

IV- CIRCUITS DE COMMANDE ET REGULATION

IV - CIRCUITS DE COMMANDE ET REGULATION

IV - 1 - Dispositif de commande du hacheur -

Ce dispositif fournit la fréquence de découpage de la tension 1500 V, et simultanément une tension en dent de scie, destinée aux chaînes de régulation. Il se compose d'un oscillateur générant des dents de scie, d'une bascule de mise en forme et d'un amplificateur commandant les thyristors de puissance.

a) L'oscillateur (fig. 13)

Celui-ci est bâti autour d'un transistor unijonction. Le fonctionnement de ce type d'oscillateur est le suivant:

- une capacité C est chargée par un courant constant. Lorsque la tension aux bornes de ce condensateur atteint la valeur de pic du transistor UJT, la jonction émetteur-base de celui-ci bascule à la conduction, et décharge brutalement la capacité. La montée est donc lente, et la pente est fonction du courant de charge, alors que la descente est très brutale, et indépendante de ce courant. La forme de la tension aux bornes de la capacité est une dent de scie linéaire (oscillogramme n° 7 page 37).

Le courant constant est fourni par un transistor monté en régulateur de courant. Le montage est celui de la fig. 14.

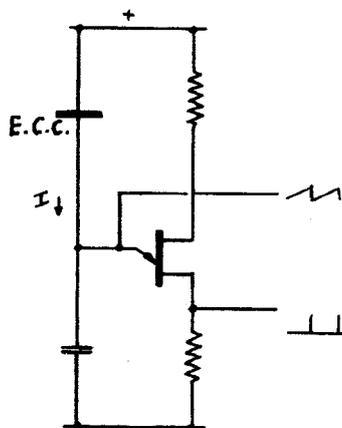


Fig. 13

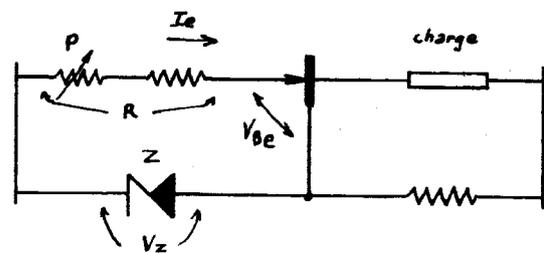


Fig. 14

Une diode zener détermine une tension de base fixe sur le transistor. Celui-ci conduit donc, et son courant d'émetteur est tel que $I_e \times R = V_z + V_{be}$.

.../...

Si I_e tend à croître, la chute $R_e I_e$ tend à augmenter. Comme V_z est constant, V_{be} tend à diminuer. On sait que si V_{be} diminue, le courant d'émetteur diminue aussi. Cet effet s'oppose alors à la tendance à l'augmentation de I_e . Inversement, si I_e tend à diminuer, V_{be} tend à augmenter, ce qui entraîne l'augmentation de I_e , d'où compensation.

Il en résulte que le courant d'émetteur, donc approximativement celui de collecteur reste constant, quelque soit la tension appliquée aux bornes du montage. Ce courant est déterminé uniquement par la valeur de R_e et par la tension de la diode zener. Sur le montage pratique (fig. 16), la diode Z_1 a une tension de zener de 6,2 V, et la résistance d'émetteur est constituée par un potentiomètre qui permet de régler avec précision le courant de charge, donc la fréquence de relaxation du montage. En effet,

$$q = C \cdot U_p$$

où q est la charge emmagasinée dans le condensateur pendant la charge, C la valeur de ce condensateur, et U_p la tension de pic de l'UJT. D'autre part, I étant le courant de charge et t le temps de charge, on a :

$$q = I \cdot t$$

$$\text{d'où } I \cdot t = C \cdot U_p$$

$$t = \frac{C \cdot U_p}{I}$$

t représente alors le temps mis par la capacité pour atteindre la valeur U_p . Le cycle de recharge recommence dès que le condensateur est déchargé, car l'UJT est rebloqué, ce qui signifie que t est la période de l'oscillation en dent de scie (oscillo n° 7).

I est égal à $\frac{V_z + V_{be}}{R_e}$, où R_e est la résistance d'émetteur, donc :

$$t = \frac{C \cdot U_p \cdot R_e}{V_z + V_{be}}$$

$$\text{et la fréquence } f = \frac{1}{t} = \frac{V_z + V_{be}}{C \cdot U_p \cdot R_e}$$

On voit qu'effectivement la résistance d'émetteur permet d'ajuster la fréquence.

Le transistor T_1 de la fig. 16 permet le changement de fréquence lorsque la charge augmente, c'est-à-dire lorsque la référence I inducteur (référence J) apparaît.

Lorsque J est nulle, la tension d'émetteur de T_1 est nulle, et la tension au point β est à - 4,3 V par rapport au 0, tension de la diode Z_2 , alors que la tension au point α devrait être de - 6,2 V, tension de la diode Z_1 . La diode silicium D_1 est alors en conduction, fixant le point α à - 4,3 - 0,7 = - 5 V.

•

..//..

Lorsque J augmente vers - 15 V, de quelques volts (1 volt par exemple) la tension d'émetteur de T1 est aussi à - 1 V, et la tension en β devient - 5,3 V. La diode D8 conduit toujours, et porte le potentiel du point α à - 6 V. De la relation précédente, on peut dire que la fréquence a augmentée dans un rapport 6/5.

Si J continu de croître, dès que le point α atteint - 6,2 V la diode D1 se bloque et la tension en α reste à - 6,2 V, déterminée par Z1. La fréquence a donc variée dans le rapport 6,2/5 lorsque J est passée de 0 à -1,2V, c'est-à-dire pour 1/13 de l'excursion maximum de la référence J.

