

# GENERATEUR HAUTE-TENSION

## I / DEFINITION DU CAHIER DES CHARGES

Le générateur aura pour rôle de fournir à un ou plusieurs tubes l'énergie électrique nécessaire à son fonctionnement.

Nous avons vu au chapitre précédent que le tube nécessite pour son fonctionnement

- Une tension élevée pour l'accélération des électrons (40 à 150 kV) A venant frapper l'anode.
- Un courant de chauffage filament pour l'émission thermoélectronique des électrons (5 A sous 15 V environ).
- Une alimentation électrique pour le fonctionnement du moteur de rotation d'anode (s'il y a) (nécessite au démarrage une puissance de 30 kW).

Ce générateur devra être capable de délivrer un courant tube compatible avec le nombre d'électrons émis par le filament de tungstène. Ce courant pourra atteindre l'ampère.

Le générateur devra délivrer les constantes définies par l'utilisateur à savoir la tension, l'intensité et le temps d'exposition. Le générateur devra asservir le courant de chauffage du filament, ainsi que le rapport de transformation de l'autotransformateur pour obtenir les constantes choisies. (Nous avons vu précédemment que le courant tube dépendait à la fois du chauffage filament et de la tension tube).

Le générateur ne devra pas autoriser à l'utilisateur des constantes ne correspondant pas aux caractéristiques de l'abaque de charges instantanées.

Le générateur devra assurer la préparation du tube avant d'appliquer à ce dernier la haute-tension. (temps pour le chauffage du filament et pour la mise en rotation de l'anode).

Le générateur devra pouvoir puiser son énergie électrique soit du réseau de distribution E.D.F. ; soit d'accumulateurs (appareils mobiles).

Ce cahier des charges peut-être complété ainsi pour des installations sophistiquées :

- Posemètre assurant le temps d'exposition correct
- L'alimentation des accessoires (caméra photographique, caméra de cinéma)
- La synchronisation de l'émission X avec les accessoires précités
- Un intégrateur de charge évitant toute surcharge thermique au tube

## II / RAPPEL SUR LE COURANT ALTERNATIF

Le réseau E.D.F. distribue à l'utilisateur un réseau de tensions triphasées ayant pour valeur entre phases  $V_i = V \sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_i)$  avec  $\varphi_i = 0, 2\pi/3$  et  $4\pi/3$ , et  $V = 380$  v.

Les tensions entre phase et neutre ont pour valeurs  $U_i = U \sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi'_i)$  et l'on peut démontrer facilement que  $U = V/\sqrt{3} = 220$  v et que  $\varphi'_i = \varphi_i + \pi/6$  en utilisant les diagrammes de Fresnel.

En courant alternatif on exprime les valeurs de tension et d'intensité en valeur efficace, les tensions entre phases ont pour valeur efficace 380 V, les tensions entre phase et neutre ont pour valeur efficace 220 V. Le rapport entre tension crête sur tension efficace est égal à  $\sqrt{2}$ . Il est à noter que pour un réseau triphasé équilibré les sommes  $V_1+V_2+V_3$  et  $U_1+U_2+U_3$  sont égales à zéro.

**ATTENTION** : Si l'on exprime en valeurs efficaces les valeurs caractéristiques d'un appareil alimenté par le réseau de distribution, on exprime pour un générateur la tension en valeur crête et l'intensité en valeur moyenne.

## III / RAPPEL D'ELECTROMAGNETISME

Le flux d'induction magnétique à travers un circuit est égal  $\Phi = N.B.S.\cos(\alpha)$

$N$  = nombre de spires

$B$  = induction magnétique en Tesla

$S$  = surface d'une spire

$\alpha$  = angle entre  $B$  et la demi-normale

La force électromagnétique induite est égale  $e = -d\Phi/dt$

### Cas du transformateur :

Le transformateur est composé de deux enroulements sans aucun point commun composés pour le primaire de  $n_1$  spires et pour le secondaire de  $n_2$  spires. Soit la tension  $u_1$  au bornes du primaire, la tension aux bornes de chaque spire est égale à  $u_{s1} = u_1 / n_1$ .

Soit la tension  $u_2$  au bornes du secondaire, la tension aux bornes de chaque spire est égale à  $u_{s2} = u_2 / n_2$ .

Au primaire chaque spire va être traversé par un flux magnétique  $\Phi_1$  tel que  $-d\Phi_1/dt = u_{s1}$

Au secondaire chaque spire va être traversé par un flux magnétique  $\Phi_2$  tel que  $-d\Phi_2/dt = u_{s2}$

Le flux magnétique à travers le circuit magnétique (c'est à dire l'ensemble des plaques métalliques composant le "noyau de fer") du transformateur est conservatif.

**Conclusion** :  $\Phi_1 = \Phi_2$  et par conséquent  $u_{s1} = u_{s2}$  ; et  $u_2 = n_2/n_1.u_1$ .

L'intensité parcourant le circuit secondaire va dépendre de la charge qui lui est associée.  
 $u_2 = Z_2 \cdot i_2$  (loi d'ohm en courant alternatif avec  $Z_2$  représentant l'impédance de la charge).

La puissance fournie par le primaire est égale à la puissance consommée par le secondaire.

