REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGUARRA
BOUMERDES
FACULTE DES HYDROCARBURES ET DE LA CHIMIE

LABORATOIRE DE RECHERCHE SUR L'ELECTRIFICATION DES ENTREPRISES INDUSTRIELLES
(LREEI)

MEMOIRE

Présenté par :

KIFOUCHE REZKI

EN VUE D'OBTENTION DU TITRE DE

MAGISTER EN GENIE ELECTRIQUE

OPTION : équipements électriques industriels

THEME

IDENTIFICATION DES HARMONIQUES ET GENERATION DU COURANT DE REFERENCE "application au convertisseur statique"

Membres de jury :

Mr E. Berkouk	Pr ENP Alger	Président
Mr I. Habi	CC Université de Boumerdes	Rapporteur
Mr A Benfdila	Pr Université de Tizi Ouzou	Examinateur
Mr R Azouaou	CC Université de Tizi Ouzou	Examinateur
Mr D. Ouahdi	MC Université de Boumerdes	Examinateur
Melle B. Nadji	CC Université de Boumerdes	Examinateur

Boumerdes 2005

Dédicaces

Je dédie ce travail à toute ma famille et en particulier à
ma sœur Drifa plus curieuse entre tous.

Je le dédie aussi à tous les amis, les proches
et tous ceux qui m'ont soutenu durant toute
la durée de préparation de ce Magister.

Remerciements :

Je teins à remercier tous ceux qui ont contribué, de prés ou de loin à l'élaboration de ce travail.
Mes remerciements vont en particulier à Mr Habi Idir mon encadreur, Mr Azouaou Rabah pour son soutien et à tous les enseignants du département automatisation et électrification des procédés industriels de la faculté des hydrocarbures et de la chimie de l'université de Boumerdes.
Sans oublier tous les amis qui m'ont encouragé et accompagné pour mener ce travail à terme.

Résumé :

Les récents développements apparus dans plusieurs domaines de l'utilisation de l'énergie électrique surtout chez ceux qui font usage des appareils de l'électronique de puissance ont causé l'apparition des harmoniques dans le réseau de transport et de distribution de l'énergie électrique ce qui induit la détérioration de la qualité de l'onde de la tension fournie ayant ainsi des effets néfastes sur les charges sensibles alimentées par ce même réseau.

Puisque la présence de ces harmoniques est due à l'utilisation croissante de ces appareils pollueurs, leur traitement donc revient à exiger des consommateurs pollueurs de réduire à des valeurs acceptables selon la réglementation en vigueur les taux des harmoniques qu'ils injectent dans le réseau.

Parmi les nombreuses solutions adoptées pour lutter contre la prolifération de ces harmoniques on peut citer : le filtrage passif et le filtrage actif. Le recours au filtrage actif s'est avéré le plus efficace et le plus approprié.

Dans ce travail nous avons abordé le principe de fonctionnement des filtres actifs parallèles, comme nous avons détaillé la méthode des puissances instantanées pour l'identification du courant de référence pour le filtre actif parallèle. Cette méthode nous permet d'opter pour la compensation de toutes les perturbations en courant, les courants harmoniques, le courant réactif et même les courants de déséquilibre, ce qui permet au réseau de ne fournir qu'un courant électrique propre une fois toutes les perturbations compensées.

Pour cela nous avons élaboré un programme (sous langage Delphi) permettant d'identifier les courants harmoniques. Nous l'avons ensuite appliqué à un convertisseur statique alimentant un moteur (redresseur débitant sur un moteur à courant continu) dont les perturbations peuvent être calculées. Ce qui nous a permis de les comparer aux valeurs obtenues expérimentalement et de valider ainsi la méthode utilisée et le programme conçus à cet effet.

The abstract:

The recent developments appeared in several fields of application of the electric power, especially at those which use the power electronics equipment, cause the appearance of harmonics in the electric power network which induces deterioration of qualities of the voltage wave.

Since the presence of these harmonics is due to the increasing use of pollutants equipment, their treatment require to consumers to reduce to acceptable values the harmonics which they inject into the network.

Among the many solutions adopted to fight against the proliferation of these harmonics like: passive filter and active filter.

In this thesis we have to approach the principle of operation of the parallel active filters, as we detailed the method of the instantaneous powers for identification of the current of reference for the parallel active filter. This method enables us to choose the compensation of all the disturbances while running that it is the harmonic currents or the reactive current and even the current unbalanced, which makes it possible the network to provide only the clean electrical current once all the disturbances is compensated.

In the experimental part, we carried out a data acquisition which consists in measuring the sizes of the tension and the current at the boundaries of a nonlinear load to treat them numerically in seen identification of the harmonics and the generation of the current of reference. We wrote the program under the programming language Delphi. It enables us to carry out calculations necessary and to display the results graphically.

ملخص

إن التطورات الأخيرة التي ظهرت في عدة ميادين استعمال الطاقة الكهربائية و خاصة منها تلك التي تخص إلكترونيك الاستطاعة (القدرة) أدت إلى ظهور و تضاعف تواجد التوافقيات في شبكة نقل وتوزيع الطاقة الكهربائية التي تؤدي إلي ندهور نوعية موجة فرق الكمون التي قد تسببت في إفساد وتعطيل الأجهزة لهده الطاقة.

فبمأن معظم هده التوفقيات مصدرها يكمن في الاستعمال المتزايد لتلك الأجهزة الملوثة، فأن مكافحتها يعود إلي إرغام مستعملي هده الأجهزة الملوثة إلي اتخاذ احراءات لتخفيض وتقليص نسبة التوافقيات اللواتي يصدرونها في الشبكة إلي ما حيث هو مقبول.

اتخاذ الاحراءات الفعالة لمكافحة هده التوافقيات يعود إلي معرفتها و إبرازها بدقة.

هناك عدة طرق تستعمل حاليا من اجل تخليص الشبكة الكهربائية من هده التوافقيات فمن بين هده الطرق نجد استعمال المصفاة الغير فعالة و المصفاة الفعالة حيث تعتبر هده الأخيرة الأفعل و الأنجع.

قمنا في دراستنا هده بشرح طريقة عمل المصفاة الفعالة المتوازية التي تعتبر الأمثل لتعويض التيارات الكهربائية التوافقية و كما قمنا كدالك بتفصيل طريقة إبراز التيارات المرجعية لهده المصفاة الفعالة حيث اخترنا طريقة الاستطاعات الآنية التي بفضلها نستطيع سرد تيارات مرجعية من اجلها نستطيع تعويض التيار الكهربائي التوافقي سوءا وحده أو مع التيار الردى كما نستطيع أيضا تعويض التيارات الكهربائية الغير متوازنة وبدالك تقتصر شبكة التوزيع بتزويد المستهلك بتيار كهربائي نظيف.

قمنا باستعمال منهج البرمجة في الأعلام الآلي ديلفي بصياغة برنامج يسمح لنا بعد أخد معلومات عن قيم شدة التيار المستهلك و التوتر بين قطبي المستهلك بإبراز قيم التوافقيات المولدة من طرف المستهلك الملوث و بالتالي سرد التيار المرجعي اللازم من اجل تعويضها.

SOMMMAIRE

Sommaire

Introduction générale : ……..…….. ……..01
Chapitre I : Généralités sur la pollution harmonique : …….. ……...03
I.1 Introduction : ……..……... …03
I.2 Généralités sur la pollution harmonique : ……... ……04
I.2.1 Définition de l'harmonique : ……..…….…….. …04
I.2.2 Harmonique de Courant et de tension : ……...…….….04
I.2.3 Le taux Individuel de distorsion : ……..06
I.2.4 Le taux Global de distorsion : ……..…….…….06
I.2.5 Propagation des harmoniques : …….…….……..……..07
I.2.6 Les résonances : ……...……..……..……..07
I.2.7 Effets des harmoniques : ……..……..08
I.3 traitements des harmoniques : ……..…...……09
I.3.1 Traitements traditionnels des harmoniques : ……..…….……10
I.3.1.1 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique : …….……10
I.3.1.2 Filtrage passif : ..…….. …… ...…10
I.3.2 La compensation active des harmoniques : ……..……...…11
I.3.2.1 Les filtres actifs parallèles : ……...…….…….11
I.3.2.2 Les filtres actifs séries : …….…….….11
I.3.2.3 Les filtres actifs mixtes (série et parallèle) : ……...……..…12
I.3.2.4 Les filtres hybrides actifs et passifs : …….……..……12
I.4 Les engagements respectifs du consommateur et du fournisseur de l'énergie : ……....…12
I.4.1 Perturbations harmoniques générées par les installations sur le Réseau : ...…...…...…..13
I.4.2 Perturbations venant du Réseau de Distribution : ……...…13
I.5 Conclusion : ……. ……...…..15
Chapitre II : Le filtrage passif et Actif des harmoniques : ……16
II.1 Introduction : ……16
II.2 Le filtrage passif : ……16
II.2.1 Types des filtres passifs : ……16
II.2.1.1 Les filtres barrages : ……..……...……...…….……16
II.2.1.2 Les filtres résonants : ……...……...……18
II.2.1.3 Les filtres amortis : ……..……...……20

II.3 Le filtrage actif : ……21
II.3.1 Principe des filtres actifs : ……..……21
II.3.2. Types de filtres actifs : ……..……22
II.3.2.1 Filtres actifs parallèles : ……...……22
II.3.2.2 Filtres actifs séries : ……..……...……25
II.3.2.3 Les Filtres actifs combinés Parallèle-Série : ……..……...……27
II.4 Le filtrage hybride : ……...……29
II.4.1 Principe des filtres hybrides : ……..……...……..……29
II.4.2 Filtre actif en série avec filtre passif en parallèle : ……29
II.4.3 Filtre actif avec filtre passif en parallèle avec la charge : ……..……30
II.5 Conclusion : ……...……30
Chapitre III : Filtre actif parallèle et identification du courant de référence : ...…….32
III.1 Introduction : ……32
III.2 Le Filtre actif parallèle : ……...……32
III.2.1 Principe de compensation active : ……32
III.2.2 Onduleur de tension MLI : ……33
III.2.2.1 Principe des onduleurs MLI : ……33
III.2.2.2 Régulation du courant de l'onduleur : ……35
III.3 La méthode d'identification des courants de références : ……36
III.3.1 Choix de la méthode : ……..36
III.3.2 La méthode des puissances instantanées : ……37
III.3.3 Algorithme d'identification : ……...……41
III.4 Exemple de simulation : ……...……42
III.4.1 Description du système à simuler : ……..……..42
III.4.2 Résultats de simulation : ……...……44
III.4.3 Interprétation des résultats de simulation : ...……47
III.5 Calcul de la puissance du filtre actif parallèle : ……...……48
III.6 Conclusion : ……50
Chapitre IV : Partie expérimentale : ……..…….……51
IV.1 Introduction :……51
IV.2 Structure d'une chaîne d'acquisition de données : ……51
IV.3 Performances globale : ……53
IV.3.1 Fréquence de fonctionnement : ……53
IV.3.2 Résolution de la chaîne : ……...……54

IV.4 Acquisition de plusieurs grandeurs : ……54
IV.5 Analyse spectrale : ……..……56
IV.5.1 La formule de Fourier : ……56
IV.5.2 Signal discret : ……57
IV.5.3 Fenêtrage : ……58
IV.5.4 Influence du fenêtrage : ……58
IV.5.5 Les fréquences discrètes : ……59
IV.5.6 Relations temps-fréquence : ……..59
IV.5.7 Calcul des coefficients de Fourier : ……..60
IV.6 Partie Software : ……..……..…….61
IV.6.1 Programme d'acquisition de données : ……..……...…61
IV.6.1.1 Structure fondamentale d'un programme avec DLL driver : ...……...…61
IV.6.1.2 Organigramme de plusieurs lectures d'un seul canal : ...……62
IV.6.1.3 Organigramme de plusieurs lectures de plusieurs canaux : ...……62
IV.6.2 Calibrage de la chaîne d'acquisition : ……....…….63
IV.6.3 Organigramme de génération du courant de référence : ……..63
IV.7 Utilisation du programme : ……....……65
IV.7.1 Résultats expérimentaux : ……...…….66
IV.7.2 Interprétation des résultats : ……...…..…….70
IV.8 conclusion : ……...……...…….71
Conclusion Générale : …..……...…….……..72
Bibliographie : ……74
Anexe I : ……..…….……..77
Annexe II : ……...…78
Annexe III : ……..…83

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE :

La qualité du produit électricité peut se définir par l'ensemble des propriétés et caractéristiques qui lui afférent l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés. Cette qualité peut être mesurée et quantifiée moyennant l'installation d'équipements peu coûteux au point de livraison de l'énergie électrique. En vue de minimiser le manque à gagner, conséquence directe des effets de la mauvaise qualité de l'énergie qui circule à travers le réseau, deux attitudes de part du consommateur et du fournisseur ont vu le jour. Le consommateur exige au fournisseur de lui fournir un produit de meilleure qualité. De son coté le Fournisseur impose des restrictions aux consommateurs, surtout pollueurs, en matière de l'énergie réinjecté dans le réseau [16].

Les imperfections de l'électricité nuisant à la qualité de l'énergie dans le réseau électrique de distribution sont de deux types. Premièrement, les défaillances dans la continuité du service, qui sont des phénomènes aléatoires. Deuxièmement, les imperfections dans la qualité de l'énergie disponible sur le réseau, Il s'agit là de phénomènes plus ou moins permanents regroupant l'ensemble des imperfections de la forme d'onde et des paramètres du signal électrique.

Ces imperfections sont plus liées à la nature des charges raccordées sur le réseau et à la structure même du réseau. Elles constituent un facteur de qualité important pour les usages industriels et électroniques qui s'appuient de plus en plus sur la forme d'onde dans l'utilisation de l'énergie électrique. Ce qui rend impératif le fait de chercher à déterminer les perturbations qui risquent d'être créés par la mise en ligne d'une charge polluante, pour prévoir des solutions à adopter en conséquence. L'importance accordée à la qualité de l'énergie fournie a considérablement augmenté ces dernières années et constitue un enjeu majeur de la distribution [9].

Il existe plusieurs solutions de dépollution des réseaux électriques. Celles qui répondent le mieux aux contraintes industrielles d'aujourd'hui sont les compensateurs actifs parallèles, série et leurs combinaisons. Le compensateur actif parallèle peut être utilisé pour compenser les courants harmoniques et déséquilibrés ainsi que la puissance réactive. Le compensateur série peut compenser à la fois les tensions harmoniques, déséquilibrées et les creux de tension [2].

On a abordé ce travail en présentant des généralités sur les harmoniques, leurs origines et leurs effets, puis les différentes solutions proposées. Le choix de la compensation active des harmoniques en utilisant un filtre actif parallèle s'impose. On a développé une méthode pour générer le courant de référence pour le filtre actif parallèle.

On a effectué des essais au sein du laboratoire pour identifier les harmoniques générées par un convertisseur statique débitant sur une charge RL et le courant de référence nécessaire à leur compensation avec un filtre actif parallèle. Pour cela on a monté un système d'acquisition de données pour lire les grandeurs instantanées du courant et de la tension à l'entrée de la charge, et on a élaboré un programme sous Delphi pour effectuer leur traitement numérique dans l'objectif de générer le courant de référence et identifier les harmoniques générées par le convertisseur statique pour pouvoir les visualiser graphiquement.
A la compensation des harmoniques en peut ajouter la compensation de l'énergie réactive et cela grâce au pouvoir d'adaptation et de commandabilité que présente les filtres actifs parallèles.

Progressivement, et de manière à endiguer l'augmentation des problèmes de perturbation sur les réseaux électriques, des normes de qualité électrique de plus en plus contraignantes seront imposées aux fournisseurs et aux consommateurs industriels. Face à ces nouvelles réglementations mais aussi face à la demande de plus en plus spécifique des utilisateurs d'énergie électrique, les compensateurs actifs doivent s'adapter quitte à rendre plus complexes leurs structures et leurs méthodes de régulation. D'autant plus que ces solutions doivent se soumettre aux limites physiques et technologiques inhérentes aux dispositifs de filtrage actif.

CHAPITRE I :

GENERALITES SUR LA POLLUTION HARMONIQUE

I Généralités sur la pollution harmonique :

I.1 Introduction :

L'objectif du distributeur de l'énergie électrique est de fournir à ces clients une électricité de bonne qualité c'est à dire une onde de tension sinusoïdale, d'amplitude et de fréquence constante. En pratique, le transport et l'usage qui en est fait par différents utilisateurs provoquent la déformation de la sinusoïde. Cette déformation ou distorsion de l'onde est appelée : perturbation harmonique. C'est ce qui fait que la forme des ondes du courant et de tension relevée sur le réseau s'éloigne assez souvent de la sinusoïde idéale.

Les perturbations harmoniques sont dues pour une large part au développement de nouveaux usages qui se répondent tant dans l'industrie que dans les ménages.

Ces perturbations qui augmentent au fil des années risquent d'être gênantes à terme. Elles provoquent des dysfonctionnements d'appareils sensibles, des claquages de condensateurs, de disjoncteurs, il est donc important de prévoir cette évolution dans le temps.

La distorsion harmonique sur le réseau dépend donc de l'importance de la puissance totale des charges non linéaires qui y sont raccordées, par rapport à celle de l'ensemble des charges alimentées par le réseau. Quant l'impédance du réseau est très faible par rapport à celle des charges non linéaires qu'il alimente, on peut considérer ces dernières comme une source idéale de courants harmoniques [28].

La cause principale de l'existence des harmoniques de tension est la consommation des courants non sinusoïdaux par les charges non linéaires qui provoquent une chute de tension non sinusoïdale en circulant à travers l'impédance du réseau [2, 5, 9, 22, 23].

Ces charges et équipements non linéaires se divisent en trois parties qui sont :

- Notre réseau lui-même tel que les transformateurs et alternateurs qui se saturent.
- Les équipements de la clientèle tel que l'ensemble des appareils électroménagers et les nouvelles applications de l'électricité utilisant en majorité des dispositifs électroniques qui contribuent à l'augmentation de la pollution harmonique.
- Les équipements de grande puissance installée dans des usines à des niveaux de tension plus élevés

Les convertisseurs de puissance et les appareillages à arc sont actuellement les véritables causes de la distorsion harmonique [16].

I.2 Généralités sur la pollution harmonique :

I.2.1 Définition de l'harmonique :

Une harmonique peut être défini comme étant une composante sinusoïdale d'une onde périodique ou d'une quantité possédant une fréquence qui est multiple entier de la fréquence fondamentale. Mais on peut observer des sous-harmoniques ou des inter-harmoniques à des fréquences non multiples entières de la fréquence fondamentale [9].

Toute fonction périodique peut être représentée par une série de Fourrier de la forme :

$$y(t) = Y_0 + \sum_{h=1}^{\infty} Yh.\sqrt{2}.\sin(h\omega t - \varphi_h) \quad \text{……..…..I-1}$$

Yh = la valeur efficace de la composante de rang h.

φh= phase de la composante h lorsque t = 0.

Y_0 = amplitude de la composante continue, généralement nulle.

I.2.2 Harmonique de Courant et de tension :

Les harmoniques présentes sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation de charges non linéaires. Quand elles sont connectées au réseau d'une certaine fréquence, elles absorbent un courant pas sinusoïdal mais de même fréquence.

Ces charges se comportent comme des sources de courant harmonique, c'est à dire que le courant est fixé par la charge et non par la tension du réseau. Ces courants provoquent, dans le réseau, des chutes de tensions harmoniques selon la loi d'Ohm :

$$\overrightarrow{V_h} = \overline{Z}_h \overrightarrow{I_h} \quad \text{……..….I-2}$$

V_h : Tension harmonique de rang h ;

Z_h : Impédances harmoniques de rang h ;

I_h : Courant harmonique de rang h.

Soit par exemple la figure suivante représentant la forme de l'onde d'un courant pollué avec en même temps l'image des différents courants harmoniques le constituant qu'on peut exprimer grâce à une représentation en série de Fourrier du courant global :

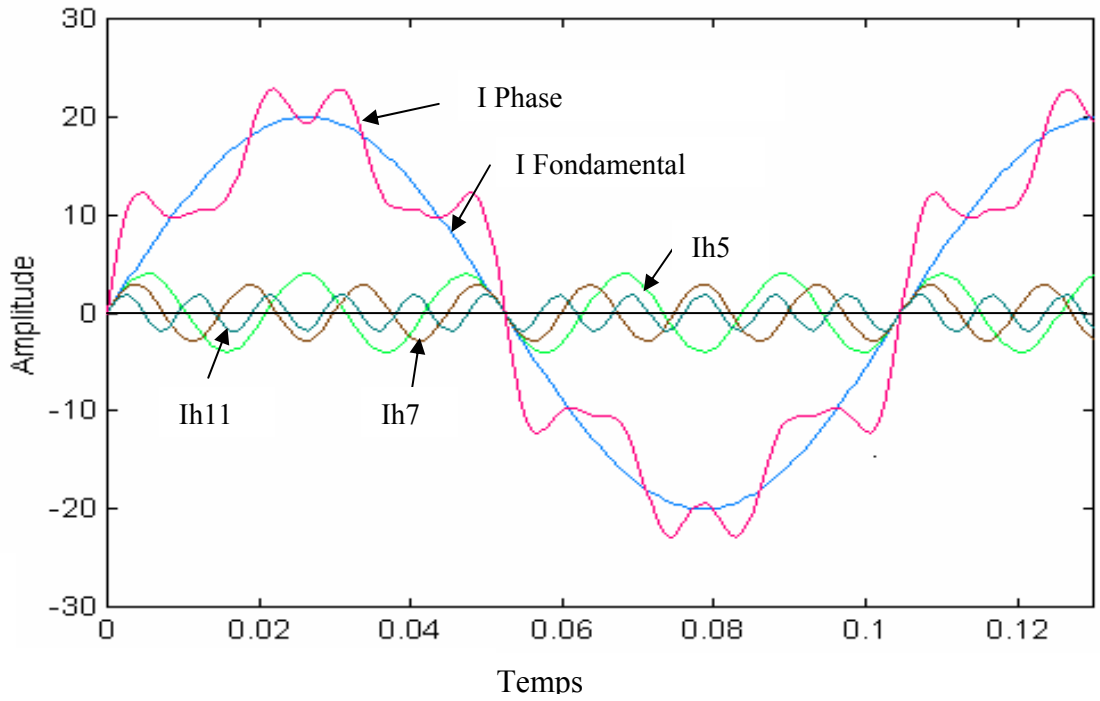


Fig.I.1 La représentation de la forme de l'onde d'un courant déformé avec les différents courants harmoniques le constituant

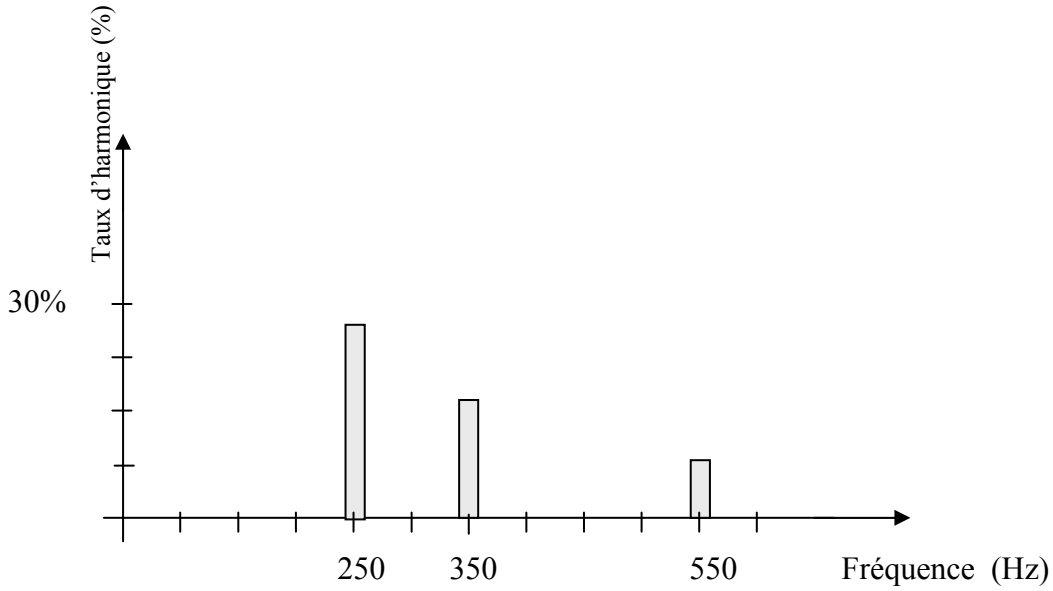


Fig.I.2 Représentation spectrale des harmoniques

I.2.3 Le taux Individuel de distorsion :

Mesure l'importance de chaque rang par rapport au fondamental.

$$D\,(\%) = \frac{Y_h}{Y_1}.100 \quad \text{.....I-3}$$

I.2.4 Le taux Global de distorsion :

Le taux global de distorsion en courant ou THDI (Total Harmonic Distorsion - I pour courant), mesure l'importance des harmoniques de tous les rangs par rapport au fondamental.

$$T\mathrm{HD}\,(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{2}^{\infty} Y_h^2}}{\mathrm{Y}_1} \quad \text{.....I.-4}$$

Il faut préciser s'il s'agit d'un THD de courant : $THDI$ ou de tension : $THDV$. Contrairement au niveau de courant, le niveau de tension est une valeur fixe et prédéfinie pour un réseau. On définie donc les contraintes en terme de $THDV$.

Le fait d'exprimer l'amplitude de chaque harmonique en valeur efficace permet de quantifier l'effet thermique de l'ensemble.

En effet, supposons que ce courant i(t) traverse une résistance R, la puissance dissipée par effet Joule est :

$$Pj = R.I^2 = R.I_1^2 + R.I_5^2 + R.I_7^2 + R.I_{11}^2 + ... \quad \text{…I-5}$$

Ce qui permet de calculer :

$$Itrms = \sqrt{\sum_{1}^{\infty} I_h^2} \quad \text{.....I-6}$$

I.2.5 Propagation des harmoniques :

La susceptibilité de la plupart des équipements à la distorsion harmonique dépend de la tension harmonique à ses bornes. Cette tension est obtenue par le produit du courant harmonique et de l'impédance harmonique du réseau à la fréquence du courant injecté (rang h).

$$Vh = Zh.Ih \quad \text{.....I-7}$$

De ce fait, la tension harmonique peut atteindre un niveau élevé si le courant harmonique rencontre à une fréquence donnée une impédance élevée ou un niveau faible dans le cas contraire [28].

Les ouvrages qui composent les réseaux de distribution (lignes, transformateurs) sont très souvent inductifs aux fréquences harmoniques de rang faible (=< 7), comme à la fréquence fondamentale. Le problème de propagation des harmoniques vers l'amont se ramène à l'état d'un simple diviseur de courant. La charge non linéaire génératrice d'harmoniques apparaît comme une source de courant, celui-ci se répartit entre les charges voisines et les lignes conduisant au poste source.

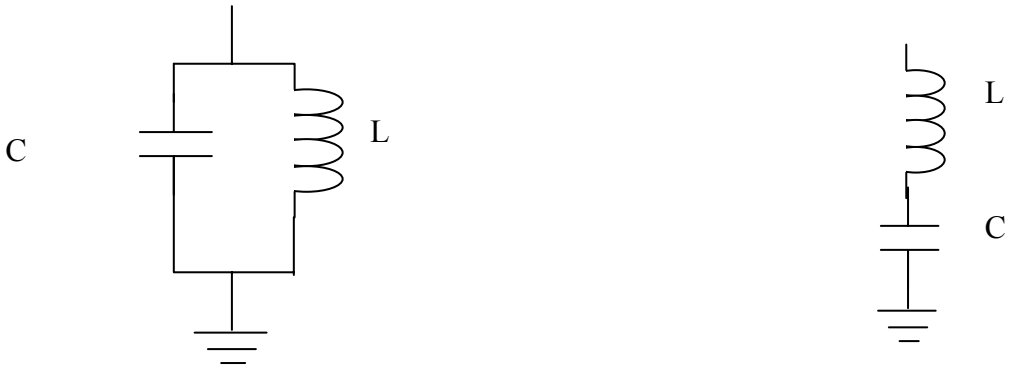
Sur les réseaux de transport, l'étude de la propagation des harmoniques est plus complexe, car les lignes ne sont plus inductives. De plus elles sont disposées selon une structure maillée.

Généralement, les tensions s'atténuent lorsque l'on remonte vers les niveaux de tensions élevées et s'atténuent très peu dans l'autre sens. Dans certains cas cependant, on peut observer localement des amplifications de tensions harmoniques à des fréquences particulières. Ces amplifications sont généralement dues à des résonances entre l'inductance qui représente le réseau et les condensateurs de compensation implantés, soit en réseau, soit chez les clients. Dans ce cas, l'impédance Z_h du réseau mentionné plus haut devient élevée à cette fréquence particulière appelée de résonance [3].

I.2.6 Les résonances :

Sur les réseaux, on rencontre deux types de résonances (résonance parallèle et résonance série). La présence de résonances entraîne des contraintes supplémentaires sur certains matériels, et notamment sur les condensateurs, qui peuvent alors se détériorer rapidement. Certaines précautions doivent donc être prises lors de l'installation de ces

matériels, de manière à ne pas amplifier les courants et les tensions harmoniques présents sur les réseaux [27].



Résonance parallèle Résonance série

Fig.I-3 Différents types de résonance rencontrés sur le réseau

- L'impédance d'une inductance et d'une capacité mises en parallèle est donnée par la fonction suivante :

$$Z_h = \frac{jLW}{1 - LCW^2} \quad \text{.....I-8}$$

La fréquence de résonance est alors donnée par :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{.....I-9}$$

l'impédance prend une valeur infinie, $1 - LCW^2 = 0$.

- L'impédance d'une capacité et d'une inductance montées en série est donnée par :

$$Z_h = \frac{1 - LCW^2}{jCW} \quad \text{..... I-10}$$

lorsque $1 - LCW = 0$, l'impédance prend une valeur nulle. La fréquence de résonance est alors donnée par :

$$f_{r,s} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{.....I-11}$$

I.2.7 Effets des harmoniques :

Les tensions et courants harmoniques superposés à l'onde fondamentale conjuguent leurs effets sur les appareils et équipements utilisés. Les effets les plus connus des harmoniques sont la destruction de condensateurs et de disjoncteurs suite à de fortes intensités dans les réseaux internes [2, 5, 16].

En présence des harmoniques, la valeur efficace résultante est la somme des valeurs efficaces de toutes les harmoniques et la fondamentale qui traversent le circuit. Les appareils dimensionnés pour un courant fondamental donné peuvent être soumis à de sévères contraintes supplémentaires. Alors comme traitement traditionnel de ces harmoniques on sur-dimensionne ou on déclasse les installations.

Donc les courants et les tensions harmoniques ont des effets néfastes sur le fonctionnement, la rentabilité et la durée de vie de certains équipements électriques. Parmi les effets instantanés, on peut citer :

- Perturbations des électroniques des dispositifs de mesure et de protection ;
- Perturbations des lignes de téléphones proches de lignes de puissance ;
- Résonance ;
- Vibrations et bruits ;

En ce qui concerne les effets à long terme :

- Usure mécanique des matériaux due aux vibrations ;
- Echauffement qui réduit la durée de vie des matériels (condensateurs, transformateur, machines tournantes).

I.3 Traitements des harmoniques :

L'élimination des harmoniques a pour but d'éviter ou de limiter la pénétration sur le réseau de courants harmoniques susceptibles de créer à leur tour des tensions harmoniques importantes. Il est néanmoins impossible d'éliminer toutes trace d'harmoniques du réseau. IL

est bien plus économique d'essayer de maintenir les tensions harmoniques en deçà des niveaux de compatibilité [5, 10, 16].

I.3.1 Traitements traditionnels des harmoniques :

I.3.1.1 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique :

On n'élimine pas les courants harmoniques, on ne fait qu'éviter leurs effets néfastes pendant une période limité. Pour les installations nouvelles, on surdimensionne tous les éléments. Dans le cas d'installations existantes, on déclasse les équipements de distribution électrique soumis aux courants harmoniques.

