

# AUGMENTATION DE FREQUENCE DE L'ACCELERATEUR PHIL

## Dimensionnement d'éléments magnétiques du modulateur

JEAN NOEL CAYLA<sup>1</sup> & JEAN-LUC BABIGEON<sup>2</sup> & JOEL COLLIN<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Laboratoire de l'Accélérateur linéaire (CNRS – LAL/DACC), Centre scientifique d'Orsay - 91898 Orsay - France

### Résumé

Il est question d'augmenter la fréquence de fonctionnement de l'accélérateur PHIL au Lal; elle pourrait passer de 5Hz actuellement à 10Hz dans un premier temps, puis 25Hz en projet.<sup>a</sup> Indépendamment des éléments en aval, RF de puissance, canon, etc..., pour obtenir ces performances il faut agir sur la source de puissance, c'est-à-dire le modulateur. Nous donnons ici les bases de ce dimensionnement pour les installations classiques, et décrivons les paramètres des éléments magnétiques de puissance. Augmenter la fréquence d'un modulateur à Ligne A Retard (LAR), implique une hausse de la puissance moyenne, et cela dépend des paramètres principaux :

1. l'alimentation de charge haute tension,
2. l'inductance résonante de charge, dite aussi self doubleuse,
3. les performances en puissance des commutateurs, thyatron ou semi-conducteurs, klystrons,
4. pour des fréquences supérieures à 25Hz, la nécessité d'une régulation en température plus rigoureuse de la cuve THT, etc...

Les éléments principaux qui sont l'objet de cet exposé sont donc l'alimentation de charge et l'inductance résonante de charge.<sup>b</sup> Nous décrivons une action de R&D portant sur un prototype d'inductance résonante, son dimensionnement suivant la fréquence, et nous introduisons des outils de calcul des caractéristiques de ces éléments magnétiques. Ceux-ci sont extrapolables à la conception au premier ordre d'autres composants magnétiques, par exemple les dipôles que l'on trouve dans l'optique des faisceaux. En effet, leur structure intime comporte de nombreux points communs, section fer, section cuivre, entrefer, fenêtre, etc... Nous testons actuellement un algorithme qui pourrait être amené dans ce dernier sens.

<sup>a</sup> Une extrapolation - plus cretuse est aussi envisagée pour un passage à 50Hz  
<sup>b</sup> Dans notre cas, les commutateurs ont des spécifications compatibles au moins jusqu'à 50Hz, même 100Hz théoriquement, et un fonctionnement pour l'instant prévu autour de 25Hz n'exigerait pas de régulation supplémentaire de température

### I Puissances de source-Inductance de charge

#### 1. Description du système

Le schéma d'un modulateur classique à LAR, est donné par la fig. 1.

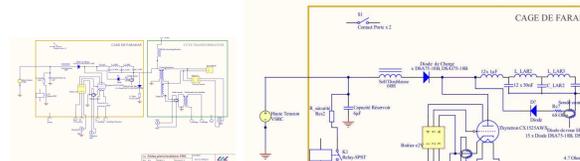


FIGURE 1 – modulateur standard, détail étage de charge

La partie qui nous intéresse est donnée par la figure droite.<sup>a</sup>

La source haute tension charge à l'instant  $t_0$  le circuit formé par la self et les condensateurs de la Ligne à Retard. On peut considérer l'excitation comme une marche de 0 à  $V_{charge}$ . Le circuit résonant délivre alors une arche de sinusoïde dont les caractéristiques sont

$$1. \text{ période : } T = \sqrt{L_{doubleuse} \times C_{LAR}} \quad (1)$$

$$2. \text{ courant crête : } i_{crete} = \frac{V_{charge}}{L_{doubleuse}\omega} = C_{LAR}V_{charge}\omega \quad (2)$$

Où  $\omega$  est la pulsation correspondant à la fréquence recherchée. Il existe donc pour chaque fréquence, une valeur maximale d'inductance telle que la charge soit effectuée complètement avant la décharge suivante.

