

RAPPORT PRELIMINAIRE  
SUR LE FILTRAGE DES HARMONIQUES  
ET LA COMPENSATION DU FACTEUR DE PUISSANCE  
DU RESEAU 18 kV DU CERN

O. Bayard

Sommaire

- I. Récapitulation des données numériques
- II. Compensation du facteur de puissance
- III. Calcul des harmoniques du réseau
- IV. Etude préliminaire du filtre
- V. Filtre proposé et conclusion.

Nota : Ce rapport n'est qu'un avant-projet, destiné  
à servir de guide pour les discussions ultérieures.

I. RECAPITULATION DES DONNEES NUMERIQUES

Tableau 2

Récapitulation des puissances  
installées en redresseurs

(seuls les redresseurs non compensés sont pris en considération)

	Total unitaire	Total général
Actuellement : Zone Sud, Est, Neutrino, SC	24 MW	24 MW
Après mise en service des ISR et du SI, et du Hall Ouest	41 MW	65 MW
Après installations expérimentales des ISR et l'extension du Hall Ouest	18 MW	83 MW

Tableau 3

Décomposition des puissances  
installées en fonction du type de redresseurs

Nbre de phases	Décalage	Puissance installée			totale
		actuelle	1ère extens.	2ème extens.	
6	0°	3250 kW	7600 kW		10,8 MW
	30°	934 kW	2100 kW		3 MW
	Σ	4180 kW	9700 kW		13,8 MW
12	0°	2600 kW	2500 kW		5,1 MW
	15°	17150 kW	15000 kW		32,1 MW
	± 7°5		14000 kW		14,0 MW
	Σ	19750 kW	31500 kW	18000 kW	69,2 MW

Le rapport de la puissance installée des redresseurs hexaphasés à celle des redresseurs dodécaphasés va passer du chiffre actuel de 21 % à celui de 31 %, ce qui est préjudiciable au filtrage des harmoniques.

Tableau 4

Tableau des puissances installées

en moteur synchrone

Zone	M o t e u r s		Puissance totale installée	cos φ de fonctionnement
	nombre	puissance unitaire max.		
Est	22	380 kW	8360 kW	0,8 - 0,9 capa.
	2	3200 kW	6400 kW	1
Sud	26	380 kW	9600 kW	0,8 - 0,9 capa.
	2	3200 kW	6400 kW	1
PH	1	5000 kW	5000 kW	1

## II. COMPENSATION DU FACTEUR DE PUISSANCE

### II. A. Calcul des coefficients d'utilisation

On peut calculer la puissance active et la puissance réactive maximum absorbées par la totalité de l'installation, en faisant les hypothèses approximatives suivantes :

A puissance maximum, le facteur de puissance d'une installation de redresseur est de l'ordre de 0,94 ( $\varphi = 20^\circ$ ). La puissance apparente maximum utilisable est donc

$$P \text{ (MVA)} = \frac{Pa \text{ (MW)}}{0,94}$$

	<u>Total MVA</u>
soit : 25,6 MVA sur le site actuel	25,6
soit : 43,7 MVA sur le site des ISR en première étape	69,3
soit : 64,0 MVA sur le site des ISR en deuxième étape	88,5

Tableau 5 des puissances apparentes utilisables

D'autre part, si l'on admet une utilisation simultanée de 84 % de l'équipement de redressement, et que celui-ci fournisse 84 % du courant maximum, on arrive à un coefficient d'utilisation de 0,7.

On peut admettre, d'autre part, qu'il existe entre les différents redresseurs une répartition continue du facteur de puissance avec une densité constante de puissance apparente. Si l'on prend comme limite supérieure du facteur de puissance  $\cos \varphi_0$

