

UNIVERSITE D'ALGER

9/77

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRICITE

SECTION: ELECTROTECHNIQUE

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
الهندسة الكهربائية
THESE DE FIN D'ETUDES
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE

-PRODUCTION ET EFFETS DES HARMONIQUES
SUR LES RESEAUX ELECTRIQUES M.T ET H.T

-MOYENS D'ATTENUATION

PROPOSEE PAR SO.N.EL.GAZ
DIRIGEE PAR V STIRBU

ETUDIEE PAR:
B. METALLAQUI

janvier 1977

A MES PARENTS

A MES AMIS

L'OCCASION M'EST DONNEE

POUR EXPRIMER MES PLUS VIFS REMERCIE-
MENTS A TOUS CEUX QUI ONT CONTRIBUE,
DE PRES OU DE LOIN, A MA FORMATION ET
A L'ELABORATION DE CE MODESTE TRAVAIL.

B. METALLAOU,



I N T R O D U C T I O N

De nombreux exposés présentés au cours des journées d'études ont mis en évidence l'abondance des risques de perturbation de la tension des réseaux devant lesquels nous allons nous trouver placés en raison du développement considérable de l'utilisation des équipements électroniques dans les applications industrielles.

On a pu constater, par la même occasion, qu'il n'existe actuellement pas suffisamment de règles bien établies et auxquelles on puisse se référer pour savoir jusqu'à quel point certaines perturbations tant du point de vue des inconvénients apportés aux réseaux que de leur nocivité pour les équipements d'utilisation, restaient tolérables.

En fait, il semble ressortir que la pratique courante consiste à admettre les perturbations jusqu'au point où le distributeur est amené à les considérer comme intolérables.

Il n'y a, a-t-on dit, de perturbateur que s'il y a perturbé...

Et il est vrai que le volume de perturbations harmoniques que l'on peut laisser produire par un équipement déterminé dépend essentiellement des caractéristiques locales du réseau au point où il est raccordé, et que cela rend délicat l'établissement de règles bien claires qui permettraient de savoir exactement sur quoi l'on peut se baser pour faire un projet d'équipement nouveau, comme probablement la plupart des constructeurs le souhaiteraient.

Les distributeurs, comme la SONEELGAZ, sont conduits à être de plus en plus attentifs à ce problème:

- d'une part, en raison de l'augmentation prévisible du risque de perturbations harmoniques qui seront injectées sur les réseaux
- d'autre part, en raison de la nécessité accrue de maintenir la qualité de tension au-dessus d'un certain niveau, non seulement pour sauvegarder les conditions nécessaires à un bon fonctionnement des réseaux (exemple : minimiser les pertes), mais aussi parce que certains appareils qui utilisent précisément des composants ou dispositifs électroniques (calculateurs par ex.) exigent d'être alimentés par des tensions peu perturbées.

(N)

Dans certains réseaux industriels auxquels sont raccordés de nombreux redresseurs, en particulier dans ceux qui alimentent les lignes de chemin de fer utilisant le courant continu, et surtout dans ceux qui sont raccordés aux mutateurs des stations de conversion de transport d'énergie à courant continu, les taux d'harmoniques deviendraient prohibitifs si l'on ne prenait pas des mesures pour les limiter.

Cette étude est si l'on veut constituée de deux parties :

- une partie théorique traitant l'étude des harmoniques dans les réseaux moyenne et haute tension,
- et une petite application qui a pour but le calcul et le moyen de limitation des distorsions harmoniques sur le réseau 90 kV alimentant la ligne minière ANNABA-TEBESSA.

CHAPITRE-I-

ORIGINE DES HARMONIQUES

I - LES QUALITES DE LA FREQUENCE -

I - 1. Première Qualité : invariance

La vitesse de rotation des machines tournantes est directement liée à la fréquence. Les variations de cette dernière entraînent de ce fait des variations du couple avec lequel est fournie l'énergie mécanique. On imposera donc comme première qualité de la fréquence une constance et une précision compatibles avec le bon fonctionnement des appareils d'utilisation.

I - 2. Deuxième Qualité : pureté

L'étude des machines tournantes met en évidence la difficulté d'obtenir à leurs bornes une tension sinusoïdale sans déformation. Les déformations considérées ici étant périodiques, elles peuvent être décomposées en harmoniques de tension qui se propagent dans le réseau en fonction des impédances harmoniques de celui-ci comme on le verra plus tard. Bien d'autres appareils sont aussi des générateurs d'harmoniques de tensions ou de courant. Il y a indépendance entre ces systèmes d'harmoniques qui se superposent. Leur présence dans les lignes, dans les transformateurs, dans les condensateurs et dans les appareils d'utilisation entraîne des pertes supplémentaires. Dans certaines installations il peut apparaître aussi des résonances locales créant des conditions dangereuses pour le matériel. La seconde qualité de la fréquence est donc sa pureté qui n'est satisfaisante que si le taux d'harmoniques peut-être considéré comme négligeable.

I - 3. Troisième Qualité : optimalité

Il ne faut pas oublier que la fréquence doit avoir la meilleure valeur possible. Il est bien évident que le développement actuel des réseaux d'énergie électrique ne laisse pas de choix pour toute nouvelle machine productrice ou consommatrice à raccorder. La fréquence optimale est la fréquence du réseau préexistant. Il n'est pas sans intérêt cependant d'étudier les facteurs qui influent sur le choix de la fréquence des réseaux.

Les 3 fonctions : production, transport et utilisation posent des problèmes différents en ce qui concerne le taux d'harmoniques dans les réseaux.

II - LES HARMONIQUES DE FREQUENCE .

II - 1. Origines des Harmoniques :

La production de l'énergie électrique se fait par des centrales utilisant des grosses machines tournantes, le transport se fait en général en courant alternatif, quant à la distribution aux différents consommateurs nécessite des transformateurs et des convertisseurs.

Dans le but de cette étude les charges intéressantes sont celles qui déforment la courbe de tension et de courant du réseau. C'est le cas des charges non linéaires (non linéarité de la caractéristique $u = f(I)$)

L'installation dans les réseaux électriques de fortes sources d'harmoniques en même temps que l'utilisation d'un appareillage sensible aux harmoniques pose de grands problèmes. On peut classer ces générateurs de fréquences harmoniques, en générateurs de tension et générateurs de courants, bien que le réseau, lorsqu'il est soumis à ces tensions, soit traversé par des courants harmoniques et lorsqu'il est soumis à ces courants, fasse apparaître à ses bornes des tensions harmoniques.

II - 1.1. Générateurs de tensions harmoniques :

Un générateur de tensions harmoniques impose ses tensions au réseau qui lui est raccordé.

La représentation schématique consiste alors en une force électromotrice E_n en série avec une impédance interne Z_n . Le courant harmonique I_n débité par le générateur est déterminé par le réseau extérieur, si l'on appelle Z_{ccn} l'impédance harmonique de court-circuit du réseau, ce courant est déterminé par la loi d'Ohm :

$$I_n = \frac{E_n}{Z_n + Z_{ccn}}$$

.../...

4

de tensions

Les 2 principales sources d'harmoniques sont :

a)- Les machines tournantes génératrices et motrices où le champ tournant est nécessairement créé par un nombre fini de conducteurs placés dans un nombre fini d'encoches, ce qui ne permet pas de lui donner une répartition parfaitement sinusoïdale. On arrive cependant à éteindre pratiquement les premiers harmoniques, ce qui est le plus important, puisque les harmoniques supérieurs ont des taux bien plus faibles et se propagent plus difficilement dans le réseau. Il faut rappeler que, dans les machines tournantes, différentes causes engendrent des harmoniques qui sont tous des harmoniques de tension, mais se distinguent par certaines caractéristiques :

- Les harmoniques de la f. e. m. renforcés par la réaction d'induit, sont de rang impair, leur taux décroissant avec le rang, les harmoniques de rang h multiple de 3 étant homopolaires, les autres formant des systèmes directs ou inverses.

- Les harmoniques de denture, de rang relativement élevé, et qui se groupent par paires (rangs $h = 6n \pm 1$), d'amplitudes égales; ondulations périodiques du flux sous l'action de la denture et de l'induit.

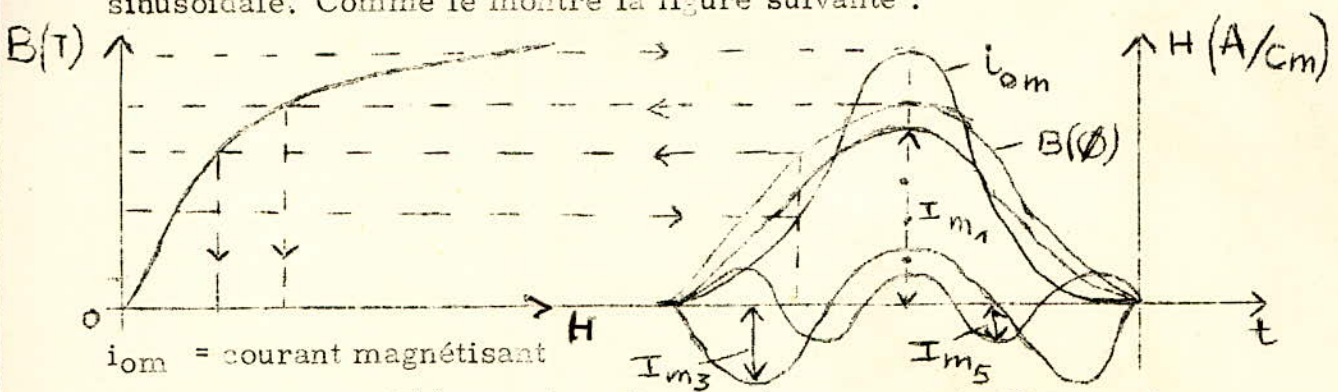
- Les harmoniques dus au déséquilibre, qui sont impairs, de taux décroissant avec le rang, mais forment tous des systèmes directs.

Dans les réseaux où sont raccordés des moteurs asynchrones puissants, on observe parfois des harmoniques de denture dont les fréquences sont décalées par rapport aux multiples de 50 HZ du fait du glissement de ces moteurs.

b)- Les circuits magnétiques saturés, c'est à dire surtout les transformateurs, où la relation entre l'induction B et le champ magnétique H n'est plus linéaire. Dans le courant magnétisant on peut admettre que le terme fondamental est prépondérant et les harmoniques négligeables en première approximation. Mais le flux d'induction et donc la tension aux bornes ne peuvent plus être considérés comme sinusoïdaux.

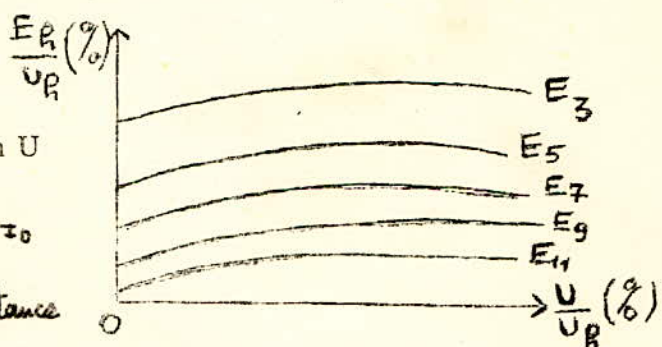
Les harmoniques produits par le transformateur sont dus à la saturation de son circuit magnétique.

La courbe d'aimantation n'étant pas une droite, le courant qui correspond à un flux d'induction sinusoidal donc à une F. e. m sinusoidale ne sera pas sinusoidal. Comme le montre la figure suivante :



La courbe $i_{om} = f(t)$ peut-être développée en une série d'harmoniques. Etant donné que cette courbe est symétrique par rapport à l'origine la série contient seulement les harmoniques d'ordre impair.

La tension harmonique E_R dépend de la valeur de la tension U appliquée au transformateur.



F. M. H. produites par i_0

$$\phi = \frac{W_1 \cdot I_0}{R} \leftarrow \text{reluctance}$$

Pour l'harmonique de rang h on peut schématiser la bobine à noyau de fer monophasée par une impédance de fuite $r+jlh.w$ et une impédance magnétisante $L.h.w$, en série avec une force électromotrice harmonique E_h . La symétrie du cycle d'hystérésis permet de dire qu'il n'y a que des harmoniques impairs. La décomposition en série de Fourier des tensions aux bornes de 3 phases supposées parfaitement symétriques donne :

$$U_1 = u_1 \cos (wt - \phi_1) + u_3 \cos (3 wt - \phi_3) + u_5 \cos (5 wt - \phi_5) + \dots$$

$$U_2 = u_1 \cos (wt - \frac{2\Pi}{3} - \phi_1) + u_3 \cos (3 wt - \frac{6\Pi}{3} - \phi_3) + u_5 \cos (5 wt - \frac{10\Pi}{3} - \phi_5) + \dots$$

$$U_3 = u_1 \cos (wt - \frac{4\Pi}{3} - \phi_1) + u_3 \cos (3 wt - \frac{12\Pi}{3} - \phi_3) + u_5 \cos (5 wt - \frac{20\Pi}{3} - \phi_5) + \dots$$

En éliminant les multiples de 2π dans les déphasages on constate que quel que soit $n = 0, 1, 2$ etc.

- Les harmoniques de rang $h = 3(n+1)$ sont homopolaires,
- Les harmoniques de rang $h = (6p + 1)$ forment un système direct,
- Les harmoniques de rang $h = (6n - 1)$ forment un système inverse.

Les amplitudes de ces harmoniques décroissent régulièrement avec le rang, et dépendent de l'état de saturation des noyaux. Le taux d'harmonique 3 et même les taux d'harmoniques 5 et 7 atteignent souvent des valeurs élevées par exemple 30 pour cent et même plus.

La teneur en % des harmoniques supérieurs dans la courbe du courant et d'autant plus élevée que l'amplitude de l'induction est plus grande.

Les transformateurs sont donc des sources très importantes d'harmoniques.

On peut cependant éviter d'envoyer dans le réseau les harmoniques 3 par un couplage en triangle qui constitue un court-circuit pour eux puisqu'il sont homopolaires.

I -1.2. Générateurs de courants harmoniques :

Un générateur de courants harmoniques est un appareil qui débite dans le réseau des courants harmoniques indépendants de l'impédance du réseau, les tensions harmoniques aux bornes d'un générateur sont données par la loi d'Ohm:

$$U_h = Z_{cch} \cdot I_h$$

Il existe plusieurs générateurs de courants harmoniques, dont le plus important est le redresseur industriel.

a)- Les redresseurs : Les sources d'harmoniques qui sont actuellement de beaucoup les plus importantes sont les mutateurs qui produisent essentiellement des harmoniques de courant équilibrés dans les réseaux à courant alternatif. Un mutateur à p phase effectives produit des harmoniques d'ordre Kp dans le réseau à courant alternatif. K étant un nombre entier supérieur ou égale à 1. Il y a ainsi production d'une bande de fréquence entre les 2 types de réseaux (car ce mutateur produit des harmoniques d'ordre Kp dans le réseau à courant continu).
.../...

p étant supérieur ou égal à 6 et même souvent à 12 ou plus, les harmoniques d'ordre inférieurs sont absents. Dans les réseaux à courant alternatif, les harmoniques peuvent être considérés comme engendrés par des mutateurs sous forme de courant provenant d'une source de forte impédance; L'amplitude dépend de la charge et est largement indépendante du degré de contrôle par grille.

Le courant de l'harmonique d'ordre h est de l'ordre de grandeur de $\frac{i}{h}$ du courant fondamental. La tension harmonique est donnée par le produit du courant harmonique et de l'impédance du réseau d'alimentation vue du mutateur.

Les matériels polluants de la clientèle sont des récepteurs à caractéristiques courant-tension non linéaires dans lesquels circule un courant déformé qui contient une certaine proportion de courants harmoniques d'amplitudes et phase bien déterminées. Dans la mesure où la valeur de ces courants harmoniques reste indépendante de la distorsion harmonique de la tension d'alimentation on considère les matériels polluants, en première approximation, comme des sources de courants harmoniques. Cette façon de raisonner semble admise en règle générale, sauf dans les cas exceptionnels, où les distorsions de tension réagissent en retour sur le fonctionnement des matériels.

C'est le cas pour certains circuits de commande de redresseurs contrôlés. Ces phénomènes en retour ne semble pas infirmer la façon de penser habituellement dans les cas normaux.

b)- Les appareils comportant un arc électrique, ou utilisant une décharge électrique (fours à arc, soudeuses, éclairage fluorescent, etc.) engendrent des harmoniques généralement très instables dans le temps. Leur taux décroît rapidement avec leur rang h, les harmoniques 3 et 5 pouvant atteindre des taux gênants.

11

CHAPITRE -II-

ETUDE DES HARMONIQUES

Les sources harmoniques sont fort nombreuses, on commence l'étude des harmoniques par donner certaines généralités, ensuite on essaye de comparer le niveau des harmoniques des différentes sources afin de remarquer les plus gênants.

I - - GENERALITES

I -1. Rappel Théorique

I -1.1 Valeur efficace d'une grandeur alternative non sinusoïdale.

La valeur efficace Y d'une fonction périodique y est la moyenne quadratique des valeurs prises par cette fonction pendant la durée d'une période.

$$Y = \left(\frac{1}{T} \int_0^T y^2 dt \right)^{1/2}$$

Lorsque le développement en série de Fourier d'une fonction périodique est connu, on peut déterminer sa valeur efficace. On calcule d'abord le carré de cette fonction :

$$y^2 = \left[C_0 + C_1 \cos (\omega t - \phi_1) + C_2 \cos (2 \omega t - \phi_2) + \dots \right]^2$$

En effectuant ce calcul on trouve les expressions suivantes :

- termes carrés : $C_n^2 \cos (n \omega t - \phi_n)$
- termes sinusoïdaux : $2 C_0 C_n \cos (n \omega t - \phi_n)$
- termes rectangles : $2 C_m C_n \cos (m \omega t - \phi_m) \cos (n \omega t - \phi_n)$

L'intégration des termes carrés donne, compte tenu de ce que l'intervalle d'intégration T est un multiple des périodes $\frac{T}{n}$ de l'harmonique considéré, : $(\frac{T}{n}) C_n^2$.

~~I -1.2. Suppression des termes carrés et des termes rectangles.~~

~~Le calcul des termes carrés et des termes rectangles sont effectués toujours dans le même ordre que précédemment. On obtient dans ce cas la même valeur efficace que celle obtenue à ce stade de la solution des problèmes localisés.~~

L'intégration des termes sinusoidaux donne, pour la même raison, des valeurs nulles.

L'integration des termes rectangles donne aussi des valeurs nulles, ce qu'on verifie en remplaçant le produit de cosinus par une somme de cosinus de pulsations (n+m).w et (n-m).w. par une somme
Ainsi la valeur efficace de la fonction est :

$$Y = \left[0,5 (C_1^2 + C_2^2 + \dots + C_n^2 + \dots) \right]^{1/2}$$

Cependant la valeur efficace d'un harmonique de rang n considéré isolément est : $Y_n = C_n / (2)^{1/2}$

donc on a : $Y = (Y_1^2 + Y_2^2 + \dots + Y_n^2 + \dots)^{1/2}$

si on pose : $y_n = Y_n/Y_1$ c'est à dire on rapporte la valeur efficace des composantes harmoniques à celles du terme fondamental on obtient :

$$Y = Y_1 (1 + y_2^2 + y_3^2 + \dots + y_n^2 + \dots)^{1/2}$$

I -1.2. Superposition d'un courant sinusoidal et de l'un de ses harmoniques.

La pureté de la fréquence est une qualité que l'on sous entend toujours mais à laquelle on se réfère rarement. Cela tient sans doute à ce que la qualité généralement obtenue à ce point de vue est largement satisfaisante, et que l'on ne rencontre que des problèmes localisés.

Les réseaux de transport et de distribution sont des systèmes linéaires, où donc on peut appliquer le théorème de superposition. Cela permet de voir que les systèmes de tensions et courants harmoniques se répartissent dans le réseau (et s'y propagent) indépendamment les uns des autres.

Les coefficients de self et mutuelle induction et les capacités ont mêmes valeurs que pour le 50 Hz. Il en résulte pour l'harmonique de rang h (donc de pulsation = $w_h = hw$),

- des inductances $Lw_h = h (Lw)$ et $Mw_h = h (Mw)$
- des capacités $Cw_h = h (Cw)$.

considérons le courant de période $T = \frac{2\pi}{\omega}$ d'intensité instantanée : $i = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t) + I_h \sqrt{2} \sin(h\omega t)$, -14-

et désignons par I_e son intensité efficace.

$$i^2 = 2 I_1^2 \sin^2 \omega t + 2 I_h^2 \sin^2(h\omega t) + 4 I_1 I_h \sin \omega t \sin h\omega t$$

I_e^2 est la valeur moyenne de i^2 pendant une période T , la valeur moyenne de $\sin^2 h\omega t$ et $\cos^2 h\omega t$ pendant une période $T = \frac{2\pi}{\omega}$ du terme fondamental est égale à $\frac{1}{2}$; et la valeur moyenne des produits $\cos m\omega t$ et $\sin n\omega t$, $\sin^2 h\omega t$ pendant une période T du terme fondamental

est nulle lorsque m et h sont différents. Chaque harmonique transite une énergie P_h sous forme d'un courant I_h sous la tension U_h donc le courant efficace est $I_e^2 = I_1^2 + I_h^2$ et le courant efficace total est

$$I_e = \sqrt{I_1^2 + \sum_{h=2} I_h^2}$$

avec un taux d'harmonique h (exprimé en pour-cent) = $100 \frac{I_h}{I_1}$

La tension efficace totale est : $U_e = \sqrt{U_1^2 + \sum_{h=2} U_h^2}$

avec un taux d'harmonique $h = 100 \frac{U_h}{U_1}$ (%)

Le produit $U_e I_e$ est alors supérieur à la puissance apparente S_a à 50 Hz, l'excès sur l'unité du rapport de $U_e I_e$ à S_a est appelé facteur déformant,

$$f_d = \frac{U_e I_e}{S_a} - 1$$

En fait on ne peut raisonner de façon juste et simple qu'en séparant l'onde fondamentale et les ondes harmoniques puisque leurs propagations sont indépendantes.

I-2. Niveau d'harmoniques :

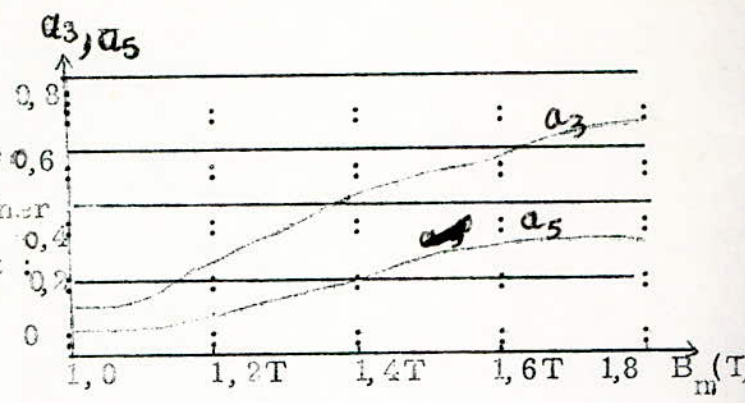
Pour affirmer qu'un harmonique est gênant ou non il faut faire une étude des harmoniques des différentes sources. Nous n'étudierons que quelques cas :

1-2.1. Le transformateur:

On a vu que la teneur en% des harmoniques supérieurs dans la courbe du courant est d'autant plus élevée que l'amplitude de l'induction est plus grande. Sur la figure suivante on a tracé, pour l'acier à transformateur laminé à chaud les rapports : I_{m3}/I_{m1} et I_{m5}/I_{m1} en fonction de B_m . On voit que pour les inductions habituelles dans les noyaux des transformateurs de puissance qui sont de l'ordre de 1,4 à 1,45 T le rapport $a_3 = I_{m3}/I_{m1}$ atteint 50% c'est à dire que la courbe du courant devient pointue.

.../...

Connaissant les amplitudes des harmoniques dans la courbe de courant nous pouvons déterminer la valeur efficace de ce courant



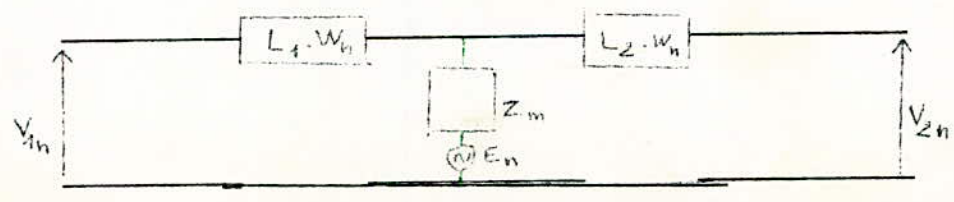
$$I = \left(\frac{I_{m1}}{\sqrt{2}} \right) \times K_a, \text{ avec } K_a = (1 + a_3^2 + a_5^2 + \dots)^{1/2}$$

Le tableau suivant donne les valeurs de I_{m1} , a_3 , et a_5 pour différentes valeurs de l'induction B d'après Richter :

B (T)	I_{m1} (A/Cm)	a_3	a_5	K_a
1,0	1,53	0,162	0,05	1,2
1,2	2,73	0,287	0,094	1,32
1,4	7,38	0,528	0,267	1,55
:	:	:	:	:
1,6	26,1	0,658	0,331	1,60
1,8	74,5	0,658	0,275	1,58

D'après ce tableau on constate que la composante fondamentale est prédominante.