En réalité, les condensateurs de la LAR ont une valeur assez faible (700nF) par rapport au domaine d'emploi de cette technique, par conséquent les valeurs d'inductance sont extrêmement élevées.<sup>b</sup>

#### 2. Evaluation de la puissance et de l'inductance

La puissance crête nécessaire de la source est calculée à partir du courant crête et de la tension de charge :

$$P_{cretenominale} = V_{charge} I_{cretenominale} \quad (3)$$

La puissance crête est nécessaire, et non la puissance moyenne.<sup>c</sup>

frequence Hz	Temps de charge s	Inductance max H	Courant de charge A	Puissance ds l'inductance W	Puissance crête W
1	0.999	144455	0.057	59.15	744
5	0.199	5732	0.287	295.75	3735.1
10	0.099	1418	0.57	591.5	7508
25	0.039	220	1.46	1478.75	19058.9
50	0.019	52	3.009	2957.5	39121
100	0.009	11	6.352	5915	82588.9

TABLE 1 – inductance, courant et puissance tension de charge 13kV, valeurs nominales

On constate que les valeurs de self maximales sont très élevées. A titre indicatif, l'inductance actuelle de PHIL a une valeur de 64 Henry. Naturellement on peut choisir une inductance plus faible, la charge sera plus rapide, mais la self devra être surdimensionnée en puissance.

<sup>a</sup> La self doubleuse est utilisée à l'origine pour reporter la haute tension à l'étage ultime, c'est-à-dire à la Ligne à Retard (LAR), et elle permet aussi l'emploi d'une alimentation plus basse tension  
<sup>b</sup> De plus la période réelle de résonance est en fait le double de la période souhaitée, par conséquent pour une fréquence de 1Hz par exemple, la période résonante est de 2s. Ces quantités sont théoriques. En réalité, la charge doit s'interrompre au moins 1 ms avant la décharge, compte tenu des délais minimaux de l'électronique de puissance, les quantités correspondantes seront désignées par "nominales".  
<sup>c</sup> Néanmoins les chiffres correspondants prennent en compte une vraie source de tension, ce qui n'est pas le cas des sources industrielles, en tout cas pas dans tout le cycle de charge.

### Références

- [1] article . CATALOGUE ISOLECTRA *Fabrication et distribution de composants pour transformateurs.*
- [2] book François LEPLUS *Bobines à noyau de fer en régime variable* Techniques de l'Ingénieur.
- [3] book Jean-Claude BAVAY *Alliages fer-silicium* Techniques de l'Ingénieur.

### III Construction et test d'un prototype

#### 1. Realisation du prototype d'inductance

Au Lal/Dacc, j'ai entrepris la construction d'une inductance de puissance, pour la tester en lieu et place de l'inductance actuelle de PHIL. A partir d'un ancien transformateur, le composant a été entièrement débobiné, et démonté, et toutes les tôles ont été nettoyées une à une. Joel Collin a alors réalisé une carcasse et nous avons bobiné 800 tours de fil de section  $1mm^2$  pour obtenir une valeur d'inductance d'environ 1 Henry. Chaque couche a été bobinée de façon homogène, et isolée de la suivante par un isolant plastique. Les mesures ont confirmées un premier dimensionnement de l'inductance. Les photos, fig. 2 illustrent la réalisation de la doubleuse.



FIGURE 2 – vue de détail de l'inductance, vue d'ensemble dans la cuve à huile

L'inductance a en réalité 2 enroulements que l'on peut mettre en série, par le clinquant en cuivre isolé par la gaine rouge sur la photo, ou bien utiliser l'un d'eux comme enroulement de prémagnétisation. Dans ce dernier cas, la prémagnétisation peut s'effectuer soit en courant continu, soit en impulsions haute tension.

La photo 2 montre le système entier dans la cuve en inox qu'à confectionné Joel Collin. Cette cuve permet le fonctionnement dans l'huile. L'inductance est par ailleurs posée sur un plateau en céron (?) et l'ensemble est suspendu par 4 tiges filetées en inox, pour faciliter la sortie du bain d'huile.

