

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

Université de Laghouat



Faculté des sciences et de la technologie
Département de électrotechnique

Mémoire de fin d'études

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master
En électrotechnique
Option : électrotechnique industrial

Thème :

Filtrage des harmoniques dans le réseau
électrique

Présenté par :

Seghir Abderrahman
Behtite Mohamed Kabir

Proposé et dirigé par :

Mr. Djekidel Rabeh

Jury par :

Mr. Bendjedia Bachir
Mr. Bessedik Sid Ahmad
Mr. Brahimi Amar

2024/2023

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail à :

A nos très chers parents

A nos frères et sœurs

A tous nos proches sans exception

A tous nos amis sans exception

A tous ceux qui nous connaissent

REMERCIEMENTS

Nous remercions ALLAH notre Dieu le tout puissant de nous avoir donné
patience, santé et volonté tout au long de nos études.

Nous tenons à remercier tout particulièrement notre promoteur
Mr.DJEKIDEL RABEH pour
ces conseils qui nous ont été précieux ainsi que toutes les suggestions et
remarques qu'ils
ont formulé tout au long de ce travail.

Nos remerciements s'adressent également à la jury et les personnes qui ont
collaboré à la
réalisation de ce travail.

Nous exprimons toute notre reconnaissance à les enseignants de
l'ELT qui ont
contribué de près ou de loin à notre formation

ملخص :

أدت التطورات الحديثة في مجال إلكترونيات الطاقة إلى زيادة وجود التوافقيات في الشبكات الكهربائية، مما يضر بجودة الجهد الكهربائي الموفر ويؤثر سلبًا على المعدات الحساسة. ولمعالجة هذه المشكلة، من الضروري الحد من التوافقيات الناتجة عن المعدات الملوثة بما يتوافق مع اللوائح. وتستخدم طرق مختلفة مثل الترشيح السلبي والنشط لمكافحة هذه الظاهرة. تقترح هذه المذكرة البحثية طريقة مبتكرة باستخدام خوارزمية مستعمرة النمل (ACO) لتصميم مرشحات تمرير عالية سلبية بكفاءة وتقليل التيارات التوافقية. تُظهر عمليات المحاكاة أن هذا المرشح يزيل التوافقيات بشكل فعال، مما يحسن جودة الطاقة في نظام الطاقة ويقلل من التشوه التوافقي. يوضح هذا النهج الأداء العالي والموثوقية العالية للخوارزمية المستخدمة لهذا النوع من التحسين.

Abstract:

Recent advances in power electronics have led to the increasing presence of harmonics in electrical networks, impairing the quality of the voltage supplied and adversely affecting sensitive equipment. To remedy this problem, it is memoir to limit the harmonics generated by polluting devices, in compliance with regulations. Various methods such as passive and active filtering are employed to combat this phenomenon. One paper proposes an innovative method using the Ant Colony Algorithm (ACO) to efficiently design passive high-pass filters and reduce harmonic currents. Simulations show that this filter effectively eliminates harmonics, thus improving power quality in the electrical network and reducing harmonic distortion. This approach demonstrates the high performance and reliability of the algorithm used for this type of optimization.

Résumé :

Les récents progrès dans l'électronique de puissance ont entraîné la présence croissante d'harmoniques dans les réseaux électriques, nuisant à la qualité de la tension fournie et affectant négativement les équipements sensibles. Pour remédier à ce problème, il est crucial de limiter les harmoniques générées par les appareils polluants, conformément aux réglementations. Différentes méthodes comme le filtrage passif et actif sont employées pour combattre ce phénomène. Un mémoire propose une méthode innovante utilisant l'algorithme de colonie de fourmis (ACO) pour concevoir efficacement des filtres passe-haut passifs et réduire les courants harmoniques. Les simulations montrent que ce filtre permet d'éliminer efficacement les harmoniques, améliorant ainsi la qualité du courant dans le réseau électrique et réduisant la distorsion harmonique. Cette approche démontre la haute performance et la fiabilité de l'algorithme utilisé pour ce type d'optimisation.

Sommaire

Dédicaces.....	I
REMERCIEMENTS	II
Résumé	III
Introduction générale	VI
Chapitre 1 : Généralités sur les harmoniques	
1.1 Qualité d'énergie	3
Définition	3
1.1.1) La continuité de l'alimentation électrique	3
1.1.2) La qualité de l'onde de tension	4
1.1.3) La qualité de service	5
1.1.4) Enjeux de la QEE	6
1.2 Les harmoniques	8
1.2.1) Définition	8
1.2.2) Harmonique de Courant et de tension	8
1.2.3) Décomposition d'un signal périodique	9
1.2.4) Les puissances active, réactive, apparente et déformante	10
1.2.5) Taux de distorsion harmonique	12
1.2.6) Origines et sources des harmoniques	13
1.2.7) Effets des harmoniques sur le réseau électrique	15
1.2.8) Normes.....	17
Conclusion	22
Chapitre 2 : Méthodes de Filtrage des harmoniques	
Introduction	24
2.1 Méthodes classiques contre les harmoniques	24
2.1.1) Choix du raccordement des charges polluantes au réseau	24
2.1.2) Couplage spécial de transformateurs	25
2.1.3) Utilisation d'un redresseur à deux ponts	26
2.1.4) Inductances (selfs) série	27
2.1.6) Filtres passif	28

2.2	Méthodes modernes contre les harmoniques	32
2.2.1)	filtre actif	32
2.2.2)	Combinaison hybride active et passive	36
	conclusion	39
Chapitre 3 : Conception optimale d'un filtre passif passe-haut à l'aide de l'algorithme de colonies de fourmis (ACO)		
	Introduction.....	39
3.1	algorithme de colonies de fourmis	39
3.1.1)	Introduction.....	39
3.1.2)	Principe de fonctionnement	39
3.1.3)	Description formelle	40
3.2	calcul d'un filtre passif amorti.....	41
3.3	RÉSULTATS ET DISCUSSION	42
3.3.1)	les composante RLC de filtre passive.....	42
3.3.2)	Filtrage des harmonique	45
3.3.3)	Optimisation de filtre passive.....	47
	Conclusion	51
	Conclusion générale.....	V

List des figures

Fig 1. 1 LA FORME DE L'ONDE D'UN COURANT DEFORME AVEC LES HARMONIQUES.....	9
Fig 1. 2 Diagramme de Fresnel des puissances.	11
Fig 1. 3 les charge (linéaire et non linéaire).....	13
Fig 2. 1Raccordement de la charge polluante le plus en amont possible de la source.	25
Fig 2. 2Couplage spécial de transformateurs.	26
Fig 2. 3Schéma de principe d'un redresseur à deux ponts décalés.	27
Fig 2. 4Raccordement d'une inductance anti-harmonique.	29
Fig 2. 5 Installation d'un filtre résonant.....	30
Fig 2. 6 Filtres amortis passe haut.	31
Fig 2. 7 Filter actif dans le reseaux electrique	33
Fig 2. 8 filtre actif de puissance parallele.	34
Fig 2. 9 filtre actif de puissance serie.	34
Fig 2. 10 Combinaison parallèle-série actifs (UPQC).	35
Fig 2. 11 Filtre actif série et filtre passif parallèle.	37
Fig 2. 12 Filtre actif série en série avec un filtre passif parallèle.....	38
Fig 2. 13 Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.	39
Fig 3. 1 algorithme d'optimisation antcolony.....	40
Fig 3. 2 la puissance réactive pour la correction du facteur de puissance	43
Fig 3. 3 la réactance capacitive du filtre	44
Fig 3. 4 la réactance inductive du filtre.....	44
Fig 3. 5 La résistance du filtre	45
Fig 3. 6 Courbes de courant fondamentales sans et avec harmoniques présentes.....	45
Fig 3. 7 Détermination du taux de distorsion harmonique totale du courant THD.	46
Fig 3. 8 Courbes de courant fondamentales sans et avec harmoniques de fiLTREaccordées à l'harmonique	46
Fig 3. 9 Détermination du THDi avec filtre accordées à l'harmonique 5.	47
Fig 3. 10 Spectre harmonique du courant résultant du réseau.	47
Fig 3. 11 Variation de la fonction objective avec le nombre d'itérations.	48
Fig 3. 12 valeur optimales du résistance de filtre passif avec le nombre d'itérations.	48
Fig 3. 13 valeur optimale de l'inductance de filtre passif avec le nombre d'itérations.....	49
Fig 3. 14 valeur optimale de cappacité de filtre passif avec le nombre d'itérations.	49
Fig 3. 15 Courbes de courant fondamentales sans et avec harmoniques de filtre passif optimis.....	50
Fig 3. 16 Détermination du THDi avec l'optimisation.	50

List des tableaux

Tableau 1. 1Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-2).	17
Tableau 1. 2Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-2).	18
Tableau 1. 3caractéristiques de la tension aux bornes d'alimentation(norme EN 50160).....	19
Tableau 1. 4: Limite IEEE des émissions de courants harmoniques	19
Tableau 1. 5La limitation des courants harmoniques injectés dans le réseau publi(norme EN 61000-3-12)	21

No table of figures entries found.

Introduction générale

Le réseau électrique joue un rôle essentiel en produisant de l'électricité et en la fournissant au consommateur pour des usages domestiques et industriels, en proposant un courant continu d'alimentation et une fréquence industrielle constante. Une puissance de qualité supérieure fait référence plus précisément à la qualité de l'alimentation électrique fournie ; elle est influencée par trois éléments : la continuité de l'alimentation, la qualité de l'onde de tension et la qualité du service. Effectivement, lors de son transport, l'énergie électrique est souvent soumise à des perturbations causées par divers facteurs tels que les changements climatiques et les conditions météorologiques, ou internes, telles que les convertisseurs statiques, les redresseurs et les onduleurs. Ces perturbations ont un impact négatif sur la qualité de l'onde de tension d'alimentation et peuvent entraîner une détérioration du réseau électrique et l'arrêt de la production, ce qui peut entraîner le black-out. La manifestation de ces défauts se traduit par différentes perturbations : surtensions temporaires et transitoires, variations et déséquilibres de tension, harmoniques et inter-harmoniques, creux et interruptions de tension. [1][4].

Ce mémoire se concentre sur l'étude approfondie des harmoniques dans les systèmes électriques, ainsi que sur les méthodes avancées de filtrage pour atténuer ces perturbations.

Le chapitre 1, intitulé "Généralités sur les harmoniques", offre une vue d'ensemble essentielle de ce phénomène omniprésent dans les réseaux électriques modernes. Les harmoniques, générées principalement par les équipements non linéaires tels que les variateurs de vitesse et les alimentations à découpage, compromettent la qualité de l'énergie électrique en introduisant des distorsions de tension et de courant. Ce chapitre explore leur définition, leurs sources, ainsi que leur impact sur les équipements sensibles et les normes réglementaires qui régissent leurs limites acceptables.

Le chapitre 2, "Méthodes de Filtrage des harmoniques", examine en détail les techniques disponibles pour réduire les harmoniques dans les réseaux électriques. Il présente les principes de base du filtrage passif et actif, en mettant l'accent sur leurs avantages, leurs limitations et leurs applications spécifiques. Ce chapitre explore également les technologies émergentes et les approches innovantes pour améliorer l'efficacité du filtrage harmonique.

Le chapitre 3, "Conception optimale d'un filtre passif passe-haut à l'aide de l'algorithme de colonies de fourmis (ACO)", propose une méthode novatrice pour optimiser la conception des filtres passifs. En utilisant l'ACO, un algorithme inspiré du comportement des fourmis pour résoudre des problèmes d'optimisation, ce chapitre détaille le processus de conception du filtre passe-haut afin

de minimiser les courants harmoniques. Les résultats de simulations et les performances du filtre optimisé sont analysés pour démontrer son efficacité et sa fiabilité dans la réduction de la distorsion harmonique.

Le but de cette étude est d'améliorer les paramètres fondamentaux liés à une impédance d'un filtre passif passe-haut du second ordre afin de réduire les harmoniques. Cela se fera en proposant un facteur de puissance adapté à l'installation électrique du système commercial. L'utilisation de l'algorithme de colonie de fourmis (ACO) est efficace pour résoudre la contrainte de dimensionnement optimale du filtre passif. Cet algorithme a été largement utilisé pour résoudre divers problèmes d'optimisation combinatoire dans de nombreuses applications liées aux réseaux électriques. [19]

Chapitre 1 :

Généralités sur les harmoniques

Introduction:

L'énergie électrique est généralement livrée par le distributeur d'énergie sous forme d'un système triphasé de tensions, dont la fréquence, l'amplitude et la forme d'onde doivent être sinusoïdales. Cependant, ces dernières années, grâce à l'évolution de la technologie d'électronique de puissance et à son utilisation croissante dans divers appareils industriels, cela entraîne de graves problèmes de perturbations dans les réseaux électriques. De cette manière, on observe une hausse constante du taux de distorsion harmonique, une perturbation des courants et une consommation élevée d'énergie réactive, ainsi qu'une augmentation des pertes d'énergie. Dans ce chapitre, nous présenterons brièvement les harmoniques, ainsi que leurs origines et conséquences.[10]

1.1 Qualité d'énergie :

Définition:

La qualité de l'énergie électrique (QEE) est un paramètre important qui se mesure en fonction de la qualité de l'air. Elle est définie par plusieurs caractéristiques, telles que la qualité de la tension, la continuité, la qualité de service, la dissymétrie et la déviation de la tension et de la fréquence.

La qualité de l'énergie électrique est essentielle pour assurer la fiabilité et l'efficacité des systèmes électriques, et elle est particulièrement importante pour les applications critiques, telles que les hôpitaux, les infrastructures de télécommunications et les centrales électriques . [1]

Les principaux facteurs qui affectent la qualité de l'énergie électrique sont les perturbations électromagnétiques, les appareils électroniques sensibles, les équipements modernes et les exigences de disponibilité du service .

Qualité de l'électricité = Qualité de la tension + Continuité + la qualité de service

Elle se caractérise par plusieurs paramètres, dont les plus importants sont :

1.1.1) La continuité de l'alimentation électrique :

La continuité de l'alimentation électrique désigne la capacité d'un système électrique à fournir une alimentation électrique sans interruption.

a) La continuité de l'alimentation est importante pour plusieurs raisons :

- **Pour garantir la sécurité des personnes:** Des coupures de courant peuvent mettre en danger la sécurité des personnes, par exemple dans les hôpitaux, les transports en commun ou les industries dangereuses. [2]

- **Pour garantir la continuité des services:** Des coupures de courant peuvent perturber la continuité des services, par exemple dans les centres de données, les télécommunications ou les services financiers.
- **Pour éviter des pertes économiques:** Des coupures de courant peuvent entraîner des pertes économiques importantes, par exemple dans les industries de production, les commerces ou les administrations. [3]

b) Causes des interruptions de l'alimentation:

Les interruptions de l'alimentation peuvent avoir plusieurs causes :

- **Les pannes de courant:** Les pannes de courant peuvent être causées par des événements naturels (orages, tempêtes), des accidents (défauts sur le réseau électrique) ou des actes de malveillance. [3]
- **Les travaux sur le réseau électrique:** Des travaux sur le réseau électrique peuvent également entraîner des coupures de courant.
- **La surcharge du réseau électrique:** En cas de forte demande d'électricité, le réseau électrique peut être surchargé et des coupures de courant peuvent se produire.

1.1.2) La qualité de l'onde de tension :

La qualité de l'onde de tension est un aspect important de la qualité de l'énergie électrique (QEE). Elle fait référence à la **forme** de la tension délivrée par le réseau électrique.

a) Caractéristiques d'une tension de bonne qualité:

- **Forme sinusoïdale:** Dans l'idéal, la tension électrique doit avoir une forme d'onde sinusoïdale. Cela signifie qu'elle oscille de manière régulière autour d'une valeur nulle, avec une fréquence constante (50 Hz en France) et une amplitude constante. [3]
- **Stabilité de la tension:** La tension doit être stable et proche de la valeur nominale (230 V en monophasé et 400 V en triphasé en France). Des variations importantes de tension peuvent perturber le fonctionnement des équipements électriques.[3]

b) Perturbations de la qualité de l'onde de tension:

Plusieurs facteurs peuvent affecter la qualité de l'onde de tension :

- **Fluctuations de tension:** Des variations rapides de la tension au-dessus ou en dessous de la valeur nominale.
- **Creux de tension:** Des baisses soudaines et brèves de la tension.

