

Chapitre

6

**INFLUENCE DE LA PROPAGATION
DES PHÉNOMÈNES TRANSITOIRES
SUR LE RESEAU DE DISTRIBUTION****VI-1 INTRODUCTION**

Les perturbations du réseau dues à la présence de transformateur de puissance sont nombreuses. Que ce soit au niveau des éléments du réseau ou jusqu'aux consommateurs d'énergie, l'influence de ces perturbations constitue un facteur gênant et indésirable pour le bon fonctionnement des récepteurs et appareils de mesure en chaque bout de ligne.

Ce chapitre détaille les effets et influences de ces perturbations à travers tout le réseau.

VI-2 INFLUENCES DES PHÉNOMÈNES SUR LE RESEAU**VI-2-1 Effets de la résonance**

En résonance, les courants et tensions croient considérablement.

a-surtension

La tension ou différence de potentiel est la valeur mesurée entre deux phases d'une ligne ou une phase et un neutre. Sa valeur est paramétrée par son amplitude définie par $\hat{U} = \sqrt{2} \cdot U_n$ si la tension est une tension de ligne, et $\hat{U} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_n$ si la tension est une tension de phase, U_n étant

la tension nominale du réseau .

Toute valeur de la tension excédant la valeur crête \hat{U} est appelée surtension.

Comme la tension, elle est fonction du temps et n'apparaît sur le réseau que pendant les régimes transitoires celui-ci, c'est à dire en une très courte durée : lors d'un enclenchement d'une machine ou d'un transformateur du réseau, lors de l'action d'une foudre sur le réseau, lors de la résonance...

Le réseau de Morondava emploie des lignes aériennes. Et sur les lignes aériennes, l'isolement de chaque conducteur de phase est assuré par la résistivité de l'air ambiant. Si la valeur de surtension est supérieure à la capacité diélectrique de l'air, il se produit ce qu'on appelle claquage d'isolant provoquant des arcs électriques entre les conducteurs de phase ou entre phase et la terre. Les arcs électriques sont des courants de court-circuit qui passent directement à travers les isolants qui est la résistivité de l'air.

Les effets de ces arcs électriques sont importantes. Ils provoquent l'érosion des conducteurs et la fusion même de deux conducteurs de phase, ils peuvent faire éclater les traversées isolantes des transformateurs.

C'est pour ceux-là que des moyens et dispositifs de protection doivent être mises en place pour éviter tout désagrément causé par la surtension.

b-surintensité

Comme pour la surtension, la surintensité est toute valeur de l'intensité dépassant la valeur crête qui est de $\hat{I} = \sqrt{2}.I$ pour les courants de ligne et $\hat{I} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}.I$ pour les courants de phase.

Cette valeur crête est caractérisée par la densité de courant admissible de la ligne qui est de
 $J = 6 \text{ [A/mm}^2\text{]}$ pour de fort courant **(6-1)**
 $J = 2 \text{ [A/mm}^2\text{]}$ pour de faible courant

La surintensité provoque, au niveau de chaque conducteur, un échauffement supplémentaire à la normale voir même excessif. Cela a pour effet d'accroître la résistivité du conducteur qui augmente les pertes linéiques.

En effet, la résistivité d'un conducteur est définie par

$$\rho = \rho_0.(1+\theta.T) \tag{6-2}$$

avec

ρ_0 : résistivité des conducteurs à 0°C

θ : coefficient de température

T : température du conducteur

L'augmentation des pertes linéiques engendre l'accroissement des chutes de tension le long de la ligne (qui doit être environ $\pm 7\%$ pour les lignes MT).

La surtension et la surintensité sont deux phénomènes prépondérants car, dans la plupart des cas, une surtension provoque toujours une surintensité.

VI-2-2 Effets des perturbations

La non-linéarité entre courant et tension est la principale cause de perturbations des réseaux de distribution électrique. Les perturbations engendrent des effets néfastes conduisant à des gênes d'exploitation voir même des catastrophes.

Il est donc nécessaire d'étudier l'origine de ces perturbations, de voir les effets sur les réseaux afin de prévoir des solutions et protections.

VI-2-2-1 Les sources de perturbation

Les sources de perturbation sont les éléments du réseau qui provoquent les perturbations.

Ils sont définis suivant deux critères : suivant la position de l'élément perturbateur sur le réseau et suivant l'évolution du phénomène au cours du temps.

Le tableau suivant décrit quelques principaux sources perturbatrices.

Position de l'élément Evolution	Interne au réseau	Externe au réseau
Stationnaire	-Machines synchrones et asynchrone -semi-conducteurs(redresseurs, onduleurs...) -circuits magnétiques à caractère saturable (transformateur, self...) -arcs électriques	- parallélisme des conducteurs de ligne
Quasi-stationnaire	-variation de charges (installations pour fusion nucléaire, accélérateurs de particules, démarrage des machines électriques...)	- courant de court-circuit
Transitoire	-enclenchement ou déclenchement (disjoncteur, fusible, relais, appareils de soudure, allumage des chaudières...)	-pulsation électromagnétique nucléaire -foudre

Tableau (6-1) liste des éléments perturbateurs

VI-2-2-2 Les éléments sensibles

Ce sont les éléments sensibles ou affectés par les perturbations. Ces éléments sont gênés et ne peuvent accomplir leur rôle correctement. Parmi ces éléments, on constate aussi des appareils perturbateurs, c'est à dire que certains appareils sont à la fois perturbateurs et sensibles. Le tableau suivant décrit quelques types d'éléments sensibles.