**Conclusion** :  $P_1 = P_2$  ;  $P_1 = u_1 \cdot i_1$  ;  $P_2 = u_2 \cdot i_2$  ;  $u_1 \cdot i_1 = u_2 \cdot i_2$  ;  $i_1 = i_2 \cdot u_2/u_1$  ;  $i_1 = i_2 \cdot n_2/n_1$

On appelle rapport de transformation ; le rapport  $n_2/n_1$  ; si le transformateur est élévateur de tension  $n_2/n_1 > 1$  ; si le transformateur est abaisseur de tension  $n_2/n_1 < 1$ . Le transformateur est un composant utilisé très fréquemment dans toutes les applications nécessitant des changements de tension .

Ceci est dû d'une part à sa facilité d'utilisation, d'autre part à son rendement qui s'approche de 100 %. Le transformateur permet un isolement total entre le circuit primaire et le circuit secondaire.

### ATTENTION :

**Un transformateur ne peut travailler qu'en courant alternatif. En effet le courant continu engendrerait un flux magnétique constant qui ne pourrait induire au secondaire une tension. ( $d\Phi/dt = 0$ ). De plus l'application d'une tension continue engendrerait un courant très élevé (la résistance de la bobine étant de quelques ohms) entraînant la destruction par échauffement du bobinage primaire.**

### Cas de l'autotransformateur :

L'autotransformateur à la différence du transformateur est composé d'une seule bobine. Le circuit "primaire" est composé de  $n_1$  spires, le circuit "secondaire" de  $n_2$  spires avec  $n_2$  pouvant être supérieur ou inférieur à  $n_1$ . Il en résulte les mêmes résultats que précédemment.

L'intérêt de l'autotransformateur réside dans son prix moins élevé que celui du transformateur. La grosse différence vient du fait que les circuits d'entrée et de sortie ne sont pas isolés entre eux.

Dans un générateur haute tension on utilise l'alternostat qui est en fait un autotransformateur permettant de faire varier le rapport de transformation. (tout simplement en promenant sur le bobinage un curseur)

### Exercices :

Désirant obtenir une tension crête de 141 kV aux bornes du secondaire d'un transformateur alimenté par une tension de 220 V (efficace), calculer le rapport de transformation nécessaire.

Calculer le courant traversant le circuit primaire, pour un courant secondaire de valeur instantanée de 1000 mA.

Le transformateur ci-dessus est alimenté par l'intermédiaire d'un autotransformateur (alternostat) lui-même raccordé au 220 V. Calculer la gamme de rapports de transformation nécessaires pour obtenir au secondaire du transformateur une tension crête comprise entre 50 kV et 120 kV.

## **IV / INTERET DES RESEAUX TRIPHASES PAR RAPPORT AUX RESEAUX MONOPHASES**

Dans l'exercice précédent notre générateur haute-tension branché sur le réseau monophasé 220 Volts demandait pour un courant secondaire de 1000 mA, un courant primaire de 454 Ampères. Cette valeur est très élevée et l'on peut réduire la valeur de ce courant en utilisant une distribution triphasée.

### **4.1 / Montage monophasé**

$$\text{Puissance fournie } P = U.I.\cos(\varphi) \text{ avec } I = U/Z$$

**Nota** : U et I sont des valeurs efficaces, formule valable pour des ondes de tension et de courant sinusoïdales.

### **4.2 / Cas particulier des tubes à rayons X**

L'onde de courant n'est pas purement sinusoïdale et on ne peut plus appliquer la formule ci-dessus. La puissance fournie au secondaire est égale à  $P_s$  ;  $P_s = 0,74 U_{\text{tube}} \cdot I_{\text{tube}}$  (formule empirique) (avec  $U_{\text{tube}}$  qui est égale à la tension crête et  $I_{\text{tube}}$  qui est égale au courant moyen).

La puissance fournie par le primaire est égale à  $U \cdot I$  (si l'on admet que l'onde de courant est pratiquement sinusoïdale) (avec U tension efficace [ 220 V ], I intensité efficace).

### **4.3 / Montage triphasé**

La puissance fournie par un montage triphasé équilibré s'exprime par la formule suivante :  
 $P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cos(\varphi)$

Avec V tension entre phases ( $V = 380 \text{ v}$ )  
I courant ligne  
 $\varphi$  déphasage tension / courant

Cette formule est valable dans le cas d'une charge composée de 3 impédances identiques montées soit en triangle, soit en étoile.

#### **4.3.1 Montage étoile**

$$P = 3 \cdot U \cdot I \cos(\varphi) = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cos(\varphi) \text{ avec } I = U/Z$$

$$P = (V^2/Z) \cdot \cos(\varphi)$$

### **4.3.2 / Montage triangle**

$$P = 3 \cdot V \cdot J \cos(\phi) \text{ avec } J = V / Z$$

$$J = I / \sqrt{3} \text{ (et non } I/2 \text{ car les courants } J \text{ ne sont pas en phase)}$$

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cos(\phi)$$

$$P = 3 \cdot (V^2/Z) \cdot \cos(\phi)$$

**Nota :** La puissance délivrée par un montage triangle est trois fois supérieure à celle d'un montage étoile ( les impédances  $Z$  étant identiques)

### **4.3.3 / Comparaison montage monophasé - triphasé**

A puissance identique le courant ligne sera 3 fois plus faible en montage triphasé qu'en montage monophasé. (valable dans le cas d'une charge composée de 3 impédances identiques montées soit en triangle, soit en étoile)

### **4.3.4 / Cas particulier du tube à rayons X**

Lors de l'utilisation d'un générateur 6 crêtes ou 12 crêtes, on peut admettre que le courant traversant le tube a une valeur constante  $I_{\text{tube}}$ .