- **Surintensités:** Des hausses soudaines et brèves de la tension.
- **Harmoniques:** Des courants électriques à des fréquences multiples de la fréquence fondamentale (50 Hz). Les harmoniques sont souvent causées par des charges non linéaires, comme les alimentations à découpage présentes dans de nombreux appareils électroniques.[2]

c) Impact des perturbations sur les équipements électriques:

Les perturbations de la qualité de l'onde de tension peuvent avoir plusieurs effets négatifs sur les équipements électriques :

- **Mauvais fonctionnement:** Des variations de tension peuvent entraîner des dysfonctionnements des équipements électriques.
- **Réduction de la durée de vie:** Les perturbations de tension peuvent réduire la durée de vie des équipements électriques.
- **Pannes:** Dans les cas extrêmes, les perturbations de tension peuvent entraîner des pannes d'équipement.

1.1.3) La qualité de service :

La qualité de service peut avoir deux sens selon le contexte :

a) Qualité de service dans le secteur des services :

Dans ce contexte, la qualité de service fait référence à la capacité d'une entreprise à répondre aux attentes de ses clients. Elle englobe plusieurs aspects :

- **La compétence du personnel:** Un personnel compétent et serviable est essentiel pour fournir une bonne qualité de service. [2]
- **L'amabilité et la courtoisie:** Les clients doivent se sentir respectés et valorisés par l'entreprise.
- **La rapidité et l'efficacité du service:** Les clients ne veulent pas perdre de temps et attendent un service rapide et efficace.[2]
- **La fiabilité et la disponibilité du service:** Le service doit être fiable et disponible lorsque le client en a besoin.
- **La communication et l'information:** Les clients doivent être informés de manière claire et transparente sur les services proposés et les conditions associées.

b) Qualité de service dans les technologies de l'information et de la communication (TIC) :

Dans le domaine des TIC, la qualité de service fait référence à la capacité d'un réseau à délivrer des performances satisfaisantes pour une application ou un service donné. [3] Elle se mesure par plusieurs indicateurs :

- **Disponibilité:** Le pourcentage de temps pendant lequel le service est accessible et opérationnel.
- **Débit:** La vitesse de transmission des données.
- **Latence (temps de retard):** Le délai entre l'envoi d'une information et sa réception.
- **Taux de perte de paquets:** Le pourcentage de paquets de données qui ne parviennent pas à leur destination.

c) Importance de la qualité de service :

Une bonne qualité de service est essentielle pour toute entreprise, quel que soit son secteur d'activité. Elle permet de :

- Fidéliser les clients et en attirer de nouveaux.
- Améliorer l'image de marque de l'entreprise.
- Augmenter la productivité et l'efficacité.
- Réduire les coûts liés aux plaintes et aux litiges

d) Comment améliorer la qualité de service :

Il existe plusieurs moyens d'améliorer la qualité de service :

- Former et motiver le personnel.
- Mettre en place des processus et des procédures clairs.
- Investir dans les technologies et les outils nécessaires.
- Mettre en place un système de gestion de la qualité.
- Mesurer régulièrement la satisfaction des clients et prendre des mesures correctives en cas de besoin.

Enjeux de la QEE:

Une bonne QEE est importante pour plusieurs raisons :

- **Pour garantir le bon fonctionnement des équipements électriques:**

Des perturbations de la QEE peuvent entraîner des pannes d'équipement, des réductions de la durée de vie des équipements, des pertes de production et des perturbations de process.

- **Pour la sécurité des personnes:** Des perturbations de la QEE peuvent également présenter un risque pour la sécurité des personnes, par exemple en cas de surtensions.
- **Pour l'efficacité énergétique:** Une mauvaise QEE peut entraîner une augmentation de la consommation d'énergie.

a) Causes des perturbations de la QEE:

Les perturbations de la QEE peuvent avoir plusieurs causes :

- **Les phénomènes naturels:** Les orages, les éclairs et les surtensions d'origine atmosphérique peuvent perturber la QEE.[1]
- **Les charges non linéaires:** De plus en plus d'équipements électriques sont non linéaires, ce qui signifie qu'ils ne consomment pas le courant de manière sinusoïdale. Ces équipements peuvent générer des harmoniques, qui peuvent perturber la QEE.[1]
- **Les défauts du réseau électrique:** Des défauts sur le réseau électrique, tels que des courts-circuits ou des coupures de courant, peuvent également perturber la QEE.

b) Solutions pour améliorer la QEE:

Il existe plusieurs solutions pour améliorer la QEE :

- **Utiliser des équipements électriques de bonne qualité:** Des équipements électriques de bonne qualité sont moins sensibles aux perturbations de la QEE.[3]
- **Installer des filtres anti-harmoniques:** Les filtres anti-harmoniques permettent de réduire les harmoniques générées par les charges non linéaires.
- **Utiliser des onduleurs:** Les onduleurs permettent de fournir une alimentation électrique de secours en cas de coupure de courant.[2]
- **Mettre en place un plan de maintenance du réseau électrique:** Un plan de maintenance permet de prévenir les défauts du réseau électrique qui peuvent perturber la QEE.

1.1.5) Conclusion:

La QEE est un élément important pour garantir le bon fonctionnement des installations électriques, la sécurité des personnes et l'efficacité énergétique. Il est important de prendre des mesures pour améliorer la QEE et de se conformer aux normes et réglementations en vigueur.

1.2 Les harmoniques:

1.2.1) Définition :

Les dispositifs non linéaires tels que les fours à arc, les éclairages, les convertisseurs, les redresseurs et les onduleurs... etc., absorbent des courants non sinusoïdaux qui traversent les impédances du réseau, ce qui entraîne une déformation de l'onde de tension et une déformation de l'onde de courant de raccordement. L'apparition des fréquences harmoniques est la manifestation de la déformation de la forme d'onde. La pollution du réseau électrique par distorsion harmonique peut causer des problèmes si la somme de ces courants harmoniques dépasse certaines valeurs limites. De manière générale, on considère les fréquences harmoniques dans un réseau électrique comme étant supérieures à 100 Hz et inférieures à 2500 Hz, c'est-à-dire dans les rangs 2 à 50. Le rang harmonique est défini comme le rapport entre sa fréquence et celle du fondamental. [4] On définit le rang harmonique comme le rapport de sa fréquence f_h à celle du fondamental :

$$h = \frac{f_h}{f_1} \quad (1.1)$$

1.2.2) Harmonique de Courant et de tension :

Les harmoniques présents sur les réseaux électriques sont le résultat de l'utilisation de charges non linéaires. Lorsqu'elles sont reliées au réseau à une fréquence spécifique, elles reçoivent un courant non sinusoïdal mais de même fréquence.[5] Ces courants provoquent, dans le réseau, des chutes de tensions harmoniques selon la loi d'Ohm :

$$V_h = Z_h \times I_h \quad (1.2)$$

V_h : Tension harmonique de rang h .

Z_h : Impédances harmoniques de rang h .

I_h : Courant harmonique de rang h.

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

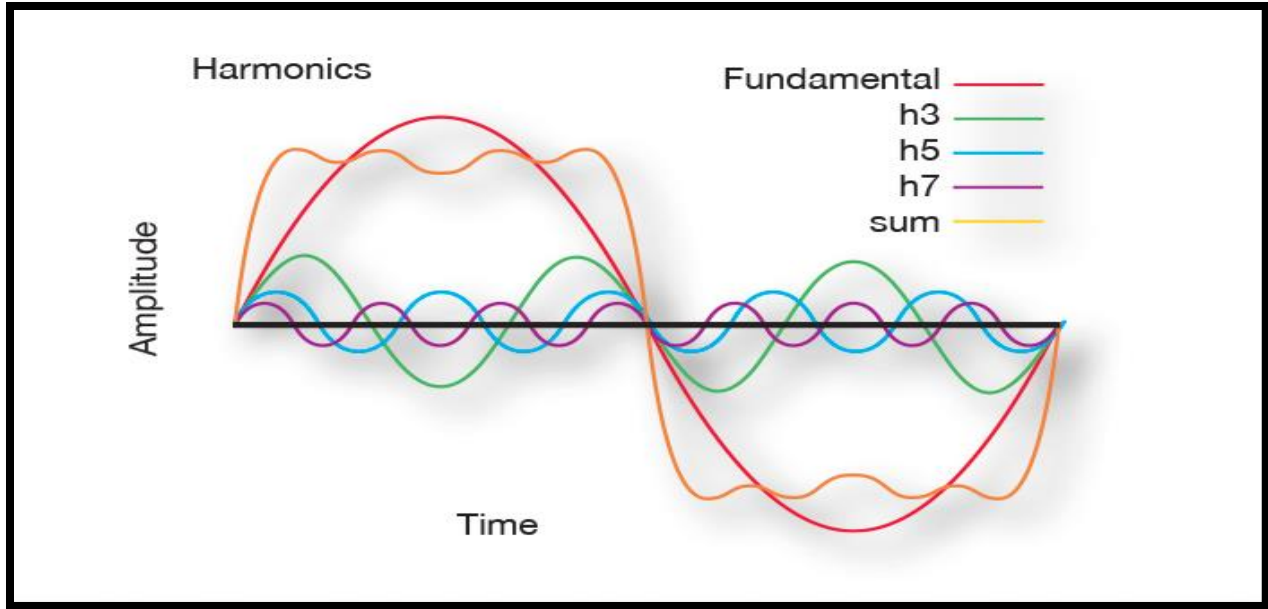


FIG 1. 1 LA FORME DE L'ONDE D'UN COURANT DEFORME AVEC LES HARMONIQUES.

• **Les inter harmoniques et les infra harmoniques :**

sont des types de perturbations dans les réseaux électriques qui affectent la qualité de l'énergie électrique. Voici une explication de chacun :

- Inter harmoniques : Ce sont des signaux de fréquence qui ne sont pas des multiples entiers de la fréquence fondamentale. Ils peuvent être générés par des événements tels que le démarrage ou l'arrêt de machines électriques, ou par des processus de conversion de puissance qui ne fonctionnent pas à la fréquence du réseau.
- Infra harmoniques : Ce sont des composantes de fréquence inférieure à celle du fondamental. Ils sont moins communs que les harmoniques et inter harmoniques et peuvent être causés par des phénomènes tels que la résonance entre les éléments inductifs et capacitifs du réseau.[5]

1.2.3) Décomposition d'un signal périodique :

La décomposition d'un signal périodique consiste à le représenter comme une somme de fonctions sinusoïdales, un concept fondamental en analyse de signaux. Selon le Théorème de Fourier, tout signal périodique peut être décomposé en une série infinie de sinus et cosinus. Cette décomposition permet de caractériser le signal en termes de ses composantes harmoniques. Les coefficients de Fourier, déterminent l'amplitude des différentes fréquences présentes dans le signal, formant ainsi son spectre.[6]

• **La décomposition en série de Fourier :**

La décomposition en série de Fourier est essentielle pour analyser et comprendre les signaux périodiques, que ce soit en électronique, en physique, ou dans d'autres domaines où des phénomènes périodiques sont observés. Elle offre une méthode puissante pour étudier et manipuler ces signaux de manière mathématique et pratique.[6]

Le signal $v(t)$ de la figure 1.1 peut représenter un courant ou une tension périodique de période T , donc de fréquence $f = \frac{1}{T}$ et de pulsation $\omega = 2\pi f$. Ce signal se décompose de la façon

SUIVANTE :

$$V(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} (A \cos(\omega h t) + B \sin(\omega h t)) \quad (1.3)$$

AVEC :

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad (1.4)$$

ET POUR $h \geq 1$:

$$\alpha_h = \frac{2}{T} \int_0^T v(t) \cos(\omega h t) dt \quad (1.5)$$

$$\beta_h = \frac{2}{T} \int_0^T v(t) \sin(\omega h t) dt \quad (1.6)$$

• **La valeur efficace d'un signal :**

Le efficace d'un signal $v(t)$ et par définition :

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad (1.7)$$

D'après le théorème de Parseval :

$$\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt = V^2 + \sum_{h=1}^{\infty} V_h^2 \quad (1.8)$$

On a donc la relation suivante :

$$V_{eff} = \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} V_h^2}, \quad V_0 = 0 \quad (1.9)$$

De même :

$$I_{eff} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (1.10)$$

1.2.4) Les puissances active, réactive, apparente et déformante :

• **La puissance active :**

C'est la puissance qui se transforme en travail, elle est mesurée en Watt, son expression est donnée par l'équation[6]

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cos \varphi_h \quad (1.11)$$

$$\varphi_h = \alpha - \beta \quad (1.12)$$

α : Phase initiale de la tension harmonique d'ordre h.

β : Phase initiale du courant harmonique d'ordre h.

φ_h : Déphasage de la tension harmonique d'ordre h sur le courant harmonique d'ordre h.

• **La puissance réactive :**

C'est une puissance qui est absorbée dans le réseau et qui ne se transforme pas en travail. Elle est mesurée en VAR et son expression est donnée par l'équation :

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cdot \sin \varphi_h \quad (1.13)$$

• **La puissance apparente :**

La puissance apparente, mesurée en kilovoltampères (kVA), est la combinaison de la puissance active et de la puissance réactive.[7] Elle représente la capacité totale d'un circuit à fournir de l'énergie et son expression est donnée par l'équation :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1.14)$$

$$S^2 = \sum_{h=1}^{\infty} U_h^2 \times \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \geq (\sum U_h \cdot I_h \cdot \cos \varphi_h)^2 + (\sum U_h \cdot I_h \cdot \sin \varphi_h)^2 \quad (1.15)$$

Donc une quantité nommée la puissance déformante est :

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \quad (1.16)$$

$$D = U_1 \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} \quad (1.17)$$

La puissance déformante se compose principalement des produits croisés de la tension et du courant harmoniques de différents ordres et sera réduite à zéro si les harmoniques sont réduits à zéro, c'est-à-dire aux conditions sinusoïdales. [7][6]

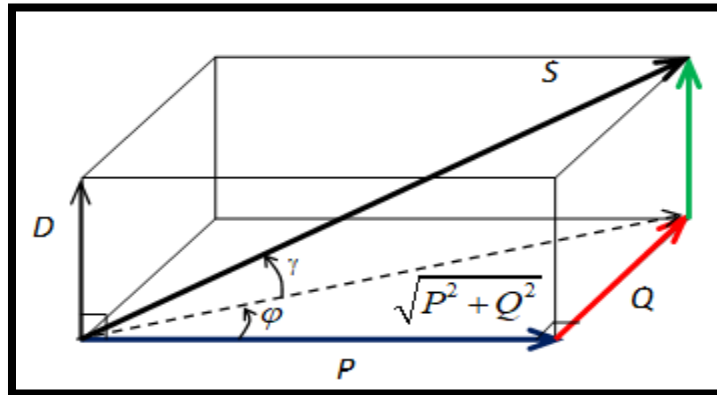


FIG 1. 2 DIAGRAMME DE FRESNEL DES PUISSANCES.

Facteur de puissance (F.P) :

$$F.P = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos \varphi \cdot \cos \gamma \quad (1.18)$$

1.2.5) Taux de distorsion harmonique :

Le taux de distorsion harmonique (TDH) est une mesure de la distorsion d'un signal qui a été affecté par l'harmonique. En termes simples, c'est une mesure de la quantité de déformation ou de modification du signal d'origine.[7]

• Taux harmonique de rang h :

L'harmonique de rang h d'un signal est la composante sinusoïdale dont la fréquence est h fois la fréquence fondamentale.

La composante harmonique individuelle est définie comme étant le pourcentage d'harmoniques de rang h par rapport à la composante fondamentale. Notamment :

Pour les harmoniques de tension :

$$u_h = 100 \times \frac{V_h}{V_1} \quad (1. 19)$$

Pour les harmoniques de courant :

$$i_h = 100 \times \frac{I_h}{I_1} \quad (1. 20)$$

• Le taux global de distorsion harmonique :

Le taux global de distorsion harmonique (THD, Total Harmonic Distortion) est une mesure de la distorsion d'un signal causée par les harmoniques. Il est défini comme le rapport de la somme des puissances de toutes les composantes harmoniques à la puissance de la composante fondamentale.[7]

La formule pour calculer le THD est la suivante :

-Pour la tension :

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H V_h^2}}{V_1} \quad (1. 21)$$

V_h : est la tension de l'harmonique h.

V_1 : est la tension du signal fondamental.

H : est le nombre total d'harmoniques considérées.

-Pour le courant :

$$THD_I = \sqrt{\sum_{h=2}^H I_h^2} / I_1 \quad (1. 22)$$

I_h : est le courant de l'harmonique h.

I_1 : est le courant du signal fondamental.