Evolution au cours du temps	Eléments perturbés
Stationnaire	- Electronique de commande - Relais électromagnétique - Electronique de mesure - Télécommunication
Quasi-stationnaire	- Relais électromagnétique - Electronique de mesure - Eclairage - Electronique de commande (calculateur) - Emetteurs récepteurs (radio, TV)
Transitoire	- Electronique de commande - Electronique de mesure - Télétransmissions - Emetteurs récepteurs

Tableau(6-2) liste de quelques éléments sensibles aux perturbations

Chapitre
7

SOLUTIONS

VII-1 INTRODUCTION

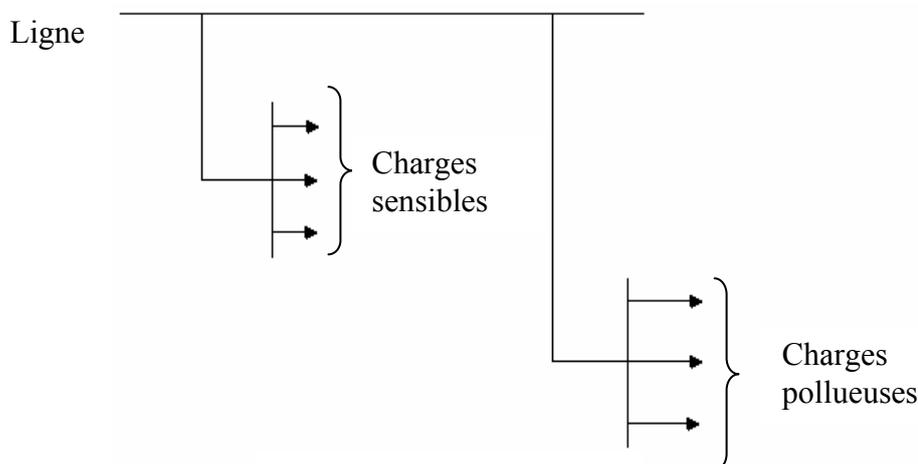
Les propagation des perturbations harmoniques dans un réseau de distribution électrique provoquent toujours des effets néfastes pour les appareils récepteurs ou de mesure en bout de ligne. La qualité de l'énergie électrique y est très affectée. En général, il existe un seuil acceptable en dessous duquel ces oscillations peuvent être négligées car les effets sur le réseau sont minimales.

Dans ce chapitre, on va établir des solutions qui permettront de les réduire ou même en vue de les éliminer.

VII-2 ORGANISATION DU RESEAU

L'organisation du réseau consiste à séparer les charges polluantes des charges sensibles aux harmoniques et de les éloigner, l'une par rapport à l'autre, sur le réseau. Donc l'opération doit être faite lors de la mise en place du réseau en tout début. L'organisation d'un réseau se limite aux récepteurs ou charges polluantes de moyenne puissance, car si la pollution harmonique provoquée est puissante, il vaut mieux alimenter les charges polluantes par un transformateur à part.

Lors de la simulation, on a vu que les transformateurs constituent une isolation galvanique et filtrent les harmoniques. Mais la capacité de filtrage du transformateur se limite par le degré de distorsion harmonique de la charge pollueuse sur le réseau. Si le taux de distorsion harmonique est trop élevé (cas des charges polluantes de grande puissance), il est plus prudent de séparer la charge du réseau.



fig(7-1) réseau organisé

VII-3 CONFINEMENT DES HARMONIQUES

Cette solution consiste à réduire le moins possible le rayon d'action des harmoniques c'est-à-dire à limiter la circulation des courants harmoniques à une zone aussi restreinte que possible sur le réseau.

a- utilisation de transformateurs à couplage spécial

Les rangs harmoniques d'ordre 3,5 et 7 sont les plus gênants.

Quelques cas de couplages de transformateur peuvent réduire ou empêcher les courants harmoniques de circuler sur le réseau. Les types de transformateur concernés sont :

- transformateur couplés en Dy_n

Ce transformateur bloque les harmoniques de rang $3h$ (3 et ses multiples) en amont du transformateur. Ces courants deviennent en phase et s'éliminent.

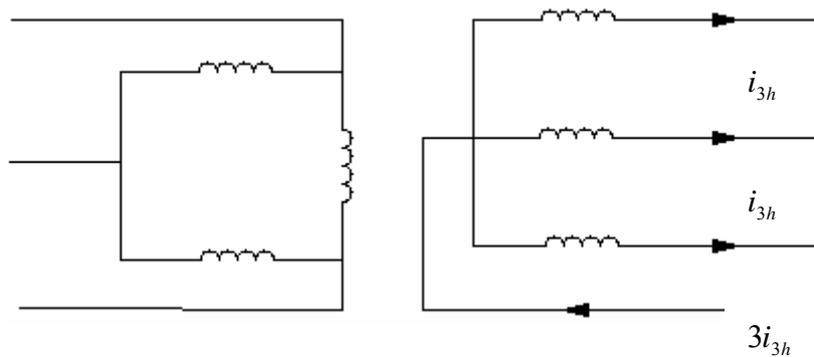


fig (7-2) transformateur à couplage Dyn

Ce sont essentiellement les rangs harmoniques d'ordre 5 et 7 qui peuvent être éliminés.

Néanmoins, il existe des conditions à respecter pour l'élimination de ces harmoniques :

- il faut que les charges perturbatrices soient identiques
- il est préférable d'utiliser soit un transformateur à deux secondaires mais déphasés de 30° , soit un transformateur à couplage $Dy_n 11$

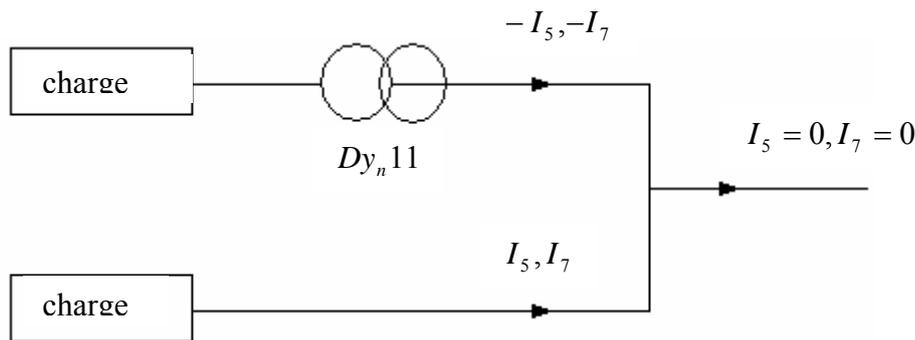


fig (7-3) schéma de principe pour l'utilisation d'un transformateur Dyn

- transformateur couplé en Yz_n

Le transformateur couplé en étoile au primaire et en zigzag au secondaire permet d'éliminer les courants de rang $3h$ au primaire.

