

INT 172/91

Février 1991

Source haute tension en régime pulsé pour
l'alimentation de tube micro-onde "Gyrotron"
employé dans la fusion thermonucléaire

Guy Adrien Besson

SOURCE HAUTE TENSION EN REGIME PULSE POUR L'ALIMENTATION DE TUBE MICRO-ONDE "GYROTRON" EMPLOYE DANS LA FUSION THERMONUCLEAIRE

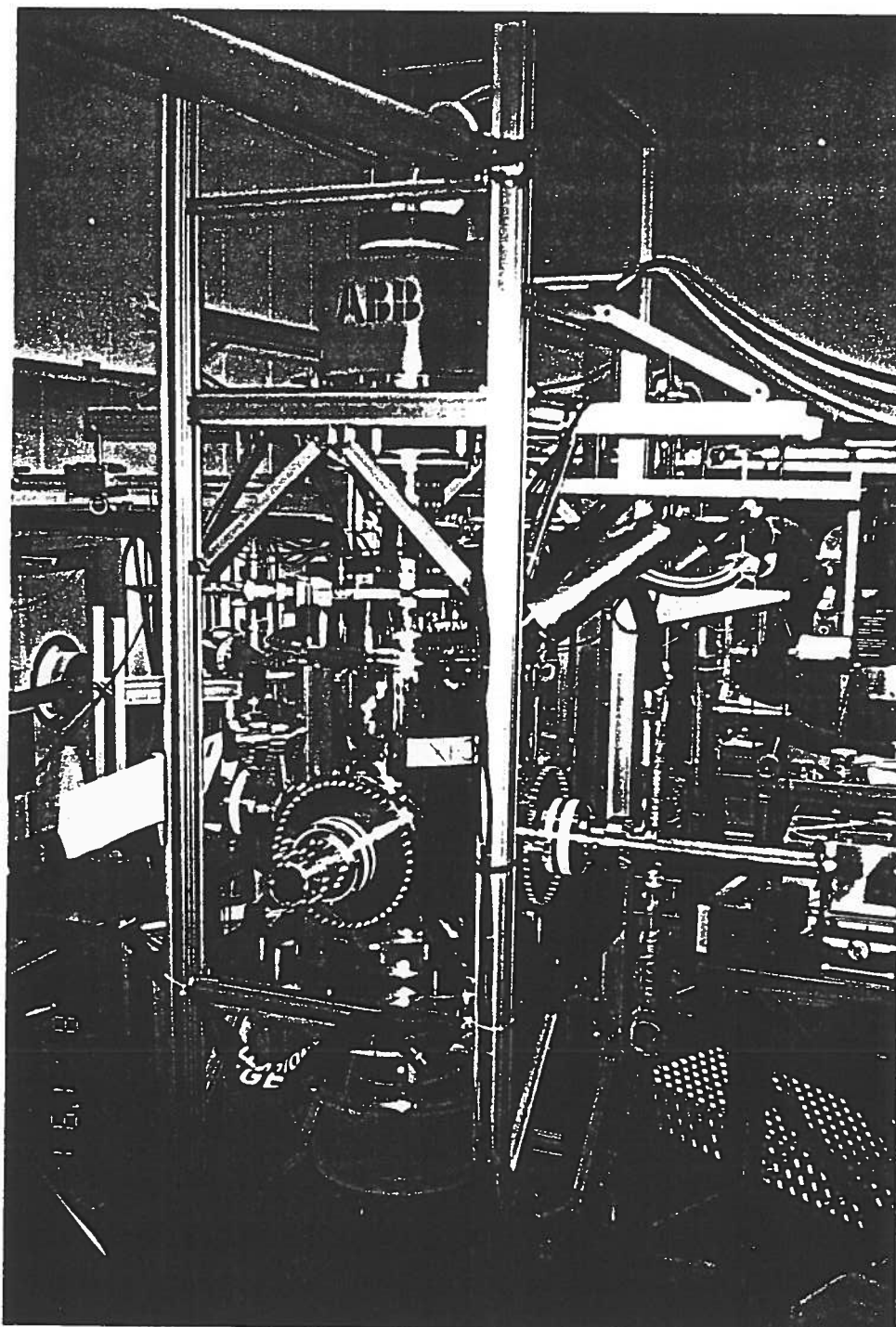
Guy Adrien Besson

Centre de Recherches en Physique des Plasmas
Association Euratom - Confédération Suisse
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
21, Av. des Bains - CH-1007 Lausanne - Switzerland

SOMMAIRE

La fusion thermonucléaire se trouve actuellement dans une phase d'évolution rapide. Cette nouvelle source d'énergie, qui met en jeu le quatrième état de la matière, le plasma, a subi des poussées technologiques énormes. Les moyens mis en oeuvre, pour remplacer la production d'énergie par fission de l'atome d'uranium, ont permis de réaliser récemment des progrès importants. Nous traiterons dans cet exposé des sources micro-ondes utilisées pour le chauffage des plasmas, et plus spécifiquement de leurs dispositifs d'alimentation.

Janvier 1991



Prototype d'un gyrotron quasi-optique à 95GHz

TABLE DES MATIERES

	INTRODUCTION.....	1
Chapitre 1	LES GYROTRONS.....	3
	1.1 Principe	3
	1.2 Equations de fonctionnement.....	4
	1.3 Charge provoquée par un gyrotron sur une source d'alimentation.....	13
	1.4 Réalisation.....	19
Chapitre 2	CAHIER DES CHARGES D'UNE ALIMENTATION.....	24
	2.1 Remarques.....	24
	2.2 Description.....	24
	2.3 Spécifications des alimentations	25
	2.4 Sécurité.....	26
	2.5 Conditions commerciales.....	26
Chapitre 3	ETUDE DE DIFFERENTS SYSTEMES D'ALIMENTATION	27
	3.1 Alimentation à découpage.....	27
	3.2 Alimentation à étage multiple GTO.....	29
	3.3 Convertisseur statique pour réseau AC-DC-AC.....	30
	3.4 Alimentation à thyristors et tétrode de régulation.....	31
	3.5 Discussion.....	32
Chapitre 4	CHOIX ET REALISATION D'UNE ALIMENTATION.....	34
	4.1 Disjoncteur.....	36
	4.2 Transformateur et redresseur.....	36
	4.3 Thyristors et filtre.....	38
	4.4 Crowbar.....	39
	4.5 Régulateur et modulateur.....	40
	4.6 Phénomènes transitoires et rejet d'harmoniques dans le réseau.....	41
	4.7 Système de commande et de sécurité.....	48
	4.8 Connexion des masses et de la terre	48
	CONCLUSION.....	49
	BIBLIOGRAPHIE.....	51

INTRODUCTION

C'est en 1923 que le terme de "plasma" a été introduit par deux physiciens américains, Irving Langmuir et Levi Tonks, pour désigner, dans les tubes à décharges, certaines régions équipotentielles contenant un gaz ionisé électriquement neutre. Ce mot est actuellement très employé en astrophysique pour caractériser un état délié de la matière, analogue à un gaz mais constitué de particules chargées, électrons et ions positifs, en proportion telle que le milieu soit globalement neutre. On pense que 99% de l'univers est constitué par de la matière à l'état de plasma.

Depuis l'explosion de la première bombe thermonucléaire en 1952, des efforts de grande envergure sont entrepris par un nombre important de nations pour parvenir à domestiquer cette nouvelle source d'énergie.

La fusion de l'atome d'hydrogène lourd ou deutérium permet d'obtenir une très grande quantité d'énergie. Lorsque l'on sait que 1.6g de deutérium sont contenus dans chaque litre d'eau et que l'énergie libérée par la fusion de 1g de cet élément est d'environ $25 \cdot 10^3$ kWh, pour mieux concevoir quelle est la puissance de cette nouvelle énergie, on peut s'imaginer que, avec un rendement de conversion de 30%, on peut fournir la Suisse en électricité (production : 60Mrd kWh (1988) [1]; consommation : 45Mrd kWh (1989)) avec 1500 m³ d'eau!

Cette vision un peu simpliste laisse rêveur, mais la réalité n'est pas si simple. Pour parvenir à cette fusion des atomes, une température de l'ordre de 100 millions de degrés doit être atteinte pour obtenir le début d'une réaction avec un bilan d'énergie positif.

Les recherches actuelles sont en majeure partie faites sur le confinement magnétique. Les réacteurs pour ce type de recherche sont appelés tokamak (ce nom a été donné par les russes qui en sont les inventeurs : Toroidal Kamera Magnetik). Les électrons et les ions sont confinés dans un champ magnétique en forme de tore et on cherche à

déposer de l'énergie par des moyens différents afin d'augmenter la température du combustible [2, 3].

Un des moyens qui nous occupent est l'injection d'une onde électromagnétique qui permet, si cette onde est à une fréquence bien définie, de transmettre son énergie au plasma. Ces ondes sont générées par des sources appelées gyrotrons fonctionnant à des fréquences variant de quelques gigahertz à plus de 100GHz, avec des puissances de plusieurs centaines de kW.

On peut comprendre le mécanisme de la transmission d'énergie entre l'onde et le plasma comme étant la conversion inverse de l'énergie qu'il a fallu fournir aux électrons pour créer cette onde. L'augmentation de la vitesse des électrons est directement liée à l'augmentation de la température. Ce type de chauffage est appelé chauffage dans le domaine cyclotronique-électronique (ECRH : Electron Cyclotron Resonance Heating).

Dans l'exposé qui va suivre, nous décrivons le fonctionnement d'un gyrotron ainsi que les problèmes liés à son alimentation. Nous présenterons quelques réalisations de gyrotron.

Un cahier des charges contenant les principales caractéristiques d'une alimentation suivra cette description.

Les différentes possibilités pour fournir l'énergie à cette source micro-onde ont fait que nous avons rassemblé quelques exemples d'alimentation qui pourraient convenir ou du moins qui donnent quelques idées.

Notre institut a eu en 1984 à choisir un type d'alimentation et l'on décrira cette appareillage. Une étude concernant les problèmes provoqués par le fonctionnement en régime pulsé ainsi que le rejet d'harmoniques dans le réseau terminera cette exposé.

Chapitre 1

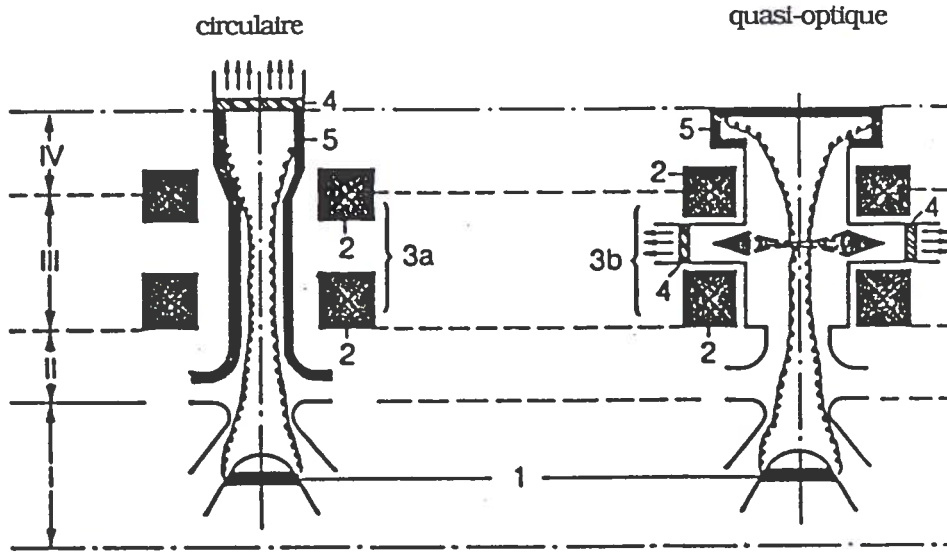
LES GYROTRONS

La paternité de ce nouveau développement est attribuée à un groupe soviétique qui publia un article concernant ce nouveau tube micro-onde voici une quinzaine d'années [4].

1.1 Principe

Le Gyrotron est un tube électronique basé sur le principe de la résonance cyclotronique électronique; c'est-à-dire sur l'interaction entre un faisceau d'électrons annulaire émis par un canon et un champ hyperfréquence créé par résonance cyclotronique, ceci est dû au champ magnétique des électrons excités dans une cavité à symétrie de révolution de profil complexe résonant [5].

Cette description s'applique au gyrotron **circulaire**. Un nouveau type de gyrotron est en développement actuellement. Le gyrotron **quasi-optique** est basé sur le même principe que le gyrotron circulaire, mais le résonateur à symétrie de révolution est remplacé par deux miroirs de type Fabry-Perrot (cavité ouverte).



I canon à électron II compression magnétique III résonateur IV collecteur

1 cathode 2 bobine de champ résonnat 3a résonateur cylindrique 3b résonateur quasi-optique 4 fenêtre HF 5 collecteur

Fig. 1.1 : Principe des gyrotrons

1.2 Equations de fonctionnement

1.2.1 Définition : fréquence cyclotronique

Un électron circulant avec une vitesse \mathbf{v} dans un champ d'induction magnétique \mathbf{B} subit une force de Lorentz donnée par la formule

$$\mathbf{F}_m = e (\mathbf{v} \wedge \mathbf{B}) \quad (1.1)$$

e est la charge (négative) de l'électron. ($1.602 \cdot 10^{-19} \text{C}$).

Cette force s'exerce perpendiculairement aux vecteurs vitesse \mathbf{v} et induction magnétique \mathbf{B} .

Dans le cas où \mathbf{v} est perpendiculaire à \mathbf{B} , la trajectoire de l'électron devient un cercle de rayon r .

L'électron en rotation subit une force centrifuge qui doit être compensée par la force de Lorentz [6].

$$F_{centr} = F_m \quad (1.2)$$

$$\frac{mv^2}{r} = B v e \quad (1.3)$$

m est la masse de l'électron ($9.109 \cdot 10^{-31} \text{Kg}$)

$$m \Omega_B^2 r = B \Omega_B r e \quad (1.4)$$

$$f_B = \frac{B e}{2\pi m} \quad (1.5)$$

$$f_B [\text{GHz}] \approx 28 B[\text{T}] \quad (1.5a)$$

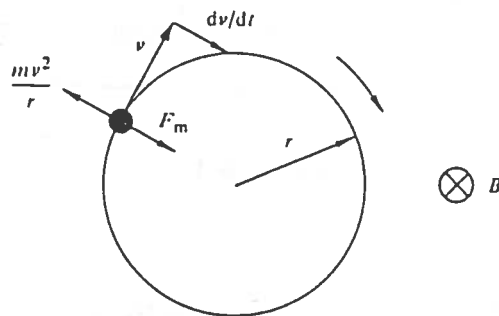


Fig. 1.2 : Trajectoire d'un électron dans un champ d'induction homogène

1.2.2 L'électron et la mécanique relativiste

Dans l'étude qui nous occupe, la vitesse des électrons (tension d'accélération) nous oblige à modifier les lois de la mécanique classique et doivent être remplacées par la mécanique relativiste.

Nous donnerons ici une comparaison (Tableau 1.1) de la vitesse par la mécanique classique et la mécanique relativiste.

A partir de l'équation d'énergie pour la mécanique classique

$$\frac{1}{2} m v^2 = eV \quad (1.6)$$

pour la mécanique relativiste

$$m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) = eV \quad (1.7)$$

c est la vitesse de la lumière ($3 \cdot 10^8$ m/s)

m_0 est la masse de l'électron au repos

V[volts]	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	5·10 ⁵	10 ⁶	5·10 ⁶	10 ⁷
v[m/s] classique	5.93·10 ⁶	1.88·10 ⁷	5.93·10 ⁷	1.88·10 ⁸	4.20·10 ⁸	5.93·10 ⁸	1.33·10 ⁹	1.88·10 ⁹
v[m/s] relati- viste	5.93·10 ⁶	1.87·10 ⁶	5.84·10 ⁷	1.64·10 ⁸	2.59·10 ⁸	2.82·10 ⁸	2.998·10 ⁸	2.999·10 ⁸

Tableau 1.1

Les tensions d'accélération employées dans les gyrotrons sont actuellement de l'ordre de 70kV, un facteur de correction relativiste doit être appliqué aux équations de fonctionnement [7].