La fréquence engendrée est réglée à 160 Hz pour une tension de - 5 V au point α . Lorsque J aura dépassé le seuil de 1,2V cette fréquence sera devenue :

$$\frac{160 \cdot 6,2}{5} = 200 \text{ Hz environ.}$$

On voit que pour 1/13 de l'excursion de J, la fréquence passe de 160 à 200 Hz, fréquence de fonctionnement avec courant dans les inducteurs.

La tension en dent de scie présente sur la capacité C5 est transmise par un étage adaptateur d'impédance T4 - T5, à 4 transistors de sortie, qui permettent d'obtenir le signal en dent de scie sous une faible impédance en 4 points différents.

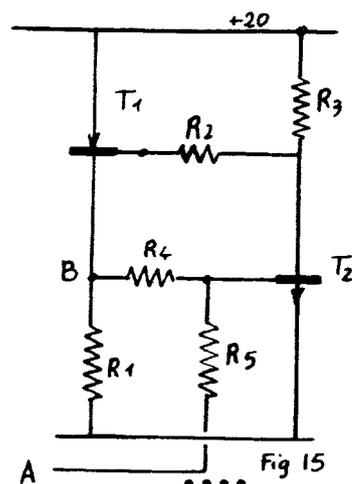
La pointe due à la décharge de la capacité est transmise par la diode D2 au transistor T6. Cette pointe étant positive sature T6 pendant le temps de retour de la dent de scie. Ce transistor shunte les bases des transistors T7 à T10, donnant ainsi un temps de descente très bref (oscillogramme n°8).

Trois des sorties fournissent la dent de scie aux trois chaînes de régulation, et la quatrième est transmise à une bascule avant d'attaquer l'amplificateur de sortie.

b) Bascule de mise en forme

Pour déclencher des thyristors, il faut une impulsion brève. Cette impulsion est obtenue grâce à une bascule composée de deux transistors T1 et T2, schéma fig.15.

Supposons les deux transistors bloqués. Leurs bases respectives sont à un potentiel voisin de la masse. Si le point A reçoit une tension positive, le transistor T2 commence à conduire, entraînant une chute de tension dans R3. Cette ddp est transmise à la base de T1 par R2. T1 commence alors aussi à conduire, entraînant une chute de tension dans R1, qui est transmise à T2 par R4; ce qui augmente sa conduction, et ainsi de suite, jusqu'à ce que T2 soit saturé.



On a donc un phénomène cumulatif. Si le point A devient plus négatif que B (les valeurs des résistances déterminent les valeurs des tensions) T2 commence à se bloquer, entraînant le blocage de T1, et le phénomène cumulatif inverse se produit, amenant les deux transistors au blocage. Ce montage se comporte en bistable, car ces deux états sont stables, c'est-à-dire que si après le basculement on déconnecte l'information d'entrée, (c'est-à-dire entrée A en l'air, ou attaquée par un condensateur), le montage reste dans l'état où il est. Ce montage présente un hystérésis marqué dont l'amplitude dépend du rapport de la valeur des résistances.

La sortie s'effectue sur le collecteur de T12 par l'intermédiaire du transistor T13 monté en collecteur commun (fig.16).

Le seuil de cette bascule est réglée par une polarisation fixe, introduite sur la base de T12 par le potentiomètre R2-R3 et R4.

Lorsque l'on applique à l'entrée une tension linéairement croissante la bascule fonctionne à un instant t donné. Si le seuil est plus positif, la bascule fonctionne plus tôt, et inversement si le seuil est plus négatif.

c) Amplificateur de sortie (fig.16)

Le signal issu de l'émetteur de T13 est dérivé par le condensateur C4, c'est-à-dire que l'on extrait du signal carré ou rectangulaire, les du/dt , correspondant aux transitions du niveau 0 à + 20V et -20V à 0. Cette dérivation donne des impulsions de courant positives et négatives, suivant le sens de la transition dérivée. Les impulsions positives traversent la diode D4, alors que les impulsions négatives traversent la base du transistor T15, monté en amplificateur de courant, qui à son tour commande l'amplificateur de sortie constitué par le transistor T16, fonctionnant en classe C (*). La charge de collecteur de ce transistor est constituée par le primaire du transformateur de commande des thyristors hâcheurs.

L'ensemble D5, R14, D7 constitue une chaîne de polarisation des émetteurs des transistors T15 et T16. Un courant permanent circule dans cette chaîne, dont la valeur est approximativement de $19\text{ V}/2,2\text{ k}\Omega$ soit 8,6 mA. Ce courant provoque une chute de tension de 0,7 V, constante, aux bornes des diodes D5 et D7. Cette tension se retrouve entre l'émetteur et la ligne d'alimentation, ce qui permet, lorsque la base reçoit un potentiel voisin de celui de la ligne d'alimentation, d'assurer un blocage complet et certain des transistors.

Le transistor T14 court-circuite les impulsions négatives lorsqu'il est rendu conducteur, c'est-à-dire lorsque sa base reçoit un signal négatif, signal qui est appliqué sur la borne "Pro", lorsque certaines conditions sont réunies (voir paragraphe "protections").

Les surtensions inverses aux bornes du transistor de puissance sont limitées par la diode zener Z3.

