

A MES PARENTS
AVEC RESPECT
ET RECONNAISSANCE

UNIVERSITE DU QUEBEC

THESE
PRESENTEE A
L'INSTITUT NATIONAL
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
(ENERGIE)
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAITRISE ES SCIENCES (ENERGIE)

PAR

ARNOLD ATTALLAH
B. Sp. ENSEIGNEMENT PROFESSIONNEL

REGULATION AUTOMATIQUE
DE LA PUISSANCE REACTIVE

JANVIER 1976

RESUME

Un système de contrôle automatique de la puissance réactive a été mis au point. Ce système de régulation est entièrement électronique. Le contrôle se fait par branchement débranchement de banques de condensateurs. Le système a été conçu de façon à pouvoir être facilement adapté à différents types de charge de moyenne puissance (Mégawatt).

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à adresser ses sincères remerciements à MM.Z. Jacyno et F. Gros d'Aillon, qui ont supervisé cette recherche, à M. A. Boutard, Directeur du Département de Physique de l'UQAM, qui a mis à sa disposition les moyens matériels et financiers pour poursuivre cette recherche.

Sa gratitude s'adresse aussi, aux membres du personnel du département de Physique qui l'ont aidé de leur conseil, de leur assistance et de leurs services, et tout particulièrement à M. J. Bernard.

TABLE DES MATIERES

RESUME	ii
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIERES	iv
INTRODUCTION	1
PREMIERE PARTIE: DEFINITION DU SYSTEME	4
1.1 Méthode de facturation de la fourniture d'électricité	5
1.2 Systèmes de régulation existants	8
1.3 Système de régulation mis au point	10
1.3.1 Avantages du système mis au point	10
1.3.2 Stratégie de régulation	10
1.3.2.1 Principe de régulation	11
1.3.2.2 Etude des coûts	12
DEUXIEME PARTIE: DESCRIPTION DU SYSTEME	17
2.1 Principe du régulateur	18
2.2 Description du régulateur	19
2.2.1 Seconds transformateurs	20
2.2.2 Système de mesure de la puissance réactive	20
2.2.2.1 Principe de la mesure	20
2.2.2.2 Multiplicateur	21
2.2.3 Echantillonneur	22
2.2.4 Compérateurs	24
2.2.5 Unité de temporisation	25
2.2.6 Unité de commande	26
2.3 Remise à zéro	27
2.4 Algorithme de régulation	28

TROISIEME PARTIE: ESSAIS DU SYSTEME	30
3.1 Adaptation, réglage et calibration	31
3.1.1 Spécification des premiers transformateurs de mesure	32
3.1.2 Réglage de l'unité de temporisation	32
3.1.3 Réglage du modulo de l'unité de commande	33
3.1.4 Réglage de la plage de réglage du régulateur	33
3.1.5 Calibration de l'unité de mesure de puissance réactive	36
3.2 Vérification du fonctionnement du régulateur	37
3.3 Essais en régulation	38
CONCLUSION	43
APPENDICE A	45
APPENDICE B	47
REFERENCES	53
LISTE DES FIGURES	55

INTRODUCTION

Notre travail de recherche a consisté à concevoir et réaliser un système électronique de régulation automatique de la puissance réactive consommée par une charge. Dans un tel système la régulation a pour but de ramener la puissance réactive à un niveau aussi bas que possible. Il est en effet très important de réduire la puissance réactive d'une charge car même si cette puissance ne correspond pas à une consommation d'énergie, elle entraîne de nombreux inconvénients tant pour le fournisseur que pour le consommateur d'électricité. D'une façon générale si une charge a une puissance réactive non nulle, cela veut dire qu'il y a transfert de puissance entre la charge et la source, dans les deux sens, à chaque alternance du réseau, sans que cette puissance soit utilisée. Cela nécessite donc des investissements supplémentaires car il faut construire des centrales plus puissantes qu'il n'y en aurait effectivement besoin si la puissance réactive était nulle. Cela nécessite également des investissements supplémentaires pour la transmission et la distribution de l'électricité, au niveau des lignes et des transformateurs qui doivent être surdimensionnés. Cela nécessite donc des investissements supplémentaires pour la régulation de tension sur les lignes de distribution. Cela entraîne enfin des pertes supplémentaires par effet joule et donc une diminution du rendement du réseau. Pour l'utilisateur une forte puissance réactive entraîne une baisse de tension ce qui diminue entre autre le rendement des machines et ajoute encore aux pertes. Le tarif de fourniture d'électricité, pour les installations de puissance assez élevée, tient compte et de l'énergie consommé et de la disponibilité de puissance accessible à l'utilisateur. Le premier terme est principalement relié au coût de fonctionnement (très principalement en fait

en ce qui concerne les centrales thermiques classiques), le deuxième terme est principalement relié au coût d'amortissement des centrales électriques. Ce deuxième terme tient donc compte de la puissance réactive. De deux utilisateurs consommant la même énergie et ayant la même puissance installée, celui dont la puissance réactive est la plus forte devra acquitter une facture plus élevée.

Depuis longtemps des systèmes automatiques de compensation ont été étudiés et mis au point [1], [2] utilisant éventuellement les techniques très récentes [3], [4], [5], [6]. Certains de ces systèmes ont été commercialisés par des compagnies telles que General Electric, Westinghouse, Siemens, etc. L'avantage du système que nous avons mis au point par rapport aux systèmes décrits dans la littérature ou utilisés industriellement est essentiellement sa grande souplesse; il peut s'adapter facilement à toutes sortes de variations de charge et à toutes sortes de puissances. Nous pensons que notre système présente également d'autres avantages en terme de fiabilité, précision, etc, avantages qui seront discutés plus loin. Notre travail a donc principalement porté sur la conception et la réalisation d'un instrument permettant de contrôler la puissance réactive et non sur les aspects théoriques généraux ou particuliers du contrôle de cette puissance. Bien que de nombreux et fort intéressants problèmes, tels que les problèmes de réponse dynamique, soient encore à résoudre dans ce domaine, cela aurait fortement dépassé le cadre de notre travail.

Dans une première partie nous définissons donc notre système de régulation, en d'autres mots nous parlons de ce qui nous a amené à la réalisation de ce système, à savoir d'abord son intérêt économique en terme de facturation, ensuite son originalité et ses avantages a priori par rapport aux

systèmes de régulation existants, puis nous fixons les spécifications générales du système en terme de principe de régulation.

La réalisation du régulateur à partir de ces spécifications est décrite dans la deuxième partie, d'une façon générale, cette description étant faite essentiellement à partir des principes utilisés. Le régulateur est donc présenté sous la forme d'un schéma bloc. Ce schéma est utilisé pour expliquer son fonctionnement et chaque bloc est décrit d'une façon très succincte, essentiellement encore à partir des principes. Le détail des circuits électroniques permettant de réaliser pratiquement ces principes est d'un intérêt assez limité, ces circuits pouvant éventuellement être appelés à changer par l'introduction de nouvelles technologies*; ce détail est donné seulement sur le plan des circuits.

Finalement en troisième partie nous parlerons des principaux essais que nous avons réalisés sur et avec notre système de façon à nous assurer qu'il répondait bien aux spécifications que nous nous étions imposées. Ces essais ont été concluants et très satisfaisants, il nous ont montré entre autre que l'utilisation d'un tel système dans une industrie pouvait amener des économies très substantielles permettant rapidement d'amortir les coûts d'investissement du système.

* Nous avons cependant utilisé les techniques les plus récentes et notamment des circuits C-MOS pour la partie logique.

PREMIERE PARTIE

DEFINITION DU SYSTEME

Dans cette première partie, nous définissons les principes généraux de fonctionnement du système ainsi que ses contraintes.

1.1 Méthode de facturation de la fourniture d'électricité

Quand un particulier paye sa facture d'électricité, il ne paye que pour l'énergie qu'il a consommée (kwh); il est soumis à ce qu'on appelle le tarif domiciliaire. Cependant tous les autres consommateurs d'électricité: magasins, immeubles, usines, etc... sont facturés d'une part pour l'énergie consommée et d'autre part pour l'appel de puissance. Pour certains de ces utilisateurs l'appel de puissance facturée tient également compte du facteur de puissance: " $\cos\phi$ ".

Lorsqu'on parle de puissance électrique il faut en fait spécifier trois quantités: la puissance effective, la puissance réactive et la puissance apparente; cette troisième quantité est la somme vectorielle des deux autres. Le facteur de puissance: F.P. ou $\cos\phi$ est défini comme étant le rapport de la puissance effective sur la puissance apparente. La puissance effective est celle qui, multipliée par le temps, correspond à une consommation réelle d'énergie. La puissance réactive est due à ce que les réseaux d'utilisations ont toujours une impédance complexe. La puissance réactive se traduit par un transfert de puissance entre la source et le réseau sans consommation d'énergie. Une puissance réactive élevée (c'est-à-dire un F.P. faible) présente plusieurs inconvénients pour le client et pour le fournisseur; d'une façon générale cela augmente les coûts d'investissement et les pertes.

Quand une compagnie fournit de la puissance électrique à un abonné elle doit considérer deux facteurs importants, afin d'amortir ses investissements et ses coûts de fonctionnement:

- a) La consommation d'énergie.
- b) L'appel maximum de puissance.

Toute tarification doit donc généralement tenir compte à la fois de l'énergie consommée et de la puissance mise à la disposition du consommateur. Cette double tarification est toujours appliquée lorsque la puissance demandée par le consommateur dépasse un certain niveau.

Par exemple, la facture d'un abonné soumis au tarif industriel de moyenne puissance de l'Hydro Québec (appendice 1) peut être calculée à partir de l'équation suivante:

$$F = \begin{cases} (1 + T) [Pa*t_1 + E*t_2] & 0 \leq E \leq 50 \text{ Pa} \\ (1 + T) [Pa*t_1 + 50 Pa*t_2 + (E - 50 Pa)*t_3] & 50 \text{ Pa} \leq E \leq 100 \text{ Pa} \\ (1 + T) [Pa*t_1 + 50 Pa*(t_2 + t_3) + (E - 100 Pa)*t_4] & 100 \text{ Pa} \leq E \leq 150 \text{ Pa} \\ (1 + T) [Pa*t_1 + 50 Pa*(t_2 + t_3 + t_4) + (E - 150 Pa)*t_5] & 150 \text{ Pa} \leq E \end{cases}$$

où:

(1)

F: Montant de la facture

E: Energie effective enregistrée pendant la période facturée

t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 : Prix facturé par unité suivant le tarif en vigueur

Pa: Puissance d'appel à facturer telle que définie dans l'appendice 1

T: Taux de taxation

Sans entrer dans les détails qui sont donnés en appendice, la puissance d'appel à facturer mentionnée dans l'équation 1 dépend de deux facteurs: le facteur de puissance et le facteur de charge.

Le facteur de charge est le rapport de "l'énergie réelle consommée au cours de la période de consommation" sur "l'appel de puissance

réelle maximum au cours de la période de consommation multiplié par cette période". En quelque sorte le facteur de charge qualifie la rationalité de l'utilisation de la puissance disponible. Il est utilisé pour pénaliser le consommateur qui fonctionne avec des pointes excessives par rapport à des puissances consommées faibles. Le facteur de puissance que nous avons défini plus haut, qualifie au contraire l'efficacité de l'utilisation de la puissance disponible. Pour des installations identiques, i.e. de même puissance installée, de consommation égale et de facteurs de charge égaux, la puissance d'appel, donc la facture, sera d'autant plus élevée que le facteur de puissance sera élevé. La tarification pénalise donc, et parfois fortement, les abonnés qui ont un facteur de puissance faible, comme on peut le voir à partir de l'exemple suivant.

Prenons deux abonnés ayant consommé pendant un mois la même énergie: 212,640 kwh, et dont l'un a eu pendant la dite période un facteur de puissance moyen égal à 0.91 et l'autre un facteur de puissance moyen égal à 0.4. Il est clair que les deux abonnés tout en ayant la même consommation auront eu des appels de puissance effective et apparente différents, qui auront été: 498.9 kw, 548.3 kva pour le premier et 500 kw, 1250 kva pour le second. Si on calcule P_a de (1) à l'aide des valeurs ci-dessus et de la méthode indiquée dans l'appendice 1 on trouve:

$$P_a = 500 \text{ kw et } 1125 \text{ kw respectivement.}$$

A l'aide de (1) on trouve alors:

$$F = \$3148.99 \quad \text{et} \quad \$5592.42 \text{ respectivement.}$$

A partir de l'exemple ci-dessus on voit donc à quel point il peut être intéressant pour un utilisateur industriel d'avoir un système lui permettant de corriger le facteur de puissance afin de le tenir aussi

voisin de l'unité que possible. Ceci a motivé notre recherche qui a donc consisté à mettre au point un système de régulation automatique pour la compensation de la puissance réactive.

1.2 Systèmes de régulation existants

Il existe de nombreux systèmes de régulation automatique pour la régulation du facteur de puissance. Tous ces systèmes peuvent être classés en cinq familles suivant la variable mesurée et régulée. On peut les classer comme suit:

- a) Mesure et régulation de la tension, système utilisé principalement au niveau de la distribution.
- b) Mesure et régulation du courant, système utilisé principalement pour les applications industrielles mais seulement si le facteur de puissance de l'installation est raisonnablement constant quel que soient les variations de charge .
- c) Mesure et régulation de la tension avec compensation en courant, système utilisé comme pour le cas # 1.
- d) Contrôle par horloge, système utilisé seulement si la charge reste constante pendant de longues périodes de temps et si les variations de charge se répètent d'une façon quotidienne et connue.
- e) Mesure et régulation de la puissance réactive, système utilisé jusqu'à présent chez certains abonnés de grande puissance, et là où le facteur de puissance peut varier dans de grandes proportions.

D'une façon générale la régulation est le plus souvent obtenue en branchant des banques de condensateurs sur la ligne d'alimentation. Dans quelques cas et seulement en grande puissance la régulation se fait par moteurs synchrones.

Les cinq systèmes de contrôle dont nous venons de parler sont uniquement utilisés par les distributeurs d'électricité ou les utilisateurs de fortes puissances.

La méthode utilisée dans les installations de petite et moyenne puissance consiste à installer des condensateurs de dimensions appropriées sur chaque charge inductive singulière. Ces condensateurs sont branchés automatiquement à la mise en service de la charge. La raison pour laquelle les installations de petite et moyenne puissances utilisent une compensation répartie plutôt qu'une régulation centrale d'un des cinq types indiqués plus haut est le coût plus élevé de ces (derniers) systèmes de régulation. La compensation par condensateurs distribués a cependant un inconvénient, elle contrôle plus qu'elle ne régularise, et par effet cumulatif de sur ou sous compensation, lors de variations simultanées de charge des moteurs, le facteur de puissance peut très bien atteindre des valeurs faibles et ce, pendant de longues périodes de temps; d'autre part la surcompensation cause des surtensions sur les lignes⁽⁷⁾. Ceci est dû à ce que la compensation est fixe, alors qu'en fait les variations de charge exigent une compensation variable. Toutes ces considérations, amènent donc à penser, qu'il serait utile de mettre au point un système de régulation automatique, adapté aux petites et moyennes puissances. D'un point de vue économique, il est cependant important que le coût d'un tel système soit rapidement amorti grâce aux économies réalisées sur la facturation.

D'autre part les systèmes de régulation par mesure de KVAR actuellement commercialisés et dont le principe général de fonctionnement est identique à celui du système sur lequel nous avons travaillé, sont des systèmes électromécaniques donc relativement imprécis et rudimentaires. Ces systèmes

ont deux inconvénients, à notre point de vue; comme ils sont électromécaniques, ils nécessitent entretien, réglage et mise au point fréquente; ils sont également sensibles aux chocs et vibrations. D'autre part, même s'il s'agit d'instruments de haute qualité ils ne permettent pas, de par leur conception, une régulation fine; ils permettent seulement de maintenir la puissance réactive en dedans d'une plage assez large.

