

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

MESRAOUI Ismail

&

DAOUDI Abdelmadjid

pour l'obtention du diplôme de Master en Électronique Spécialité Traitement de l'Information
et Systèmes Électroniques (TISE)

Thème

Estimation adaptative de la fréquence fondamentale d'un réseau électrique intelligent

Proposé par : Ykhlef Farid

Année Universitaire 2016-2017

Nous remercions en premier lieu, le dieu tout puissant qui nous a donné la volonté et le courage pour réaliser ce modeste travail.

Nous remercions vivement :

- Nos chers parents qui nous ont toujours soutenus.
- Notre promoteur **Mr YKHLEF** pour l'intérêt qu'il a porté à notre travail.
- Enfin à toutes le groupe **TISE** et les personnes qui ont contribué de près ou de loin pour la réussite de notre travail.

MESRAOUI Ismail

&

DAOUDI Abdelmadjid

Résumé

ملخص:

العمل المقدم في هذا المشروع النهائي هو جزء من مجال مراقبة الشبكات الكهربائية الذكية. ويطبق النهج القائم على خوارزميات تكيفية لتقدير التردد الأساسي للشبكة الكهربائية. مختلف التقنيات المقترحة هي

RLS, BCRLS, RTLS.

كلمات المفاتيح: : التردد الأساسي؛ الشبكة الكهربائية، نموذج تنبؤ ذاتي الانحدار.

Résumé :

Le travail présenté dans ce projet de fin d'étude s'inscrit dans le domaine des réseaux électriques intelligents. Des techniques basées sur les algorithmes adaptatifs sont appliquées à l'estimation de la fréquence fondamentale d'un réseau électrique. Les différentes techniques utilisées sont : RLS, BCRLS et RTLS.

Mots clés : fréquence fondamentale; réseau électrique ; filtrage adaptatif.

Abstract :

The work presented in this final project is in the area of the smart grids. Techniques based on adaptive algorithms are applied to estimate the fundamental frequency of the electrical grid. The different techniques used are: RLS, BCRLS and RTLS.

Keywords: fundamental frequency; electrical grid; adaptive filtering.

Listes des acronymes et abréviations

THD: Taux de Distorsion Harmonique.

RSB : Rapport Signal sur Bruit.

TF : Transformé de Fourier.

VA : Variable Aléatoire.

RIF : Réponse Impulsionnelle Finie.

RII : Réponse Impulsionnelle Infinie.

RLS: Recursive Least Squares.

BCRLS: Bias-Compensated Recursive Least Squares.

RTLS: Recursive Total Least Squares.

AR : Autorégressif.

EQM : Erreur Quadratique Moyenne.

EQMM : Erreur Quadratique Moyenne Minimal.

Notations

t : temps continu.

n : temps discret.

$x(n)$: signal scalaire de n .

$\mathbf{x}(n)$: signal vecteur de n .

$(.)^T$: transposition d'un vecteur ou d'une matrice.

$(.)^H$: transposition conjuguée (hermitienne).

$(.)^*$: l'opérateur de conjugaison.

$\overline{(\cdot)}$: convergence d'une fonction .

$x, \mathbf{x}, \mathbf{X}$: scalaire, vecteur, matrice.

$E\{.\}$: espérance mathématique.

Table des matières

Remerciements	i
Résumé.....	ii
Listes des acronymes et abréviations	iii
Notations.....	iv
Introduction générale	12
Chapitre 1 Pollution des réseaux électriques	15
1.1 Introduction	15
1.2 Réseaux électriques	16
1.2.1 Généralités	16
1.2.2 Grandeurs électriques.....	18
1.3 Perturbations des réseaux électriques	20
1.3.1 Creux de tension et Coupures brèves	21
1.3.2 Fluctuations de tension (flicker).....	22
1.3.3 Déséquilibre du courant et de la tension.....	22
1.3.4 Variation de fréquence	23
1.3.5 Parasites	24
1.3.6 Perturbations Harmoniques.....	25
1.4 Conclusion	30
Chapitre 2 Filtrage Adaptatif	31
2.1 Filtre numérique.....	31
2.2 Processus aléatoire	32
2.3 Problème de base du filtrage adaptatif	32
2.3.1 Définition.....	33
2.3.2 Critères de choix de l'algorithme	33
2.3.3 Application	34
2.4 Processus stochastique discrets.....	35
2.4.1 Matrices d'auto-corrélation	36
2.4.2 Matrice d'auto-corrélation d'un bruit blanc :	36
Chapitre 3 Estimation de la fréquence fondamentale par algorithmes adaptatifs	37
3.1 Introduction	37
3.2 Estimation de la fréquence fondamentale	38

3.2.1	L'algorithme de moindré carré récursif (RLS)	40
3.2.2	L'algorithme de BCRLS (Bias-Compensated Recursive Least Squares)	43
3.2.3	L'algorithme de RTLS (Recursive Total Least Squares).....	45
3.3	Conclusion	48
Chapitre 4	Résultats expérimentaux de l'estimation de la fréquence	49
4.1	Introduction	49
4.2	Cas où la fréquence fondamentale du réseau et les amplitudes harmoniques sont constantes	50
4.2.1	Cas sans harmoniques	53
4.2.2	Cas avec harmoniques	55
4.2.3	Interprétations	57
4.3	Cas où les amplitudes harmoniques sont variables et la fréquence fondamentale du réseau est constant	57
4.3.1	Cas sans harmoniques	57
4.3.2	Cas avec harmoniques	59
4.3.3	Interprétations	61
4.4	Cas où les amplitudes harmoniques sont constantes et la fréquence fondamentale du réseau est variable	61
4.4.1	Cas sans harmoniques	62
4.4.2	Cas avec harmoniques	64
4.4.3	Interprétation.....	66
4.5	Cas où les amplitudes des harmoniques et la fréquence fondamentale du réseau sont variables	66
4.5.1	Cas sans harmoniques.....	67
4.5.2	Cas avec harmoniques	69
4.5.3	Interprétation.....	71
4.6	Conclusion	72
Chapitre 5	Analyse d'un réseau électrique : simulations	73
5.1	Introduction	73
5.2	Explication du schéma de la simulation	74
5.3	Résultats de la simulation	76
5.3.1	Cas de changement de fréquence.....	76
5.3.2	Cas des harmoniques	78
5.3.3	Cas de bruit	79
5.4	Conclusion	80

Conclusion générale.....	82
Bibliographie	83

Liste des figures

Figure 1.1. Creux et Coupures de tension	21
Figure 1.2. variation de tension (flicker).....	22
Figure 1.3. Déséquilibre des amplitudes et des phases.	23
Figure 1.4. Variation de fréquence.	24
Figure 1.5. Parasite.	25
Figure 1.6. Les Harmoniques.	25
Figure 1.7. Harmoniques, les inters et infra harmonique.....	26
Figure 2.1. Principe d'un filtre adaptatif	33
Figure 2.2. Schéma d'application d'identification des systèmes	34
Figure 2.3. Schéma d'application de la prédiction linéaire.....	34
Figure 2.4. Schéma d'application de la modélisation inverse.....	35
Figure 2.5. Schéma d'application d'Annulation d'interférences.....	35
Figure 4.1. Signal du test non bruité avec $f_e=1500\text{Hz}$	53
Figure 4.2. Signal du test bruité avec $f_e=1500\text{Hz}$ et $\text{RSB}=40\text{ dB}$	53
Figure 4.3. Estimation de la fréquence fondamentale à l'aide des déférentes techniques adaptatives dans le cas d'absence d'harmoniques.....	54
Figure 4.4. comparaison entre les déférentes techniques d'estimation pour un signal non harmonisée.....	55
Figure 4.5. Signal du test bruité avec $\text{RSB}=40\text{dB}$ et harmonisé de rang 3 et 5.....	55
Figure 4.6. Estimation de la fréquence fondamentale à l'aide des déférentes techniques adaptatives dans le cas De présence d'harmoniques.....	56
Figure 4.7. comparaison entre les déférentes techniques d'estimation pour un signal harmonisée.....	56
Figure 4.8: Signal du test non bruité.....	57

Figure 4.9. Signal du test bruité avec RSB=40 dB.....	58
Figure 4.10. Estimation de la fréquence fondamentale à l'aide des différentes techniques adaptatives dans le cas d'absence d'harmoniques durant la variation des amplitudes.....	59
Figure 4.11. comparaison entre les différentes techniques d'estimation pour un signal non harmonisée durant la variation des amplitudes	59
Figure 4.12. signal du test bruité avec RSB=40 dB et harmonisé de rang 3 et 5	59
Figure 4.13. Estimation de la fréquence fondamentale à l'aide des différentes techniques adaptatives dans le cas de présence d'harmoniques durant la variation des amplitudes.....	60
Figure 4.14. Comparaison entre les différentes techniques d'estimation pour un signal harmonisée durant la variation des amplitudes	61
Figure 4.15. Signal du test non bruité.....	62
Figure 4.16. Signal du test bruité avec RSB=40dB.....	62
Figure 4.17. Estimation de la fréquence fondamentale à l'aide des différentes techniques adaptatives dans le cas d'absence d'harmoniques durant la variation de la fréquence fondamentale	63
Figure 4.18. Comparaison entre les différentes techniques d'estimation pour un signal non harmonisée durant la variation de la fréquence fondamentale	64
Figure 4.19. Signal du test bruité avec RSB=40 dB et harmonisé de rang 3 et 5.....	64
Figure 4.20. Estimation de la fréquence fondamentale à l'aide des différentes techniques adaptatives dans le cas d'absence d'harmoniques durant la variation de la fréquence fondamentale.....	65
Figure 4.21. Comparaison entre les différentes techniques d'estimation pour un signal non harmonisée durant la variation de la fréquence fondamentale.....	65
Figure 4.22. Signal du test non bruité.....	67
Figure 4.23. Signal du test bruité avec RSB=40dB	67
Figure 4.24. Estimation de la fréquence fondamentale à l'aide des différentes techniques adaptatives dans le cas de présence d'harmoniques durant la variation de la fréquence fondamentale et l'amplitude	68

Figure 4.25. Comparaison entre les différentes techniques d'estimation pour un signal harmonisée durant la variation de la fréquence fondamentale et l'amplitude	69
Figure 4.26. Signal du test bruité avec RSB=40dB et harmonisé de rang 3 et 5	69
Figure 4.27. Estimation de la fréquence fondamentale à l'aide des différentes techniques adaptatives dans le cas d'absence d'harmoniques durant la variation de la fréquence fondamentale et l'amplitude.....	70
Figure 4.28. Comparaison entre les différentes techniques d'estimation pour un signal non harmonisée durant la variation de la fréquence fondamentale et l'amplitude.....	70
Figure5.1. schéma global du système.....	73
Figure5.2. Bloc de changement de fréquence.....	74
Figure5.3. Bloc des Harmoniques.....	75
Figure5.4. Bloc de bruit.....	75
Figure.5.5 Bloc de l'estimation.....	76
Figure.5.6 Bloc des algorithmes.....	76
Figure.5.7 Signal avec changement de fréquence.....	76
Figure.5.8 La fréquence estimée par BCRLS.....	77
Figure.5.9 La fréquence estimée par RTLS.....	77
Figure.5.10 Signal avec changement des harmoniques.....	78
Figure.5.11 La fréquence estimée par BCRLS.....	78
Figure.5.12 La fréquence estimée par RTLS.....	78
Figure.5.13 Signal bruité	79
Figure.5.14 La fréquence estimée par BCRLS.....	79
Figure.5.15 La fréquence estimée par RTLS.....	80

Liste des tableaux

Tableau 4.1. Estimation de la fréquence fondamentale par différent techniques pour le cas sans perturbations harmoniques avec RSB=40 dB.....	51
Tableau 4.2. Estimation de la fréquence fondamentale par différent techniques pour le cas avec perturbations harmoniques avec RSB=40dB	52
Tableau 4.3. Les paramètres de convergence	53
Tableau 5.1. Les paramètres de Simulation.....	74

Introduction générale

Au cours de la nouvelle révolution industrielle et des ses conséquences responsables du réchauffement climatiques imposé par la haute consommation énergétique qui représente environ deux tiers des émissions mondiales de gaz à effet de serre et afin d'avoir arrêté ce détruire de la planète, une grande transition énergétique vers l'intégration des nouveaux ressources cleans et renouvelables comme l'énergie solaire, éolien et hydrolienne pour l'usage domestique et industrielle et même l'intégration des conséquences du développement de la mobilité propre (véhicule électrique) [1].

En effet, une grande complexité imposée aux niveaux de la gestion parfaite des ressources qui nécessite des solutions optimales, ce qui oblige la mise en œuvre des technologies numériques, c'est la naissance d'une nouvelle vision technologique d'autopilotage nommée " les réseaux électriques intelligents".

Les réseaux électriques intelligents sont arrivés afin d'améliorer l'observabilité, la prévisibilité, la fiabilité et la flexibilité des réseaux d'électricité. Aux sens large, les réseaux électriques intelligents est tout un environnement qui relie les filières de la chaine énergétique (production, transport, distribution et stockage) par la technologie numériques et énergétiques. Mais quand on parle sur la technologie numérique précisément la phase de protection et le contrôle des réseaux, on intéressé au développement des méthodes de traitement et d'analyse des données afin de détecter, d'identifier et même de localiser en temps réel et de façon automatique tous les événements indésirables ou polluent dans un réseau électrique. Dans ce cas, le but essentiel de la mise en œuvre de cette intelligence est de fournir une bonne qualité d'énergie aux consommateurs [2].

Pour évaluer cette dernière, on se base généralement sur des méthodologies d'analyse et de reconnaissance des perturbations appelées les monitorings qui nous permettent de comprendre l'origine de ces problèmes et de trouver des solutions urgentes et efficaces [3].

Dans ce travail, on s'intéresse précisément à l'élaboration d'algorithmes d'analyse et de traitement des signaux issus d'un réseau électrique. L'objectif de ces algorithmes sera l'extraction des changements d'information brusques des grandeurs physiques des signaux traités. Parmi ces grandeurs, la fréquence fondamentale d'un réseau électrique qui est l'une des trois grandeurs essentielles (l'amplitude, la phase, la fréquence). Elle joue un rôle particulier en électrotechnique car l'influence des parasites ou des harmoniques sur cette dernière définit une défaillance entre la production et la consommation d'énergie et donc une mauvaise qualité d'énergie.

Les techniques de filtrage adaptatif sont des outils très intéressants en traitement du signal pour leur meilleure estimation des paramètres et cela est dû à leur robustesse.

Dans notre travail on a choisi de faire l'opération d'estimation de la fréquence fondamentale par le biais d'algorithmes adaptatifs pour les signaux issus d'un système triphasé du réseau de distribution. On s'est intéressé en particulier aux algorithmes de type : moindres carrés récursifs (RLS), BCRLS et RTLS.

Afin de bien présenter ce travail, ce mémoire sera organisé comme suit :

Le premier chapitre présentera des généralités sur le réseau électrique et ses grandeurs essentielles avec une présentation des principaux types de perturbations.

Le deuxième chapitre exposera quelques notions de base sur le traitement du signal et ses propriétés.

Le troisième chapitre définira le besoin aux techniques de filtrage adaptatif pour l'estimation de la fréquence fondamentale dans un réseau électrique.

Le quatrième chapitre illustrera les résultats expérimentaux des simulations effectuées sous MATLAB pour une comparaison des différentes techniques d'estimation de la fréquence fondamentale.

Le cinquième et dernier chapitre réalisera des simulations des différentes techniques sur un réseau triphasé perturbé.

Chapitre 1 Pollution des réseaux électriques

1.1 Introduction

Le distributeur d'énergie doit fournir à l'ensemble de ces clients et utilisateurs une énergie avec une parfaite continuité et de bonne qualité. Généralement, il délivre l'énergie électrique sous forme d'un système triphasé de tensions sinusoïdales. Les paramètres caractéristiques de ce système sont la fréquence, l'amplitude, la forme d'onde, qui doit être sinusoïdale et la symétrie du système triphasé [1].

Depuis quelques années, les convertisseurs électroniques et l'électronique de puissance ont donné naissance à de nombreuses applications nouvelles, offrant aux clients un confort, une flexibilité et une efficacité inégalables. Mais leur reproduction au cours de la dernière décennie est devenue préoccupante et se trouve à l'origine de problèmes dont le nombre ne cesse de croître: ces charges électroniques polluent non seulement le réseau de distribution de courant alternatif, mais elles sont apparemment aussi très sensibles à la distorsion de la tension [1,2].

Ces charges non linéaires sont génératrices d'harmoniques. Elles sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension d'un réseau et elles causent des problèmes de compatibilité électromagnétique. L'analyse et la détection de ces harmonies en temps réel est devenue une importance capitale.

Pour ce chapitre, nous commencerons par une généralité sur l'énergie électrique. Ensuite, nous exposerons les paramètres de qualité de l'énergie électrique. Nous parlerons également de l'origine, l'analyse et l'effet des perturbations électriques sur les récepteurs électriques.

1.2 Réseaux électriques

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité. Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. Ces derniers permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs [2].

Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production-transport-consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble [1].

1.2.1 Généralités

Un réseau électrique est tout d'abord défini par le type de courant électrique qu'il utilise [1]. Les réseaux électriques actuels utilisent un courant alternatif triphasé sinusoïdal, ce choix décisif découle d'un ensemble de raisons que nous allons présenter par la suite.

a Nécessité de transporter l'électricité à une tension élevée

De la sortie de la centrale électrique au compteur de l'utilisateur final, l'électricité doit transiter sur un réseau électrique. Ces réseaux possèdent souvent la même structure d'un pays à l'autre, car le transport de fortes puissances sur de longues distances impose la minimisation de l'effet Joule [1].

b Courant alternatif et continu

Le transport de puissances importantes sur de longues distances nécessite des tensions élevées. Il faut donc des transformateurs pour passer d'une tension à une autre ; où les transformateurs passifs ne fonctionnent qu'avec du courant alternatif. Les changements de tension sur un système à courant continu ne sont pas aussi efficaces (plus de pertes) qu'en alternatif (transformateur).

Le gain lors du transport d'électricité sur les lignes sont contre balancés par les pertes plus importantes lors des phases d'élévation de la tension et d'abaissement de la tension.

De plus la coupure des courants dans les disjoncteurs est facilitée par le passage répétitif à zéro du courant alternatif.

c Une tension sinusoïdale

La solution la plus commode pour produire de manière industrielle de l'énergie électrique est l'entraînement d'un alternateur par une turbine, le tout en rotation autour d'un axe. De manière naturelle, ces installations produisent des tensions sinusoïdales. En sens inverse et tout aussi naturellement, ces tensions sinusoïdales permettent l'entraînement régulier d'un moteur électrique. Cette facilité d'utilisation à la production et à l'usage dans les machines tournantes constitue les deux grands atouts de la tension sinusoïdale [1].

d Un système monophasé et triphasé

Il est tout à fait possible de réaliser un réseau uniquement en courant monophasé. Les raisons qui ont conduit à adopter le réseau triphasé sont les avantages techniques et économiques importants qu'il présente :

- ❖ Un alternateur de très forte puissance ne peut pas fonctionner en produisant un courant monophasé car la puissance fluctuante qui en résulte provoque une destruction de l'arbre de liaison entre l'alternateur et la source d'énergie mécanique qui le met en rotation. En effet, un système monophasé voit sa puissance instantanée passer par une valeur nulle à chaque oscillation de l'onde de tension (lorsque la tension ou l'intensité passe par zéro). La puissance instantanée est donc variable. Au contraire, les systèmes triphasés équilibrés assurent une puissance instantanée constante, c'est-à-dire "sans à-coup", ce qui est important en électromécanique.
- ❖ Transport d'une même puissance électrique en triphasé (sans neutre) nécessite une section de câbles conducteurs deux fois plus faible qu'en monophasé. Les courants triphasés peuvent produire des champs magnétiques tournants en

répartissant d'une manière spécifique les bobinages sur un rotor. Où les machines électriques qui produisent et utilisent ces courants fonctionnent de manière optimale en régime triphasé.

- ❖ Une distribution de l'électricité en courant triphasé avec fil de neutre permet de proposer pour un même réseau deux tensions d'utilisation différentes :
 - soit entre une phase et le neutre : par exemple 230V en Europe.
 - soit entre deux phases : par exemple 400 V en Europe.

***e* Fréquence des réseaux électriques**

La fréquence d'un réseau électrique est un paramètre particulièrement important à choisir pour un meilleur rendement dans le domaine d'électrotechnique, pour cela elle était imposée de 60 Hz selon les normes d'États-Unis, et de 50Hz selon les normes Européen.

1.2.2 Grandeurs électriques

Les réseaux électriques nécessitent la surveillance constante de certains paramètres afin de maintenir le réseau, parmi ces principales grandeurs la qualité d'énergie.

❖ Qualité de l'énergie électrique

Les principaux facteurs qui interviennent pour définir la qualité du d'énergie sont :

- ❖ La constance de la mise à disposition de l'énergie électrique; (toutes tensions)
- ❖ la constance de la tension
 - variation lente
 - rapide (flicker ou papillotement)
 - creux de tension (voltage dip)
- ❖ la constance de la fréquence
- ❖ la pureté de l'onde (harmoniques)
- ❖ le déséquilibre de tensions polyphasées : apparition de tension inverse ou homopolaire.
- ❖ stabilité à court, moyen et long terme (uniquement grand transport) [2].

La qualité de cette énergie dépend de celle de qualité de tension et de qualité du courant :

- **Qualité de la tension**

Le distributeur d'énergie fournit l'énergie sous la forme de trois tensions sinusoïdales constituant un réseau alternatif triphasé équilibré. La qualité de la tension peut être affectée, soit par des perturbations aléatoires à caractère accidentel, soit par des perturbations existantes en permanence ou pendant des instants de durées bien déterminées. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbations :

- ❖ les fluctuations de la fréquence à 50 Hz : elles sont rares et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles, par exemple certains défauts graves du réseau, au niveau de la production ou du transport.
- ❖ les variations de l'amplitude : il ne s'agit pas des variations lentes de tension qui sont corrigées par les transformateurs de réglage en charge, mais de variations rapides de tension ou de creux de tension se présentant souvent sous forme d'à-coups brusques. Les creux de tension peuvent être soit isolés, soit plus ou moins répétitifs, de forme régulière ou non.
- ❖ la modification de la forme d'onde de la tension : cette onde n'est alors plus sinusoïdale, et peut être considérée comme représentable par une onde fondamentale à 50 Hz, associée soit à des harmoniques de fréquence multiple entier de 50 Hz, soit même parfois à des ondes de fréquence quelconque.
- ❖ la dissymétrie du système triphasé : que l'on appelle déséquilibre. On peut, en plus, mentionner un type particulier de perturbations difficile à classer puisqu'il concerne tout à la fois l'amplitude et la forme d'onde : ce sont les variations transitoires d'amplitudes dont la durée est inférieure à 10 ms.