I.3.1.2 Filtrage passif :

Pour atténuer la perturbation harmonique, depuis son origine, les filtres passifs sont traditionnellement employés. Leur principe consiste à dériver le courant harmonique dans une faible impédance placée en parallèle avec la charge polluante pour éviter sa propagation dans le réseau [11, 28].

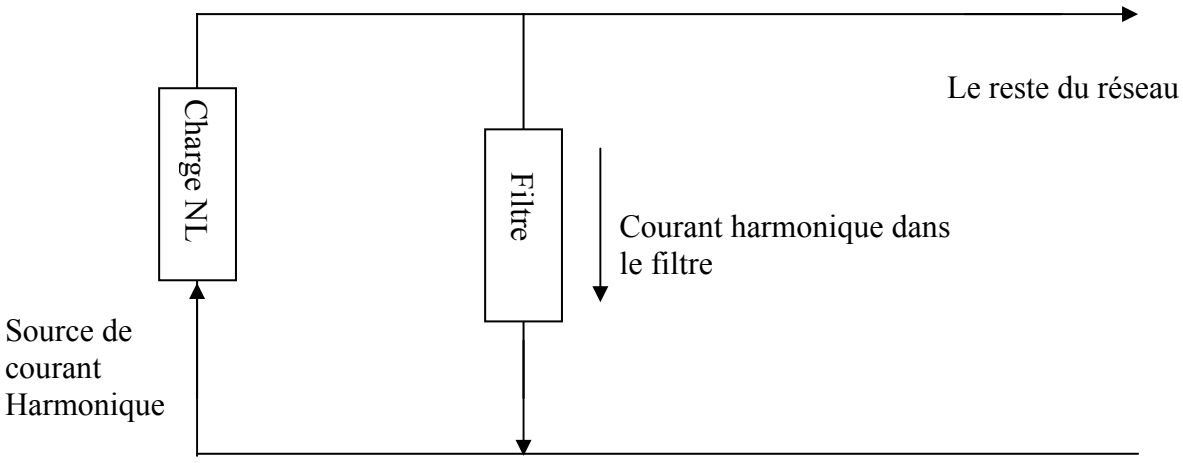


Fig.I-4 Filtrage passif

Les filtres passifs sont des moyens faciles et efficaces si les harmoniques à filtrer sont localisés dans une bande de fréquence étroite et l'impédance harmonique du réseau élevée.
Ce pendant, si ces conditions favorables ne sont pas réunies ces dispositions deviennent plus complexes, onéreux et moins efficaces. Ceci est lié aux aspects suivants :

- Leur incapacité de couvrir une large bande de fréquence, d'où l'utilisation de plusieurs filtres de rang d'accord différents.
- Un changement de la fréquence d'accord même petit, dû aux variations des caractéristiques de leur élément surtout les condensateurs (température, vieillissement.....) peut considérablement affecter leur capacité de filtrage.
- Leur efficacité dépend de l'impédance du réseau, mal connue et susceptible de varier.
- Le caractère inductif de l'impédance du réseau peut provoquer des résonances entre celui-ci et le filtre passif.

I.3.2 La compensation active des harmoniques :

L'apparition des nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT, a permis d'envisager de nouvelles solutions aux perturbations des réseaux notamment la pollution harmonique. Dans certains pays comme le japon, les filtres passifs traditionnellement utilisés pour la compensation des harmoniques sont de plus en plus abandonnés au profit des nouveaux dispositifs appelés filtres actifs de puissance. Jusqu'à présent plusieurs types de filtre actif ont été proposés et étudier, mais peu d'entre eux ont été mis en pratique [2, 5, 7, 19, 29].

I.3.2.1 les filtres actifs parallèles :

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau est le plus souvent contrôlé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants harmoniques égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant coté réseaux sera ainsi sinusoïdal, cependant la tension au point de raccordement ne le sera que si la tension ne contient pas d'harmoniques. Ainsi l'objectif d'un filtre parallèle générateur de courant consiste à empêcher les courants harmoniques absorbés par la charge non linéaire de circuler à travers l'impédance du réseau située en amont du point de connexion du filtre. Le dimensionnement du filtre actif est lié au courant harmonique à générer. La majorité des filtres actifs parallèles actuellement installés sur les réseaux électriques fonctionne selon ce principe.

I.3.2.2 Filtre actif série :

Le filtre actif série se comporte comme une source de tension qui s'oppose à une éventuelle tension harmonique venant de la source et également à celle provoquée par la

circulation du courant harmonique de la charge polluante à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge polluante est purement sinusoïdale, ce qui n'est pas le cas du courant dans le réseau car celui-ci est traversé par la totalité du courant de la charge.

I.3.2.3 Filtre actif mixte (série et parallèle) :

Aucun des filtres actifs (série et parallèle) n'est capable de réaliser seul un filtrage complet donnant une tension sinusoïdale coté charge et un courant côté réseau exempt d'harmonique. Cet objectif peut être réaliser en utilisant un filtre actif mixte composé de deux filtres, l'un connecté en série l'autre en parallèle avec la charge.

Les tensions harmoniques provenant du réseau sont éliminées par le filtre série fonctionnant en générateur de tension tandis que les courants harmoniques absorbés par la charge polluante sont compensés par le filtre actif parallèle, générateur de courant.

Ainsi le curant dans le réseau et la tension aux borne de la charge ne contiennent pas de composantes harmoniques.

I.3.2.4 filtres hybrides actifs et passifs :

Malgré la grande attention portée sur les filtres actifs, leur application industrielle reste limitée à certains pays où les solutions traditionnelles sont inefficaces face à la prolifération des équipements polluants de fortes puissances sur un réseau qui n'est pas assez puissant partout. L'application industrielle de ces nouveaux dispositifs de filtrage est freinée par leur coût.

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs et ainsi augmenter leur potentialité d'application, l'association de filtres actifs de faibles puissances à des filtres passifs semble être une solution prometteuse. Donc on peut trouver plusieurs configuration, en voici quelque une :

- Filtre actif série associée à un filtre passif parallèle ;
- Filtre actif en série avec filtre passif parallèle ;
- Filtre actif parallèle associée à un filtre passif parallèle.

I.4 Les engagements respectifs du consommateur et du fournisseur de l'énergie électrique :

La préservation de la qualité de l'énergie électrique dans le réseau nécessite un effort commun entre le consommateur et le fournisseur. Du côté du fournisseur il est impératif de

fournir une énergie la moins polluée possible. Alors que le consommateur doit s'assurer que ses installations ne contribuent pas à la pollution du réseau. Plusieurs normes ont vu le jour dans le but d'encadrer ses accords et engagements entre les parties concernées.

I.4.1 Perturbations harmoniques générées par les installations sur le Réseau de Distribution :

En plus des Fluctuations rapides de la tension pour qui le niveau de contribution individuelle des installations au papillotement doit être limité à une valeur permettant au Distributeur de respecter la limite admissible, et la contribution au taux de déséquilibre qui doit être inférieur à un certain seuil donné pour toute installation de production ou de consommation prise individuellement, dans chaque Poste de Livraison chacun des courants harmoniques injectés par l'Installation sur le Réseau de Distribution doit être limité à des seuils réglementaires [10].

A chaque Harmonique de rang n est associé un coefficient de limitation kn défini par rapport au fondamental. Le tableau ci-dessous donne la valeur de kn en fonction du rang n de l'Harmonique selon le contrat Emeraude [10, 16] :

Rangs impairs	k_n	**Rangs pairs**	k_n
3	4%	2	2%
5 et 7	5%	4	1%
9	2%	>4	0,5%
11 et 13	3%		
>13	2%		

Tableau I.1 : coefficient de limitation en courant en fonction du rang n de l'Harmonique selon contrat Emeraude

I.4.2 Perturbations venant du Réseau de Distribution

L'Installation du Demandeur doit pouvoir supporter les niveaux maximaux de perturbations sur la continuité de la tension, la disponibilité de l'accès et la qualité de la tension venant du Réseau de Distribution, sur lesquels le Distributeur s'engage.

Les facteurs de qualité de l'onde électrique et de disponibilité du Réseau sur lesquels le Distributeur s'engage à respecter les normes sont les suivants :

- Les variations de la fréquence ;
- Les variations de l'amplitude de la tension fournie ;
- Les fluctuations de la tension sous forme de variations lentes ;
- Les fluctuations rapides de la tension, appelés flickers ;
- Les creux de tension ;
- Les coupures brèves ;
- Les coupures longues ;
- Les surtensions provisoires ;
- Les harmoniques ;

Toujours selon le contrat émeraude le tableau suivant donne les seuils des tensions harmoniques admis selon leurs rangs par rapport toujours à la fondamentale.

Les taux de tensions harmoniques sont exprimés en pour cent de la tension de fourniture [10, 16].

Harmoniques impairs				Harmoniques pairs	
Non multiple de 3		multiple de 3			
Rang	Seuil (%)	Rang	Seuil (%)	Rang	Seuil (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15 et 21	0,5	6 à 24	0,5
13	3				
17	2				
19 et 23	1,5				

Tableau I.2 : coefficient de limitation en tension en fonction du rang n de l'Harmonique selon contrat Emeraude

I.5 Conclusion :

Avant tout branchement de tout équipement générant des harmoniques, il est important d'évaluer les tensions harmoniques induites dans le réseau afin de prévoir éventuellement des dispositifs de limitation des harmoniques à installer.

Les perturbations évoquées précédemment sont bien comprises, et découlent directement de la prolifération des charges qui consomment un courant non sinusoïdal, appelées «charges non linéaires». Ce type de charge est utilisé pour assurer la conversion, la variation et la régulation du courant électrique dans les installations industrielles, commerciales et résidentielles.

La perspective d'un retour rapide aux conditions des charges linéaires est illusoire. De récentes études ont démontré que la consommation de courant non linéaire va augmenter de façon très abrupte dans les prochaines années.

La présence de résonance au sein du réseau électrique entraîne un certain nombre de risques vis-à-vis des perturbations harmoniques. On risque de voir apparaître une ou plusieurs résonances gênantes, donc des précautions doivent être prises lors de l'installation de nouveaux équipements (condensateurs par exemple).

Il faut impérativement mettre en œuvre des solutions pour protéger les installations industrielles et désensibiliser le réseau vis-à-vis de la pollution harmonique.

CHAPITRE II :

FILTRAGE PASSIF ET ACTIF DES HARMONIQUES

Chapitre II : Le filtrage passif et Actif des harmoniques :

II.1. Introduction :

Avec l'augmentation ces dernières années du nombre et de la puissance unitaire des charges non linéaires telles que les sources d'alimentations statiques et les entraînements électriques à vitesse variable dans les réseaux électriques, les harmoniques qu'ils génèrent deviennent de plus en plus préoccupantes, tant pour les distributeurs d'énergie que pour les consommateurs vus les effets nocifs et les coûts qu'ils engendrent. En conséquences, il est important que des solutions de dépollution harmoniques soit mises en œuvre.

Parmi les solutions existantes :

- Le filtrage passif qui consiste à installer un circuit L, C série accordé sur la fréquence de la composante à éliminer ;
- Le filtrage actif génère des composantes harmoniques aux même fréquences et en opposition de phase aux perturbations mesurées ;
- Le filtrage hybride combine les solutions passives et actives ;
- L'utilisation d'appareils à absorption sinusoïdale (appareils dits "propres").

Les nouveaux équipements de petite puissance sont soumis à des normes limitant les perturbations harmoniques.

Dans ce chapitre en traitera des trois premières solutions.

II.2 Filtrage passif :

Le filtrage passif est basé sur l'utilisation de circuits électrique RLC (résistance, inductance, capacité) dit filtre passif, dont le principe est de modifier localement l'impédance du réseau, de façon à dériver les courants et à éliminer les tensions harmoniques. On associe des éléments capacitifs et inductifs de manière à obtenir une résonance série accordée à une fréquence choisie. Donc avant le choix des éléments constituant le filtre passif et leur dimensionnement, une connaissance précise des rangs harmoniques qui devront être filtrés et des atténuations requises est nécessaire car plusieurs types de filtres passifs sont utilisés pour différentes dépollutions à réaliser [5, 7, 9].

II.2.1 Types des filtres passifs :

II.2.1.1 Les Filtres barrages :

Appelé aussi Inductance antiharmonique, Cette solution consiste à installer une inductance en série avec les condensateurs de compensation. Ce type de filtre se comporte comme un court circuit à la fréquence d'accord. Il est utilisé pour protéger les condensateurs

de compensation d'une surintensité due aux harmoniques. Il permet de réduire les valeurs de l'impédance harmonique du réseau vu du point d'injection du courant harmonique et donc des tensions harmoniques sur le réseau. Ces filtres présentent des résonances parallèles avec l'inductance du réseau sur le quel ils sont accordés [9].

L'impédance vue du jeu de barres en négligeant l'inductance de la charge devant celle du réseau est donnée par l'expression suivante :

- Avant l'installation de l'inductance antiharmonique :

$$Z_h' = jLw^2 \frac{1 - L_{ah}w^2}{1 - (L + L_{ah})Cw^2} \qquad \text{……..II-1}$$

- Apres l'installation de l'inductance antiharmonique :

$$Z_h = jLw \frac{1}{1 - LCw^2} \qquad \text{……..II-2}$$

La figure suivante montre un filtre barrage monté sur le réseau.

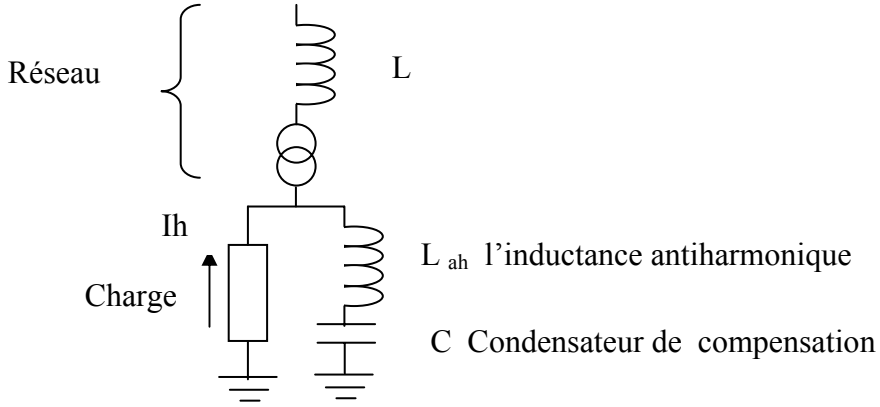


Fig.II.1 Filtre barrage ou L'inductance antiharmonique

La figure suivante montre la variation de l'impédance en fonction de la fréquence sans et avec la présence de l'impédance antiharmonique.

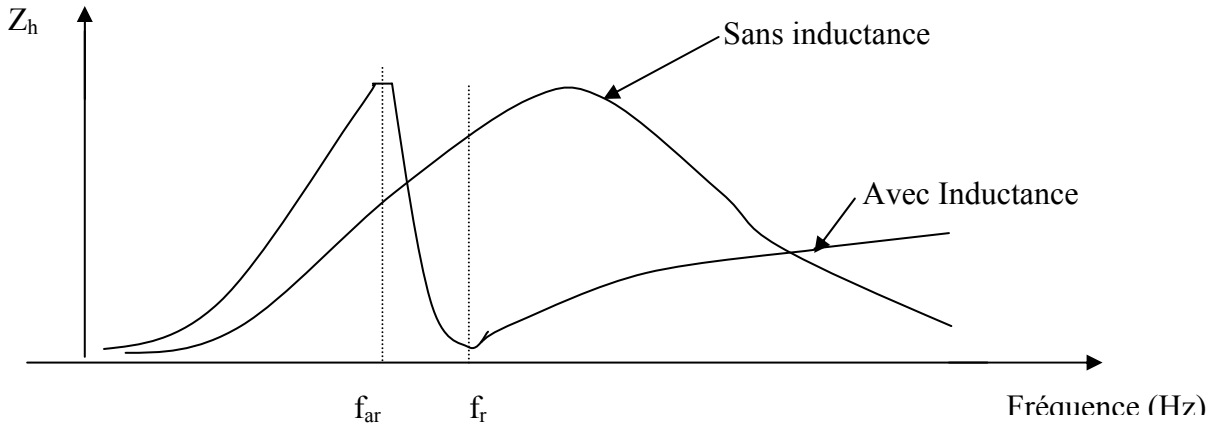


Fig.II.2 L'allure de l'impédance vue du jeu de barres, avec et sans inductance antiharmonique

La fréquence d'accord f_r est donnée par : $$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$ ……..II.3

La fréquence d'antirésonance est donnée par : $$f_{ar} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L+L_{ah})C}}$$ ……II.4

En observant la figure ci-dessus on remarque que si la fréquence d'accord f_r du filtre est inférieure au premier rang harmonique injecté les tensions harmoniques sur le jeu de barres seront réduites et donc si le filtre (l'inductance antiharmonique) est bien dimensionné le condensateur de compensation évitera de subir les grandes tensions harmoniques qui risquent de le détériorer [9].

II.2.1.2 Les Filtres résonants :

Le principe des filtres résonnants et de présenter une impédance très faible au passage d'un courant harmonique d'un rang déterminé. Un filtre passif résonant est un circuit RLC en série, accorder à la fréquence d'une harmonique généralement d'un rang inférieur. On installe très souvent plusieurs filtres résonants en parallèle, correspondant aux différents rangs harmoniques à filtrer.

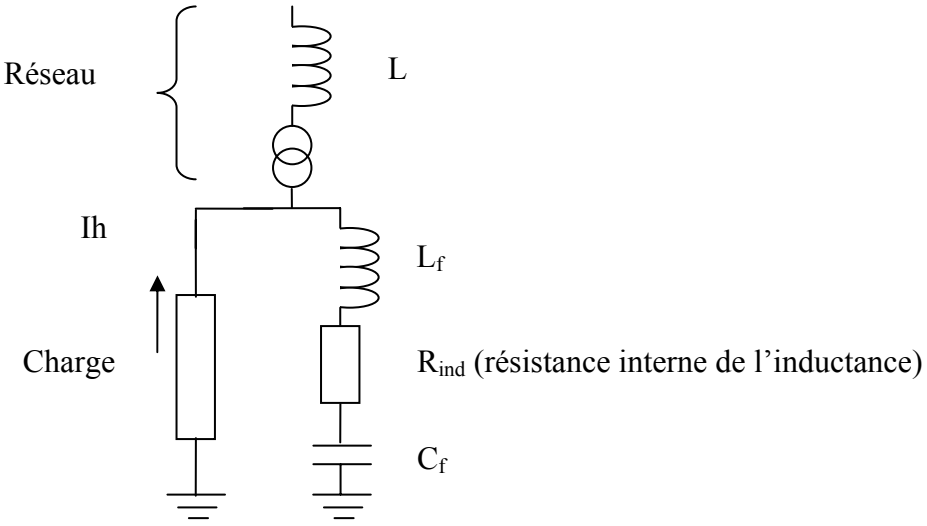


Fig.II.3 Filtre passif résonant

L'installation d'un filtre résonant conduit pour le réseau à une impédance qui prend l'allure représentée dans la figure ci-dessous.

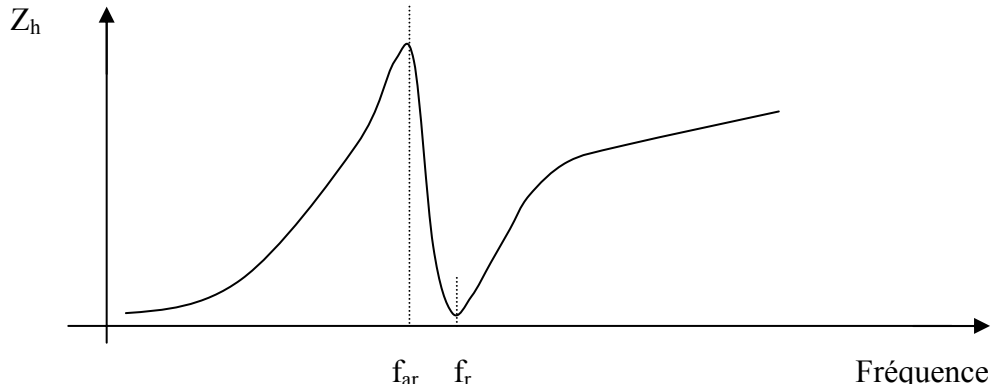


Fig.II.4 L'allure de l'impédance vue du jeu de barres, avec filtre résonant

L'impédance du filtre passif résonant est donnée par l'expression suivante :

$$Z = R_{ind} + \frac{LCw^2 - 1}{Cw} \qquad \text{……II-5}$$

La fréquence de résonance du filtre est donnée par :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad \text{……..II-6}$$

A la fréquence de résonance l'impédance du filtre est réduite à R_{ind} .

Les filtres résonants présentent l'inconvénient d'être sensibles aux variations de l'inductance ou de la capacité ce qui entraîne un désaccord de l'ensemble.

II.2.1.3 Les Filtres amortis :

On utilise les filtres amortis pour filtrer simultanément des harmoniques du rang supérieur, et non une harmonique d'un rang particulier. Il est recommandé lorsque les performances demandées ne sont trop élevées. On l'appelle aussi un filtre passe haut.

Le filtre passif amorti est un circuit RLC constitué par la mise en série d'une capacité avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une résistance dite résistance d'amortissement et d'une inductance.

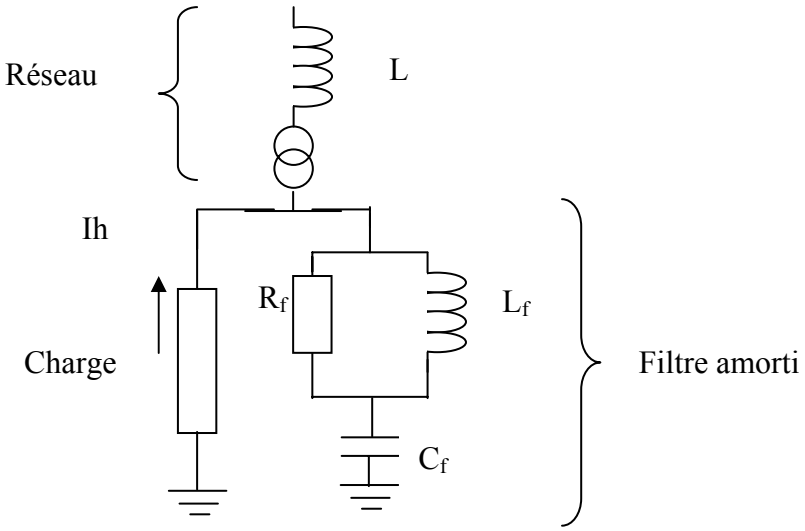


Fig.II.5 Filtre passif amorti

La fréquence d'accord de ce filtre amorti est donnée par l'expression suivante :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C}} \qquad \text{.....II-7}$$

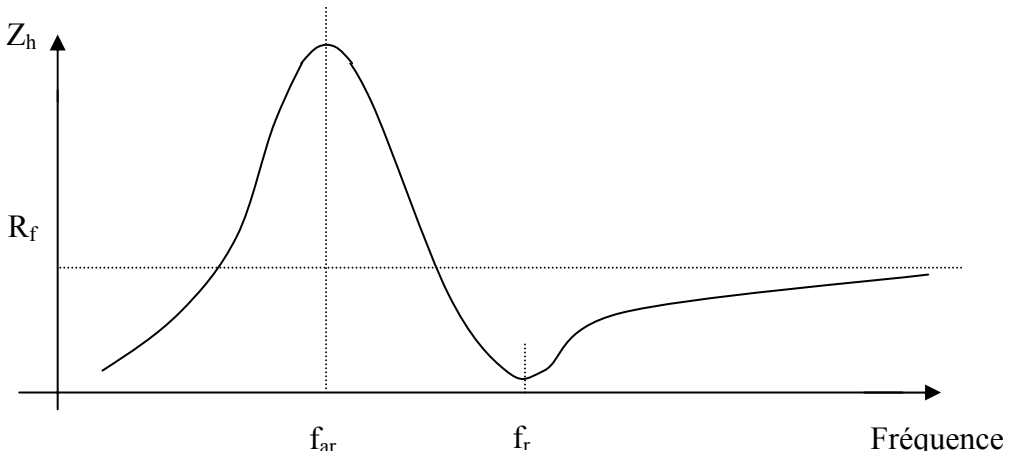


Fig.II.6 L'allure de l'impédance vue du jeu de barres, avec filtre amorti

La figure ci-dessus donne l'allure de l'impédance harmonique vue du jeu de barres après l'installation du filtre. On remarque que l'impédance tend vers une asymptote, dont la valeur est égale à la résistance du filtre amorti.

Le filtre amorti est moins sensible aux variations de ses éléments qu'un filtre résonant. L'utilisation des filtres amortis rend nécessaire le filtrage des rangs harmoniques inférieurs à f_r. D'ailleurs lors du choix des filtres, très souvent plusieurs filtres résonants pour les rangs harmoniques inférieurs et un filtre amorti sont utilisés, tous montés en parallèle avec la charge polluante [9].

II.3 Filtrage actif :

II.3.1 Principe des filtres actifs :

Le filtre actif compense de façon dynamique les courants et les tensions harmoniques générés par les charges non-linéaires. Il élimine ces perturbations harmoniques en injectant en série ou en parallèle dans le réseau des courants ou des tensions ou les deux à la fois, en opposition par rapport aux perturbations existantes. Les courants et les tensions harmoniques générés par les charges non-linéaires sont ainsi supprimés par leurs équivalents inverses générés par le filtre actif.

Puisque le filtre règle le courant, la qualité de filtrage n'est pas influencée par l'impédance du réseau. Si les courants harmoniques absorbés par la charge dépassent la capacité nominale du compensateur actif, ce dernier limite automatiquement son courant de sortie à sa valeur nominale [2, 4, 5, 8, 9, 15, 19, 22, 23].

Facile à mettre en œuvre, un compensateur actif peut être installé en n'importe quel point d'un réseau à basse tension, pour compenser la puissance absorbée par une ou plusieurs charges non-linéaires, évitant ainsi la circulation des courants harmoniques dans tout le réseau.

II.3.2. Types de filtres actifs :

II.3.2.1 Filtres actifs parallèles :

On dit filtre parallèle parce que ce filtre est monté en parallèle avec la charge non-linéaire. Ce filtre génère des courants équivalents en amplitude avec les courants harmoniques générés par la charge mais en opposition de phase afin que la somme avec ceux-ci soit nulle. Alors l'ensemble charge/filtre se présente comme une charge propre, on obtient alors des courants sinusoïdaux au niveau du réseau.

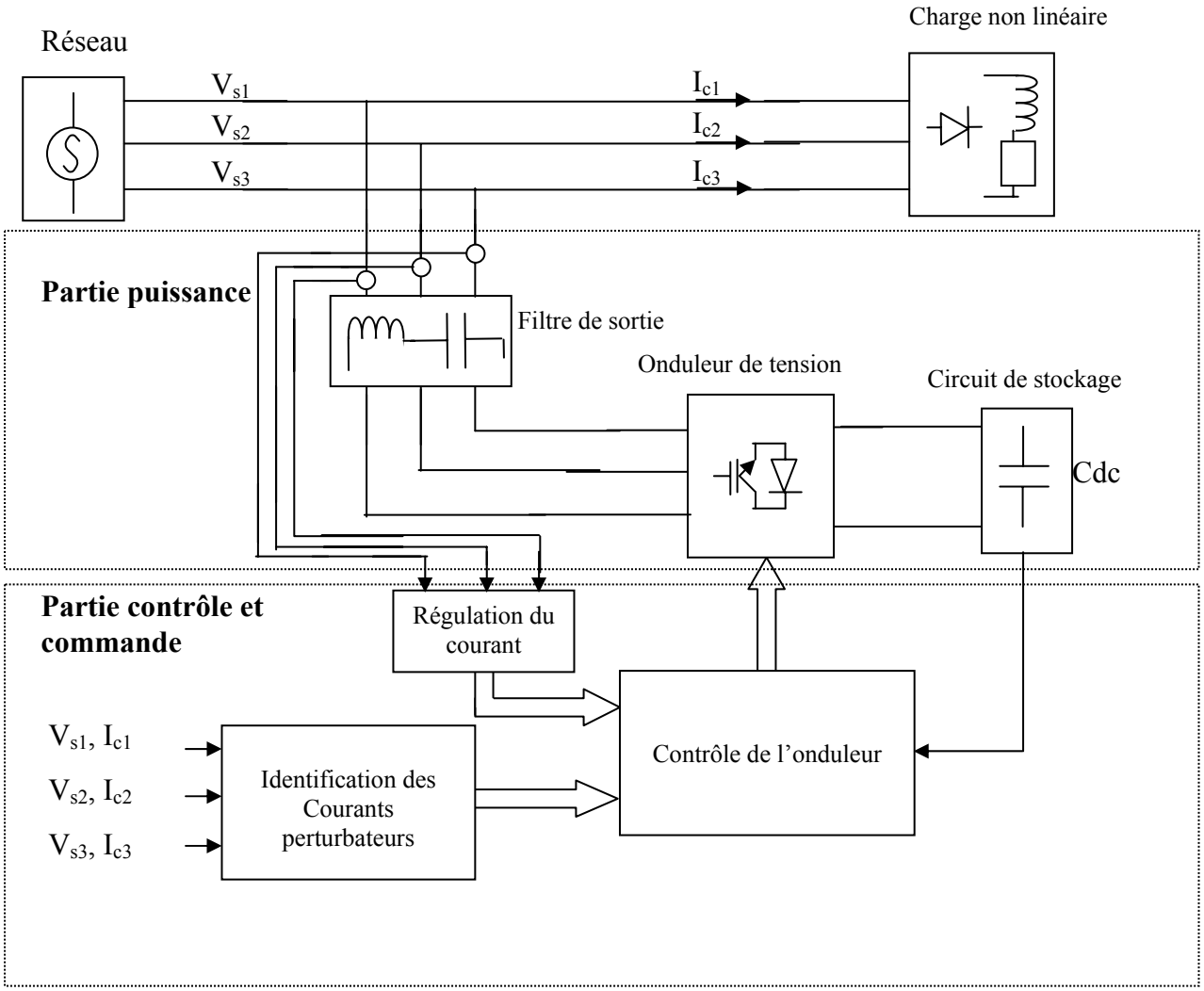


Fig.II.7 Structure générale du filtre actif parallèle

Un filtre actif parallèle se constitue de deux (02) parties principales : la partie puissance et la partie contrôle et commande. La partie puissance est elle-même constituée d'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, …etc.) avec des diodes en antiparallèle, d'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif et d'un filtre de sortie. Alors que La partie contrôle-commande quant à elle s'accomplissait en quatre phases :

a. Identification des courants perturbés ;
b. Régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie, ;
c. Commande de l'onduleur de tension ;
d. Régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.

L'élément principal du filtre est l'onduleur de tension c'est d'ailleurs grâce au progrès remarquables réalisés au cours des dernières années, dans le domaine des dispositifs électroniques de puissance, que la conception des dispositifs d'élimination des harmoniques auto-adaptables que sont les compensateurs Actifs d'harmoniques ou encore Filtres Actifs est devenu possible.

On représente dans les figures ci-dessous les deux principaux onduleurs de tension qui peuvent être utilisés. On a un onduleur triphasé à structure de tension, il se compose de trois bras à interrupteurs réalisés à partir d'éléments de l'électronique de puissance des GTO ou des IGBT et d'une diode en antiparallèle, un condensateur C_{dc} qui sert de l'élément de stockage de l'énergie du côté continu. Un filtre de sortie pour filtrer les fluctuations de la tension à la sortie de l'onduleur, il est un filtre passif. Il connecte l'onduleur de tension au réseau électrique.