1.3 Système de régulation mis au point

1.3.1 Avantages du système mis au point

Notre travail a consisté à mettre au point un système de régulation qui soit électronique; tout d'abord, un système électronique n'a pas les inconvénients des systèmes électromécaniques cités plus haut; un système électronique, nécessite peu ou pas d'entretien, il est peu sensible aux chocs, vibrations et poussières, il permet d'autre part de faire une régulation fine. En fait notre système permet théoriquement de faire une régulation aussi fine que désirée, encore que des considérations économiques rendent inutiles une régulation trop précise. Cependant la régulation que l'on peut obtenir avec le système que nous avons mis au point est supérieure à celle obtenue avec les systèmes disponibles actuellement sur le marché nord américain. Enfin un système électronique est moins encombrant, et théoriquement beaucoup plus fiable qu'un système électromécanique.

1.3.2 Stratégie de régulation

Lors de la conception d'un système de régulation il faut tenir compte de deux considérations. La première concerne le principe de régulation, i.e. quelle quantité faut-il réguler. La deuxième concerne le coût du système: un système ne présente d'intérêt que

si son emploi est justifiable d'un point de vue économique, et le calcul des coûts doit tenir compte non seulement du prix du régulateur lui-même, mais de tous les équipements qu'il faut lui annexer pour obtenir un système régulé. Nous allons étudier brièvement ces deux points.

1.3.2.1 Principe de régulation

Afin de régulariser la puissance réactive, on pourrait régulariser soit le facteur de puissance " $\cos\phi$ ", soit l'angle de déphasage " ϕ ", soit le facteur réactif " $\sin\phi$ ", soit la puissance réactive $Q = \sqrt{3} VI \sin\phi$ (pour un réseau triphasé). A première vue les trois premières méthodes paraissent plus attrayantes car elles exigent à priori la mesure d'une seule quantité; cependant du point de vue pratique les quatre méthodes exigent la mesure du même nombre de variables (8). Enfin un système basé sur la régulation de l'angle de déphasage, du facteur de puissance ou du facteur réactif a toujours des conditions d'instabilité (7). C'est pourquoi les régulateurs utilisés dans les installations où le facteur de puissance peut varier fortement régularisent de fait soit la puissance réactive soit le facteur de puissance compensé en courant; ces méthodes évitent d'avoir un système instable.

Le système que nous avons mis au point régularise la puissance réactive. Le régulateur a comme élément de base un système de capteurs mesurant automatiquement les tensions et courants nécessaires pour obtenir à la sortie un signal proportionnel à la puissance réactive, même si la charge n'est pas équilibrée. Le principe détaillé du régulateur sera donné plus loin.

1.3.2.2 Etude des coûts

Un travail de recherche portant sur un système ayant éventuellement des applications industrielles devrait normalement comporter non seulement une étude des coûts de l'instrument développé mais aussi du coût des appareils annexes que son utilisation peut exiger. En ce qui nous concerne nous avons pensé qu'il serait intéressant de faire un calcul d'optimisation des coûts du matériel annexe à l'instrument mis au point, un tel calcul permettant de mieux définir les équations de "design" du système. En effet l'étude des coûts du matériel annexe permettait d'une part, de décider laquelle parmi différentes stratégies de régulations, équivalentes au point de vue de l'instrument, était la plus rentable au point de vue coût du matériel annexe, et permettait d'autre part de choisir à partir de donnée économique et non pas d'une façon purement arbitraire et théorique la finesse de régulation du système.

En effet le principe général de fonctionnement du régulateur est le suivant: à l'entrée on mesure la puissance réactive totale du système et on la compare à deux valeurs de référence. Si la puissance réactive est plus grande que la valeur de référence supérieure, le régulateur branche une capacitance suffisante pour ramener la puissance réactive entre les deux références, et vice versa dans le cas contraire. Cependant la valeur de la capacitance qu'il faudra brancher variera continuellement avec la valeur de la puissance réactive à compenser. Théoriquement donc, le contrôle de la puissance réactive nécessiterait un grand nombre de condensateurs de valeurs variées dont la somme des puissances réactives capacitives compenserait la puissance réactive inductive de la charge. Pratiquement cependant pour des raisons de coût d'achat, d'entretien et de stockage, on doit limiter

le nombre et la variété des condensateurs utilisés. Les systèmes commerciaux utilisés jusqu'à présent régularisent la puissance réactive en branchant 1, 2, 3 ou au maximum 4 condensateurs égaux. Il est évident que la finesse de régulation augmente avec le nombre de condensateurs. Si les systèmes commerciaux n'utilisent au maximum que 4 étages de régulation, c'est parce que ces systèmes sont électromécaniques et que ce nombre représente en fait la limite de précision de ces systèmes.

Notre système qui est électronique, et qui a une précision supérieure à 1%, pourrait théoriquement faire une régulation très fine avec cent étages de régulation. Cependant une régulation aussi fine serait superflue et illusoire à cause de la précision de la valeur des condensateurs (10%) et de la largeur de la plage de réglage. Par contre, une régulation grossière, à faible nombre d'étages, a un inconvénient majeur, même si elle permet en fait dans certains cas de très bien se tenir dans la plage de réglage, elle entraîne des surtensions dues aux surcompensations (7). Les surtensions qui peuvent parfois atteindre 20% de la valeur normale peuvent être dangereuses, spécialement pour l'appareillage électronique que l'on trouve maintenant à peu près partout; d'autre part ces surtensions nécessitent un surdimensionnement des installations.

Entre ces deux extrêmes, régulation grossière avec risque de fortes surtensions et régulation très fine donc coûteuse, une régulation raisonnable devrait avoir au maximum une quinzaine d'étages de régulation. A partir des remarques ci-dessus, on peut alors commencer à définir les paramètres du calcul d'optimisation; ce calcul, pour être complet devrait également tenir compte des contraintes suivantes:

- Coût du régulateur, des condensateurs, des relais.

- Caractéristique de charge de l'usine régulée (cette caractéristique pouvant être différente d'un jour sur l'autre).
- Méthode de facturation employée.
- Coût d'installation.
- Coût d'entretien.
- Limite de surtension tolérée.

Il est clair qu'un tel calcul serait difficile à effectuer et seulement à l'aide d'efforts considérables. Nous sommes donc limités à faire une optimisation des coûts d'investissement et ce, dans le sens suivant.

Le calcul d'optimisation que nous avons effectué permet de déterminer à partir de la valeur de la puissance réactive maximum à compenser quelle stratégie de régulation il faut employer de façon à minimiser le coût d'investissement. Par stratégie de régulation nous entendons d'une part que cette régulation peut être faite en un nombre d'étages quelconque, nombre compris entre 2 et 15; d'autre part, ce nombre d'étages de régulation peut être réalisé par différentes méthodes utilisant des condensateurs en nombre et dimensions différents, le nombre maximum étant de 15 condensateurs valant chacun une unité et le nombre minimum étant de 4 condensateurs valant respectivement 1, 2, 4 et 8 unités, avec entre ces deux extrêmes de nombreux cas intermédiaires. En ce qui concerne les coûts, ce sont ceux des condensateurs et des contacteurs nécessaires pour brancher les condensateurs [9].

Le calcul d'optimisation a été fait à l'aide d'un programme Fortran (annexe B) dont l'organigramme général est donné en figure 1.

Le programme a comme donnée initiale la puissance réactive à compenser. Le programme entre alors dans une boucle qui sera effectuée un nombre de fois égal au nombre d'étages de régulation; ce nombre est compris, pour les raisons que nous avons mentionnées plus haut, entre 2 et 15. Pour un nombre d'étages de régulation donné il y a plusieurs stratégies de régulation possible comme nous l'avons également indiqué plus haut; pour chaque stratégie étudiée le programme calcule d'abord les valeurs des capacitances qu'il faudra utiliser pour satisfaire à cette stratégie. Il est clair que dans de nombreux cas il n'existera pas dans les catalogues des valeurs de condensateurs correspondant exactement aux valeurs de capacitance exigée; le programme choisit alors la valeur la plus proche existant dans le catalogue. Puisque dans certains cas les valeurs choisies ne correspondent pas exactement aux valeurs exigées, il y aura donc erreur de compensation. Le programme rejette alors la stratégie où l'erreur de régulation est supérieure à 5%. Dans le cas contraire le programme calcule le coût total d'investissement (condensateurs et relais correspondants) pour chacune des stratégies possibles. Le programme choisit enfin quelle stratégie a le coût d'investissement minimum.

Un des résultats très intéressants du programme est que la stratégie de régulation de coût minimum est celle qui utilise des condensateurs identiques, ce qui n'est pas évident à priori puisque c'est celle qui utilise le plus grand nombre de condensateurs et donc de contacteurs. Ce paradoxe apparent est dû à ce que le prix des condensateurs et contacteurs n'est pas proportionnel à leur capacité. Par exemple un condensateur de 400 kvars coûte 9.2 fois plus cher qu'un condensateur de 50 kvars au lieu de 8 fois plus cher. Un autre

résultat important du programme est que le nombre d'étages de régulation correspondant à un coût minimum, dépend de la puissance réactive à compenser ce qui se comprend pour les mêmes raisons que ci-dessus. Bien que le calcul des coûts de stockage des pièces de rechange n'a pas été inclus dans le programme, il est cependant très intéressant de noter que la stratégie de régulation ayant un coût d'investissement minimum est également celle qui de toute évidence à un coût minimum pour le stockage de pièces de rechange.

DEUXIEME PARTIE

DESCRIPTION DU SYSTEME

2.1 Principe du régulateur

Un régulateur idéal maintiendrait la puissance réactive à zéro en branchant la capacitance nécessaire pour compenser cette puissance réactive. Cependant, pratiquement, il ne sert à rien de maintenir la puissance réactive exactement à zéro; il suffit en effet de la maintenir entre 2 valeurs de référence, valeurs qui dépendent de la tarification imposée. D'autre part, le régulateur idéal suppose qu'on peut obtenir n'importe quelle valeur de capacitance et ce de façon continue. Pratiquement cela est impossible comme nous l'avons expliqué plus haut; il faut en fait brancher des condensateurs discrets i.e. remplacer la régulation idéale continue par une régulation pratique discontinue.

Le régulateur pratique que nous avons mis au point diffère donc du régulateur idéal. Il maintient la puissance réactive dans une plage déterminée qui dépend d'une part de l'installation où le régulateur est installé, d'autre part du nombre d'étages de régulation et enfin des contraintes de la tarification en vigueur. Le maintien de la puissance réactive dans la plage de réglage se fait en branchant éventuellement jusqu'à quinze (15) condensateurs identiques. D'autre part le régulateur corrige plus rapidement la puissance réactive élevée que la puissance réactive faible et ce pour des raisons évidentes. Enfin nous avons introduit un délai dans la réponse du système et ceci de façon à éviter des branchements ou débranchements intempestifs des condensateurs causés par des variations transitoires et de brève durée.

Le principe du régulateur est le suivant: la puissance réactive est mesurée d'une façon continue. Elle est ensuite échantillonnée à une fréquence qui dépend de la valeur de la puissance réactive. La valeur échantillonnée est ensuite comparée à 2 valeurs de référence. Si cette valeur est en dehors de la fenêtre du comparateur chaque transition du comparateur fait avancer un compteur à modulo programmable. L'"overflow" de ce compteur commande suivant les cas le branchement ou débranchement de condensateurs. Le délai dont nous avons parlé ci-dessus est donc introduit par le compteur à modulo. La rapidité de correction du régulateur dépend de la fréquence d'échantillonnage. Cette fréquence dépend de la puissance à corriger et la correction est donc d'autant plus rapide que la puissance réactive est plus élevée.

2.2 Description du régulateur

Le régulateur est installé entre le transformateur d'alimentation et la charge (usine généralement) tel qu'indiqué sur la figure 2, et derrière les compteurs utilisés pour la facturation. Comme la puissance que le système doit réguler pourra varier dans de grandes proportions d'une installation à l'autre, nécessitant de ce fait des transformateurs de mesure différents, ces transformateurs ne sont pas inclus dans notre système. Cependant l'entrée du système est standard i.e. 120 volts, 5A, pour se conformer aux secondaires des transformateurs de mesure utilisés en Amérique du Nord. Tel que nous l'avons expliqué précédemment le système de régulation maintient la puissance réactive à l'intérieur d'une plage déterminée, en agissant sur le panneau de contrôle, lequel branche ou débranche les condensateurs nécessaires pour assurer la régulation. Ce panneau de contrôle n'est pas inclus dans le

système que nous avons mis au point, car comme les transformateurs de mesure il dépend du système régulé.

2.2.1 Seconds transformateurs

Le rôle des seconds transformateurs de mesure est triple, d'une part abaisser les courants et tensions des premiers transformateurs de mesure à des valeurs compatibles avec celles des circuits électroniques qui les suivent, d'autre part, pour les transformateurs de tension, effectuer un déphasage de 90^0 , enfin, pour les transformateurs de courant, faire une conversion courant-tension, figure 3. Les sorties $v_1(t)$ et $v_2(t)$ sont à 9 volts pour $V_1(t)$ et $V_2(t)$ de 120 volts et les sorties $i_1(t)$ et $i_2(t)$ sont en fait des tensions de 9 volts pour des courants $I_1(t)$ et $I_2(t)$ de 5 ampères. Les diodes Zener en parallèles sur la sortie des transformateurs servent à supprimer les surtensions transitoires. Elles ont été calculées de façon à écrêter les tensions dépassant 1.2 fois la valeur maximum à l'entrée du système, et protègent ainsi les entrées des multiplicateurs.

Le module des seconds transformateurs est montré sur la figure 4.

2.2.2 Système de mesure de la puissance réactive

2.2.2.1 Principe de la mesure [8], [10]

Par définition la puissance réactive totale instantanée q d'un circuit triphasé est:

$$q = i_a v_{ab} + i_c v_{cb} ; \quad (4)$$

où i_a et i_c sont les courants instantanés dans les phases a et c, et

v_{ab} et v_{cb} sont les différences de potentiel instantanées entre les phases a et b et c et b respectivement, déphasées de 90° . Ce déphasage de 90° est réalisé par les transformateurs de mesure.

D'autre part la puissance réactive moyenne, Q_1 i.e. celle qui est mesurée par les compteurs et qui sert pour la facturation est donnée par:

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T q \, dt \quad (5)$$

Pour mesurer cette puissance réactive moyenne on utilise donc deux multiplicateurs qui effectuent les produits $i_a v_{ab}$ et $i_c v_{cb}$ (4). Les multiplicateurs sont suivis d'un additionneur et d'un filtre passe bas. En effet, le circuit le plus simple pour prendre la valeur moyenne d'un signal périodique est le filtre passe bas; il suffit que sa fréquence de coupure soit inférieure à la fréquence du signal périodique dont on prend la valeur moyenne; le nombre de pôles du filtre utilisé dépend du rapport fréquence de coupure/fréquence maximum du signal. Dans notre cas nous avons utilisé un filtre du 1° degré (figure 5).

2.2.2.2 Multiplicateur

Quatre types de multiplicateurs sont généralement utilisés en électronique: [11], [12] Ce sont les multiplicateurs à transconductance, les multiplicateurs à effet Hall, les multiplicateurs à amplificateurs logarithmiques et exponentiels, et les multiplicateurs à échantillonnage.

