



WATERLEAU

protecting the 4 elements

LICENCE SCIENCES ET TECHNIQUES
Génie Electrique

RAPPORT DE FIN D'ETUDES

Intitulé :

**Maintenance : Les courants
parasites**

Réalisé Par :

- **Rachid ABBOU**

Encadré par :

Pr Najiba EL AMRANI (FST FES)

Mr Said OUAMAR (STEP)

Soutenu le 09 Juin 2016 devant le jury

Pr Najiba EL AMRANI (FST FES)

Pr Mohamed JORIO (FST FES)

Pr Najia ESBAI (FST FES)

Remerciement

Au terme de stage effectué au sein de la Station d'épuration des eaux usées de Fès je tiens à exprimer ma gratitude à Mr le directeur Zakaria ALAOUI qui a eu l'amabilité de m'accorder ce stage.

Je présente également mes chaleureux remerciements à Mr Saïd OUAMAR pour m'avoir encadré durant mon stage et pour ses explications, ses conseils et son aide.

Je tiens aussi à exprimer ma profonde reconnaissance à Mme Najiba EL AMRANI mon autre encadrante pour ce stage de fin d'études.

En somme je salue toutes les personnes qui m'ont aidées de près ou de loin ; chacune à sa manière ; pendant la période du stage.

Dédicace !

A mes parents : En témoignage de mon affection et ma reconnaissance des sacrifices consentis pour mon éducation et ma formation.

Aucune dédicace ne saurait exprimer la profondeur de mon amour et de mon attachement.

Un simple document scientifique ne saurait exprimer tout ce que j'éprouve pour vous.

Merci énormément !

A toute ma famille !

A ma chère défunte grand-mère !

A tous mes amis !

A tous ceux qui me sont chers !

Sommaire :

CHAPITRE I : PRESENTATION DE STEP

1. Station d'épuration des eaux usées de Fès	6
2. Les eaux usées	9
2.1. Types des eaux usées	9
2.2. Impact des eaux usées sur la santé et l'environnement	9
3. Le traitement des eaux usées	8
3.1. Filière EAU	10
3.1.1. Prétraitement	10
3.1.2. Dégrillage	10
3.1.3. Dessablage	11
3.1.4. Déshuilage / Dégraissage.	12
3.1.5. Décantation primaire	12
3.1.6. Traitement biologique avec aération de surface.....	13
3.1.7. Dégazage	14
3.1.8. Décantation secondaire	14
3.2. Filière boue	15
3.2.1. Epaisseurs des boues primaires.	15
3.2.2. Flottateurs des boues secondaires.....	16
3.2. 3. Digestion des boues mixtes.....	16
3.2.4. Déshydratation	17
3.2.5. Stockage des boues déshydratées.....	17

3.3.Filière biogaz	18
3.3.1. Récupération du biogaz.....	18
3.3.2. Désulfurisation	18
3.3.3. Stockage de biogaz.	18
3.3.4. Cogénération du biogaz.....	19
3.3.5. Torchère	19
CHAPITRE II : L'ARCHITECTURE ELECTRIQUE DE STEP	20
1.La canalisation et la distribution des sous stations électrique	20
1.1. Distribution d'électricité au sein de la STEP	20
2.Le rôle de chaque sous-station	21
2.1. Sous-Station 2.....	21
2.2. Sous-Station 1.....	21
2.3. Sous-Station 3	22
3.Les liaisons entre les différentes zones de STEP	23
 Chapitre III : Les Harmoniques	
1. Introduction générale	24
2. Les Harmoniques.....	24
3. Sources d'harmoniques	25
3.1. Charge non linéaire	25
3.2. Amplification.....	26
3.3. Couplage	26
4. Caractéristique d'un signal.....	27

4.1. Rang d'un harmonique	27
4.2. Représentation spectrale	27
5. Les formes des perturbations.	28
6. Principaux effets des perturbations harmoniques	28
6.1. Les effets instantanés	28
6.1.1. Perturbation des convertisseurs statiques et des matériels électroniques	28
6.1.2. Vibrations et bruits	29
6.1.3. Dysfonctionnement des systèmes de protection et des relais	29
6.2. Les effets différés	29
6.2.1. Echauffement des condensateurs	30
6.2.2. Echauffement des câbles et des équipements	30
7. Types d'harmoniques	30
7.1. Aspects spécifiques des harmoniques à séquence zéro (H3 et multiples)	30
8. Distorsion harmonique de la tension et du courant	32
9. Élimination des harmoniques	33
9.1. Surdimensionnement des équipements	33
9.2. Solution du filtrage	34
9.2.1. Filtre passif	34
9.2.2. Filtre actif	35
10. Solution mieux adaptée	37
11. Conclusion	37
12. Bibliographie	38

Chapitre I : Présentation de la STEP

1. Station d'épuration des eaux usées de Fès .

Le Maroc a réalisé les études spécifiques à l'épuration des eaux usées de la ville de Fès. Les solutions choisies par la RADEEF tiennent compte des données de base ainsi que des objectifs de qualité à atteindre au niveau du bassin de Sebou. [2]

La RADEEF a ainsi doté la ville de Fès d'une station d'épuration des eaux usées pour réduire la pollution des eaux usées acheminés à Oued Sebou. Avec la participation d'un groupement international ; elle traite un débit d'eaux usées d'environ 130.000 m³/j avec une charge polluante de 72 tonnes/jour de DBO₅, [1][2].

La STEP est également dotée d'une unité de cogénération d'électricité à partir du biogaz récupéré des digesteurs anaérobiques. Elle génère en moyenne 50% de la consommation interne de STEP.

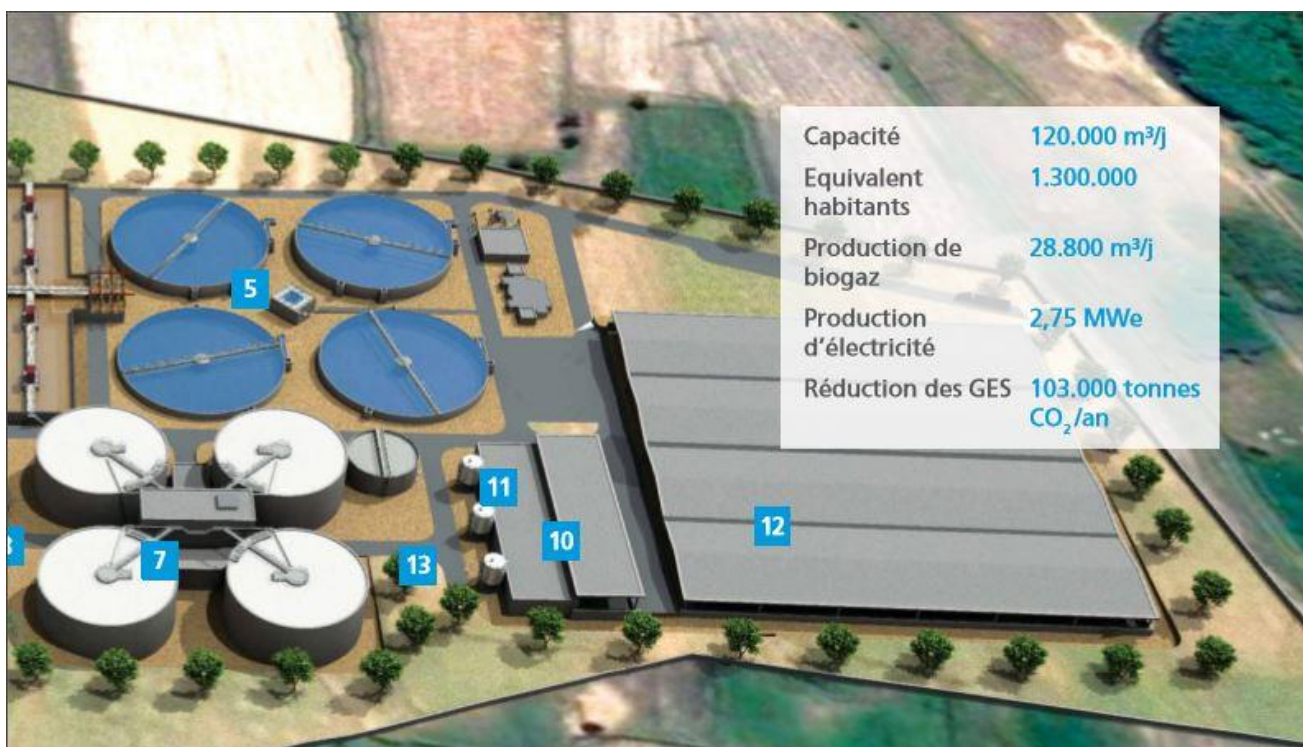


FIGURE 1 TRAITEMENT BIOLOGIQUE

- 1 Prétraitement: dégrillage, déshuilage, dessablage
- 2 Décantation lamellaire : séparation des boues et de l'eau
- 3 Epaissement des boues primaires
- 4 Traitement secondaire ou biologique : absorption de la pollution organique par micro-organismes
- 5 Décantation secondaire dans 8 clarificateurs
- 6 Aéro-flottation des boues secondaires : épaissement des boues secondaires
- 7 Digestion anaérobie des boues : les boues sont digérées et décomposées par des bactéries, produisant du méthane
- 8 Désulfurisation du biogaz
- 9 Stockage du biogaz
- 10 Déshydratation par filtres à bandes des boues digérées
- 11 Chaulage : stabilisation des boues déshydratées
- 12 Stockage des boues stabilisées
- 13 Unités de cogénération : production d'électricité et de chaleur