NB : Le sommet commence à 2 car le signal fondamental est considéré comme la première harmonique.

1.2.6) Origines et sources des harmoniques :

Les harmoniques dans un système électrique sont généralement causées par des charges non linéaires. Une charge est dite non linéaire lorsque le courant qu'elle absorbe n'a pas la même forme d'onde que la tension qui l'alimente.[8]

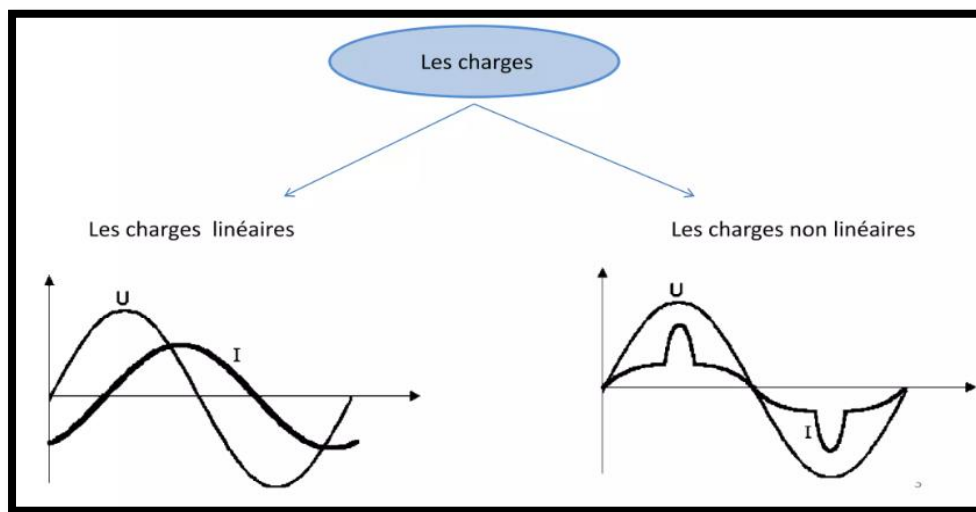


FIG 1. 3LES CHARGE (LINEAIRE ET NON LINEAIRE).

- **Génération des tensions harmoniques:**

- Alternateurs:

Les alternateurs des centrales de production fournissent une tension d'alimentation qui contient très peu d'harmoniques (<0.5% selon la norme harmonique IEEE 519 (1992)). Le contenu harmonique de la tension générée par les alternateurs est lié à la qualité du bobinage et des pièces polaires qui assurent la forme sinusoïdale de l'onde. Sur un groupe électrogène, le taux de distorsion harmonique en tension est généralement inférieur à 5% à vide et inférieur à 1% lorsque le groupe électrogène débite à pleine puissance sur une charge linéaire.[8]

- Transformateurs:

Les transformateurs peuvent être générateurs de tensions harmoniques lorsqu'ils fonctionnent en régime saturé. Sur les réseaux, le taux de distorsion harmonique en tension dû à ces appareils reste toujours inférieur au pourcent.[8]

➤ Alimentations statiques ininterrompibles (ASI):

Ces dispositifs ont des performances très intéressantes pour la protection du matériel contre les creux de tension et les coupures. En revanche, ils ont parfois des limitations dans le domaine harmonique qu'il convient de connaître pour bien les maîtriser. En effet, le réseau protégé alimente généralement des charges non linéaires comme du matériel informatique. Pour une ASI d'une puissance de 80KVA, le taux de distorsion harmonique en tension est inférieur à 4% pour une charge linéaire, est inférieur à 7% pour une charge non linéaire.[9]

En général, le taux de distorsion harmonique en tension diminue avec l'augmentation de la puissance de l'ASI.

Il faut bien noter qu'en charge, le taux de tension harmonique est dû essentiellement aux courants harmoniques créés par les charges non linéaires qui sont alimentées par l'ASI.

➤ Charges électrodomestiques:

Ce terme englobe tous les appareils domestiques de faible puissance tels que les récepteurs de télévision, les magnétoscopes, etc... Ces charges sont présentes en grand nombre sur le réseau et, bien que de puissance unitaire réduite, elles sont responsables d'une part importante de la pollution harmonique.[8]

• **Générateurs de courants harmoniques:**

Les charges non linéaires consomment un courant qui n'est pas sinusoïdal. Elles représentent les principales sources d'émission en courants harmoniques sur les réseaux.

➤ Machines tournantes :

Les machines synchrones ou asynchrones, même alimentées par des courants parfaitement sinusoïdaux, sont elles-mêmes génératrices d'harmoniques à cause de la saturation du circuit magnétique, d'où la répartition spatiale du flux tournant dans l'entrefer qui n'est pas rigoureusement sinusoïdal. [6]

➤ Convertisseurs d'électronique de puissance:

Comme les : Redresseurs monophasés (micro-ordinateurs, imprimantes et périphériques d'ordinateurs, variateurs de vitesse pour les moteurs à courant alternatif, téléviseurs...etc.).

- Gradateurs à angle de phase (commande de four électrique, régulation de puissance, démarreurs progressifs des moteurs ...etc.). [8]
- Redresseurs triphasés à base de semi- conducteurs (variation de vitesse de moteur, four à induction, électrolyseurs ...etc.).

➤ Eclairage:

On distingue deux types de lampes qui produisent des courants harmoniques :

- Les lampes à fluorescence.
- Les lampes à vapeur haute pression.
- Les lampes fluo-compactes.

La génération d'harmoniques dans ces lampes est liée à la nature fortement non linéaire du phénomène entraînant l'illumination ainsi qu'à la présence d'un ballast.

➤ Appareils à arc électrique:

Les appareils à arc électrique regroupent les fours à arc à courant alternatif dont la puissance peut atteindre plusieurs dizaines de « MW », et les machines de soudure à l'arc, à courant alternatif ou continu. Certaines perturbations harmoniques sont dues essentiellement aux imperfections de construction (dissymétrie, distribution non sinusoïdale du champ dans les alternateurs, saturation des circuits magnétiques...etc.).[6]

1.2.7) Effets des harmoniques sur le réseau électrique :

Les effets des harmoniques les plus connus et les plus spectaculaires sont la destruction de condensateurs et de disjoncteurs sous l'effet de forts courants harmoniques amplifiés par des résonances. Ce phénomène est généralement observable sur des réseaux internes d'usines alimentant des convertisseurs statiques. Un autre phénomène de plus en plus rencontré est l'échauffement des transformateurs et des conducteurs de neutre sous l'effet des courants harmoniques de rang 3 et multiples de 3. On rencontre le plus souvent ce type de situation en milieu tertiaire, en raison de la multiplication des matériels informatiques monophasés. Il est d'usage de dire que, dans les installations industrielles, les tensions harmoniques inférieures à 5% de la tension fondamentale ne produisent pas d'effets notables. Entre 5% et 7%, on commence à observer des effets, de 7% à 10% ces effets sont fréquents, et pour plus de 10%, les effets sont quasi certains.[7]

Les différents types d'effets:

On distingue quatre grands types d'effets : Effets instantanés et effets différés et effets à court terme et effets à long terme.

1.2.7.1) Effets instantanés:

- Les perturbations des systèmes électroniques.
- Déclenchements intempestifs des protections.
- Perturbation des lignes de téléphone proches des lignes de puissance.
- Résonance.
- Vibrations et bruits acoustiques anormaux (moteurs, transformateurs...)
- Destruction par surcharge thermique de condensateurs.
- Perte de précision des appareils de mesure

1.2.7.2) Effets différés:

Les effets différés sont souvent liés à un sur-échauffement plus ou moins important. Ces effets sont dus essentiellement à deux phénomènes :

- l'échauffement des conducteurs ou des composants traversés par les courants harmoniques .
- le vieillissement des isolants qui peut être dû soit à une contrainte en tension consécutive à la présence de tensions harmoniques, et donc à une augmentation locale des courants de fuite, soit à l'échauffement exagéré des conducteurs. L'impact d'une perturbation harmonique sur un appareil donné est fonction des constantes de temps et d'échauffement mises en jeu et du niveau de perturbation.[8]

1.2.7.3) Effets à court terme:

Ils concernent essentiellement deux types d'équipement :

- les composants à faible constante de temps thermique comme les étages d'alimentation des appareils électroniques,
- les éléments susceptibles d'entrer en résonance ou situés sur le trajet d'un courant amplifié par une résonance, comme les condensateurs, les disjoncteurs ou les petits transformateurs.

1.2.7.4) Effets à long terme :

- Une surcharge en courant provoque des échauffements supplémentaires donc un vieillissement prématuré des équipements.

- Echauffement des sources : transformateurs, alternateurs (par augmentation des pertes Joule, des pertes fer.....).
- Fatigue mécanique (pulsation de couple dans les machines asynchrones....).
- Echauffement des récepteurs, des conducteurs de phases et du neutre par augmentation des pertes Joule et diélectriques.
- Destruction de matériels (condensateurs, disjoncteurs...) .
- Rayonnement électromagnétique perturbant les écrans (micro-ordinateurs, appareils de laboratoire.....).
- Ils réduisent le couple utile des moteurs et les empêchent d'atteindre la vitesse nominale.

1.2.8) Normes:

Les normes relatives aux harmoniques sur le réseau électrique visent à limiter les effets néfastes des harmoniques sur la qualité de l'énergie et sur les équipements électriques. Elles définissent des limites d'émission et d'immission d'harmoniques pour les différents types d'installations électriques.

a. Normes internationales:

➤ La norme CEI 61000-2-2:

elle définit les niveaux de compatibilité de tension harmoniques sur les réseaux publics basse tension.[10]

Cette norme vise à protéger les équipements raccordés sur un réseau basse tension déformé.

TABLEAU 1. 1 LIMITE DES COMPOSANTES HARMONIQUES EN COURANT (NORME CEI 61000-3-2).

Rangs impairs		Rangs impairs		Rangs pairs	
Rang	Taux(%)	Rang	Taux(%)	Rang	Taux(%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2

25	1,5
>25	$0,2+1,3*25/h$

- **La norme CEI 61000-3-2:** cette norme fixe la limitation des courants injectés dans le réseau public pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16A. Il s'agit des appareils du domaine domestique.

Tableau 1. 2 Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-2).

Rang harmonique (h)	Courant harmoniques maximal autorisé (A)
Harmoniques impairs	
3	2,3
5	1,14
7	0,77
9	0,4
11	0,33
13	0,21
$15 \leq h \leq 39$	$0,15*15/h$
Harmoniques pairs	
2	1,08
4	0,43
6	0,3
$8 \leq h \leq 40$	$0,24*8/h$

➤ **La norme EN 50160 :**

précise les principales caractéristiques de la tension aux bornes d'alimentation d'un utilisateur du réseau dans les systèmes publics basse tension, moyenne tension, haute tension et de distribution d'électricité. Il décrit les plages d'écart admissibles pour les paramètres de tension dans des conditions de fonctionnement normales, telles que les variations de tension d'alimentation, les tensions harmoniques, le déséquilibre de tension, etc. La norme EN 50160 vise à garantir la qualité de l'alimentation électrique afin de répondre aux exigences des équipements électriques pour un

fonctionnement, une efficacité et une durée de vie optimales. De plus, il met en évidence les différences entre les normes EN 50160 et EMC, soulignant l'importance de maintenir les niveaux de tension appropriés pour les performances de l'équipement .[10]

TABEAU 1. 3 CARACTERISTIQUES DE LA TENSION AUX BORNES D'ALIMENTATION (NORME EN 50160)

limites harmoniques				
non-multiple de 3		multiple de 3		
Order h	Relative voltage (%)	Order h	Relative voltage (%)	
5	6	3	5	
7	5	9	1,5	
11	3,5	15	0,5	
13	3	21	0,5	
17	2			
19	1,5			
23	1,5			
25	1,5			

➤ **La norm IEEE 519 :**

également connu sous le nom de "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality," est une norme recommandée qui fournit des lignes directrices pour la surveillance des caractéristiques électriques des systèmes d'alimentation en courant alternatif monophasés et triphasés. Elle comprend des définitions de conditions nominales et des écarts, des techniques de mesure, des techniques d'application et l'interprétation des résultats de surveillance. La norme a été initialement publiée en 1995 et a été révisée en 2019.[21]

TABEAU 1. 4: LIMITE IEEE DES EMISSIONS DE COURANTS HARMONIQUES

V_n ≤ 69 kV						
I_{cc}/I_{ch}	3 ≤ h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	TDD
< 20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20-50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50-100	10	4,5	4	1,5	0,7	12

100-1000	12	6	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20
69kV < V_n ≤ 161kV						
<20	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
20-50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4
50-100	5	2,25	2	1,25	0,35	6
100-1000	6	2,75	2,5	1	0,5	7,5
>1000	7,5	3,5	3	1,25	0,7	10
V_n > 161kV						
<50	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
≥50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4

b. Normes européennes:

➤ EN 61000-3-2:

est une norme européenne qui spécifie les limites d'émission de courants harmoniques dans les équipements électriques avec un courant nominal allant jusqu'à 16 A par phase. Il fait partie de la série CEI 61000, qui traite de la compatibilité électromagnétique (CEM) et est publiée par la Commission électrotechnique internationale (CEI).[10]

de la compatibilité électromagnétique (CEM) :

La CEM est la capacité d'un appareil ou d'un système électrique ou électronique à fonctionner de manière satisfaisante dans son environnement électromagnétique, sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour les autres appareils de son environnement.

➤ EN 61000-3-12:

est une norme européenne qui traite de la limitation des courants harmoniques injectés dans le réseau public. Elle s'applique aux équipements électriques et électroniques avec un courant d'entrée nominal supérieur à 16 A et allant jusqu'à 75 A inclus par phase, destinés à être connectés au courant alternatif public basse tension. systèmes de distribution des types suivants :

- Tension nominale jusqu'à 240 V, monophasé, deux ou trois fils.
- Tension nominale jusqu'à 690 V, triphasé, trois ou quatre fils.
- Fréquence nominale 50 Hz ou 60 Hz.

TABEAU 1. 5 LA LIMITATION DES COURANTS HARMONIQUES INJECTES DANS LE RESEAU PUBLI(NORME EN 61000-3-12)

Harmoniques impairs non-multiple de 3		Harmoniques impairs multiple de 3		Meme harmoniques	
Harmoniques order (h)	Harmoniques voltage (%)	Harmoniques order (h)	Harmoniques voltage (%)	Harmoniques order (h)	Harmoniques voltage (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,4	6	0,5
13	3	21	0,3	8	0,5
$17 \leq h \leq 49$	$2,27 \cdot 17/h - 0,27$	$21 \leq h \leq 45$	0,2	$10 \leq h \leq 50$	$0,25 \cdot 10/h + 0,25$

Normes françaises

➤ La norme NF C 15-100 :

La norme française NF C 15-100 régit la conception, l'installation et la maintenance des installations électriques basse tension. Il couvre la partie aval du disjoncteur de raccordement et fixe les conditions de conception et d'installation des circuits électriques dans les habitations. Cette norme est cruciale pour garantir la sécurité et la durabilité électriques, avec des règles spécifiques sur les prises, les indices de protection, les circuits spécialisés, l'éclairage, etc. La conformité à la norme NF C 15-100 est obligatoire pour les nouvelles constructions, les rénovations et les extensions afin de garantir la sécurité des installations électriques au sein des habitations.

➤ La norme NF C 14-100 :

La norme française NF C 14-100 régit la conception et l'installation des réseaux de distribution d'électricité, en se concentrant spécifiquement sur la section en amont du disjoncteur de raccordement. Elle couvre les travaux de raccordement entre le raccordement au réseau et le point d'alimentation électrique (disjoncteur) et s'applique aussi bien aux habitations individuelles que

collectives. La norme NF C 14-100 est mise à jour régulièrement pour répondre aux exigences modernes en matière de sécurité et de durabilité des installations électriques.

Conclusion :

Dans ce chapitre , nous avons illustré le phénomène des harmoniques, leurs caractéristiques, leurs conséquences, leurs sources et les différentes origines des perturbations affectant les réseaux électriques.

Les harmoniques constituent un problème croissant dans les systèmes électriques modernes. Il est important de les connaître et de mettre en place des solutions pour limiter leurs effets néfastes. Le choix de la solution la plus adaptée dépend de l'installation électrique et des besoins spécifiques.