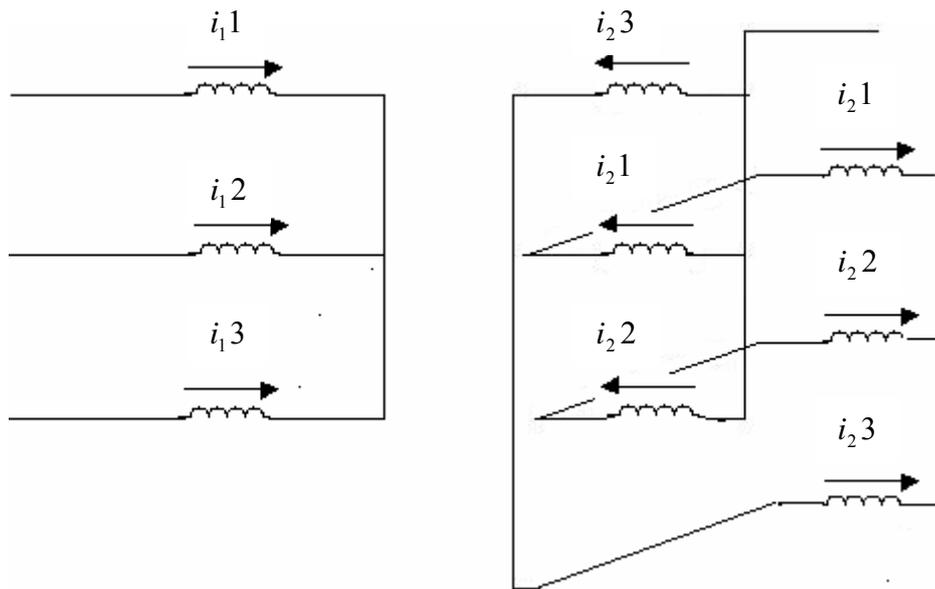


fig (7-4) transformateur à couplage Yzn

D'après la relation des ampères-tours liant le primaire et le secondaire, on a

$$n_1 \cdot i_1 = n_2 \cdot (i_21 - i_23) \quad (7-1)$$

Pour les courants harmoniques d'ordre 3h

$$i_21_{(3h)} = I_21_{(3h)} \cdot \sin(3 \cdot h \cdot \omega t)$$

$$i_23_{(3h)} = I_23_{(3h)} \cdot \sin\left(3 \cdot h \cdot \left(\omega t - \frac{4 \cdot \pi}{3}\right)\right)$$

$$= I_23_{(3h)} \cdot \sin(3 \cdot h \cdot \omega t - 4 \cdot h \cdot \pi)$$

L'expression de $i_23_{(3h)}$ est déphasée de multiple de $2 \cdot \pi$ par rapport à celui de $i_21_{(3h)}$.

Donc, les deux expressions des courants harmoniques 1 et 3 sont identiques. Ramené à l'équation (7-1), cela annule le courant $i_1_{(3h)}$.

D'où :

$$i_1_{(3h)} = 0 \quad (7-2)$$

b- Redimensionnement des éléments du réseau

Le plus souvent, une installation sur un réseau électrique est connectée à un neutre. Si l'installation est équilibrée c'est-à-dire que les charges et les caractéristiques des phases sont identiques, les courants harmoniques de rang 3 circulent dans chacune des phases et s'écoulent dans le neutre.

Il est alors indispensable de redimensionner le neutre afin qu'il puisse supporter l'ajout de ces courants harmoniques pour éviter toute possibilité de claquage d'isolant.

VII-4 LE FILTRAGE

Le principe du filtrage consiste à écouler et à court-circuiter les courants harmoniques par l'intermédiaire d'éléments passifs ou actifs. Il doit présenter une impédance très faible au passage des courants harmoniques et ne doit pas affaiblir le signal utile

Le filtre échange de l'énergie avec le réseau.

VII-4-1 Les différents types de filtres

Le filtre fréquemment utilisé sur les réseaux de distribution est le filtre passif.

Comme son nom l'indique, ce type de filtre est constitué d'éléments passifs seulement tels que résistances, selfs ou inductances, diodes et condensateurs. La disposition des éléments du filtre est déterminée suivant l'ordre des harmoniques à éliminer. Alors, on peut classer les filtres passifs en trois catégories :

- filtre simple
- filtre accordé ou résonant
- filtre résonant amorti

a- filtre simple

Le filtre est constitué par :

- ♦ une inductance servant à réduire l'amplitude des courants harmoniques appelée inductance de lissage
- ♦ un condensateur absorbant les courants de haute fréquence (le condensateur a une impédance inversement proportionnelle avec la fréquence).

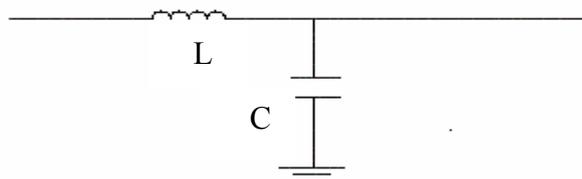


fig (7-5) Schéma simplifié d'un filtre simple

L'efficacité du filtre est déterminée par :

$$E = \frac{1}{A} \tag{7-3}$$

et l'atténuation A du filtre par :

$$A = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V_{2s}}{V_{1s}} \right) \quad [\text{dB}] \tag{7-4}$$

avec :

V_{1s} : tension aux bornes de l'installation sans filtre

V_{2s} : tension aux bornes de l'installation avec le filtre

b- filtre accordé

Ce type de filtre est constitué par un self (L) mis en série avec un condensateur (C). Le montage est placé en dérivation sur la ligne. Chaque phase admet un filtre et les filtres sont reliés entre eux (au point O).

En général, un filtre résonant est utilisé pour des fréquences basses (pour l'élimination des courants harmoniques d'ordre 5,7 et 11).