- $\cos \varphi_0 = 0,94$  ( $\varphi_0 = 20^\circ$ ) correspondant à un retard à l'allumage  $\alpha = 0$  (pleine tension redressée),

et d'autre part comme limite inférieure

- $\cos \varphi_1 = 0,423$  ( $\varphi_1 = 65^\circ$ ) correspondant à un retard à l'allumage  $\alpha = 60^\circ$  (tension redressée = 50 % de la tension maximum),

on trouve pour les puissances maxima absorbées :

$$\text{Puissance active } P_a = \frac{0,7 P \text{ (MVA)}}{\varphi_1 - \varphi_0} \int_{\varphi_0}^{\varphi_1} \cos \varphi \cdot d\varphi$$

$$\text{Puissance réactive } P_r = \frac{0,7 P \text{ (MVA)}}{\varphi_1 - \varphi_0} \int_{\varphi_0}^{\varphi_1} \sin \varphi \cdot d\varphi$$

qui, après résolution, donnent :

$$P_a = 0,89 \cdot P \cdot 0,564 = 0,50 \cdot P$$

$$P_r = 0,89 \cdot P \cdot 0,517 = 0,46 \cdot P$$

ce qui correspond à un récepteur unique de puissance apparente moyenne  $P_m$

$$P_m = P \sqrt{(0,5)^2 + (0,46)^2} = 0,68 P$$

et un facteur de puissance moyen

$$\cos \varphi_m = \frac{P_a}{P_m} = \frac{0,5}{0,68} = 0,73$$

$$\varphi_m = 43^\circ$$

$$\sin \varphi_m = \frac{P_r}{P_m} = \frac{0,46}{0,68} = 0,68$$

$$P_m = 0,68 P_{\text{installée}} \text{ en MVA}$$

II. B. Calcul de la puissance réactive nécessaire à la compensation du site des ISR en 2ème étape

D'après tableau 5 :  $P = 64 \text{ MVA}$ ,

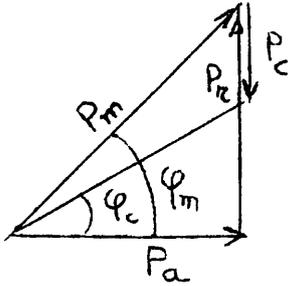
d'où pour la puissance apparente utilisée  $P_m$  sous  $\cos \varphi_m = 0,73$

$$P_m = 0,68 P = 43,5 \text{ MVA}$$

$$P_a = 0,73 P_m = 31,7 \text{ MW}$$

$$P_r = 0,68 P_m = 29,6 \text{ MVAR}$$

Si pour ces conditions d'utilisation on désire un facteur de puissance compensé  $\cos \varphi_c = 0,866$ , on doit installer une batterie de condensateur de puissance  $P_c$  telle que :

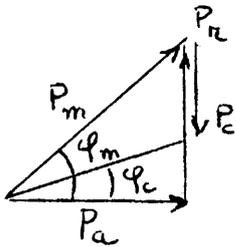


$$P_c = P_r - P_a \cdot \operatorname{tg} \varphi_c = P_r - 0,577 P_a$$

$$P_c = 29,6 - 18,1 = 11,5 \text{ MVAR}$$

Deuxième extension ISR :  
 $P_c$  condensateur  $\cong 11,5 \text{ MVAR}$   
 $\cos \varphi_c = 0,866$

II. C. Facteur de puissance du site des ISR obtenu en lère étape avec la même batterie de 11,5 MVAR



$$P_m = 0,68 P = 0,68 \cdot 43,7 = 29,7 \text{ MVA}$$

$$P_a = 0,73 P_m = 21,7 \text{ MW}$$

$$P_r = 0,68 P_m = 20,2 \text{ MVAR}$$

$$P_c = 11,5 \text{ MVAR}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_c = \frac{P_r - P_c}{P_a} = \frac{8,7}{21,7} = 0,4$$

$$\cos \varphi_c = 0,927 \quad \text{ce qui est excellent.}$$

II. D. Compensation du site suisse du CERN à l'aide des machines synchrones qui y sont installées

Avec les mêmes hypothèses que précédemment.