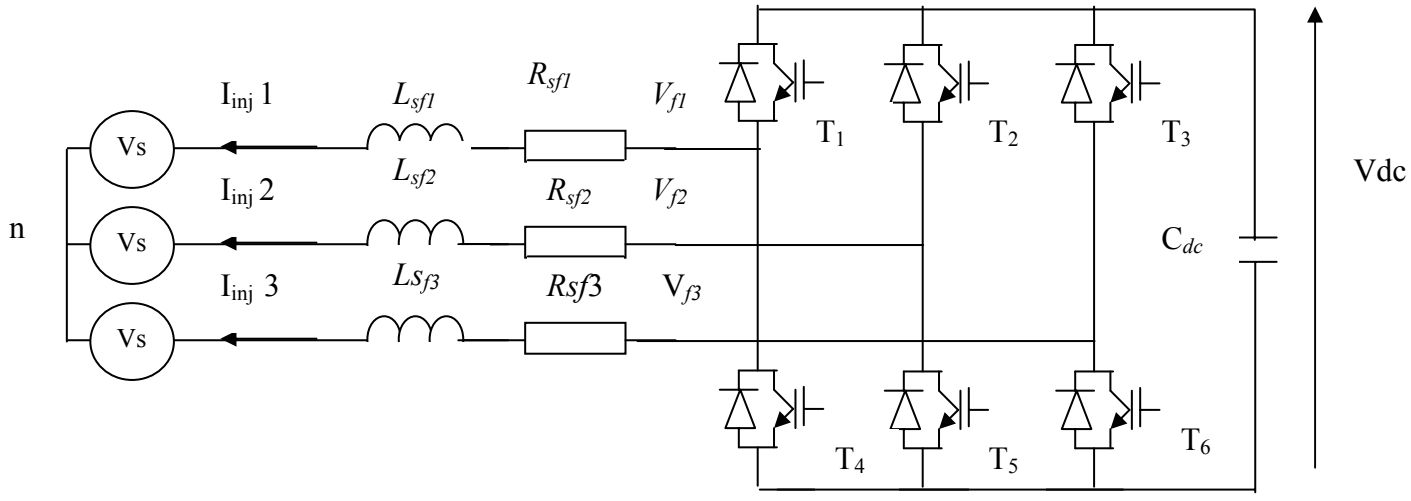


Fig.II.8 : Onduleur de tension triphasé

On peut utiliser aussi un onduleur monophasé toujours à structure tension, mais celui-ci ne se compose que de deux bras à interrupteurs par contre on utilise trois onduleurs monophasés, au lieu d'un seul pour l'exemple précédant, chacun aura à compenser les perturbations d'une phase.

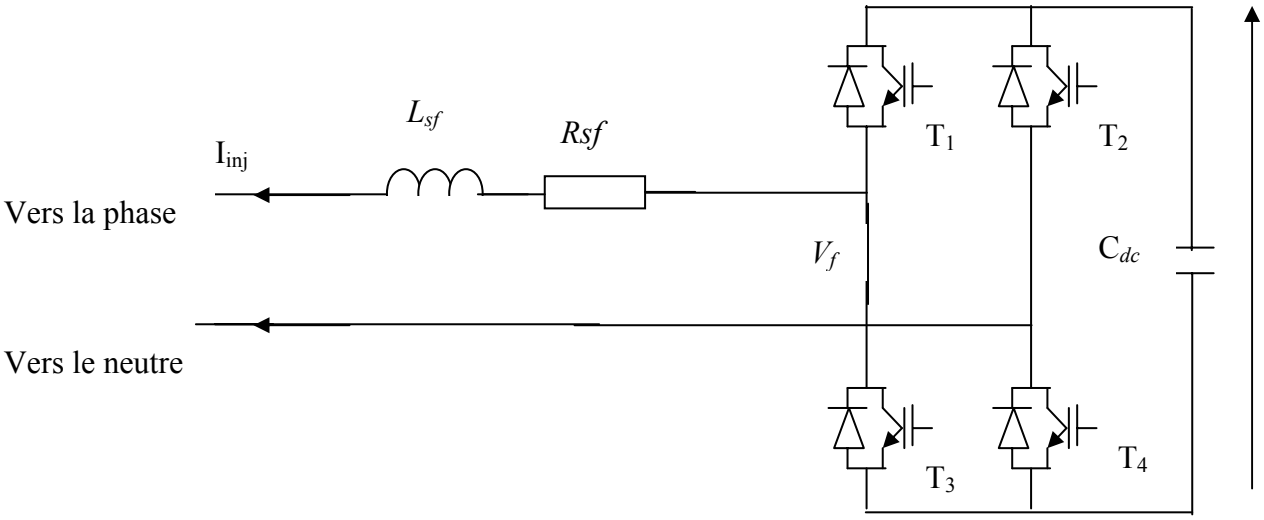


Fig.II.9 : Onduleur de tension monophasé en pont complet

Les interrupteurs ou les cellules de commutations sont à la base de la majorité des structures d'onduleurs de tension. Elaborée à partir d'interrupteurs entièrement commandables, associés chacun à une diode antiparallèle D, elle est réversible en courant. Elle peut être considérée comme une phase élémentaire d'un quelconque onduleur polyphasé classique.

Ces deux structures représentées de l'onduleur ne permettent pas la fermeture simultanée des semi-conducteurs d'un même bras sous peine de court-circuiter le condensateur de stockage. Par contre, ils peuvent être tous les deux ouverts (pendant un temps mort). La continuité des courants est alors assurée par la mise en conduction d'une des diodes d'un même bras.

En pratique, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. En réalité, le mode, où les semi-conducteurs d'un même bras sont tous les deux fermés, n'existe que durant les commutations.

Afin d'éviter un court-circuit à cause du délai de blocage des interrupteurs, il faut insérer sur un même bras, un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande de blocage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre. Avec

l'hypothèse des commutations instantanées, ce mode de fonctionnement ne sera pas pris en compte et par conséquent, aucun risque de court-circuiter le condensateur n'est à craindre.
Grâce au signal de commande des interrupteurs généré, après avoir déterminé le signal de référence et ajouté à l'action des régulateurs que nous aurons l'occasion d'aborder dans ce chapitre, l'onduleur se met alors à générer un courant qui sera directement injecter à travers le filtre de sortie dans le réseau.

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait souvent par un système de stockage capacitif représenté par un condensateur Cdc qui joue le rôle d'une source de tension continue Vdc. Le choix des paramètres du système de stockage (Vdc et Cdc) se répercute sur la dynamique et sur la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension Vdc élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de la tension continue Vdc, causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de Cdc, peuvent dégrader la qualité de compensation du filtre actif parallèle. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible.

Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique. Le filtre de sortie est dimensionné pour empêcher les composantes harmoniques dues aux commutations des interrupteurs de l'onduleur de se propager sur le réseau électrique mais il ne doit tout de même pas gêner la dynamique du courant.

II.3.2.2 Les Filtres actifs séries :

Le filtre actif série compense les tensions harmoniques en fournissant une tension qui s'oppose à la tension à harmonique venant du côté source et du côté charge non linéaire, et fait ainsi protéger les charges sensibles contre les perturbations de tension du réseau électrique. Il s'insère entre le réseau perturbé et la charge à protéger par l'intermédiaire d'un transformateur d'injection de tension.

Comme le filtre actif parallèle, la structure du filtre actif série se compose d'une partie puissance et d'une partie contrôle et commande.
La partie puissance est constituée d'un onduleur de tension triphasé, d'un circuit de stockage d'énergie, d'un filtre de sortie qui empêche les perturbations de la tension générées de s'infiltrer dans le réseau, et de trois transformateurs monophasés d'injection de tension.

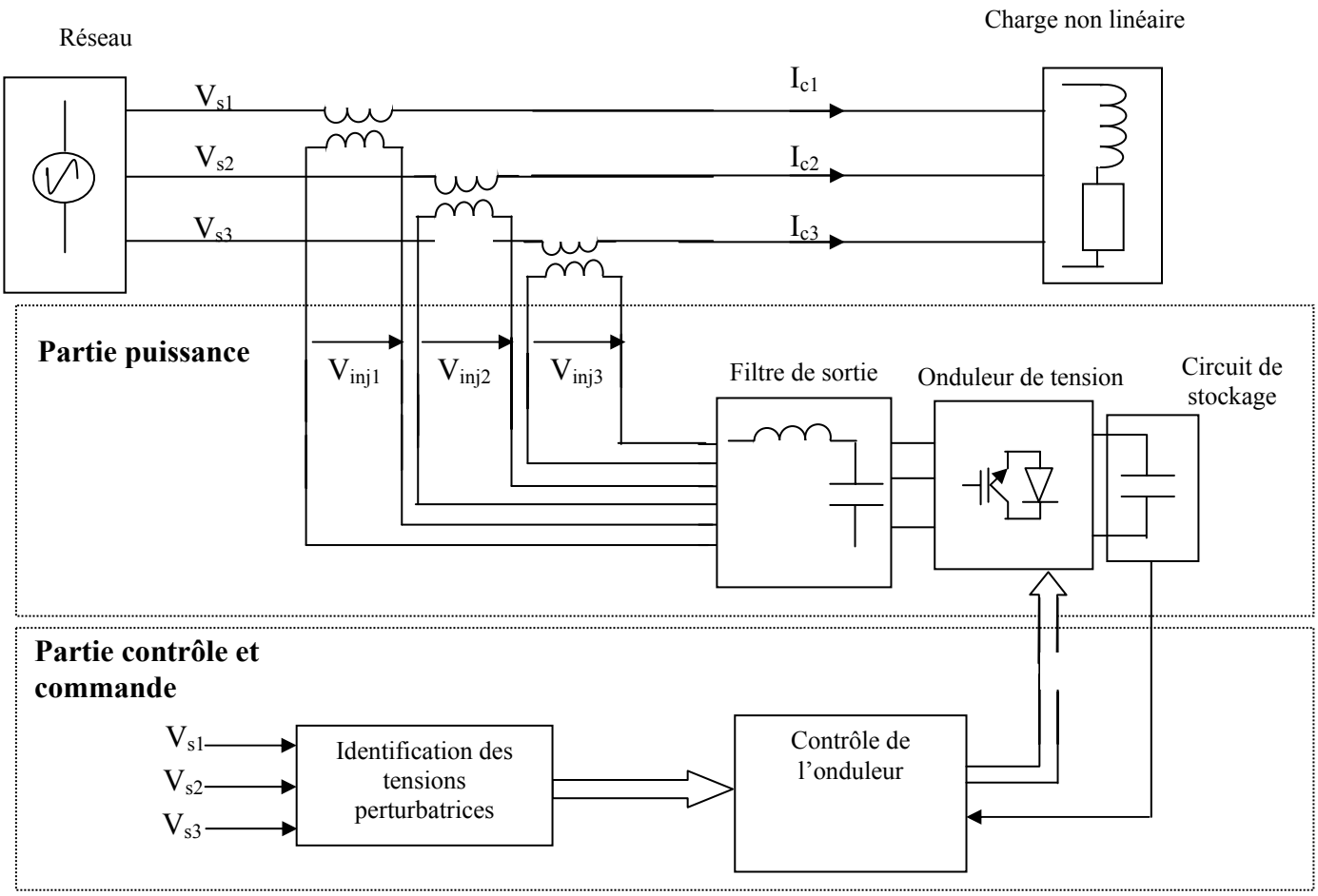


Fig.II.10 Structure générale du filtre actif série

La partie contrôle et commande comporte l'identification des tensions perturbatrices, la régulation des tensions injectées et la commande des interrupteurs de l'onduleur.
L'onduleur de tension est toujours comme pour le filtre actif parallèle, l'élément principale du filtre. Se compose de six interrupteurs repartis, d'une façon symétrique, sur trois bras à interrupteurs commandés à la fermeture et à l'ouverture (IGBT, GTO) avec des diodes en antiparallèle.

L'utilisation d'un circuit de stockage d'énergie composé de deux condensateurs avec un point milieu (C1, C2), permet d'avoir, aux bornes des condensateurs, une tension continue Vdc sans fluctuation. Par contre, ce choix dans le cas du filtre actif parallèle aurait dégradé la dynamique de ce dernier, lequel dépendait, entre autre, de la tension continue Vdc. En effet, un système de stockage sans point milieu permet à l'onduleur d'avoir une tension de sortie dont la valeur maximale est de Vf=2/3. Vdc, au lieu d'une valeur maximale de Vdc/2 dans le cas d'une structure avec un point milieu.

Pour stabiliser la valeur de la tension aux bornes des circuits de stockages afin de garantir que l'onduleur peut disposer d'une tension maximale à sa sortie, il faut que les deux

tensions continues aux bornes des condensateurs soient maintenues dans une plage bien spécifiée. Pour cela, il faut impérativement prévoir un système de rechargement. Pour cela plusieurs solutions peuvent être envisagées comme une alimentation DC à base d'un pont redresseur à diodes, triphasé ou monophasé, inclus dans la structure et qui sera lui-même alimenter à travers le réseau, un système DC indépendant à base des batteries alimentant les condensateurs de stockage d'énergie.

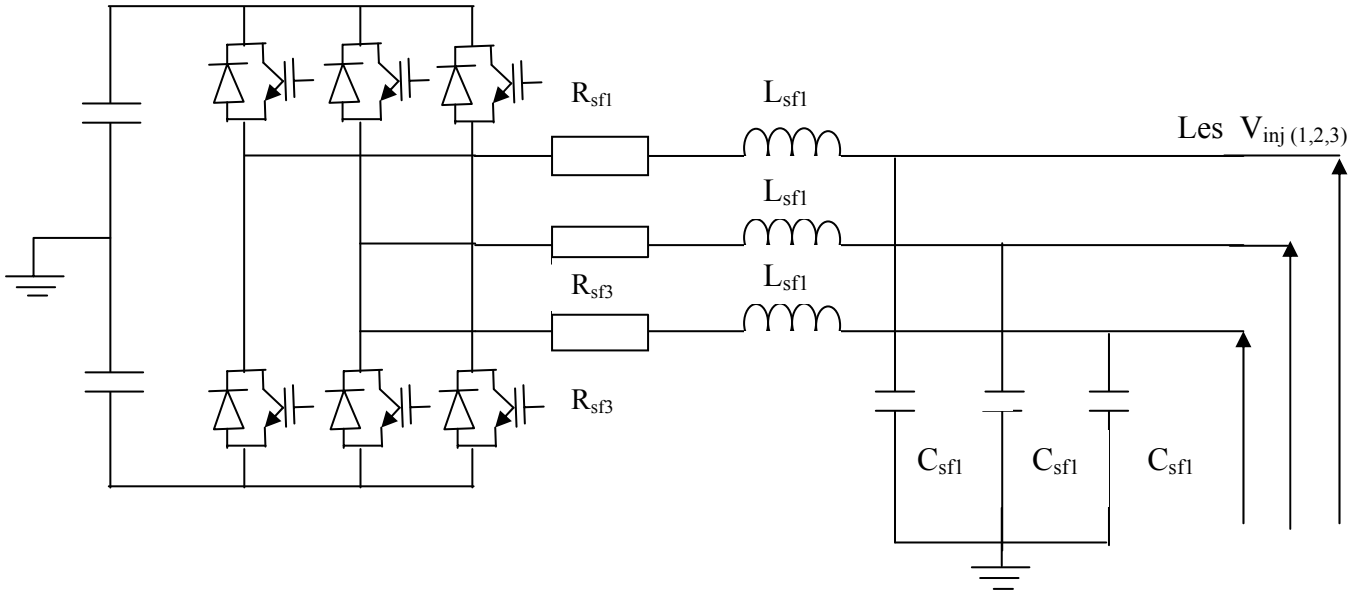


Fig.II.11 L'onduleur de tension du filtre actif série avec circuit de stockage et le filtre de sortie

Le filtre de sortie d'un filtre actif série est un filtre passif qui sert d'une part à atténuer les composantes harmoniques dues aux commutations de l'onduleur, d'autre part à connecter le filtre actif au réseau électrique. L'ensemble onduleur et filtre de sortie se comportant comme une source de tension.

Les transformateurs d'injection de tension permettent d'injecter en série avec le réseau électrique et avec le taux de transformation souhaité la tension produite par l'onduleur.

II.3.2.3 Les Filtres actifs combinés Parallèle-Série :

La structure générale de ces filtres combinés se ramène à celles des deux filtres un actif parallèle et l'autre actif série réunie, cette combinaison permet de faire fonctionner certains blocs en commun, comme le circuit de stockage d'énergie ainsi que la régulation de la tension continue.

Donc ces filtres combinés, comme le montre la figure, se constituent de deux onduleurs, l'un pour la génération des courants de compensation des courants harmoniques l'autre pour la compensation des tensions harmoniques.

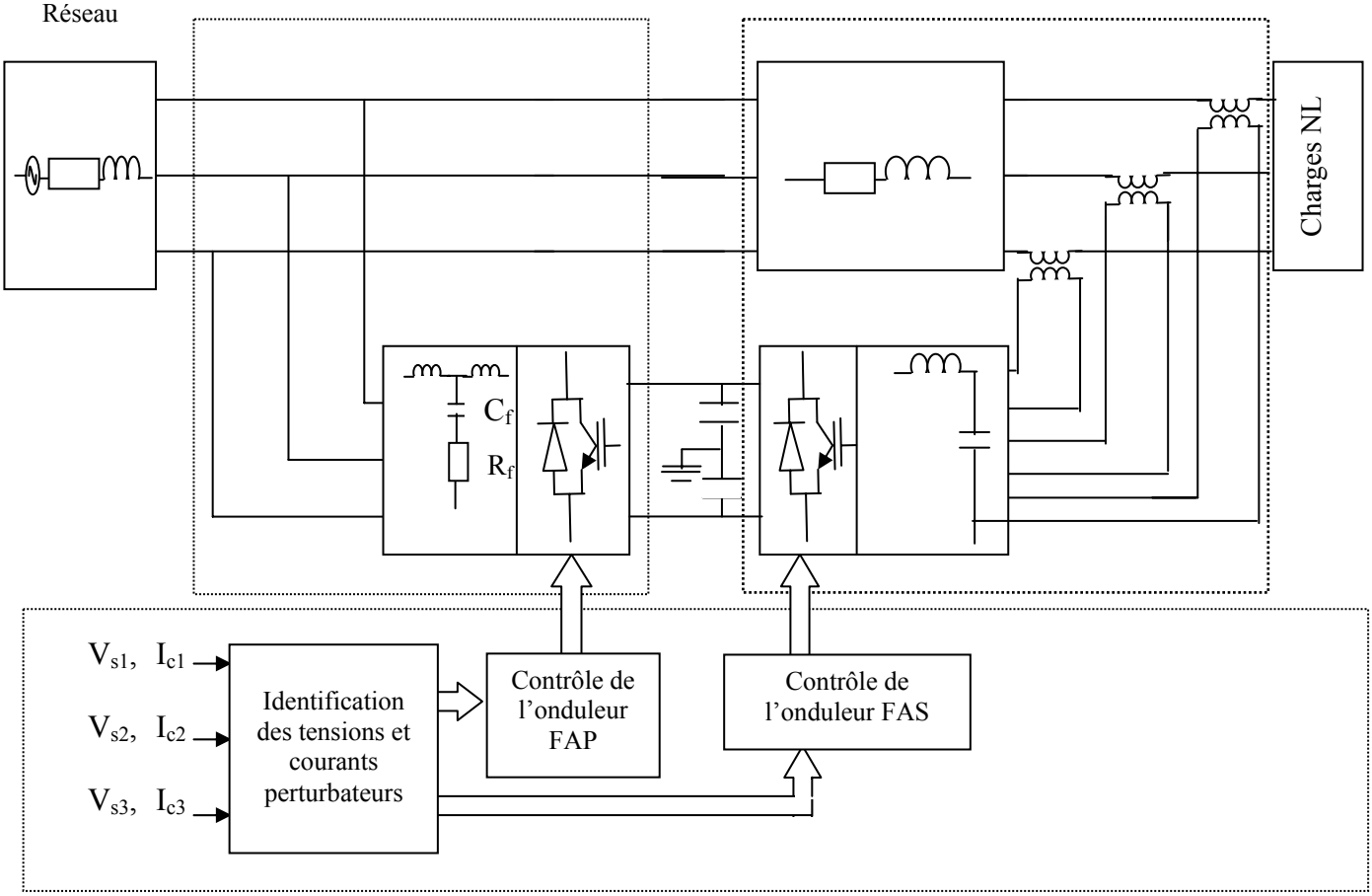


Fig.II.12 Filtre actif combiné Parallèle-Série

Pour l'utilisation du filtre actif combiné deux montages sont possibles :

- Le filtre actif série est monté en amont du filtre actif parallèle.
- Le filtre actif série est monté en aval du filtre actif parallèle.

Le choix entre les deux modèles dépend du rôle alloué au filtre actif série, inclus dans le filtre combiné. Pour le premier cas, c'est d'empêcher les tensions perturbatrices générées par la charge de se propager dans le réseau. Alors que le deuxième cas, c'est pour protéger la charge sensible des tensions harmoniques présentes sur le réseau.

II.4 Filtrage hybride :

II.4.1 Principe des filtres hybrides :

Le principe du filtrage hybride consiste à combiner les deux types de filtrage : actif et passif. Le rôle du filtre passif est de filtrer les harmoniques prépondérantes, donc d'absorber la une grande partie de la puissance harmonique, alors que le filtre actif sert à maintenir les performances du filtrage en fonction de l'évolution de la charge. Cela nous permet de réduire le dimensionnement du filtre actif. Cette structure permet donc d'optimiser le rapport performance / coût de l'ensemble [19].

Il existe plusieurs configurations de filtres hybrides, parmi les plus utilisées on peut citer :

- Filtre actif en série, filtre passif en parallèle ;
- Filtre actif et filtre passif en parallèle ;

II.4.2 Filtre actif en série avec filtre passif en parallèle :

Le filtre passif est accordé aux fréquences des harmoniques de courant, donc il dépollue le réseau des harmoniques du courant, alors que le rôle du filtre actif se résume à compenser les tensions harmoniques (Vh), il ne sera dimensionné que pour supporter le courant fondamental puisque les courants harmoniques sont déjà filtrés.

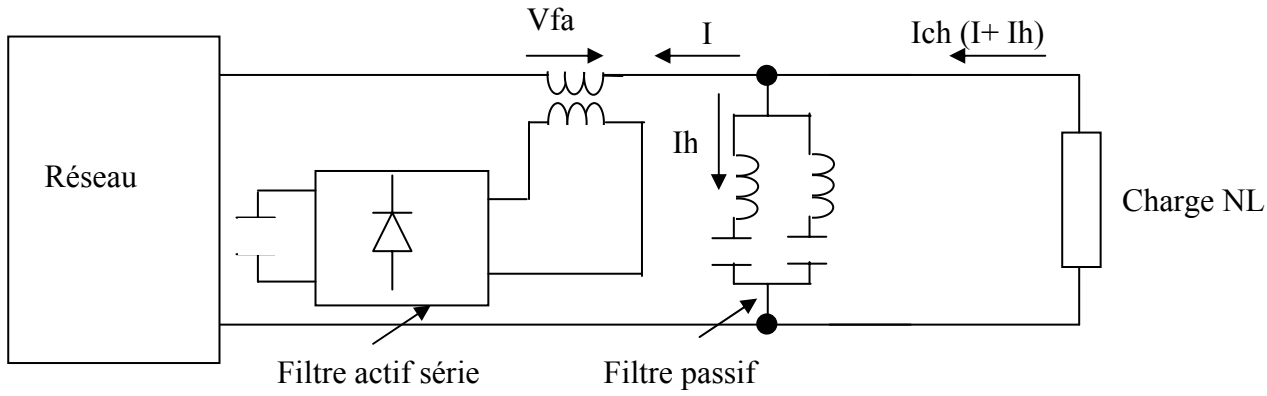


Fig.II.13 Filtre actif série monté avec un filtre passif

II.4.3 Filtre actif avec filtre passif en parallèle avec la charge :

Le filtre passif est accordé aux fréquences supérieures, il filtre les harmoniques supérieures y compris les harmoniques générées par le filtre actif lui-même. Ce dernier monté en série avec le filtre passif compense les courants harmoniques basses fréquences.

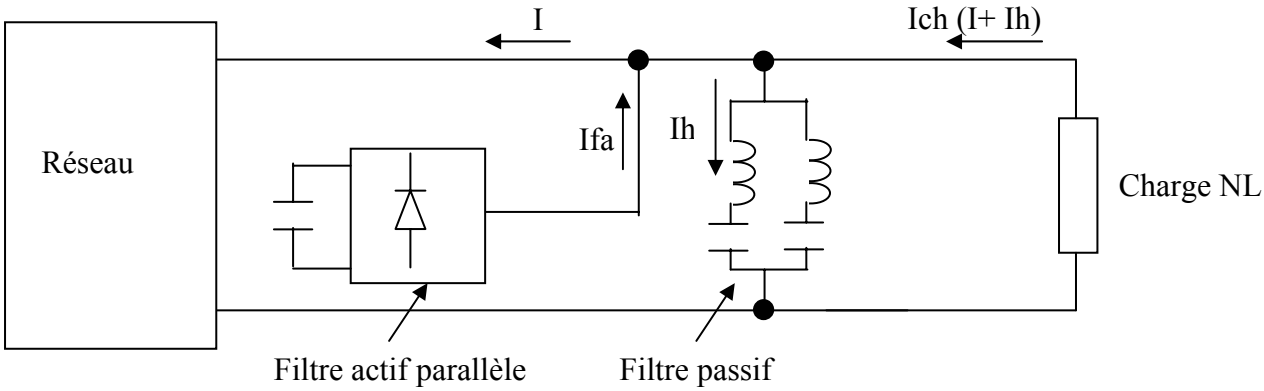


Fig.II.14 Filtre actif parallèle monté avec un filtre passif

II.5 Conclusion :

L'analyse harmonique s'inscrit dans l'ensemble des études de réseaux électriques, à côté de beaucoup d'autres spécialités. Elle concerne les régimes permanents et non les régimes de défaut ou transitoires, et les valeurs crêtes plutôt que les valeurs moyennes. Son importance s'accroît de jour en jour, en même temps que celle de l'électronique de puissance, principale cause des perturbations harmoniques.

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents types de filtrages, le filtrage passif, actif et hybride ainsi que leurs principes de fonctionnements. Certains de ces filtres ont des inconvénients par rapport à d'autres. Les filtres passifs présentent un inconvénient majeur, celui des résonances qui est la principale cause de plusieurs désagréments, ainsi que beaucoup d'autres comme la sensibilité aux variations de l'inductance et de la capacité, dues au vieillissement ou à la température, ce qui entraîne un désaccord de l'ensemble. Alors que le principal inconvénient des filtres actifs était autrefois leur coût de revient. Mais vue les grandes performances de ses derniers et pour pouvoir en profiter, on a eu recourt à l'utilisation des filtres hybrides qui était un choix optimal entre le prix et les performances techniques. Actuellement, avec les progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de

puissance, les prix ont beaucoup baissé et les performances ont augmenté ce qui rend les filtres actifs beaucoup plus compétitifs. Parmi leurs nombreux avantages ont peut citer :

- L'adaptation automatique à l'évolution des charges et du réseau.
- Compensation de plusieurs rangs harmoniques.
- Le contrôle de la valeur maximale du courant, la valeur maximale du courant de compensation est limitée par la capacité du filtre.
- Pas de risque de résonance.
- Possibilité de compensation de l'énergie réactive.

Avec tous ces avantages le filtre actif peut s'imposer facilement dans tous les domaines de filtrage.

CHAPITRE III :

FILTRE ACTIF PARALLELE ET IDENTIFICATION DES COURANTS DE REFERENCE

Chapitre III : Filtre actif parallèle et identification du courant de référence :

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre on traitera de l'onduleur de tension utilisé comme élément fondamental des filtres actifs parallèles. On abordera la partie commande des interrupteurs, contrôle du courant de la détermination des courants de référence puis de la détermination de la puissance apparente du filtre en connaissant la puissance nominale consommée par la charge polluante qui est un redresseur triphasé à pond.

On a choisi de travailler avec un onduleur de tension MLI après le grand essor connu par ce dernier grâce aux progrès réalisés sur les semi-conducteurs de puissance, la réduction des pertes lors des commutations au niveau des interrupteurs aurait permis l'augmentation du nombre des commutations, faisant de la fréquence des commutations très supérieure à la fréquence de la tension de sortie. Cela présente un grand avantage qui est celui de facilite le filtrage des harmoniques de la tension de sortie dû aux commutations, étant donnée leurs fréquences élevées [17].

III.2 Filtre actif parallèle :

III.2.1 Principe de compensation active :

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

Donc le compensateur (filtre) actif doit fournir la puissance déformante et où la puissance réactive. Ainsi, le réseau fournit uniquement la puissance fondamentale active et où réactive. Pour cela le circuit de contrôle en agissant sur les signaux de gâchette des semi-conducteurs (transistors, GTO, IGBT,..) doit imposer la valeur instantanée du courant débité par l'onduleur ($I_{ing}1$, $I_{ing}2$, $I_{ing}3$) de telle sorte que le courant fourni par le réseau (Is1, Is2, Is3) soit sinusoïdale et en phase avec la tension du réseau [2, 5, 22, 6, 8].

Dans le cas général, le courant absorbé par la charge comporte une composante active (I_{ca}), une composante réactive (I_{cr}) et une composante harmonique ($\sum I_{chn}$).

Avec

$$I_c = I_{ca} + I_{cr} + \sum I_{chn} \quad \text{.....III-1}$$

Dont I_{ca} le courant actif absorbé par la charge est fourni par le réseau et la somme des autres courants ($I_{cr} + \sum I_{chn}$), le courant réactive et déformant sera compensé par le filtre actif.
On a :

$$I_{ca} = I_s \; ; \; I_{inj} = I_{cr} + \sum I_{chn} \quad \text{....III-2}$$

III.2.2 Onduleur de tension MLI :

L'onduleur de tension est l'élément clé du filtre actif. Utilisant l'énergie emmagasinée dans le système de stockage de l'énergie, il débite une tension générera un courant à l'image de son signal de référence qui sera déterminé à partir du signal de référence du filtre actif "I_{ref}" et du courant généré par ce dernier "I_{inj}" [17, 26].

III.2.2.1 Principe des onduleurs MLI :

Les interrupteurs des onduleurs MLI sont toujours constitués d'un semi-conducteur commandable à l'ouverture et à la fermeture (GTO, IGBT, …) connecter en antiparallèle avec une diode.

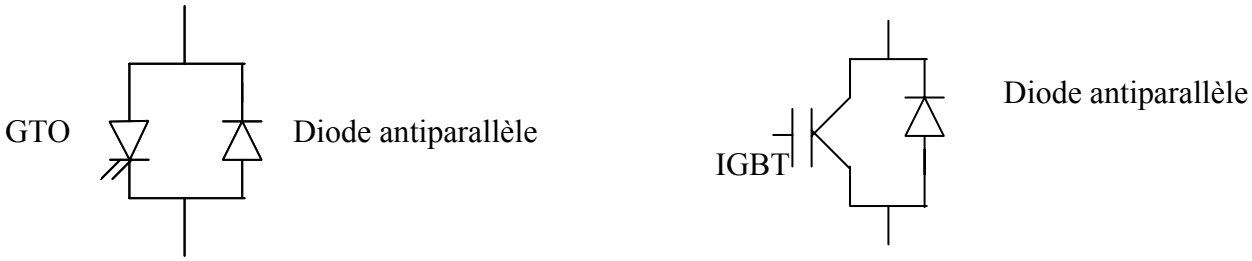


Fig.III.1 Les interrupteurs de puissance : GTO, IGBT

Plus souvent on détermine en temps réel les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs à l'aide d'une électronique de commande analogique ou numérique. La tension de sortie se compose de plusieurs "impulsions" formées par l'ouverture et la fermeture des interrupteurs qui relient une source de tension continue avec une source de courant ce qui assure le transfère de l'énergie entre ces deux sources.