Chapitre 2 :

Méthodes de Filtrage des
harmoniques

Introduction

Vus les nombreux effets néfastes créés par les harmoniques sur les appareils électriques industriels, plusieurs solutions ont été envisagées afin de pouvoir garantir un niveau de qualité et de sécurité suffisant à l'ensemble de l'installation. Mais avant d'envisager de mettre en place une solution de filtrage pour dépolluer le réseau, il faut d'abord s'intéresser au mode de raccordement du récepteur non linéaire vis-à-vis de l'installation concernée et vis-à-vis des autres charges présentes sur le même réseau.

2.1 Méthodes classiques contre les harmoniques

Les harmoniques sont des distorsions du courant électrique qui peuvent avoir des effets néfastes sur les installations électriques et les équipements. Parmi les méthodes classiques de lutte contre les harmoniques, on trouve :

2.1.1) Choix du raccordement des charges polluantes au réseau

Il est recommandé de brancher la charge non linéaire, si cela est possible, sur la source ayant la plus faible impédance, comme le transformateur le plus puissant.

Quand la source a une faible impédance, la puissance de court-circuit est plus faible. important, ce qui diminue les difficultés causées par les harmoniques. Il est également important de connecter les charges polluantes le plus en amont possible de la source afin de profiter du maximum de puissance de court-circuit, Par ailleurs, un récepteur sensible ne doit pas être connecté à proximité d'une charge déformante. Il est donc essentiel de placer le branchement des charges déformantes dans une installation de manière à garantir la séparation des charges et à obtenir la puissance de court-circuit la plus élevée. [6]

La séparation des sources est également utilisée, même si elle est coûteuse. La méthode implique d'attribuer un transformateur autonome pour alimenter une seule charge non linéaire.

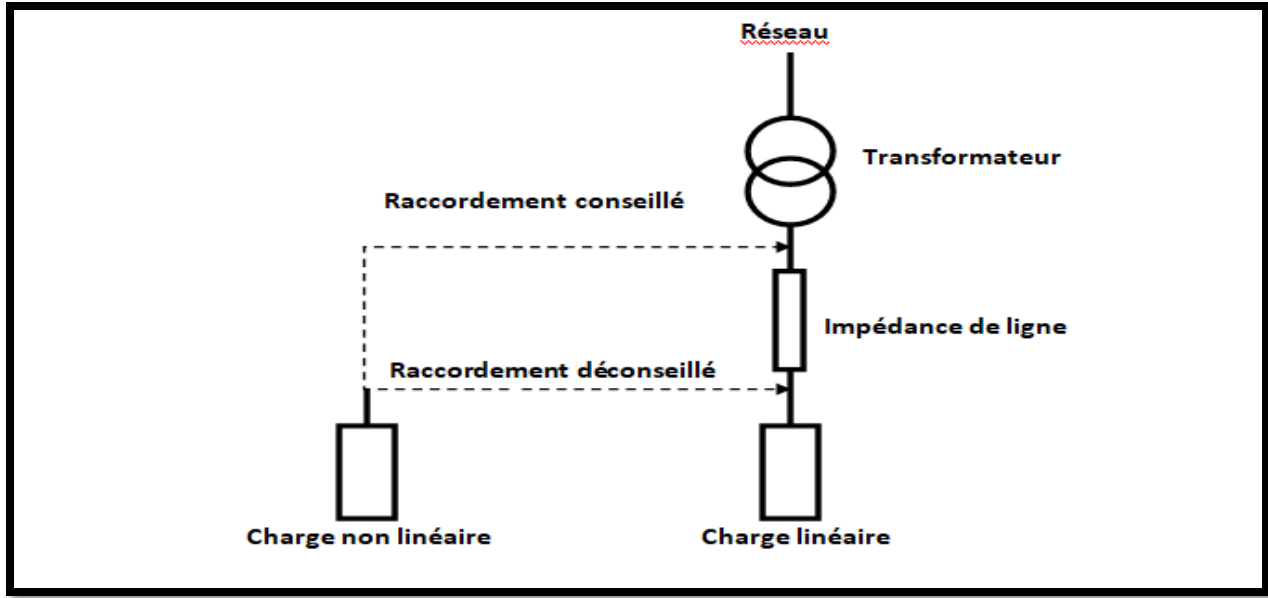


FIG 2. 1 RACCORDEMENT DE LA CHARGE POLLUANTE LE PLUS EN AMONT POSSIBLE DE LA SOURCE.

2.1.2) Couplage spécial de transformateurs :

En général, les harmoniques de rang 3 sont bloquées au niveau du circuit aval du transformateur par des charges non linéaires alimentées en monophasé (charges informatiques, ballasts d'éclairage, etc.). Les transformateurs HTA/BT, en raison de leur combinaison étoile-zigzag ou triangle-étoile, constituent une protection contre les harmoniques de niveau 3. Dans le cas d'une installation tertiaire, par exemple, qui comprend de nombreux ordinateurs et équipements informatiques, l'installation d'un transformateur de séparation peut être une solution efficace pour éliminer les harmoniques de rang 3 et multiples de 3. Cependant, elle n'affecte aucunement les autres rangs harmoniques (H5, H7, etc...). Cette solution, au contraire, restreint la puissance disponible de la source et accroît l'impédance de la ligne. [11]

En conséquence, la distorsion en tension est accrue en raison des autres rangs harmoniques.

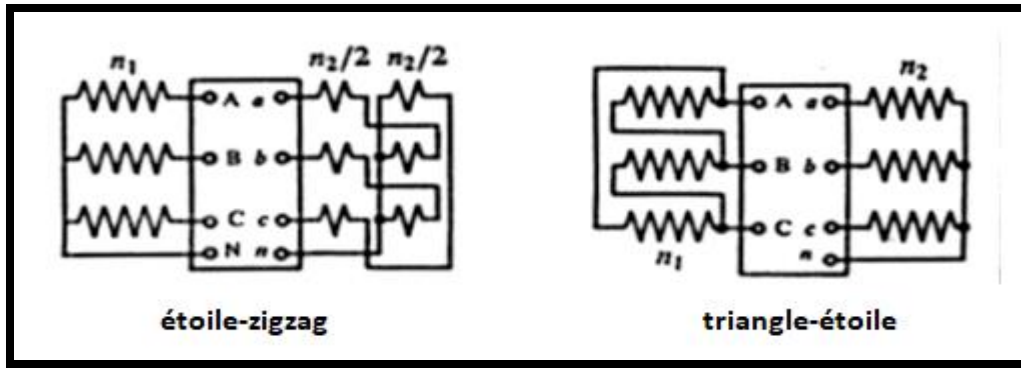


FIG 2. 2 COUPLAGE SPECIAL DE TRANSFORMATEURS.

2.1.3) Utilisation d'un redresseur à deux ponts :

Il s'agit d'un transformateur à deux enroulements secondaires qui fonctionne. À chaque sortie, un redresseur en pont de Graëtz alimente un redresseur hexaphasé. Il est essentiel que les redresseurs offrent des courants continus identiques. Au cours de ces conditions, les courants harmoniques générés par chaque redresseur au primaire du transformateur sont recombinaés, ce qui entraîne l'élimination des harmoniques de rang $6k \pm 1$ avec k impair. Cela s'applique notamment aux harmoniques 5 et 7 dont les amplitudes théoriques sont les plus élevées.[11]

Les harmoniques 11 et 13 sont maintenues et les 17 et 19 sont supprimées. Il reste donc 12 harmoniques de rang $12k \pm 1$ avec k entier naturel. Cette solution est coûteuse, elle engendre des frais supplémentaires et nécessite davantage de compétences que les méthodes habituelles pour les mettre en place.

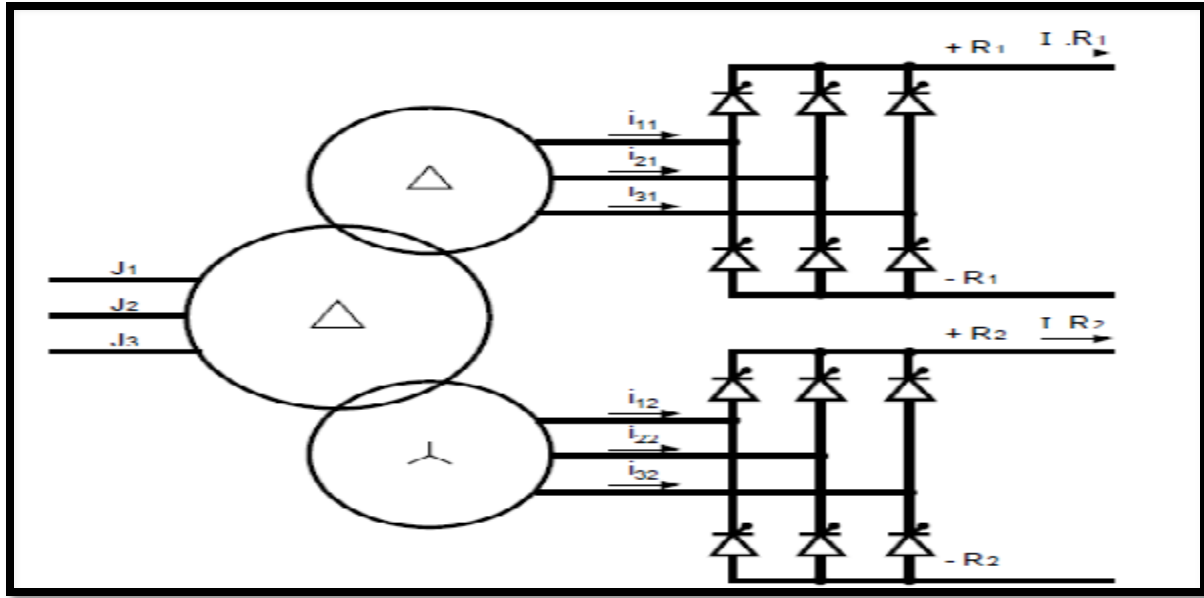


FIG 2. 3 SCHEMA DE PRINCIPE D'UN REDRESSEUR A DEUX PONTS DECALES.

2.1.4) Inductances (selfs) série :

D'autres méthodes sont employées, en particulier dans les convertisseurs d'énergie tels que les onduleurs ou les variateurs de vitesse, qui utilisent une inductance en série avec le récepteur déformant (on parle ici d'inductance de ligne). L'inductance, y compris l'augmentation de l'impédance avec la fréquence entraîne une diminution des amplitudes des harmoniques de haut rang. En amont du convertisseur polluant, cette inductance entraîne une réduction significative des courants harmoniques produits par l'équipement sur le réseau d'alimentation électrique et, par conséquent, du taux de distorsion harmonique en tension. [12]

2.1.5) Compensation de la puissance réactive :

La puissance réactive est principalement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par les dispositifs électroniques basés sur la puissance.

Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour améliorer le facteur de puissance.

La manière la plus simple consiste à placer batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau. L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que la puissance réactive fournie par le condensateur est constante et ne s'adapte pas aux changements de demande. [10]

2.1.6) Filtres passif:

Dans un réseau électrique, le filtrage passif est une technique employée afin de réduire les harmoniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique. Les filtres passifs ont pour objectif de modifier l'impédance du réseau localement, ce qui permet de dévier les courants harmoniques et de supprimer les tensions harmoniques qui en découlent. En fonction de leur position sur le réseau, de leur mode de connexion, de leur degré d'amortissement et de leur fréquence de résonance, ils sont divisés en filtres séries et filtres parallèles. Les harmoniques sont bloquées par les filtres passifs séries qui introduisent une impédance série élevée entre le convertisseur et le réseau, tandis que les filtres passifs parallèles dévient les harmoniques en fournissant une impédance en parallèle faible. Certains filtres passifs ont la capacité de combiner ces deux méthodes afin d'atteindre une efficacité maximale. Il est crucial d'utiliser ces filtres afin de réduire la distorsion du courant et de la tension électrique, ce qui permet d'améliorer la qualité de l'énergie électrique et de réduire les perturbations indésirables sur la ligne.

2.1.6.1) Inductance anti-harmonique :

Le concept « d'inductance anti-harmonique » fait référence à l'utilisation d'inducteurs dans un système électrique pour minimiser les effets des harmoniques.

Ces inductances sont intentionnellement installées en série avec les condensateurs pour décaler la fréquence de résonance en dessous de la fréquence du courant harmonique perturbateur.

Ce faisant, l'inductance contribue à protéger les condensateurs des courants harmoniques, les empêchant ainsi d'être surchargés.[13]

L'installation de ces inducteurs anti-harmoniques vise à réduire la distorsion harmonique, à protéger les équipements contre la surchauffe, à empêcher les fausses détections dans l'électronique de puissance et à minimiser le bruit et les interférences dans le système électrique.

L'inductance anti-harmonique joue un rôle important dans les réseaux électriques avec des charges non linéaires, tels que l'électronique de puissance, les fours à arc et les fours à induction, où la distorsion harmonique peut avoir un impact significatif sur la qualité de l'énergie électrique.

Ces inductances sont conçues pour créer une chaîne résonante avec les condensateurs, garantissant que l'impédance équivalente du réseau aux fréquences harmoniques reste faible, protégeant ainsi les condensateurs des courants harmoniques.

De plus, l'installation de ces inductances permet de maintenir une tension stable à la fréquence fondamentale, garantissant ainsi que les condensateurs sont correctement dimensionnés pour gérer le contenu harmonique.[13]

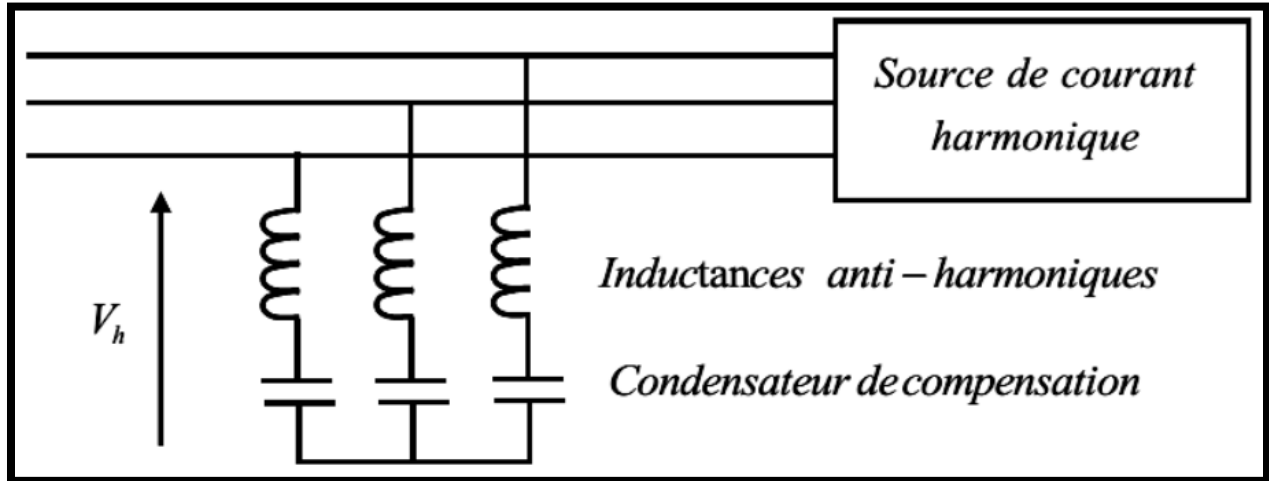


FIG 2. 4RACCORDEMENT D'UNE INDUCTANCE ANTI-HARMONIQUE.

2.1.6.2) Filtre résonant :

Un filtre résonnant est un type de filtre passif conçu pour piéger ou supprimer une fréquence spécifique dans un signal.

Il est également connu sous le nom de filtre résonant simple ou filtre résonant.

Un filtre résonnant est un type de filtre passe-bas accordé sur une fréquence spécifique et peut piéger ou éliminer une seule harmonique.

Les filtres résonants sont utilisés dans les filtres d'harmoniques pour réduire ou empêcher la propagation des harmoniques dans les réseaux électriques.

Ils sont conçus en combinant des réponses capacitatives et inductives pour former un ou plusieurs pièges harmoniques dont on souhaite éviter la propagation.[13]

Les paramètres clés pour la conception d'un filtre résonnant incluent la résistance (R), la capacité (C) et l'inductance (L), qui déterminent la fréquence de coupure et la réponse en fréquence du filtre.

Le calcul du filtre suit les mêmes étapes que le filtre résonnant, mais avec une résistance différente, cette fois dérivée de R = certaines composantes du signal.

Ils sont essentiels pour nettoyer les enregistrements comportant des fréquences indésirables, notamment pour filtrer les basses fréquences et éviter un mixage audio peu clair.

