

M. DI GIACOMO
B. DUCOUDRET
W. LE COZ (IPN ORSAY)

Novembre 1999

LE GROUPEUR LINEAIRE DE SPIRAL

CIRCUIT DE GENERATION DE LA DENT-DE-SCIE

INTRODUCTION

La forme d'onde dent-de-scie constitue la tension de groupement idéale, permettant de regrouper 100% d'un faisceau continu. Cependant, les signaux dent-de-scie qu'on réussit à réaliser, présentent des temps de descente non négligeables par rapport à la période et le rendement réaliste d'un groupeur de ce type se situe autour de 80%, cette valeur dépendant fortement des fréquences et de tensions de fonctionnement demandées.

Pour la ligne TBE du projet Spiral, la réalisation d'un système de ce type vient d'être achevée et ce rapport décrit le principe de fonctionnement des circuits de puissance et les caractéristiques obtenues. La table suivante résume les spécifications du cahier des charges.

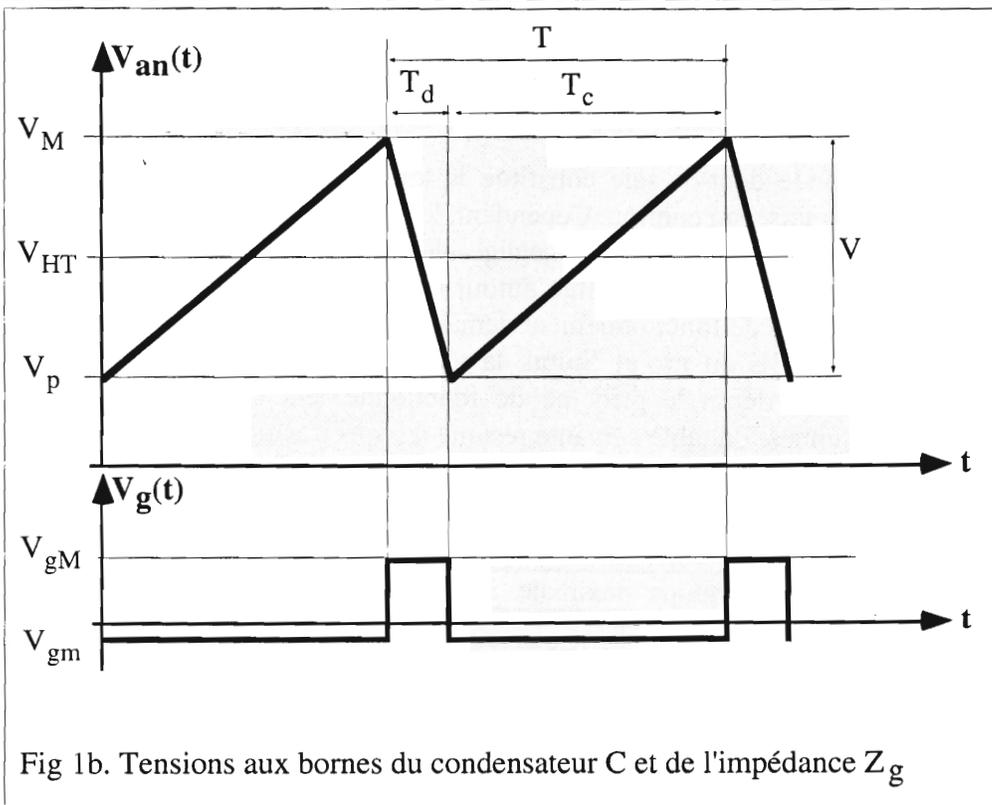
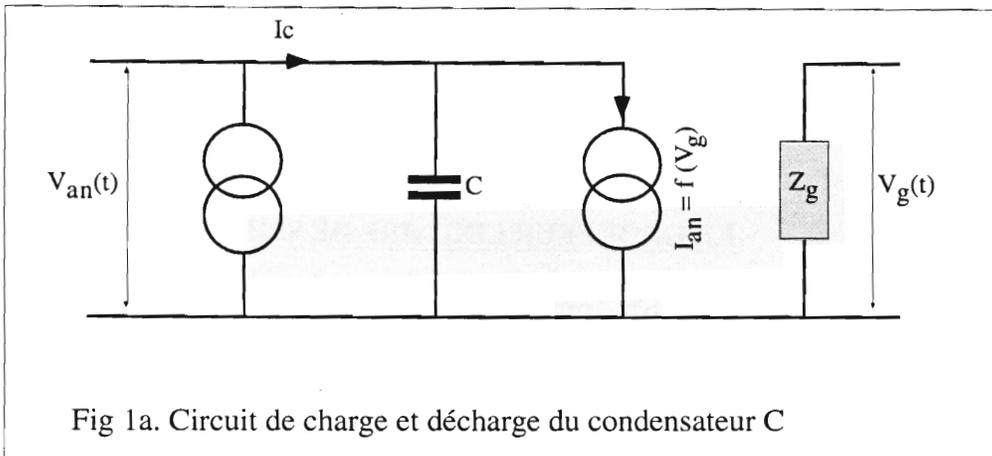
Capacité électrode	43 pF
Gamme de fréquence	9,6 et 14,5 MHz
Tension de rampe maximale	800 V @14,5 MHz
Rendement	>70%

Un paragraphe est aussi dédié à l'analyse des points critiques d'une solution pour tensions plus élevées.

1) PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La tension aux bornes d'un condensateur chargé à courant constant décrit une rampe linéaire. Il est donc possible d'obtenir une tension dent-de-scie en déchargeant périodiquement ($T=1/f$) le condensateur en un temps négligeable par rapport à la période T [1].

Le circuit de la figure 1_a correspond à ce principe: il comprend un générateur de courant constant I_c , un condensateur C et un générateur de courant $I_{an}(V_g)$ contrôlé par la tension $V_g(t)$. L'impédance Z_g représente la résistance de charge pour la génération de la tension $V_g(t)$



La figure 1_b montre la dent-de-scie $V_{an}(t)$ et la tension de commande $V_g(t)$.

Les valeurs de tension caractéristiques sont:

- V: amplitude crête à crête (tension utile de groupement)
- V_M : tension maximale atteinte (Vmax)
- V_p : tension minimale atteinte (Vpied)
- V_{HT} : tension moyenne

pour la dent-de-scie,

- V_{gM} : tension maximale
- V_{gm} : tension minimale

pour la tension de contrôle, tandis que les durées temporelles des deux signaux sont :

- T: période de la fréquence de répétition
- T_d : temps de décharge
- T_c : temps de charge

2) MODELE DE CALCUL

Pour une amplitude V demandée, les courants de charge I_{cc} et décharge I_{dd} dans le condensateur dépendent de la fréquence suivant les formules:

$$f=1/T, T= T_c + T_d$$

$$I_{cc} = C \cdot V / T_c \quad 1)$$

$$I_{dd} = C \cdot V / T_d \quad 2)$$

Le courant I_c du premier générateur coïncide avec I_{cc} si on suppose que le courant circulant dans le deuxième générateur est nul pendant la phase de charge, sinon nous avons

$$I_c = I_0 + I_{cc} = I_0 + C \cdot V / T_c \quad 3)$$

I_0 étant le courant résiduel dans le générateur bloqué:

$$I_0 = I_{an}(V_{gm}) \quad 4)$$

Dans le deuxième générateur circule le courant $I_{an}(V_g)$ dont la valeur moyenne sur la période \hat{I}_{an} est égale à I_c . La valeur crête de décharge vaut:

$$I_{an}(V_{gM}) = I_c + I_{dd} \quad 5)$$

La transconductance μ du générateur détermine le niveau du pulse:

$$V_{gM} = I_{an} / \mu \quad 6)$$

En conséquence, le niveau V_{gM} du pulse, défini uniquement l'amplitude V de la dent-de-scie. La puissance P_{an} en jeu vaut:

$$P_{an} = V_{HT} \cdot I_c \quad 7)$$

elle est fournie par le premier générateur et dissipée sur le deuxième.

Le coefficient de groupement est enfin:

$$\eta = T_c/T.$$

8)

3) SCHEMA ELECTRIQUE

La figure 2 montre le schéma électrique correspondant au circuit précédemment exposé.