Dans ce qui suit nous allons étudier le transformateur en régime harmonique. Le schéma équivalent d'un transformateur en régime harmonique est un quadripôle actif conforme à la figure suivante :



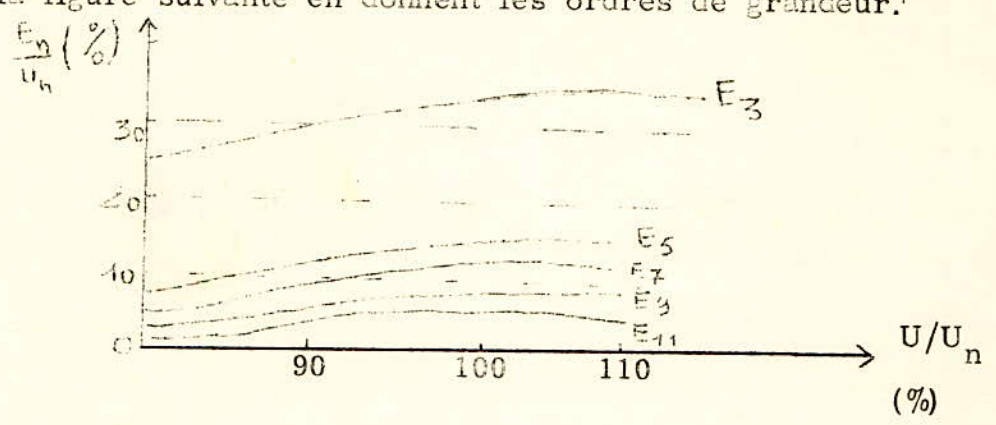
L_1 et L_2 sont les inductrices de fuites 1^{ères} et 2^{èmes}

Ce schéma est le schéma en T classique du transformateur dans lequel nous plaçons une force électromotrice E_n en série avec l'impédance magnétisante Z_n de façon à rendre compte des courants harmoniques engendrés par le circuit magnétique.

I-2.1.1- Réseau Equivalent au Transformateur pour les Systèmes Harmoniques Directs et Inverses.

Les réactance de fuites primaire et secondaire du transformateur sont des réactances dans l'air, donc linéaires et proportionnelles à la fréquence. L'impédance magnétisante Z_m doit-être considérée comme étant indépendante du rang de l'harmonique et égale à celle qu'on mesure à 50 Hz . Z_m ne dépend que de l'état de saturation du transformateur.

La source de tension harmonique fictive E_n ne dépend pour un rang n bien déterminé que de la tension fondamentale appliquée au transformateur, les courbes de la figure suivante en donnent les ordres de grandeur :



Les tensions harmoniques V_{1n} et V_{2n} qui apparaissent aux bornes du transformateur sont alors fonction de la valeur relative des impédances harmoniques des réseaux primaires et secondaire par rapport aux impédances internes du transformateur ; lorsque des réseaux présentent des impédances faibles, il sont parcourus par des courants harmoniques d'autant plus grands que les impédances internes du transformateur sont plus faibles, c'est-à-dire que la machine est plus puissante, au contraire quand les impédances extérieures sont élevées, les courants harmoniques à travers le réseau sont faibles et les tensions harmoniques que l'on mesure aux bornes du transformateur sont élevées et voisines des forces électromotrices fictives du transformateur et ceci d'autant plus que la puissance de la machine est plus grande.

Il y a donc lieu de retenir que les distorsions des courants et des tensions du réseau d'énergie sont d'autant plus grandes que la puissance de ces appareils est plus importante.

1.2.1.2-Réseau Equivalent du Transformateur pour le Régime Homopolaire.

Pour les régimes harmoniques homopolaires, comme pour les harmoniques à 50Hz, le quadripôle équivalent au transformateur dépend de la mise à terre du point neutre et du couplage des enroulements.

On établit les schémas équivalents en tenant compte des considérations suivantes :

- Les courants harmoniques d'excitation, multiples de 3, circulent librement à l'intérieur d'un couplage en triangle; un passage leur est également offert par le couplage en étoile avec neutre à la terre, les courants se refermant par les impédances à la terre du réseau extérieur, les courants harmoniques homopolaires ne peuvent pas circuler dans les couplages en étoile avec neutre isolé.

- Les tensions harmoniques homopolaires apparaissent entre les phases du réseau et le point neutre, et la répartition des tensions harmoniques entre ce point et la terre, d'une part, et les phases et la terre, d'autre part, dépend des impédances entre phase et terre et entre terre et neutre du réseau.

1.2.2.- Le Redresseur :

Les matériels polluants de la clientèle sont des récepteurs à caractéristiques courant-tension non linéaires dans lesquels circule un courant déformé qui contient une certaine proportion de courants harmoniques d'amplitude et phase bien déterminées.

Dans la mesure où la valeur de ces courants harmoniques restent indépendante de la distorsion harmonique de la tension d'alimentation, on considère les matériels polluants, en première approximation, comme des sources de courants harmoniques.

Les amplitudes des courants harmoniques engendrés par les redresseurs suivent une loi approchée très simple.

Si l'on désigne par I_1 la valeur efficace du terme fondamentale de l'onde de courant alimentant le redresseur et I_n la valeur efficace du courant harmonique de rang n, on a : $I_n = (1/n) I_1$.

En effet, si on suppose que le courant redresseur est composé d'une suite d'ondes rectangulaires d'amplitude I_0 et de (durée) période $\frac{2\Pi}{p}$, la valeur efficace des courants harmoniques et du fondamental est :

$$I_n = \frac{I_0}{\sqrt{2 \Pi^2}} \int_{-\Pi/p}^{\Pi/p} \cos (nx) dx = \left(\frac{\sqrt{2} I_0}{\Pi \cdot n} \right) \sin \frac{(n\Pi)}{p}$$

Et par conséquent en négligeant les portions de commutations, on obtient l'expression de distorsion :

$$I_n = (1/n) I_1$$

puisque si $n = p + 1$ n'est pas un multiple de 3 on a :

$\sin \left(\frac{n\Pi}{p} \right) = \mp \sin \left(\frac{\Pi}{p} \right)$. Par conséquent, les amplitudes des courants harmoniques sont d'autant plus faibles que leurs rangs sont élevés.

1-2.3. Appareils à réglage électronique de phase.

On prend comme exemple le cas où la charge est une résistance pure R. R est alimenté par un réseau de tension sinusoïdale $U_m \sin wt$ et d'impédance interne nulle. Ainsi la courbe de courant absorbé à pour équation :

$$I(t) = 0 \text{ pour } 0 < t < \theta, \quad \Pi < t < \Pi + \theta$$

$$I(t) = \frac{U(t)}{R} \text{ pour } \theta < t < \Pi, \quad \Pi + \theta < t < 2\Pi$$

Le calcul des composantes harmoniques consiste à développer $I(t)$ en série de Fourier.

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos (n w t) + b_n \sin (n w t) \right]$$

$$a_n = \frac{1}{2 \Pi} \times \int_0^{2\Pi} i(wt) \cos (nwt) d(wt)$$

$$b_n = \frac{1}{2 \Pi} \times \int_0^{2 \Pi} i(wt) \sin (nwt) d(wt)$$

.../...

Comme la courbe est symétrique par rapport à l'axe des abscisses il n'y aura que les harmoniques de rang impair.

pour n impair ≠ 1, on obtient :

$$a_n = \frac{1}{\pi} \left[\frac{\cos (n+1) \theta - 1}{n+1} - \frac{\cos (n-1) \theta - 1}{n-1} \right]$$

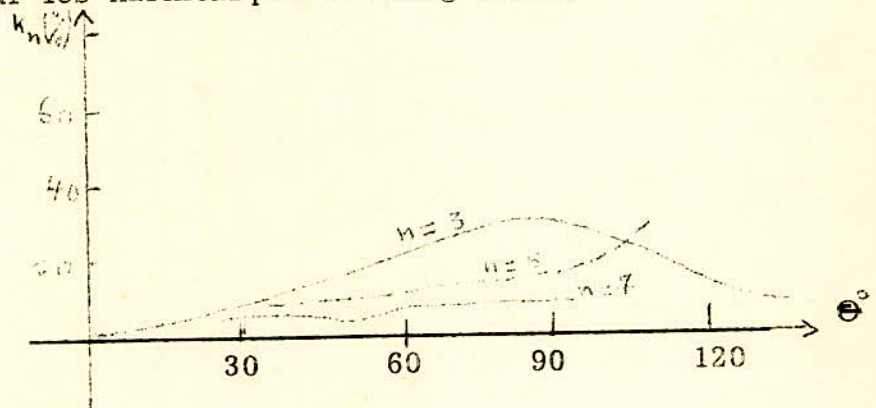
$$b_n = \frac{1}{\pi} \left[\frac{\sin (n+1) \theta}{n+1} - \frac{\sin (n-1) \theta}{n-1} \right]$$

Si on rapporte les valeurs efficaces des composantes au courant efficace sinusoïdal I₀ prélevé au réseau par la même charge lorsque l'angle d'amorçage θ = 0° on aura :

$$K_n = I_n/I_0 = (a_n^2 + b_n^2)^{1/2}$$

ou I₀ = U/R , U = valeur efficace de la tension du réseau.

La figure suivante montre les variations de K_n en fonction de l'angle d'amorçage, pour les harmoniques de rang faible.



La phase du courant harmonique de rang n est

$$\phi_n = \text{arctg} (b_n/a_n)$$

1-3. Comparaison de quelques Sources d'Harmoniques :

Le tableau suivant donne un résumé du pouvoir perturbant d'un certain nombre de matériels. Il en ressort principalement les points suivants :

- Les appareillages les plus polluants sont les circuits d'alimentation des postes de télévision. Ceux-ci sont des systèmes redresseurs dont les organes de filtrage côté continu sont souvent réduits à une simple capacité. De ce fait, le courant prélevé sur le réseau est constitué d'impulsions périodiques à 50 Hz très riches en harmoniques.

- Les appareillages normalement polluants sont les systèmes à redresseur qui en général prélèvent sur le réseau une onde de courant plus ou moins apparentée à une onde en forme de créneaux.

- Les appareillages les moins polluants semblent être tout une série d'appareillages à réponses courant-tension non linéaires qui ne mettent pas forcément en oeuvre de composants "redresseurs".

Matériel	En fonction du rang N taux des courants rapportés au courant à pleine puissance à 50 Hz
Redresseur monophasés contrôlés et semi-contrôlés double alternance avec charge résistive ou à courant lissé ou Thyristors tête-bêche avec charge résistive, appareil électromécanique, tube fluorescent	- Harmonique de rangs impairs seulement, - Amplitude maximale de l'ordre de 1/N avec décroissance plus rapide lorsque N augmente, - Disparition de certaines fréquences pour certaines valeurs de l'angle de contrôle de phase en cas de redressement semi-contrôlé ou à contrôle séquentiel.
Redresseur monophasé à une alternance à charge résistive ou à courant lissé	- Harmoniques de rangs pairs et impairs - Amplitude maximale de l'ordre de 1/N avec décroissance plus rapide lorsque N augmente

Matériel	En fonction du rang N taux des courants harmoniques rapportés au courant à pleine puissance à 50 Hz
Redresseur hexaphasés à p phases effectivement contrôlées	-Harmoniques de rangs $K_p \pm 1$, -Amplitude maximale de l'ordre de $1/N$ avec décroissance plus rapide lorsque N augmente, -Disparition de certaines fréquences pour certaines valeurs de l'angle de contrôle de phase en cas de semi-contrôle.
Fours à arc pendant période de fusion	-Harmoniques de rangs pairs et impairs, -Amplitude de l'ordre de 5% pour $N = 2$, -Décroissance lente lorsque N augmente.
Compensateurs statiques de fours à arc	-Harmoniques de rangs 5, 7, 11, 13 etc., - Décroissance très rapide lorsque N augmente.
Locomotives monophasées à redresseurs	-Harmoniques impairs, -Niveau de l'ordre de 20% pour $N=3$, -Décroissance rapide lorsque N augmente.

II - INFLUENCE DES MONTAGES REDRESSEURS-ONDULATEURS SUR LA QUALITE DU RESEAU.

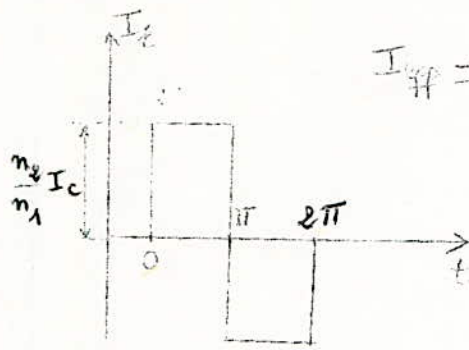
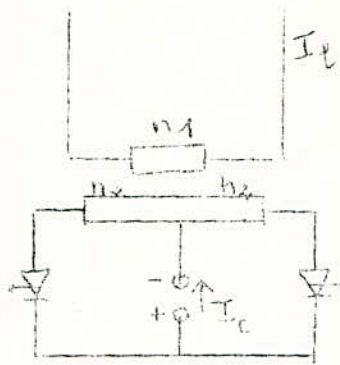
II -1. Forme de courant Consommé par les Montages Redresseurs Onduleurs - Harmoniques :

II -1.1. Quelques Schémas de base avec les formes typiques de courant :

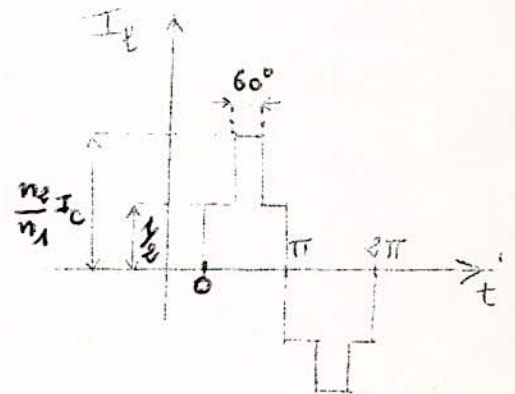
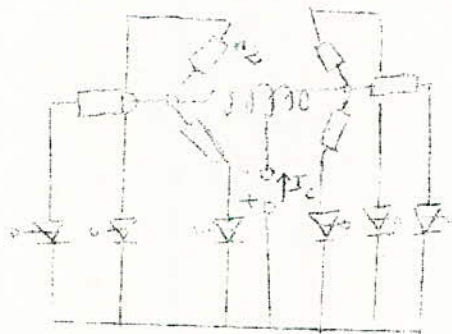
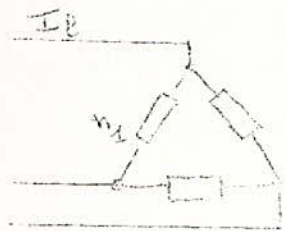
Dans le circuit à courant continu, le courant est supposé être continu et non haché.

Par le jeu des commutations, les phases du réseau alternatif débitent des "tranches" de courant continu. La composition, pour un des fils de phase l'alimentation, des tranches successives de courant qui y circulent consécutivement aux débits successifs des thyristors (ou diodes) donne pour différents schémas les formes qui sont représentées. Les valeurs efficaces correspondant sont indiquées. Il est à remarquer que les formes de courant sont les mêmes quel que soit le retard à l'allumage (sous réserve que le courant dans le circuit continu reste continu et ne devient pas haché).

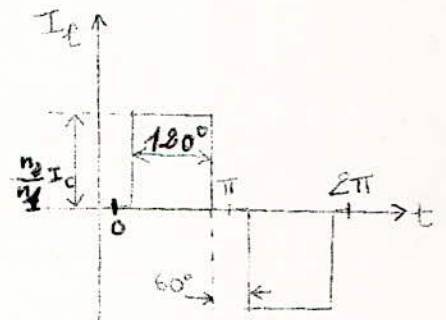
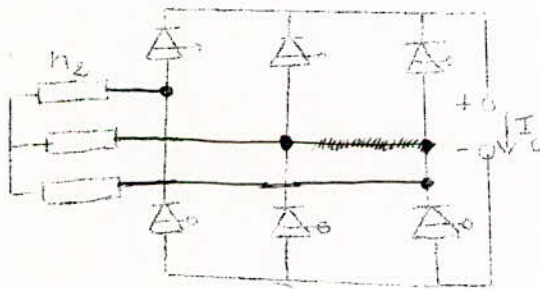
23



$$I_{\text{eff}} = \frac{n_2}{n_1} I_c$$



$$I_{\text{eff}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \frac{n_2}{n_1} I_c = 0,816 \frac{n_2}{n_1} I_c$$



$$I_{\text{eff}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \frac{n_2}{n_1} I_c$$

$$= 0,816 \frac{n_2}{n_1} I_c$$

Remarque : On a supposé la chute de tension inductive nulle.
Donc on a des courants primaires avec des formes idéales.

II. 4.2- Décomposition en harmonique pour un cas typique

Ordre des harmoniques :

Théoriquement les courants en ligne coté réseau ne contiennent que des harmoniques de fréquence $(Kp \pm 1) f_1$, et la tension continue ne contient que des harmoniques de fréquence $Kp f_1$

$K = 1, 2, 3$ etc

$p =$ indice de pulsation

$f_1 =$ fréquence nominale

Cependant, les écarts tolérés en pratique par rapport à la forme sinusoïdale théorique et à la symétrie des tensions coté réseau peuvent faire apparaître certains harmoniques dont la valeur théorique devrait être nulle.

Amplitude des Harmoniques coté alternatif :

Les courants côté réseau alternatif contiennent des harmoniques de rang $n = Kp \pm 1$ dont la valeur efficace idéale ($dx = 0$) est :

$$I_{Ln} = \frac{1}{n} \times \sqrt{3} \times \cos \phi \times I_L$$

$(\sqrt{3} \times \cos \phi)$: facteur de déformation du courant d'alimentation I_L) Expression qui, pour une alimentation triphasé, peut-être mise sous la forme :

$$I_{Ln} = \frac{1}{n} \times \frac{U_{dio} \cdot I_d}{\sqrt{3} \cdot U_L}$$

U_L : tension nominale d'alimentation entre phases.

U_{dio} : tension continue fictive (idéale) à vide

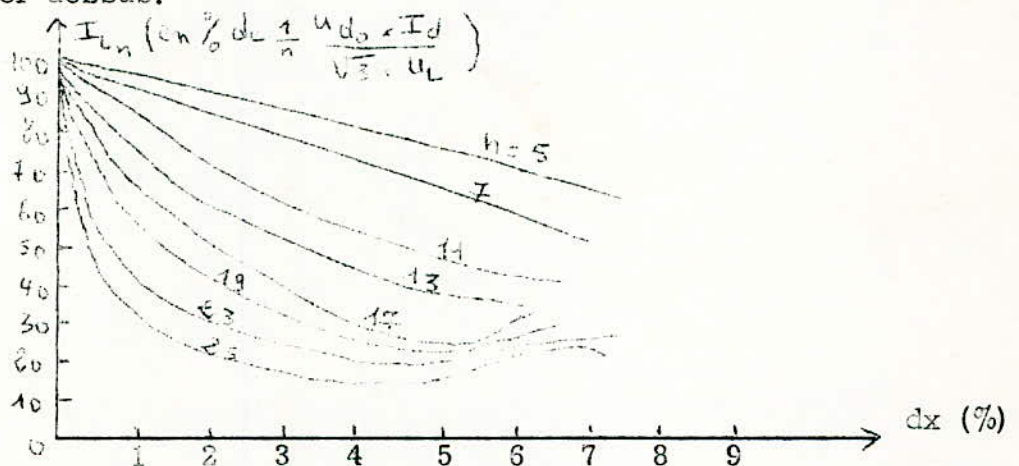
205

I_d : courant continu nominal du groupe

d_x : chute inductive totale de tension continue pour le courant continu nominal I_d , en pour cent de U_{d10}

Ces expressions ont été établies dans l'hypothèse de commutation instantanées, or le phénomène de l'empiètement anodique améliore la forme des courants de ligne en approchant celle-ci de la sinusoïde.

Ce fait réduit l'amplitude des harmoniques dans une mesure qui est indiquée par la figure suivante où la valeur 100 représente celle de I_{Ln} donnée par les formules ci-dessus.



Les courbes sont limitées aux cas de $n = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25$ valables pour $p = 6$ et aussi pour $p = 12$ en considérant $n = 11, 13, 23, 25$.

Il faut bien garder dans l'esprit que ces courants harmoniques doivent circuler et qu'ils sont proportionnels au courant continu débité. Ils sont fournis par les générateurs alimentant le réseau.

Une autre manière d'envisager le phénomène est de considérer le redresseur comme "source" de courants harmoniques qui circulent dans les impédances du réseau. Cette source est à courant constant pour un courant continu constant.

Les courants harmoniques circulent surtout dans les parties du réseau présentant une faible inductance (cas des alternateurs puissants) et à fortiori dans les capacités permettant leur retour à la source (retour au point neutre du transformateur).

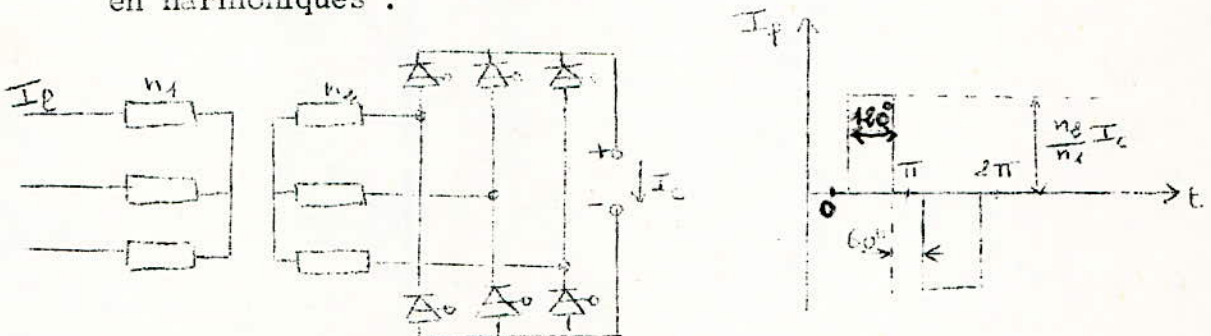
Si pour un harmonique déterminé, il existe un circuit de retour "inductance capacité" en résonance sur sa fréquence, la totalité de ce courant passera par le circuit ainsi "accordé". On voit donc que les harmoniques de courant coté réseau peuvent circuler dans des circuits où ils sont indésirables et perturbent certains fonctionnements.

En particulier, si le réseau de production et de transport présente une inductance non négligeable, des tensions harmoniques apparaissent et peuvent engendrer des courants perturbateurs chez divers utilisateurs.

Ce sont surtout des circuits à "courants faibles" qui risquent d'être mis en cause (Téléphone par la ligne HT, commande impulsionnelle, distribution horaire etc...)

Généralement, la protection pourra être située sur ces circuits et sera ainsi peu onéreuse.

* On peut donner les résultats de la décomposition d'un cas typique, en harmoniques :



Le courant efficace total en ligne est :

$$I_{L_t} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \frac{n_2}{n_1} I_c = 0,816 \frac{n_2}{n_1} I_c$$

fréquence harmoniques : $(K_p \pm 1) \cdot f_{\text{fond}}$

On décompose en harmoniques, le courant primaire pour le pont de GRAETZ en couplage étoile-étoile en supposant la chute de tension inductive nulle.

