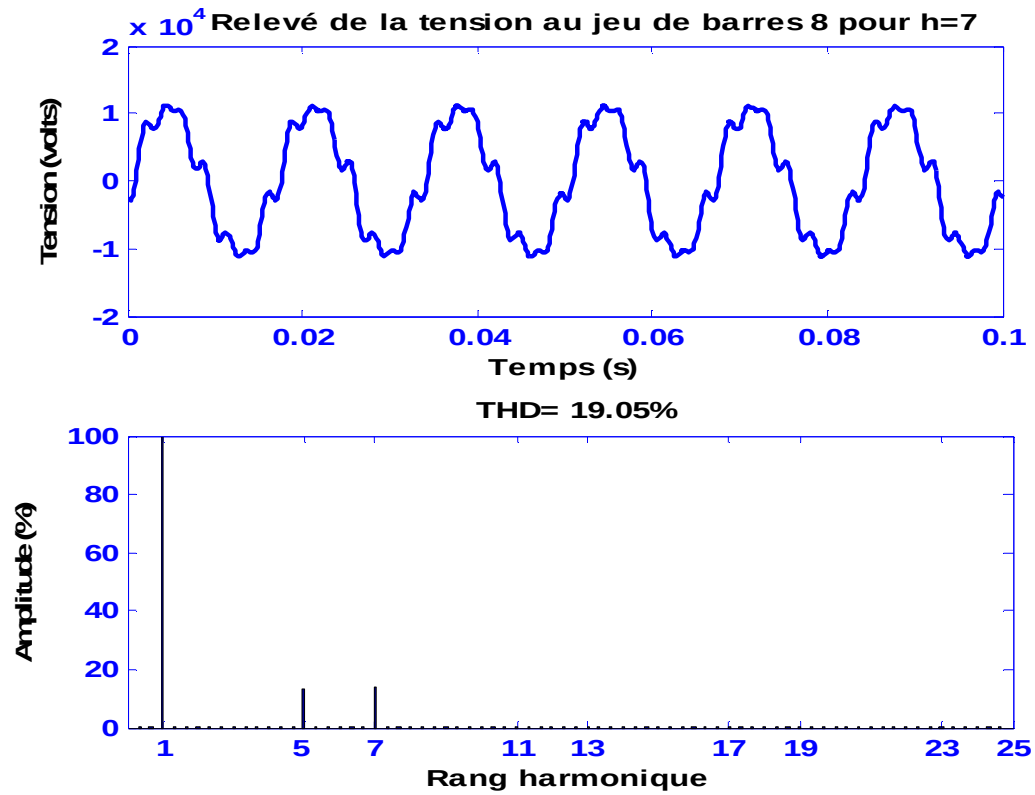


THD= 0.29%

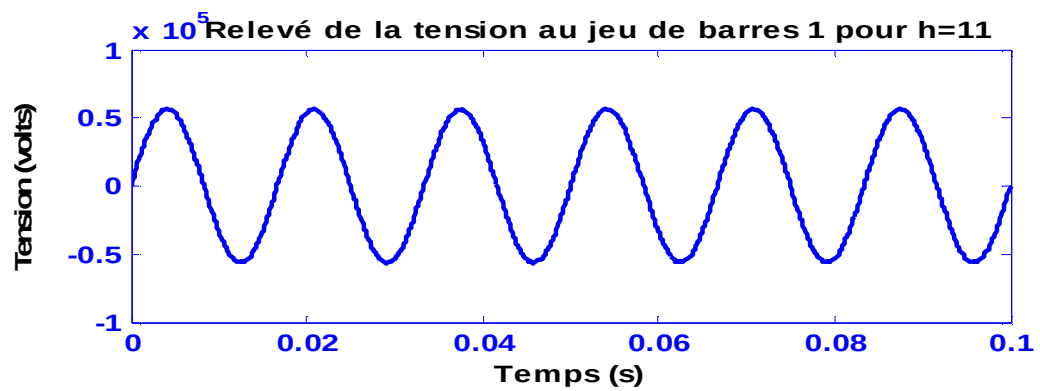


THD= 19.04%

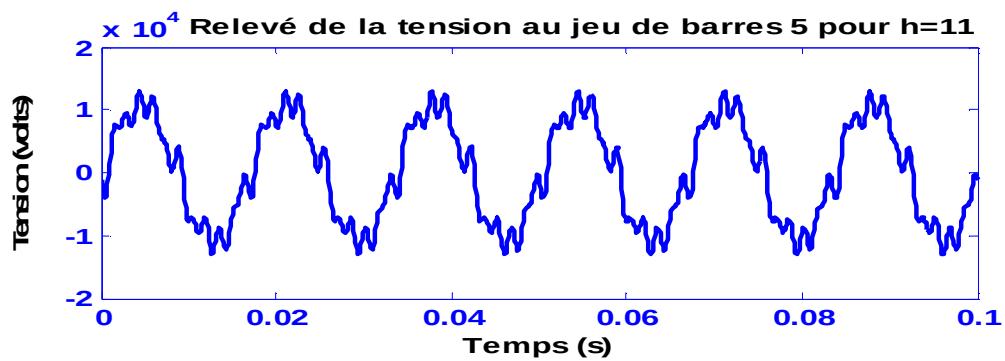
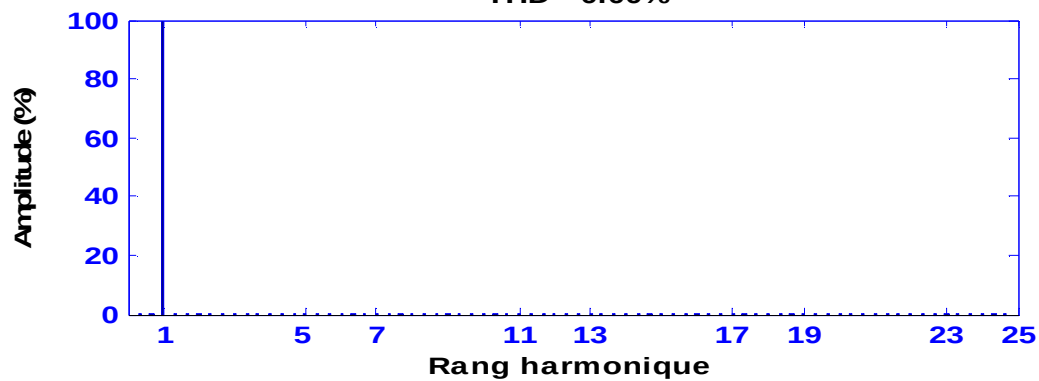




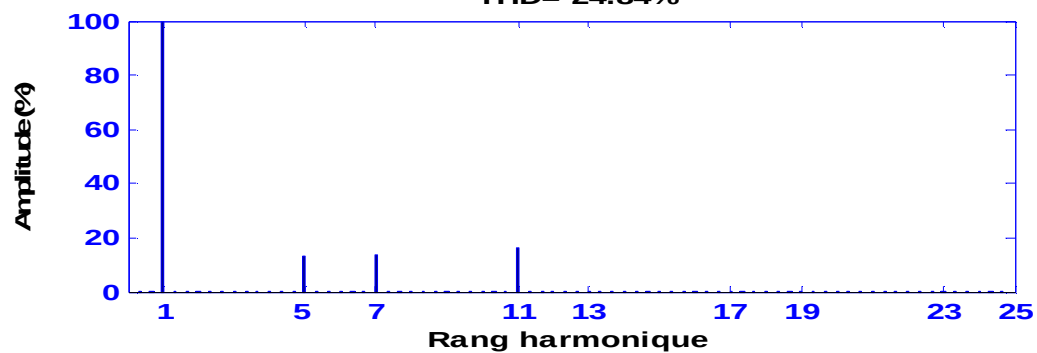
Pour $h=11$

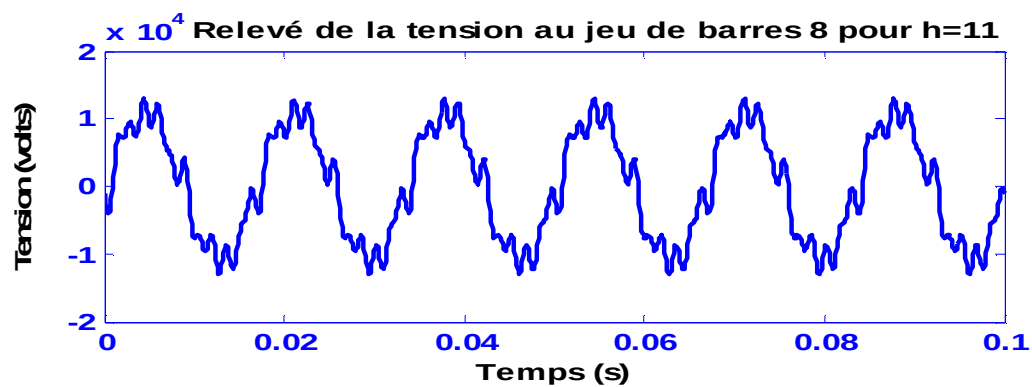


THD= 0.00%

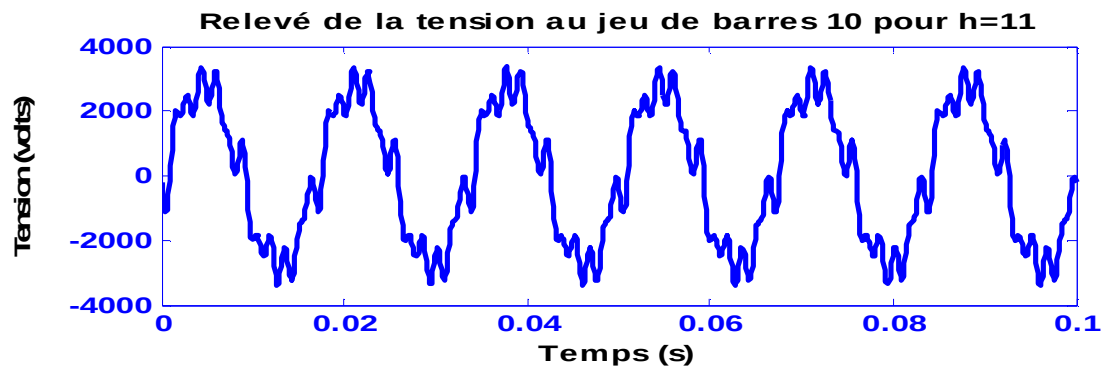
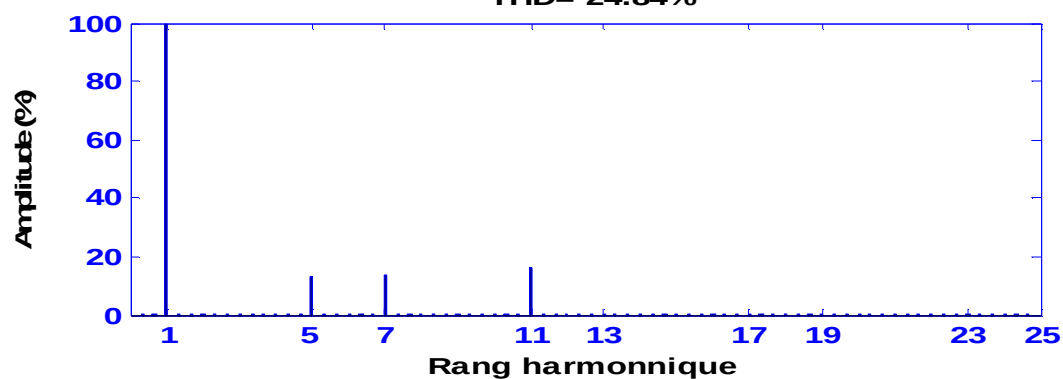


THD= 24.84%

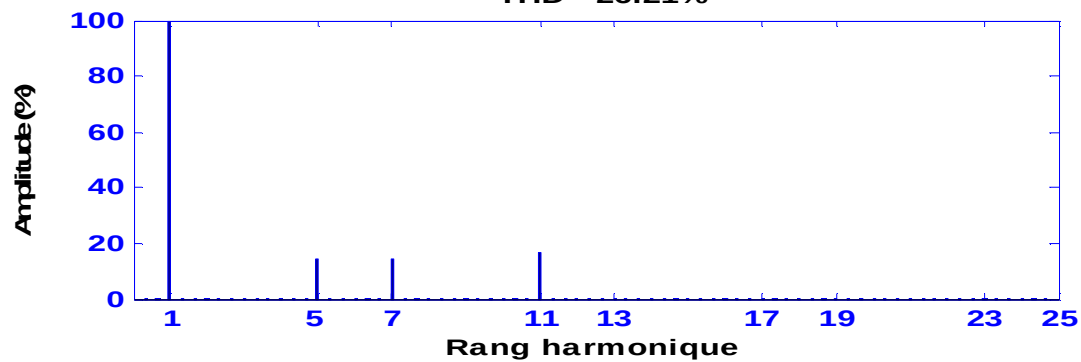




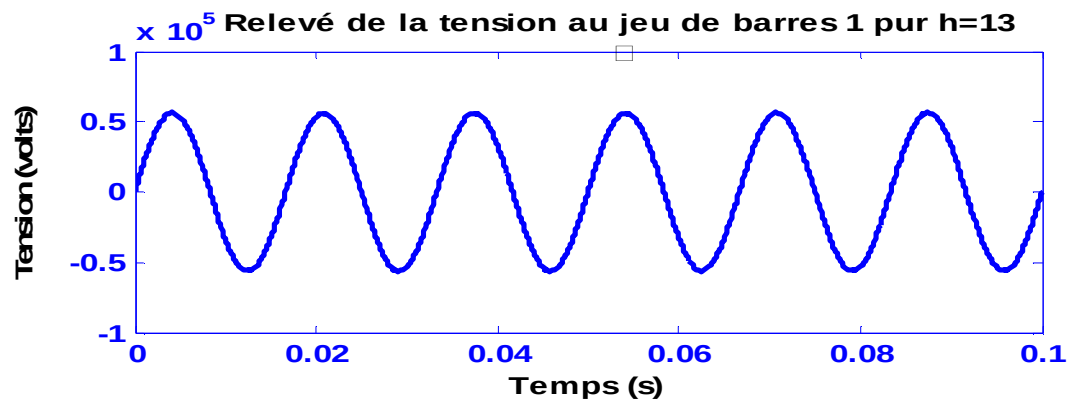
THD= 24.84%



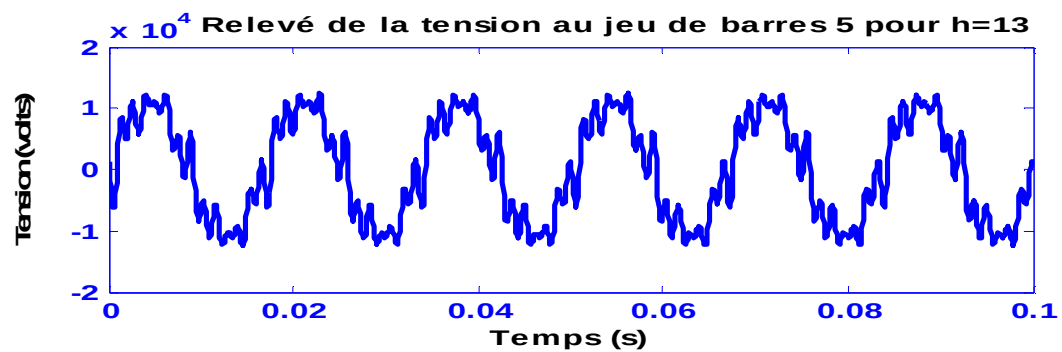
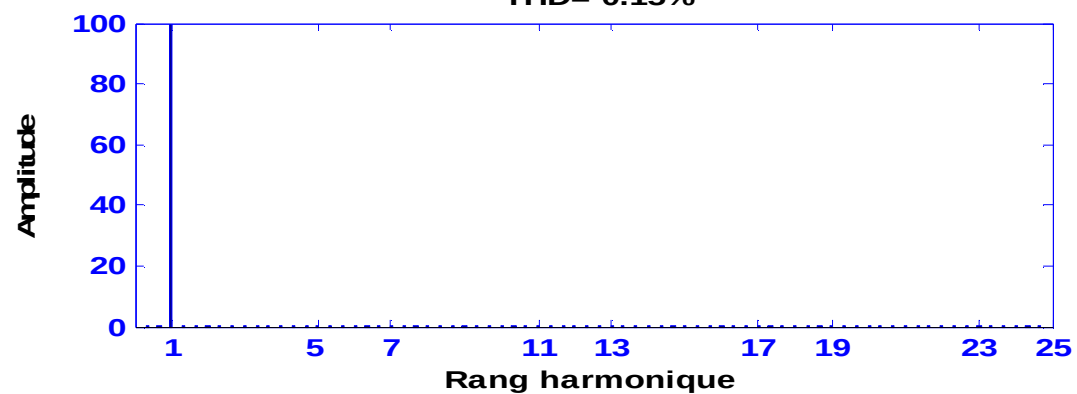
THD= 26.21%