- **Qualité de courant**

La qualité du courant est relative à une dérive des courants de leur forme idéale, et se caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres :

amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. Dans le cas idéal, les trois courants sont d'amplitude et de fréquence constante, déphasés de $\frac{2}{3}\pi$ radians entre eux, et de forme purement sinusoïdale.

Le terme « qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, la qualité de l'énergie électrique est souvent réduite à la qualité de la tension.[3]

Les courants perturbateurs comme les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive sont majoritairement émis par des charges non linéaires, à base d'électronique de puissance, les circuits magnétiques. La puissance réactive peut être aussi consommée par des charges linéaires inductives comme les moteurs asynchrones qui sont largement présents dans les sites industriels.

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

Ces types de perturbation ont des effets très néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller des échauffements ou de l'arrêt des machines tournantes jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

1.3 Perturbations des réseaux électriques

Pour classifier les perturbations électriques, En se basant sur les paramètres caractérisant la tension, on distingue quatre familles de perturbations électriques :

- ❖ les variations de l'amplitude (creux de tensions, coupures brèves et surtensions),
- ❖ les fluctuations de la fréquence autour de la fréquence fondamentale,
- ❖ les modifications de la forme d'onde (harmoniques, interharmoniques, bruits),
- ❖ la dissymétrie du système triphasé : déséquilibre.

La qualité de l'énergie peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de

certaines récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis [3]. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbation:

1.3.1 Creux de tension et Coupures brèves

Par définition, un creux de tension est une réduction brève de la tension d'alimentation de 10% à 90% de la tension nominal en un point du réseau électrique pendant une période variant de 10 ms à quelques secondes [4]. Une coupure brève représente une chute de tension supérieure à 90% de la valeur nominale et d'une durée de 10ms à 1 min. Un creux de tension peut être produit par les manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de forte intensité ou par le fonctionnement de protection consécutif à l'apparition de défauts dans le réseau. Les creux de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles et tertiaires. En effet, ce type de perturbation peut causer des dégradations de fonctionnement des équipements électriques qui peuvent aller jusqu'à la destruction totale de ces équipements. Les creux de tension sont caractérisés par leur amplitude et par leur durée. Ils sont monophasés, biphasés ou triphasés suivant le nombre de phases concernées.

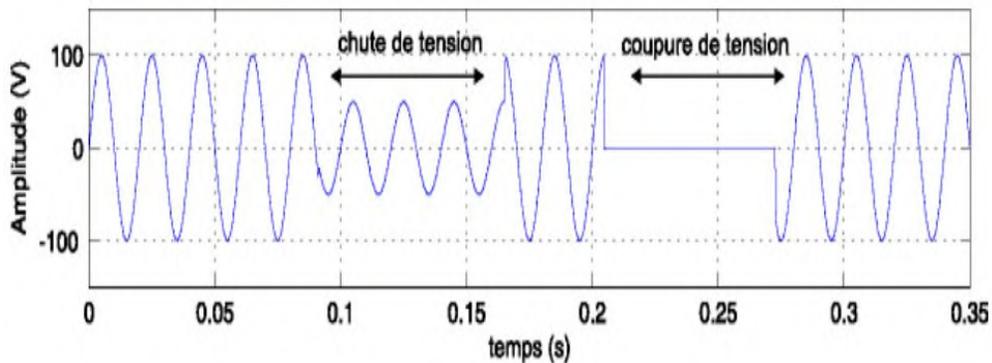


Figure 1.1. Creux et Coupures de tension.

1.3.2 Fluctuations de tension (flicker)

La mise en service ou hors service des appareils électriques et le fonctionnement de certaines charges à puissance variable entraînent des variations de tension qui se manifestent sous deux formes principales :

- ❖ Des variations lentes de tension se produisant à des intervalles de temps supérieurs à quelques secondes. Ces variations sont dues principalement au branchement et débranchement des charges et en général ne dépassent pas les % ± 10 de la tension nominale. Ils ne causent pas de préjudice pour la plupart des équipements électriques.
- ❖ Des variations rapides de tension conduisant à une composition spectrale de fréquence dans la bande 0,5 et 25. Ces variations sont dues aux charges dont la puissance absorbée fluctue de manière rapide, tels que les fours à arc, les machines à souder, les moteurs à couples pulsatoires ou à démarrages fréquents. Ces fluctuations rapides sont particulièrement ressenties sur le flux lumineux des lampes car elles provoquent un papillotement de la lumière, connu aussi comme flicker et qui est fort désagréable pour les consommateurs.

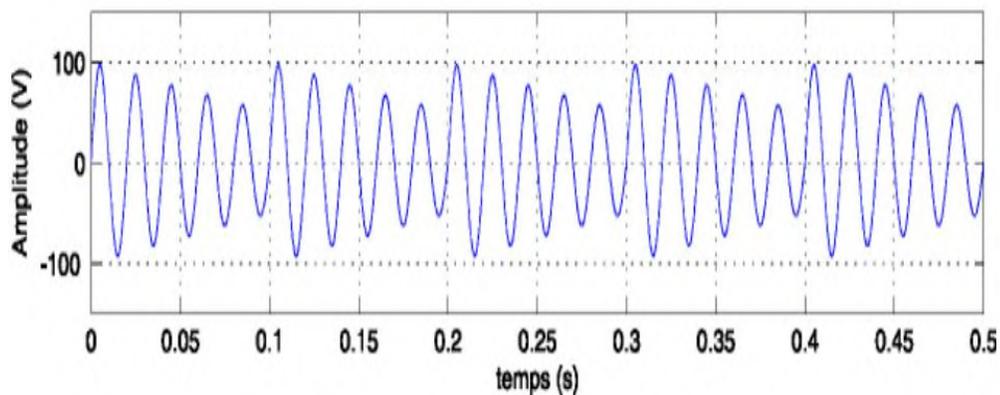


Figure 1.2. Variation de tension (flicker).

1.3.3 Déséquilibre du courant et de la tension

Le phénomène de déséquilibre de tension est la situation où les trois tensions du système triphasé ne sont pas égales en amplitudes et/ou ne sont pas décalés normalement les unes par rapport aux autres de 120° . Ce déséquilibre peut être

engendré par la présence de fortes charges monophasées raccordée non uniformément sur le réseau triphasé, comme cela peut être dû à des machines à souder, des fours à arc ou à des tractions ferroviaires.

Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. Le déséquilibre engendre des dégradations des performances des machines électriques, un vieillissement accéléré des isolants, la production de courants de ligne ayant des fréquences non caractéristiques. Le déséquilibre en tension est caractérisé par le taux de déséquilibre de tension. Il est donné comme suivant [5]:

$$\tau_v = \frac{V_i}{V_d} \times 100 \quad (1.1)$$

où :

- τ_v : Le taux de déséquilibre.
- V_i : La valeur efficace de la tension inverse.
- V_d : La valeur efficace de la tension directe.

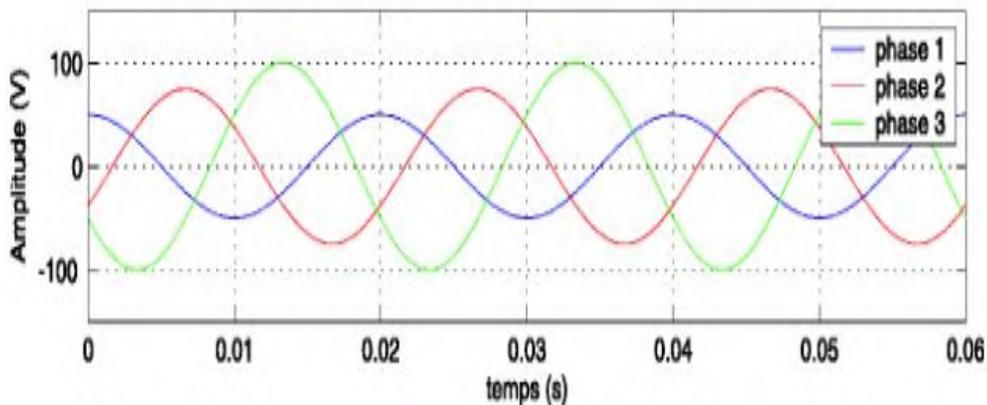


Figure 1.3. Déséquilibre des amplitudes et des phases.

1.3.4 Variation de fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome.

Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle 50 Hz \pm 1%.

Dans les réseaux publics d'alimentation, la capacité de production est normalement excédentaire par rapport à la consommation. Cela permet de maintenir les variations de fréquences à l'intérieur de la plage de fréquences désirées. Toutefois, il peut arriver, qu'une partie importante de la production ou de la consommation disparaisse. Il s'ensuit des variations de fréquences qui sortent de la plage normalement tolérée. Dans de tel cas, une partie de la production ou de la consommation doit être déconnectée pour rétablir l'équilibre aussi vite que possible.

Dans les limites généralement rencontrées, le principal effet du changement de fréquence est de modifier la vitesse des machines tournantes. Les moteurs fourniront alors plus ou moins de puissances. Les variations de fréquences peuvent avoir également pour effet de rendre moins opérants les filtres d'harmoniques. Tout appareil électronique utilisant la fréquence du réseau comme base de temps sera aussi affecté.

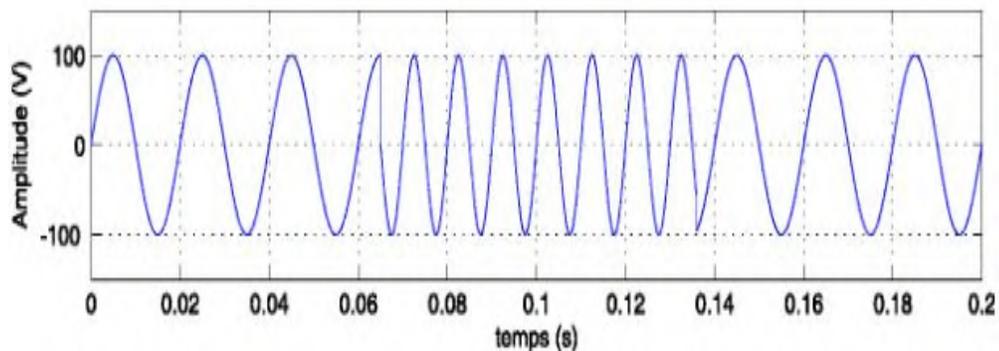


Figure 1.4. Variation de fréquence.

1.3.5 Parasites

Les parasites sont des tensions à haute fréquence qui viennent s'ajouter sur la sinusoïde et provoquent ainsi une déformation [6]. Ils sont essentiellement dus aux

autres équipements branchés sur le même réseau tels que perceuses, poste à souder, etc. Ils peuvent provoquer une défaillance dans le circuit branché au réseau électrique.

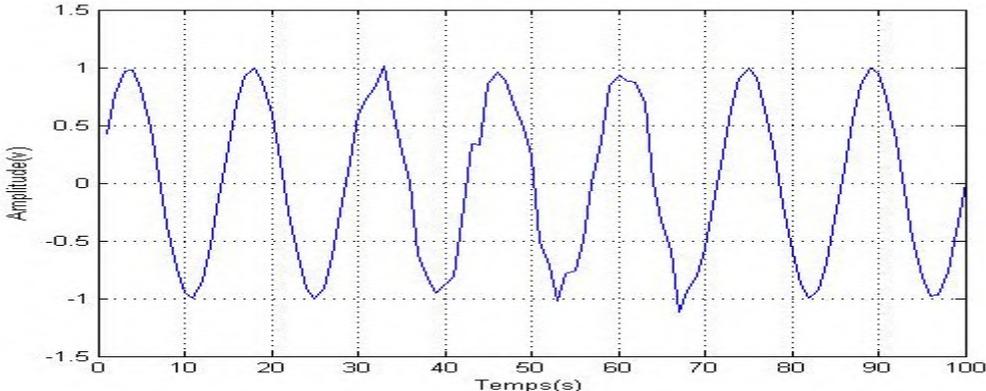


Figure 1.4. Parasite.

1.3.6 Perturbations Harmoniques

a Les Harmoniques

Un harmonique est défini comme étant une composante sinusoïdale d'un signal périodique, ayant une fréquence multiple entier de l'onde fondamentale. Les perturbations harmoniques sont généralement créées par des appareils munis de dispositifs à caractéristique courant/tension non linéaire. Ces appareils peuvent être considérés comme des sources de courant harmoniques. Les courants harmoniques produits par les différentes sources provoquent des chutes de tension harmonique sur les impédances des réseaux.

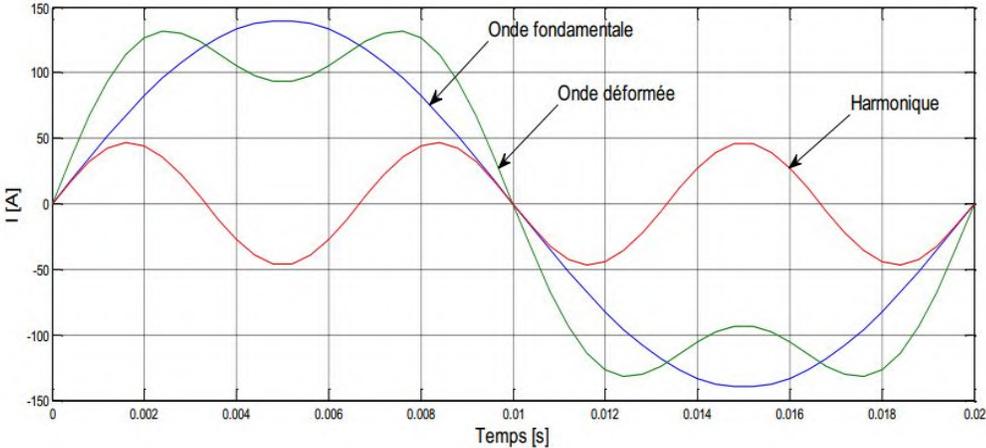


Figure 1.6. Les Harmoniques.

Comme on peut l'observer à partir de la forme d'onde de la **Figure 1.6**, les distorsions de forme d'onde peuvent modifier radicalement la forme de la sinusoïde. Cependant, quel que soit le niveau de complexité de l'onde fondamentale, il s'agit en fait d'un simple composite de formes d'onde multiples appelées harmoniques. Par exemple, compte tenu d'une forme d'onde fondamentale de 50 Hz, les composants du 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} harmoniques seront respectivement de 100Hz, 150Hz et 200Hz. Ainsi, la distorsion harmonique est le degré auquel une forme d'onde dévie de ses valeurs sinusoïdales pures en raison de la sommation de tous ces éléments harmoniques. L'onde sinusoïdale idéale n'a aucun composant harmonique. Dans ce cas, rien ne déforme cette vague parfaite.

b Les inter-Harmoniques

Entre les harmoniques de courant et de tension réseau, on peut observer d'autres fréquences, qui ne sont pas des multiples entiers du fondamental. Elles peuvent apparaître soit sous la forme de fréquences discrètes, soit sous la forme d'un spectre continu à large bande.

c Les Infra-Harmoniques

Ce sont des composantes qui sont à des fréquences inférieures à celle du fondamental [7].

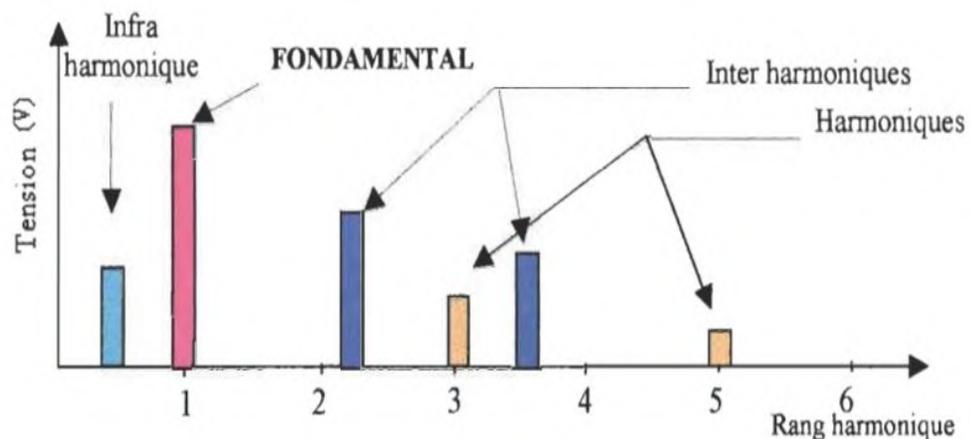


Figure 1.7. Harmoniques, inters et infra harmonique.

d Sources des Harmoniques

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et ainsi polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique [8].

Les principales sources à l'origine des harmoniques sont les appareils d'éclairage fluorescent, les appareillages informatiques, les appareils domestiques (téléviseurs, appareils électroménagers en grand nombre), les arcs électriques et tous les convertisseurs statiques raccordés aux réseaux tels que les redresseurs et les onduleurs. Tous ces systèmes contribuent à la pollution harmonique du réseau auquel ils sont connectés.

e Le taux de distorsion harmonique

Différentes grandeurs sont définies pour chiffrer ces perturbations. Parmi celles-ci le plus utilisé est le THD.

Le taux de distorsion harmonique (THD: Total Harmonic Distortion en anglais) représente la variation d'un signal par rapport à une référence.

La distorsion harmonique totale est la sommation de tous les composants harmoniques de la forme d'onde de tension ou de courant par rapport à la composante fondamentale de la tension ou de l'onde de courant:

$$THD = \sqrt{\sum_n C_n^2 / C_1^2} \times 100 \quad (1.2)$$

où :

- C_n : La composante harmonique de rang n .

- C_1 : La composante fondamentale.

La formule ci-dessus montre le calcul de THD sur un signal. Le résultat final est un pourcentage comparant les composants harmoniques à la composante fondamentale d'un signal. Plus le pourcentage est élevé, plus la distorsion est présente sur le signal du réseau.

Il existe deux sortes de THD : en tension (apparaît à la source) ou en courant (dû aux charges non linéaires).

Lorsqu'il s'agit des harmoniques de courant, l'expression devient :

$$THD = \sqrt{\sum_n I_n^2 / I_1^2} \times 100 \quad (1.3)$$

où :

- I_n : La valeur efficace du courant harmonique de rang n .
- I_1 : La valeur efficace du courant fondamental.

Lorsqu'il s'agit des harmoniques de tension, l'expression devient :

$$THD = \sqrt{\sum_n V_n^2 / V_1^2} \times 100 \quad (1.4)$$

où :

- V_n : Valeur efficace du Tension harmonique de rang n .
- V_1 : La valeur efficace du Tension fondamental.

f Les Effets de perturbation harmonique

La présence d'harmoniques de courant ou de tension conduit à des effets néfastes sur les installations et les équipements électriques. Les principaux effets préjudiciables liés aux perturbations harmoniques sont : l'échauffement, les défauts de fonctionnement de certains équipements électriques et le risque d'excitation de résonance :

- ❖ **L'échauffement** : Les pertes totales par effet Joule sont la somme de celles du fondamental et des harmoniques :

$$I^2 \cdot R = \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \cdot R \quad (1.5)$$

où :

- I : le courant total.
- I_h : le courant harmonique de rang h qui représente le fondamental pour $h=1$.
- R : la résistance traversée par le courant I .

Les harmoniques augmentent aussi les pertes fer (pertes par courants de Foucault). Ils prennent de l'importance dans les matériels utilisant les circuits magnétiques (moteurs, transformateurs...).

Le vieillissement des isolants est souvent dû à une contrainte en tension consécutive à la présence de la tension harmonique, et donc à une augmentation locale du courant de fuite, ou encore à l'échauffement exagéré dans les conducteurs.

- ❖ **Dysfonctionnements de certains équipements électriques** : En présence des harmoniques, la tension (ou le courant) peut changer plusieurs fois de signe dans une demi-période; par conséquent, tout appareil dont le fonctionnement est basé sur le passage par zéro des grandeurs électriques (appareils utilisant la tension comme référence) peut être perturbé.
- ❖ **Le risque d'excitation de résonance** : Les fréquences de résonance des circuits formés par des inductances du transformateur et des câbles sont normalement élevées. Ce n'est pas le cas lorsque des batteries de capacité sont raccordées au réseau pour relever le facteur de puissance; les fréquences de résonance peuvent devenir assez faibles, et coïncide ainsi avec celles des harmoniques engendrés par les convertisseurs statiques. Dans ce cas, il y aura des phénomènes d'amplification d'harmoniques.

Les effets nuisibles peuvent être classés soit en effets instantanés soit en effets à long terme.

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes perturbations affectant les réseaux électriques et leurs origines ainsi que leurs effets sur les équipements électriques qui y sont connectés. Ces effets sont à l'origine d'échauffements et de dégradations du fonctionnement de ces équipements.

Le développement croissant des appareils générateurs d'harmoniques entraînera une hausse sensible des perturbations injectées par les clients. Nous sommes intéressés à l'estimation de la fréquence fondamentale afin de contrôler et d'assurer la dominance de cette dernière, ainsi que pour éviter les distorsions harmoniques. Ensuite, nous présentons les méthodes et les techniques d'estimation de la fréquence fondamentale.

2.1 Filtre numérique

Les filtres numériques sont des systèmes linéaires unidimensionnels, discrets et invariants dans le temps. De plus, pour qu'ils soient physiquement réalisables, il faut qu'ils soient nécessairement causaux.

Pour un filtre numérique, le calcul porte sur une séquence (ou suite) de nombres introduites à son entrée et fournit une séquence numérique modifiée, c'est-à-dire filtrée ou traitée, à sa sortie.[10]

a Filtre à réponse impulsionnelle finie (RIF)

Ils sont des filtres simples à réaliser n'ayant pas des problèmes de stabilité, car la sortie n'est qu'une somme finie d'échantillons de l'entrée. En plus, sa réponse impulsionnelle est parfaitement contrôlable.