FIGURE 2 LE PROCESSUS DU TRAITEMENT BIBLIOGIQUE

2. Les eaux usées :

Les eaux usées sont d'origine domestique, industrielle ou agricole. La ville des Fès, à elle seule participe avec ses rejets d'eaux usées domestiques et industrielles avec un volume estimé à 38 millions m³/an. La pollution industrielle est estimée à 65 % de la pollution totale générée par la ville. Elle provient essentiellement des rejets des huileries ; des tanneries ...etc.

2.1. Types des eaux usées :

On distingue trois types des eaux usées :

- **Les eaux ménagères**
- **Les eaux résiduaires industrielles**
- **Les eaux pluviales**

2.2. Impact des eaux usées sur la santé et l'environnement

Les rejets des eaux usées dans les milieux récepteurs sans traitement au préalable engendrent des répercussions sur :

- La santé : en causant des maladies hydriques, telles que le choléra , la malaria , le typhoïde... Etc.
- La qualité d'eaux d'irrigation : hors classe ; sur plusieurs tronçons.
- La potabilisation de l'eau.
- L'abreuvement des animaux.
- Les conditions socio-économiques des habitants.
- Les pertes économiques annuelles liées à la pollution d'Oued Sebou estimés à plus d'un milliard de centimes.

La participation de la ville de Fès aux rejets d'eaux usées domestiques et industrielles est estimées à environ 38 millions m³/an.

3. Le traitement des eaux usées

Le processus d'épuration est composé de trois filières : eau ; boue et Gaz

3.1.Filière EAU :

Les eaux usées, arrivent à la station par gravitation. Elles sont pompées à partir des fosses ou postes de relevage pour passer par le dégrilleur grossier et le dégrilleur fin afin d'éliminer les gros objets et les déchets volumineux comme les papiers, les feuilles, les matières plastiques, tissus, objets ... etc. Le volume des objets éliminés est supérieur à 2 ou 3 cm³.

Après cette action les opérations conduites pour traiter l'eau sont les suivantes :

3.1.1.Prétraitement

Le prétraitement des eaux usées comprend les étapes de dégrillage grossier, le dégrillage fin, le dessablage, le déshuilage dégraissage , la décantation primaire , traitement biologique et décantation secondaire.

3.1.2.Dégrillage

Le dégrillage est la première étape de traitement. Elle consiste à éliminer les déchets solides tels que des morceaux de bois, plastics et canettes en plaçant des grilles permettant de retenir ces déchets.

Il existe deux types de dégrillage :

- **Dégrillage grossier** : il s'agit d'un prétraitement qui permet de débarrasser les eaux usées des déchets grossiers à un diamètre supérieur à 6 cm.



Figure 1.1 : Photo d'un dégrillage grossier

- **Dégrillage fin** : il permet l'élimination des déchets les plus fins ayant un diamètre supérieur à 1 cm.



Figure 1.2 : Photo d'un dégrillage fin

3.1.3.Dessablage

Il consiste à enlever les dépôts de sable ; de graviers, des matières abrasives et d'autres particules lourdes. Ils sont récupérés du fond du bassin par raclage. Ceci permet d'éviter les dépôts dans les canalisations et les installations en aval qui risquent de perturber les autres étapes de traitement.



Figure 1.3 : Photo d'un dessaleurs/déshuileur

3.1.4.Déshuilage / Dégraissage

Elle consiste à injecter de fines bulles d'air pour remonter les graisses et les huiles, emportées par les eaux usées à la surface d'aération et de sédimentation. Elles sont ensuite raclées puis refoulées vers les installations de traitement des boues pour les épaisseurs. Le dessablage et le déshuilage sont combinés et s'effectuent dans les mêmes bassins.

3.1.5.Décantation primaire

Les eaux usées prétraitées arrivent à un premier ouvrage où les particules lourdes et les matières en suspension se déposent et subissent donc une décantation primaire. Ceci se passe dans des décanteurs primaires qui éliminent 70% de matières minérales et organiques en suspension. Elles se déposent au fond du bassin où elles constituent les boues primaires. Elles sont ensuite récupérées par raclage au fond du bassin puis envoyées dans des épaisseurs qui assurent le tassement des boues pour y être traitées.



Figure 1.4 : bassin de décantation primaire (système laminaire) STEP Fès

3.1.6.Traitement biologique avec aération de surface

Dans un bassin d'aération, la matière organique est dégradée par des microorganismes qui sont des bactéries floculées dans un milieu appelé " boues activées ".

Le principe de traitement biologique consiste à réaliser par voie biologique l'élimination de la pollution dissoute contenue dans les eaux usées. Pour cela, les microorganismes sont mis en contact et de l'eau à traiter.



Figure 1.5 : Photos du bassin d'aération

Après la décantation, l'effluent est introduit dans des bassins équipés de dispositif d'aération (turbines, insufflation de l'air) ou des microorganismes naturellement présents dans l'effluent, dégradent les matières organiques dissoutes. L'air insufflé leur fournit l'oxygène nécessaire pour respirer. Les microorganismes se développent en se nourrissant de la pollution organique et se ressemblent pour faire des flocs grâce à leur propension par l'air .

3.1.7.Dégazage

Il consiste à éliminer l'excès d'oxygène présent dans l'eau avant son passage vers l'étape de clarification dans les ouvrages profonds. Le but de cette élimination est d'éviter le phénomène de corrosion.

3.1.8.Décantation secondaire

C'est la dernière étape de l'épuration de l'eau. Elle consiste à laisser reposer l'eau pendant 6 heures pour que les dernières impuretés se déposent au fond de l'eau. Il ya ainsi séparation de l'eau des boues ou des résidus secondaires issus de la dégradation des matières organiques. Cette décantation est opérée dans des bassins spéciaux appelés clarificateurs

Les boues biologiques de déposent au fond du bassin, ou elles sont raclées et évacuées.



Figure 1.6 : Photos d'un clarificateur

Les effluents clarifiés sont renvoyés vers le milieu récepteur qui est Oued Sebou tandis que les boues biologiques décantées sont recyclées vers le bassin d'aération pour renouveler la masse biologique nécessaire au fonctionnement de l'installation.

3.2.Filière boue :

Les boues sont composées d'éléments recueillis à différents stades de l'épuration d'une eau usée : matières minérales en suspension, matières organiques non biodégradables et microorganismes, ces derniers résultant de l'épuration biologique.

3.2.1.Epaississeurs des boues primaires :

L'épaississement, qui constitue la première étape du traitement de boues a pour but de réduire le volume et augmenter la concentration des boues issues des traitements primaires des effluents urbains.



FIGURE 1.7 : EPAISSISSEUR STEP FES

Le temps de séjour de la boue doit être court afin de limiter les fermentations. Il doit être compris entre 24 à 48 heures maximum.

Les boues issues des décanteurs primaires sont épaissies au niveau des épaississeurs par gravité. Sous la seule action de la force pesanteur ; ces boues se concentrent, jusqu'à des niveaux de quelques dizaines de g/L en vue d'une digestion, d'une déshydrations ultérieure ou d'un stockage à des fins d'épandage. L'épaississeur statique est un ouvrage circulaire de béton avec une pente du radier comprise entre 10 et 20 % et une hauteur cylindrique de 4 à 7 m.

3.2.2.Flottateurs des boues secondaires

Après avoir récupéré les boues secondaires décantées, une partie sera recyclée pour maintenir la concentration des boues dans le réacteur biologique proche de sa valeur nominale. L'autre partie va être dirigée vers les flottateurs ou on injecte un polymère en présence de l'eau saturée en air appelée : eau pressurisée (ou eau boueuse) afin d'agglomérer les floccs qui se collent aux bulles d'air pour faciliter leur remontée en surface.