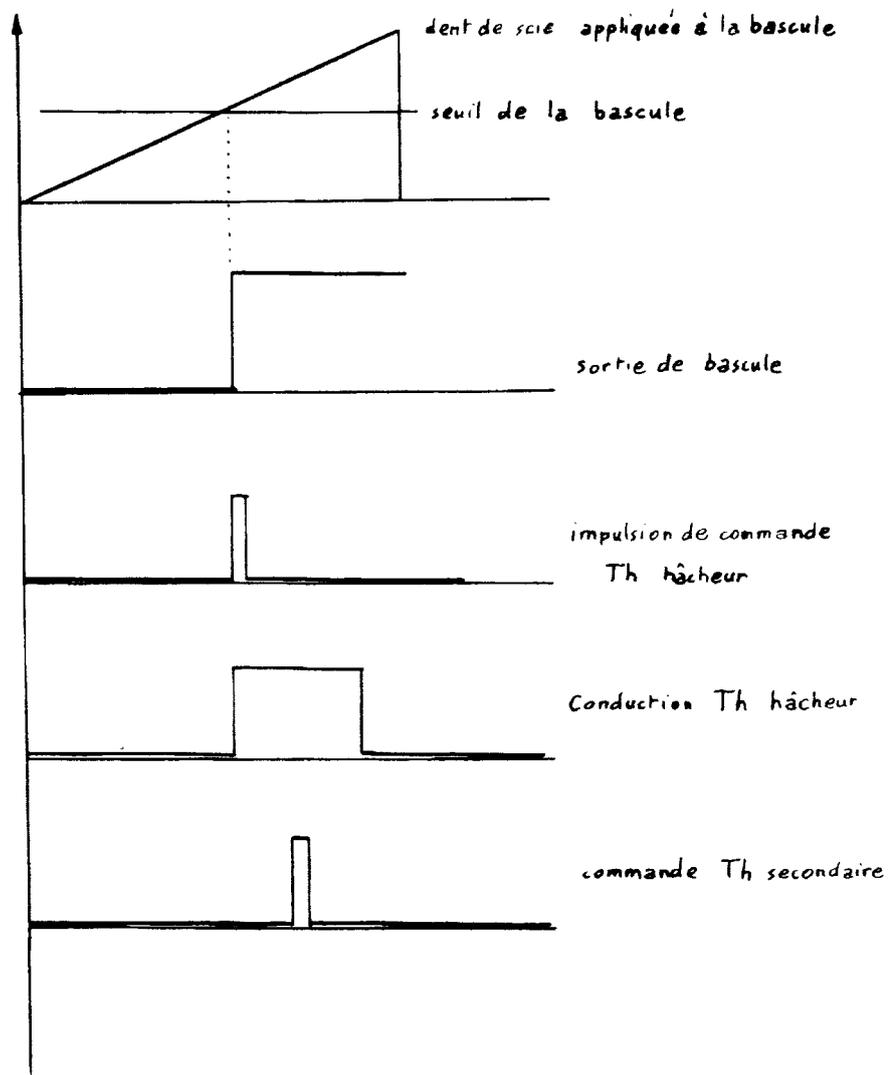
* Le fonctionnement en classe C correspond à une polarisation du transistor au-delà du point de coupure; une excursion trop faible de la tension d'entrée n'a aucun effet.

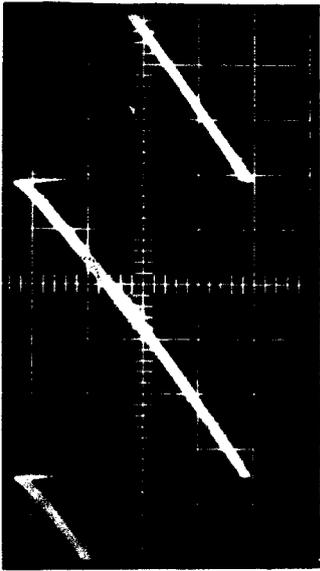
La tension aux bornes du primaire du transformateur est représenté par l'oscillogramme n° 9. L'impulsion utile transmise aux thyristors est la partie positive de l'oscillo. Cette impulsion dure 320 μ s environ.

Lorsque le transistor se rebloque, le circuit magnétique se décharge, et l'énergie magnétisante apparaît sous forme d'une impulsion négative; dont l'amplitude est limitée par la diode zener Z3.

Le transformateur de sortie est muni de 6 secondaires. Chacun de 4 de ces secondaires commande la porte d'un des thyristors hacheurs. Lorsqu'une impulsion est fournie par l'étage de sortie, les thyristors s'amorcent. Leur temps de conduction est constant et uniquement défini par leur circuit d'extinction .

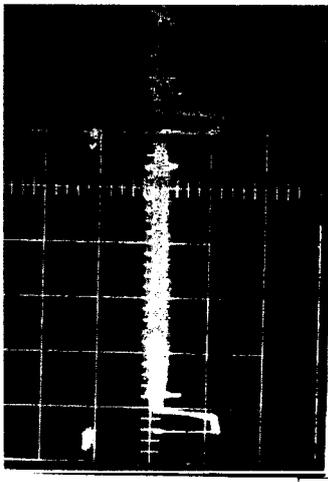
L'instant de déclenchement est réglé par la valeur du seuil de la bascule de telle manière que lorsque les tensions d'erreurs sont nulles les impulsions fournies par les trois chaînes de régulation (voir plus loin) soient produites au milieu du temps de conduction des thyristors hacheur.