Tous ces multiplicateurs ont leurs avantages et inconvénients respectifs, en termes de précision, stabilité, linéarité, réponse en fréquence, etc... Nous avons choisi le multiplicateur à échantillonnage, car même si c'est celui dont la réponse en fréquence est la plus basse, il est très supérieur aux autres dans toutes ses spécifications; quant à la limite en fréquence que l'on peut atteindre avec ce genre de multiplicateur, elle est très supérieure à la fréquence des signaux que nous devons mesurer (60 Hz). Dans ce multiplicateur les signaux à multiplier sont échantillonnés à intervalles réguliers, en principe au moins à 2 fois la fréquence maximum des signaux à multiplier (théorème de Nyquist), parfois d'ailleurs à une fréquence très supérieure à cette valeur théorique afin de simplifier le circuit. Nous avons mis au point un multiplicateur original et dont le principe de fonctionnement a été étudié par Castellani[13]. Le principe général de ce multiplicateur consiste à produire des impulsions dont la hauteur est proportionnelle à une des quantités à multiplier et dont la durée est proportionnelle à l'autre. Même si un temps ne peut être négatif, un simple artifice permet d'obtenir facilement un multiplicateur à 4 quadrants. Le schéma de réalisation du multiplicateur est indiqué en figure 6, le module correspondant est indiqué en figure 7.

2.2.3 Echantillonneur

Le rôle de l'échantillonneur est d'actionner un interrupteur placé entre les multiplicateurs et les comparateurs. Comme nous l'avons dit précédemment la fréquence d'ouverture et fermeture de cet interrupteur dépend de la puissance réactive de façon à ce que celle-ci soit corrigée d'autant plus rapidement qu'elle est plus élevée. Le schéma

de principe de l'échantillonneur est donné en figure 8 et le circuit électronique en figure 9.

L'amplificateur non linéaire dont la fonction de transfert est également indiquée en figure 8 sert à faire réagir le système plus rapidement si la puissance réactive est négative (capacitive) que si elle est positive (inductive). En effet il y a rarement des variations transitoires de courte durée si la puissance réactive est négative alors que l'on peut en avoir si la puissance réactive est positive.

La sortie de l'amplificateur non linéaire est l'entrée de contrôle de l'oscillateur contrôlé en voltage (VCO). Etant donné que la période d'intégration des indicateurs d'appel est de 15 minutes, il est inutile de chercher à compenser trop rapidement la puissance réactive. D'une façon très à priori une compensation à toutes les secondes suffirait pour avoir une régulation de l'ordre de 1/1000 (1 seconde/15 minutes). Bien que nous ne cherchions pas une telle précision nous avons cependant choisi une période d'échantillonnage de 1 seconde comme étant la période utilisée lorsque la puissance réactive à compenser est maximum. Ceci représente également aussi une limite qu'il ne faut pas dépasser sous peine de rendre le système instable et ce à cause des temps de réponse des contacteurs des condensateurs.

Pour des raisons de coût, stabilité et fiabilité il est préférable d'utiliser un "VCO" dont la fréquence nominale est de l'ordre du KHz suivit d'un diviseur, qu'un "VCO" dont la fréquence nominale est de un Hz. Le "VCO" utilisé est une partie d'un "Phase Locked Loop", (PLL), (# RCA-CD4046A) dont la fréquence est réglable avec un potentiomètre.

tre. Le diviseur est un compteur binaire (# RCA-CD4040A) dont on utilise la sortie du dixième bit, ce qui divise la fréquence du VCO par 1024 (2^{10}).

Cette sortie du compteur aurait pu actionner directement l'interrupteur. Cependant pour la réalisation des circuits logiques et séquentiels, il est nécessaire d'avoir une impulsion de durée bien définie et le compteur est donc suivi d'un monostable (# RCA-CD4047A). La durée de l'impulsion, qui dépend de R et C, est de 200 msec (figure 9). Le translateur de niveau rend compatible la sortie C.MOS du monostable avec la "switch" analogique qui est réalisée en JFET.

2.2.4 Comparateurs

Le rôle des comparateurs est d'envoyer une impulsion vers le système de commande de branchement des condensateurs chaque fois que la puissance réactive est supérieure à une valeur prédéterminée et réglée lors de la calibration, et d'envoyer une impulsion vers le système de commande de débranchement des condensateurs à chaque fois que la puissance réactive est inférieure à une valeur également prédéterminée et réglée lors de la calibration.

Ces comparateurs sont réalisés à l'aide d'amplificateurs opérationnels de type 747 (figure 10). Une des entrées des comparateurs est la puissance réactive mesurée. L'autre entrée est reliée à une tension de référence qui représente la valeur maximum permise à la puissance réactive avant que le système la corrige. Les tensions de références ont une stabilité meilleure que .01%.

Si la puissance réactive mesurée est supérieure ou inférieure à la puissance réactive positive ou négative permise, l'un des comparateurs change d'état.

La translation de niveau entre la sortie des comparateurs et l'entrée des circuits logiques qui les suit est faite à l'aide des diodes et des résistances R_1 et R_2 (figure 10); les diodes servent à bloquer les tensions négatives à la sortie des comparateurs, car les circuits logiques qui les suivent sont en C-MOS et peuvent être détruits si on applique un signal négatif sur une entrée. Le module de l'échantillonneur (§ 2.2.3) et des comparateurs (§ 2.2.4) est montré en figure 16.

2.2.5 Unité de temporisation

Comme nous l'avons dit plus haut il est important d'éviter les enclenchements inutiles et intempestifs dus à des pics transitoires de courtes durées. Il faut donc temporiser la réponse du système. Le délai est introduit à l'aide de 2 compteurs à modulo programmable, un pour le branchement et l'autre pour le débranchement; le modulo peut être différent pour les 2 compteurs et ce modulo est réglé lors de la calibration. Ce réglage permet d'avoir un délai plus ou moins long dans la réponse du système.

Les transitions des comparateurs, après passage dans des circuits logiques assurant quelques fonctions annexes, entre autre la remise à zéro, (figure 11), font avancer les compteurs (# MC-14526). La sortie de ces compteurs va au circuit de commande. Les modulus des compteurs peuvent être réglés entre 1 et 16, ce qui donne un délai

variant de 1 à 16 secondes lorsque la puissance réactive est maximum. Le réglage du modulo se fait lors de la mise en service du régulateur, et sa valeur dépend de l'exploitation régulée.

2.2.6 Unité de commande

Comme nous l'avons dit précédemment le régulateur peut compenser la puissance réactive en branchant jusqu'à 15 condensateurs identiques. D'une façon plus précise le régulateur fonctionne de la façon suivante. Chaque fois que la puissance réactive dépasse la limite prescrite, et pendant un temps suffisamment long (§ 2.2.5), une impulsion commande le branchement d'un condensateur ce qui aura pour effet de ramener la puissance réactive résultante dans les limites permises. Si la puissance réactive continue d'augmenter ou si cette puissance réactive prenait une valeur élevée, les impulsions venant du système de temporisation commanderont la mise en circuit d'un ou plusieurs (séquentiellement) autres condensateurs. De la même façon en cas de surcompensation, au delà de la limite permise, les impulsions commanderont la mise hors circuit d'un ou plusieurs condensateurs. Ces commandes séquentielles de branchement ou débranchement sont réalisées à l'aide d'un compteur "Up/Down" à 4 bits (# RCA-4029) à modulo réglable de 0 à 15, d'un décodeur 4 à 16 et de portes logiques. Le modulo du compteur représente le nombre de condensateurs utilisés pour la régulation, le rôle du décodeur est évident, quant aux portes logiques, elles ont trois fonctions. Ces portes servent d'abord à choisir le mode "Up/Down" suivant que les impulsions sont dues à une sous-compensation ou une surcompensation, elles servent d'autre part à éviter le retour à zéro ou au modulo, si la

sur ou la sous-compensation est supérieure aux valeurs que le système peut régler, et enfin elles servent à verrouiller les condensateurs enclenchés. Le schéma du circuit réalisant les fonctions décrites ci-dessus est donné en figure 12 et 12A.

Les contacteurs des condensateurs sont commandés par des relais optoélectroniques qui font l'interface entre les circuits logiques et le panneau de contrôle.

L'unité de temporisation et une partie de l'unité de commande sont montrés sur la figure 13, la deuxième partie de l'unité de commande est sur le module montré sur la figure 14.

2.3 Remise à zéro (Figure 6)

Il est important que le régulateur soit dans un état connu lors de la mise en marche du système et ce pour 2 raisons:

- Premièrement, il ne faut pas que l'un des états transitoires et arrivant au hasard lors de la mise sous tension des circuits logiques soit telle quelle conduise à l'enclenchement d'un ou plusieurs condensateurs.

- Deuxièmement, comme le système contient des circuits séquentiels (compteurs) il est nécessaire de les initialiser.

La remise à zéro se fait à l'aide d'une impulsion dont la durée est réglée par un circuit R.C. Il est clair que cette durée doit être plus longue que le délai de propagation maximum des circuits logiques que cette impulsion doit traverser. Cette impulsion remet à zéro les 2 compteurs du circuit de temporisation (§ 2.2.5) le compteur du

circuit de commande (§ 2.2.6), enfin elle est appliquée directement au "inhibit" du décodeur (§ 2.2.6) figure 12A pour s'assurer qu'à la mise en service tous les contacteurs des condensateurs sont ouverts.

2.4 Algorithme de régulation

Pour faire la synthèse des éléments du régulateur que nous venons de présenter, nous donnons maintenant l'algorithme de régulation du système, figure 15. A la mise en service une lampe verte s'allume pour indiquer que le système est en fonctionnement, les blocs d'alimentation des circuits électroniques sont mis en puissance et une impulsion initialise le système (§ 2.3). D'autre part un relais miniature branche les sorties des seconds transformateurs de mesure à l'entrée des multiplicateurs. La puissance réactive est alors lue à des intervalles de temps qui dépendent de la puissance réactive elle-même (§ 2.2.3). Pendant le temps d'échantillonnage la valeur lue est comparée aux deux valeurs de référence (§ 2.2.4). Trois cas peuvent alors se présenter selon que la puissance réactive est plus grande que la limite supérieure, plus petite que la limite inférieure, ou entre les deux.

1er cas: $-Q_{MIN} < Q(t) < Q_{MAX}$.

Dans ce cas la puissance réactive n'a pas à être corrigée et on revient en position de lecture.

2e cas: $Q(t) \geq Q_{MAX}$.

Dans ce cas il faut brancher un ou des condensateurs de façon à ramener $Q(t)$ entre les 2 valeurs de référence, et ce après un délai, afin d'éviter les branchements inutiles dûs à des transitions

de courtes durées (§ 2.2.5). Les transitions à la sortie du comparateur remettent à zéro le compteur qui fait la temporisation au débranchement (CMD) puis augmentent d'une unité le compteur qui fait la temporisation au branchement (CMB). Si le compteur n'a pas atteint son modulo, i.e. si le délai d'attente n'est pas encore écoulé, il n'y a pas de branchement et on retourne en lecture. Dans le cas contraire il y a branchement d'un condensateur puis remise à zéro du compteur CMB, de façon à réenclencher la temporisation, pour assurer le délai nécessaire au branchement éventuel d'un autre condensateur. On retourne alors en lecture.

3e cas: $Q(t) \leq Q \text{ MIN.}$

L'algorithme est similaire au cas précédent avec les modifications appropriées.

La figure 17 montre l'apparence extérieure du régulateur construit, et la figure 18, montre le montage des modules et l'assemblage de l'instrument.

TROISIEME PARTIE

ESSAIS DU SYSTEME

3.1 Adaptation, réglage et calibration

Comme le régulateur mis au point est destiné à être branché sur des installations de puissance très différentes, ayant d'autre part des chartes de charge très différentes suivant le type d'installation, ayant également des facteurs de puissance moyens différents et finalement demandant une régulation plus ou moins fine (fonction du nombre de condensateurs installés), il a fallu prévoir lors de la conception et de la réalisation du régulateur, les moyens permettant de l'adapter le plus facilement possible à toutes les conditions de fonctionnement éventuelles. Il fallait d'autre part s'assurer que l'on puisse également dans tous les cas optimiser son fonctionnement.

Pour faire le réglage et la calibration du régulateur avant de l'installer dans une industrie donnée il faut connaître:

- la tension nominale des lignes d'alimentation,
- le courant maximum utilisé par cette industrie,
- le déphasage moyen maximum enregistré,
- la charte de charge d'une journée typique,
- le nombre de condensateurs que cette industrie désire installer.

A partir de ces données nous pouvons alors:

- spécifier les premiers transformateurs de mesure (§ 2.2)

- régler - la fréquence du "VCO" et le modulo des compteurs de l'unité de temporisation (§ 2.2.3 et 2.2.5)
- le modulo du compteur de l'unité de commande (§ 2.2.6)
- la plage de réglage du régulateur (§ 2.2.4)
- calibrer les deux multiplicateurs (§ 2.2.2.2).

3.1.1 Spécification des premiers transformateurs de mesure

Notre système est relié à quatre premiers transformateurs de mesure: deux pour la tension et deux pour le courant.

Les transformateurs de tension doivent être choisis de façon à ce que la tension au secondaire soit de 120 volts quelque soit la tension nominale au primaire; dans le cas le plus fréquent la tension du primaire est de 600 volts. Quant aux transformateurs de courant ils doivent être choisis de façon à ce que le secondaire soit de cinq ampères pour le courant maximal.

Nous rappelons que les valeurs des secondaires sont des valeurs standards.

3.1.2 Réglage de l'unité de temporisation

La temporisation du régulateur peut être réglée depuis la fraction de seconde jusqu'à la minute et plus en changeant la fréquence du "VCO" et/ou le modulo des compteurs de temporisation. Rappelons que cette temporisation sert à prévenir des branchements et débranchements intempestifs des condensateurs.

Cette temporisation est généralement différente au branchement et au débranchement. En effet la puissance réactive augmente pour une courte durée par exemple pendant les quelques secondes du démarrage d'un moteur. Dans ce cas il est inutile de brancher un condensateur de régulation puisqu'il faudrait le débrancher quelques secondes plus tard. Quant à la puissance réactive intégrée pendant ces quelques secondes elle n'aura qu'un effet négligeable sur l'indicateur d'appel qui rappelons-le intègre sur un quart d'heure (900 secondes). Au contraire quand la puissance réactive devient capacitive, par surcompensation, par exemple à l'arrêt d'un moteur, on peut alors débrancher instantanément un condensateur de régulation. Le rapport délai au branchement/délai au débranchement peut être réglé, entre 8 et 1/32. Quant à la fréquence du "VCO" elle est réglée aux environs de la seconde. Le réglage final du "VCO" et des modules des compteurs se fait après étude de la charte de charge de l'industrie concernée.

3.1.3 Réglage du modulo de l'unité de commande

Le modulo du compteur de l'unité de commande est évidemment égal au nombre de condensateurs installés, et il est réglé avant la mise en service à l'aide d'interrupteurs miniatures.