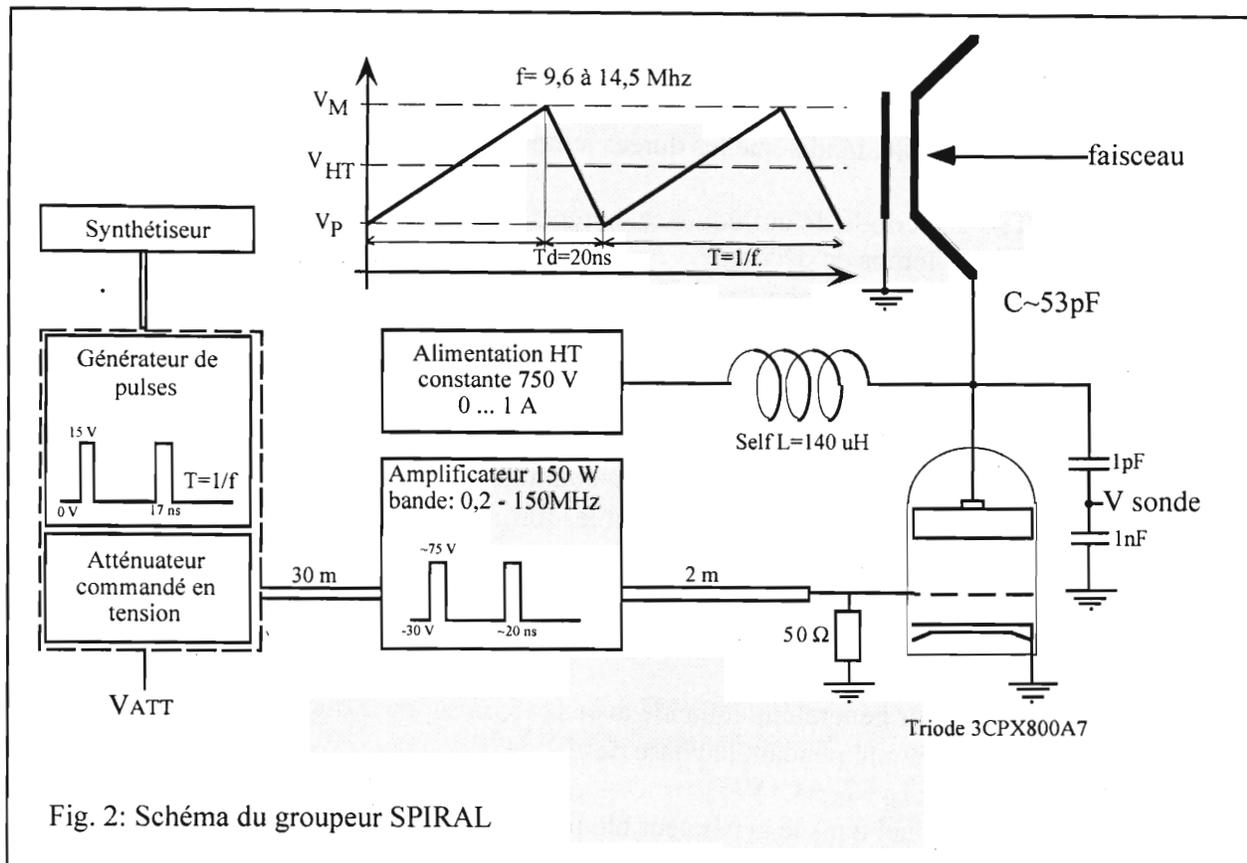


Fig. 2: Schéma du groupeur SPIRAL

Le générateur contrôlé est réalisé à travers une triode pour application de commutation avec une tension de coupure $V_g \approx 0$. Cela permet d'éliminer le circuit de polarisation de grille et d'utiliser la valeur basse du pulse (environs -20 V) pour bloquer le passage de courant. Le tube peut drainer un courant de 8 A, dissiper 800 W sur l'anode et 4 W sur la grille. Sa transconductance vaut environ 55 μ mhos (annexe 1).

La capacité anode-cathode du tube, celle de l'environnement autour l'anode, celle de l'électrode et celle du diviseur (sonde) résultent en parallèle. Leur somme constitue la valeur C qui doit être chargée et déchargée. Les mesures d'impédance sur l'anode du tube, ensemble monté, donnent $C=53$ pF.

Le générateur de courant constant I_c est réalisé à travers une alimentation haute tension V_{HT} qui assure la polarisation de l'anode du tube, suivi par un inducteur (140 nH) en série qui s'oppose aux variations de courant. La qualité de la bobine garantit la linéarité de la rampe.

Le signal pulsé de commande est généré à bas niveau (0 - 5V) à partir d'une sinusoïde de même fréquence. La durée du pulse T_d est d'environ 17 ns et ne dépend pas de la fréquence. Un atténuateur permet de changer le niveau du pulse et de régler l'amplitude de la dent-de-scie. Le signal, est ensuite amplifié par un module large bande (0,1 à 150 MHz) [2] et se présente sur la grille avec une valeur moyenne nulle. La tension V_{gm} est négative (ce qui réduit ultérieurement le courant résiduel dans le tube (I_0) pendant la phase de charge) et la tension V_{gM} peut atteindre les 90 V. L'impédance Z_g est constituée d'une résistance (50 Ohm 200 W) en parallèle avec la capacité d'entrée de la grille (24 pF) ce qui produit des fronts de montée et descente du pulse d'environ 5 ns. La durée du pulse amplifié est de 20 ns.

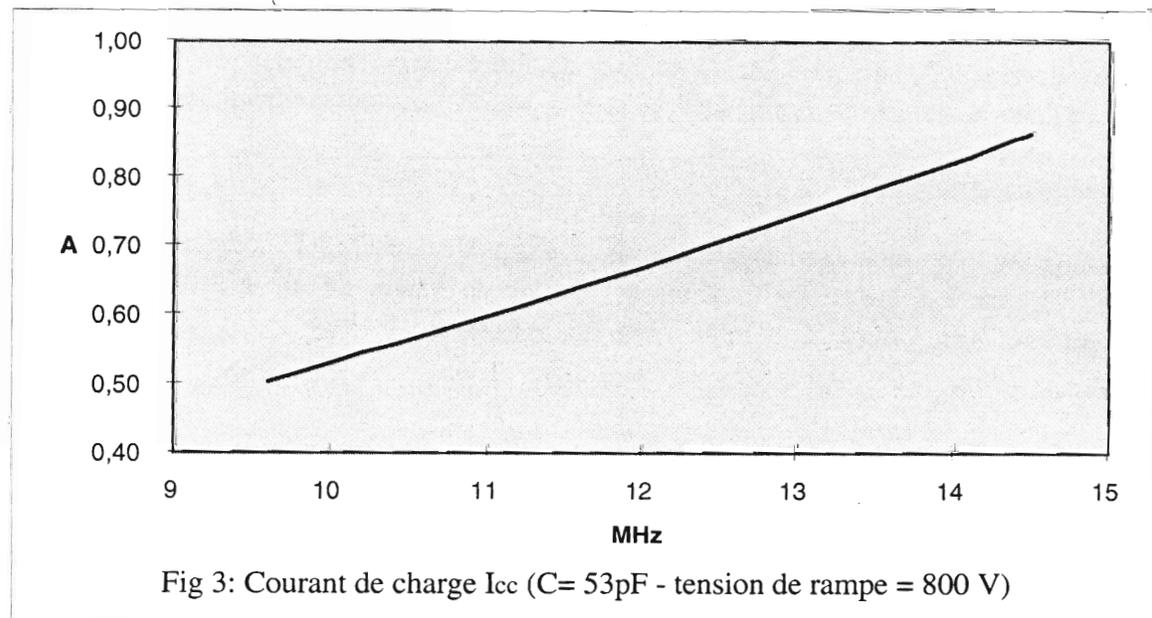
Deux régulations (annexe 1) complètent le système et assurent une stabilité de 10^{-2} pour l'amplitude et 0,2 degré sur la phase

4) VALEURS MAXIMALES DES PARAMETRES CARACTERISTIQUES DU SYSTEME (@ V= 800 V)

4.1 Courants de charge et décharge

Compte tenu de la durée fixe du pulse et des équations 1) et 2), le courant de décharge I_{dd} est constant pour une tension V de rampe donnée et vaut 2,1 A à 800 V.