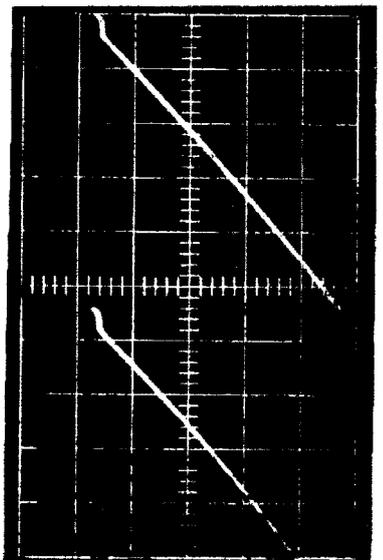
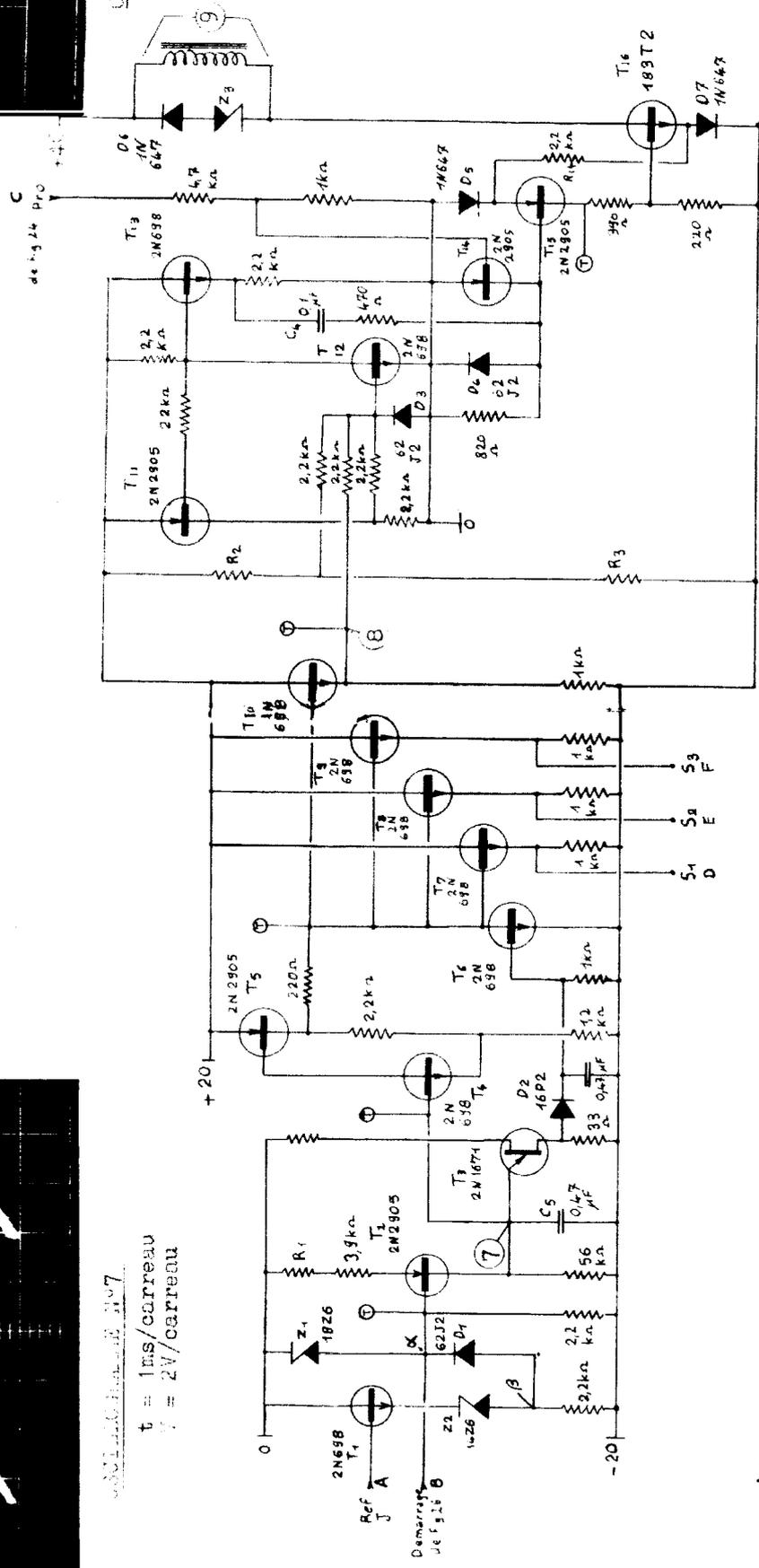
OSCILLOGRAMME N°7

t = 1ms/carreau
V = 2V/carreau



OSCILLOGRAMME N°9

t = 1ms/carreau
V = 50V/carreau



OSCILLOGRAMME N°8

t = 1ms/carreau
V = 5V/carreau

REMARQUE : LA SAISON DE L'AMPLIFICATEUR

IV - 2 - Chaîne de régulation courant inducteur -

La référence J (référence courant inducteur) est issue du curseur d'un potentiomètre à la disposition du conducteur, et alimenté par une tension de - 20 V fournie par une des alimentations du coffret électronique. Cette référence est donc une tension variant de 0 à -15V, lorsque le courant dans les inducteurs doit varier de zéro au maximum.(550 A)

La mesure du courant réel circulant dans les inducteurs est effectuée par un transformateur d'intensité, suivi d'un redresseur en pont et d'un filtrage par capacité.

Les deux valeurs ainsi obtenues (ref. J et J mesuré) sont introduites dans un comparateur, qui donne, sur sa sortie, une tension proportionnelle à la différence entre les deux valeurs d'entrée. Le schéma de ce comparateur est celui de la fig. 18. Il est essentiellement composé d'un module amplificateur opérationnel à entrée différentielle, suivi de deux étages fournissant les butées nécessaires pour que la tension de sortie du circuit suivant ne dépasse pas certaines limites, qui seront précisées ultérieurement.

Les deux tensions sont admises sur l'entrée I de l'amplificateur alors que l'entrée NI est connectée à la masse par R5. La sortie de cet amplificateur fournit la différence entre les deux tensions appliquées sur les entrées. Cette sortie est connectée à un étage à paire complémentaire T1-T2, dont le rôle est d'abaisser l'impédance du signal différence, car ces deux transistors sont montés en collecteur commun. Le signal issu des émetteurs de ces transistors est transmis au circuit déterminant les butées. Ce circuit se compose de la résistance R10, des deux diodes PR2, et des ponts potentiométriques R 12/R 13 et R 14/R 15.