#### 2. Tests sur le modulateur de PHIL

Nous avons inséré le prototype en lieu et place de la doubleuse actuelle de PHIL. Le fonctionnement à 1Hz s'est révélé correct jusqu'à une tension de consigne de charge de 6kV. La tension est doublée dans l'inductance, soit une tenue une tension de 12kV à ses bornes.

A la consigne de 8kV, un arc s'est produit dans les enroulements de l'inductance, les essais ont été arrêtés. L'arc a été observé à travers l'écran plexiglass de la cuve. Il s'est produit sur la partie haute de l'enroulement, et, semble-t-il, du côté d'un bord de l'enroulement. Le fait que l'arc se soit produit sur la partie supérieure, peut s'expliquer par un remplissage insuffisant de l'huile.<sup>a</sup> La valeur d'inductance obtenue-faute de place pour un bobinage plus important-était très faible. Si on se reporte au tableau 1, à 100Hz, une inductance de 14 Henry charge la LAR en 10ms, par extrapolation pour 1 mH, le temps de charge théorique est donc de  $\tau = \frac{10}{\sqrt{14}}ms$  soit 2,7ms. La puissance traversant l'inductance serait bien supérieure à 5kW, si on travaillait à ces fréquences. La puissance moyenne étant alors assez faible, la puissance crête et surtout la tension crête sont responsables de la dégradation. Les courbes 3 et 4 sont les formes d'onde  $V_k/ik$  au secondaire, avant et après l'arcage.

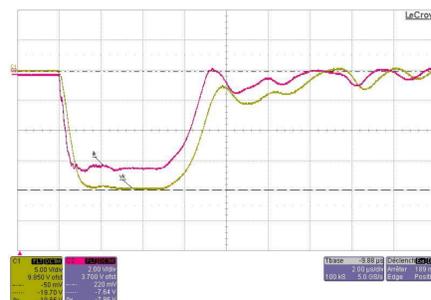


FIGURE 3 –  $V_k$  et  $i_k$  du klystron avant arc

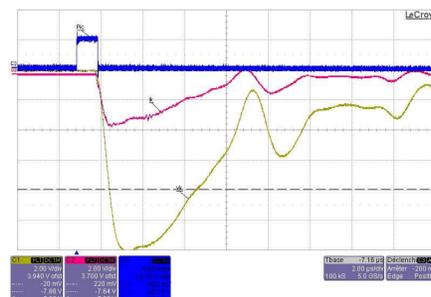


FIGURE 4 – Charge 6kV après arcage

Avant l'arc, la tension secondaire atteint environ 100kV, et la forme d'onde indique que toutes les cellules de la LAR ont été correctement chargées. Après l'arc, seule les premières cellules sont chargées, vraisemblablement par le condensateur ballast de l'alimentation, et la forme d'onde n'est plus satisfaisante. Des mesures sur les enroulements de l'inductance montrent un court-circuit franc.

<sup>a</sup> De plus on nous a confirmé par la suite que le champ électrique est renforcé sur les bords de bobinage, et que ceux-ci doivent être isolés soigneusement sur ce point. Nous avons aussi réalisé qu'il vaut mieux isoler les enroulements par du papier, lequel n'est pas étanche et permet une répartition de l'huile entre les couches.

### V Dimensionnement de la doubleuse

#### 1. Approche industrielle

Nous avons consulté un catalogue de la société Isolectra Martin ([1]), et suivi les instructions du fabricant pour le cas d'une inductance 50Hz/15kV.<sup>a</sup>

1. puissance transmise par l'inductance 3kW à 50Hz/13kV ou 25Hz/15kV → choix du noyau AP51,
2. tableaux catalogue → rendement 95%
3. tableau 2, → 0,83 spires/volt. Pour obtenir une tension de 15kV, il faut donc  $N_{tours} = 1510^3 \times 0,83 \text{spires/volt} = 10500 \text{tours}$ ,
4. Le courant maximal → tableau 1,
5. section nécessaire du fil  $s(mm^2) = \frac{I(A)}{J(A/mm^2)} = 3A/1,7(A/mm^2) = 1,77mm^2$ ; le diamètre du fil est donc de 1,50 mm,
6. épaisseur totale de l'enroulement  $F - 3ec = 7 - (3 \times 0,72) = 5,8cm$  tableau 2,
7. longueur moyenne de spire 34,9 cm,
8. résistance totale de l'enroulement  $R = \frac{\rho l}{s} = 35,2\Omega$ ,  $\rho$ , résistivité du cuivre,
9. pertes cuivre  $P_{cu} = RI^2 = 35\Omega \times (3,0)^2 = 318W$ ,<sup>b</sup>
10. vérification du rendement, 90,3%,<sup>c</sup>
11. pertes fer pour les 2 circuits → 36W.