Courants efficaces en ligne	$\frac{I_{L_n}}{\frac{n_2}{n_1} I_c}$	$\frac{I_{L_n}}{I_{L_t}}$	Fréquence f : pour fondamen- tal 50 Hz
I_{L_t} Total	$\left(\frac{2}{3}\right)^{0,5} = 0,816$	1	
I_{L_1} fondamental	$\frac{\sqrt{3} \sqrt{2}}{II} = 0,779$	0,95	50
I_{L_5} harmonique 5	$\frac{1}{5} \frac{\sqrt{3} \sqrt{2}}{II} = 0,156$	0,19	250
I_{L_7} harmonique 7	$\frac{1}{7} \frac{\sqrt{3} \sqrt{2}}{II} = 0,111$	0,136	350
$I_{L_{11}}$ harmonique 11	$\frac{1}{11} \frac{\sqrt{3} \sqrt{2}}{II} = 0,07$	0,086	550
$I_{L_{13}}$ harmonique 13	$\frac{1}{13} \frac{\sqrt{3} \sqrt{2}}{II} = 0,06$	0,073	650

Le courant efficace en ligne du fondamental à l'harmonique 13 est égal à

$$I_L (1 \text{ à } 13) = \sqrt{\sum_{h=1}^{13} I_{L_n}^2}$$

$$= \sqrt{(0,95)^2 + (0,19)^2 + \dots + (0,073)^2} \times I_{L_t} = 0,985 \cdot I_{L_t}$$

N.B. : (1-) pour 1 A en ligne, il y a 0,95 A à 50 Hz, 0,19 A à 250 Hz, 0,136 A à 350 Hz etc.

(2-) le fondamental et les quatre premiers harmoniques représentent 98,5% du courant total en ligne I_{L_t}

.../...

3) Chute inductive de tension continue.

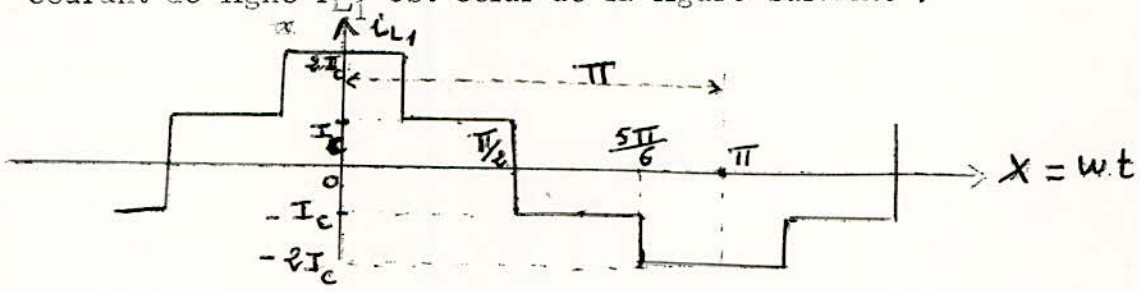
C'est la chute de tension continue, pour une charge déterminée, due à l'inductance du côté alternatif, et exprimée généralement en pourcent de la tension continue idéale à vide.

3) Harmoniques $n = K.p \pm 1$ du courant de ligne :

On sait que la tension continue comporte les harmoniques de rang $K.p$ (p : indice de pulsation, $K = 1, 2, 3, \dots$), ces harmoniques de tension ne peuvent se répercuter sur la tension primaire, à laquelle le réseau impose la forme sinusoïdale.

- exemple : montage de GRAETZ

Dans le cas d'un couplage triangle - étoile, en supposant l'égalité des nombres de spires d'un enroulement primaire et d'un enroulement secondaire ($n_1 = n_2$) dans l'approximation de courants rectangulaires, le courant de ligne i_{L1} est celui de la figure suivante :



Cette même forme, mais avec des ordonnées différentes, se retrouve pour l'hexaphasé à simple voie et le montage à bobine d'absorption (à primaire triangle).

Pour calculer commodément les termes de la série de Fourier, faisons correspondre l'origine du temps à un axe de symétrie appliquons les règles d'élimination.

- courant alternatif symétrique : valeur nulle;

$i_{L1}(-x) = i_{L1}(x)$: pas de termes sinus;

$i_{L1}(x + \pi) = -i_{L1}(x)$: pas d'harmoniques pairs.

Le développement est donc de la forme :

$i_{L1} = B_1 \cos x + B_3 \cos 3x + B_5 \cos 5x + \dots + B_n \cos nx + \dots$

avec n impair.

.../...

Calcul du terme général : $B_n = \frac{1}{\Pi} \int_{-\Pi}^{\Pi} \dot{i}_{L_1} \cos nx \, dx$

mais $\dot{i}_{L_1}(-x) \cos n(-x) = \dot{i}_{L_1}(x) \cos nx$, donc

$$B_n = \frac{2}{\Pi} \int_0^{\Pi} \dot{i}_{L_1} \cos nx \, dx.$$

$$B_n = \frac{2}{\Pi} I_c \left[\int_0^{\Pi/6} 2 \cos nx \, dx + \int_{\Pi/6}^{\Pi/2} \cos nx \, dx + \int_{\Pi/2}^{5\Pi/6} -\cos nx \, dx + \int_{5\Pi/6}^{\Pi} -2 \cos nx \, dx \right]$$

$$B_n = \frac{2 I_c}{n \Pi} \left(\sin \frac{n\Pi}{6} + 2 \sin \frac{n\Pi}{2} + \sin n \frac{5 \Pi}{6} \right)$$

Pour $n = 1$, on trouve l'amplitude I_1 du fondamental

$$I_1 = \frac{2 I_c}{\Pi} \left(\frac{1}{2} + 2 + \frac{1}{2} \right) = \frac{6 I_c}{\Pi}$$

Pour $n = 3$: $I_3 = \frac{2 I_c}{3\Pi} (1 - 1 + 1) = 0$

De même : $I_5 = \frac{I_1}{5}$, $I_7 = -\frac{I_1}{7}$, $I_9 = 0$, $I_{11} = -\frac{I_1}{11}$,

$$i_{L_1} = I_1 \left(\cos x + \frac{\cos 5x}{5} - \frac{\cos 7x}{7} - \frac{\cos 11x}{11} + \frac{\cos 13x}{13} + \dots \right)$$

Les harmoniques de courant sont donc de rang

$$n = 6k \pm 1 \quad \dots/\dots$$

II - 2. Harmoniques de Rang bas Provoqués par les Redresseurs de forte Puissance en Régime Permanent :

- Les perturbations dont on parlera ne seront que les harmoniques jusqu'au 25e environ, assez facilement mesurables ou calculables à l'avance.

On n'abordera pas les perturbations de fréquence supérieure, moyenne ou haute, que constituent les parasites.

-- On étudiera les perturbations du réseau par les équipements électroniques et non la réciproque, c'est à dire les perturbations subies par ces équipements du fait d'une tension déformée.

- Les équipements électroniques de puissance consistent principalement en redresseur; les gradateurs, les onduleurs, cycloconvertisseurs sont en moyenne de puissance inférieure aux gros redresseurs rencontrés dans l'électrochimie, la sidérurgie par exemple.

- Nous avons eu à analyser des régimes de marche très fluctuants, mais n'avons pas étudié de régimes réellement transitoires.

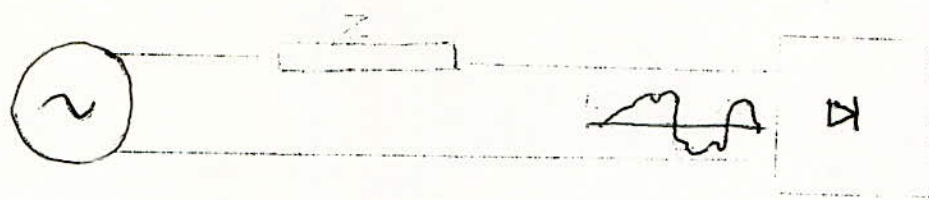
II -2.1- Tensions Harmoniques provoquées par des courants harmoniques Passant dans les Impédances du Réseau.

a)- Principe : Un récepteur qui absorbe un courant déformé peut-être considéré comme un générateur d'harmoniques.

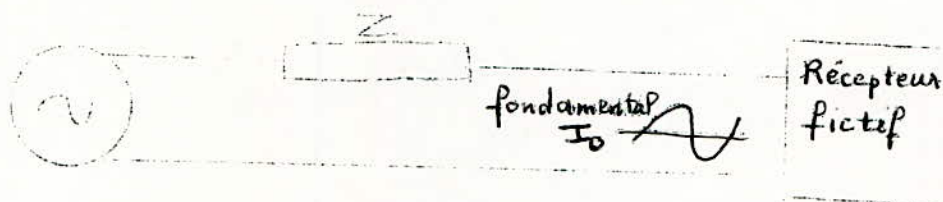
En effet le système réel réseau-récepteur peut-être considéré comme la superposition de 2 systèmes.

- Un système à 50 Hz ou fondamental, où le récepteur réel (redresseur) est remplacé par un récepteur fictif qui n'absorberait que le fondamental I_0 ;

- Un système harmonique où la force électromotrice à 50 Hz est supprimée et où le récepteur est remplacé par un générateur qui envoie dans le réseau tous les harmoniques I_h



△
Système réel



△
Système 50 Hz



△
Système harmonique

△
- Superposition des états dans un Réseau avec un Seul Récepteur.

- Les impédances de la source des lignes, etc... ont été regroupées en une seule: Z.

Pour un harmonique de rang n, les réactance Lw sont n fois plus grandes et les impédances deviennent Z_h.

La tension harmonique vaut :

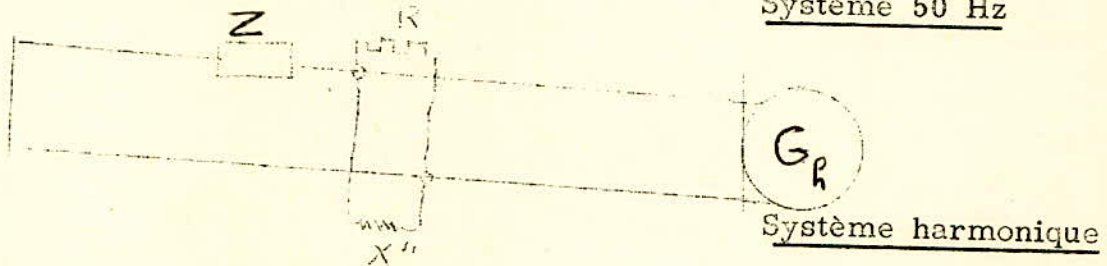
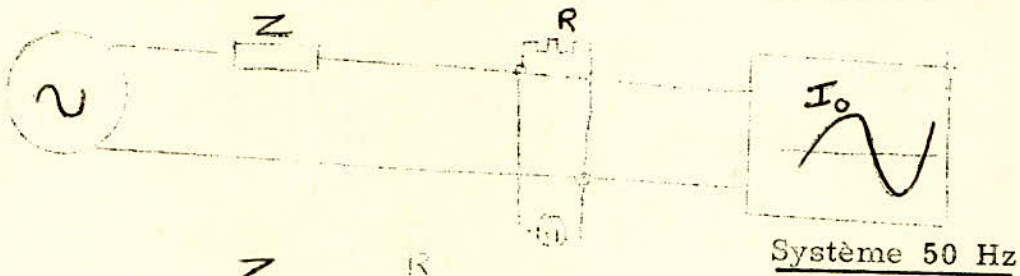
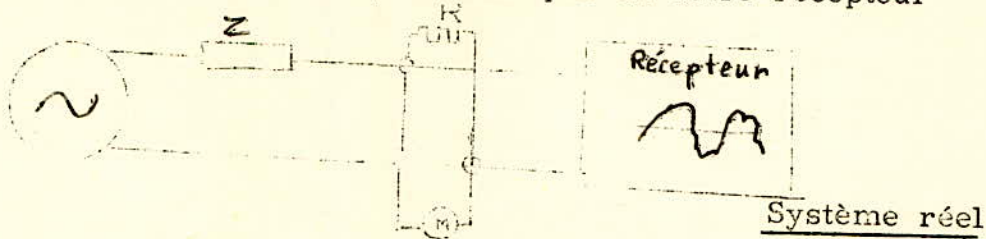
$$U_h = Z_h I_h$$

Ce calcul est possible pour les redresseurs grâce à leurs courants harmoniques qui sont pratiquement indépendants des impédances amont du moins si la self du circuit continu est assez forte.

b)- Etude des impédances Z_h :

Le calcul des tensions harmoniques dues aux redresseurs demande donc de connaître les impédances du réseau amont.

Complétons le schéma précédent par un autre récepteur



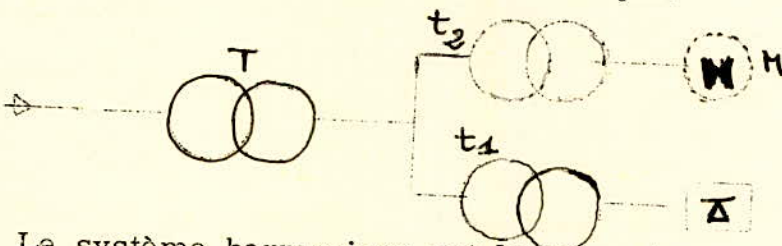
(G_h : source d'harmonique)

C'est une superposition des états dans un réseau avec plusieurs récepteurs.

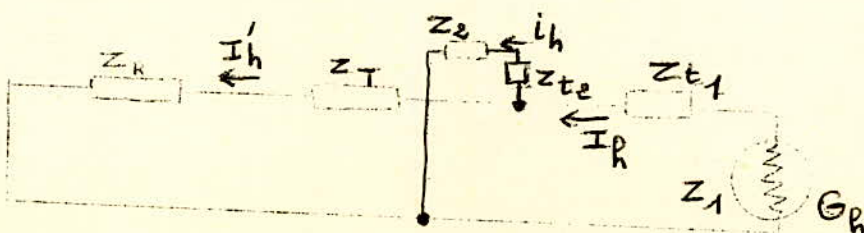
Dans le système harmonique, ce récepteur constitue une dérivation pour les courants harmoniques. La tension U_h est plus faible parce que le courant harmonique passant dans Z_h est diminué, ou parce que l'impédance amont vue de G_h est plus faible.

c)- Répartition des tensions harmoniques

Prenons l'exemple d'un réseau simple.

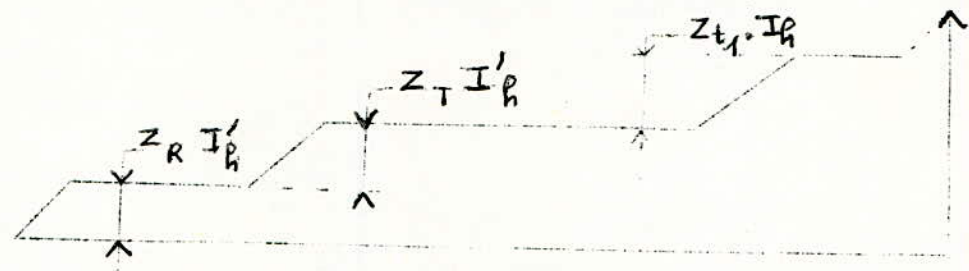


Le système harmonique est le suivant :



Les tensions harmoniques sont très faciles à calculer en chaque point du réseau et pour chaque rang d'harmonique, si l'on connaît I_h et les impédances harmoniques.

La figure suivante montre à l'évidence que plus on remonte vers la source 50 Hz plus les tensions diminuent et que les perturbations seront d'autant plus faibles que les impédances seront faibles, c'est à dire dûe que la puissance de court-circuit sera forte.



II-2.2: Puissance des Redresseurs à partir de laquelle le Réseau est Perturbé :

Partant du fait qu'un taux de distorsion de tension de 5% est généralement considéré comme acceptable, un calcul simple nous a donné la puissance maximale des redresseurs, en fonction de leur nombre de bras et de la puissance de court-circuit au niveau où l'on veut respecter ce taux.

Ce taux global est :
$$\sqrt{\sum \frac{1}{2} (Z_h I_h)^2}$$

On veut qu'il soit :
$$< \frac{5}{100} \times \frac{U}{\sqrt{3}}$$

Z_h vaut approximativement $h \cdot Z_0$, en l'absence de condensateurs (h = rang de l'harmonique, Z_0 = impédance à 50 Hz), I_h vaut au maximum I_0/h :

d'où : $Z_h I_h = h Z_0 \frac{I_0}{h} = Z_0 I_0$

et le taux global devient :

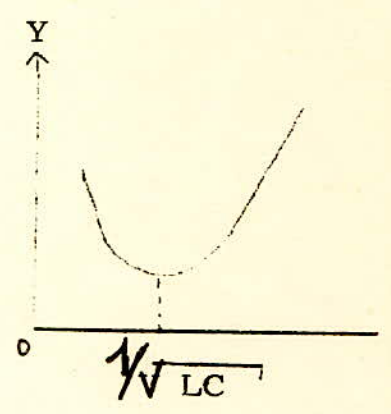
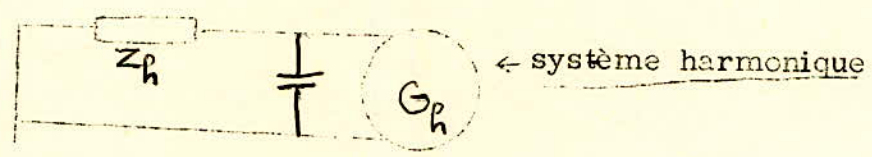
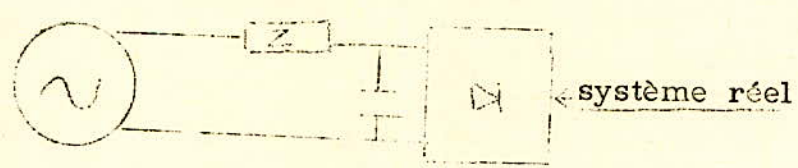
$$\sqrt{\sum_1^h (Z_h I_h)^2} = \sqrt{n} (Z_0 I_0)$$

En admettant que les harmoniques jusqu'à $n = 25$ on trouve :

Nombre de bras des ponts	4	6	12	18	24	36
P. max redres % Pcc	1,43	1,78	2,5	3,58	5	7,15

II-2.3. Cas particulier des condensateurs :

Si l'on place des condensateurs Shunt pour relever le facteur de puissance l'impédance amont augmente



En effet l'admittance vue du générateur d'harmoniques devient :

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{j\omega L} + j\omega C$$

S'il y a des harmoniques dont la fréquence est égale ou proche du minimum de Y, la tension U_h sera très grande et de plus le courant I_h dans le circuit bouchon ainsi constitué sera très grand, au détriment des condensateurs.

En effet, la valeur efficace du courant dans ces condensateurs vaut :

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{(C\omega_0 U_0)^2 + (C\omega_2 U_2)^2 + \dots + (C\omega_n U_n)^2}$$

Suivant la norme U.T.E, les condensateurs doivent supporter 30% de surcharge, en prévision des harmoniques. Au delà de 30%, une protection à maximum de courant doit déclencher la batterie. En pratique si cela se produit c'est parce qu'il y a résonance sur un des harmoniques

III- PROPAGATION ET AMPLIFICATION DES HARMONIQUES

IMPEDANCES HARMONIQUES.

III-1. Propagation de la Pollution Harmonique.

Le problème est très complexe, il semble actuellement étudié sur le plan théorique à l'aide de programmes de calcul dits programmes de pénétration. Pour les cas simples, où les phénomènes de résonances ou d'antirésonances ne se font pas sensiblement sentir on peut néanmoins rappeler les indications suivantes :

- Réseau à très haute tension :

Il semble que les tensions harmoniques créées en un point d'un fléau puissent se propager, sans atténuation, ni amplifications excessives dans un rayon de 150 Km autour du point d'injection.

- Autres réseaux :

Ces tensions harmoniques créées en un point source d'un réseau semblent se retrouver en tous les points du même réseau ainsi que dans les réseaux de puissances de court-circuit et de tensions inférieures situées en aval.

Inversement, la transmission de ces tensions aux réseaux de puissances de court-circuit et de tensions supérieures situé en amont s'accompagne généralement d'une forte atténuation.

Il résulte de ces quelques indications que la pollution harmonique créée en un point gêne un nombre de clients d'autant plus grand que l'on se trouve placé dans un réseau de puissance et de tensions élevées. A ce titre, il peut sembler nécessaire de limiter d'autant plus sévèrement la pollution harmoniques dans des réseaux que le niveau de tension est plus élevé.

Pour certains besoins, on est amené à installer un point quelconque du réseau, des appareils sensibles aux harmoniques, citons en exemple les batteries de condensateurs. Pour affirmer si, en ce point, les harmoniques sont, ou ne sont pas dangereux, il faut connaître leur propagation, leur amplitude et leur impédance harmonique de court-circuit du réseau. Un générateur de fréquence harmoniques débite un courant dans le réseau. L'étude de la propagation de ces fréquences se fait à l'aide des théorèmes classiques de l'électrotechnique, la loi d'Ohm généralisée, le principe de superposition, le théorème de Thévenin s'appliquent sans difficultés à chacune des fréquences. En particulier, lorsque plusieurs générateurs d'harmoniques sont raccordés à un même réseau, le principe de superposition des états permet de calculer la distribution des courants et des tensions harmoniques dus à l'un quelconque des générateurs considéré comme étant la source d'harmoniques dans le réseau.

La vitesse de propagation des ondes électriques sur les lignes aériennes est voisine de la célérité de la lumière : 300.000Km/s. La longueur d'onde est définie par le quotient de cette vitesse à la fréquence. Il s'ensuit que la longueur d'onde pour une fréquence harmonique de rang n est :

$$\lambda = c/n.f = \frac{300.000}{n.50} = \frac{600}{n} = \frac{\lambda_0}{n}$$

Dans les câbles souterrains si ϵ est la permittivité de l'isolant, la longueur d'onde est $\sqrt{\epsilon}$ fois plus faible. Pour le transport d'énergie on a : $\epsilon = 3$ à $4,5$.

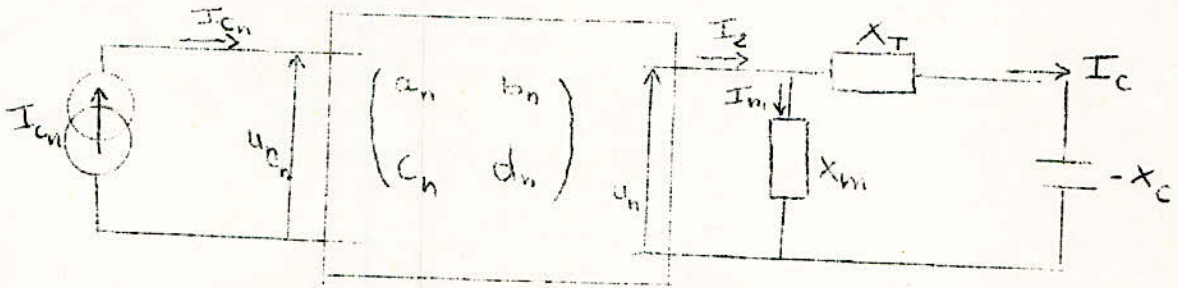
.../...

III-2. Amplification de la Pollution Harmonique :

Prenons 2 Exemples :

1)- Amplification des courants harmoniques par une batterie de condensateurs :

Nous calculons l'amplitude du courant harmonique qui traverse une batterie de condensateurs en fonction de celle du courant débité par la source harmonique. La batterie de condensateurs est connectée au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur, qui sera représenté par un schéma en gamma (Γ). Quant au réseau, la ligne est considérée à constantes uniformément réparties.



Le quadripôle est caractérisé par la matrice de passage

$$\begin{pmatrix} a_n & b_n \\ c_n & d_n \end{pmatrix} \text{ définie par :}$$

$$a_n = \text{Ch} (Z_n Y_n)^{0,5}$$

$$b_n = Z_{c_n} \text{Sh} (Z_n Y_n)^{0,5}$$

$$c_n = \frac{\text{Sh} (Z_n Y_n)^{0,5}}{Z_{c_n}}$$

$$d_n = a_n$$

Avec $Z_{c_n} = (Z_n / Y_n)^{0,5}$ où $Z_n = R + j n L \omega$ et $Y_n = G + j n c \omega$

D'après la figure précédente on a :

$$\begin{pmatrix} U_{c_n} \\ I_{c_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_n & b_n \\ c_n & d_n \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} U_n \\ I_2 \end{pmatrix}$$

$$\text{Et } U_n = j \left[\frac{(X_t - X_c) // X_m}{X_m} \right] \times I_2 = Z_2 \cdot I_2$$

d'o on tire l'expression du gain :

$$A'_n = \frac{I_2}{I_{cn}} = \frac{1}{(C_n Z_2 + d_n)}$$

$$A_n = \frac{1}{(Y_{cn} Z_2 \text{Sh}(Z_n Y_n)^{0,5} + \text{Ch}(Z_n Y_n)^{0,5}}$$

Dans ce qui suit nous allons voir les différentes variables qui peuvent influencer le gain en courant dans le système transformateur-condensateur. Pour cela on fait le changement de variable suivant :

th $\theta_n = Y_{cn} Z_2$ d'où l'expression de A'n

$$A'_n = \text{ch}\theta_n / \left[\text{Sh}\theta_n \text{Sh}(Z_n Y_n)^{0,5} + \text{ch}\theta_n \text{ch}(Z_n Y_n)^{0,5} \right]$$

Or $\text{Sh}(a) \text{ch}(b) + \text{ch}(a) \text{Sh}(b) = \text{ch}(a + b)$

Finalement on obtient : $A'_n = \text{ch}\theta_n / \text{ch} \left[(Z_n Y_n)^{0,5} + \theta_n \right]$

Si on suppose que la ligne est sans pertes, c'est à dire que l'onde se propage sans être atténuée. Il vient alors :

$$\left. \begin{aligned} Z_n &= j n w L \\ Y_n &= j n w c \end{aligned} \right\} Z_n Y_n = - n^2 w^2 LC$$

d'autre part $Z_2 = j \left[\frac{(X_t - X_c) // X_m}{X_m} \right] = j X_2$

Ceci nous permet d'aboutir à la formule :

$$A'_n = \cos(\theta'_n) / \cos(\phi_n + \theta'_n)$$

Où : $\text{th}\theta_n = Y_{cn} Z_2 = j Y_{cn} X_2 = j \cdot \text{tg}(\theta'_n)$

$$(Z_n Y_n)^{0,5} = j n w (LC)^{0,5} = j \phi_n$$

Dans ce qui suit on écrira θ_n au lieu de θ'_n

D'autre part on a : $n\omega = n \cdot 2 \cdot \Pi \cdot f = 2 \Pi (C / \lambda_0) \cdot n$

et : $(LC)^{0,5} = \frac{l}{c}$ où l = longueur de la ligne
 c = vitesse de la lumière.