Par d'autre définition, La sortie de filtre est une combinaison linéaire d'un ensemble fini d'éléments d'entrées, on suppose que l'entrée $x(t)$ est une impulsion de Dirac, la sortie $y(n)$ et la réponse $h(n)$

$$y(n) = \sum_{i=0}^N b_i x(n - i) \quad (2.1)$$

D'où

$$h(n) = \sum_{i=0}^N b_i \delta(n - i) \quad (2.2)$$

Donc la fonction de transfert d'un filtre RIF est :

$$H(z) = \sum_{n=0}^N b_n \cdot z^{-n} \quad (2.3)$$

b Filtre à réponse impulsionnelle infinie RII

Des filtre qui sont très efficaces mais avec plusieurs pôles et zéros, la forme de la réponse impulsionnelle n'est pas facile a déterminé plus que le problème de stabilité et contrôle[11]. Donc la sortie est une combinaison linéaire d'un ensemble fini d'éléments d'entrées et de sortie.

pour :

$$y(n) = \sum_{i=0}^N b_i x(n - i) - \sum_{i=1}^M a_i y(n - i) \quad (2.4)$$

d'où la fonction de transfert d'un filtre RII est :

$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^N b_i z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^M a_i z^{-i}} \quad (2.5)$$

2.2 Processus aléatoire

Un processus aléatoire (ou stochastique) est une famille de fonctions $X(t)$, réelles ou complexes, définies dans un espace de probabilité, c'est-à-dire dépendant de deux variables, dont l'une est le temps t (usuellement, mais cela peut être l'espace pour des images), et dont l'autre est la variable ζ de l'espace des épreuves.

Selon que les variables sont continues ou discrètes, on parle de processus aléatoires continus ou discrets.

Si le temps est discret en raison d'un échantillonnage, on a une suite aléatoire. Si le temps est discontinu et que le signal apparaît à des instants aléatoires, on parle de processus ponctuel [9].

2.3 Problème de base du filtrage adaptatif

Les méthodes adaptatives en traitement du signal visent l'adaptation automatique des opérateurs de traitement aux propriétés statistiques des signaux et des systèmes, ainsi que l'adaptation à leurs variations dans le temps. Il s'agit donc d'un mélange bien pondéré entre la stationnarité, qui permet grâce à la permanence dans le temps de propriétés statistiques de se débarrasser, ou tout au moins de réduire, les fluctuations

purement aléatoires, et la non-stationnarité, c'est-à-dire la variation «lente» au cours du temps de ces propriétés, sans laquelle il n'y aurait pas besoin de l'adaptatif : il suffirait de calculer une fois pour toute le «filtre optimal» puis de le mettre en ligne [14].

2.3.1 Définition

Un filtre adaptatif est un filtre numérique dont les coefficients se modifient eux-mêmes en fonction des signaux extérieurs [15]. Le principe de fonctionnement du filtre adaptatif est représenté dans la figure 3.1, Il s'agit d'effectuer l'opération sur un signal d'entrée $x(n)$ pour avoir une fonction d'erreur $e(n)$ le plus minimiser par une différence entre une sortie $y(n)$ et un signal de référence $d(n)$ sert à contrôler les coefficients du filtre pour chaque nouvel itération.

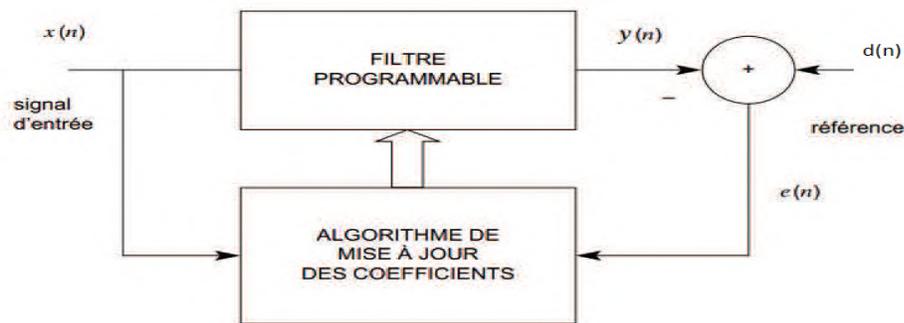


Figure 2.2. Principe d'un filtre adaptatif

2.3.2 Critères de choix de l'algorithme

Le choix de l'algorithme se fera en fonction des critères suivants :

- La rapidité de convergence qui sera le nombre d'itérations nécessaires pour converger à la solution optimale
- La capacité de poursuite des variations du processus.
- La robustesse aux interférences
- La complexité
- La structure
- Les propriétés numériques (stabilité et précision)

2.3.3 Application

On peut distinguer quatre grandes classes d'applications :

a Identification des systèmes

$d(n)$ est la sortie du système que l'on souhaite identifier

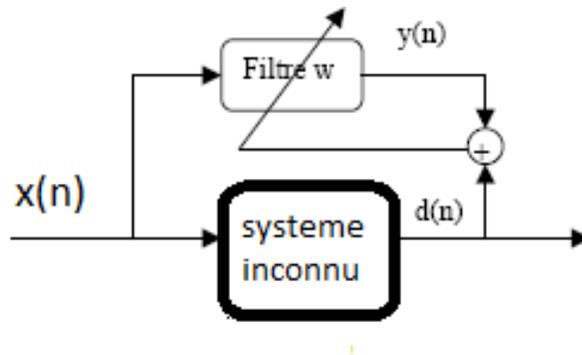


Figure 2.3. Schéma d'application d'identification des systèmes.

b Prédiction linéaire

$d(n)$ est le signal à l'instant n et $y(n)$ le signal prédit à partir du signal aux instants précédents

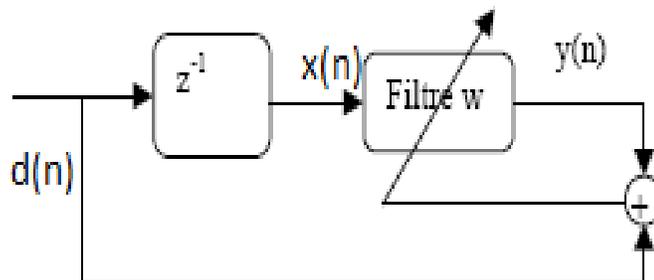


Figure 2.4. Schéma d'application de la prédiction linéaire

c Modélisation inverse (égalisation, déconvolution)

$d(n)$ est l'entrée (retardée) du système que l'on cherche à « inverser ».

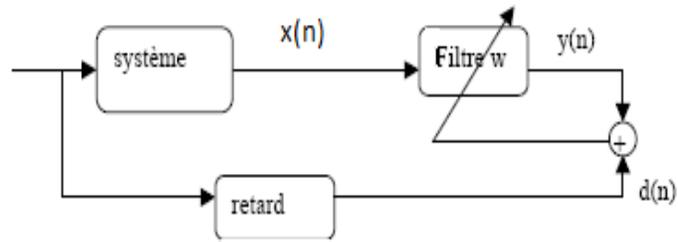


Figure 2.5. Schéma d'application de la modélisation inverse

***d* Annulation d'interférences (annulation d'écho, de bruit)**

$d(n)$ est un signal primaire qui comporte les interférences à annuler. $u(n)$ est le signal de référence dénué (ou presque) d'information et obtenu par un capteur proche de celui qui fournit $d(n)$.

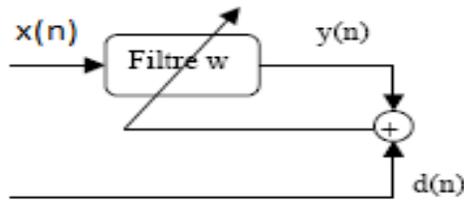


Figure 2.6. Schéma d'application d'Annulation d'interférences.

2.4 Processus stochastique discrets

On s'intéresse de définir les outils de description des processus stochastique discrets, échantillonnés de façon uniforme dans le temps. Dans ce cadre, on considère une séquence :

$$x(n), x(n-1), \dots, x(n-L) \quad (2.6)$$

comme une réalisation particulière de $L+1$ échantillons d'un processus aléatoire, où n représente le temps discret. Bien sûr, en théorie, un processus stochastique n'est pas associé à une seule réalisation mais à un nombre infini de réalisations sur lesquelles on peut faire des calculs statistiques, pourvu que l'on connaisse la distribution de probabilité [16].

2.4.1 Matrices d'auto-corrélation

Soit le vecteur d'observation d'une série temporelle stationnaire, on note $x(n)$ le vecteur de taille $L \times 1$:

$$x(n) = [x(n), x(n-1), x(n-2), \dots, x(n-L+1)]^T \quad (2.7)$$

où T : représente la transposition.

Donc la matrice d'auto-corrélation d'un processus stochastique stationnaire à temps discrète définie par :

$$R(k) = E[x(n) x(n)^H] = E \left\{ \begin{bmatrix} x(n) \\ x(n-1) \\ \vdots \\ x(n-L+1) \end{bmatrix} [x^*(n) x^*(n-1) \dots x^*(n-L+1)] \right\}$$

$$= \begin{bmatrix} r(0) & r(1) & \dots & r(L-1) \\ r(-1) & r(0) & \dots & r(L-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r(-L+1) & r(-L+2) & \dots & r(0) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Où $()^*$ représente l'opérateur de conjugaison, $()^H$ représente la transposée conjuguée (hermitienne).

2.4.2 Matrice d'auto-corrélation d'un bruit blanc :

Un bruit blanc a une moyenne nulle et une variance constante. Pour un bruit $u(n)$, la moyenne et l'auto-corrélation sont définis par suivant :

$$m_u = E[u(n)] = 0 \quad (2.9)$$

$$R_u(k) = E[u(n)u^*(n-k)] = \begin{bmatrix} \sigma_u^2(n) & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_u^2(n) & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_u^2(n) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Chapitre 3 Estimation de la fréquence fondamentale par algorithmes adaptatifs

3.1 Introduction

Dans les réseaux électriques, la fréquence du système fluctue normalement autour de sa valeur nominale dans une plage acceptable. L'écart de la fréquence du système par rapport à sa plage nominale représente un déséquilibre entre la charge et la génération, ce qui est un événement critique. Par conséquent, il est impératif de surveiller attentivement les variations possibles de la fréquence. La plupart des applications de protection et de contrôle dans les systèmes d'alimentation électrique nécessitent une estimation précise et rapide de la fréquence du système. Une estimation erronée de la fréquence peut provoquer une défaillance catégorique du réseau en raison d'une perte de charge inadéquate ou retardée [12].

La fréquence est un paramètre de qualité de puissance important et ne peut être modifiée que dans une petite plage prédéfinie; Ses variations sont la conséquence d'un déséquilibre dynamique entre la génération et la charge. Une estimation précise de la fréquence est essentielle, car le maintien de la valeur de fréquence nominale est une condition préalable à la stabilité de la grille et au fonctionnement normal des appareils électriques. La fréquence est également un paramètre clé dans le contrôle des réseaux distribués où il peut être utilisé, par exemple, pour déterminer le contenu harmonique des tensions tirées par des charges non linéaires.

La qualité de l'évaluation de la valeur de la fréquence fondamentale a des conséquences directes sur le calcul d'un grand nombre de grandeurs électrotechniques essentielles à l'analyse des perturbations observées sur les réseaux électriques [13].

Pour cela des nombreuses méthodes sont proposées dans la littérature pour estimer la fréquence fondamentale des formes d'onde mesurées sur les réseaux électriques. Parmi ces méthodes Les méthodes adaptatives en traitement du signal qui visent la réalisation des opérations d'optimisation statistique (prédiction linéaire) par traitement en ligne des données. Elles cherchent à optimiser les paramètres caractéristiques des traitements. Elles constituent actuellement l'un des grands thèmes de la discipline du traitement du signal. Leur succès est dû à la philosophie qui les sous-tend, qui est de s'appuyer sur le caractère séquentiel de l'acquisition du signal pour effectuer l'acquisition de manière récursive. L'avantage principal de l'adaptatif est la simplicité des calculs : quelques incréments successives suffisent pour fournir l'optimum.

Dans ce chapitre, des nouvelles techniques de filtrage adaptatif utilisés afin d'estimer la fréquence fondamentale dans les réseaux électriques comme les algorithmes de gradient déterministe (RLS, BC-RLS et RTLS).

3.2 Estimation de la fréquence fondamentale

Les observations de temps discrets du système d'alimentation triphasé déséquilibré sont modélisées comme suite :

$$v_{a,n} = V_a \cos(\omega n T_s + \varphi)$$

$$v_{b,n} = V_b \cos\left(\omega n T_s + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right)$$

et

$$v_{c,n} = V_c \cos\left(\omega n T_s + \varphi + \frac{2\pi}{3}\right)$$

où f est la fréquence du système, V_a , V_b et V_c sont les valeurs de tension de crête, φ est un angle de phase initial et n est l'indice de temps entier. En pratique, ces tensions sont mesurées avec du bruit. Nous exprimons les mesures bruyantes comme suite :

$$\tilde{v}_{a,n} = v_{a,n} + u_{a,n}$$

$$\tilde{v}_{b,n} = v_{b,n} + u_{b,n}$$

et

$$\tilde{v}_{c,n} = v_{c,n} + u_{c,n}$$

où $u_{a,n}$, $u_{b,n}$ et $u_{c,n}$ désignent le bruit additif aux phases respectives. Nous supposons que les bruits ont des moyennes nulles. Ainsi, nous avons

$$E[u_{a,n}] = E[u_{b,n}] = E[u_{c,n}] = 0,$$

$$E[u_{a,n}^2] = \delta_a^2, \quad E[u_{b,n}^2] = \delta_b^2 \quad \text{et} \quad E[u_{c,n}^2] = \delta_c^2,$$

L'application de la transformation de Clarke aux tensions triphasées bruyantes se traduit par :

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha,n} \\ v_{\beta,n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{\alpha,n} \\ u_{\beta,n} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} v_{a,n} \\ v_{b,n} \\ v_{c,n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{a,n} \\ u_{b,n} \\ u_{c,n} \end{bmatrix} \right)$$

Le facteur $\sqrt{\frac{2}{3}}$ est utilisé pour s'assurer que la puissance du système est invariante sous cette transformation qui produit un signal de tension à valeur complexe (connu sous le nom de signal $\alpha\beta$) qui peut représenter le système d'alimentation triphasé. Le signal $\alpha\beta$ moins-bruyant est calculé comme suit :

$$\begin{aligned} v_n &= v_{\alpha,n} + jv_{\beta,n} \\ &= (A + jB) \cos(2\pi fnT_s + \theta) + (B + jC) \sin(2\pi fnT_s + \theta) \end{aligned} \quad (3.1)$$

où
$$A = \sqrt{\frac{2}{3}}V_a + \frac{1}{2\sqrt{6}}(V_b + V_c)$$

$$B = -\frac{1}{2\sqrt{2}}(V_b - V_c)$$

et
$$C = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{3}{2}}(V_b + V_c)$$

On écrit le signal $\alpha\beta$ bruyant comme :

$$\tilde{v}_n = v_n + u_n \quad (3.2)$$

Le bruit complexe additif u_n est lié au bruit aux phases individuelles via

$$u_n = u_{\alpha,n} + ju_{\beta,n}$$

$$= \sqrt{\frac{3}{2}} \left(u_{a,n} - \frac{u_{b,n}}{2} - \frac{u_{c,n}}{2} \right) + \frac{j}{\sqrt{2}} (u_{b,n} - u_{c,n})$$

Nous montrons que l'évolution du temps du signal $\alpha\beta$ non-bruyant, x_n peut être décrite par un modèle prédictif linéaire autorégressif (AR2) de second ordre exprimé en

$$\frac{1}{2}(v_{n-2} + v_n) = hv_{n-1} \quad (3.3)$$

$$\text{où} \quad h = \cos(2\pi f T_s) \quad (3.4)$$

Ce modèle relie la fréquence du système à trois échantillons de tension consécutifs des trois phases à travers son paramètre de valeur réelle h . À l'aide de (3.3) et (3.4), la fréquence du système peut être extraite de trois échantillons consécutifs du signal $\alpha\beta$ à condition que

$$0 < 2\pi f T_s < \pi \quad \text{où} \quad T_s < \frac{1}{2f}$$

Cependant, comme les échantillons mesurés sont bruyants, l'identification du paramètre de modèle h doit être effectuée par une technique d'estimation linéaire. Compte tenu d'une estimation de h à l'instant instantané n , noté $f_{estimé}$.

L'estimation de la fréquence du système est calculée par :

$$f_{estimé} = \frac{1}{2\pi T_s} \arccos(h_{estimé})$$

3.2.1 L'algorithme de moindre carré récursif (RLS)

Le filtre RLS (Réursive Least Squares) est un algorithme qui trouve récursivement les coefficients de filtre qui minimisent une fonction de coût des moindres carrés linéaires pondérés en relation avec les signaux d'entrée. Les algorithmes RLS sont connus pour leurs excellentes performances lorsqu'ils travaillent dans des environnements variables dans le temps, mais au prix d'une complexité de calcul accrue et de certains problèmes de stabilité. [18]

Sur la base du modèle (3.3), une estimation LS pondérée exponentiellement de h à l'instant instantané n du signal $\alpha\beta$ bruyant est donnée par :

$$\omega_n = \text{arccmin} \|y_n - wx_n\|^2 \quad (3.5)$$

où

$$x_n = \Lambda \begin{bmatrix} \tilde{v}_{n-1} \\ \tilde{v}_{n-2} \\ \dots \\ \tilde{v}_1 \\ \tilde{v}_0 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad y_n = \frac{\Lambda}{2} \begin{bmatrix} \tilde{v}_{n-2} + \tilde{v}_n \\ \tilde{v}_{n-3} + \tilde{v}_{n-1} \\ \dots \\ \tilde{v}_0 + \tilde{v}_2 \\ \tilde{v}_{-1} + \tilde{v}_1 \end{bmatrix}$$

x_n et y_n sont les vecteurs de données d'entrée et de sortie pondérés exponentiellement, respectivement.

$$\Lambda = \text{diag} \{1, \sqrt{\lambda}, \dots, \sqrt{\lambda^{n-2}}, \sqrt{\lambda^{n-1}}\}$$

est une matrice de pondération exponentielle et $0 \ll \lambda < 1$.

Une solution récursive pour le problème d'optimisation de (3.5), appelée l'estimation RLS, est donnée comme: [19]

$$\omega_n = \frac{p_n}{r_n} \quad (3.6)$$

où p_n est la covariance moyenne en temps partiellement pondérée de l'entrée et de la sortie calculée comme :

$$\begin{aligned} p_n &= x_n^H y_n \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \lambda^{n-i} \tilde{v}_{i-1}^* (\tilde{v}_{i-2} + \tilde{v}_i) \\ &= \lambda p_{n-1} + \frac{1}{2} \tilde{v}_{n-1}^* (\tilde{v}_{n-2} + \tilde{v}_n) \end{aligned} \quad (3.7)$$

et r_n est la variance moyenne pondérée en fonction de la fréquence de l'entrée calculée en tant que :

$$\begin{aligned} r_n &= x_n^H x_n \\ &= \sum_{i=1}^n \lambda^{n-i} \tilde{v}_{i-1}^* \tilde{v}_{i-1} \\ &= \lambda r_{n-1} + |\tilde{v}_{n-1}|^2 \end{aligned} \quad (3.8)$$

Notez que nous considérons ω_n une estimation récursive parce que cela peut être mis à jour de manière récursive.

L'estimation de Biais :

Puisque $n \rightarrow \infty$, Le RLS estime w converger dans la moyenne [19]. Ainsi, nous avons

$$\begin{aligned}\bar{w}_\infty &= \lim_{n \rightarrow \infty} E[w_n] \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} E\left[\frac{p_n}{r_n}\right]\end{aligned}\quad (3.9)$$

L'application du théorème de Slutsky à l'équation précédent nous donne :

$$\bar{w}_\infty = \frac{\bar{p}_\infty}{\bar{r}_\infty} \quad (3.10)$$

où
$$\bar{p}_\infty = \lim_{n \rightarrow \infty} E[p_n] \quad (3.11)$$

et
$$\bar{r}_\infty = \lim_{n \rightarrow \infty} E[r_n] \quad (3.12)$$

Nous montrons que :

$$\bar{p}_\infty = \frac{hD}{1-\lambda} \quad (3.13)$$

et
$$\bar{r}_\infty = \frac{D+\sigma^2}{1-\lambda} \quad (3.14)$$

où
$$D = B^2 + \frac{A^2}{2} + \frac{C^2}{2}$$

et
$$\sigma^2 = \frac{2}{3}(\sigma_a^2 + \sigma_b^2 + \sigma_c^2)$$

La substitution de (3.13) et (3.14) à (3.10) nous donne :

$$\bar{w}_\infty = \frac{hD}{D+\sigma^2} \quad (3.15)$$

On voit à partir de (3.15) que, lorsque le bruit est présent, $\sigma^2 \neq 0$ l'estimation LS est biaisée. Ceci est dû au fait que les techniques d'estimation LS ne compensent que l'effet du bruit à la sortie du modèle linéaire sous-jacent et négligent l'effet du bruit à l'entrée. Le biais d'estimation de l'approche LS est

$$b = \bar{w}_\infty - h = -\frac{h\sigma^2}{D + \sigma^2}$$

Résumé de l'algorithme RLS:

$$w(0) = 0, \quad p(0) = \delta^{-1}I$$

Pour $n = 1, 2, \dots$

$$k(n) = \frac{\lambda^{-1}p(n-1)v(n)}{1 + \lambda^{-1}v^T(n)p(n-1)v(n)}$$

$$e(n) = d(n) - v^T(n)w(n-1)$$

$$w(n) = w(n-1) + k(n)e(n)$$

$$p(n) = \lambda^{-1}p(n-1) + \lambda^{-1}k(n)v^T(n)p(n-1)$$

3.2.2 L'algorithme de BCRLS (Bias-Compensated Recursive Least Squares)

L'estimation RLS peut être conçue en soustrayant le biais d'estimation LS de l'estimation RLS comme :

$$\begin{aligned} \omega &= w_n - b \\ &= \frac{p_n}{r_n} + \frac{h\sigma^2}{D+\sigma^2} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Puisque h et D dans (3.16) ne sont pas connus a priori, ils doivent être remplacés par certaines quantités connues. Le paramètre h peut être remplacé par son estimation la plus récente ω_{n-1} . Considérant (3.14) et prenant r_n comme approximation instantanée pour \bar{r}_∞ . D peut également être remplacé par $(1 - \lambda)r_n - \sigma^2$.

Par conséquent, l'estimation BCRLS est déclarée comme :

$$\omega_n = \frac{p_n}{r_n} + \frac{\sigma^2}{(1-\lambda)r_n} \omega_{n-1} \quad (3.17)$$

Notez que cette estimation nécessite encore la connaissance préalable de la variance du bruit σ^2 .

