

4/91
Sex

وزارة الجامعات
Ministère aux Universités

المدسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE PAR SIMULATION DE LA
POLLUTION HARMONIQUE DANS
LES RESEAUX DE TRANSPORT
D'ENERGIE ELECTRIQUE

Proposé par :
A.BENSENOUCI

Etudié par :
BOUROUBA
Djamel-eddine

Dirigé par :
A.BENSENOUCI

RABEHI
Sid-Ali Redouane

PROMOTION
Juin 1991

وزارة الجامعات
Ministère aux Universités

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE PAR SIMULATION DE LA
POLLUTION HARMONIQUE DANS
LES RESEAUX DE TRANSPORT
D'ENERGIE ELECTRIQUE

Proposé par :
A.BENSENOUCI

Etudié par :
BOUROUBA
Djamel-Eddine

RABEHI
Sid-Ali Redouane

Dirigé par :
A.BENSENOUCI

PROMOTION
Juin 1991

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier toutes les personnes sans lesquelles ce travail n'aurait pu être mené à terme.

Je dédie ce fruit

à mes parents,

à ma soeur,

à mon frère.

Djamel-Eddine.

Je dédie ce travail

à mon père,

à ma mère,

à mon frère Amine

et mes soeurs

Amel,

Goucem,

Tamani.

Sid-Ali.

SOMMAIRE :

| | | |
|-----|---|----|
| I | - Introduction générale..... | 1 |
| II | - Introduction à l'étude harmonique des RTEE..... | 2 |
| | II.1 - Nécessité de l'étude..... | 2 |
| | II.1.1 - Effets des harmoniques..... | 2 |
| | II.1.2 - Parade aux harmoniques..... | 4 |
| | II.2 - Les différentes approches de l'analyse harmonique..... | 4 |
| III | - Mise en oeuvre de la méthode d'analyse par écoulement de puissance harmonique..... | 7 |
| | III.1 - Description de la méthode..... | 7 |
| | III.2 - Modélisation des éléments du réseau..... | 10 |
| | III.3 - Résolution numérique..... | 19 |
| | III.3.1 - Méthode de Newton-Raphson..... | 19 |
| | III.3.2 - Méthode d'optimisation..... | 22 |
| | III.3.3 - Comparaison des deux méthodes..... | 23 |
| | III.3.4 - Mise en oeuvre informatique..... | 24 |
| IV | - Application aux polluants sidérurgiques..... | 28 |
| | IV.1 - Présentation des polluants rencontrés en sidérurgie..... | 28 |
| | IV.1.1 - Les fours à arcs..... | 28 |
| | IV.1.2 - Les redresseurs..... | 30 |
| | IV.2 - Exemple d'application..... | 32 |
| | IV.3 - Application au projet 'SIDER Bellara'..... | 41 |

IV.4 - Application au projet 'Metal-SIDER, PROFILOR

L'ARBÂA'..... 45

V - Conclusion..... 49

- Annexes

- A (Définitions sur les harmoniques)..... 51

- B (Expression des dérivées du jacobien)..... 53

- C (Questions-Réponses sur le "Flicker")..... 58

- D (Données des réseaux étudiés)..... 61

- Bibliographie..... 65

Liste des notations

| Symboles | Désignation |
|---|--|
| $[V]^{(k)}$ | Vecteur tension du $k^{\text{ième}}$ harmonique |
| $[Z]^{(k)}, [Y]^{(k)}$ | Matrice impédance/admittance du $k^{\text{ième}}$ harmonique |
| n | Nombre total de nœuds |
| n_{PV} | Nombre de nœuds PV |
| n_l | Nombre de nœuds NL (non-linéaire) |
| h | Nombre total d'harmoniques |
| i, l, m | Indices nodaux |
| j, k, h_1, h_2 | Indices d'harmoniques |
| $V^{(k)}$ | Module de la tension du $k^{\text{ième}}$ harmonique |
| $\delta^{(k)}$ | Phase à l'origine du $k^{\text{ième}}$ harmonique |
| $Y_{11}^{(k)}$ | Module de l'élément il $[Y]^{(k)}$ |
| $\theta_{11}^{(k)}$ | Phase de l'élément il $[Y]^{(k)}$ |
| $g_m^{(k)}$ | Module du courant du $k^{\text{ième}}$ harmonique injecté au nœud m |
| $\varphi_m^{(k)}$ | Phase du courant du $k^{\text{ième}}$ harmonique injecté au nœud m |
| $\phi_m^{(k)} = \delta_m^{(k)} + \varphi_m^{(k)}$ | |
| $g_{m,r}^{(k)}$ | Partie réelle du courant du $k^{\text{ième}}$ harmonique injecté au nœud m |
| $g_{m,i}^{(k)}$ | Partie imaginaire du courant du $k^{\text{ième}}$ harmonique injecté au nœud m |
| P | Puissance active |
| Q | Puissance réactive |

Chapitre I

INTRODUCTION:

La pollution harmonique constitue une forme de détérioration de la qualité de tension. L'abondante prolifération de l'électronique de puissance et l'essor de certaines industries ces dernières années, constituent un risque certain de perturbation dans les réseaux de transport d'énergie électrique.

Le but de notre travail est de mettre en oeuvre une méthode de prédétermination de l'état harmonique d'un réseau contenant des charges non-linéaires.

Après avoir défini, le concept et les effets de la pollution harmonique et donné un aperçu sur les différentes approches d'analyse du problème, nous entreprenons la mise en forme mathématique de la méthode d'analyse choisie, ainsi que la présentation des méthodes numériques adoptées et les problèmes s'y rattachant (stabilité, mémoire,...).

Enfin, différentes applications sont effectuées. D'abord un exemple simplifié pour mettre en évidence l'effet des différents paramètres (numériques ou physiques) ayant trait au problème, puis la simulation du fonctionnement des usines sidérurgiques des projets 'SIDER - Bellara' et 'METAL SIDER - Larbâa' afin de prédéterminer leurs effets sur leur réseau régional respectif.

Chapitre II

II - INTRODUCTION À L'ÉTUDE HARMONIQUE DES RTEE:

II.1 - Nécessité de l'étude:

II.1.1 - Effets des harmoniques:

La nécessité des études harmoniques s'est faite ressentir, au fur et à mesure de l'identification des effets des harmoniques sur les éléments du réseau et sur la qualité de service. On pourrait citer comme effets:

- La distorsion de l'onde de tension: La présence des harmoniques déforme l'onde de tension d'où perturbation du fonctionnement des appareils électroniques et relais électromagnétiques (décalage du passage à zéro, du maximum).

- L'échauffement des machines, par courants de Foucault et hystérésis.

- L'apparition de couples parasites dans les machines asynchrones, pouvant entraîner des dysfonctionnements importants (vibrations, point de fonctionnement à glissement important).

- Les résonances: La présence de compensateurs statiques dans un réseau électrique, peut entraîner l'annulation de la réactance de ce dernier à la fréquence considérée. Ce phénomène peut apparaître, même loin de la charge perturbatrice.

- Les anti-résonances: Ce phénomène se caractérise par une valeur maximale de l'impédance du réseau vue par la charge. Et pour peu que cette dernière se comporte comme une source de courant harmonique (Voir modèle convertisseur AC/DC, four), on observera donc des surtensions, pouvant dépasser 7 à 8 fois la valeur de la tension considérée dans le cas d'un réseau pur (sans compensation) [LEM 78].

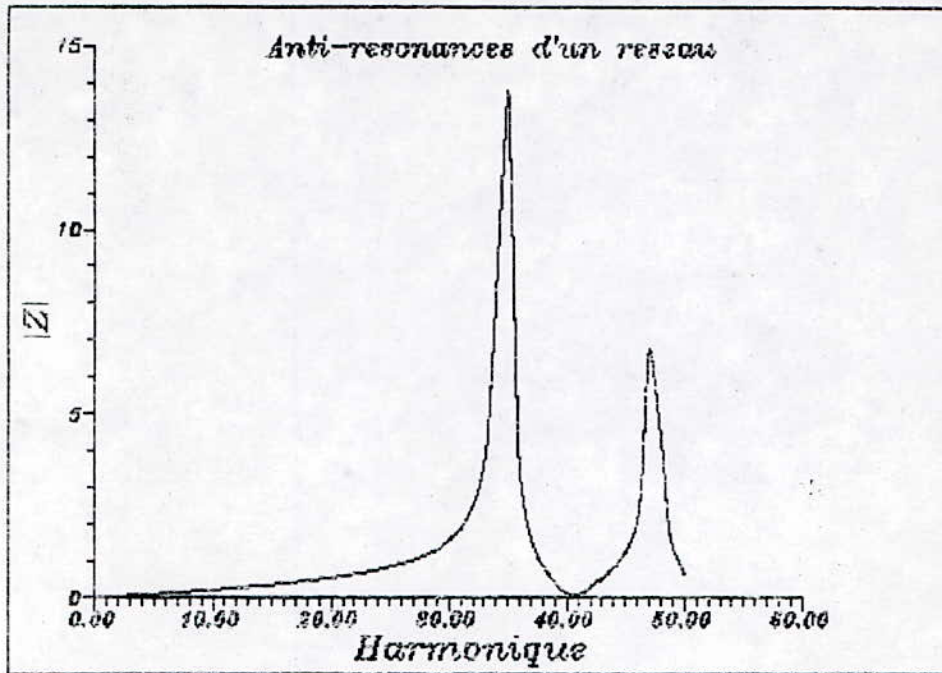


Fig II.1.1-1

- Les surchauffes des condensateurs, lors des surtensions (anti-résonance 5 à 7 V_{max} ; distorsions 1,1 à 1,3 V_{max}), sont très 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 % [MIL 82].

- L'interférence avec les signaux de commande du réseau (Commande à distance de postes, de compteurs d'énergie ...).

- Les bruits téléphoniques, par effet d'induction, lorsque les lignes sont proches.

De part ces effets, l'analyse harmonique des réseaux électriques devient une partie importante des études de réseaux, tout comme les études classiques de répartition de puissances et celle de stabilité.

II.1.2 - Parades aux harmoniques:

Même si parfois certaines techniques, comme l'utilisation de transformateurs à couplages particuliers ou de redresseurs dodécaphasés, sont adoptées, il n'en reste pas moins que la réponse classique à la présence des harmoniques dans les réseaux, est l'utilisation des filtres. Ces derniers, étant composés de circuits résonnants LC, peuvent, s'ils sont mal dimensionnés, être la cause de résonnances ou d'anti-résonnances parallèle avec le réseau, et sont difficiles à prévoir [LEM 78], [MIL 82]. C'est pour cela que des méthodes de simulation et d'analyse harmoniques sont effectuées.

II.2 - Différentes approches de l'analyse harmonique:

L'approche classique considère la charge perturbatrice, le réseau amont, et prédétermine les résonnances éventuelles du réseau seul ou avec le système de compensation.

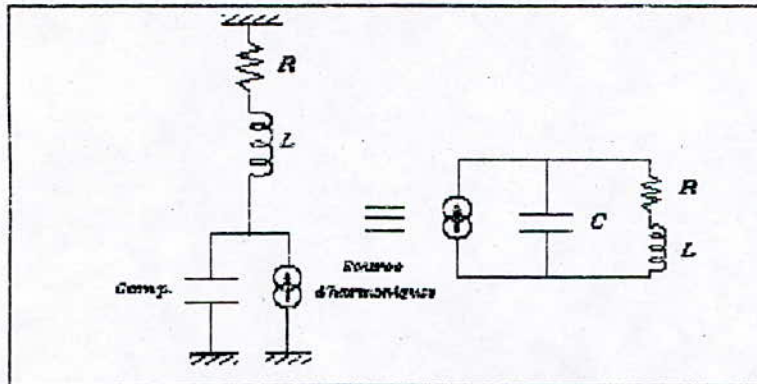


Fig II.2-1

La recherche de la sensibilité fréquentielle du réseau est faite au noeud perturbateur uniquement.

Il est très important d'essayer de se rapprocher le plus possible de l'image réelle du réseau, en tenant compte de la

présence des charges, de leur type, de leur taux de présence et de leur représentation harmonique, ainsi que celle des lignes (effet de peau, effet de distribution des paramètres des lignes ...).

Il faut signaler que cette méthode ne permet pas de déterminer le taux de distorsion harmonique en chaque noeud, la circulation de puissance harmonique ainsi que les pertes dans le réseau et dans les charges dues aux fréquences autres que la fondamentale.

Cette dernière approche nécessite la connaissance des harmoniques que produit la charge, si l'on veut voir ses effets sur le réseau [KIM 71], [LEM 78], [MIL 82].

Une autre approche, consiste à déterminer les niveaux de tensions harmoniques, par injection des courants au noeud perturbateur, moyennant la matrice $[Z]^{(k)}$ du réseau:

$$V^{(k)} = [Z]^{(k)} \cdot [I]^{(k)}$$

On remarquera que cette méthode ne tient pas compte de l'interaction tension-courant. Néanmoins, elle peut être utilisée comme première approximation.

Une analyse plus complète du régime harmonique du réseau, consisterait à effectuer un calcul d'écoulement de puissance harmonique (méthode itérative contrairement aux précédentes) où l'interaction, charge non-linéaire-réseau, pourrait être prise en compte, vue que, selon le modèle de la charge ce dernier

tiendrait compte de l'évolution harmonique du réseau au cours du calcul.

L'interaction tension-courant de circulation de même pulsation serait assurée par l'expression du bilan de puissance complexe totale, tenant compte de la participation, de tous les harmoniques dans le développement de la puissance, et la présence de plusieurs charges perturbatrice serait possible.

Comme pour la première approche la représentation fidèle du réseau en régime harmonique est critique.

Plusieurs publications ont été faites [TAM 88], chacune essayant de simplifier la formulation du problème, au prix de certaines hypothèses ou manipulations pénalisantes. Le but étant de calculer le plus rapidement possible l'état harmonique du réseau.

Parcontre, l'approche qu'ont effectuée Heydt & Xia, demeure la plus rigoureuse, mais aussi la plus compliquée. Grady (élève de Heydt), a continué à travailler sur le même sujet en développant les modèles harmoniques des convertisseurs, et des lampes à gaz.

Le travail qu'il a effectué pour l'Electric Power Research Institut (EPRI), nous a permis de reprendre la même approche et d'essayer de la mettre en oeuvre.

Chapitre III

III - MISE EN OEUVRE DE L'ANALYSE PAR LA METHODE D'ÉCOULEMENT

DE PUISSANCE HARMONIQUE:

III.1 - Description de la méthode:

Notre but est de déterminer le spectre harmonique de la tension en chaque noeud du réseau, en régime équilibré et stable.

Pour un réseau contenant:

- n noeuds dont n_l non-linéaires
- h harmoniques (fondamental compris)

On a les inconnues suivantes:

| | | |
|-------------------------|---|---------------------|
| $\delta^{(1)}$ | pour tous les noeuds sauf le noeud bilan | n-1 |
| $V^{(1)}$ | pour tous les noeuds sauf le noeud bilan et les noeuds PV | n-1-n _{PV} |
| $\delta^{(k)}, V^{(k)}$ | pour tous les noeuds; k=2..h | 2n(h-1) |
| P, Q | au noeud bilan | 2 |
| | | <hr/> |
| | | 2nh-n _{PV} |

Celles-ci sont les inconnues principales, il nous faut donc autant d'équations indépendantes pour les déterminer.

On a le:

Bilan de puissance active de la fréquence fondamentale en chaque noeud linéaire n-n_l

Bilan de puissance réactive de la fréquence fondamentale en chaque noeud (sauf noeud linéaire et PV) n-n_{PV}-n_l

Bilan de puissance active et réactive en
chaque noeud non-linéaire

2nl

Bilan des courants harmoniques réels et
imaginaires en chaque noeud (excepté le
fondamental)

2n(h-1)

2nh-n_{pv}

On a donc autant d'équations que d'inconnues.