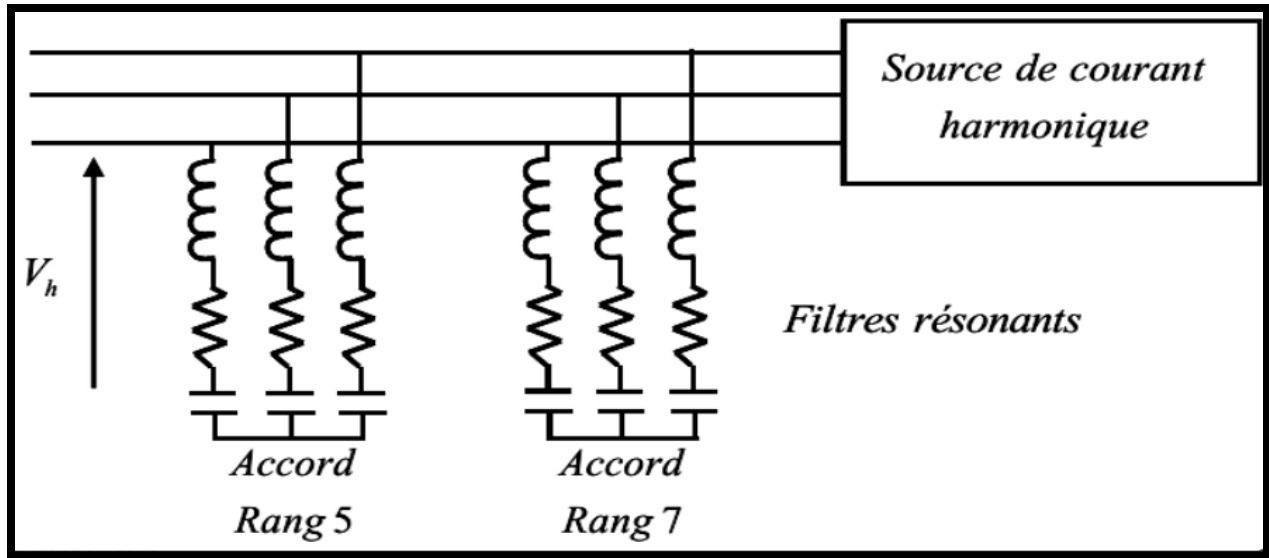


FIG 2. 5 INSTALLATION D'UN FILTRE RESONANT.

2.1.6.3) Filtre amorti :

Un filtre d'amortissement est un type de filtre passif conçu pour éliminer ou réduire les harmoniques d'un signal électrique.

Il est également connu sous le nom de filtre résonant car il utilise des réponses capacitives et inductives pour créer une résonance à une fréquence spécifique.

Les filtres d'amortissement sont utilisés pour éliminer les harmoniques des signaux, en particulier dans les filtres d'harmoniques pour les réseaux électriques.[7]

Il existe trois types de filtres d'amortissement :

- **Filtre d'amortissement de premier ordre :** Il nécessite une grande capacité et une perte de puissance excessive à la fréquence fondamentale.
- **Filtre d'amortissement du second ordre:** Il se compose d'un condensateur en série avec un ensemble composé d'une inductance parallèle et d'une résistance appelée résistance d'amortissement. Il est utilisé lorsque les performances requises ne sont pas élevées pour filtrer simultanément les hautes fréquences du spectre .
- **Filtre d'amortissement de troisième ordre:** Il est moins courant que les filtres de premier et de deuxième ordre et est utilisé pour des applications spécifiques.

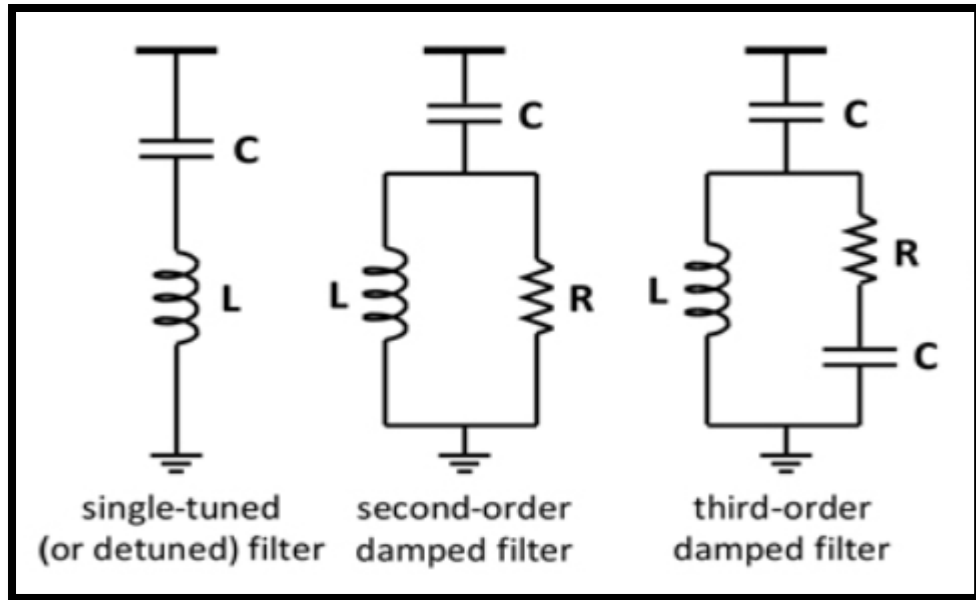


FIG 2. 6 FILTRES AMORTIS PASSE HAUT.

Les filtres d'amortissement sont souvent utilisés en combinaison avec d'autres types de filtres pour obtenir la réponse en fréquence souhaitée.

Par exemple, un filtre passe-haut peut être utilisé conjointement avec un filtre d'amortissement pour limiter l'impédance harmonique sur le reste du spectre .

2.1.6.4) Avantages et inconvénients des filtres passifs :

Le filtrage passif présente de nombreux bénéfices dans le domaine industriel en raison de sa facilité de conception et de mise en œuvre, de son coût abordable et de son efficacité.

mais il présente certain inconvénients comme :

- La performance du filtrage est grandement influencée par l'impédance du réseau.
- La capacité du filtre passif à surveiller les fluctuations de charge et les dérives des composants passifs (comme l'échauffement et le vieillissement) est limitée.
- La résonance entre les éléments du filtre passif et le réseau peut entraîner une augmentation de la fréquence du courant harmonique du côté du réseau.
- On considère que le prix du filtre passif est excessif lorsque l'on demande une valeur réduite de THD.
- Lorsque deux filtres passifs sont placés sur un rang théoriquement égal, mais en pratique légèrement différent, cela entraîne la circulation de courants harmoniques très importants

entre eux, ce qui entraîne rapidement leur destruction. Ce cas est souvent observé car la fréquence d'accord évolue lentement avec le vieillissement des éléments du filtre. Il est impératif d'éviter toute connexion entre des filtres harmoniques de même rang sur un même réseau.[14]

- Il est nécessaire de mettre autant de filtres accordés sur les rangs harmoniques correspondants lorsqu'il y a plusieurs rangs harmoniques à filtrer .
- La mise en place de filtres passifs dans un réseau nécessite une analyse approfondie et minutieuse.

Cependant, il est difficile de connaître tous les paramètres du réseau, indispensables à l'étude, lorsqu'il est de grande taille .

- Les équipements de grande taille .

La solution du filtrage passif peut être intéressante en raison de sa simplicité d'utilisation et de son prix abordable. Cependant, les filtres passifs présentent de nombreux désavantages. Tout d'abord, les résultats de filtrage de ces filtres passifs sont en relation avec les paramètres du réseau électrique. Les filtres passifs sont plus efficaces lorsque l'impédance du réseau augmente. C'est pourquoi la probabilité d'un court-circuit est élevée .[14]

Les chercheurs sont poussés par les problèmes liés aux harmoniques à concevoir une solution dynamique et flexible afin d'améliorer la qualité de l'énergie. Grâce à l'évolution de la technologie des semi-conducteurs, la solution contemporaine basée sur le filtrage actif de puissance est désormais considérée comme une solution valable pour résoudre le problème des harmoniques chez les consommateurs et le réseau.

2.2 Méthodes modernes contre les harmoniques

Les solutions de dépollution traditionnelle ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger, on opte alors à des solutions plus efficaces qui sont les filtres actifs

2.2.1) filtre actif :

Un compensateur actif, ou filtre actif, est un appareil électronique destiné à améliorer la qualité de l'énergie électrique dans un réseau. Sa fonction consiste à introduire un courant ou une tension précise dans le réseau, pour compenser les perturbations engendrées par les charges non linéaires.[15]

2.2.1.1) Principe de fonctionnement du filtre actif :

Les filtres actifs sont constitués d'onduleurs qui fonctionnent comme des convertisseurs de puissance statiques.

L'onduleur, équipé d'une source de courant ou de tension continue, peut fournir un courant ou une tension dont le contenu harmonique est dépendant exclusivement de la loi de commutation des interrupteurs.

Ainsi, les filtres actifs fonctionnent comme des sources de tension ou de courant harmoniques en alternance avec ceux du réseau pour rétablir un courant de source presque sinusoïdal. Il est possible de connecter le filtre actif au réseau de manière série ou parallèle, en fonction de sa conception visant à compenser les tensions ou les courant harmoniques.[15]

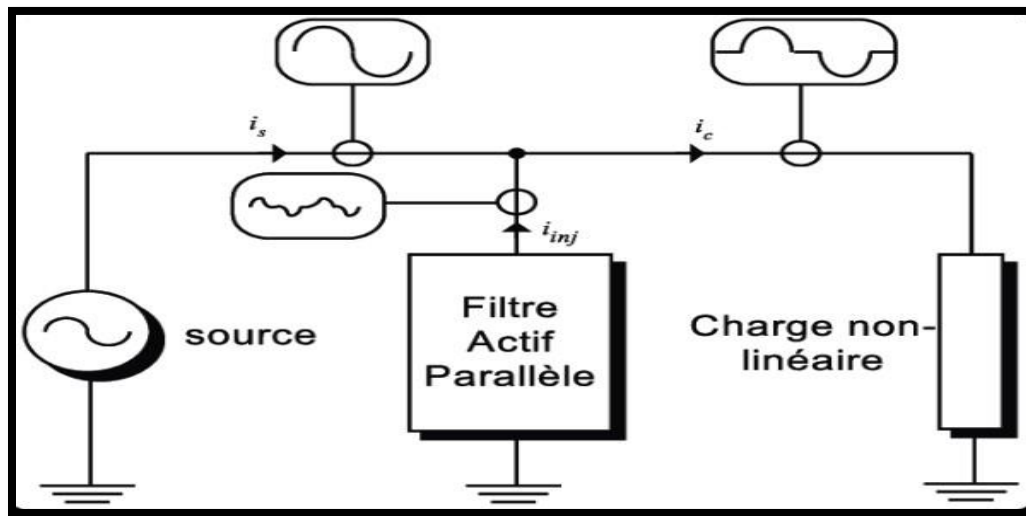


FIG 2. 7 FILTER ACTIF DANS LE RESEAUX ELECTRIQUE

2.2.1.2) Types de filtres actifs :

Les types de filtres actifs utilisés dans les réseaux électriques sont les suivants :

➤ Filtre Actif parallèle (FAP):

On le désigne également sous le nom de compensateur shunt, il est relié en parallèle au réseau de distribution. On le commande généralement comme un générateur de courant. Il fonctionne en injectant dans le réseau électrique des courants harmoniques i_{inj} similaires à ceux absorbés par la charge non linéaire, mais en opposition de phase, de manière à ce que le courant fourni par le réseau i_s soit sinusoïdal et en phase avec la tension simple correspondante. De cette manière, il bloque les courants harmoniques, réactifs et déséquilibrés des circuits grâce à l'impédance du réseau. Ainsi, il diminue la distorsion du courant et de la tension.[16]

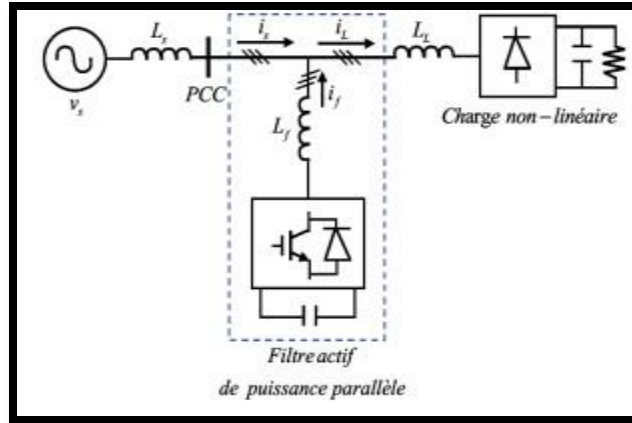


FIG 2. 8 FILTRE ACTIF DE PUISSANCE PARALLELE.

➤ **Filtre Actif Série (FAS):**

Le filtre actif en série est relié de manière série au réseau. Son rôle est de générer des tensions harmoniques, dont la somme avec la tension réseau forme une onde sinusoïdale.

Son objectif est de préserver les installations. Les tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibres) sont sensibles à la source, ainsi qu'à celles causées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Le principe de cette structure est similaire à celui des conditionneurs de réseau. Cependant, il y a quelques obstacles et désavantages à mettre en place cette topologie : elle ne permet pas, par exemple, de compenser les courants harmoniques consommés par la charge. [16]

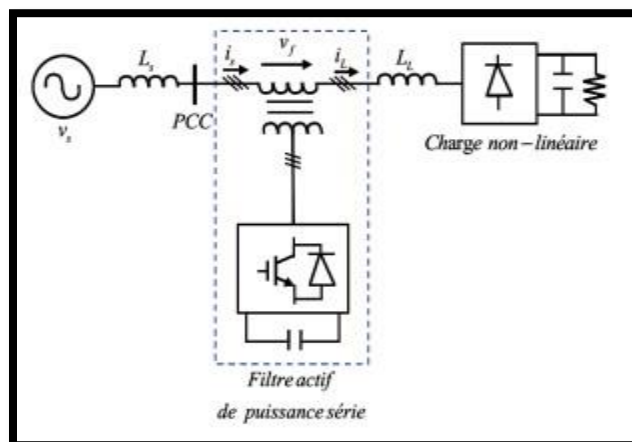


FIG 2. 9 FILTRE ACTIF DE PUISSANCE SERIE.

2.2.1.3) La combinaison parallèle-série actifs :

Il s'agit d'une solution de compensation universelle qui utilise les filtres actifs parallèle et série en même temps . La nouvelle configuration est désignée sous le nom de combinaison parallèle-série actifs ou Unified Power Quality Conditioner (UPQC).

Les avantages combinés des filtres actifs parallèle et série sont présents dans l'UPQC.[16]

Lorsqu'il est positionné en amont du filtre actif parallèle, le filtre actif série permet de purifier la source des tensions perturbatrices. Il permet d'isoler la charge de la source perturbée lorsqu'il est positionné en aval.

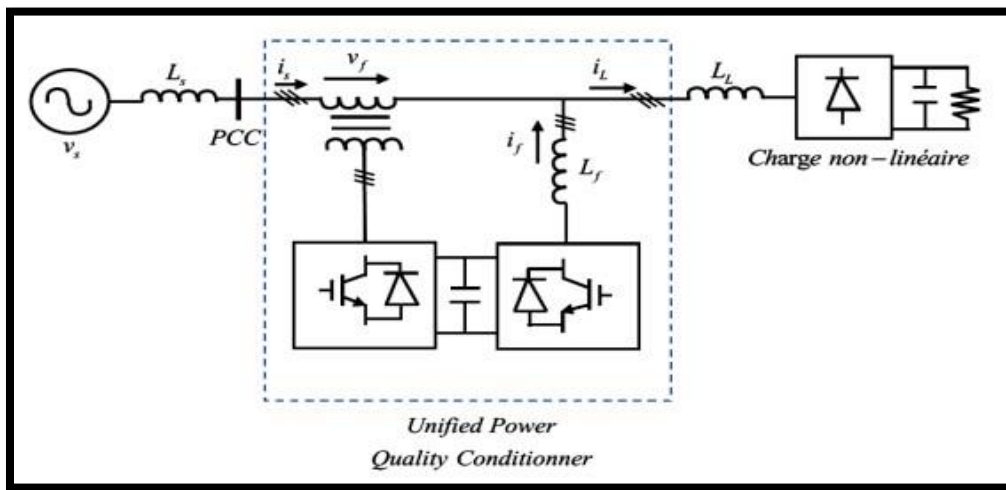


FIG 2. 10 COMBINAISON PARALLELE-SERIE ACTIFS (UPQC).