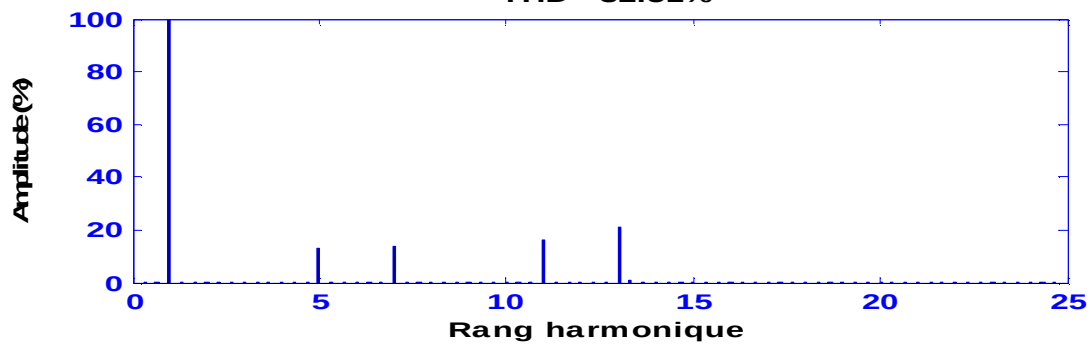
Pour $h=13$

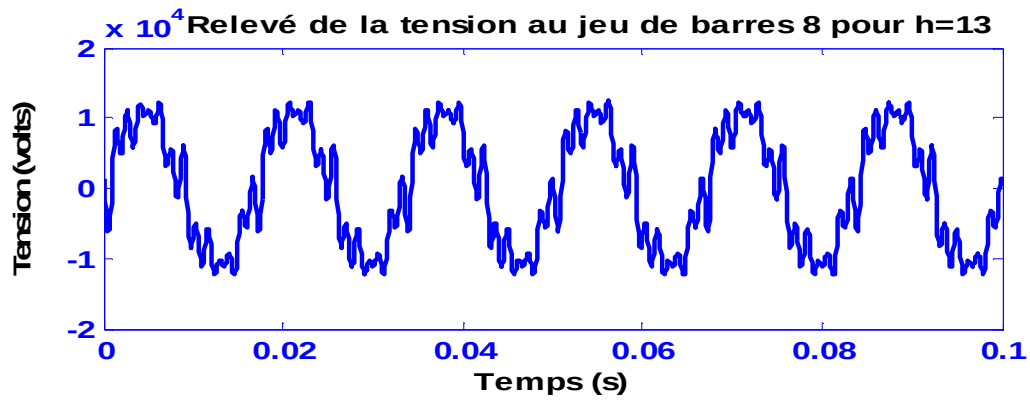


THD= 0.15%

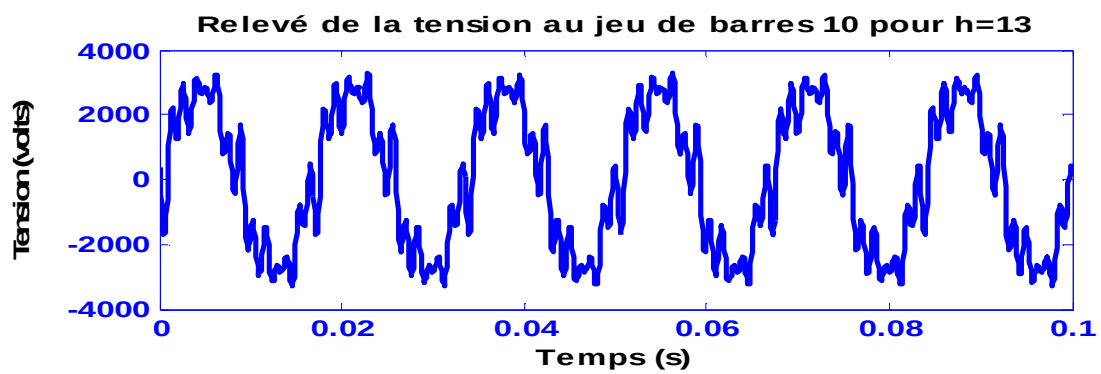
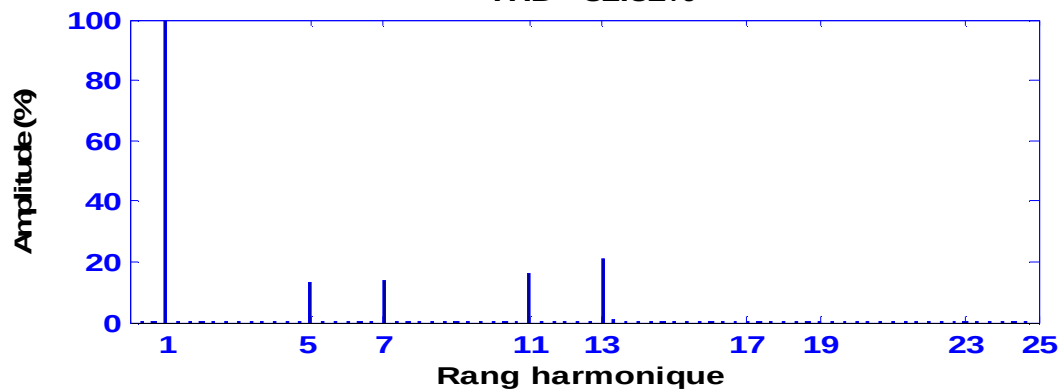


THD= 32.51%

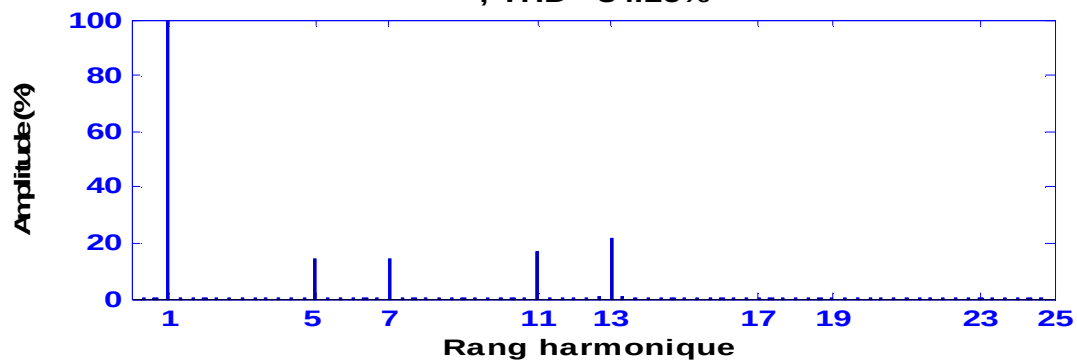




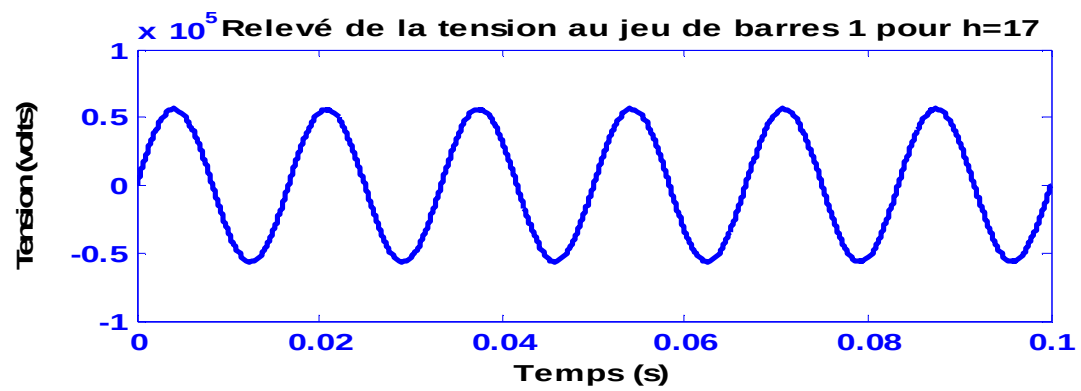
THD= 32.52%



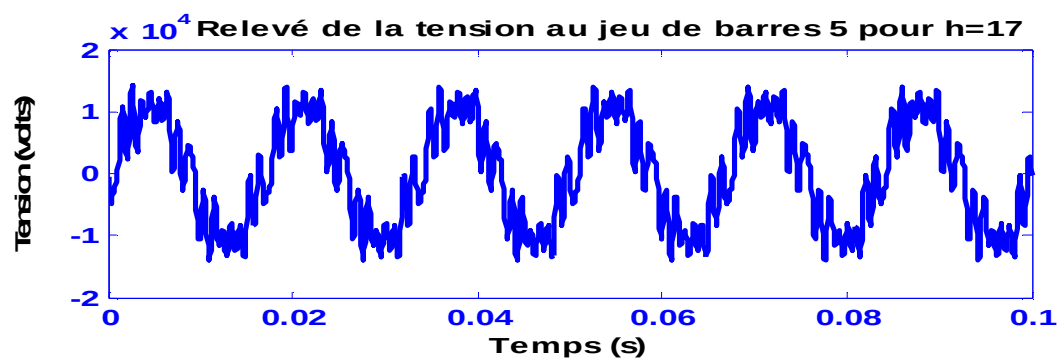
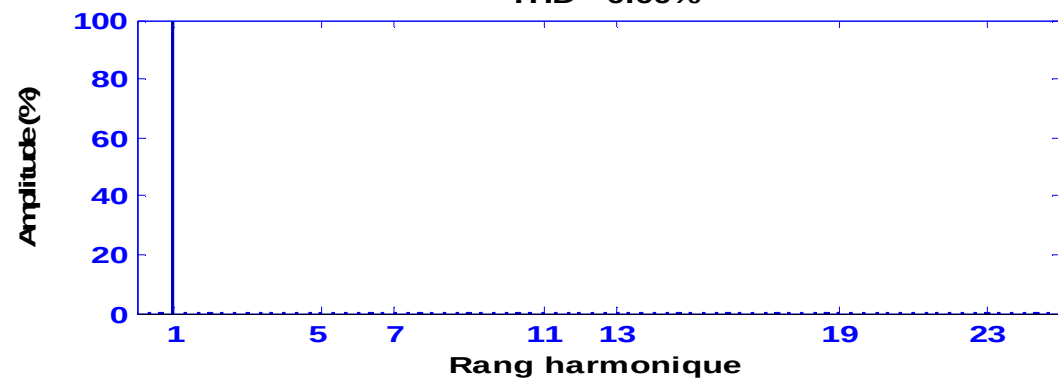
, THD= 34.26%



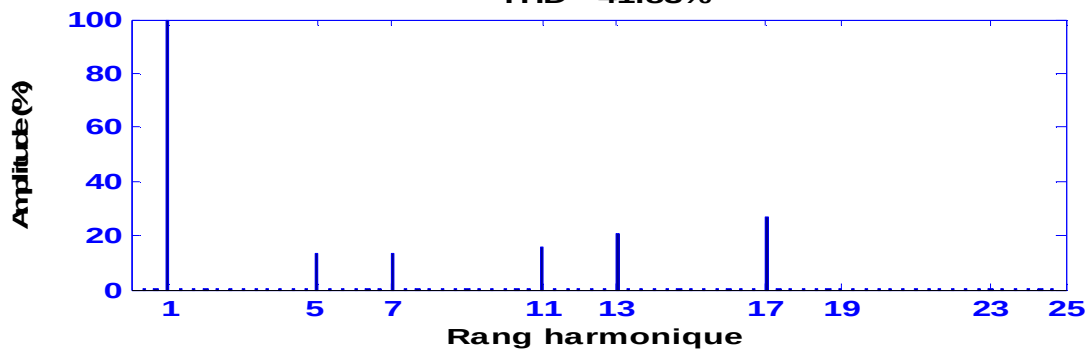
Pour $h=17$

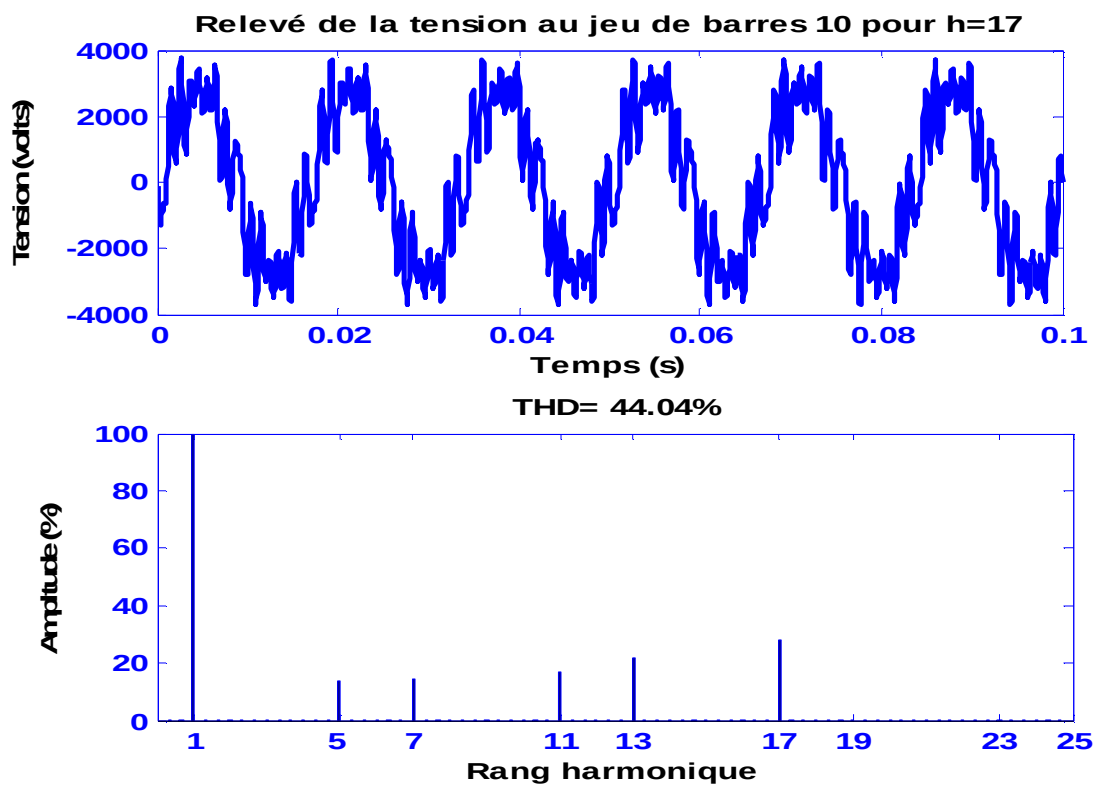
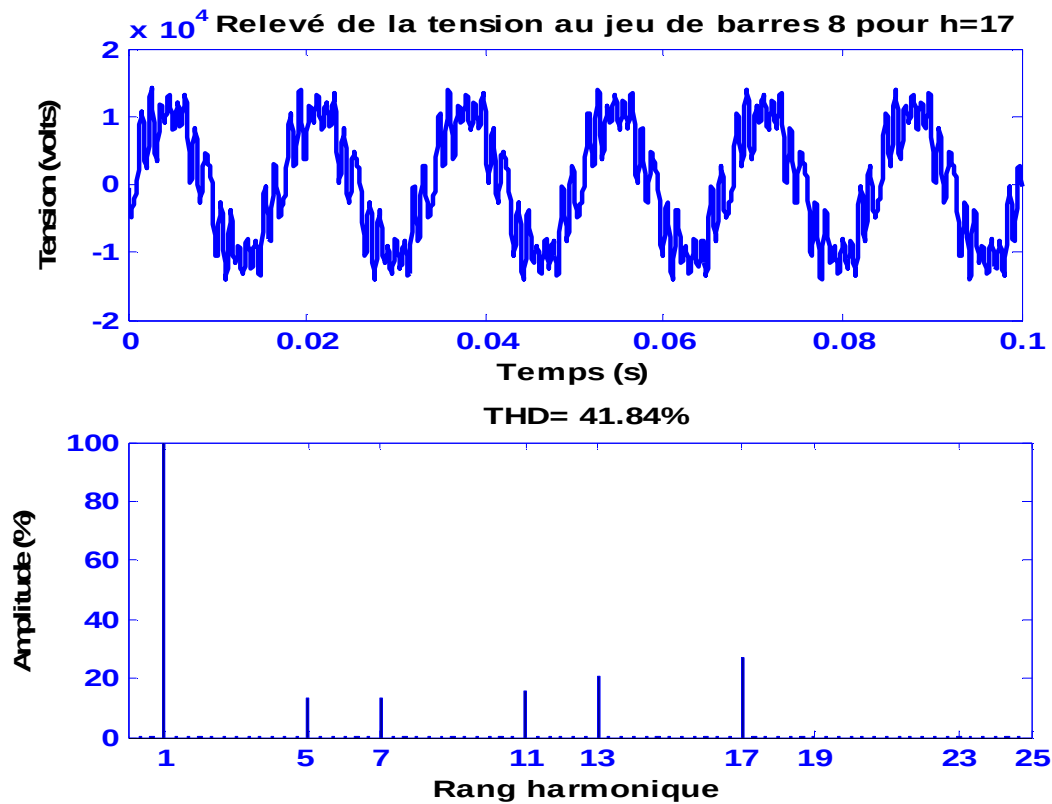


THD= 0.00%

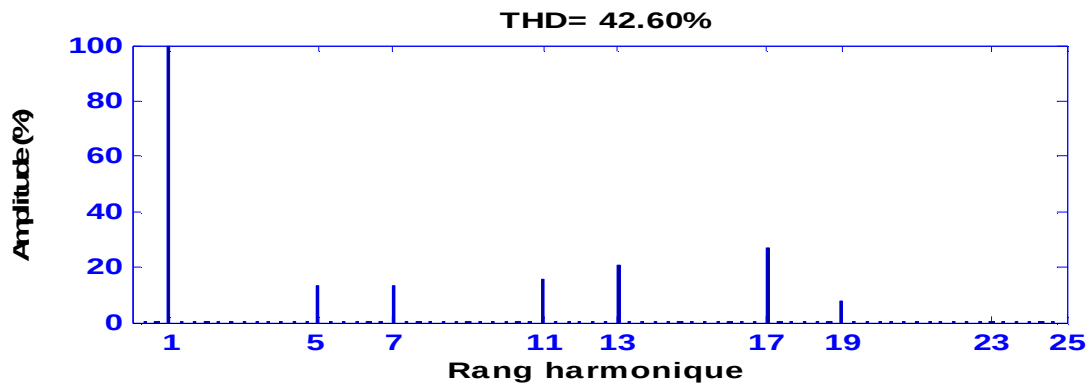
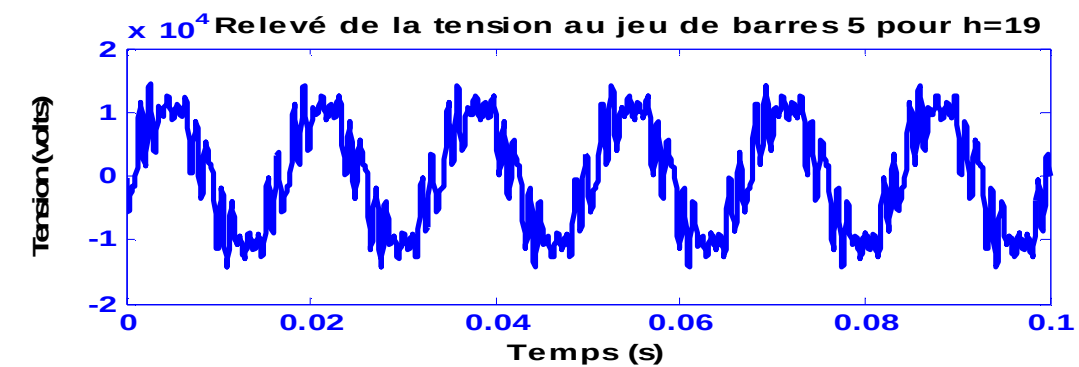
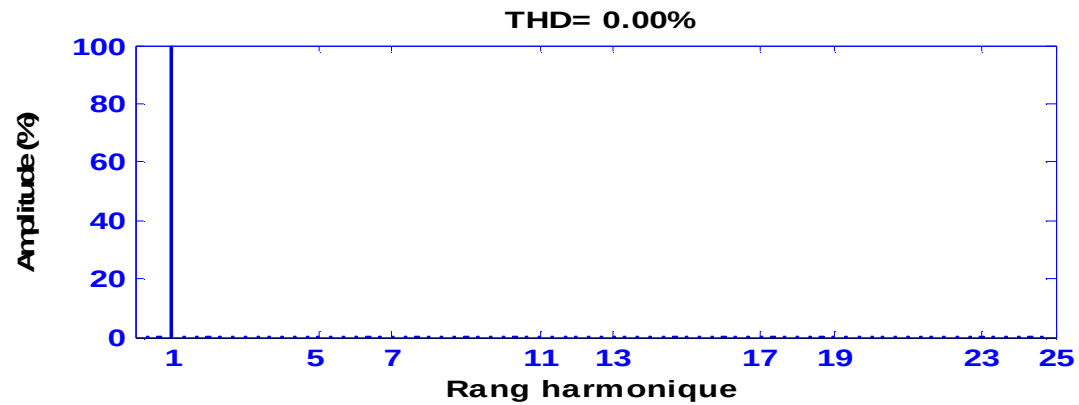
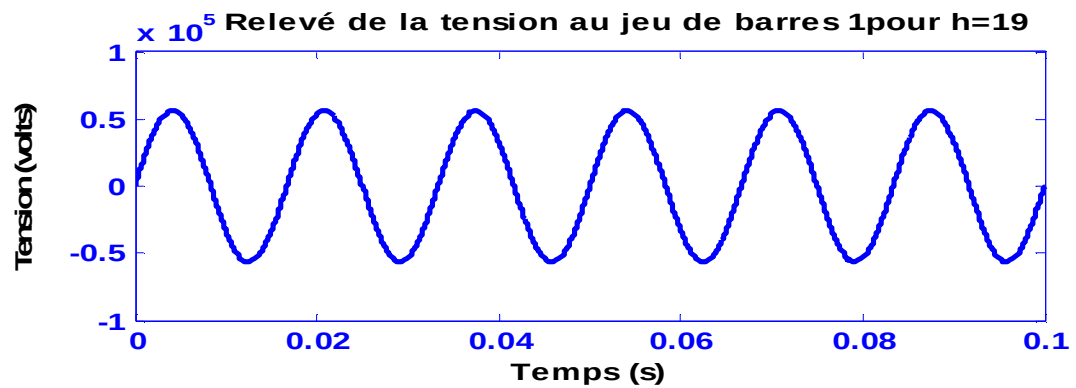