Contrairement à une charge composée de trois impédances identiques, à un instant  $t$ , seules deux phases au lieu de trois sont parcourues par un courant dont la valeur absolue est égale à  $I_{\text{tube}}$  multiplié par le rapport de transformation.

(la phase possédant la tension la plus positive, et la phase possédant la tension la plus négative pour un redresseur double parallèle).

Sachant que la tension moyenne est égale à 257 volts ( $1,17 \cdot U$ ) lors de la conduction d'une phase, la puissance fournie par cette phase pendant sa période de conduction est égale à  $P_1 = 1,17 U \cdot I_{\text{tube}} \cdot n$ ;  $n$  étant le rapport de transformation. Sachant que deux phases conduisent en même temps  $P_T = P_1 + P_2 = 2 \cdot 1,17 U \cdot I_{\text{tube}} \cdot n$ ;  $P_T = 2,34 \cdot U \cdot I_{\text{ligne}}$ .

Le montage en monophasé nous donnait une puissance  $P$ ;  $P = U \cdot I_{\text{ligne}}$ . Pour une puissance identique un générateur triphasé 6 crêtes nécessite un courant efficace ligne 2,34 fois plus faible que pour un générateur monophasé à deux crêtes.

Attention dans le cas d'un générateur 6 crêtes le courant ligne est constant (valeur efficace = valeur moyenne = valeur crête) alors que dans le générateur à deux crêtes le courant ligne est une sinusoïde (le courant crête est égal à 2 fois le courant efficace, le courant moyen est égal à 0,64 fois le courant crête).

Pour une puissance identique un générateur triphasé 6 crêtes nécessite un courant crête ligne 3,30 fois plus faible que pour un générateur monophasé à deux crêtes

### **Exercices :**

En utilisant un réseau triphasé calculer la valeur du courant ligne  $I$  nécessaire pour obtenir une puissance identique à celle fournie précédemment ( $I_s = 1000 \text{ mA}$  et  $U_s = 141 \text{ kV}$  crête) avec le transformateur monophasé.

## **V/ INTERET DES RESEAUX TRIPHASES PAR RAPPORT AUX RESEAUX MONOPHASES**

### **L'utilisation d'un réseau triphasé par à un réseau monophasé permettra :**

- De diminuer le courant ligne dans chaque conducteur . Pour une puissance identique un générateur triphasé 6 crêtes necessite un courant efficace ligne 2,34 fois plus faible que pour un générateur monophasé à deux crêtes.

Attention dans le cas d'un générateur 6 crêtes le courant ligne est constant (valeur efficace = valeur moyenne = valeur crête ) alors que dans le générateur à deux crêtes le courant ligne est une sinusoïde ( le courant crête est égal à 2 fois le courant efficace, le courant moyen est égal à 0,64 fois le courant crête ).

Pour une puissance identique un générateur triphasé 6 crêtes necessite un courant crête ligne 3,30 fois plus faible que pour un générateur monophasé à deux crêtes.

- D'équilibrer le réseau, chaque phase fournissant la même puissance au générateur (au lieu d'une seule phase pour le réseau monophasé).
- D'obtenir des formes d'onde (= forme de la tension appliquée au tube) s'approchant d'une forme d'onde continue (générateur à 6 ou 12 crêtes).

*avec à impeller quel moment.*

## **GENERATEUR HAUTE-TENSION**

### **V / ELEMENTS CONSTITUANTS DU GENERATEUR**

- Les éléments constitutifs d'un générateur sont les suivants :
- Autotransformateur (réglage de la valeur de haute tension).
- Transformateur haute-tension (permet la conversion basse-tension en haute tension).
- Transformateur chauffage filament associé au système de réglage du courant tube.
- Redresseurs (permet de transformer une ou plusieurs tensions alternatives en une tension continue qui sera appliquée aux bornes du tube minuterie (permet de préparer le tube, et d'imposer un temps d'exposition).

### **VI / CLASSIFICATION DES GENERATEURS**

Les générateurs sont classés en fonction de la forme d'onde (ou de tension appliquée au tube) qu'il délivre.

- Générateur à 1 crête (netits appareils tels que dentaire, portatifs...).
- Générateur à 2 crêtes (obtenues en redressant le réseau monophasé).
- Générateur à 6 ou 12 crêtes (obtenues en redressant le réseau triphasé).
- Générateur à tension constante.
- Générateur haute fréquence.
- Générateur à décharge de condensateurs.