La convergence en moyenne

Lorsque le facteur λ est proche de l'unité ($\lambda \rightarrow 1$), après un assez grand nombre d'itérations, p_n et r_n convergent vers \bar{p}_∞ et \bar{r}_∞ respectivement. L'attente des deux côtés de (3.17) donne :

$$\bar{\omega}_n = \frac{\bar{p}_\infty}{\bar{r}_\infty} + \frac{\sigma^2}{(1-\lambda)\bar{r}_\infty} \bar{\omega}_{n-1} \quad (3.18)$$

où
$$\bar{\omega}_n = E[\bar{\omega}_n]$$

L'utilisation de (3.13) et (3.14) en (3.18) donne :

$$\bar{\omega}_n = \frac{hD}{D+\sigma^2} + \frac{\sigma^2}{D+\sigma^2} \bar{\omega}_{n-1} \quad (3.19)$$

Puisque nous avons

$$0 < \frac{\sigma^2}{D + \sigma^2} < 1$$

La récursivité (3.19) est stable donc converge. En conséquence, à l'état stationnaire, l'équation (3.19) se transforme en

$$\bar{\omega}_\infty = \frac{hD}{D+\sigma^2} + \frac{\sigma^2}{D+\sigma^2} \bar{\omega}_\infty \quad (3.20)$$

où
$$\bar{\omega}_\infty = \lim_{n \rightarrow \infty} \bar{\omega}_n$$

Nous concluons de (3.20) que l'algorithme BCRLS est asymptotiquement imparfait comme :

$$\bar{\omega}_\infty = h$$

Résumé de l'algorithme BCRLS:

$$r(0) = 0, \quad p(0) = 0, \quad w(0) = 0$$

Pour $n = 1, 2, \dots$

$$r(n) = \lambda r(n-1) + |v(n-1)|^2$$

$$p(n) = \lambda p(n-1) + \frac{v(n-1)(v(n-2) + v(n))}{2}$$

$$w(n) = \frac{p(n)}{r(n)} + \frac{\delta^2}{(1-\lambda)r(n)} w(n-1)$$

3.2.3 L'algorithme de RTLS (Recursive Total Least Squares)

L'estimation de RTLS de h à l'instant instantané n désigné par W_n , est calculée de telle sorte qu'elle correspond au vecteur de données d'entrée x_n au vecteur de données de sortie y_n , en encourageant une perturbation minimale dans les données, elle détient que :

$$(x_n + \varepsilon_n)w_n = y_n + \delta_n$$

où $[\varepsilon_n, \delta_n]$ est la perturbation minimale de la norme Frobenius.

Selon l'analyse de [20], en utilisant la décomposition de valeur singulière de la matrice de données augmentée et pondérée $[x_n, y_n] T$, l'estimation TLS est donnée par :

$$w_n = \frac{z_{1,n}}{\gamma z_{2,n}}$$

où $z_n = [z_{1,n}, z_{2,n}]^T$ est le vecteur singulier correct correspondant à la plus petite valeur singulière de $[x_n, y_n] T$.

La matrice de pondération T explique la disparité dans la variance du bruit sur l'entrée et la sortie, notée ζ_i^2 et ζ_0^2 respectivement, et définie comme :

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \gamma \end{bmatrix}$$

où
$$\gamma = \sqrt{\frac{\zeta_i^2}{\zeta_0^2}}$$

$$= \sqrt{\frac{\sigma^2}{\frac{1}{2}\sigma^2}}$$

$$= \sqrt{2}$$

Le vecteur z_n est également le vecteur propre correspondant à la plus petite valeur propre de la matrice de covariance de données augmentée et pondérée.

$$\psi_n = \begin{bmatrix} x_n^H \\ y_n^H \end{bmatrix} [x_n \quad y_n]^T,$$

Qui peut être écrit comme :

$$\psi_n = \begin{bmatrix} r_n & \sqrt{2p_n} \\ \sqrt{2p_n^*} & 2s_n \end{bmatrix}$$

où p_n et r_n sont donnés par (3.7) et (3.8), respectivement, et s_n est la variance moyenne pondérée en fonction de la puissance de sortie calculée comme :

$$\begin{aligned} s_n &= y_n^H y_n \\ s_n &= \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n \lambda^{n-i} (\tilde{v}_{i-2}^* + \tilde{v}_i^*)(\tilde{v}_{i-2} + \tilde{v}_i) \quad (3.21) \\ &= \lambda s_{n-1} + \frac{1}{4} |\tilde{v}_{n-2} + \tilde{v}_n|^2 \end{aligned}$$

La décomposition propre de ψ_n donne z_n . Cependant, comme alternative plus efficace en termes de calcul, nous proposons de mettre à jour z_n de manière adaptative en exécutant une seule itération de la méthode de puissance inverse à chaque instant instantané. En analyse numérique, la méthode de l'énergie inverse est utilisée pour trouver un vecteur propre approximatif lorsqu'une approximation d'une valeur propre correspondante est connue [21]. Nous sommes intéressés à trouver le vecteur propre qui appartient à la plus petite valeur propre. Par conséquent, nous pouvons prendre zéro comme approximation de cette valeur propre. Par conséquent, l'estimation de z_n en utilisant la méthode de l'énergie inverse est réalisée par la récurrence suivante:

$$z_n = \psi_n^{-1} z_{n-1} \quad (3.22)$$

En multipliant les deux côtés de l'équation par $\psi_n / (\sqrt{2} z_{2,n-1} z_{2,n})$ donne

$$\psi_n \begin{bmatrix} w_n \\ -1/\sqrt{2} \end{bmatrix} = \frac{z_{2,n-1}}{z_{2,n}} \begin{bmatrix} w_{n-1} \\ -1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

où équivalent :

$$r_n w_n - p_n = \frac{z_{2,n-1}}{z_{2,n}} w_{n-1} \quad (3.23)$$

et

$$p_n^* w_n - s_n = \frac{z_{2,n-1}}{2z_{2,n}} \quad (3.24)$$

La résolution de (3.23) pour w_n après substitution de (3.24) en elle donne une estimation récursive TLS (RTLS) de

$$w_n = \frac{p_n + 2s_n w_{n-1}}{r_n + 2p_n^* w_{n-1}} \quad (3.25)$$

a La convergence en moyenne

Ainsi $\lambda \rightarrow 1$ et après un assez grand nombre d'itérations, p_n , r_n et s_n convergent vers \bar{p}_∞ , \bar{r}_∞ et \bar{s}_∞ respectivement.

$$\bar{s}_\infty = \lim_{n \rightarrow \infty} E[s_n] \quad (3.26)$$

Par la suite, l'attente des deux côtés de (3.25) donne

$$\bar{w}_n = \frac{\bar{p}_\infty + 2\bar{s}_\infty \bar{w}_{n-1}}{\bar{r}_\infty + 2\bar{p}_n^* \bar{w}_{n-1}} \quad (3.27)$$

où

$$\bar{w}_n = E[w_n]$$

On montre que

$$\bar{s}_\infty = \frac{2h^2 D + \sigma^2}{2(1-\lambda)} \quad (3.28)$$

La substitution de (3.13), (3.14) et (3.28) en (3.27) conduit à

$$\bar{w}_n = \frac{hD + (2h^2 D + \sigma^2) \bar{w}_{n-1}}{D + \sigma^2 + 2hD \bar{w}_{n-1}} \quad (3.29)$$

On pose le changement de variable comme suit

$$\kappa_n = \frac{\bar{w}_n - h}{\bar{w}_n + \frac{1}{2h}}$$

et en utilisant (3.29), nous pouvons montrer que

$$\kappa_n = \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + (2h^2 + 1)D} \kappa_{n-1}$$

puisque nous avons

$$0 < \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + (2h^2 + 1)D} < 1$$

il détient que

$$k_\infty = \lim_{n \rightarrow \infty} k_n = 0$$

et par conséquent

$$\bar{w}_\infty = \lim_{n \rightarrow \infty} \bar{w}_n = h$$

En d'autres termes, l'algorithme RTLS est convergent dans la moyenne et asymptotiquement non biaisé.

Résumé de l'algorithme RTLS:

$$r(0) = 0, \quad p(0) = 0, \quad w(0) = 0, \quad s(0) = 0$$

Pour $n = 1, 2, \dots$

$$r(n) = \lambda r(n-1) + |v(n-1)|^2$$

$$p(n) = \lambda p(n-1) + \frac{v(n-1)(v(n-2) + v(n))}{2}$$

$$s(n) = \frac{\lambda s(n-1)|v(n-2) + v(n)|^2}{4}$$

$$w(n) = \frac{p(n) + 2s(n)w(n-1)}{r(n) + 2p^*(n)x(n-1)}$$

3.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les principes de base du filtrage adaptatif ainsi qu'un ensemble des techniques adaptatives pour l'estimation de la fréquence fondamentale.

Nous avons vu les formulations mathématiques des différentes techniques utilisées dans notre travail présent dans le chapitre ultérieur où on a présenté la validation expérimentale de l'algorithme des moindres carrés récursif (RLS), l'algorithme BCRLS (Bias Compensated Recursive Least Squares) et RTLS (Recursive Total Least Squares).

Chapitre 4 Résultats expérimentaux de l'estimation de la fréquence

4.1 Introduction

L'étude des changements et de la variation des caractéristiques d'un réseau de distribution électrique couvre une grande importance. En électrotechnique, l'objectif est d'avoir une bonne qualité de surveillance et un contrôle plus confort de ces variation pour que le système soit toujours mise en marche (car ces changements indésirables représentent une pollution dans le système triphasé). En autre termes, des perturbations qui vont engendrer des dysfonctionnements aux niveaux des réseaux électriques [18]. Pour cela, l'estimation de la fréquence fondamentale est très importante à cause de l'information tirée par le suivie de ce paramètre. De ce fait, dans ce chapitre on va réaliser une étude comparative entre des techniques d'estimation de la fréquence en se basant sur une approche adaptative. Les algorithmes utilisés sont : RLS , BCRLS et RTLS.

La comparaison est basée sur les propriétés et les critères de choix de chaque technique comme la rapidité de convergence, la capacité de poursuite, la robustesse, la stabilité et la précision.

Ce chapitre présente essentiellement les résultats de teste des programmes réalisés sous MATLAB, où on examinera un signal sinusoïdal avec différents types des perturbations.

Les premières étapes de test prennent le cas des amplitudes harmoniques et la fréquence fondamentale constante. Le deuxième test présente le cas où les

amplitudes et harmoniques sont constantes alors que la fréquence fondamentale est variable.

Dans la troisième étape on a expérimentée le signal test où les amplitudes harmoniques sont variables et la fréquence fondamentale est constante. A la fin, le test est pour amplitudes, harmoniques et fréquence fondamentale variables.

Nous supposons que la fréquence fondamentale varie dans une bande de fréquence de 48 à 52 Hz et que sa vitesse de variation est lente vis-à-vis de sa valeur nominale du réseau.

Pour la fréquence d'échantillonnage des signaux de test, on a respecté le théorème de Shannon et on a prendre $F_e = 4 * f_0$ tant que f_0 est la fréquence fondamentale et avec une amplitude $A=10$ volt. Ces signaux de test sont toujours accompagnés par des parasites qui sont définies précédemment comme des tensions à haute fréquence qui viennent s'ajouter sur la sinusoïde et provoquent ainsi des déformations. Donc pour avoir ce phénomène dans notre expérience on a ajouté un bruit blanc de type gaussien aux signaux de test et on les considère comme des parasites qui influe sur les réseaux électriques.

Selon l'influence des perturbations harmoniques sur les signaux de test, on a préférée de simuler dans l'absence et la présence des harmoniques.

4.2 Cas où la fréquence fondamentale du réseau et les amplitudes harmoniques sont constantes

Comme étant définie précédemment selon les harmoniques, qui ayant une fréquence multiple entier de l'onde fondamentale généralement impaire, dans notre cas on va prendre une distorsion harmonique de rang 3 et 5. Le signal est modélisé par la forme suivant :

$$x(n) = A \cos\left(2\pi f_0 n + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{A}{3} \cos(2\pi(3f_0)n + \pi) + \frac{A}{5} \cos\left(2\pi(5f_0)n + \frac{\pi}{4}\right) + v(n)$$

Pour que f_0 est la fréquence fondamentale a estimé en [Hz]. $v(n)$ est un bruit gaussien modélisant les parasites.

Avec un rapport de signal sur bruit (RSB)=40 dB pour pouvoir étudier la robustesse des techniques d'estimation aux bruits.

On présente premièrement les résultats obtenus des expériences sous forme de tableaux (4.1) et (4.2). L'erreur en % est obtenue par le rapport de l'erreur de l'estimation de la fréquence sur la fréquence actuelle comme suite :

$$\text{erreur} = \frac{|f_{\text{actuelle}} - f_{\text{estimé}}|}{f_{\text{actuelle}}} \times 100$$

L'estimation de ce signal est effectuée à l'aide des différentes techniques : RLS, BCRLS et RTLS.

Technique d'estimation	Fréquence actuelle [Hz]	48.00	49.00	49.50	50.00	50.5.	51.00	52.00
RLS	Fréquence estimée [Hz]	48.01	48.99	49.51	49.99	50.49	51.01	51.98
	Erreur [%]	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.038
BCRLS	Fréquence estimée [Hz]	47.98	48.99	49.49	50.00	50.51	51.01	52.02
	Erreur [%]	0.041	0.020	0.020	0.00	0.020	0.020	0.038
RTLS	Fréquence estimée [Hz]	48.00	49.00	49.50	50.00	50.50	51.00	52.00
	Erreur [%]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tableau 4.1. Estimation de la fréquence fondamentale par différentes techniques pour le cas sans perturbations harmoniques avec RSB=40 dB.

Technique d'estimation	Fréquence actuelle [Hz]	48.00	49.00	49.50	50.00	50.50	51.00	52.00
RLS	Fréquence estimée [Hz]	47.98	48.99	49.51	49.99	50.52	50.99	52.02
	Erreur [%]	0.04	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03
BCRLS	Fréquence estimée [Hz]	47.98	48.99	49.49	50.01	50.51	51.01	52.02
	Erreur [%]	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
RTLS	Fréquence estimée [Hz]	48.01	49.01	49.51	50.01	50.49	50.99	51.99
	Erreur [%]	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

Tableau 4.2. Estimation de la fréquence fondamentale par différentes techniques pour le cas avec perturbations harmoniques avec RSB=40dB.

D'après les résultats obtenu au tableau (4.1) quand on a fait l'estimation des différentes fréquences par plusieurs technique avec un niveau de bruit de 40dB, nous observons que l'erreur est presque la même pour chaque technique et d'ordre de 0.020% mais l'algorithme RTLS est la plus robuste aux bruit que d'autre algorithme.

Selon l'influence des harmoniques sur la convergence des technique de travaille, le tableau (4.2) confirme l'impact de ces dernier sur toute les techniques utilisée.

Pour que on peut juger la qualité de convergence de toute ces techniques, on essaye de faire une comparaison entre les algorithmes dans la présence du bruit et le cas ou on ajoute les harmoniques et le cas d'absence de ces dernier, on trace les résultats des tableaux précédent sous forme des courbes pour une fréquence fondamentale de 50Hz.

Le tableau (4.3) présente les paramètres de convergence pour chaque technique :

Technique	Facture d'adaptation	Variance σ^2	Paramètre d'estimation δ
RLS	$\lambda = 0.95$	/	0.9
BCRLS	$\lambda = 0.98$	0.01	/
RTLS	$\lambda = 0.98$	0.01	/

Tableau 4.3. Les paramètres de convergence.

4.2.1 Cas sans harmoniques

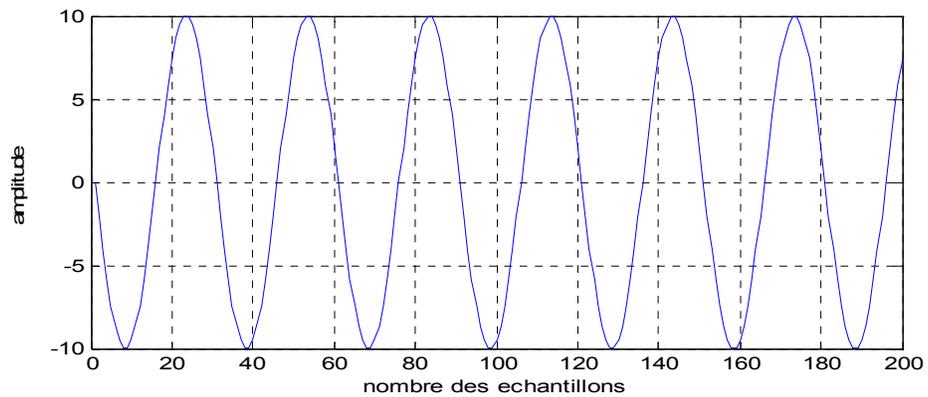


Figure 4.1. Signal du test non bruité avec $f_e=1500\text{Hz}$.

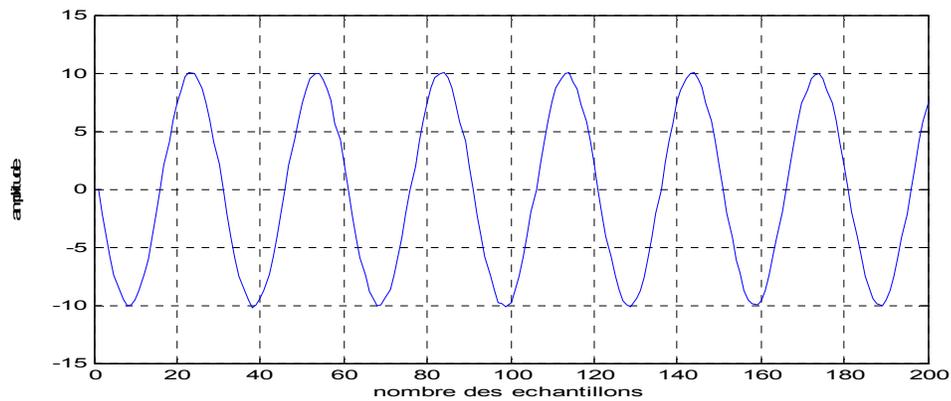


Figure 4.2. Signal du test bruité avec $f_e=1500\text{Hz}$ et RSB=40 dB

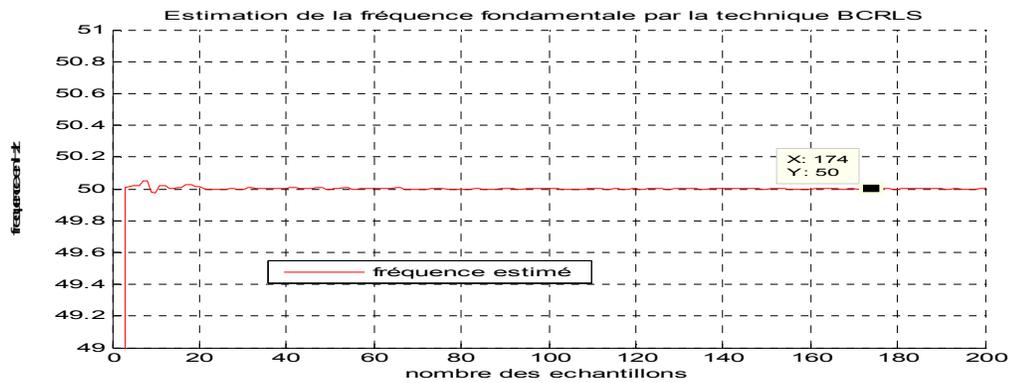
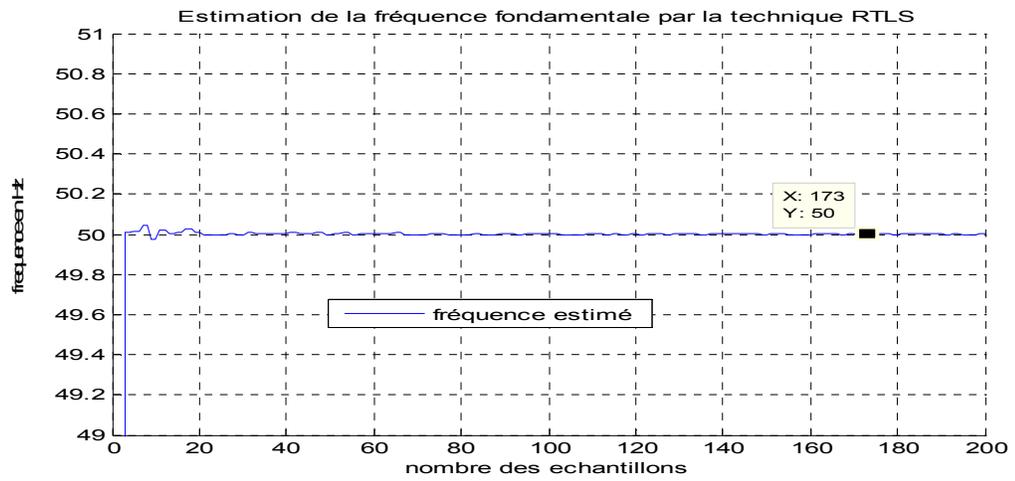
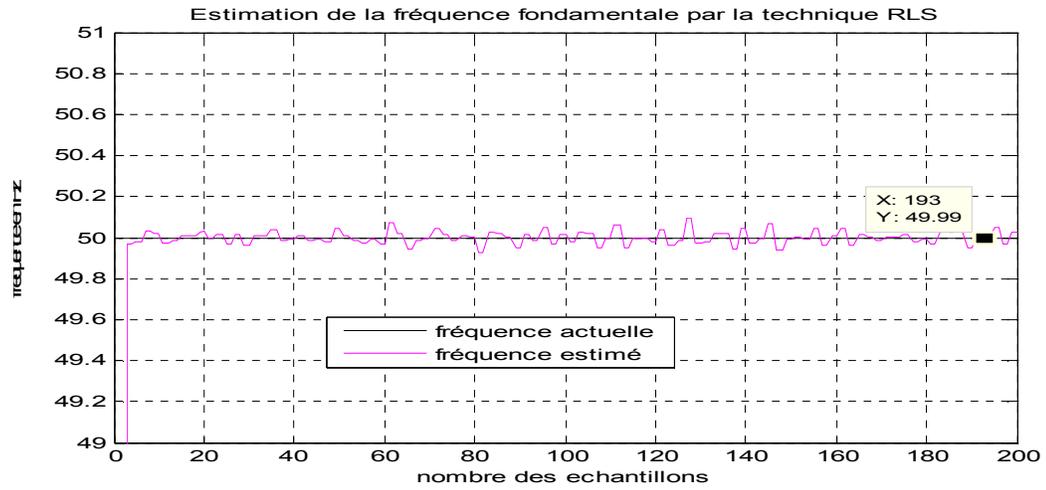


Figure 4.3. Estimation de la fréquence fondamentale à l'aide des différentes techniques adaptatives dans le cas d'absence d'harmoniques.