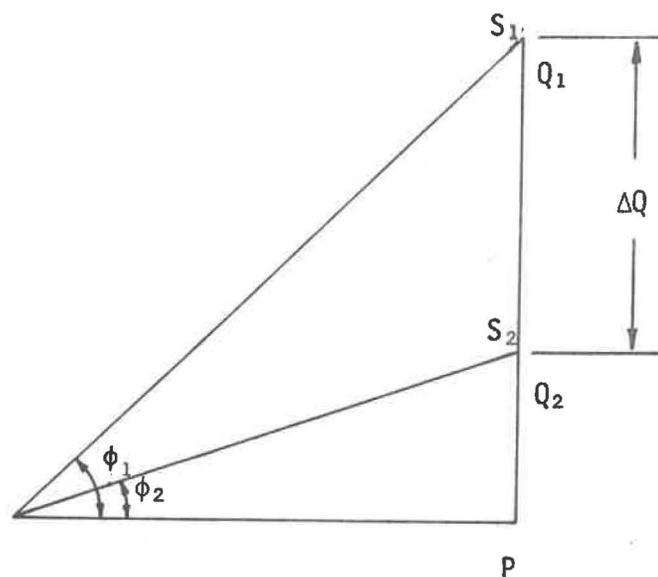
3.1.4 Réglage de la plage du réglage du régulateur

Le régulateur envoie des ordres de branchement ou débranchement si la puissance réactive est plus grande qu'une certaine puissance Q_{MAX} (branchement) ou inférieure à une certaine puissance Q_{MIN} (débranchement) tel qu'expliqué aux paragraphes 2.1 et 2.4. Dans le régulateur ces valeurs Q_{MAX} et Q_{MIN} sont en fait traduites par deux tensions de référence réglables V_{MAX} et V_{MIN} . La puissance réactive, elle, est traduite par une tension v dont la valeur maximum est 10 volts lorsque la puissance réactive de l'installation considérée est maximum.

Dans un cas idéal le réglage devrait être fait à partir d'une étude des enregistrements en continu des puissances consommées. Si ces données ne sont pas accessibles on peut alors utiliser la méthode suivante, qui sans être optimum permet cependant de répondre aux spécifications imposées, à savoir maintenir le facteur de puissance moyen à une valeur supérieure à la valeur exigée. Pour ce faire il suffit de connaître les données du compteur utilisées pour la facturation à savoir: les valeurs maximum de la puissance effective \vec{P} , réactive \vec{Q}_1 et apparente \vec{S}_1 intégrées sur un quart d'heure. Ceci permet de calculer l'angle de phase moyen maximum ϕ_1 . Il faut savoir d'autre part quel déphasage ϕ_2 on veut obtenir à l'aide du système de régulation. La valeur de ϕ_2 est fixée par la compagnie qui fournit l'énergie électrique ($\phi_2 = 25.8^\circ$ pour l'Hydro Québec). Si le déphasage est supérieur à cet angle cela entraîne une pénalisation pour l'utilisateur sous forme d'une facture majorée (appendice 1). Pour ramener ϕ_1 à ϕ_2 il faut brancher une charge capacitive ΔQ donnée par l'équation:

$$\Delta Q = P(\text{tg } \phi_1 - \text{tg } \phi_2), \quad (6)$$

comme on peut le voir à partir de la figure ci-dessous.



Dans le régulateur, Q_1 correspond à une tension de 10 volts à la sortie du multiplicateur, donc ΔQ correspond à une tension ΔV de $10 \frac{\Delta Q}{Q_1}$ [volts], et Q_2 à une tension de $10 \frac{Q_2}{Q_1}$ [volts].

Pour s'assurer que le régulateur fonctionne d'une façon telle que l'utilisateur ne soit pas pénalisé, il faut que les condensateurs de compensation soient branchés sur le circuit si la tension de sortie du multiplicateur est supérieure à $10 \frac{Q_2}{Q_1}$ [volts]. Le potentiomètre permettant d'ajuster la tension de comparaison du comparateur de branchement (§ 2.2.4) est réglé de façon que cette tension soit égale à $10 \frac{Q_2}{Q_1}$ [volts].

Pour déterminer la puissance réactive donc la tension de comparaison V_{MIN} à laquelle on doit débrancher les condensateurs il faut tenir compte du nombre de condensateurs utilisés et de leur tolérance.

On a:
$$V_{MAX} - V_{MIN} = \delta V = \frac{V}{N} \quad (7)$$

où N est le nombre de condensateurs utilisés pour la régulation. On a donc:

$$V_{MIN} = V_{MAX} - \delta V \quad (8)$$

Comme les condensateurs ont une tolérance de 10%, la valeur de δV est augmentée de 15% (10% pour la tolérance et 5% de coefficient de sécurité), cette augmentation de la largeur de la plage de réglage prévenant ainsi des branchements et débranchements successifs et intempestifs des condensateurs.

Si la valeur de V_{MIN} calculée en (8) est positive ou nulle, on règle alors V_{MIN} à priori à -0.5 volt et la nouvelle valeur de réglage de V_{MAX} est alors:

$$V_{MAX} = -0.5 + \delta V . \quad (9)$$

En effet ce genre de situation se présente si le nombre de condensateurs est élevé et si le déphasage moyen sans régulation est déjà faible. Dans ce cas le régulateur est conçu de telle façon qu'il permet une régulation meilleure que celle imposée par la facturation. Il y a donc intérêt à profiter de cette situation pour garder la puissance réactive corrigée à des valeurs aussi faibles que possible, même si cela ne diminue en rien la facturation. Cela permet en effet de diminuer les surtensions et de parer à une éventuelle, et fort probable, augmentation du facteur de puissance exigé.

Rappelons en effet qu'il ne faut pas régler V_{MIN} à zéro volt car cela créerait du pompage [7]. En effet le circuit serait en résonance. Il ne faut pas non plus trop surcompenser car cela crée des surtensions. C'est pourquoi dans ces cas particuliers la valeur de V_{MIN} est fixée à -0.5 V.

3.1.5 Calibration de l'unité de mesure de puissance réactive

Pour calibrer cette unité il faut connaître la puissance apparente maximum du système à réguler ainsi que l'angle de déphasage à cette puissance maximum. Pour faire cette calibration on suppose que les phases sont équilibrées. Connaissant la puissance apparente maximum, on peut donc calculer le courant au primaire des seconds transformateurs de mesure du courant. Rappelons que les primaires des seconds transformateurs de mesure de tension sont toujours à 120 volts. Il est alors facile d'alimenter les seconds transformateurs de mesure avec les courants calculés et déphasages connus à l'aide d'une ligne à charge résistive et inductive variable. On règle alors l'unité de mesure de puissance réactive de façon à obtenir une tension de sortie de 10V .

3.2 Vérification du fonctionnement du régulateur.

Le régulateur que nous avons mis au point n'est qu'une partie, la partie mesure et commande, d'un système de régulation de puissance réactive. Avant d'essayer ce régulateur dans un système de régulation tel que montré dans la figure 2, il fallait d'abord s'assurer du bon fonctionnement du régulateur lui-même. Pour cela nous avons fait une première série d'essais à l'aide du montage montré sur la figure 19 et dont le schéma est indiqué en figure 20. Le régulateur est branché sur la ligne, à la sortie des premiers transformateurs de mesure ; la fermeture des contacteurs des condensateurs est simulée par l'éclairage de cinq lampes témoins. Dans cet essai on ne branche donc pas les condensateurs assurant la régulation, on vérifie seulement la réponse du régulateur à des variations de puissance réactive; la vérification du bon fonctionnement en régulation a fait l'objet d'essais ultérieurs qui seront décrits plus loin.

Afin de pouvoir faire varier la puissance réactive de la ligne, celle-ci est chargée par un moteur synchrone de 1 KVA-220V, 3 phases, dont on peut faire varier l'excitation. Le moteur synchrone est couplé à une machine à courant continu. Cette dernière est d'abord utilisée comme moteur pour la mise en synchronisme de la machine synchrone avec le réseau. Une fois le moteur synchrone connecté au réseau, celui-ci entraîne la machine à courant continu qui lui sert de charge. Une charge ohmique variable est branchée en triangle sur la ligne. Elle permet de régler la puissance fournie par la ligne, et éventuellement de déséquilibrer les phases.

Pour faire varier les déphasages on peut donc :

- soit changer le courant d'excitation du moteur synchrone à l'aide du Variac, ce qui permet d'avoir des puissances

réactives positives ou négatives (sous-excitation ou sur-excitation),

- soit changer le courant d'excitation de la machine c.c. à l'aide du rhéostat de champ, ce qui change la charge du moteur synchrone,
- soit changer la charge ohmique.

Nous avons fait une série d'essais pour différentes valeurs de déphasage et de puissance réactive tant inductives que capacitives. Nous avons alors vérifié d'une part que, pour une puissance réactive inductive donnée, les lampes témoins simulant la fermeture des contacteurs des condensateurs s'éclairaient successivement, dans l'ordre prévu, et à des intervalles de temps égaux, tandis que si la puissance réactive était capacitive et de même valeur absolue que précédemment les lampes témoins s'éteignaient successivement dans l'ordre inverse du cas précédent, également à des intervalles de temps égaux, mais deux fois plus courts que précédemment (§ 2.2.3). L'allumage ou l'extinction successive des lampes témoins à intervalles de temps réguliers était dû évidemment à ce que le régulateur fonctionnait sans contre-réaction puisque l'on ne branchait ou débranchait pas effectivement les condensateurs qui auraient assuré la régulation.

3.3 Essais en régulation

Nous avons finalement essayé le régulateur en fonctionnement réel, i.e. en boucle fermée, avec contre réaction. Pour les essais en régulation nous avons fait un montage (figure 19) dont le schéma de principe est indiqué en figure 21. Notons que ce schéma est très semblable à celui de la figure 20, cependant il contient en plus les contacteurs et les condensateurs.

Les essais en régulation avaient pour but:

1^o de s'assurer que le régulateur compensait automatiquement et tel que prévu la puissance réactive demandée par la charge,

2^o de mesurer le temps de réponse du régulateur à des variations de puissance réactive,

3^o de simuler en laboratoire et à échelle réduite le fonctionnement du régulateur dans une situation industrielle typique,

4^o de calculer à partir de cette simulation les économies réalisées sur la facturation grâce à l'utilisation du régulateur.

Des mesures et calculs préalables faits sur le système d'essai nous permettaient de faire varier facilement et d'une façon connue la puissance réactive en réglant l'excitation du moteur synchrone. Les principaux résultats de nos essais sont illustrés sur les figures 22, 23 et 24, qui sont des enregistrements de la puissance réactive en fonction du temps.

La figure 22 montre dans la première moitié du graphique, la réponse du système à une variation instantanée de puissance réactive, depuis une valeur nulle jusqu'à la valeur maximum que l'on pouvait imposer au système avant le décrochement du moteur synchrone. Ceci correspondait dans le montage d'essai à 670 VARS. Après correction par le régulateur la puissance réactive demandée par la charge simulée était ramenée à zéro, et la réponse correspondante du système est indiquée dans la deuxième moitié du graphique.

Sur la première partie de cet enregistrement on voit clairement le branchement successif des condensateurs avec diminution correspondante et par paliers de la puissance réactive résultante avec des temps de branchement de plus en plus longs.

Rappelons en effet (§ 2.2.3 et 2.2.5) que le temps de réponse du régulateur dépend de la puissance réactive à corriger. Sur la deuxième partie on peut suivre le débranchement successif des condensateurs, avec également des temps de débranchement de plus en plus longs mais cependant plus courts que les temps de branchement. Remarquons enfin que sur cet enregistrement on voit clairement le délai apporté par le système de mesure de la puissance réactive (multiplicateurs), délai ajouté intentionnellement comme temporisation supplémentaire à la réponse du système.

La figure 23 a été obtenue dans des conditions identiques à celles de la figure 22 mais pour une variation de puissance réactive allant de 0% à 50% de la valeur maximum (335 VARS) et vice-versa. Cependant nous n'avons dans ce cas que branchement et débranchement de deux condensateurs, avec évidemment des temps de réponse plus longs que dans le cas précédent.

La figure 24 est un enregistrement simultané de la puissance réactive avant le régulateur et après le régulateur. Cette puissance réactive est celle qui aurait été enregistrée par les indicateurs d'appel en absence de régulation; le relevé de ces indicateurs est utilisé pour la facturation. L'enregistrement a été fait sur une période de quinze (15) minutes ce qui correspond à la période d'intégration des indicateurs

d'appel. Cet enregistrement montre clairement que le régulateur fonctionne tel que désiré, et solutionne de façon satisfaisante le problème qui nous était posé.

D'autre part cet enregistrement nous a permis de faire une facturation fictive afin d'estimer les économies que l'utilisation d'un tel régulateur permettrait de réaliser. Pour cela nous avons supposé que l'enregistrement de la figure 24 se serait reproduit d'une façon identique tous les quarts d'heure, pendant un jour ouvert ordinaire, d'une durée de huit heures, et ce pendant un mois (20 jours ouvrables). Ceci correspond à une période normale de facturation. D'autre part nous avons multiplié les échelles par 2000 ce qui correspondait à une puissance effective constante de 1 MWatt et à une puissance réactive maximum de 1.24 MVars. Ceci correspond à la puissance installée d'une petite industrie, en effet 1 MWatt représente seulement la puissance installée de 50 maisons unifamiliales. Dans les conditions de l'essai et sans régulation, le facteur de puissance moyen était de 60%, avec le régulateur il était ramené à 95%.

Utilisant ces données et la méthode de facturation de l'Hydro-Québec (appendice A), la facture pour ce mois fictif aurait été de \$6146.00 sans régulation et de \$4452 avec régulation. L'utilisation du régulateur entraînerait donc une économie de \$1692/mois soit un peu plus de \$20,000/an.

Bien que cette facturation ait été faite sur des données simulées et fictives, elle est certainement assez réaliste. En effet les industries utilisant des puissances de l'ordre de grandeur mentionné ci-dessus, et ayant un faible facteur de puissance, installent des systèmes

de compensation dont le coût d'investissement est plusieurs fois supérieur au chiffre mentionné plus haut. Une telle dépense n'est effectuée que si elle peut être amortie assez rapidement grâce aux économies réalisées.

CONCLUSION

Le contrôle de la puissance réactive n'est évidemment utilisé que si les coûts d'investissement d'un tel système peuvent être amortis grâce aux économies réalisées sur la facturation de l'électricité; ces économies sont souvent importantes et de nombreux utilisateurs sont donc déjà équipés de ces systèmes de contrôle. Cependant ces systèmes ne sont généralement ni assez souples ni assez précis pour répondre exactement à tous les besoins. Entre autre le choix d'un type de régulateur de contrôle demande généralement une étude préalable et détaillée des variations de charge de l'usine concernée. Une telle étude augmente évidemment le coût total du système de contrôle.

Le système de régulation que nous avons mis au point est assez souple et précis pour pouvoir répondre facilement, après une très courte étude, aux besoins de la plupart des industries. D'autre part son prix de revient serait certainement très compétitif par rapport à celui des systèmes actuellement sur le marché, et avec de meilleures spécifications. En effet, le coût total des composants du régulateur: circuits intégrés, composants passifs, blocs d'alimentation, transformateurs de mesure, ... est d'environ \$275.00. Ce coût n'inclut le coût ni des circuits imprimés, ni du montage, ni des relais opto-électroniques de sortie (\$35.00 l'unité). Un régulateur complet pour un contrôle à 5 (cinq) banques de condensateurs devrait coûter, une fois sur le marché, aux environs de \$1000.00.

Enfin notre travail prend un intérêt nouveau à cause des données économiques actuelles et entre autre la crise de l'énergie. Etant donné que le coût de l'énergie ira en augmentant, tout ce qui diminue les pertes en énergie est assuré d'un bon accueil, or une puissance réactive trop élevée contribue à l'augmentation des pertes d'énergie.

Il est certain que les fournisseurs de l'électricité exigeront bientôt de leur client un facteur de puissance voisin de l'unité. Remarquons d'ailleurs que pour les installations industrielles isolées, loin des grands centres urbains, l'Hydro-Québec exige déjà un facteur de puissance très voisin de l'unité. La plupart des systèmes de régulation existants actuellement sur le marché contrairement au système que nous avons mis au point ne permettent généralement pas de faire une régulation aussi fine.