Celui-ci se calcule

à partir de l'équation 1.7 et donne le résultat suivant

$$\rho = 1 + \frac{V[\text{kV}]}{511[\text{kV}]} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_{\parallel}^2}{c^2} - \frac{v_{\perp}^2}{c^2}}} \quad (1.8)$$

avec V le potentiel d'accélération.

La fréquence cyclotronique corrigée par le facteur relativiste devient

$$f_{Br} [\text{GHz}] \approx \frac{28}{\rho} B[\text{T}] \quad (1.9)$$

pour une tension de 70kV le facteur relativiste est

$$\beta = 1 + \frac{70}{511} = 1.137 \quad (1.10)$$

1.2.3 Génération et mouvement d'un faisceau d'électrons accéléré par un champ électrique E et guidé par un champ d'induction B

A son émission l'électron possède une vitesse v donnée par le champ électrique placé entre la cathode et le collecteur. Lors de son arrivée dans le champ d'induction, celui-ci, dû à la force de Lorentz, voit sa vitesse v décomposée en deux composantes v_{\perp} et v_{\parallel} .

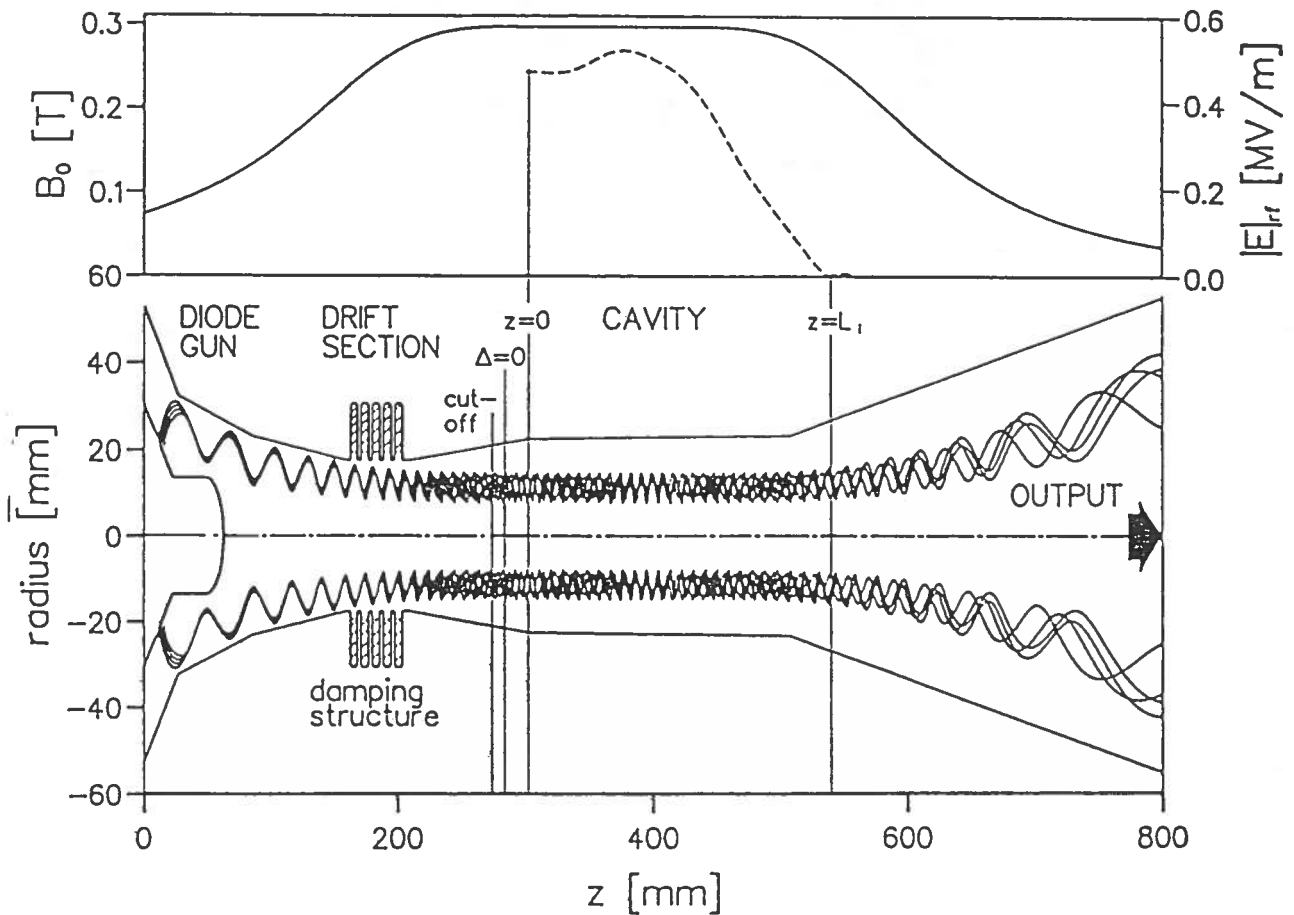


Fig. 1.3 : Canon à électron et son faisceau (circulaire 8GHz)
(source P. Muggli CRPP)

L'énergie cinétique de l'électron se décompose alors en une énergie perpendiculaire W_{\perp} et une énergie parallèle W_{\parallel} .

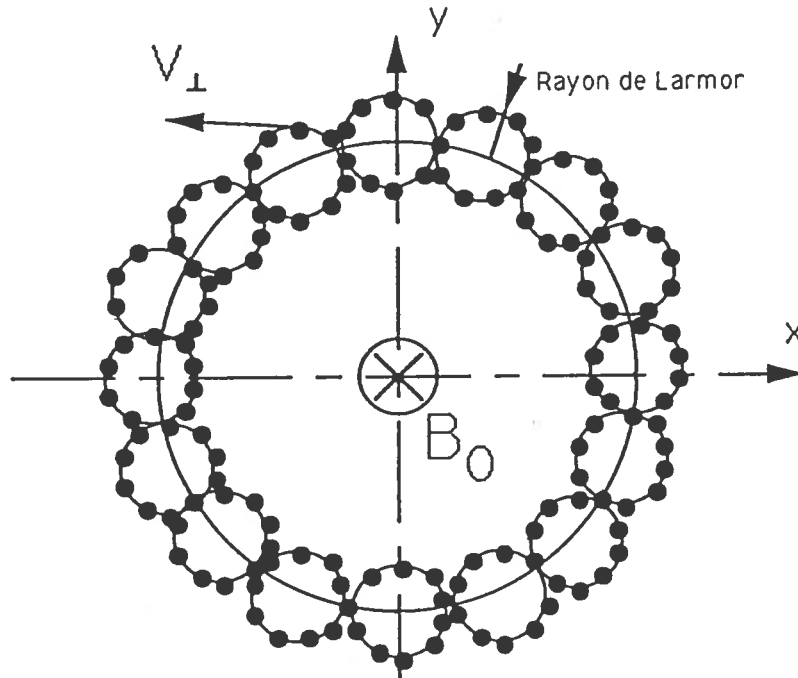


Fig. 1.4 : Coupe du faisceau d'électrons dans le champ d'induction

L'énergie utile au faisceau micro-onde est uniquement l'énergie de rotation due à v_{\perp} .

L'énergie utile micro-onde devient

$$W_{\perp} = \frac{1}{2} m_0 \rho v_{\perp}^2 \quad (1.11)$$

1.2.4 Production de micro-onde

Comme dit précédemment l'interaction d'un faisceau d'électrons relativistes avec les modes de résonance d'une cavité produit une onde.

Après les considérations suivantes, on décomposera le déplacement d'un groupe d'électrons dans la cavité pour différents temps.

Après avoir quitté la cathode, les électrons subissent une accélération jusqu'à la ligne équipotentielle zéro et ils continuent leurs mouvements suivant la loi de la conservation d'énergie.

Lors du passage dans la cavité, il n'existe plus de champ électrique d'accélération.

Le champ d'induction B_0 étant variable entre la cathode et la cavité provoque une striction du faisceau suivant la loi de conservation du flux.

$$r_{cathode}^2 \cdot B_{cathode} = r_{cavité}^2 \cdot B_{cavité} \quad (1.12)$$

avec pour un gyrotron à 96 GHz

$$B_{cathode} = 0.2 \text{ T}$$

$$r_{cathode} = 10 \text{ mm}$$

$$B_{cavité} = 4 \text{ T}$$

$$r_{cavité} = r_{faisceau} = r_{cathode} \sqrt{\frac{B_{cathode}}{B_{cavité}}} \cong 2.2 \text{ mm}. \quad (1.13)$$

Le rayon de Larmor dans la cavité pour 96 GHz est égal à

$$r_L = \frac{v_{\perp}}{\Omega_{Br}} \cong \frac{0.4 \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot 10^9} = 0.2 \text{ mm}. \quad (1.14)$$

avec Ω_{Br} = pulsation cyclotronique relativiste.

Le bruit étant une propriété de tous systèmes électroniques, il provoque dans le cas des gyrotrons le démarrage du phénomène d'oscillation.

On peut prouver que si $\Omega_{Br} = \omega_{cavité}$ il n'y a pas de production d'ondes.

La puissance est égale à la variation d'énergie par unité de temps et en dynamique, le produit de la force par la vitesse.

$$\frac{dW}{dt} = P = F \cdot v \quad (1.15)$$

La force est égale au produit $-e \cdot E_0$

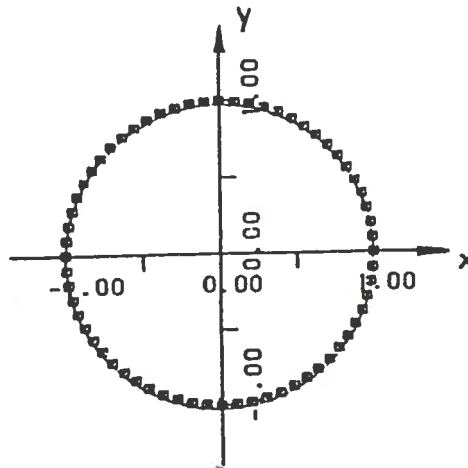
$$P = -e \cdot E_0 \cdot v_x \quad (1.16)$$

avec E_0 = champ électrique de l'onde
 v_x = composante de v_{\perp} selon x

au temps t

Situation avant l'entrée dans la cavité

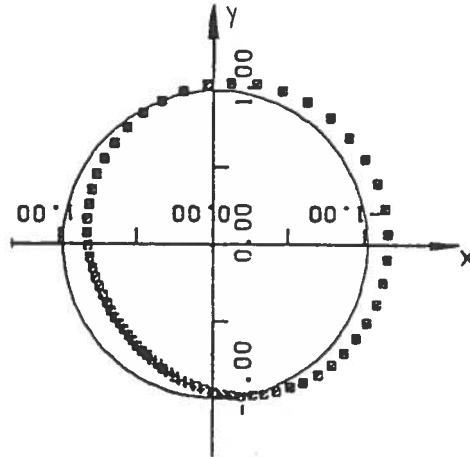
La répartition des électrons est uniforme sur le cercle défini par le rayon de Larmor (position angulaire uniforme).



au temps $t + 1\Delta t$

Les électrons entrent dans la cavité

Le bruit fait que la répartition angulaire se modifie. Les électrons prélèvent de l'énergie à l'onde existante. Le rendement est négatif (on peut assimiler ce phénomène à un surfer qui prend de la vitesse sur une vague).



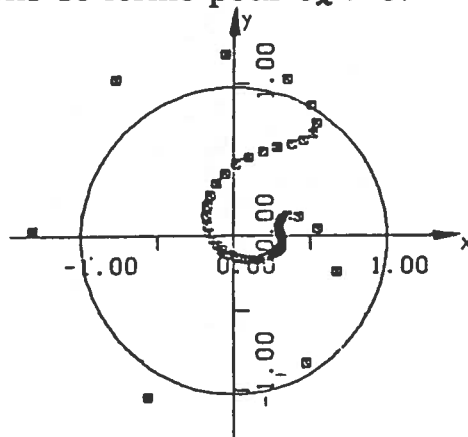
$$v_x < 0 \rightarrow \frac{dW}{dt} < 0 \rightarrow v_{\perp} \downarrow \rho \uparrow \Omega_{Br} \downarrow$$

gain d'énergie

au temps $t + 2 \cdot \Delta t$

Les électrons sont dans la cavité

Les électrons interagissent fortement avec le champ de l'onde, ils lui communiquent leur énergie. Leurs positions angulaires changent et une concentration d'électrons se forme pour $v_x > 0$.



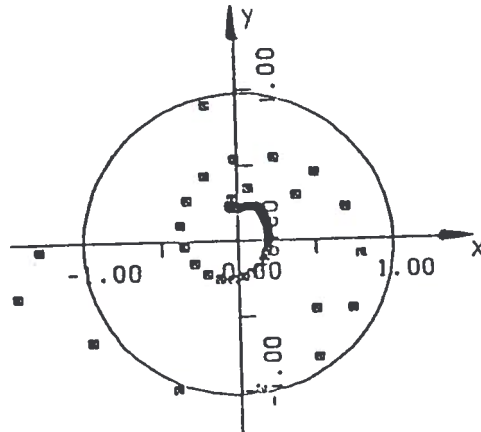
$$v_x > 0 \rightarrow \frac{dW}{dt} > 0 \rightarrow v_{\perp} \uparrow \rho \downarrow \Omega_{Br} \uparrow$$

perte d'énergie

au temps $t + 3 \cdot \Delta t$

Les électrons sont au centre de la cavité

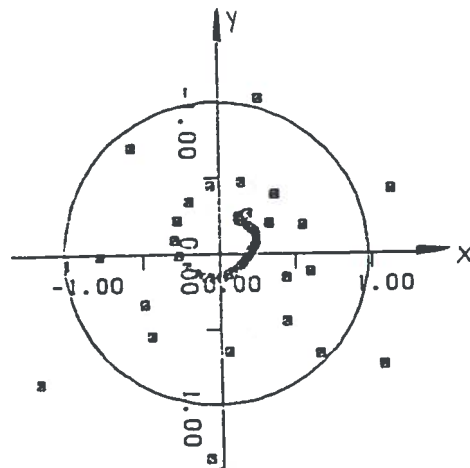
La position angulaire des électrons est maintenant très déformée, c'est le regroupement relativiste. Les électrons cèdent leur énergie à l'onde.



au temps $t + 4 \cdot \Delta t$

Les électrons sortent de la cavité

L'énergie des électrons décroît, l'onde n'est plus alimentée.



(Figures source P. Muggli CRPP)

1.3 Charge provoquée par un gyrotron sur une source d'alimentation

Les alimentations d'un gyrotron qui nous concernent sont définies selon la figure 1.5.

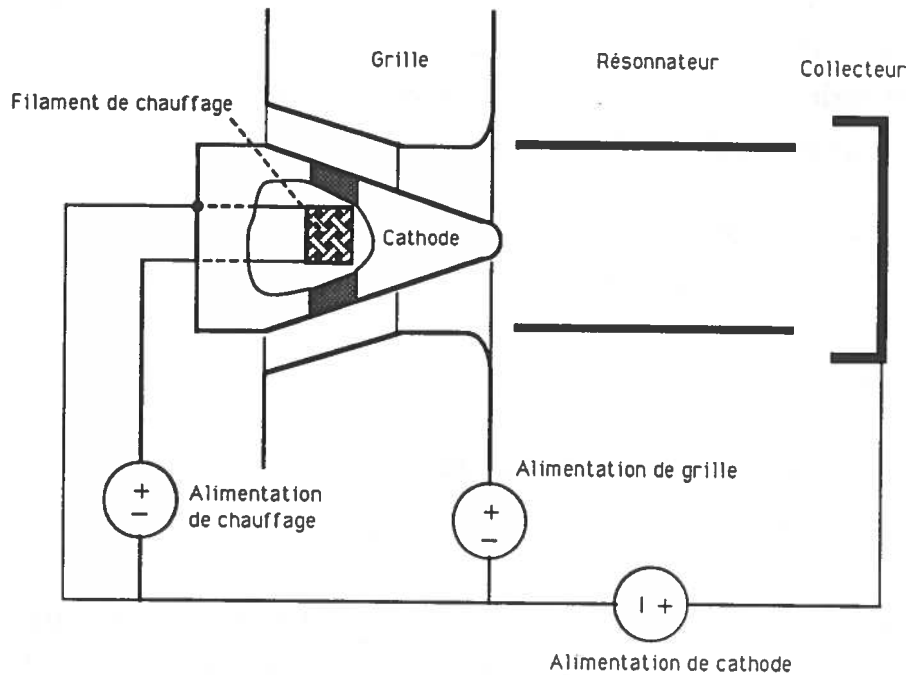


Fig. 1.5 : Schéma des alimentations d'un gyrotron

Les similitudes ainsi que le comportement entre les gyrotrons et les tubes électroniques nous amènent à étudier les lois d'émission et de fonctionnement de ces derniers.