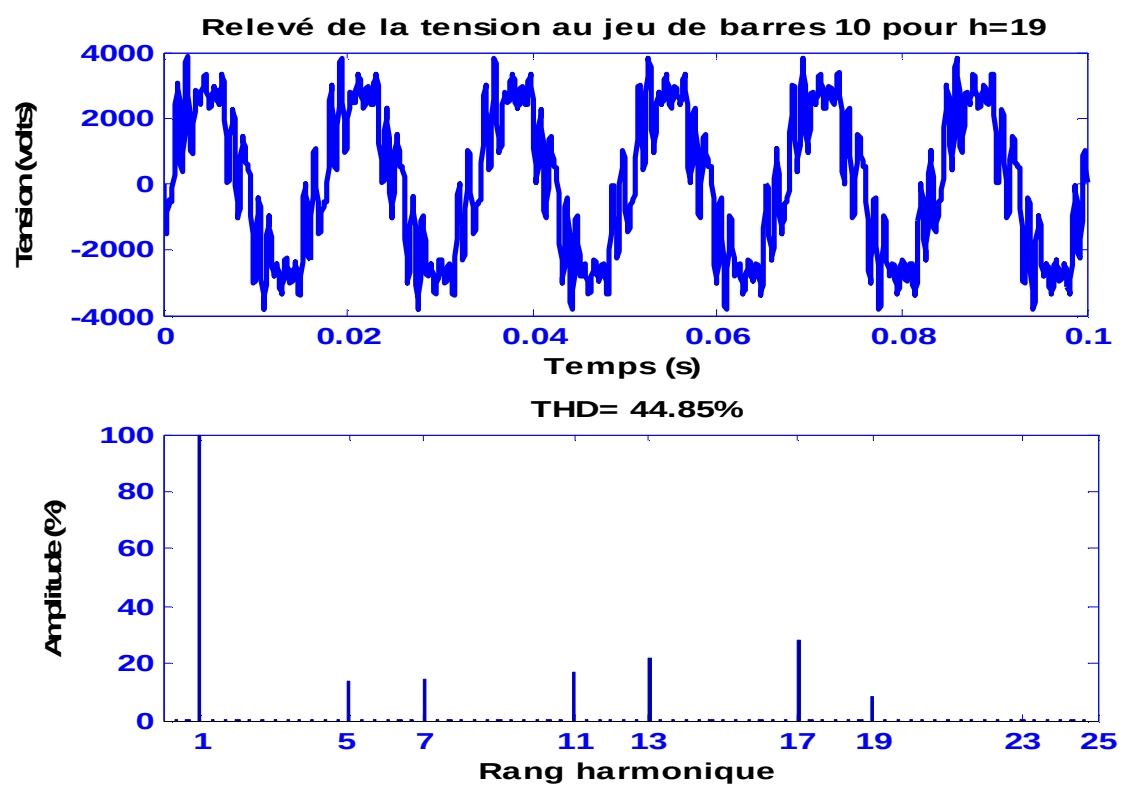
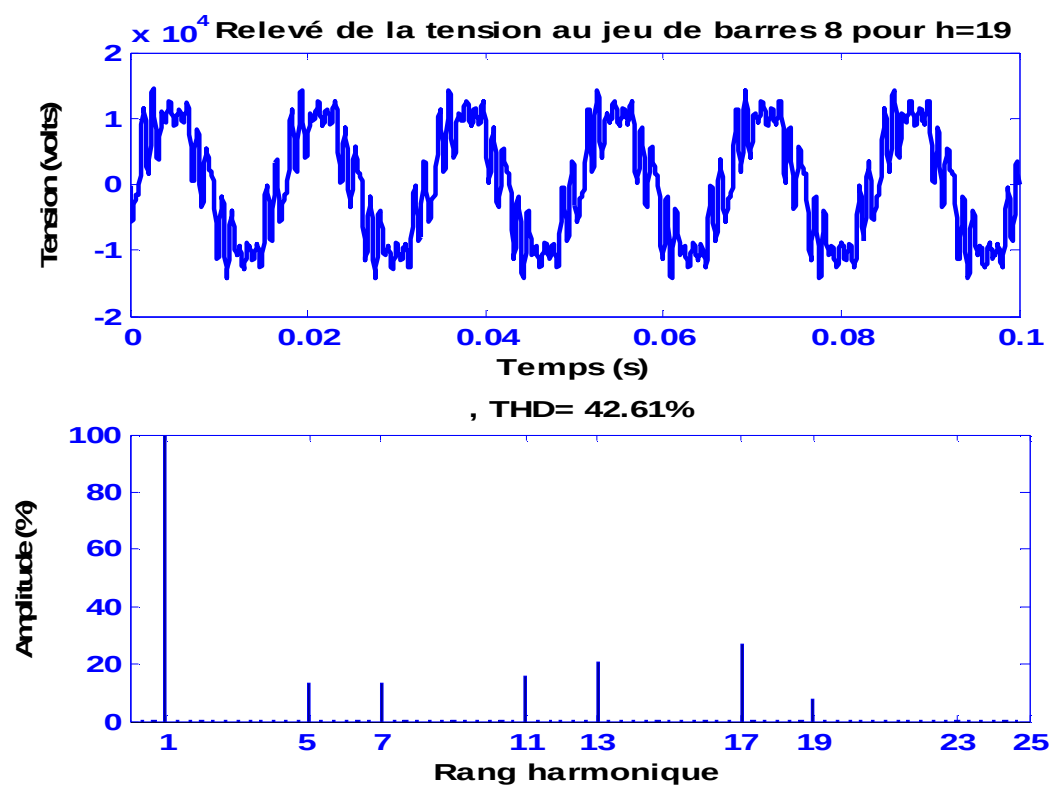
THD= 41.83%



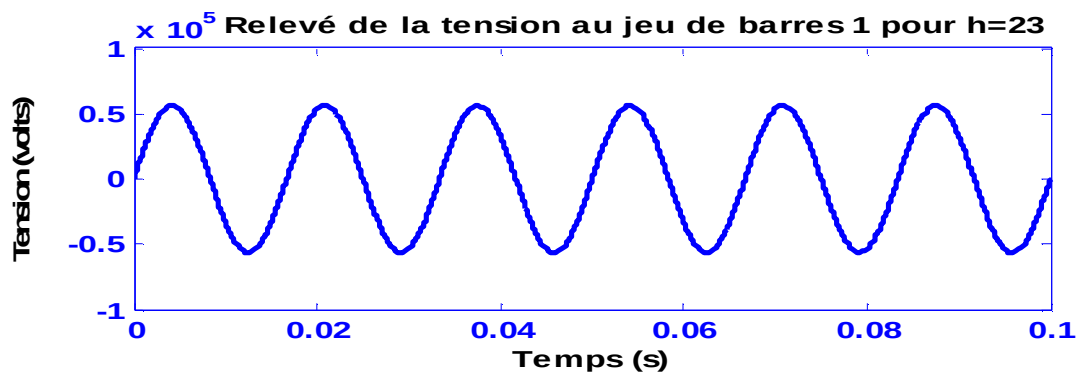


Pour $h=19$

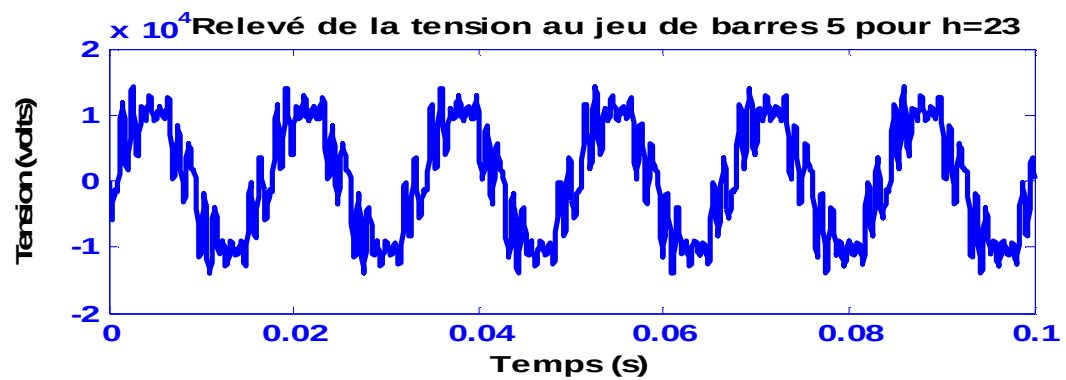
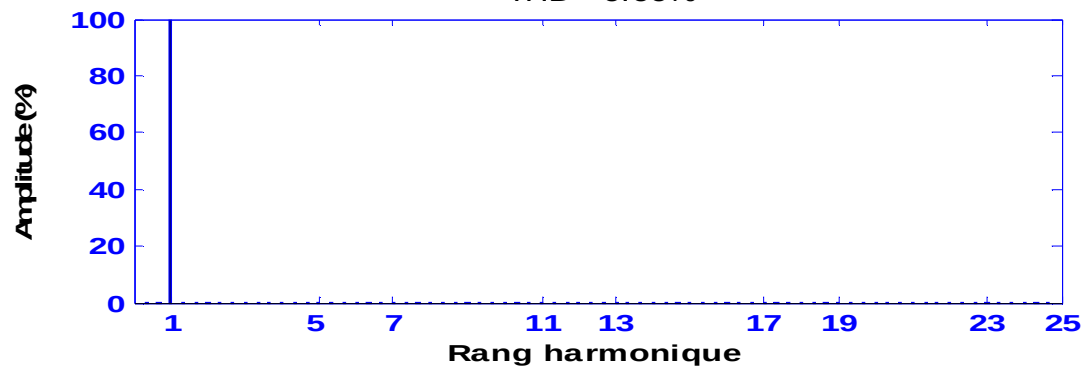




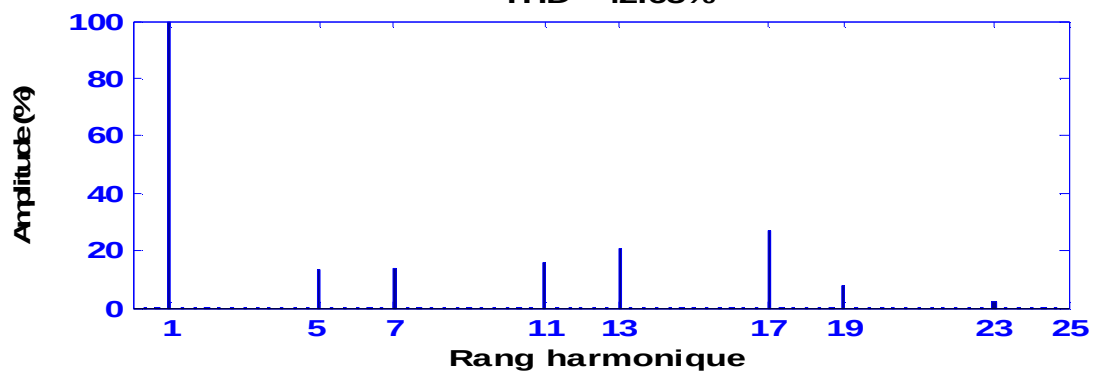
Pour $h=23$

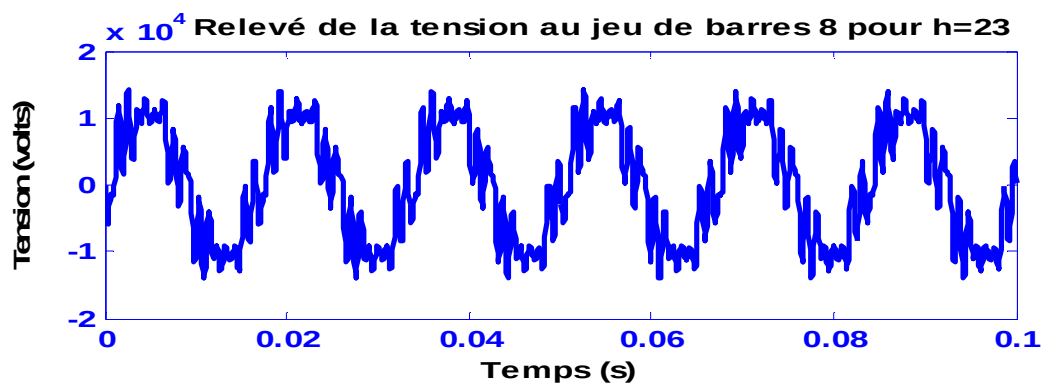


THD= 0.00%

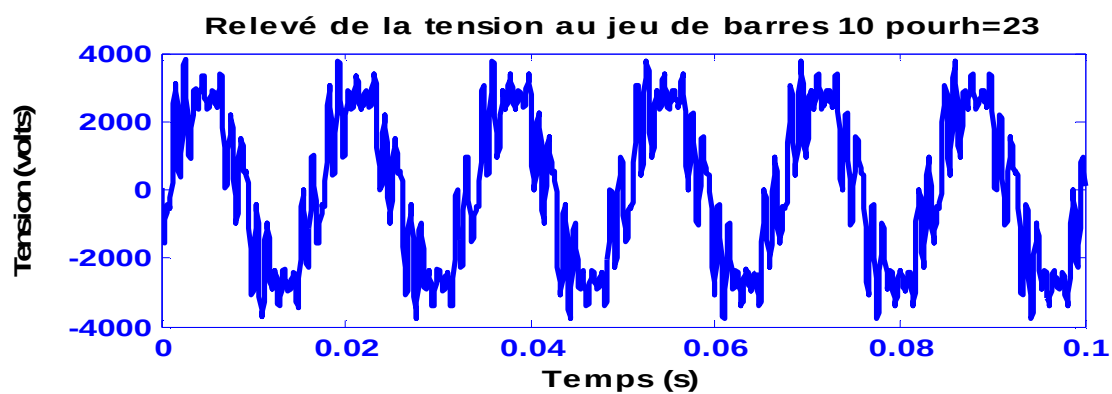
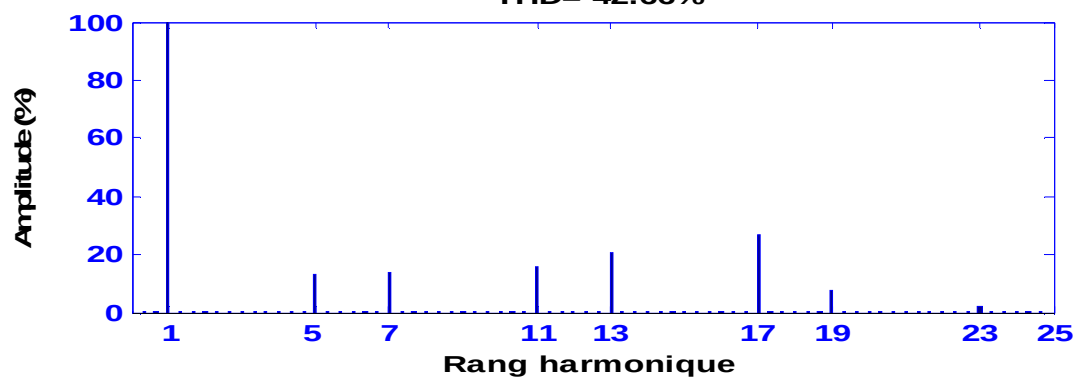