On rappellera que:

Le bilan de puissance complexe s'exprime comme suit:

- au noeud linéaire i:

$$V_i^{(1)} \sum_{l=1}^n V_l^{(1)} Y_{il}^{(1)} \exp[j(\delta_i^{(1)} - \delta_l^{(1)} - \theta_{il}^{(1)})] - S_i = 0$$

- au noeud non-linéaire m :

$$\sum_{k=1}^h V_m^{(k)} \sum_{l=1}^n V_l^{(k)} Y_{ml}^{(k)} \exp[j(\delta_m^{(k)} - \delta_l^{(k)} - \theta_{ml}^{(k)})] - S_m = 0$$

Où

$$S = P + Q$$

P : spécifiée

Q : spécifiée pour les
noeuds linéaires sinon
calculée pour les noeuds NL
selon:

$$Q_m = \sum_{k=1}^h V_m^{(k)} g_m^{(k)} \sin(\delta_m^{(k)} - \varphi_m^{(k)})$$

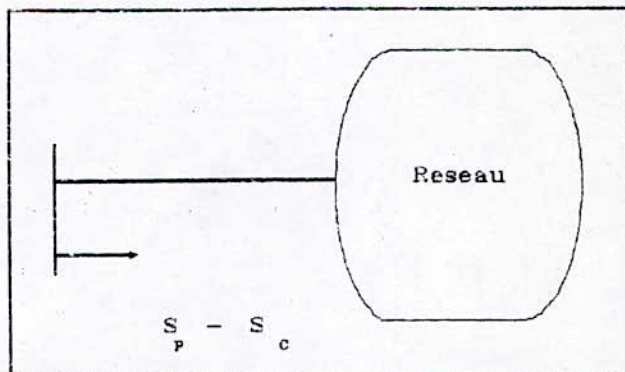


Fig III.1-1

Pour les noeuds non-linéaires Q est une inconnue secondaire.

Le bilan en courant d'harmonique k s'exprime comme suit:

- au noeud linéaire i :

$$\sum_{l=1}^n V_l^{(k)} Y_{il}^{(k)} \exp[j(\delta_l^{(k)} + \theta_{il}^{(k)})] - 0$$

- au noeud non-linéaire m :

$$\sum_{l=1}^n V_l^{(k)} Y_{ml}^{(k)} \exp[j(\delta_l^{(k)} + \theta_{ml}^{(k)})] + g_m^{(k)} - 0$$

où

$$g_m^{(k)} = g_{m,r}^{(k)} + jg_{m,i}^{(k)}$$

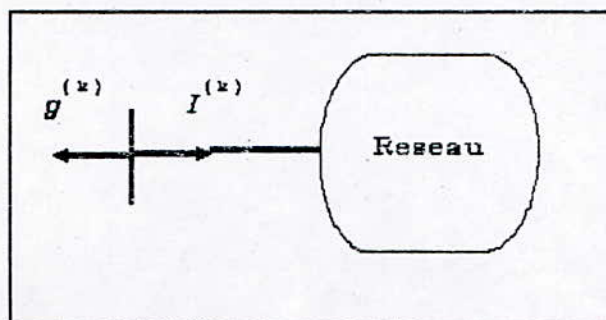


Fig III.1-2

Remarque:

Le bilan de puissance et de courant au noeud linéaire ne tient pas compte de la consommation harmonique en ces noeuds, car cette dernière sera prise en considération lors de la modélisation du réseau [§ Chap.III]

En conclusion, on peut dire que du point de vue physique le problème à résoudre est en fait un problème de circulation

de puissance harmonique, et que du point de vue mathématique, on a un système à $2nh-n_{pv}$ équations non-linéaires à résoudre.

III.2 - Modélisation des éléments du réseau:

On rappelle les hypothèses en considération desquelles les modèles suivants sont développés.

Le réseau est supposé fonctionner en régime stable et équilibré.

III.2.1 - Réseau de transport:

a) Les lignes: Selon l'harmonique considéré le réseau présentera des admittances particulières vu que:

1- Les résistances sont sujettes à l'effet de peau: Si $r_{AC} \neq r_{DC}$ à 50 Hz, ce n'est plus le cas pour les fréquences supérieures. En effet, soit:

$$\chi = \frac{r_{AC}}{r_{DC}}$$

χ évolue [GRA 83] selon l'expression suivante :

$$\chi = 0.356 a + 0.288 \quad \text{avec} \quad 2 \leq a \leq 10$$

où

$$a = \sqrt{\frac{2\mu_0 f}{r_{DC}}} = 0.356 \sqrt{\frac{k}{r_{DC}}}$$

avec

μ_0 : perméabilité magnétique dans le vide.

f : fréquence $f = k.f_0$ ($f_0 = 50$ Hz).

r_{DC} : résistance DC linéique [Ω/km].

k : ordre de l'harmonique (multiple de 50 Hz).

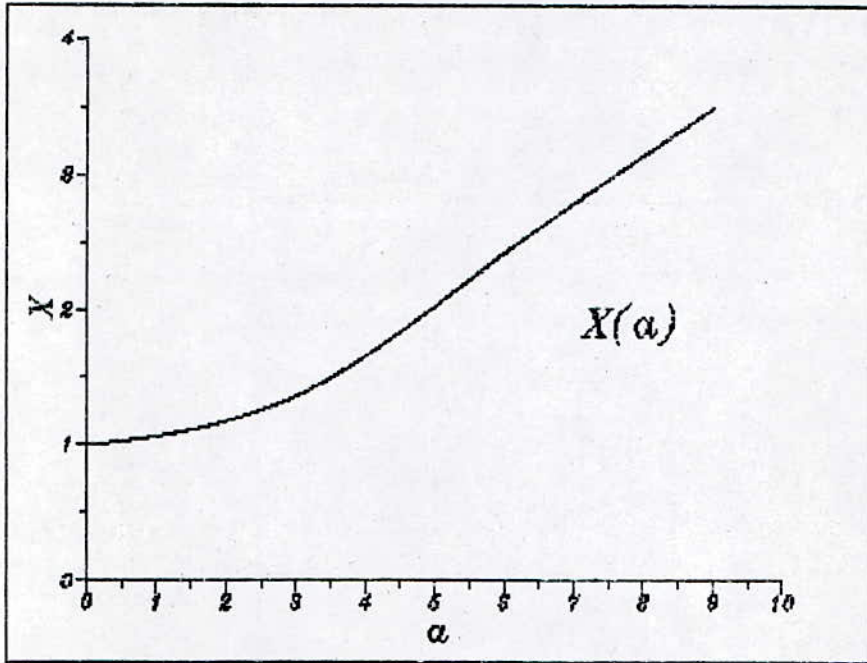


Fig III.2.1 - 1

Exemple:

Soit une ligne de 100 km, présentant une résistance de 9 Ω , le rapport r_{AC}/r_{DC} évolue comme suit:

| k | x |
|-----|------|
| 5 | 1.23 |
| 7 | 1.40 |
| 11 | 1.68 |
| 13 | 1.80 |

2- Pour les basses fréquences les réactances sont proportionnelles à ces dernières. La ligne a pour modèle donc:

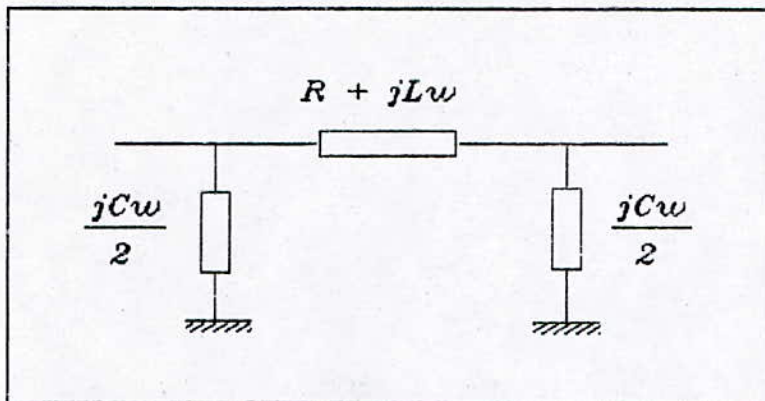


Fig III.2.1 - 2
Modèle de ligne à C^{st} localisée

Si la longueur L de la ligne est supérieure à 5% de la longueur d'onde (de la fréquence considérée), alors la ligne devient à constantes réparties et a pour représentation le modèle suivant:

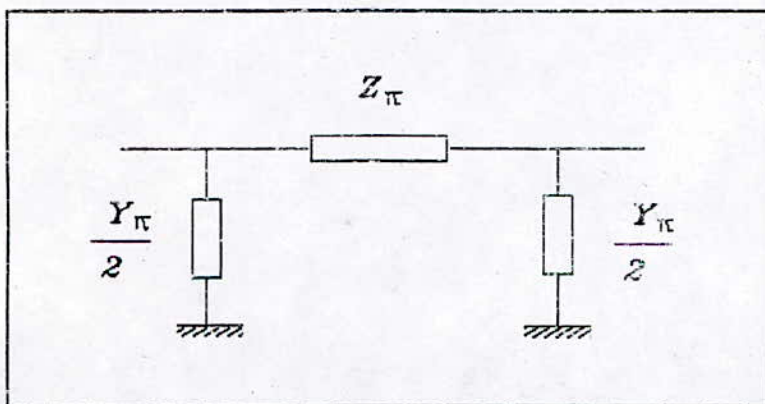


Fig II.2.1 - 3
Modèle de ligne à C^{st} réparties

où

$$Z_{\pi} = Z_0 \sinh(\gamma L)$$

$$Y_{\pi} = \frac{1}{Z_0} \tanh\left(\frac{\gamma L}{2}\right)$$

avec

$$Z_0 = \sqrt{\frac{(R+jL\omega)}{(G+jC\omega)}}$$

$$\gamma = \sqrt{(R+jL\omega)(G+jC\omega)}$$

où

- R : résistance linéique de la ligne.
- $L\omega$: réactance linéique de la ligne à 50 Hz.
- G : conductance linéique de la ligne.
- $C\omega$: susceptance linéique de la ligne à 50 Hz.
- Z_0 : impédance caractéristique de la ligne.
- γ : coefficient de propagation de la ligne.

b) Transformateur: En général, le modèle harmonique du transformateur doit tenir compte de l'aspect capacitif que présente tout espace diélectrique. En effet, la coexistence de l'aspect capacitif et inductif du transformateur peut créer des circuits résonants [TAM 88].

N'ayant pas eu accès à un tel modèle, nous avons considéré le modèle en π (Pi) des transformateurs en ne tenant compte que de la réactance proportionnelle à la fréquence.

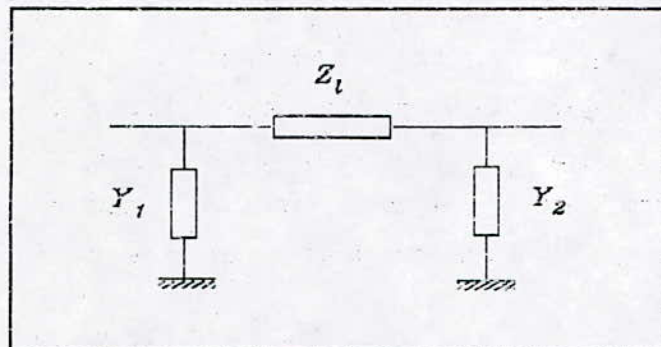


Fig III.2.1-4
Modèle Pi du transformateur

$$Z_0 = aZ_{cc}$$

$$Y_1 = \frac{1}{Z_{cc}} \cdot \frac{1-a}{a^2}$$

$$Y_2 = \frac{1}{Z_{cc}} \cdot \frac{a-1}{a}$$

avec Z_{cc} : impédance
 a : déphasage complexe introduit par le transformateur.

Remarque: Du point de vue circulation dans le réseau la prise en considération des séquences (directe, inverse et homopolaire) est importante. Mais, du fait qu'on isole notre réseau, en général, de la charge perturbatrice par des transformateurs à couplage YD ou YZ les harmoniques à séquence homopolaire ne peuvent circuler. Il reste les harmoniques à séquence directe et inverse, ceux-ci voient un réseau identique, donc une modélisation unique est suffisante [STE 82].

c) Charges: Afin de tenir compte de la présence des charges et de leurs influences dans l'étude harmonique, on les représente par des modèles adéquats, qui tiennent compte de leur comportement harmonique. Ainsi, on modélise [GRA 83], [LAG 82], [TAM 88].

Les machines synchrones: La machine synchrone en régime harmonique est modélisée par l'inductance de sa réactance inverse:

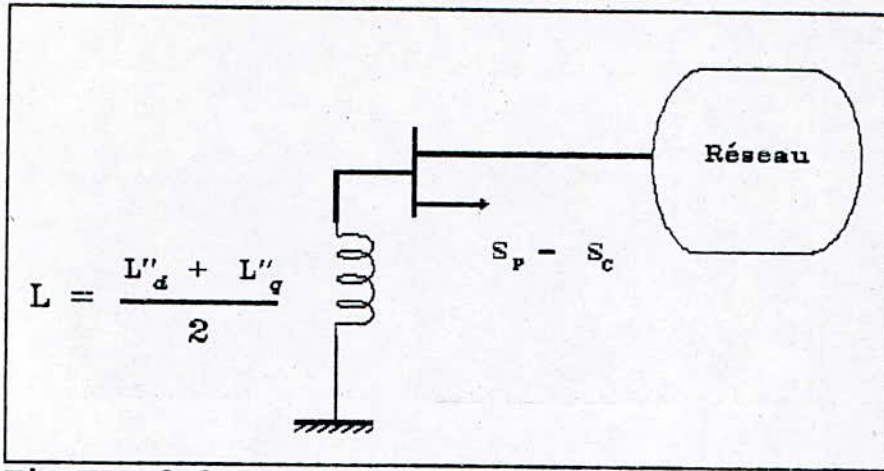


Fig III.2.1-5

Les machines asynchrones: Le modèle classique est représenté en figure III.2.1-6.

considère la branche L_m ouverte, vu que la réactance correspondante augmente proportionnellement avec la fréquence, ce qui donne:

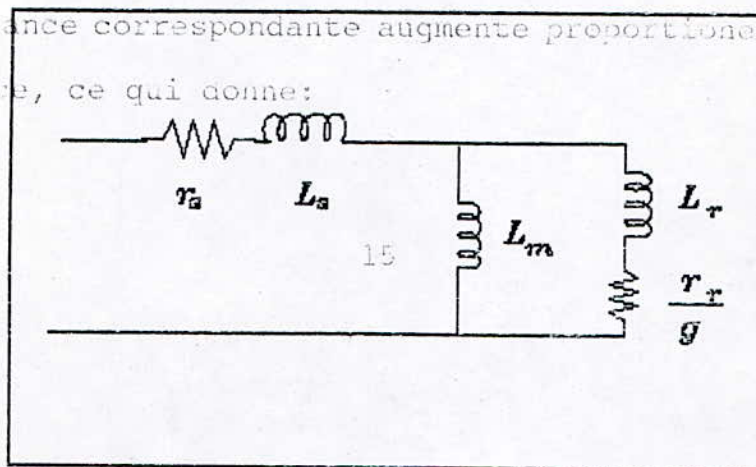


Fig III.2.1-6

Modèle classique de la machine asynchrone

En régime harmonique, on considère la branche L_m ouverte, vu que la réactance correspondante augmente proportionnellement avec la fréquence, ce qui donne:

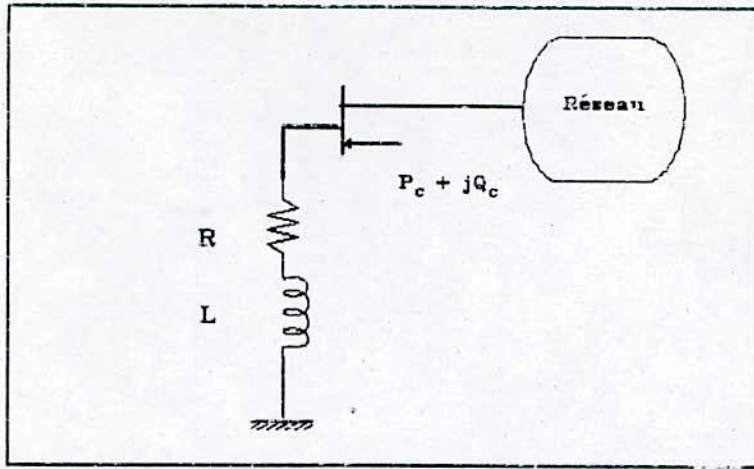


Fig III.2.1-7
Modèle de la machine asynchrone en régime harmonique

où on détermine R et L d'après

$$V^{(1)} \left[\frac{V^{(1)}}{R + jL\omega_0} \right]^* = P_c + jQ_c$$

Charge quelconque: Afin de tenir compte de la consommation de cette dernière en énergie active et réactive on la représente selon le figure III.2.1-8.