Le plus adaptée et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est la MLI à échantillonnage naturelle, appelée aussi MLI intersective. Pour cette méthode les instants de fermeture des interrupteurs sont déterminés par les intersections de l'onde de référence U_{ref}

représentant la tension de sortie recherchée de fréquence f avec l'onde de la porteuse, de fréquence f_p très supérieure à f. Donc c'est la porteuse qui est une onde triangulaire de fréquence très élevée qui fixe la fréquence de commutation [15, 21].

Deux indices caractérise la commande des interrupteurs :

- L'indice de modulation : $m = f_p / f$ avec m>>1 ;
- Le coefficient de réglage : $r = U_{ref}\,\max / U_p$ avec : 0< r > 1 ;

f_p, U_p : Respectivement la fréquence et l'amplitude de la porteuse ;

f, U_{ref} max : Respectivement la fréquence et l'amplitude maximale de la référence.

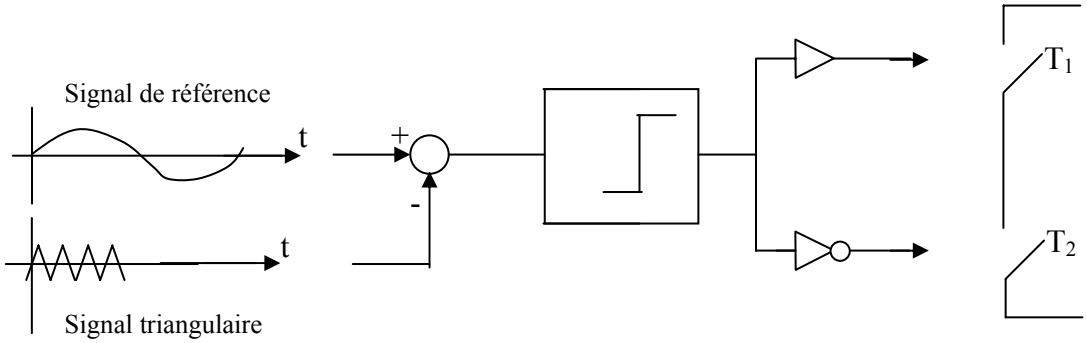


Fig.III.2 Principe MLI de génération des signaux de commande des interrupteurs

Pour le besoin de lisibilité la fréquence du signal triangulaire représenté dans ci-dessus est sous évaluée, dans la réalité cette fréquence est beaucoup plus importante.

Dans le chapitre précédent nous avons présenté le filtres actif parallèle avec deux types d'onduleurs : onduleur de tension triphasé, trois onduleurs monophasés. Le premier est beaucoup plus économique que le second vu le nombre réduit des semi-conducteurs qu'il contient et le circuit de stockage unique et de puissance pas trop élevée. Le deuxième nous permet de contrôler indépendamment le courant harmonique pour chaque phase.

Lors de l'utilisation des onduleurs monophasés il est préférable de travailler avec des onduleurs en pont complet cela évite de recourir à un diviseur de tension même s'il contient deux fois plus de semi-conducteurs.

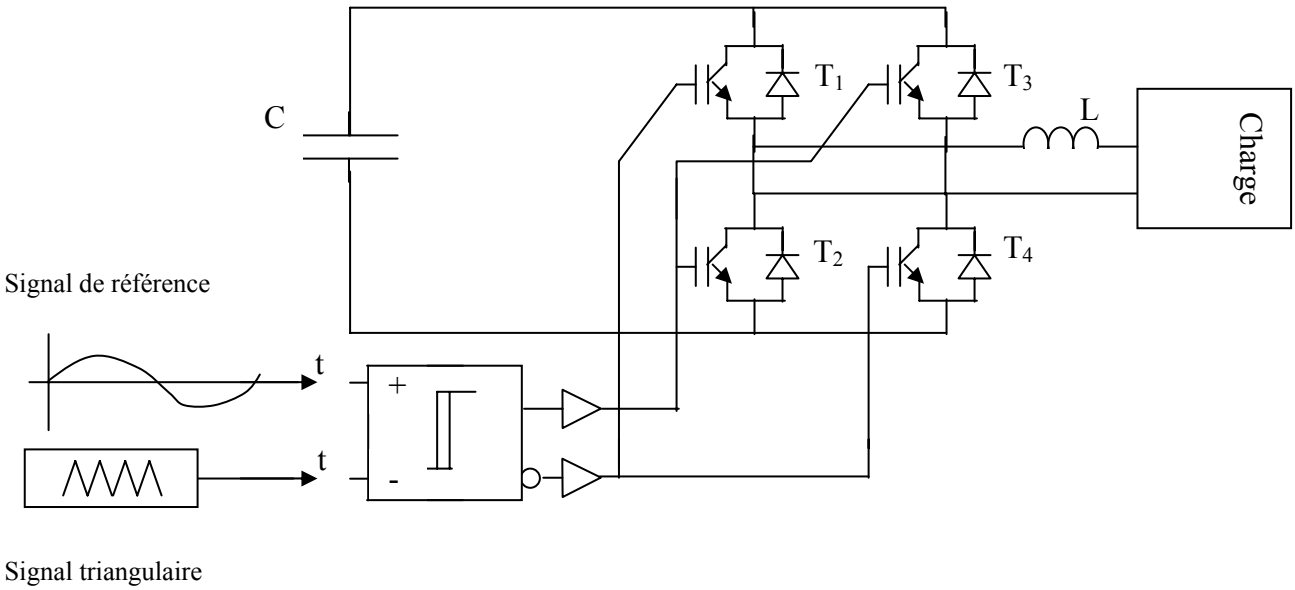


Fig.III.3 Onduleur de tension monophasé avec commande MLI

III.2.2.2 Régulation du courant de l'onduleur :

La technique de commande MLI nécessite un régulateur qui calcule la tension de référence de l'onduleur à partir de la différence entre le courant généré et sa référence donc la consigne. La référence tension du MLI est fournie par la tension de sortie du régulateur [2, 5].

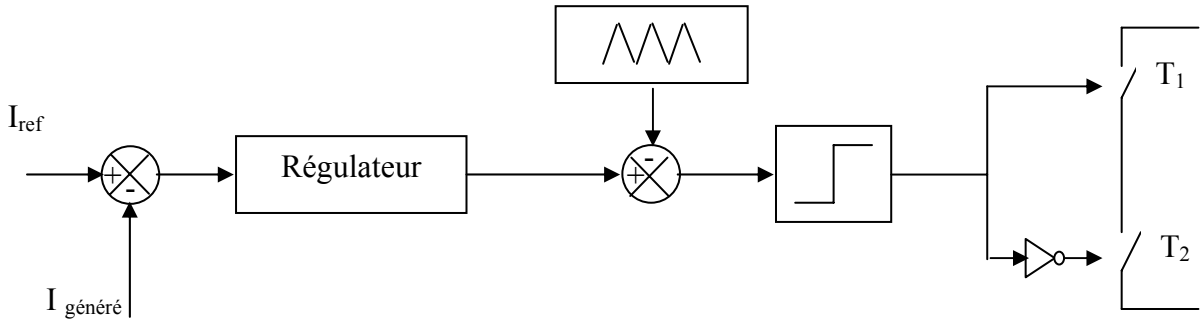


Fig.III.4 Principe de commande des courants avec onduleur MLI

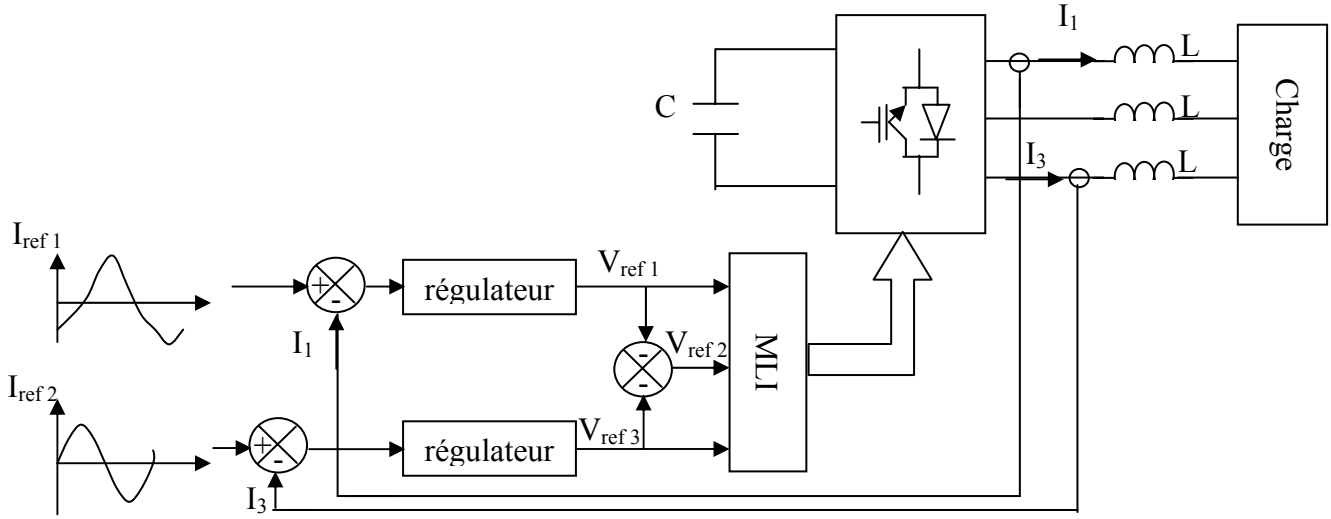


Fig.III.5 Principe de contrôle du courant d'un onduleur triphasé

Pour effectuer la régulation contrôle des courants pour un onduleur de tension triphasé à l'aide d'un régulateur, à condition que la charge soit équilibrée, il suffit de controler deux phases avec deux régulateurs, la tension de référence correspondant à la troisième phase (la deuxième sur la figure ci-dessus) est déterminée à partir des deux sorties des deux régulateurs (première et deuxième phase):

$$V_{ref2} = -V_{ref1} - V_{ref3}$$

III.3 Les méthodes d'identification des courants de références :

III.3.1 Choix de la méthode :

Plusieurs méthodes ont étés utilisés pour l'extraction des courants de références pour un filtre actif ; parmi elles, la méthode basée sur le principe du courant actif, la méthode tri-monophasé, la méthode basé sur la régulation de la tension continue et la méthode des puissances instantanées.

Cette dernière est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Elle permet de calculer les puissances harmoniques de la charge non linéaire. Comme on peut l'utiliser pour compenser à la fois les courants harmoniques et les courants réactives, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant total.

C'est la méthode d'identification la plus utilisée est aussi appelée méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées. Elle offre l'avantage de choisir les

perturbations à compenser avec précision, de rapidité et de facilité d'implantation. Pour toutes ces raisons on a retenu cette méthode d'identification pour le reste de ce travail. En effet, afin de pouvoir compenser les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive conjointement ou individuellement, cette méthode est la mieux appropriée.

III.3.2 La méthode des puissances instantanées :

Elle permet d'isoler les trois puissances instantanées qui peuvent coexister dans un circuit triphasé, la puissance active, réactive et la puissance déformante. Avec cette méthode, il est facile d'éliminer la composante continue des puissances active et réactive instantanées et obtenir la puissance instantanée qu'il faut compenser (la puissance déformante (harmonique) seule ou avec la puissance réactive) [1, 2, 5, 22].

On utilise la transformation de concordia pour obtenir les puissances actives et réactives et cela suppose qu'on a un système triphasé de tensions sinusoïdales et équilibrées.

Si on note :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix}$$ Les tensions triphasées équilibrées ;

$$[I_C] = \begin{bmatrix} I_{C1} \\ I_{C2} \\ I_{C3} \end{bmatrix}$$ Les courant dans les trois phases absorbées par la charge polluante ;

Si on note ($V_{c\alpha}$, $V_{c\beta}$) et ($I_{c\alpha}$, $I_{c\alpha}$) les composantes orthogonales du repère $\alpha - \beta$ associées respectivement aux tensions ($Vs1$, $Vs2$, $Vs3$) et aux courants (I_{C1}, I_{C2} et I_{C3}) les valeurs de ($V_{c\alpha}$, $V_{c\beta}$) et ($I_{c\alpha}$, $I_{c\alpha}$) seront données par les expressions suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_{S\alpha} \\ V_{S\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \\ V_{S3} \end{bmatrix} \qquad \text{……..III-3}$$

Pour les tensions

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_{C\alpha} \\ I_{C\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{C1} \\ I_{C2} \\ I_{C3} \end{bmatrix} \qquad \text{…….III-4}$$

Les puissances réelles et imaginaires instantanées sont données par :

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{S\alpha} V_{S\beta} \\ -V_{S\beta} V_{S\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{C\alpha} \\ I_{C\beta} \end{bmatrix} \qquad \text{……III-5}$$

La puissance homopolaire P_0 est donnée par :

$$P_0 = V_0 I_0 \qquad \text{……III-6}$$

Comme on peut écrire les puissances réelle et imaginaire sous la forme suivante :

$$P = V_{S\alpha} I_{C\alpha} + V_{S\beta} I_{C\beta}$$
$$Q = V_{s\alpha} I_{C\beta} - V_{S\beta} I_{C\alpha} \qquad \text{……..III-7}$$

Delà, On peut aussi écrire ($I_{C\alpha}$, $I_{C\beta}$) en fonction de P et de Q :

$$\begin{bmatrix} I_{C\alpha} \\ I_{C\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{S\alpha} & -V_{S\beta} \\ V_{S\beta} & V_{S\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \qquad \text{……III-8}$$

Tout en posant delta :

$$\Delta = V_{S\alpha}{}^2 + V_{S\beta}{}^2 \quad \text{.....III-9}$$

- La puissance P coïncide avec la puissance active instantanée transmise par le réseau ;
- La puissance Q coïncide avec la puissance imaginaire instantanée qui circule dans le réseau ;

Dans ce cas, vu que les tensions sont sinusoïdales et alimentent une charge non linéaire, les puissances instantanées P , Q prennent en compte les composantes perturbatrices dues aux courants harmoniques, Donc chacune de ces deux puissances peut avoir comme expression :

$$\begin{aligned} P &= \overline{P} + \widetilde{P} \\ Q &= \overline{Q} + \widetilde{Q} \end{aligned} \quad \text{.....III-10}$$

Avec :

$\overline{P}$: Puissance fondamentale liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension ;

$\overline{Q}$: Puissance fondamentale liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension ;

$\widetilde{P}$ et $\widetilde{Q}$: des puissances alternatives liées à la somme des composantes harmoniques du courant et de la tension.

On considère les équations (III-8) et (III-10) on peut déduire les valeurs des courants $I_{C\alpha}, I_{C\beta}$ en fonction des trois composantes des puissances instantanées : active fondamentale, réactive fondamentale et les puissances harmoniques actives et réactivés ($\overline{P}$, $\overline{Q}$, $\widetilde{P}$ et $\widetilde{Q}$):

$$\begin{bmatrix} I_{C\alpha} \\ I_{C\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{S\alpha} - V_{S\beta} \\ V_{S\beta} V_{S\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{P} + \widetilde{P} \\ \overline{Q} + \widetilde{Q} \end{bmatrix} \quad \text{.....III-11}$$

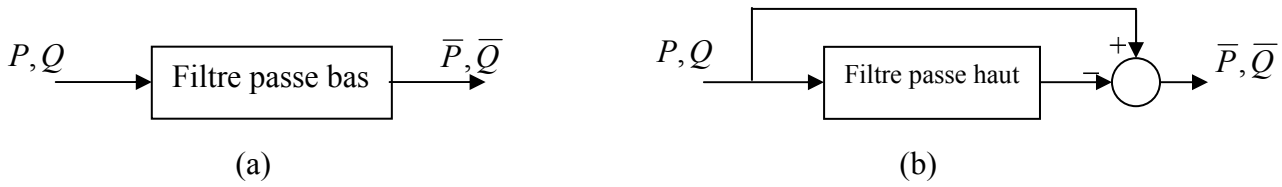
Ce qui est équivalent à :

$$\begin{bmatrix} I_{C\alpha} \\ I_{C\beta} \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta}\begin{bmatrix} V_{S\alpha} & -V_{S\beta} \\ V_{S\beta} & V_{S\alpha} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \overline{P} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant actif } (\alpha\ \beta)} + \underbrace{\frac{1}{\Delta}\begin{bmatrix} V_{S\alpha} & -V_{S\beta} \\ V_{S\beta} & V_{S\alpha} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 \\ \overline{Q} \end{bmatrix}}_{\text{Courant réactif } (\alpha\ \beta)} + \underbrace{\frac{1}{\Delta}\begin{bmatrix} V_{S\alpha} & -V_{S\beta} \\ V_{S\beta} & V_{S\alpha} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \widetilde{P} \\ \widetilde{Q} \end{bmatrix}}_{\text{Courant harmonique } (\alpha\ \beta)} \quad \text{...III.12}$$

Il est évident que pour pouvoir calculer les trois composantes du courant indépendamment les unes des autres, il faut tout d'abord pouvoir isoler les puissances active et réactive ($\overline{P}$,$\overline{Q}$) liées respectivement à la composante fondamentale du courant active et réactive.

Pour effectuer cette opération nous avons le choix entre deux méthodes soit un filtre de puissance implanté numériquement ou l'exploitation de la transformée de Fourier numérique.

Avec un filtre de puissance, pour isoler ces puissances, il faut connaître avec précision les fréquences de leurs pulsations, pour pouvoir dimensionner ce filtre qui peut remplir cette fonction. On peut utiliser un circuit constitué soit d'un filtre passe bas fig.III.6 (a) ou un filtre passe haut fig.III.6 (b) avec soustracteur comme le représente la figure III.6 :



(a) (b)

Fig.III.6 Schéma du filtre de puissance utilisé pour l'extraction des composantes fondamentales $\overline{P},\overline{Q}$

La transformée de Fourier nous permet d'avoir toutes les composantes harmoniques et même la fondamentale des deux puissances P , Q . Avec à l'algorithme de calcul de la DFT à partir des valeurs échantillonnées de P et Q on obtient les coefficients de la série de Fourier pour toutes les harmoniques à commencer de la fondamentale jusqu'à la N^{ime} harmonique avec la fréquence équivalente à chacune d'entre elles. Alors il suffit de calculer les valeurs de la puissance fondamentale (de P et de Q) qui sont équivalentes à ($\overline{P}$,$\overline{Q}$

respectivement) et de les soustraire à chaque instant (ou itération) des valeurs de P et de Q pour obtenir les valeurs de $\widetilde{P}$ et $\widetilde{Q}$.

Une fois les valeurs $\overline{P}$, $\overline{Q}$, $\widetilde{P}$ et $\widetilde{Q}$ isolées, il devient aisé de calculer les courants réactifs et les courants harmoniques à partir de l'équation (III.12) ;
Donc le courant de référence harmonique est donné par :

$$\begin{bmatrix} I_{Ch1} \\ I_{Ch2} \\ I_{Ch3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{C\alpha h} \\ I_{C\beta h} \end{bmatrix} \quad \text{.....III-13}$$

Alors que le courant de référence réactif par :

$$\begin{bmatrix} I_{Cr1} \\ I_{Cr2} \\ I_{Cr3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{C\alpha r} \\ I_{C\beta r} \end{bmatrix} \quad \text{.....III-14}$$

Pour obtenir le courant de référence harmonique et réactif il suffit de sommer les deux courants de références harmoniques et réactifs :

$$\begin{bmatrix} I_{Cref1} \\ I_{Cref2} \\ I_{Cref3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{Ch1} \\ I_{Ch2} \\ I_{Ch3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{Cr1} \\ I_{Cr2} \\ I_{Cr3} \end{bmatrix} \quad \text{.....III-15}$$

III.3.3 Algorithme d'identification :

La méthode que nous avons explicitée si dessus, peut être résumée par le schéma suivant qui illustre les différentes étapes qui nous permettent d'obtenir valeurs des courants de références.

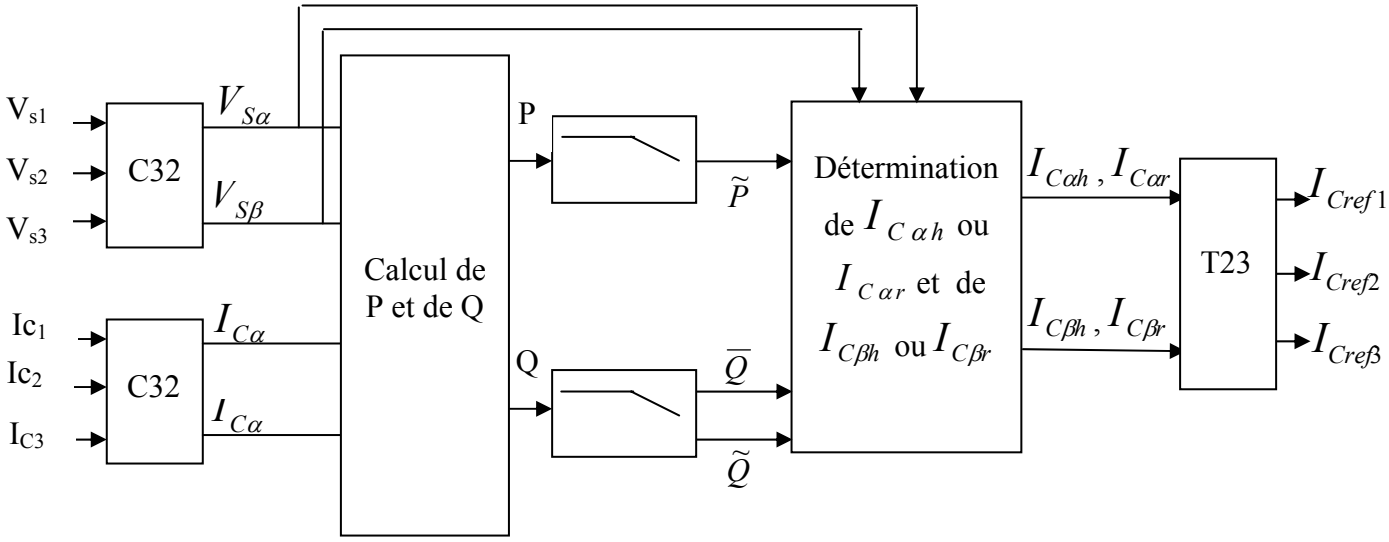


Fig.III.7 Algorithme de la méthode des puissances instantanées pour l'extraction des courants harmoniques

III.4 Exemple de simulation :

III.4.1 Description du système à simuler :

Pour valider la méthode d'identification du courant de référence choisi, on procède à la simulation du système présenté si dessous. On simule le filtre actif en compensation des harmoniques seules puis en compensation et des harmoniques et du réactif.

Pour se faire, on a choisi simuler deux fois. La première fois, la charge est seulement un redresseur débitant sur une charge (R, L). Pour la deuxième fois, on ajoute en série avec le redresseur une charge inductive. Le tout est alimenté par un réseau triphasé à tension sinusoïdale.

Le filtre actif supposé idéal est contrôlé pour générer des courants de compensation des harmoniques et/ou du réactif de la charge non-linéaire évitant ainsi au réseau d'être pollué

Pour génération du courant de référence en utilise la méthode des puissances instantanée décrite ci-dessus.

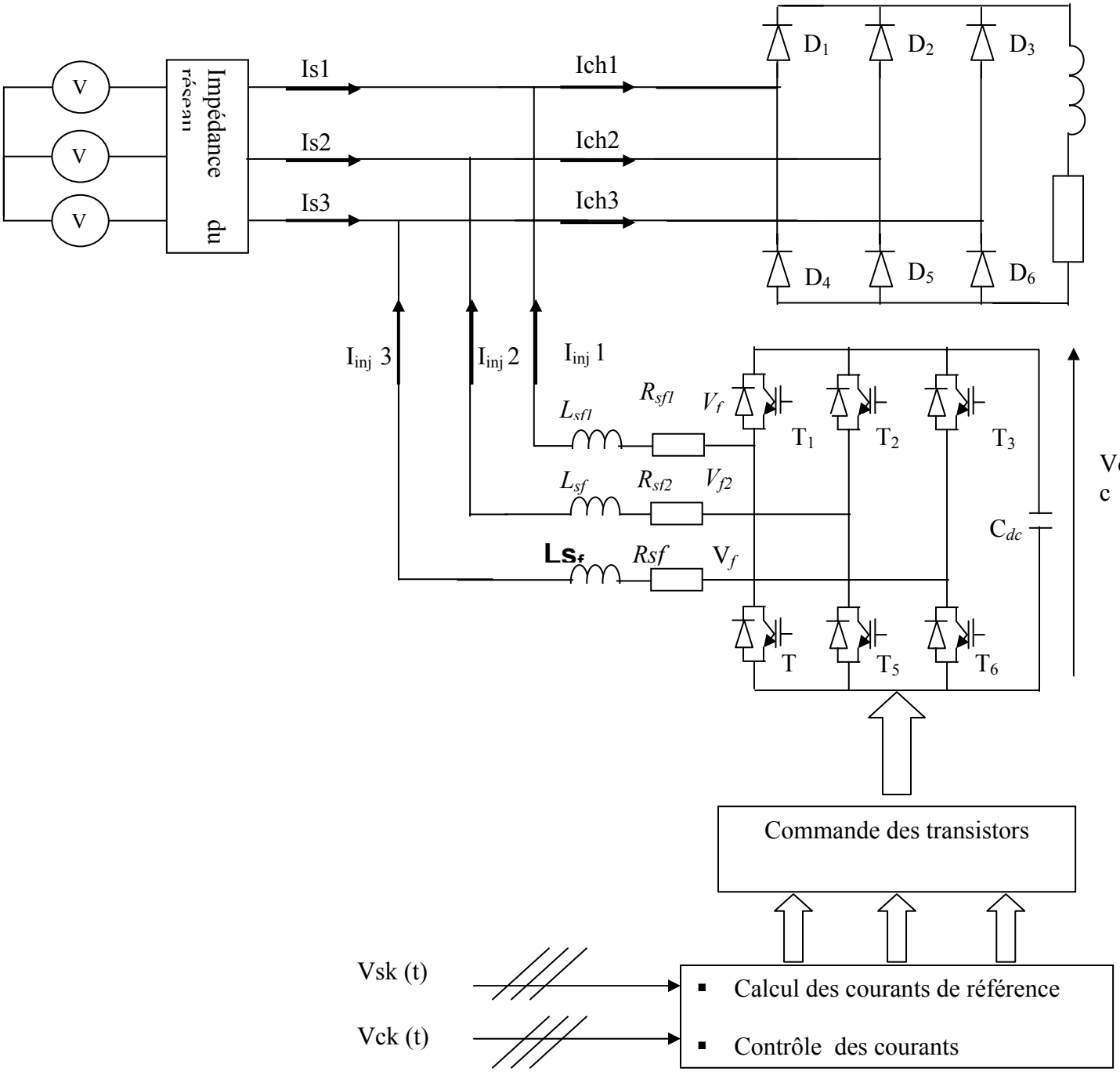


Fig.III.8 Système filtre actif, charge non linéaire

III.4.2 Résultats de simulation :

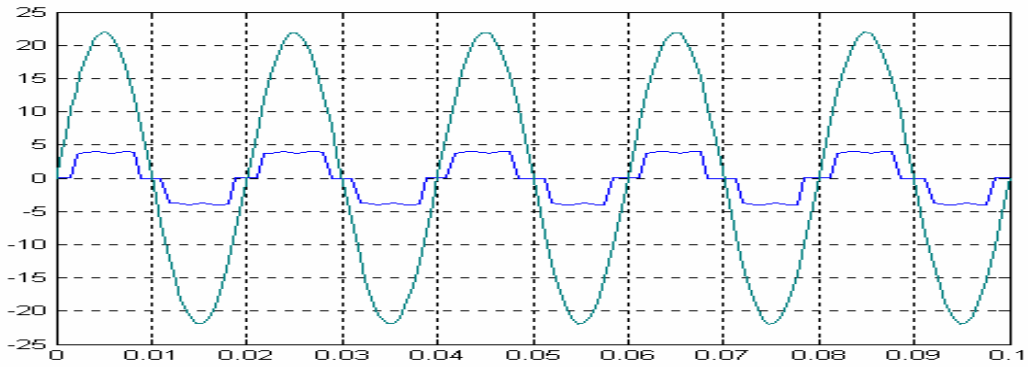


Fig.III.9 Figure représentant courant et tension de phase pour un redresseur triphasé

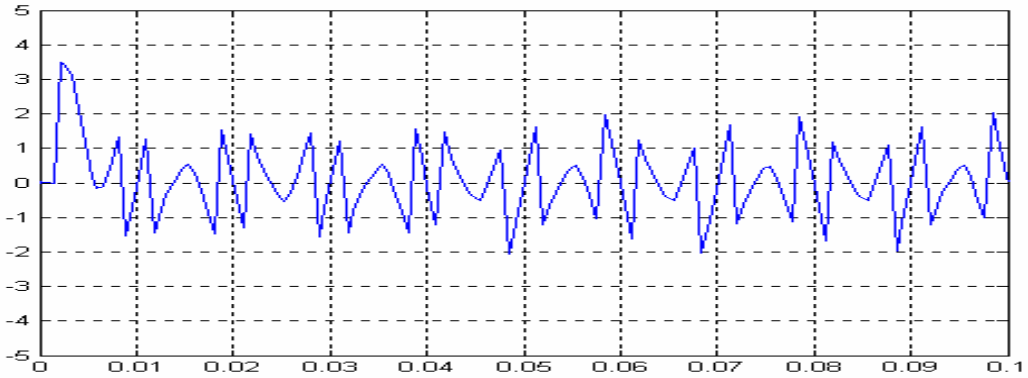


Fig.III.10 Figure représentant le courant de référence pour la compensation des harmoniques

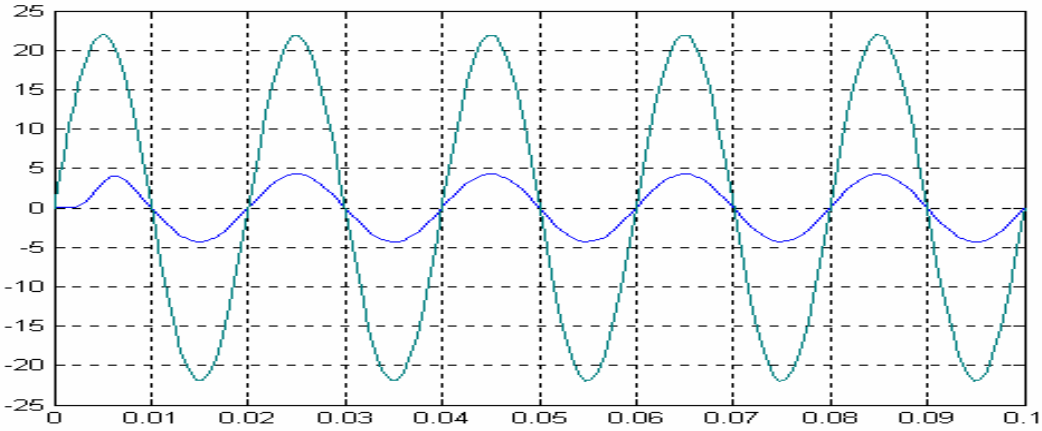


Fig.III.11 Courant de phase avec compensation du courant harmonique pour le redresseur

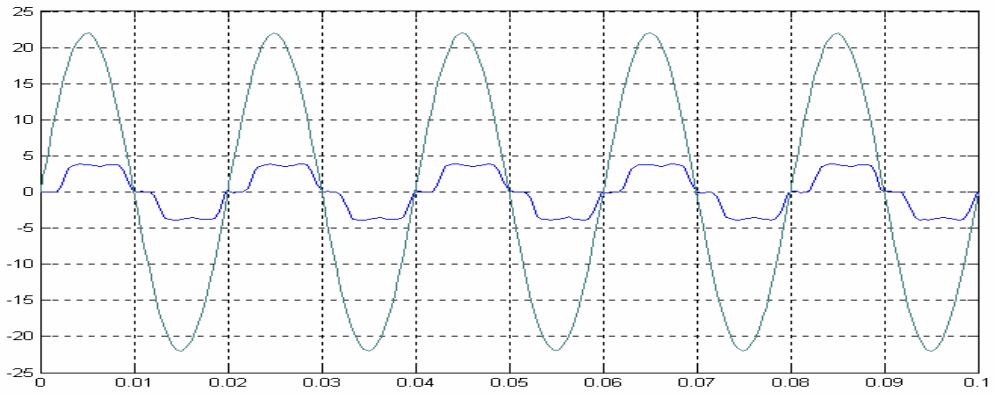


Fig.III.12 Figure représentant courant de phase d'une charge inductive et un redresseur