Le courant de charge I_{cc} varie comme en figure 3, atteignant une valeur de presque 0,87 A à 14,5 MHz. (@ V= 800V).



4.2 Courant dans le tube et dans l'alimentation H.T.

Pendant la phase de montée, la tension de grille est négative et le courant d'anode résiduel I_0 est faible: environs 0,03 A. Pendant la phase de décharge, le tube conduit la somme de I_c et I_{dd} donc un peu plus que 3,1 A à 14,5 MHz.

D'après l'équation 3) et les valeurs calculées précédemment, le courant fourni par l'alimentation H.T. est maximum à 14,5 MHz et vaut environs 0,9 A.

4.3 Tension de rampe

La tension de rampe V est symétrique par rapport à la valeur V_{HT} de polarisation et son excursion maximale est limitée par la tension de déchet du tube (cause de V_p). Cette tension dépend de l'intensité du courant d'anode et pour les valeurs citées ci-dessous, vaut environ 350 V. Lorsque la tension d'anode s'approche de cette valeur, le courant qui commence à circuler dans la grille, modifie la relation 3) définie dans le modèle de calcul et surtout, si son intensité est élevée, provoque une dégradation rapide du tube. La tension de déchet est plus élevée pour une tétrode que pour une triode, ce qui, avec les avantages liés à un circuit de polarisation plus simple, justifie notre choix du tube.

En conséquence, avec une tension de pied V_p de 350 V ($>V_{gM}$) et une tension de rampe de 800 V, la valeur maximale V_M est de 1150 V.

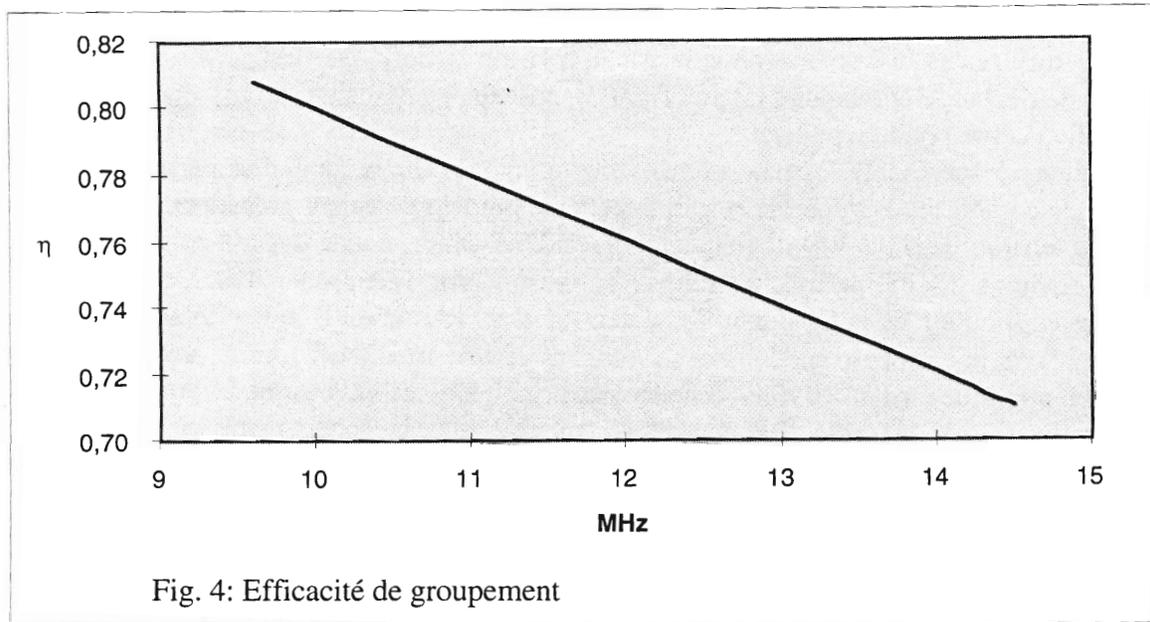
La valeur moyenne V_{HT} ($= (V_M + V_p)/2$) définit la tension de polarisation de l'anode du tube: 750 V. Il n'est pas nécessaire de découpler cette valeur car elle ne gêne pas le principe de groupement: les particules prennent cette énergie avant d'arriver à l'électrode et la perdent après, dans l'espace de groupement [3].

4.4 Puissance

La puissance P_{an} qui doit être à la fois de fournie par l'alimentation haute tension et dissipée sur l'anode du tube est donnée par la 7) et, à 14,5 MHz, vaut environs 700 W

4.5 Efficacité de groupement

Pour chaque période $T(=1/f)$ nous avons un temps de décharge T_d constant et un temps de charge T_c variable est égal à $T - T_d$. Compte tenu de la valeur de $T_d = 20$ ns l'efficacité de groupement vaut entre 71 et 81% comme montré dans la figure 4.