1.3.1 Equations fondamentales des tubes à vide

La première équation est celle du courant d'émission d'une cathode chauffée à une température T d'une surface S .

Cette formule établie par Richardson et Duschman est la suivante :

$$I_e = S \cdot A \cdot T^2 \cdot \exp \frac{-11600 \varphi}{T} \quad (1.17)$$

où I_e est le courant d'émission en Ampères; A est le produit de constantes physiques ($120 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{degré}^2$), mais en réalité la valeur dépend du matériau constituant la cathode; T la température de la cathode en °K; φ le travail de sortie (en eV) qui détermine l'énergie complémentaire qu'il faut communiquer aux électrons pour assurer leur sortie de la cathode. Les valeurs des constantes sont pour les cathodes à oxyde du type baryum, strontium et calcium.

$$A = 2.0 \div 3.0 \cdot 10^{-3} \text{ A/cm}^2 \cdot \text{degré}^2$$
$$\varphi = 0.81 \div 1.4 \cdot \text{eV}$$

Pour des cathodes en tungstène pur

$$A = 60 \div 212 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{degré}^2$$
$$\varphi = 4.52 \text{ eV}$$

La seconde équation est celle qui lie le courant anodique (dans le cas des gyrotrons le courant collecteur) à la valeur de la tension d'accélération des électrons (tension anodique).

Si tous ces électrons émis par la cathode sont attirés par l'anode, on parle alors du régime de saturation ($I_a = I_e$).

La relation entre le courant anodique et la tension anodique a été donnée par Langmuir et Child :

$$I_a = g V_a^{3/2} \quad (1.18)$$

g est une constante qui dépend de la forme, de la surface de l'anode ainsi que de la distance l entre la cathode et l'anode.

Pour une anode plane dont la surface S_a est exprimée en cm^2 et l en cm

Pour une anode plane dont la surface S_a est exprimée en cm^2 et l en cm

$$g = 2.33 \cdot 10^{-6} \frac{S_a}{l^2} \quad (1.19)$$

Pour un système avec des électrodes cylindriques

$$g = 2.33 \cdot 10^{-6} \frac{S_a}{(r_a - r_k)^2} \quad (1.20)$$

où r_a est le rayon de l'anode en cm
 r_k est le rayon de la cathode en cm .

Ceci nous amène à l'équation générale des tubes triodes qui est

$$I_a = g (V_g + DV_a)^{3/2} \quad (1.21)$$

D est un coefficient qui détermine la transparence de la grille. Il est défini par le rapport de la capacité entre la grille et l'anode et la capacité entre la cathode et la grille [8].

1.3.2 Effet du champ électrique sur l'émission thermo-électronique

Les équations données dans le paragraphe précédent ne tiennent pas compte des effets du champ électrique aux abords de la cathode.

Ces effets ont été expliqués par Schottky, voici une brève description de ce phénomène terminé par l'équation de correction du courant I_s donnée par Richardson - Duchmann.

Lors de la sortie d'un électron d'une cathode chaude et en l'absence d'un champ électrique, celui-ci a tendance est à nouveau attiré par la cathode. Cette tendance est la force qui lie l'électron au noyau.

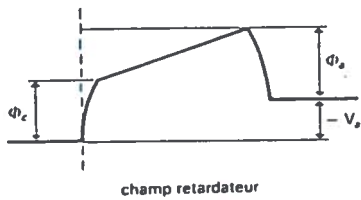
Si l'on applique un champ électrique, l'électron qui parvient à dépasser la distance où l'attraction du métal impose son retour, à partir de cette distance l'électron devient donc libre et le champ électrique permet son accélération.

$$I_S' = I_S \exp \frac{4.4\sqrt{E}}{T} \quad (1.22)$$

E en Volt par centimètre.

1.3.3 Résumé des différents états de l'émission thermo-électronique

Dans les figures qui suivent on a regroupé ces différents états des électrons dus au chauffage d'une cathode ainsi qu'à l'application d'un champ électrique [9, 10, 11].



V_a potentiel appliqué
 Φ_c potentiel de sortie de la cathode
 Φ_a potentiel de sortie de l'anode

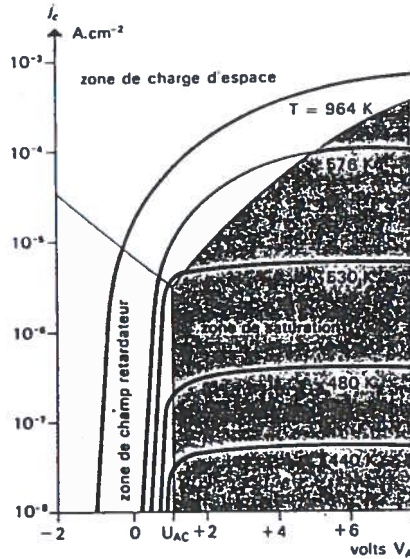
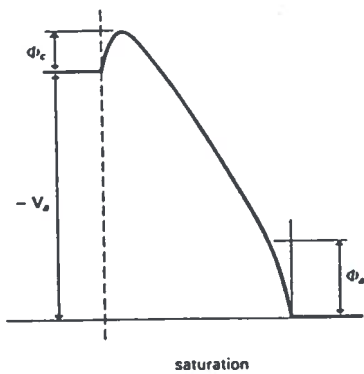
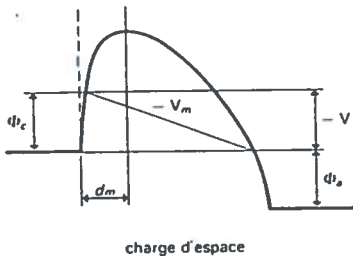


Fig. 1.6 : Emission thermo-électronique

1.3.4 Réflexions sur l'application des équations du tube triode au gyrotron

Après ce rappel des équations qui régissent l'émission thermo-électronique dans les triodes ainsi que les phénomènes, nous sommes en mesure de donner quelques réflexions quant à l'application de ces lois aux gyrotrons.

La conception d'un tube électronique relève plutôt de l'expérience acquise dans ce domaine. Les lois précitées permettent une compréhension des phénomènes physiques car l'application de ces lois dépend de coefficients qui varient d'une manière importante (contamination de la cathode, état de surface, problème de vide, oscillations parasites, tolérances mécaniques).

Les gyrotrons ayant des tensions d'accélération importantes, les paramètres physiques (éloignement du collecteur par rapport au canon, compression du faisceau par les champs magnétiques, point de fonctionnement, l'interaction particule-cavité) font que l'extrapolation des lois est complexe. C'est pourquoi la charge que représente un gyrotron pour une alimentation doit être définie expérimentalement. L'équipement que nous possédons actuellement ne nous permet pas d'exécuter des mesures suffisamment précises et certains paramètres ne sont pas mesurés.

Pour être efficace, ces mesures devraient se faire sur le gyrotron de façon à éviter les erreurs dues au câble d'alimentation haute tension.

1.3.5 Schéma équivalent d'un gyrotron

Dans notre cas, on définit un schéma équivalent dont les paramètres sont admis fixes. En réalité ils sont fonctions des tensions appliquées aux différentes électrodes du système.

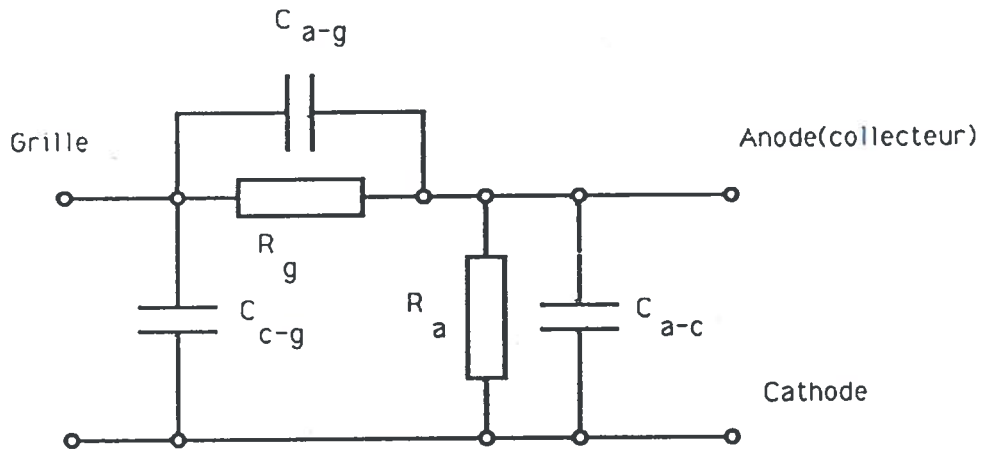


Fig. 1.7 : Schéma équivalent d'un gyrotron

Pour le cas du gyrotron 96 GHz installé au CRPP; $U_{\text{cathode}} = -70$ kV, $I_{\text{cathode}} = 10$ A, $R_a = 7$ k Ω , on estime les valeurs suivantes $R_g = 1$ M Ω , $C_{c-g} = 5$ pF, $C_{a-g} = C_{a-c} =$ quelques fF.

1.3.6 Remarques concernant l'alimentation de la cathode et de la grille.

Les exigences concernant ces alimentations sont :

- Un excellent taux de régulation des alimentations de cathode et de grille (< 0.5 %).
- La coupure de la tension cathodique doit pouvoir se faire dans un temps très court (< 10 μ s), ceci pour éviter lors d'arcage dans le gyrotron la formation de cratères.
- La limitation en cas d'arc doit fonctionner d'une façon très précise et d'une manière parfaite.
- On admet une énergie maximum de 5 Joules, au-delà de laquelle des dégâts causés à la surface des éléments sont possibles. Ceci oblige l'alimentation cathodique à ne contenir aucun accumulateur d'énergie (self, capacité).

1.4 Réalisation

1.4.1 Le tube électronique

Le potentiel d'alimentation du tube étant très élevé, l'isolation des connexions se fait soit dans le SF6, soit dans l'huile.

Le canon à électrons, la grille de commande, le conducteur du faisceau, le résonateur et le collecteur sont des parties placées dans un vide de l'ordre de $10^{-8} + 10^{-9}$ mbar.

Leurs élaborations requièrent un très grand soin dans l'usinage et l'état de surface des éléments.

1.4.2 Les bobines de champ magnétique

Ces bobines placées le long du tube peuvent être du type conventionnel ou du type supraconducteur.

Certaines bobines dont le rôle est la focalisation sont conventionnelles, par contre, les bobines des champs d'induction pour la rotation des électrons sont supraconductrices. Dans le cas de gyrotrons basse fréquence ($f < 10\text{GHz}$), les bobines des champs d'induction pour la rotation des électrons sont du type conventionnel.

1.4.3 Les bobines supraconductrices

Ces bobines sont d'une mise en opération et d'un fonctionnement très compliqués.

Le conducteur se trouve plongé dans de l'Hélium liquide à 4°K, une isolation thermique avec de l'azote liquide à 77°K se fait dans une chambre adjacente et enfin une troisième enceinte dans laquelle un vide de l'ordre de 10^{-5} mbar est maintenu, permet une déperdition de chaleur (consommation d'Hélium et d'Azote) minimale.

Les figures suivantes illustrent deux gyrotrons de type différent actuellement en service au CRPP.

Le gyrotron circulaire à 39 GHz permet d'effectuer des études sur l'allumage ainsi que sur le chauffage des plasmas dans le Tokamak TCA.

Le gyrotron quasi-optique 96 GHz est employé pour la recherche et le développement du principe des gyrotrons quasi-optiques.

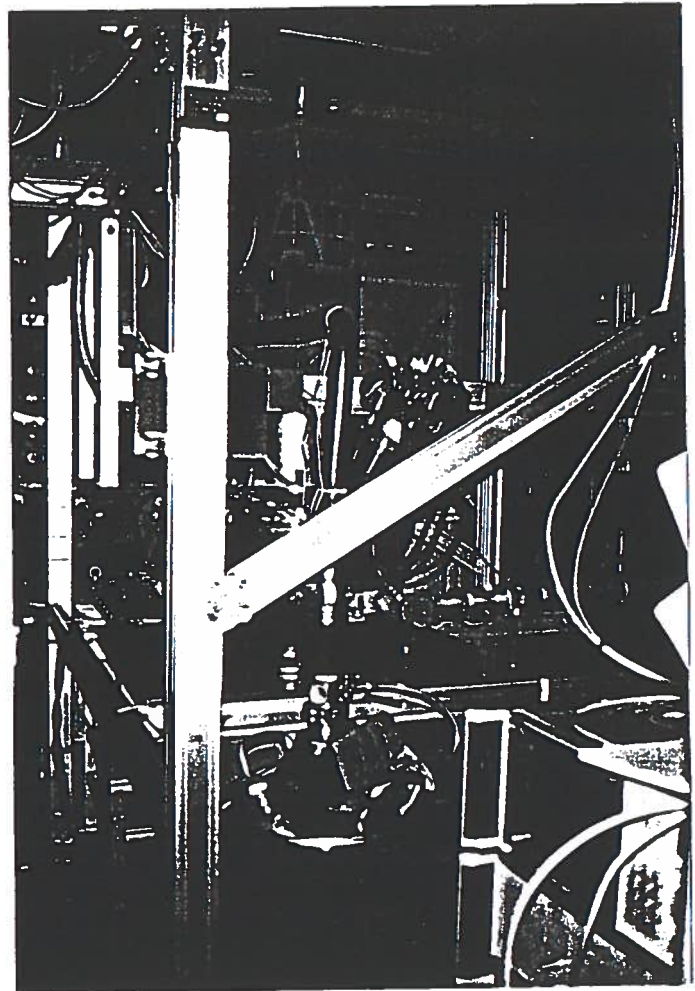
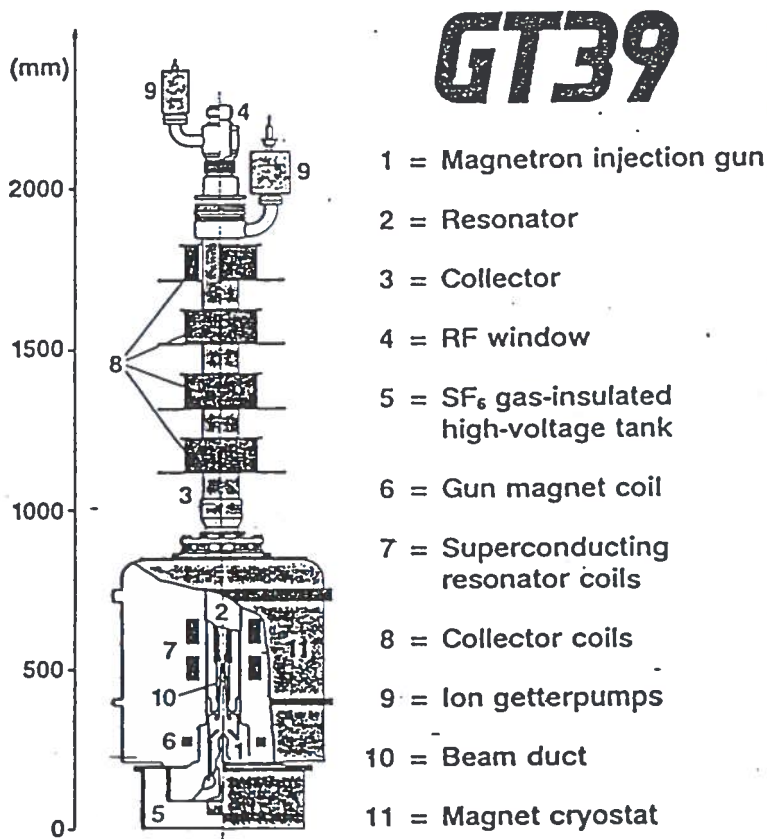