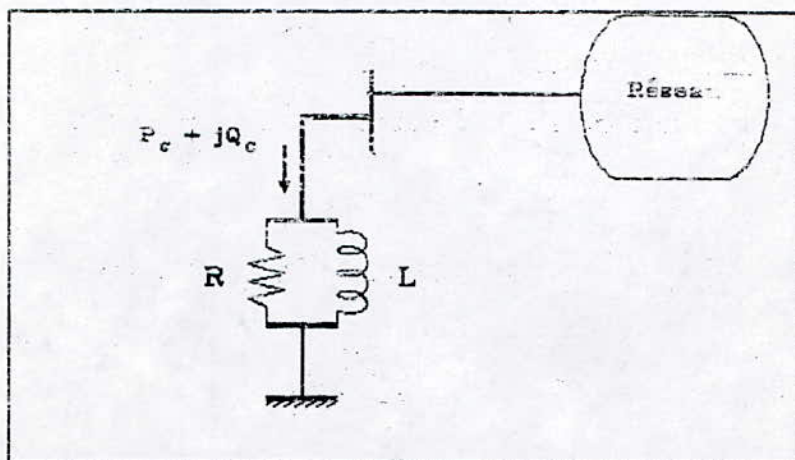


Fig III.2.1-8
Modèle de charge quelconque en régime harmonique

où

$$R = \frac{[V^{(1)}]^2}{P_c}$$

$$L = \frac{[V^{(1)}]^2}{Q_c \omega_0}$$

N.B.: Si $Q_1 < 0$ on remplace L par $1/C$ tel que:

$$C = \frac{Q_c}{(V^{(1)})^2 \omega_0}$$

d) Compensation: On représente la compensation comme indiqué en figure II.2.1 - 9.

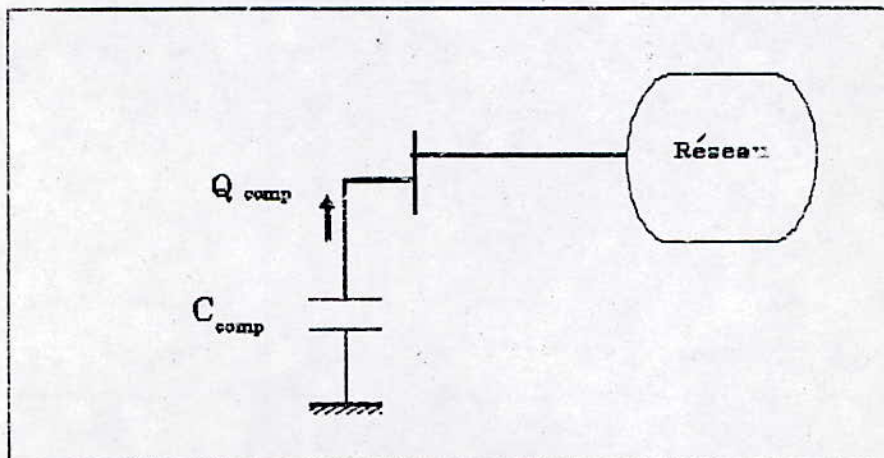


Fig III.2.1-9
Représentation de la compensation

avec

$$C_{comp} = \frac{Q_{comp}}{(V^{(1)})^2 \omega_0}$$

e) Charge non-linéaire: Les charges non linéaires sont matérialisées par une injection de courant plutôt que par une réactance donnée. Il faudrait donc avoir le spectre de la charge ou bien simuler cette dernière pour avoir ce spectre en fonction de la tension d'alimentation.

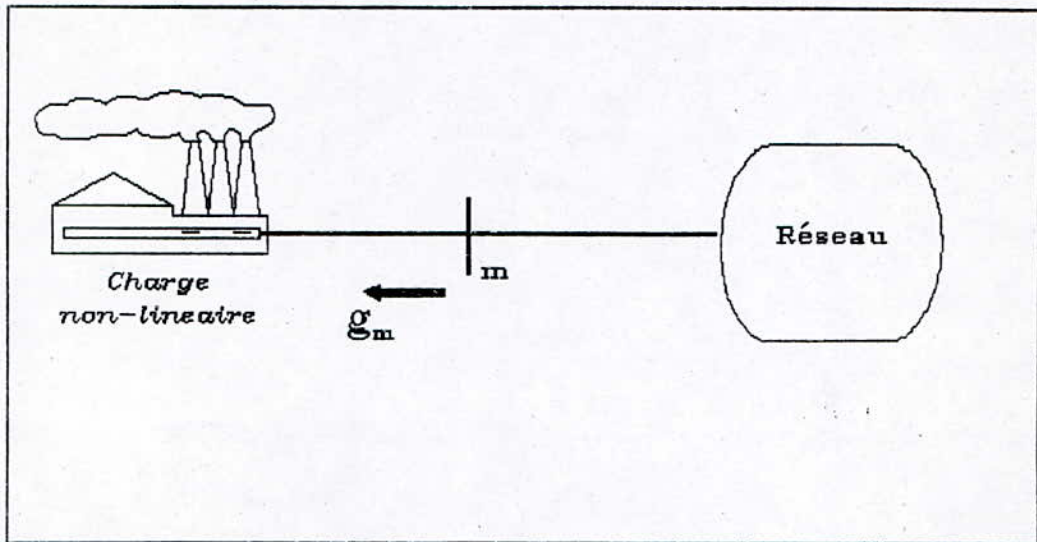


Fig III.2.1-10
Représentation des charges non-linéaires

où

$$g_m = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} g^{(k)} \exp[j(k\omega_0 t + \varphi^{(k)})]$$

Remarque: En général, les spectres qui sont prédéterminés sont obtenus à partir d'une alimentation purement sinusoïdale, alors que la rigueur voudrait que l'on tienne compte de l'effet de la présence d'harmoniques de tension sur la charge. d'où l'importance de la simulation des charges non-linéaires à partir d'un modèle complet.

III.3 - Résolution numérique:

Généralement, la résolution des problèmes d'écoulement de puissance se fait, soit par la méthode de Gauss-Seidel (GS) ou (et surtout) par la méthode de Newton-Raphson (NR). [STE 82]

Ces méthodes sont des méthodes itératives, comme toute celle utilisées pour la résolution des systèmes d'équations non-linéaires. Quoique la méthode de GS offre quelques avantages, facile à programmer et prend moins de mémoire si la propriété de creux est utilisée, le principal inconvénient est que sa convergence est lente. La méthode de NR est une alternative car elle présente une convergence quadratique lorsque l'on se rapproche de la solution. Ceci a justifié notre choix pour la dernière.

III.3.1 - Méthode de Newton-Raphson:

Le principe est le suivant:

Soit le système:

$$F(X) = \begin{cases} f_1(x_1 \dots x_n) = 0 \\ \vdots \\ f_n(x_1 \dots x_n) = 0 \end{cases}$$

On forme le jacobien

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

On calculera l'itéré X^{n+1} tel que:

$$X^{n+1} = X^n + \Delta X$$

ou ΔX est solution de

$$F(X) = -J \cdot \Delta X$$

Le critère d'arrêt, sera le test $F(X^{n+1}) < \epsilon$

En appliquant le principe de cette méthode à notre système d'équations on obtient ce qui suit:

$$F(X) = [\Delta W, \Delta I^{(2)}, \Delta I^{(3)}, \dots, \Delta I^{(h)}]^T$$

$$J = \begin{bmatrix} J^{(1)} & J^{(2)} & \dots & J^{(k)} & \dots & J^{(h)} \\ G^{(2,1)} & TG^{(2,2)} & \dots & G^{(2,k)} & \dots & G^{(2,h)} \\ G^{(k,1)} & G^{(k,2)} & \dots & TG^{(k,k)} & \dots & G^{(k,h)} \\ G^{(h,1)} & G^{(h,2)} & \dots & G^{(h,k)} & \dots & TG^{(h,h)} \end{bmatrix}$$

et

$$\Delta X = [\Delta V^{(1)}, \Delta V^{(2)}, \dots, \Delta V^{(h)}]^T$$

avec

$$\Delta W = [f_{1,r} - P_1, f_{1,i} - Q_1, \dots, f_{n,r} - P_n, f_{n,i} - Q_n]^T$$

: le mismatch en puissance.

$$\Delta I^{(k)} = [I_{1,r}^{(k)}, I_{1,i}^{(k)}, \dots, I_{m-1,r}^{(k)}, I_{m-1,i}^{(k)}, I_{m,i}^{(k)} + g_{m,r}^{(k)}, I_{m,i}^{(k)} + g_{m,i}^{(k)}, \dots, I_{n,r}^{(k)} + g_{n,r}^{(k)}, I_{n,i}^{(k)} + g_{n,i}^{(k)}]^T$$

: le mismatch en courant.

$J^{(1)}$: Jacobien composé des dérivées partielles de f_r et de

f_i par rapport à $V^{(1)}$ et $\delta^{(1)}$ pour tous les noeuds.

$J^{(k)}$: Jacobien composé des dérivées partielles de f_r et de f_i par rapport à $V^{(k)}$ et $\delta^{(k)}$ pour les noeuds non-linéaires seulement.

$$TG^{(k,k)} = T^{(k,k)} + G^{(k,k)}$$

$T^{(k,k)}$: dérivées partielles des courants de circulation du $k^{\text{ième}}$ harmonique par rapport aux tensions du réseau de même pulsation (k).

$G^{(j,k)}$: dérivées partielles du courant $g^{(j)}$ (absorbé par la charge non-linéaire) par rapport à la tension d'harmonique k du même noeud.

(Voir annexe B pour l'expression des dérivées).

enfin

$$\Delta V^{(k)} = [\Delta \delta_1^{(k)}, \Delta V_1^{(k)}, \dots, \Delta \delta_n^{(k)}, \Delta \delta_n^{(k)}]^T$$

Comme pour toute méthode itérative, il faut choisir des valeurs initiales de V et de δ pour amorcer la résolution. Pour ne pas tomber sur une solution particulière, ou une divergence leur estimation doit être faite avec une assez bonne précision. C'est pour cela que l'on utilise des méthodes de prédétermination non précises mais suffisantes pour l'amorçage. Ces méthodes doivent être simples, donc sont le plus souvent directes.

Néanmoins, parfois, la convergence est difficile à obtenir, voir impossible, surtout lorsque le nombre de variables est important, problème que nous avons rencontré dans notre travail.

III.3.2 - Méthode d'optimisation:

Pour parer aux problèmes de stabilité de la méthode précédente nous avons opté pour la méthode d'optimisation.

Inspirée de la méthode de VIGNES [VIG 81], nous avons appliqué des méthodes d'optimisation pour la résolution de notre système d'équations. Le principe est le suivant:

Soit le système d'équations non-linéaires:

$$F(X) = \begin{cases} f_1(x_1 \dots x_n) = 0 \\ \vdots \\ f_n(x_1 \dots x_n) = 0 \end{cases}$$

on construit la fonction objective:

$$\psi(X) = \sum_{i=1}^n f_i^2(x_1, \dots, x_n)$$

et on cherche son minimum nul.

Ceci équivaut donc, à la recherche de la solution du système sus-cité.

Il existe pour cela, plusieurs méthodes. La plus connue est celle du gradient, elle a engendrée plusieurs autres (gradient conjuguée...) basées toutes sur le même principe [BAZ 79]. Elles sont toutes itératives, vu la nature du problème. A partir d'un point initial une suite décroissante de ψ est calculée d'après un déplacement ΔX déterminé à chaque itération:

$$\Delta X = - \lambda d$$

où d est la direction donnée par la méthode choisie. La méthode du gradient donne $d^{(n+1)}$ selon la plus grande pente de ψ ("Steepest descent"):

$$d^{(n+1)} = - \frac{\nabla \psi^{(n)}}{\|\nabla \psi^{(n)}\|}$$

et λ est le facteur de déplacement optimal dans la direction prédéterminée.

Il existe plusieurs méthodes de recherche de λ_{opt} donnant ψ_{min} , on pourrait citer:

- La méthode dichotomique.
- La méthode du nombre d'or.

Les méthodes dites du gradient sont efficaces au début, mais au voisinage de la solution, elles perdent de leur efficacité (lenteur, zig-zag). Pour cela de meilleures méthodes existent: ce sont les méthodes de type newtonien.

Dans notre travail, nous avons retenu deux méthodes d'optimisation:

- celle du gradient
- et la pseudo-newtonienne,

en retenant à chaque fois celle qui donne le plus petit ψ . La recherche de λ_{opt} se faisant par la méthode du nombre d'or

[BAZ 79].

III.3.3 - Comparaison des deux méthodes:

La méthode de résolution des systèmes non-linéaires par optimisation ne peut diverger car elle forme toujours une suite monotonnement décroissante de la fonction objective.

Toutefois, elle peut déterminer un minimum local non nul, qui n'est donc pas la solution du système à résoudre. Par le fait

d'avoir utilisé la méthode du gradient et la pseudo-newtonienne, on assure l'évolution rapide du calcul, vu qu'au début c'est la méthode du gradient qui l'emporte et au voisinage de la solution la convergence quadratique est assurée par la seconde (Newton). Par contre, lorsque l'on utilise la méthode de Newton-Raphson le choix des valeurs initiales est bien plus critique, vu que des divergences peuvent en résulter, et elles ne peuvent être détectées qu'au bout d'un nombre important d'itérations; cela veut dire que la méthode de Newton-Raphson dans le cas de non-convergence est généralement beaucoup plus couteuse en temps machine que le blocage dans le cas de la résolution par optimisation, puisque dans cette dernière alternative il "suffirait" de donner d'autres valeurs initiales pour avoir un autre minimum de Ψ , et c'est pour cela que nous avons choisi la méthode d'optimisation pour la résolution de notre système d'équations.

III.3.4 - Mise en oeuvre informatique:

a) Algorithme: L'algorithme de calcul de l'écoulement de puissance harmonique peut se résumer par ce qui suit:

- 1 - Lecture des données topologiques et nodales.
- 2 - Formation de la matrice admittance harmonique à vide.
- 3 - Initialisation des variables.
- 4 - Calcul du Load-Flow fondamental.
- 5 - Calcul des branches harmoniques et initialisation des variables harmoniques.
- 6 - Calcul des courants (g) aux noeuds non-linéaires.
- 7 - Calcul du mismatch en puissance et en courant. Si

acceptable, aller en 11.