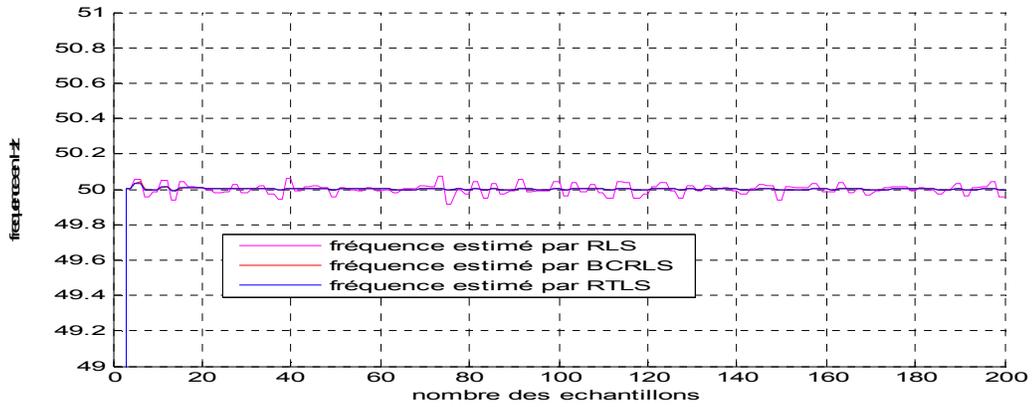


Figure 4.4 comparaison entre les différentes techniques d'estimation pour un signal non harmonisé.

4.2.2 Cas avec harmoniques

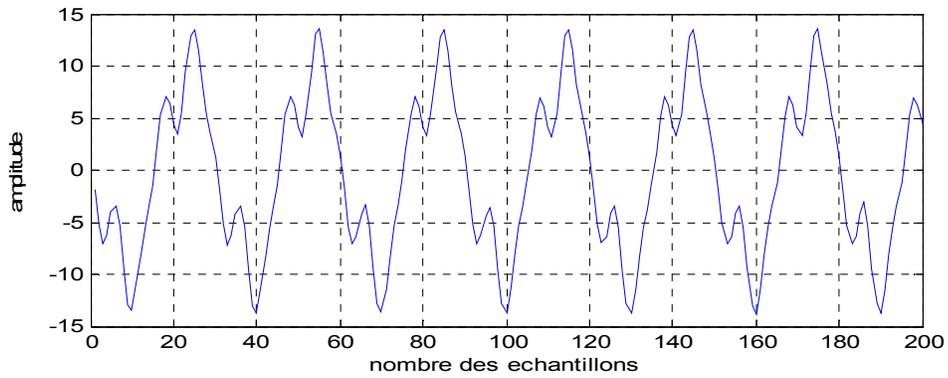
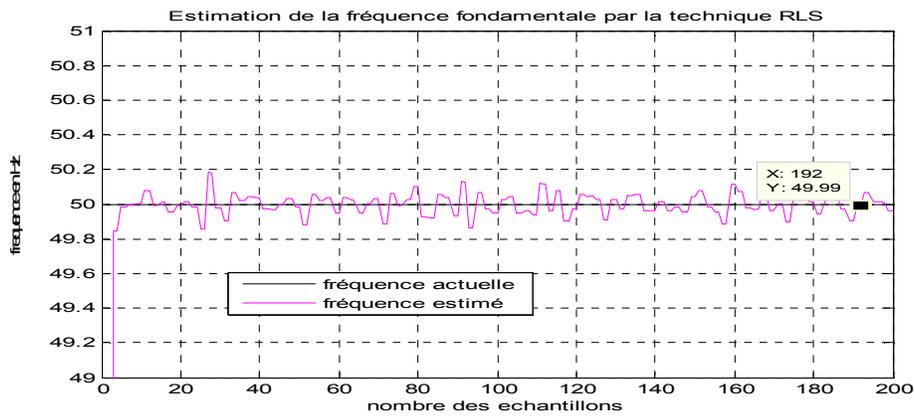


Figure 4.5 signal du test bruité avec RSB=40dB et harmonisé de rang 3 et 5.



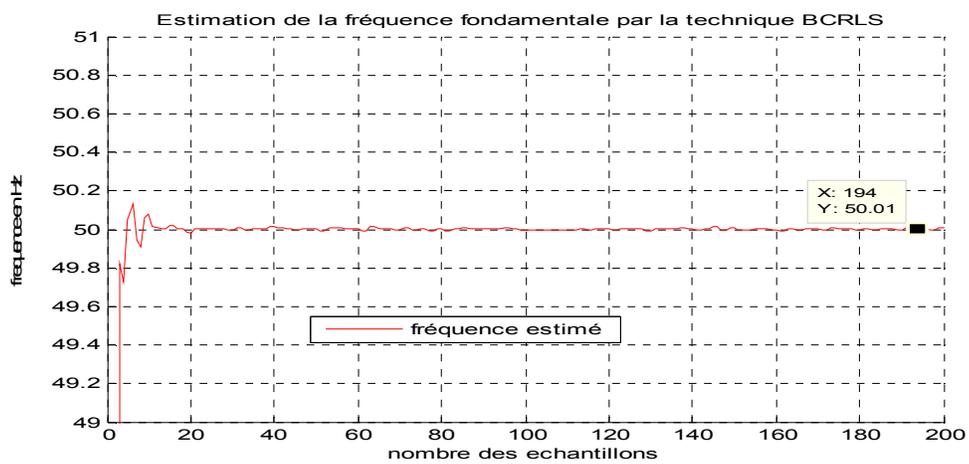
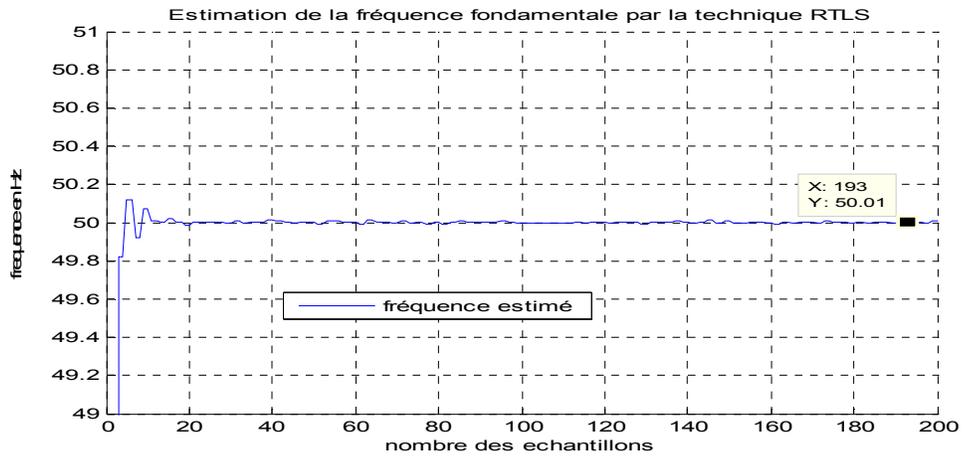


Figure 4.6 Estimation de la fréquence fondamentale à l'aide des différentes techniques adaptatives dans le cas de présence d'harmoniques.

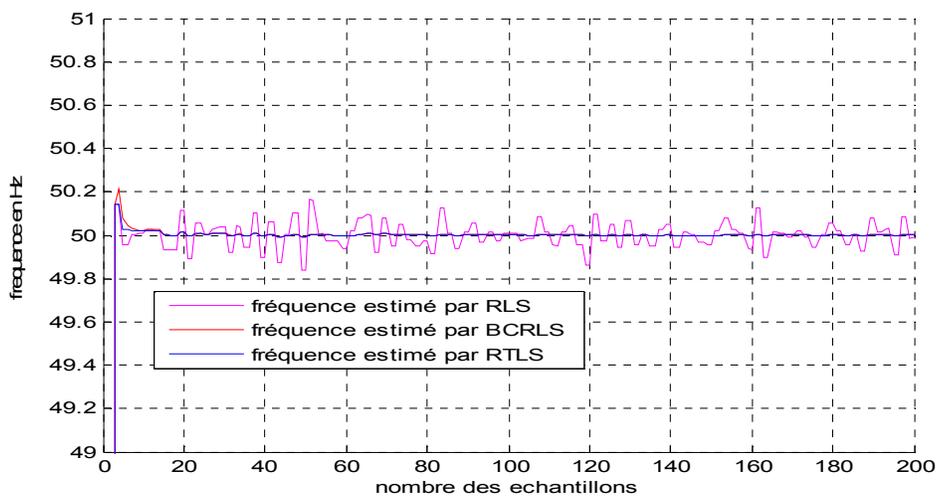


Figure 4.7. comparaison entre les différentes techniques d'estimation pour un signal harmonisé.

4.2.3 Interprétations

Les résultats de simulation montrent que toutes les techniques d'adaptation présentent une bonne poursuite et rapidité de convergence pour les deux cas d'absence et de présence d'harmoniques, tant que la technique RTLS est plus robuste au bruit.

Donc l'influence des harmoniques sur les techniques adaptatives étudiées est très petite.

4.3 Cas où les amplitudes harmoniques sont variables et la fréquence fondamentale du réseau est constant

Dans cette deuxième étape, on veut manipuler notre réseau par un autre type de perturbation qui est reliée par le changement d'amplitude seulement, cette phénomène est présentée comme les creux de tension provoqué par un court-circuit.

On peut les modélisés par le signal suivant :

$$x(n) = \left[A \cos \left(2\pi f_0 n + \frac{\pi}{2} \right) + A \cos \left(2\pi (3f_0) n + \pi \right) + A \cos \left(2\pi (5f_0) n + \frac{\pi}{4} \right) \right] (u(n) - 0.6u(n - 0.25F_e) + 0.4u(n - 0.57F_e)) + v(n)$$

où F_e comme toujours est la fréquence d'échantillonnage.

On va examiner la capacité de poursuite et la robustesse, même la précision des techniques d'estimation de la fréquence quand le réseau est influée par un niveau de bruit de 40dB, dans le cas de présence et d'absence des harmoniques durant la variation des amplitudes. Pour les mêmes paramètres de convergence et de fréquence fondamentale on a conclue à ces résultats :

4.3.1 Cas sans harmoniques

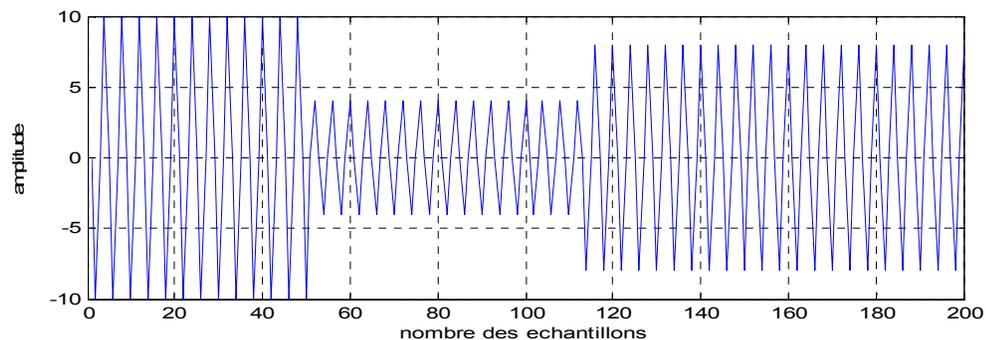


Figure 4.8. Signal du test non bruité.

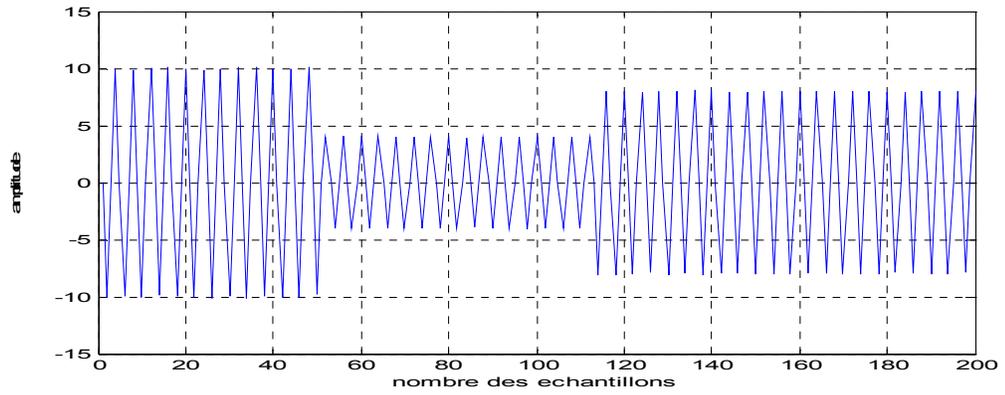
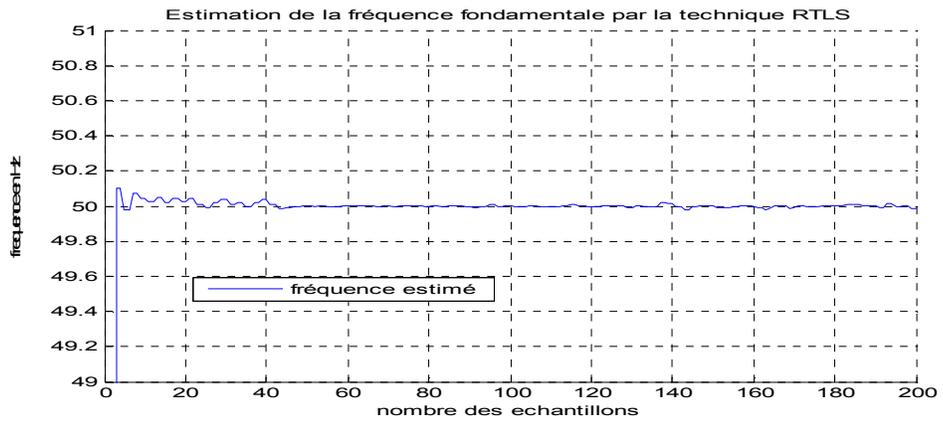
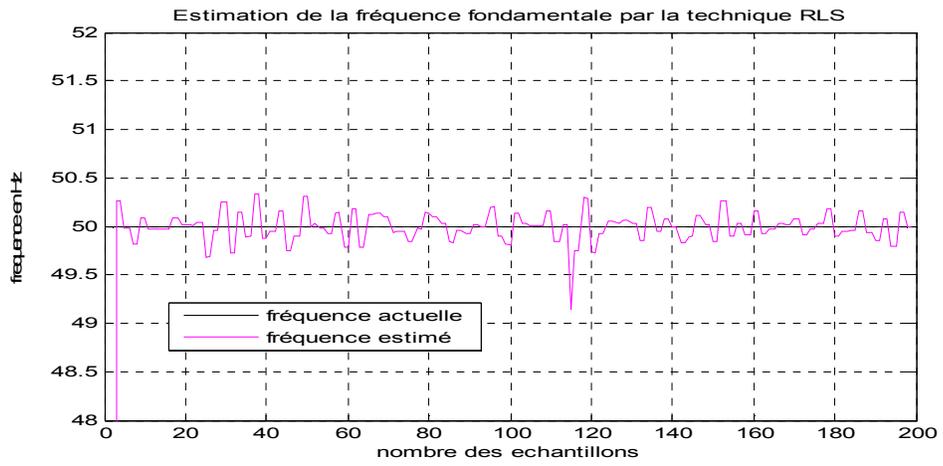


Figure 4.9. Signal du test bruité avec RSB=40 dB



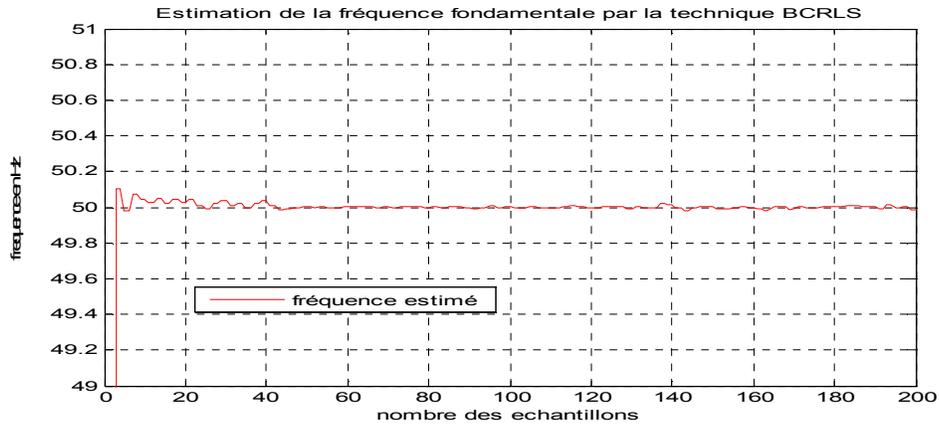


Figure 4.10. Estimation de la fréquence fondamentale à l'aide des différentes techniques adaptatives dans le cas d'absence d'harmoniques durant la variation des amplitudes.

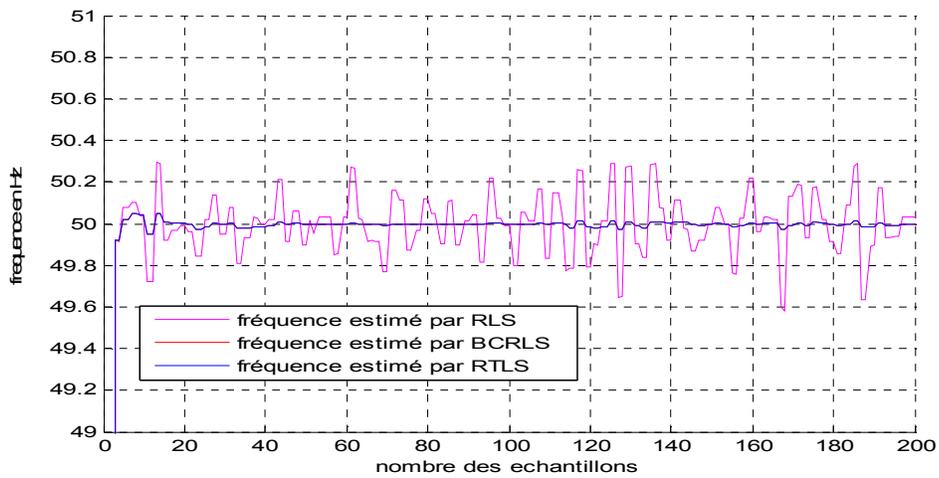


Figure 4.11. Comparaison entre les différentes techniques d'estimation pour un signal non harmonisé durant la variation des amplitudes.

4.3.2 Cas avec harmoniques

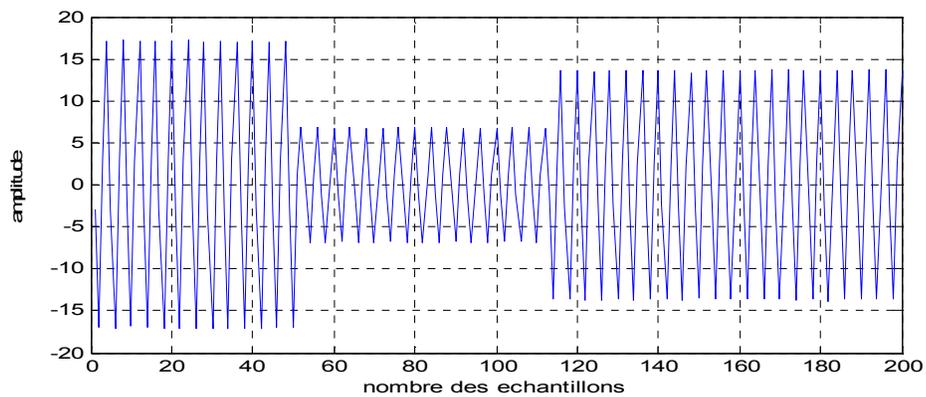


Figure 4.12. Signal du test bruité avec RSB=40 dB et harmonisé de rang 3 et 5.