On en déduit : $\phi_n = 2 \Pi n \cdot l / \lambda_0$

Avec ces notations on aboutit à :

$$A'n = \cos \left[\text{Arctg} \left(\frac{X_2}{Z_{cn}} \right) \right] / \cos \left[2 \Pi n l / \lambda_0 + \text{Arctg} \left(\frac{X_2}{Z_{cn}} \right) \right]$$

Le courant qui passe dans la batterie de condensateurs est :

$$I_c = I_2 - I_m \text{ or}$$

$$Z_m (I_c - I_2) = I_c (X_t - X_c) \text{ d'où : } I_c = I_2 \frac{Z_m}{X_m + X_c - X_t}$$

d'autre part on a : $I_c / I_n = \cos \theta_n / \cos (\theta_n + \phi_n)$

$$\text{où : } \theta_n = \text{Arctg} \left[\frac{Y_{cn} X_m (X_t - X_c)}{(X_m + X_t - X_c)} \right]$$

$$\text{et } \phi_n = n \omega (LC)^{0,5} = 2 \Pi n l / \lambda_0$$

Finalement le gain en courant dans la batterie de condensateurs est :

$$A_n = I_c / I_n = \frac{\cos \left[\text{arctg} \frac{X_m}{Z_{cn}} \cdot \frac{X_t - X_c}{X_m + X_c - X_t} \right] \cdot X_m}{\cos \left(\frac{2 \Pi n l}{\lambda_0} + \text{Arctg} \frac{X_m \cdot X_t - X_c}{Z_{cn} \cdot X_m + X_c - X_t} \right) \cdot X_m + X_c - X_t}$$

Dans ce qui suit nous supposons que la batterie de condensateurs X_c sert à compenser de l'énergie réactive, on peut alors écrire :

$$Q = U^2 / X_c \text{ pour le calcul on prend une variation de :}$$

$Q = (15 \text{ à } 20) \% \text{ de } S_n \text{ où } S_n = 120 \text{ MVA}$ d'où la variation de la réactance capacitive : $X_c = \frac{U^2}{Q} = 800 \text{ à } 2500 \text{ Ohms}$

On prend $X_m = 200000 \text{ Ohms}$, $X_t = 40 \text{ Ohms}$, $l = 150 \text{ Km}$

$|A_n|$

L.E.A à paramètres uniformément répartis (alimentation d'un condensateur)

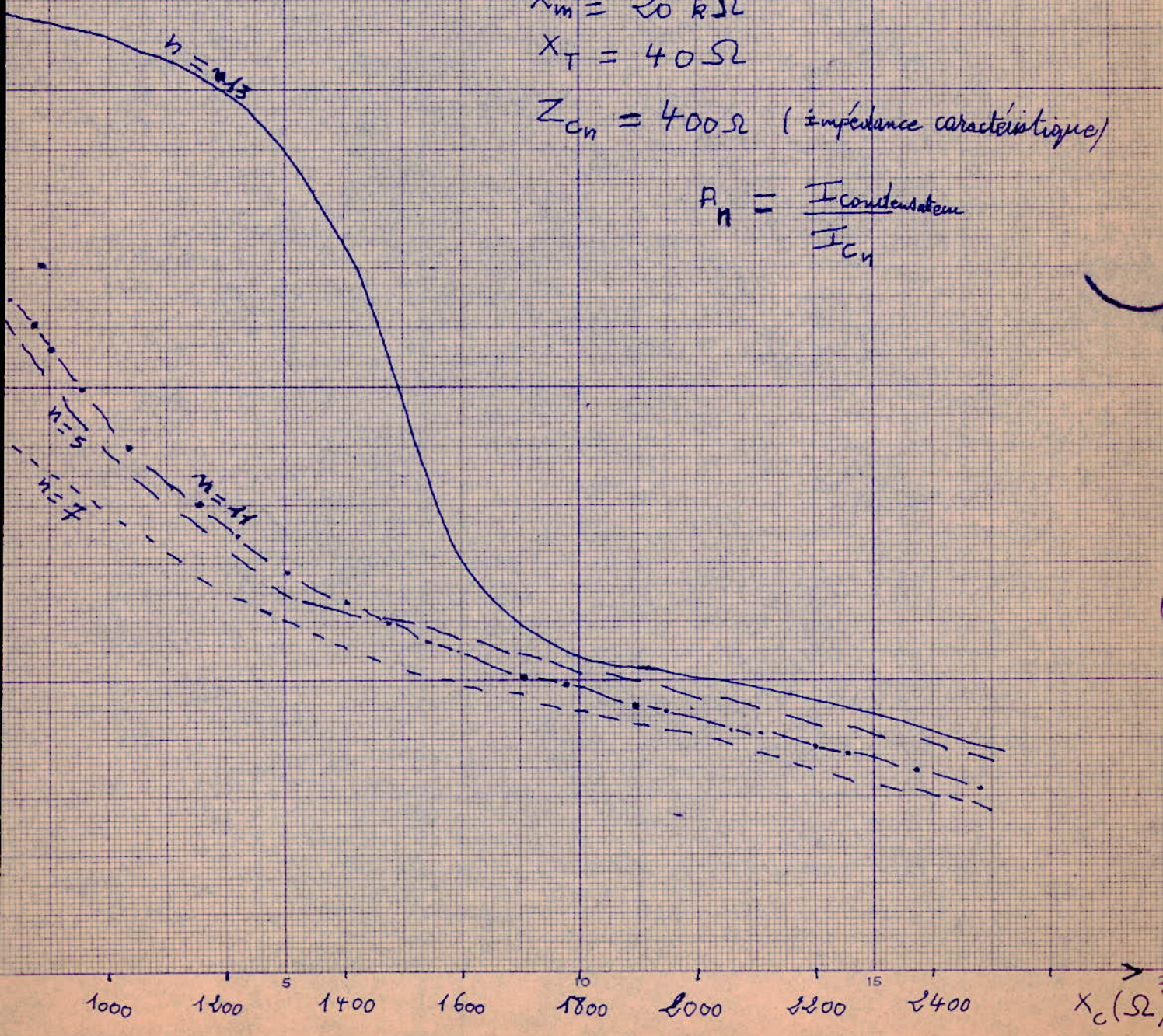
$l = 150 \text{ km}$

$X_m = 20 \text{ k}\Omega$

$X_T = 40 \Omega$

$Z_{cn} = 400 \Omega$ (impédance caractéristique)

$A_n = \frac{I_{\text{condensateur}}}{I_{cn}}$



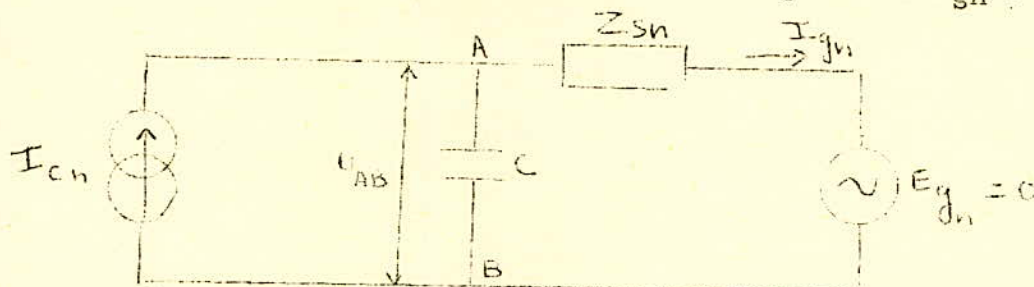
On prend $X_m = 20000$ Ohms, $X_t = 40$ Ohms, $l = 150$ Km

$X_c (\Omega)$ \ n	5	7	11	13
800	0,526	0,462	0,583	0,819
1200	0,357	0,326	0,371	0,759
1600	0,288	0,256	0,277	0,342
2000	0,236	0,206	0,214	0,259
2500	0,194	0,167	0,169	0,200

La courbe $A_{n+1}(X_c)$, tracée sur le graphe, montre que l'amplification diminue quand la réactance de la batterie de condensateurs augmente, c'est à dire qu'elle est d'autant plus faible que l'énergie réactive à compenser est faible. Pour une réactance capacitive donnée, l'amplification diminue lorsque le rang de l'harmonique augmente de 3 à 7, puis elle augmente avec le rang.

2)- Amplification dans une ligne courte :

Pour notre étude, la ligne est représentée par sa capacité. Le schéma équivalent de l'alternateur est une impédance Z_{sn} :



Le générateur de courants harmoniques débite un courant I_{cn} dans le réseau. La capacité C , représentant la ligne de transport va amplifier les courants harmoniques dans le circuit de l'alternateur. Soit A_n le gain en courant. Ce facteur sera défini par la relation suivante :

$$A_n = I_{gn} / I_{cn}$$

Pour calculer ce coefficient on applique la loi des mailles au circuit de la figure précédente on obtient :

$$I_{gn} = U_{ab} / j n \omega L_s$$

$$U_{AB} = (I_{cn} - I_{gn}) / j n \omega c$$

En substituant l'expression de U_{AB} dans la première Équation, on obtient :

$$A_n = \frac{1}{(1 - n^2 \omega^2 C L_s)}$$

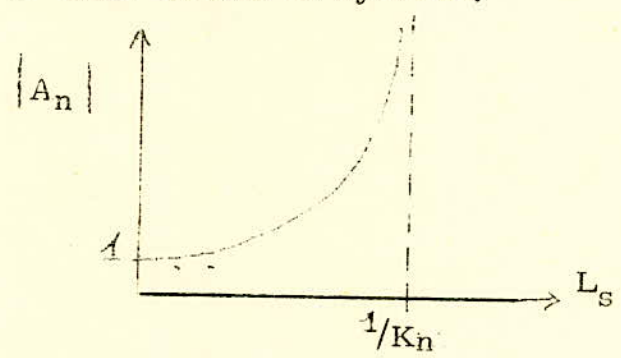
Cette dernière équation montre que l'amplification du courant harmonique pour une ligne courte dépend de la capacité, C, de la ligne de transport et de l'inductance du système L_s .

a) Variation de A_n avec la capacité $c =$ constante :

Si la capacité de la ligne est constante, ce qui revient à supposer que la longueur de la ligne est constante, on aura :

$$A_n = \frac{1}{1 - K_n L_s}$$

Avec $K_n = n^2 \omega^2 c =$ constante, pour une harmonique de rang donné. L'amplification est d'autant plus importante que l'alternateur est moins puissant, ceci se déduit du fait que K_n et L_s sont toujours positifs, d'une part et d'autre part L_s est inversement proportionnelle à la puissance de court-circuit du système.



b)- Variation de A_n en fonction de la capacité de la ligne :

Si on suppose que L_s est constante, A_n devient :

$$A_n = \frac{1}{(1 - K'_n . C)}$$

.../...

Où $K'_n = n^2 \omega^2 L_s = \text{constante}$.

La courbe aura alors la même allure que celle de la figure du a).

D'où les conclusions suivantes :

- L'amplification est plus importante pour les lignes souterraines que pour les lignes aériennes ayant la même longueur.

- L'amplification des harmoniques augmente avec la longueur du fait que la capacité C augmente avec la longueur.

III-3. Impédance Harmonique :

1)- Généralités.

Les données concernant les sources de courants harmoniques sont en général bien connues. De plus, les méthodes de mesure les concernant sont relativement au point, et permettent l'étude des cas nouveaux ou des cas particuliers.

Par contre, les données concernant l'impédance des réseaux vue d'un point de raccordement commun de clients perturbants ou non sont moins précises. Leur mesure est très délicate, de plus du fait des variations de charge, ou du fait des manoeuvres dans les réseaux elles ne sont jamais des grandeurs constantes.

Un résumé des résultats de mesures ou de calculs d'impédances est donné dans le tableau suivant :

..../...

Palier de Tension	Nature des impédances harmoniques	Valeur des impédances ramenées à 50 Hz et comparées à U^2/P_{cc}
Basse tension (homopolaire directe-inverse)	<p>90% des clients basse tension : pays du marché commun sont connectés en des points du réseau où l'impédance est inférieure aux valeurs suivantes :</p> <p>$Z = 0,24 + j0,15 \cdot n$, directe inverse</p> <p>$= 0,72 + j0,45 \cdot n$, homopolaire</p> <p>$= 0,4 + j0,25 \cdot n$, phase-neutre</p> <p>$= 0,48 + j0,3 \cdot n$, phase-phase</p>	Bonne concordance $Z \# U^2/P_{cc}$
Moyenne tension (directe - inverse)	<p>Si $n < 14$ impédances capacitatives inductives ou résistives.</p>	<p>Réseau très chargé : $U^2/P_{cc} < Z < 2 U^2/P_{cc}$</p> <p>Réseau peu chargé : $U^2/P_{cc} < Z < n \cdot U^2/P_{cc}$</p>
	<p>Si $n > 14$ impédances résistives ou capacitives.</p>	$Z \leq U^2/P_{cc}$
Haute tension et très haute tension jusqu'à 220 Kv (directe -inverse)	<p>Si $n < 26$ impédances capacitatives inductives ou résistives.</p>	<p>Si $n < 26$ $U^2/P_{cc} < Z \leq 4 U^2/P_{cc}$</p> <p>si $n > 26$ $Z \leq U^2/P_{cc}$</p>

Ce tableau concerne les réseaux maillés européens mais il risque de donner des indications fausses pour certains réseaux ilotés peu étendus tels que ceux de pays en voie de développement. En règle générale, il ressort plusieurs points principaux :

- Les impédances harmoniques des réseaux semblent liées à l'impédance de court-circuit à 50 Hz de ceux-ci, de façon plus ou moins directe,
- Les écarts entre les impédances harmoniques réelles et l'impédance inductive calculée à partir de la puissance de court-circuit provient de l'apparition de résonances et d'anti-résonances successives lorsque la fréquence croît (ces résonances sont rares en basse tension et inévitables aux moyennes et hautes tensions; elles sont dues aux interactions entre les inductances et les capacités des réseaux).

Les résonances sont soumises aux conditions d'amortissement elles-mêmes liées à la charge des réseaux, surtout aux paliers de tension moyens.

Lorsque l'on désire raccorder une charge sur un réseau et que l'on connaît l'impédance harmonique de la charge supposée passive, le théorème de Thévenin permet de prévoir le courant harmonique qui circulera dans la charge. Si V_n est la tension harmonique du réseau avant le raccordement de la charge, Z_{cc_n} l'impédance de court-circuit du réseau vue du point où l'on branche la charge, on a :

$$I_n = V_n / (Z_n + Z_{cc_n}).$$

Si Z_n a une valeur nulle, par exemple si la charge constitue un circuit résonant série pour la fréquence n , seule l'impédance harmonique de court-circuit du réseau Z_{cc_n} limite le courant harmonique ce sera le courant de court-circuit harmonique du réseau. L'impédance harmonique de court-circuit est donc une caractéristique du réseau et elle joue le même rôle, dans un autre domaine de fréquences, que l'impédance de court-circuit habituelle dans les réseaux à 50 Hz. il faut cependant faire quelques restrictions; l'application du théorème de Thévenin suppose que le raccordement de la nouvelle charge ne modifie pas les forces électromotrices du réseau;

Si cette condition est pratiquement toujours vérifiée pour les régimes à

.../...

50 Hz, il peut en être autrement pour les forces électromotrices harmoniques.

Nous avons vu que les f.e.m des générateurs d'harmoniques sont souvent directement liées aux tensions fondamentales du réseau (cas des transformateurs). Par conséquent, le théorème de Thévenin est applicable aux fréquences harmoniques si la charge que l'on désire raccorder ne provoque pas de variations trop importantes de la tension fondamentale, soit inférieures à 1%.

La valeur de l'impédance harmonique de court-circuit n'est pas facilement accessible au calcul, si les schémas équivalents aux divers éléments du réseau (lignes, transformateurs, ...etc...) sont assez bien connus, il n'en est pas de même des impédances harmoniques équivalentes aux charges de clientèle. Les charges de la clientèle sont des ensembles complexes de résistances, d'inductances, de capacités et de générateurs d'harmoniques et, à moins d'en connaître exactement la texture, il est difficile de se faire une idée de leurs schémas équivalents. C'est pourquoi il est préférable de mesurer directement cette impédance. Cette mesure est très délicate, de plus, du fait des variations de charge, ou du fait des manoeuvres dans les réseaux, l'impédance harmonique du réseau n'est jamais une grandeur constante.

On peut toujours rattacher les impédances des réseaux Z_n au rang n de la fréquence harmonique et à Z_{cc} l'impédance de court-circuit fondamentale (qu'on suppose pour simplifier, purement inductive), elle-même liée à la puissance de court-circuit P_{cc} au point considéré.

On se limite ici à la gamme des fréquences telles que $n \leq 20$ environ.

- En basse tension ($P_{cc} \neq 1$ MVA) les phénomènes capacitifs sont souvent inopérants, il s'ensuit que :

$$Z_R \neq n \cdot Z_{cc} \cdot S \quad \text{avec } S \neq 1$$

- En moyenne tension ($P_{cc} \neq 150$ MVA) les capacités de compensation d'énergie réactive jouent un rôle essentiel, il s'ensuit que :

$$Z_n \neq n \cdot Z_{cc} \cdot S \quad \text{avec } 1 \leq S \leq 10$$

.../...

- En haute et très haute tension ($P_{cc} \neq$ quelques GVA)

Les capacités des lignes jouent un rôle essentiel, il s'ensuit que :

$$Z_n \neq n \cdot Z_{cc} \cdot S \quad \text{avec } 1 \leq S \leq 4$$

Donc il semble indispensable de considérer que les impédances harmoniques d'un réseau peuvent être déduites de son impédance de court-circuit inductive à 50 Hz à condition de multiplier celle-ci par un coefficient variable suivant le palier de tension considéré.

2)- Mesure de l'impédance harmonique :

Les méthodes de mesures se ramènent directement ou indirectement à injecter un courant harmonique dans un réseau et à effectuer la division si possible en valeurs complexes, de la valeur de la tension harmonique qui en résulte par celle du courant injecté. La difficulté rencontrée pour effectuer ces mesures provient du fait qu'on ne dispose pas de sources harmoniques, et d'autre part, parce que le bruit de fond du réseau lui-même risque de masquer complètement les grandeurs mesurées.

a)- Mesure à l'aide d'un générateur à fréquence musicales

Considérons un alternateur triphasé à vitesse variable fournissant 3 tensions équilibrées. Lorsque l'alternateur est relié au réseau, il fournit une tension V , à la fréquence f considérée, et débite dans le réseau un courant I à la même fréquence; le rapport V/I donne la valeur du module de l'impédance de court circuit du réseau pour la fréquence f .

Il faut noter que la mesure effectuée à une fréquence harmonique rigoureusement multiple de la fréquence fondamentale, n'a pas de sens, en effet, le rapport V/I ne représente pas dans ces conditions, l'impédance passive de court-circuit, mais une fonction complexe faisant intervenir toutes les f. e. m harmoniques à la même fréquence du réseau. En conséquence, pour connaître l'impédance de court-circuit pour une fréquence harmonique $n \cdot 50$ Hz, il faut effectuer 3 mesures, l'une à une fréquence non harmonique légèrement supérieure, l'impédance à $n \cdot 50$ Hz est donnée par la moyenne des 3 mesures à condition, précisément, de ne pas être en résonance pour la fréquence $n \cdot 50$

Avec un alternateur à vitesse variable, et à point neutre relié à la terre fournissant 3 tensions égales et en phases (alternateur homopolaire), il est possible de déterminer l'impédance harmonique homopolaire de court circuit du réseau pour une fréquence f .

* Mise en oeuvre de la méthode :

L'alternateur est relié au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur réducteur, et on s'arrange pour s'opposer, au moyen de bouchons, au passage de courants à 50 Hz qui peuvent circuler dans le stator.

Pour connaître en grandeur et en phase l'impédance harmonique du réseau il faut mesurer les puissances actives et réactives, à la fréquence débitée par la machine.

b)- Mesure de l'impédance harmonique par la méthode du théorème de Thévenin :

Le principe de la méthode repose sur la mesure des variations brusques de la tension harmonique du réseau lorsque l'on branche en dérivation un condensateur donné.

Nous utilisons un condensateur car son admittance est proportionnelle à la fréquence, de ce fait, on peut provoquer des variations très importantes des tensions harmoniques sans pour autant, perturber les régimes de tensions à 50 Hz.

Désignons par $Z = R + j X$ l'impédance de court-circuit du réseau pour l'harmonique n ; soit un condensateur dont l'impédance par phase et pour l'harmonique n est $-j X'$; soit encore V la tension harmonique que l'on mesure sur le réseau juste avant le branchement du condensateur et V' juste après le branchement de ce dernier.

Le courant I' dans le condensateur est donné par le théorème de Thévenin :

$$I' = \frac{V}{Z + (-j X')}$$

Il est aussi donné par la loi d'Ohm : $I' = \frac{V'}{-j X'}$

On déduit : $\left| \frac{V}{Z - j X'} \right| = X' \cdot \left| \frac{V}{V'} \right|$

On recommence le même essai avec un autre condensateur dont l'impédance pour l'harmonique, est X'' , on obtient :

$$\left| \frac{V}{Z - j X''} \right| = X'' \cdot \left| \frac{V}{V''} \right|$$

.../...

Ces 2 dernières équations permettent de calculer les 2 composantes R et X de l'impédance de court-circuit du réseau, on peut les résoudre par une méthode graphique.

Les variations des rapports V/V' et V/V'' peuvent être comprises entre 0,1 et 10 par exemple, alors que les variations de la tension fondamentale reste inférieure à 1%. Lorsque les mesures portent sur des fréquences constituant des systèmes directs et inverses, le point neutre de la batterie de condensateurs doit-être isolé, par contre, le point neutre de la batterie doit-être mis à la terre lorsque les mesures portent sur les systèmes homopolaires, sinon l'admittance harmonique homopolaire de la batterie serait nulle il n'y aurait pas de variations de tensions harmoniques homopolaires.

- La précision de la méthode dépend de l'analyseur d'harmoniques dont on dispose et du temps nécessaire pour effectuer les 2 mesures, car l'impédance harmonique de court-circuit varie en fonction du temps suivant la charge du réseau et les batteries de condensateurs en service. D'après des essais effectués dans des réseaux, le temps nécessaire pour effectuer les 2 mesures est de l'ordre de la minute. De plus cette méthode ne provoquant aucune perturbation dans l'exploitation des réseaux il est possible d'effectuer plusieurs mesures en essayant de se placer dans les mêmes conditions; les résultats ainsi trouvés ont toujours été concordants à 5% . La méthode est donc suffisamment précise pour la majorité des problèmes qui peuvent se poser à l'exploitation des réseaux.

c)- Autre procédé de mesure actuellement utilisable.

Une méthode de mesure est en cours de mise au point par E.D.F. Elle vise à déterminer aux fréquences harmoniques, les impédances homopolaires d'une part, et directe ou inverse supposées identiques d'autre part, au point de raccordement du client perturbant. Les données expérimentales sont les enregistrements simultanés des courants déformés injectés dans le réseau par la ligne alimentant le client, et des tensions déformées du réseau qui en résultent compte-tenu des déformations préexistantes sur celui-ci.

L'originalité de la méthode est d'opérer simultanément sur, toutes les fréquences contenues dans une bande au choix de l'utilisateur, et la redondance ainsi obtenue est exploitée au mieux pour améliorer sensiblement le rapport signal sur bruit. La mise au point d'un appareil entièrement électronique est en cours, mais actuellement, le traitement des données expérimentales par une méthode mathématique a déjà été expérimentée en laboratoire sur un réseau.