THD= 42.65%

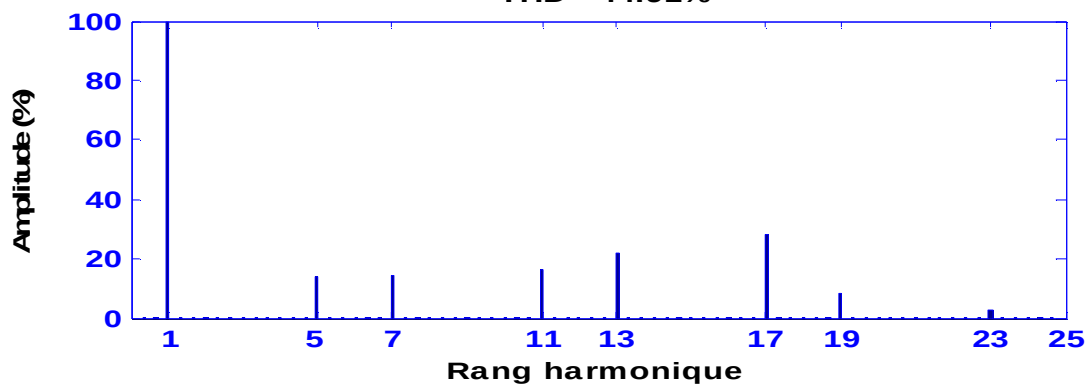




THD= 42.66%



THD= 44.91%



Discussion des résultats

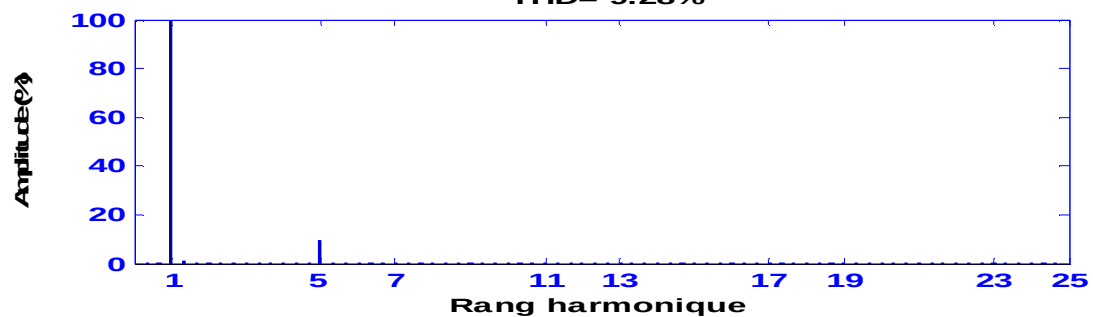
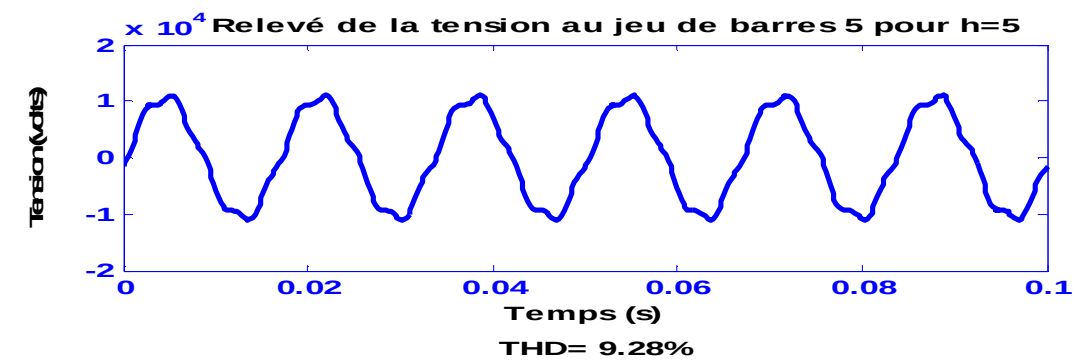
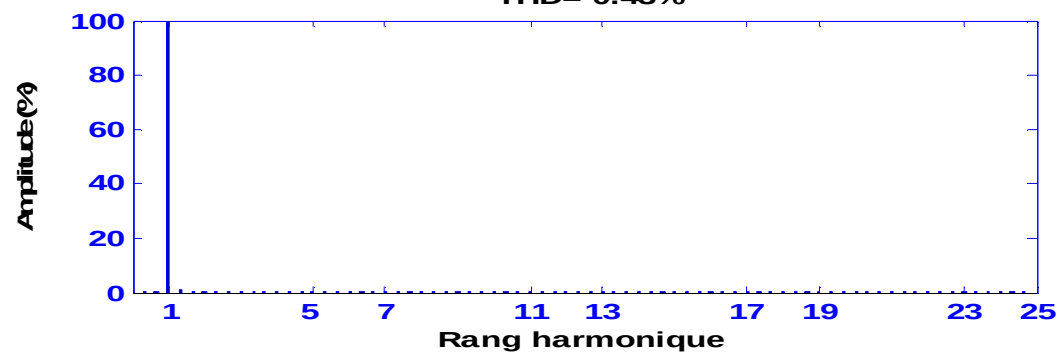
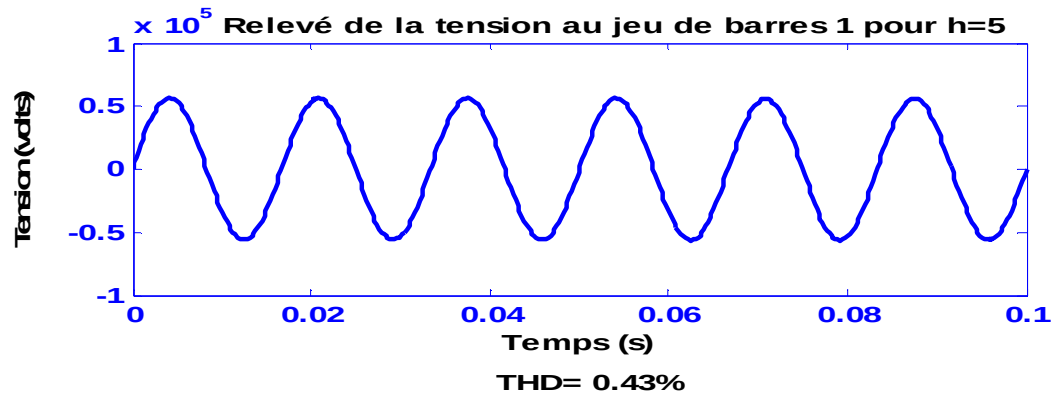
La forme de la tension demeure sinusoïdale pour le jeu de barres 1. La charge polluante n'a, donc, aucun effet sur la forme de la tension de la source.

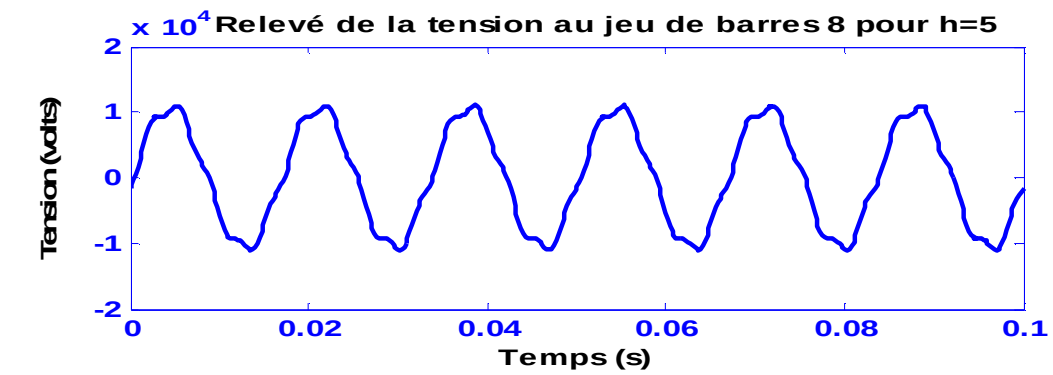
Une légère hausse du TDH_v peut être observée, pour les jeux de barres 5 et 8. Par contre, au niveau du jeu de barres 10, on aperçoit une diminution du TDH_v . Cela est dû au fait que la réactance inductive en amont de ce jeu de barres a diminué. En effet, en diminuant l'inductance en amont d'une charge et en augmentant l'inductance en aval de la même charge le taux de distorsion diminue [10].

III.5.2.1.b.3.Eloignement de la charge polluante du jeu de barres principal

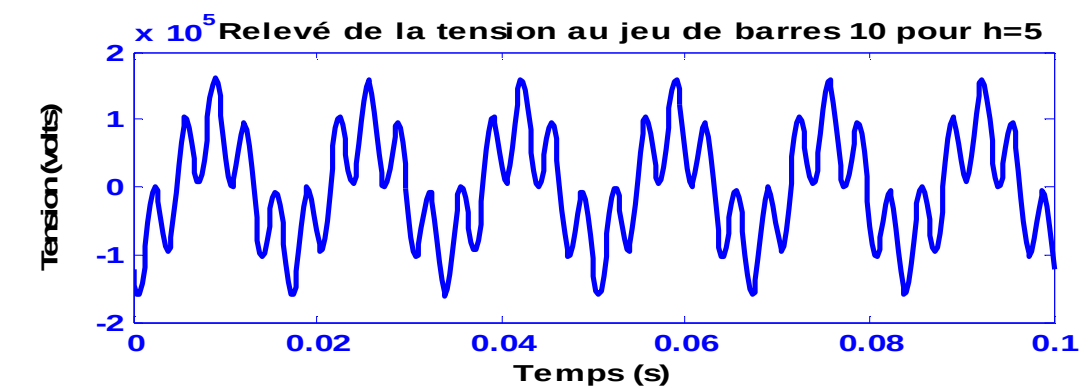
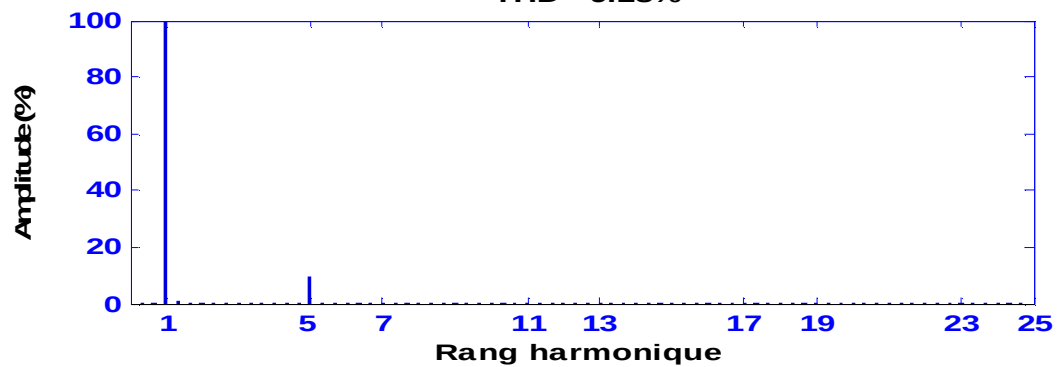
$$X=3.2.10^{-2}H$$

Pour $h=5$

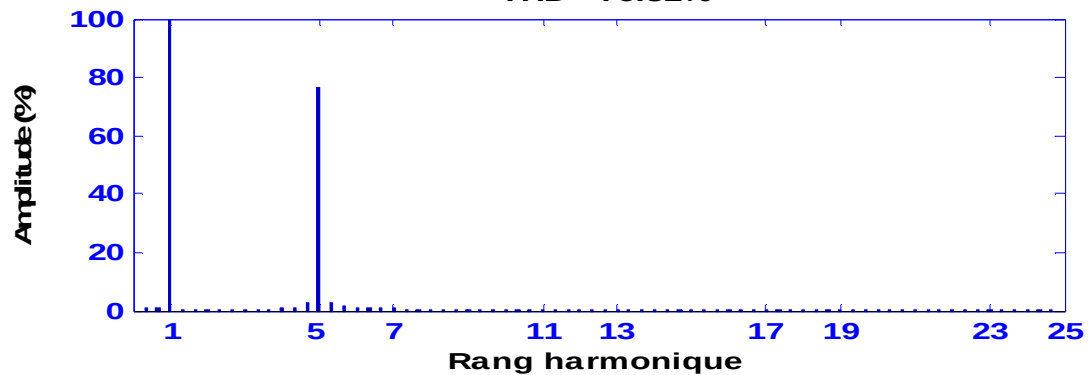




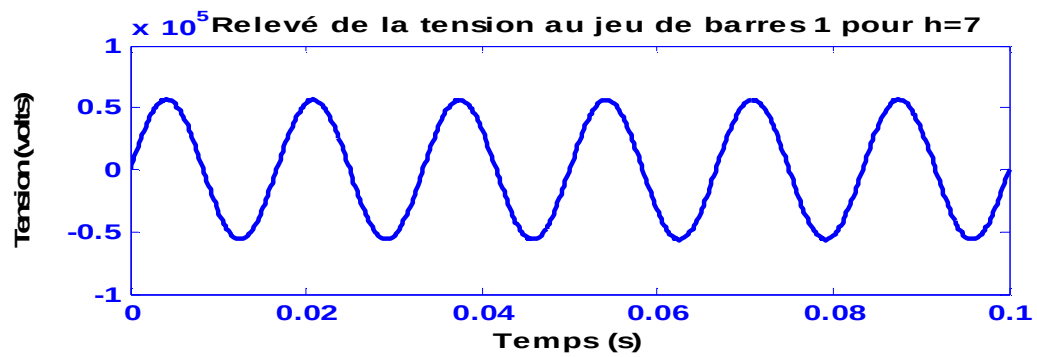
THD= 9.28%



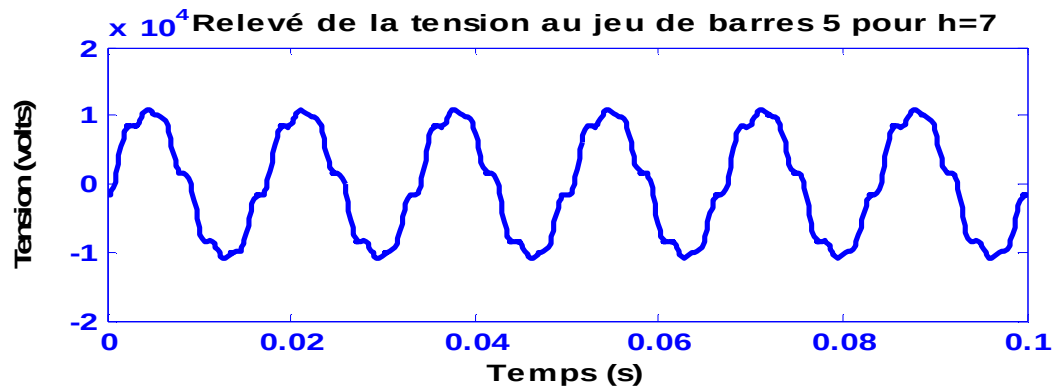
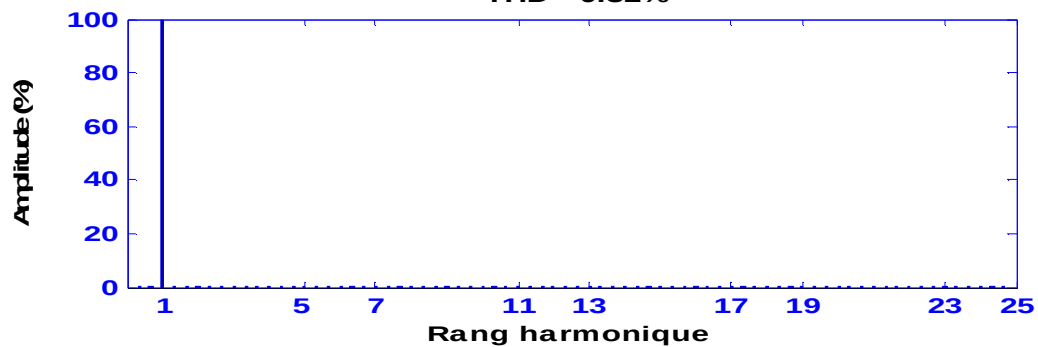
THD= 76.32%



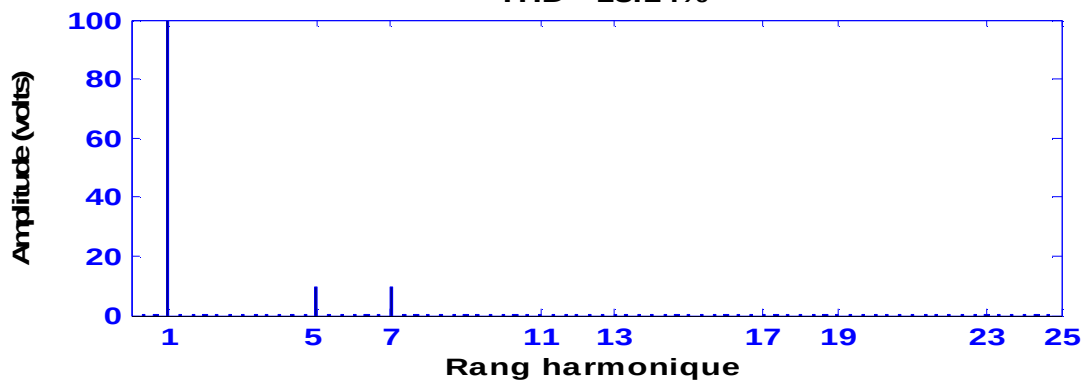
Pour $h=7$

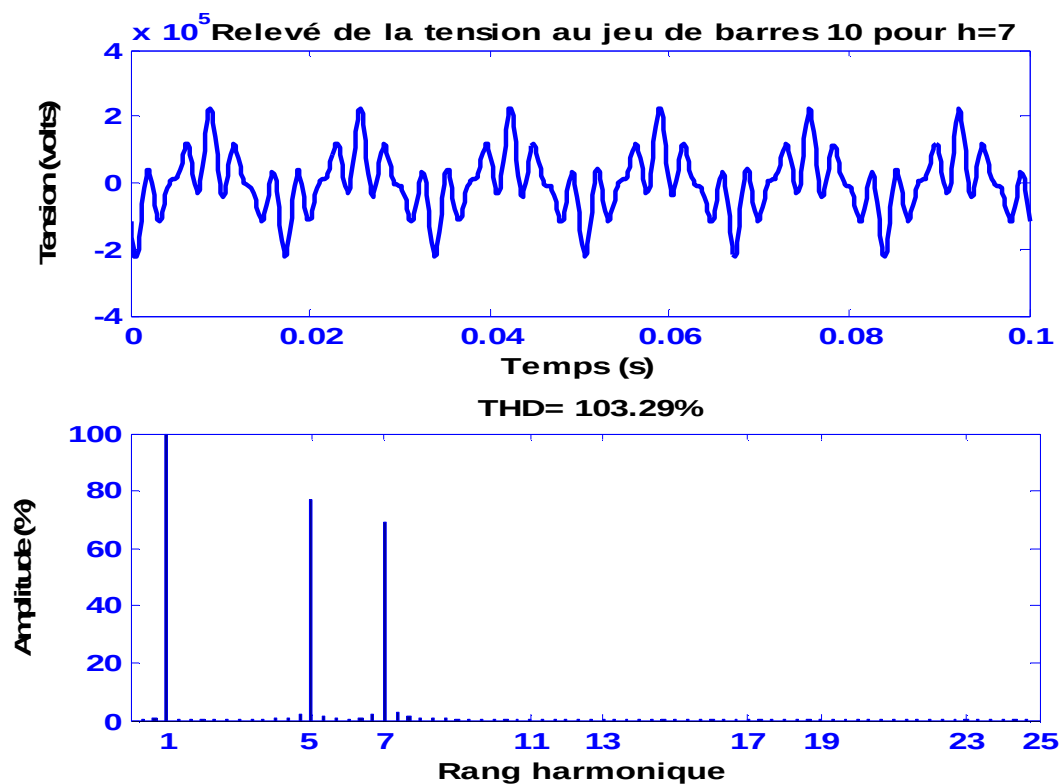
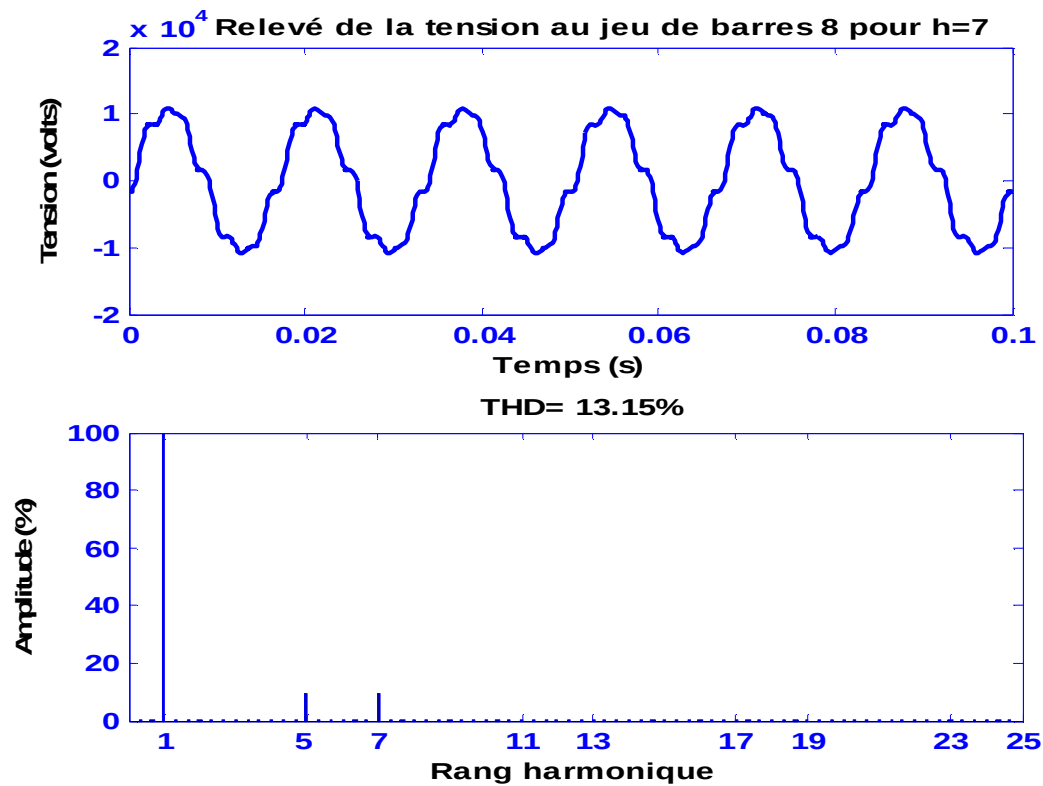