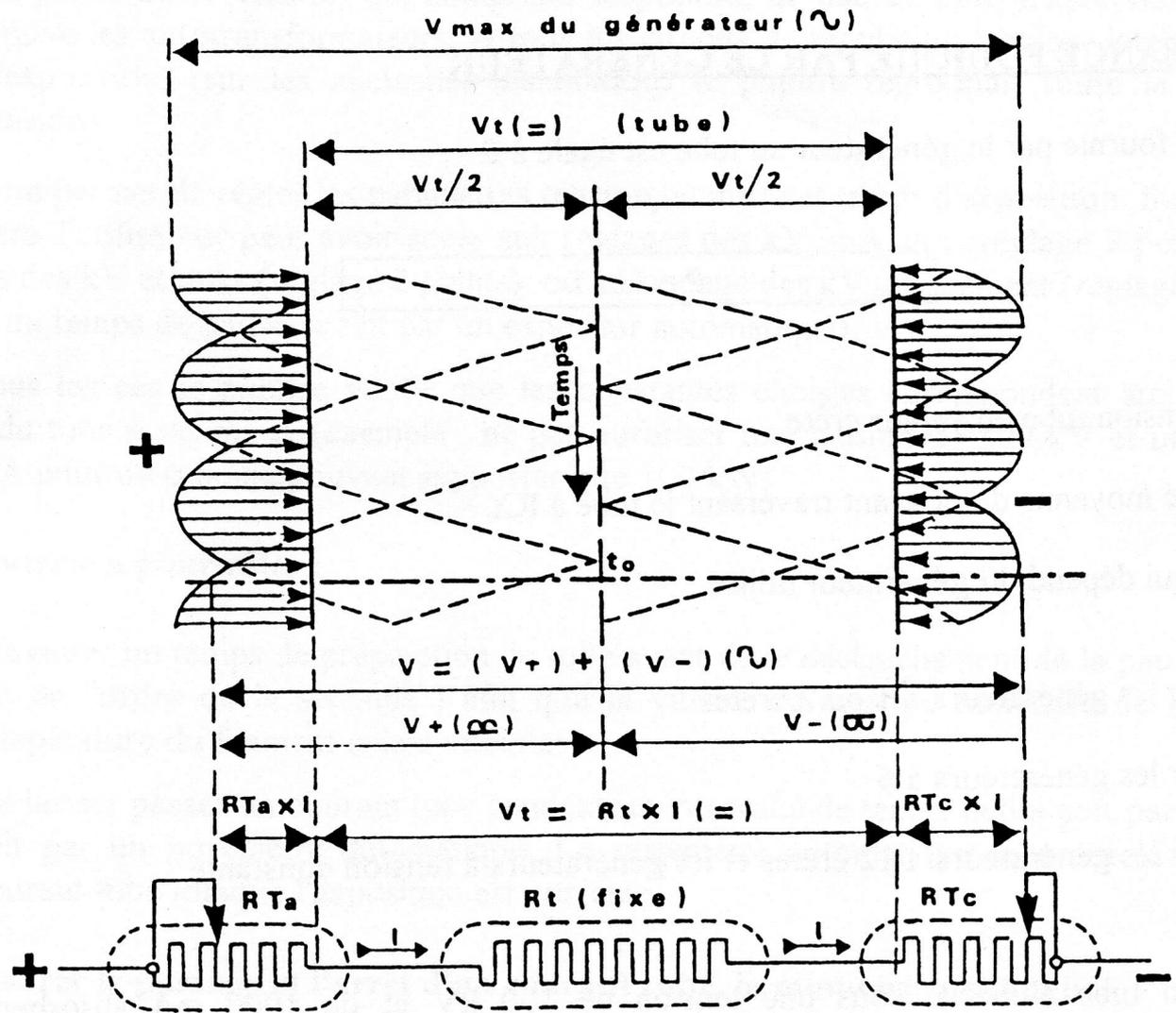
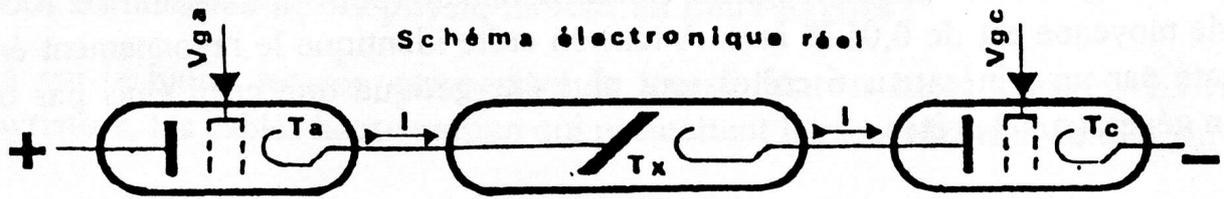
### **VII / INFLUENCE DE LA FORME D'ONDE**

Les spectres d'émission des photons X varient en fonction du générateur utilisé. La valeur de la longueur d'onde minimale du spectre est identique quelquesoit le générateur utilisé.

Sa valeur en nanomètre ne dépend que de la tension tube et est égale à  $1,24 / V$  où V est exprimée en kV. (pour une tension de 100 kV, la longueur minimale obtenue est égale 0,0124 nm). Par contre la longueur d'onde moyenne du rayonnement obtenue dépend du type de générateur utilisé.