Fig. 1.8 : Gyrotron circulaire : f : 39GHz, P : 200kW, t = 100ms, rendement : 40%, Mode:

TE₀₂

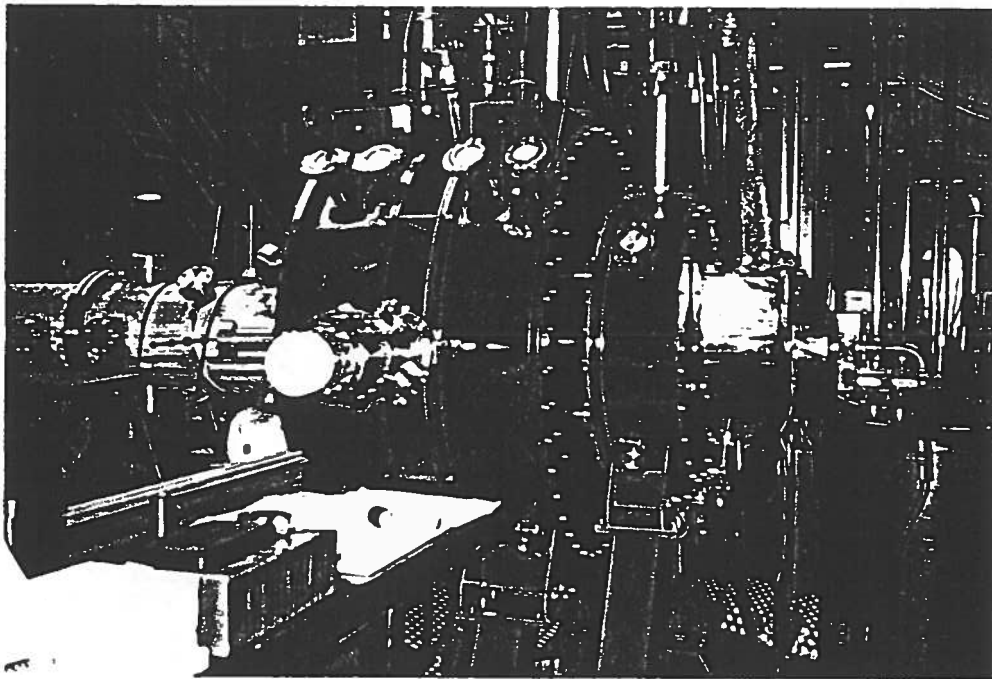
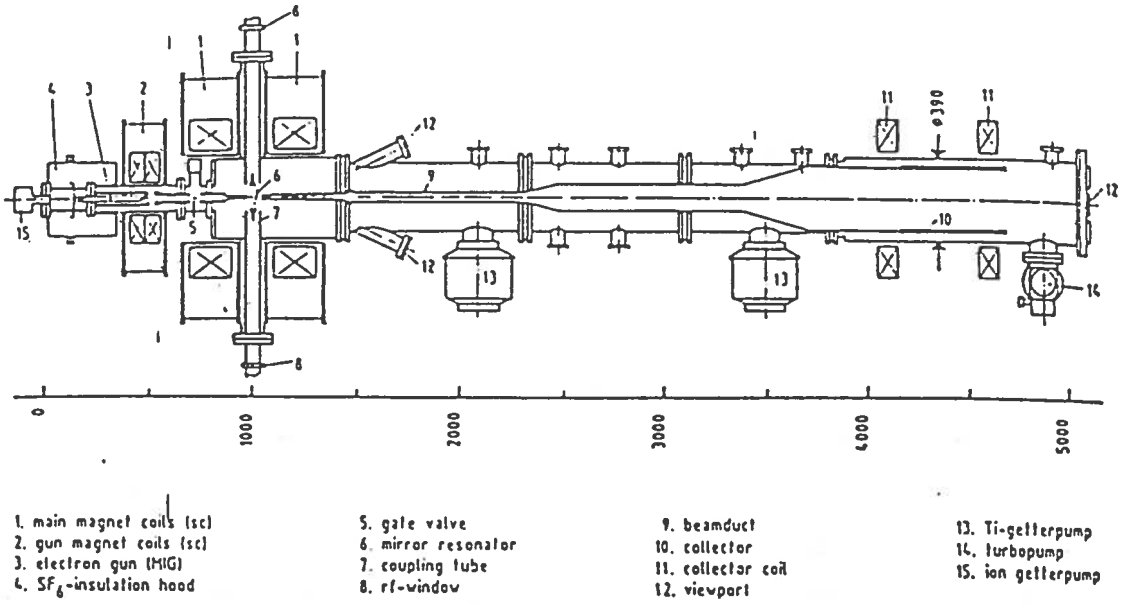
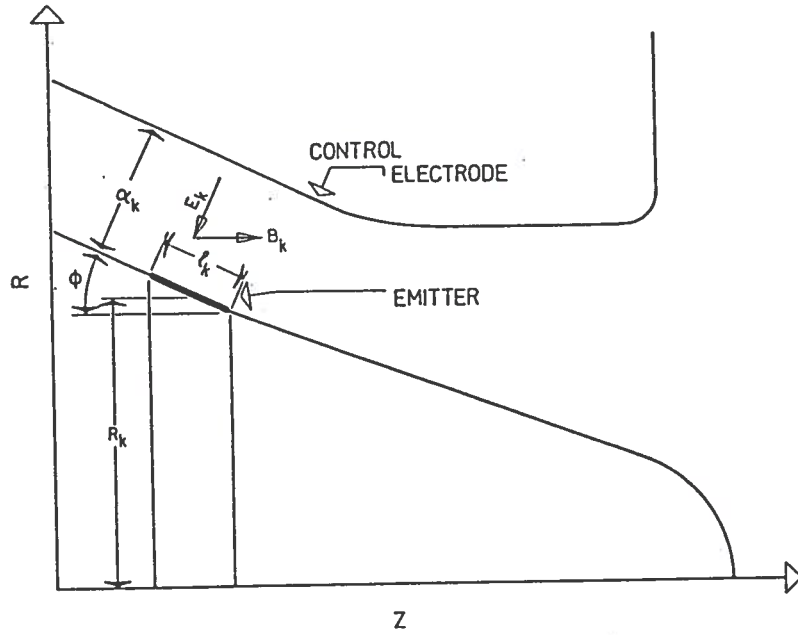


Fig. 1.9 : Gyrotron quasi-optique : f : 96GHz, P : 200kW, t = 100ms, rendement : 30%,
 Mode : TEM₀₂



$$\alpha_k = 4\text{mm}, l_k = 3\text{mm}, R_k = 9\text{mm}, \Phi = 30^\circ$$

Fig. 1.10 : Dimension d'un canon pour un gyrotron quasi-optique à 96 GHz

Nous terminerons ce chapitre par un graphique (Fig.1.11) donnant la position du gyrotron parmi les tubes et les semi-conducteurs micro-ondes ainsi qu'un tableau (Tableau 1.2) fournissant les performances obtenues actuellement.

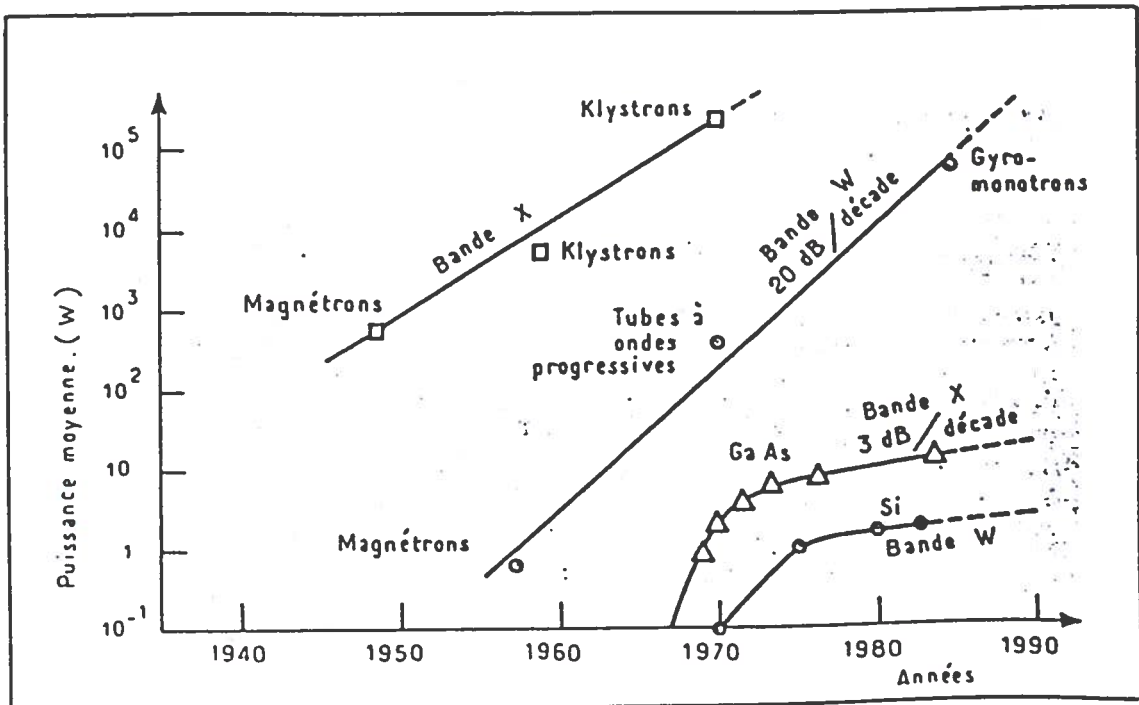


Fig. 1.11 : Evolution des sources micro-ondes dans le temps
(source Micro-waves and RF May 1985)

GYROTRON DEVELOPMENT Status: Oct. 90

Insitution	Mode	Frequency	Power	Efficiency	Pulse Length
Thomson TE	TE ₃₄ ⁰	100 GHz	200 kW	30%	100 ms
Thomson TE*	TE ₆₄ ⁰	110 GHz	>450kW	30%	60s
KfK	TE ₀₃ ⁰	140 GHz	300 kW	35%	< 0.15ms
			120 kW	13%	100 ms
MIT	TE _{16.2} ⁰	149 GHz	1.2 MW	32%	a few μs
VARIAN	TE ₀₃ ⁰	140 GHz	100 kW		CW
	TE _{15.2} ⁰	140 GHz	384 kW	28%	500ms
	TE _{15.2} ⁰	140 GHz	940 kW	34.9%	0.2ms
GORKI	TE _{11.3} ⁰	84 GHz	1.5 MW	up to 50%	
	TE _{22.5} ⁰	140.06GHz	550kW	35%	550ms
			940kW 970kW	32% 34%	300ms 1ms
CRPP	TEM _{00q}	100 GHz	90 kW	12%	15ms
NRL	TEM _{00q}	115 GHz	600 kW	9%	~15 μs
			220 kW	15.4%	~15 μs
ABB*	TEM _{00q}	92.4 GHz ±10%	500 kW		10 ms

* Tubes under development

Tableau 1.2 Performance des gyrotrons
(Source Dr.M.Q.TRAN CRPP)

Chapitre 2

CAHIER DES CHARGES D'UNE ALIMENTATION

2.1 Remarques

Dans le cas de l'emploi d'un gyrotron pour le chauffage ou l'allumage des plasmas, la stabilité en amplitude du signal micro-onde, la précision de la fréquence ainsi que le rapport signal - bruit du gyrotron sont relativement peu important du fait que le plasma intègre ces variations sans grande influence sur ses caractéristiques.

Nous n'entrerons pas dans les détails commerciaux mais nous en énumérerons les points principaux à la fin de ce chapitre.

2.2 Description

Nous considérons le terme d'alimentation d'un gyrotron comme étant le groupe des trois alimentations du canon à électrons (Fig. 1.5) :

- L'alimentation de cathode
- L'alimentation de grille
- L'alimentation de chauffage

Le réseau disponible pour l'alimentation de ce système est le suivant :

- Réseau moyenne tension 20 kV, triphasé, 50 Hz
- Réseau basse tension 380 V, triphasé, 50 Hz

Le rejet d'harmoniques dans ces réseaux doit satisfaire la norme ASE 3600 - 1.1987.

2.3 Spécifications des alimentations

2.3.1 Alimentation de cathode

Réglage de la tension entre : - 30kV + - 90kV

Courant : 10A

Régulation : $\leq 0.5\%$

Temps d'impulsion : 100 μ s à 10 sec

Temps de montée : 50 μ s

Temps de chute : 10 μ s

Réglage de la valeur du courant de court-circuit : 1A + 10A (par pas de 1A)

Possibilité de modulation : max. 10kHz

Profondeur de modulation : 50%

Energie maximum fournie entre la détection d'un arc, surintensité du courant cathodique, dans le gyrotron et la coupure rapide : 5 Joules

2.3.2 Alimentation de grille

Réglage de la tension entre : - 3kV + 50kV

Régulation : $\leq 0.2\%$

Courant : 100mA

Temps d'impulsion : 20 μ s à 10 sec

Temps de montée : 5 μ s

Temps de chute : 5 μ s

Possibilité de modulation : max. 10kHz

Profondeur de modulation : 50%

2.3.3 Alimentation de chauffage

Tension de chauffage de la cathode : 0 + 20VDC ou AC 50Hz

Courant : 10A

Régulation : $\leq 1\%$

Possibilité de modulation : max. 1kHz

Profondeur de modulation : 20%

2.3.4 Commande

L'enclenchement et le déclenchement de toute l'installation ainsi que sa commande et son contrôle doit pouvoir se faire depuis une console unique.

2.4 Sécurité

Le système doit contenir des mises à terre des parties haute-tensions (court-circuit à retombée par gravitation), les locaux dangereux seront verrouillés et les clés assurant la fermeture devront être placées dans la commande pour autoriser la mise en route de l'installation.

2.5 Conditions commerciales

Nous donnerons ici une liste des points concernant les liens commerciaux entre l'acheteur et le vendeur.

- For juridique
- Exécution du contrat (mal-façon)
- Adresse de livraison
- Prix (inclus ICHA, transport, mise en service, monnaie)
- Date de livraison (retard, pénalité)
- Emballage
- Assurance
- Condition de paiement (échelonnement)
- Garantie
- Contrat pour les renseignements
- Le paiement des frais d'études
- Documentation
- Test d'acceptation (délai)

Chapitre 3

ETUDE DE DIFFERENTS SYSTEMES D'ALIMENTATION

Nous exposerons dans ce chapitre différentes solutions pouvant présenter un intérêt pour l'alimentation de cathode.

Une discussion ainsi qu'un tableau comparatif (Tableau 3.1) des caractéristiques suivront ces descriptions.

3.1 Alimentation à découpage

Cette alimentation proposée récemment par un groupe japonais [12], est basée sur la mise en série de cellules convertisseur DC-DC.

Ces cellules sont équipées pour l'élément de commutation d'un nouveau type de transistor l'IGBT (Insulated Gate Bipolaire Transistor).

Cet élément permet la commutation de tension de 1200V sous 500A avec une fréquence de commutation de l'ordre de 20kHz (diminution des pertes de commutation). Cet élément est employé dans une cellule de correction des fluctuations.

Un deuxième élément équipant les cellules de puissance, le GTR (Giant Transistor) est un élément qui permet des caractéristiques semblables à l'IGBT mais son temps de fermeture est double par rapport à l'IGBT (perte de commutation à la fermeture).

La figure 3.1 donne une valeur de comparaison des éléments semi-conducteurs de puissance.