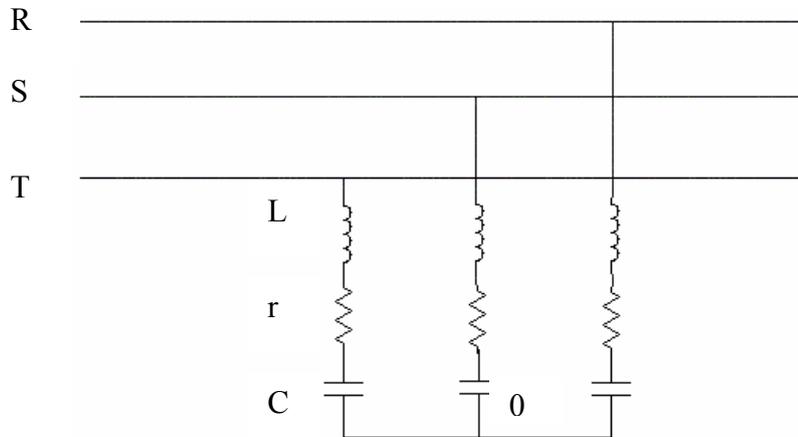


fig (7-6) filtre shunt résonant

c- Filtre shunt résonant amorti

Le filtre résonant amorti est une filtre à large bande. Cela lui permet de filtrer plusieurs harmoniques en même temps c'est-à-dire plusieurs fréquences différentes. Il filtre la fréquence à laquelle il a été prévu mais aussi les fréquences supérieures du spectre.

Le filtre est composé toujours du même branche LrC mais une résistance R est mise en parallèle avec l'inductance L et la résistance r. R est appelée résistance d'amortissement du filtre.

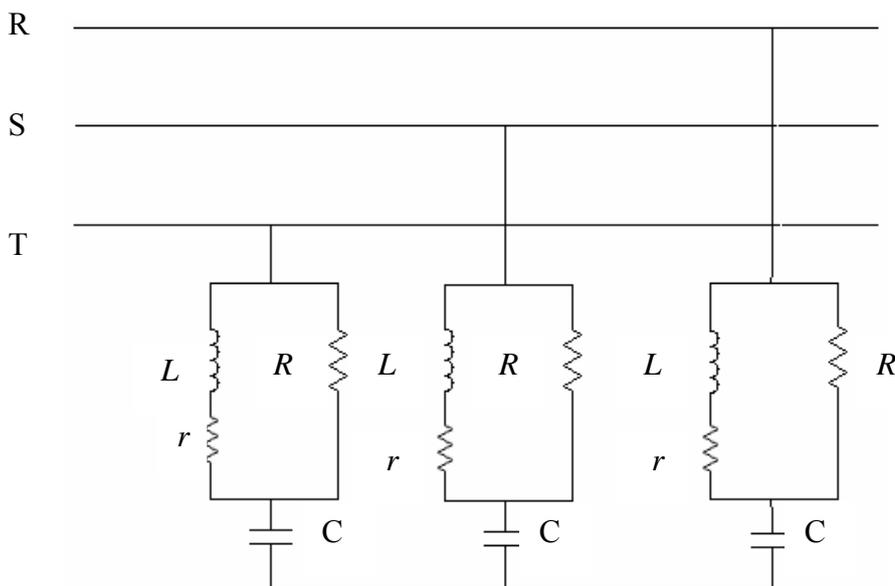


fig (7-7) filtre résonant amorti

La fréquence d'anti-résonance du filtre est donnée par :

$$f_{ra} = \frac{1 + R.r}{2.\pi.r.\sqrt{(R^2 - 1).L.C}} \quad (7-8)$$

VII-4-2 Application des filtres sur le réseau étudié

Pour mettre en évidence l'efficacité des filtres à agir sur les harmoniques, on les simulera sur le réseau.

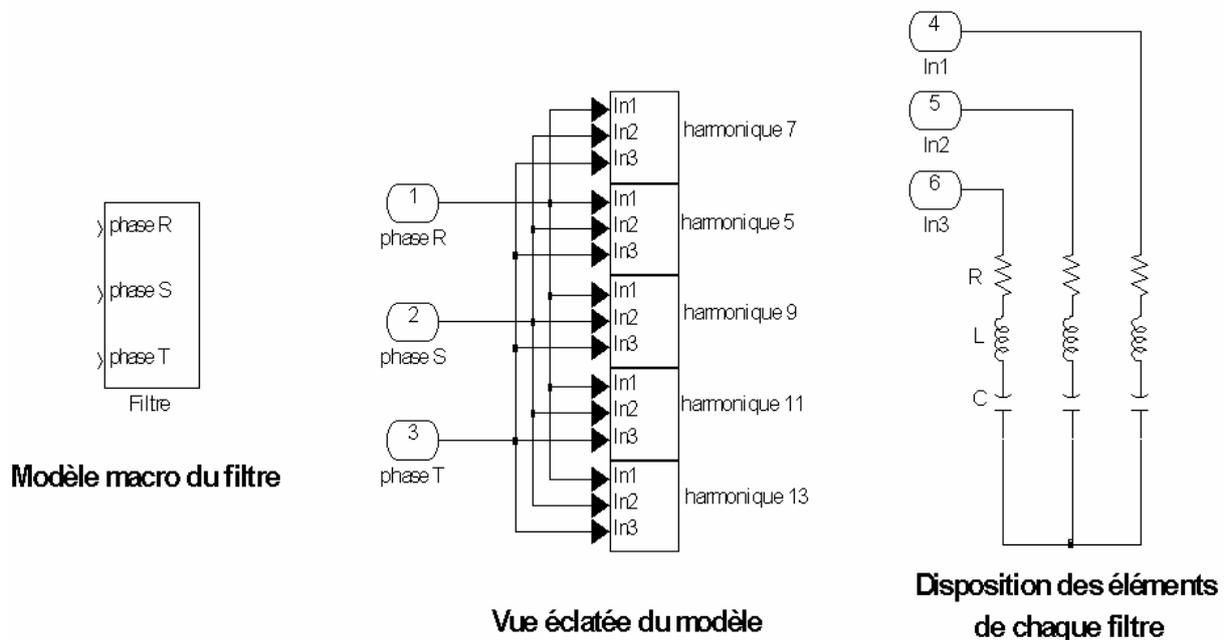
Pour l'utilisation des filtres, plusieurs conditions sont à respecter telles que :

- 1- les filtres doivent être placés le plus proche possible des récepteurs à protéger.
- 2- le dimensionnement des filtres doivent être en accord avec la fréquence des harmoniques à éliminer et des caractéristiques du réseau.
- 3- les filtres ne doivent, en aucun cas, diminuer le signal utile c'est à dire le signal de tension et courant.
- 4- les filtres peuvent être mis en parallèle pour le filtrage de plusieurs harmoniques à la fois.