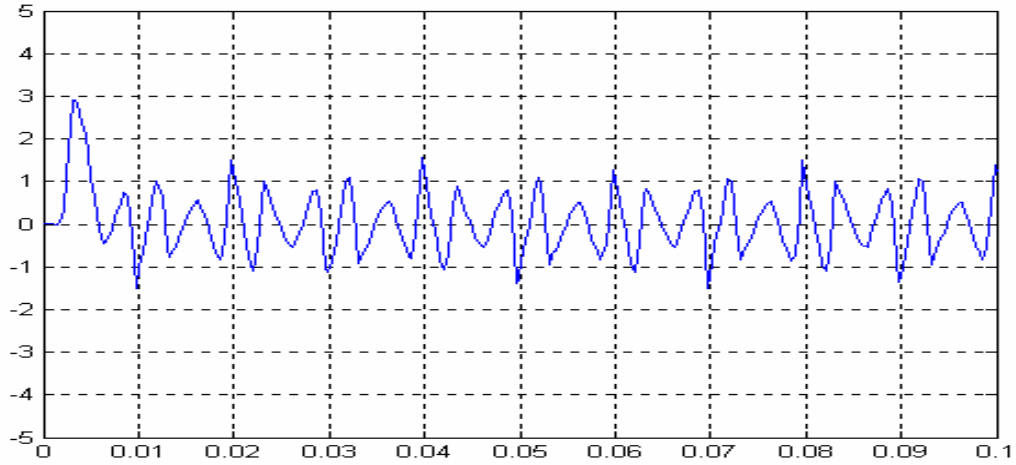


Fig.III.13 Figure représentant le courant de référence pour la compensation des harmoniques pour les deux charges

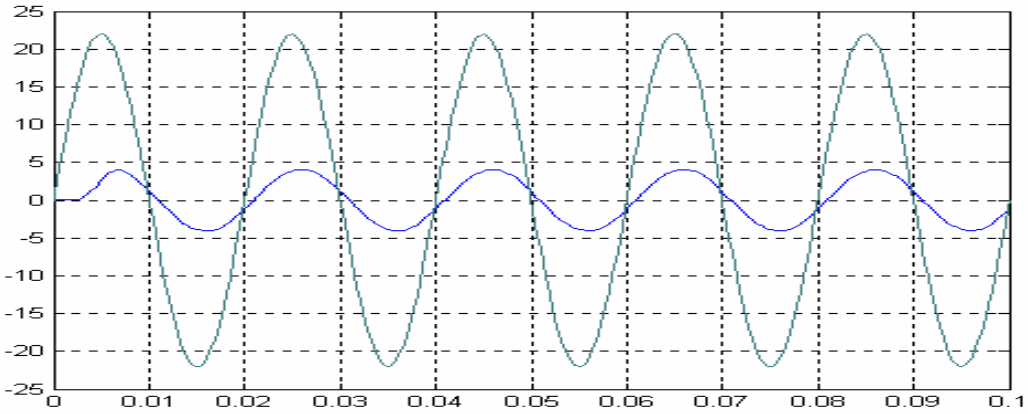


Fig.III.14 Courant de phase avec compensation du courant harmonique pour les deux charges

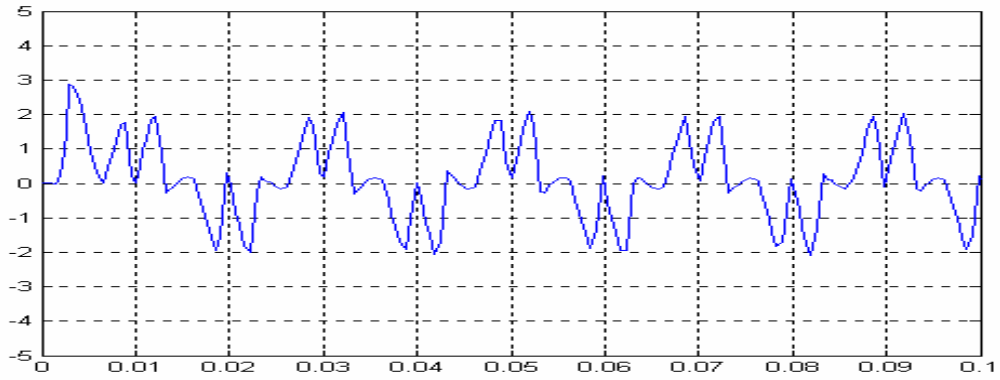


Fig.III.15 Figure représentant le courant de référence pour la compensation des harmoniques et du réactif pour le redresseur la charge inductive

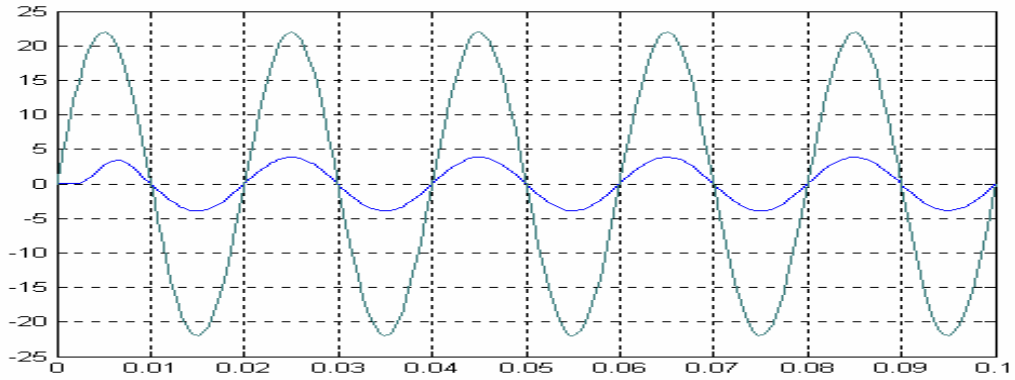


Fig.III.16 Courant de phase avec compensation du courant harmonique et du réactif

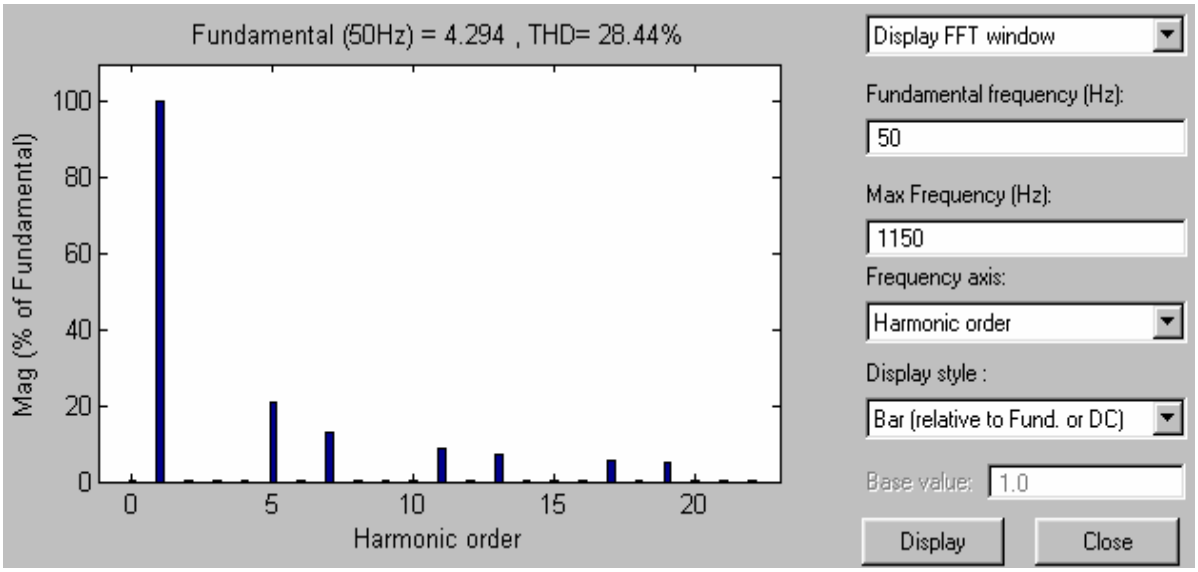


Fig.III.17 Analyse spectrale du courant de phase à l'entrée du redresseur avant la compensation des harmoniques

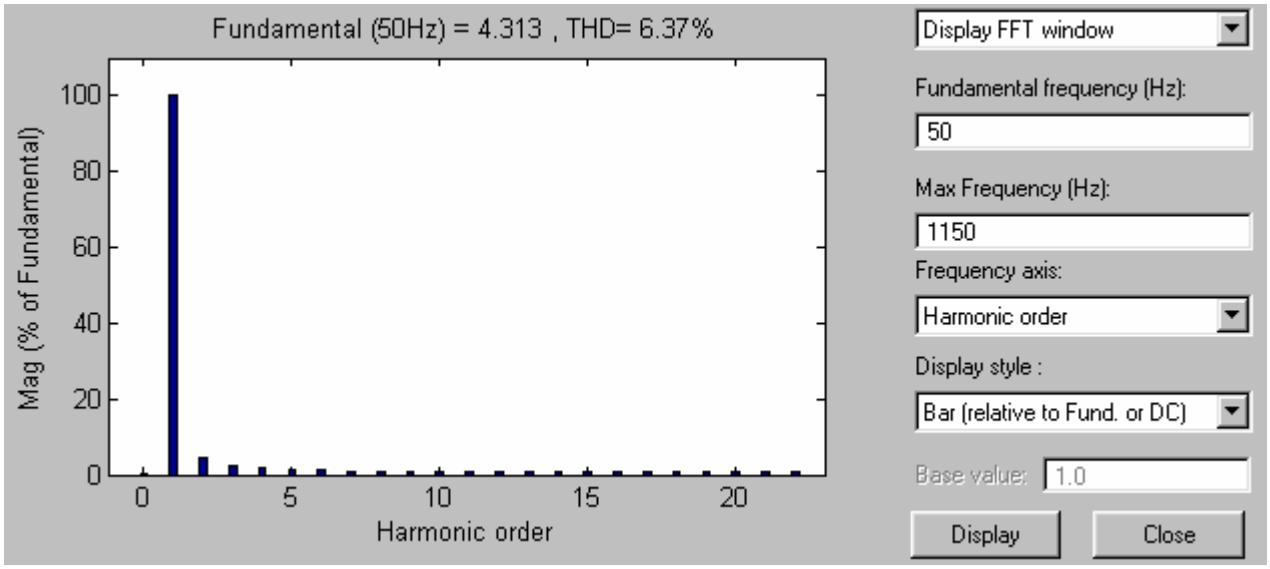


Fig.III.18 Analyse spectrale du courant de phase à l'entrée du redresseur après la compensation des harmoniques

III.4.3 Interprétation des résultats de simulation :

Les figures ci-dessus représentent respectivement, les résultats de simulation pour la compensation des harmoniques seulement puis des harmoniques et du réactif en même temps.

La figure fig.III.9 représente la forme du courant de phase imposé par le redresseur alors que la figure fig.III.10 représente le courant de référence du filtre actif pour la compensation des harmoniques générés par le redresseur.

On remarque pour la compensation des harmoniques figure fig.III.11 que le courant est sinusoïdal donc filtré (les harmoniques compensées), ce qui est vérifié par l'analyse spectrale du courant avant et après compensation des harmoniques figure III.17 et figure III.18. On remarque un fort affaiblissement des taux d'harmoniques pour le courant compensé.

La figure III.12 représente la forme du courant consommé par le redresseur et la charge inductive qui justifie la consommation de l'énergie réactive. La figure III.13 donne le courant de référence pour la compensation des harmoniques seules. D'ailleurs on remarque sur la figure III.14, après la compensation des harmoniques, que le courant reste toujours déphasé par rapport à la tension. Ce qui montre que l'énergie réactive n'est compensée.

La figure fig.III.15 représente le courant de référence du filtre actif pour la compensation des harmoniques et du réactif. Dans ce cas le courant réactif consommé par la charge s'ajoute aux courants harmoniques pour constituer le courant de référence du filtre actif. Après la compensation des harmoniques et du réactif on remarque sur la figure III.16

que le courant est sinusoïdal donc filtré (les harmoniques compensées) et purement en phase avec la tension, donc l'énergie réactive est compensée.

III.5 Calcul de la puissance du filtre actif parallèle :

L'objectif est de déterminer la puissance apparente du filtre actif connaissant la puissance nominale consommée par la charge non linéaire. Le dimensionnement du filtre actif est réalisé en supposant que la totalité des courants harmoniques est compensée [5, 17].

La valeur efficace du courant I_{ch} est définie par la relation suivante :

$$I_{ch} = \sqrt{\sum_{h=1}^{n} I_{ch}^2} \qquad \text{……III-20}$$

On en déduit la valeur efficace I_f des courants harmoniques de compensation générée par le filtre actif :

$$I_f = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{ch}^2} = \sqrt{(I_c^2 - I_c^2)} \qquad \text{…….III-21}$$

Dans le cas d'un réseau comportant 3 phases, supposé sinusoïdal et équilibré, la puissance apparente nominale absorbée par le redresseur se met sous la forme :

$$S_{red} = \sqrt{P_{red}^2 + Q_{red}^2 + D_{red}^2} \qquad \text{……III-22}$$

avec :

P_{ch}, Q_{ch}, D_{ch}: sont respectivement la puissance active, réactive et harmonique absorbée par la charge ;

V_s : tension au point de raccordement ;

I_{ch} : Le courant de la charge non linéaire.

avec

$$\begin{cases} P_{red} = 3V_s I_s \cos\alpha \\ Q_{red} = 3V_s I_s \sin\alpha \\ D_{red} = 3V_s \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{ch}^2} \end{cases} \qquad \text{……III-23}$$

En supposant que le filtre actif compense la totalité des courants harmoniques. Sa puissance nominale sera :

$$S_{filtre} = D_{red} \qquad \text{……III-24}$$

A partir de ces relations précédantes nous déduisons le rapport reliant la puissance apparente du filtre actif et celle de le charge polluante :

$$\frac{S_{filtre}}{S_{red}} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{ch}^{2}}}{I_c} \qquad \text{…….III-25}$$

Si on néglige le phénomène d'empiétement, les expressions des courants I_c et I_{fh} deviennent :

$$I_c = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \qquad \text{……III-26}$$

$$I_{fh} = I_d \sqrt{\frac{2}{3} - \frac{6}{\pi^2}} = 0.24 I_d \qquad \text{……III-27}$$

À partir de ces relations on déduit le rapport de reliant la puissance apparente du filtre actif et celle de la charge polluante :

$$\frac{S_{filtre}}{S_{red}} = 29\ \% \qquad \text{……III-27}$$

La puissance du filtre actif nécessaire à la compensation de tous les harmoniques de courant consommés par un pont triphasé représente prés d'un tiers de puissance nominale de la charge.

III.6 Conclusion :

On a présenté dans le chapitre précédent les avantages du filtrage actif, dans ce chapitre on a traité du filtre actif lui-même, du fonctionnement de l'onduleur de tension, de l'identification du courant de référence de l'onduleur puis on a effectué une simulation pour l'ensemble. On a terminer avec le dimensionnement du filtre actif.

On a choisi de travailler avec un onduleur MLI avec filtre de sortie de premier ordre qui empêche les ondulations à la sortie de l'onduleur du au du fonctionnement des interrupteurs, qui ont l'avantage d'avoir une fréquence fixe. Pour la régulation du courant à la sortie de l'onduleur un régulateur IP est utilisé. Comme on a détaillé la méthode des puissances instantanées utilisée pour l'identification des harmoniques et du réactif choisie pour sa simplicité et sa rapidité, elle nous permet de séparer les énergies active et réactive consommé et d'isoler les perturbations harmoniques qui circulent dans le réseau.

Pour valider les choix qui ont été fait, on a procédé à la simulation du système charge polluante filtre actif sous Simulink pour deux types de fonctionnements : compensation des harmoniques seulement, compensation des harmoniques et du réactif. Les résultats obtenus démontrent les bonnes dispositions du filtre actif parallèle à compenser les perturbations en courant générer par les charges non-linéaires ainsi que l'énergie réactive demandée, permettant ainsi au réseau de ne fournir que la puissance active fondamentale.

Finalement, suite à ce qu'on a obtenu comme résultats à la fin de ce chapitre, on peut affirmer que le filtre actif parallèle peut parfaitement tenir son rôle et atteindre de très bonnes performances.

CHAPITRE IV :

PARTIE EXPERIMENTALE

Chapitre VI : Partie expérimentale :

VI.1 Introduction :

On a un réseau triphasé qui alimente une charge non-linéaire constituée par un redresseur débitant sur une charge RL (Moteur à courant continu). L'expérience consiste à prendre les mesures des trois tensions et courants de ligne pour pouvoir après les traiter numériquement avec un programme qu'on a élaboré. Ce dernier permettra l'identification des harmoniques de courant générées par le convertisseur ainsi que la génération du courant de référence pour la compensation de ces harmoniques.

Dans ce chapitre on va traiter de la structure d'acquisition de données conventionnelles, qui permet la lecture des valeurs de grandeurs analogiques et leur conversion numérique puis leur stockage dans un élément de sauvegarde.

Comme expliquer au chapitre III, pour les opérations de filtrages numériques des puissances active et réactive dans la méthode des puissances instantanées, on utilisera la méthode de la transformée de Fourier discrète. Cette méthode sera aussi utilisée pour effectuer une analyse spectrale du courant pour l'identification des harmoniques.

IV.2 Structure d'une chaîne d'acquisition de données :

IV.2.1 Principe

Une chaîne d'acquisition numérique peut se représenter selon la figure suivante :

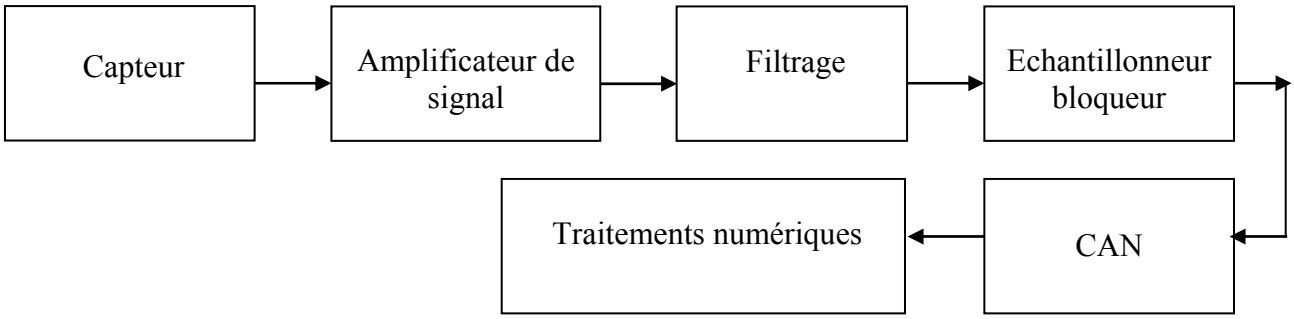


Figure IV.1 : structure d'acquisition de données

IV.2.2 Capteur :

IV.2.2.1 Définition :

Il est l'interface entre le monde physique et le monde électrique. Il va délivrer un signal électrique image du phénomène physique que l'on souhaite numériser. Il est toujours associé à un circuit de mise en forme.

On trouve deux grandes familles de capteurs en fonction de la caractéristique électrique de la grandeur de sortie. Les capteurs passifs qui se comportent en sortie comme un dipôle passif qui peut être résistif, capacitif ou inductif ; et les capteurs actifs dont la sortie est équivalente à un générateur. C'est un dipôle actif qui peut être du type courant, tension ou charge.

IV.2.2.2 Performances d'un capteur :

Les performances d'un capteur sont des paramètres très importants, parmi les plus considérés, on peut citer : l'étendue de la mesure, résolution, sensibilité, linéarité. La connaissance de ses caractéristiques et de ses performances permet de déterminer les domaines de son utilisation efficace qui permettent retrouver les valeurs réelles des grandeurs mesurées.

IV.2.3 Amplificateur de signal :

Cette étape permet d'adapter le niveau du signal issu du capteur à la chaîne globale d'acquisition. Pour pouvoir travailler avec une bonne précision, il est nécessaire d'amplifier les signaux électriques utiles à la sortie du capteur. Il faut donc faire une amplification partielle ou sélective qui élimine ou atténue fortement tout signal ne contenant pas d'information pour ne garder que le signal capteur.

IV.2.4 Filtre d'entrée :

Ce filtre est communément appelé filtre anti-repliement. Son rôle est de limiter le contenu spectral du signal aux fréquences qui nous intéressent. Ainsi il élimine les parasites. C'est un filtre passe bas que l'on caractérise par sa fréquence de coupure et son ordre.

IV.2.5 L'échantillonneur :

Son rôle est de prélever à chaque période d'échantillonnage (Te) la valeur du signal. On l'associe de manière quasi-systématique à un bloqueur. Le bloqueur va figer l'échantillon pendant le temps nécessaire à la conversion. Ainsi durant la phase de numérisation, la valeur de la tension de l'échantillon reste constante assurant une conversion aussi juste que possible. On parle d'échantillonneur bloqueur.

IV.2.6 Le convertisseur analogique numérique (CAN) :

Il transforme la valeur analogique de la tension prélevée par l'échantillonneur en une grandeur numérique. Les caractéristiques principales d'un convertisseur analogique numérique sont la précision et le temps de conversion. Quant on veut améliorer la précision d'un convertisseur, on augmente le nombre de bits, et pour réduire le temps de conversion, on augmente la fréquence de son horloge interne.

IV.2.7 La zone de stockage ou de traitement :

La valeur numérique du signal obtenu à la sortie du CAN peut être orientée vers un support de traitement (DSP, ordinateur), un élément de sauvegarde (RAM, Disque dur) ou encore vers un récepteur situé plus loin.

IV.3 Performances globale :

IV.3.1 Fréquence de fonctionnement :

On peut définir la vitesse limite d'acquisition. Elle va dépendre du temps pris pour effectuer les opérations de :

Echantillonnage ech T

Conversion Tconv

Stockage Tstock

Ainsi la somme de ces trois temps définit le temps minimum d'acquisition et donc la fréquence maximum de fonctionnement de la chaîne [18] :

$$T_{acq} = T_{ech} + T_{conv} + T_{stock} \qquad \text{……..……..IV.1}$$

Donc la fréquence d'échantillonnage est :

$$F_{acq} = \frac{1}{T_{ech} + T_{conv} + T_{stock}} \qquad \text{…….IV.2}$$

T_{acq} : Le temps d'acquisition ;

F_{acq} : la fréquence d'acquisition de la chaîne ;

IV.3.2 Résolution de la chaîne :

La numérisation d'un signal génère un code binaire sur N bits. On obtient donc une précision de numérisation de $\frac{1}{2^n}$%. Il faut donc que tous les éléments de la chaîne de conversion aient au moins cette précision.

On leur demande en général une résolution absolue de $0{,}5.\frac{1}{2^n}$%.

IV.4 Acquisition de plusieurs grandeurs :

Dans le cadre d'une chaîne d'acquisition traitant plusieurs capteurs (N) vers une même zone de stockage, il existe différentes structures qui différent en terme de performances et de coût.

N Capteurs. une (01) zone de stockage ou traitement numérique

IV.4.1 Acquisition séquentielle décalée :

Elle se base sur l'utilisation en amont d'un multiplexeur qui va orienter un capteur vers la chaîne unique d'acquisition

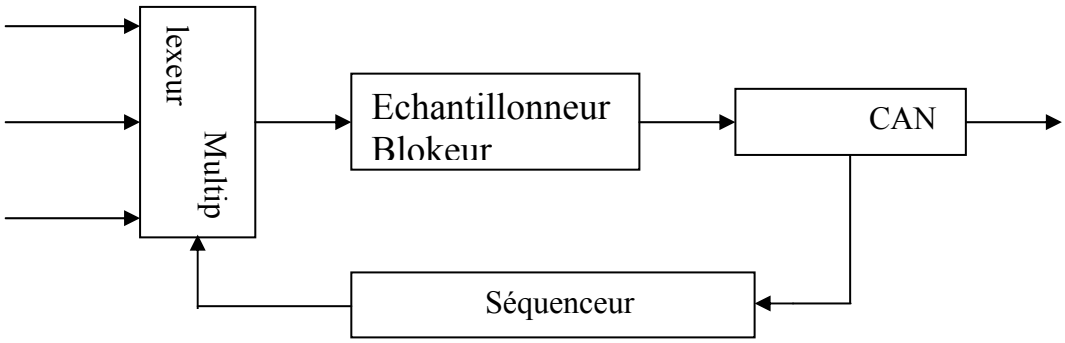


Figure IV.2 : Structure d'acquisition séquentielle décalée

L'avantage de cette structure est bien évidemment son côté économique. Par contre il y a un décalage dans le temps des acquisitions. On réservera donc cette structure ne nécessitant pas une synchronisation entre les données numérisées. De plus le temps d'acquisition complet est à priori élevé car proportionnel au nombre de capteur.

IV.4.2 Acquisition séquentielle simultanée :

De manière à avoir des acquisitions «synchrones», on utilise la même structure que précédemment mais en utilisant des Echantillonneurs Bloqueurs (E/B) en amont du multiplexeur. On est dans une situation d'E/B en tête.

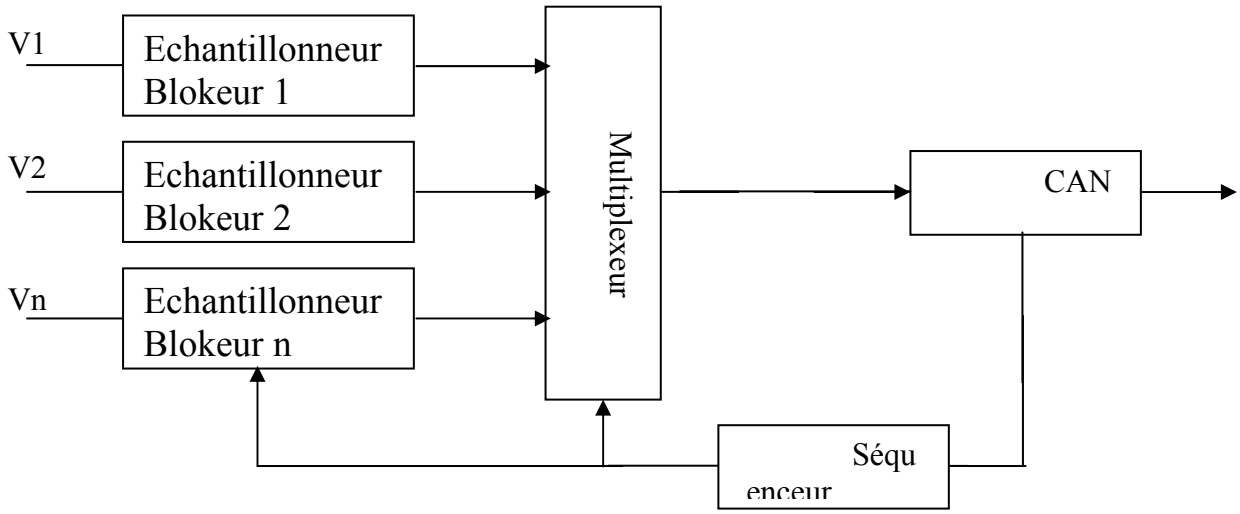


Figure IV.3 Structure d'acquisition séquentielle simultannée

La prise des échantillons s'effectue au même instant, la conversion est effectuée de manière progressive. Cela signifie que les E/B assurent un maintien de l'échantillon durant les N acquisitions sans introduire de pertes supérieures à la résolution du CAN. Son coût est moyen.

IV.4.3 Acquisition parallèle :

C'est la structure la plus complète puisqu'elle consiste à disposer N chaînes d'acquisition en parallèle et de les connecter sur un bus de données commun.

Avec cette structure, il est possible d'effectuer en même temps l'acquisition d'une donnée pendant que l'on en stocke une autre. De même, toutes les conversions peuvent être simultanées, le stockage s'effectuant après. Cela permet un gain de temps sur l'acquisition complète. Mais elle est coûteuse.

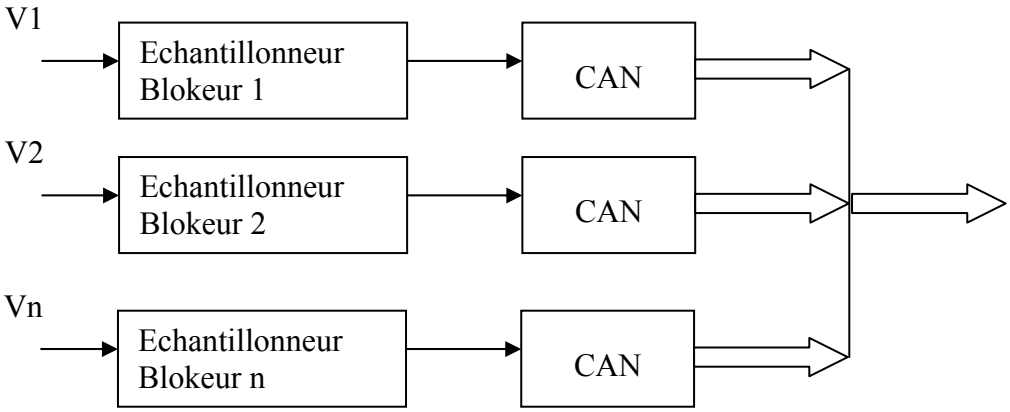


Figure IV.4 Structure d'acquisition parallèle

IV.5 Analyse spectrale :

Le but de cette partie est de faire un lien direct entre l'acquisition de données et leur traitement numérique. Dans notre cas nous allons utiliser la transformation de Fourier discrète (TFD) comme moyen de filtrage des deux puissances instantanées (voir chapitre III) ainsi qu'une analyse spectral des courants. Dans cette partie du chapitre nous allons traiter de :

- L'échantillonnage du signal temporel
- La limitation de la durée d'analyse de ce signal
- La discrètisation de la fréquence pour l'analyse spectrale.

IV.5.1 La formule de Fourier :

Un signal analogique $x(t)$ et sa densité spectrale $X(jf)$ sont reliés entre eux par la relation :

$$X(jf) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \exp(-j2\pi ft)\, dt \quad \text{.....IV.3}$$

Le signal physique complet (analogique) n'est pas étudié en pratique. En fait, seule la représentation numérique du signal est utilisée pour réaliser les calculs voulus. La numérisation du signal est une transformation discrète du signal physique considéré comme continu dans le sens mathématique du terme.

IV.5.2 Signal discret :

On considère que le signal continu x(t) est échantillonné tous les multiples de la période d'échantillonnage Te. On obtient alors un signal discret x[n]= x (t = nTe). Mathématiquement, cette opération d'échantillonnage est équivalente à une multiplication du signal x(t) par un peigne d'impulsions de Dirac distantes de Te.

$$x[n] = x(t).\delta_{T_e}(t) \quad \text{.....IV.4}$$

Pratiquement cette opération est effectuée lors de l'acquisition des données.