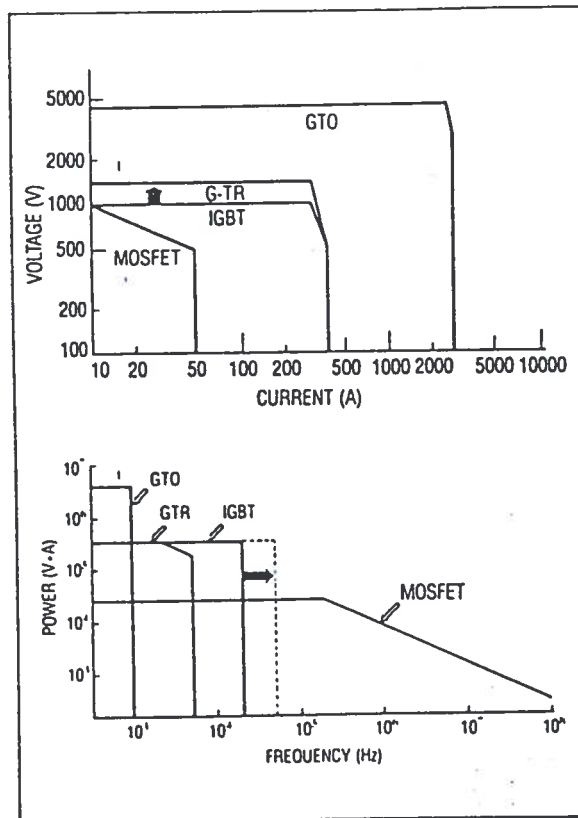


Fig. 3.1 : Semi-conducteurs de puissance
(Source Toshiba).

Le schéma de l'alimentation proposé (Fig. 3.2) fait appel à une alimentation AC-DC hexaphasé régulée par un système à thyristors, ceci pour obtenir un taux d'ondulation acceptable ainsi qu'une réduction des pertes lors du fonctionnement avec des tensions variables.

Le convertisseur DC-DC est composé de 6 cellules équipées de GTR et d'une cellule avec IGBT. Les étages GTR effectuent une régulation grossière, l'étage IGBT permet de compenser les irrégularités des étages GTR. Cette méthode fait appel à un système de commande très évolué.

Le système de compensation doit, pour être efficace, étudier les comportements des fluctuations de la tension et fournir les corrections nécessaires ceci pratiquement instantanément.

Chaque cellule comporte un transformateur élévateur avec un redresseur équipé de diodes rapides (Schottky).

Seuls des tests sur des modules basses puissances ont été réalisés.

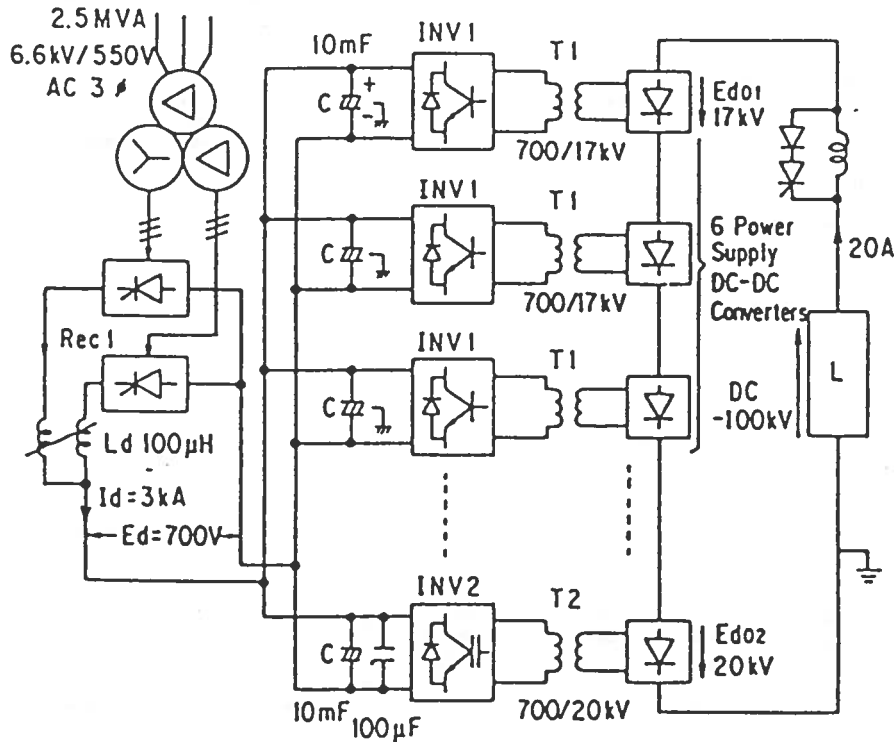


Fig. 3.2 : Schéma bloc

3.2 Alimentation à étages multiples GTO

Cette alimentation est basée sur le nouveau concept de PSM (Pulse Step Modulation) exploitée pour la modulation basse fréquence dans les émetteurs radio de haute puissance, est proposée par ABB.[13].

Une alimentation dont le schéma bloc est donné par la figure 3.3, a été réalisée pour un système d'injection de particules neutres (NBI : Neutral Beam Injector) sur le tokamak TEXTOR à Jülich (Allemagne) pour le chauffage des plasmas [14]. Cette alimentation de 68 cellules avec système de commutation par GTO est d'un concept relativement simple.

Composée de 4 transformateurs équipés chacun de 17 sorties, chaque sortie est connectée à un redresseur triphasé suivi d'un interrupteur GTO. La mise en série de ces modules permet de réaliser les caractéristiques demandées.

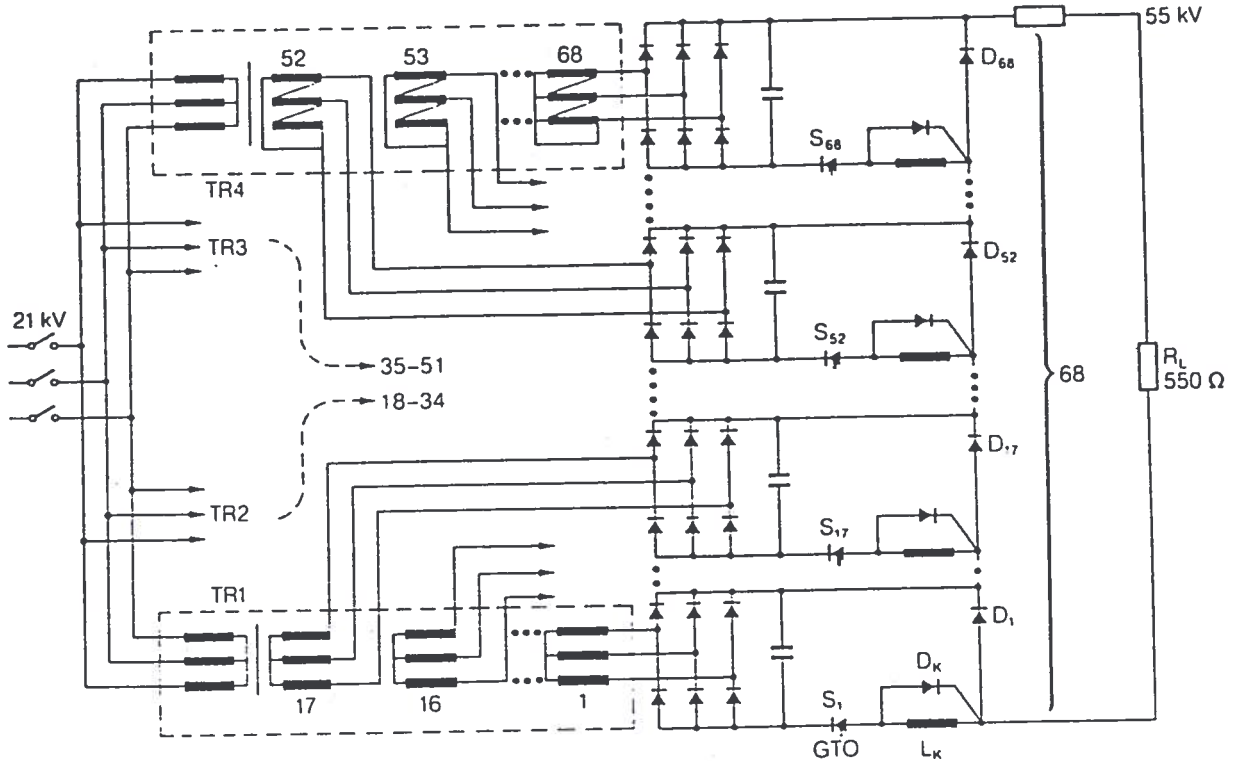


Fig. 3 - Circuit for the high voltage build-up

TR = Transformers
 S = Switches
 D = Diodes
 D_k = Freewheeling diode

L_k = Series inductance
 R_L = Load resistance
 68 = No. of stages

Fig. 3.3 : Schéma bloc

3.3 Convertiseur statique pour réseau AC-DC-AC

Ces systèmes actuellement employés pour transmettre de l'énergie sur des longues distances par courant continu (suppression des réactances de compensation) ou pour l'interconnexion de réseaux non-synchronisés sont en pleine évolution (Fig. 3.4).

La transformation AC-DC-AC est exécutée par le montage série parallèle de groupes de thyristors.

Ces groupes de thyristors assemblés, forment des tours dont les dimensions sont impressionnantes. Ces systèmes transmettent des tensions de l'ordre de $\pm 500\text{kV}$ avec des puissances de 2GW [15, 16, 17, 18].

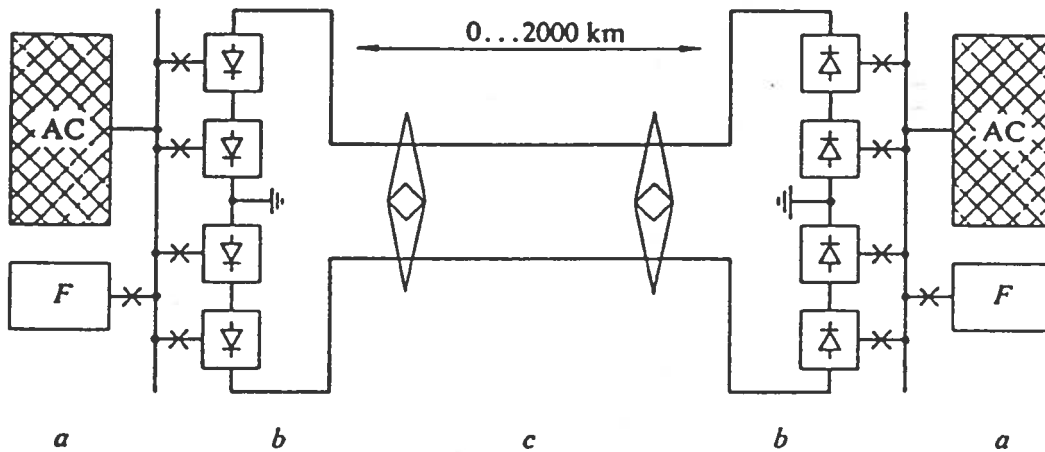


Fig. 3.4 : Schéma bloc

3.4 Alimentation à thyristors et tétrode de régulation

Ce système, selon la figure 3.5, est couramment employé actuellement pour diverses applications dans la recherche de la fusion nucléaire. La transformation AC-DC est effectuée par un transformateur-abaisseur couplé à un transformateur-survolteur. Le point milieu du transformateur-survolteur est relié à un système de régulation à thyristors. La sortie du survolteur est connectée à un redresseur haute-tension suivie d'un filtre.

La régulation fine s'effectue par une tétrode de puissance. En cas de défectuosité de la tétrode, un système de court-circuit rapide (crowbar) équipé de tubes à mercure (Ignitron) permet la mise à zéro de la tension.

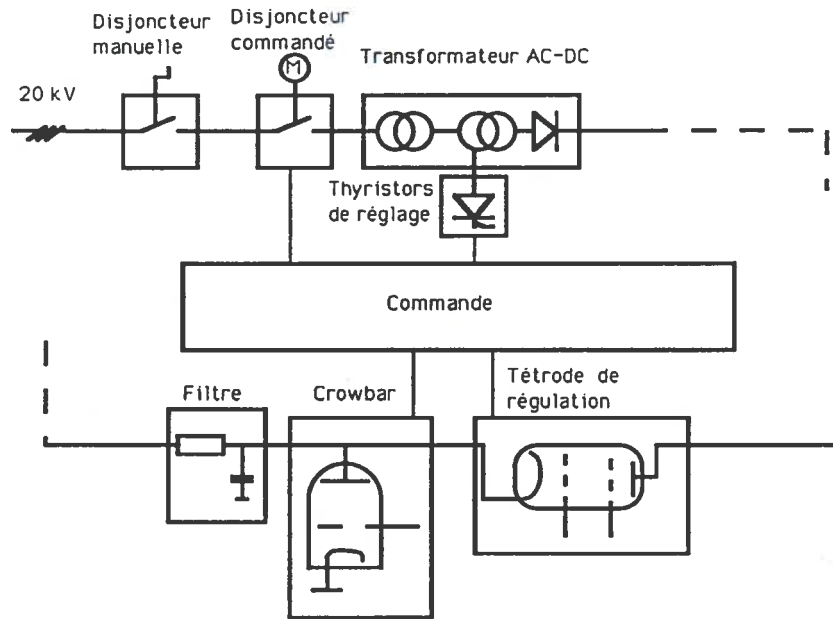


Fig. 3.5 : Schéma bloc

3.5 Discussion

Les différentes possibilités exposées précédemment permettent de faire le point sur les systèmes actuellement existants ou en phase de développement.

Comme nous l'avons vu, une transformation AC-DC est de fait obligatoire et une attention particulière à la réjection d'harmoniques dans le réseau doit être sujette à une étude.

Le convertisseur statique de réseau est présenté pour une connaissance de la possibilité de réalisation de systèmes à très haute tension et puissance importante, mais elle ne pourrait en aucun cas convenir à l'alimentation en direct d'un gyrotron (temps de coupure, fluctuation).

ALIMENTATION HAUTE - TENSION

	Alimentation à découpage	Alimentation à étages multiples GTO	Convertisseur statique de réseau AC-DC-AC [19]	Alimentation à thyristor et tube électronique de régulation
Etat de réalisation	Seulement en prototype basse puissance	Existant	Existant	Existant
Encombrement	Réduit	Important	Important	Moyen
Tension de sortie	100kV	55kV	140kV	100kV
Fluctuation	< 0.5%	0.75%	dépend du réseau AC d'alimentation	< 0.5%
Puissance de sortie	2MW	5.5MW	550MW	1MW
Vitesse de coupure	< 50 μ s	< 10 μ s	< 2500 μ s	< 10 μ s
Possibilité de réglage	oui	oui	Système conçu tout ou rien	oui
Vitesse d'enclenchement	< 100 μ s	< 20 μ s	250 μ s	< 200 μ s
Crowbar	obligatoire	inutile	obligatoire	obligatoire
Efficacité	> 95 %	> 95 %	> 90 %	80%

Tableau 2.1

L'alimentation à étages multiples GTO ne nécessite pas de crowbar car son temps de coupure est suffisamment rapide et la fiabilité des GTO par rapport au tube électronique est nettement supérieure.

Chapitre 4

CHOIX ET REALISATION D'UNE ALIMENTATION

Le choix de l'alimentation par notre département lors de l'appel d'offre en 1984 s'est porté sur une alimentation à thyristors avec une tétrode de régulation pour les raisons suivantes :

L'alimentation du type convertisseur avec les puissances demandées n'existait pas.

Une demande concernant une alimentation à étage multiple GTO avait été faite, mais le constructeur n'a pas voulu entrer en matière.

Le schéma bloc de l'alimentation retenu est donné à la figure 4.1.