3.3.3.Digestion des boues mixtes

Les boues ayant subi un épaississement et une flottation sont pompées vers le digesteur anaérobique. Ce dernier consiste à assurer les conditions de développement des bactéries spécifiques à la digestion, absence d'oxygène, température et temps de séjour, pour produire le biogaz. Ce biogaz sera utilisé pour le réchauffage des boues jusqu'à 37° C dans le digesteur et pour la production de l'énergie.



FIGURE 1.8 : DIGESTEUR STEP FES

3.2.4.Déshydratation

C'est la deuxième étape de traitement des eaux qui consiste à réduire le volume des boues de manière à les rendre soit pelletables, soit solides .



FIGURE 1.8 : FILTRE A BANDE STEP FES

Pour la déshydratation La STEP utilise comme technique le procédé à travers des filtres à bandes.

3.2.5.Stockage des boues déshydratées

Les boues ainsi déshydratées et parfois chaulées peuvent être stockées jusqu'à 3 mois sur une aire équipée d'un réseau de reprise de lexiviats avant leur mise en décharge contrôlée.



Figure 1.10 : Photo d'un Hall de stockage

3.3.Filière biogaz :

Le biogaz est produit pendant la digestion anaérobie par transformation des matières organiques contenues dans les boues en méthane et gaz carbonique. Sa qualité dépend d'une part, de la matière volatile sèche et des matières nutritives que les boues contiennent, et d'autre part, de la cinétique des bactéries.

3.3.1.Récupération du biogaz

Les boues ainsi digérées produisent du biogaz qui va servir à la fois au brassage des boues ; aux digesteurs au chauffage des boues et à la production de l'énergie électrique.

3.3.2.Désulfurisation

Le biogaz ainsi produit contient du soufre et de l'eau sous forme d'acide sulfhydrique H_2S en plus du méthane et du gaz carbonique. Il faut faire une désulfurisation pour éviter les corrosions dans les tuyauteries, les armatures et les moteurs des différents équipements.



Figure 1.11 : Photo d'un désulfure de biogaz

3.3.3.Stockage de biogaz

Le biogaz est stocké dans des gazomètres à membrane souple constituée par une double membrane avec une capacité de 3000 m³ sous pression contrôlée.

3.3.4.Cogénération du biogaz

La cogénération consiste en la production de chaleur et de l'électricité à partir du biogaz. Le module de cogénération est constitué d'un moteur qui entraîne un alternateur – générateur du courant électrique. Dans le cas de la station d'épuration, la cogénération génère une capacité de production de 2 MW d'énergie électrique. Elle contribue ainsi à la couverture de plus 50 % des besoins d'énergie électrique de la station et à la réduction des émissions des gaz à effet de serre de 100 000 tonnes CO₂/AN. Ceci constitue l'un des aspects distinctifs de la station d'épuration de Fès.



Figure 1.13 : Gaz stocker dans les gazomètres vers l'unité de Cogénération STEP Fès

3.3.5.Torchère

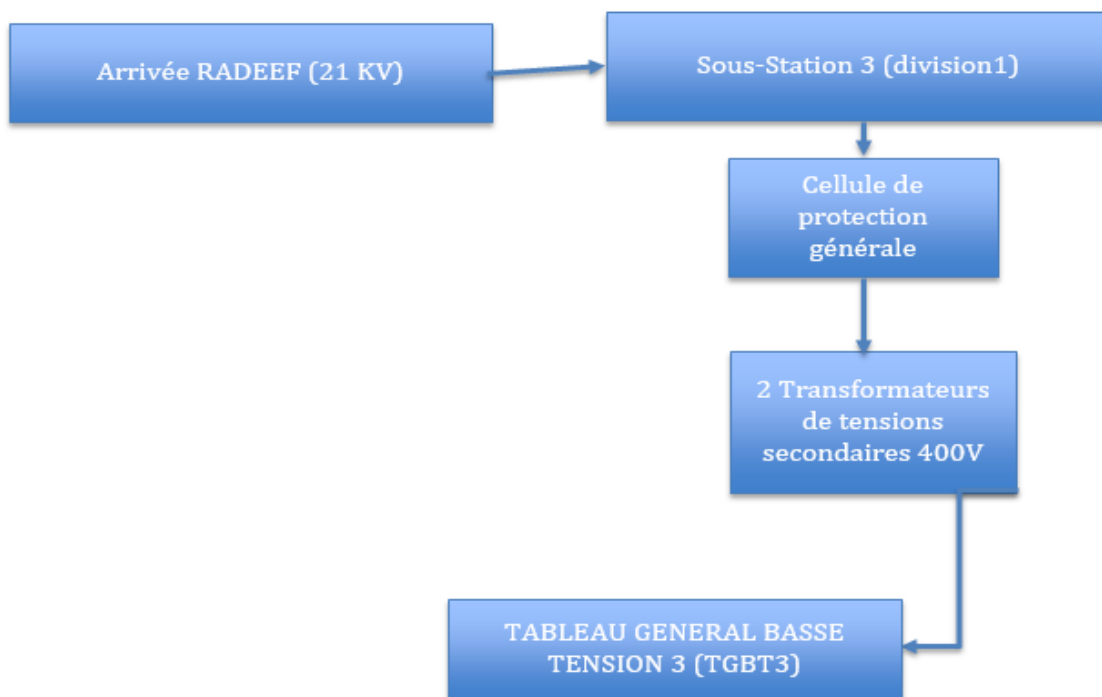
Dans le cas, où se trouve devant une production excessive du biogaz qui dépasse la capacité du générateur, on brûle l'excès dans une torchère à flamme invisible.

Chapitre 2 : L'architecture électrique de STEP

1. La canalisation et la distribution des sous stations électriques.

La station STEP est une enceinte de dernière technologie au niveau des instruments et des installations électriques. Les sous stations sont des parties du réseau électrique situé en un même milieu, comprenant principalement les extrémités des lignes de transport ou de distribution, de l'appareillage électrique, 5 bâtiments, et, des transformateurs. Chaque sous station est équipée de son propre transformateur d'une tension primaire de 21 000 V et de tension secondaire de 410 V. Chacune des sous stations comporte 2 transformateurs de même gamme. De même les SS comportent des armoires électriques capables de gérer localement et à distance tous les instruments de la station STEP.

1.1.Distribution d'électricité au sein de la STEP :



2. Le rôle de chaque sous-station :

2.1.Sous-Station 2 :

La SS2 comporte deux tableaux généraux de basses tensions, étant donné que la station (STEP) est symétrique. TGBT21 et TGBT22, permettent chacun de commander une partie de la station et comme cité auparavant la symétrie de la station permet de gérer la station d'une manière identique.

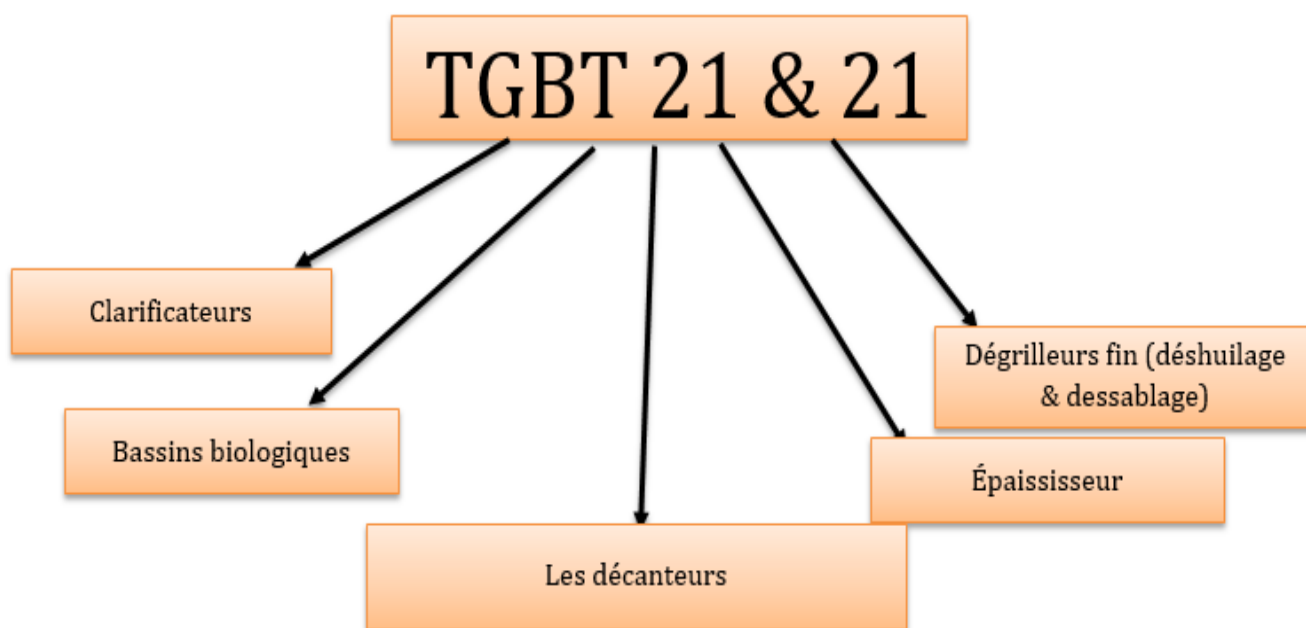


FIGURE 3 TABLEAU GENERAL DE BASSE TENSION 21&22

2.2.Sous-Station 1 :

La sous-station 1 a pour rôle de gérer la première partie du processus qui est le **relevage**.