Important...  $encombremnt_{dufil} < dimensions_{carcasse}$  soit  $e_{P_{bobinage}} < \frac{h_2 - h_1}{2}$  (profondeur de bobinage de la carcasse). nous avons  $5,8cm < 6,5cm$ , → compatible.

modèle	puissance	dimensions	section fer	lcm	spire/volt	densité courant	fenêtre	E	D	ce
AP51	5500	260x300x210	38.76	61.7	0.7	1.7	7	4	5.1	0.4

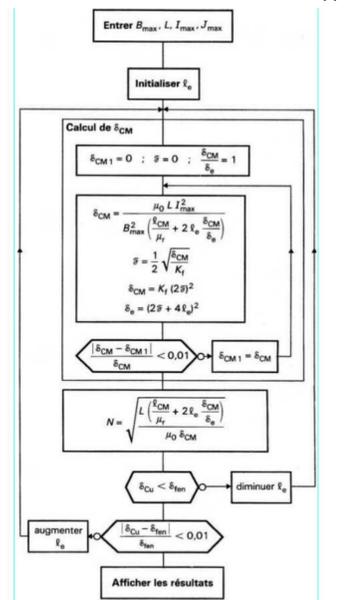
TABLE 2 – caractéristiques du noyau AP51 Isolectra

<sup>a</sup> Les noyaux magnétiques et carcasses sont normalisés en dimensions. Seuls les circuits C (et U/I) permettent des dimensions et des puissances importantes. à noter aussi qu'un circuit U/I permet un plus grand volume magnétique, mais l'inductance est plus faible qu'avec un circuit U/I, à nombre de tours égal. Il y a donc un compromis à trouver  
<sup>b</sup> ce qui est assez élevé; il est probable que le refroidissement par huile calme sera le minimum nécessaire. Il est à noter que l'inductance doubleuse du modulateur 50Hz d'Elyse (Laboratoire de Chimie Physique, Orsay) est en bain d'huile  
<sup>c</sup> inférieur au rendement théorique du fait du grand nombre de spires, le surplus de courant lié à ce rendement plus bas est de 3,32A contre les 3A prévus  
<sup>d</sup> Autre dimensionnement avec le noyau AJ51 : pour une tension de consigne de 13kV → l'encombrement des spires est compatible.

#### 2.Méthode alternative

Nous avons suivi la méthode donnée par la référence [2]

Le calcul passe par un algorithme de la fig. : nous partons d'une fenêtre de circuit nulle ou faible, et nous agrandissons la fenêtre et faisons varier l'entrefer en fonction des paramètres énergétiques, jusqu'à ce que la solution en terme de surface magnétique converge vers une valeur constante. Il est nécessaire d'évaluer la perméabilité du fer [3]



algorithme de dimensionnement d'inductance doubleuse

L'algorithme a été porté sous scilab, les validations sont en cours.

<sup>a</sup> La précédente méthode était déjà réursive, au sens où un premier choix (AJ51 pour 50Hz/15kV) avait conduit à un encombrement de bobinage incompatible. Nous n'avions donné que la solution compatible.

### VI Conclusion

- Dans l'optique de l'augmentation de fréquence de PHIL, Nous avons conçu, réalisé et testé un prototype d'inductance de puissance

- Ces premiers essais valident la faisabilité d'une doubleuse fabriquée au Lal, et nous montrent aussi les points à corriger pour atteindre la charge résonante jusqu'à 50Hz

- Les outils de conception en cours de développement peuvent servir à la définition d'autres éléments magnétiques comme les dipôles