- 8 - Calcul des sous-jacobiens ($J^{(k)}, TG^{(k,k)}, G^{(k)}$).
- 9 - Formation du jacobien harmonique total.
- 10 - Résolution du système d'équations. Aller en 6.
- 11 - Résultats:

- . Visualisation de la réponse fréquentielle nodale.
- . Détermination du taux de distorsion.
- . Reconstitution du signal de la tension (pour observer la déformation).

b) Problèmes rencontrés lors de la programmation: Le problème majeur fût la taille des matrices à manipuler, puisque pour un problème classique de dix (10) noeuds PQ et dix harmoniques on a:

$$\dim(\text{Jacobien}) = [2.n.h]^2 = 40\ 000 \text{ é}^{1ts}$$

Vu qu'on effectue la résolution par la méthode LU, les matrices L et U sont regroupées dans une matrice unique ToF (Table of Factors).

$$\dim(\text{ToF}) = [2.n.h]^2 = 40\ 000 \text{ é}^{1ts}$$

$$\dim(\text{Y}_{\text{harm}}) = [2.n]^2.h = 4\ 000 \text{ é}^{1ts}$$

On obtient 84 000 éléments. En ne tenant compte que de ces trois matrices on a pour les types de variables utilisées les valeurs suivantes en koctet:

| N ^{bre} Chf. signif. | 7-8 | 12 | 15-16 | 19-20 |
|--|--------|--------|--------|----------|
| Type* | single | real | double | extended |
| Matrices | (4) | (6) | (8) | (10) |
| A/ ToF + Jac | 312.5 | 468.75 | 625 | 781.25 |
| B/ Y_harm | 15.63 | 23.44 | 31.25 | 39.06 |
| Total ₁ = A + B | 328.1 | 492.2 | 656.25 | 820.31 |
| Total ₂ = 1,3.Total ₁ | 425 | 640 | 850 | 1050 |

: Octets.

Rq: On considère que les variables auxiliaires occupent une mémoire égale à 30% de celle du jacobien et du ToF.

On se retrouve donc avec des matrices et une mémoire importantes à utiliser ce qui n'est pratiquement pas réalisable sur un PC, sans compter la série de calculs nécessaires à chaque élément dans le temps d'exécution.

Les matrices sont pratiquement de 85% à 90% creuses, donc une technique de programmation adéquate s'impose. Nous avons choisi la technique qui se base sur l'utilisation de la mémoire virtuelle, autrement dit, nous utilisons le disque dur comme extension mémoire par fichiers à accès direct interposés, en n'opérant des accès disque que pour les éléments non-nuls. La reconnaissance de ces éléments se fait grâce à l'utilisation de matrices logiques représentant l'état du jacobien, ToF...

Vu le nombre important d'informations du réseau à saisir (caractéristiques topologiques et nodales) et le risque d'erreurs qui pourrait en résulter lors de leurs saisie, nous avons réalisé une unité de manipulation interactive de données sur fichier (lecture, écriture, modification, suppression etc...).

Tout ceci a été élaboré autours du langage et l'environnement du Turbo Pascal 5.5 de Borland. Nous avons donc profité de l'apport du debugger (correcteur d'erreurs syntaxique systématique - execution pas à pas - suivi de l'évolution des variables etc...) de la structuration du langage, ce qui nous a permis de gérer un programme de quelque 3000 lignes.

Chapitre IV

IV - APPLICATION AUX POLLUANTS SIDÉRURGIQUES:

IV.1 - Présentation des polluants sidérurgiques:

L'industrie sidérurgique est une très grosse consommatrice d'énergie électrique, de l'ordre de centaines de MW, ce qui nécessite une étude particulière avant tout branchement au réseau. Des études classiques de stabilité statique et dynamique sont effectuées, mais des études plus spécifiques telles celles de la pollution harmonique sont nécessaires aussi, car les charges non-linéaires de la sidérurgie (four à arc, et redresseurs) sont celles qui consomment le plus dans cette industrie.

IV.1.1 - Les fours à arcs:

Les fours à arcs utilisés en sidérurgie sont de puissances allant de quelques dizaines à une centaine de MVA. Cette charge là, est particulièrement perturbatrice, du fait qu'elle soit non-linéaire, non équilibrée, et appelant des puissances énormes. Tout ceci, fait que ses défauts ne peuvent être négligés [MIL 82], [CHA 78].

Dans notre travail, nous ne nous sommes intéressés qu'à l'aspect non-linéaire de la charge.

La nature même et l'instabilité de l'arc dans une bonne partie du fonctionnement du four, font que ce dernier absorbe des courants à spectre, très riche, continu, et à variation aléatoire. Ce spectre présente deux (2) bandes remarquables, la bande 0-25 Hz et la bande 50-1000 Hz.

La première bande est celle qui crée le "flicker" (papillotement); Ce phénomène a des effets plutôt physiologiques

(§ Annexe C) alors que la seconde bande pose les problèmes que posent les harmoniques (§ Chap.II).

La nature du spectre du four à arc, fait que sa modélisation totale par un modèle de connaissance est assez complexe [MAH 85] et peu répandu. Les approches rencontrées dans ce domaine consistent à traiter le problème du "flicker" à part et celui des harmoniques aussi.

Vu qu'aucun modèle du "flicker" n'existe, ce dernier est traité de façon semi-empirique et est diminué par compensateurs statiques [EDF 82], [EDF], [CHA 78]. Par contre, l'aspect harmonique ($f > 50$ Hz) est décrit par le modèle expérimental suivant, obtenu après l'étude de quatre types de fours (2 de 100 MVA, 1 de 63 MVA et 1 de 25 MVA) installés sur réseau:

Le rapport $I^{(k)}/I^{(1)}$ est donné par:

$$\begin{aligned} & 0.15 + 3.5e^{-0.4(k-2)} \% \quad \text{si } k \text{ est paire} \\ & 0.15 + 7.5e^{-0.45(k-3)} \% \quad \text{si } k \text{ est impaire} \end{aligned}$$

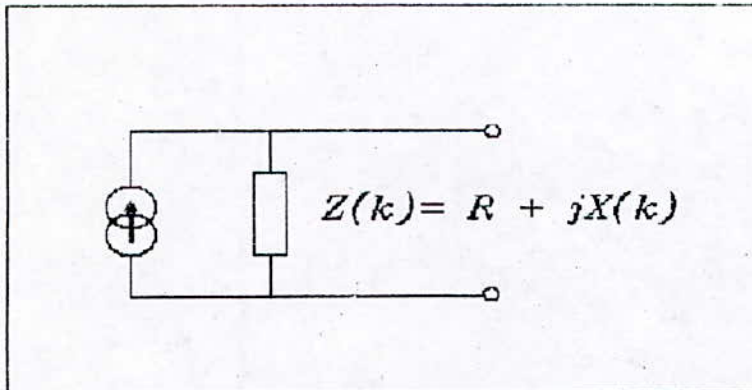


Fig IV.1.1-1
Modèle en source de courant du four

Où l'impédance du four $Z(k)$ est donnée par le régime en court-circuit:

$$|Z(1)| = 1.2 \frac{U_n^2}{S_n}$$

avec

$$\frac{X_{cc}(1)}{R} = \tan(\varphi) = 0.88 \quad (\cos(\varphi) = 0.75)$$

(Modèle utilisé par EDF).

Il est à remarquer que ce modèle discretise le spectre du four, et ne donne que des valeurs moyennes. Cela veut dire, que dans certaines phases de fonctionnement, ces valeurs sont largement sous-estimées et dans d'autres sur-estimées.

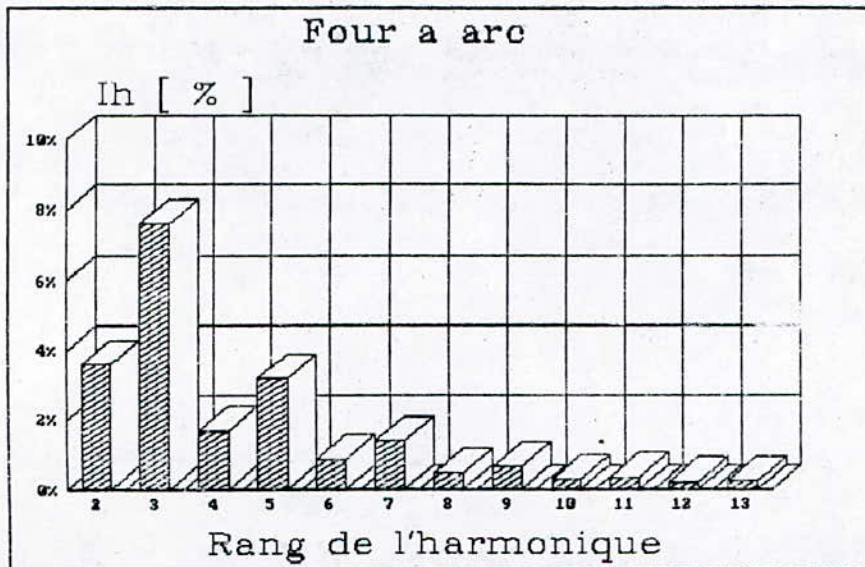


Fig IV.1.1-2
Spectre du courant absorbé par un four à arc

IV.1.2 - Les redresseurs:

Ils sont utilisés en sidérurgie pour alimenter les moteurs à courant continu, encore utilisés dans les laminoirs. Les puissances appelées à travers ces éléments sont de l'ordre du MW, donc absorbant des puissances bien moins importantes que celles des fours. La différence ne se situe pas seulement à ce niveau;

Les redresseurs ont un spectre discret et pour un même harmonique présentent un taux $I^{(k)}/I^{(1)}$ quatre (4) fois plus important, en moyenne, que le four.

Beaucoup de travaux, ont été effectués sur les redresseurs, mais rarement en régime harmonique (tension d'alimentation non sinusoïdale). Pour cela, très peu de modèles existent [GRA 83], [TAM 88], mais ces derniers allonge considérablement l'exécution lors de leur intégration dans un calcul d'écoulement de puissance harmonique, surtout par la méthode d'optimisation.

Dans notre étude, nous avons utilisé un modèle expérimental simple, qui en fonction du courant fondamental donne les courants harmoniques caractérisés du redresseur [EDF], [LEM 78]. Ce modèle représente le redresseur comme source de courants harmoniques :

$$\frac{I^{(k)}}{I^{(1)}} = \frac{1}{\left(k - \frac{5}{k}\right)^{1.2}}$$

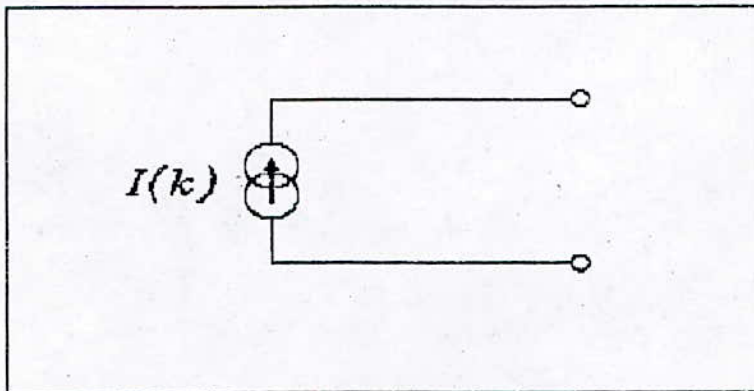


Fig IV.1.2-1
Modèle en source de courant du redresseur

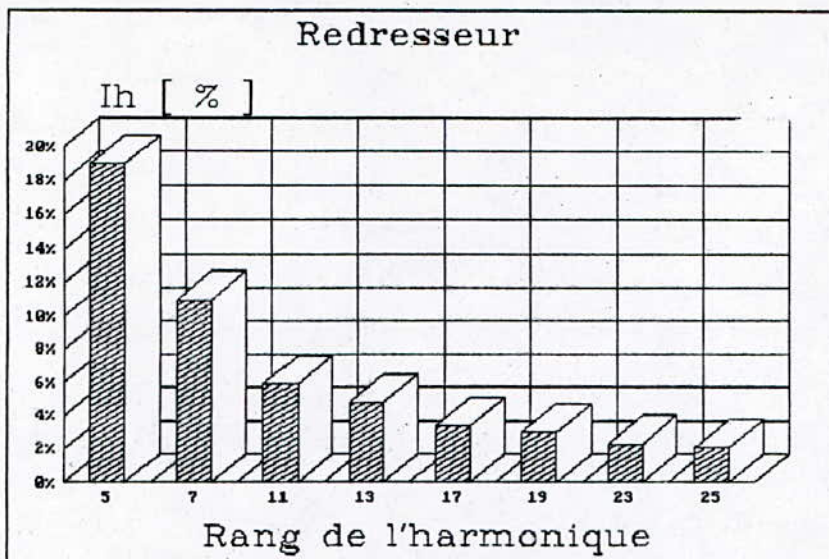


Fig IV.1.2-2
Spectre caractéristique du courant absorbé par un redresseur

L'inconvénient de ce modèle, comme celui du four, c'est qu'ils ne tiennent pas compte de l'alimentation harmonique de l'appareil en question.

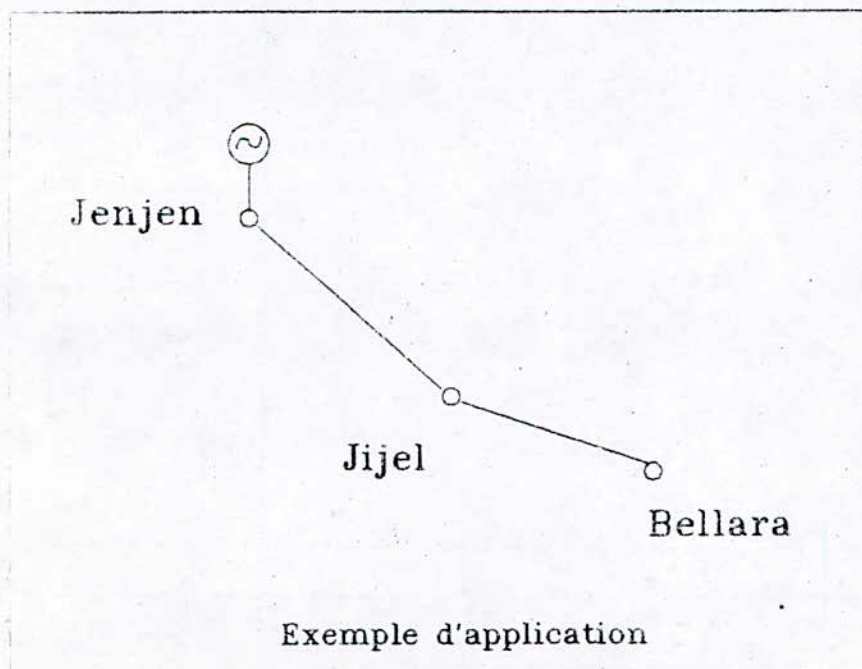
IV.1.3 - Exemple d'application:

Afin de mettre en évidence les effets de ces charges sur un réseau, de comparer leurs effets, et de valider la méthode de calcul, nous avons choisis un réseau à trois noeuds en ligne (1 noeud bilan, 1 noeud PQ, et 1 noeud NL), dont les caractéristiques ont été extraites du réseau alimentant l'usine de Bellara (Jijel).

Nous avons fait deux essais pour chaque charge. Un essai sans compensation et un autre avec compensation, ceci afin de mettre en évidence l'effet de présence de condensateurs dans un réseau, sur le taux de distorsion de la tension.

Afin que les résultats soient comparables, nous avons pris un four et un redresseur de même puissance (75 MW).

Du point de vue calcul, nous effectuons l'écoulement de puissance fondamental par la méthode de Newton-Raphson, en initialisant tous les noeuds à 1 p.u. 0° et l'écoulement de puissance harmonique par la méthode d'optimisation en utilisant la méthode d'injection des courants (vu que les modèles s'y prêtent) comme initialisation des tensions $V^{(k)}$. Nous mettons en évidence l'évolution du taux de présence de chaque harmonique entre l'initialisation, qui est déjà une méthode de prédétermination (§ Chap.II), et les résultats à la convergence. De plus, à la fin, par une transformé de Fourier inverse on reconstitue l'onde de tension pour le noeud perturbateur et le noeud bilan (le plus éloigné). De là un certain nombre de conclusions pourront être tirées tout en sachant que l'exemple est purement théorique.