5) RESULTATS DES MESURES

La figure 5 montre la rampe obtenue.

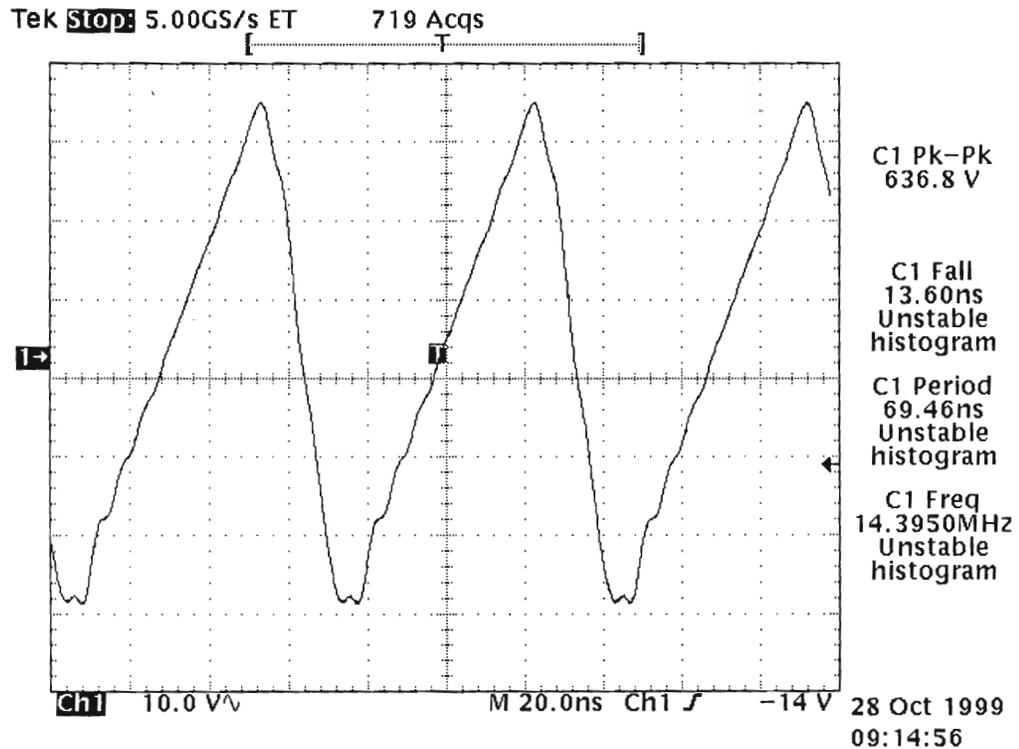
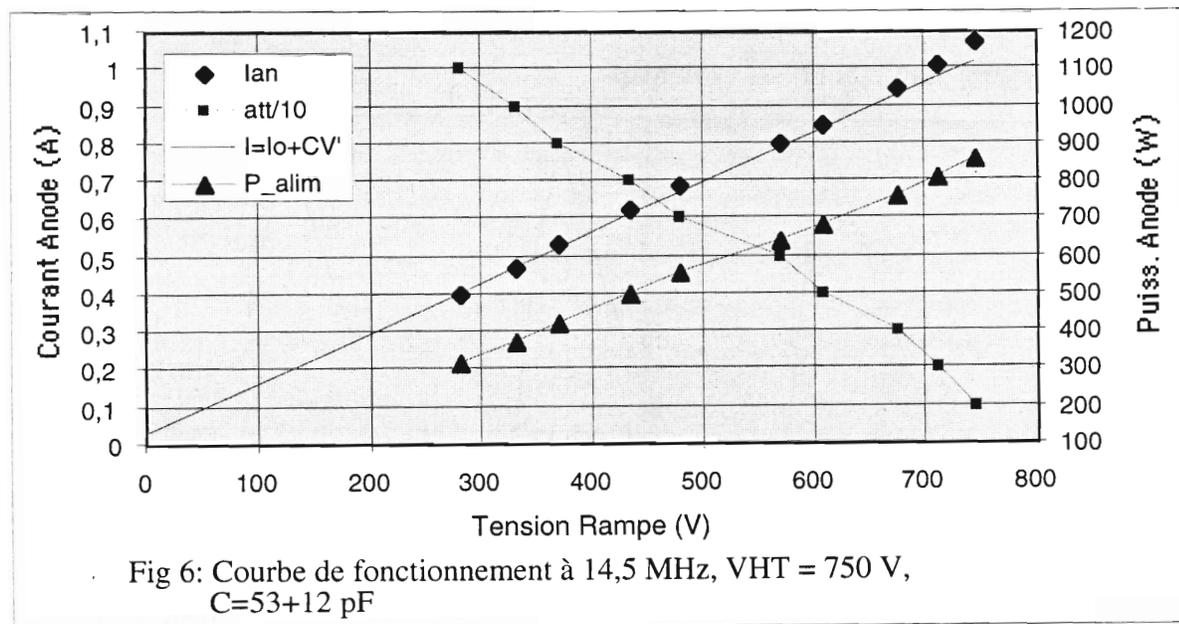