Le potentiomètre R 12/R 13 détermine au point A une tension fixe comprise entre 0 et + 20 V. Tant que la tension sur l'anode de la diode P2 est plus négative que la tension au point A, cette diode reste bloquée, mais dès que la tension sur son anode devient égale à la tension du point A, la diode entre en conduction, et un courant circule de la sortie de l'amplificateur au pont potentiométrique. Ce courant crée une chute dans R10, et la valeur de cette chute est égale à la différence entre la tension de sortie de l'amplificateur, et la tension fixée par le pont diviseur. Il en résulte que la tension sur l'anode de D2b ne peut dépasser la valeur de la tension fixée par R 12/R 13 + 0,7 V, dû à la chute de tension directe de la diode D2b. Le raisonnement est identique pour le pont potentiométrique R 14/ R 15, qui détermine une butée, lorsque la tension de sortie de l'amplificateur tend à devenir trop négative.

La tension appliquée à l'étage suivant est donc comprise entre deux limites: une négative et une positive. Cet étage suivant est aussi constitué par une paire complémentaire T3 et T4, qui fournit le signal de sortie sous faible impédance. Le point de sortie sert de départ à la boucle de contre-réaction R 19-C2, qui détermine avec précision le gain de l'étage, c'est-à-dire, la valeur de la tension de sortie pour une différence donnée des tensions d'entrée, et temporise les variations rapides (C2).

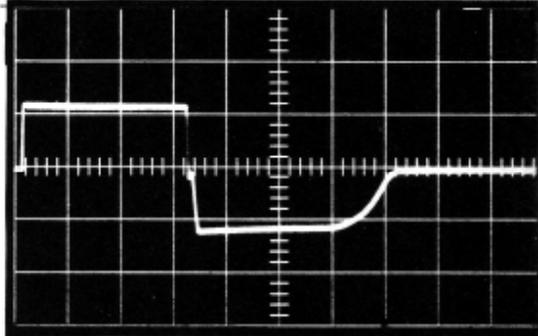
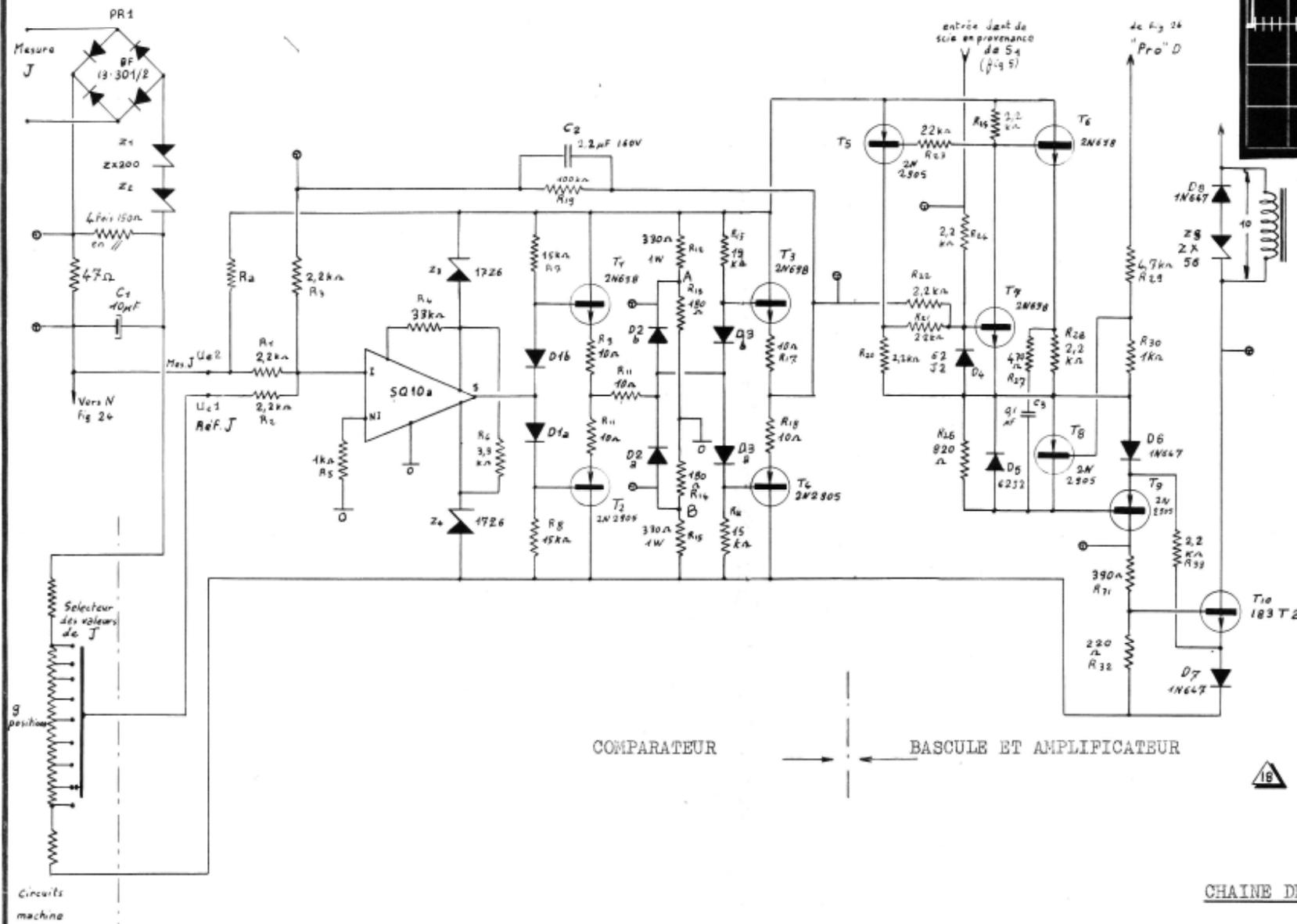
Cette tension différence fixe le seuil de fonctionnement d'une bascule bistable identique à celle utilisée dans les circuits de commande du hâcheur, et alimentée par la même dent de scie. La sortie de cette bascule est dérivée par le condensateur C3 de manière à obtenir une impulsion correspondant au passage de la dent de scie à la valeur du seuil, fixée par le comparateur.