Cette méthode comprend actuellement 3 parties principales à savoir :

1°) • Enregistrement sur le site des grandeurs expérimentales.

- Les grandeurs triphasées sont captées, en général, aux bornes des transformateurs de tension et de courant des circuits de mesures des postes, de manière à pouvoir enregistrer simultanément les tensions déformées au point d'alimentation du matériel perturbant et les courants déformés absorbés par celui-ci.

↳ Des filtres ramènent ces 6 grandeurs triphasées à 4 grandeurs monophasées : 2 homopolaires, et 2 directes -inverses d'autre part, tout en éliminant leur composante à 50 Hz gênante pour le reste du processus de mesure.

↳ Enfin ces grandeurs physiques ainsi filtrées sont enregistrées à l'aide d'un enregistreur magnétique analogue classique.

2°) - Echantillonnage des données expérimentales.

Actuellement une station d'acquisition, (en France) permet de réaliser commodément l'échantillonnage des grandeurs analogiques et de mettre celles-ci sous une forme numérique et sur un rapport directement utilisables par un ordinateur scientifique.

3°) - Traitement de l'information.

Un programme écrit en FORTRAN, permet d'identifier le réseau à un modèle d'impédance simple donc valable dans une bande de fréquence relativement étroite. L'identification est effectuée séparément pour les grandeurs directes et inverses d'autre part .

Les 2 fonctions principales du programme sont donc les suivantes :

- Opérer un filtrage numérique des grandeurs physiques d'entrée pour conserver seulement les fréquences contenues dans une bande au choix de l'utilisateur.

- Identifier le réseau au modèle, ce qui consiste à rechercher la valeur numérique des 2 constituants, de ce dernier (inductance et résistance placées en série), de manière à rendre minimale la différence quadratique moyenne entre la tension perturbée enregistrée et la tension calculée à partir du courant et de la valeur numérique de l'impédance issue du modèle d'autre part.

Chapitre III : Conséquences des harmoniques dans les réseaux
Electriques :

I) Introduction

Les redresseurs constituent la plus forte source d'harmoniques, Dans ce cas, les courants harmoniques apparaissent comme une conséquence du changement cyclique de l'impédance dans le circuit d'alimentation du redresseur.

Les perturbations harmoniques dues aux variations de tension à redresseur peuvent engendrer un gêne, sur place au lieu même ou elles apparaissent.

En outre, du fait de l'interconnexion générale par le réseau public d'énergie électrique, les perturbations peuvent gêner d'autres clients placés parfois très loin de la source d'harmonique.

La grandeur physique caractéristique de la gêne due aux distorsions harmoniques est la valeur des tensions harmoniques juxtaposées à la tension normale des réseaux.

Le regain d'acuité de cette pollution provient de la prolifération récente d'équipements à caractéristiques courant-tension non linéaires chez la clientèle, qui ont la propriété d'injecter des courants à fréquences harmoniques dans l'impédance des réseaux, et ce faisant de faire apparaître des tensions harmoniques superposées à la tension fondamentale. C'est le cas des équipements à semi-conducteurs redresseurs.

Sur le plan purement physique, la pollution des réseaux par les distorsions harmoniques implique donc une dualité entre les impédances des réseaux et les courants perturbants de la clientèle.

II) Gêne apportée par les perturbations harmoniques dans les réseaux

Les perturbations harmoniques se traduisent par la déformations des tensions et courants appliqués aussi bien aux matériels de réseaux qu'aux appareillages de la clientèle.

On peut principalement représenter la gêne par la seule distorsion de tension, chose admise en règle générale.

Chaque tension harmonique de fréquence donnée participe individuellement à la gêne.

II)-1/ Aspects de la gêne : Chaque tension harmonique engendre des sur-tensions par superpositions de sa valeur crête à celle de la tension fondamentale, des décalages du passage par zéro de l'ordre de tension qui peuvent gêner le fonctionnement de certains appareillages électroniques synchronisés par la tension d'alimentation, des échauffements supplémentaires par effet joule, etc...

II)-2/ Pertes dans les machines tournantes :

Il existe 2 sortes de pertes dans une machine électrique : les pertes supplémentaires et les pertes principales.

Mais les pertes principales dans le cuivre sont les pertes les plus importantes d'une machine électrique tournante, vu qu'elles sont proportionnelles au carré du courant d'induit.

Dans le cas où ce courant n'est pas sinusoïdal alors les pertes actives sont proportionnelles à :

$$I^2 = I_1^2 \sqrt{1 + \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2}$$

On remarque que les pertes principales dans le cuivre sont majorées des pertes proportionnelles à : $(I_n/I_1)^2$ dues aux courants harmoniques.

Exemple : soit une machine de 23 kw, I = 103 A

S'il y a $S = 12,3 \text{ mm}^2$, W (poids) = 27,7 kg

Les pertes principale dans le cuivre :

$$P_c = \left(\frac{I}{S}\right)^2 W \cdot 2,4 = 1,16 \text{ kW}$$

avec 2,4 = constante correctrice de la machine.

Si les harmoniques 3 et 5 existent dans la machine, dont les amplitudes des courants correspondantes sont

$$I_3 = \frac{I_1}{3} \quad \text{et} \quad I_5 = \frac{I_1}{5}$$

$$\text{on aura : } I^2 = I_1^2 \sqrt{1 + \left(\frac{I_3}{I_1}\right)^2 + \left(\frac{I_5}{I_1}\right)^2} = 1,15 \cdot I_1^2$$

et $P_{cn} = 1,15 \text{ pc}$

le rendement diminue.

II)-3/ Pertes dans les transformateurs

Les pertes dans le transformateur se composent :

- des pertes dans le cuivre de l' enroulement primaire
- " principales dans le fer du noyau
- " supplémentaires à vide.

.../...

Les pertes principales dans le fer sont les ^{plus} importantes des pertes, les autres pertes sont en général négligeables (2%).

Déterminons les pertes dans le fer pour une valeur efficace donnée de la tension U₁ à une fréquence donnée f.

Si la f.e.m est une courbe non sinusoïdale on a :

$$E_1 = 4 K f . w_1 \cdot \phi_m$$

ou K : facteur de forme de la courbe de la f.e.m, par conséquent :

$$\phi_m \equiv B_m \equiv \frac{E_1}{K} \equiv \frac{U_1}{K}$$

Les pertes par hystérésis sont $p_h \equiv B_m^2$, c'est à dire

$$P_h \equiv \left(\frac{U_1}{K} \right)^2$$

Les pertes par courants de Foucault sont :

$$P_f \equiv K^2 B_m^2, \text{ c'est à dire : } P_f \equiv U_1^2$$

Il en résulte que pour une valeur efficace donnée de la f.e.m, les pertes par hystérésis sont inversement proportionnelles au carré du facteur de forme de la courbe de la f.e.m et les pertes par courants de Foucault ne dépendent pas de la forme de cette courbe. Vu que les courbes principales dans le fer sont les pertes par hystérésis, on peut admettre approximativement que les pertes totales dans le fer sont

$$P_f \equiv \left(U_1 / K \right)^2$$

Lorsque la courbe de la f.e.m a une forme aplatie, K est inférieur à 1,11 ; les pertes fer sont supérieures aux pertes qui ont lieu pour courbe sinusoïdale de la f.e.m.

L'augmentation des pertes fer est alors :

$$P_f . \left(1,11 / K \right)^2$$

Enfin nous allons définir le facteur de forme K :

Lorsque la tension appliquée au primaire du transformateur est sinusoïdale la valeur efficace de la f.e.m de l'enroulement primaire est :

$$E_1 = 4,44 f w_1 . \phi_m$$

Supposons maintenant que la tension appliquée et le flux magnétique n'ont pas une forme sinusoïdale. Indépendamment de la forme de cette courbe on aura :

$$e_1 dt = - W d \phi$$

$$\int_0^{T/2} e_1 . dt = - w_1 \int_{\phi}^{-\phi} d \phi = w_1 . 2 \phi$$

La valeur moyenne de la f.e.m sera :

$$E_{1m} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} e_1 \cdot dt = (4/T) W_1 \phi = 4 W_1 f \cdot \phi$$

Quelle que soit la forme de la courbe de la tension appliquée.

On définit le facteur de forme k de la courbe comme le rapport :

$$k = E_1 / E_m \quad \text{d'où } E_1 = 4 kW_1 \cdot \phi f.$$

W_1 = nombre de spires au primaire du transformateur.

II)-4/ Pertes dans les batteries de condensateurs

Les pertes diélectriques d'un condensateur sont chiffrées par l'angle de pertes d qui est une constante caractéristique du diélectrique.

Cet angle d est indépendant des paramètres géométriques.

Si un conducteur est alimenté par une tension U la puissance transformée en chaleur est :

$$P = U^2 \cdot C \cdot W \cdot \text{tg}(d)$$

$$\text{ou : } w = 2 \pi f, \quad \text{tg}(d) = \sin(d) = \cos(\phi)$$

supposons maintenant que la ^{tension} d'alimentation U n'est pas sinusoïdale ; si U_n est la n ème composante harmonique de U on aura :

$$P_n = U_n^2 \cdot C \cdot W \cdot n \text{ tg}(d) \quad \text{car } W_n = n \cdot W$$

Ainsi les pertes dans les batteries de condensateurs subissent une élévation égale à : $\frac{U_n^2 \cdot n \cdot C \cdot W \cdot \text{tg}(d)}{U^2}$

Généralement ces pertes sont élevées du fait que l'admittance de la batterie de condensateurs est proportionnelles à l'ordre de l'harmonique qui y pénètre.

II)-5/ Influence sur l'équipement électrique :

Les harmoniques entraîne un vieillissement accéléré des câbles, de l'isolation des machines électriques, des transformateurs et des condensateurs, résultat de processus physico-chimiques qui déroulent de l'action des champs harmoniques supérieures et aussi de l'influence des parties conductrices de courant qui sont fortement chauffées (augmentation des pertes).

La durée de vie de l'isolation des classes A et B, les plus ^{utilisées en électrotechnique, est déterminée par des tensions} sinusoïdales et non sinusoïdales.

Soient t_s et t_{ns} : durées de vie respectivement sinusoïdale et non sinusoïdale.

$$t_s = t_0 \cdot 2^{(T_M - T_s)/\theta} \quad , \quad t_{ns} = t_0 \cdot 2^{(T_M - T_{ns})/\theta}$$

.../...

avec t_0 = durée de service de l'isolation à la température maximale admissible T_M ; T_S et T_{NS} : température de l'isolation dans un service continu de travail de l'équipement pour une tension sinusoïdale respectivement non sinusoïdale ;

θ : constante thermique, égale au dépassement de la température pour laquelle la durée de vie de l'isolation diminue de moitié.

La réduction relative de la durée de l'isolation pour une tension non sinusoïdale est $\frac{t_s - t_{ns}}{t_s} = 1 - 2 \frac{(T_S - T_{NS})}{\theta}$

exemple : Pour une isolation de classe B, utilisée dans les turboalternateur un échauffement supplémentaire de 2°C conduit à la réduction de la durée de vie de l'isolation de 16 %, si le turboalternateur travaille dans un régime de base avec une charge constante.

- L'échauffement supplémentaire d'un transformateur de force est :

$$T_S - T_{NS} = 0,6 \sum_{n=2}^{\infty} k_{1n}^2 k_{rn}^2$$

où : K_{1n} = valeur relative du courant harmonique d'ordre n qui passe dans le transformateur par rapport au courant fondamental ;

k_{rn} : coefficient qui tient compte de l'augmentation de la résistance de l'enroulement dû à l'effet de peau et à l'effet de proximité.

Les calculs montrent que la durée de vie d'un transformateur de 40,5 MVA alimentant continuellement une cage de lamiroir à chaud muni de redresseurs à semi-conducteurs est diminuée, à cause de l'échauffement par les courants harmoniques, de 6,5 %.

II)-6/ Influence sur le facteur de puissance : $K = P/S$

avec $P = U_1 I_1 \cos \phi_1$: puissance active

$$Q_1 = U_1 I_1 \sin \phi_1 : \text{puissance réactive}$$

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} : \text{puissance apparente.}$$

Les harmoniques déforment celles-ci et on aura :

$$Q = Q_1 + \sum U_n I_n \sin \phi_n$$

$$P = P_1 + \sum U_m I_m \sin \phi_m.$$

$$S^2 = S_1^2 + D^2$$

Avec D : puissance déformante, d'où le nouveau facteur de puissance

$$\text{sera } k = \frac{P_1}{S} = \frac{P_1}{(P_1^2 + Q_1^2 + D^2)^{0,5}}$$

on conclut que la pollution harmonique diminue le facteur de puissance K .

III) Pollution harmonique dans un réseau :

Niveau global admissible et son fractionnement entre différents perurbateurs.

On aborde le problème du choix de la pollution harmonique admissible en répertoriant quelques informations publiées par des organismes étrangers et internationaux concernant la pollution totale admissible sur les réseaux, la fraction de celle-ci qu'il est possible d'imputer à un client, et les mécanismes de combinaison entre plusieurs pollutions de sources différentes. Les réglementations actuellement en vigueur sont peu nombreuses et encore incomplètes ainsi que les études qui leur ont servi de base, mais il semble se dégager des tendances que l'on essaie d'explicitier.

III)-1/ Pollution admissible dans un réseau :

A priori le choix des niveaux de pollution admissible pourrait être déterminé par une optimisation globale visant la recherche de l'économie maximale. La tendance générale est dans le choix des tensions harmoniques admissibles au point de raccordement de matériels existant à ce jour, à partir des critères de bon fonctionnement de ceux-ci sur le plan purement technologique.

1) Gêne due aux harmoniques : Il semble possible de regrouper en 2 catégories les matériels soumis aux pollutions harmoniques :

. Première catégorie :

Certains matériels sont sensibles aux fréquences harmoniques principalement sous la forme d'échauffements supplémentaire dus aux distorsions harmoniques du courant qui les traverse $\sqrt{\text{perte joule}}$ en ligne et dans les enroulements de machines etc... et aux distorsions harmoniques de la tension présente à leurs bornes (pertes dans les circuits magnétiques et dans les diélectriques etc...), ces pertes augmentent les dépenses énergétiques, et peuvent nécessiter le surdimensionnement des appareillages donc la majoration des investissements.

. Seconde catégorie

Certains matériels, en particulier ceux qui utilisent des dispositifs synchronisés par la tension d'alimentation, subissent des troubles fonctionnels en présence de distorsions harmoniques de tension.

Le tableau suivant donne succinctement des informations issues d'études diverses concernant les inconvénients apportés par la pollution harmonique, pour quelques appareillages des 2 catégories.

.- Gêne due à la pollution harmonique et seuils réputés tolérables.

Matériels	Gêne liée à la pollution harmonique.	Seuils admissibles ou pour lesquels des incidents ont été signalés
Alternateurs	<ul style="list-style-type: none"> - Pertes supplémentaires, dans les enroulements statoriques et dans les amortisseurs principalement, liées à la circulation des courants harmoniques. - Ordre de grandeur : pertes joule supplémentaires dans le cuivre. 	<p>Distorsion de tension D=10% (petites machines).</p> <p>Distorsion de courant D=5% (machines importantes).</p>
Lignes	<ul style="list-style-type: none"> - Pertes ohmiques supplémentaires 	
Transformateurs	<ul style="list-style-type: none"> - Pertes supplémentaires dans les enroulements liées à la circulation des courants harmoniques. - Ordre de grandeur : pertes Joule supplémentaires. - Pertes supplémentaires dans le fer (par courants de Foucault principalement). - Ordre de grandeur : majoration proportionnelle à D². - Risque de saturation en présence de composantes continues (associées aux harmoniques pairs). 	
Moteurs à induction	<ul style="list-style-type: none"> - Pertes supplémentaires dans les enroulements principalement liées à la distorsion de tension. - Ordre de grandeur : majoration proportionnelle à $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{Un^2}{n^2}$ 	
Câbles	<ul style="list-style-type: none"> - Pertes ohmiques supplémentaires, surtout dans les câbles de retour du neutre ou circulent les courants harmoniques 3 homopolaires. - Pertes diélectriques liées à la distorsion de tension pouvant entraîner des détériorations. - Corrosion des câbles en aluminium sous l'effet de la circulation de courants harmoniques pairs associés à une composante continue. 	<p>distorsion de tension D=10% Tension harmonique individuelle $\frac{Un}{U1} = 7\%$</p>
Condensateurs de puissance	<ul style="list-style-type: none"> - Pertes diélectriques supplémentaires aboutissant au vieillissement du condensateur. 	<p>Tension harmonique individuelle $\frac{Un}{U1} = 83\%$</p> <p>non cumulable avec d'autres fréquences harmoniques</p>
Ponts redresseurs	<ul style="list-style-type: none"> - Troubles fonctionnels liés à la distorsion de tension. 	<p>somme des tensions harmoniques individuelle 5%</p>
Téléviseurs	<ul style="list-style-type: none"> - Risques de déformations de l'image liés à la distorsion de tension. 	

2) Grandeur physique caractéristique de la gêne liée aux distorsions harmoniques :

Pour certains appareillages, des appareillages, des appareils de réseaux principalement, les courants harmoniques en circulation sont représentatif de la gêne. Mais il est difficile de définir exactement un seuil admissible sans faire intervenir des considérations économiques.

Une idée approximative des dépenses supplémentaires non facturées supportées de ce fait par un réseau distributeur d'énergie pourrait être obtenue en partant de données économiques semblables à celles qui interviennent dans la limitation de la consommation d'énergie réactive. En effet ; sous l'aspect des pertes supplémentaires dues à leur circulation, les courants harmoniques se comportent de façon semblable à celle des courants réactifs.

En fait, les anomalies de comptage en présence de pollution harmonique augmente la complexité du problème.

De plus , la limitation provisoire de la distorsion de tension à 5 % à été soit éditée sous forme de recommandations, soit adoptée implicitement, dans divers pays européens.

- Il semble donc bien admis que la distorsion de tension soit finalement la grandeur la plus représentative de la gêne due à la pollution harmonique, bien que le problème des pertes dans les réseaux soit ainsi provisoirement laissé dans l'ombre.

- Il semble également admis que le facteur de distorsion D soit représentatif de plusieurs tensions harmoniques :

$$D = \frac{\sqrt{\sum U_N^2}}{U_1}$$

Cette façon de penser semble pourtant peu fondée physiquement en présence d'une multitude de tensions harmoniques de très bas niveaux peu significatifs. Il semble donc plus simple de choisir des limites pour chaque tension harmonique U_N prise individuellement. A cet égard il semble nécessaire de limiter plus sévèrement au moins les tensions harmoniques impairs.

III)-2/ Pollution admissible imputable à un client : situation actuelle

Un certain nombre d'organismes européens proposent des recommandations visant à limiter la pollution harmonique imputable à un client particulier. Ces recommandations s'appliquent soit à des appareils électrodomestiques dès le stade de leur sortie d'usine, soit au pouvoir

perturbateur des matériels d'un client au stade de son alimentation par le réseau. Elles tiennent implicitement compte de la nécessité de maintenir la pollution harmonique dans les réseaux en deçà des limites déjà mentionnées et de la nécessité d'alimenter plusieurs clients perturbants potentiels notamment à partir d'un même point source d'un réseau. Enfin elles sont provisoires étant donné qu'un grand nombre d'études concernant le sujet est toujours en cours. La présentation des indications données par ces recommandations apparaît sous forme de variantes différentes :

. Sous forme de tensions harmoniques admissibles :

Cette façon de faire permet de comparer directement la pollution permise au client à la pollution admissible sur le réseau. Cependant la pollution créée au point d'alimentation des matériels polluants d'un client par l'injection des courants harmoniques dans l'impédance du réseau n'est pas une caractéristique intrinsèque du matériel perturbant puisque l'impédance du réseau intervient également. C'est pourquoi cette dernière est précisée dans certaines recommandations soit explicitement, soit sous la forme indirecte de niveau de puissance de court-circuit.

. Sous forme de courants harmoniques admissibles :

Cette forme de recommandation ne permet pas de chiffrer directement la pollution (en tension) permise au client, cependant elle règle de façon directe (en courant) son pouvoir perturbant intrinsèque. Il faut ajouter que, sur le plan expérimental, la mesure des courants harmoniques absorbés par un appareillage est plus facile que celle des tensions harmoniques qu'il engendre sur son réseau d'alimentation lequel peut déjà être pollué. En outre, la considération des courants harmoniques permettrait de reprendre éventuellement en compte le coût des pertes supplémentaires dans les réseaux.

. Sous forme d'une limite du rapport W/P_{cc} , puissance perturbante sur puissance de court-circuit du réseau :

Cette forme de recommandation présente l'avantage de faire la synthèse entre le pouvoir perturbant (en courant) du client (plus ou moins proportionnel à la puissance W du matériel), et l'impédance du réseau (plus ou moins liée à sa puissance de court-circuit P_{cc}). En fait le rapport W/P_{cc} est un critère de pollution approximatif sauf dans le cas idéal où le matériel perturbant est un pont redresseur à commutation pratiquement instantanée et où l'impédance du réseau est constituée d'une inductance pure constante.

La valeur relative de chaque tension harmonique produite est alors égale au rapport W/P_{cc} .

Quelle qu'en soit la forme, toutes les recommandations se recoupent dans l'ensemble. Il en ressort les indications.

- Pour les paliers de tension supérieurs, où la pollution est la crainte notamment à cause de l'importance géographique des zones desservies, les limites admises pour les tensions harmoniques se situent à des valeurs égales ou sensiblement inférieures à 1 %.

Les recommandations qui proposent des limitations de courants harmoniques sont pratiquement équivalentes.

- Pour la basse tension et pour les installations industrielles la prévention de la pollution aboutit à des recommandations sensiblement différentes : Les valeurs limites traduites en tension se situent entre 1 et 2 %.

Conclusion :

L'importance de ces perturbations dépend des caractéristiques des réseaux qui sont souvent mal connues ; d'autre part, ces caractéristiques sont variables puisque les charges connectées sur les réseaux peuvent varier d'un instant à l'autre.

Les effets de ces perturbations dépendent également du niveau de sensibilité des éléments pouvant être perturbés. C'est la connaissance imprécise de ces paramètres (caractéristiques des réseaux et niveau de sensibilité des éléments perturbés), ainsi que l'absence actuelle de normes (qui sont en cours d'élaboration) qui rendent quelquefois nécessaire l'adjonction d'éléments de réduction des perturbations lors de la mise en service.

Chapitre IV : Les moyens de limitation des harmoniques dans
les réseaux.

Sur le plan technico-économique, la pollution harmonique, possède également 2 aspects complémentaires puisque :

- d'une part, elle détériore la qualité de service du réseau distributeur d'énergie électrique, en risquant d'amener l'accroissement des coûts d'exploitation ou de fabrication des appareillages perturbés de la clientèle et du réseau lui-même.
- et, d'autre part, tout palliatif à cette détérioration de la qualité de service peut entraîner l'augmentation, soit des coûts de fabrication ou d'exploitation soit des réseaux, s'il s'avère nécessaire de les modifier dans le but de mieux résorber la pollution, soit des appareillages perturbateurs de la clientèle s'il s'avère nécessaire de diminuer leur pouvoir de pollution.

Pour une technologie rationnelle on doit, sinon éliminer ces harmoniques, du moins réduire leur niveau ; cette mesure se justifie, aussi économiquement. La solution la plus simple est d'agir sur la source.

I) Palliatifs aux distorsions harmoniques :

Les harmoniques dues aux machines tournantes sont négligeables par rapport à ceux produits par les redresseurs industriels et les transformateurs ; notons que ceux dus aux redresseurs sont plus importants.

I)-1/ Prévention des distorsions harmoniques à leur source :

I)-1/-1/ Le transformateur :

Les harmoniques produits par le transformateur sont liés à la situation du circuit magnétique de cet appareil. Pour réduire leur niveau on intervient alors au niveau de la construction du noyau. En général on l'exécute à cette fin en tôles formées de grains orientés.

Une fois cette correction réalisée on élimine les harmoniques homopolaires à l'aide d'un choix judicieux du couplage des enroulements. Indépendamment du mode de couplage les harmoniques homopolaires des f.e.m des enroulements triphasés d'un transformateur sont en phase. on prévoit :

- la connexion en étoile de l'enroulement triphasé d'un transformateur : les harmoniques homopolaires disparaissent dans la tension composée ; ceci s'explique par le fait que dans chacun des 2 circuits qui forment l'étoile ces harmoniques sont opposés.

- La connexion en triangle :

En agissant suivant le circuit fermé du triangle, la f.e.m E_3 y crée un courant I_3 . Cette f.e.m E_3 n'apparaît pas dans les tensions composées car dans le triangle fermé elle est entièrement utilisée pour vaincre la chute de tension due au courant I_3 .