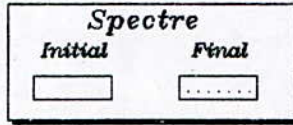


Spectres de tension

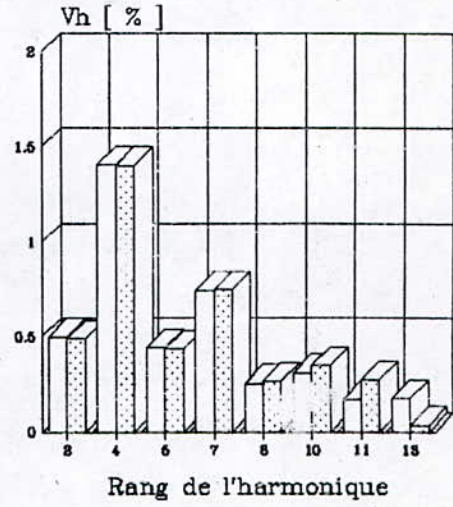
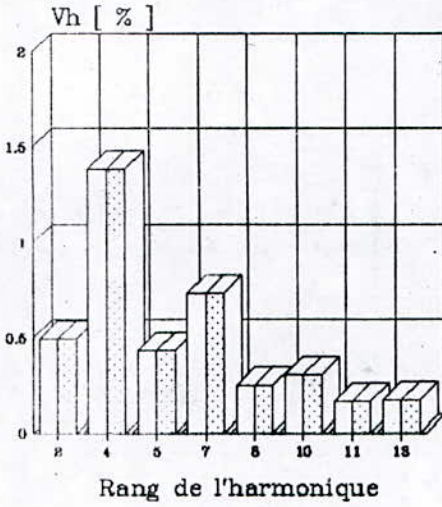
Exemple d'application

Four a arc 75 MW

Noeud Jenjen
Four a arc
 $Q_c = 0$ MVar

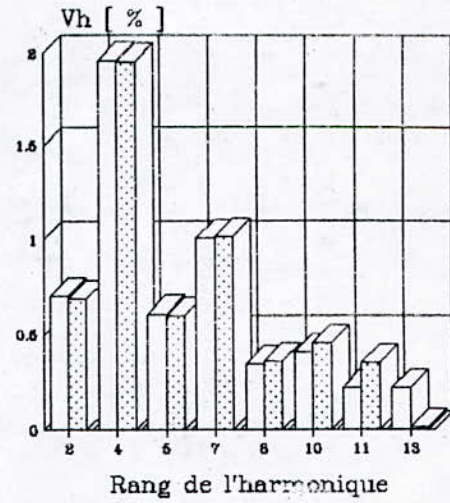
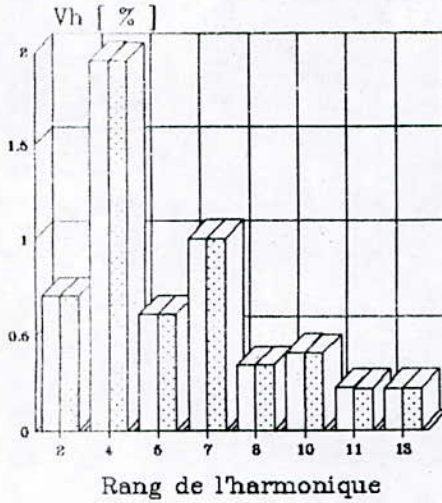


Noeud Jenjen
Four a arc
 $Q_c = 35$ MVar



Noeud Bellara
Four a arc
 $Q_c = 0$ MVar

Noeud Bellara
Four a arc
 $Q_c = 35$ MVar



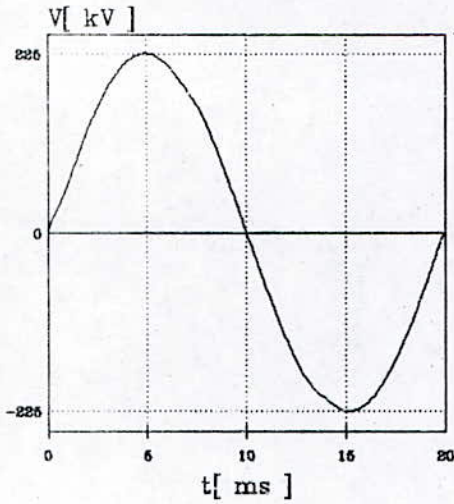
Effet de la compensation (four a arc).

Ondes de tension

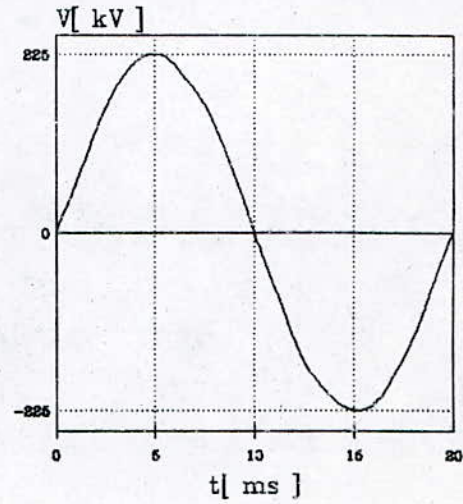
Exemple d'application

Four a arc 75 MW

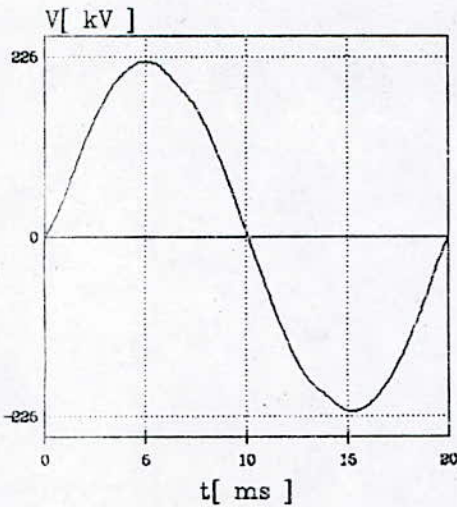
Noeud Jenjen
Four a arc
 $Q_c = 0 \text{ MVar}$ $t = 1.76 \%$



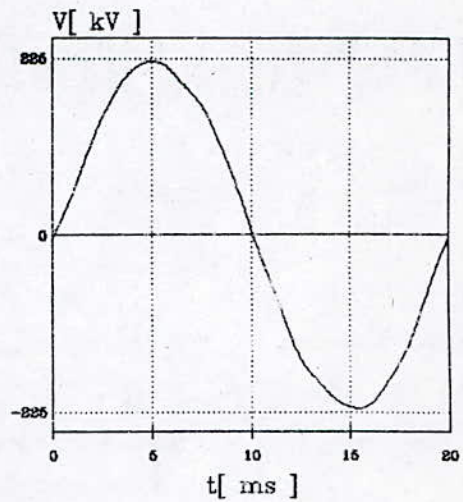
Noeud Jenjen
Four a arc
 $Q_c = 35 \text{ MVar}$ $t = 1.79 \%$



Noeud Bellara
Four a arc
 $Q_c = 0 \text{ MVar}$ $t = 2.46 \%$



Noeud Bellara
Four a arc
 $Q_c = 35 \text{ MVar}$ $t = 2.48 \%$



Effet de la compensation (four a arc).

Spectres de tension

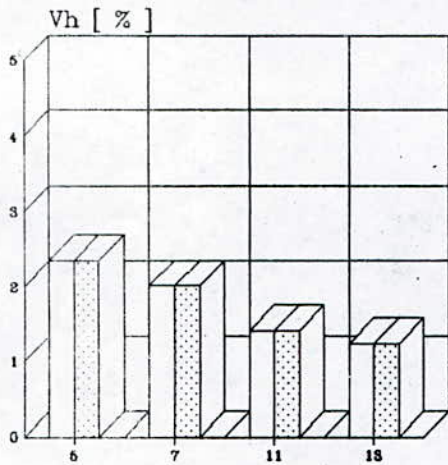
Exemple d'application

$P = 75 \text{ MW}$

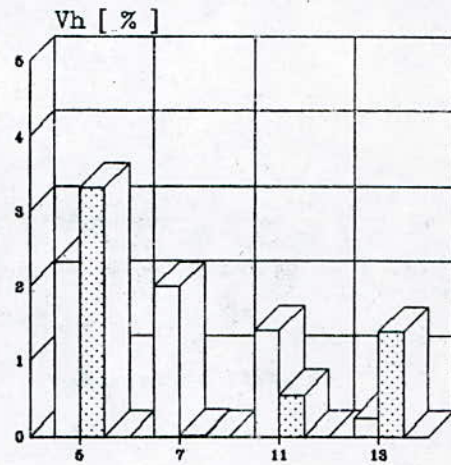
Noeud Jenjen
Redresseur
 $Q_c = 0 \text{ MVar}$



Noeud Jenjen
Redresseur
 $Q_c = 35 \text{ MVar}$

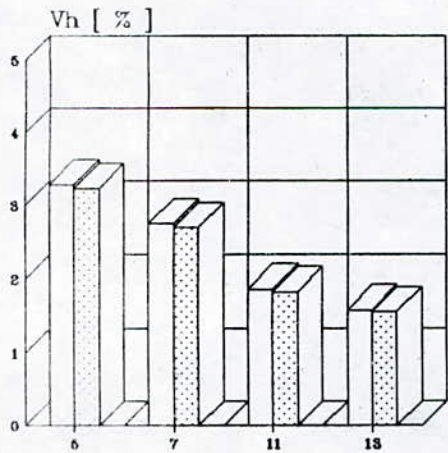


Rang de l'harmonique



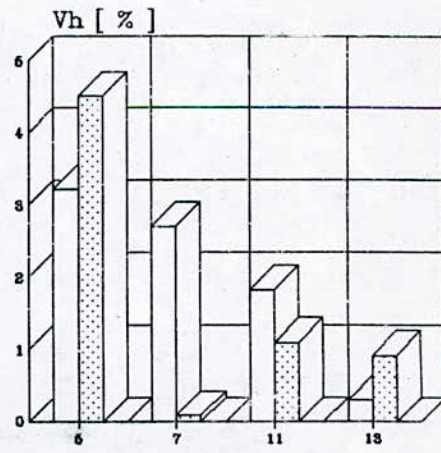
Rang de l'harmonique

Noeud Bellara
Redresseur
 $Q_c = 0 \text{ MVar}$



Rang de l'harmonique

Noeud Bellara
Redresseur
 $Q_c = 35 \text{ MVar}$



Rang de l'harmonique

Effet de la compensation (redresseur).

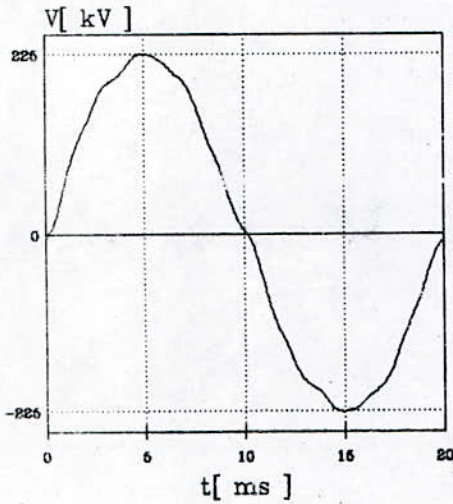
Ondes de tension

Exemple d'application

Redresseur 75 MW

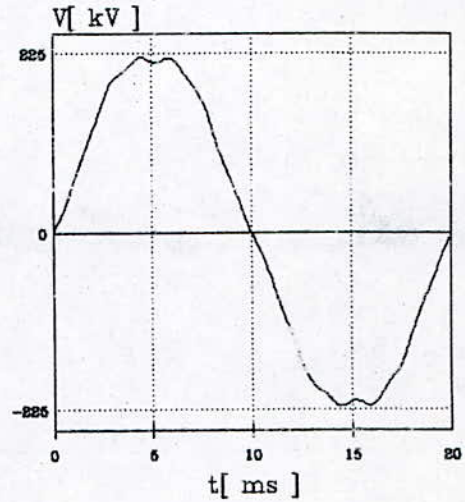
Noeud Jenjen
Redresseur

$Q_c = 0 \text{ MVar}$ $t = 3.61 \%$



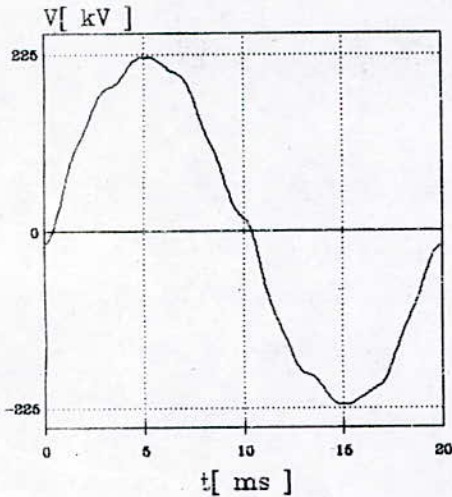
Noeud Jenjen
Redresseur

$Q_c = 35 \text{ MVar}$ $t = 3.63 \%$



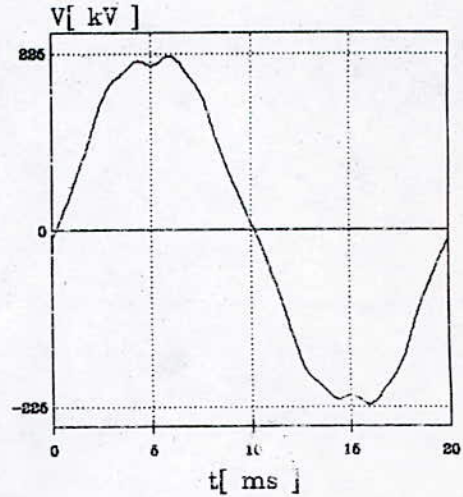
Noeud Bellara
Redresseur

$Q_c = 0 \text{ MVar}$ $t = 4.85 \%$



Noeud Bellara
Redresseur

$Q_c = 35 \text{ MVar}$ $t = 4.74 \%$



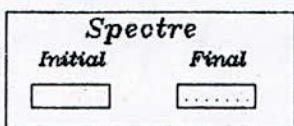
Effet de la compensation (redresseur).

Spectres de tension

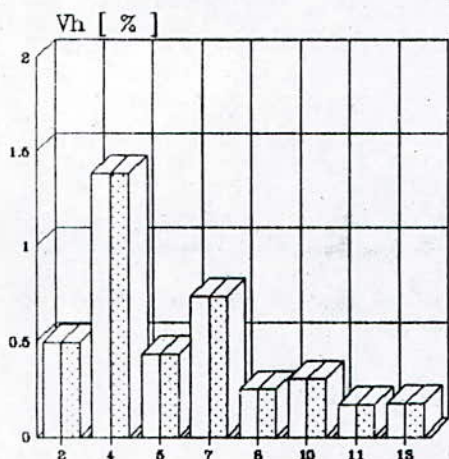
Exemple d'application

$P = 75 \text{ MW}$

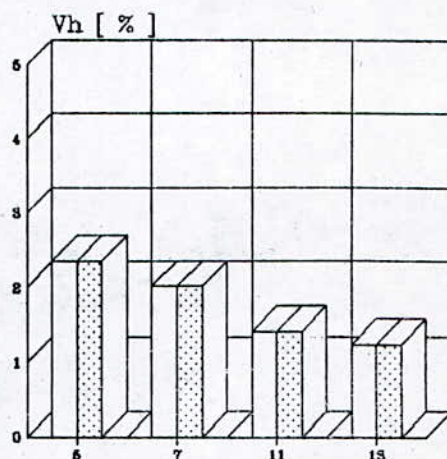
Noeud Jenjen
Four a arc
 $Q_c = 0 \text{ MVar}$



Noeud Jenjen
Redresseur
 $Q_c = 0 \text{ MVar}$

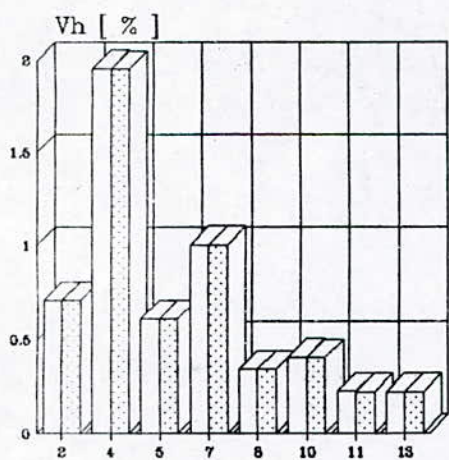


Rang de l'harmonique



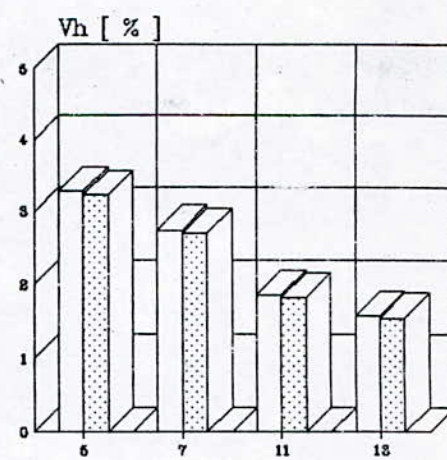
Rang de l'harmonique

Noeud Bellara
Four a arc
 $Q_c = 0 \text{ MVar}$



Rang de l'harmonique

Noeud Bellara
Redresseur
 $Q_c = 0 \text{ MVar}$



Rang de l'harmonique

Effet du type de la charge.