D'après tableau 5 :  $P_{\text{installée redresseur}} = 25,6 \text{ MVA}$

d'où  $P_m = 0,68 P = 17,4 \text{ MVA}$

$P_a \text{ redresseur} = 0,73 P_m = 12,7 \text{ MW}$

$P_r \text{ redresseur} = 0,68 P_m = 11,8 \text{ MVAR}$

D'autre part, la puissance consommée par les moteurs synchrones sous  $\cos \varphi = 1$ , et un coefficient d'utilisation de 0,7 est, d'après le tableau 4 :

$P_a \text{ moteur} = 35,7 \cdot 0,7 = 25 \text{ MW}$

d'où pour  $\text{tg } \varphi_c$  :

$$\text{tg } \varphi_c = \frac{11,8}{25 + 12,7} = 0,315$$

$\cos \varphi_c \text{ site suisse} = 0,95$

ce qui est très largement suffisant, même si l'on tient compte du reste de l'équipement électrique.

### III. CALCUL DES HARMONIQUES DU COURANT PRIMAIRE

#### III. A. Harmoniques d'un redresseur à p phases

On sait qu'un redresseur à p phases ne produit dans le réseau primaire que des harmoniques de courant de rang n

$$n = kp + \epsilon \quad \text{avec} \quad \epsilon = \begin{matrix} + \\ - \end{matrix} 1$$

et  $k = 1, 2, 3, \dots$

Si  $V \cos x$  est la tension étoile primaire, l'expression de l'harmonique de rang n est

$$i_n = I_{\text{fondamental}} \frac{\epsilon (-1)^k}{n} ; \cos (nx - n\varphi - kp\theta)$$

où  $\varphi$  est l'angle de retard à l'allumage et où  $\theta$  est l'angle de décalage entre la sinusoïde génératrice de la tension continue et la tension phase neutre primaire ( $\theta$  est donné dans le tableau 1).  $\theta$  ne dépend que du mode de redressement, et que du couplage du transformateur. Il apparaît dans le déphasage des courants d'harmonique par rapport au terme fondamental du courant primaire, qui est lui décalé de l'angle de retard à l'allumage  $\varphi$  par rapport à la tension primaire  $V \cos x$ .

A  $\varphi$  et p constant, et pour des valeurs de  $\theta$  différents de  $\frac{\pi}{p}$ , deux harmoniques de même rang k impair se soustraient arithmétiquement (les deux premières harmoniques). Malheureusement, les redresseurs étant contrôlés, il suffit d'un écart de retard à l'allumage  $\Delta\varphi$  du même ordre que  $\theta$  pour annuler cet avantage.

$$\left( \text{pour } \Delta\varphi = \frac{n + \epsilon}{n} \theta \text{ exactement} \right)$$

Aussi, dans l'étude suivante des harmoniques, nous avons, pour simplifier, supposé  $\theta$  constant pour tous les redresseurs.

### III. B. Sommation des courants d'harmoniques

Dans les mêmes hypothèses que celles qui ont servi pour le calcul du facteur de puissance, c'est-à-dire :

- Coefficient d'utilisation = 0,7
- Répartition continue du déphasage  $\varphi$  avec une densité constante de puissance apparente,  $\varphi$  variant de  $\varphi_0$  à  $\varphi_1$ .

on peut écrire pour le terme de rang  $n$  :

$$i_n = 0,7 \frac{P}{\sqrt{3} U} \cdot \frac{d\varphi}{\varphi_1 - \varphi_0} \frac{\varepsilon (-1)^k}{n} \cdot \cos (nx - n\varphi - kp\theta)$$

où  $P$  est la puissance totale installée.

En développant en sinus et cosinus, on trouve

$$i_n = 0,7 \frac{P}{\sqrt{3} U} \frac{d\varphi}{\varphi_1 - \varphi_0} \cdot \frac{\varepsilon \cdot (-1)^k}{n} [\cos(nx - kp\theta) \cos n\varphi + \sin(nx - kp\theta) \sin n\varphi]$$

L'amplitude totale de la somme des harmoniques de courant compris entre  $\varphi_0$  et  $\varphi_1$  est obtenue en faisant la somme, d'une part de l'amplitude  $A_n$  des termes en cos., d'autre part de l'amplitude  $B_n$  des termes en sin.

$$A_n = 0,7 \frac{P}{\sqrt{3} U} \cdot \frac{1}{n (\varphi_1 - \varphi_0)} \int_{\varphi_0}^{\varphi_1} \cos n\varphi \cdot d\varphi$$

$$B_n = 0,7 \frac{P}{\sqrt{3} U} \cdot \frac{1}{n (\varphi_1 - \varphi_0)} \int_{\varphi_0}^{\varphi_1} \sin n\varphi \cdot d\varphi$$