Donc pour les transformateurs triphasés on prévoit pour éliminer les harmoniques multiples de 3, la connexion en triangle pour ou moins un enroulement.

I)-1/1/ Le redresseur :

La périodicité d'un redresseur étant toujours multiple de 3, ces appareils ne sont donc pas générateurs de courants homopolaires. On utilise généralement pour les redresseurs la connexion ΔY parcequ'elle donne les plus petits harmoniques. Le rang des fréquences harmoniques étant $n = kp \mp 1$, pour annuler les harmoniques de rang faible on doit augmenter le nombre de voies de passage du courant, donc augmenter l'indice de pulsation p . Généralement on monte des groupes redresseurs dodécaphasés (à 12 phases), c'est à dire, 2 ponts triphasés en série ou en parallèle, alimenté chacun par un enroulement séparé.

I)-2/ Prévention globale des distorsions harmoniques dans les réseaux

I)-2/1/ Intervention sur les impédances harmoniques des réseaux :

. La puissance de court-circuit des réseaux évolue dans le sens de l'augmentation, cependant, pour des raisons technologiques et financières, les possibilités d'augmentation ne sont pas illimitées.

. Les résonances dues aux interférences inéluctables entre les inductances et capacités constitutives d'un réseau public ou privé surviennent pratiquement dans la gamme usuelle des fréquences harmoniques.

Il serait trompeur de laisser croire qu'il est possible de supprimer les capacités des lignes et autres, pour les faire disparaître. On s'efforce pourtant de minimiser les effets des résonances.

I)-2/2/ Protection des batteries de condensateurs des réseaux :

Les condensateurs branchés au réseau pour l'amélioration du facteur de puissance ($\cos \phi$) constituent des impédances réduites pour les courants harmoniques.

.../...

Même pour des petites tensions aux bornes, les courants harmoniques dans les condensateurs peuvent être très importants parce que les admittances sont proportionnelles à la fréquence. Les courants importants créent un grand chauffage du matériel diélectrique. Dans le cas de résonance le phénomène a des conséquences plus grandes.

Avant l'installation de ces appareils on doit vérifier la composition harmonique du réseau dans le poste en question en mesurant l'impédance harmonique de court-circuit du réseau. Pour déterminer les courants harmoniques qui vont traverser les condensateurs, lorsque ceux-ci sont branchés, on utilise la formule :

$$I_{cn} = \frac{U_n}{j x_{cn} + Z_{cc.n}} \quad \text{Ou} \quad U'_n = \text{la tension harmonique avant le branchement.}$$

et $X_{cn} = \frac{1}{n.w.c}$

Après le raccordement on aura :

$$\text{une tension harmonique : } U_{cn} = \frac{X_{cn} \cdot I_{cn}}{Z_{ccn} - j x_{cn}}$$

ou Z_{ccn} = impédance de court-circuit du réseau pour l'harmonique d'ordre n, vue du point de raccordement.

$$Z_{ccn} = R + jx$$

On en déduit un coefficient y caractérisant la chute de tension harmonique :

$$y = \frac{U_{cn}}{U'_n} = \frac{X_{cn}}{\sqrt{R^2 + (x - x_{cn})^2}} \approx 0,5$$

Ce coefficient "y" est la valeur par laquelle il faut multiplier les tensions harmoniques du réseau, avant le branchement de la batterie, pour obtenir les tensions harmoniques après la mise en service de celle-ci.

* Connaissant les valeurs de R, X et X_{cn} en fonction de la fréquence on peut calculer la valeur de "y".

La norme française, UTE 127, relative aux règles d'établissement des condensateurs, statiques à fréquence industrielle, spécifie qu'un condensateur, de tension nominale U et de courant nominal I, doit pouvoir supporter en service continu toute tension alternative, même non sinusoïdale, de valeur efficace 1,10.U, à condition que la valeur efficace du courant traversant le condensateur ne soit pas supérieur à 1,30.I.

Pour cette raison la protection anti-harmonique des condensateurs doit toujours être présente car le niveau de tension harmonique dans le réseau est variable. .../...

On protège les batteries de condensateurs par une commande de déclenchement si le courant effectif dépasse la valeur prescrite on utilise pour cela des relais thermique au lieu de relais à maximum de courant. La protection contre les surcharges commande un déclenchement temporisé à l'aide d'un relais thermique sensible uniquement à la valeur efficace du courant. La temporisation dans la plupart des pays est de 0,5 à 1 seconde. Mais de nombreux incidents ont montré qu'une telle protection est imparfaite.

Dans le cas où la batterie est en résonance avec le réseau, et par conséquent constamment surchargée, les solutions proposées ci-dessus ne sont pas applicables. On fait alors appel, dans de telles situations particulièrement à la solution qui consiste à déplacer la fréquence de résonance. Ceci se réalise, de la manière la plus simple, en modifiant la puissance de la batterie.

Si cela n'est pas possible, on prévoit des inductances, dites "inductances anti-harmoniques", en série avec le condensateur. Ces inductances sont dimensionnées de telle sorte que l'ensemble : capacité - inductance soit approximativement accordé sur l'harmonique le plus dangereux.

Il a été démontré qu'il suffit de faire l'accord pour la fréquence de 250 HZ.

L'inductance est dimensionnée approximativement à l'aide de la formule suivante :

$$X_L = 1,5 \frac{X_c}{n_{min}}$$

n_{min} = rang minimal de l'harmonique

La plupart des auteurs conseillent de prendre comme réactance à 50 HZ, (5 à 6 %) de la réactance capacitive de la batterie de condensateurs à 50 HZ.

Les normes françaises prévoient que l'inductance anti-harmonique doit supporter un courant résultant :

$$I_{rés} = I_{nom}(50) + 0,5 \cdot I_{nom}(250)$$

ou :

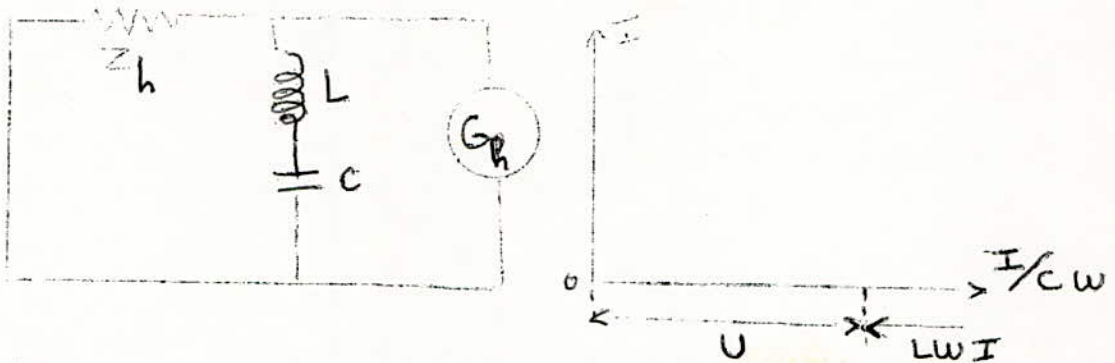
$$I_{nom}(50) = \text{courant nominal à 50 HZ.}$$

D'autres pays dimensionnent cette inductance de façon qu'elle supporte : $I_{rés} = 1,3 I_{nom}$ à 50 HZ.

La connexion de la bobine anti-harmonique exige que le condensateur fournisse, à la fréquence fondamentale, une puissance supérieure à la puissance utile. En effet le condensateur doit fournir le courant de magnétisation de la bobine.

68

Pour cette raison certains auteurs considèrent cette solution non économique, pourtant elle est inévitable pour les grandes batteries de condensateurs.



Le système L et C est selfique pour tous les harmoniques 5 et suivants provoqués par les redresseurs.

Il est capacitif à 50 HZ, donc fournit de l'énergie réactive.

S'il y a plusieurs batteries, il y a autant de fréquences de résonance que de batteries et ce système demande des calculs plus précis.

Remarquer que la tension aux bornes des condensateurs $1/Cw$ est plus grande que la tension du réseau U (d'environ 6 %).

Enfin ce système ne diminue pas les tensions harmoniques.

I)-3/ Filtres d'harmoniques :

Si l'on veut faire baisser une tension harmonique gênante pour les autres consommateurs, on accorde L et C sur cet harmonique, constituant un court-circuit :

$$Lw - \frac{1}{cw} = \xi$$

Les filtres d'harmoniques peuvent être des filtres en série avec le réseau, ils séparent ainsi les charges linéaires des charges non linéaires ; ou des filtres en parallèle avec le réseau, il dérivent alors les courants harmoniques vers la terre.

Généralement les filtres sont placés près de la source afin d'éviter la pénétration de ces courants dans le réseau.

Ces filtres sont parfois constitués simplement de condensateurs, parfois formés par des ensembles plus ou moins complexes de conductances et d'inductances en série ou en parallèle, de façon à obtenir une bande passante de largeur appropriée.

Les filtres placés en déviation constituent des circuits de grande admittance absorbant la puissance harmonique. Ils peuvent être complétés par d'autres placés en série sur la connexion au réseau et formant circuit bouchon.

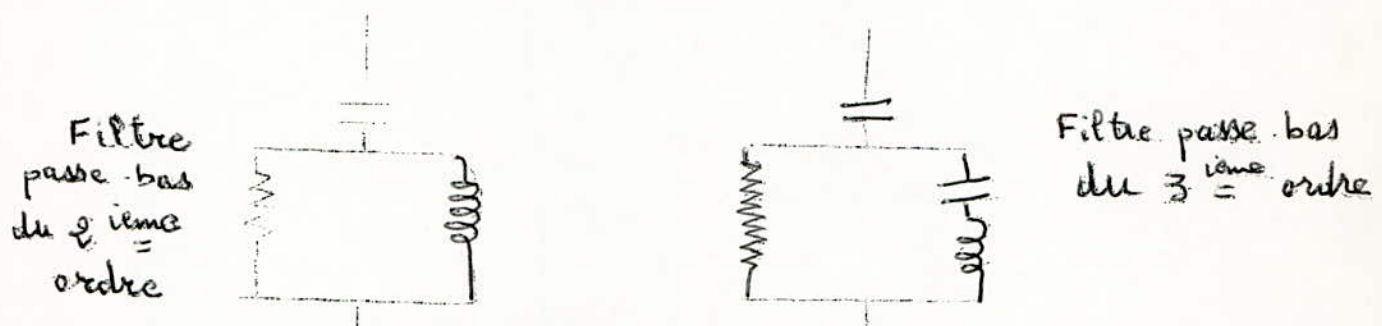
.../...

. Economiquement on préfère les filtres shunts :

Pour éliminer les harmoniques de rang bas qui sont les plus dangereux on utilise des bras résonants, en parallèle avec le réseau, accordés chacun sur une fréquence jusqu'à un certain ordre. Au delà de ce rang on installe un filtre passe-bas.

Les cellules les plus utilisées sont :

- filtre à une seule fréquence d'accord
- filtre à double fréquence d'accord
- filtre passe-bas du second ordre
- filtre passe-bas du troisième ordre.



II) Prévision des harmoniques dans un réseau par le calcul sur ordinateur.

L'objet de l'étude est de calculer les effets de l'injection de courants harmoniques en un ou plusieurs points d'un réseau quelconque contenant uniquement des éléments passifs (résistances, selfs et capacités) à l'exclusion de toute source harmonique.

Le programme de calcul mis au point répond à 2 objectifs distincts :

II)-1/ Etude des risques de résonance :

Il s'agit de savoir si le réseau présente des risques de résonance à des fréquences proches de celles des courants harmoniques les plus probables (5,7...etc selon le couplage des redresseurs).

Pour cela nous disposons de 2 programmes :

1°) Calcul direct des fréquences de résonance (ou fréquences propres) du réseau en négligeant les termes d'amortissement (résistances des liaisons et des charges).

2°) Etude de la variation de l'impédance du réseau vue d'un certain nombre de noeuds (en particulier ceux où il y a injection de courants harmoniques) en fonction de la fréquence.

Cette étude consiste à calculer l'impédance pour un certain nombre de fréquences.

La comparaison de ces résultats avec les rangs d'harmoniques qui sont injectés dans le réseau montre quels sont ceux qui provoqueront des surtensions dangereuses et qu'il faut donc filtrer.

Le programme 1° présente l'avantage d'être le plus direct, mais il ne tient pas compte des résistances (or la fréquence propre varie peu si l'on en tient compte).

Le programme 2°, s'il est plus lent en temps de calcul, donne par contre des résultats plus exacts, puisqu'il tient compte de l'amortissement dû aux résistances présentes dans le réseau (lignes et charges).

II)-2/ Courants injectés :

Il s'agit de connaître comment se répartissent dans le réseau les courants injectés, et déterminer les surtensions qu'ils provoquent aux différents noeuds.

Cette deuxième étape nécessite donc de connaître non seulement comme dans la première, les valeurs des différents éléments passifs (résistances, selfs et capacités), mais aussi les valeurs des courants injectés, pour les différents rangs d'harmoniques.

II)-3/ Exploitation du programme

Elle peut avoir plusieurs aspects :

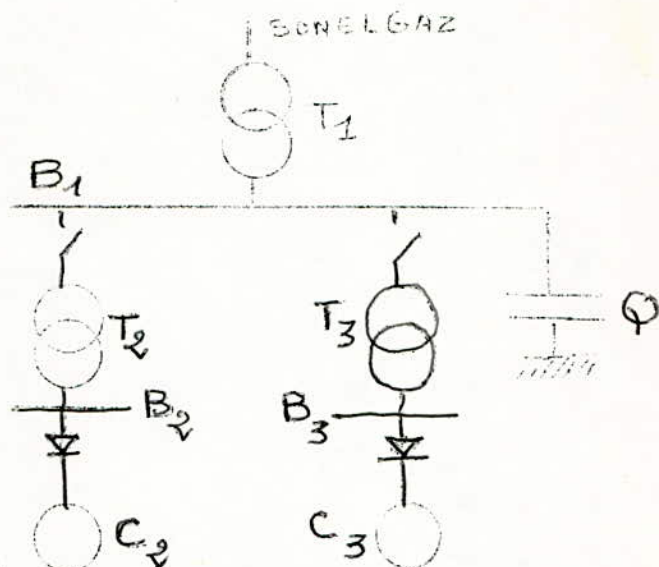
- . La recherche des fréquences de résonance d'un réseau donné, ceci dans les différentes configurations possibles, permettra de définir la ou les fréquences qui doivent être éliminées par des filtres.
- . La mise en place de filtres modifiant l'impédance globale du réseau, il faut alors vérifier que n'apparaissent pas d'autres fréquences dangereuses. Plusieurs passages consécutifs du programme devaient permettre en outre d'établir quel est l'emplacement le meilleur à choisir pour un filtre, lorsque plusieurs solutions sont possibles.
- . La connaissance des courants harmoniques injectés permet de vérifier que les différents éléments du réseau (en particulier les batteries de condensateurs) ne sont pas surchargés et que les tensions harmoniques aux différents noeuds ne sont pas exagérément élevées.

L'exemple simple de la figure suivante illustre une application possible du programme.

41

Le réseau Sonelgaz alimente à travers le transformateur T1 un jeu de barres B1 auquel sont raccordées 2 charges redressées C₂ et C₃, productrices d'harmoniques de rang n.

Une batterie de condensateurs Q relève le Cos φ au niveau B₁.



Supposons que l'ensemble (T1, Q) constitue un circuit bouchon sur l'harmonique de rang n ($LCW^2 = 1$). Il y a donc lieu d'éliminer cette fréquence par adjonction d'un filtre.

A priori, on peut penser que 2 solutions sont possibles :

- soit placer un filtre unique sur le jeu de barres B1,
- soit placer un filtre sur chacun des jeux de barres B₂ et B₃.

Or il peut être suffisant de ne placer qu'un seul filtre, soit en B₂, soit en B₃. Il y a par conséquent 4 solutions à examiner ce que est très fastidieux par un calcul manuel, alors que cela ne présente aucune difficulté avec le programme établi.

D'autre part on peut être amené à étudier de nombreux modes de marche.

Considérons 2 ponts à thyristors, alimentant 2 moteurs régulés.

Les harmoniques aux différents points du réseau sont la somme des I_n , approximativement égal à l'angle de retard des thyristors, peut-être très différent.

Faire la somme arithmétique des I_n donnera la valeur maximal. Mais s'il y a de très nombreux ponts redresseurs dont les angles de retard varient indépendamment, ils ne seront pratiquement jamais tous en phase. Donc la somme arithmétique donne une valeur excessive. On peut prendre la somme quadratique.

Cette valeur est bonne pour tous les phénomènes d'échauffement dûs aux harmoniques.

Per contre, s'il y a risque de résonance sur l'un des rangs d'harmonique, on peut s'attendre à voir déclencher une batterie de condensateurs sporadiquement, quand par hasard tous les I_n se sont trouvés en phase.

III) Mesure des harmoniques dans les réseaux.

Les calculs précédents sont nécessaires au stade du projet, pour choisir les couplages des ponts redresseurs, les impédances du réseau, ...etc.

Quand les incidents se produisent dans une usine en fonctionnement et qu'on soupçonne les harmoniques, il faut faire des mesures ou des enregistrements :

- Dans des usines à marche fluctuante, comme la sidérurgie, il faut faire des enregistrements en continu pour avoir des valeurs moyennes.
- dans des usines à régime stable, comme l'électrolyse, des mesures peuvent suffire.

III)-1/ Régimes stables :

Dans ce cas on ne manque pas de moyens pour faire l'analyse de Fourier, mais il faut bien vérifier que le régime est réellement stable, ce qui est rare. L'oscilloscope est le minimum indispensable ne fut-ce que pour voir si l'ordre à observer ne varie pas dans le temps.

S'il suffit de relever les harmoniques jusqu'au 15ème environ, avec une précision de l'ordre de 10 %, un simple oscilloscope suffit.

On emploie le Tektronix à écran rémanent, avec son appareil photographique Polaroid adaptable. La photographie suffit à faire une analyse de Fourier sommaire.

On dispose aussi d'un tiroir adaptable à cet oscilloscope, qui fait apparaître sur l'écran l'amplitude des harmoniques.

E D F a fabriqué un analyseur se limitant à 1 K Hz qui donne par lecture successive les amplitudes d'harmoniques jusqu'au 20ème, avec une précision de 0,5 % environ.

Pour une analyse plus fine, jusqu'au 25 ème rang par exemple, pour des ponts redresseurs à 24 bras, il faut un oscillographe donnant une courbe assez grande ; on emploie l'oscillofil de siemens, qui tout en étant transportable, trace par défilement du papier à 5m/s, une période sur 10 cm.

Un programme d'ordinateur permet de fournir l'analyse de Fourier de cette courbe, en amplitude et en phases.

III)-2/ Régimes instables :

L'intérêt principal des thyristors étant la facilité de variation de régime des moteurs qu'ils alimentent, il est normal que les courants à analyser soient variables, il en est de même pour les courants

des sous stations de chemin de fer où le trafic est variable. Pour les perturbations qui nous intéressent, à savoir des échauffements, principalement dans les condensateurs, éventuellement dans les circuits magnétiques ou autres, c'est une valeur moyenne qu'il faut connaître. Nous employons alors la méthode suivante, éprouvée entre autre dans la sidérurgie, où les moteurs à laminoirs et de leurs annexes sont à régime sans cesse variable.

. Un enregistreur à bande magnétique philips, à 7 voies, fréquence passante 20 KHz, permet d'enregistrer des heures de fonctionnement dans l'usine à étudier.

On branche souvent en parallèle un simple oscilloscope pour voir ce qu'on enregistre.

Les avantages de l'enregistreur magnétiques sont multiples :

- il permet d'enregistrer pendant des durées infiniment plus longues qu'un oscilloscope à papier ;
- Par suite, il permet de comprendre beaucoup plus facilement les phénomènes à étudier mais qu'on ne peut provoquer quand on veut et autant de fois qu'on veut : coulée de four laminage de grosse pièce...etc.
- Par dessus tous, il permet de revoir en laboratoire, dans de meilleurs conditions qu'en usine, les phénomènes autant de fois que l'on veut et de les analyser. L'enregistreur peut en effet alimenter :

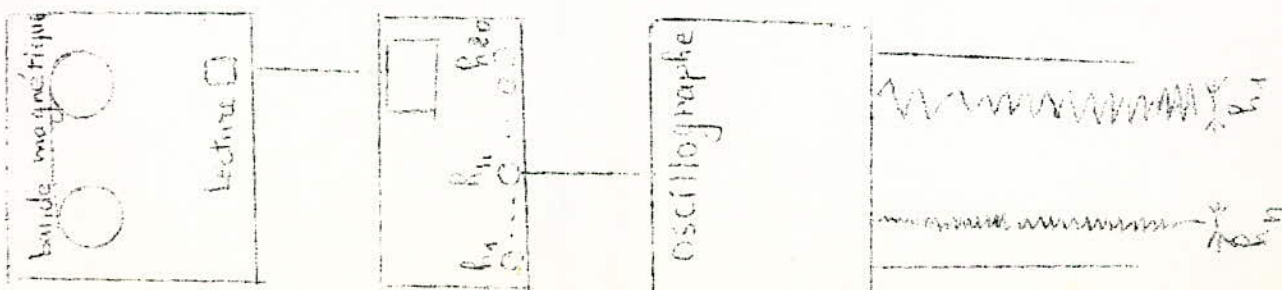
. Un oscilloscope, avec lequel on sélectionne les régimes intéressants de la bande,

. Un oscillographe, en particulier l'oscillofil. Par un premier passage à vitesse lente on a la variation de valeur efficace des courants et tensions. On détecte ainsi les zones de puissance à peu près stables où il peut être utile de faire des calculs,

. L'analyseur de la figure suivante, possède des sorties correspondants à chaque harmonique.

Par ces sortie on alimente l'oscillographe précédent. On peut donc enregistrer, par défilement lent, la variation du fondamental en même temps que l'amplitude de chaque harmonique.

On a ainsi la valeur moyenne cherchée.



III)-3/ Conclusion

Les redresseurs ayant l'avantage, de provoquer des harmoniques connus d'avance en fonction de leur couplage, d'autre part les impédances harmoniques du réseau, pour les fréquences jusqu'au KHz étant assez bien définies on peut calculer à l'avance les perturbations de la tension du réseau aux différents niveaux.

Les calculs à la main, pour différentes configurations d'un réseau, en différents points, et pour chaque rang d'harmonique étant extrêmement longs, on a établi un programme permettant de faire ces calculs à l'ordinateur.

C H A P I T R E - V -

A P P L I C A T I O N

ETUDE DES HARMONIQUES ET MOYENS
DE LIMITATION DES PERTURBATIONS DUES
AUX REDRESSEURS DE PUISSANCE DE LA
LIGNE MINIERE -ANNABA - TEBESSA -

I- INTRODUCTION :

Le trafic devenant de plus en plus intense et important sur la ligne minière électrifiée Annaba - Tébessa, la S.N.T.F a jugé utile de renforcer son réseau en courant continu en projetant d'installer 12 groupes redresseurs alimentés par la ligne 90 Kv de Sonelgaz.

Ces convertisseurs créent des harmoniques de courants, ceux-ci circulent en direction du réseau et engendrent une déformation de l'onde fondamentale de tension par la génération de tensions harmoniques qui sont gênantes pour le réseau. Sonelgaz pense faire une étude sur harmoniques dus à ce genre de convertisseurs pour chercher le moyen d'atténuer ce type de pollution des réseaux électriques.

L'étude faite ici, est très simplifiée, car par manque de moyens (appareils de mesure, connaissance imparfaite du réseau etc...) nous n'avons pas pu approfondir l'analyse, d'autant plus que ce renforcement de la ligne minière est en projet.

II- CARACTERISTIQUES DE LA LIGNE 90 Kv ET DES GROUPES

REDRESSEURS.

La ligne Annaba-Tébessa est longue de 230 Km. La S.N.T.F. a choisi d'augmenter le nombre de sous stations (au lieu d'augmenter la puissance) pour éviter des pertes considérables d'énergie.

- Rapport de transformation à vide du groupe redresseur

$$U = 87 \text{ Kv} \neq 4 \neq 8\% / 3,340 \text{ Kv}$$

- Tension continue nominale :

Selon la norme C.E I 146 : on admet que la tension continue nominale est la tension que l'on aura aux bornes du redresseur au courant nominal permanent lorsque le bloc redresseur est couplé sur le réseau présentant la puissance de court-circuit infinie ($P_{cc} = \infty$)

. La chute de tension continue = 100 V

d'où la tension continue nominale $U_{dn} = 3240 \text{ V}$

.../...