Tableau I Tableau synoptique des schémas des générateurs de haute tension pour le radiodiagnostic

Courant alternatif	Nombre de redresseurs	SCHEMA	FORME D'ONDE	Nombre de crêtes	Ondulaton %	UTILISATIONS PRINCIPALES
MONOPHASE	0 (tube auto-à l'inducteur)			1	100%	Radiographie dentaire Radiochirurgie orthopédique Matériels transportables
	4			2	100%	Petite radiologie Radiodépistage pulmonaire
	6			6 non équi- libré	16%	- abandonné -
TRIPHASE	6			6 équi- libré	15%	Radiologie générale, osseuse et viscérale Moyenne puissance
	12 double étoile			6 symé- trique	15%	Radiologie générale, osseuse et viscérale Grande puissance
	12 étoile triangle			12 hexa- phasé	3.5%	Radiologie vasculaire Très grande puissance
	12 + 2 16- trodes			12 hexa- phasé	TENSION CONSTANTE	Radiologie vasculaire et cinéma Très grande puissance



# GENERATEUR HAUTE-TENSION

## V / ELEMENTS CONSTITUANTS DU GENERATEUR

- Les éléments constitutifs d'un générateur sont les suivants :
- Autotransformateur (réglage de la valeur de haute tension).
- Transformateur haute-tension (permet la conversion basse-tension en haute tension).
- Transformateur chauffage filament associé au système de réglage du courant tube.
- Redresseurs (permet de transformer une ou plusieurs tensions alternatives en une tension continue qui sera appliquée aux bornes du tube minuterie (permet de préparer le tube, et d'imposer un temps d'exposition)).

## VI / CLASSIFICATION DES GENERATEURS

Les générateurs sont classés en fonction de la forme d'onde (ou de tension appliquée au tube) qu'il délivre.

- Générateur à 1 crête (netits appareils tels que dentaire, portatifs...).
- Générateur à 2 crêtes (obtenues en redressant le réseau monophasé).
- Générateur à 6 ou 12 crêtes (obtenues en redressant le réseau triphasé).
- Générateur à tension constante.
- Générateur haute fréquence.
- Générateur à décharge de condensateurs.

## VII / INFLUENCE DE LA FORME D'ONDE

Les spectres d'émission des photons X varient en fonction du générateur utilisé. La valeur de la longueur d'onde minimale du spectre est identique quelquesoit le générateur utilisé.

Sa valeur en nanomètre ne dépend que de la tension tube et est égale à  $1,24 / V$  où V est exprimée en kV. (pour une tension de 100 kV, la longueur minimale obtenue est égale 0,0124 nm). Par contre la longueur d'onde moyenne du rayonnement obtenue dépend du type de générateur utilisé.

## **IX / PUPITRE DE COMMANDE DU GENERATEUR**

**Le générateur se décompose physiquement en deux parties :**

- La partie haute tension comportant la transformateur haute tension, les redresseurs, les thyristors, les cables haute tension qui permettent le raccordement du tube au générateur.
- La partie basse tension qui comprend le pupitre, et une armoire d'asservissement où se trouve les autotransformateurs, et tous les circuits de régulation tension, intensité et temps d'exposition. (sur les anciennes installations le pupitre regroupait toute la partie basse tension).

Le pupitre permet de régler les paramètres tension, intensité et temps d'exposition. Suivant le type de pupitre, l'utilisateur peut avoir accès aux réglages des kV, mA, et t (réglage 3 points), ou aux réglages des kV et mAs (réglage 2 points) ou au réglage des kV uniquement (réglage 1 point) (le réglage du temps de pause se fait par un exposeur automatique).

Dans tous les cas le pupitre vérifie que les constantes choisies correspondent aux abaques de charge du tube à rayons X (exemple : ne pas autoriser une tension de 100 kV et un courant de 2000 mA pour un tube ne pouvant supporter que 100 kW).

**La minuterie a pour rôles :**

- D'assurer un temps de préparation du tube avant de le déclenchement de la pause (ce temps est de l'ordre de la seconde ) afin que la vitesse de rotation nominale de l'anode et la température du filament soient atteintes.
- De laisser passer un courant tube pendant un intervalle de temps défini soit par l'utilisateur, soit par un posemètre automatique. Le posemètre automatique assurant la coupure du courant tube lorsque l'exposition est correcte.

**Pour assurer le passage et l'arrêt d'un courant tube, la minuterie peut agir :**

- Sur le circuit primaire. Le transformateur haute-tension n'est alimenté que pendant le temps de pose. L'ouverture et la fermeture du circuit peuvent être assurés par des thyristors ou pour les très anciens générateurs par des contacteurs électromagnétiques.
- Sur le circuit secondaire. Le transformateur haute-tension est alimenté dès la mise en préparation du tube, le passage du courant étant alors autorisé par la conduction de deux tétrodes situées de part et d'autre du tube RX (1 en série avec l'anode et 1 en série avec la cathode du tube. Les tétrodes sont des tubes à vide à deux grilles permettant de réguler la tension du tube RX (cas des générateurs à tension constante) et de jouer le rôle d'interrupteur.
- Sur le tube lui-même pour les tubes à grille. Cette grille joue également le rôle d'un interrupteur en autorisant ou non le passage des électrons.