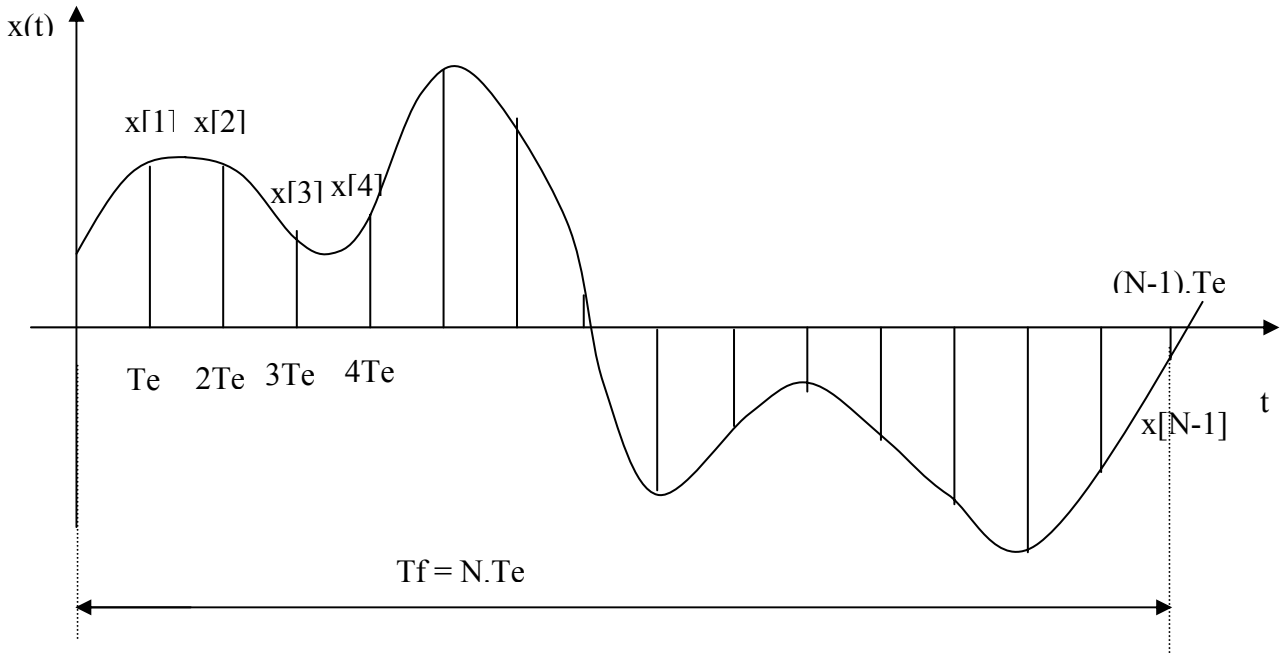


Figure IV.5 Signal continu échantillonné

La période d'échantillonnage ne peut être infinie (problème de fenêtrage).

En respectant le critère de Nyquist (fe > 2B), on ne connaît cependant la valeur du signal qu'aux instants d'échantillonnage n.Te.

Il est impensable de calculer numériquement une transformée de Fourier pour toutes les fréquences f , il va falloir donc 'échantillonner', c'est à dire se contenter de valeurs discrètes de f.

Le calcul du spectre $Xe(jf)$ d'un signal discret $x[n]$ se fait à partir de la définition de la transformation de Fourier des signaux continus. On obtient alors :

$$X_e(jf) = T_e \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n] \exp(-j2\pi fnT_e) \quad \text{.....IV.5}$$

IV.5.3 Fenêtrage :

Soit un signal v(t) à puissance finie et illimité dans le temps Comme il n'est pas possible d'effectuer la transformée de Fourier numérique d'un signal de durée infinie, on limite la période d'échantillonnage de v(t) à une fenêtre de largeur Tf. Pratiquement, cela équivaut à la multiplication de v(t) par un signal w(t) [25].

Plusieurs fenêtres sont utilisées :

- La fenêtre rectangulaire dont l'expression est donnée par :

$$w(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } t \prec 0 \\ 1 & \text{si } 0 \le t \le T_f \\ 0 & \text{si } t \succ 0 \end{cases} \quad \text{.....IV.6}$$

- La fenêtre de Hanning :

$$w\ (t)\ =\ \frac{1}{2}.\left(\ 1\ -\ \cos\ \left(\ \frac{2\ \pi\ .t}{T_{\ f}}\right)\right)\ \text{.....IV.7}$$

- La fenêtre de Hamming :

$$w\,(t)\ =\ 0\,.54\ -\ 0\,.46\ .\cos\ \left(\ \frac{2\,\pi\,t}{T}\right)\ \text{.....IV.8}$$

- La fenêtre de Blackman :

$$w(t) = 0.42659071\ -0.49656062\ .\cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)+0.07684867\ .\cos\left(\frac{4\pi t}{T}\right)\text{.....IV.9}$$

- La fenêtre de Blackman-Harris :

$$w(t)\ =\ 0\,.42323\ \ -0\,.49755\ \ .\cos\left(\frac{2\,\pi t}{T}\right)+\ 0\,.07922\ \ .\cos\left(\frac{4\,\pi t}{T}\right)\text{.....IV.10}$$

IV.5.4 Influence du fenêtrage

Le choix d'une fenêtre est nécessaire car cela nous permet de limiter une partie du signal à traiter. On transforme le signal du départ à un signal de puissance finie. On peut dire à présent que la DFT correspond à une série de Fourier du signal rendu périodique, donc de période T.

La fenêtre rectangulaire est la plus utilisée, surtout dans les cas ou on peut choisir le temps du début et de la fin de l'échantillonnage à l'instant ou le signal s'annule, cela permet d'avoir une jonction du signal aux temps $n.T$ lorsque n prend les valeurs de zéro et de N (n =0, n =N) pas brusque.

Si par contre la jonction du signal au début et de la fin de l'échantillonnage est brusque la fenêtre rectangulaire sera forcément mauvaise car les sauts aux extrémités génèrent artificiellement des hautes fréquences qui seront des harmoniques parasites. Il faut donc dans ce cas choisir une des autres fenêtres beaucoup plus appropriées que la fenêtre rectangulaire.
Les autres fenêtres (Hanning, Hamming, …) convergent doucement vers zéro aux extrémités n=0 et n =N. Cela nous permet d'éviter que la mauvaise jonction ne fasse apparaître des harmoniques parasites mais cela au prix d'une perte en 'précision' au voisinage de la fréquence fondamentale.

Une jonction 'en douceur' se rencontre dans certains cas pratiques, comme dans notre cas par exemple, l'analyse des courants dont la fréquence fondamentale est connue. Nous allons donc chercher à adapter la fréquence d'échantillonnage pour que la longueur de la fenêtre Tf soit un multiple entier de la période du courant T ($T = 2.\pi.f$).

En conclusion, si le système à analyser est connu et si la fréquence d'échantillonnage s'adapte facilement, alors la fenêtre rectangulaire peut nous garantir un très bon résultat. Si au contraire il n'y a aucune possibilité de synchroniser l'échantillonnage avec le signal, alors un fenêtrage plus réfléchi s'impose [25].

IV.5.5 Les fréquences discrètes :

Lors du traitement numérique de la transformée de Fourier on ne peut obtenir que des fréquences discrètes. Cela reviens à diviser le domaine fréquentiel en N intervalles.
L'incrément fréquentiel vaut Δf = fe/N et les fréquences analysées, au nombre de N, sont :

$$f = k.\Delta f = k.{fe}/{N} \quad \text{.....IV.11}$$

Cette discrétisation de la fréquence n'est rien d'autre qu'un échantillonnage dans le domaine spectral et les résultats des opérations d'échantillonnage et de multiplications vues plus haut pour l'espace temps s'appliquent également dans l'espace des fréquences.

IV.5.6 Relations temps-fréquence

Selon la théorie de Shannon, on doit représenter un signal sinusoïdal par au moins deux échantillons par période. Donc si f_e est la fréquence d'échantillonnage du signal, la fréquence la plus élevée qui peut être représenté aura pour valeur $f = {fe}/{2}$. On négligeant les fréquences négatives, le spectre des fréquences qu'on peut obtenir sera compris dans l'intervalle 0<f<fe/2.

Dans la pratique on résume la relation entre le temps et les fréquences par les équations suivantes [20, 25] :

On posant :

Tf : temps, ou fenêtre, d'échantillonnage du signal dans le domaine temporel.

N : le nombre d'échantillons.

fe : fréquence d'échantillonnage dans le domaine temporel.

Te : la période d'échantillonnage dans le domaine temporel.

$$T_e = \Delta t = Tf / N \quad \text{……IV.12}$$

$$f_e = 1 / T_e \quad \text{…..……..IV.13}$$

$$\Delta f = f_e / N = 1 / N . T_e \quad \text{……IV.14}$$

Donc l'expression de la fréquence est donnée par :

$$f(n) = n.\Delta f \quad \text{……..IV.15}$$

avec n = (1, 2, …….n/2) ;

IV.5.7 Calcul des coefficients de Fourier :

Le calcul des coefficients de Fourier permet de déterminer les amplitudes des différentes composantes sinusoïdales qui composent le signal. Connaissant Δf et N on peut déterminer pour chaque composante son amplitude et sa fréquence.

Les coefficients de Fourier sont données par :

$$a_0 = \sum_{k=0}^{N-1} x[k] / N \quad \text{……....IV.16}$$

$$a_n = (\sum_{k=0}^{T=1} x[k].\cos(2.\pi.n.k / N)).2 / N \quad \text{…….IV.17}$$

$$b_n = (\sum_{k=0}^{T-1} x[k]\sin(2.\pi.k / N)).2 / N \quad \text{….IV.18}$$

a_0 est la composante continue; a_n et b_n sont les composantes horizontale et verticale de la composante A_n.

$$A_n = \sqrt{a_n{}^2 + b^2{}_n} \quad \text{……IV.19}$$

VI.6 Partie Software :

VI.6.1 Programme d'acquisition de données :

Apres avoir configuré la carte et installé son pilote advantech DLL driver qui offre une série de fonction qui facilitent la communication avec les entrées sortie de la carte, on doit concevoir un programme qui effectuera la lecture des mesures à l'entrée du PC puis les enregistrer dans le disque dur sous forme d'un fichier. Advantech DLL driver offre la possibilité de travailler avec différents langages de programmation les plus utilisé, qui sont: Visual C++, Visual Basic, Borland C++ Builder et Borland Delphi. Quant a nous, on a choisi de travailler avec Delphi. Voir annexe II.

VI.6.1.1 Structure fondamentale d'un programme avec DLL driver :

Pour l'écriture du programme on utilise des fonctions préalablement prédéfinis par le concepteur du driver. La structure fondamentale est donnée par l'organigramme suivant [14]:

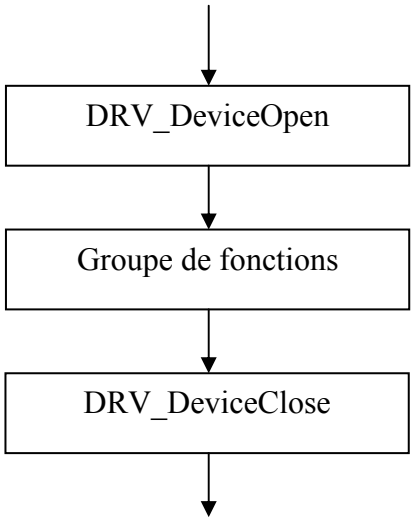


Figure IV.6 Structure d'un programme d'acquisition avec Advantech DLL driver

Les programmes d'acquisitions commence par la fonction DRV_DeviceOpen pour charger le pilote et initialiser la carte et se termine par sa désactivation. Alors que la composition du groupe de fonction dépend de type de lecture à effectuer qui varie d'une lecture d'un seul canal à plusieurs lectures de plusieurs canaux.

VI.6.1.2 Organigramme de plusieurs lectures d'un seul canal :

Dans cet organigramme on retrouve le groupe de fonction nécessaire à une lecture de plusieurs données d'un seul canal. Tout en spécifiant le numéro du canal de lecture et de son gain.

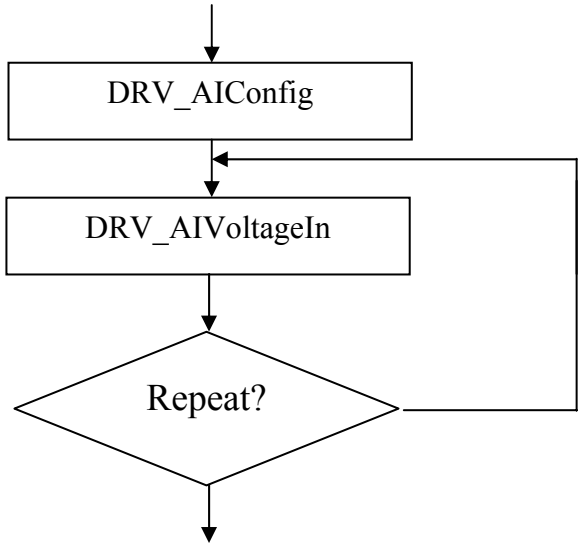


Fig IV.7 Lecture de données d'un seul canal

VI.6.1.3 Organigramme de plusieurs lectures de plusieurs canaux :

Pour la lecture des données de plusieurs canaux, on doit spécifier le canal du début de lecture et celui de la fin ainsi que le gain qui peut être soit global donc identique à tous ou individuel.

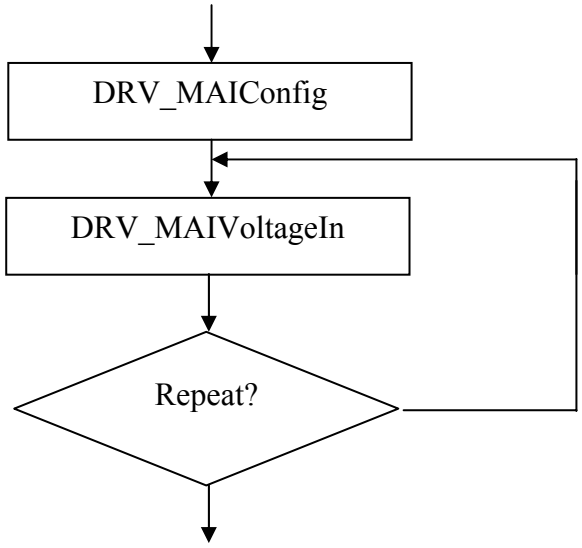


Figure IV.8 Lecture de données de plusieurs canaux

VI.6.2 Calibrage de la chaîne d'acquisition :

La carte d'acquisition comme toute la chaîne d'acquisition est caractérisée par un gain et un point zéro, une fois connus, ils nous permettent de retrouver les grandeurs réelles des valeurs de tensions et de courants mesurés. Ces corrections sont à introduire dans le programme d'acquisition de données.

Grandeur réelle = (lecture – offset). Gain.

Les gains de la chaîne d'acquisition pour notre cas, que nous avons déterminé expérimentalement sont respectivement pour la chaîne courant et la tension :

Gc = 220
Gv = 12

VI.6.3 Organigramme de génération du courant de référence :

Après avoir fait l'acquisition des données, on peut maintenant les traiter numériquement pour pouvoir générer le courant de référence pour un filtre actif parallèle.

Cet organigramme renvoie au chapitre trois (03) ou la méthode des puissances instantanée est détaillée, ainsi qu'à la méthode d'utilisation de la DFT d'abord pour le filtrage des deux puissances active et réactive instantanées en calculant leur composante continue successif, puis à l'analyse spectrale du courant de la charge ainsi que le courant compensé.

Pour l'exécution du programme, on a besoin de connaître préalablement la durée de l'échantillonnage (Tf) et le nombre d'échantillons (N); ce qui reviens à connaître la fréquence et la fenêtre d'échantillonnage (fe et Tf respectivement) nécessaires pour maîtriser les entrées et les sorties de la DFT.

On rappelle que la fréquence d'échantillonnage est déterminée par le système d'acquisition de données, par conséquent pour obtenir des résultats reflétant la réalité du signal traité on a l'obligation de se soumettre à une certaine logique tell que développé au chapitre IV traitant de la relation temps fréquence en ce qui concerne l'analyse spectrale, ainsi que l'opération de filtrage qui consiste à calculer la composante continue des deux puissances à filtrer. Cela peut se traduire par l'obligation de choisir la fenêtre Tf égale à la période de la fondamentale du signale à traiter.

L'écriture de ce programme sous Delphi nous permet d'avoir une interface graphique qui facilite la manipulation du programme. Grâce à la programmation événementielle, en cliquant sur un bouton, on peut visualiser graphiquement respectivement la forme du courant

et de la tension de ligne, du courant de référence, du courant sans les harmoniques et avec ou sans le réactif ainsi que le spectre harmonique du courant de la charge avant et après compensation. Voici, si dessous, l'organigramme global du programme élaboré sous délphi.

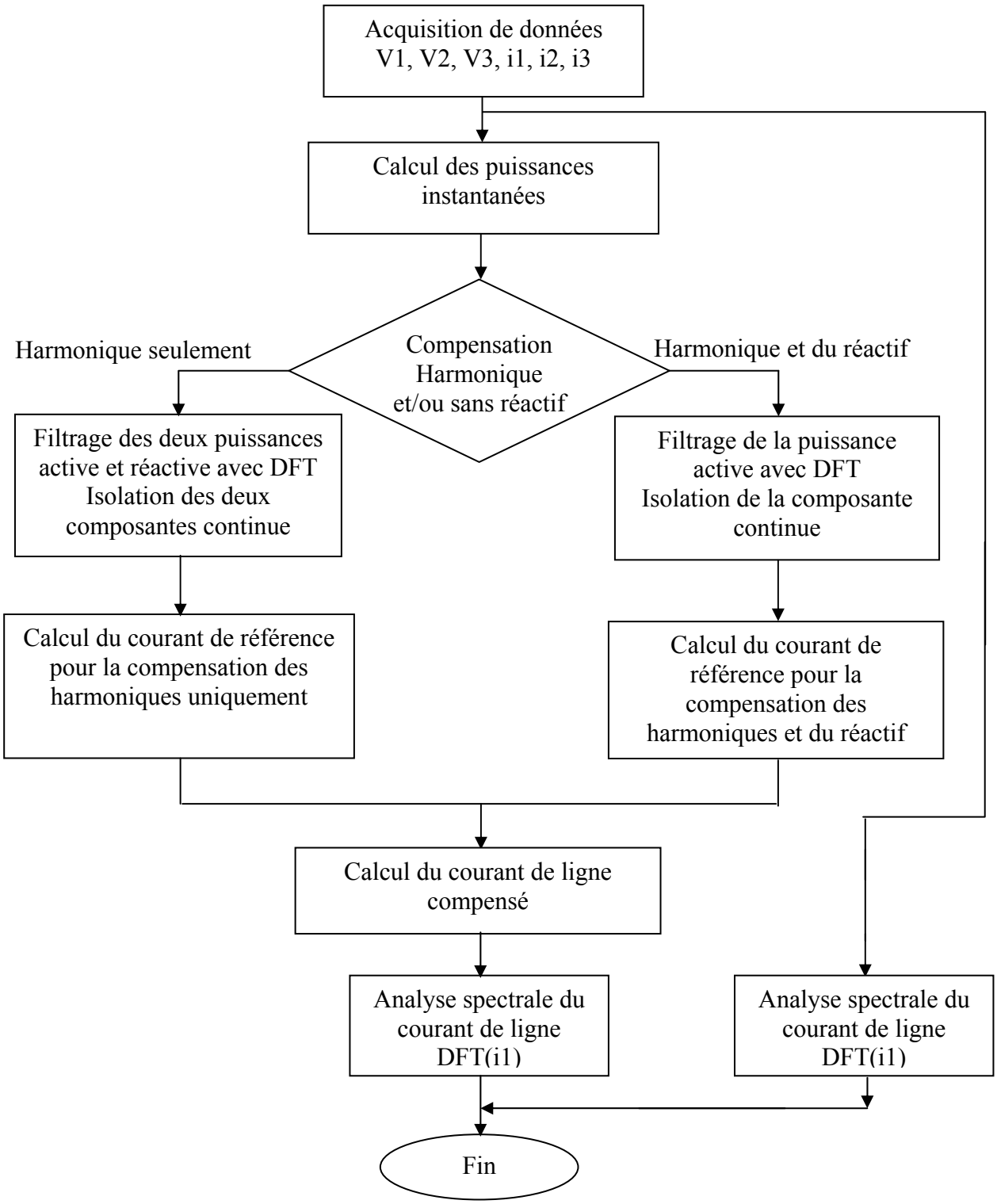


Figure IV.9 Organigramme de calcul du courant de référence et analyse spectral

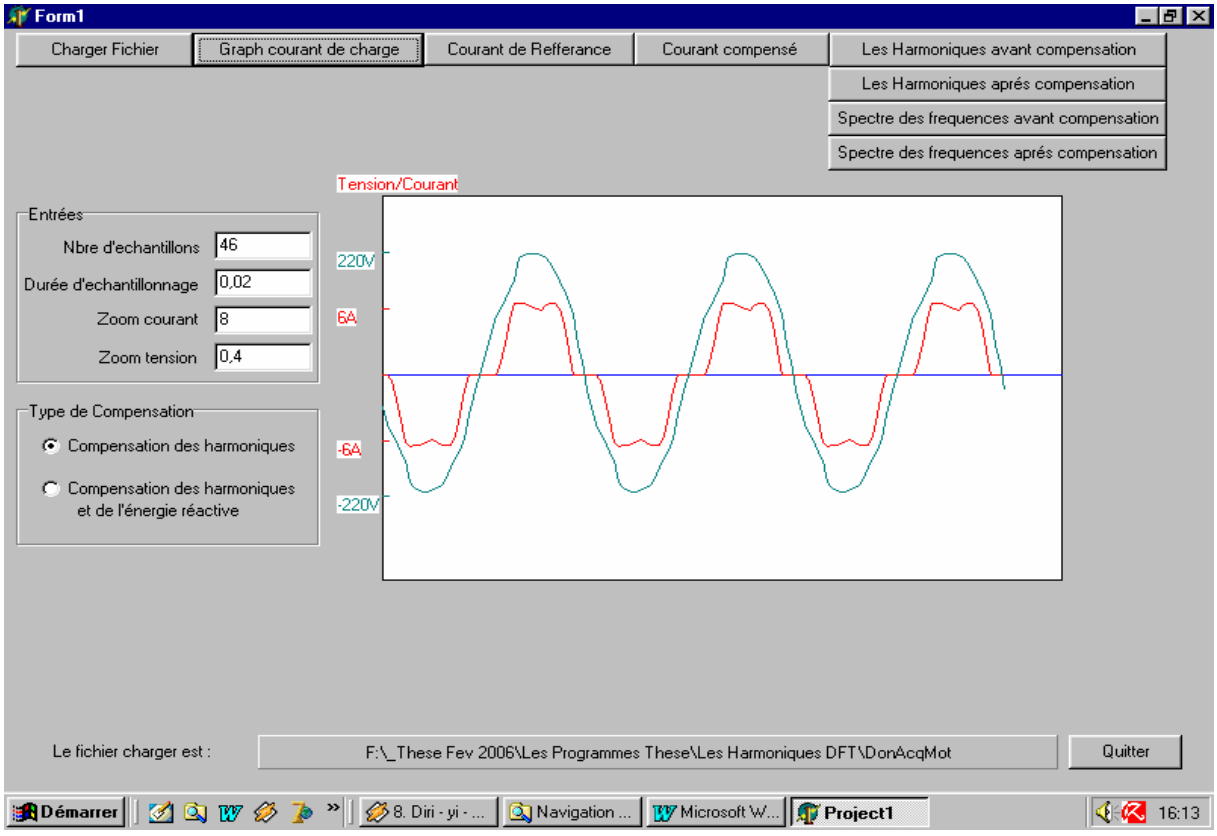
IV.7 Utilisation du programme :

On a rédigé le programme de l'identification des harmoniques et génération du courant de référence pour un filtre actif sous Delphi. Son interface graphique et représentée ci dessous. On a effectué d'abord une acquisition de données avec une fréquence d'échantillonnage de l'ordre de 2300 Hz, ce qui correspond à un temps d'échantillonnage qui avoisine 0.0004347 seconde. Les valeurs que nous avons mesurées sont enregistrées dans un fichier.

Pour traiter les données et affiché les résultats, on charge tout d'abord le fichier dans le programme et on spécifie les entrées :

- Le nombre d'échantillons, dans notre cas Nbre = 46 ;
- La durée d'échantillonnage, dans notre cas Te = 0.02 ;
- Le type de compensation ;

Puis on exécute les procédures nécessaires [voir annexe] pour pouvoir visualiser tous les autres résultats.



IV.7.1 Résultats expérimentaux :

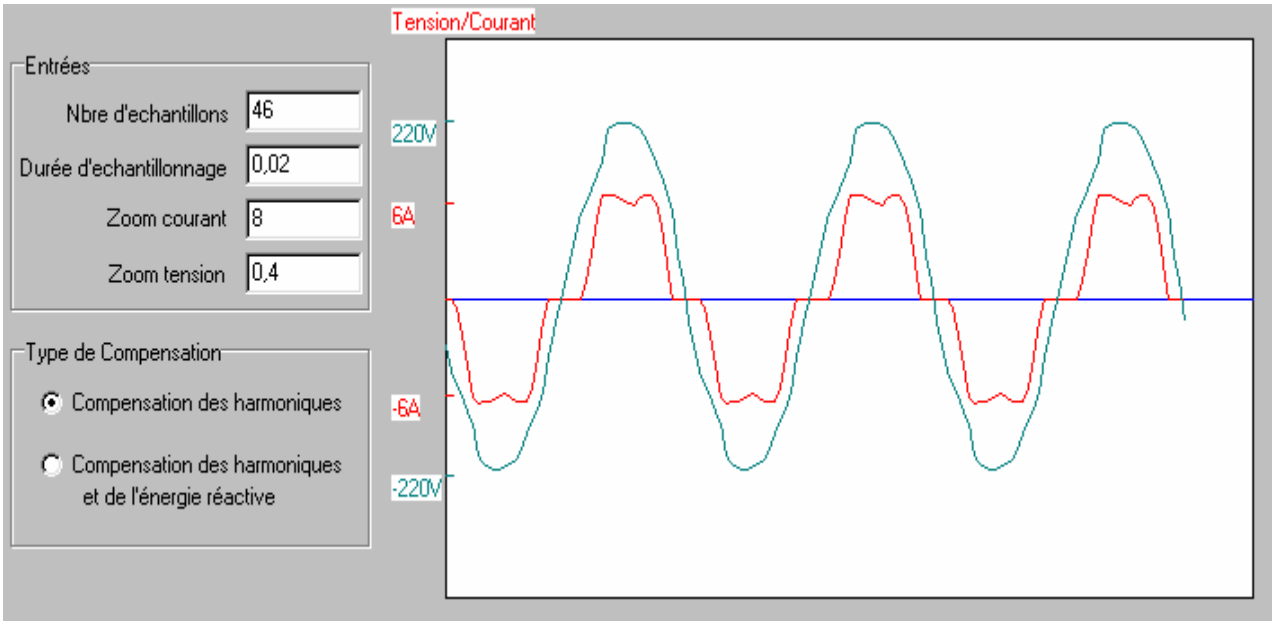


Figure IV.10 Courant de charge et tension de ligne avant compensation

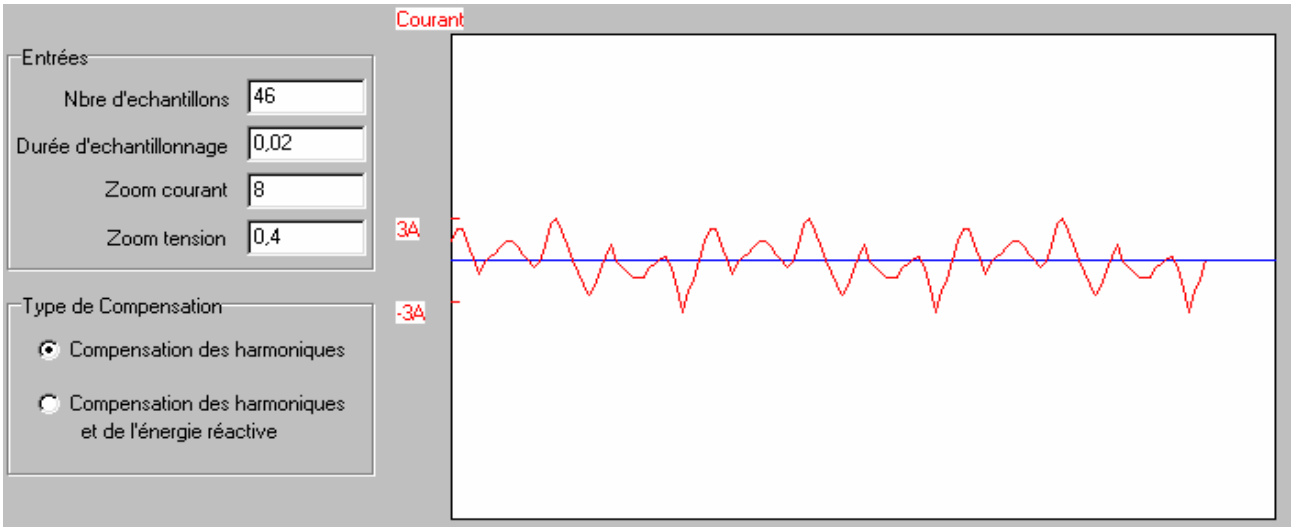


Figure IV.11 Courant de référence pour la compensation des Harmoniques

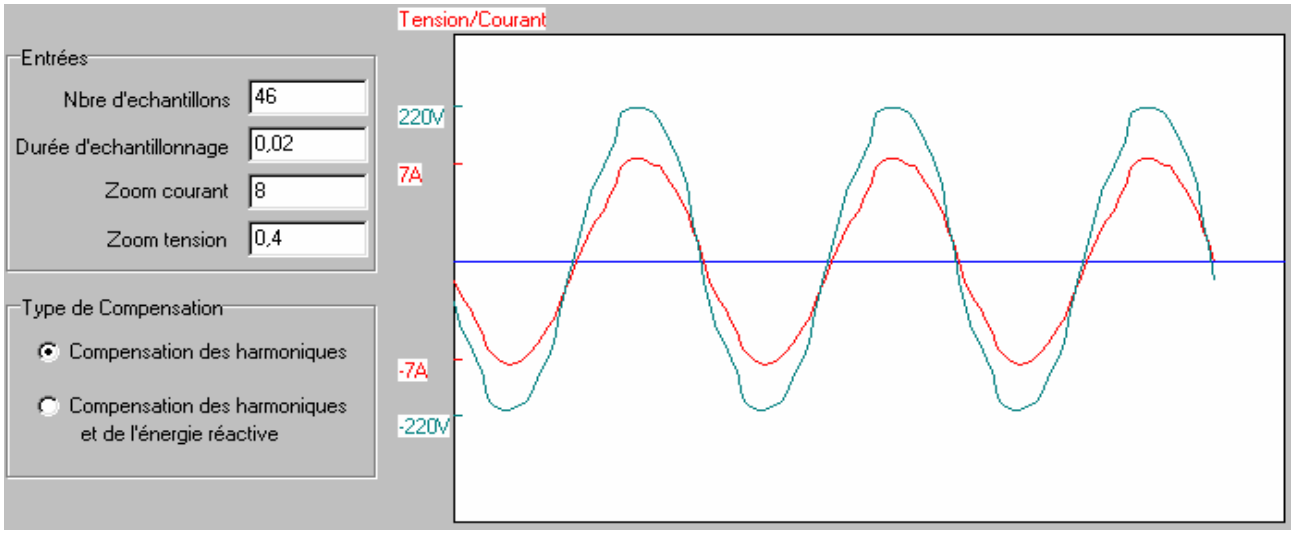


Figure IV.12 Le courant après compensation des harmoniques

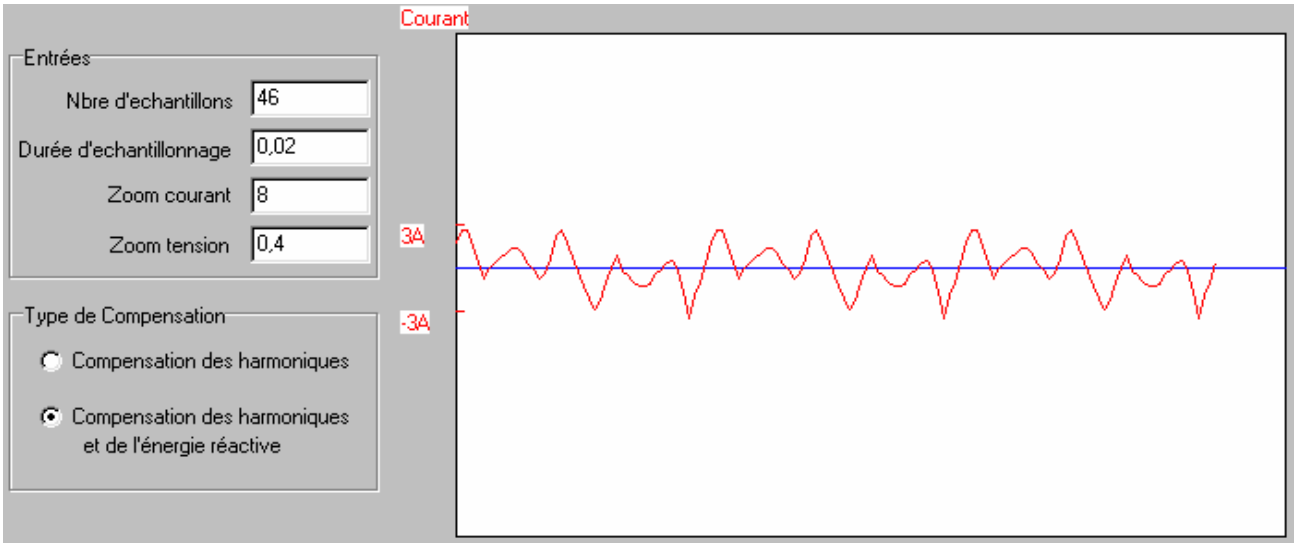


Figure IV.13 Courant de référence pour la compensation des harmoniques et du réactif