2.3.Sous-Station 3 :

La sous-station 3 est la partie composée d'un seul tableau général de basse tension (TGBT3) qui permet de gérer une partie de la station. La figure ci-dessous représente les différentes parties qui peuvent être gérées à travers le TGBT3 :

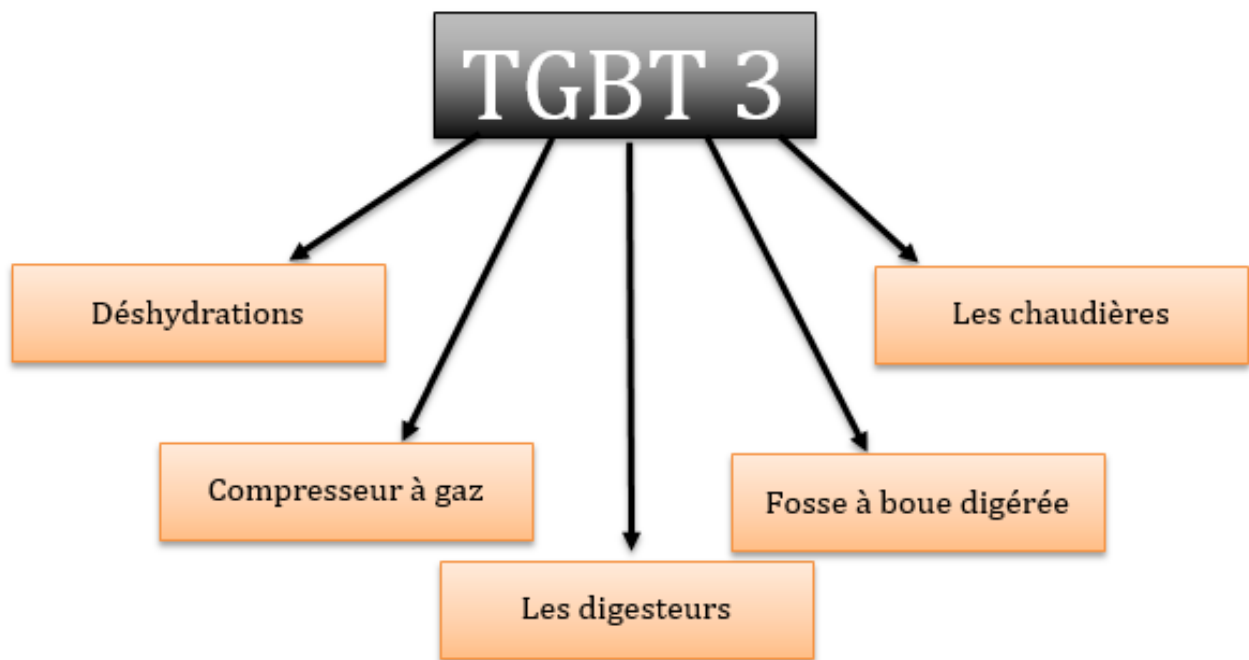


FIGURE 4 TABLEAU GENERAL DE BASSE TENSION 3

Les principaux composants des cellules présentes ci-dessus sont :

- Variateur de vitesse
- Démarreur simple
- Démarreur progressif

La sous station 3 est dotée d'une sous station filiale nommée Sous-Station32 . Celle-ci permet de gérer une partie très critique de la station qu'est la partie du Biogaz.



FIGURE 5 LES PARTIES COMMANDEES PAR LA SS32

3. Les liaisons entre les différentes zones de STEP :

Les différentes zones de la STEP sont liées entre elles par plusieurs types de liaisons parmi lesquelles on trouve :

- Profibus
- ProfiNet
- Ethernet
- Fibre Optique

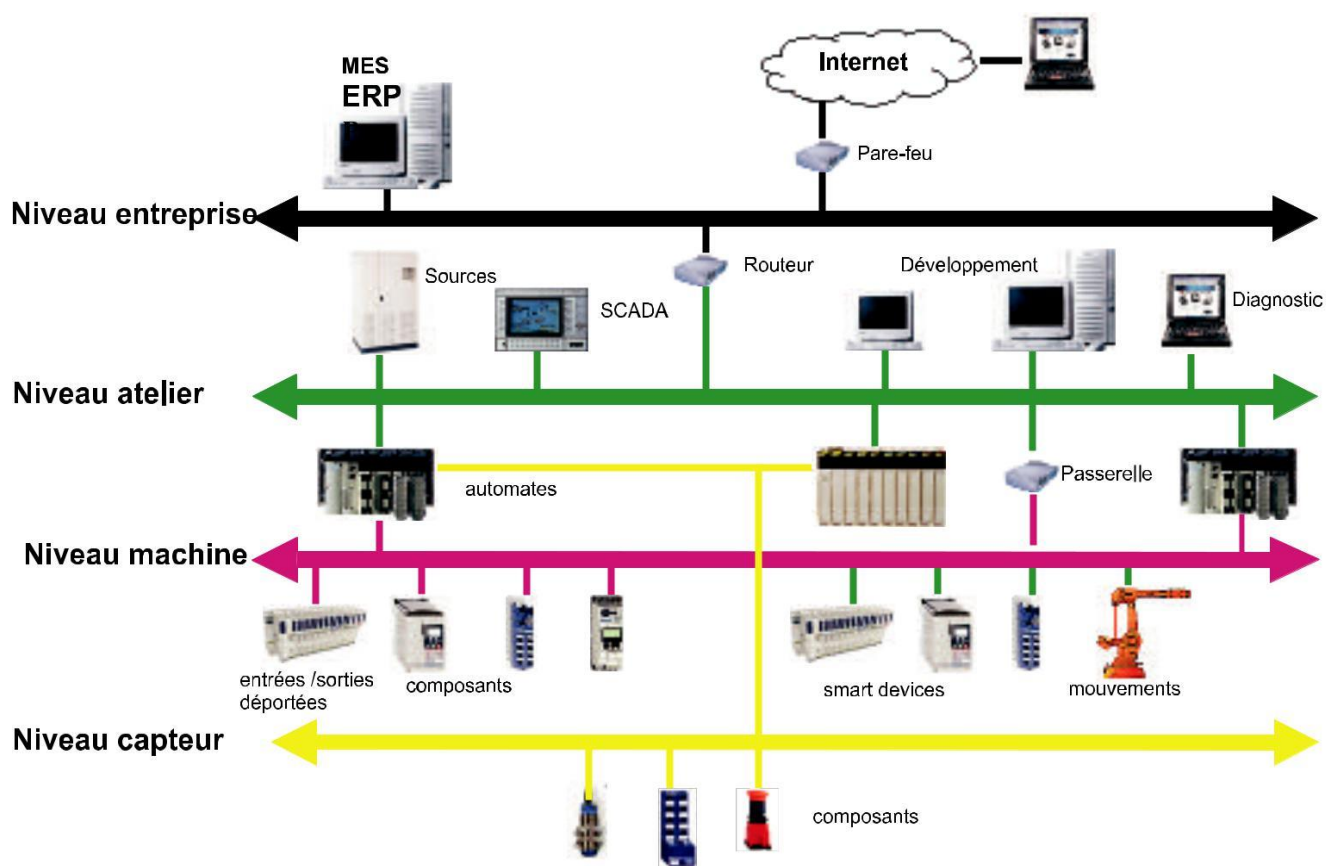


FIGURE 6 LES DIFFERENTES TYPES DE COMMUNICATIONS PRESENTS AUSEIN DE STEP

Chapitre III : Les Harmoniques

1. Introduction générale :

L'objectif du distributeur d'énergie électrique est de fournir à ses clients une énergie électrique de bonne qualité. L'onde de tension idéale utilisée dans les réseaux électriques est une onde sinusoïdale d'amplitude et de fréquence constantes. En pratique le transport de l'électricité et l'usage qui en est fait par les utilisateurs provoquent la déformation de la sinusoïde. Cette déformation ou distorsion de l'onde est appelée perturbation harmonique.