## Circuit de régulation de la tension

Ce circuit va permettre de réguler la tension crête appliquée au générateur en réglant le rapport de transformation de l'autotransformateur en fonction du courant tube demandé. En théorie si aucune perte de tension n'était possible au niveau du générateur et du réseau d'alimentation, ce rapport de transformation resterait fixe quel que soit le courant tube sélectionné.

Dans la réalité des pertes de tension ont lieu au niveau du réseau d'alimentation et du générateur. Ces pertes sont proportionnelles au courant tube. Il faut donc compenser ces pertes en augmentant le rapport de transformation de l'autotransformateur afin d'obtenir la tension sélectionnée lorsque le courant passe d'une valeur peu élevée à une valeur élevée. (par exemple de 10 mA à 1000 mA).

Les pertes au niveau du réseau d'alimentation sont dues à l'impédance des lignes d'alimentation. Généralement l'impédance totale de ces lignes doit être inférieure à 0,1 ohm. Pour un générateur monophasé alimenté par deux lignes, la chute de tension est égale à 2 fois l'impédance de la ligne multipliée par le courant ligne.

Dans le cas de l'exercice de la page 25, le courant de 454 Ampères entraînerait une chute de tension d'environ 45 volts ce qui est élevé (impédance de chaque ligne 0,05 ohm pour une impédance totale de 0,1 ohm) Pour calculer l'impédance d'une ligne, il faut connaître sa résistivité, sa longueur, sa section.

$$R = \rho \cdot l / S$$

- $\rho$  = résistivité ( $\Omega \cdot m$ )
- $l$  = longueur ( $m$ )
- $S$  = section ( $m^2$ )

Pour le cuivre la résistivité est égale à  $1,6 \cdot 10^{-8}$  ohm.mètre

### Exercice :

Calculer la résistance d'une alimentation électrique composée de deux lignes de section  $10 \text{ mm}^2$  et ayant une longueur de 200 mètres.

Tous les générateurs sont étalonnés en usine avant leur mise en place dans un service. Ces générateurs sont étalonnés sur une impédance de lignes de 0,1 ohm. Lorsque ce générateur arrive chez le client, l'impédance de ces lignes n'est pas exactement de 0,1 ohm mais elle est de toute façon inférieure à cette valeur.

Pour éviter de faire un nouveau étalonnage chez le client, l'installateur mesure exactement l'impédance des lignes, et rajoute à ces impédances, une ou plusieurs résistances de compensations de façon à obtenir une impédance lignes et résistances de compensation égale à 0,1 ohm. (ex : si l'impédance des lignes est égale à 0,08 ohm, la résistance de compensation sera de 0,02 ohm).

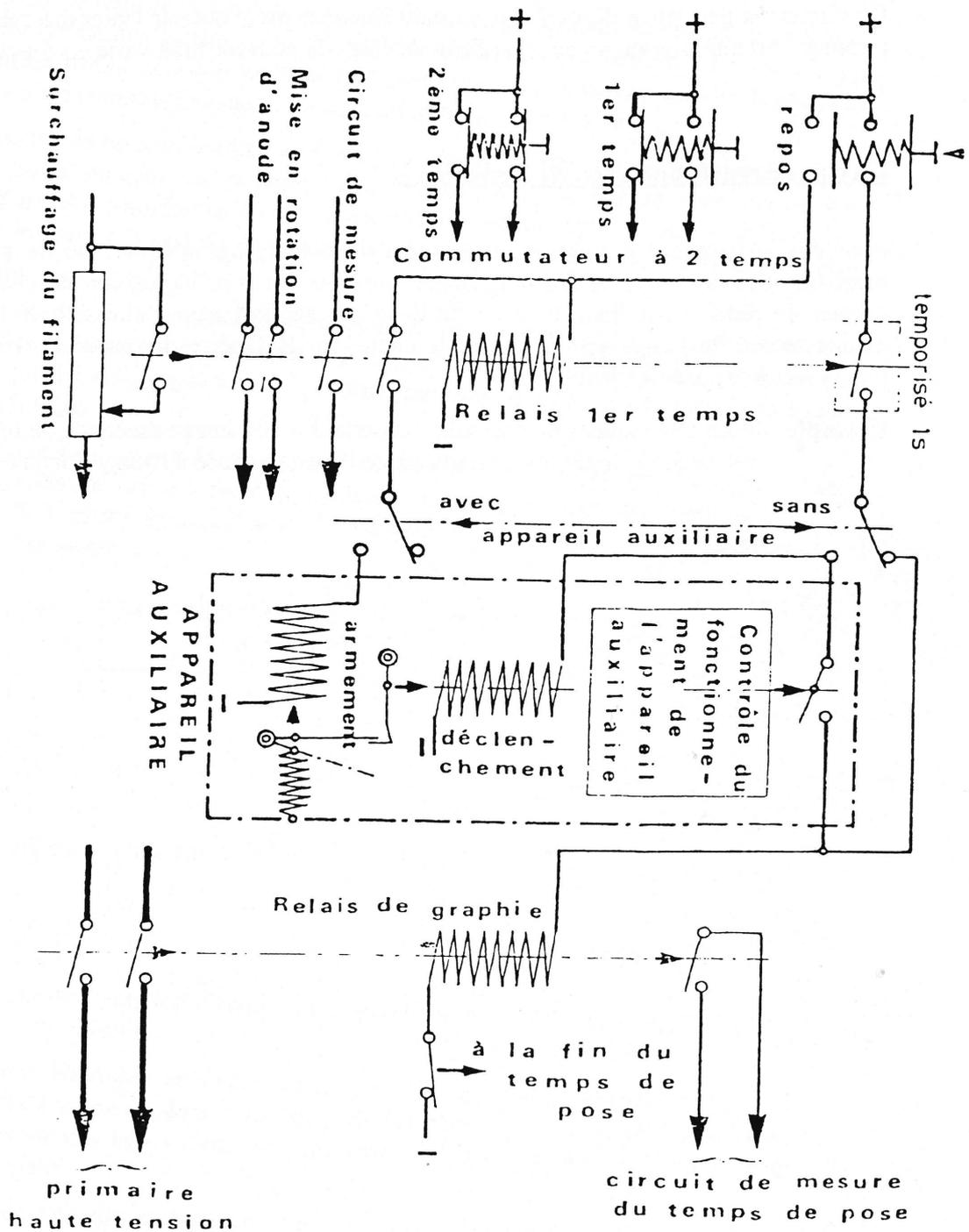
### **Circuit de régulation d'intensité**