— mise en place du filtre sur le réseau

On a utilisé un filtre résonant qu'on place placé au nœud P10 . De ce fait, les perturbations générées par le transformateur saturable seront tout de suite filtrées avant de se propager dans tout le réseau

La disposition du filtre est la suivante :



fig(7-8) schéma détaillé du filtre d'harmoniques

La valeur des éléments du filtre dépend, comme nous l'avons vu, de l'ordre des harmoniques à éliminer.

Pour l'élimination des harmoniques de rang 5, on a :

$$(L+L').C = \frac{1}{4.\pi^2.(250)^2} = 4,052.10^{-7}$$

Pour l'élimination des harmoniques de rang 7, on a :

$$(L+L').C = \frac{1}{4.\pi^2.(350)^2} = 2,067.10^{-7}$$

Pour l'élimination des harmoniques de rang 9 :

$$(L+L').C = \frac{1}{4.\pi^2.(450)^2} = 1,250.10^{-7}$$

Pour l'élimination des harmoniques de rang 11 :

$$(L+L').C = \frac{1}{4.\pi^2.(550)^2} = 8,373.10^{-8}$$

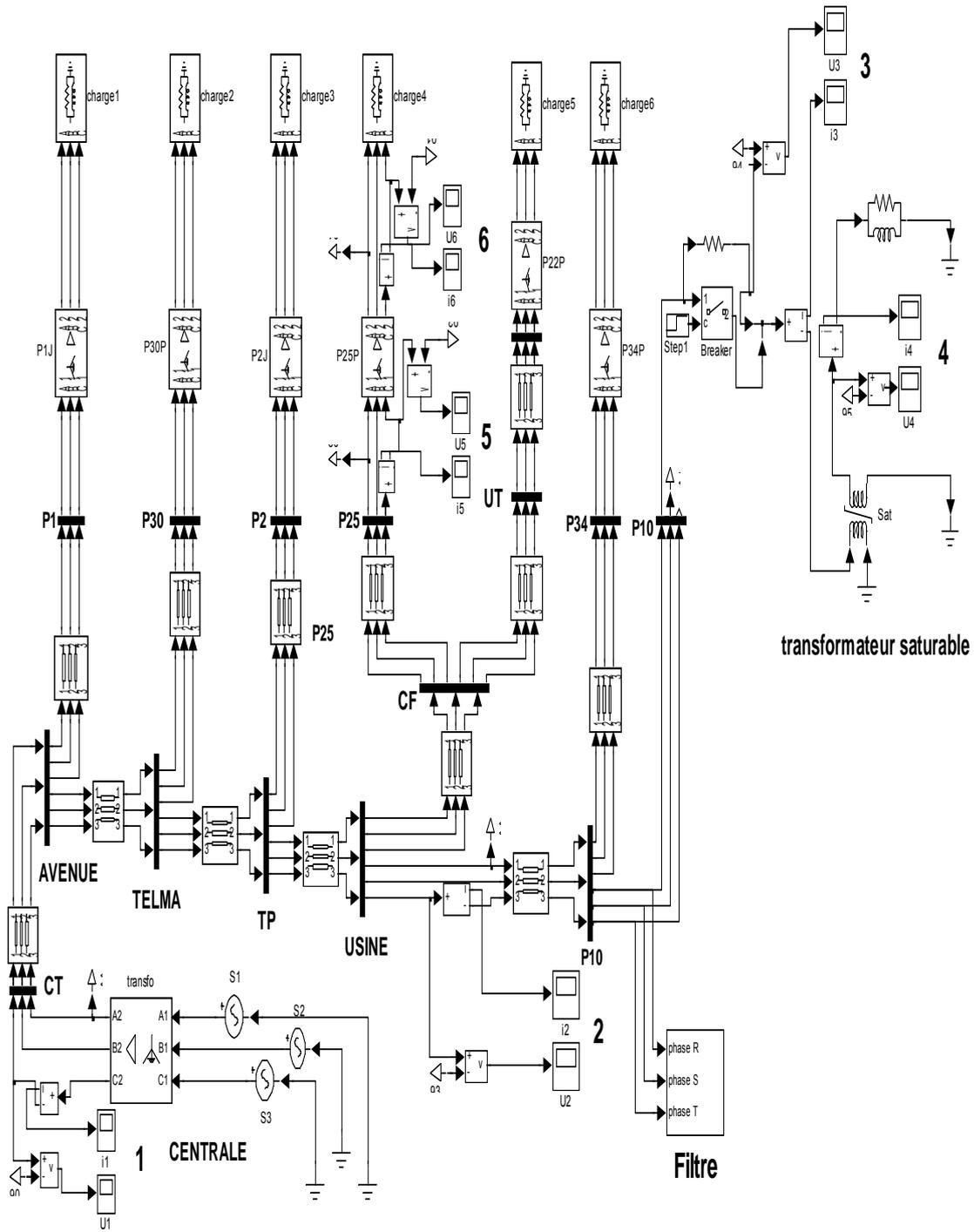
Pour l'élimination des harmoniques de rang 13 :

$$(L+L').C = \frac{1}{4.\pi^2.(650)^2} = 5,995.10^{-8}$$

L' étant l'impédance du réseau, les valeurs de L et C seront choisies de façon à respecter l'égalité ci-dessus.