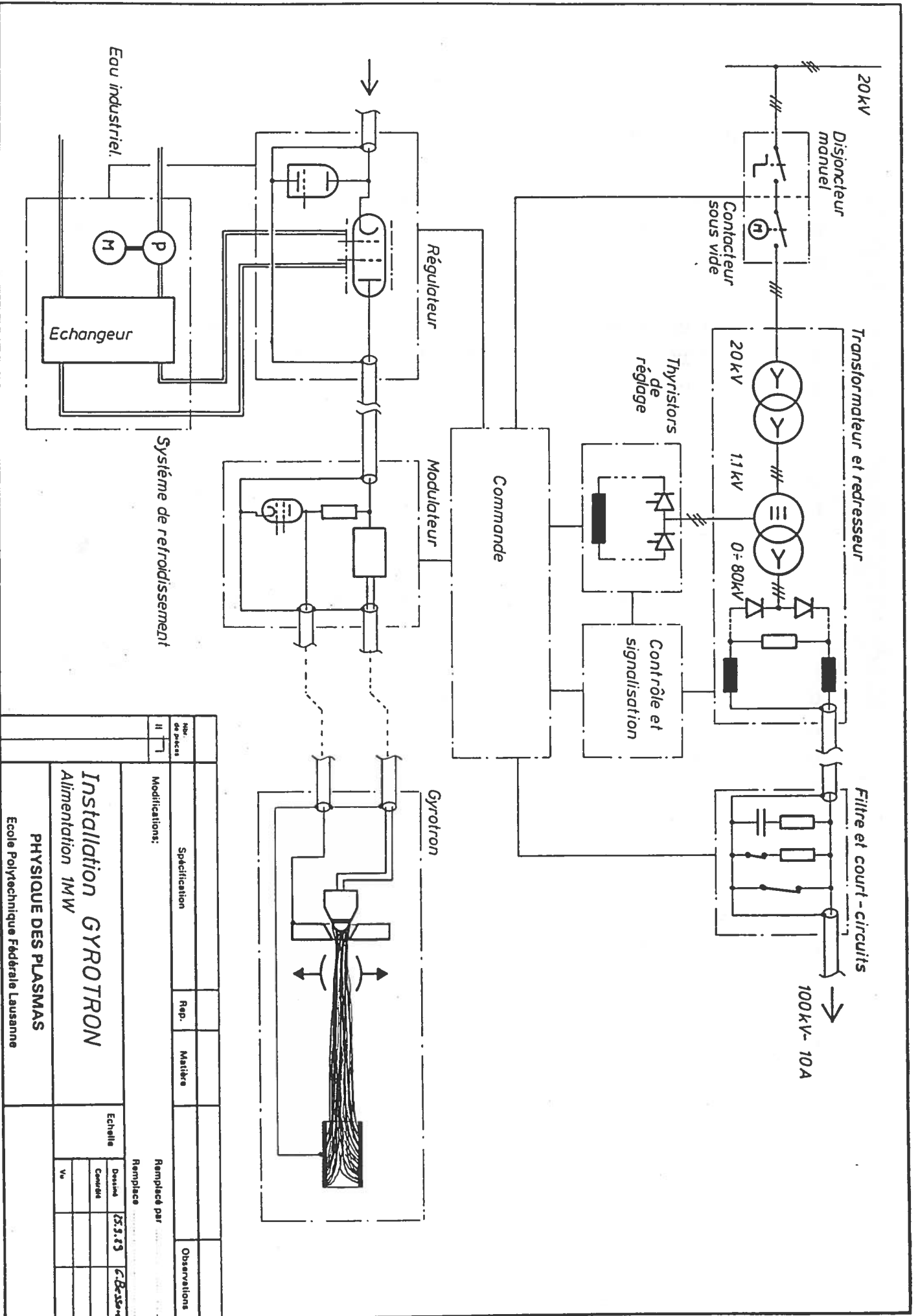


Fig. 4.1 : Schéma bloc

Num. de pièces		II		1	
Specification		Rep.	Matière	Observations	
Modifications:		Remplacé par			
Remplace		Remplacé par			
Echelle		Desiné		C.B. 1964	
Alimentation 1MW		Circuit			
PHYSIQUE DES PLASMAS		V ₀			
Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne					

4.1 Disjoncteur

Le disjoncteur joue un rôle d'interrupteur de l'alimentation.

Ce disjoncteur sous vide est télécommandé à partir de la cage de contrôle. Son pouvoir de coupure est de 10kA avec un temps de réaction inférieur à 40ms.

En cas de défaillance dans le système transformateur et redresseur, c'est cet élément qui doit permettre l'interruption entre le réseau 20kV~ et l'alimentation.

Par mesure de sécurité une possibilité de verrouillage (par clé) permet sa mise hors-service pour les travaux intervenant dans les locaux haute-tension.

4.2 Transformateur et redresseur

Ce système est comme le montre la figure 4.2, composé d'un transformateur-abaisseur du type étoile-étoile. L'entrée est connectée au réseau 20kV~. La sortie est d'une part reliée à un système de compensation et de protection et d'autre part connectée à un transformateur-survolteur dont la partie basse tension est branchée au système de thyristors de réglage. La partie haute-tension alimente le redresseur.

Le redresseur contient, outre les diodes, des systèmes de protection contre les transitoires.

Tout le système transformateur et redresseur est contenu dans une cuve remplie d'huile.

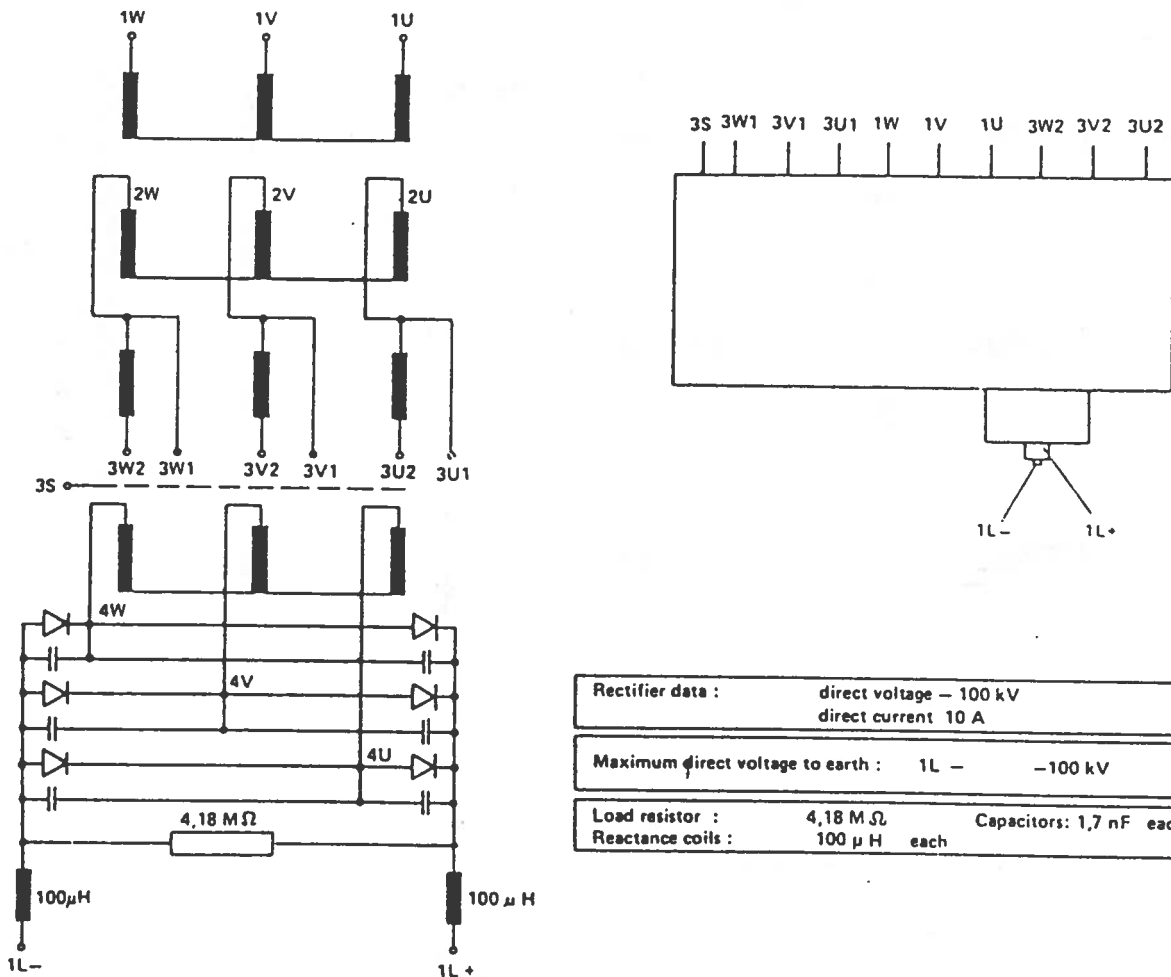
RECTIFIER - TRANSFORMER AGGREGATE

Transformer Type TSAJ 5644 + TSAJ 6049		No. N 344 382 - 383		Year of manuf. 1985		Specification IEC 76, special stipulations	
Rated power 1268 + 1136		kVA		Kind of transf. PT		Voltage class	
Vector - group symbol Yy0+Yiii0		Short - time duty *)		Rated Frequency 50 c/s		Cooling method ONAN	
Position		Voltage **)		Current		Impedance voltage	
		TSAJ 5644		TSAJ 6049			
		20 000 / 1116 V		1000 / $\sqrt{3}$ / 80 000 V		36,6 / 656 A	
						656 / 8,2 A	
						7,6 %	
Stabilizing winding		V		A		Upper limit of overcurrent kA	
						Duration of short - circuit 1,5 s	
Tank full vacuum resistant				Total mass 17 t		Mass of insul oil 6,2 t	
Transport on Uis 632				Untanking mass 6,3 t		Transportation mass 17 t	
Type of oil				Temp. rise oil / winding 60 / 65 K		Ambient temp. max. 40 °C	
Electrostatic shield: 3S (Test voltage 10 kV a.c. voltage) directly earthed at the plant							

*) Load cycle: 10s full load , 90 s zero load

**) 10 % continuous over - excitation is permissible

o) referred to 1136 kVA



Rectifier data :	direct voltage - 100 kV
	direct current 10 A
Maximum direct voltage to earth :	1L - -100 kV
Load resistor :	4,18 MΩ
Reactance coils :	100 μ H each
	Capacitors: 1,7 nF each

Fig. 4.2 : Système transformateur et redresseur

4.3 Thyristors et filtre

Le système de thyristors (Fig. 4.3) connecté au transformateur de réglage permet lorsque ceux-ci sont passant, d'obtenir la pleine tension à la partie survolteur. Les thyristors sont reliés à une self de filtrage pour diminuer les harmoniques rejetées dans le réseau.

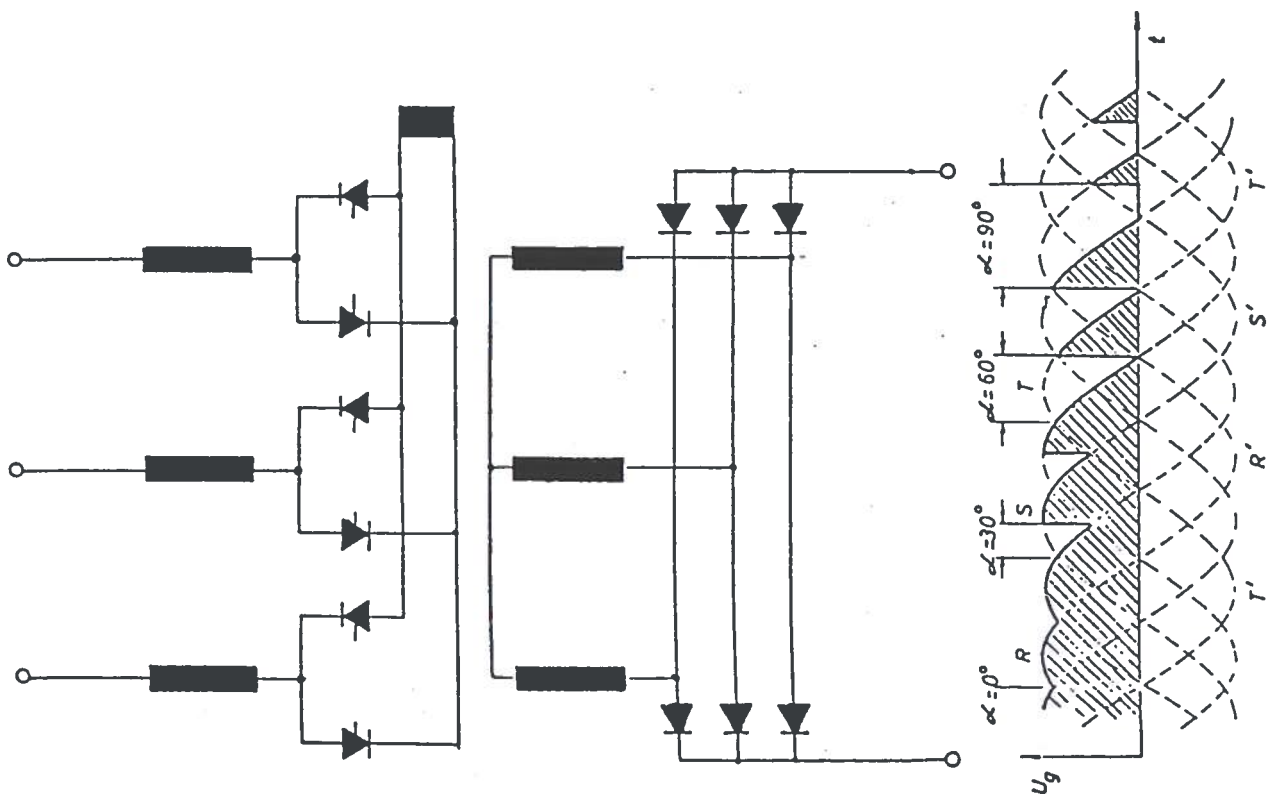


Fig. 4.3 : Système thyristors

Le filtre permet un lissage de la tension de sortie du redresseur. Il est composé d'un banc de capacité de $10\mu\text{F}$ et d'une résistance série de 55Ω .

4.4 Crowbar

Cet élément d'une grande importance dans l'installation permet la mise à zéro de la tension aux bornes de la tétrode de régulation en cas de défectuosité de celle-ci.

Le système est composé de 12 Ignitrons, avec une capacité de décharge de 15 Coulombs par Ignitrons. Ceux-ci sont montés série-parallèle 2 par 2. Un système de conditionnement est employé pour le chauffage de l'anode et le refroidissement de la cathode. Ce système permet l'évaporation du mercure sur l'anode et sa condensation sur la cathode, si ce conditionnement est défaillant le mercure redevient en phase vapeur et la tension de tenue s'abaisse d'une façon importante.

Le déclenchement du système se fait par des transformateurs d'impulsion reliés aux gâchettes des ignitrons.

Le système est commandé par fibre optique de telle façon à éviter des couplages avec le reste de l'installation.

Trois signaux permettent le déclenchement :

- un signal de test
- un signal commandé par un courant de retour de plus de 10A
- un signal d'une mesure sur le courant de sortie de la tétrode et qui devient actif si celui-ci est d'une durée et d'une amplitude définie

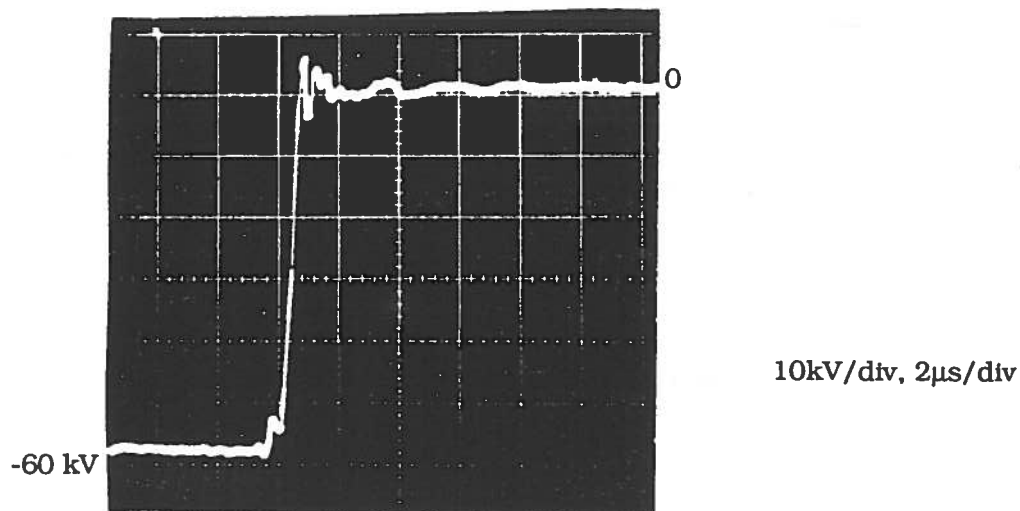


Fig. 4.4 : Coupure d'une tension de 60kV

4.5 Régulateur et modulateur

Le régulateur est la pièce principale du réglage de la tension cathodique du gyrotron.