Ce circuit va permettre de régler le courant filament pour obtenir l'intensité tube sélectionné au pupitre . Attention pour un courant filament fixe , le courant tube varie en fonction de la tension tube.

### **Circuit de synchronisation de l'émission X**

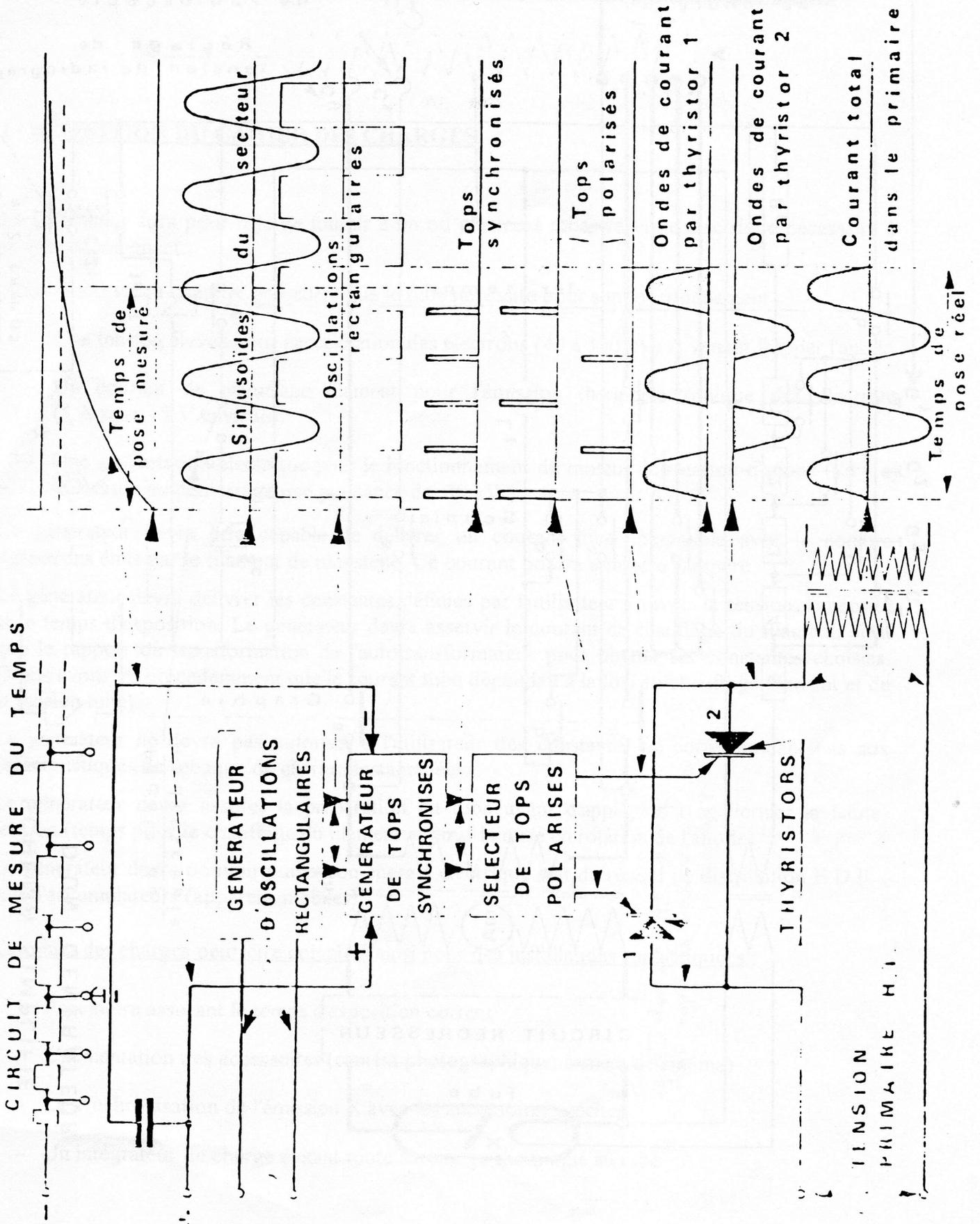
Pour des installations possédant une caméra d'ampliphotographique , ou de caméra cinéradio, l'émission des rayons X se fait uniquement pendant le temps exposition du cliché. Ce dispositif permet de réduire par deux le débit de dose par rapport à une émission X continue puisque qu'une moitié du temps sert à amener le cliché sur la fenêtre d'exposition et l'autre moitié du temps sert à exposer le cliché.