Enfin, comme nous l'avons déjà mentionné précédemment un facteur de puissance faible entraîne également des coûts supplémentaires d'investissement puisqu'il faut installer une puissance plus grande qu'il y en a effectivement besoin. Pour le moment la plupart des fournisseurs d'électricité en Amérique du Nord n'exigent généralement de leurs clients qu'un facteur de puissance de "0.9", en Europe le facteur de puissance exigé est souvent de "0.95".

Nous pensons que toutes les raisons mentionnées ci-dessus justifient notre travail et nos efforts. Comme nous l'avons démontré dans les essais réalisés, le régulateur que nous avons mis au point est à la fois souple, précis et efficace. D'autre part comme il est réalisé à l'aide de composants très standards il est d'un coût de revient très économique. Nous pensons donc qu'il devrait répondre aux besoins d'un grand nombre de consommateurs industriels.

Appendice A

Extraits des tarifs d'électricité de l'Hydro Québec

Nous donnons ci-dessous quelques extraits du règlement 163 de l'Hydro-Québec approuvé par l'arrêté en conseil 3667-74, le 16 octobre 1974, et s'appliquant pour l'année 1975.

"Tarif industriel (en) petite et moyenne puissances

Abonnement annuel (au) tarif P

Le tarif industriel mensuel suivant,, s'applique aux abonnements industriels de petite ou de moyenne puissance:

\$1.85 le kilowatt de puissance à facturer, plus

3.0¢ le kilowattheure pour les 50 premières heures d'usage de la puissance à facturer;

1.4¢ le kilowattheure pour les 50 heures suivantes d'usage de la puissance à facturer;

0.7¢ le kilowattheure pour les 50 heures suivantes d'usage de la puissance à facturer;

0.52¢ le kilowattheure pour le reste de l'énergie consommée.

Montant mensuel minimum de la facture: \$1.85 le kilowatt de puissance à facturer."

La puissance à facturer dont on parle dans le texte ci-dessus est définie plus loin et comme suit

"La puissance à facturer correspond à l'appel maximum de puissance, de la période de consommation concernée..."

Finally, the maximum power call of the consumption period is defined in another part of the said regulation, as follows:

"Power, or maximum power call, of the consumption period: the largest real power call in kilowatts, but not less than ninety percent (90%) of the largest apparent power call in kilovoltamperes - between two (2) consecutive readings of maximum power call indicators - as measured by one or several maximum power call indicators with a 15-minute integration period, and of approved models by the competent authority."

APPENDICE B

PROGRAMME D'OPTIMISATION

PROGRAM IT(OLTPJT,TAPE6=OUTPUT)
INTEGER VERIF,CHERCHE
COMMON POURCEN,TEST,AMIN,PRIX,INDEX,VERIF
LOGICAL PORTE
5 DIMENSION STOC(67),CAT1(67),CAT2(67),STOCS(67),CAT3(67),CAT4(67),
+CMA(67),STOCS(67)

C CONDENSATEURS EN KVARS 600 VOLTS 3 PHASES STOK (WESTINGHOUSE)
10 DATA STOC/5.,7.5,10.,15.,20.,25.,30.,35.,40.,45.,50.,60.,75.,
+80.,85.,90.,95.,100.,105.,110.,115.,120.,125.,130.,135.,140.,145.,
+150.,155.,160.,165.,170., 180.,185.,190.,195.,200.,205.,210.,
+215.,220.,225.,230.,235.,240.,245.,250.,260.,270.,280.,290.,300.,
+310.,320.,330.,340.,360.,370.,380.,390.,400.,410.,420.,430.,440.,
+450.,460./

C NUMEROS DE CATALOGUE DU STOK (WESTINGHOUSE)
15 DATA CAT1/12*8H823 C501,35*8H823 C642,20*8H2(823 C6/

DATA CAT2/4H A21,4H A22,4H A23,4H A24,4H A25,4H A26,4H A27,4H A28,
20 +4H A29,4H A30,4H A31,4H A32,4H A02,4H A03,4H A04,4H A05,4H A06,4H
+ A07,4H A08,4H A09,4H A10,4H A11,4H A12,4H A13,4H A14,4H A15,4H A1
+6,4H A17,4H A18,4H A19,4H A20,4H A21,4H A23,4H A24,4H A25,4H A26,4
+H A27,4H A28,4H A29,4H A30,4H A31,4H A32,4H A33,4H A34,4H A35,4H A
+36,4H A37,
25 +7H42 A13),7H42 A14),7H42 A15),7H42 A16),7H42 A17),7H42 A18),7H42 A
+19),7H42 A20),7H42 A21),7H42 A22),7H42 A24),7H42 A25),7H42 A26),
+7H42 A27),7H42 A28),7H42 A29),7H42 A30),7H42 A31),7H42 A32),7H42 A
+33)/

C PRIX EN DOLLARDS DES CONDENSATEURS (TAXE EXCLUSE).
30 DATA STOCS/85.00,92.00,100.00,114.00,140.00,167.00,
+182.00,204.00,227.00,250.00,272.00,316.00,515.00,556.00,581.00,
+606.00,631.00,656.00,753.00,778.00,803.00,828.00,853.00,856.00,
35 +881.00,906.00,931.00,956.00,1063.00,1088.00,1113.00,1138.00,
+1155.00,1180.00,1205.00,1230.00,1255.00,1297.00,1322.00,
+1347.00,1372.00,1397.00,1449.00,1474.00,1499.00,1524.00,
+1549.00,1712.00,1762.00,1812.00,1862.00,1912.00,2126.00,
+2176.00,2226.00,2276.00,2310.00,2360.00,2410.00,2460.00,
40 +2510.00,2594.00,2644.00,2694.00,2744.00,2794.00,2898.00/

C RELAIS D EXECUSSION (SIEMENS) =NUMEROS DE CATALOGUE SUIVENT
45 DATA CAT3/3*6H3TA 21,4*6H3TA 22,2*6H3TA 23,2*6H3TA 24,5*6H3TA 26,
+25*6H3TA 30, 10*6H3TA 32,16*6H3TA 34/

DATA CAT4/7*5H10=3R,2*5H15=3R,58*5H16=0A/

C CEMA SIZE (DIMENSION STANDARD).
50 DATA CMA/3*1.,4*2.,2*2.5,2*3.,5*4.,25*4.5,10*5.,16*6./

C PRIX EN DOLLARDS DES RELAIS D EXECUSSION (SIEMENS).
DATA STOCS/3*26.00,4*49.00,2*71.00,2*83.00,5*211.00,
+25*310.00,10*463.00,16*1278.00/

C
C

55

```

C
C
C
C
60      DD 300 NI=50,950,10
        PORTE=.FALSE.
        CMAX=NI
        AMIN=100000.00
65      WRITE(6,400) CMAX
C
C
C
C
70      REGULATION UNIDIMENSIONNELLE (DE 2 A 16 STEPS)
C
C
C
C
75      WRITE(6,600)
        WRITE(6,12)
110     INDEX=0
        DO 2 NS=2,16
80         TEST=1H
            INDEX=INDEX+1
            IF(INDEX.NE.VLRIF.AND.PORTE)GO TO 2
            CX=CMAX/NS
            K=CHERCHE(CX,STOC)
            DIF=NS*STOC(K)-CMAX
85         POURCEN=DIF*100.0/CMAX
            PRIX=NS*(STOCS(K)+STOCS(K))
            IF(ABS(POURCEN).GT.5.00)TEST=1H*
            IF(PRIX.GE.AMIN.OR.TEST.NE.1H)GO TO 3
90         VERIF=INDEX
            AMIN=PRIX
3         WRITE(6,6)NS,CX,STOC(K),STOCS(K),STOCS(K),PRIX,DIF,POURCEN
            +,TEST,CAT1(K),CAT2(K),CAT3(K),CAT4(K),CHA(K)
            IF(PORTE)GO TO 300
95         2 CONTINUE
C
C
C
C
100     REGULATION BIDIMENSIONNELLE. 3 , H , 15 STEPS
C
C
C
C
105     IF(PORTE)GO TO 145
        WRITE(6,602)
        WRITE(6,12)
145     DO 140 KK=1,3
            NS=(KK+1)**2-1
            TEST=3H
110     INDEX=INDEX+1

```

```

IF(INDCX.NE.VERIF.AND.PORTE)GO TO 140
CPR=CMAX/FLOAT(NS)
CGR=CPR*FLOAT(KK+1)
K=CHERCHE(CPR,STOC)
115 A=FLOAT(KK)*STOC(K)
B=STOC(K)
PRIX=FLOAT(KK)*(STOCS(K)+STOCS(K))
WRITE(6,82)NS,CPR,STOC(K),TEST,STOCS(K),STOCS(K),CAT1(K),CAT2(K)
+,CAT3(K),CAT4(K),CMA(K)
120 K=CHERCHE(STOC(K)*(FLOAT(KK+1)),STOC)
IF(STOC(K).GT.(FLOAT(KK)+1,01)*B,OR,STOC(K).LT.(KK+.8)*B)
+ TEST=3H***
PRIX=PRIX+FLOAT(KK)*(STOCS(K)+STOCS(K))
DIF=A+STOC(K)*FLOAT(KK)-CMAX
135 POURCEN=DIF*100.0/CMAX
WRITE(6,82)NS,CGR,STOC(K),TEST,STOCS(K),STOCS(K),CAT1(K),CAT2(K)
+,CAT3(K),CAT4(K),CMA(K)
IF(ABS(POURCEN).GT.5,0)TEST=1H*
IF(PRIX.GE.AMIN,OR.TEST.NE.3+ )GO TO 4
130 VERIF=INDEX
AMIN=PRIX
4 WRITE(6,99)PRIX,DIF,POURCEN,TEST
IF(PORTE)GO TO 300
140 CONTINUE
135 C
C
C
C
C
140 C REGULATION TRI DIMENSIONNELLE ET TETRA DIMENSIONNELLE (BINAIKE)
C
C
C
C
145 C
IF(PORTE)GO TO 451
WRITE(6,601)
WRITE(6,12)
451 DO 434 KK=1,2
INDCX=INDEX+1
IF(INDCX.NE.VCRIF.AND.PORTE)GO TO 434
NS=KK+2
TEST=3H
PRIX=0.
155 A=0.0
CAPA=CMAX/15.0
IF(KK.EQ.1)CAPA=CMAX/7.0
CAPAT=CAPA
DO 435 KKK=1,NS
160 K=CHERCHE(CAPAT,STOC)
A=A+STOC(K)
PRIX=PRIX+STOCS(K)+STOCS(K)
IF(KKK.EQ.1)GO TO 436
IF(STOC(K).GT.2.01*B,OR,STOC(K).LT.1.8*B)TEST=3H***
165 435 WRITE(6,82)NS,CAPA,STOC(K),TEST,STOCS(K),STOCS(K),CAT1(K),CAT2(K)

```

```

+ ,CAT3(K),CAT4(K),CMA(K)
CAPA=2.0*CAPA
CAPAT=2.0*STOC(K)
B=STOC(K)
170 435 CONTINUE
DIF=A-CMAX
POURCEN=DIF*100.0/CMAX
IF (ABS(POURCEN).GT.5.0)TEST=1H*
IF (PRIX.GT.AMIN.OR.TEST.NE.3H )GO TO 440
175 VERIF=INDEX
A=IT=PRIX
440 *WRITE(6,99)PRIX,DIF,POURCEN,TEST
IF (PORTE)GO TO 300
139 CONTINUE
180 C
C
C
C
185 C
C
C
C
C
WRITE(6,700)
IF (VERIF.EQ.0)GO TO 925
190 *WRITE(6,12)
PORTE=.TRUE.
GO TO 110
925 *WRITE(6,500)
300 CONTINUE
195 C
C
C
C
C
200 C
C
C
12 FORMAT(14077X*ERREUR*8X*CATALOGUE*10X*CATALOGUE*7X*CEMA*/2X2HNS6X2
+HCX10X4HSTOC6X5HSTOC57X6HSTOCS8X4HPRIX7XSHDI5X11HPOURCENTAGE3X*
+ONDENSATEUR*10X*RELAIS*8X4HSIZE/)
205 82 FORMAT(1X12,4XF7.1,5X,F7.1,A3,1X1H5F7.2,4X1H5F7.2 ,41X,AB,A7,4XAB
+,A5,4X,F6.2)
99 FORMAT(54X1H5F8.2,3X,F7.1,5XF6.1,2X,A1)
400 FORMAT(1H1,40X,*POUR UNE DEMANDE DE PUISSANCE REACTIVE DE *
210 +,F7.1,1X,5HKVARS)
600 FORMAT(/40X,*STRATEGIE DE REGULATION UNIDIMENSIONNELLE DE 2*
** A 16 STEPS*)
6 FORMAT(1X12,4XF7.1,5XF7.1,4X1H5F7.2,4X1H5F7.2,4X1H5F8.2,3X,
+7.1,5X,F6.1,2X,A1,4X,AB,A7,4X,AB,A5,4X,F6.2)
215 602 FORMAT(/31X,*STRATEGIE DE REGULATION BIDIMENSIONNELLE *
**3NS(1G,1P) 8NS(2G,2P) 15NS(3G,3P) *)
601 FORMAT(/18X,*STRATEGIE DE REGULATION TRIDIMENSIONNELLE ET*
** TETRA DIMENSIONNELLE EFFECTUES PAR CONNECTEURS BINAIRES*)
700 FORMAT(/,45X,6H***** AVOICI LE SYSTEME A COUT*
220 ** MINIMAL*,6H *****/)

500 FORMAT(10X,*AUCUNE COMBINAISONS N'EST VALABLE*)
END

```

FUNCTION CHERCHE

CDC 6400 FTN V3,0-P3b5 OPT=1 75/10/07. 20,04,19.

PAGE 1

```
      INTEGER FUNCTION CHERCHE(CX,STOC)
      DIMENSION STOC(1)
      DO 2 K=1,67
      IF(STOC(K).GE. CX)GO TO 3
3       CONTINUE
      CHERCHE=67
      RETURN
      3   IF(K.EQ.1)GO TO 10
      DIF1=ABS(CX-STOC(K))
10      DIF2=ABS(CX-STOC(K-1))
      IF(DIF1.LE.DIF2)GO TO 10
      CHERCHE=K-1
      RETURN
15      10  CHERCHE=K
      RETURN
      END
```

REFERENCES

- [1] W.H. Cuttino, "Extending the use of shunt capacitors by means of automatic Switching," Trans. Elec. Eng., Vol. 63, pp.674-678, 1944.
- [2] R. Chakrabarti, S. Chaudhuri, and S.K. Basu, "Automatic reactive power compensation by capacitance-inductance switching," Electr. India, Vol. 13, pp. 5-10, Aug. 1973.
- [3] H. Frank and B. Landström, "Power factor correction with thyristor-controlled capacitors," ASEA Journal, Vol. 44, no 6, pp. 180-184, 1971.
- [4] H. Kreit, "Automatische blindstromkompensation," Elektrotechnische Zeitschrift, Serie B, Vol. 23, no 12, pp. 273-277, 1971.
- [5] H. Becker, "Die stenerbare drosselspule," Elektrotechnische Zeitschrift, Série B, Vol. 23, no 12, pp. 293-295, 1971.
- [6] A. Schmidt, "Der blindleistungs regler MINIVAR," Techn. Mitt., Vol. 58, no 6, pp. 369-372, 1968.
- [7] Switchgear Handbook, Vol. 4363, Canadian General Electric Ltd, 1968.
- [8] M. Gasparini - M. Rinaldi, "Misure di potenza, fattore di potenza ed energia a frequenza industriale," L'Elettrotecnica, Vol. 59, no 12, pp. 1253-1263, Déc. 1972.