La distorsion harmonique est due pour une large part au développement de nouveaux usages (alimentés par des équipements électroniques) qui se répandent tant dans l'industrie que dans les ménages. La nécessité des études harmoniques s'est fait ressentir, au fur et à mesure de l'identification des effets des harmoniques sur les éléments du réseau et sur la qualité du service. On pourrait citer comme effets : l'échauffement excessif des machines, le claquage des condensateurs, l'apparition des résonances dans les différents harmoniques et des bruits téléphoniques,... etc.

2. Les Harmoniques :

Les harmoniques sont des tensions ou des courants sinusoïdaux dont la fréquence est un multiple entier (k) de la fréquence du réseau de distribution, appelée fréquence fondamentale (50 à 60 Hz).

Lorsqu'elles sont combinées à la tension ou au courant fondamental sinusoïdal, les harmoniques provoquent la distorsion de la forme d'onde de la tension ou du courant (voir fig. 3.1). Les harmoniques sont généralement nommées H_k , où k est le rang de l'harmonique. [9]

- I_{Hk} ou U_{Hk} indique le type d'harmonique (tension ou courant).
- I_{H1} ou U_{H1} désigne la tension ou le courant sinusoïdal à 50 ou 60 Hz lorsqu'il n'y a pas d'harmoniques (tension ou courant fondamental).

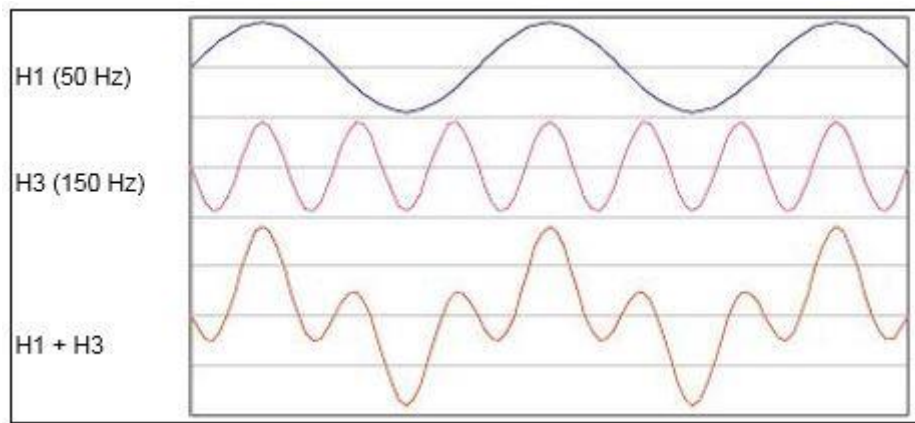


FIGURE 3.7: DISTORSION DE H1 (LA FONDAMENTALE) PAR H3 (HARMONIQUE DE TROISIEME RANG)

3. Sources d'harmoniques :

Les équipements incorporant des dispositifs électroniques d'alimentation sont la principale cause des harmoniques [3][4].

3.1.Charge non linéaire :

Pour alimenter les composants électroniques en courant continu, l'équipement dispose d'une alimentation à découpage avec un redresseur à l'entrée qui génère des courants harmoniques.

Les redresseurs sous leurs différentes formes sont la principale cause des courants harmoniques dans le réseau. Le pont de Graetz est un montage très répandu permettant de redresser le courant. Afin de lisser le courant sortant du redresseur, une inductance est généralement placée dans le circuit à tension continue. Le courant entrant dans le montage a alors la forme d'un créneau.

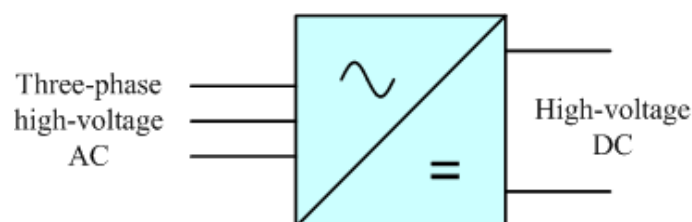


FIGURE 3.2 : SYMBOLE D'UN REDRESSEUR.

Etant alimentés en courant continu les appareils électroniques domestiques, nécessitent une alimentation à découpage pour transformer le courant alternatif du réseau en courant continu. Ils constituent la principale source d'harmoniques au niveau domestique. L'éclairage, par le biais des lampes fluorescentes et des lampes à décharges et les variateurs (gradateurs), est une autre source d'harmoniques. Au niveau

industriel, les variateurs de vitesse, c'est-à-dire le système permettant de régler la vitesse d'un moteur électrique, sont non-linéaires. Les fours à arc et les soudeuses sont d'autres exemples.



FIGURE 3.3 : EXEMPLES DE CHARGES NON LINEAIRES CAUSANT DES HARMONIQUES

Les variateurs de vitesse, de part la présence de composants électroniques commutant à hautes fréquences variables en leur sein, créent des distorsions des courants et des tensions à leur bornes d'entrée. Ces distorsions se propagent sur le réseau et induisent dans les autres appareils branchés sur le même réseau des distorsions du signal sinusoïdal et des consommations accrues de courant.

Le courant absorbé par la charge résulte en fait de la combinaison des éléments suivants :

- un courant sinusoïdal appelé « composante fondamentale », à une fréquence de 50 ou 60 Hz
- les harmoniques, qui sont des courants sinusoïdaux dotés d'une amplitude inférieure à celle de la composante fondamentale, mais dont la fréquence est un multiple de la composante fondamentale et définit l'ordre des harmoniques. Par exemple, l'harmonique de rang 3 possède une fréquence égale à $3 \times 50 \text{ Hz}$ (ou 60 Hz).

3.2.Amplification

L'impédance du réseau est principalement inductive. Toutefois, si des bancs de capacité sont montés en shunt dans le réseau, il existe une ou plusieurs fréquences de résonance pour lesquelles l'impédance du réseau devient nulle. Les harmoniques de fréquence proche de cette résonance sont donc amplifiés. On parle de résonance parallèle. La résonance série est également possible si des inductances sont placées en série avec des capacités dans le réseau.

3.3.Couplage

Le couplage, qu'il soit galvanique, capacitif ou inductif, représente le passage d'une perturbation d'un appareil émetteur vers un appareil récepteur. Il varie selon la conception ou la configuration des circuits électriques en présence.

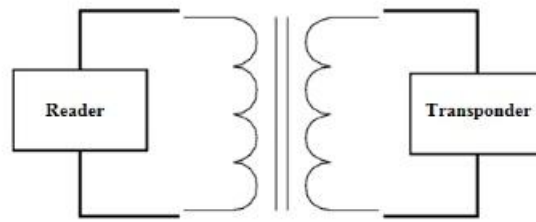


FIGURE 3.4 : EXEMPLE DE COUPLAGE INDUCTIF

4. Caractéristique d'un signal :

4.1.Rang d'un harmonique :

Le rang harmonique est le rapport de sa fréquence $n f$ à celle du fondamental, généralement la fréquence industrielle 50Hz ou 60Hz. Par principe, le fondamental f_1 a le rang 1 [5].

$$\underline{n = Fn \div F1}$$

4.2. Représentation spectrale :

C'est un histogramme donnant l'amplitude de chaque harmonique en fonction du rang. L'amplitude est donnée en valeur relative par rapport au fondamental en un point spécifié. La figure ci-dessous montre un exemple de spectre.

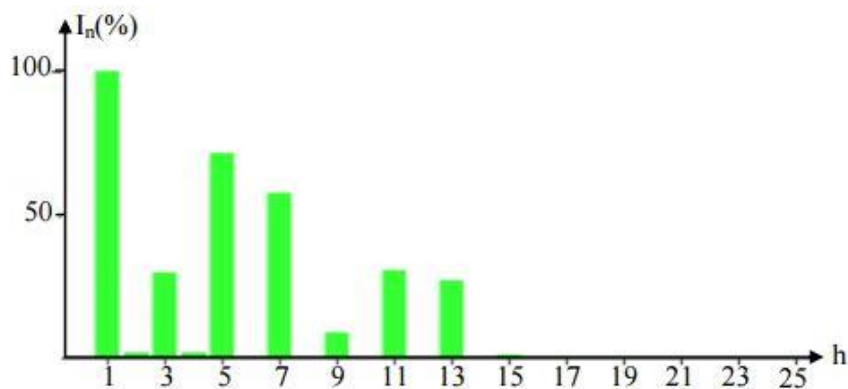


FIGURE 3.5 : SPECTRE HARMONIQUE D'UN SIGNAL

5. Les formes des perturbations[9].

Ces harmoniques de tension et de courant peuvent fortement contraindre les équipements électrique jusqu'à les endommager on distingue ci-dessous les formes de perturbations générées :

- **les câbles** : Pertes ohmique, vieillissement prématuré de l'isolant, corrosion des câbles.
- **Variateurs** : Mise en défaut de l'équipement dû à l'onde de la tension pour les commutations entre autres.
- **Fusibles, disjoncteurs, relais de protection** : Déclenchements intempestifs.
- **Condensateurs** : Vieillissement prématuré, claquage...etc.
- **Transformateurs** : Accroissement des pertes, saturation si harmoniques de rang pairs.
- **Moteurs** : Couple variable, bruit.
- **Télécommande, systèmes de transmissions** : Interférences, pertes de communication.