Ondes de tension

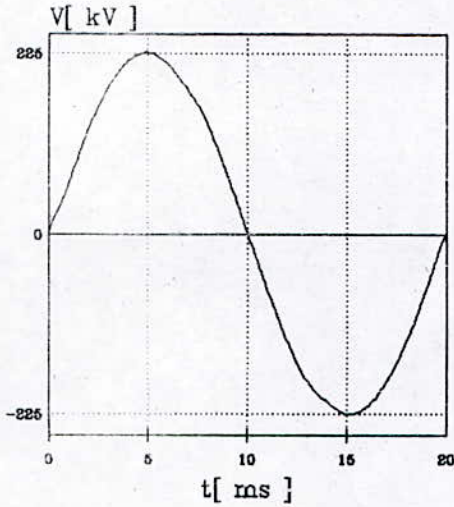
Exemple d'application

$P = 75 \text{ MW}$

Noeud Jenjen

Four a arc

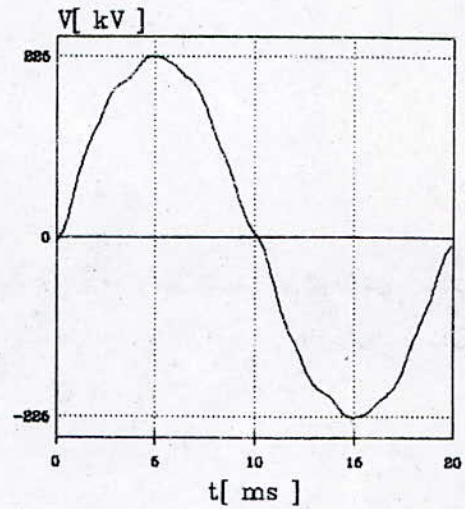
$Q_c = 0 \text{ MVar}$ $t = 1.76 \%$



Noeud Jenjen

Redresseur

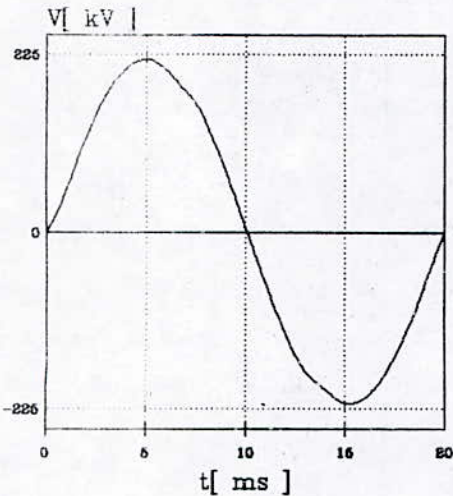
$Q_c = 0 \text{ MVar}$ $t = 3.61 \%$



Noeud Bellara

Four a arc

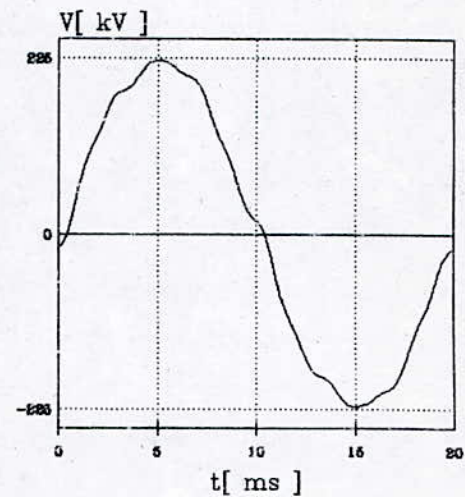
$Q_c = 0 \text{ MVar}$ $t = 2.46 \%$



Noeud Bellara

Redresseur

$Q_c = 0 \text{ MVar}$ $t = 4.85 \%$



Effet du type de la charge.

Observations:

Du point de vue numérique, la convergence, n'est assurée que par la méthode d'optimisation. Toutefois, elle se fait en un minimum local, mais pour un mismatch maximal assez faible (0.01 à 0.05) que nous, estimons être admissible relativement au nombre d'inconnues à déterminer (four 52 inconnues; redresseur 28 inconnues), et au degré de non linéarité du système à résoudre. La convergence est obtenue en un nombre d'itérations allant de 10 à 60. Nous avons mis en évidence, la différence des spectres entre leur niveau initial et final. Parfois la différence est presque ou même totalement nulle (voir exemple sans compensation), mais cela ne veut pas dire que les tensions n'ont pas évoluées, vu que le spectre est présenté en %. Pour les applications avec compensation on observera une nette différence (voir ex: redresseur $Q_c = 35$ MVar noeud Jenjen).

Nous avons calculé deux écoulements de puissances, un avec compensation au noeud perturbateur ($Q_c = 35$ MVar) et un autre sans. Il apparait, que cette dernière favorise vis-à-vis de certains harmoniques leur amplification (ex: redresseur H13 à Jenjen - Four H11 à Bellara) ou leur quasi élimination (ex: redresseur H7 Bellara - Four H13 Bellara).

Ceci nous permet de démontrer l'importance du dimensionnement et du choix du lieu de l'installation des condensateurs dans un réseau.

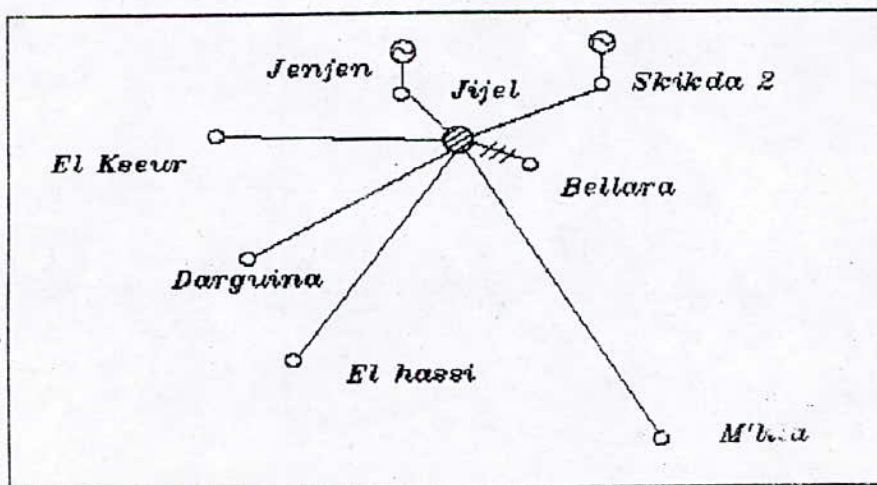
Enfin, il apparait des courbes et spectres de tensions précédents qu'à puissance égale le redresseur est plus polluant que le four à arc (4 à 5 fois en moyenne) ce qui est confirmé par [LEM 78].

IV.3 - Application au projet 'SIDER Bellara':

L'application consiste à représenter le comportement harmonique du réseau algérien 220 kV, vis-à-vis des charges non-linéaires, de la futur industrie sidérurgique qui sera implantée à Bellara JIJEL.

Cette usine, présentera au réseau entre autre deux fours de 100 MVA et deux fours poches de 18 MVA, en plus de 55 MVA de charge linéaire.

Pour un calcul d'écoulement de puissance harmonique du 10^{ème} ordre, on aura à gerer des matrices d'ordre 798 ($2nh-2$) soit une occupation mémoire de 16 Mo (en extended), d'où des difficultés accrues de calcul et de résolution. Donc, des techniques de réduction de réseaux en régime harmonique s'avèrent indispensables. N'ayant pas eu le temps de nous investir dans la recherche et le developpement de telles techniques, nous nous sommes vu contraints de tronquer le réseau, et de ne faire l'étude que pour la région de Bellara (isolée du réseau total) soit neuf noeuds pour huit harmoniques, ce qui pénalisera sans aucun doute la validité de nos résultats.

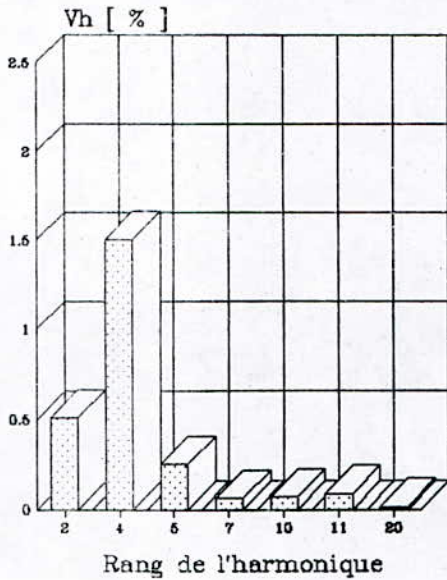


Réseau Bellara

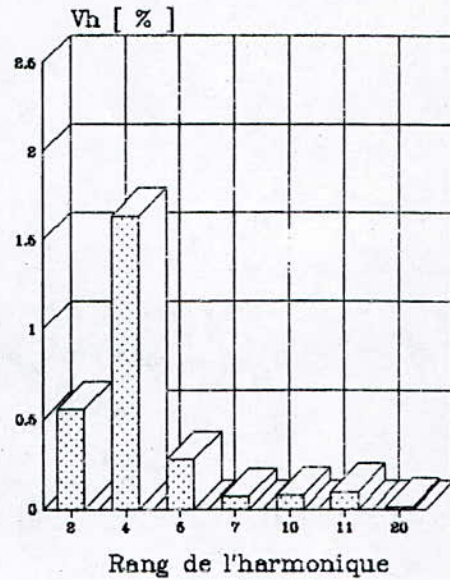
Spectres de tension

Application Bellara Four a arc 75 MW

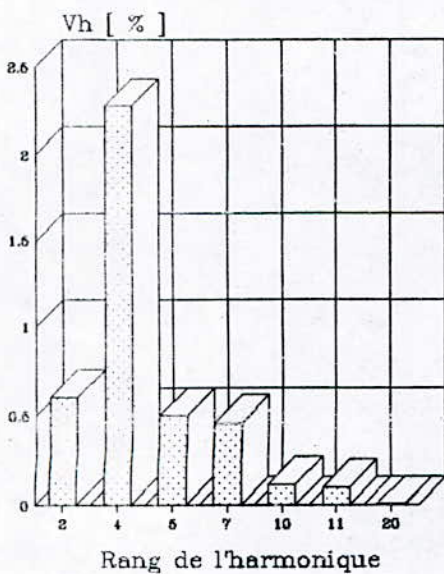
Noeud Jenjen



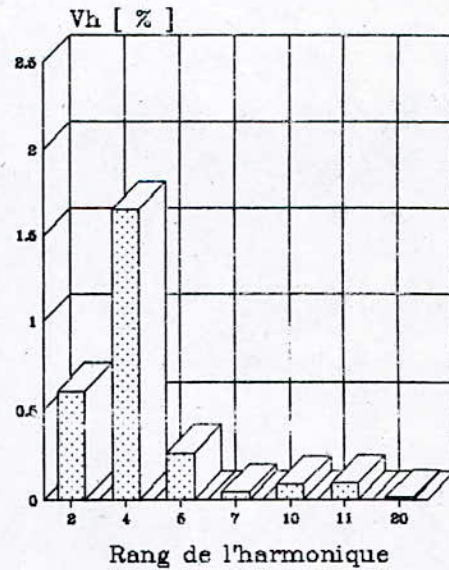
Noeud Jijel



Noeud Ain M'lila



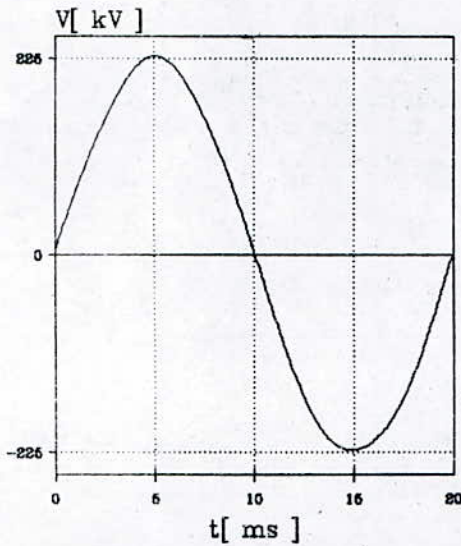
Noeud Bellara



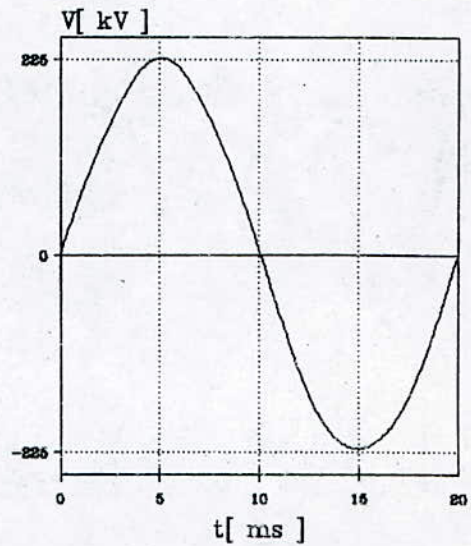
Ondes de tension

Application Bellara Four a arc 75 MW

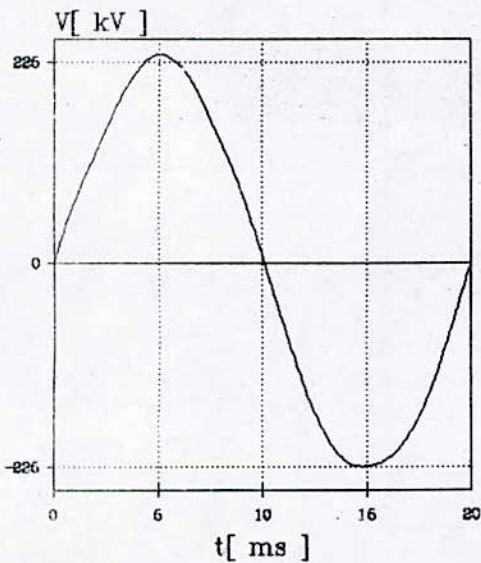
Noeud Jenjen
 $t = 1.61 \%$



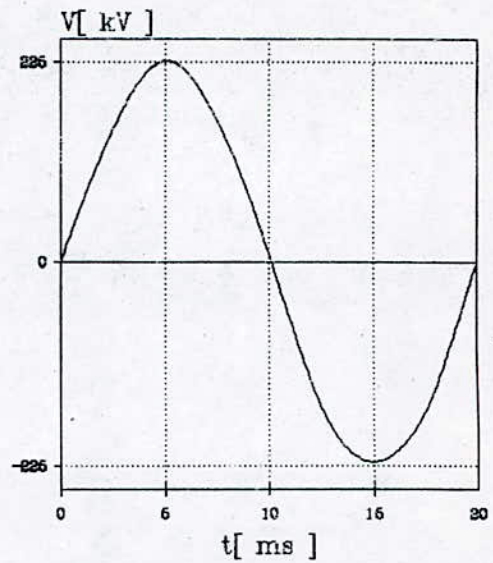
Noeud Jijel
 $t = 1.75 \%$



Noeud Ain M'lila
 $t = 2.45 \%$



Noeud Bellara
 $t = 1.75 \%$



Commentaires:

La simulation a été faite pour un four de 100 MVA, compensé avec 40 MVar au noeud Bellara. Nous avons obtenu une convergence en neuf itérations, en un minimum local, correspondant à un mismatch maximum de 0.08. Les limites de perturbations à respecter, pour être en accord avec les exigences de SONEGAS sont les suivantes:

$$\frac{U^{(k)}}{U^{(1)}} \leq 1.5 \% \quad \text{par harmonique}$$

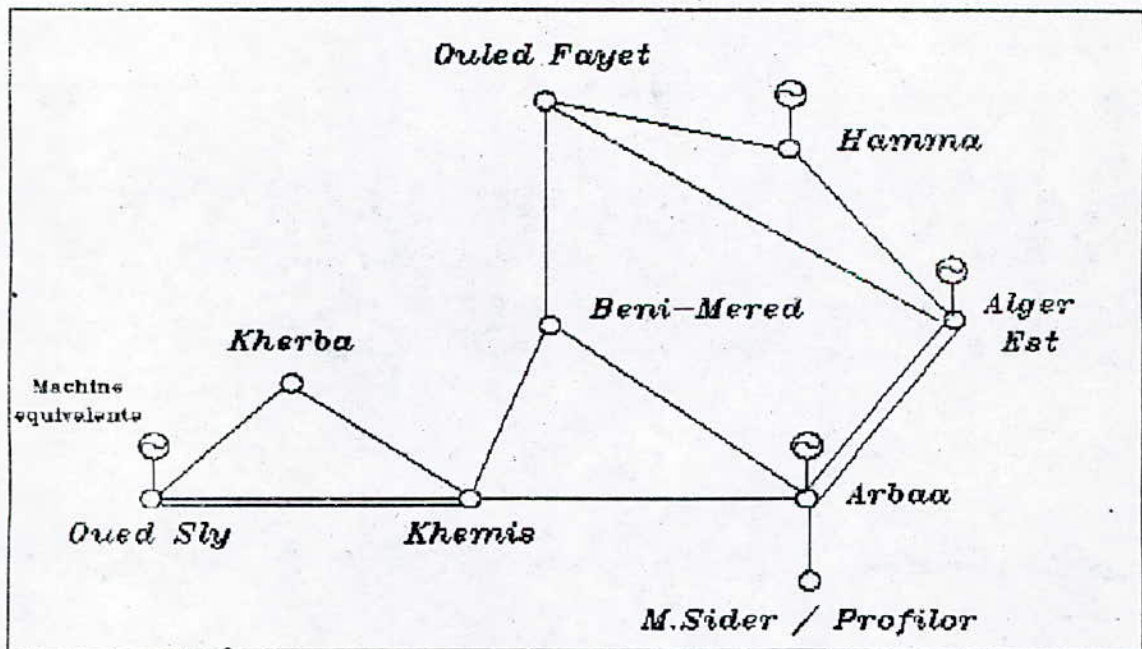
$$\sqrt{\sum_{k=2}^h \left(\frac{U^{(k)}}{U^{(1)}} \right)^2} \leq 5 \% \quad \text{taux de distorsion}$$

Les spectres précédents nous permettent de constater un dépassement de l'harmonique 4 au noeud Aïn M'lila (2.3 %), alors qu'au noeud Bellara on est dans les normes sus-citées. Tous les taux de distorsions obtenus aux autres noeuds sont dans les normes. Mais il faut noter que les puissances nodales spécifiées dans le calcul effectué, sont au tiers de la puissance maximale observées lors de certaines saisons dans cette région. Néanmoins, les résultats que nous avons obtenus sont dans un même ordre de grandeur que celles obtenus par l'étude de l'EDF [EDF] pour ce projet là, dans une configuration semblable du réseau.

VI.3 - Application au projet 'Métal SIDER LARBÂA':

Les remarques faites au sujet du nombre de variables à manipuler et la dimension du réseau pour le projet 'SIDER Bellara' sont valables dans ce cas ci, aussi. Nous avons calculé un écoulement de puissance pour un réseau tronqué de neuf noeuds et sept harmoniques.

Sachant que l'usine en question présente deux fours de 45 et 25 MW et un four poche de 12 MW, des redresseurs de puissance totale de 25 MW, nous avons simulé séparément un redresseur de 25 MW et un four équivalent de 64 MW branché au réseau. Nous avons obtenu les résultats suivants:

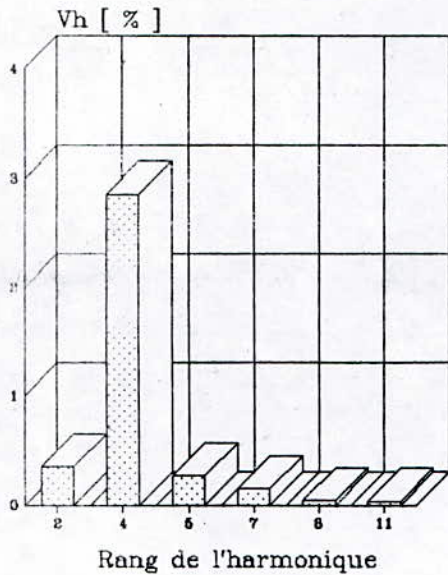


Réseau LARBAA

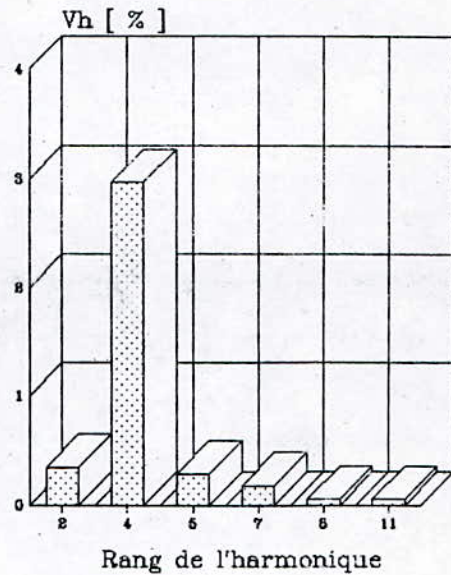
Spectres de tension

Application Arbaa Four a arc 64 MW

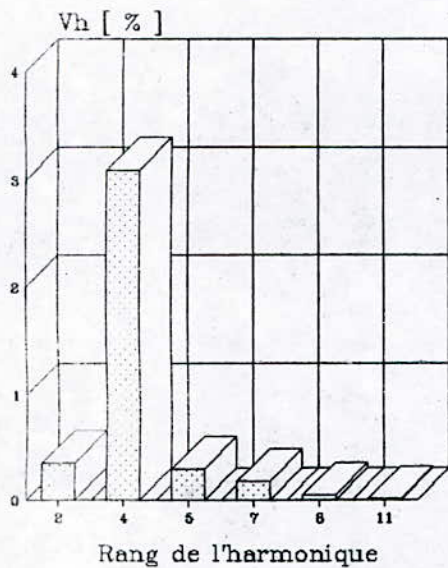
Noeud Alger Est



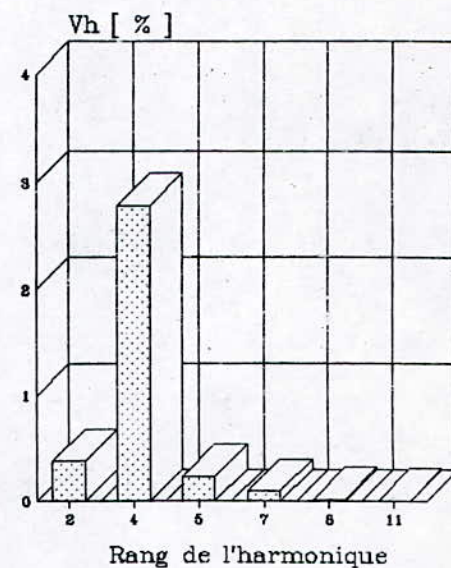
Noeud Ouled Fayet



Noeud Kherba



Noeud Arbaa



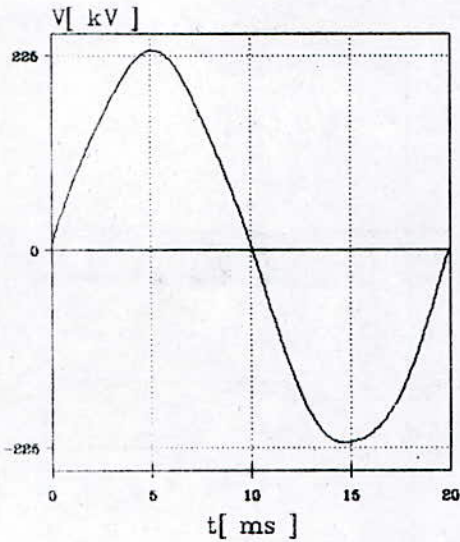
Ondes de tension

Application Arbaa

Four a arc 64 MW

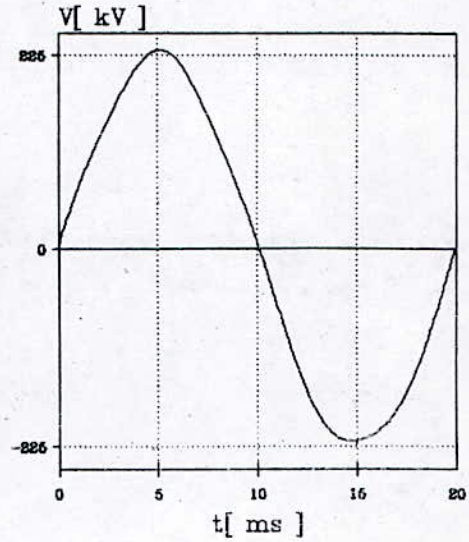
Noeud Alger Est

$t = 2.89 \%$



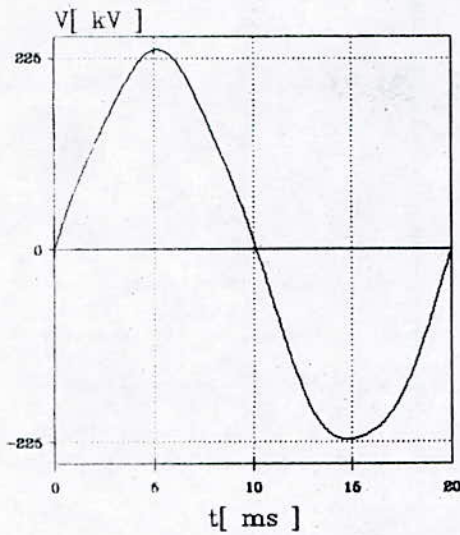
Noeud Ouled Nayet

$t = 3.01 \%$



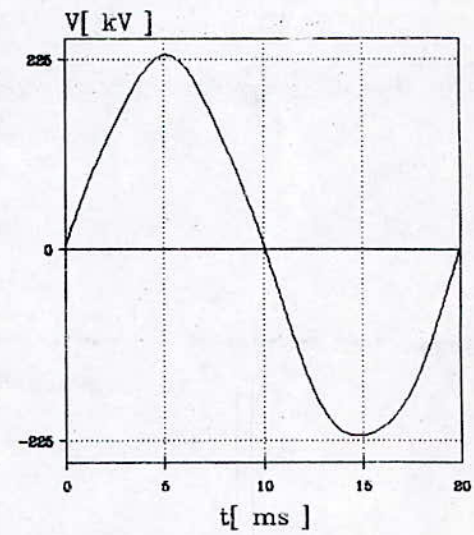
Noeud Kherba

$t = 3.13 \%$



Noeud Arbaa

$t = 2.82 \%$



Commentaire:

Nous constatons que l'harmonique d'ordre 4 présente des dépassements de la limite SONELGAZ aux différents noeuds, sans pour autant que le taux de distorsion ne dépasse les 5 %.

La déformation causée par le four est caractérisé par un dépassement de la crête négative de l'onde.

Nous remarquons aussi que la déformation maximale est observée assez loin de la charge non-linéaire (KHERBA), possibilité qui a été mentionnée plus haut (§ Chap.II).

Pour le redresseur les déformations obtenues sont négligeables.

Conclusion

CONCLUSION:

La méthode d'analyse par écoulement de puissance harmonique permet de calculer les spectres nodaux des tensions du réseau et de déterminer des résonances éventuelles. De même pour les courants en circulation dans les lignes.

L'algorithme de résolution est établi de telle manière à ce que des modifications topologiques peuvent être faites (ouverture de lignes, ajout d'éléments tel compensation nodale...) ainsi que l'introduction de modèles non-linéaires sous forme d'unités (algorithmes) débrochables vis-à-vis du programme principal, tenant compte de l'interaction tension-courant de la charge.

La méthode numérique adoptée (optimisation), assure la convergence du processus de calcul, chose que les méthodes classiques de résolution des systèmes non-linéaires (Newton-Raphson, Gauss-Seidel) ne permettent pas lorsque le nombre de variables et le degré de non-linéarité du problème deviennent importants.

Néanmoins, il apparait après ce travail, que certain axes restent à investir. Essentiellement:

- La validation des résultats, par des mesures sur sites.
- Le développement de modèles des charges non-linéaires, tenant compte de l'interaction réseau-charge (alimentation polluée).
- La prise en considération de la circulation des harmoniques à séquence homopolaire.
- La prise en compte du comportement non-linéaire des

transformateurs.

- Des méthodes d'initialisation des variables ainsi que celles d'optimisation de l'utilisation mémoire (technique de programmation des matrices creuses...).