**Exemple :** Pour une caméra de cinéradio travaillant à 100 images/seconde, le temps d'exposition est de 5 ms, le temps de transfert de l'image exposé à l'image suivante est de 5 ms.

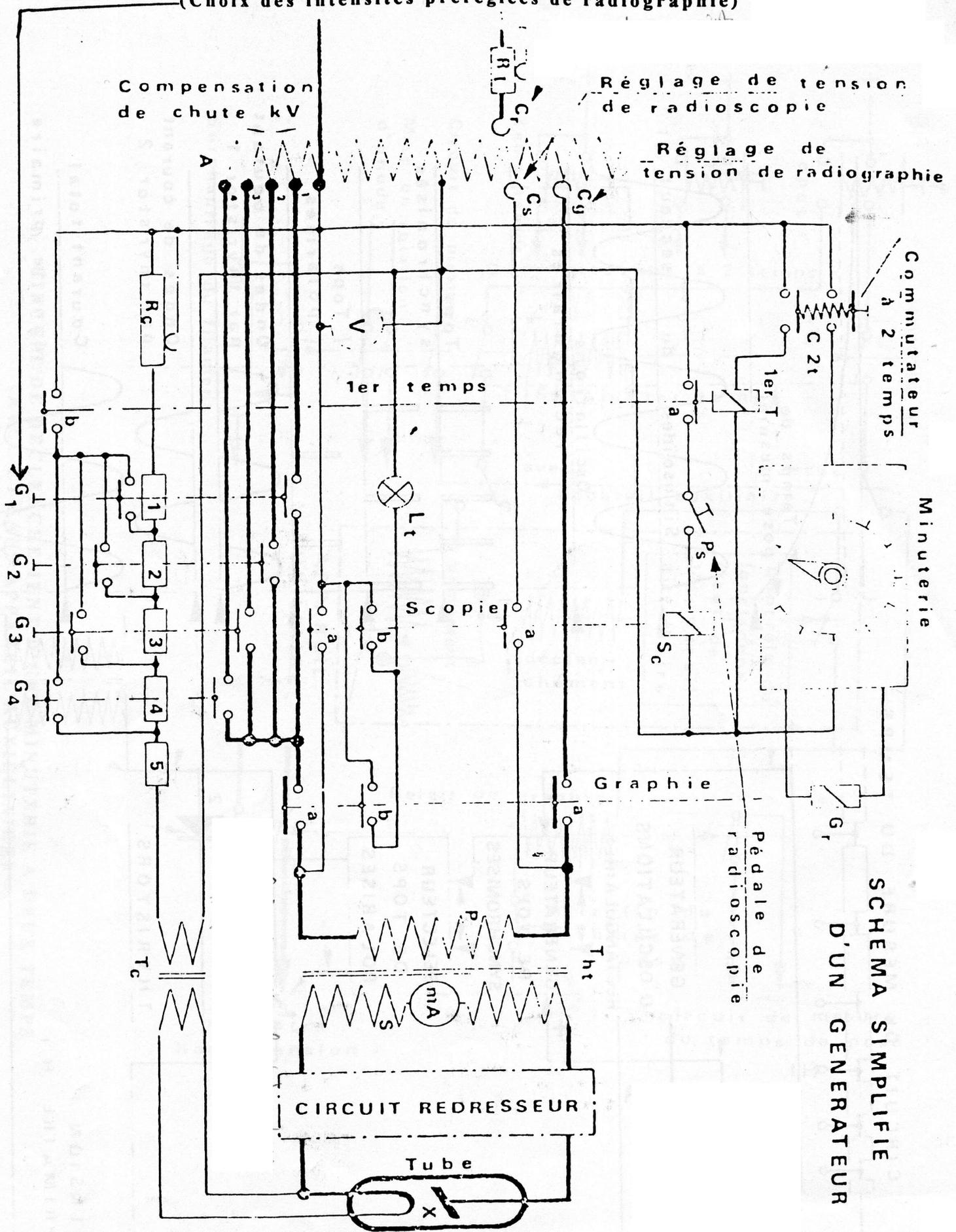


**CIRCUIT DE DECLENCHEMENT D'UNE MINUTERIE A DEUX TEMPS  
 (AVEC ET SANS APPAREIL AUXILLIAIRE)**

# PRINCIPE ET FONCTIONNEMENT D'UNE MINUTERIE A THYRISTORS



**SCHEMA SIMPLIFIE D'UN GENERATEUR**  
 (Choix des intensités prérèglées de radiographie)



SCHEMA SIMPLIFIE  
 D'UN GENERATEUR