Après intégration, on trouve :

$$A_n = 0,7 \frac{P}{\sqrt{3} U} \frac{\sin n \varphi_1 - \sin n \varphi_0}{n^2 (\varphi_1 - \varphi_0)}$$

$$B_n = 0,7 \frac{P}{\sqrt{3} U} \frac{\cos n \varphi_0 - \cos n \varphi_1}{n^2 (\varphi_1 - \varphi_0)}$$

L'amplitude  $I_n$  résultante (valeur efficace) de l'harmonique de courant de rang  $n$  est alors

$$I_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$$

$$I_n = 0,7 \frac{P}{\sqrt{3} U} \cdot \frac{\sqrt{2 [1 - \cos n (\varphi_1 - \varphi_0)]}}{n^2 (\varphi_1 - \varphi_0)}$$

$I_n$  présente un maximum chaque fois que :

$$\varphi_1 - \varphi_0 = \frac{2h + 1}{n} \pi \quad \text{avec } h = 0, 1, 2, 3 \dots$$

Ce maximum est :

$$I_{n \text{ max}} = 0,7 \frac{P}{\sqrt{3} U} \frac{2}{(2h + 1) n \pi}$$

Pour le calcul du facteur de puissance, nous avons choisi  $\varphi_0 = 20^\circ$  et  $\varphi_1 = 65^\circ$ . Ces valeurs sont arbitraires, et pour calculer l'amplitude possible maximum des harmoniques, on peut toujours choisir  $\varphi_1$  voisin de  $65^\circ$ , tel que

$$\varphi_1 - \varphi_0 = \frac{2h + 1}{n} \pi$$

On obtient alors le tableau suivant :

n	h	$\varphi_1 - \varphi_0$	$\varphi_0$	$\varphi_1$	$2/(2h + 1) \cdot n \cdot \pi$
5	0	$36^\circ$	$20^\circ$	$56^\circ$	0,127
7	0	$26^\circ$	$20^\circ$	$46^\circ$	0,091
11	1	$49^\circ$	$20^\circ$	$69^\circ$	0,020
13	1	$41,5^\circ$	$20^\circ$	$61,5^\circ$	0,017
17	2	$53^\circ$	$20^\circ$	$73^\circ$	0,008
19	2	$47^\circ$	$20^\circ$	$67^\circ$	0,007
23	2	$39^\circ$	$20^\circ$	$59^\circ$	0,006
25	2	$36^\circ$	$20^\circ$	$56^\circ$	0,005

Tableau 6

À partir des valeurs du coefficient  $2/(2h + 1) n \pi$  et des puissances installées en redresseurs à 6 phases et à 12 phases du tableau 3, on peut calculer le courant  $I_n$  des différentes harmoniques.

n	P. MW	fondamental $I_o = \frac{0,7 \cdot P}{\sqrt{3} \cdot U}$	$\frac{2}{(2h + 1) n \pi}$	$I_n$ efficace	$\frac{\Delta U_n}{U}$ ‰
5	13,8	310 A	0,127	40 A	1,04 ‰
7	13,8	310 A	0,091	28 A	1,02 ‰
11	83	1860 A	0,020	37 A	2,12 ‰
13	83	1860 A	0,017	32 A	2,16 ‰
17	13,8	310 A	0,008	2,5 A	0,22 ‰
19	13,8	310 A	0,007	2,2 A	0,22 ‰
23	83	1860 A	0,006	11 A	1,3 ‰
25	83	1860 A	0,005	9,3 A	1,2 ‰

Tableau 7

Dans le tableau 7, la valeur  $\Delta U_n/U$  représente la tension relative d'harmonique n sur les barres 18 kV due à la chute de tension produite par la circulation du courant d'harmonique n dans l'impédance de connexion au réseau 130 kV.