Nous avons vu que le temps de conduction des thyristors hâcheurs est constant. L'instant de déclenchement de ces thyristors est réglé de telle manière que l'impulsion fournie par les chaînes de régulation, lorsque les tensions d'erreurs sont nulles, arrivent au milieu du temps de conduction des thyristors hâcheurs (voir fig. 17). Il en résulte que lorsque la différence est positive en sortie du comparateur (J mesurée plus faible que ref. J), le seuil monte et l'impulsion est engendrée plus tôt. Autrement dit, les thyristors de régulation sont allumés avant la moitié du temps de conduction des thyristors hâcheurs. La quantité de courant transmise est donc plus importante. Le processus inverse se produit si la différence est négative.

L'impulsion engendrée par la bascule est ensuite transmise à un amplificateur de puissance identique à celui destiné aux thyristors hâcheurs. Cet amplificateur fournit les impulsions à un transformateur, qui à son tour attaque les électrodes de commande des thyristors de régulation du courant inducteur. L'oscillogramme n° 10 est la tension aux bornes du transformateur de sortie.

Le gain de l'amplificateur définit l'amplitude de la correction apportée pour une erreur donnée. Si le gain est trop important, on risque d'obtenir un "pompage", c'est-à-dire qu'une très légère différence entraîne une forte correction. Le courant inducteur devient alors trop important, et la correction se fait en sens inverse. Comme le gain est trop fort, le courant devient beaucoup trop faible, et une correction trop forte est redonnée, et ainsi de suite. Le courant inducteur prend une forme sinusoïdale d'amplitude maximum, et de période dépendant du temps de réponse de la chaîne de régulation. Ce régime est évidemment inacceptable. Si maintenant on considère un gain trop faible, la valeur mesurée de J n'atteindra la valeur de référence qu'au bout d'un certain temps, suivant une loi exponentielle. Ce régime n'est pas valable non plus, car le temps de réponse du système devient trop long.

Ces considérations quelque peu théoriques sont fournies par la théorie générale des systèmes asservis. De tout cela, on tire que le temps de réponse, et la qualité de la régulation dépendent en grande partie du gain de la boucle d'asservissement.



OSCILLOGRAMME N° 10

t = 100 μs/carreau
V = 50V/carreau

CHAINE DE REGULATION "INDUCTEUR"

IV - 3 - Chaîne de régulation charge batterie machine et secours freinage

Pour la charge batterie, deux paramètres sont pris en considération: tension aux bornes de la batterie, et courant de charge.

La tension est comparée à une référence déterminée par un potentiomètre, à l'aide d'un comparateur équipé de butées. Cette tension différence de U est additionnée à la valeur de l'intensité mesurée. Nous avons écrit additionnée, mais en fait, il s'agit d'une soustraction, car la tension différence issue du premier comparateur est affectée du signe-. En effet, cette tension différence est positive lorsque la tension différence à l'entrée est négative, c'est-à-dire que U mesuré est plus grand que U ref.. Ceci fait que lorsque U mesuré est très en dessous de la réf. U , c'est la valeur de l'intensité qui commande l'angle d'allumage des thyristors de régulation, et lorsque U mesuré devient égal ou plus fort que U réf., l'intensité perd son action. Les deux comparateurs sont identiques, et sont bâtis autour d'un module amplificateur opérationnel. Les butées sont réalisées suivant le même principe que celui donné précédemment.

En résumé, si U est élevé, l'instant d'allumage des thyristors de régulation est retardé, si U est faible et I faible, l'instant d'amorçage est avancé, si U est faible, et I trop fort, l'instant d'amorçage est retardé, de manière à ramener le courant à une valeur convenable

L'oscillogramme n° 11 représente la tension de sortie de bascule (2) qui engendre l'impulsion de commande, et la tension en dent de scie (1) du générateur pilote.

L'oscillogramme n° 12 représente la tension aux bornes d'un secondaire de charge batterie. L'impulsion représentée a donc une largeur égale au temps de conduction des thyristors hâcheurs.

Lorsque la dent de scie atteint le seuil fixé par les comparateurs, la bascule change d'état, produisant l'amorçage des thyristors de régulation.

Cet amorçage se traduit par une onde de choc amortie sur le secondaire.

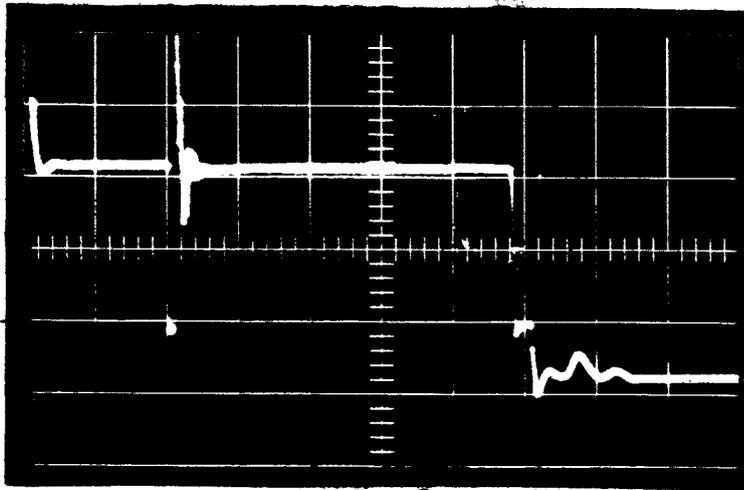
La tension aux bornes du thyristor régulateur tombe à 0, et un courant circule dans la batterie, jusqu'à l'extinction des thyristors hâcheurs (oscillo n° 13).