2.2.1.4) Avantages et les inconvénients des filtres actifs :

Les avantages des filtres actifs de puissance sont :

- La mesure et l'ajustement constants des fluctuations de courant ou de tension.
- Les semiconducteurs et les bobines ne consomment pas de puissance active, à l'exception des pertes internes.
- Ils ont la capacité de s'ajuster aux changements de la charge non linéaire.
- Leur réponse rapide et leur bande suffisante permettent de compenser les harmoniques dans le système global.
- La capacité physique du filtre est diminuée.

les filtres actifs ont les inconvénients suivants :

- Il est difficile de construire un FAP avec une grande gamme de puissance et une réponse fréquentielle très élevée avec des petites pertes.

- Le coût global est élevé pour les petites gammes de puissance lorsqu'on compare les FAPs avec les filtres passifs (ce qui a limité leur implantation).

Le coût par rapport à leur capacité à éliminer les différentes distorsions est l'un des éléments les plus cruciaux à prendre en compte lors de l'évaluation des filtres actifs et passifs. Il semble que l'utilisation conjointe des FAPs et des filtres passifs améliore les performances et élargit l'utilisation des filtres actifs .[17]

2.2.2) Combinaison hybride active et passive :

Pour diminuer la taille et donc le coût des filtres actifs, il est possible d'associer des filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs. Dans cette situation, les filtres passifs ont pour fonction de supprimer les harmoniques prépondérants afin de diminuer le spectre.[16] Les filtres actifs sont dimensionnés de manière à compenser uniquement le reste des perturbations. Différentes configurations ont été exposées dans les écrits, les plus étudiées étant les suivantes :

- le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.
- le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.
- le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

2.2.2.1) Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles :

Cette configuration consiste à connecter un filtre actif série en série avec le réseau électrique, et des filtres passifs parallèles en parallèle avec le réseau. Le filtre actif série a pour rôle de compenser les tensions harmoniques du réseau, tandis que les filtres passifs parallèles éliminent les courants harmoniques générés par les charges non linéaires. Cette combinaison permet de bénéficier des avantages des deux approches :

- Le filtre actif série corrige les distorsions de tension
- Les filtres passifs parallèles éliminent les courants harmoniques de manière économique

Ainsi, cette configuration hybride active et passive offre une solution efficace et économique pour la dépollution du réseau électrique.[16]

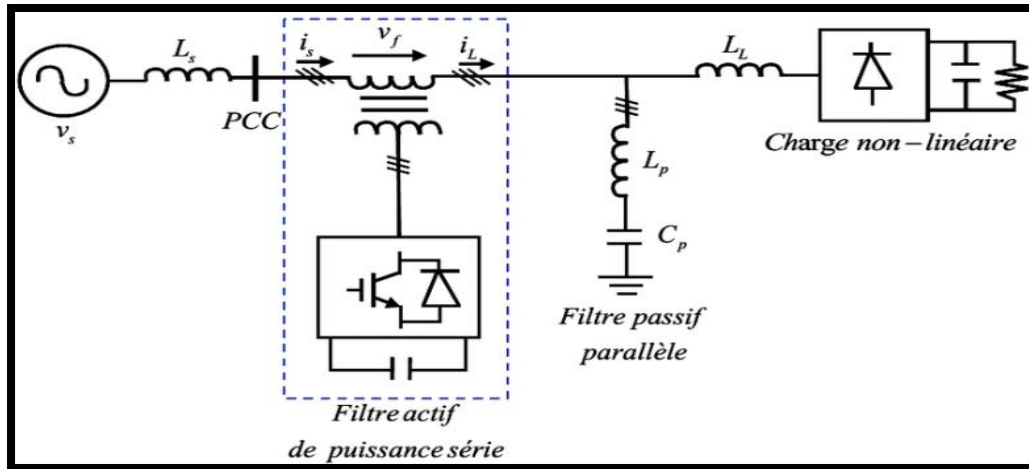


FIG 2. 11 FILTRE ACTIF SERIE ET FILTRE PASSIF PARALLELE.

2.2.2.2) le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles :

La configuration hybride du filtre actif série, qui est connecté en série avec des filtres passifs parallèles, combine les bénéfices des filtres actifs et passifs afin de diminuer les perturbations dans les réseaux électriques.[16]

Dans ce système, le filtre actif série joue le rôle d'une résistance aux courants harmoniques et les contraint à passer dans le filtre passif, tout en maintenant sa transparence à la fréquence fondamentale.

Le filtre actif série a pour fonction d'empêcher la circulation des courants harmoniques dans le réseau et de les contraindre à passer par les filtres passifs connectés à leurs fréquences. Les filtres passifs parallèles sont positionnés sur les fréquences des harmoniques dominantes et en absorbent une grande partie, ce qui diminue la puissance du filtre actif.

Grâce à cette configuration, les risques d'antirésonance entre les éléments du filtre passif et l'impédance du réseau sont réduits, ce qui améliore les performances de ces filtres. Spécialement conçue pour la dépollution des réseaux électriques, elle permet de diminuer les perturbations de courant et de tension.[17]

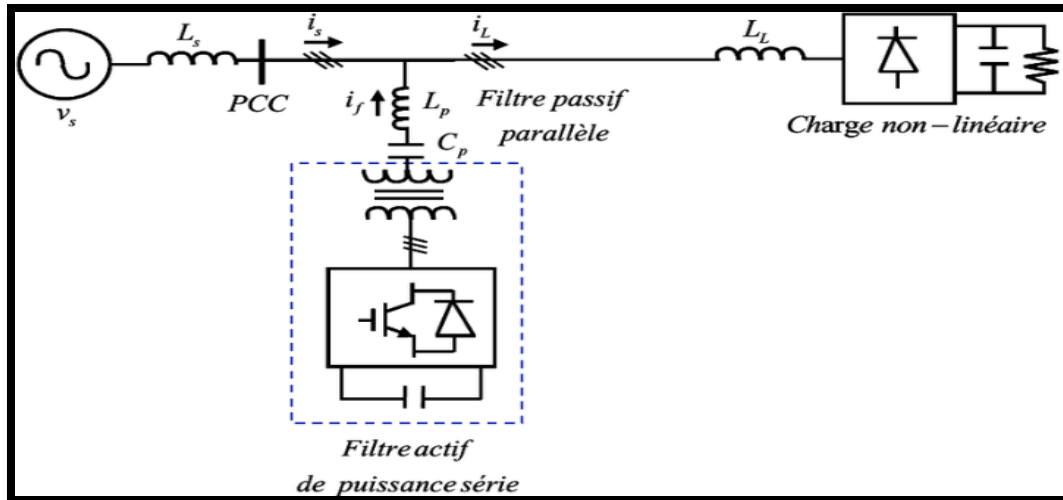


FIG 2. 12 FILTRE ACTIF SERIE EN SERIE AVEC UN FILTRE PASSIF PARALLELE

2.2.2.3) le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle :

Le système hybride de filtre actif parallèle et de filtre passif parallèle est une combinaison des avantages des filtres actifs et passifs afin de diminuer les perturbations dans les réseaux électriques. Dans cette configuration, le filtre actif parallèle est relié en parallèle au réseau et transmet en temps réel les composantes harmoniques des courants absorbés par les charges non linéaires reliées au réseau.

Le filtre actif parallèle a pour fonction de compenser les courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante, tandis que le filtre passif accordé à une fréquence élevée élimine les harmoniques hautes fréquences, y compris celles générées par le filtre actif. [17]

Ce type de filtre a déjà été appliqué à la compensation des courants harmoniques émis par un cyclo convertisseur de forte puissance.

Il présente l'avantage de réduire les perturbations dans les réseaux électriques, en éliminant les harmoniques de courant et de tension générés par les charges non linéaires

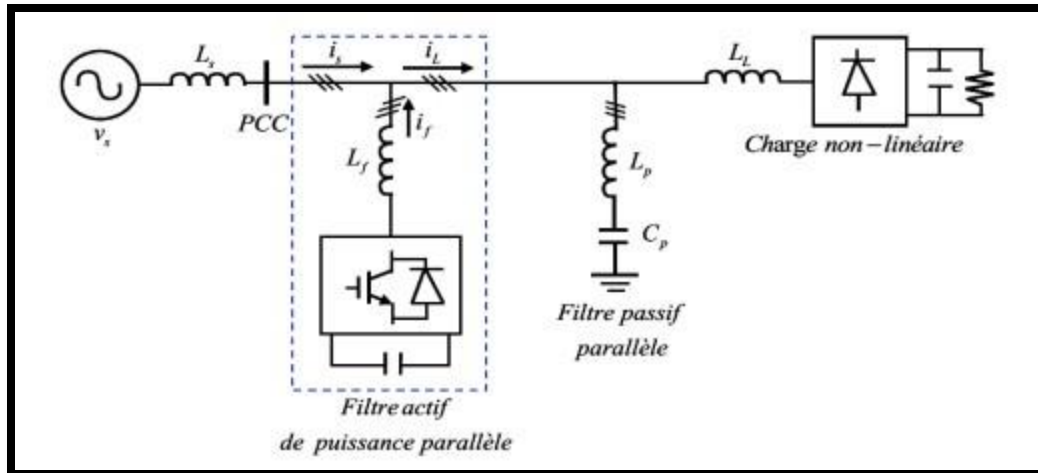


FIG 2. 13 FILTRE ACTIF PARALLELE AVEC UN FILTRE PASSIF PARALLELE.

conclusion

Jusqu'à présent, la solution la plus fréquemment utilisée est celle du filtrage passif. En réponse à cette solution lourde et non sans risques, une alternative puissante et attrayante est actuellement proposée : l'utilisation de compensateurs actifs.

Ces appareils font appel à une structure de type convertisseur de puissance statique.

Les avancées des semi-conducteurs ont donc permis aux convertisseurs, qui sont généralement des pollueurs harmoniques, de devenir des dépollueurs efficaces et auto-adaptables.

Chapitre 3 :

Conception optimale d'un filtre
passif passe-haut à l'aide de
l'algorithme de colonies de
fourmis (ACO)

Introduction

Ce chapitre sera divisé en trois parties, dans la première partie nous avons parlé de l'algorithme de colonies de fourmis et dans la deuxième partie étudierons la capacité du filtre passif à éliminer les harmoniques dans le cas normal et dans la troisième partie nous optimiserons les composants du filtre passif à l'aide de l'algorithme de colonies de fourmis (ACO) afin d'éliminer complètement les harmoniques

3.1 ALGORITHME DE COLONIES DE FOURMIS

3.1.1) Introduction

Les algorithmes de colonies de fourmis (ACO) font partie de la famille des métaheuristiques, des techniques d'optimisation inspirées du comportement des colonies de fourmis. Ces algorithmes s'inspirent de la façon dont les fourmis explorent leur environnement à la recherche de nourriture, en déposant des phéromones sur leur chemin pour marquer les pistes les plus prometteuses.[18]

3.1.2) Principe de fonctionnement

Un algorithme de colonies de fourmis simule le comportement collectif des fourmis en utilisant des agents artificiels appelés "fourmis". Chaque fourmi se déplace de manière probabiliste dans l'environnement, en tenant compte de deux facteurs principaux :

- **Piste de phéromones** : La probabilité qu'une fourmi emprunte un chemin est proportionnelle à la quantité de phéromones déposées sur ce chemin. Plus il y a de phéromones, plus le chemin est considéré comme attrayant.[18]
- **Visibilité** : Les fourmis ont également tendance à explorer de nouvelles zones, même si elles ne sont pas marquées par des phéromones. Cette exploration aléatoire permet de découvrir de nouvelles solutions potentielles.[18]

Au fil du temps, les fourmis déposent des phéromones sur les chemins qu'elles empruntent, renforçant ainsi les pistes les plus prometteuses et créant une sorte de "mémoire collective" de l'environnement. Ce processus permet à la colonie de converger progressivement vers des solutions optimales ou de bonne qualité.[19]

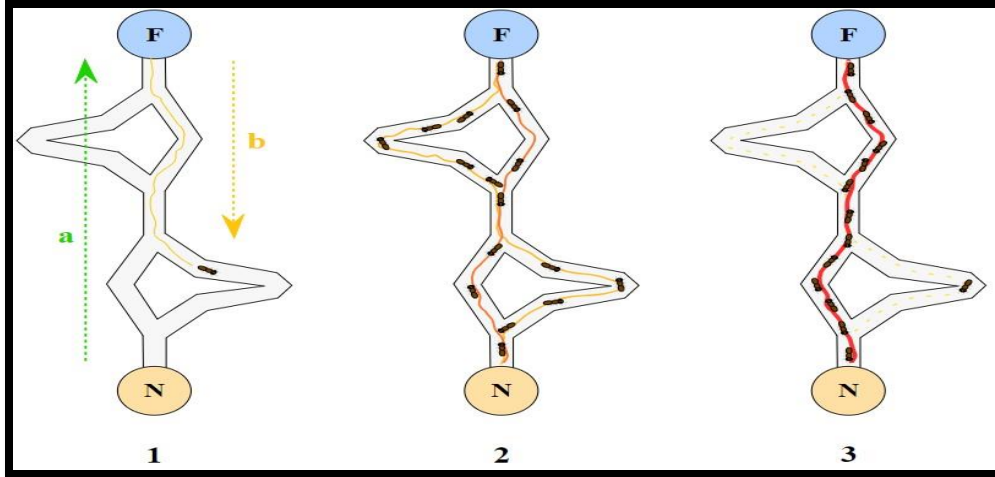


FIG 3. 1 ALGORITHME D'OPTIMISATION ANT COLONY.

3.1.3) Description formelle

L'algorithme de colonies de fourmis est défini par les équations suivantes :

1. **Règle de déplacement** : La fourmi k choisit de passer d'une ville i à une autre j en fonction de la règle aléatoire de transition proportionnelle :

$$p_{ij}^k(t) = \frac{[\phi_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{n \in N_i} [\phi_{in}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{in}]^\beta} \quad (3.1)$$

où :

- $\phi_{ij}(t)$ est l'intensité de la piste de phéromone sur l'arête entre i et j à l'itération t .
 - η_{ij} est la visibilité de l'arête entre i et j .
 - N_i est l'ensemble des villes adjacentes à i .
 - α et β sont des paramètres de réglage.
2. **Déposition de phéromones** : Une fois la tournée des villes effectuée, chaque fourmi k dépose une quantité $\Delta\tau_{ijk}$ de phéromone sur chaque arête de son parcours:

$$\Delta\tau_{ij}^k = Q / L_k \quad (3.2)$$

où :

- Q est une quantité de phéromone maximale.
 - L_k est la longueur du parcours de la fourmi k .
3. **Évaporation des phéromones** : À la fin de chaque itération de l'algorithme, les phéromones déposées aux itérations précédentes par les fourmis s'évaporent de manière exponentielle :

$$\phi_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \cdot \phi_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}^k \quad (3.3)$$

où :

- ρ est un paramètre de réglage représentant la vitesse d'évaporation des phéromones.

3.2 calcul d'un filtre passif amorti

En général, le filtre amorti de second ordre (passe-haut) est le plus couramment employé, caractérisé par une impédance faible pour une large plage de fréquences et capable d'atténuer simultanément plusieurs harmoniques. Ce filtre offre une qualité supérieure et une performance de filtrage fiable, ce qui en fait un choix plus économique et essentiel pour les situations où il est nécessaire de filtrer une grande variété d'harmoniques. La résistance du filtre entraînera une diminution de la puissance pendant le fonctionnement à la fréquence fondamentale en tant que compromis. Le filtre passe-haut de deuxième ordre a été largement utilisé pour résoudre les problèmes harmoniques d'ordre élevé en raison de sa capacité de filtrage unique. L'objectif principal de la conception d'un filtre passif est de calculer et de dimensionner les éléments RLC qui forment son impédance équivalente.[20] Les paramètres électriques clés qui influencent le dimensionnement sont les suivants :

1. La tension de fonctionnement nominale, qui représente la tension au niveau de la connexion du jeu de barres où le filtre est couplé .
2. La puissance réactive que ce filtre est appelé à compenser .
3. les rangs harmoniques auxquels ce filtre est accordé .
4. Le facteur de qualité du filtre.

Les paramètres peuvent être modifiés pour ajuster le choix calculé de ces éléments constitutifs afin d'éviter les résonances indésirables avec les éléments du réseau électrique.