- Courant continu nominal I_{dn}

Après étude, la S.N.T.F a décidé d'installer des groupes équipant l'ensemble des sous-stations.

avec $I_{dn} = 1000$ A chacun

- Conditions Techniques particulières

1- Caractéristiques propres du réseau d'alimentation

- Tension nominale de service du réseau : 90 Kv
- Tolérance +8 %
- Tension la plus élevée pour le matériel 100 Kv eff
- Fréquence du réseau 50 Hz, 2,3 Hz
- Puissance de court circuit : 500 MVA max
- Nombre de phase : 3

2- Délimitation des ouvrages

- La fourniture complète et le montage de 12 groupes redresseurs complets et identiques, comprenant chacun :

- . 1 transformateur d'alimentation
- . L'assemblage des éléments redresseurs dodécophasés avec cellules au silicium
- . Les barres de connexion à courant alternatif reliant le transformateur d'alimentation et le groupe redresseur proprement dit.
- . Le sectionneur -fusibles ainsi que les barres de raccordements entre les barres 3 Kv du transformateur principal et les bornes 3 Kv du transformateur auxiliaire des service auxiliaires.

3 - Nombre de groupes par sous-station de redressement :

	El-Hadjar	Medjez S.F.A	Mechroa	Souk Ahras	Tuileries	Mdaourouch	Oued Keberif	Tebessa
Transformateur de puissance triphasés enroulements = 87 Kv	2	1	1	2	1	2	1	1
Groupes redresseurs 10 Kw, 1000 A 10 V	2	1	1	2	1	2	1	1

4- Caractéristiques de fonctionnement des groupes redresseurs

-Tension nominale primaire 87 Kv

(tenant compte des conditions réelles de chute de tension le long de la ligne 90 Kv El Hadjar - El Aouinet - Tebessa.)

- Tension continue réelle à vide à la sortie des groupes redresseurs.

- . Tension lère 87 Kv + 8% = 94Kv $\implies U_{dv} = 3607 V$
- . Tension lère 87 Kv $\implies = 3340 V$
- . Tension lère 87 Kv - 8% = 80Kv $\implies = 3073 V$

- Tension continue nominale en charge à la sortie des groupes redresseurs pour une tension d'alimentation de 87 Kv, un courant débité de $I_{dn} = 100'$ et en admettant une réactance de court-circuit du réseau d'alimentation égale à zéro c'est à dire P_{cc} infinie; $U_{dn} = 3240 V$

- Mode de couplage : 2 points triphasés en série (ou en parallèle) alimenté chacun par un enroulement séparé, déphasé de 30° et du même transformateur.

- Facteur de puissance de l'onde fondamentale coté 90 Kv pour :

1/4 charge	$\cos \phi = 0,972$
2/4 charge	$\cos \phi = 0,966$
3/4 charge	$\cos \phi = 0,958$
4/4 charge	$\cos \phi = 0,949$
5/4 charge	$\cos \phi = 0,944$

- Forme d'onde de la tension alternative :

Le taux de distorsion engendré sur le réseau Sonelgaz à 90 Kv par suite de l'introduction de la charge des sous-stations ne devra pas dépasser, la valeur maximale, limite de 5%, ceci compte-tenu des puissances de court-circuit suivantes, indiquées par le fournisseur d'énergie en régime équilibrables dans les cas extrêmes prévisibles au cours des prochaines années.

Station	Puissance de court-circuit (maximale)	Puissance de court-circuit (min)
El Hadjar	500 MVA	275 MVA
Medjez - Sfa	220	170
Mechroa	200	170
Souk Ahras	200	160
Tuileries	200	160
M'daourouch	200	160
Oued Kebirit	200	160
Tebessa	130	110
Ain Chénia	200	160

Si le taux de distorsion dépasse 5%, on sera tenu de mettre en place les organes de filtrage nécessaire.

. Caractéristiques techniques pour transformateurs de puissance :

- Nombre de bornes coté réseau : 3 + N
- Nombre de bornes coté cellule : 3 + 3
- Neutre de l'enroulement coté réseau : directement à la terre
- Groupe de couplage Y.n - d Y
- Tensions : à vide $U_0 = \begin{cases} 1,236 \text{ Kv} \\ 1,225 \text{ Kv} \end{cases}$

. Nominale de l'enroulement coté réseau :

$$U_n = 87 \text{ Kv}$$

. De court-circuit : $U_{cc} = 6,9 \%$

- Puissances :

. Pertes à vide nominale = 7,7 Kw

. Puissance apparente nominale :

à 95 Kv : 3561 KVA

à 79 Kv : 3561 KVA

à 79 Kv : 3561 KVA

.../...

. Caractéristiques des transformateurs dans le cadre de leur utilisation avec les redresseurs.

. Pertes cuivres et supplémentaire à charge nominale selon Art 331 de la norme C.E.I 149 = 24 Kw. La réactance de commutation par phase selon l'article 341 de la norme C.E.I 146 est :

$$X_t = 0,15 \text{ Ohm.}$$

. Caractéristiques techniques pour des assemblages de groupes redresseurs.

- Puissance nominale sur barres coté continu : 3240 KW
- Tension continue à vide sur barres du redresseur pour une tension primaire de 87 Kv est 3240 V
- Chute inductive du redresseur = $d_{X_{tn}} = 11 \text{ V}$
- Tension continue nominale en charge pour courant nominal $I_{cn} = 1000 \text{ A}$ puissance de court-circuit du réseau d'alimentation infinie et tension alternative d'alimentation :

$$U_n = 87 \text{ Kv (sel comprise) , est } U_{dn} = 3240 \text{ V}$$

- courant continu nominal $I_{cn} = 1000 \text{ A}$

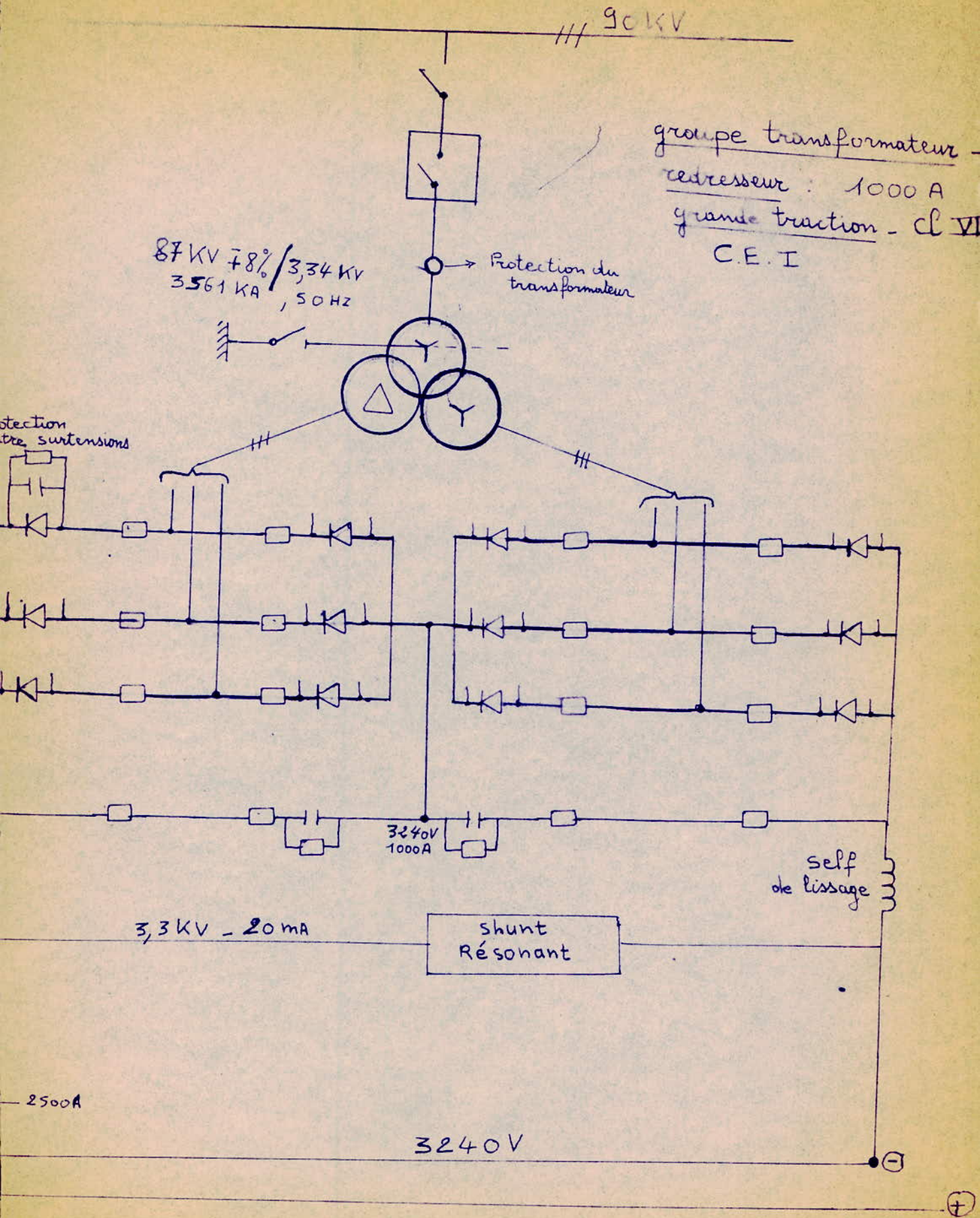
. Cycles de charges nominales des groupes redresseurs :

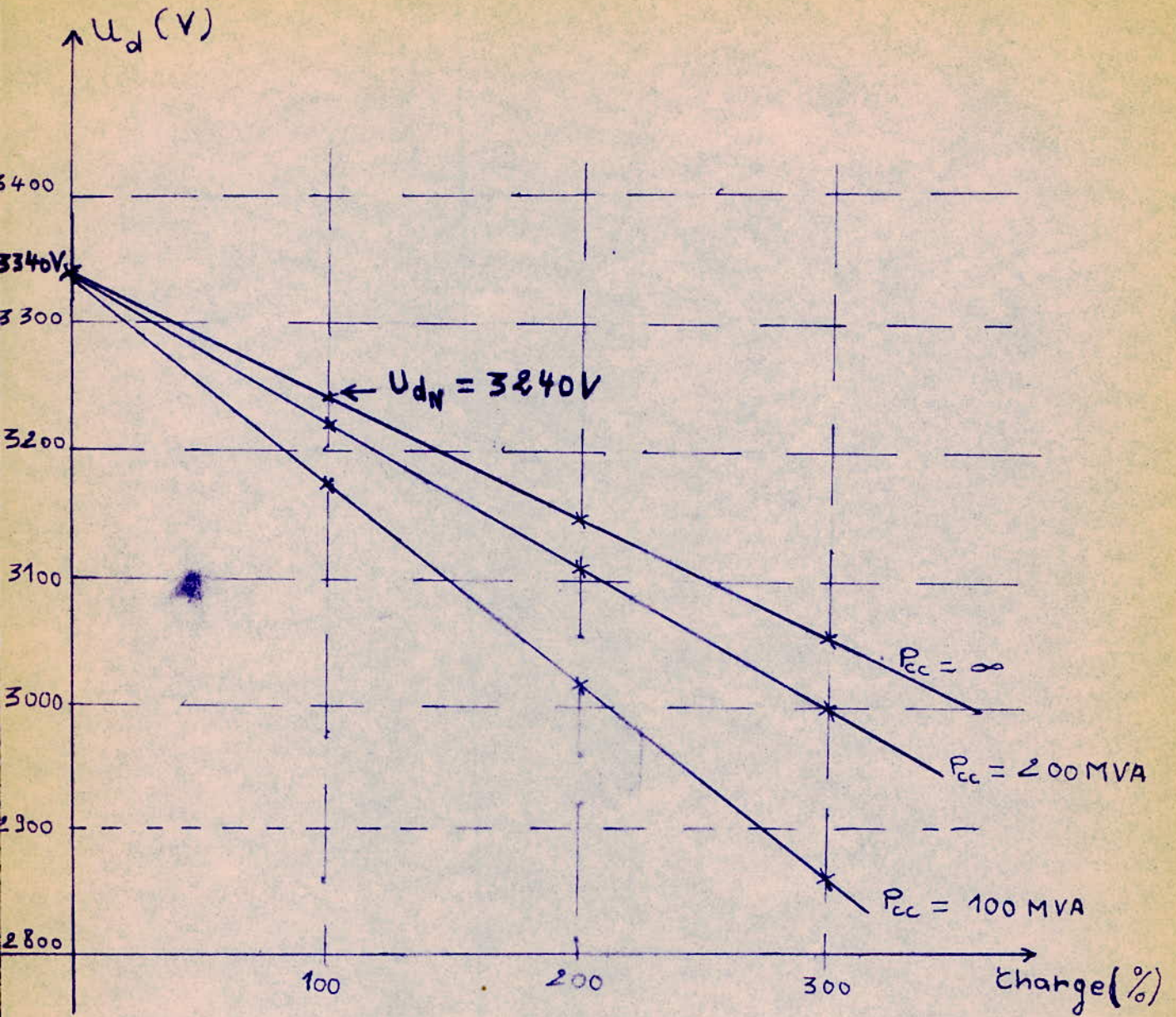
en permanence :	100%	1000 A	} selon les normes
pendant 2 heures :	150%	1500 A	
pendant 1 minute :	300%	3000 A	

. Détermination du nombre de groupes par station :

Economiquement parlant on a avantage à avoir le moins de groupes possibles par station. En effet l'augmentation du coût, d'un groupe pour obtenir une puissance plus élevée est très faible par rapport à ce qu'il faut investir pour la mise en place d'un 2ème groupe.

On a calculé que cette augmentation est de l'ordre de 8% pour passer de 3200 Kw à 4000 Kw soit pour obtenir une augmentation de puissance de 25% (compte tenu de l'ensemble de l'équipement). On a également déterminé que le gabarit de transport limite l'augmentation de puissance des groupes.

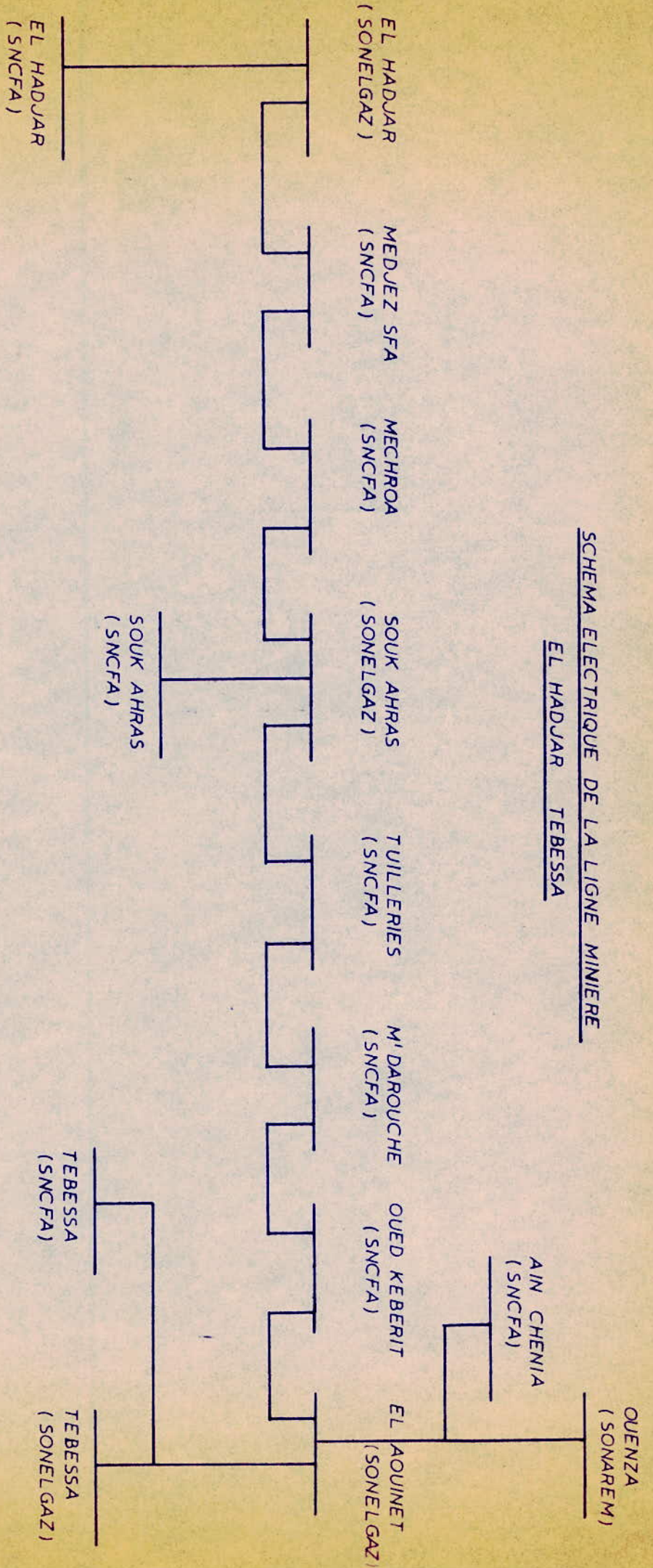




chutes de tension dans les blocs
transformateurs - redresseurs
et le réseau.

SCHEMA ELECTRIQUE DE LA LIGNE MINIERE

EL HADJAR TEBESSA



III- CALCUL DES TAUX D'HARMONIQUE

D'après les statistiques on a défini un seuil admissible ou pour lequel des incidents ont été signalés.

Pour un pont redresseur, le seuil admissible est égale à la somme des tensions harmoniques individuelles et égale à 5% = $\sum_{i=2}^{\infty} \frac{U_i}{U_1}$

Les données concernant l'impédance harmonique du réseau vue d'un point de raccordement commun de clients perturbants ou non est moins précises. Leur mesure est très délicate, de plus du fait des variations de charge, elles ne sont jamais constantes. Empiriquement on a trouvé que l'impédance harmonique de court-circuit des réseaux haute tension et très haute tension est comprise dans l'intervalle suivant :

$$Z_R = \frac{U_1^2}{P_{cc}} < Z_h \leq 4 \frac{U_1^2}{P_{cc}} = 4 Z_R, \text{ avec } Z_R = \text{impédance de cc du réseau}$$

En raison des difficultés rencontrées au cours de cette étude du taux d'harmonique, on simplifie le problème, en donnant des hypothèses approchées; on suppose que :

- La charge est constante et égale à la charge nominale I_n
- La tension est constante = U_n (nominale)
- L'impédance harmonique est pour le cas le plus défavorable $Z_h = 4 Z_{cc}$.
- La chute inductive du redresseur étant faible ($\neq 11$ V) n'influence pas beaucoup l'amplitude des harmoniques de courants.
- Les courants harmoniques d'un seul enroulement se superposent donc on fait la somme arithmétique.

* La valeur efficace de l'amplitude fondamental du courant primaire (coté réseau) du transformateur est :

$$I_1 = \frac{\pi (\sqrt{3} + 1)}{6 \sqrt{6}} \frac{I_d}{\cos \phi} \frac{U_d}{U_L}$$

I_d = courant continu moyen

U_d = tension continue

U_1 = tension de ligne (coté réseau alternatif)
entre phases :

.../...

Cas β : facture de puissance du réseau 90 Kv

Pour les valeurs nominales on aura :

$$\underline{I}_1 = \frac{II(\sqrt{3} + 1)}{6 \sqrt{6}} \times \frac{1000}{0,95} \times \frac{3240}{87,10^3}$$

$$\underline{I}_1 = 22,80 \text{ A}$$

Chaque pont (hémphasé) du groupe redresseur engendre dans le primaire du transformateur des courants harmoniques = 11, 13, 23, 25 donc la valeur efficace est de l'ordre de

$$\underline{I}_{11} = \frac{\underline{I}_1}{11} = \frac{22,8}{11} = 2,07 \text{ A}; \underline{I}_{13} = 1,75 \text{ A}$$

$$\underline{I}_{23} \approx 1 \text{ A}; \underline{I}_{25} = 0,9 \text{ A}$$

Dans chaque groupe redresseur, les 2 ponts en série, formant ainsi un système dodécphasé, sont alimentés chacun par un enroulement séparé, déphasé de $b = 30^\circ$ électriques et du même transformateur.

Les courants harmoniques issus de chacun des 2 ponts seront déphasés en ligne d'un angle : $a = (h \mp 1) b$ les uns par rapport aux autres respectivement :

$$\text{harmoniques } \begin{matrix} 11 \\ 13 \end{matrix} \left] a = 12 \times 30^\circ = 36^\circ, \text{ coincidence}$$

$$\text{harmoniques } \begin{matrix} 23 \\ 25 \end{matrix} \left] a = 24 \times 30^\circ = 2 \times 36^\circ, \text{ coincidence}$$

Le seuil admissible est donné par :

$$\frac{\sum_h U_h}{U_1} = \frac{\sum_h Z_h \cdot I_h}{U_1} = \frac{Z_h \times \sum_h I_h}{U_1} = \frac{Z_h \cdot I_t}{U_1} ?$$

Les courants harmoniques I_h dus à un pont (D) et ceux I_h'' de l'autre pont (Y) sont de même ordre de grandeur I_h donc $I_t' = I_{11}' + I_{13}' + I_{23}' + I_{25}' = I_t''$

$$\text{ainsi } I_t = 2(2,07 + 1,75 + 1 + 0,9) = 11,5 \text{ A}$$

* Calcul du taux d'harmonique à EL HADJAR :

L'impédance de court-circuit du réseau en ce point est

$$Z_R = \frac{U_L^2}{P_{cc}} = \frac{(90 \text{ KV})^2}{275 \text{ MVA}} = 29,5 \text{ Ohm}$$

. L'impédance harmonique maximale du réseau en ce point est donnée empiriquement par :

$$Z_H \# 4 Z_R = 4 \times 29,5 = 117,8 \text{ Ohm}$$

. Le taux de distorsion harmonique de tension dû à un seul groupe est : $U_{h_1} (\%) = \frac{Z_h \cdot I_t}{U_1} = \frac{117,8 \times 11,5 \times 100}{87.10^3} = 1,56 \%$

. Le taux de distorsion global dû aux 2 groupes est :

$$U_h = 1,56 \times 2 = 3,12 \%$$

. Finalement on trouve :

SOUS-STATION	NOMBRE DE GROUPEs	IMPEDANCE DE COURT CIRCUIT ZR	IMPEDANCE HARMONIQUE ZH	U _h (%)
EL HADJAR	2	29,5 Ohm	117,8 Ohm	3,52 %
MEDJEZ SFA	1	47,65 "	190,6 "	2,52
MECHROA	1	47,65 "	190,6 "	2,52
SOUK AHRAS	2	50,6 "	202,4 "	5,35
TUILERIES	1	50,6 "	202,4 "	2,67
M'DAOUROUCH	2	50,6 "	202,4 "	5,35
OUED KEBERIT	1	50,6 "	202,4 "	2,67
TEBESSA	1	73,64 "	294,6 "	3,9
AIN CHENLA	1	50,6 "	202,4 "	2,67

* Une autre méthode empirique nous permet fixer un seuil admissible en fonction de la puissance maximale du groupe redresseur et de la puissance de court-circuit du réseau : pour un redresseur à 12 bras (dodécaphasé)

On a un seuil $\frac{P_{max}(\text{redres})}{P_{cc}} \leq 2,5 \%$ or on trouve

	$\frac{P_{max}}{P_{cc}} (\%)$
EL HADJAR	2,35
S. AHRAS	4,05
M'DAOUROUCH	4,05

Donc le réseau sera perturbé à Souk-Ahras et à M'Daourouch ce que confirme les résultats précédents.

Il y a donc 2 sous-stations où l'on dépasse les 5% imposés.
 Si l'on considère la puissance de court-circuit maximale à Souk Ahras
 et à M'daourouch qui est de 200 MVA on aura :

$$Z_h \# 40,5 \text{ Ohm} \qquad Z_h \# 162 \text{ Ohm et } U_h = 4,1 \%$$

Donc inférieure à la limite imposée :

Inconvénient : La puissance de court-circuit est loin d'être maximale.

-- Calcul du taux d'harmonique traversant la batterie de condensateur à El Hadjar :

Pour l'énergie réactive consommée par l'usine SNS d'El Hadjar, on a placé une batterie de condensateurs sur la ligne 90 Kv, près d'El Hadjar. (car cette ligne alimente l'usine par l'intermédiaire de transformateurs). Donc il est nécessaire de protéger cette batterie de condensateurs contre les surtensions dues aux harmoniques de courants et de tensions.

Empiriquement on a déterminé approximativement que le seuil admissible ou pour lequel des incidents ont été signalés est donné par le taux d'harmonique individuel de tension (pour les condensateurs de puissances) :

$$\frac{U_h}{U_1} = \frac{83}{h} \quad (\%) \qquad h = \text{rang de l'harmonique}$$

Nous supposons que la ligne est sans perte et que les courants harmoniques se propagent et s'accumulent en ce point (El Hadjar).