Si  $P_{cc}$  est la puissance de court-circuit sur les barres 18 kV

$$\frac{\Delta U_n}{U} \text{ o/o} = 100 \sqrt{3} \frac{n U}{P_{cc}} I_n \text{ avec } U = 18 \text{ kV} \\ P_{cc} = 600 \text{ MVA}$$

$$\frac{\Delta U_n}{U} \text{ o/o} = 0,52 \cdot 10^{-2} \cdot n \cdot I_n \text{ (A)}$$

### III. C. Dimensionnement des circuits de filtrage

Les hypothèses, qui ont permis de trouver les valeurs de  $I_n$  données dans le tableau 7, peuvent sembler trop optimistes. On peut alors pour plus de sécurité faire la constatation suivante :

Les redresseurs à 12 phases comportent de grosses unités. On peut faire l'hypothèse que l'alimentation 6 MW des chambres et une alimentation 7 MW des ISR marchent en pleine puissance et en phase, le décalage de  $\theta = 70^\circ$  existant entre elles étant compensé par un retard à l'allumage équivalent. Les courants d'harmonique dûs à ces deux grosses sources seraient alors de :

$$I_n' = \frac{13 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 18 \cdot 10^3} \cdot \frac{1}{n} = \frac{415}{n} \text{ A}$$

Les courants d'harmoniques dûs à l'ensemble des charges restantes seraient alors :

$$I_n'' = (1860 - 415) \frac{2}{(2h + 1) n \pi} = \frac{2 \cdot 1445}{(2h + 1) n \pi} \text{ A}$$

On peut alors faire l'hypothèse la plus défavorable pour le dimensionnement des circuits, où  $I_n'$  et  $I_n''$  seraient en phase, et où le courant d'harmonique résultant  $I_n$  serait la somme arithmétique de  $I_n'$  et  $I_n''$ .

n	5 *	7 *	11	13	17 *	19 *	23	25
$I_n'$ (A)	6	4,4	38	32	1,8	1,6	18	16,5
$I_n''$ (A)	36	25,1	29	25	2,2	2,0	8,5	7,2
$I_n = I_n' + I_n''$ (A) Courant de dimensionnement	42	29,5	67	57	4,0	3,6	26,5	23,7
$\Delta U_n/U$ ‰	1,09%	1,07%	3,84%	3,84%	0,35%	0,35%	3,14%	3,05%

Tableau 8

( \* : En ce qui concerne les redresseurs à 6 phases, on a aussi corrigé les valeurs de  $I_n$  données dans le tableau 7, en supposant 10 ‰ de la charge concentrée en un seul point).

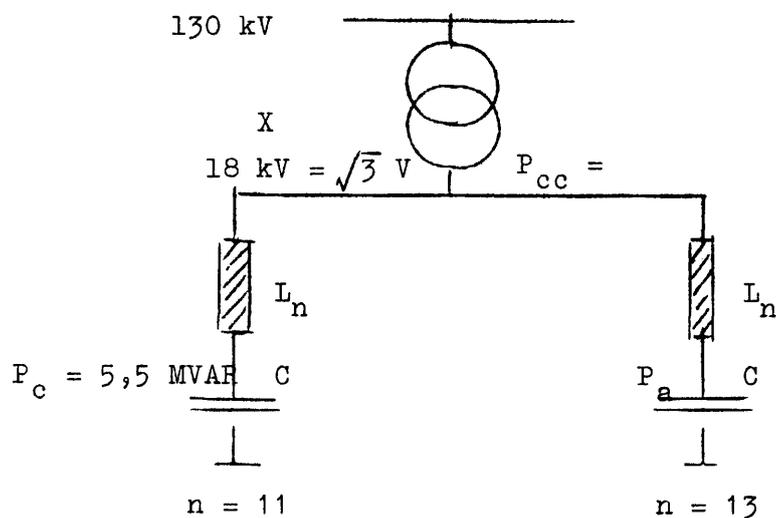
Le tableau 8 montre que la concentration de la charge tend à amplifier les harmoniques de rang élevé.