La seule exigence dans ce genre de filtre est que la valeur minimale de l'impédance ne soit pas en accord avec la résonance du filtre. La réactance capacitive du filtre est déduite en fonction de la puissance réactive requise par la source harmonique, comme suit. [20]

$$X_c = \frac{U^2}{Q_c} \quad (3.4)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f_0 X_c} \quad (3.5)$$

Afin de capturer l'harmonique de rang h_n , il est nécessaire que la réactance inductive du filtre soit égale à :

$$X_L = \frac{X_c}{h_n^2} \quad (3.6)$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (3.7)$$

La réactance caractéristique de ce filtre est donnée par la formule :

$$X_n = \sqrt{X_L \times X_C} \quad (3.8)$$

La résistance du filtre est déduite du facteur de qualité Q du filtre par la relation :

$$R = X_n/Q \quad (3.9)$$

Il est crucial de souligner qu'avant de débiter la conception du filtre passif, il est nécessaire de réaliser un calcul de la demande de puissance réactive au point de connexion commun. Étant donné l'utilisation du filtre passif pour compenser la puissance réactive à et la fréquence fondamentale du réseau. L'équation suivante calcule la puissance réactive nécessaire au point de connexion commun pour passer d'un facteur de puissance à un autre facteur amélioré.[21]

$$Q_C = P(\tan(\cos^{-1} pf_1) - \tan(\cos^{-1} pf_2)) \quad (3.10)$$

$$pf = \cos\varphi \quad (3.11)$$

$$\varphi = \cos^{-1} pf \quad (3.12)$$

$$Q_C = (\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) \quad (3.13)$$

Pour étudier l'effet harmonique, il convient de prendre en compte un système électrique simplifié d'une installation industrielle où une charge non linéaire est directement reliée au point de couplage commun. Un filtre passif amorti de 2ème ordre est connecté en parallèle à la charge polluante équivalente pour résoudre le problème de propagation des courants harmoniques dans le réseau électrique.

La charge polluante fonctionne à une tension nominale de 234.45 V à une fréquence de 50 Hz; la puissance active et réactive consommée par tous les équipements qui composent la charge non linéaire est $P = 80.5 \text{ kW}$ et $Q = 29.65 \text{ KVAR}$ avec un facteur de puissance de 0,94.[22]

Le facteur de puissance est supposé passer de $pf_1 = 0,94$ à $pf_2 = 0,99$.

Le tableau 3.1 présente l'ampleur et la phase des distorsions de tension harmoniques causées par la charge polluante.

TABLEAU 3. 1 TAUX DE DISTORSIONS HARMONIQUES DU COURANT GENEREES PAR LA CHA LINEAIRE.

ordre harmonique	1	5	7	11	13	17	19	THDi%
In/I1	100	13.89	6.95	0.49	0.35	1.12	0.9	15.63

3.3RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.3.1) les composante RLC de filtre passive

Il est crucial de souligner qu'avant de débiter la conception du filtre passif, il est nécessaire de réaliser un calcul de la demande de puissance réactive au point de connexion commun. Étant donné

l'utilisation du filtre passif pour compenser la puissance réactive à et la fréquence fondamentale du réseau.

1. la puissance réactive pour la correction du facteur de puissance :

$$\varphi_1 = \cos^{-1}(0.94) = 19.95$$

$$\varphi_2 = \cos^{-1}(0.99) = 8.11$$

$$Q_c = 80.5(\tan(19.95) - \tan(8.11)) = 17.75 \text{ KVAR}$$

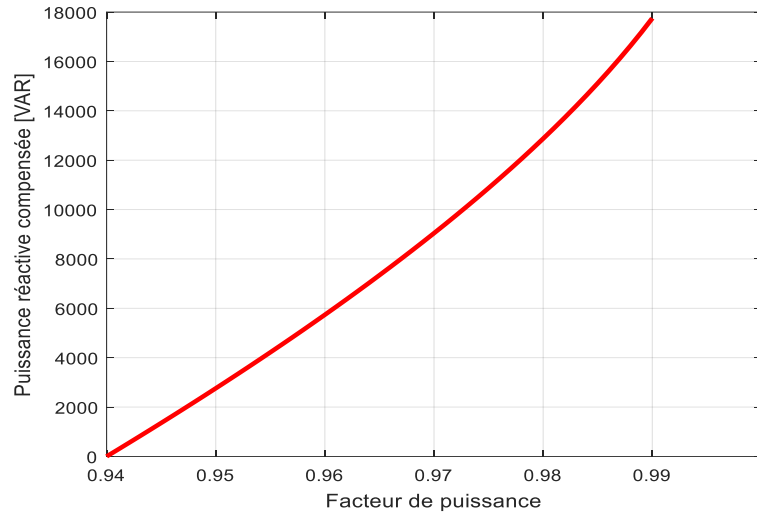


FIG 3. 2 LA PUISSANCE REACTIVE POUR LA CORRECTION DU FACTEUR DE PUISSANCE .

2. la réactance capacitive du filtre :

$$X_c = \frac{234.45^2}{17.75 \times 10^3} = 3.09 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2 \times \pi \times 50 \times 3.09} = 1028.45 \mu F$$

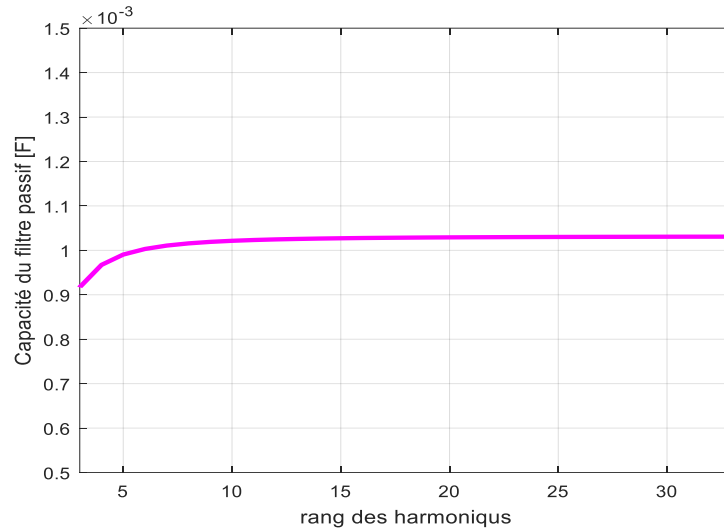


FIG 3. 3 LA REACTANCE CAPACITIVE DU FILTRE .

3. la réactance inductive du filtre :

suppose que $X_c = X_L$

$$L = \frac{3.09}{2 \times \pi \times 50} = 3.84mH$$

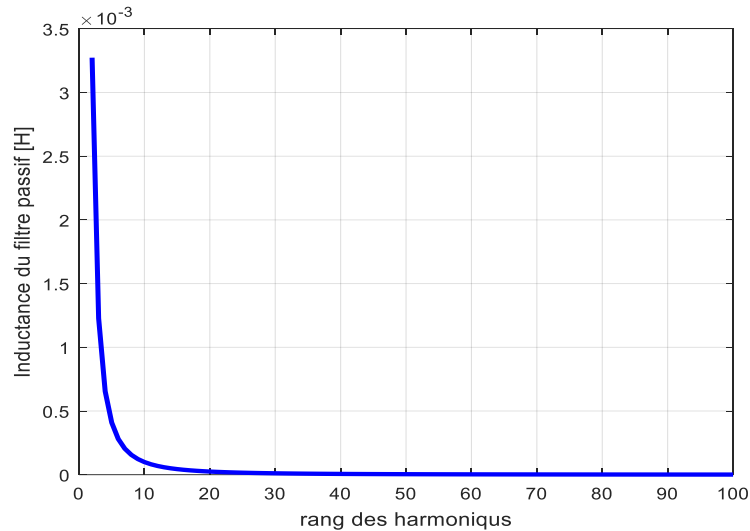


FIG 3. 4 LA REACTANCE INDUCTIVE DU FILTRE.

4. La réactance caractéristique de ce filtre :

$$X_n = \sqrt{3.09 \times 3.09} = 3.09$$

5. La résistance du filtre : En supposant le facteur de qualité du filtre passif à réglage unique
(Q) = 100

$$R = \frac{3.09}{100} = 0.0309\Omega$$

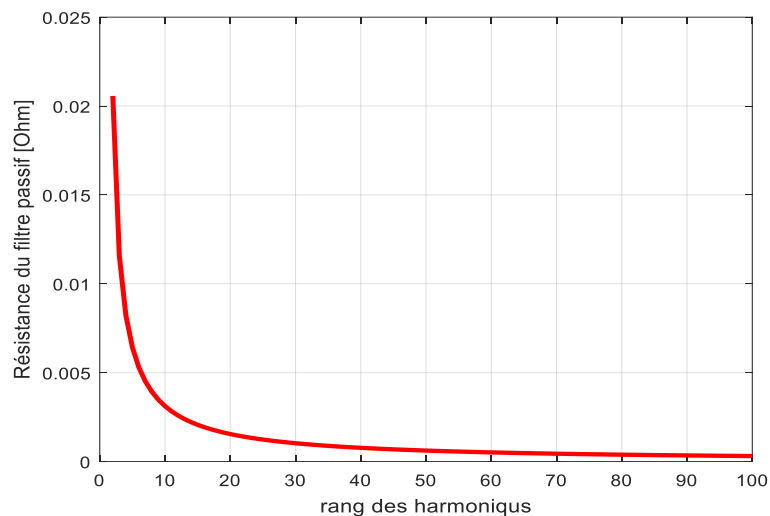


FIG 3. 5 LA RESISTANCE DU FILTRE

3.3.2) Filtrage des harmonique

La forme de l'onde de courant du réseau est illustrée dans les figures 3.6 et 3.7 avec sa distorsion harmonique totale avant l'installation du filtre passif. Selon ces résultats, on constate une forte pollution du courant absorbé par la charge, avec un THDi de 13.89%. Effectivement, il est possible de constater que le courant total perd sa forme sinusoïdale de base.

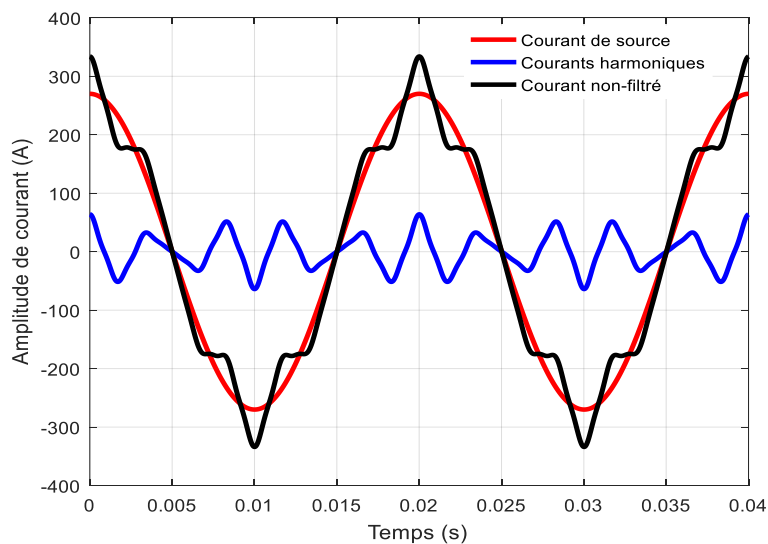


FIG 3. 6 COURBES DE COURANT FONDAMENTALES SANS ET AVEC HARMONIQUES PRESENTES

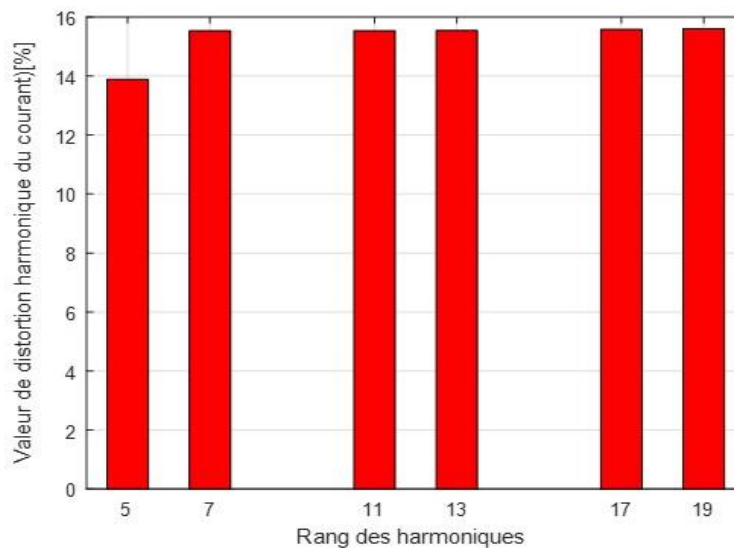


FIG 3. 7 DETERMINATION DU TAUX DE DISTORSION HARMONIQUE TOTALE DU COURANT THD.

Pour éliminer les harmoniques actuelles causées par la charge non linéaire sur le réseau, un filtre passif passe-haut de deuxième ordre a été développé et adapté à toutes les gammes harmoniques existantes.

Les figure 3.8 et figure 3.9 et figure 3.10 montre l'effet du filtre passif sur le courant du réseau, le filtre passif accordé à l'harmonique 5 réduire la valeur de THDi(5) de 13.89% à 0.5% Cela permet de réduire considérablement la distorsion harmonique du courant de charge. Cette limite est inférieure au maximum de 5 % autorisé par la norme IEEE 519.

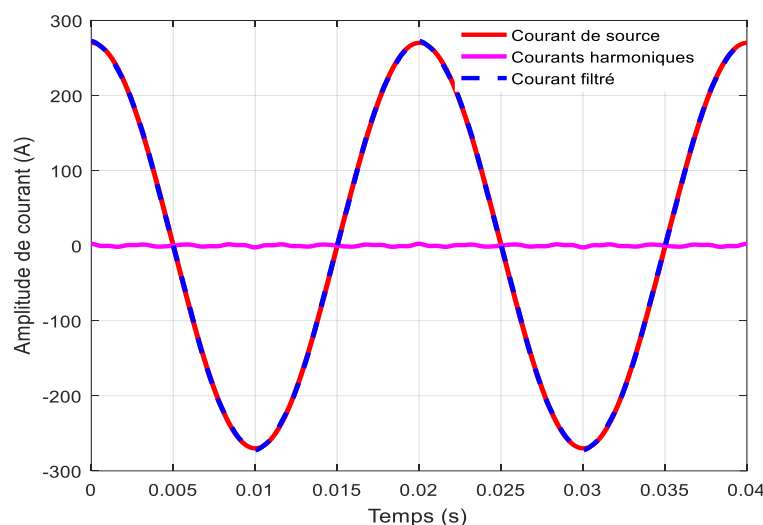


FIG 3. 8 COURBES DE COURANT FONDAMENTALES SANS ET AVEC HARMONIQUES DE FILTRE ACCORDEES A L'HARMONIQUE

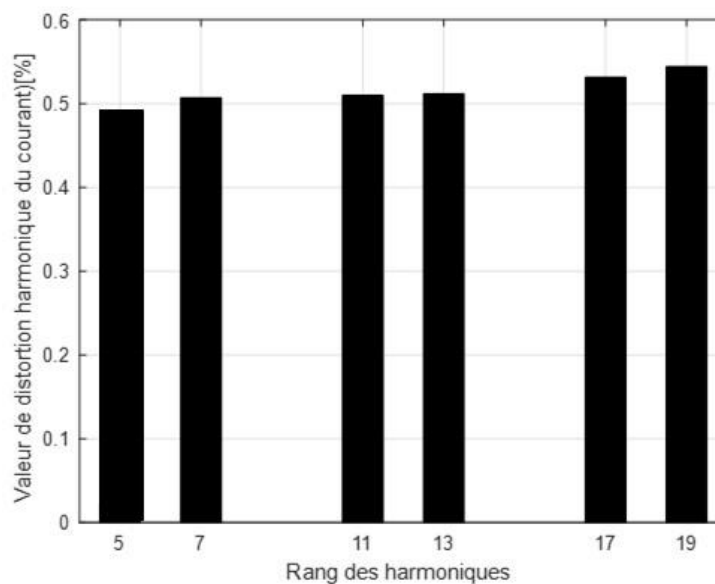


FIG 3. 9 DETERMINATION DU THDi AVEC FILTRE ACCORDEES A L'HARMONIQUE 5.