Fig. 5: Dent-de-scie à 14.5 MHz, 637 V

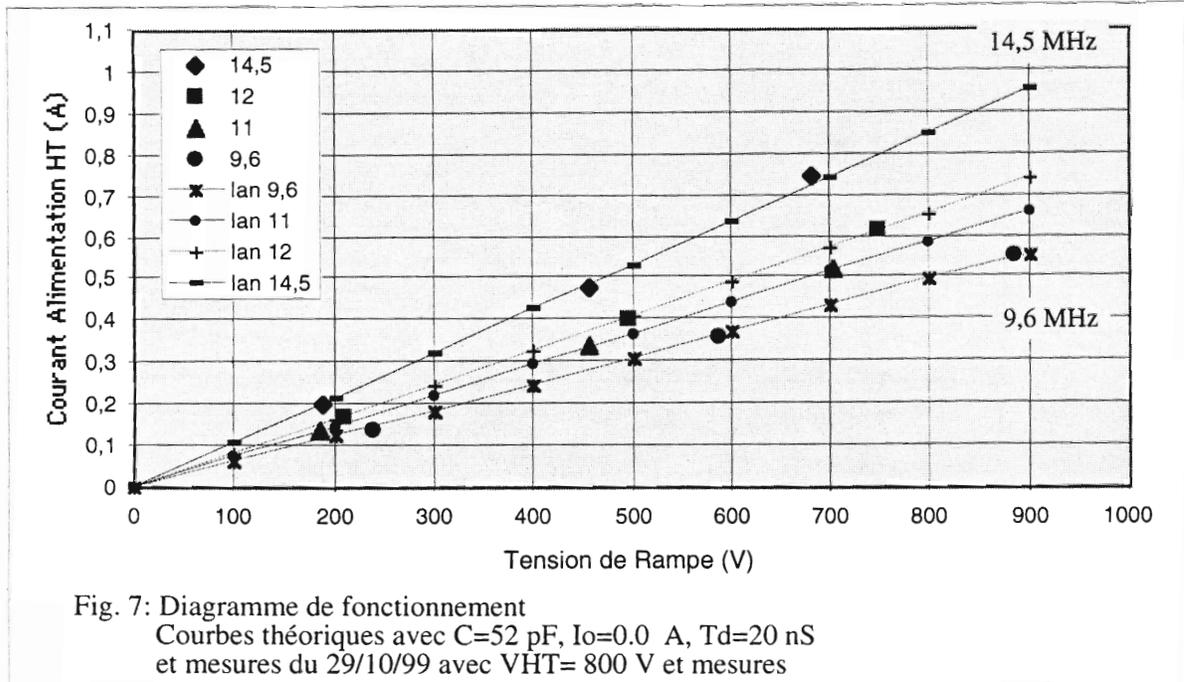
La linéarité de la phase de montée est excellente tandis que la phase de descente présente deux pentes différentes. Ce comportement est dû à la forme du pulse: les pentes plus faibles en début et fin de décharge correspondent aux fronts de montée et descente, tandis que la pente plus raide au milieu correspond au plateau.

La figure 6 représente les paramètres caractéristiques du groupeur et permet de voir les différences de comportement entre le système réel et le modèle de calcul précédent. Le diagramme est réalisé à tension d'anode V_{HT} et fréquence fixes. Une sonde haute tension avec une capacité parasite d'environ 12 pF permet de relever la tension sur l'électrode. Trois courbes y sont représentées en fonction de la tension utile de dent-de-scie: le courant I_c lu sur l'Alimentation H.T. (axe principal), la puissance d'anode (axe secondaire) et une troisième courbe, proportionnelle à l'atténuation appliquée (dB, 10 fois échelle axe principale) et inversement proportionnelle à l'amplitude du signal de grille. La courbe I_{an} montre que la schématisation effectuée, bien qu'extrêmement simplifiée, reproduit correctement le comportement réel: le courant nécessaire augmente linéairement avec la tension demandée. A tension zéro on peut remarquer le faible courant I_0 résiduel: environ 0,03 A. A haute tension, la perte de linéarité visible correspond au fonctionnement du tube proche de la tension de déchet et à l'apparition de courant de grille. La différence par rapport à la courbe linéaire, correspond à la valeur moyenne du courant de grille. D'après les caractéristiques du tube, cette différence ne peut pas dépasser le 0,06 A sans comporter une dégradation progressive de la grille. La courbe de l'atténuation montre que l'amplitude nécessaire à drainer un courant de 0,9 est entre 3 et 4 dB plus faible de la valeur maximale disponible.



5) DIAGRAMME DE FONCTIONNEMENT

En représentant l'équation 3) sur le même type de diagramme de la figure 5, avec la fréquence comme paramètre libre, nous obtenons le diagramme de fonctionnement de figure 7.