6. Principaux effets des perturbations harmoniques:

Les tensions harmoniques peuvent provoquer des dysfonctionnements de certains matériels. C'est en particulier le cas du claquage de condensateurs destinés à compenser l'énergie réactive, lors de phénomène de résonance.

La circulation des courants harmoniques induit des échauffements supplémentaires dans les composants du réseau, accroissant leur vieillissement. Ceci peut mener à une surcharge du conducteur de neutre BT, principalement lorsque le réseau alimente du tertiaire. Ces courants peuvent aussi conduire à surdimensionner certains matériels, comme les transformateurs et les câbles [4][7].

6.1.Les effets instantanés :

6.1.1.Perturbation des convertisseurs statiques et des matériels électroniques :

Les tensions harmoniques peuvent perturber les dispositifs de régulation des systèmes électroniques. Elles peuvent influencer les conditions de commutation des thyristors lorsqu'elles déplacent ou multiplient les passages par zéro de la tension. Les appareils utilisant la valeur crête de la tension à des fins de régulation pourront également être perturbés. Les compteurs d'énergie à induction présentent des

erreurs supplémentaires en présence d'harmoniques. Par exemple, un compteur de classe 2 donnera une erreur supplémentaire de 0.3% avec un taux de 5% d'harmonique 5 sur la tension et le courant [17] [24].

6.1.2.Vibrations et bruits :

Les efforts électrodynamiques étant proportionnels aux courants instantanés en présence, les courants harmoniques généreront des vibrations, des bruits acoustiques, surtout dans les appareils électromagnétiques tels que les transformateurs et les inductances. Des couples mécaniques pulsatoires, dus aux champs tournants harmoniques, donneront des vibrations dans les machines tournantes.

6.1.3.Dysfonctionnement des systèmes de protection et des relais :

Les dispositifs de protection et les relais utilisant les courants de charge peuvent être affectés par la présence d'harmoniques, dans la mesure où ceux-ci modifient la valeur instantanée de ces courants.

6.2.Les effets différés :

Ce sont les effets qui apparaissent après une exposition plus au moins longue au phénomène. Ils se traduisent par une perte partielle des fonctionnalités, une indisponibilité et même une destruction complète de l'appareil. Les effets différés sont classés selon le délai avant destruction comme suit :

- Effets à court terme (quelques secondes) ;
- Effets à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures) ;
- Effets à long terme (de quelques heures à quelques années) [4].

6.2.1 Echauffement des condensateurs :

Les pertes, causés par l'échauffement des condensateurs , sont dues à deux phénomènes : conduction et hystérésis dans les diélectriques. Elles sont en première approximation proportionnelles au carré du courant efficace.

Les condensateurs sont donc sensibles aux surcharges, quelle soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence de tensions harmoniques [16]. Les surchauffes des condensateurs, lors des surtensions, sont nocives car s'il n'y a pas claquage immédiat ; pour une surtension de 10 % ; il en résulte une augmentation de 7% de la température et une réduction de l'espérance de vie du condensateur de 30 % [12].

6.2.2.Echauffement des câbles et des équipements :

Les pertes des câbles traversés par des courants harmoniques sont majorées, d'où une augmentation de température. Parmi les causes des pertes supplémentaires on peut citer :

- Une augmentation de la valeur efficace du courant pour une même puissance active consommée ;
- L'élévation de la résistance apparente de l'âme avec la fréquence, phénomène dû à l'effet de peau ;
- L'augmentation des pertes diélectriques dans l'isolant avec la fréquence, si le câble est soumis à une distorsion de tension non négligeable [16] .

7. Types d'harmoniques

Les charges non linéaires causent trois types de courants harmoniques, tous de rang impair (car la sinusoïde est une fonction « impaire »)[8].

- Harmoniques H7 - H13 - : séquence positive.
- Harmoniques H5 - H11 - : séquence négative.
- Harmoniques H3 - H9 - : séquence zéro.

7.1.Aspects spécifiques des harmoniques à séquence zéro (H3 et multiples) :

Les courants harmoniques à séquence zéro (H3 et multiples impairs, écrit $3(2k+1)$, où k est un entier) dans les systèmes triphasés s'accumulent dans le neutre du conducteur. Comme leur rang est un

multiple du nombre de phases (3), les harmoniques coïncident avec de déphasage (un tiers de période) des courants de phase. La figure 3.5 illustre ce phénomène sur une période. Les courants des trois phases sont déphasés d'un tiers de période ($T/3$), c'est-à-dire que les harmoniques I_{H3} sont en phase et que les valeurs instantanées s'ajoutent. Par conséquent :

- Quand il n'y a pas d'harmoniques, le courant dans le neutre est égal à zéro : $I_N = I_1 + I_2 + I_3 = 0$
- Quand il y a des harmoniques, le courant dans le neutre est égal à : $I_1 + I_2 + I_3 = 3 \times I_{H3}$

Il est donc nécessaire de faire particulièrement attention à ce type d'harmoniques dans les installations ayant un neutre distribué (applications commerciales et d'infrastructure).

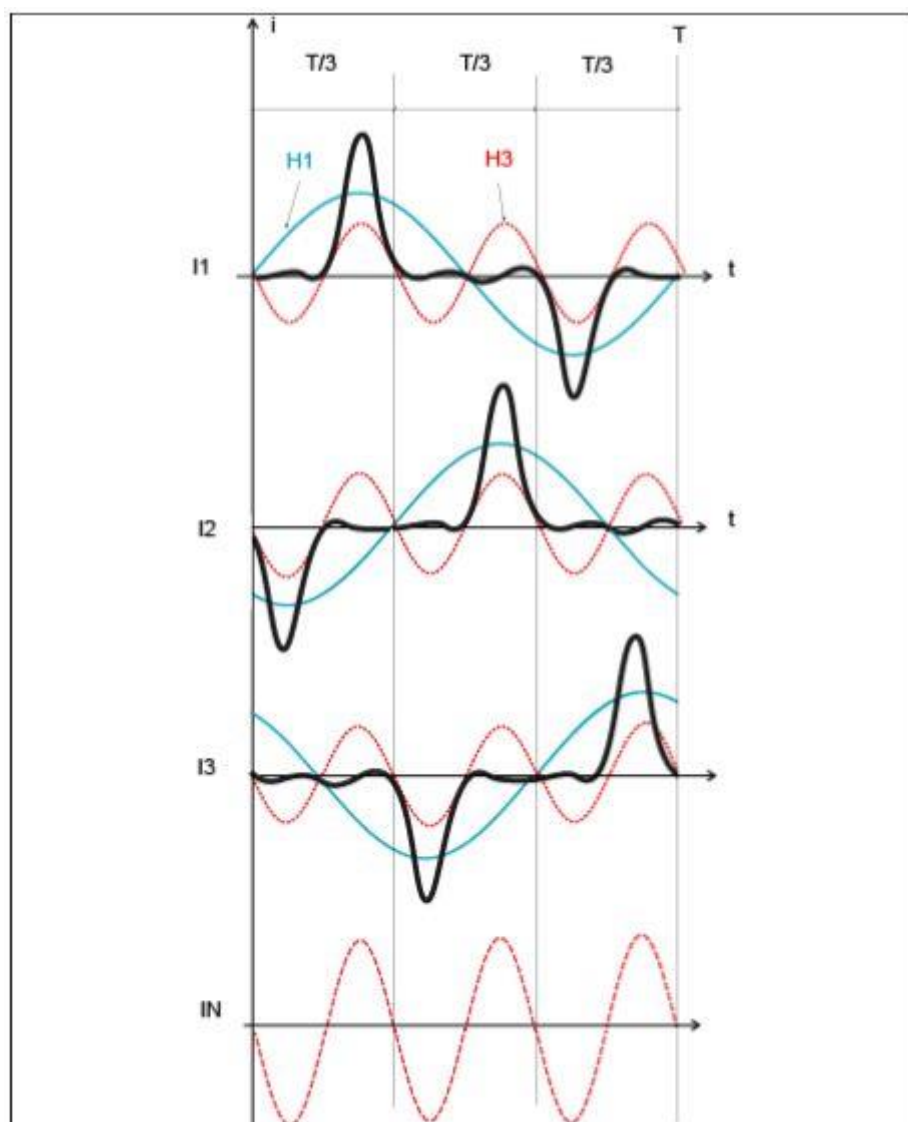


FIGURE 3.5 : LES HARMONIQUES DE RANG 3 ET LEURS MULTIPLES S'ADDITIONNENT DANS LE CONDUCTEUR NEUTRE.