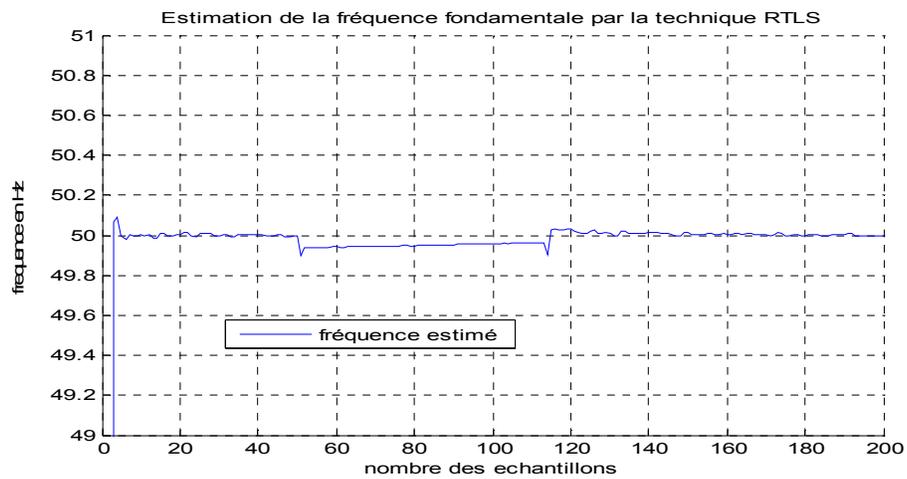
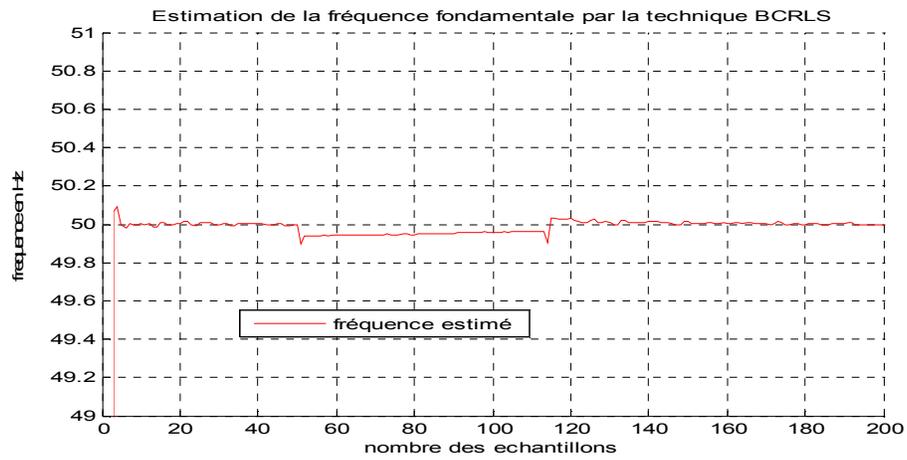
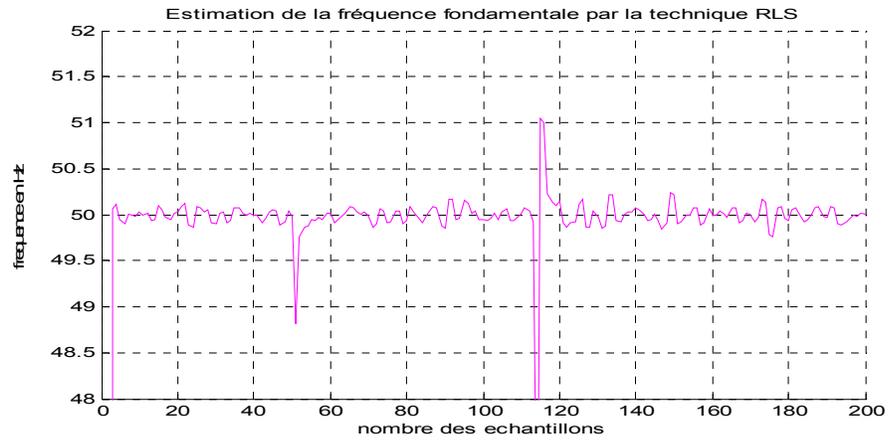


Figure 4.13. Estimation de la fréquence fondamentale à l'aide des différentes techniques adaptatives dans le cas de présence d'harmoniques durant la variation des amplitudes.

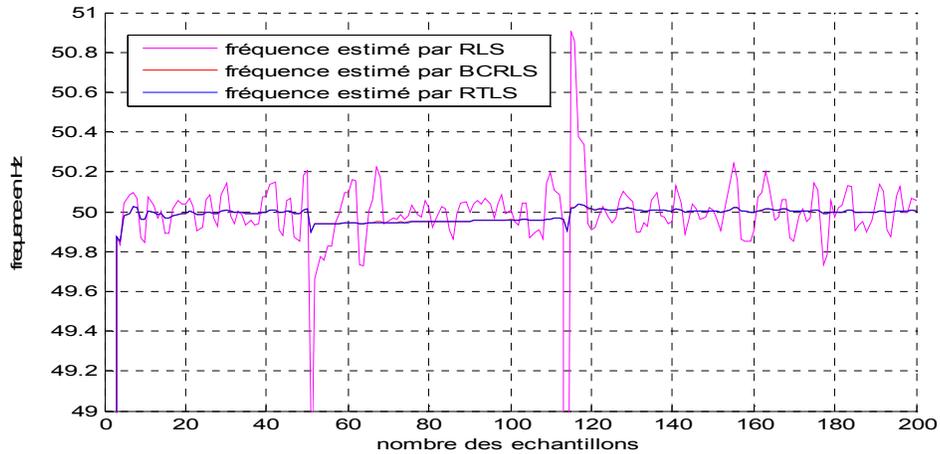


Figure 4.14. Comparaison entre les différentes techniques d'estimation pour un signal harmonisée durant la variation des amplitudes.

4.3.3 Interprétations

D'après les résultats précédents, en absence des fluctuations harmoniques durant la variation des amplitudes on observe que toutes les techniques utilisées donnent une meilleure poursuite et une rapidité de convergence. En présence d'harmoniques, la technique RLS présente une meilleure poursuite et une rapidité de convergence, tant qu'il présente une bonne estimation des changements d'amplitude qui sont reflétés comme des pics de reconfiguration. Les deux autres techniques supposent une latence de convergence dans la durée des changements d'amplitude, mais une bonne capacité de poursuite.

Dans les deux cas de présence et d'absence d'harmoniques, la technique RLS présente un petit problème de robustesse au bruit tant que les autres techniques sont plus robustes.

4.4 Cas où les amplitudes harmoniques sont constantes et la fréquence fondamentale du réseau est variable

Un des problèmes les plus connus en électrogène, la variation de la fréquence fondamentale provoquée par le changement brusque de vitesse des groupes. On veut les modéliser dans notre test pour voir la capacité de poursuite (tracking en anglais) des

techniques adaptative et ça rapidité de convergence. Le modèle de signal examiné est le suivant :

$$x(n) = [A \cos\left(2\pi f_1 n + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{A}{3} \cos(2\pi(3f_1)n + \pi) + \frac{A}{5} \cos\left(2\pi(5f_1)n + \frac{\pi}{4}\right)](u(n) - u(n - 0.4F_e)) + [A \cos\left(2\pi f_2 n + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{A}{3} \cos(2\pi(3f_2)n + \pi) + \frac{A}{5} \cos\left(2\pi(5f_2)n + \frac{\pi}{4}\right)] u(n - 0.4F_e) + v(n)$$

où F_e est la fréquence d'échantillonnage.

Si on pose la fréquence fondamentale variable de manière échelon entre $f_1 = 50$ Hz à $f_2 = 52$ Hz, on lance le test sur le signal modélisé précédemment dans les deux cas proposé.

4.4.1 Cas sans harmoniques

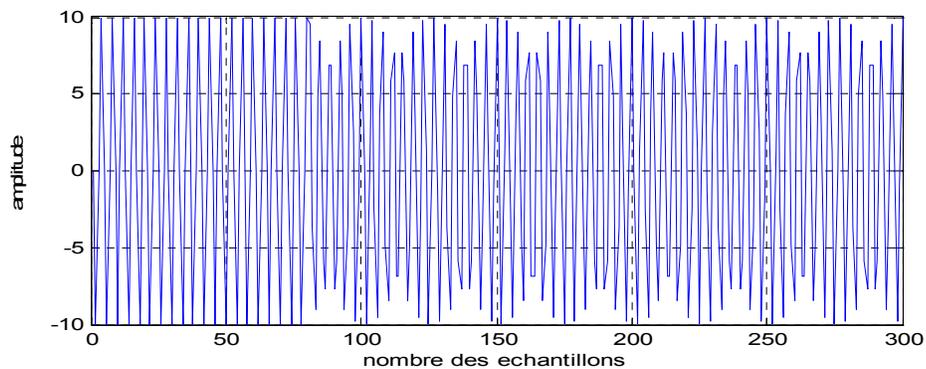


Figure 4.15 Signal du test non bruité.

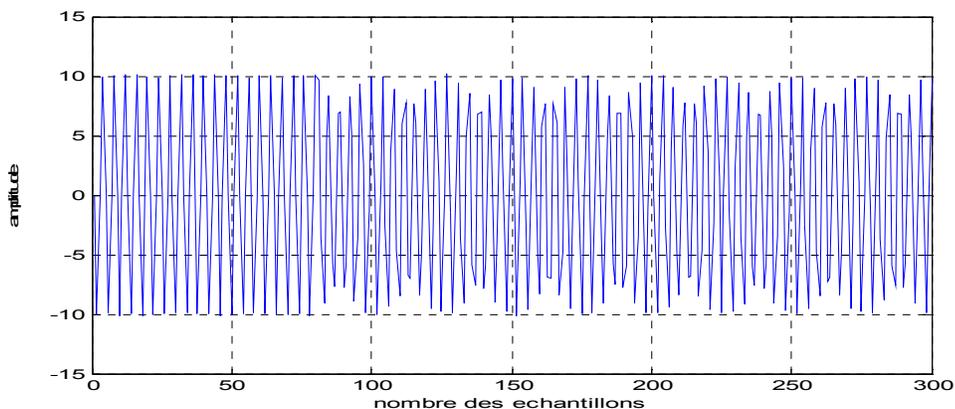


Figure 4.16 Signal du test bruité avec RSB=40dB.

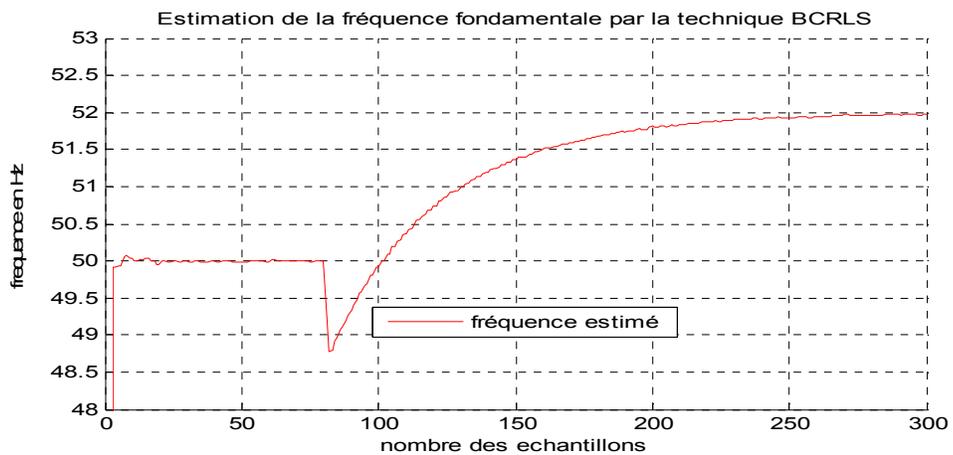
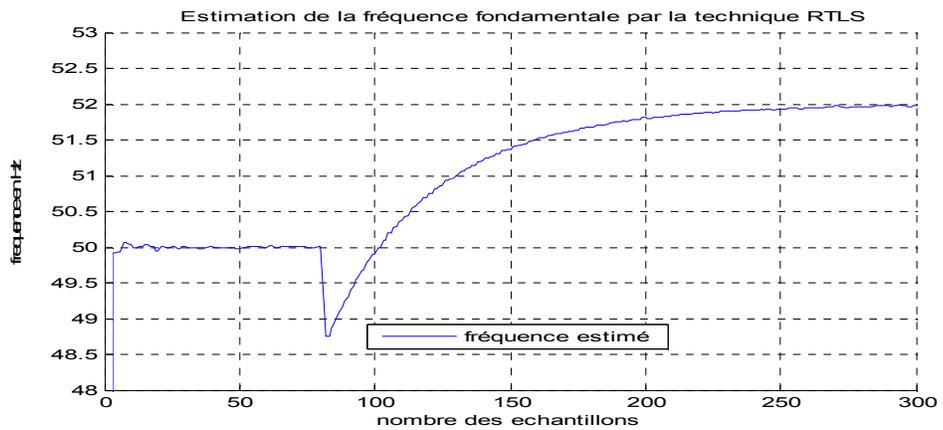
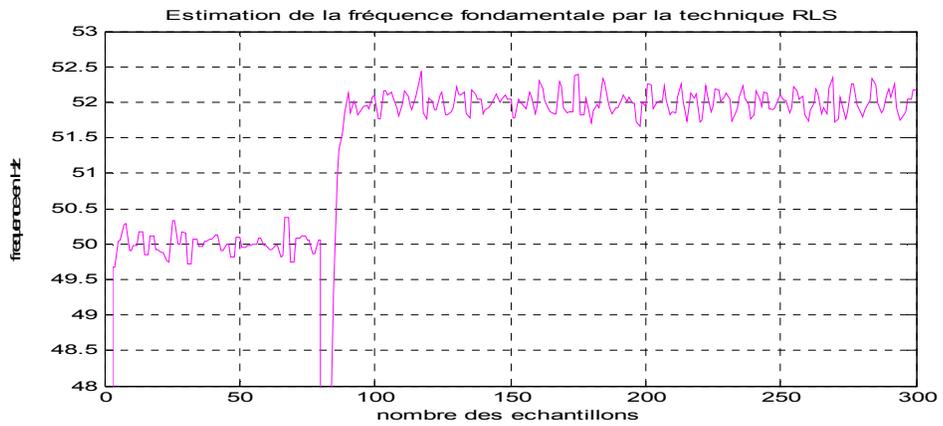


Figure 4.17. Estimation de la fréquence fondamentale à l'aide des différentes techniques adaptatives dans le cas d'absence d'harmoniques durant la variation de la fréquence fondamentale.

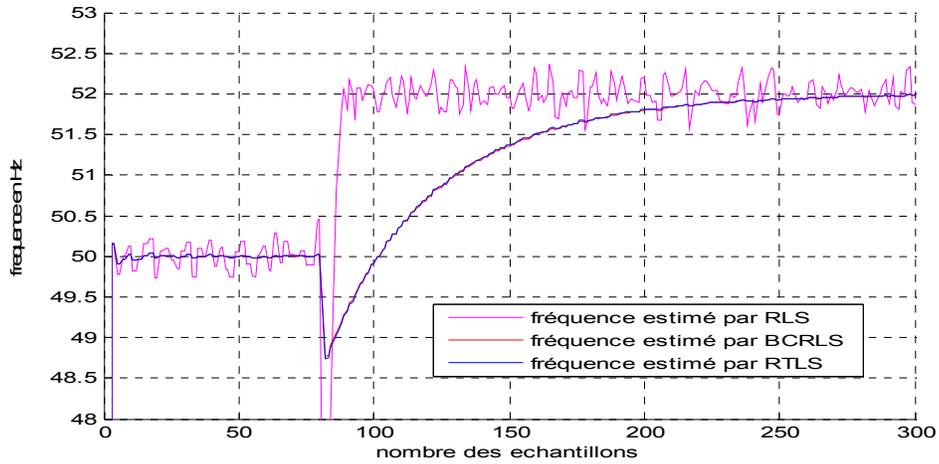


Figure 4.18. Comparaison entre les différentes techniques d'estimation pour un signal non harmonisé durant la variation de la fréquence fondamentale.

4.4.2 Cas avec harmoniques

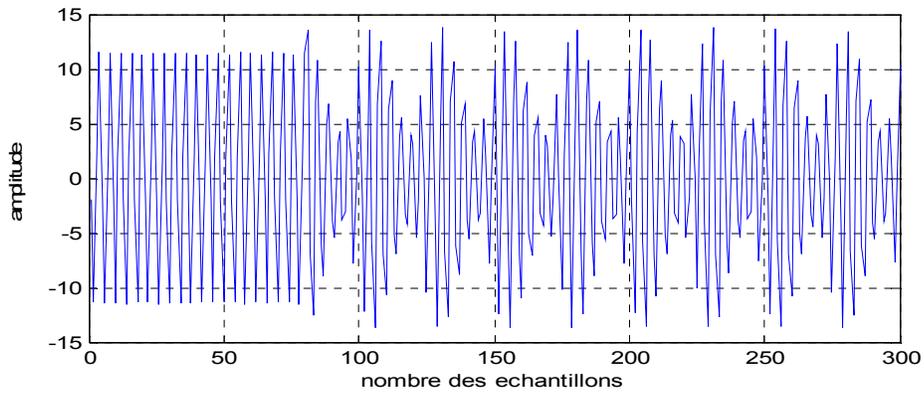
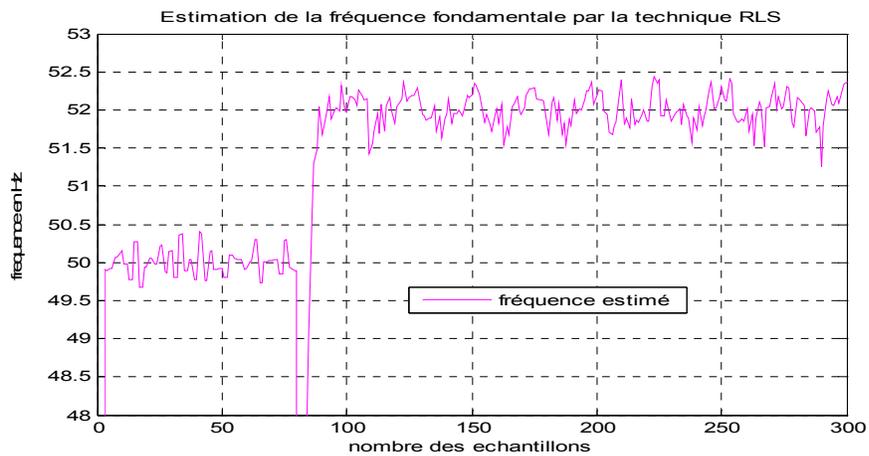


Figure 4.19 Signal du test bruité avec RSB=40 dB et harmonisé de rang 3 et 5.



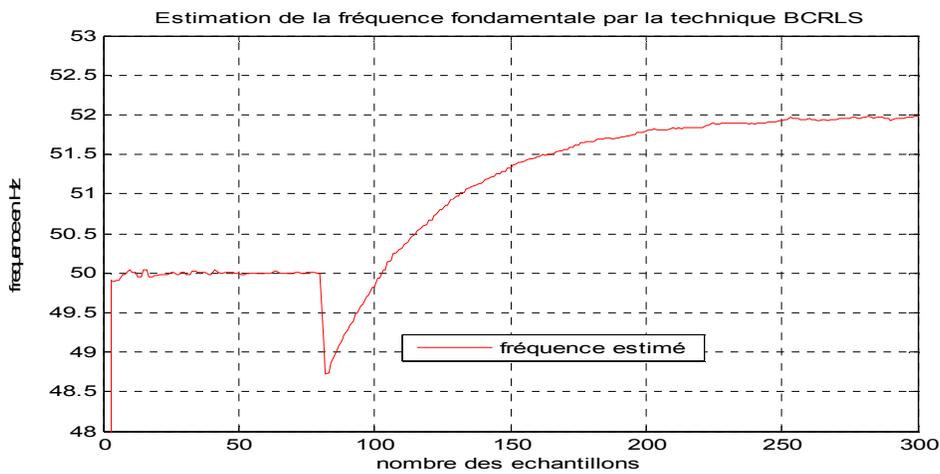
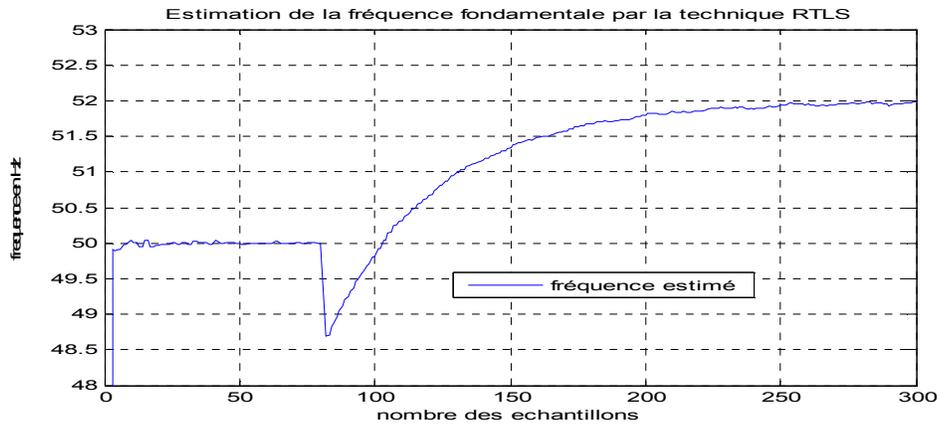


Figure 4.20. Estimation de la fréquence fondamentale à l'aide des différentes techniques adaptatives dans le cas de présence d'harmoniques durant la variation de la fréquence fondamentale.

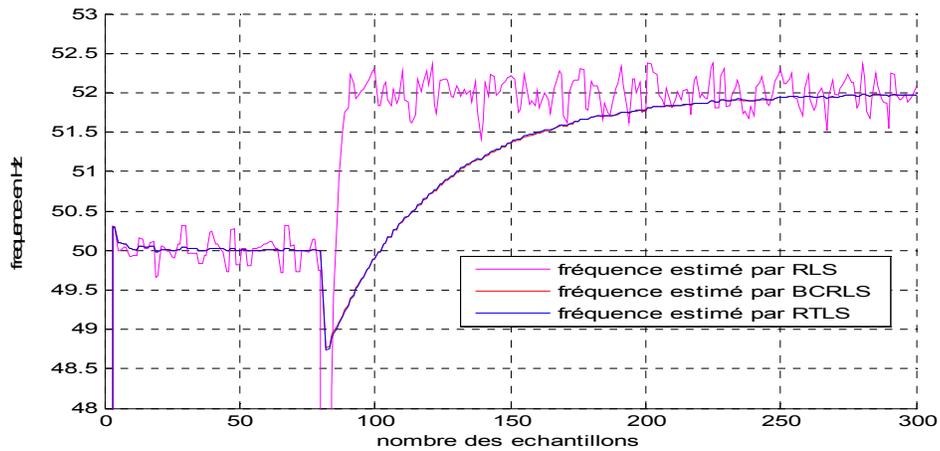


Figure 4.21. Comparaison entre les différentes techniques d'estimation pour un signal harmonisée durant la variation de la fréquence fondamentale.

4.4.3 Interprétation

D'après les résultats précédents, en absence des fluctuations harmoniques durant la variation de la fréquence fondamentale on observe que les techniques BCRLS et RTLS présentent une latence de convergence mais une bonne poursuite après certain nombre d'échantillons.

Et pour la technique RLS, une bonne estimation de changement de fréquence, convergence très rapide mais un problème de bruit très claire.

En présence d'harmoniques, presque les même résultats obtenu en absence des harmonique, une bonne estimation durant la variation de la fréquence mais une mauvaise robustesse au bruit surtout pour la technique RLS.

4.5 Cas où les amplitudes des harmoniques et la fréquence fondamentale du réseau sont variables

L'étude dans ce cas, c'est l'étude d'un réseau dans un environnement très pollué, des creux des tensions et des variations brusque de la fréquence fondamentale et même des parasites qui influe sur le signal de test, on peut modéliser ces perturbations par l'équation suivante :

$$\begin{aligned}x(n) = & [[A \cos\left(2\pi f_1 n + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{A}{3} \cos(2\pi(3f_1)n + \pi) \\ & + \frac{A}{5} \cos\left(2\pi(5f_1)n + \frac{\pi}{4}\right)](u(n) - u(n - 0.4F_e)) \\ & + [A \cos\left(2\pi f_2 n + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{A}{3} \cos(2\pi(3f_2)n + \pi) \\ & + \frac{A}{5} \cos\left(2\pi(5f_2)n + \frac{\pi}{4}\right)](u(n) - u(n - 0.4F_e))](u(n) \\ & - 0.6u(n - 0.24F_e) + 0.4u(n - 0.8F_e)) + v(n)\end{aligned}$$

où F_e est toujours la fréquence d'échantillonnage.