THD= 0.32%

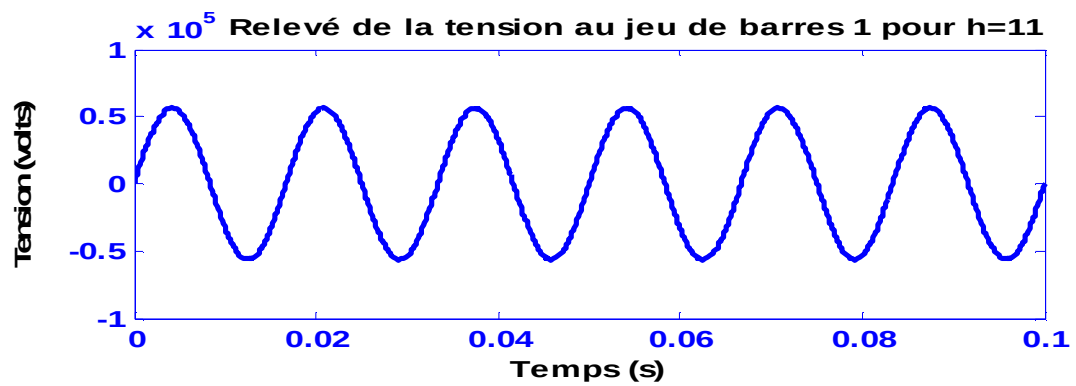


THD= 13.14%

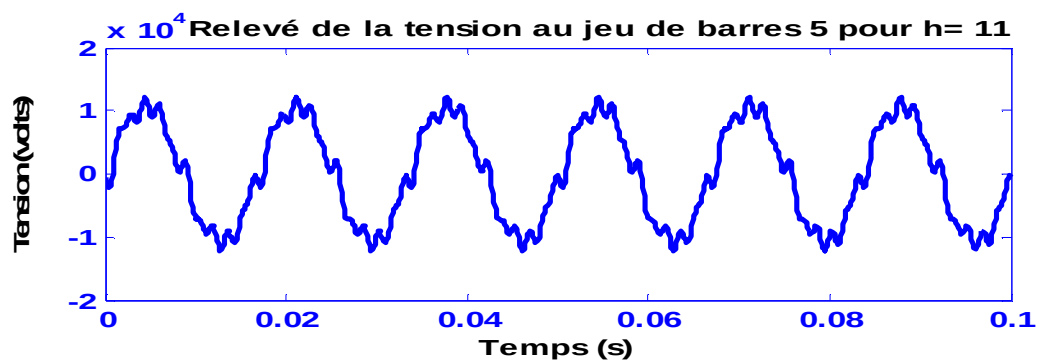
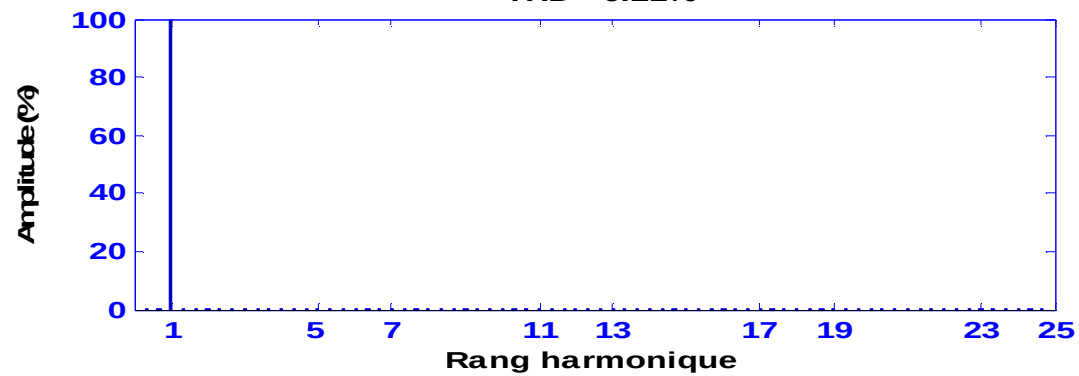




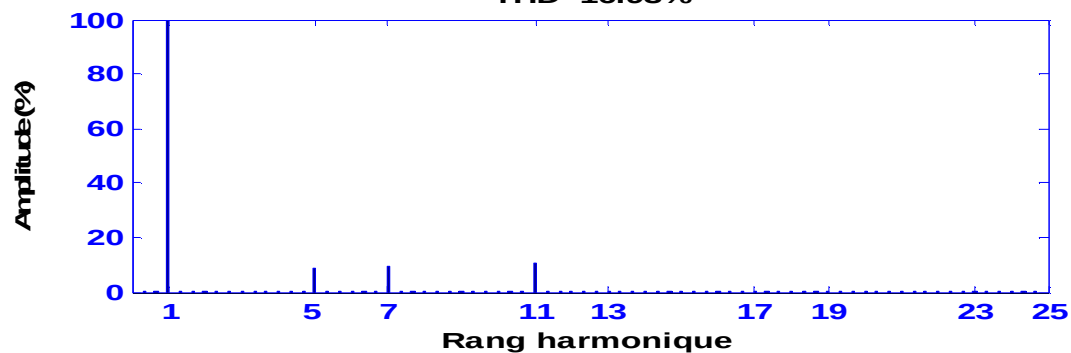
Pour $h=11$

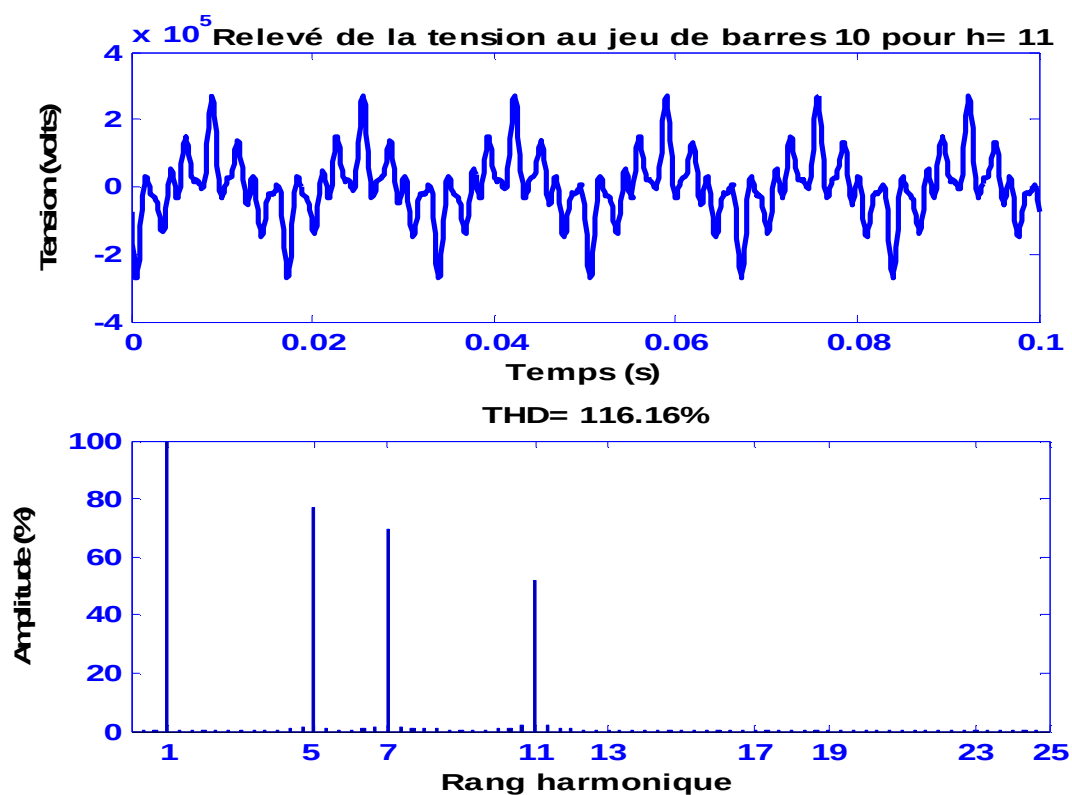
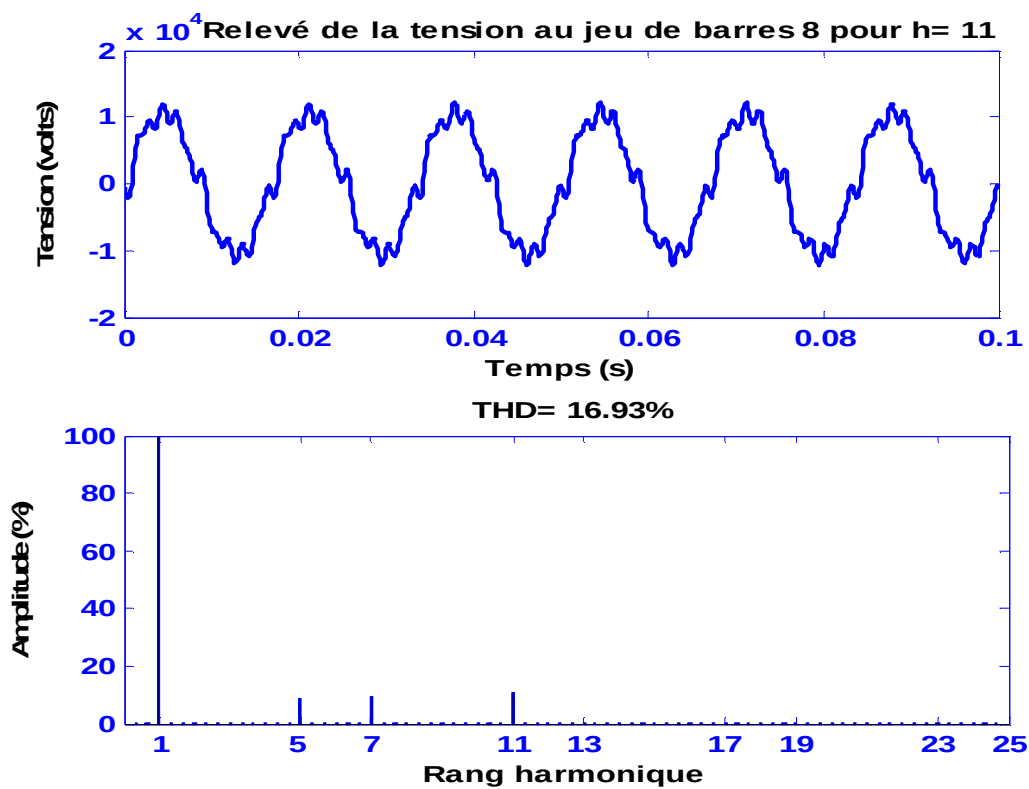


THD= 0.21%

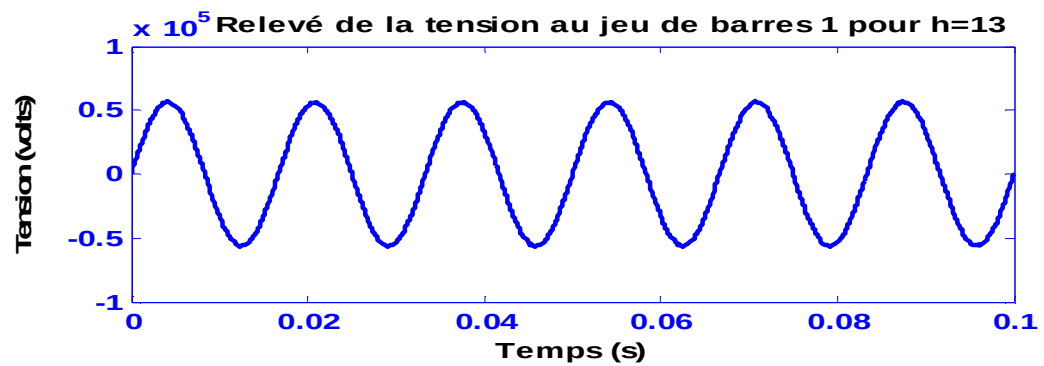


THD=16.93%

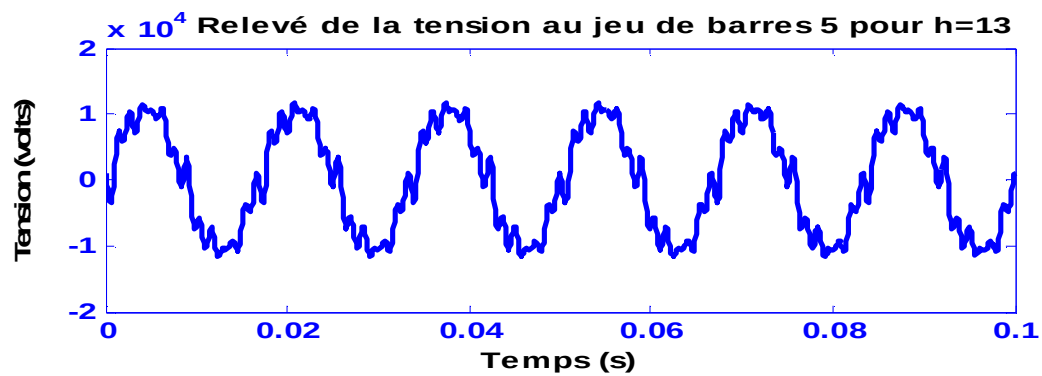
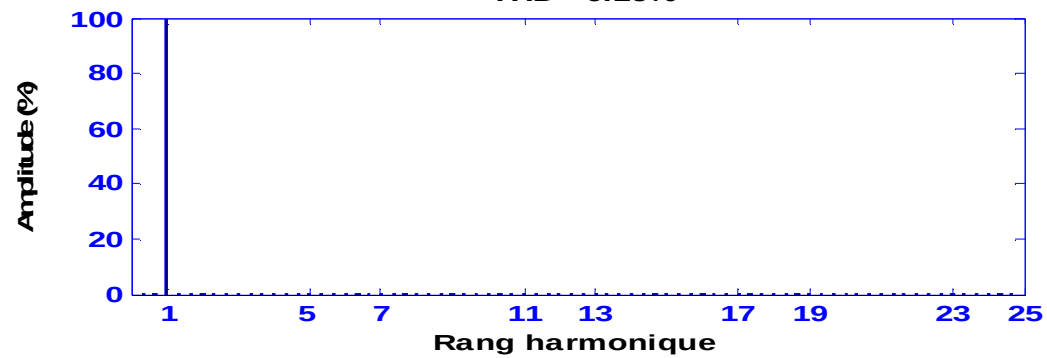