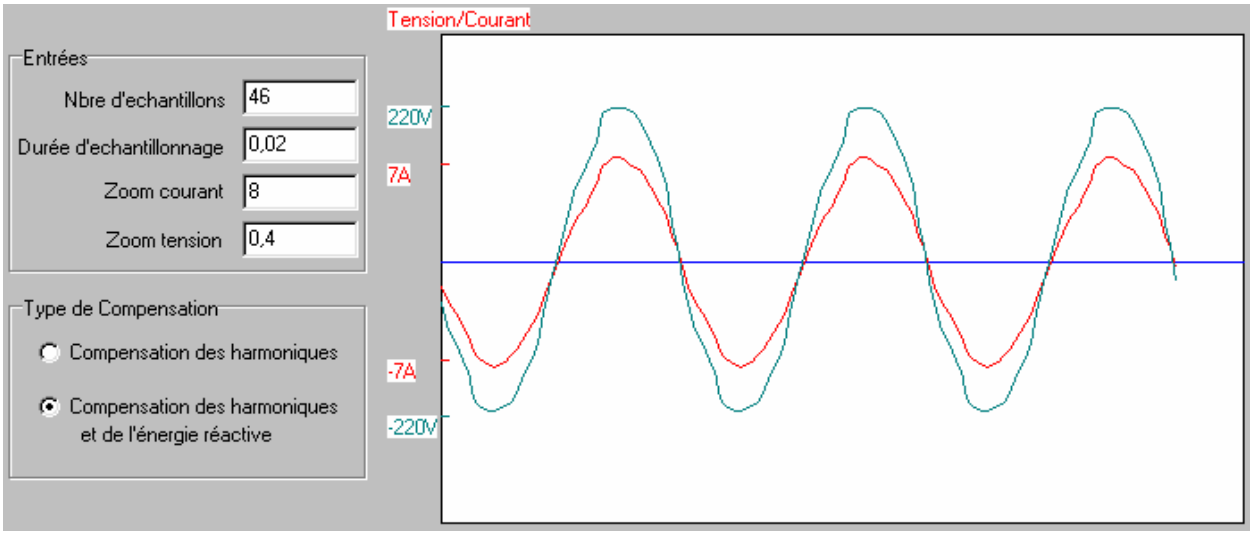


Figure IV.12 Le courant après compensation des harmoniques et du réactif

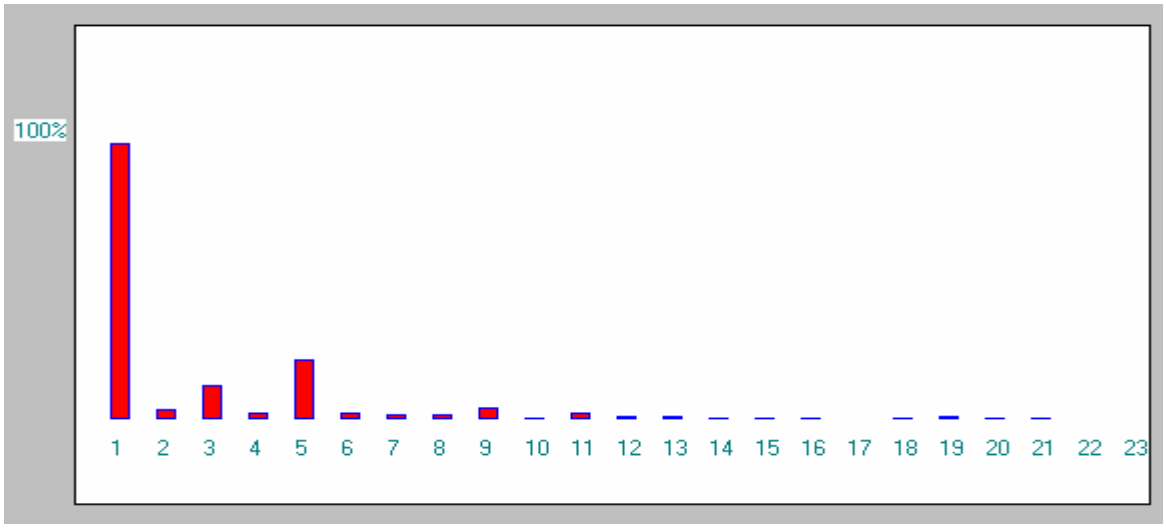


Figure IV.15 Spectre du courant avant compensation des harmoniques

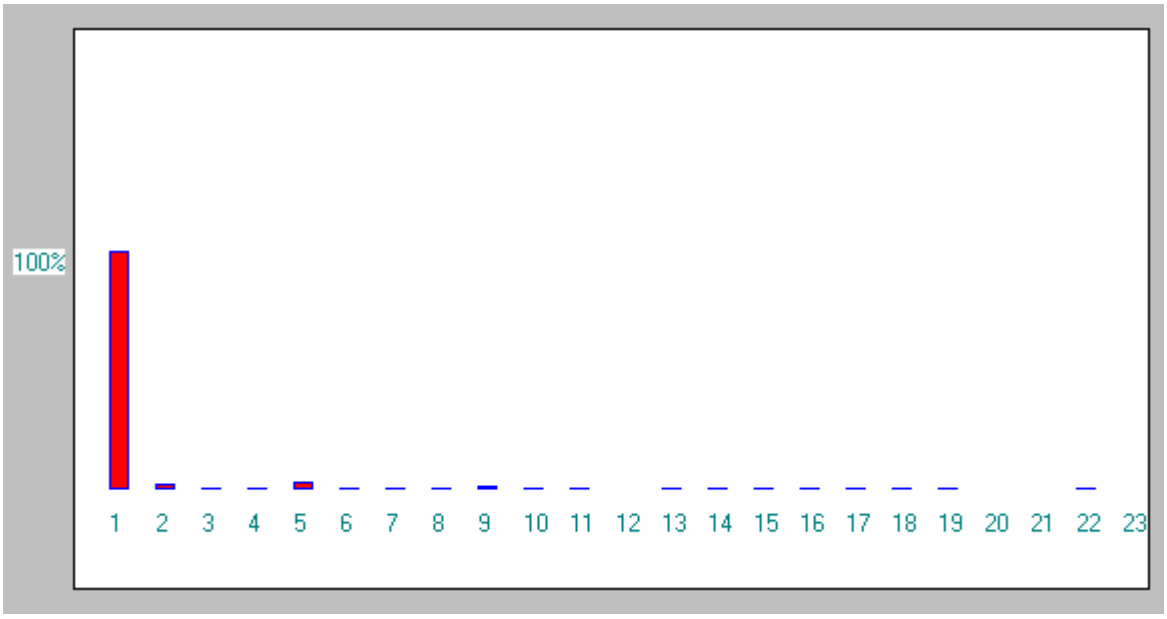


Figure IV.16 Le spectre harmonique du courant après compensation des harmoniques

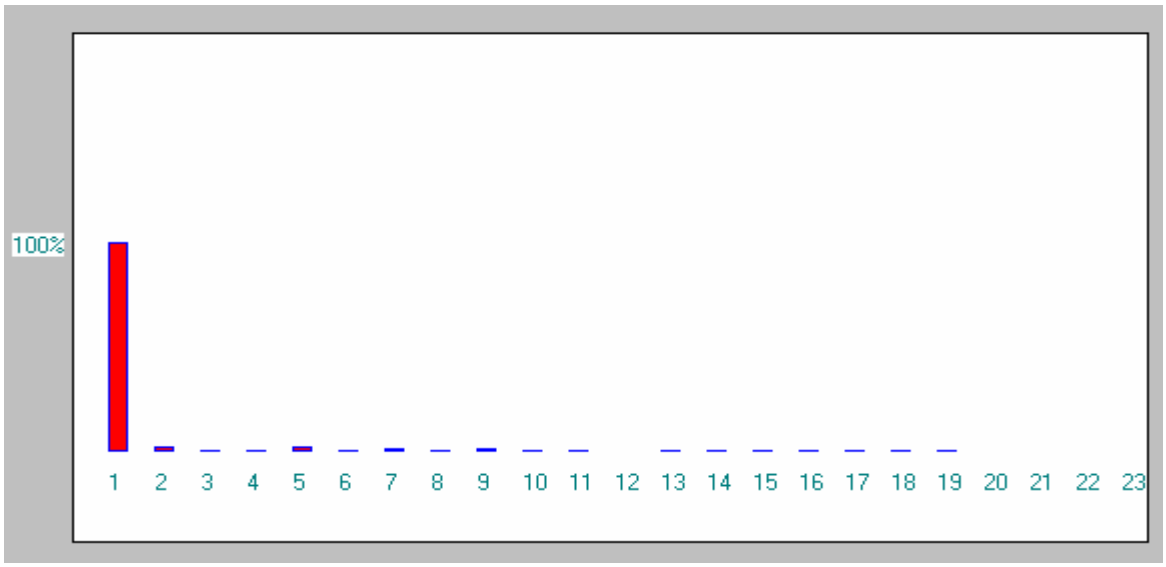


Figure IV.17 Le spectre harmonique du courant après compensation des harmoniques et du réactif

IV.7.2 Interprétation des résultats :

Pour commencer, remarquant que les résultats obtenus dans le cas pratique se rapprochent de ceux qu'on a obtenus dans la simulation, au troisième chapitre lors de la validation de la méthode des puissances instantanées. On remarque néanmoins une légère perturbation de la tension qui se répercute sur le courant compensé, elle est du à l'utilisation des appareils de mesures (capteur de courant) et aux performances de la chaîne d'acquisition.
Le courant de charge tel que représenté par la figure IV.10 et très ondulé son spectre harmonique représenté par la figure IV.15 montre le taux élevé d'harmonique que contient ce courant, les harmoniques avec le taux le plus élevé dont plus dangereuses sont la troisième (rang 03), la cinquième (rang 05) et la neuvième (rang 09) avec respectivement les 11,43%, 22,24% et 4,77%. Néanmoins, Les harmoniques identifiées ne sont pas seulement générées par le redresseur, à celles générées par ce dernier s'ajoutent celles déjà présente dans le réseau.

Le courant de référence généré représenté par la figure IV.11 ne peut être considéré efficace que s'il arrive à annuler les courants harmoniques contenus dans le courant de la charge.

La soustraction du courant de référence du courant de la charge nous permet de prévoir la forme du courant une fois ce dernier compensé. La figure IV.12 représente ce courant, il prend une forme presque sinusoïdale avec un certain déphasage par rapport à la tension représenté sur la même figure, ce qui montre que l'énergie réactive n'est pas compensée. L'analyse spectrale de ce courant représenté par la figure IV.16 montre une baisse très sensible des taux individuels des harmoniques des différents rangs ce qui veux dire que les harmoniques sont compensées.

En plus de la compensation des harmoniques, on peut compenser aussi le courant réactif. La figure IV.13 montre le courant de référence nécessaire à la compensation des harmoniques et du réactif, de la soustraction de ce courant de celui de la charge résulte le courant représenté par la figure IV.14 qui est le courant après la compensation des harmoniques et du réactif. On remarque qu'il est en phase avec la tension ce qui montre que le courant réactif est compensé et son analyse spectrale représentée par la figure IV.17 montre que les harmoniques elles aussi sont compensées.

IV.8 conclusion :

Au chapitre III on a détaillé la méthode des puissances instantanées qu'on a validé par simulation, dans ce chapitre, on a relevé l'un des paramètres les plus importants de la chaîne d'acquisition de données celui de la fréquence d'échantillonnage $T_e = T_{acq}$ dont dépend le travail de la DFT lors de l'analyse spectrale et de filtrage.

On a rédigé sous Delphi le programme qui génère les courants de référence et identifie les harmoniques en s'appuyant sur la méthode des puissances instantanées et la DFT. Pour son fonctionnement le programme à besoin, comme paramètres d'entrées, des valeurs de la tension et du courant aux bornes de la charge non-linéaire qu'on peut obtenir à l'aide de la chaîne d'acquisition de données ainsi que le nombre d'échantillons et la fenêtre d'échantillonnage qui sont préalablement défini, puisque on a la fréquence d'échantillonnage est celle d'acquisition, donc connue, alors que la fenêtre est la période ou le multiple de la période du fondamental du signale à traiter, et la période est de 0.02 s.

On a utilisé pour l'acquisition de données un isolateur d'amplification et une carte PC d'acquisition de technologie advantech PCL-818L avec son extension la carte de connexion externe PCLD-8115. Avec la fréquence d'échantillonnage totale de la chaîne égale à 2300 hz

Apres l'acquisition de données et l'exécution du programme, les résultats obtenus montrent le bon fonctionnement de la méthode des puissances instantanées et du programme lui-même.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Les effets néfastes induits par la présence des harmoniques dans le réseau sur les différents équipements électriques ne sont plus à démonter. Plusieurs normes nationales et internationales et de plus en plus contraignantes sont mises en œuvre dans le but d'améliorer la qualité de l'énergie électrique.

En effet, les fournisseurs et les consommateurs sont très souvent tenus, par des conventions, au respect d'une certaine réglementation qui leur impose des restrictions au service d'une certaine qualité de l'énergie électrique. Entre autre des maxima en matière des taux d'harmoniques de courant injecté dans le réseau.

Apres les solutions déjà adoptées comme le surdimensionnement des installations et le filtrage passif, le filtrage actif commence à prendre le relais. Pour la compensation des courants perturbés le filtre actif parallèle est la solution la plus adaptés, flexible, il peut compenser en temps réel les perturbations en courant en tout ou en partie, soit les courants harmoniques, le réactif ou les courants déséquilibrés.

Pour la génération du courant de référence pour le filtre actif parallèle, nous avons choisi parmi d'autres la méthode des puissances instantanées pour son efficacité, sa simplicité et sa facilité d'implantation, que nous avons en suite validé par simulation sous simulink. Comme nous avons détaillé la méthode de la DFT (Transformée de Fourier discrète) pour effectuer les opérations de filtrage et d'analyse spectrale que nous avons préféré a la FFT, ailleurs beaucoup plus utilisée, pour sa précision d'abord et sa rapidité lors du filtrage en suite. Puisque pour filtrer la puissance fondamentale on se limite au calcule de la composante continue de cette dernière.

Dans la partie pratique nous avons monté un système d'acquisition de données pour lire les grandeurs instantanées du courant et de la tension aux bornes de la charge non-linéaire, un convertisseur statique dans notre cas qui débite sur une charge RL, avec une fréquence d'échantillonnage de 2300 Hz.

Nous avons rédigé un programme sous Delphi qui nous permet de visualiser graphiquement la forme de la tension et du courant de la charge. Puis en utilisant la méthode des puissances instantanées et la DFT déterminé le courant de référence dans le cas de compensation des seules harmoniques et celui de la compensation des harmoniques et du courant réactif, pour les visualiser graphiquement en suite. Puis déterminé les valeurs et la forme du courant délivré par le réseau sans les harmoniques et le réactif.

Conclusion générale :

Grâce à la fréquence d'échantillonnage de la chaîne d'acquisition de données nous pouvons déterminer le taux des harmoniques du courant jusqu'au rang 23.

Avec la DFT on identifie les taux des harmoniques de courant présent avant et après la soustraction du courant de référence calculé à partir de la méthode des puissances instantanées.

Après l'affichage du spectre du courant de charge nous remarquons des taux très élevés pour les harmoniques du rang 3, 5 et 9 qui avoisine respectivement 12%, 22% et 5% du courant fondamentale.

Le spectre du courant après la soustraction du courant de référence, montre une baisse très sensible des taux des harmoniques, pour la 3eme et la 9eme il est de l'ordre de 1% alors que celui de 5eme harmonique est de 3%.

Les résultats obtenus montrent bien que notre programme avec la méthode des puissances instantanées et la DFT peut identifier les harmoniques créées par une charge triphasée non-linéaire et générer correctement le courant de référence pour leur compensation.

Nous espérons que ce travail que nous avons effectué sera poursuivi par d'autre en améliorant le programme et en effectuant pratiquement une compensation des harmoniques et du réactif.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie :

[01] H. Akagi, A. Vabac et S. Atoh
Control strategy of active power filters unsing multiple voltage source PWM converters
IEEE Tranactions on Industry Applications, vol. 22. No. 3 1986.

[02] M. A. E. Alali
Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension (Automatisation des systèmes de puissance électriques)
Thèse ULP strasbourg Septembre 2002

[03] R. Azouaou
Ecoulement de puissance harmonique dans les réseaux arborescents et maillés.
Sonelgaz Conférence sur les perturbations harmoniques. Avril 2001

[04] S. Battacharaya, D. M. Divan et B. B. Banerjee
Parallel active filter System implementation and Design Issues for utility interface of Adjustable speed Drive Systems
IEEE conf. 1996

[05] M. C. Benslimane
Compensation globale des harmoniques « Etude, dimensionnement et commande d'un filtre actif parallèle »
Thèse Magister Université de Boumerdes mai 2003

[06] S. Buso, L. Malesani et P. Mattavelli
Comparison of Current Control Techniques for Active Filter Applications
IEEE transactions on industrial electronics, VOL. 45, NO. 5, OCTOBER 1998

[07] C. Chou, C. Liu, J. Lee et K. Lee
Optimal Planning of Large Passive-Harmonic-Filters Set at High Voltage Level
IEEE transaction on power systems, vol. 15. No. 1 February 2000

[08] A. Dabrowski, K. Sozanski
Control Circuit for Active Power-Harmonic-Compensation Filter in Power Systems – Realized with Digital Signal Processor TMS320C50

[09] T. Deflandre et P. Mauras
Les Harmoniques sur les réseaux électriques
Edition EYROLLES 1998

[10] T. Deflandre et P. Mauras
La maîtrise des harmoniques sur les réseaux industriels et tertiaires.
EDF décembre 1996

[11] J. du Parc
Réseaux industriels Correction de la puissance réactive et des harmoniques
Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique D 3 215

[12] L. G. Durante et P. K. Ghosh
Active Power Measurement in Nonsinusoidal Environments
IEEE transaction on power systems, vol. 15. No. 3 August 2000

[13] Document advantech
Document technique, Carte d'acquisition PCL818LS

[14] Document advantech
Advantech DLL Drivers User's Manual and Programmer's Reference Ducument advantech
1ere Edition

[15] M. El Habrouk, M.K. Darwish et P. Mehta
Active power filters
IEE Proc. Electr. Power Appl vol 147 N° 5 sept 2000

[16] E. Felice
Perturbations harmoniques
Effets, origine, mesure, diagnostic et remèdes.
Dunode, Paris, 2000

[17] H. Foch, F. Forest et T. Meynard
Onduleur de tension : Structures. Principes. Applications.
Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique D 3 177

[18] O. Français
Acquisition de données
ESIEE 2000

[19] S. Kim et P. N. Enjeti
A New Hybrid Active Power Filter (APF) Topology
IEEE transaction on power electronics, vol. 17. No. 1 August 2002

[20] T. Lachand-Robert
Analyse harmonique, distribution, convolution
Techniques de l'ingénieur, traité Science fondamentales A 142 - 1

[21] P. Ladoux et G. Olle
Compensateur d'harmoniques et de réactif : Etude et dimensionnement
LEEI Toulouse.

[22] C. Lott
Filtrage actif parallèle des harmoniques de courant sur les réseaux industriels : Etude théorique et réalisation d'une maquette à GTO.
Thèse INPL Nancy 1995.

[23] C. Lott, O. Lapiere, H. Pouliquen et S. Saadate
Filtrage actif des harmoniques en courant et en tension des réseaux électrique : modélisation, simulation numérique et expérimentation.
J. Phys III France 7 (1997) 2433 2457

[24] L. Malesani, L. Rosseto et Pμ. Tenti
Active filter for reactive power and harmonics compensation.
IEEE-PESC'86 Power electronics
Spec. Conf. 86CH2310-1

[25] F. Mudry
Cours de traitement du signal
Fmy octobre 2004

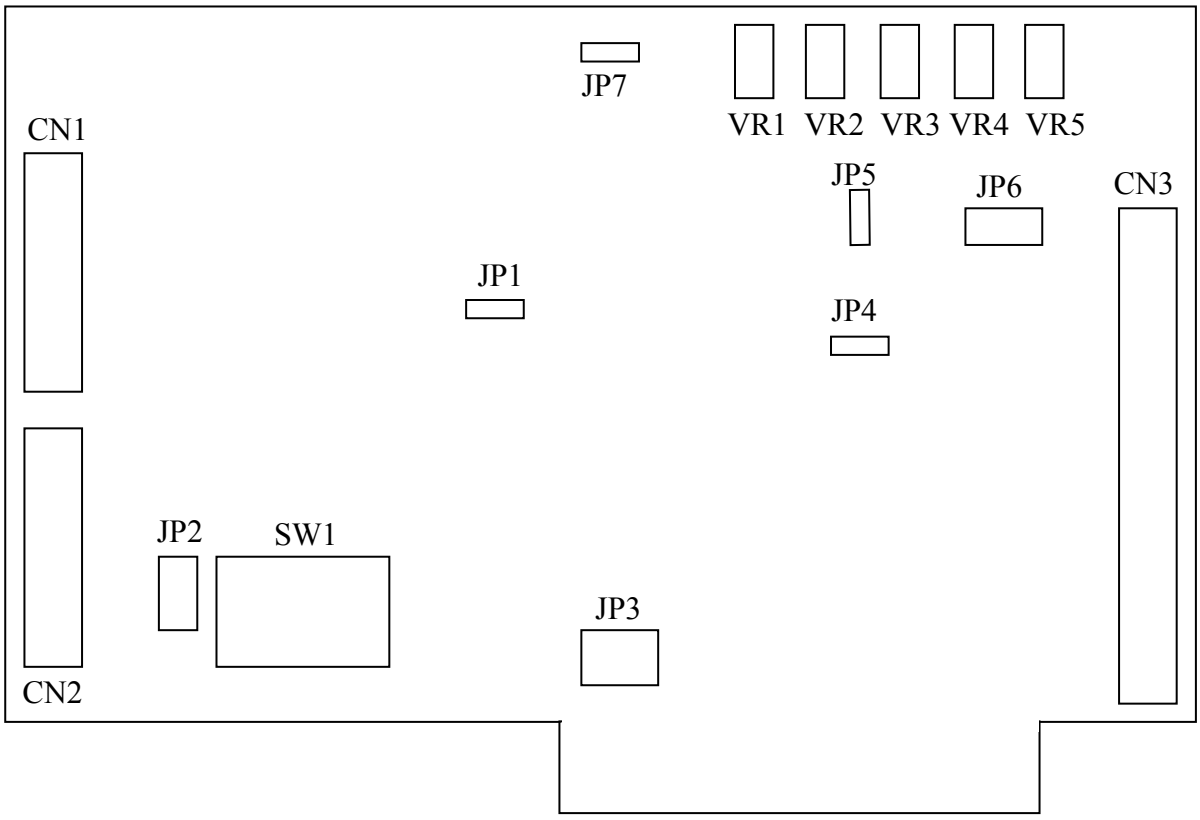
[26] P. Maussion, J. Faucher et M. Grandpierre
Principe de commande numérique en temps réel d'un onduleur a modulation de largeur d'impulsion sur charge non linéaire.
J. Phys. III France 4 1994 p1101-1119

[27] R. Ott
Qualité de la tension
Harmonique
Techniques de l'ingénieur, traité Génie électrique, D 4 264

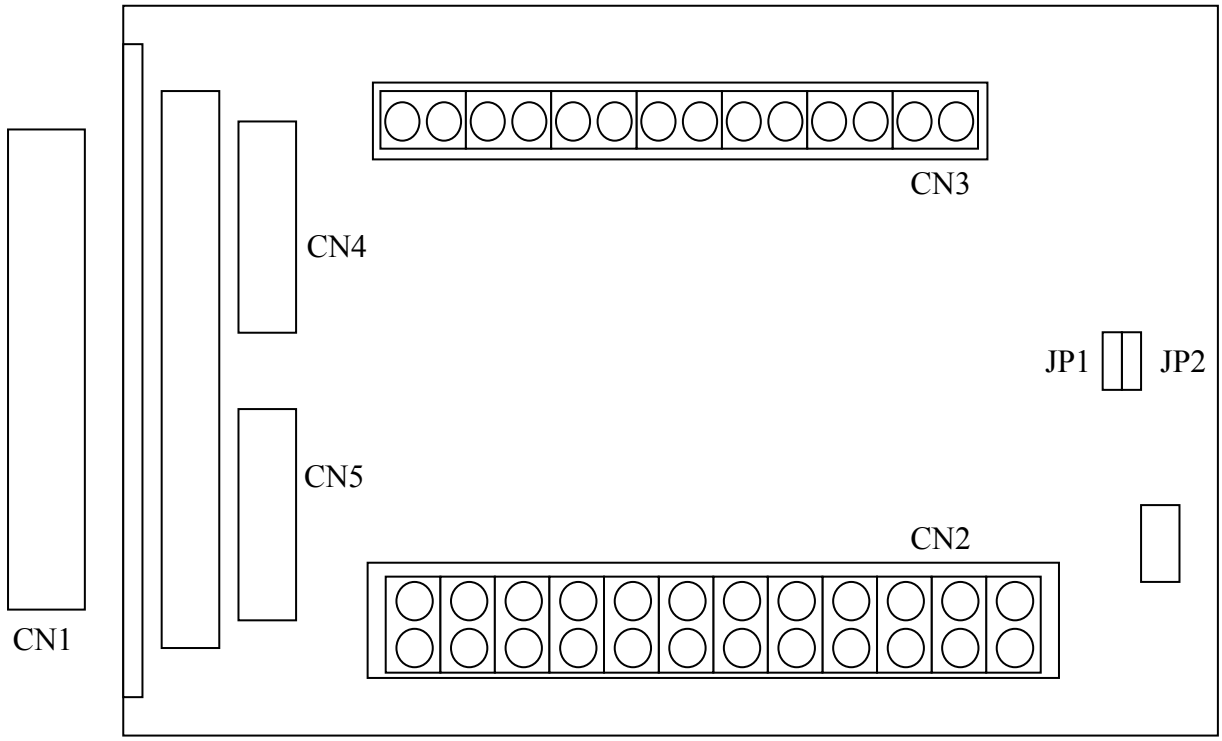
[28] A. Ressad
Problème et impacts des harmoniques sur les réseaux d'énergie électrique
Sonelgaz Conférence sur les perturbations harmoniques. Avril 2001

[29] J. Xu
Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité
These INPL Nancy 1994.

ANNEXES



La carte PCL818L avec localisation des jumpers et du switcher



La carte PCLD8115 avec localisation des jumpers et du switcher

I Chaîne d'acquisition de données utilisée :

Pour mener à terme cette expérience nous avons utilisé un amplificateur d'isolation dans le rôle d'un capteur et de l'amplificateur de mesure puis d'une carte d'acquisition PCL818L avec la carte de connexion externe PCLD8115 et d'un micro-ordinateur doté d'un environnement de programmation Delphi.

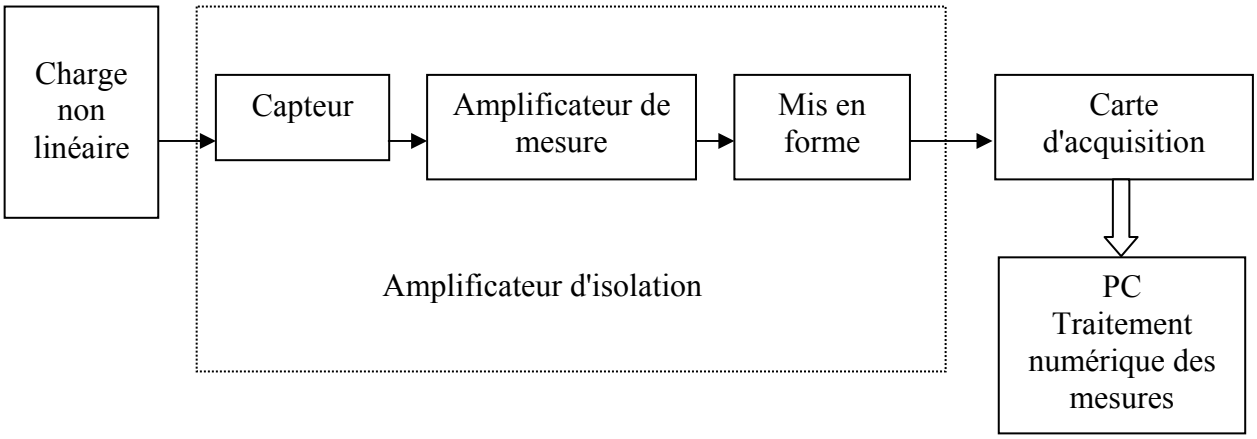


Figure V-1 Structure de la chaîne d'acquisition de donnée utilisée

I.1 Amplificateur d'isolation :

Dans application, en plus d'une isolation galvanique garantissant la sécurité du matériel, l'amplification d'isolation joue le rôle d'un capteur et d'un amplificateur du signal.

Les entrées de l'amplificateur d'isolation sont des tensions qui peuvent atteindre 700V alors que la sortie est de quelques volts avec un rapport de sensibilité réglable ainsi que le gain de l'amplificateur du signal.

Donc pour la mesure de la tension il suffit d'alimenter l'une des entrées de l'amplificateur d'isolation directement par la tension de ligne. Alors que pour la mesure du courant, on utilise un shunt, puis on mesure la tension à travers l'amplificateur d'isolation, tout en sauvegardant la valeur du shunt pour calculer les valeurs du courant équivalent dans le programme.

I.2 La carte d'acquisition PCL818L :

PCL818L est une carte d'acquisition multifonctions de technologie Advantech pour les IBM PC/XT/AT ou ordinateur compatible [13]. Elle se compose de :

- 16 entrées analogiques en mode direct ou 08 entrées analogique en mode différentiel ;
- Le gain programmable pour chaque canal ou entrée ;
- Un convertisseur analogique numérique 12-bit ;
- Un convertisseur numérique analogique ;

- Entrée et sortie numérique ;
- Un timer ou horloge ;
- La carte externe de raccordement PCLD-8115 ;

I.2.1 Le réglage des switchs et des jumpers :

La carte présente une fonction switch et sept (07) jumpers qu'il faudrait bien régler pour une configuration correcte de la carte :

- **Sélection de la base adresse (SW1) :**

Elle nous permet de contrôler les opérations de la carte PCL818L en écrivant ou en lisant des adresses des ports entrées sortie du PC. La carte PCL818L requit une location de 16 adresses consécutives. Les bases adresses valides pour la carte sont entre Hex 000 et Hex3F0.