- [9] SIEMENS, "Motor control catalog", Sept. 74 et WESTINGHOUSE, "CAPACITORS CATALOG", no. H55000, SEC. 6, juin 1974.
- [10] U. Junga et A. Schmidt, "Blindstrommessung," Elektrotechnische Zeitschrift, Serie B, Vol. 23, no 12, pp. 278-282, 1971.
- [11] D.H. Sheingold, "Nonlinear circuits handbook" CH. 3.2, pp. 203-269, Analog Devices, INC., 1974.
- [12] J. Bishop and E. Cohen, "Hall effect devices in power measurement," Electronic Eng., Vol. 45, no 54B, pp. 57-61, oct. 1973.
- [13] A. Castellani & P.P. Prencipe, "Convertitore statico per la misura di potenza su reti a frequenza industriale," Proceeding of 11th automation and instrumentation conference, Milan-Italy, pp. 742-751, Nov. 1970

LISTE DES FIGURES

FIG. 1	Organigramme du programme d'optimisation	57
FIG. 2	Schéma de principe du régulateur	58
FIG. 3	Schéma de branchement des transformateurs de mesure	59
FIG. 4	Module des seconds transformateurs de mesure	60
FIG. 5	Système de mesure de la puissance réactive	61
FIG. 6	Schéma de réalisation du multiplicateur et de circuits auxiliaires	62
FIG. 7	Module des multiplicateurs	63
FIG. 8	Schéma de principe de l'échantillonneur	64
FIG. 9	Circuit de l'échantillonneur	65
FIG. 10	Circuit des comparateurs	66
FIG. 11	Circuit de l'unité de temporisation	67
FIG. 12	Circuit de l'unité de commande. (Compt. UP/DOWN)	68
FIG. 12A	Circuit de l'unité de commande. (Décodeur)	69
FIG. 13	Module de l'unité de temporisation et d'une partie de l'uni- té de commande. (Compteur UP/DOWN et portes logiques)	70
FIG. 14	Module de la deuxième partie de l'unité de commande (Déco- deur et "Buffers drivers")	71
FIG. 15	Algorithme de régulation	72
FIG. 16	Module de l'échantillonneur et comparateurs	73
FIG. 17	Vue externe du régulateur	74
FIG. 18	Montage et assemblage du régulateur	75
FIG. 19	Montage d'essais	76
FIG. 20	Schéma du montage d'essai pour la vérification du fonction- nement du régulateur	77
FIG. 21	Schéma du montage d'essai en régulation	78

FIG. 22	Réponse du système à une variation instantanée de la puissance réactive depuis une valeur nulle jusqu'à la valeur maximum	79
FIG. 23	Réponse du système à une variation instantanée de la puissance réactive depuis une valeur nulle jusqu'à 50% de la valeur maximum	79
FIG. 24	Enregistrement de la puissance réactive avant et après le régulateur, i.e., sans et avec régulation	79

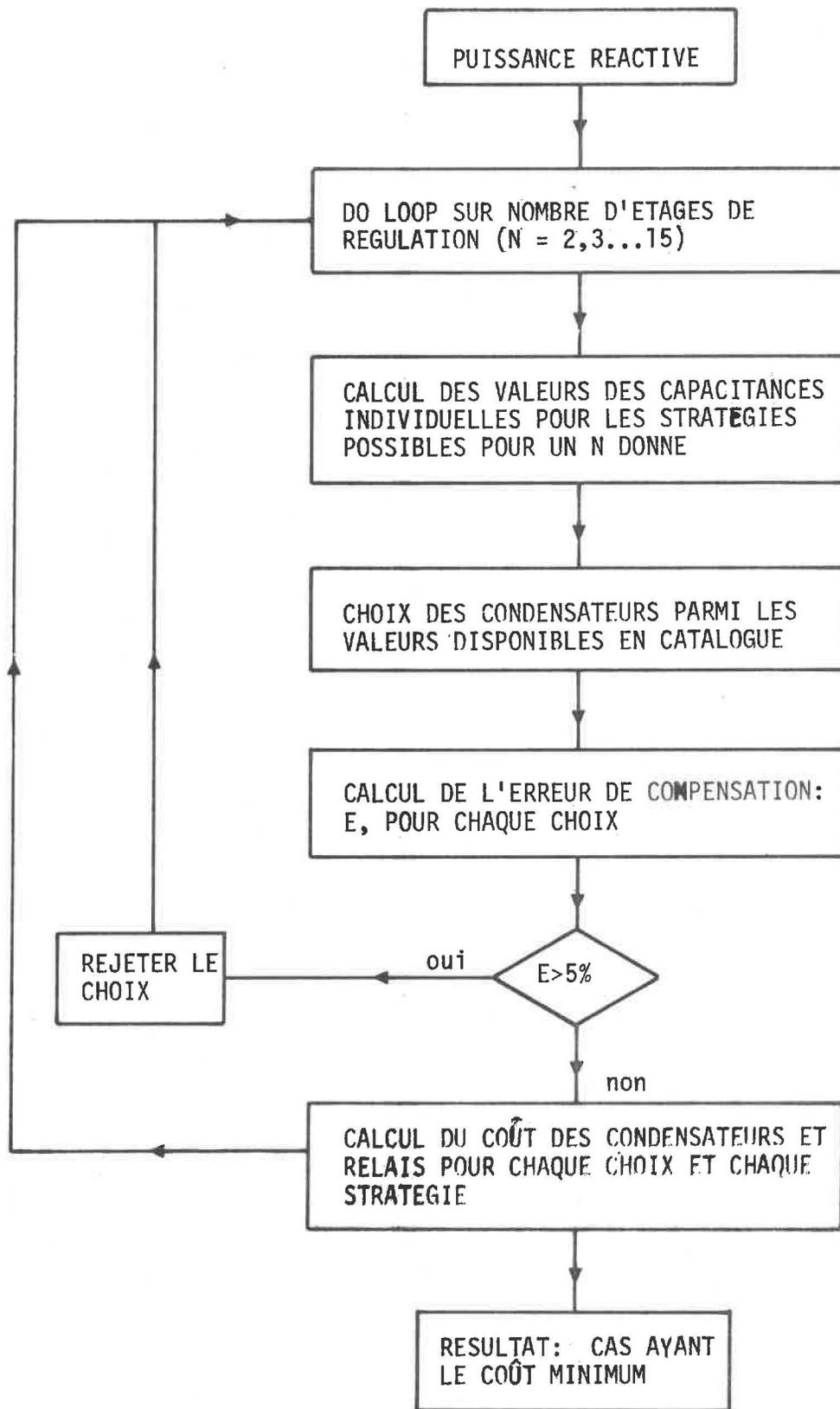


FIGURE 1 . ORGANIGRAMME DU PROGRAMME D'OPTIMISATION.

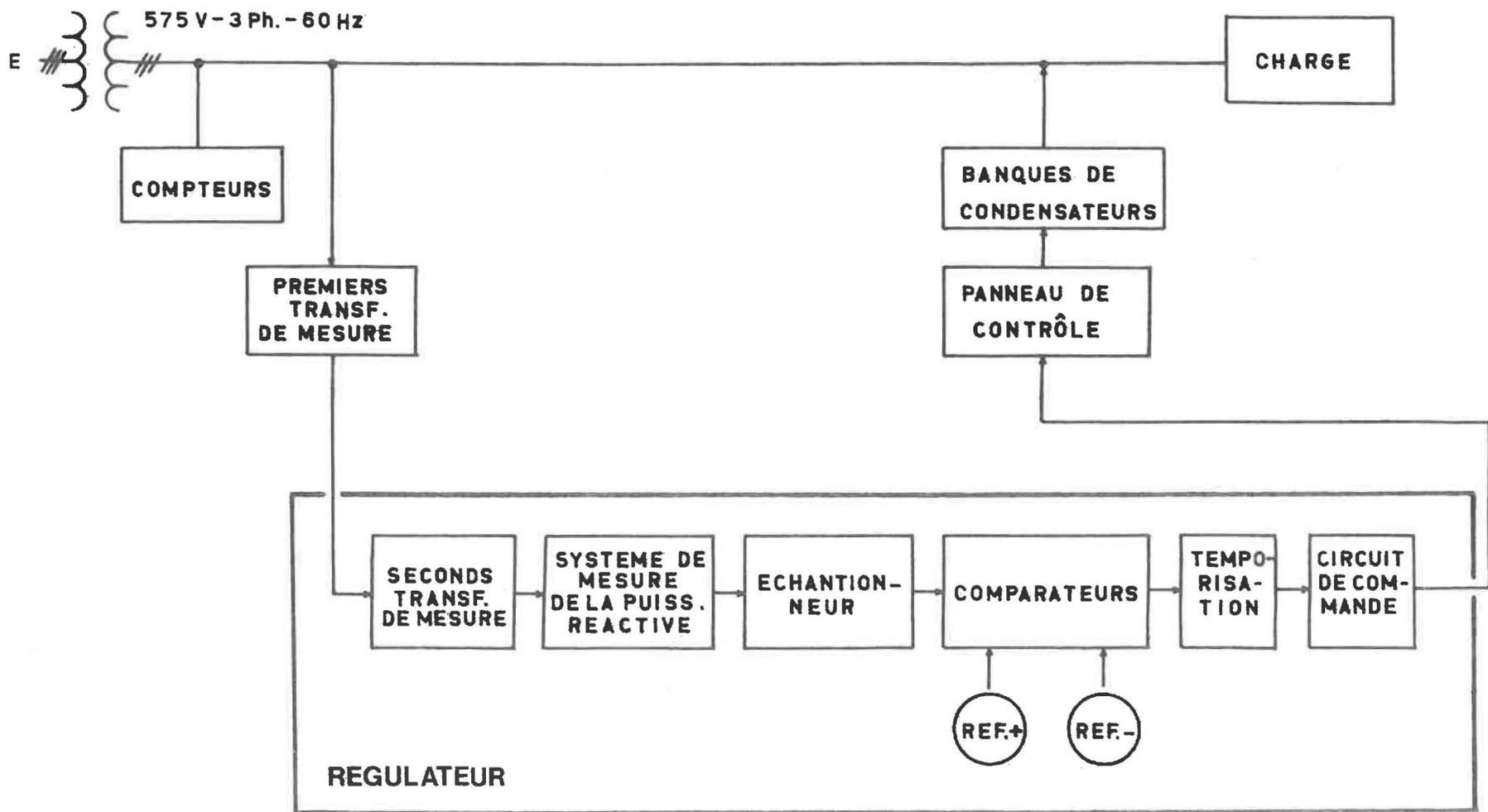


FIGURE 2 . SCHEMA DE PRINCIPE DU REGULATEUR.

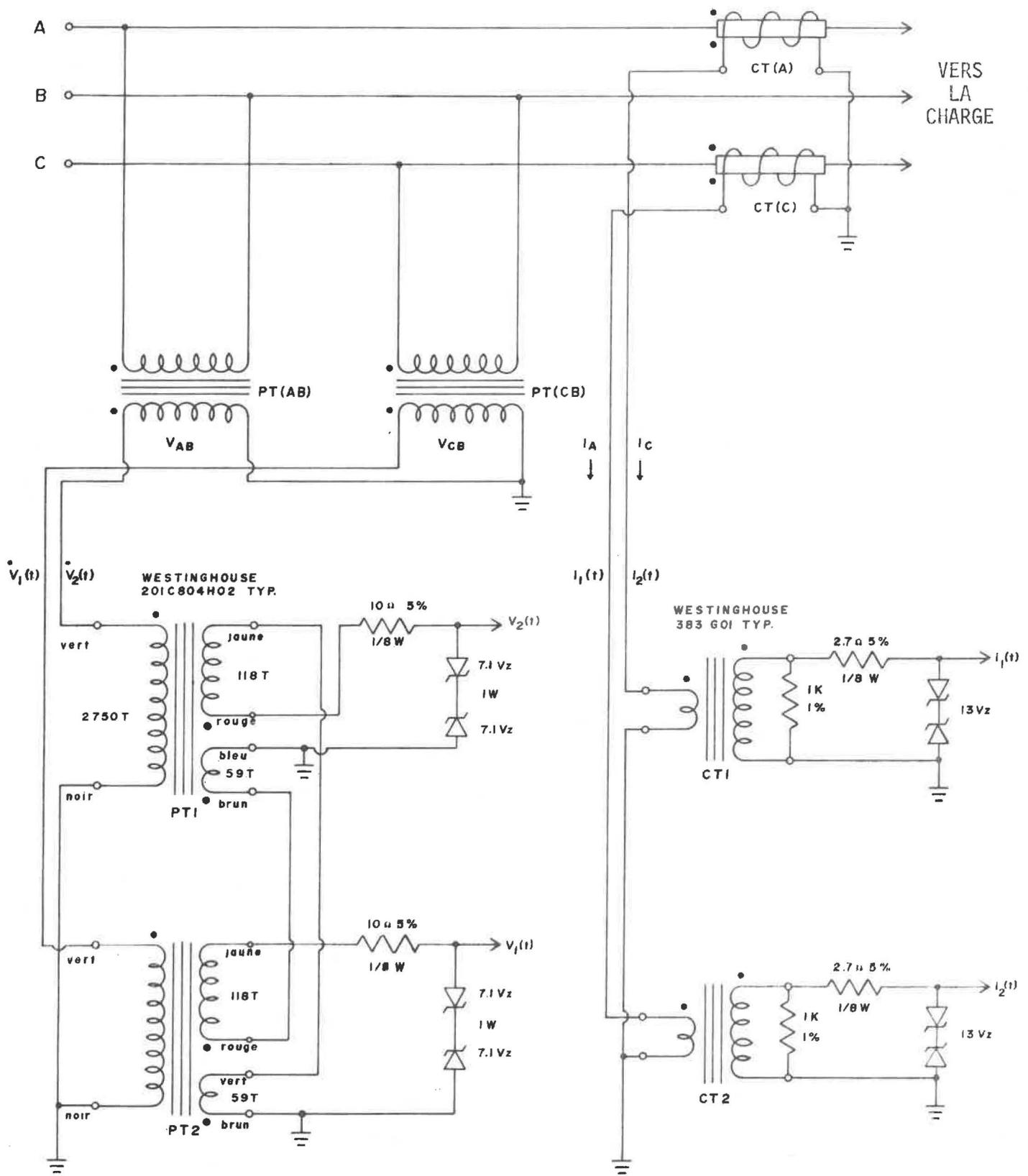


FIGURE 3 . SCHEMA DE BRANCHEMENT DES TRANSFORMATEURS DE MESURE.