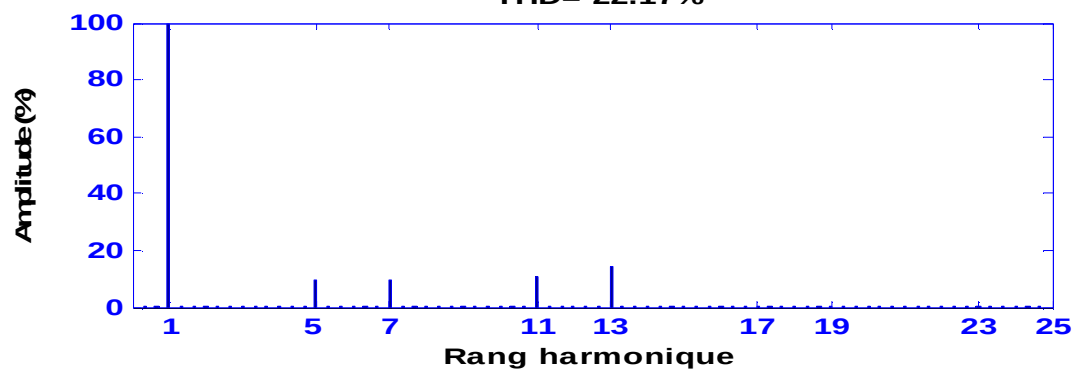
Pour $h=13$

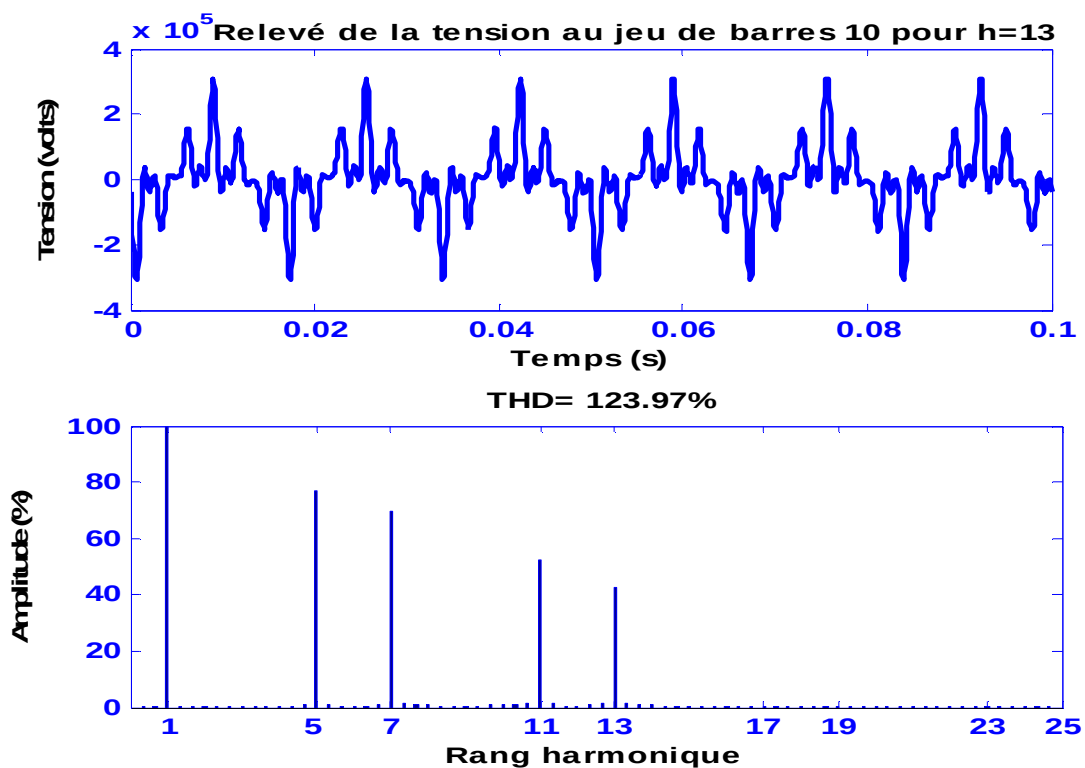
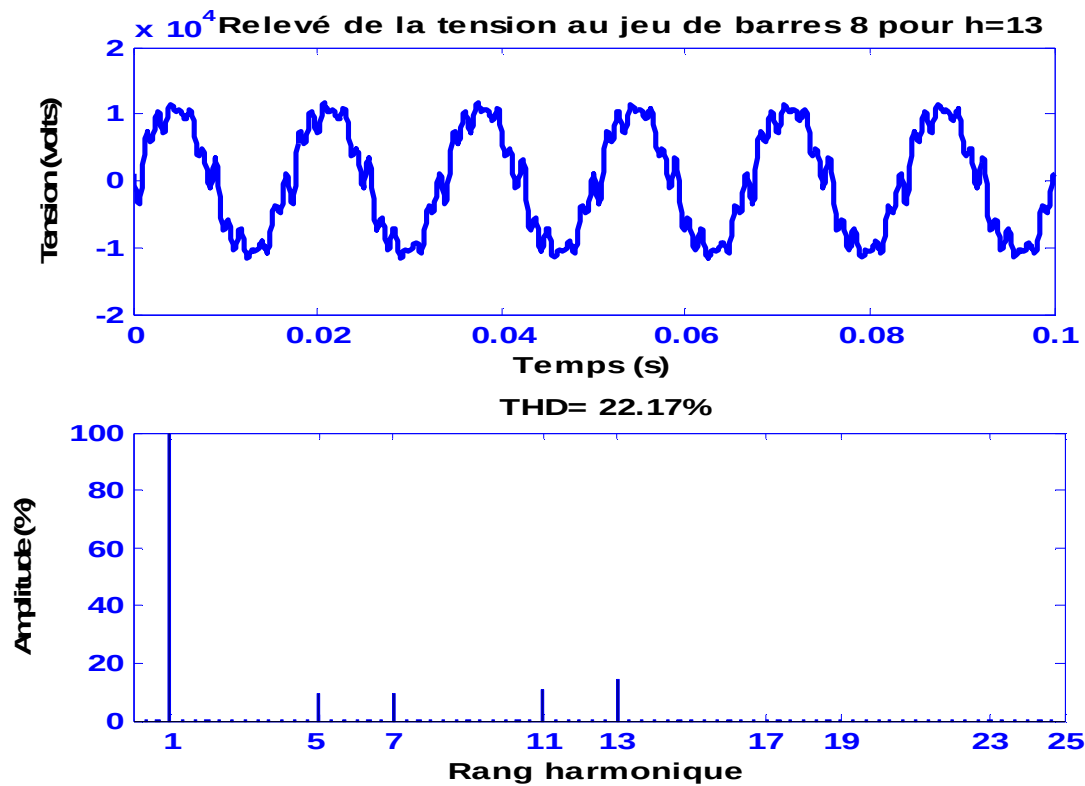


THD= 0.16%

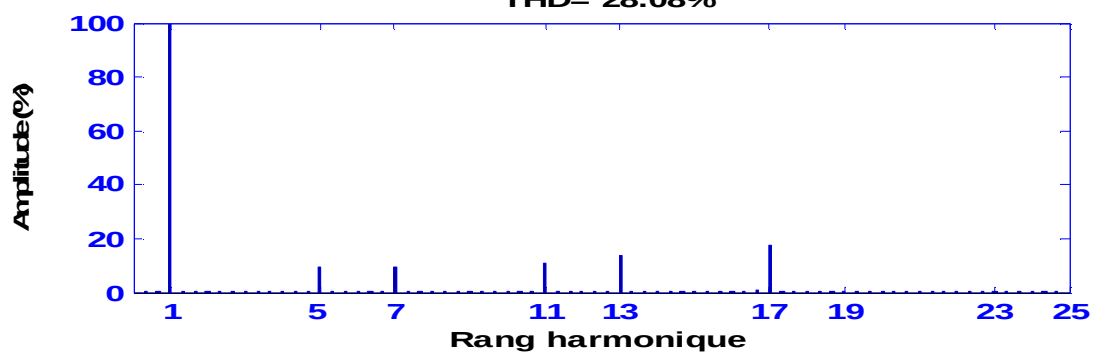
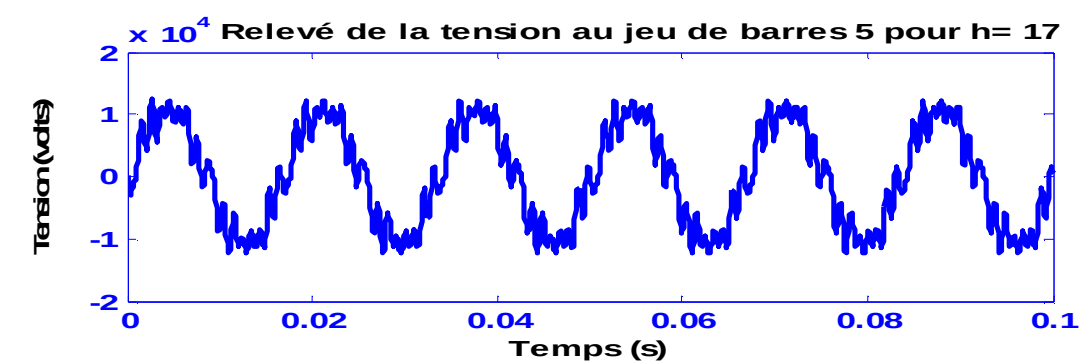
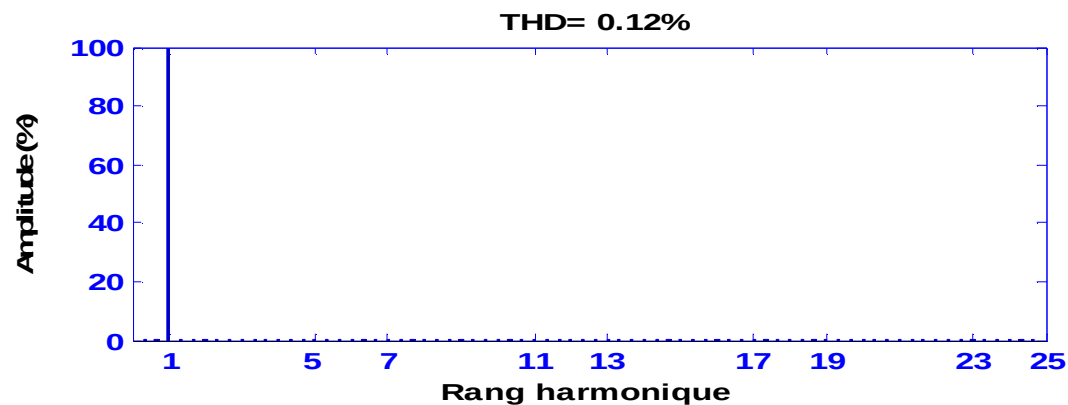
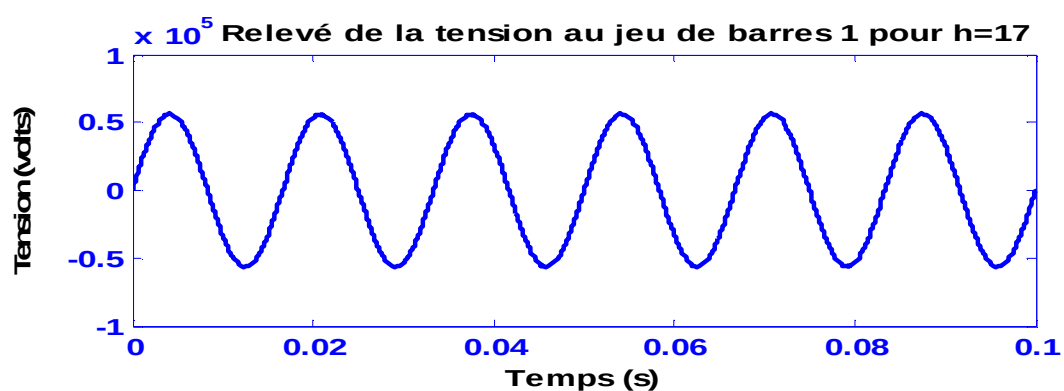


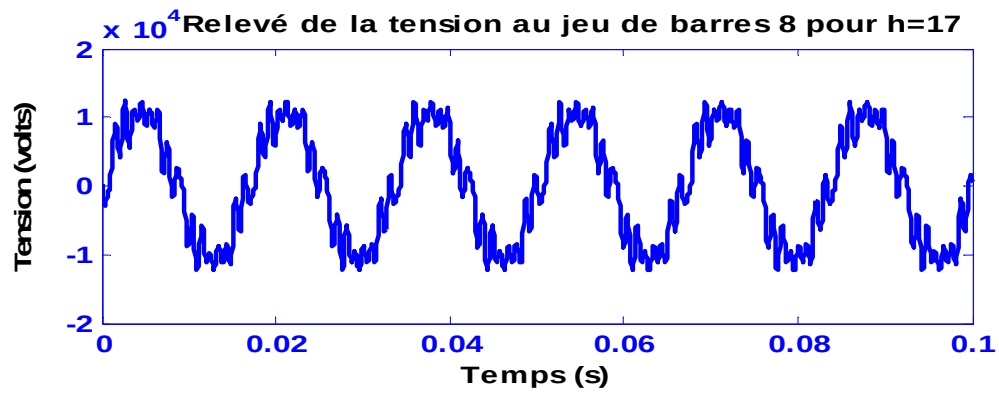
THD= 22.17%



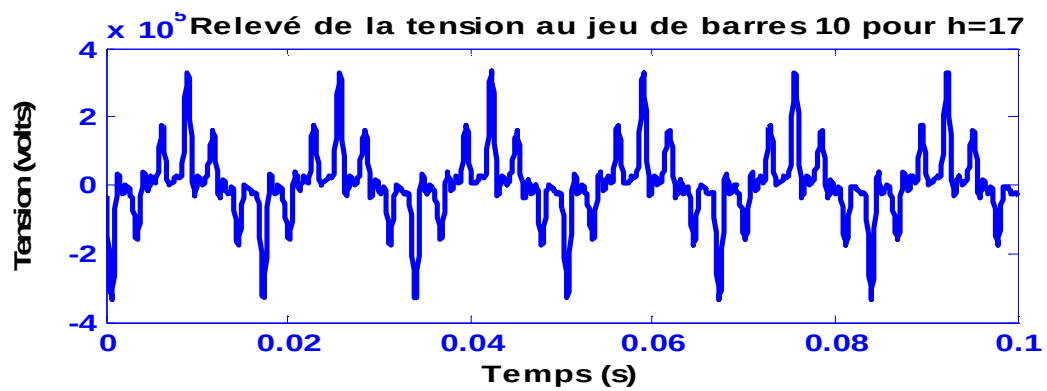
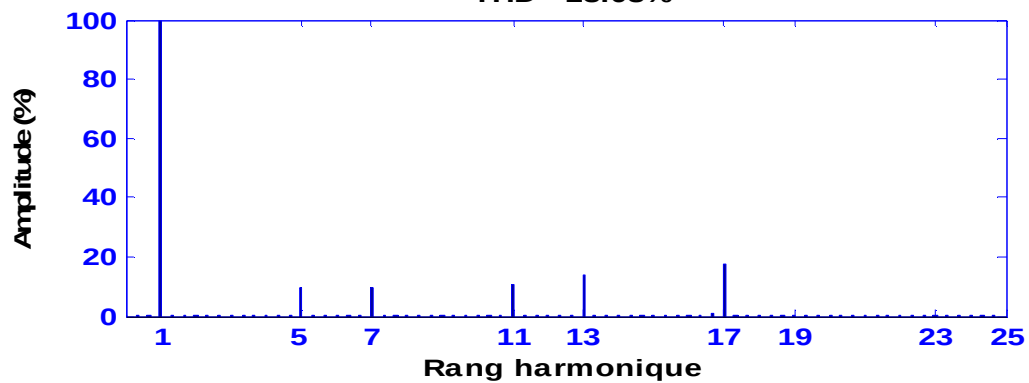


Pour $h=17$

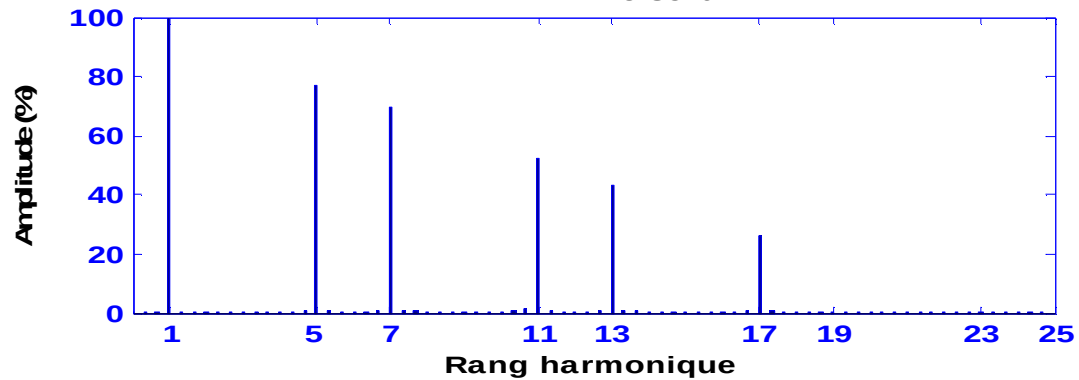




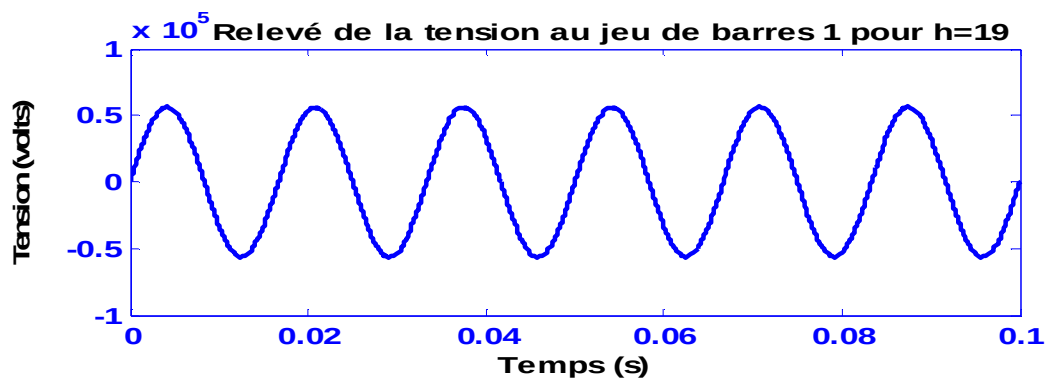
THD= 28.08%



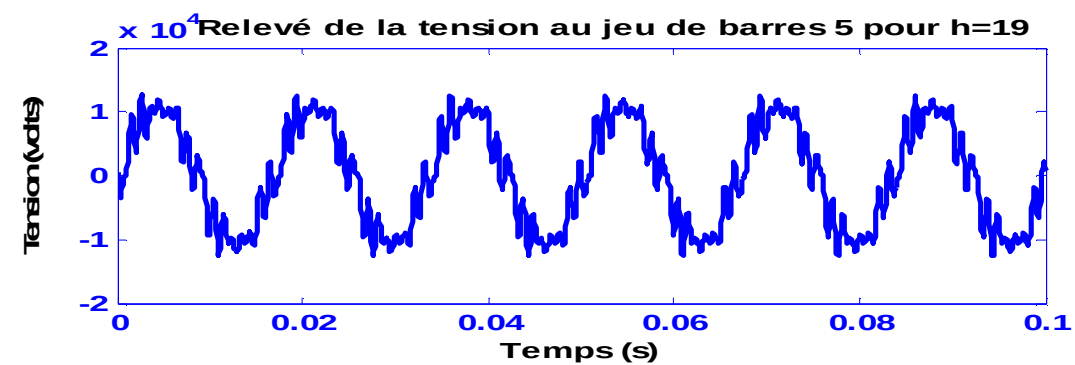
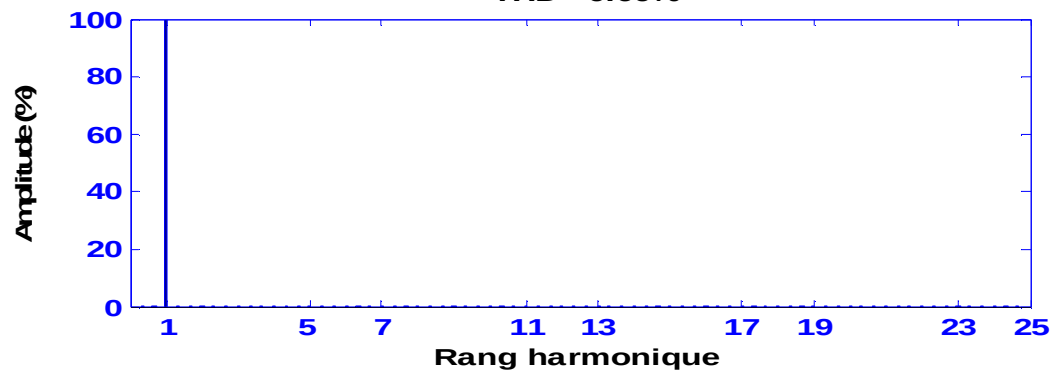
THD= 126.89%