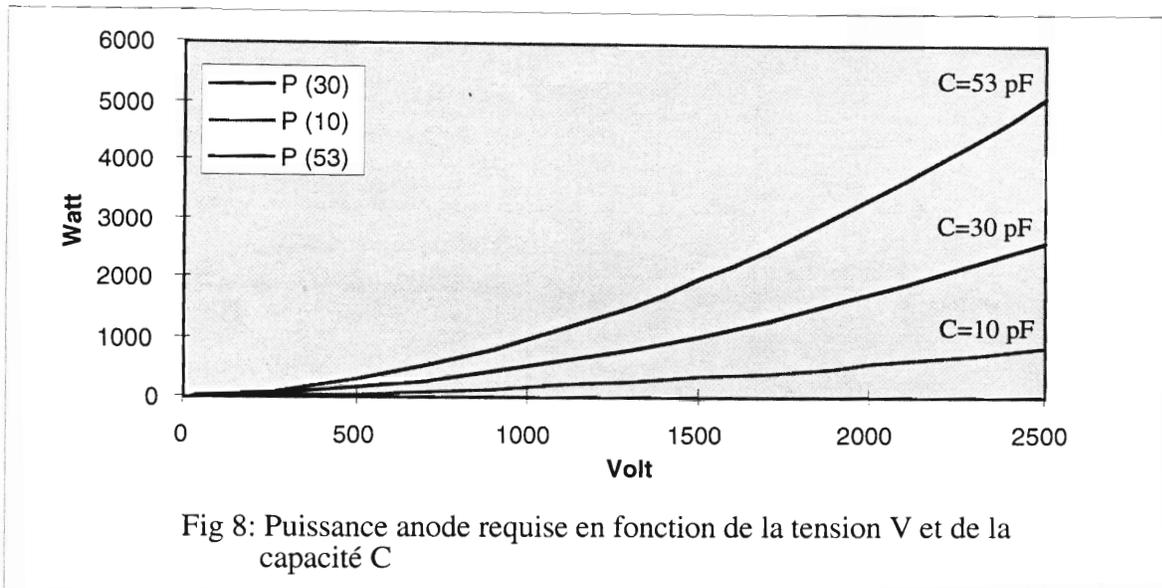


Les mesures indiquées ont été effectuées en utilisant la régulation d'amplitude, ce qui permet, lorsqu'on applique la sonde, de ne pas changer la tension mais de faire augmenter le courant proportionnellement à la capacité parasite de la sonde.

6) EVOLUTIONS POSSIBLES

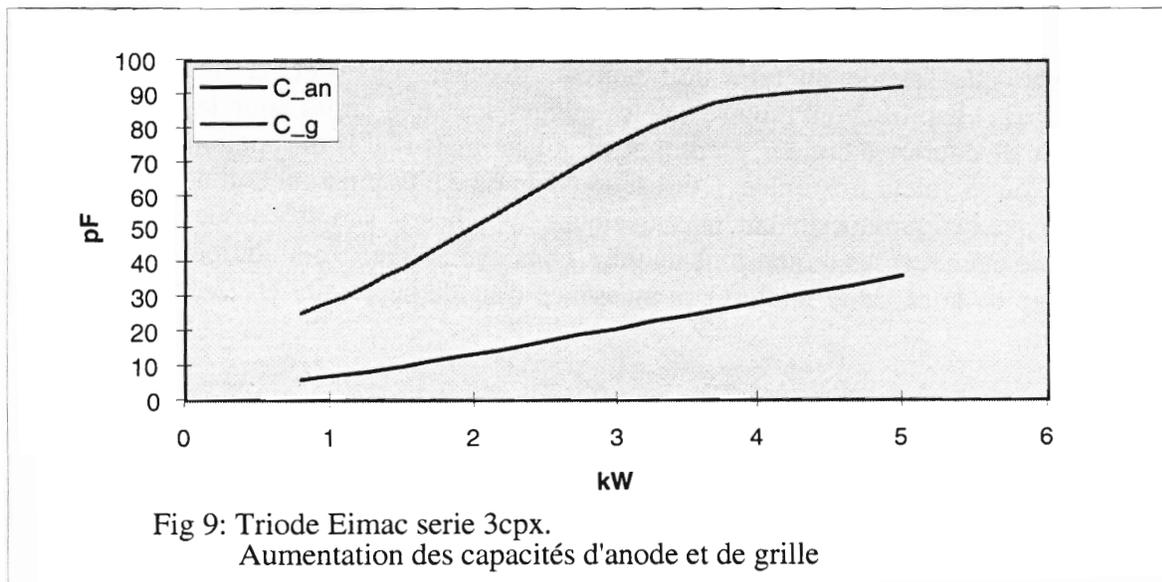
La solution actuelle ne permet pas d'obtenir de tensions plus élevées que 900 V à cause de la puissance que l'anode du tube doit pouvoir dissiper. En effet, la figure 6 et les valeurs numériques du chapitre 3 ont montré que les marges sont très larges pour les paramètres: tension d'anode, pic de courant à drainer, amplitude du pulse; mais que la dissipation d'anode du tube est très proche de sa valeur maximale. L'utilisation d'un tube plus puissant doit donc être envisagée.

Dans le diagramme suivant, avec quelques hypothèses simplificatrices sur la relation entre la tension de déchet et les dimensions du tube, nous avons tracé trois courbes qui indiquent, pour trois valeurs de la capacité totale C, la puissance d'anode nécessaire en fonction de la tension de groupement.



L'utilisation d'un tube plus puissant implique une augmentation proportionnelle des capacités internes d'anode et de grille, comme indiqué en figure 9. La première capacité, contribue à la capacité totale à charger et décharger, et donc les courbes de la figure 9 impliquent une réduction progressive de la capacité de l'électrode en fonction du tube utilisé. La capacité de grille a par contre un effet sur les fronts de montée et descente du pulse de commande et pourrait amener à une augmentation importante de la durée du pulse.

Enfin, la transconductance des tubes plus puissants est pratiquement inchangée et le niveau de tension de grille devrait donc être suffisant autant que le courant demandé ne dépasse pas les 8 A.