Les photos ont été prises au régime maximal, c'est-à-dire:

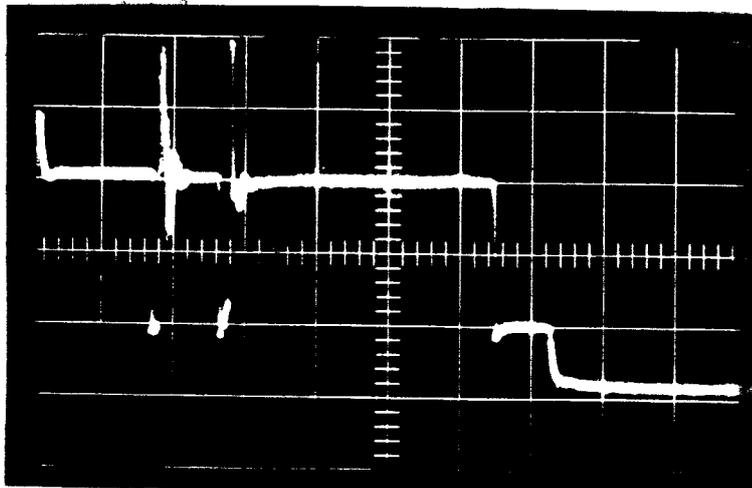
charge batterie locomotive : $U = 71,5$ V et $I = 25$ A,
charge batterie freinage : $U = 31$ V et $I = 10$ A.

L'oscillogramme N°14 représente la tension aux bornes du secondaire de charge 72V, lorsque le courant inducteur est nul. Le régime de charge des batteries est le régime nominal, c'est-à-dire que l'amorçage des thyristors de régulation des deux batteries a lieu au même instant. Cet amorçage se traduit par l'onde de choc qui apparaît 400 μ s après le début de l'impulsion. Le petit palier que l'on voit à la fin de l'impulsion est dû à la commutation des ensembles diodes thyristors, et du circuit d'extinction primaire.

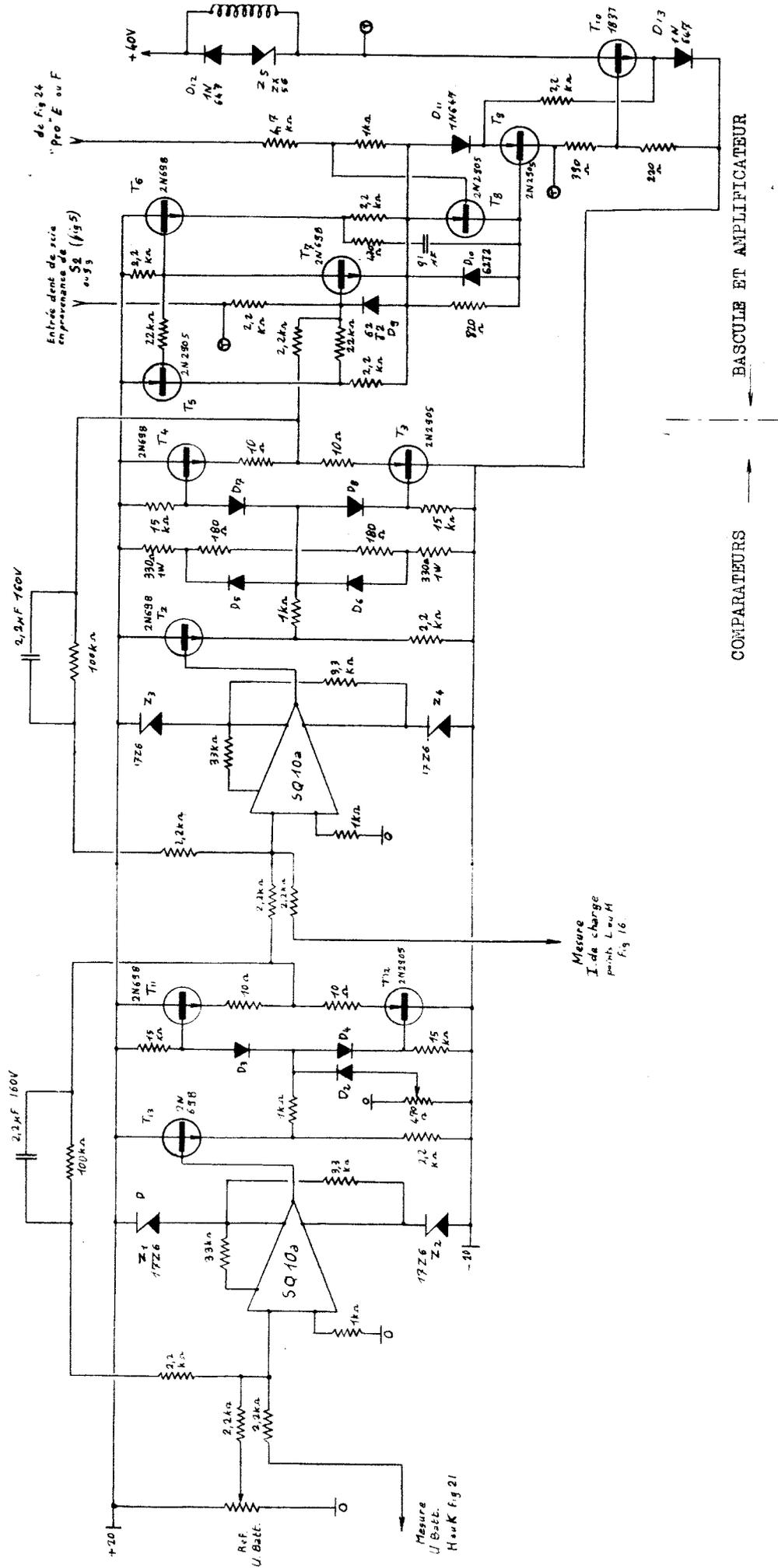
L'oscillogramme N°15 représente la même tension que 14, mais avec un courant inducteur maximum. L'allumage des thyristors régulateurs inducteurs se traduit par une onde de choc importante. Le transformateur étant chargé, on voit que l'instant d'amorçage des thyristors régulateurs de batteries a été avancé, de manière à compenser les pertes transformateurs plus importantes, et maintenir un régime de charge constant.