#### IV. ETUDE PRELIMINAIRE DU FILTRE

##### IV. A. Premier avant-projet

Les valeurs de la distorsion  $\Delta U_n/U$  données dans le tableau 8 montrent qu'il faut filtrer en priorité les harmoniques de rang 11, 13, 23, 25. On peut pour cela adopter des circuits résonants pour les harmoniques de rang 11 et 13 qui seraient ainsi pratiquement éliminées. En adoptant pour les circuits résonants des batteries de condensateur de forte puissance, donc des bobines d'induction de faible valeur, on peut, avec les mêmes circuits, diminuer fortement la distorsion due aux harmoniques de rang 23 et 25.

On dispose pour cela de la batterie de compensation de 11 MVAR approximativement, que l'on peut partager en deux groupes de  $P_c = 5,5$  MVAR, comme le montre le schéma ci-après :



Le dimensionnement du circuit est alors le suivant :

$$C \omega = \frac{P_c}{U^2}$$

$$L_n \omega = \frac{1}{n^2 C \omega}$$

Donc pour le terme fondamental, la chute de tension dans la self est  $\frac{V}{n^2}$ , soit 0,83 % pour la résonance calée sur la 11ème harmonique, et 0,59 % pour celle calée sur la 13ème. La puissance réactive fournie par les condensateurs pour magnétiser les selfs est respectivement :

$$0,83 \% \cdot P_c = 46 \text{ kVAR pour } n = 11$$

$$0,59 \% \cdot P_c = 32,5 \text{ kVAR pour } n = 13$$

valeurs qui sont négligeables.

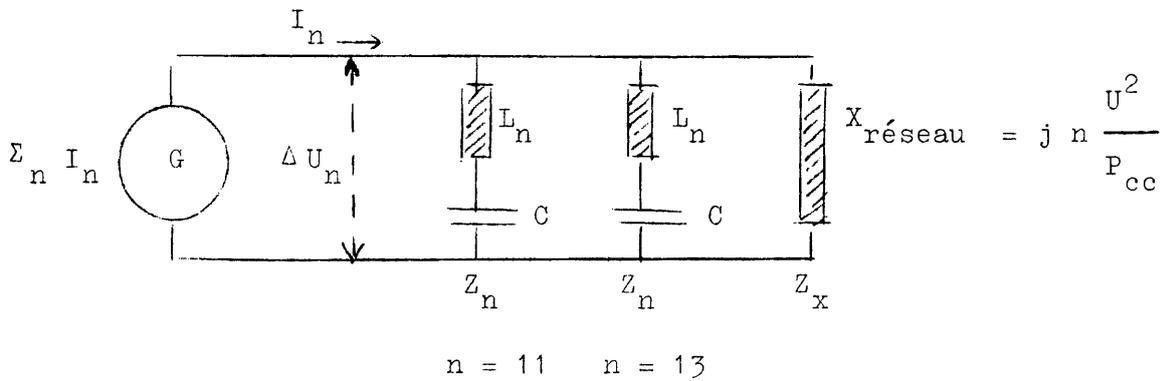
On trouve alors les caractéristiques des circuits :

Résonance pour n =	11	13
Puissance réactive condensateur	5,5 MVAR	5,5 MVAR
Capacité	54 $\mu$ F	54 $\mu$ F
Tension entre phase condensateur	18 kV	18 kV
Courant fondamental ou nominal	172 A	172 A
Courant d'harmonique	67 A	57 A
Courant efficace total	182 A	181 A
Inductivité $L_n$	1,53 mH	1,09 mH
Tension aux bornes de la self :		
- terme fondamental	90 V	61 V
- terme de rang n	386 V	262 V

Comme d'après les normes le courant efficace, harmoniques comprises, d'un condensateur peut atteindre 1,4 fois le courant nominal,

et la puissance, harmoniques comprises, peut atteindre 1,35 fois la puissance nominale, on peut adopter pour ces circuits des condensateurs normaux pour 18 kV.