Afin d'avoir connaitre les performances de chaque techniques adaptatives pour l'estimation de la fréquence fondamental et son critère de convergence, on veut les examinées avec le signal de test proposé précédemment avec une fréquence

fondamental variante dans la plage de $f_1 = 50$ Hz et $f_2 = 52$ Hz, un bruit modélise les parasite avec $RSB=40$ dB et des fluctuations harmoniques de rang 3 et 5.

Pour cela on répète les mêmes démarches des tests précédents.

4.5.1 Cas sans harmoniques

Dans ce signal de test si on prend 300 échantillons avec une fréquence d'échantillonnage de $4 * f_2$ on aura un changement de fréquence aux niveaux de l'échantillon 80 et deux changements d'amplitude le premier en échantillon 48 et l'autre en échantillon 160. Ces variations sont claires dans la figure (4.22) et (4.23) suivantes :

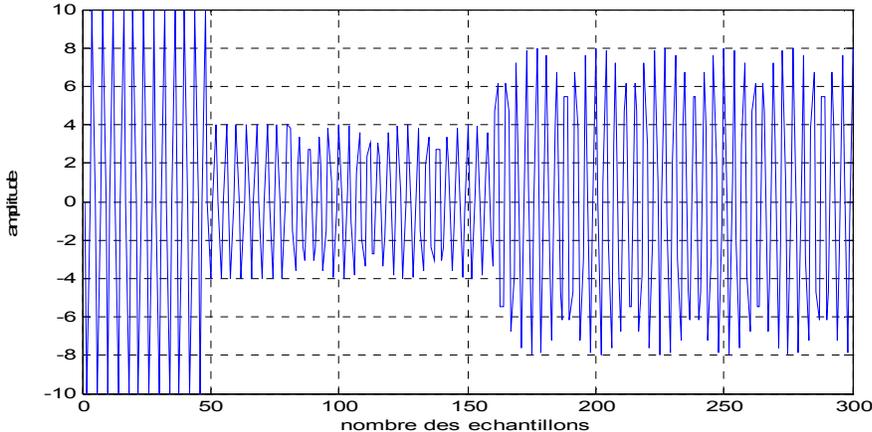


Figure 4.22. Signal du test non bruité.

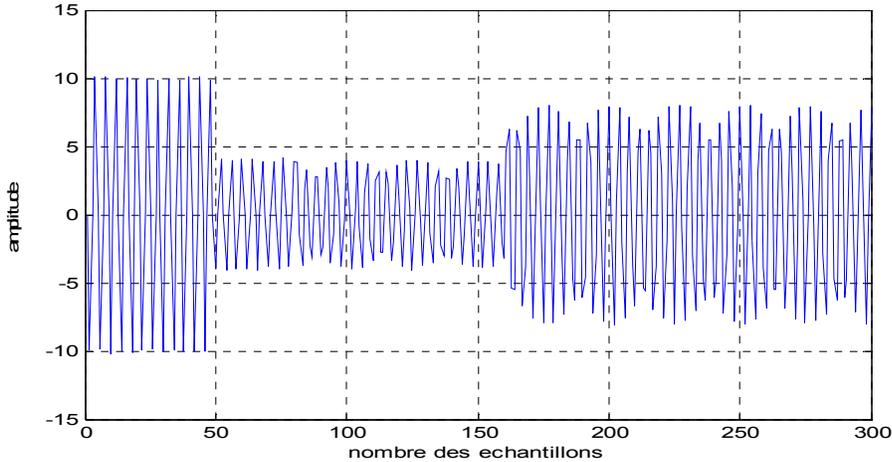


Figure 4.23. Signal du test bruité avec $RSB=40$ dB.

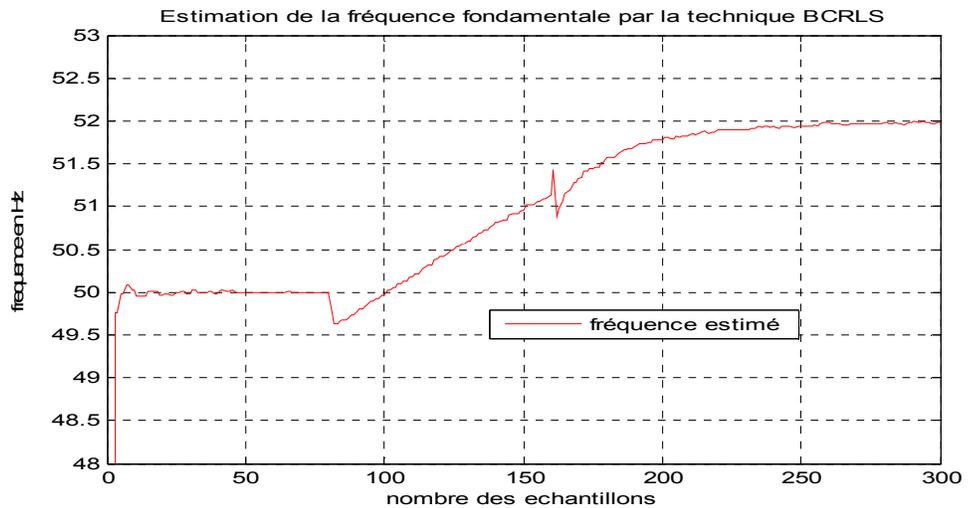
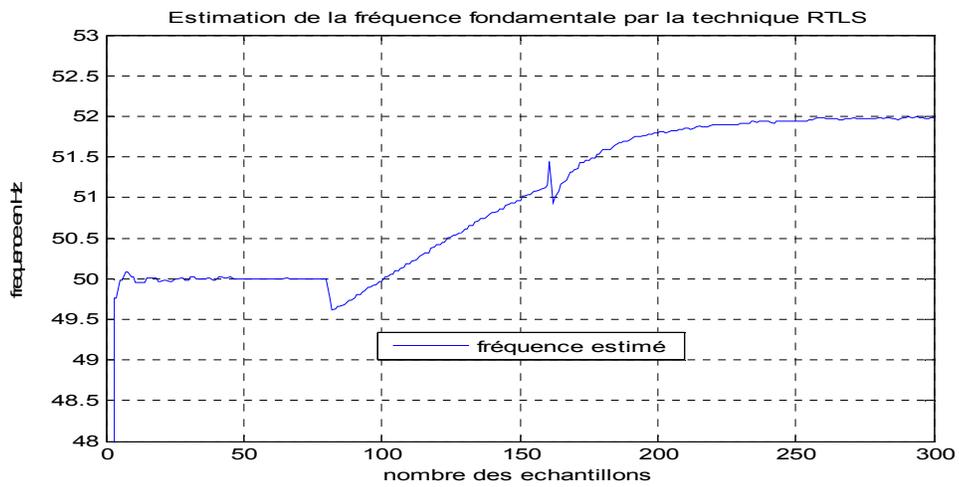
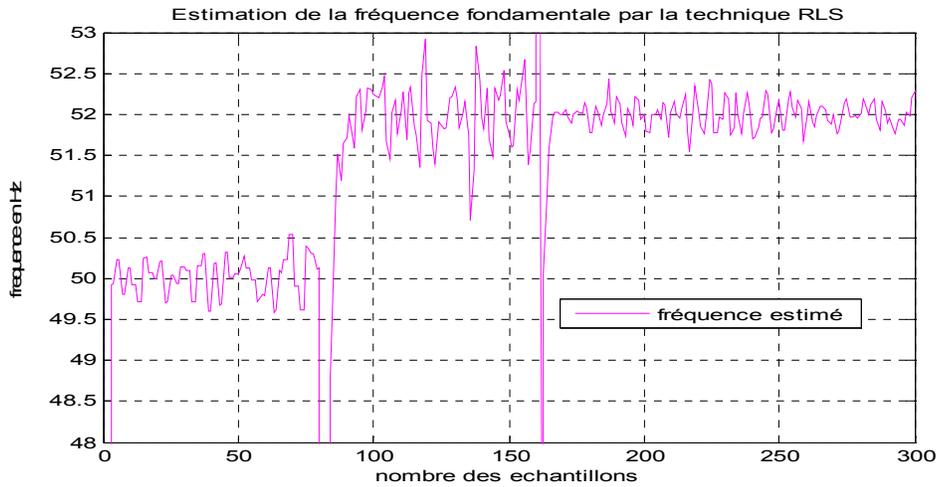


Figure 4.24. Estimation de la fréquence fondamentale à l'aide des différentes techniques adaptatives dans le cas de présence d'harmoniques durant la variation de la fréquence fondamentale et l'amplitude.

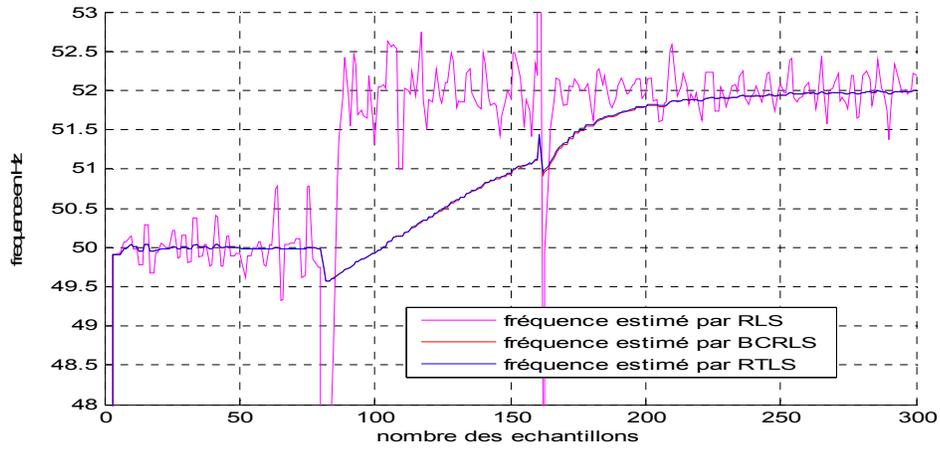


Figure 4.25. Comparaison entre les différentes techniques d'estimation pour un signal harmonisée durant la variation de la fréquence fondamental et l'amplitude.

4.5.2 Cas avec harmoniques

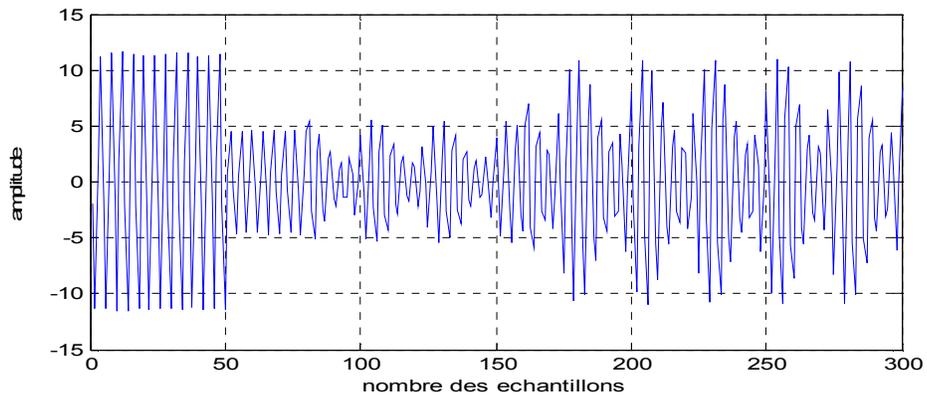
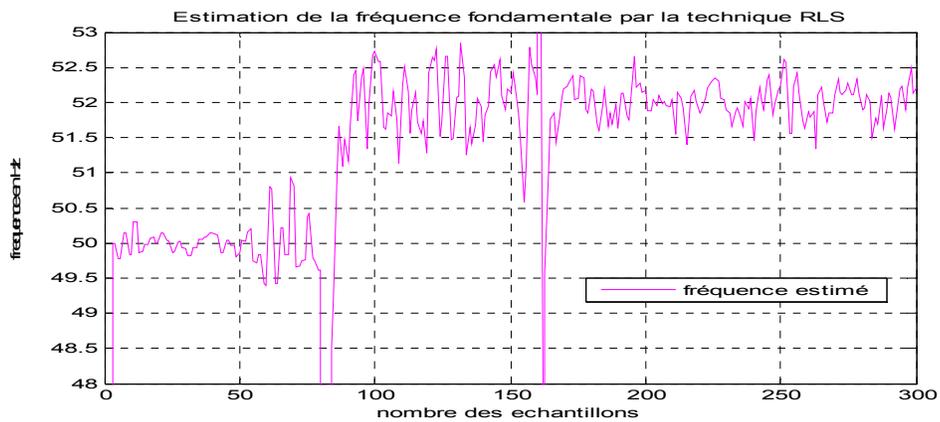


Figure 4.26. Signal du test bruité avec RSB=40dB et harmonisé de rang 3 et 5.



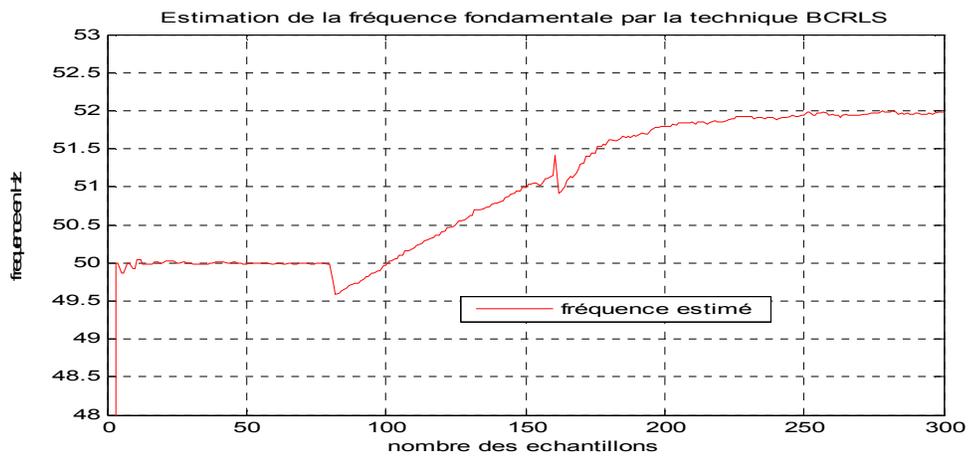
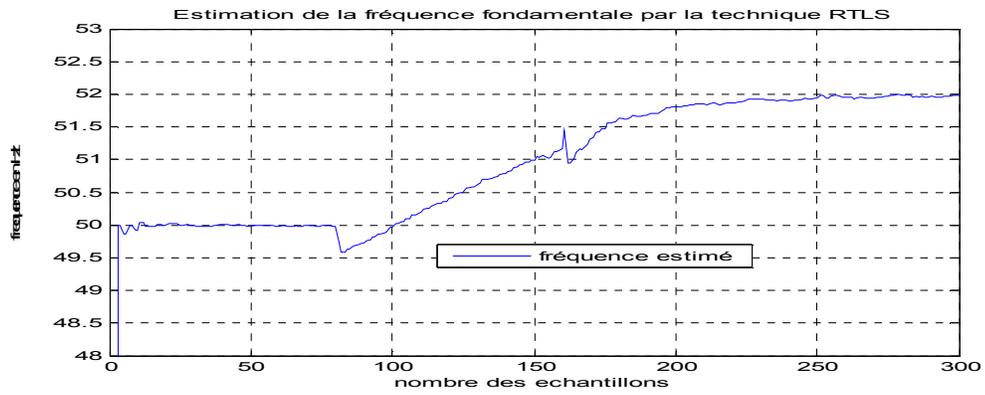


Figure 4.27. Estimation de la fréquence fondamentale à l'aide des différentes techniques adaptatives dans le cas d'absence d'harmoniques durant la variation de la fréquence fondamentale et l'amplitude.

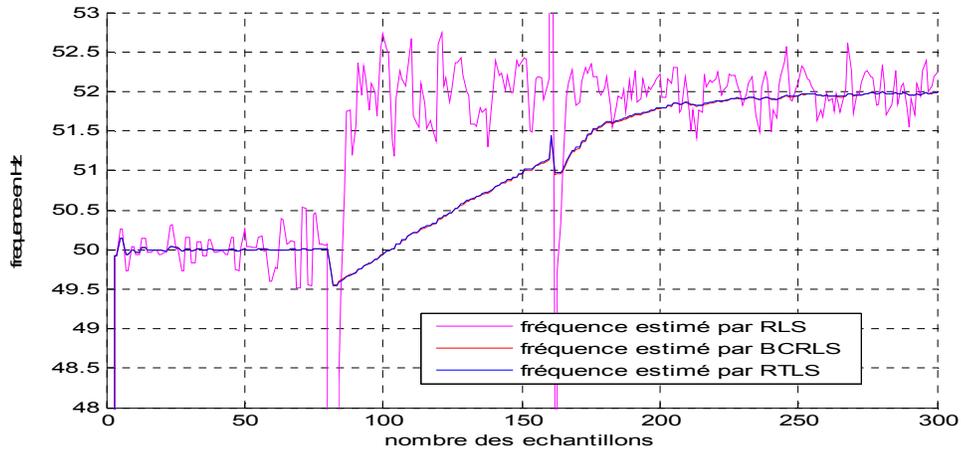


Figure 4.28. Comparaison entre les différentes techniques d'estimation pour un signal non harmonisée durant la variation de la fréquence fondamentale et l'amplitude.

4.5.3 Interprétation

D'après les résultats précédents, en absence des fluctuations harmoniques durant la variation de la fréquence fondamentale et la variation d'amplitude, on observe que les techniques BCRLS et RTLS donnent une bonne poursuite (détection de changement d'amplitude et de fréquence) malgré qu'il y'a une latence de convergence. Et pour la technique RLS qui présente une rapidité de convergence et une parfaite estimation des changements de la fréquence et d'amplitude, mais comme toujours il pose un problème d'oscillation a cause de bruit.

En présence d'harmoniques, presque les même résultats obtenu précédemment, une bonne estimation durant la variation de la fréquence et d'amplitude. Mais les harmoniques augmentent l'imprécision de la technique RLS.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, les résultats expérimentaux relatifs à l'estimation de la fréquence fondamentale des signaux supposé pour effectuer le teste ont été présentés. Les estimateurs utilisés dans cette expérience sont des techniques de filtrage adaptatif avancé basées notamment sur la RLS, la RTLS et la BCRLS.

Cependant, on peut rencontrer dans le réseau plusieurs cas où le contenu harmonique du signal électrique varie dans le temps. Nous avons restreint notre étude dans quatre cas où les amplitudes harmoniques et la fréquence fondamentale varient simultanément ou alternativement.

Notre étude comparative nous a permis de faire les observations suivantes:

- L'algorithme RLS présente une meilleure poursuite de la fréquence fondamentale et une rapidité de convergence et une bonne estimation du changement du contenu harmoniques reflet dans des pics de reconfiguration, mais cette technique est très sensible au bruit.
- L'algorithme BCRLS présente une bonne poursuite de la fréquence fondamentale et une bonne estimation du changement des amplitudes harmoniques fréquence harmonique, et très bonne robustesse au bruit mais une latence de convergence vers la fréquence fondamentale.
- L'algorithme RTLS présente les mêmes résultats de la technique BCRLS, la précision et la stabilité, la capacité de poursuit et latence de convergence mais ils différent tant que la RTLS est meilleur et plus robuste au bruit.

Dans le chapitre suivant et pour pouvoir réaliser une comparaison plus précise, on va faire une simulation d'un réseau électrique polluée par différents perturbateurs.

5.1 Introduction

Dans ce chapitre on utilise le logiciel MATLAB /SIMULINK pour analyse les réseaux électriques perturbants. On s'intéresse particulièrement à l'estimation de la fréquence fondamentale de ces derniers au but de détecter les déformations de l'onde électrique.

Notre travail est basé essentiellement sur les algorithmes RTLS et BCRLS que nous avons utilisés dans le chapitre précédent. On a mettre dans une simulation qui modélise un réseau électrique triphasée. Le schéma suivant montre l'idée que nous somme entraine d'expliquer :

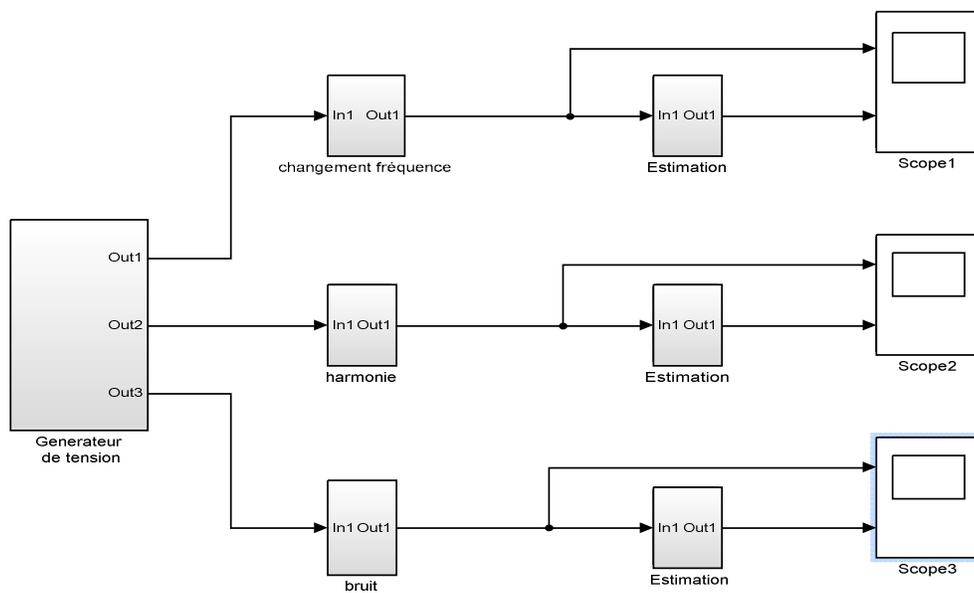


Figure 5.1. Schéma global du système.

5.2 Explication du schéma de la simulation

La simulation que nous allons étudier est une modélisation d'un réseau électrique triphasé qui était affecté par des fluctuations comme le changement brusque de la fréquence, les harmoniques et le bruit additif. Le tableau 5.1 résume le cas étudié.