Oscillo N°14
200 V / carreau
200 μ s / carreau

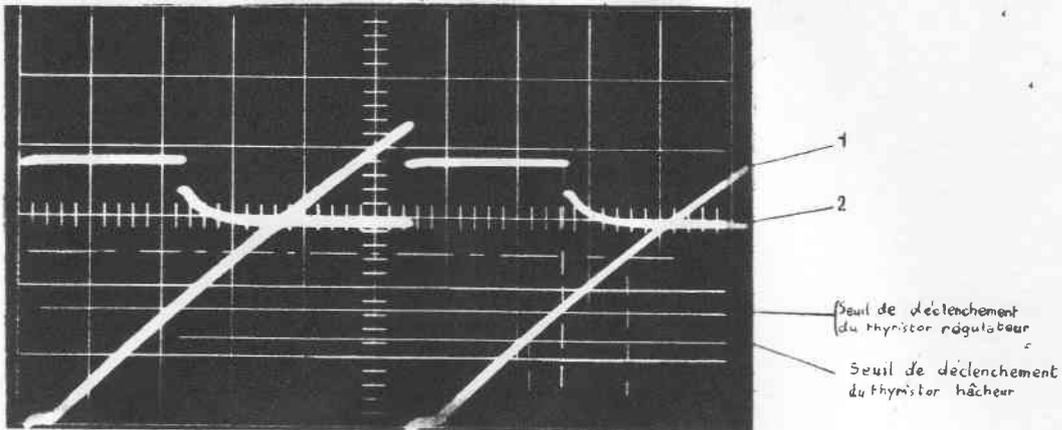


Oscillo N°15
200 V / carreau
200 μ s / carreau

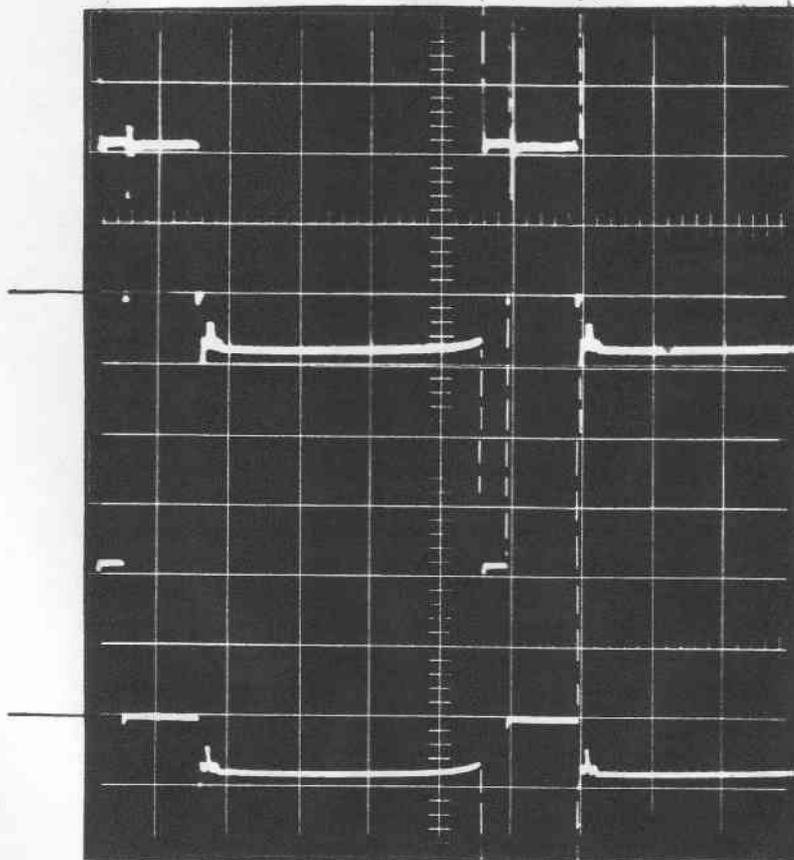


CHAÎNE DE REGULATION CHARGE BATTERIE

OSCILLOGRAMME N°11



déclenchement du thyristor hacheur
 déclenchement du thyristor régulateur
 t_1 t_2
 extinction thyristor hacheur



OSCILLOGRAMME N°12

Tension aux bornes
 secondaire charge
 batterie
 $t = 1\text{ms}/\text{carreau}$
 $V = 200\text{V}/\text{carreau}$

OSCILLOGRAMME N°13

Tension aux bornes
 du thyristor de
 régulation
 $t = 1\text{ms}/\text{carreau}$
 $V = 200\text{V}/\text{carreau}$