La base adresse par défaut est Hex 300. Si on a besoin de choisir une autre base d'adresse on a qu'à modifier la position des switchers comme indiqué dans la table suivante :

Les adresses des entrées sorties (SW1)						
Plage des adresses	Les Postions des switchs					
	A9	A8	A7	A6	A5	A4
000-00F	0	0	0	0	0	0
010-01F	0	0	0	0	0	1
. .						
200-20F	1	0	0	0	0	0
210-21F	1	0	0	0	0	1
. .						
300-30F	0	0	1	1	1	1
. .						
3F0-3FF	0	0	0	0	0	0

- **La sélection du canal DMA :**

La carte PCL818L supporte le transfert de données en mode DMA, le jumper JP1 sélectionne le canal (01) ou (03) pour DMA.

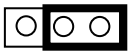
Canal 1

Canal 3

- **Sélection de la fréquence du timer (JP2) :**

On a à choisir entre deux valeurs 1MHz ou 10MHz comme valeur d'entrée au programmable 8254 clock/timer.

10MHZ

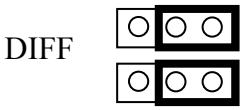


1Mz

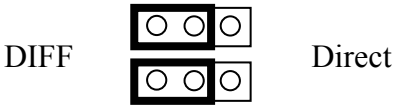
- **Sélection de la configuration des canaux (JP6) :**

Avec la carte PCL818L les canaux d'entrée analogique peuvent être configurés soit en 16 entrées en mode direct soit en 08 entrées en mode différentiel. Le jumper JP6 nous permet d'effectuer cette configuration comme suivant :

16 entrées en mode direct



08 entrées en mode Différentiel

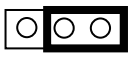


- **Sélection de la plage de variation de la tension (JP7) :**

Le jumper JP7 nous permet de sélectionner la valeur maximale de la plage de variation de la tension d'entrée du convertisseur analogique numérique.

+/- 10V

+/- 5V



I.2.2 Connexion et assignation :

On utilise la carte d'acquisition pour l'introduction des mesures effectuées dans un PC pour qu'en suite effectuer un traitement numérique. On aura donc à utiliser que les ports d'entrées analogiques CN3 en mode direct.

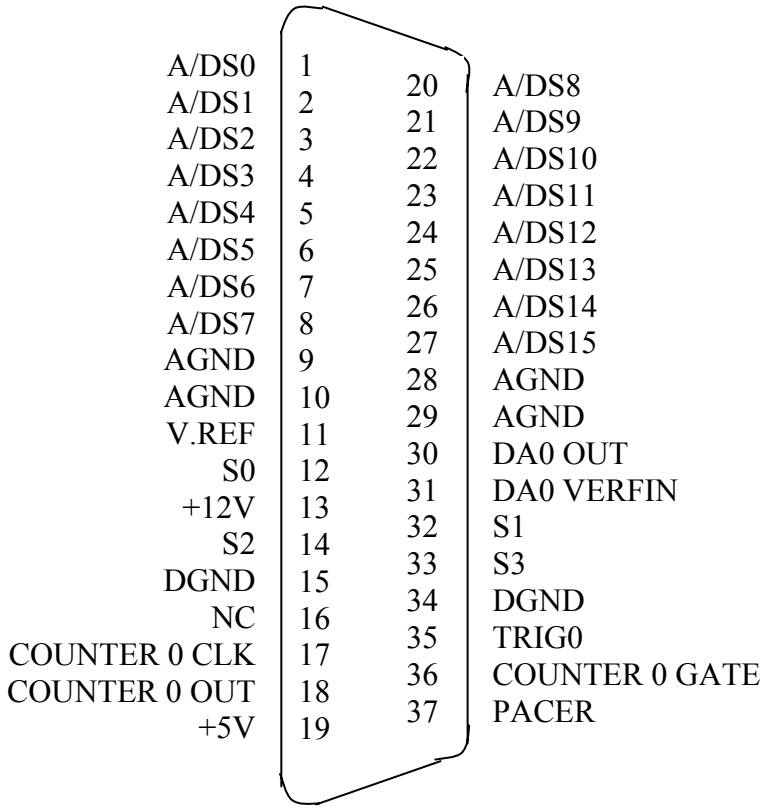


Figure V-2 : le connecteur CN3 – analogique input/ output/ counter
Mode direct

Avec :

A/D S : Analogique input (en mode direct) ;

A.GND : La masse ;

D/A : La sortie analogique ;

CLK : L'entrée horloge de 8254 ;

GATE : Plage d'entrée de 8254 ;

OUT : Le signal de sortie de 8254 ;

VREF : La tension de référence interne ;

VREFIN : La tension de référence externe ;

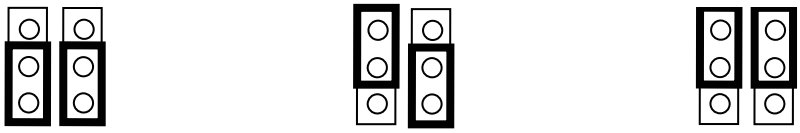
I.2.3 Installation de la carte d'acquisition :

Une fois tous les réglages effectués, on peut installer la carte d'acquisition dans le PC en commençant par monter la carte PCL818L sur la carte mère puis installer le pilote de la carte. Le pilote disponible mis en place par le constructeur est Advantech DLL Drivers [14].

I.2.4 La carte de connexion externe PCLD-8115 :

Cette carte externe rend les connexions avec la carte PCL-818L beaucoup plus facile. Doté d'un câble de connexion avec PCL-818L tout en présentant les canaux d'entrées analogiques (16 en mode direct, sinon 08 en mode différentiel) avec leur circuit de connexion.

Elle contient des jumpers qui permettent la configuration soit en mode direct, mode Différentiel Mode direct Désactivé (mode par défaut)



différentiel ou en mode par défaut [13].

a. **Connexion d'un canal en mode direct :**

En ce mode de fonctionnement, on utilise qu'une seul connexion par canal, la tension est lu entre cette borne et la borne commune (la masse ou le neutre)

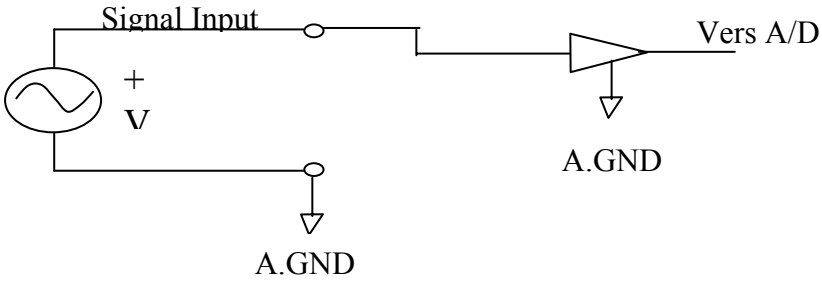


Figure V-3 : Diagramme de connexion en mode direct

b. **Connexion d'un canal en mode différentiel :**

En mode différentiel en utilise deux connexions par canal, la mesure est la différence entre les deux tensions H et L (haut et bas).

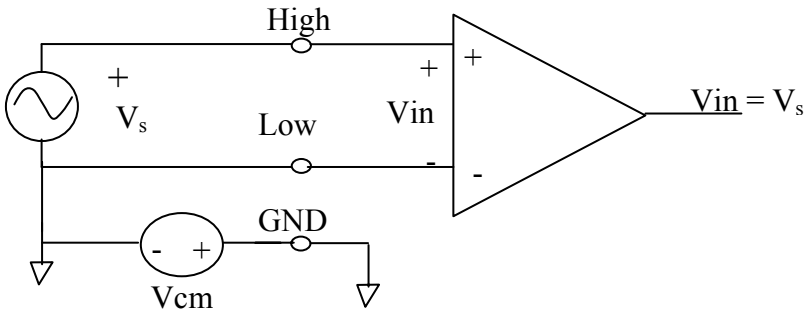


Figure V-4 : Diagramme de connexion en mode direct

La source sous Delphi du programme de génération du courant de référence et d'identification des Harmoniques.

```
unit Unit1;
interface
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  StdCtrls, ExtCtrls;

type
  TForm1 = class(TForm)
    Chargfich: TButton;
    Courantcharg: TButton;

    Quitter: TButton;
    OpenDialog1: TOpenDialog;
    Panel1: TPanel;
    Label3: TLabel;
    Harmonique: TButton;
    ListBox1: TListBox;
    Label4: TLabel;
    Label5: TLabel;
    Label6: TLabel;
    HarCourantComp: TButton;
    CourantFond: TButton;
    CourantRefferance: TButton;
    Label8: TLabel;
    Entrees: TGroupBox;
    Edit1: TEdit;
    Edit2: TEdit;
    Edit3: TEdit;
    Label9: TLabel;
    Label10: TLabel;
    Label11: TLabel;
    TypeComp: TGroupBox;
    RdHarmo: TRadioButton;
    RdHarmoReact: TRadioButton;
    Label12: TLabel;
    SpctrFreq: TButton;
    Button1: TButton;
    Edit4: TEdit;
    Label1: TLabel;
    procedure ChargfichClick(Sender: TObject);
    procedure CourantchargClick(Sender: TObject);
    procedure QuitterClick(Sender: TObject);
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure HarmoniqueClick(Sender: TObject);
    procedure HarCourantCompClick(Sender: TObject);
    procedure CourantFondClick(Sender: TObject);
    procedure CourantRefferanceClick(Sender: TObject);
```

```
    procedure SpctrFreqClick(Sender: TObject);
    procedure FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
    procedure Button1Click(Sender: TObject);
  private
    { Déclarations privées }
  public
    { Déclarations publiques }
  end;
var
                                        Form1   :  TForm1;
                  chargf, chrgFichier, N, t, j, i, h    :   integer;
                                        ZoomC   :   integer;
                                        ZoomT   :   real;
                                          Ccps    :   integer;
                              V1, V2, V3, i1, i2, i3   :   array[1..900] of real;
      T1, T2, T3, C1, C2, C3, Tf, A0, Delta_f   :   real;
                                Phk , Qhk, ih, Icomp    :   array [1..200] of real;
    Va, Vb, ia, ib, Pint, Q, delta, Pap, Pbp, P    :   real;
                                        An, Bn, Xn   :   array [1..128] of real;
                                Valreel, ValVa, ValVb   :  array [1..128] of real;
                                        CoefP, CoefQ   :  array [1..2,1..128] of real;{integer;}
                                          Valent   :   array [1..2,1..128] of real;
                        Ph, Qh, iah, ibh, i1h, i2h, i3h  :   real;
                                        ValP, ValQ  :   array [1..128] of real;
          VdP, BruitP, VdQ, BruitQ, DC, Noise  :   real;

implementation

{$R *.DFM}
{=====================================================================}

procedure Transf32;
begin
    Va :=  0.816496 * (V1[((j-1)*(N))+i] -0.5 * V2[((j-1)*(N))+i] -0.5 * V3[((j-1)*(N))+i]);
    Vb :=  0.816496 * (0.866025 * V2[((j-1)*(N))+i] - 0.866025 * V3[((j-1)*(N))+i]);
    ia   :=  0.816496 * (i1[((j-1)*(N))+i] -0.5 * i2[((j-1)*(N))+i] - 0.5 * i3[((j-1)*(N))+i]);
    ib   :=  0.816496 * (0.866025 * i2[((j-1)*(N))+i] - 0.866025 * i3[((j-1)*(N))+i]);
end;
{=====================================================================}

 procedure puissance_inst;
begin
    Pint  := Va * ia + Vb * ib;
    Q     := Va * ib - Vb * ia;
    delta := (Va*Va) + (Vb*Vb);
    Pap :=  Va*Va*Pint/delta;
    Pbp :=  Vb*Vb*Pint/delta;
    P   := (Pap + Pbp);
end;
{=====================================================================}
```

```
procedure Courant_ref;
Begin
    Ph := ValP[t] - VdP;
    Qh := ValQ[t];
    iah := ((-ValVb[t]* Qh)+(ValVa[t] * (Ph)))/delta;
    ibh := ((ValVa[t] * Qh)+(ValVb[t] * (Ph)))/delta;
    i1h := 0.81649658 * iah;
    i2h := 0.81649658 * (-0.5*iah + 0.8660254 * ibh);
    i3h := 0.81649658 * (-0.5*iah - 0.8660254 * ibh);
end;
{=====================================================================}

procedure Harmoniquek;
Begin
    Ph := Phk[t];
    Qh := Qhk[t];
    iah := ((-ValVb[t]* Qh)+(ValVa[t] * (Ph)))/delta;
    ibh := ((ValVa[t] * Qh)+(ValVb[t] * (Ph)))/delta;
    i1h := 0.81649658 * iah;
    i2h := 0.81649658 * (-0.5*iah + 0.8660254 * ibh);
    i3h := 0.81649658 * (-0.5*iah - 0.8660254 * ibh);
end;
{=====================================================================}

procedure DFT;
var i1, i2, j1, k : integer;
begin
    A0 := 0;
     // calcul des coefficients de Fourier
     i1 := 1;
     k := round(N/2);
     repeat
          A0 := A0 + xn[i1]/N;
          for j1 := 1 to N do
            begin
                An[j1]:= An[j1]+ (xn[i1]*cos(2*pi*J1*i1/N))*2/N;
                Bn[j1]:= Bn[j1]+ (xn[i1]*sin(2*pi*J1*i1/N))*2/N;
            end;
          i1 :=i1+1;
     until i1> (N);

     // Calcul des frequences à partir de Delta_f
     Delta_f := 1/Tf;

end;
{=====================================================================}
```

```
procedure TForm1.ChargfichClick(Sender: TObject);
var fich : TextFile;
   ind : integer;
begin
    N      := strtoint (Edit1.text);
    Tf     := strtofloat (edit2.text);
    if OpenDialog1.execute then
      begin
          assignFile (fich, OpenDialog1.FileName);
          reset (fich);
          ind :=1;
          chargf := 5;
          form1.canvas.brush.color := clbtnface;
          form1.canvas.Pen.color   := clbtnface;
          form1.canvas.rectangle (19, 120, 950, 510);
          while ind <=600 do
            begin
               readln (fich,T1,T2,T3,C1,C2,C3);
               V1[ind]:=T1; V2[ind]:=T2; V3[ind]:=T3;
               i1[ind]:=C1; i2[ind]:=C2; i3[ind]:=C3;
               ind := ind + 1;
            end;
          if chargf = 5 then
          begin
             panel1.visible := true;
             Label3.visible := true;
             panel1.Caption := OpenDialog1.FileName;
          end;
      end;
end;
{=====================================================================}


procedure TForm1.CourantchargClick(Sender: TObject);
var k : integer;
   w : real;

begin
    if chargf = 5 then

    begin
        Label4.Visible   := false;
        Label5.Visible   := false;
        Label6.Visible   := false;
        Label8.Visible   := false;
        ListBox1.Visible := false;

        ZoomC  := strtoint (Edit3.text);
        ZoomT  := strtofloat (Edit4.text);
        form1.canvas.brush.color := clBtnFace;
```

```
form1.canvas.Pen.color   := clBtnFace;
form1.canvas.rectangle (220, 105, 800, 510);
form1.canvas.brush.color := clwhite;
form1.canvas.Pen.color   := clblack;
form1.canvas.rectangle (250, 120, 700, 400);
form1.Canvas.Font.Color := clred;
form1.Canvas.TextOut(220, 105,'Tension/Courant');
form1.canvas.Pen.color   := clblue;
form1.canvas.MoveTo(250,250);
form1.Canvas.LineTo (700,250);
form1.canvas.Pen.color   := clteal;
form1.canvas.MoveTo(250,trunc(250-220*ZoomT));
form1.Canvas.LineTo (255,trunc(250-220*ZoomT));
form1.canvas.MoveTo(250,trunc(250+220*ZoomT));
form1.Canvas.LineTo (255,trunc(250+220*ZoomT));
form1.Canvas.Font.Color := clteal;
form1.Canvas.TextOut(220, trunc(250-220*ZoomT),'220V');
form1.Canvas.TextOut(220, trunc(250+220*ZoomT),'-220V');
form1.Canvas.Font.Color := clred;
form1.Canvas.TextOut(220, trunc(250-6*ZoomC),'6A');
form1.Canvas.TextOut(220, trunc(250+6*ZoomC),'-6A');
form1.canvas.Pen.color   := clred;
form1.canvas.MoveTo(250,trunc(250-6*ZoomC));
form1.Canvas.LineTo (255,trunc(250-6*ZoomC));
form1.canvas.MoveTo(250,trunc(250+6*ZoomC));
form1.Canvas.LineTo (255,trunc(250+6*ZoomC));

k:=0;
i:=1;
for i :=1 to 138 do

Begin
    if (i=1) then
    Begin
        form1.canvas.MoveTo(250,250-trunc(ZoomC*i1[1]));
    end;
    w := ZoomC * i1[i];
    form1.canvas.lineto(250+k,250-trunc(w));
    k:=k+3;
end;
k:=0;
t:= 1;
form1.canvas.Pen.color   := clteal;
for t :=1 to 138 do
Begin
    if t=1 then
       Begin
           form1.canvas.MoveTo(250,250-trunc(ZoomT*V1[1]));
       end;
    w := ZoomT*V1[t];
```

```
            form1.canvas.lineto(250+k,250-trunc(w));
            k:=k+3;
    end;
    end
    else
       panel1.visible := true;

end;

{=========================================================================}

procedure TForm1.QuitterClick(Sender: TObject);
begin
      close;
end;
{=========================================================================}

procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
begin
   Edit1.text := inttostr(46);
   Edit2.text := floattostr(0.02);
   Edit3.text := inttostr(8);
   Edit4.text := floattostr(0.40);
  { Edit4.text := floattostr(0,36);}
end;
{=========================================================================}

procedure TForm1.HarmoniqueClick(Sender: TObject);
var  w : real;
    k : integer;
    NbrHarm : integer;
begin
    if chargf = 5 then
    begin
        form1.canvas.brush.color := clBtnFace;
        form1.canvas.Pen.color   := clBtnFace;
        form1.canvas.rectangle (250, 120, 700, 510);
        form1.canvas.brush.color := clBtnFace;
        form1.canvas.Pen.color   := clBtnFace;
        form1.canvas.rectangle (220, 105, 800, 510);
        k:=0;
        NbrHarm := round(N/2);
        Label4.Visible   := true;
        Label5.Visible   := true;
        Label6.Visible   := true;
        ListBox1.Visible := true;
        Label8.Visible   := true;
        for i :=1 to N do
         begin
            An[i] := 0;
```

```
            Bn[i] := 0;
         end;
        for i:=1 to N do
              Begin
                 xn[i]:= i1[i];
              end;
        DFT;
        for i := 1 to N do
          Begin
             ih[i]:= sqrt(sqr(An[i])+sqr(Bn[i]));
          end;
        Delta_f := 1/Tf;
        listbox1.Clear;
        for t := 1 to NbrHarm do
          Begin

             listbox1.Items.add(inttostr(t)+'          '+ floattostr(t * Delta_f)+'
'+floattostr(ih[t])+'          '+floattostr(100*ih[t]/ih[1]));
          end;

    end
    else
     panel1.visible := true;

end;

{=====================================================================}
procedure TForm1.HarCourantCompClick(Sender: TObject);
var  w : real;
    k, NbrHarm : integer;
begin
    if Ccps = 5 then
    begin
        form1.canvas.brush.color := clBtnFace;
        form1.canvas.Pen.color   := clBtnFace;
        form1.canvas.rectangle (250, 120, 800, 510);
        form1.canvas.brush.color := clBtnFace;
        form1.canvas.Pen.color   := clBtnFace;
        form1.canvas.rectangle (220, 105, 800, 510);
        k:=0;
        NbrHarm := round(N/2);
        Label4.Visible   := true;
        Label5.Visible   := true;
        Label6.Visible   := true;
        ListBox1.Visible := true;
        Label8.Visible   := true;
        for i :=1 to N do
         begin
            An[i] := 0;
            Bn[i] := 0;
```

```
        end;
        for i:=1 to N do
              Begin
                  xn[i]:= Icomp[i];
              end;
        DFT;
        for i := 1 to N do
          Begin
              ih[i]:= sqrt(sqr(An[i])+sqr(Bn[i]));
          end;
        Delta_f := 1/Tf;
        listbox1.Clear;
        for t := 1 to NbrHarm do
          Begin

              listbox1.Items.add(inttostr(t)+'           '+ floattostr(t * Delta_f)+'
'+floattostr(ih[t])+'           '+floattostr(100*ih[t]/ih[1]));
          end;
    end
    else
     panel1.visible := true;
end;
{=====================================================================}
```

procedure TForm1.CourantFondClick(Sender: TObject);

```
var  w, Ifond1, Ifond2, Ifond3 : real;
    k : integer;
begin
    if chargf = 5 then
    begin
        Label4.Visible   := false;
        Label5.Visible   := false;
        Label6.Visible   := false;
        Label8.Visible   := false;
        ListBox1.Visible := false;
        ZoomC  := strtoint (Edit3.text);
        ZoomT  := strtofloat (Edit4.text);
        form1.canvas.brush.color := clBtnFace;
        form1.canvas.Pen.color   := clBtnFace;
        form1.canvas.rectangle (220, 105, 800, 510);
        form1.canvas.brush.color := clwhite;
        form1.canvas.Pen.color   := clblack;
        form1.canvas.rectangle (250, 120, 700, 400);
        form1.Canvas.TextOut(220, 105,'Tension/Courant');
        form1.canvas.Pen.color   := clblue;
        form1.canvas.MoveTo(250,250);
        form1.Canvas.LineTo (700,250);
        form1.canvas.Pen.color   := clred;
        form1.canvas.Pen.color   := clteal;
        form1.canvas.MoveTo(250,trunc(250-220*ZoomT));
```

```
form1.Canvas.LineTo (255,trunc(250-220*ZoomT));
form1.canvas.MoveTo(250,trunc(250+220*ZoomT));
form1.Canvas.LineTo (255,trunc(250+220*ZoomT));
form1.Canvas.Font.Color := clteal;
form1.Canvas.TextOut(220, trunc(250-220*ZoomT),'220V');
form1.Canvas.TextOut(220, trunc(250+220*ZoomT),'-220V');
form1.Canvas.Font.Color := clred;
form1.Canvas.TextOut(220, trunc(250-7*ZoomC),'7A');
form1.Canvas.TextOut(220, trunc(250+7*ZoomC),'-7A');
form1.canvas.Pen.color   := clred;
form1.canvas.MoveTo(250,trunc(250-7*ZoomC));
form1.Canvas.LineTo (255,trunc(250-7*ZoomC));
form1.canvas.MoveTo(250,trunc(250+7*ZoomC));
form1.Canvas.LineTo (255,trunc(250+7*ZoomC));
k:=0;
for j := 1 to 3 do
Begin
    i:=1;
   for i:=1 to N do
      Begin
         transf32;
         ValVa[i]:= Va;
         ValVb[i]:= Vb;
         puissance_inst;
         ValP[i] := P;
         ValQ[i] := Q;
      end;
   i:=1;
   for i:=1 to N do
      Begin
         xn[i]:= ValP[i];
      end;
   i:=0;
   DFT;
   VdP := A0;
   i:=1;
   for i:=1 to N do
      Begin
         xn[i]:= ValQ[i];
      end;
   DFT;
   VdQ := A0;
   for t := 1 to N do
      Begin
         if RdHarmo.Checked then
               begin
                  Ph := VdP;
                  Qh := VdQ;
               end;
```

```
                if RdHarmoReact.Checked then
                        begin
                            Ph := VdP;
                            Qh := 0;
                        end;
                delta := (Va*Va) + (Vb*Vb);
                iah := ((-ValVb[t]* Qh)+(ValVa[t] * (Ph)))/delta;
                ibh := ((ValVa[t] * Qh)+(ValVb[t] * (Ph)))/delta;
                Ifond1 := 0.81649658 * iah;
                Ifond2 := 0.81649658 * (-0.5*iah + 0.8660254 * ibh);
                Ifond3 := 0.81649658 * (-0.5*iah - 0.8660254 * ibh);
                if j=1 then Icomp [t] := Ifond1;
                if ((t=1) and (j=1)) then
                Begin
                    form1.canvas.MoveTo(250,250-trunc(ZoomC*Ifond1));
                end;
                w := ZoomC*Ifond1;
                form1.canvas.lineto(250+k,250-trunc(w));
                k := k+3;
            end;
        Ccps := 5;
    end;
        k:=0;
    form1.canvas.Pen.color   := clteal;
    t:=1;
    for t :=1 to 138 do
    Begin
        if t=1 then
        Begin
            form1.canvas.MoveTo(250,250-trunc(ZoomT*V1[t]));
        end;
        w := ZoomT*V1[t];
        form1.canvas.lineto(250+k,250-trunc(w));
        k:=k+3;
    end;
    { Ccps := 5;}
    end
    else
     panel1.visible := true;
end;
{=====================================================================}
```

procedure TForm1.CourantRefferanceClick(Sender: TObject);

```
var  w, Ifond1, Ifond2, Ifond3, Iref1 : real;
    k : integer;
begin
    if chargf = 5 then
    begin
        Label4.Visible   := false;
        Label5.Visible   := false;
```

```
Label6.Visible   := false;
Label8.Visible   := false;
ListBox1.Visible := false;
ZoomC  := strtoint (Edit3.text);
ZoomT  := strtofloat (Edit4.text);
form1.canvas.brush.color := clBtnFace;
form1.canvas.Pen.color   := clBtnFace;
form1.canvas.rectangle (220, 105, 800, 510);
form1.canvas.brush.color := clwhite;
form1.canvas.Pen.color   := clblack;
form1.canvas.rectangle (250, 120, 700, 400);
form1.Canvas.Font.Color := clred;
form1.Canvas.TextOut(220, 105,'Courant');
form1.Canvas.TextOut(220, trunc(250-3*ZoomC),'3A');
form1.Canvas.TextOut(220, trunc(250+3*ZoomC),'-3A');
form1.canvas.Pen.color   := clred;
form1.canvas.MoveTo(250,trunc(250-3*ZoomC));
form1.Canvas.LineTo (255,trunc(250-3*ZoomC));
form1.canvas.MoveTo(250,trunc(250+3*ZoomC));
form1.Canvas.LineTo (255,trunc(250+3*ZoomC));
form1.canvas.Pen.color   := clblue;
form1.canvas.MoveTo(250,250);
form1.Canvas.LineTo (700,250);
form1.canvas.Pen.color   := clred;
k:=0;
for j := 1 to 3 do
Begin
    i:=1;
   for i:=1 to N do
      Begin
         transf32;
         ValVa[i]:= Va;
         ValVb[i]:= Vb;
         puissance_inst;
         ValP[i] := P;
         ValQ[i] := Q;
      end;
   i:=1;
   for i:=1 to N do
      Begin
         xn[i]:= ValP[i];
      end;
   i:=0;
   DFT;
   VdP := A0;
   i:=1;
   for i:=1 to N do
      Begin
         xn[i]:= ValQ[i];
      end;
```

```
            DFT;
            VdQ := A0;
            for t := 1 to N do
               Begin
                  if RdHarmo.Checked then
                        begin
                           Ph := VdP;
                           Qh := VdQ;
                        end;
                  if RdHarmoReact.Checked then
                         begin
                            Ph := VdP;
                            Qh := 0;
                         end;
                  iah := ((-ValVb[t]* Qh)+(ValVa[t] * (Ph)))/delta;
                  ibh := ((ValVa[t] * Qh)+(ValVb[t] * (Ph)))/delta;
                  Ifond1 := 0.81649658 * iah;
                  Ifond2 := 0.81649658 * (-0.5*iah + 0.8660254 * ibh);
                  Ifond3 := 0.81649658 * (-0.5*iah - 0.8660254 * ibh);
                  Iref1 := i1[t]-Ifond1;
                  if ((t=1) and (j=1)) then
                  Begin
                     form1.canvas.MoveTo(250,250-trunc(ZoomC*Iref1));
                  end;
                  w := ZoomC*Iref1;
                  form1.canvas.lineto(250+k,250-trunc(w));
                  k := k+3;
               end;
         Ccps := 5;
      end;
      end
      else
       panel1.visible := true;
end;
{=====================================================================}
```

procedure TForm1.SpctrFreqClick(Sender: TObject);

```
var  w : real;
     k : integer;
     NbrHarm : integer;
     RangH : string;
begin
     if chargf = 5 then
     begin
          Label4.Visible   := false;
          Label5.Visible   := false;
          Label6.Visible   := false;
          Label8.Visible   := false;
          ListBox1.Visible := false;
          form1.canvas.brush.color := clBtnFace;
```

```
        form1.canvas.Pen.color   := clBtnFace;
        form1.canvas.rectangle (250, 120, 850, 510);
        form1.canvas.brush.color := clBtnFace;
        form1.canvas.Pen.color   := clBtnFace;
        form1.canvas.rectangle (220, 105, 800, 510);
        k:=0;
        NbrHarm := round(N/2);
        for i :=1 to N do
         begin
             An[i] := 0;
             Bn[i] := 0;
         end;
        for i:=1 to N do
                Begin
                    xn[i]:= i1[i];
                end;
        DFT;
        for i := 1 to N do
          Begin
              ih[i]:= sqrt(sqr(An[i])+sqr(Bn[i]));
          end;
        ListBox1.Visible := false;
        form1.canvas.brush.color := clwhite;
        form1.canvas.Pen.color   := clblack;
        form1.canvas.rectangle (250, 120, 788, 400);
        form1.Canvas.Font.Color := clteal;
        form1.Canvas.TextOut(220, 350-7*25,'100%');
        form1.canvas.Pen.color   := clblue;
        for k:=1 to NbrHarm do
        begin
            form1.canvas.brush.color := clred;
            form1.canvas.rectangle ((250+(23*k)-5),(round(350-(25*ih[k]))), ((23*k)+5+250),
350);
            rangH := inttostr(k);
            form1.canvas.brush.color := clwhite;
            form1.Canvas.TextOut((250+(23*k)-5), 360,rangH);
    end;
end;
end;
{=====================================================================}

procedure TForm1.FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
var mess: string;
begin
    mess:='Êtes-vous sur de vouloir quitter?';
    if MessageDlg(mess, mtConfirmation, [mbyes, mbno],0) = mrYes then
    action:=caFree else action:=caNone ;

end;
{=====================================================================}
```

```
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
var k, NbrHarm : integer;
   rangH : string;
begin
    if Ccps = 5 then
    begin
        form1.canvas.brush.color := clBtnFace;
        form1.canvas.Pen.color   := clBtnFace;
        form1.canvas.rectangle (220, 105, 800, 510);
        k:=0;
        NbrHarm := round(N/2);
        Label4.Visible   := False;
        Label5.Visible   := False;
        Label6.Visible   := False;
        ListBox1.Visible := False;
        Label8.Visible   := False;
        for i :=1 to N do
         begin
            An[i] := 0;
            Bn[i] := 0;
         end;
        for i:=1 to N do
              Begin
                  xn[i]:= Icomp[i];
              end;
        DFT;
        for i := 1 to N do
          Begin
              ih[i]:= sqrt(sqr(An[i])+sqr(Bn[i]));
          end;
        form1.canvas.brush.color := clwhite;
        form1.canvas.Pen.color   := clblack;
        form1.canvas.rectangle (250, 120, 788, 400);
        form1.Canvas.Font.Color := clteal;
        form1.Canvas.TextOut(220, 350-8*25,'100%');
        form1.canvas.brush.color := clred;
        form1.canvas.Pen.color   := clblue;
        for k:=1 to NbrHarm do
        begin
            form1.canvas.brush.color := clred;
            form1.canvas.rectangle ((250+(23*k)-5),(round(350-(25*ih[k]))), ((23*k)+5+250),
350);
            rangH := inttostr(k);
            form1.canvas.brush.color := clwhite;
            form1.Canvas.TextOut((250+(23*k)-5), 360,rangH);
        end;
    end;
end;
end.
```