On a dimensionné le filtre de façon à éliminer les rang 5, 7, 9, 11 et 13

Une fois le filtre conçu, on le place sur le réseau :



fig(7-9) schéma du réseau avec un filtre shunt

— Courbes de résultats

Pour voir les effets du filtre sur les harmoniques se propageant dans le réseau, on prélève de nouveau les ondes de tension et courant au nœud USINE afin de comparer avec le prélèvement sans filtre.

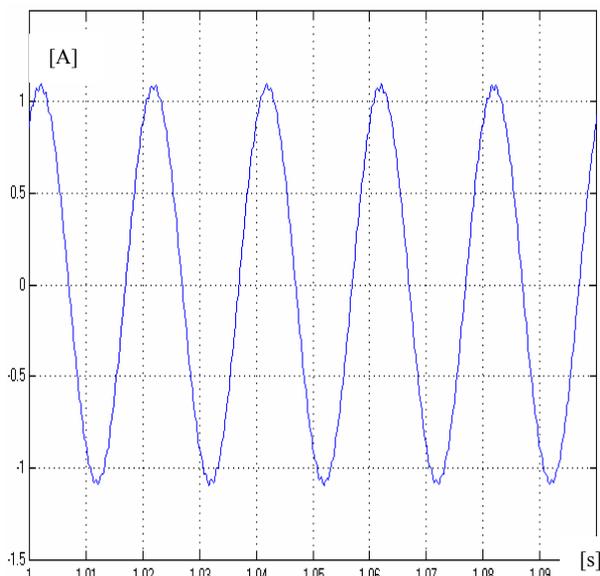
Si le résultat est bon au nœud P10 c'est à dire que les harmoniques à éliminer sont étouffées par le filtre, alors tout le reste du réseau en amont du nœud P10 est protégé des harmoniques.

Les résultats au nœud USINE sont les suivants :

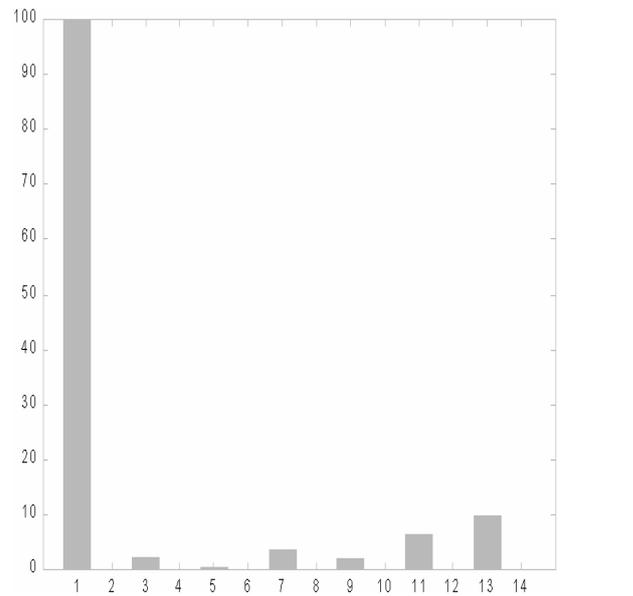
▪ **point de prélèvement 2 (au nœud USINE)**

• **Avant filtrage**

- Courant



Forme de courbe

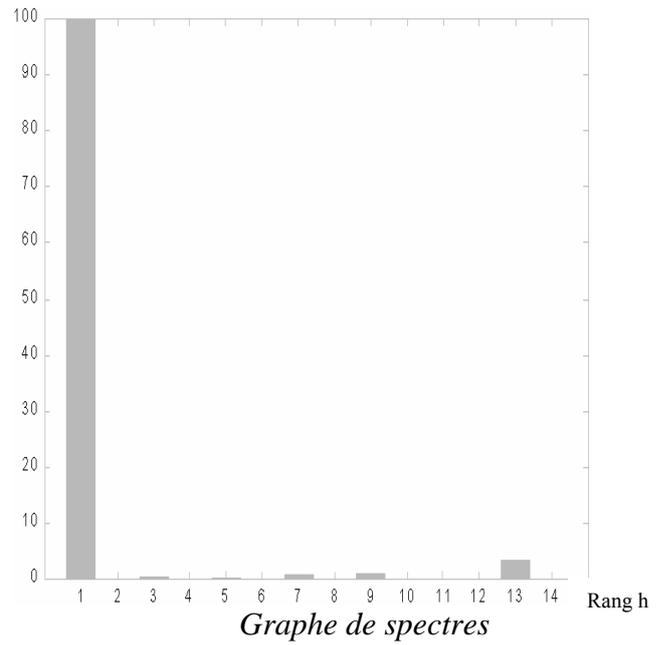
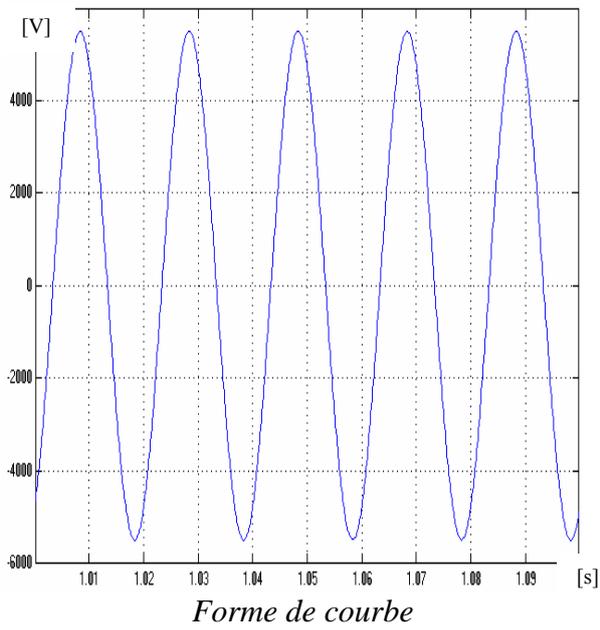