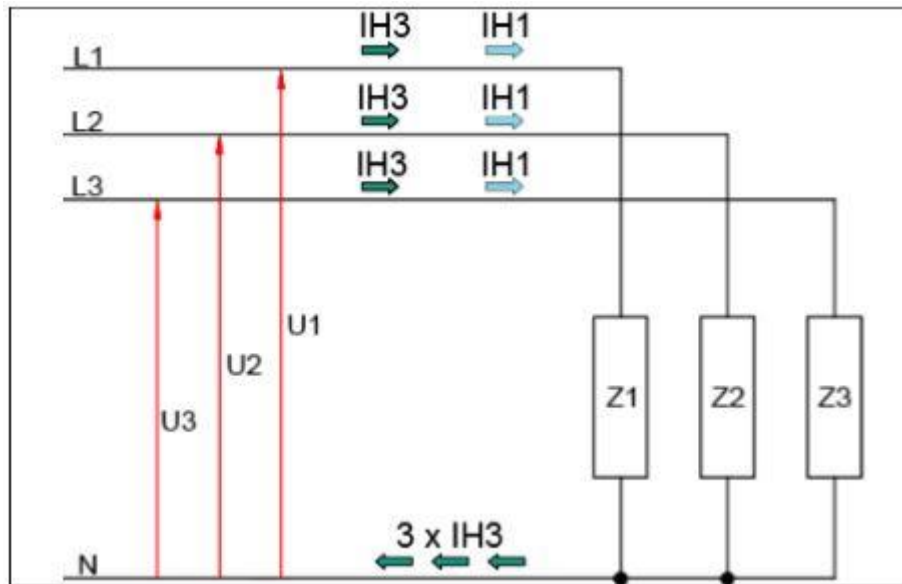


FIGURE 3.6 : QUAND IL Y A DES HARMONIQUES H3 ET LEURS MULTIPLES IMPAIRS, LE COURANT DU CONDUCTEUR NEUTRE N'EST PLUS EGAL A ZERO, IL EST LA SOMME DES HARMONIQUES DE SEQUENCE ZERO.

L'analyse harmonique d'un courant non linéaire consiste à déterminer les éléments suivants :

- le rang des harmoniques présentes dans le courant.
- l'importance relative de chaque rang.

8. Distorsion harmonique de la tension et du courant :

Les charges non linéaires créent des harmoniques de courant et de tension. En effet, pour chaque harmonique de courant de charge, il existe une harmonique de tension d'alimentation de même fréquence. Par conséquent, la tension subit également une distorsion par les harmoniques. La distorsion d'une onde sinusoïdale est présentée sous forme de pourcentage [10]:

$$\text{Rms value of all harmonics} / \text{rms value of fundamental}$$

Les valeurs suivantes sont définies :

- THDU% pour la tension, fonction des harmoniques de tension ;
- THDI% pour le courant, fonction des harmoniques de courant. La valeur THDI (ou THDU pour la tension) est mesurée à l'aide de l'équation :

$$\text{THDI}\% = 100 \frac{\sqrt{IH_2^2 + IH_3^2 + IH_4^2 + \dots + H_k^2 + \dots}}{IH_1}$$

9. Élimination des harmoniques :

Il existe deux stratégies possibles :

- surdimensionner les équipements pour prendre en compte les effets des harmoniques. [6]
- éliminer tout ou partie des harmoniques à l'aide de filtres ou de compensateurs actifs d'harmoniques.[6]

9.1.Surdimensionnement des équipements :

Comme les effets négatifs des courants harmoniques augmentent avec l'impédance cumulative des câbles et des sources, la solution évidente consiste à limiter l'impédance totale afin de réduire la distorsion de la tension et l'échauffement. La figure 3.11 montre le résultat du doublement de la section des câbles et de la puissance nominale de la source. Comme le THDU dépend principalement du composant inductif et donc de la longueur des câbles, il est clair que cette solution n'est pas très efficace et permet seulement de limiter l'échauffement. La figure 3.12 montre que, pour les courants harmoniques les plus forts (H3 à H7), le rapport $L\omega/R$ est égal à 1 pour les câbles de 36 mm² de section. Par conséquent, au-delà de 36 mm², il est nécessaire de réduire l'impédance en utilisant des câbles multibrin pour créer des impédances parallèles.

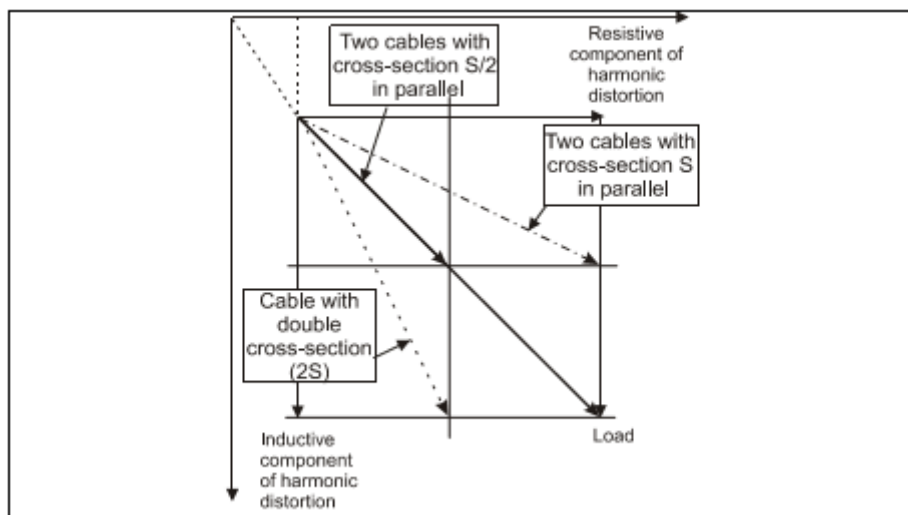


FIGURE 3.11. AUGMENTATION DE LA SECTION DES CÂBLES POUR LIMITER LA DISTORSION ET LES PERTES

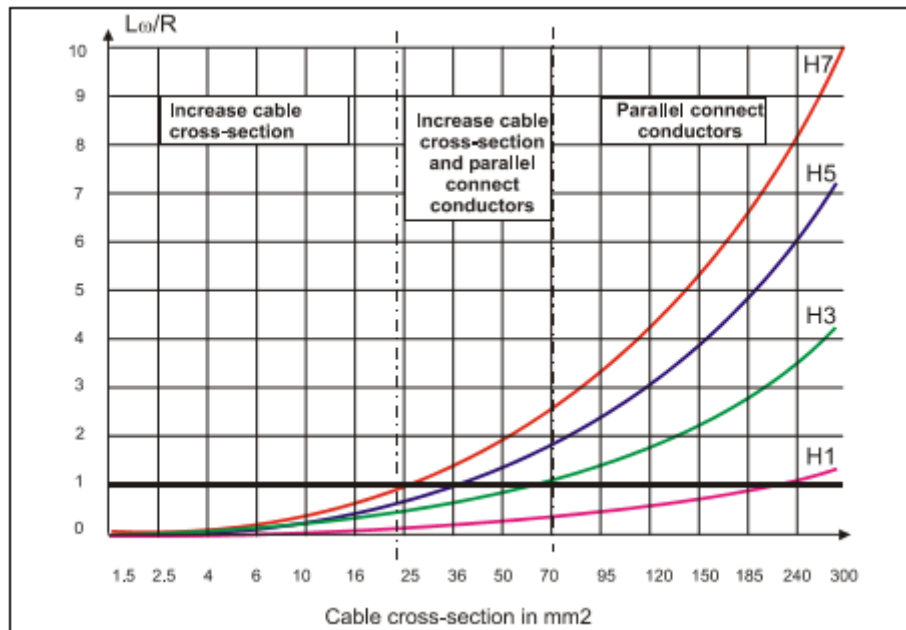


FIG. 3.12. EFFET DE LA SECTION DU CABLE SUR LQ/R

9.2.Solution du filtrage :

9.2.1.Filtre passif : Les filtres passifs LC sont accordés sur la fréquence à éliminer ou peuvent atténuer une plage de fréquences. Les systèmes de recombinaison des harmoniques (pont double, déphasage) peuvent également être regroupés dans cette catégorie.