Une tétrode (ABB CQK 200-4A) refroidie par un circuit d'eau déionisée et dont la tenue de tension (150 kV) est assurée par une cloche pressurisée contenant du SF₆, est placée sur un support isolé à 150kV.

Cette tétrode est insérée en série entre l'alimentation haute-tension et le gyrotron. Elle fait office d'interrupteur rapide et de régulateur de tension.

Un transformateur isolé, équipé de deux enroulements secondaires, a pour but le chauffage de la cathode de la tétrode et l'alimentation des tensions de grille de contrôle et de grille écran ainsi que des ventilateurs de refroidissement.

Du fait de l'isolation du système, toutes les commandes se font par fibre optique (contrôle de la présence des tensions auxiliaires, commande de la grille de contrôle).

Le modulateur fournit la tension à la grille du gyrotron. Il est basé sur le principe du diviseur de tension résistive, on dévie une partie de l'énergie de l'alimentation de la cathode pour alimenter la grille. Le diviseur est composé d'une résistance et d'une triode commandée par fibre optique.

Une alimentation supplémentaire permet de polariser négativement la grille par rapport à la cathode avec pour effet le blocage du faisceau d'électrons.

Cet ensemble est également placé sur un support isolé à 150kV et alimenté par un transformateur d'isolation pour la fourniture en énergie de l'ensemble.

4.6 Phénomènes transitoires et rejet d'harmoniques dans le réseau

4.6.1 Phénomènes transitoires

Dans ce paragraphe, nous analyserons les phénomènes provoqués par l'enclenchement et le déclenchement de la tétrode de régulation, ceci à l'entrée du régulateur et sur la cathode du gyrotron.

Nous allons donner un schéma équivalent simple de l'installation, permettant de jeter les bases d'une étude plus approfondie qui prendrait alors beaucoup plus de temps et une parfaite connaissance de la valeur numérique des éléments.

L'analyse depuis l'alimentation permet les réflexions suivantes :

L'alimentation ne doit pas chuter de plus de 5kV (5%, 100kV) avec un courant de 10A on considère alors une résistance de sortie de 500Ω .

Le filtre est connu, il est suivi d'une résistance d'adaptation et d'un câble de 20m (137pF/m, 247nH/m). A l'autre extrémité du câble on trouve une nouvelle résistance d'adaptation.

Le crowbar est connecté à ce point. Lors de son déclenchement, les résistances d'adaptation permettent d'éviter des réflexions dans le câble, une capacité permet l'amortissement des surtensions.

La tétrode est aussi connectée à ce point. Elle est simulée par un interrupteur suivi de l'impédance interne du tube. Cette valeur est donnée en fonction de la différence de tension aux bornes du tube et le courant régulé ($\Delta U = 10\text{kV}$ $I_a = 10\text{A}$), elle vaut $1\text{k}\Omega$.

La sortie de la tétrode est reliée par un câble de 10 mètres au gyrotron. L'on termine le circuit par la valeur de l'impédance de la cathode qui est donnée au paragraphe 1.3.5.

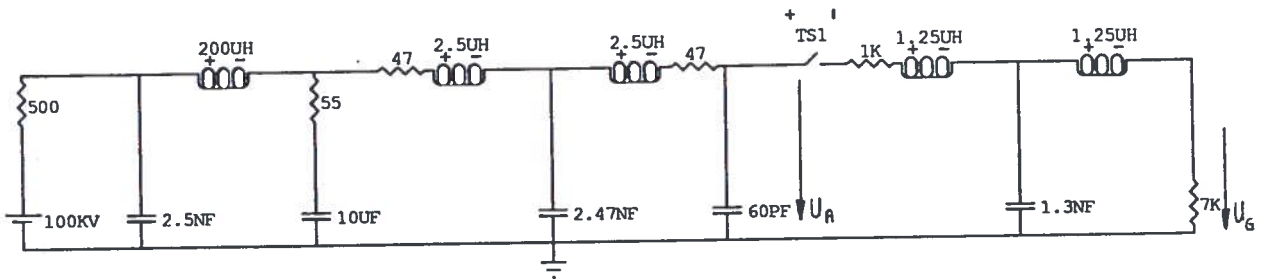
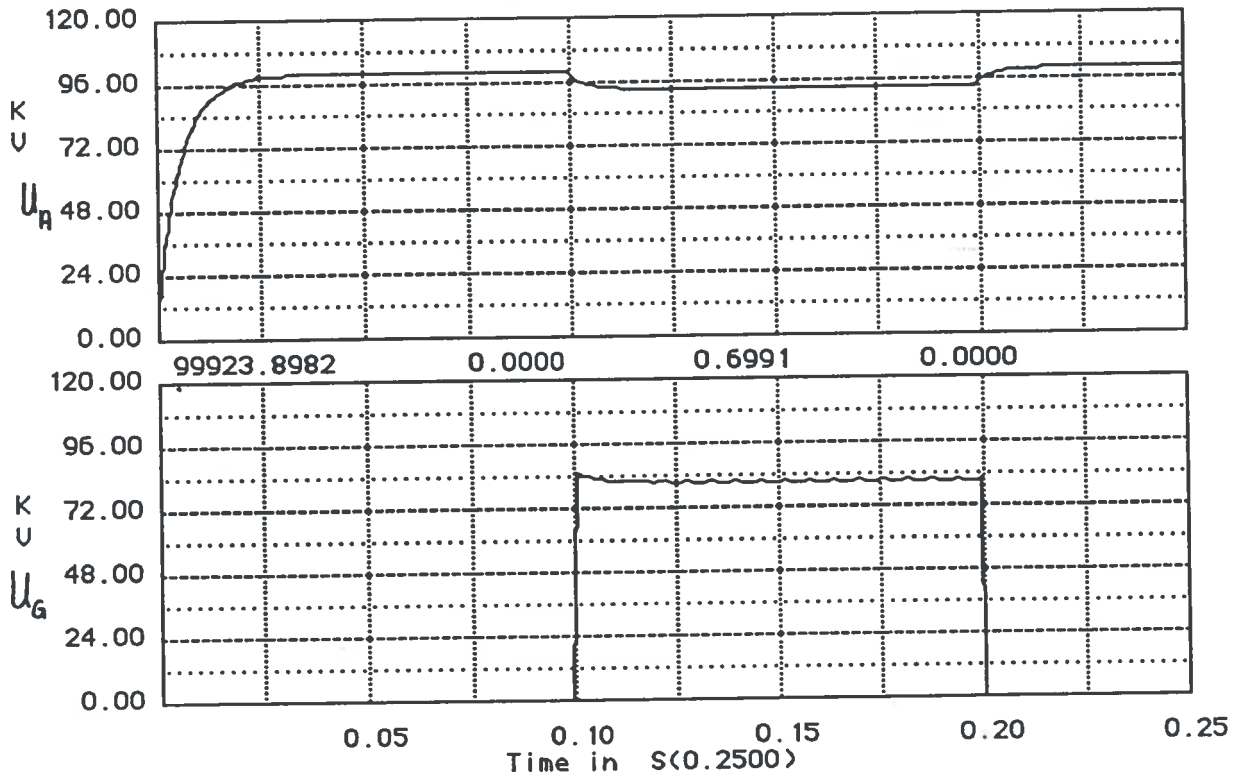


Fig. 4.5 : Schéma équivalent

Ce schéma même simple ne peut pas être étudié par une méthode manuelle de calcul (transformée de Laplace du n-ième ordre). Il faut avoir recours aux moyens informatiques avec un programme de calcul de circuit (Micro-capsII) pour l'analyse de ce circuit.



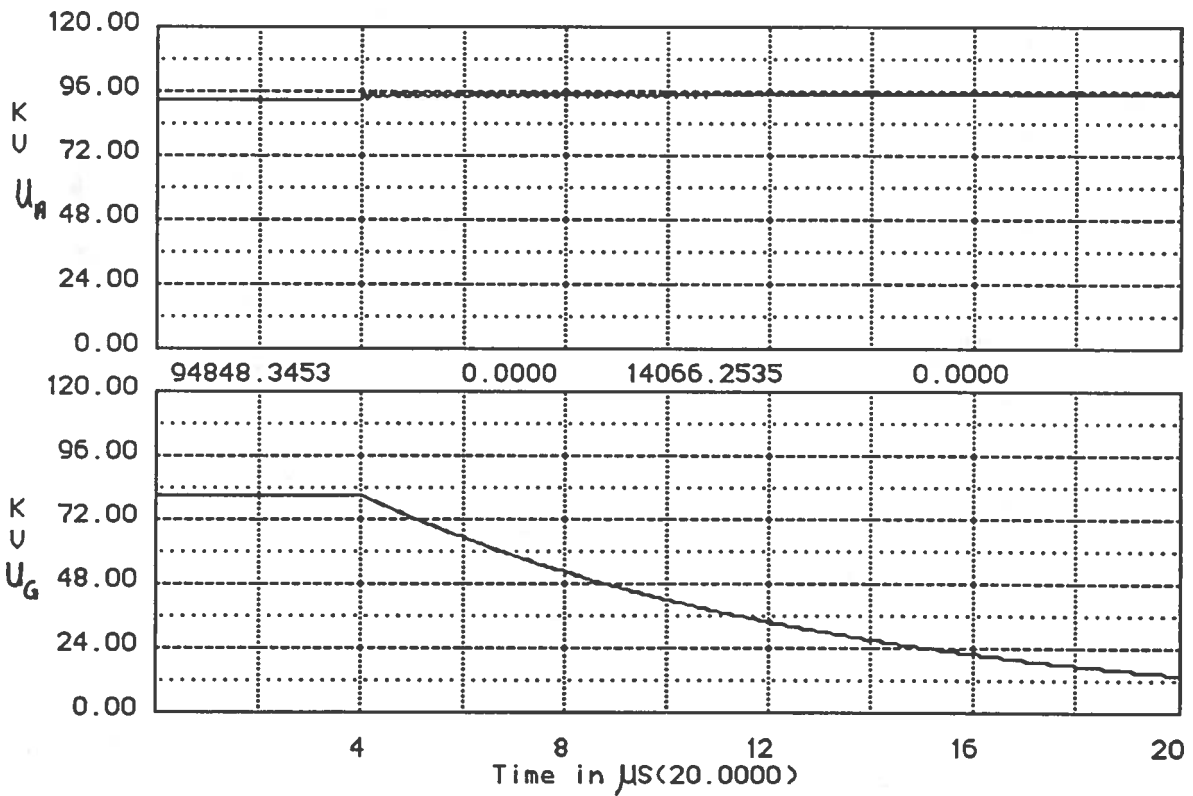
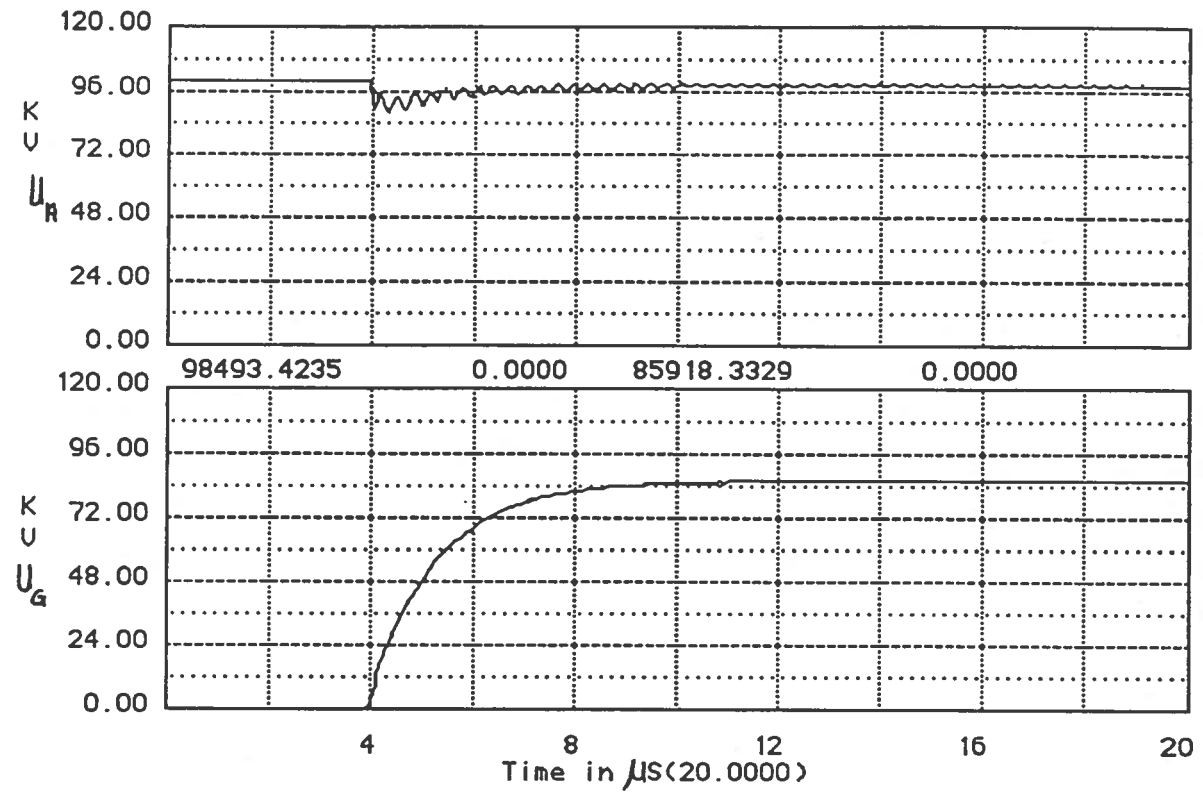


Fig. 4.6 : Résultats calculés

4.6.2 Rejet d'harmoniques dans le réseau

Ce problème est d'une très grande importance pour notre installation qui se trouve au centre de l'EPFL. Elle pourrait créer des perturbations au sein du réseau d'alimentation avec des effets très gênants pour les ordinateurs, équipements scientifiques, éclairage des salles de cours, etc. Ce problème a été traité avec soin par le service électrique en collaboration avec le CRPP ainsi que le fournisseur du système d'alimentation. Celui-ci nous fournit les composantes d'harmoniques aux bornes d'entrée du transformateur (20kV~) pour différents angles d'allumage des thyristors ainsi que le montage ou non d'une self de lissage reliée aux thyristors et formant le point central du montage étoile (voir Fig. 4.3).