Système	Désignation	Valeur
Source d'alimentation	Générateur de tension triphasé	$A=10V$; $f_0=50Hz$
Système Fréquentiel	Changement de fréquence Ajouter des harmoniques Ajouter du bruit	$\Delta f= 5 Hz$ $3f_0$ et $5f_0$ RSB=20 dB
Estimateur	Estimer la fréquence	f_{est}

Tableau 5.1. Les paramètres de simulation.

Pour avoir créé ce réseau, on peut les diviser sur trois niveaux. Dans le niveau 1, on a pris un modèle d'un générateur de tension triphasé. Dans le niveau 2, chaque phase dans ce système comporte un type de perturbation. Pour la première phase, on a créé un système de changement de la fréquence fondamentale selon le schéma suivant :

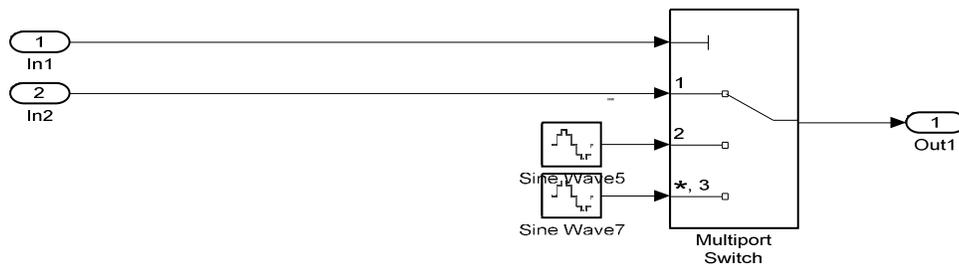


Figure 5.2. Bloc de changement de fréquence.

où :

- 'in1' est un constant pour sélectionner l'état de Switch .
- 'Sine wave 5 ' a une fréquence de 55Hz et 'Sine wave 7' a une fréquence de 45Hz.
- 'Out1' est le signal qui subit un changement de fréquence

Pour la deuxième phase, on a génère un système pour ajouter des harmoniques selon le schéma suivant

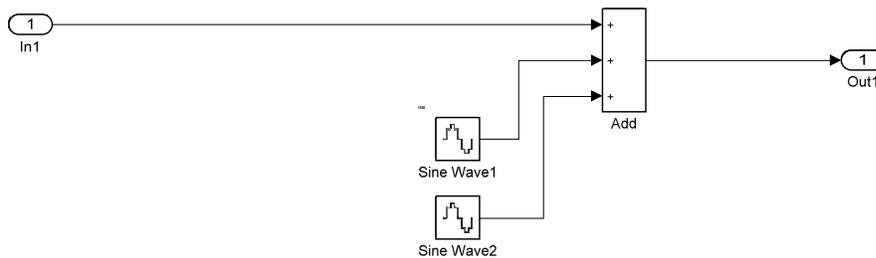


Figure 5.3. Bloc des Harmoniques.

- 'Sine wave 1' est source de la 3eme harmonique et 'Sine wave 2' est source de la 5eme harmonique.
- 'Out1' est le nouveau signal harmonisé.

Pour la troisième phase, On a crée un système pour ajouter un bruit blanc selon le schéma suivant

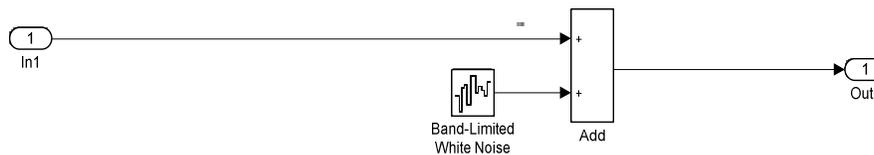


Figure 5.4. Bloc de bruit.

- 'White noise' est un générateur de bruit blanc

Dans le niveau 3, pour chaque phase on estime la fréquence fondamentale par le modèle suivant

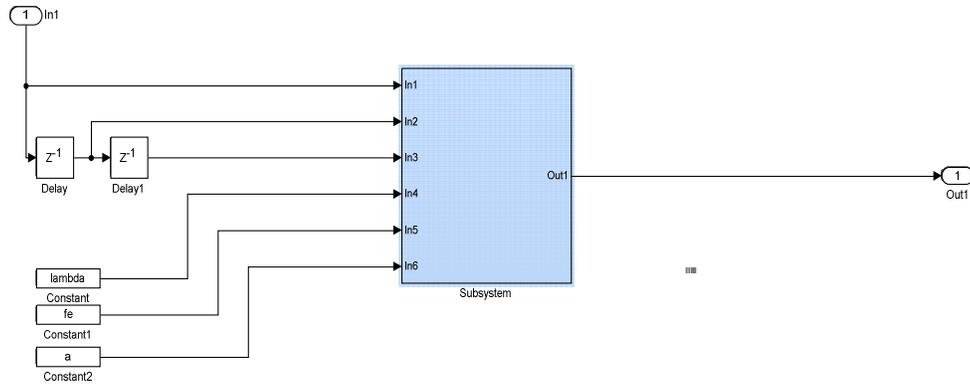


Figure 5.5. Bloc de l'estimation.

Le sous-bloc 'subsystem' contient les deux algorithmes d'estimation BCRLS et RTLS .

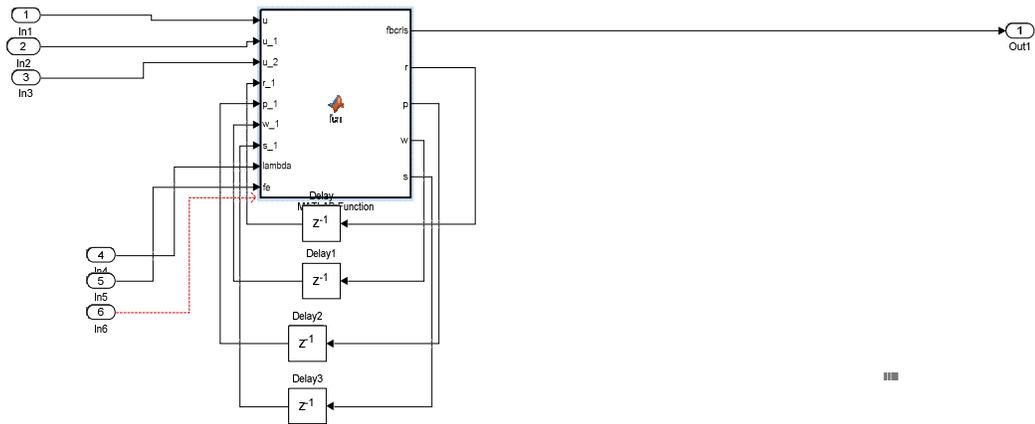


Figure 5.6. Bloc des Algorithmes.

5.3 Résultats de la simulation

5.3.1 Cas de changement de fréquence

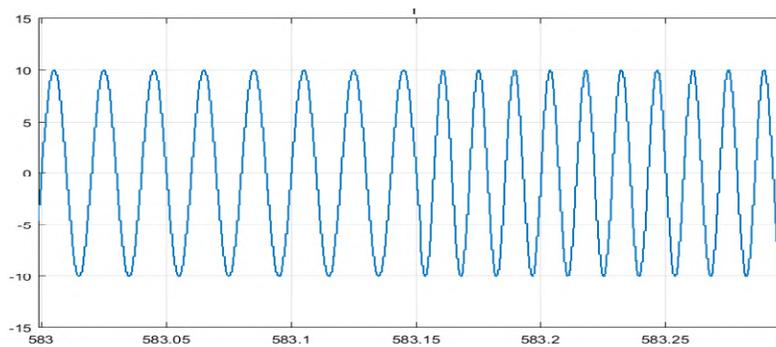


Figure 5.7. Signal avec changement de fréquence.

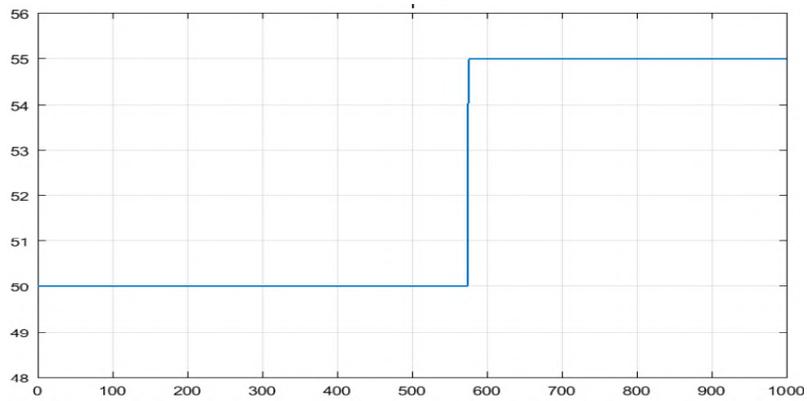


Figure.5.8. La fréquence estimée par BCRLS.

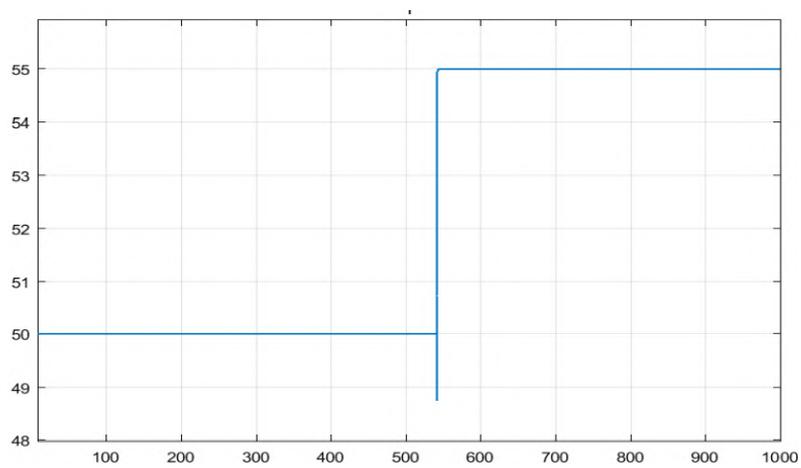


Figure.5.9. La fréquence estimée par RTLS.

Interprétation

En temps réel, on observe que les technique BCRLS et RTLS représentent une bonne convergence dans le cas de changement de fréquence. Mais BCRLS est plus rapide en reconfiguration que RTLS.

5.3.2 Cas des harmoniques

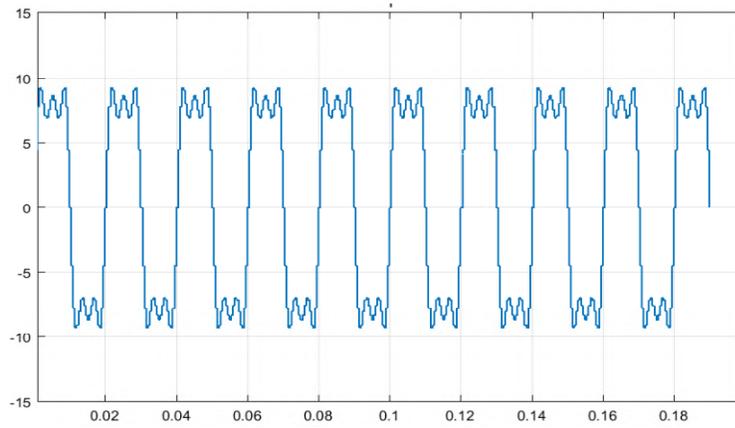


Figure.5.10 Signal avec changement des harmoniques.

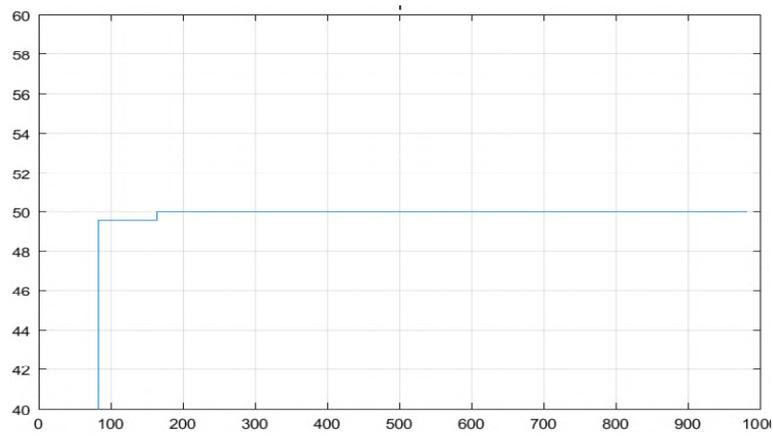


Figure.5.11 La fréquence estimée par BCRLS.

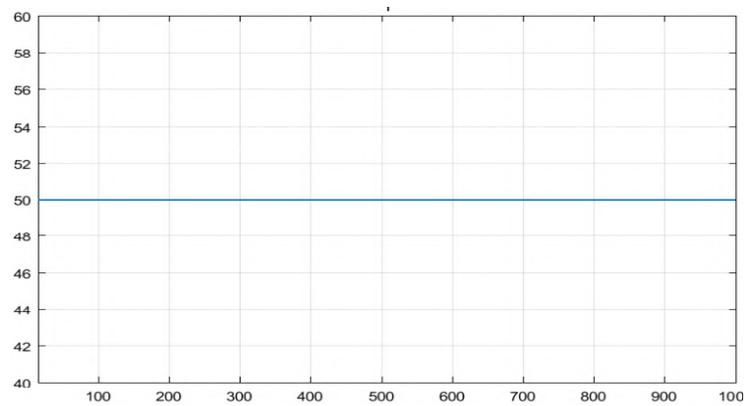


Figure.5.12 La fréquence estimée par RTLS.

Interprétation

En temps réel et dans le cas de présence d'harmoniques, on observe que la technique RTLS présente une bonne poursuite et une rapidité de convergence, tant que la technique BCRLS prend plus de temps pour converger vers la fréquence fondamentale.

5.3.3 Cas de bruit

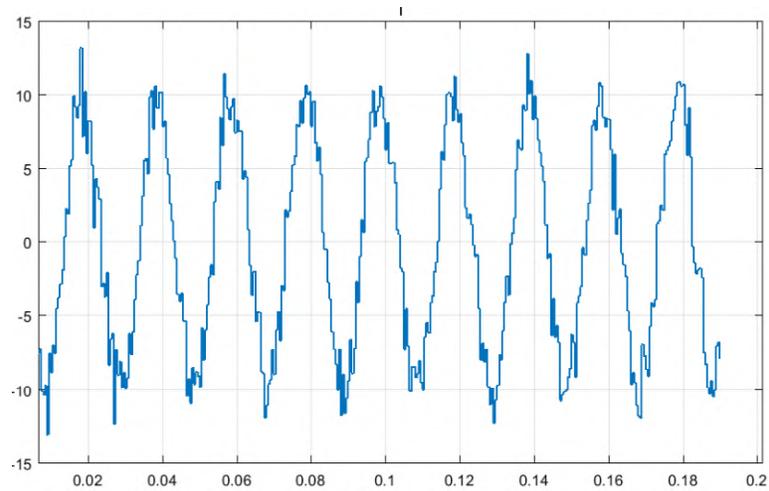


Figure 5.13. Signal bruité.

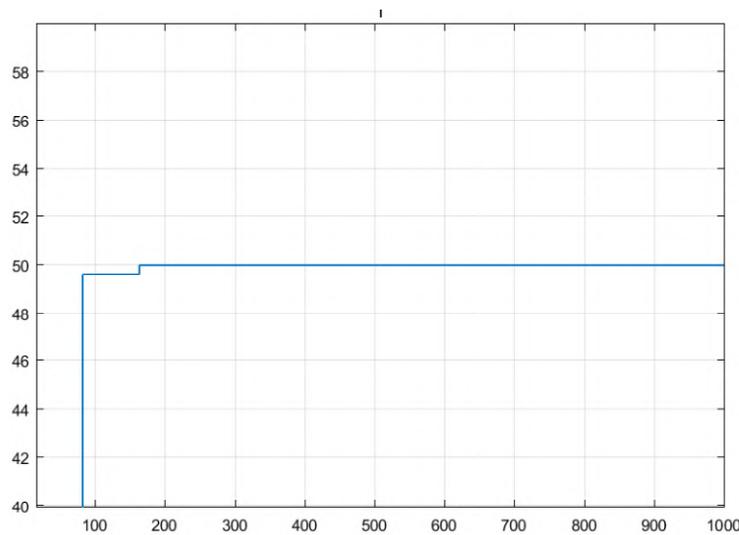


Figure.5.14 La fréquence estimée par BCRLS.

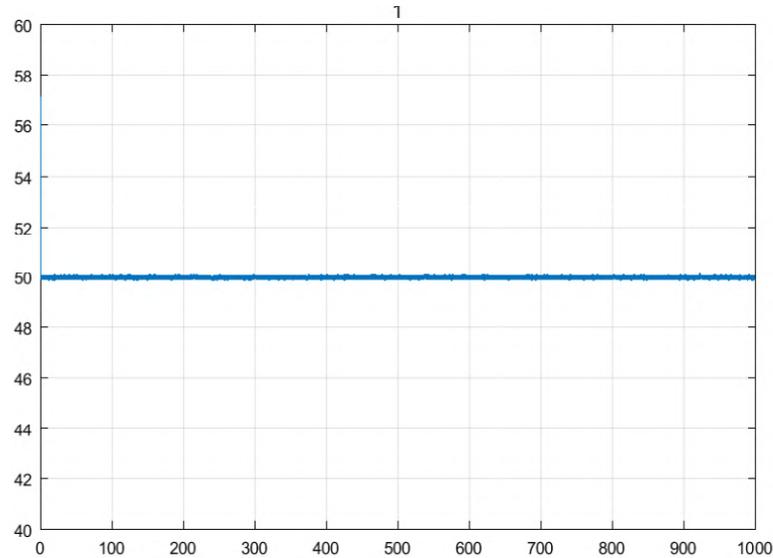


Figure.5.15 La fréquence estimée par RTLS.

Interprétation

Toujours en temps réel et dans le cas d'un signal bruité, On remarque que la technique BCRLS présente une latence de convergence mais une précision lors de l'estimation, tant que la technique RTLS influe par le bruit et donne ces résultats sous forme de oscillations mais avec une rapidité de convergence.

5.4 Conclusion

Dans ce chapitre on est intéressé par la modélisation d'un système permettant l'estimation de la fréquence fondamentale d'un réseau électrique triphasé en temps réel.

Au début, on a modélisé un générateur de réseau électrique triphasé. Ensuite, on a modélisé des sources de perturbations s'ajoutant au réseau électrique. Finalement, on a modélisé un bloc d'estimation basé sur les algorithmes BCRLS et RTLS.

Notre étude comparative nous a permis de faire les observations suivantes:

- L'algorithme BCRLS présente une latence de convergence mais une bonne poursuite de la fréquence fondamentale, et très bonne robustesse au bruit.
- L'algorithme RTLS présente une rapidité de convergence et une bonne poursuite de la fréquence fondamentale, mais elle est très sensible au bruit.

Conclusion générale

Dans ce projet de fin d'étude on a travaillé sur l'estimation d'un paramètre essentiel des réseaux électriques dans le but de détecter en temps réel les perturbations. Dans ce cadre on a choisie les méthodes basées sur le filtrage adaptatif comme une solution pertinente pour réaliser cette tâche.

Les techniques adaptatives utilisées sont basées sur les algorithmes de type gradient et moindre carrés récursifs, à savoir : RLS, BCRLS et RTLS.

Les techniques d'estimation basées sur les algorithmes adaptatifs ont montré la fiabilité de cette approche pour l'estimation de la fréquence fondamentale dans les réseaux électriques.

Les résultats de test relatifs à l'estimation de la fréquence fondamentale ont révélés la supériorité et la robustesse des performances des techniques BCRLS, RTLS à ceux de RLS.

Pour tester ces techniques sur un réseau électrique, nous avons présenté dans le cinquième chapitre des simulations d'un réseau triphasé perturbé.

Bibliographie

- [1] https://fr.wikipedia.org/wiki/réseau_électrique.
- [2] J.L.lilien : "*Transport et distribution de l'énergie électrique*", p37, 2006.
- [3] Vanya Ignatova : "*Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique*". P16, oct2009.
- [4] G. Desquilbet, C. Foucher, P. Fauquembergue : "*Statistical analysis of voltage dips*", p102, 1995.
- [5] Kebiri Samia : "*Modélisation et simulation d'un filtre actif multi-niveaux*", p13, 2009.
- [6] Marek Samotyj, R.C.Dugan, H. W. Beat y: "*Electrical Power Systems Quality* ", Annabooks,1998.
- [7] Salma Ait Fares : "*Reseau de neurones adaline pour l'estimation des harmoniques pour la commande d'un filtre actif* ", p15, juin 2003.
- [8] Omeiri Amar: "*Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant*", p09, 2007.
- [9] Christian Jutten : "*Théorie du signal*", novembre 2009.
- [10] James L. Gromly : "*Traitement du signal*", 20 octobre 2000.
- [11] F.E.I, USTHB : "*Analyse des signaux numériques*", 2014.
- [12] Reza Arablouei, Kutluyil Doğançay, Stefan Werner: "*Adaptive Frequency Estimation of Three-Phase Power Systems*", p01, Avril 2015.

- [13] Mathieu Caujolle : "*Identification et caractérisation des perturbations affectant les réseaux électriques HTA*", 12 dec 2011.
- [14] François Michaut et Maurice Bellanger: "*Filtrage adaptatif : théorie et applications*", *Volume 1, théorie et algorithmes*, 26juin2005.
- [15] Laid Zakaria, Daraoui Ayyoub : "*Filtrage adaptatif du signal électrocardiogramme (ECG)* ", Mémoire de PFE, 2014.
- [16] Christian Jutten : "*filtrage linéaire optimal*", août 2010.
- [17] J.F. Bercher, P.Jardin : "*Introduction au filtrage adaptatif*", 2003.
- [18] Jyoti Dhiman, Shadab Ahmad, Kuldeep Gulia: "*Comparison between Adaptive filter Algorithms (LMS, NLMS and RLS)* ", *Volume 2, Issue 5*, p1 et p2, May 2013.
- [19] S. Haykin: "*Adaptive Filter Theory*", 4th ed. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002.
- [20] G.H. Golub, C.F. Van Loan: "*An analysis of the total least squares problem*", *SIAM J. Numer, Anal*, juin 1980.
- [21] J.W. Demmel: "*Applied Numerical Linear Algebra*", SIAM, Philadelphia, 1997.