7) CONCLUSIONS

Les résultats décrits montrent que la solution proposée répond parfaitement au cahier des charges. La simplicité du circuit de puissance et sa fiabilité constituent les avantages principaux du côté technique, tandis que du point de vue de l'utilisateur, la simplicité de réglage et l'efficacité de groupement, prouvées lors des tests sur faisceau, (4) confortent le choix effectué en faveur d'un groupeur à dent-de-scie.

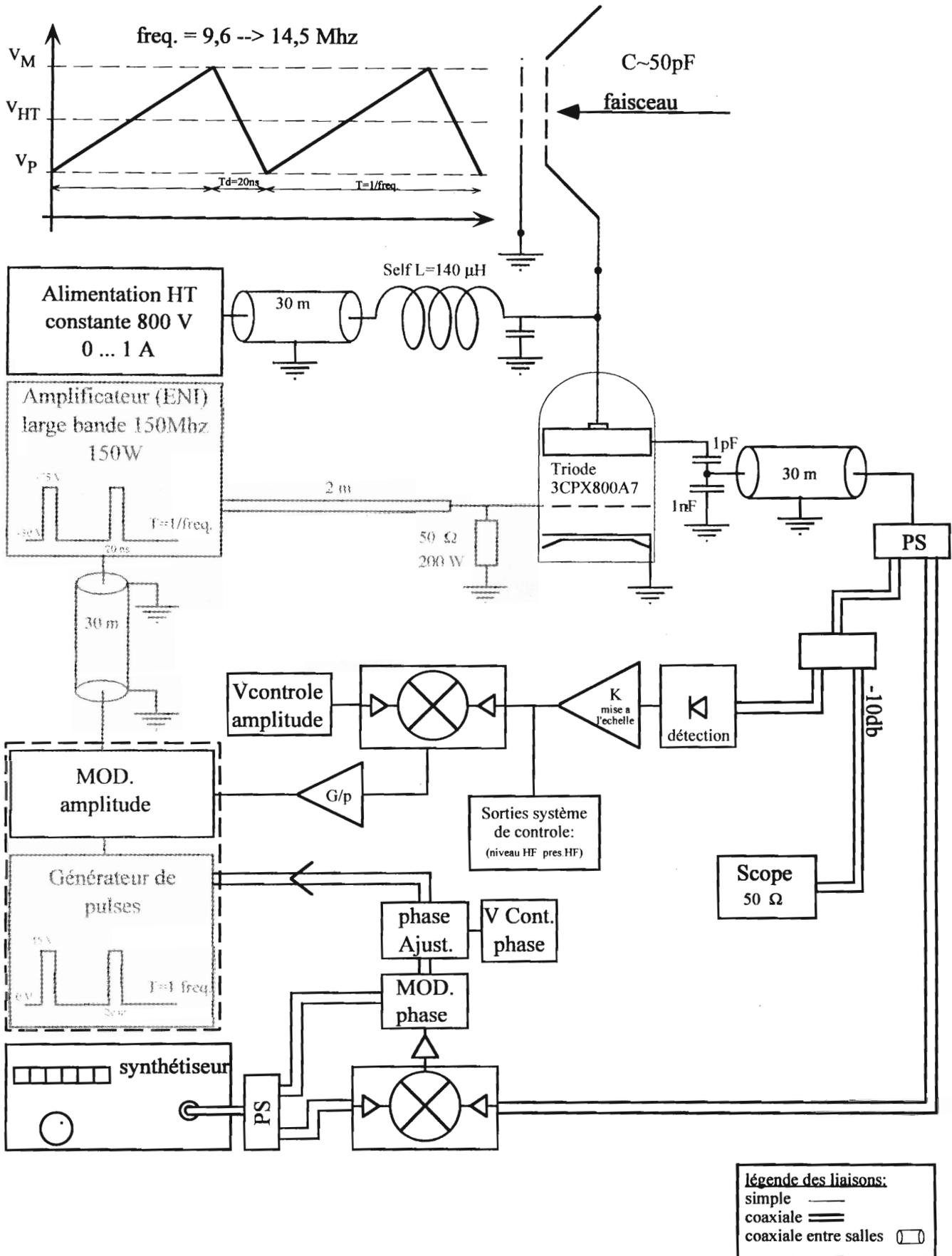
Le système de génération des pulses et l'alimentation H.T. constituent les éléments les plus coûteux du prototype actuel et nous travaillons à des solutions alternatives qui devraient aboutir à un coût d'opération moindre.

La réalisation d'un système pour tensions plus élevées (installation possible sur le C01, plate-forme 100 kV) doit sans doute passer par l'utilisation d'un tube plus puissant, mais la limitation de la capacité de l'électrode reste un point dominant. Sur l'électrode actuelle, dont la forme a été optimisée uniquement pour la dynamique du faisceau, (3) une étude visant à réduire sa capacité sera effectuée dès que la possibilité de ne pas utiliser de grilles sera confirmée.

Références

- [1] F.Y. Linch et al. *Beam buncher for heavy ions* (NIM. 159)
- [2] EIMAC-VARIAN *Power grid tube catalog*
- [3] W. Le Coz, *Génération d'un pulse de forte tension* - IPN Orsay report HF 260296
- [4] A. Chabert et al., *The linear buncher of SPIRAL: beam test of a prototype*, Ganil S9701
- [5] 15th SPIRAL Technical Comitee – 06/99

SCHEMA DE L'INSTALLATION DU GROUPEUR DE CIME



C.H. 01/09/99