Graphe de spectres

Rang h

Taux de distorsion harmonique : $T = 12,61 \%$

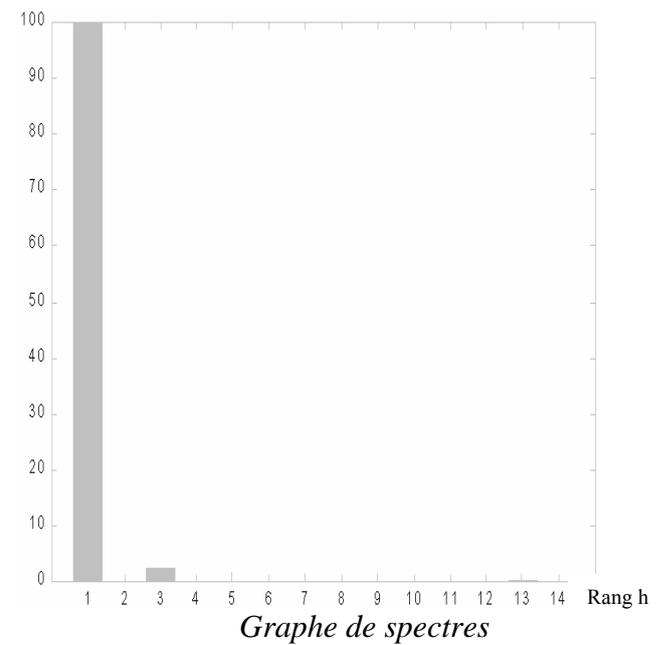
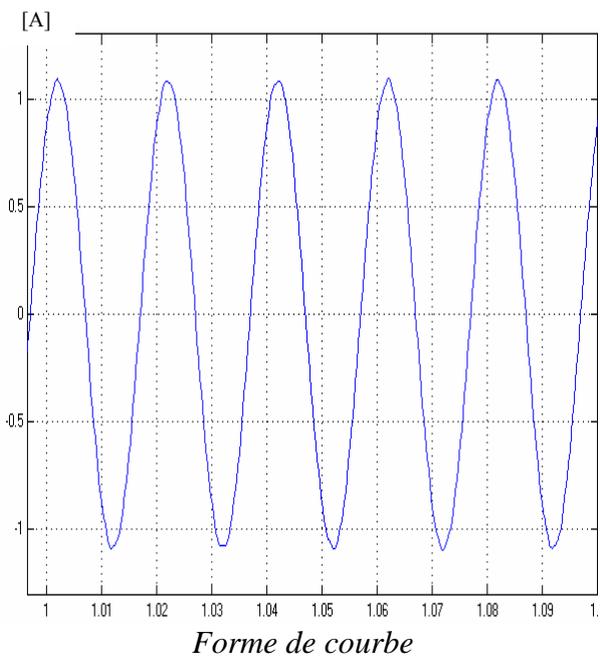
- tension



Taux de distorsion harmonique : $T = 3,36 \%$

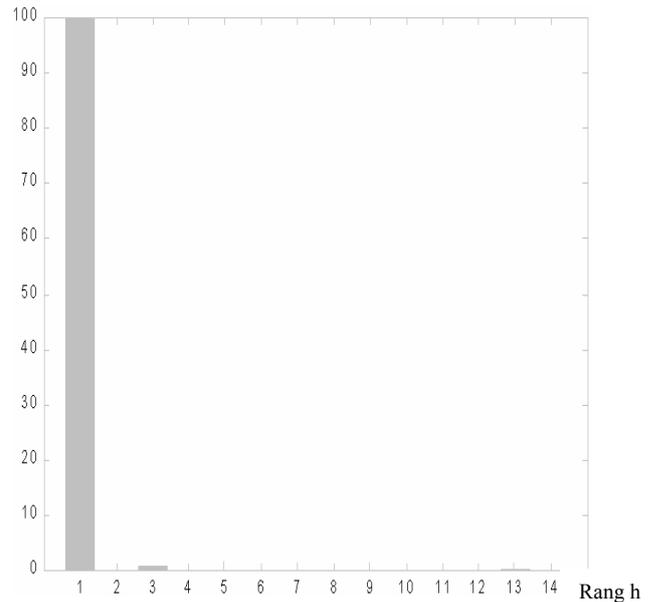
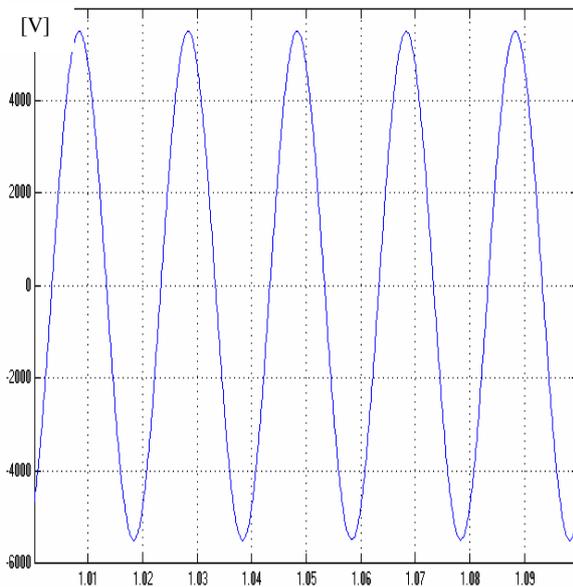
• Après filtrage

- courant



Taux de distorsion harmonique : $T = 2,50 \%$

- tension



Taux de distorsion harmonique : $T = 1,00 \%$

— Interprétations

- on observe que , dans le graphe de spectres d’harmoniques de courant, les harmoniques de rang 5, 7, 9, 11 ont totalement disparu . L’harmonique de rang 13 existe encore mais juste une petite trace. Le taux de distorsion harmonique T est passé de 12,61 % à 2,50 %..

- Dans la représentation des spectres d’harmoniques de tension, on remarque que les harmoniques de rang 7 et 9 ont disparu complètement. L’harmonique de rang 13 reste mais une toute petite trace. Le taux de distorsion passe de 3,36 % à 1,00 % à travers le filtre. D’après ces graphes de spectres, on en conclut que le filtre est efficace pour des rangs pas assez élevés compris entre 5 et 11.

- En général , les filtres utilisés sur les réseaux de distribution électrique sont tous des filtres passe-bas ayant une fréquence de coupure bien déterminée. A cette fréquence de coupure correspond une transmittance du filtre donnée par :

$$\bar{\tau} = \frac{1}{1 + jLC\omega}$$

Cette transmittance définit l’atténuation du filtre.