IV. B. Calcul de l'atténuation du filtre



Le schéma équivalent du point de vue circulation des harmoniques est donné ci-dessus :

$$Z_{11} = j \frac{L_{11} C n^2 \omega^2 - 1}{C n \omega} = j \frac{\left(\frac{n}{11}\right)^2 - 1}{C n \omega} = j \frac{U^2}{P_c} \frac{\left(\frac{n}{11}\right)^2 - 1}{n}$$

$$Z_{13} = j \frac{L_{13} C n^2 \omega^2 - 1}{C n \omega} = j \frac{\left(\frac{n}{13}\right)^2 - 1}{C n \omega} = j \frac{U^2}{P_c} \frac{\left(\frac{n}{13}\right)^2 - 1}{n}$$

$$Z_x = j \frac{U^2}{P_{cc}} n$$

Le coefficient de distorsion est :

$$\frac{\Delta U_n}{U} \text{ o/o} = 100 \frac{\sqrt{3} Z I_n}{U}$$

$$\text{avec } \frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_{11}} + \frac{1}{Z_{13}} + \frac{1}{Z_x}$$

et numériquement :

$$Z_{11} = j \cdot 60 \frac{\left(\frac{n}{11}\right)^2 - 1}{n}$$

$$Z_{13} = j \cdot 60 \frac{\left(\frac{n}{13}\right)^2 - 1}{n}$$

$$Z_x = j \cdot 0,54 n$$

Les résultats sont donnés dans le tableau 9 ci-après :

n =	5	7	11 (1+dn)	13 (1+dn)	23	25
Z <sub>11</sub>	- j 9,6	- j 5,1	j 60 · $\frac{2}{11} \frac{dn}{11}$	j 1,85	j 8,7	j 10
Z <sub>13</sub>	- j 10,3	- j 6,1	- j 1,68	j 60 · $\frac{2}{13} \frac{dn}{13}$	j 5,6	j 6,5
Z <sub>x</sub>	+ j 2,7	+ j 3,8	j 6	j 7	j 12,5	j 13,5
Z	- j 6,1	- j 10	j 0,73	j 0,35	j 2,7	j 3
$\frac{\Delta U_n}{U}$ filtré	2,45 %	2,9 %	0,47 %	0,20 %	0,70 %	0,70 %
$\frac{\Delta U_n}{U}$ non filtré	1,09 %	1,07 %	3,84 %	3,84 %	3,14 %	3,14 %

Tableau 9

(Dans ce tableau, on a admis une erreur de calage des résonances de  $\Delta n = 5 \text{ }^{\circ}/\text{o}$ , ce qui est une estimation très pessimiste).

Le tableau 9 montre que les tensions d'harmonique de rang 13 et supérieur sont très correctement filtrées. Par contre, les tensions d'harmonique de rang 5 et 7 sont amplifiées. Il peut même apparaître une résonance parallèle (amplification infinie) avec la réactance variable du réseau. Pour l'éviter, il faut installer une résonance série pour les 5ème et 7ème harmoniques, avec la capacité la plus faible possible.

Cette capacité est déterminée par l'échauffement maximum admissible du condensateur dont, d'après les normes, le courant efficace qui le traverse ne doit pas dépasser 1,4 fois son courant nominal. On a alors l'équation

$$I_n^2 + (1,04)^2 I_{\text{nom}}^2 = (1,4)^2 I_{\text{nom}}^2$$

$$\text{D'où : } I_{\text{nom}} > \frac{I_n}{0,94} = 45 \text{ A pour l'harmonique 5.}$$

Et pour la puissance de la batterie  $P_{\text{cn}}$

$$P_{\text{cn}} > 1,4 \text{ MVAR}$$

## V. FILTRE PROPOSE ET CONCLUSION

Pour tenir compte de l'introduction des résonances pour l'harmonique 5 et l'harmonique 7, avec chacune une batterie de 1,5 MVAR, on a légèrement modifié les caractéristiques des résonances pour les harmoniques 11 et 13, de façon à ne pas augmenter la puissance totale installée des condensateurs.

Les caractéristiques de ce filtre sont résumées dans le tableau 10 ci-dessous :

Résonance pour n	5	7	11	13
$P_{cn}$ en MVAR	1,5	1,5	4,5	4,5
$C_n$ en $\mu F$	14,7	14,7	44	44
$L_n$ en mH	27,2	13,9	1,87	1,33
$c^{rt}$ en ligne : 50 Hz (A)	50	49	146	145
" " " : n · 50 Hz (A)	42	30	67	57
" efficace en ligne (A)	65,5	57,5	165	162
$I_{eff.}/I_{nominal} C_n$	1,37	1,20	1,14	1,13
V aux bornes $L_n$ : 50 Hz (V)	425	214	86	61
" " " n · 50 Hz (V)	1800	920	435	310
Résistance max. circuit ( $\Omega$ )	0,5	0,5	0,15	0,15

Tableau 10

La distorsion de la tension après filtrage, calculée comme au paragraphe IV. B, est donnée dans le tableau 11 ci-après.