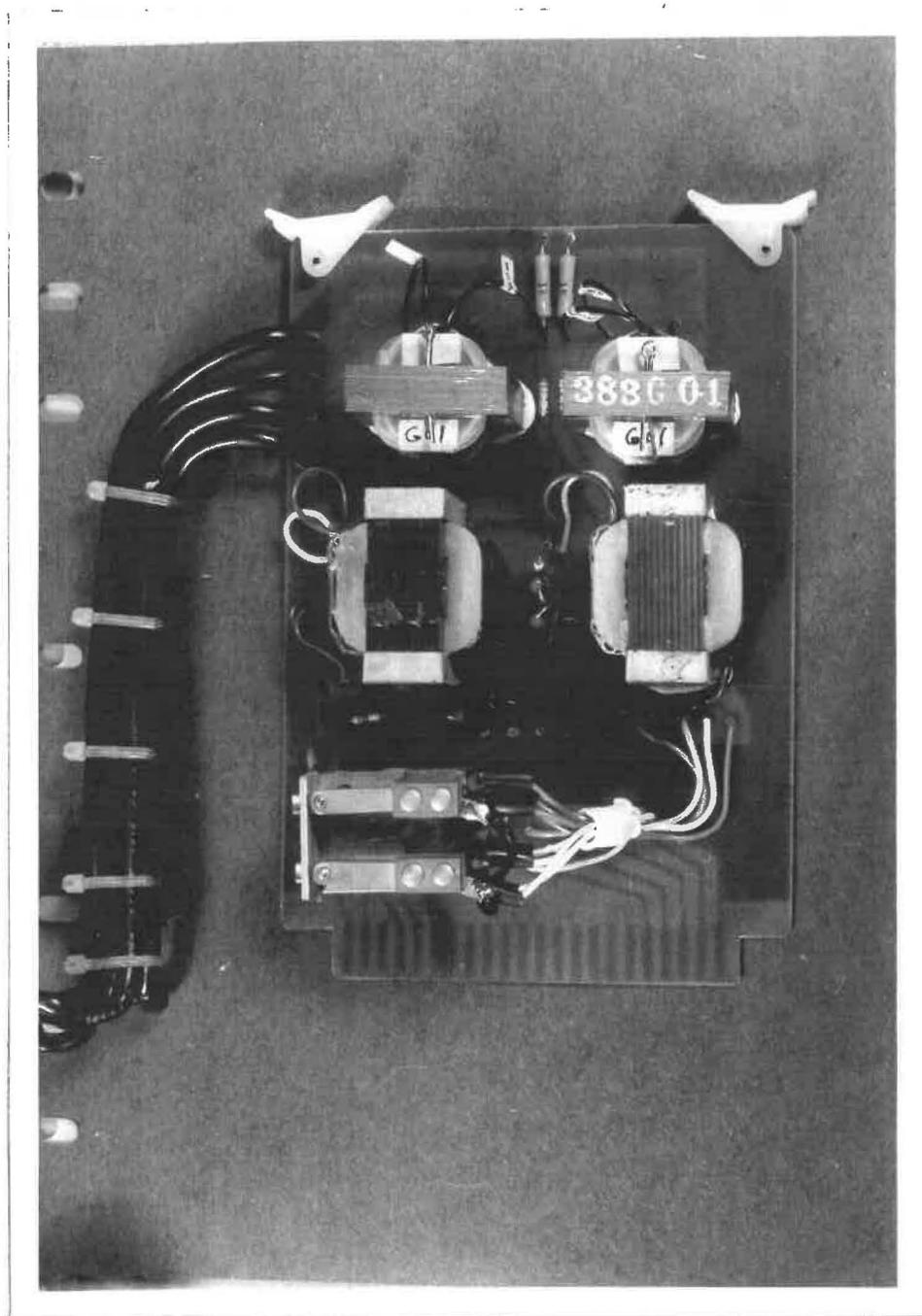


FIGURE 4 . MODULE DES SECONDS TRANSFORMATEURS DE MESURE.

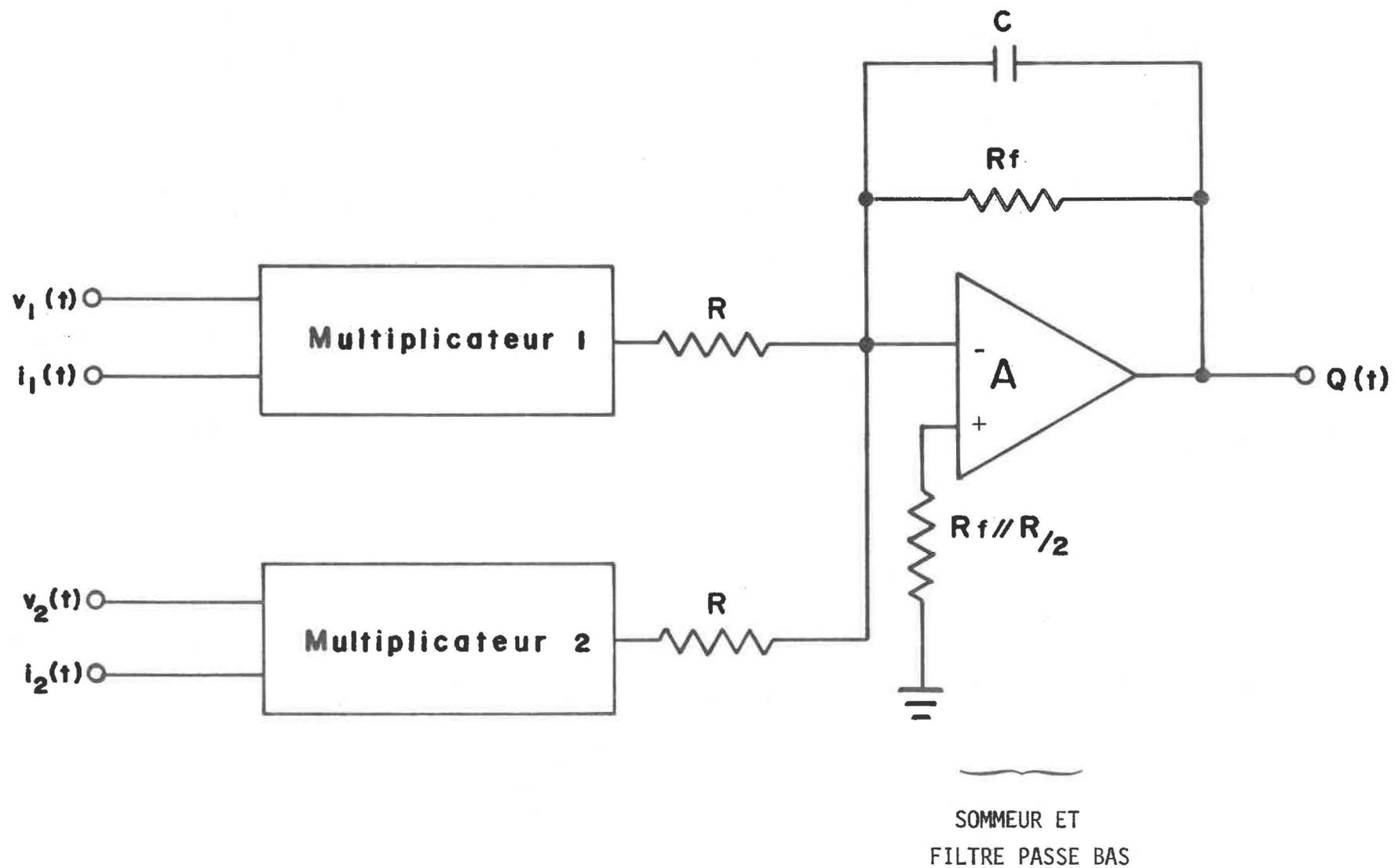


FIG. 5 SYSTEME DE MESURE DE LA PUISSANCE REACTIVE

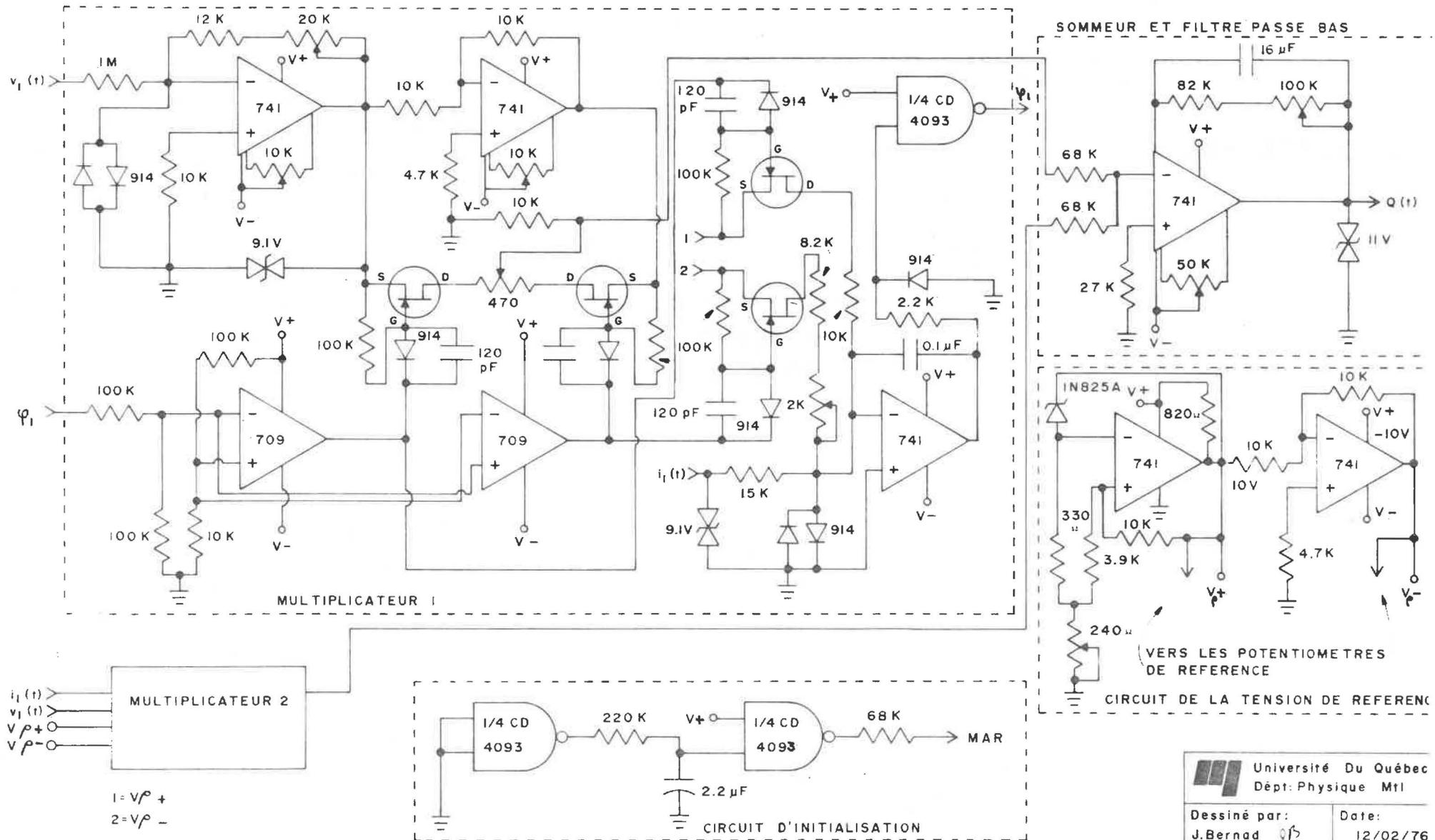


FIGURE 6 . SCHEMA DE REALISATION DU MULTIPLICATEUR ET DE CIRCUITS AUXILIAIRES.

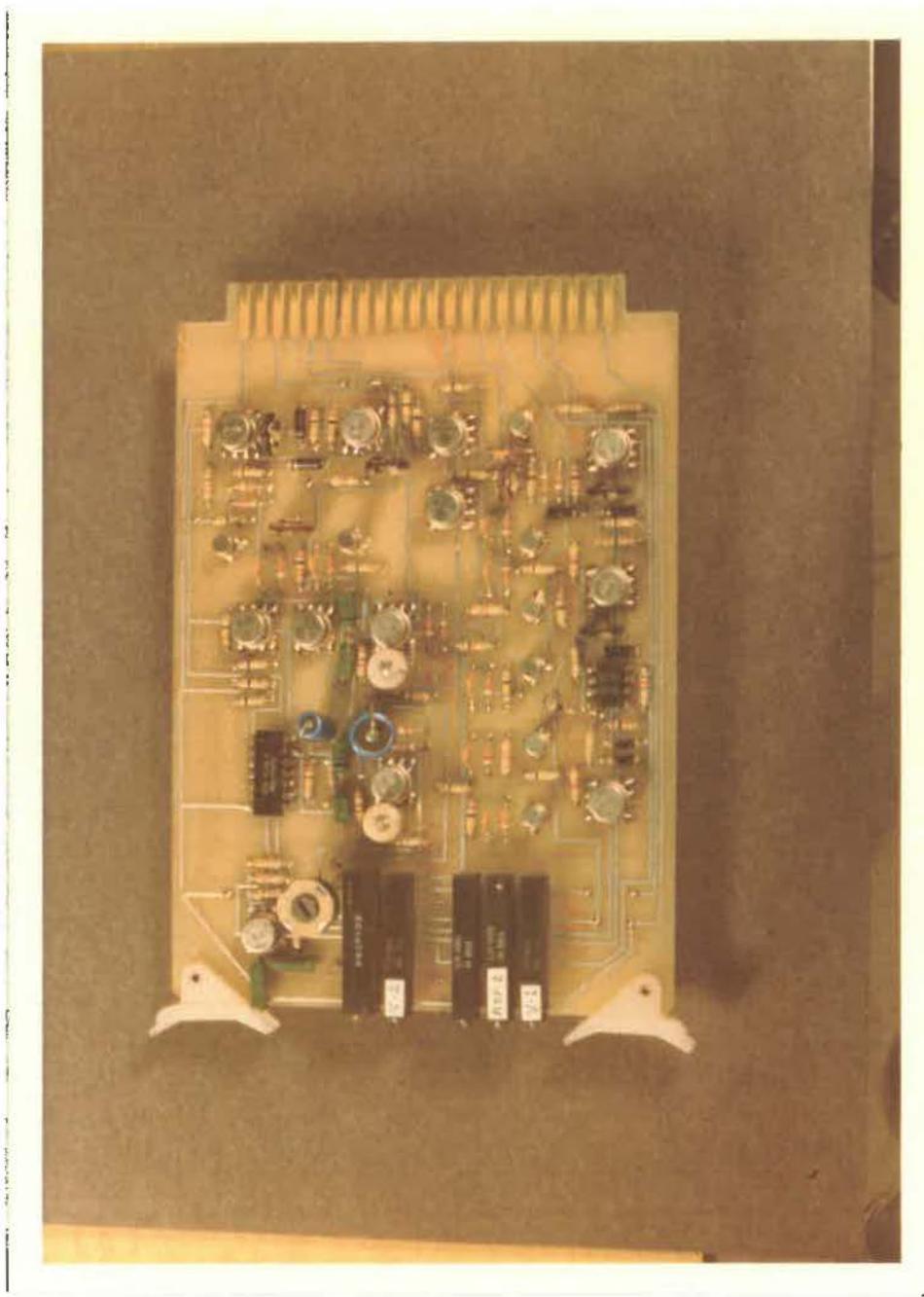


FIGURE 7 . MODULE DES MULTIPLICATEURS.