Annexes

ANNEXE A:

Définitions relatives aux harmoniques

Tension:

$$v(t) = V_{DC} + \sum_{k=1}^{+\infty} V^{(k)} \sin(k\omega_0 t + \delta^{(k)})$$

Courant:

$$i(t) = I_{DC} + \sum_{k=1}^{+\infty} I^{(k)} \sin(k\omega_0 t + \varphi^{(k)})$$

Puissance active:

$$P = V_{DC} I_{DC} + \sum_{k=1}^{+\infty} V^{(k)} I^{(k)} \cos(\delta^{(k)} - \varphi^{(k)})$$

Puissance réactive:

$$Q = \sum_{k=1}^{+\infty} V^{(k)} I^{(k)} \sin(\delta^{(k)} - \varphi^{(k)})$$

Valeur efficace d'une grandeur (tension ou courant):

$$X_{eff} = \sqrt{\sum_{k=0}^{+\infty} X^{(k)2}}$$

Puissance apparente:

$$S = V_{eff} \cdot I_{eff}$$

Taux de distorsion:

$$\tau = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{+\infty} X^{(k)2}}}{X_{eff}}$$

Séquence des phases des harmoniques pour un système équilibré:

| Harmonique | Séquence |
|------------|----------|
| 1 | + |
| 2 | - |
| 3 | 0 |
| 4 | + |
| 5 | - |
| 6 | 0 |
| 7 | + |
| 8 | - |
| 9 | 0 |

ANNEXE B:

Dérivées du jacobien

$$J = \begin{bmatrix} J^{(1)} & J^{(2)} & \dots & J^{(k)} & \dots & J^{(h)} \\ G^{(2,1)} & TG^{(2,2)} & \dots & G^{(2,k)} & \dots & G^{(2,h)} \\ G^{(k,1)} & G^{(k,2)} & \dots & TG^{(k,k)} & \dots & G^{(k,h)} \\ G^{(h,1)} & G^{(h,2)} & \dots & G^{(h,k)} & \dots & TG^{(h,h)} \end{bmatrix}$$

La sous matrice $J^{(k)}$:

Si i est linéaire et $k \neq 1$ alors

$$\frac{\partial \cdot_{i, \cdot}}{\partial \cdot_m^{(k)}} = 0$$

sinon on aura pour les dérivées:

$$\frac{\partial (f_{i,r} - P_i)}{\partial \delta_m^{(k)}} =$$

est égale à

si $i=m$

$$-V_i^{(k)} \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^n V_l^{(k)} Y_{il}^{(k)} \sin(\delta_i^{(k)} - \delta_l^{(k)} - \theta_{il}^{(k)})$$

si $i \neq m$

$$V_i^{(k)} V_m^{(k)} Y_{im}^{(k)} \sin(\delta_i^{(k)} - \delta_m^{(k)} - \theta_{im}^{(k)})$$

$$\frac{\partial(f_{i,r}-P_i)}{\partial V_m^{(k)}}$$

est égale à

si $i=m$

$$\sum_{l=1}^n V_l^{(k)} Y_{il}^{(k)} \cos(\delta_i^{(k)} - \delta_l^{(k)} - \theta_{il}^{(k)}) + 2V_i^{(k)} Y_{ii}^{(k)} \cos(\theta_{ii}^{(k)})$$

si $i \neq m$

$$V_i^{(k)} Y_{im}^{(k)} \cos(\delta_i^{(k)} - \delta_m^{(k)} - \theta_{im}^{(k)})$$

$$\frac{\partial(f_{i,i}-Q_i)}{\partial \delta_m^{(k)}}$$

est égale à

si i est non-linéaire

$$\frac{\partial f_{i,i}}{\partial \delta_m^{(k)}} - \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_m^{(k)}}$$

sinon

$$\frac{\partial f_{i,i}}{\partial \delta_m^{(k)}}$$

autrement exprimée

si $i=m$

$$V_i^{(k)} \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^n V_l^{(k)} Y_{il}^{(k)} \cos(\delta_i^{(k)} - \delta_l^{(k)} - \theta_{il}^{(k)}) - \begin{pmatrix} V_i^{(k)} g_i^{(k)} \cos(\delta_i^{(k)} - \varphi_i^{(k)}) \\ 0 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{si } i \text{ est NL} \\ \text{sinon} \end{array}$$

si $i \neq m$

$$-V_i^{(k)} V_m^{(k)} Y_{im}^{(k)} \cos(\delta_i^{(k)} - \delta_m^{(k)} - \theta_{im}^{(k)}) - \begin{pmatrix} V_i^{(k)} g_i^{(k)} \cos(\delta_i^{(k)} - \varphi_i^{(k)}) \\ 0 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{si } i \text{ est NL} \\ \text{sinon} \end{array}$$

De même pour

$$\frac{\partial(f_{i,i} - Q_i)}{\partial V_m^{(k)}}$$

est égale à

si $i=m$

$$\sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^n V_l^{(k)} Y_{il}^{(k)} \sin(\delta_i^{(k)} - \delta_l^{(k)} - \theta_{il}^{(k)}) - 2V_i^{(k)} Y_{ii}^{(k)} \sin(\theta_{ii}^{(k)}) - \begin{pmatrix} g_i^{(k)} \sin(\delta_i^{(k)} - \varphi_i^{(k)}) \\ 0 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{si } i \text{ est NL} \\ \text{sinon} \end{array}$$

si $i \neq m$

$$V_i^{(k)} Y_{im}^{(k)} \sin(\delta_i^{(k)} - \delta_m^{(k)} - \theta_{im}^{(k)}) - \begin{pmatrix} g_i^{(k)} \sin(\delta_i^{(k)} - \varphi_i^{(k)}) \\ 0 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{si } i \text{ est NL} \\ \text{sinon} \end{array}$$

La sous matrice $\mathbb{T}^{(k,k)}$:

$$I_{i,r}^{(k)} + jI_{i,i}^{(k)} = \sum_{l=1}^n V_l^{(k)} Y_{il}^{(k)} \exp[j(\delta_l^{(k)} + \theta_{il}^{(k)})]$$

d'où on tire:

$$\frac{\partial I_{i,r}^{(k)}}{\partial \delta_m^{(k)}} = -V_m^{(k)} Y_{im}^{(k)} \sin(\delta_m^{(k)} + \theta_{im}^{(k)})$$

$$\frac{\partial I_{i,r}^{(k)}}{\partial V_m^{(k)}} = Y_{im}^{(k)} \cos(\delta_m^{(k)} + \theta_{im}^{(k)})$$

$$\frac{\partial I_{i,i}^{(k)}}{\partial \delta_m^{(k)}} = V_m^{(k)} Y_{im}^{(k)} \cos(\delta_m^{(k)} + \theta_{im}^{(k)})$$

$$\frac{\partial I_{i,i}^{(k)}}{\partial V_m^{(k)}} = Y_{im}^{(k)} \sin(\delta_m^{(k)} + \theta_{im}^{(k)})$$

La sous matrice $\mathbb{G}^{(h_1, h_2)}$:

$$P_i - \sum_{k=1}^h V_i^{(k)} g_i^{(k)} \cos(\delta_i^{(k)} - \phi_i^{(k)}) = 0$$

de là on obtient:

$$\frac{\partial g_{i,(r,i)}^{(h_2)}}{\partial \delta_i^{(h_2)}} = \frac{V_i^{(h_2)} g_i^{(h_1)} g_i^{(h_2)} \sin(\phi_i^{(h_2)})}{V_i^{(h_1)} g_{i,(r,i)}^{(h_1)} \sin(\phi_i^{(h_1)})}$$

$$\frac{\partial g_{i,(r,i)}^{(h_1)}}{\partial V_i^{(h_2)}} = - \frac{g_i^{(h_1)} g_i^{(h_2)} \cos(\phi_i^{(h_2)})}{V_i^{(h_1)} g_{i,(r,i)}^{(h_1)} \cos(\phi_i^{(h_1)})}$$

ANNEXE C :

Questions réponses sur le "Flicker"

1 - Qu'est-ce que le "Flicker" ?

- C'est le phénomène de papillotement de la luminosité d'une lampe à incandescence.

2 - A quoi est-il dû ?

- Dans l'ensemble il est dû à des appareils appelant des puissances à variation rapide.

. Four à arc.

. Machines à souder.

. Laminoirs.

. Compresseurs et autres machines à couple pulsatoires.

3 - Quelle est sa nature ?

- C'est un phénomène vibratoire, présentant un spectre continu dans la bande 0.5-25 Hz, d'amplitude aléatoire.

4.- Quel est son effet sur les usagés du réseau ?

- Vu que l'amplitude des variations de la tension ne dépasse pas les 10%, sauf cas particulier, les appareils sont presque insensibles à ces variations. Par contre, elles ont pour conséquences le papillotement de la lumière des lampes à incandescence, qui peut être perceptible dans la bande 0.5-25 Hz, pour des variations de tension nettement inférieures à 1%, ce qui constitue une gêne pour les personnes exposées à un tel phénomène.

5 - Peut-on diminuer son effet ? -Comment ?

- Oui, il peut être atténué, par les procédés de compensation statique de l'énergie réactive, appelée par l'appareil.

6 - Existe-t-il un modèle de connaissance ou expérimental le représentant ?

- La littérature consultée n'en fait pas mention. Nous pensons que le phénomène n'a pas encore été modélisé.

7 - Peut-il être simulé ?

- Il pourrait l'être, si la loi de probabilité le régissant était établie.

Il a été tenté d'ajuster cette distribution par une loi uniforme, mais, elle s'est trouvée impropre à cela. D'autres lois ont été essayées telle la loi normale mais sans succès.

8 - Quelle est la position du "Flicker" vis-à-vis de l'étude de la pollution harmonique ?

- Le "Flicker" et la pollution harmonique se situent dans deux domaines de fréquences différents.

La pollution harmonique 100-2000 Hz (2-40 har.).

Le "Flicker" 0.5-25 Hz (sous-harmoniques).

Le "Flicker" se caractérise par une modulation aléatoire de la tension, alors que les harmoniques affectent la forme de l'onde de tension.

9 - L'étude du "Flicker" à notre jour.

- Il faut noter que l'étude dite du "Flicker" est surtout focalisée, sur ses effets plutôt qu'aux sources qui le créent.

ANNEXE D:

Données topologiques et nodales des réseaux étudiés

RESEAU ARBÂA

| i | noeud | type | L_i (mH) | P (MW) | Q (MVar) | Comp. (MVar) | Type de charge |
|---|--------------|------|---------------|------------|-------------|-----------------|-------------------|
| 1 | A.EST | V6 | 257.5 | - | - | - | M.synch. |
| 2 | HAMMA | PV | 338 | -50 | -37.5 | - | M.synch. |
| 3 | O.FAYET | PQ | - | -28.5 | -21.3 | - | Quelcq. |
| 4 | B.MERED | PQ | - | -42 | -31.5 | - | Quelcq. |
| 5 | KHEMIS | PQ | - | -23.5 | -17.5 | - | Quelcq. |
| 6 | KHERBA | PQ | - | -10.5 | -8 | - | Quelcq. |
| 7 | O.SLY | PV | 370 | 5 | - | - | M.synch. |
| 8 | ARBÂA | PV | 241 | 80 | - | - | M.synch. |
| 9 | FOUR RED. | NL | - | -64 -25 | * * | - | - |

* :- Pour le four $Q=P.tg(\varphi)$

- Pour le redresseur on a considéré que l'ensemble charge - redresseur ne consommait que l'énergie réactive due à l'empiètement (18.5°) [LEM 78].

- Les noeuds PV ont été considérés sans régulation de tension.

| nº | Poste1 | Poste2 | L [km] | R [Ω] | X [Ω] | Cw/2 [μs] |
|----|---------|---------|-------------|------------|------------|----------------|
| 1 | A.EST | HAMMA | 35 | 2.24 | 11.47 | 200.33 |
| 2 | A.EST | HAMMA | 35 | 2.24 | 11.47 | 200.33 |
| 3 | HAMMA | O.FAYET | 16 | 0.85 | 4.15 | 260.70 |
| 4 | A.EST | O.FAYET | 47 | 2.89 | 14.44 | 125 |
| 5 | B.MERED | KHEMIS | 66 | 5.92 | 28 | 90 |
| 6 | KHEMIS | KHERBA | 50 | 2.2 | 15.38 | 136 |
| 7 | KHERBA | O.SLY | 80 | 3.52 | 24.48 | 218 |
| 8 | KHEMIS | O.SLY | 100.5 | 12.13 | 43.73 | 134 |
| 9 | KHEMIS | O.SLY | 98.6 | 8.85 | 41.8 | 134 |
| 10 | KHEMIS | ARBÂA | 91.32 | 11.63 | 41.68 | 127.37 |
| 11 | KHEMIS | ARBÂA | 95.56 | 8.71 | 41.14 | 132.20 |
| 12 | ARBÂA | B.MERED | 30 | 2.69 | 12.72 | 41.00 |
| 13 | ARBÂA | A.EST | 22 | 3.17 | 11.79 | 36.41 |
| 14 | ARBÂA | A.EST | 22 | 3.52 | 13.45 | 41.73 |
| 15 | ARBÂA | FOUR | 4 | 0.3 | 1.4 | 4.51 |

RESEAU BELLARA

| i | noeud | type | L_1 (mH) | P (MW) | Q (MVar) | Comp. (MVar) | Type de charge |
|---|---------|------|---------------|-----------|-------------|-----------------|----------------|
| 1 | JENJEN | Vδ | 147 | 340 | - | - | M.synch. |
| 2 | JIJEL | PQ | - | -194 | -144 | - | Quelcq. |
| 3 | ELHASSI | PQ | - | -160 | -99 | - | Quelcq. |
| 4 | MLILA | PQ | - | -25 | -12 | 20 | Quelcq. |
| 5 | DARGU | PQ | - | -25 | -12 | - | Quelcq. |
| 6 | SKIK2 | PV | 308 | 324 | - | - | M.synch. |
| 7 | ELKSEUR | PQ | - | -58 | -28 | - | Quelcq. |
| 8 | BELLA | PQ | - | -50 | -24 | - | M.asynch |
| 9 | FOUR | NL | - | -75 | * | - | - |

* :- Pour le four $Q=P.tg(\varphi)$

- Pour le redresseur on a considéré que l'ensemble charge - redresseur ne consommait que l'énergie réactive due à l'empiètement (18.5°) [LEM 78].

- Les noeuds PV ont été considérés sans régulation de tension.

| n° | Postel | Poste2 | L [km] | R [Ω] | X [Ω] | C _w /2 [μs] |
|----|---------|---------|-------------|------------|------------|-----------------------------|
| 1 | JENJEN | JIJEL | 9 | 0.81 | 3.82 | 12.28 |
| 2 | ELHASSI | JIJEL | 124.32 | 11.64 | 52.71 | 169.70 |
| 3 | JIJEL | MLILA | 110 | 4.94 | 33.66 | 323.30 |
| 4 | JIJEL | DARGU | 60 | 4.94 | 28.96 | 155.93 |
| 5 | JIJEL | SKIK2 | 120 | 5.38 | 41.72 | 327 |
| 6 | JIJEL | ELKSEUR | 120 | 5.39 | 36.72 | 2.44 |
| 7 | JIJEL | BELL | 40 | 2.1 | 12.36 | 57.8 |
| 8 | JIJEL | BELL | 40 | 2.1 | 12.36 | 57.8 |
| 9 | JIJEL | BELL | 40 | 2.04 | 12.23 | 57.8 |
| 10 | BELL | FOUR | 0 | - | - | - |

Bibliographie

Bibliographie:

Ouvrages:

- [BAZ 79] M.S.BAZARÂA & C.M.SHETTY
Non linear programming
Theory & algorithms.
J.Wiley & Sons, New York 1979
- [GRA 83] Harmonique power flow studies
Thesis of PhD, Purdue University XI - 1983
- [KIM 71] E.W.KIMBARK
Direct current transmission, Vol. 1
Wiley interscience, New York 1971
- [MIL 82] T.J.MILLER
Reactive power control in electric systems
J.Wiley & Sons, New York 1982
- [STE 82] W.D.STEVENSON
Power system analysis
Mac Graw Hill, New York 1982
- [TRI 88] J.C.I.TRIGEASSOU
Recherche de modèles expérimentaux assistés par
ordinateur
Technique et documentation-Lavoisier
Paris, 1988

[VIG 81] J.VIGNES

Algorithmes numériques

Tome II - Analyse et mise en oeuvre.

Paris,

1981

Rapports:

[EDF] Rapport de l'étude harmonique du projet Bellara

1989

[EDF 82] Bulletin de recherche EDF

n°4 série B

1982

Articles:

[CHA 78] M.CHANAS

Perturbation des réseaux industriels et de
distribution, leur compensation par des procédés
statiques-

1 - Perturbation de tension affectant le
fonctionnement des réseaux: fluctuations
 Brusques, flicker, déséquilibres et
harmoniques.

RGE . Tome 87-n°12

XII-1978

[LAG 82] L.LAGOSTENA & A.PORRINO (ENEL)

G.SANTAGOSTINO & E.CLERICI (CESI)

La distortion harmonique causée par les charges
perturbatrices dans les réseaux électriques
(Origine, propagation, compensation).

CIGRE 36-10

1982

[MAH 85] A.A.MAHMOUD & R.D.STAHLHUT

Modeling of a resistance regulated arc furnace

IEEE Trans. on power apparatus & systems

Vol.Pas-104 n°1

I-1985

[TAM 88] J.P.TAMBEY & V.I.JOEN

Q'harm - A harmonic power flow program for small ~~per~~
systems.

IEEE Trans. on power apparatus & systems

Vol.3 - n°1

I-1985