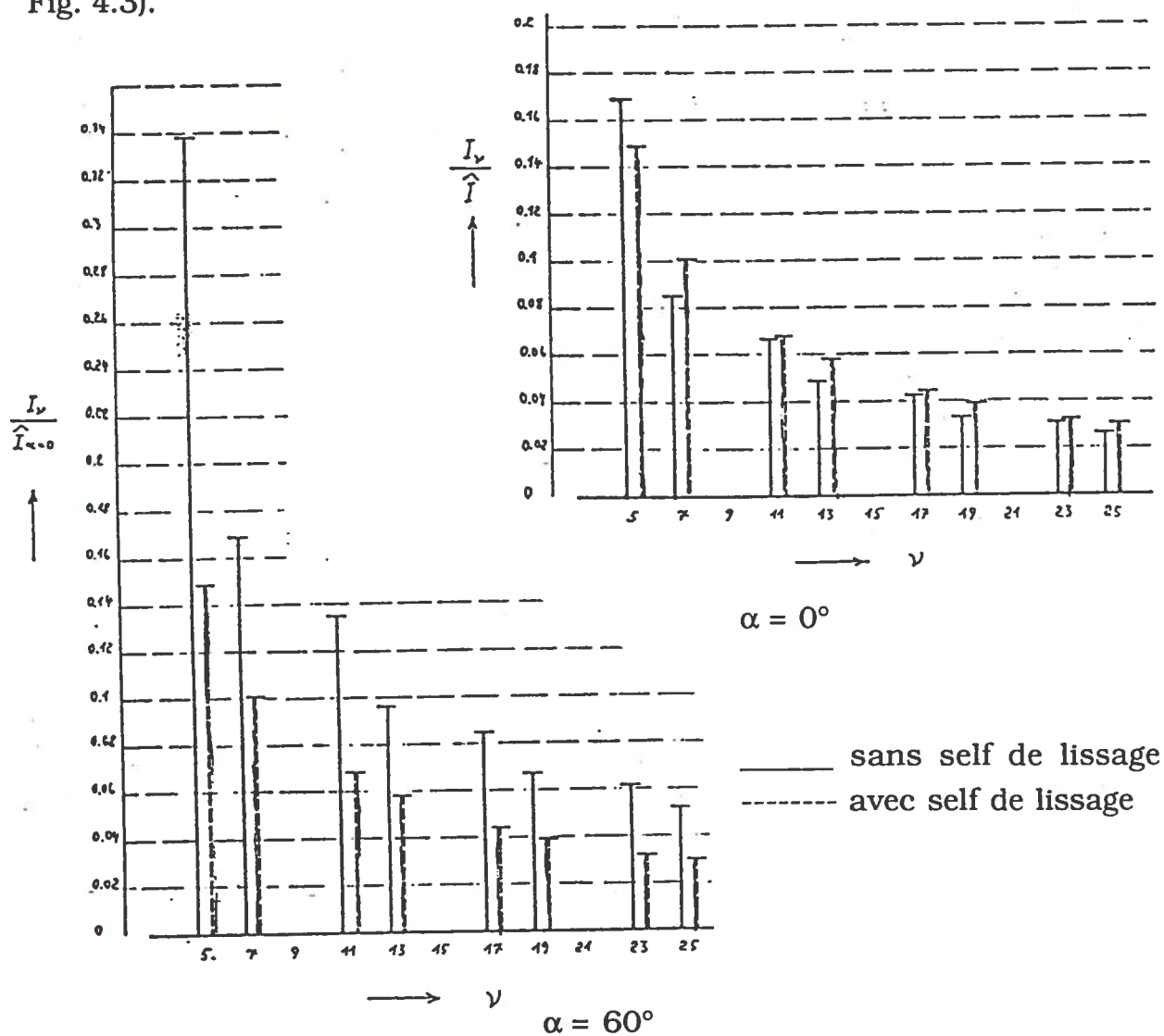


Fig. 4.7 : Harmoniques avec différents angles d'allumage

Avec les valeurs de perturbations connues, il est possible, en connaissant les impédances du réseau, de chiffrer les valeurs des harmoniques à différents niveaux du système d'alimentation de l'EPFL.

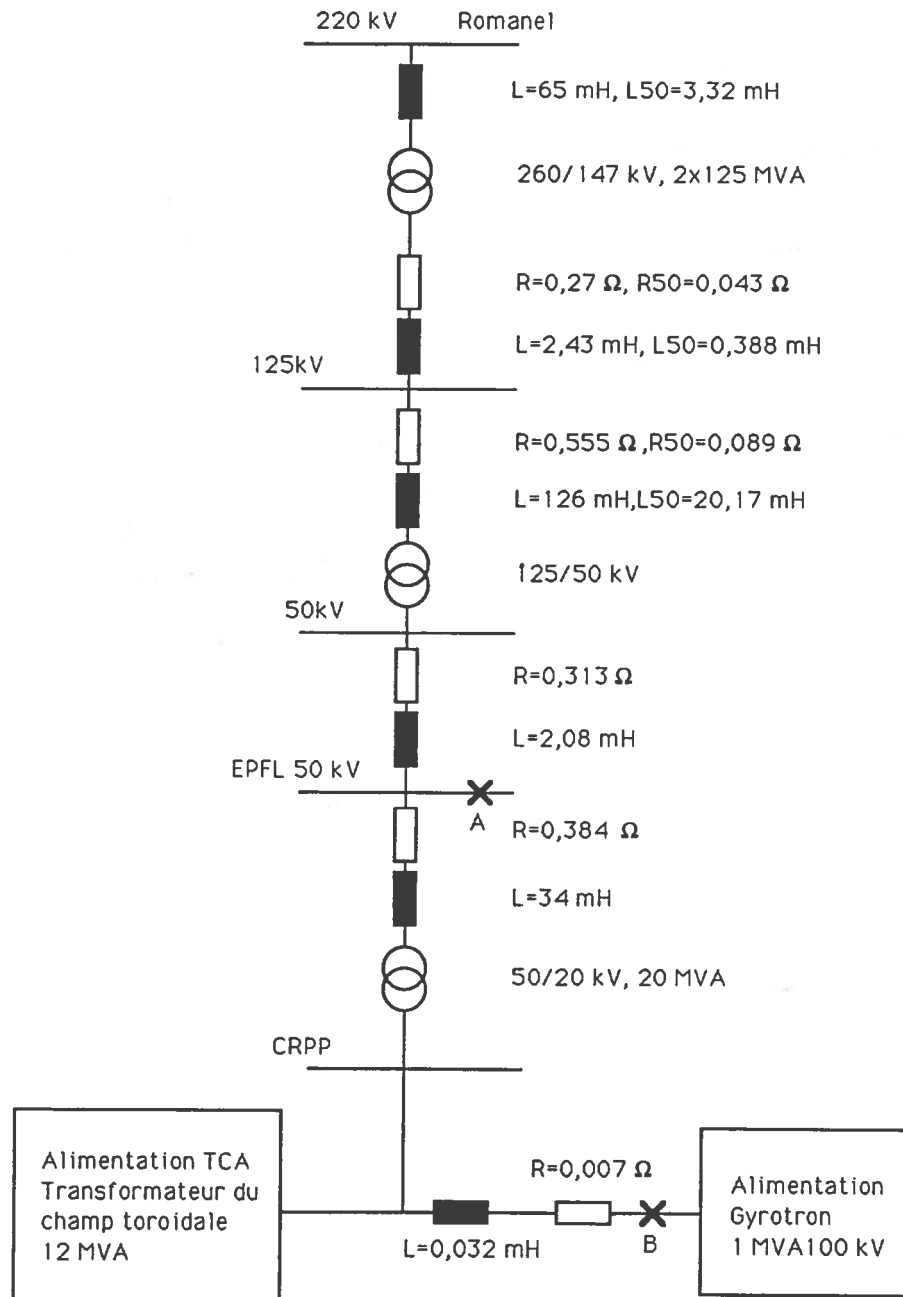


Fig. 4.8 : Schéma des impédances du réseau EPFL

Selon le schéma de la figure 4.8, l'impédance du réseau au point A est égale à:

$$Z_{50} = 0.445\Omega + j 8.15 \Omega$$

Entre A à B, nous avons le transformateur 50kV/20kV avec l'impédance de l'enroulement 50kV $Z = 0.192\Omega + j5.74\Omega$ et l'enroulement 20kV $Z = 0.031\Omega + j 0.854\Omega$. L'impédance du câble d'alimentation est $Z = 0.0072 \Omega + J 0.01\Omega$.

Nous avons la puissance 1MW (100kV- , 10A) qui donne au point A, perte négligée, un courant de 11.6A.

La valeur de l'harmonique 5 est égale, selon la figure 4.7 à $0.15 \cdot 11.6A = 1.74A$.

L'impédance au point A pour l'harmonique 5 est $X_L = 8.15\Omega \cdot 5$ et $R = 0.445\Omega$ ce qui nous donne une tension de $(0.445 + J 40.75) \cdot 1.74A = 70.9V$ qui est égale à 0.14% de la tension nominale (50 kV). Le maximum pour cette harmonique est de 0.65% (voir figure 4.9).

Le calcul est identique pour la 7ème harmonique et donne 0.13% avec un maximum de 0.6% de la tension nominale (50kV)

Taux maximal prévisible d'harmonique
de tension dans les réseaux de distribution
en pour-cent de la tension nominale

Taux admissible d'harmonique de tension
d'appareils et d'installations en pour-cent
de la tension nominale

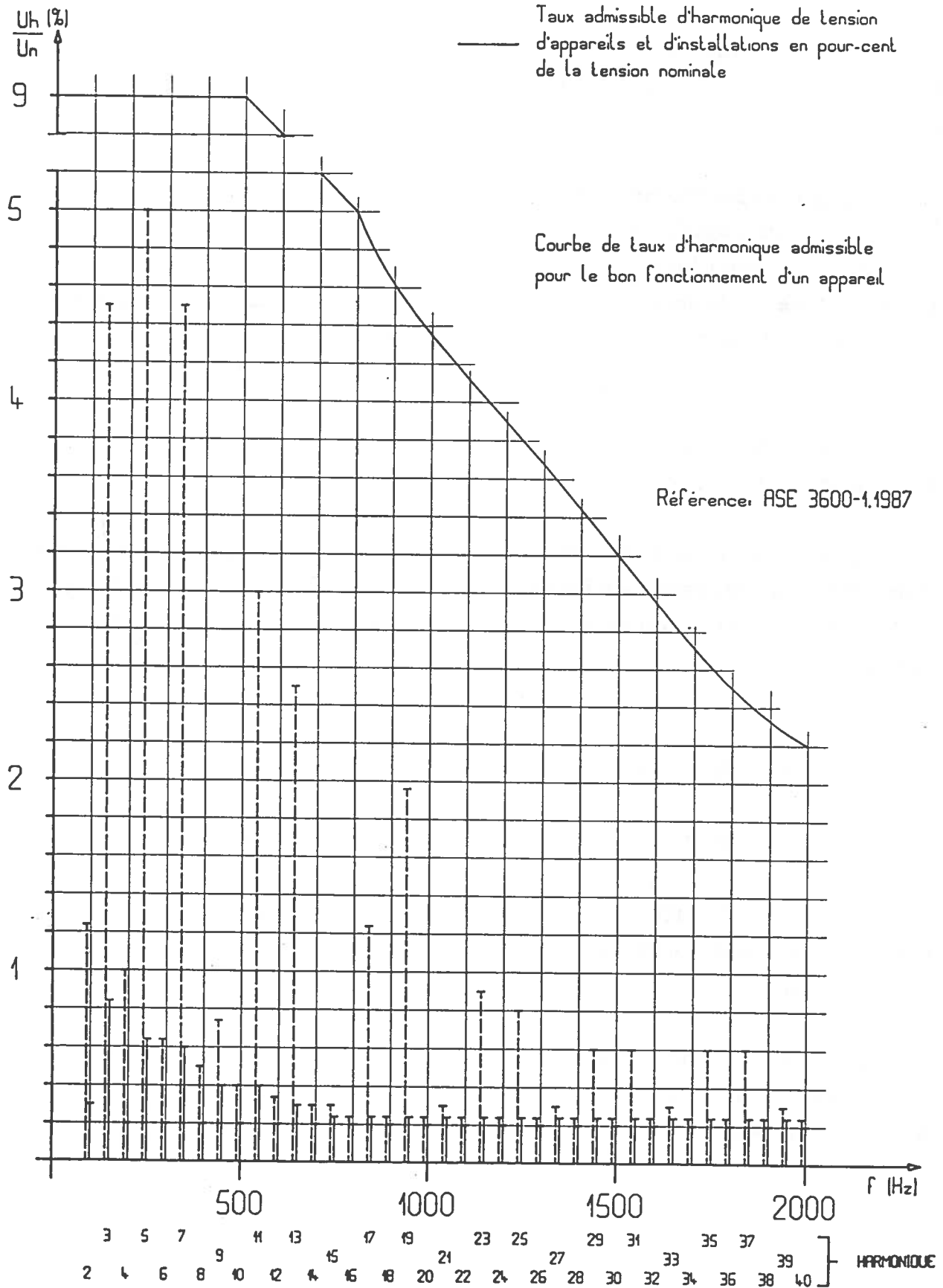


Fig. 4.9 Valeur des maxims des harmoniques

4.7 Système de commande et de sécurité

Suite à la conception de l'installation actuelle, on émettra certaines idées pour la reconstruction d'un nouveau système de commande et de contrôle.

Chaque sous-système tel que le refroidissement (eau déionisée pour la tétrode de régulation), l'équipement AC-DC, le système SF₆, le régulateur, le modulateur, le crowbar sera équipé d'une mise en route par **un signal de télécommande** depuis le poste de commande. **Un signal de contrôle** indiquera si ce sous-système présente un fonctionnement correct.

L'enclenchement de l'installation se fera depuis le poste de commande afin d'éviter une mise en route compliquée.

Le système de sécurité doit assurer la protection du personnel en cas d'une intervention dans des locaux haute-tension ainsi que la signalisation des alarmes et la coupure du système en cas de défaillance d'un sous-système.

4.8 Connexion des masses et de la terre

La connexion des masses doit-être faite avec grand soin en évitant des boucles qui ont, en règle générale, une fâcheuse tendance à provoquer des perturbations importantes dans le système. L'alimentation doit posséder une sortie isolée par rapport à la terre ceci pour permettre la séparation entre le réseau et le gyrotron.

La connexion des terres doit se faire avec un système en étoile, le point central de l'étoile étant lui-même relié à une terre centrale (bâtiment, réseau).

CONCLUSION

Le but de ce travail a été d'exposer les principes ainsi que les problèmes fondamentaux liés à l'alimentation des gyrotrons. Nous avons jeté également les bases d'un travail plus méthodique et plus poussé qui devra être exécuté dans le futur pour la modification et l'amélioration du système actuellement employé au CRPP.

La mise en évidence de la difficulté d'élaborer le schéma équivalent d'un gyrotron, va nous forcer à faire un effort particulier pour l'obtention de mesures précises afin de créer un modèle des impédances d'un gyrotron plus proche de la réalité.

Le cahier des charges que nous avons élaboré, permet de fixer les paramètres principaux des trois alimentations requises. Pour une demande d'offre, il comporterait beaucoup plus de points de détails, que nous avons volontairement omis dans ce rapport.

L'étude des différents systèmes d'alimentation a démontré que la technique actuelle permet, avec des manières différentes, d'obtenir le même résultat pour le problème qui nous concerne.

Nous n'avons pas abordé la question financière. C'est après une étude plus approfondie et l'avis de constructeurs que nous serions à même de chiffrer le coût d'une telle installation. Cette étude permettrait également de définir le type de système à utiliser.

La pratique a montré que les problèmes, survenus lors de la mise en fonction de telle installation, proviennent plutôt du mauvais fonctionnement de l'alimentation que du comportement des gyrotrons...

Le crowbar est un élément très délicat à mettre en oeuvre, sa tenue de tension dépend fortement d'un bon conditionnement.

Les déclenchements intempestifs dus au bruit environnant peuvent poser de sérieux problèmes.

La tétrode de régulation avait, dans certains régimes de fonctionnement, des comportements oscillatoires qui sont maintenant maîtrisés.

Le choix d'un système en 1984 a posé d'importants problèmes au sein du CRPP.

Le prix était un facteur important dans la décision d'achat et a fait que le choix s'est finalement porté sur une offre bon marché, qui par la suite a montré que l'entreprise engagée dans la réalisation de ce système n'avait pas les compétences nécessaires.

Nous pouvons dire de manière catégorique que d'importantes malfaçons ont été exécutées.

La réalisation d'un nouveau système capable de fournir une tension de 80kV avec un courant de 50A en régime pulsé est en cours d'élaboration depuis mars 1989. Il reste encore à exécuter le modulateur ainsi qu'un nouveau système de commande et de contrôle.

Nous terminerons cette conclusion avec quelques remarques générales:

Le développement de la recherche de la fusion nucléaire dépend de manière prépondérante des progrès réalisés par la technologie.

Le développement de gyrotrons, comme décrit dans ce rapport, n'aurait pas pu être possible voici une douzaine d'années, la technique des tétrodes de commutation avec de telles puissances n'étant pas encore suffisamment développée.

L'idée originale d'employer le gyrotron comme émetteur de communication interstellaire a récemment été émise. Elle ouvre ainsi de nouveaux champs d'application à ce magnifique outil!