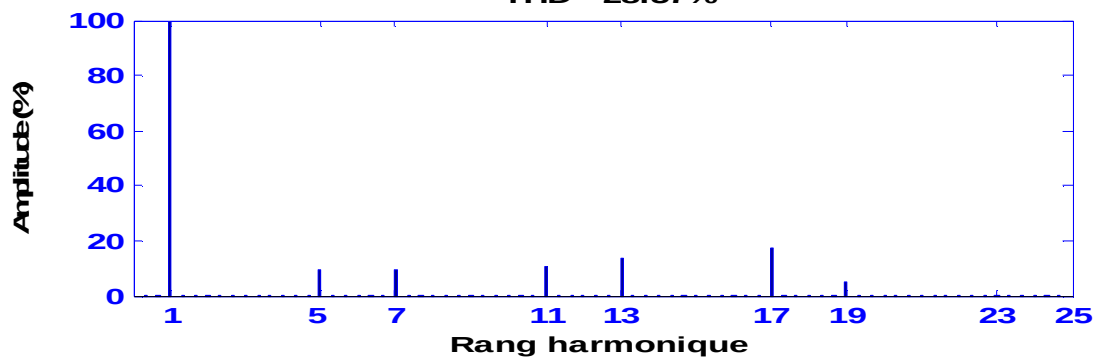
Pour $h=19$

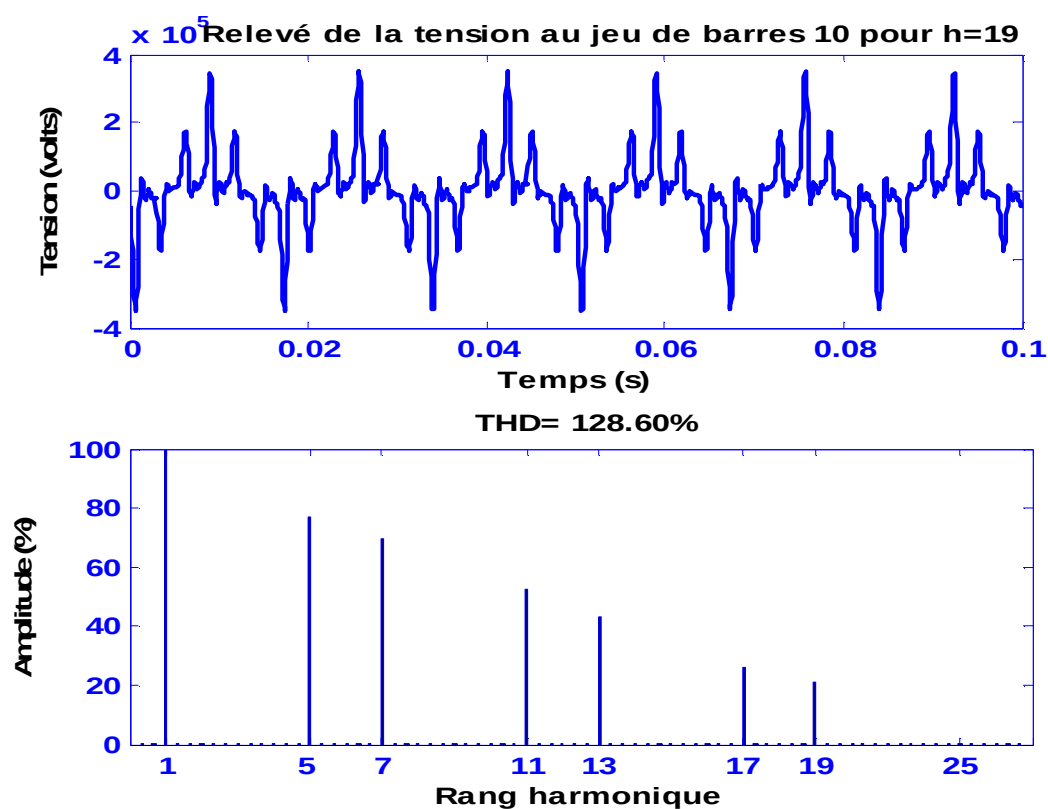
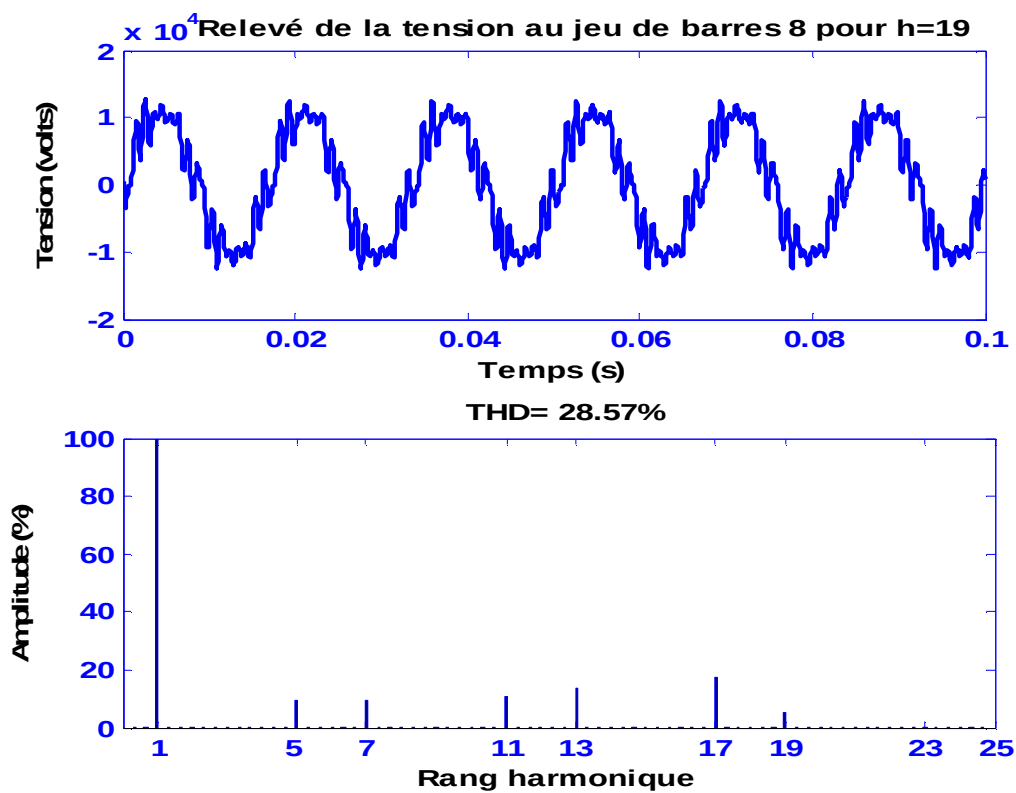


THD= 0.00%

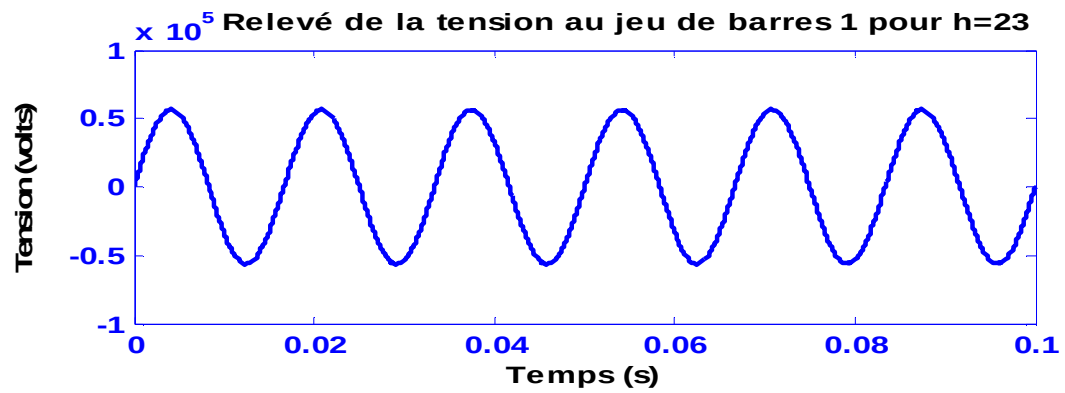


THD= 28.57%

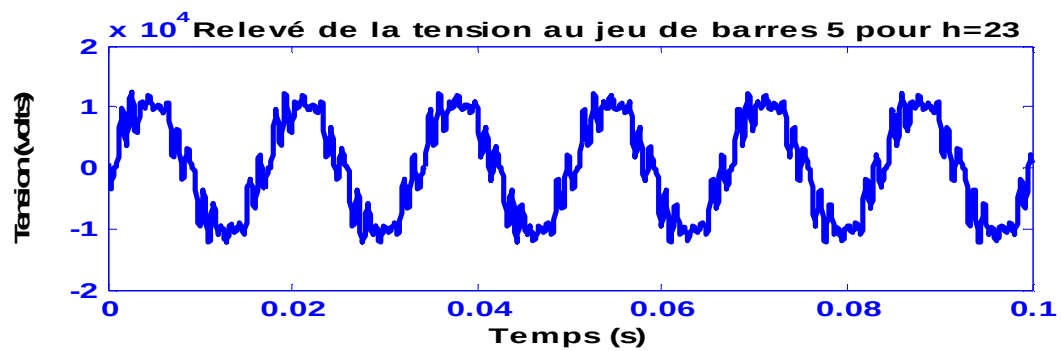
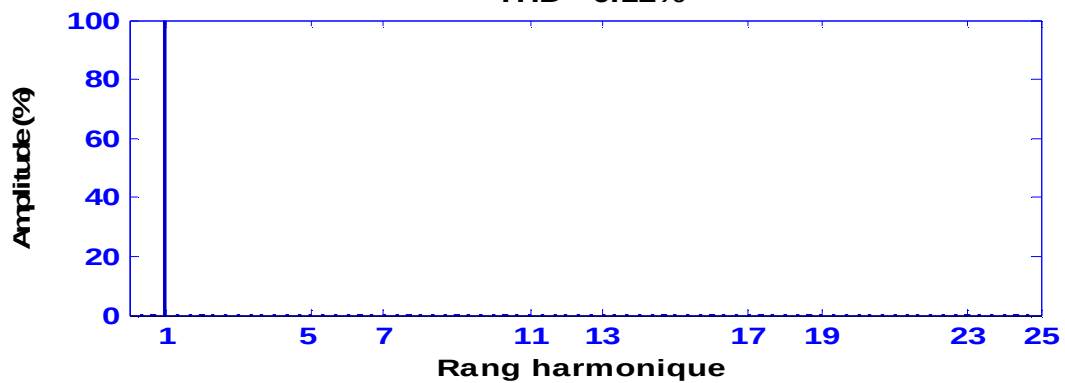




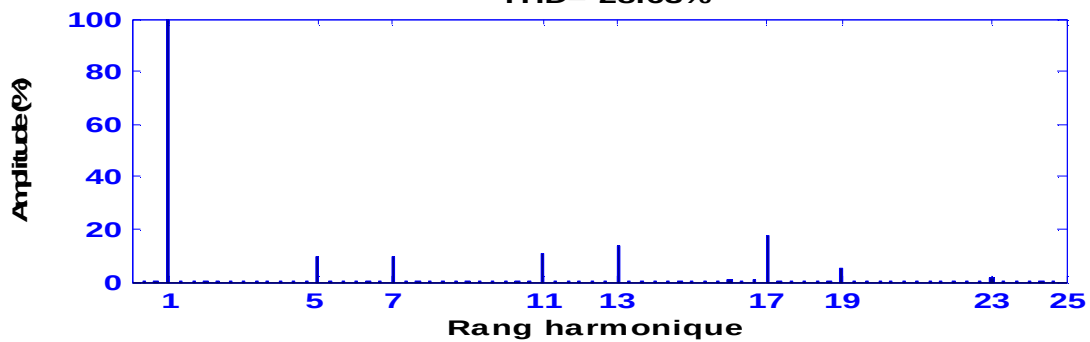
Pour $h=23$

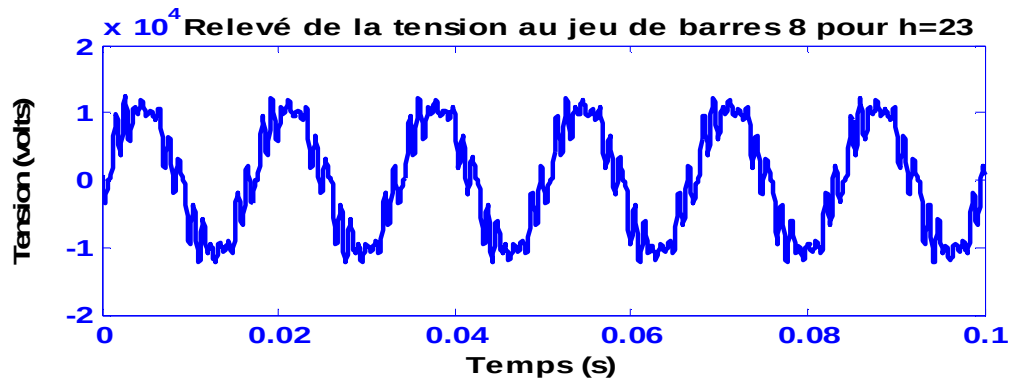


THD= 0.12%

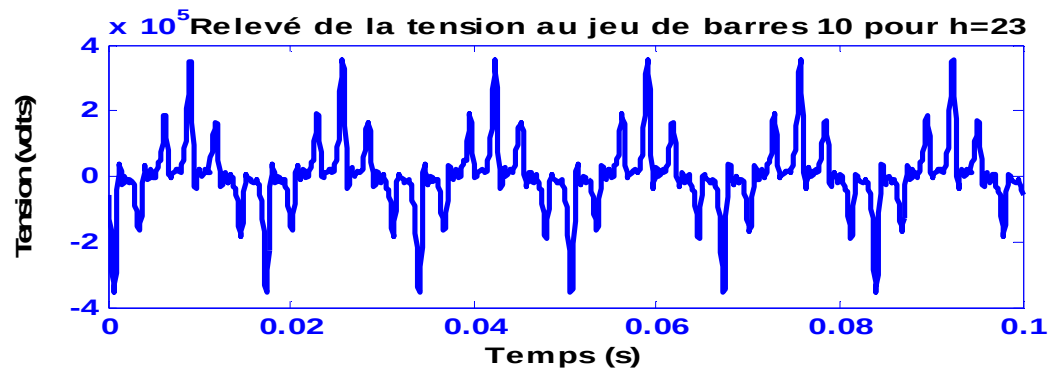
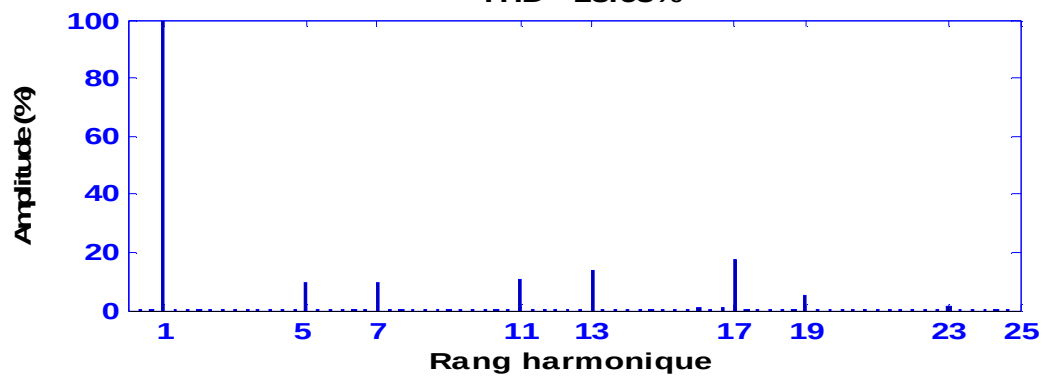


THD= 28.63%

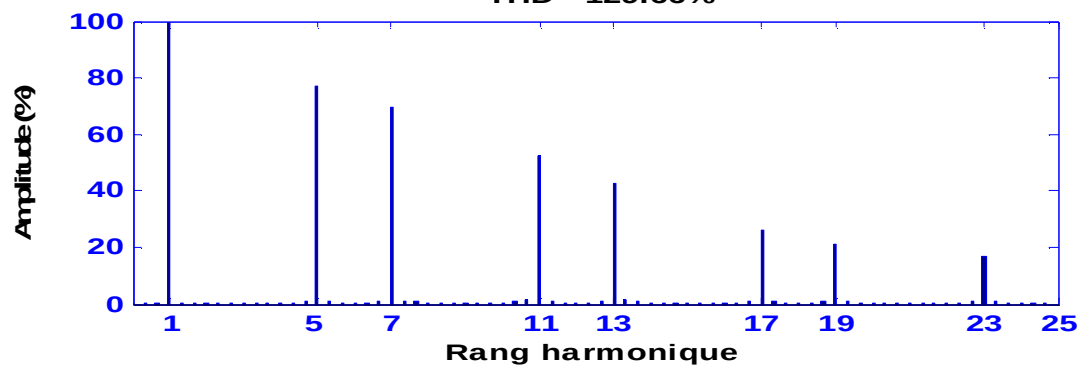




THD= 28.63%



THD= 129.66%



Discussion des résultats

En augmentant la valeur de la réactance du câble, on remarque que la forme de l'onde de tension au jeu de barres 1 demeure sinusoïdale. L'éloignement de la charge polluante, n'a donc aucun effet sur la forme de la tension de la source.

Par contre, en analysant les jeux de barres (5, 8, 10), on remarquera qu'il y a une diminution considérable du TDH_v (il passe de 42.28% à 28.57% pour l'harmonique 19 au jeu de barres 5), ce qui n'est pas le cas pour le jeu de barres 10, où on remarque une forte augmentation du TDH_v (il passe de 47.42% (pour $X=3.2 \cdot 10^{-5} \text{H}$) à 128.60% (pour $X=3.2 \cdot 10^{-2} \text{H}$), pour l'harmonique 19). Cela est dû au fait que la réactance en amont de ce jeu de barres est élevée.