Rang de l'harmonique	5	7	11	13	23	25
Calage des résonances n =	5 x 1,005	7	11	13		
$\Delta U_n / U$ % max, dans bande de $\pm 2,5$ %	1,00	0,49	0,25	0,20	0,99	0,89
bande de $\pm 1$ %	0,29	0,17	0,12	0,09		

Tableau 11

En calant soigneusement les résonances et en admettant une excursion de fréquence du réseau ou de la fréquence de résonance de  $\pm 1$  %, on voit que le filtre répond parfaitement aux problèmes posés. Une excursion de fréquence très aléatoire de  $\pm 2,5$  % n'apporterait aucune amplification des harmoniques. Pour les fréquences de rang 23 et au-dessus l'atténuation de la distorsion est de l'ordre de 3. On montre que pour les fréquences de rang élevé l'atténuation de la distorsion tend vers

$$\frac{\Delta U_n \text{ non filtré}}{\Delta U_n \text{ filtré}} \rightarrow 2,8 \frac{600}{P_{cc} \text{ MVA}}$$

Le filtre est représenté sur le schéma ci-inclus. Les bobines sont montées côté point neutre, de façon à éviter de les dimensionner pour le courant de court-circuit. L'enclenchement de la batterie a été prévu en deux étapes. La première étape consiste à insérer une bobine de 12 mH en série, de façon à réduire l'appel de courant à 2,3 fois l'intensité nominale de la batterie. Puis après amortissement des transitoires (constante de temps de l'ordre de 20 ms), on court-circuite la self. Lors des

deux manoeuvres successives, la distorsion de la tension du réseau 18 kV, due à la circulation des courants transitoires de charge, ne dépasse pas 10 % et ne dure que quelques périodes. Le problème de l'enclenchement n'a été étudié ici que de façon très sommaire, et devra être traité plus à fond ultérieurement.

La batterie d'une puissance totale de 12 MVAR sous 18 kV, fournit au réseau une puissance réactive de 11,85 MVAR, une fois déduite la puissance nécessaire à la magnétisation des bobines. Le facteur de puissance serait alors sur le site français de 0,927 en 1ère étape et de 0,866 en 2ème étape.

Nous avons vu que le  $\cos \varphi$  du site suisse est compensé par les machines synchrones qui y sont installées (de l'ordre de  $\cos \varphi = 0,95$ ). La place du filtre devant être au centre de gravité des consommateurs d'énergie réactive, qui sont en même temps les plus gros producteurs d'harmoniques, il faudrait donc le connecter sur les barres 18 kV de la sous-station alimentant le site français.

Il y a lieu de noter que le filtre peut rester constamment connecté, car l'élévation de tension due à la batterie débitant sur le réseau 18 kV à vide est de l'ordre de

$$\frac{\Delta U}{U} \% = 100 \frac{\text{Puissance batterie}}{\text{Puissance court-circuit réseau}} = \frac{1200}{600} = 2 \%$$

Il faut aussi remarquer que le filtrage de l'harmonique 5 est le plus déficient et le plus coûteux à améliorer. Il faudrait donc, dans la mesure du possible, prévoir dans les installations des redresseurs à 12 phases en lieu et place des redresseurs à 6 phases.

Un plan d'installation joint montre que la surface occupée par le filtre est de l'ordre de  $100 \text{ m}^2$ , sous une hauteur de plafond de 2 m.

Distribution : (20 exemplaires)

MM. F. Bonaudi/ISR  
M. Georgijević/MPS  
B. Godenzi/MPS  
H. Laporte/SB  
R. Mosig/MPS  
S. van der Meer/ISR  
J. Rouel/SB  
P.H. Standley/MPS