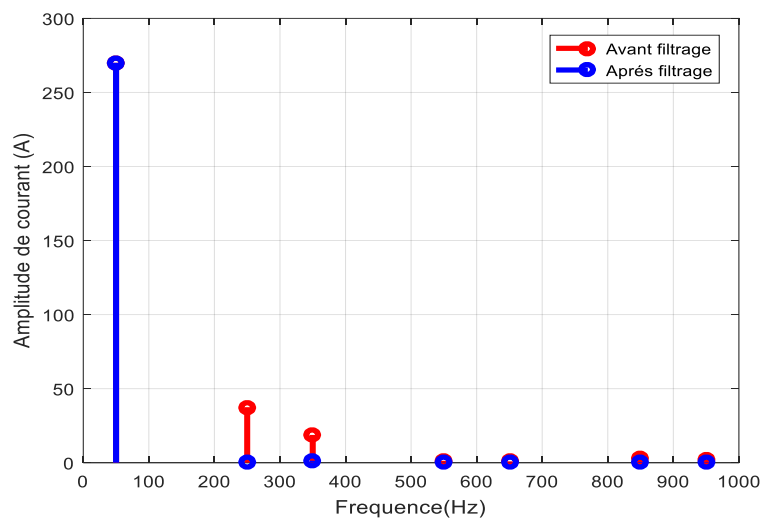


FIG 3. 10 SPECTRE HARMONIQUE DU COURANT RESULTANT DU RESEAU.

3.3.3) Optimisation de filtre passive

L'échelle des éléments de circuit du filtre passif (RLC) sera optimisée en utilisant l'algorithme ACO (Optimisation de l'Ant Colony). L'optimisation vise à supprimer entièrement les courants harmoniques.

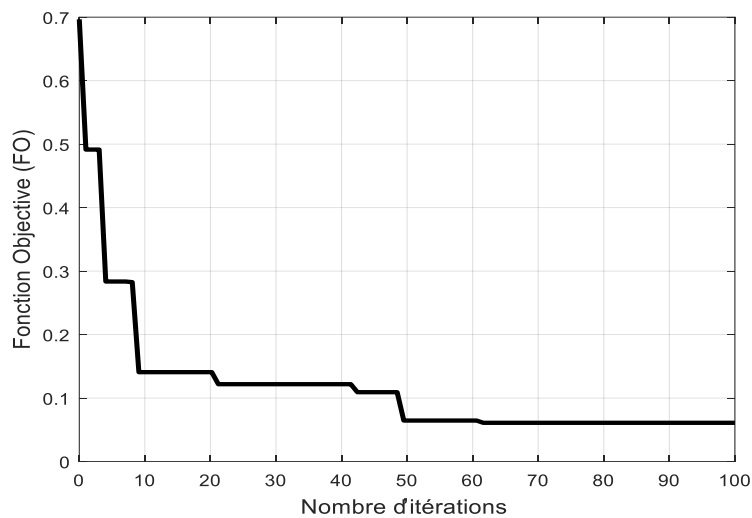


FIG 3. 11 VARIATION DE LA FONCTION OBJECTIVE AVEC LE NOMBRE D'ITERATIONS.

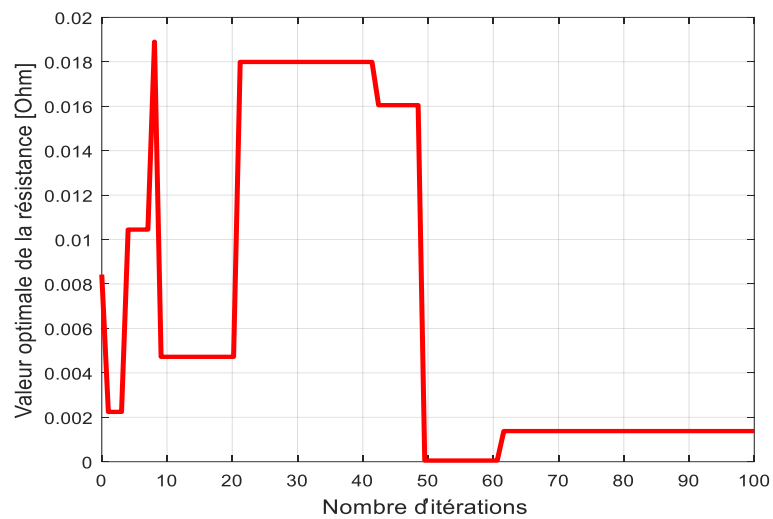


FIG 3. 12 VALEUR OPTIMALES DU RESISTANCE DE FILTRE PASSIF AVEC LE NOMBRE D'ITERATIONS.

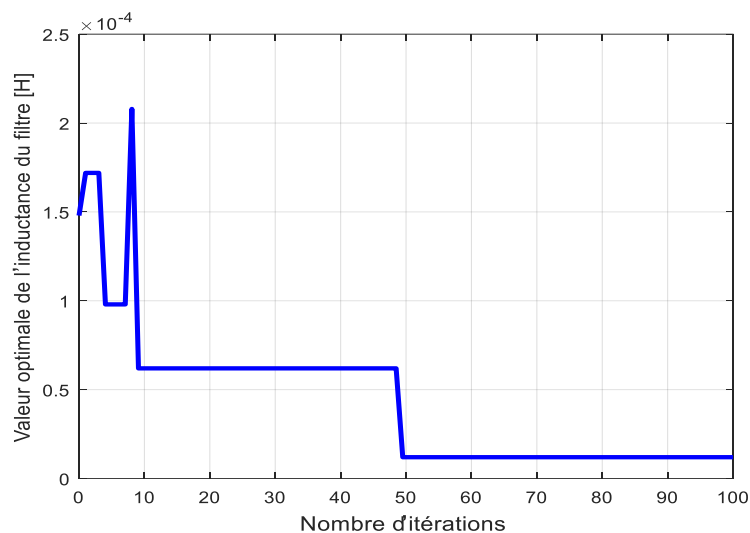


FIG 3. 13 VALEUR OPTIMALE DE L'INDUCTANCE DE FILTRE PASSIF AVEC LE NOMBRE D'ITERATIONS.

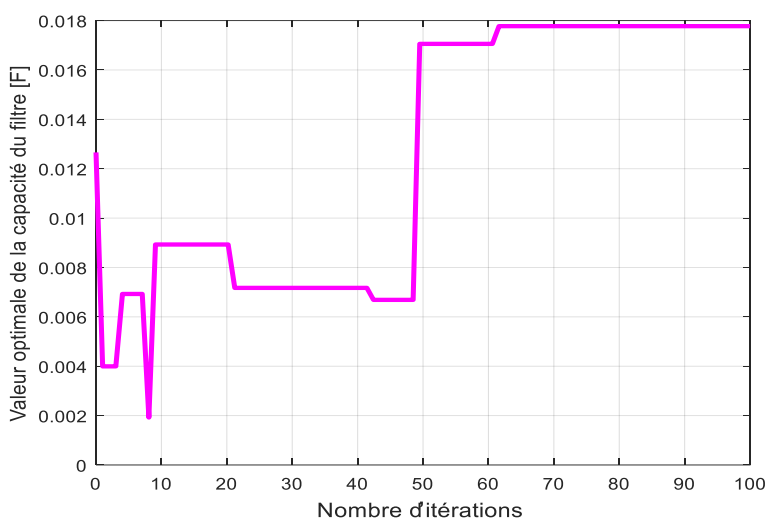


FIG 3. 14 VALEUR OPTIMALE DE CAPPACITE DE FILTRE PASSIF AVEC LE NOMBRE D'ITERATIONS.

La figure 3.10 illustre la fluctuation de la fonction objective (OF) en fonction du nombre d'itérations, ce qui témoigne de la recherche de solutions et du processus d'optimisation de l'algorithme d'optimisation des colonies de fourmis (ACO). Les figures 3.11 et 3.12 et 3.13 présente les résultats de l'optimisation des éléments (RLC) du filtre passif, où il est évident que cet algorithme converge rapidement vers ces valeurs optimales après plusieurs itérations.

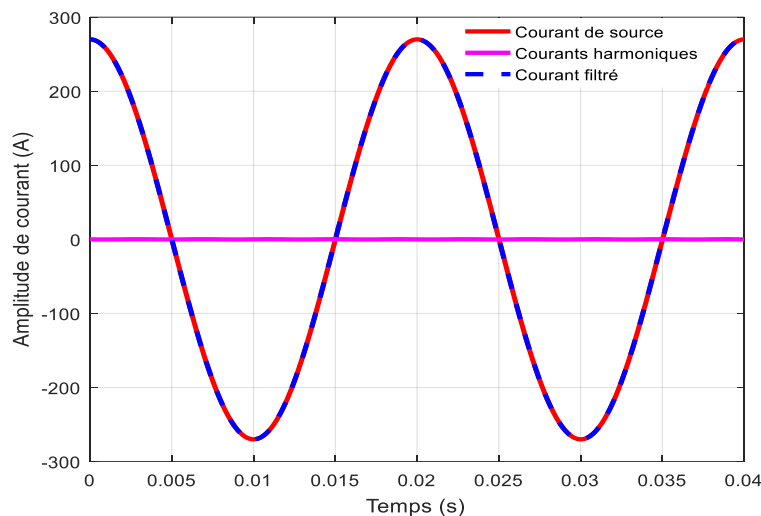


FIG 3. 15 COURBES DE COURANT FONDAMENTALES SANS ET AVEC HARMONIQUES DE FILTRE PASSIF OPTIMIS

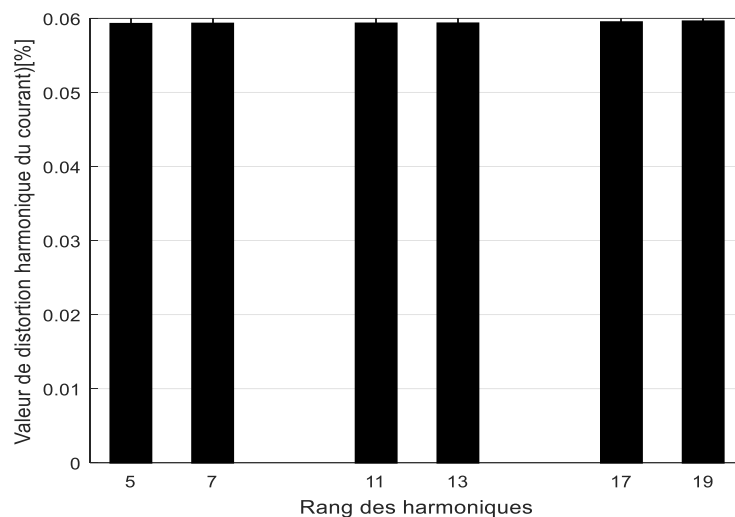


FIG 3. 16 DETERMINATION DU THDI AVEC L'OPTIMISATION.

L'effet du filtre passif optimisé sur la forme sinusoïdale du courant de réseau et le taux de distorsion harmonique totale du courant THD est illustré dans la figure 3.14 et figure 3.15. Elle met en évidence une superposition parfaite entre les deux courants, ce qui permet de démontrer que la forme de l'onde de courant est purement sinusoïdale, ce qui justifie l'absorption de toutes les différences harmoniques.

Conclusion

L'utilisation de l'algorithme de colonies de fourmis (ACO) pour concevoir un filtre passif passe-haut offre une solution prometteuse pour réduire les harmoniques dans les réseaux électriques. Les capacités d'optimisation de l'ACO sont utilisées dans cette approche afin d'ajuster les paramètres du filtre de manière à réduire les courants harmoniques et à améliorer la qualité de la tension procurée. Les simulations révèlent une grande efficacité du filtre optimisé, qui peut réduire considérablement la distorsion harmonique et maintenir le courant électrique en stabilité. Cette approche marque un pas majeur dans la résolution des problèmes de qualité de l'énergie électrique, mettant en évidence l'utilisation réussie de techniques d'optimisation inspirées de la nature pour résoudre des défis technologiques complexes.

Conclusion

générale

Les charges non linéaires créent des harmoniques qui se propagent dans les réseaux électriques et perturbent gravement le bon fonctionnement de certains équipements électriques, pouvant même les détruire. Ces conséquences néfastes peuvent survenir immédiatement, mais peuvent aussi se manifester à long terme pour le distributeur et les exploitants.

Les perturbations dans les réseaux et leurs conséquences sur les appareils électriques ont été présentées dans le premier chapitre, que ce soit à court ou à long terme. De plus, les standards internationaux établissent les limites acceptables pour ces perturbations.

Dans le deuxième chapitre on a présenté les solutions traditionnelles comme les filtre passif...etc , et les solutions nouvelle comme les filtre active et hybride pour pour la dépollution harmonique. Dans le troisième chapitre, nous avons fourni un moyen de soulager l'harmonie au moyen d'un filtre passif à passage élevé, qui consiste en un endroit parallèle à un obstacle très bas fixé à la fréquence de rangée harmonieuse qui doit être enlevée. Nous avons utilisé des algorithmes de colonie de fourmis (ACO) pour améliorer les éléments de filtre négatifs (RLC) afin d'éliminer toutes les harmonies.

Références Bibliographiques

- [1] Mohamed Zellagui « Qualité d'Énergie Électrique (QEE) » Université Batna 2. 16/11/2016
- [2] Nicolas Jurdit « 5 façons d'améliorer la disponibilité et la fiabilité de l'alimentation électrique dans votre installation » 13/04/2022
- [3] Qualité de l'électricité « Réseaux publics d'électricité - Réseaux - CRE » 22/05/2015
- [4] T.Gauroud
« Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des reseaux de distribution d'énergie électrique ». Thèse de doctorat de l'université de Nantes, janvier 1997.
- [5] R.KifoucheRezki
« Identification des harmoniques et génération du courant de référence "application au convertisseur statique » .2005.
- [6] E.Felice
« Perturbations harmoniques, effets, origines, mesures, diagnostic, remèdes » DUNOD, Paris, 2000.
- [7] T.Deflandre, P.Mauras
« Les harmoniques sur les réseaux électriques » Direction des études et recherches de EDF.EYROLLES, Paris, 1998
- [8] S.CHALLAH, N.YASSA.
« Analyse de la propagation harmonique dans un réseau électrique ». Mémoire d'ingénieur, U.M.M.T.O, 2005.
- [9] N.HANED, M.HADJI.
« Evaluation des pertes de puissances dues aux harmoniques dans un réseau électrique » Mémoire d'ingénieur, U.M.M.T.O, 2006
- [10] Mr :DJEBLI Brahi, Mr : BELLAHOUES Rabah: « Identification et filtrage des courants harmoniques générés par une A.S.I »
- [11] Schneider Electric cahiers techniques N° 141 : « Les perturbations électriques en basse tension » N° 183 : « Harmoniques: convertisseur propre et compensateur actif » N° 152 : « Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement » N° 199 : « La qualité de l'énergie électrique ». N° 199 : « L'alimentation des circuits d'éclairage »

- [12] M. Aoues « Filtrage actif des harmoniques générés par un redresseur triphasé » Mémoire de magistère, U.M.M.T.O, 2000.
- [13] H.Kouara « Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension» Mémoire de magistère, Université de Batna, Février 2006.
- [14] Rechka S., « Étude de méthodes de filtrage des harmoniques dans les réseaux électriques de distribution», thèse de doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières, Canada, Avril 2002.
- [15] T.BENSLIMANE « Commande numérique d'un filtre actif parallèle autonome »Mémoire de Magister, Université de Bechar, 2004.
- [16] Chennai S., « Etude, Modélisation & Commande des Filtres Actifs: Apport des Techniques de l'Intelligence Artificielle », thèse de doctorat en Sciences, Université de Mohamed khider Biskra, Septembre 2013.
- [17] Dastfan A., « Active power filter with minimum components », thèse de doctorat, Université de Wollongong, Australie, 1998.
- [18] COSTANZO Andrea ,LUONG Thé Van, MARILL Guillaume «Optimisation par colonies de fourmis», 19 mai 2006.
- [19] LAZGHEM Mohamed, «Algorithme Colonies de fourmis ».Dec 07, 2012.
- [20] B. Kekezoğlu, O. Arikan, C. Fadıl Kumru, « Effects of power quality terms on passive power filters, » European Journal of Engineering and Technology,vol. 4, no. 6, pp. 25-38 , 2016.
- [21] Chih-Ju Chou, Chih-Wen Liu, June-Yown Lee and Kune-Da Lee, « Planification optimale de grands filtres harmoniques passifs réglés à haute tension, » dans IEEE Transactions on Power Systems, 2000.
- [22] Salah Kamel « Single-tuned passive filter (STPF) for mitigating harmonic in a 3-phase power system» January 12th, 2023.