III.5.2.2. Etude comparative

III.5.2.2.a. Evolution des taux de distorsion harmonique pour les jeux de barres 1, 5, 8 et 10 pour différents rangs harmoniques

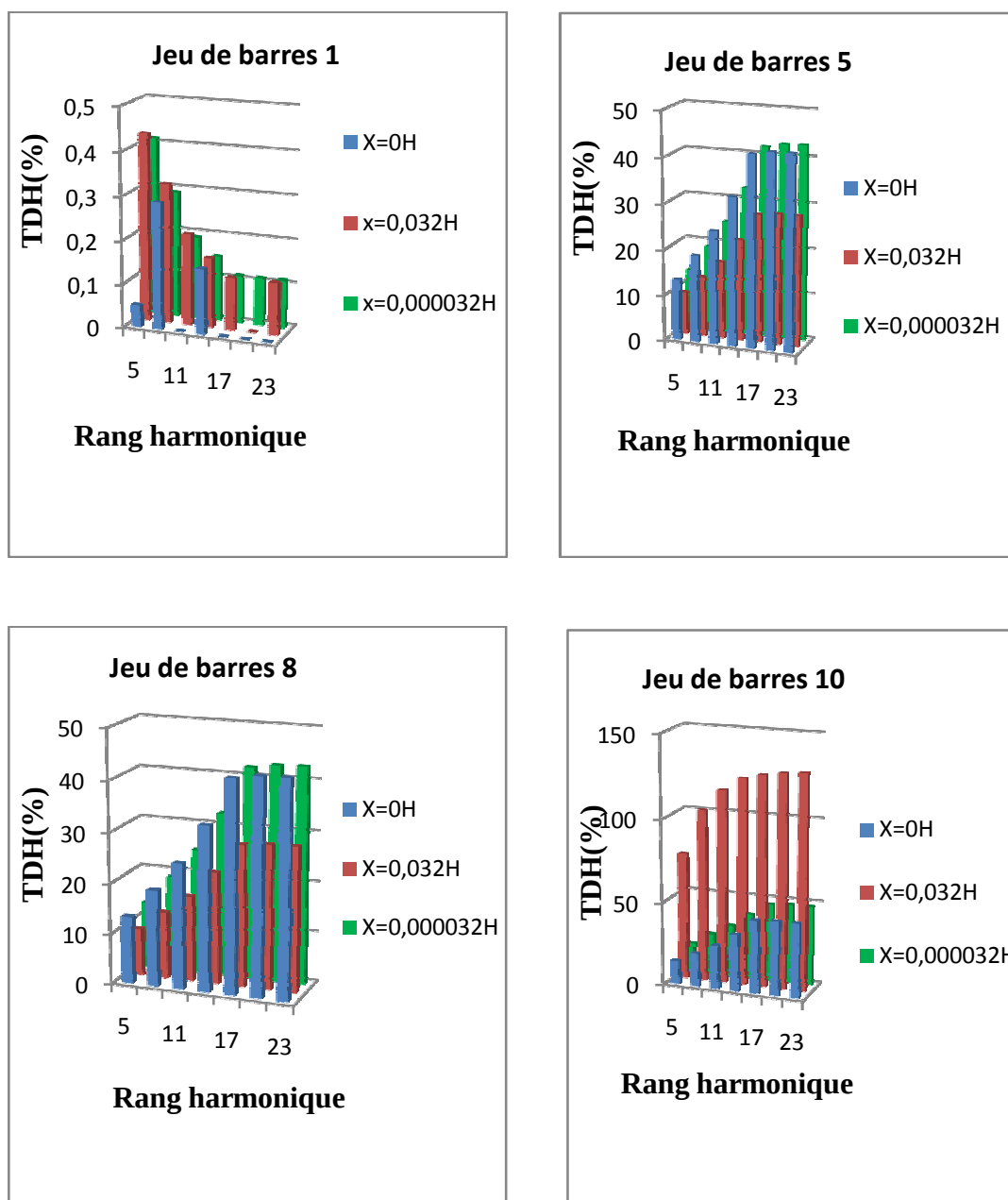
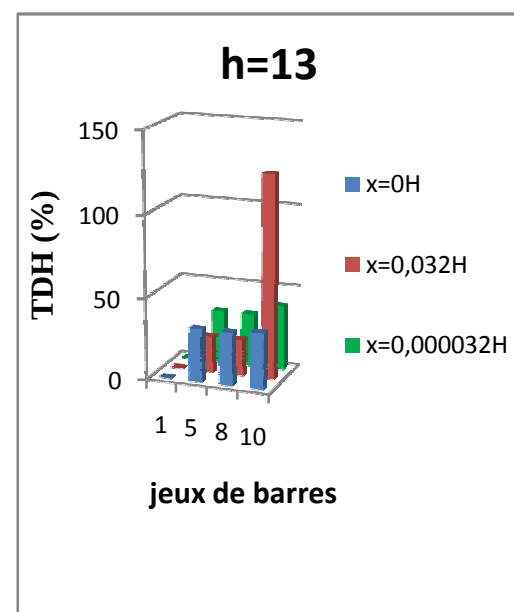
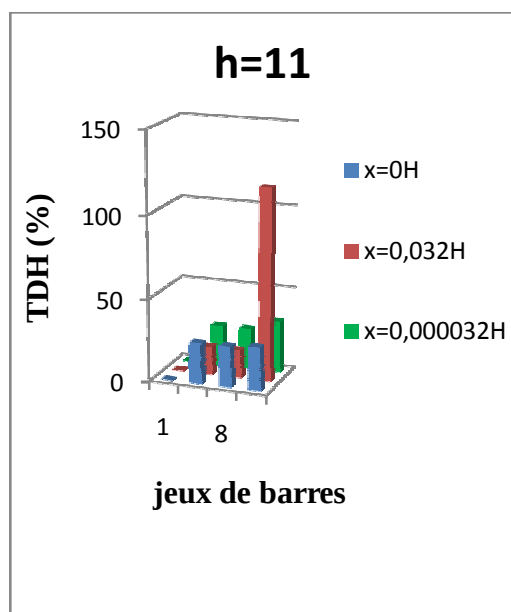
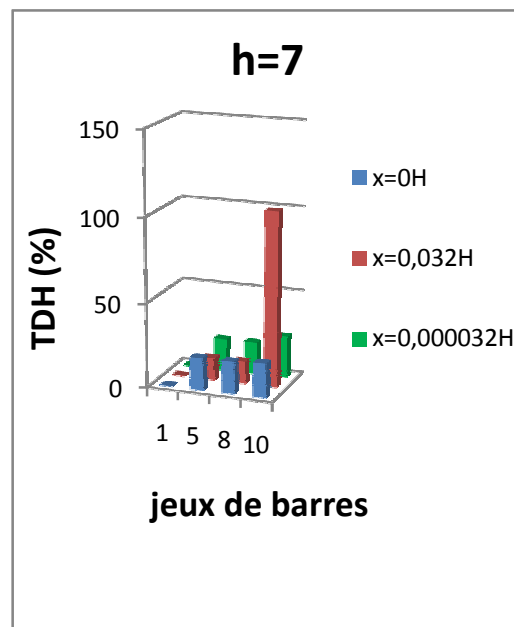
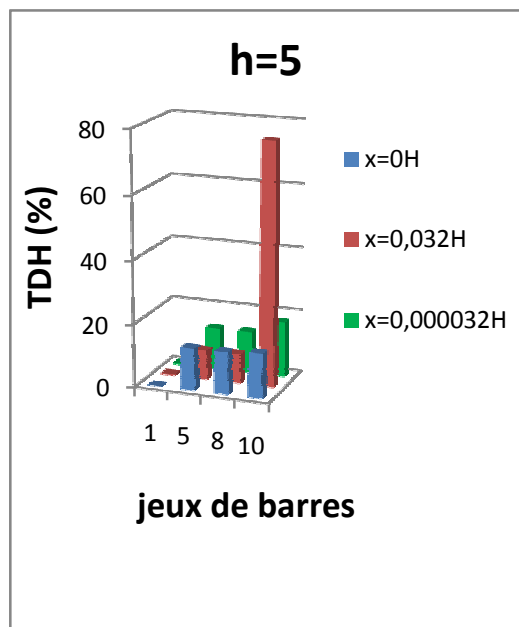


Figure (III.8) : Evolution des taux de distorsion harmonique pour les jeux de barres 1, 5, 8 et 10 pour différents rangs harmoniques

III.5.2.2.b. Evolution des taux de distorsion harmonique en tension en fonction du rang harmonique h pour les jeux de barres 1, 5, 8 et 10



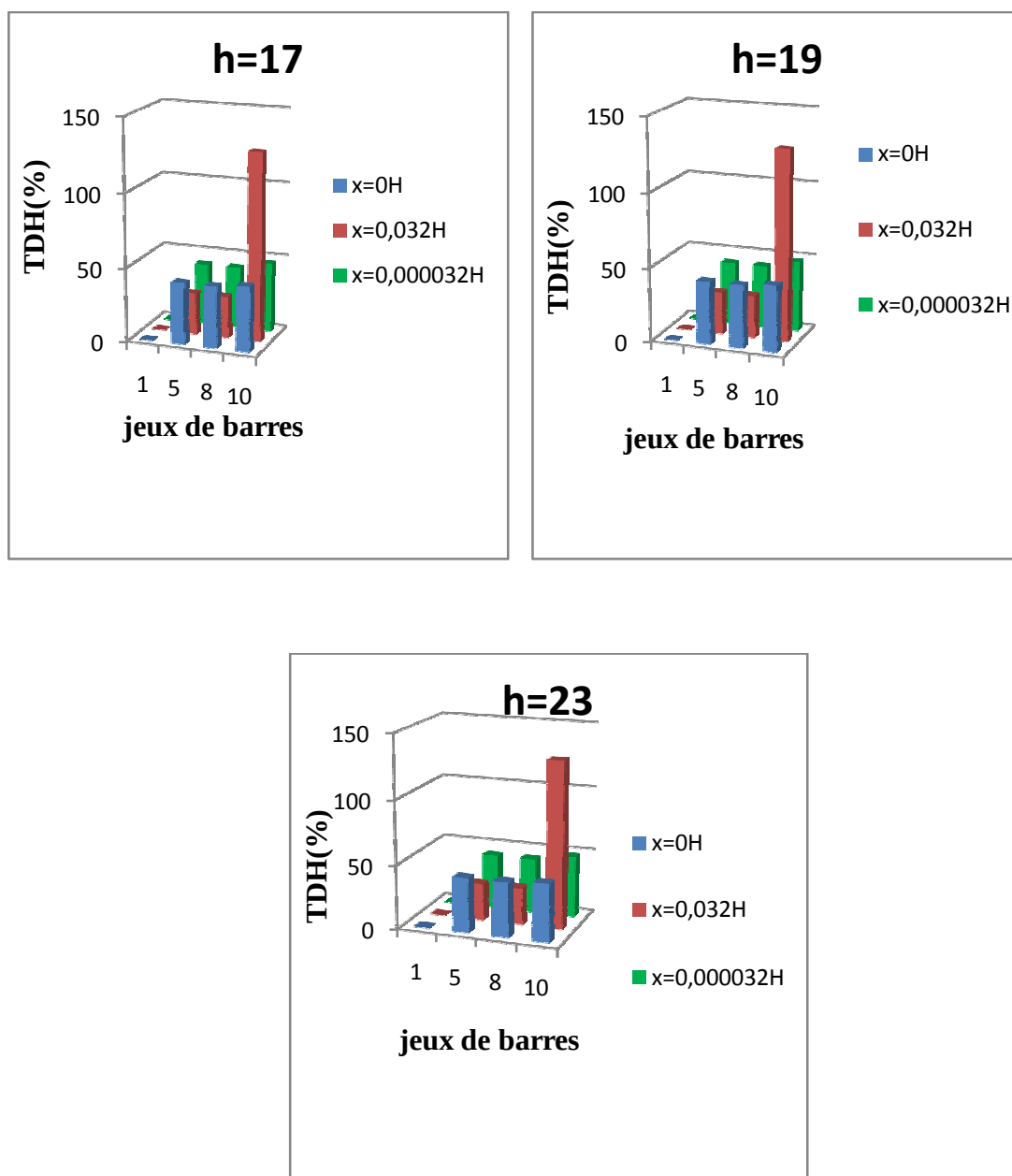


Figure (III.9.a) : Evolution des taux de distorsion harmonique en tension en fonction du rang harmonique h pour les jeux de barres 1, 5, 8 et 10

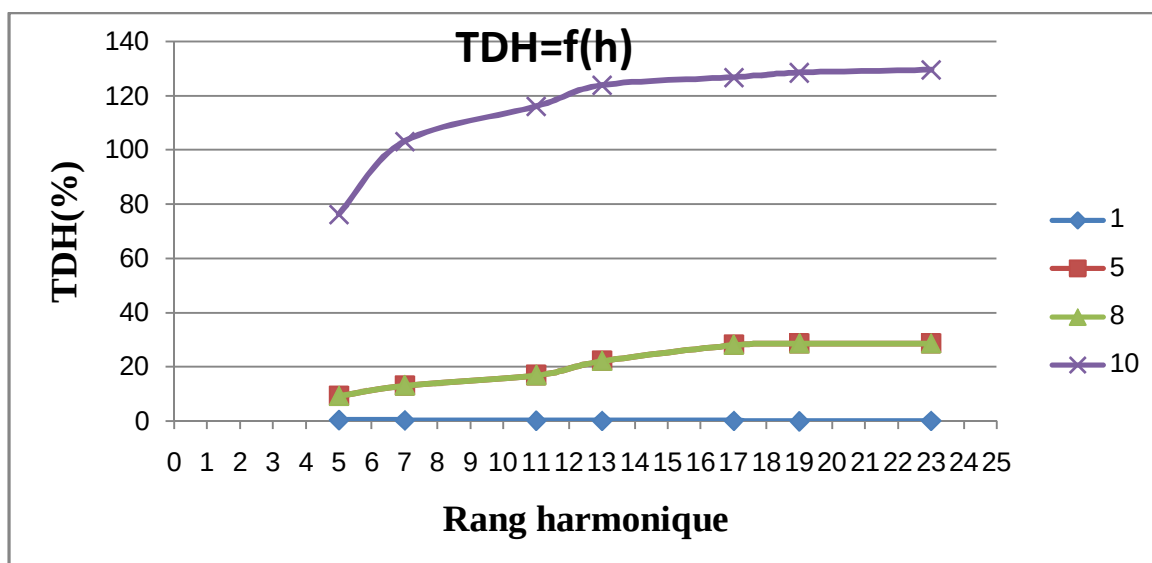


Figure (III.9.b) : Evolution des taux de distorsion harmonique en tension en fonction du rang harmonique h pour les jeux de barres 1, 5, 8 et 10

Discussion des résultats

- § On remarque, par l'analyse des figures ci-dessus, que plus le jeu de barres est proche de la source polluante, le TDH_v est d'autant plus élevé. On remarquera cela pour le jeu de barres 10, pour $X=3.2.10^{-5}H$ où le TDH_v est important (pour $h=7$, $TDH_v=24.61\%$). Par contre, au jeu de barres 5, qui est relativement éloigné de la source polluante, le $TDH_v=18.87\%$.
- § L'analyse des taux de distorsion harmonique en tension (TDH_v) en fonction du rang harmonique h , pour le jeu de barres 1, montre que les valeurs de TDH_v sont faibles (pour $X=3.2.10^{-5}H$, pour $h=5$, $TDH_v=0.41\%$, $h=11$ $TDH_v=0.19\%$, $h=23$ $TDH_v=0.11\%$,...) à cause de l'éloignement de ce jeu de barres de la source polluante.
- Quant aux autres jeux de barres, l'évolution du rang harmonique conduit à une augmentation considérable du taux de distorsion harmonique en tension jusqu'au 17^{ème} rang harmonique, comme le montre la figure (III.9.b), puis commence à se stabiliser. Ceci est dû à l'effet de foisonnement.
- § On remarque que pour différentes longueurs du câble reliant le jeu de barres principal et la charge polluante, les taux de distorsion harmonique en tension pour le jeu de barres 1 sont faibles, la longueur reliant la charge polluante au réseau, n'a donc, pas d'effet sur la forme de la tension de la source.
- Par contre, on remarque, pour les jeux de barres 5 et 8, une diminution considérable du TDH_v , pour des valeurs de la réactance en aval, élevées. Par exemple, pour le jeu de barres 5, pour $X=0$ et pour $h=13$, $TDH_v=32.51\%$, pour $X=3.2.10^{-2}H$ et pour $h=13$, $TDH_v=22.17\%$. Ce qui n'est pas le cas pour le jeu de barres 10 où le TDH_v est considérablement élevé, en augmentant la réactance en amont de ce jeu de barres (pour $X=0$ et pour $h=13$, $TDH_v=34.26\%$, pour $X=3.2.10^{-2}H$ et pour $h=13$, $TDH_v=123.97\%$). Ce qui explique le fait qu'en fonction de la distance, le même pollueur, à la même puissance, n'induit pas le même TDH de la tension. [10]

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence l'influence de la réactance du câble reliant la charge polluante au jeu de barres principal, en utilisant MATLAB/Simulink.

Les résultats de l'étude, par simulation du comportement du réseau étudié, pour différentes valeurs de la réactance du câble, montrent qu'il est déconseillé de connecter une charge sensible à proximité d'une charge polluante.

On constate, aussi, que des valeurs élevées de la réactance en aval de la charge non polluante connectée au jeu de barres principal, nous donnent de faibles TDH_v , contrairement à des valeurs élevées de la réactance en amont de la charge non polluante connecté à proximité de la charge polluante qui nous donnent d'importantes valeurs de TDH_v .

Conclusion générale

Le travail effectué dans ce mémoire a comme objectif d'évaluer la distorsion harmonique dans un réseau à 13 jeux de barres en faisant varier la réactance du câble reliant la charge polluante au jeu de barres principal.

Dans un premier lieu nous avons mis en évidence, d'une manière générale, les principales causes de cette perturbation, et identifié certains facteurs qui permettent d'agir sur celle-ci, afin d'améliorer le courant absorbé par les équipements.

En second lieu, nous avons étudié l'éloignement de la charge polluante en utilisant MATLAB/Simulink qui nous a permis de déterminer les taux de distorsion harmonique de la tension au niveau des jeux de barres.

Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de la réactance du câble reliant la charge polluante au réseau amont, conduit à une diminution du taux de distorsion harmonique en tension TDH_v . Par contre, pour les charges qui sont connectées au même jeu de barres que le pollueur, le TDH_v augmente. C'est pour cela qu'il faut séparer les charges linéaires des non-linéaires.

La charge polluante n'a pas d'effet sur la source car l'impédance de cette dernière est faible et sa puissance de court-circuit est élevée.

Ainsi, nous pouvons constater que le phénomène harmonique est lié à la puissance, à la localisation des charges perturbatrices et à la puissance de court-circuit du réseau.

[1] Cahiers techniques Schneider Electrique

N° 152 : « Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement ».

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

Harmoniques et transformateurs.

Les filtres anti-harmoniques.

[2] Steeve Beaulieu

« Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique ». Université du Québec à Chicoutimi, 2007.

[3] K.Amarouche, K.Agouazi, F.Touchrift

« Analyse harmonique et évaluation de l'impédance harmonique d'un réseau de distribution industriel équilibré ». Mémoire d'Ingénieur, UMMTO, 2010.

[4] Mohamed Alaa Eddin Alali

« Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension ». Université Louis Pasteur –Strasbourg I, 2002.

[5] A. Boulahia

« Etude des convertisseurs statiques destinés à la qualité de l'énergie électrique ». Mémoire de Magister. Université de Constantine.

[6] Serge Rolland

« Analyse harmonique sur réseau EDF ».

[7] Test Systems for Harmonics Modeling and Simulation

Task Force on Harmonics Modeling and Simulation

Transmission & Distribution Committee

IEEE power Engineering Society

[8] E.FELICE

« Perturbation harmonique, effets, origines, mesures, diagnostic, remèdes ». DUNOD, Paris, 2000.

[9] T.DEFLANDRE, P.MAURAS

« Les harmoniques sur les réseaux électriques ». Direction des études et des recherches d'EDF. Edition EYROLLES, Paris, 1998.

[10] MICHEL GUILLET, JEAN-CLAUDE GUIGNARD, JEAN-SCHUBENEL

« Comprendre les harmoniques et leurs effets », la revue 3 E.I, N° 49, juin 2007

[11] M.Hakim, A.Yahia, M.Bessadi

« Pollution harmonique due aux redresseurs triphasés et la stratégie de dépollution ». Mémoire d'ingénieur, UMMTO

[12] D.OLIVER

« La simulation des perturbations harmoniques ». Direction des études et des recherches de l'EDF, série BN° 1991.

[13] M. FERHI, S. MANSOURI

« Etude expérimentale des perturbations harmoniques générées par des redresseurs : Application à un laboratoire d'électronique de puissance ». Mémoire d'Ingénieur de l'UMMTO, Juillet 2006.

[14] S.Chellah, N.Yassa

« Analyse de la propagation harmonique dans un réseau électrique ». Mémoire d'ingénieur, UMMTO, 2005.

[15] N.Amich, L.LAouisset

« Caractéristique des lampes fluocompactes en terme de perturbations harmoniques générées ». Mémoire d'ingénieur, UMMTO, 2007.

[16] C. Moussa, S. Makhoulf

« Filtrage des harmoniques dans une liaison AC/DC mono terminale ». Mémoire d'ingénieur, UMMTO, 2010.