- L’intégration du filtre dans le réseau provoque un surplus d’appel de courant car le filtre consomme un petit courant au niveau du réseau. Ceci définit l’atténuation du filtre car : le courant consommé par la charge ne varie pas, l’appel de courant en amont du filtre augmente alors il y a une variation de la tension de part et d’autre du filtre. Et l’atténuation est

définie par :

$$A = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V_{2s}}{V_{1s}} \right)$$

Chapitre

8

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

VIII-1- Introduction

L'environnement se définit par l'ensemble des éléments qui constituent l'activité humaine. Il est formé par :

- le Biocénose : formée par l'ensemble des êtres vivants
- le Biotope : formée par l'unité écologique peuplée par la biocénose

Le biocénose et le biotope forment l'entourage biologique et physique c'est à dire : l'homme, la faune, la flore, les ressources naturelles, le climat, le sol.

- l'interaction de ces différents éléments
- les activités faites par ces éléments favorisent ou détériorent l'environnement.

VIII-2- Quelques définitions

VIII-2-1- Electrocutation

L'électrocution signifie la mort immédiate produite par le passage du courant électrique à travers l'organisme.

VIII-2-2- Choc électrique

Le choc électrique est l'effet physiopathologique résultant du passage du courant électrique à travers le corps soit de façon directe ou indirecte

Le contact direct est le contact avec des parties ou conducteurs actifs directement. Le corps humain étant conducteur, le courant électrique passe directement de la partie en contact vers le sol.

Le contact indirect est celui ayant lieu par l'intermédiaire d'une masse.

VIII-3- Impacts causés par le transformateur de puissance

Les effets néfastes dus au transformateur de puissance lui-même sont :

- propagation d'ondes électromagnétiques aux alentours du poste transformateur qui est dangereux pour l'organisme humaine. Cela peut provoquer des troubles cérébrales à long terme se manifestant, souvent, par des pertes de mémoire et détérioration de la vue. L'onde électromagnétique, à une certaine fréquence, attaque directement les organes liés au cerveau.

- propagation dans l'air d'ondes électromagnétiques aux alentours des lignes de transport d'énergie. Les lignes aériennes, en HT (haute tension) ou en MT (moyenne tension), ne sont pas isolées en général car les courants qu'elles transportent sont très grandes (de 1000 à 10000A) pour une tension aux bornes de 220000KV en HT ou 60000KV en MT.

Donc aucun isolant filaire ne peut supporter ces valeurs de tension et courant. La propagation d'ondes électromagnétiques dans l'air est alors inévitable.

■ bruit des transformateurs : souvent, les transformateurs de puissance génère de grands bruits permanents Ce qui peut gêner les habitations aux alentours. La puissance et la fréquence des bruits doivent être aussi en dessous du seuil tolérable d'écoute pour l'ouïe humaine qui est de l'ordre de 6db.

VIII-4- Impacts causés par les phénomènes transitoires

Les phénomènes transitoires d'un transformateur sont des phénomènes qui apparaissent en un court instant. Au cours de ces phénomènes, les variables de sortie du transformateur (tension et courant secondaire) croient considérablement (environ 10 fois la tension nominale) Ceci se manifeste lors de l'enclenchement du transformateur ou par des éclairs affectant les lignes en amont. Il y a alors surtension et surintensité en aval qui peuvent faire craquer les isolants, les bornes et même jusqu'à griller le transformateur même. La surtension peut arriver aux abonnés et le risque de choc électrique et d'électrocution est à craindre.

Voici le tableau donnant l'effet du courant électrique sur le corps humain :

Intensités	Effets
0 à 0.5[mA]	Aucune sensation
0.5 à 10	Faible sensation
10 à 30	Tétanisation des muscles
30 à 75	Seuil paralysie respiratoire
75 à 100	Seuil de fibrillation cardiaque

Tableau (8-1) liste des effets du courant sur l'homme

VIII-5- Solutions

■ pour la propagation des ondes du transformateur, il faut que le poste transformateur soit assez éloigné des zones d'habitation (à une distance bien déterminée par calcul) pour que les ondes n'atteignent pas la population.

■ pour la propagation sur les lignes, placer les lignes bien hautes et intercalées entre eux pour éviter les accidents et réduire l'effet des ondes véhiculés par l'air.

■ pour le bruit des transformateur, le corps du transformateur même est plongé dans de l'huile spéciale pour le refroidissement mais aussi pour la réduction du bruit. Le circuit magnétique est fixé sur un support pour réduire les vibrations qui est à l'origine des bruits. Evidement, comme cité auparavant, le poste transformateur doit être assez éloigné des zones d'habitation.

■ pour les surtensions et surintensités, les prises de terre évitent la propagation vers les abonnés.

Ces solutions sont déjà en place mais c'est surtout au niveau de la maintenance des appareils de protection qu'il faut bien surveillée. Car l'usure diminue la fiabilité des composants et la faculté de résistance des isolants.

VIII-6-Avantages de l'étude

L'étude de propagation des phénomènes transitoires permet de bien dominer le régime permanent d'un transformateur. L'impact des grandeurs transitoires au niveau des constituants internes du transformateur, des isolants et des lignes est indispensable à savoir car le claquage des isolants dû aux surtensions provoque des accidents mortels. Des arcs électriques se forment entre câbles et sol ou entre deux câbles sous tension et qui provoquent, souvent, des feux de brousse pour les lignes sur les pylônes. Il y a aussi danger pour les lignes de distribution en ville.

Alors, la maîtrise du régime transitoire permet de bien dimensionner les isolants et d'éviter des accidents fatals.

VIII-7- Conclusion

Le courant électrique est indispensable pour l'homme. A partir du central de production, passant par le transport jusqu'à la distribution, le transformateur constitue un élément essentiel pour le réseau. L'étude de ses différents comportements est nécessaire pour prévoir les impacts provoqués par le transfo sur l'environnement. Cela permet de minimiser les risques d'accidents afin de préserver l'environnement.