Considérons les harmoniques d'ordre 11 qui sont les plus importantes, chaque groupe redresseur produit des harmoniques d'ordre 11 dont la somme est 4 A comme on a 12 groupes redresseurs donc la valeur totale des harmoniques 11 à El Hadjar sera : $I_{11} = 12 \times 4 \# 48 \text{ A}$

L'énergie réactive à compenser est de :

$$Q = 41 \text{ à } 137 \text{ MVAR}$$

Donc la réactance X_c varie entre $X_c = \frac{U^2}{Q} = \frac{90^2}{137} \# 59 \Omega$

Et $X_c = \frac{U^2}{Q} = \frac{90^2}{41} \# 197,6 \Omega$

.../...

Donc
$$\frac{U_{11}}{U_1} = \frac{X_c \cdot I_{11}}{U_1} = \frac{59 \times 48}{90 \cdot 10^3} = 3,15 \%$$

et
$$\frac{U_{11}}{U_1} = \frac{X_c \cdot I_{11}}{U_1} = \frac{197,6 \times 48}{90 \cdot 10^3} = 10,5 \%$$

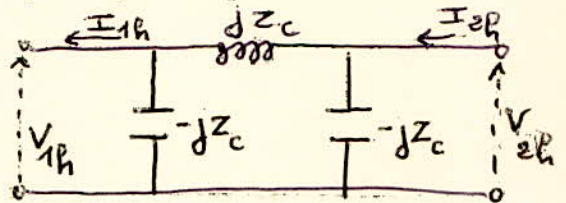
Donc si l'énergie réactive à compenser est minimale ($Q = 41$ MVAR), la réactance est maximale et le taux de distorsion individuel de tension dû aux harmoniques 11 est de 10,5 % or le seuil admissible est : $\frac{U_{11}}{U_1} = \frac{83}{11} (\%) = 7,54\%$

Donc les harmoniques 11 sont très nocifs pour cette batteries de condensator

* Propagation des systèmes harmoniques directs et inverses

- Régimes de la ligne en $\frac{1}{4}$ d'onde :

Pour une ligne en quart d'onde, $x = \frac{\lambda}{4}$, le quadripole équivalent est le suivant :



On sait que lorsque le courant est maintenu constant à l'une des extrémités de la ligne, la tension demeure constante à l'autre extrémi-

té et réciproquement; une ligne en quart d'onde transforme donc une distribution à tension constante en une distribution à courant constant et vice versa. Ce cas particulier peut se rencontrer fréquemment pour les fréquences harmoniques.

Exemple : prenons le groupe redresseurs (dodécaphasé), de M'daourouch, il est alimenté par la ligne aérienne en 90 Kv, ces redresseurs engendrent des courants harmoniques d'ordres 11, 13, 15, 25 etc. Calculons le taux de tension harmonique 11 à El Hadjar. La distance El hadjar - M'daourouch est de 140Km Dans ce cas la ligne 90 Kv est sensiblement en quart d'onde pour l'harmonique 11, car la longueur d'onde = $\lambda_{11} = \frac{3000}{11} = 545,4$ Km et $140 \times 4 = 560$ Km Lorsque les redresseurs fonctionnent à charge constante, ils débitent dans la ligne un courant harmonique constant d'ordre 11; il apparait alors à l'autre extrémité de la ligne (El Hadjar),

.../...

du côté alimentation, une tension harmonique d'ordre 11 constante et indépendante de l'impédance de court-circuit du réseau d'alimentation. Le générateur de courants harmoniques équivalent au groupe redresseur se transforme donc, pour l'harmonique d'ordre 11 seulement en une source de tension harmonique 11 placée au départ de la ligne. Calculons la tension harmonique V_{11} au départ de la ligne c'est à dire à El Hadjar

On peut écrire : $V_{11} = j Z_c I_{11}$ puisque la ligne est en quart d'onde (Z_c est l'impédance caractéristique de la ligne). Si V_0 et I_0 sont la tension fondamentale et le courant fondamental on a :

$$\left| \frac{V_{11}}{V_0} \right| = \left| \frac{I_{11}}{I_0} \frac{V_0 I_0}{\frac{2}{Z_c^2}} \right| = \left| \frac{I_{11}}{I_0} \frac{P_0}{P_c} \right|$$

où P_0 est la puissance absorbée par le redresseur et P_c la puissance caractéristique de la ligne.

Or $\frac{I_{11}}{I_0} = \frac{1}{11}$

La puissance caractéristique est la puissance que peut transporter la ligne dans de bonnes conditions :

$$P_c = 20 \text{ MW}$$

La puissance absorbée par un groupe redresseur : $P_0 = 3,34 \text{ MW}$ donc le taux de tension harmonique 11 au départ de la ligne est :

$$V_{11} (\%) = \frac{V_{11}}{V_0} \times 100 = \frac{100}{11} \cdot \frac{3,34}{20} \neq 1,5 \%$$

Comme il y a 2 groupes redresseurs à M'daourouch on aura :

$$V_{11} \neq 1,5 \times 2 = 3\%$$

Cette tension harmonique individuelle est importante, et elle va s'ajouter aux autres tensions harmoniques d'ordre inférieur et se forme ainsi une tension harmonique nocive pour la ligne 90 Kv, il est aisé de prévoir les risques de résonance à une fréquence donnée par la relation :

$$h = \left(\frac{P_{cc}}{Q} \right)^{1/2}$$

Où h est le rang de l'harmonique.

P_{cc} la puissance de court-circuit du réseau

Q la puissance réactive des batteries de condensateurs

reliées au réseau d'El Hadjar.

Q varie entre 41 et 137 MVAR d'o

$$h = \frac{(500)}{41}^{1/2} \neq 3 \text{ or } h \geq 11$$

donc il n'y aura pas de résonance en ce point.

- Réalisation d'un redressement à 24 phases

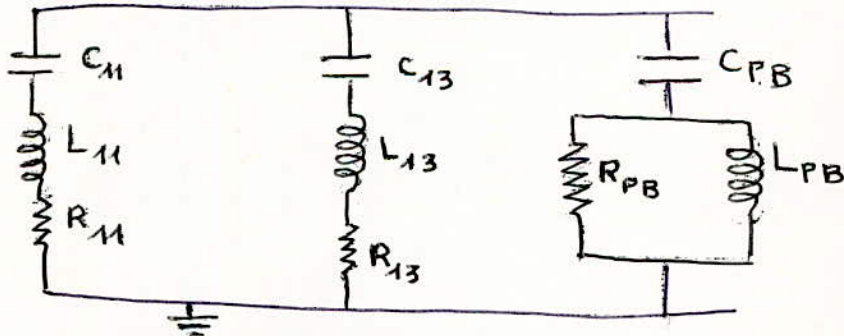
En réalisant un déphasage de 15° électrique entre 2 transformateurs en parallèle, on obtient un redressement à 24 phases. De ce fait, les premières harmoniques sont :

- rang 23 et 25

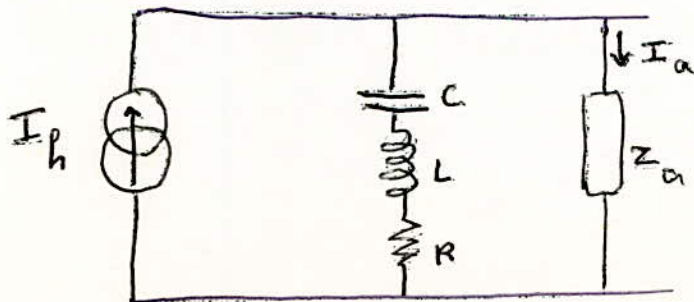
et par conséquent l'amplitude de ces harmoniques sera très faible et le seuil ne sera pas dépassé.

- Exemple de calcul simplifié d'un filtre :

On se propose de réduire les harmoniques générés par un redresseur dodécaphasé de grande puissance ^{au moyen de filtres}. Le convertisseur est alimenté par un réseau 90 Kv on placera un bras résonant à chacune des fréquences 11 et 13 (car plus gênants) et un filtre passe-bas pour les fréquences supérieures à $13 \times 50 = 650 \text{ Hz}$. Entre chaque phase et le neutre on placera une cellule du type suivant, de sorte que le filtre soit une étoile avec neutre à la terre.



a)- Choix du facteur de qualité du filtre : Q . le circuit équivalent par phase et le suivant :



La condition de résonance du filtre est : $L C W_h^2 = 1$

(avec $W_h = h \cdot W$).

Pour justifier économiquement la connexion du filtre sur le réseau, on utilise ce dernier pour fournir de l'énergie réactive consommée par les redresseurs (due au déphasage de commutation). Donc la capacité C est fixée par des considérations économiques, on déduit ensuite la valeur de L. Il reste alors à déterminer la valeur de la résistance R.

Le facteur de surtension Q du circuit est défini par le rapport : $\omega_p L / R$, le filtre est d'autant meilleur que la valeur de Q est élevée.

Malheureusement le facteur de désaccord X, défini par $X = \frac{W}{W_r} - \frac{W_r}{W}$

(W_r : pulsation de résonance) n'est pas nul, il est dû aux :

- écarts dans la fréquence du réseau
- variations de capacités avec la température
- variation de self avec le courant et la température.

La tolérance normale pour la fréquence du réseau peut-être de $\pm 0,2\%$ à 1% . Or un filtre désaccordé présente une impédance plus élevée que R, donnée par :

$$Z_f = R (1 + j Q x)$$

Cette impédance, étant plus grande que R, permet déjà que les tensions harmoniques soient plus élevées qu'au cas de l'accord exact, mais il existe un autre danger, puisque l'impédance du filtre est maintenant réactive, elle peut entrer en résonance partielle avec certaines valeurs d'impédance du réseau alternatif, ce qui conduit à des tensions encore plus élevées :

L'admittance du réseau est : $\frac{1}{Z_r} = G_r + j B_r$

L'admittance du filtre est : $\frac{1}{Z_f} = G_f + j B_f$

ou $G_f = \frac{1}{R [1 + (Q x)^2]^{0,5}}$, $B_f = - \frac{Q}{R [1 + (Q x)^2]^{0,5}}$

Si I_h est le courant harmonique venant du convertisseur on peut écrire :

$$U_h = \frac{I_h}{[(G_R + G_f)^2 + (B_R + B_f)^2]^{0,5}}$$

U_h aura une valeur maximale quand l'expression du dénominateur est minimale, ce qui correspond à

$$G_R = 0 \text{ et } B_R = B_f$$

$$\text{d'où } U_h = \frac{I_h}{\left[G_f^2 + 4 B_f^2 \right]^{0,5}} = I_h W_h \frac{L}{Q} \left[1 + (Q x)^2 \right]$$

Cette expression a un minimum égal à $R \cdot I_h$ pour $Q = \frac{1}{x}$. Cette valeur est donc un optimum de Q , dont on peut tirer la valeur de R , et qui conduira à un maximum absolu de $U_h = R \cdot I_h$ quelle que soit l'impédance du réseau.

L'hypothèse faite concernant $G_R = 0$ correspond à une impédance du réseau sans pertes (purement réactive).

b)- Détermination des éléments du filtre.

Vu le coût élevé des condensateurs on se propose de les utiliser pour compenser l'énergie réactive absorbée au réseau, en fournissant $Q_c = 40 \text{ MVAR}$ à la fréquence fondamentale. On peut alors écrire :

$$C_t = C_{11} + C_{13} + C_{P.B}$$

$$Q_c = \frac{U^2}{X_{C_t}} = 40 \text{ MVar d'où } U^2 \cdot W \cdot C_t = Q_c$$

$$\text{donc } C_t = \frac{Q_c}{U^2 \cdot W}$$

$$f = 50 \text{ Hz; } U = 90 \text{ Kv, } Q_c = 40 \text{ MVar}$$

$$\text{d'où } C_t = 1,57 \cdot 10^{-5} \text{ F}$$

$$\text{On prend : } C_{11} = C_{13} = \frac{C_{P.B}}{2}$$

Ce choix est arbitraire et le réglage exact ne peut-être fait qu'après les essais.

On obtient alors les valeurs suivantes :

$$C_{11} = C_{13} = 3,92 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

$$C_{P.B} = 7,85 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

.../...

De la condition de résonance on peut déduire les valeurs des inductances :

$$L_h = \frac{1}{W_h^2 C_h}$$

on obtient :

$$L_{11} = 21,36 \text{ mH et } L_{13} = 15,3 \text{ mH}$$

Quant aux résistances leurs valeurs sont déduites de L_h et Q

$$R_h = \frac{W_h L_h}{Q} \quad \text{d'où } R_{11} = 1,48 \text{ Ohms}$$

$$\text{et } X = 2\% \text{ soit } Q = 50 \quad R_{13} = 1,25 \text{ Ohm}$$

Pour les éléments du filtre passe-bas on choisit $f_0 = 700 \text{ Hz}$

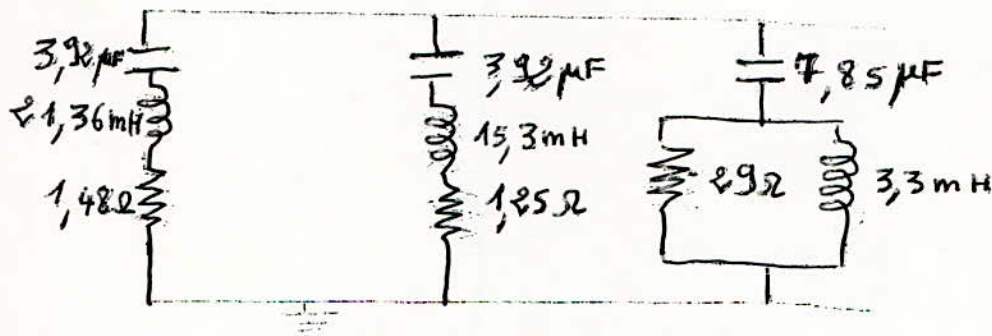
et $m = 0,5$ (en général) d'où :

$$R_{P.B} = \frac{1}{C_{P.B.} W_0} = 29 \Omega$$

$$L_{PB} = m \cdot C_{PB} R_{PB}^2 = 0,5 \times 7,85 \cdot 10^{-6} \times (29)^2$$

$$L_{PB} = 3,3 \text{ mH}$$

d'où le circuit par phase du filtre



c)- Dimensionnement des éléments du filtre :

Le courant dans un bras accordé d'un filtre comportera essentiellement le courant harmonique à la fréquence de résonance venant de la source harmonique, plus le courant à la fréquence fondamentale. Il existe aussi de faibles courants à d'autres fréquences.

- Dimensionnement des condensateurs : les dimensions physiques et le coût d'un condensateur dépendront surtout soit de la contrainte diélectrique, c'est à dire de la tension de crête (que l'on peut admettre, de façon pessimiste, égale à la somme de la crête fondamentale et des crêtes des tensions harmoniques), soit des pertes électriques, qui sont proportionnelles à la somme des puissances réactives de la fondamentale et des harmoniques.

Dimensionnement de la Self : Les principaux facteurs à prendre en considération sont la tension d'essai au choc et les pertes ohmiques. La tension d'essai au choc la plus satisfaisante est celle qui est égale à la tension d'essai du réseau, dans ce cas la tension de service et les tensions de crête transitoires sont relativement sans importance.

Le courant détermine les pertes ohmiques, quoique la résistance effective des pertes puisse varier avec la fréquence, si bien que la valeur efficace du courant total ne suffit pas encore pour le calcul.

Dimensionnement des résistances : Il est déterminé par les pertes ohmiques (qui dépendent de la valeur efficace du courant) et par la tension de crête, cette dernière ne dépasse pas quelques Kv (réseau HT et THT) dans les bras résonants,

Dans un bras résonant passe-bas, la résistance doit être dimensionnée pour supporter la pleine tension d'essai au choc de la ligne.

- Isolation à la terre : La disposition la plus économique est celle où les éléments du bras se suivent dans l'ordre R, L, C en partant de la terre. De cette façon il est facile d'isoler la résistance et une extrémité de la self, les condensateurs nécessitent des isolateurs de support pour une tension relativement haute.

.../...

C O N C L U S I O N

Les puissances de court-circuit du réseau d'alimentation sont faibles par rapport aux puissances des groupes redresseurs. Il est fort probable par conséquent que cela conduise à des difficultés en ce qui concerne le taux d'harmoniques.

- Si la définition du taux d'harmoniques est clairement définie, on ne peut pas décider à priori et sur la base d'un calcul théorique d'une valeur admissible pour celui-ci.

On doit en fait considérer le réseau dans son ensemble avec notamment les éléments qui vont agir en plus ou en moins sur le phénomène envisagé qui sont :

- L'évolution de la réactance du réseau qui va certainement diminuer, ce qui est un élément positif.
- La répartition momentanée de la charge des sous-stations redresseurs, laquelle peut varier fortement dans le temps.
- La présence dans le réseau d'autres consommateurs provoquant des perturbations qui peuvent s'ajouter ou se soustraire aux perturbations engendrées par les sous-stations.
- La sensibilité propre du réseau aux harmoniques.

* Les solutions envisagées pour diminuer le taux d'harmoniques sont les suivantes :

- Modification de l'ordre de redressement. On équiperait un certain nombre de sous-stations avec des groupes redresseurs décalés de 15° électriques par rapport aux autres stations. Cette solution n'a pas été retenue car on n'a pas de garantie de résoudre le problème par cette méthode qui est par ailleurs coûteuse et gênante au point de vue de l'exploitation, le matériel livré n'étant pas uniforme.

- Augmentation de la tension de court-circuit des transformateurs des groupes redresseurs :

Cette solution ne paraît pas apporter de solutions valables à ce problème, elle entraîne par ailleurs une augmentation de la chute de tension entre le réseau primaire et le jeu de barres 3 Kv

- Mise en place de filtre soit sur la moyenne tension, soit sur les barres 90 Kv. Cette dernière solution est la seule susceptible de donner satisfaction. Elle est conditionnée par la nécessité de dimensionner les filtres en fonction des mesures à effectuer " in situ " et non pas sur la base de calculs théoriques ne présentant aucune garantie de correspondre à la réalité.

Le contenu harmonique des courants imposés au réseau par la présence de redresseurs correspond à des fractions connues du courant fondamental lui-même lié au courant continu fourni. Dans la pratique, toutefois, la valeur du contenu harmonique va dépendre de la valeur de la puissance de court-circuit du réseau, et des conditions momentanées du trafic influençant la répartition du courant entre les différentes stations, ainsi que du taux d'harmonique déjà existant sur le réseau Sonelgaz lequel va se combiner favorablement ou défavorablement avec le contenu harmonique engendré par la S.N.T.F.

Dans l'état actuel des connaissances du réseau Sonelgaz et du régime de fonctionnement S.N.T.F. qui sera effectivement appliqué, il est pratiquement impossible de déterminer un taux d'harmoniques réel. Comme, par ailleurs les mesures propres à se prémunir contre l'apparition d'un taux d'harmonique devenant gênant pour le réseau d'électricité en général conduisent à des dépenses importantes, on convient de procéder de la manière suivante :

a)- La solution dodécaphasée adoptée représente la solution technique la plus valable tout en respectant l'aspect économique de la question.

b)- Au cas où, malgré le couplage dodécaphasé, les perturbations s'avèraient gênantes pour le réseau 2 solutions peuvent être envisagées :

- renforcement du réseau
- installation aux endroits les plus sensibles des filtres L C raccordés sur les barres 90 Kv d'entrée dans les postes S.N.T.F

On a estimé que l'installation des filtres dans une station de convertisseurs afin d'amortir la pollution harmonique dans les systèmes énergétiques de grande puissance donne une économie de 1 à 1,5 millions de DA. D'où la nécessité économique de réduction du niveau des harmoniques s'impose.

C O N C L U S I O N - G E N E R A L E

Les réseaux sont eux mêmes des sources de tensions harmoniques créées notamment par la non linéarité des circuits magnétiques des transformateurs. La théorie et la pratique indiquent que les taux de tensions harmoniques ainsi créés restent en deçà du pour-cent ou d'une fraction de pour-cent. Le fait nouveau risquant de faire augmenter le taux de distorsion des réseaux jusqu'à la valeur nocive est non pas l'apparition des redresseurs de puissance, qui existent depuis fort longtemps, mais leur généralisation et leur prolifération récentes.

La création des tensions harmoniques par les redresseurs se fait en 2 temps :

- individuellement, un redresseur se comporte approximativement comme une source de courants harmoniques. Ces courants harmoniques, injectés dans le réseau à son point de raccordement, vont y engendrer localement des tensions harmoniques également fonction de l'impédance harmonique du réseau en ce point :

- Globalement, les tensions harmoniques créées en tous les points du réseau par des redresseurs divers, se propagent souvent fort loin de leur point d'origine et s'accumulent au risque de faire apparaître en chaque point des valeurs importantes et nocives, d'où la nécessité de faire des mesures d'harmoniques en chaque point où il y a une source de fréquences harmoniques et d'essayer de les atténuer si le taux de distorsion dépasse le seuil fixé, afin d'éviter et de prévoir toute perturbation pouvant être nocive pour le réseau et les clients mêmes.

Le problème des harmoniques reste cependant difficile à étudier car ce sont toutes les caractéristiques électriques, transitoires ou non, du réseau général et de celui des utilisateurs, qui entrent en ligne de compte.

S O M M A I R E

	Page
Introduction	1
<u>Chapitre I</u> : Origine des harmoniques	4
<u>I</u> - Qualité de la fréquence	6
<u>II</u> - Les harmoniques de fréquences	6
<u>Chapitre II</u> : Etudes des harmoniques	11
<u>I</u> - Généralités	12
<u>I-1</u> - Rappels théoriques	12
<u>I-2</u> - Niveau des harmoniques	14
<u>I-3</u> - Comparaison de quelques sources d'harmoniques	20
<u>II</u> - Influence des montages redresseurs onduleurs sur la qualité du réseau	22
<u>II-1</u> - Forme de courant consommé par les montages redresseurs et onduleurs - Harmoniques	22
<u>II-2</u> - Harmoniques de rang bas provoqués par redresseurs de fortes puissances en régime permanent	30
<u>III</u> - Propagation et amplification des harmoniques impédances harmoniques	35
<u>III-1</u> - Propagation de la pollution harmonique	35
<u>III-2</u> - Amplification de la pollution harmonique	37
<u>III-3</u> - Impédances harmoniques	43
<u>Chapitre III</u> : Conséquences d'ôes aux harmoniques dans les réseaux électriques MT et HT, coté alternatif	52
<u>I</u> - Introduction	53
<u>II</u> - Gênes apportées par les harmoniques	53
<u>III</u> - Pollution harmonique dans un réseau : niveau global admissible et son fractionnement entre différents perturbateurs	58
<u>Chapitre IV</u> : Les moyens de limitation des harmoniques dans les réseaux	63
<u>I</u> - Palliatif aux distorsions harmoniques	64
<u>I-1</u> - Prévention des distorsions harmoniques à leur source	64

I - 2 -	Prévention globale des distorsions harmoniques dans les réseaux	65
I - 3 -	Filtres d'harmoniques	68
II -	Prévention des harmoniques dans un réseau par le calcul sur ordinateur	69
II - 1 -	Etude des risques de résonance	69
II - 2 -	Courant injectés	70
II - 3 -	Exploitation du programme	70
III -	Mesure des harmoniques dans les réseaux	72
III - 1 -	Régimes stables	72
III - 2 -	Régimes instables	72
Chapitre V : Application		75
Etudes et moyens de limitation des perturbations, sur le réseau 90 Kv, dûes aux harmoniques des redresseurs de puissance de la ligne minière ANNABA - TEBESSA.		
I -	Introduction	76
II -	Caractéristiques de la ligne 90 Kv et des groupes redresseurs	76
III -	Calcul des taux d'harmoniques	83
-	Calcul du taux d'harmonique dans chaque groupe redresseur	83
-	Calcul du taux d'harmonique traversant la batterie de condensateurs d'EL HADJAR	86
-	Propagation des systèmes d'harmoniques directes et inverses	87
-	Exemple de calcul simplifié d'un filtre	89
-	Conclusion	94
Conclusion Générale		96

B I B L I O G R A P H I E

- R G E : Revue générale de l'électricité : Mars 1976
- R G E : " " : Avril 1976
- R G E : " " : Juin 1953

- CIGRE : Conférence Internationale des grands réseaux électriques - Tome III

- S.F.E : Bulletin de la Société Française des électriciens

- E . E : Electrical engineering

- Brown Boveri

- R. Pelissier : Tome 1 les réseaux d'énergie électrique

- I. Kagonov

- MOUNIC : Tome 1 redressement

- ~~A~~ Manduit : installations électriques

- Association technique de la Sidérurgie Française : quelques aspects de la pollution des réseaux électriques par les équipements à thyristors. (par M. MEYNAUD et LENOINE)

=o=o=o=o=o=o=o=o=