Toutefois, les filtres passifs ont deux principaux inconvénients :

- L'élimination des harmoniques n'est effective que pour cette configuration précise (l'ajout ou la suppression de charges peut rendre les filtres inefficaces).
- Il est souvent difficile de mettre cette solution en œuvre dans une installation existante.

Applications typiques :

- Installations industrielles avec un ensemble de générateurs d'harmoniques de puissance totale supérieure à 200 kVA environ (Variateurs de vitesse , redresseurs , alimentations sans interruptions)

Principe de fonctionnement :

Un circuit LC est accordé sur chaque fréquence d'harmonique à filtrer, en parallèle sur le générateur d'harmonique.

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

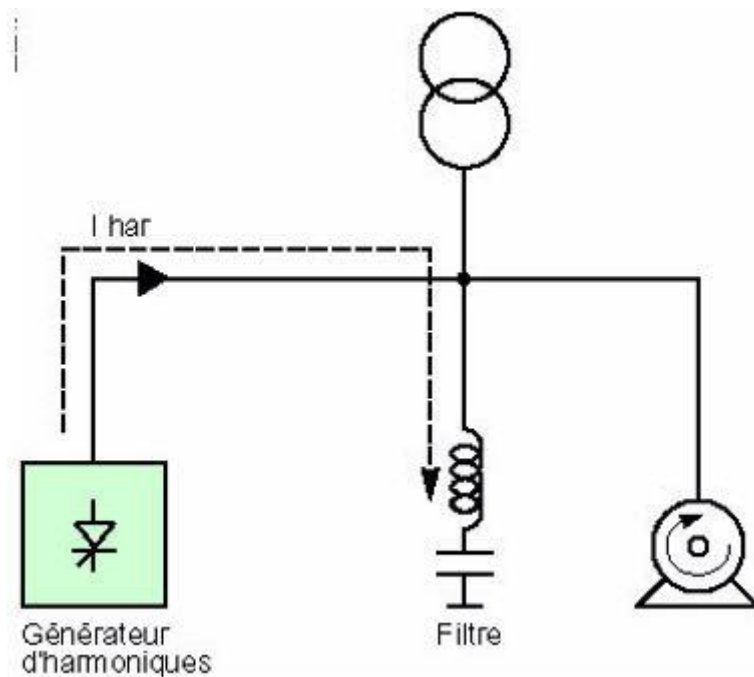


FIGURE 3.8 : PRINCIPE D'UTILISATION D'UN FILTRE PASSIF

En général , le filtre passif est accordé sur un rang d'harmonique proche de l'harmonique à éliminer . Plusieurs branches de filtres en parallèle peuvent être utilisées lorsqu'on souhaite une réduction forte du taux de distorsion sur plusieurs rangs.[9]

Avantage :

- Amélioration du taux de distorsion harmonique en courant TDHi .

Inconvénients :

- Risque de résonance ;
- Pas d'adaptabilité.

9.2.2.Filtre actif : réservés au réseau basse tension, le filtre actif produit des courants harmoniques injectés sur le réseau électrique, en opposition de phase avec le courant harmonique de la charge. Il permet d'éliminer les harmoniques polluants et d'obtenir le retour à une forme de courant linéaire. Le filtre actif permet un filtrage sur une large bande de fréquences et s'adapte à n'importe quelle charge. Cependant, sa puissance harmonique électrique est limitée.

Applications typiques :

- installations industrielles avec un ensemble de générateurs d'harmoniques de puissance totale supérieure a 200 kVA environ (variateurs de vitesse, alimentations sans interruptions, redresseurs,...)
- installation présentant un besoin de compensation d'énergie réactive,

- nécessité de réduction du taux de distorsion en tension pour éviter la perturbation de récepteurs sensibles.
- nécessité de réduction du taux de distorsion en courant pour éviter les surcharges.
- recherche de conformité à des limites strictes d'émission harmonique.

Principe de fonctionnement :

Ce sont des systèmes électroniques de puissance installés en série ou en parallèle avec la charge non linéaire, visant à compenser soit les tensions harmoniques, soit les courants harmoniques générés par la charge. La figure suivante donne un exemple de filtre actif compensant le courant harmonique ($i_{har} = -i_{act}$).

Le filtre actif réinjecte en opposition de phase les harmoniques présents sur l'alimentation de la charge, de telle sorte que le courant de ligne soit sinusoïdal.[9]

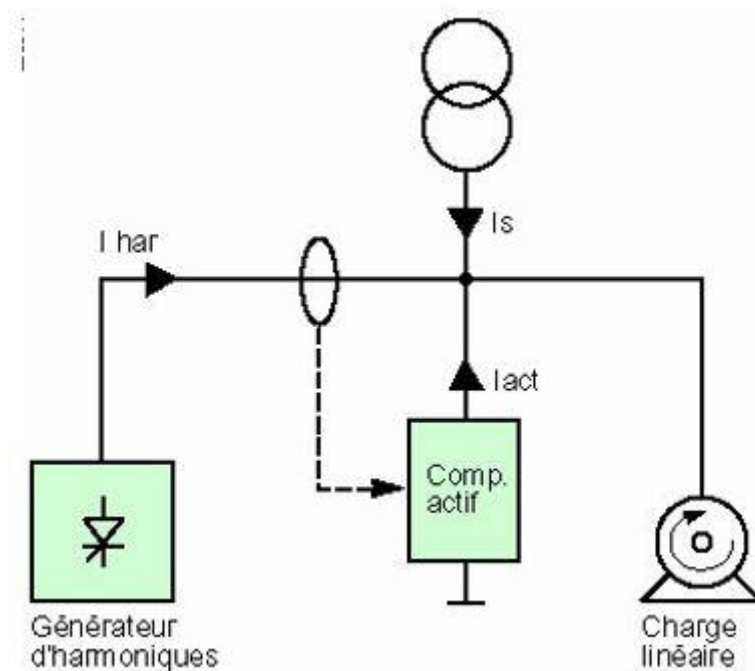


FIGURE 3.9 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN FILTRE ACTIF

10. La solution la mieux adaptée :

Les filtres actifs, ou compensateurs actifs d'harmoniques, annulent les harmoniques en injectant des courants harmoniques exactement égaux là où elles surviennent. Ce type de filtre réagit en temps réel (activement) aux harmoniques existantes pour les éliminer. Ils sont plus souples et efficaces que les filtres passifs, ils évitent leurs inconvénients et, en comparaison, constituent une solution :

- offrant de meilleures performances (l'élimination totale de toutes les harmoniques est possible jusqu'au 50e rang).
- flexible, adaptable (leur action peut être configurée) et réutilisable.

11. Conclusion :

Sur un réseau de distribution électrique, les principales sources de perturbations harmoniques sont les convertisseurs statiques de puissance.

Afin d'éviter d'éventuels dysfonctionnements ou dégradations des équipements, il est nécessaire de les dimensionner en conséquence. Si le niveau des harmoniques est trop élevé, la mise en place de filtres harmoniques est toujours envisageable.

Dans tous les cas, le choix des matériels (lignes, transformateurs, filtres...) d'une nouvelle installation passe obligatoirement par la connaissance à priori du niveau des harmoniques produits par les convertisseurs, ou plus généralement par les charges non linéaires.

12. BIBLIOGRAPHIES :

[1] : **WATERLEAU FEZ** ; <http://www.waterleau.com/files/Fez>

[2] : **RADEEF et STEP** ; www.radeef.ma/Portals/0/CommuniquéRADEEFVF

[3] : **P.Guerin** ; « Contribution à l'Etude des Perturbation Harmoniques des Réseaux de Bord de Navires : Approche Déterministe et Stochastique » ; Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale S.P.I de Nante, France, 1996.

[4] : **R.Calvas** ; « Les Perturbations Electriques » ; Merlin Guerin N°141., Mai 2001.

[5] : **R.P.Bouichard, G.Olivier** ; « Electrotechnique : deuxième édition » ; AGMV Marquis Quebec, Canada, 2001.

[6] : **C.Collombet, J.M.Lupin et J.Schonek** ; « Perturbations Harmoniques dans les Réseaux Pollués, et leur Traitement » ; Merlin Guerin N°152, September 1999.

[7] : **H.Douar** ; « Evaluation du Cout des Pertes Générées par les Perturbations Harmoniques dans les Réseaux Electriques » ; Mémoire de Magister, Université de M'Hamed Bougara, Boumerdes, 2006

[8] : **Les harmoniques** ; http://www.chauvin-arnoux.com/sites/default/files/documents/appli_f_harmoniques_ed1

[9] : **Schneider Electric**; Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement :Cahier technique n° 152 .

[10] : **Wikipedia** ; Taux de distorsion harmonique :
https://fr.wikipedia.org/wiki/Taux_de_distorsion_harmonique