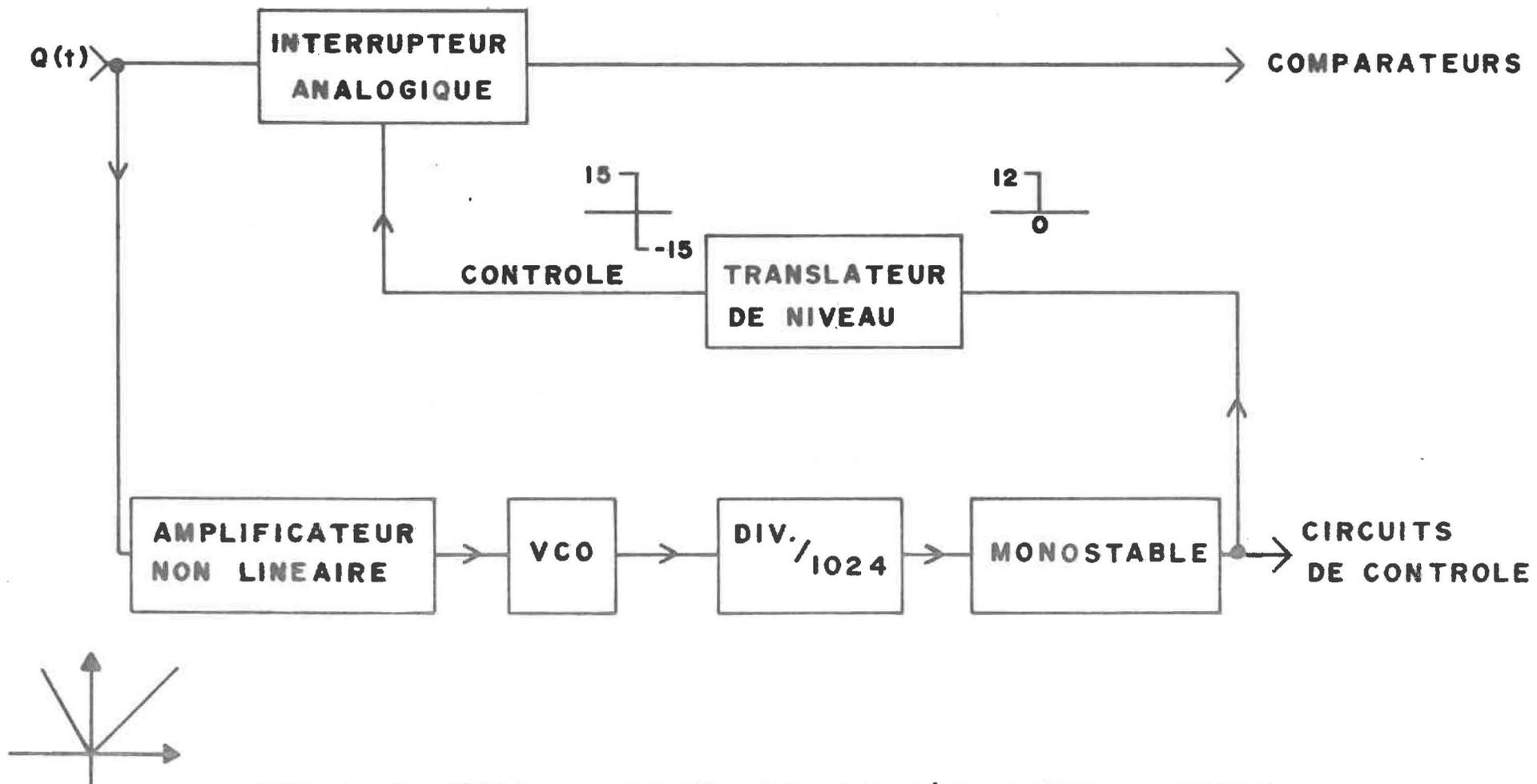


FIG.8 SCHEMA DE PRINCIPE DE L'ECHANTILLONNEUR

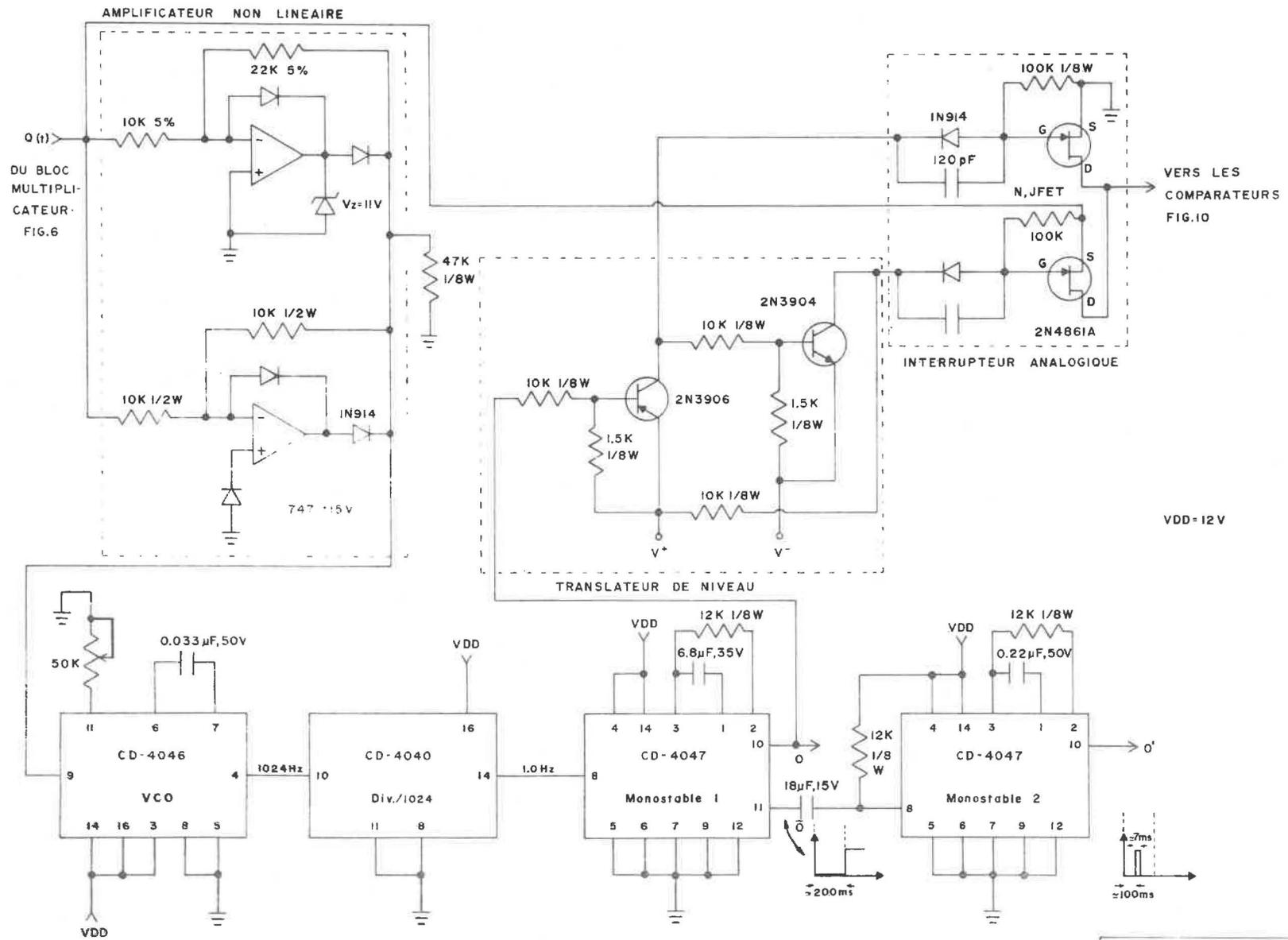


FIG.9 Circuit de l'échantillonneur

* Potentiomètre de précision , 10 k
avec affichage (AMPHENOL #2151B)

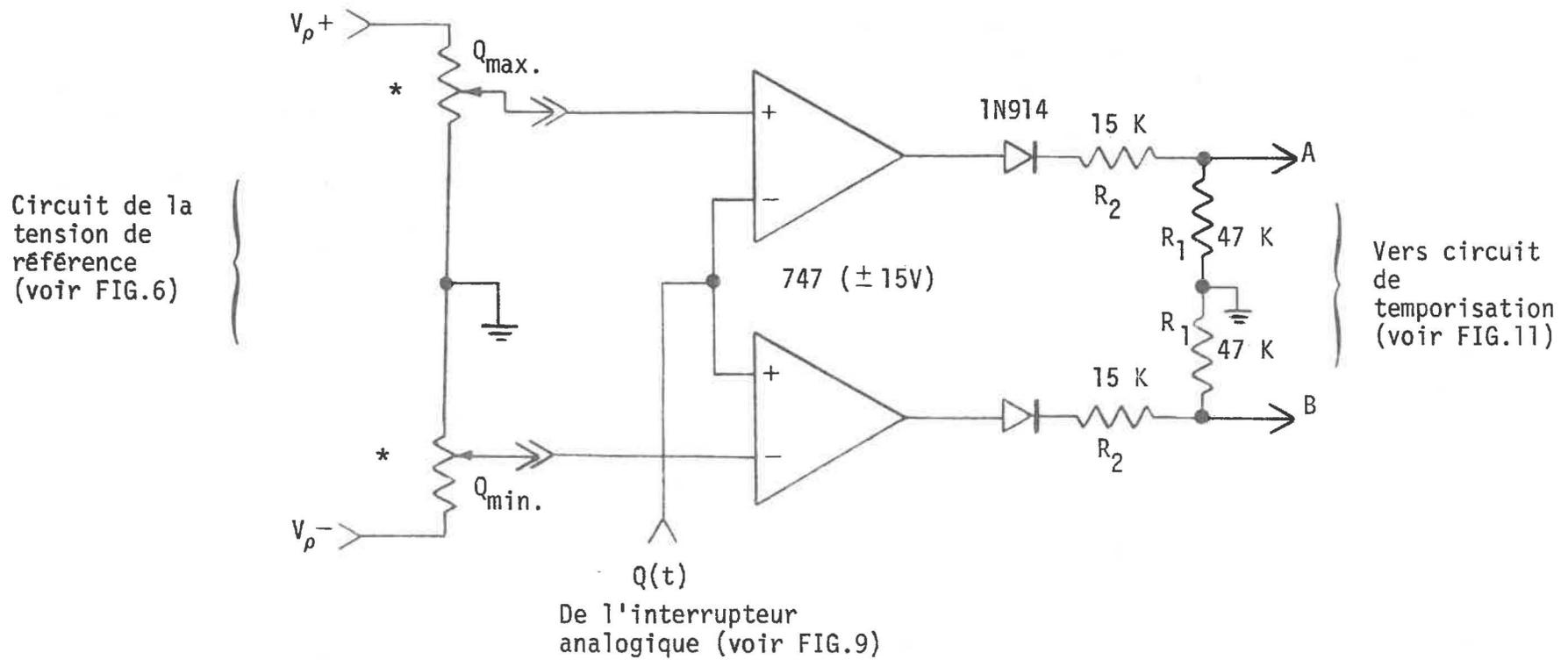
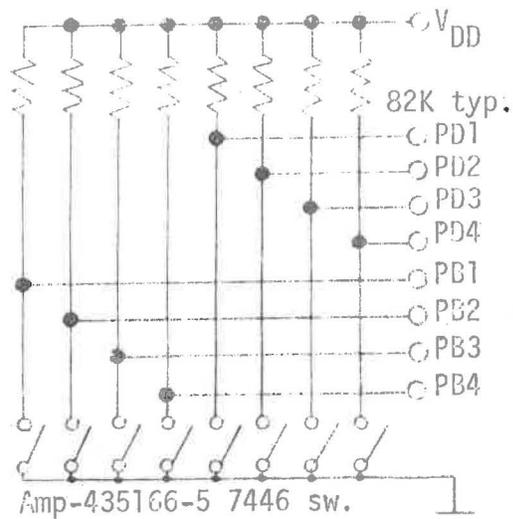
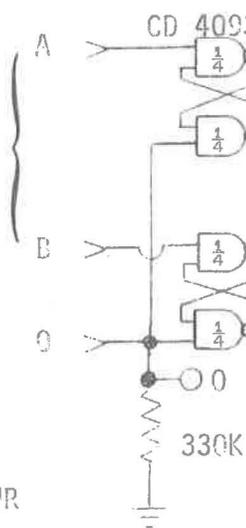


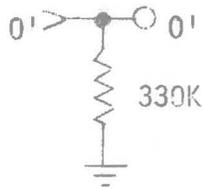
FIGURE 10 - CIRCUIT DES COMPAREURS



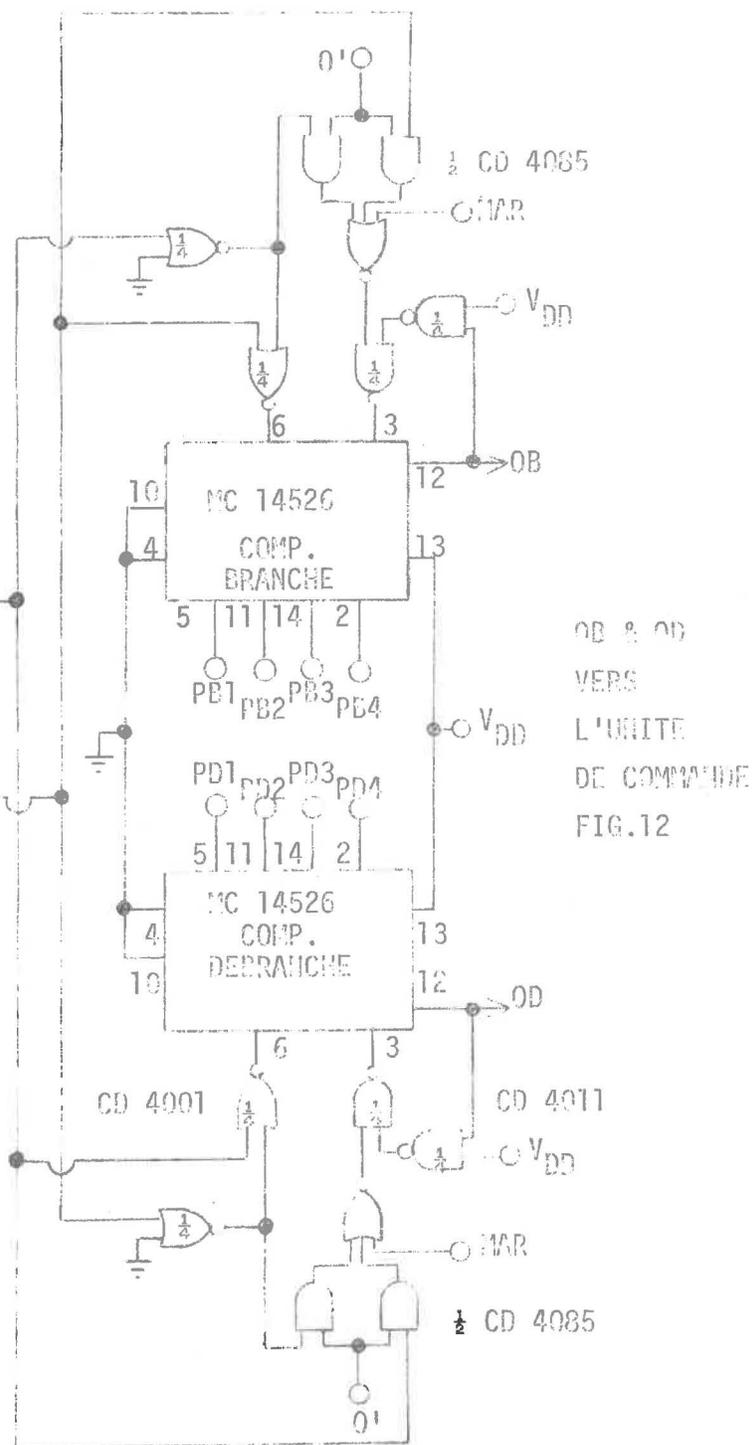
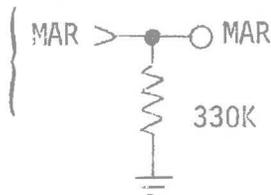
DU CIRCUIT
 DES COMPAREURS
 FIG.10



0 & 0'
 DU CIRCUIT
 DE L'ECHANTILLONNEUR
 FIG.9



DU CIRCUIT
 D'INITIALISATION
 FIG.6



V_{DD} = 12 v

FIGURE 11 . CIRCUIT DE L'UNITE DE TEMPORISATION.

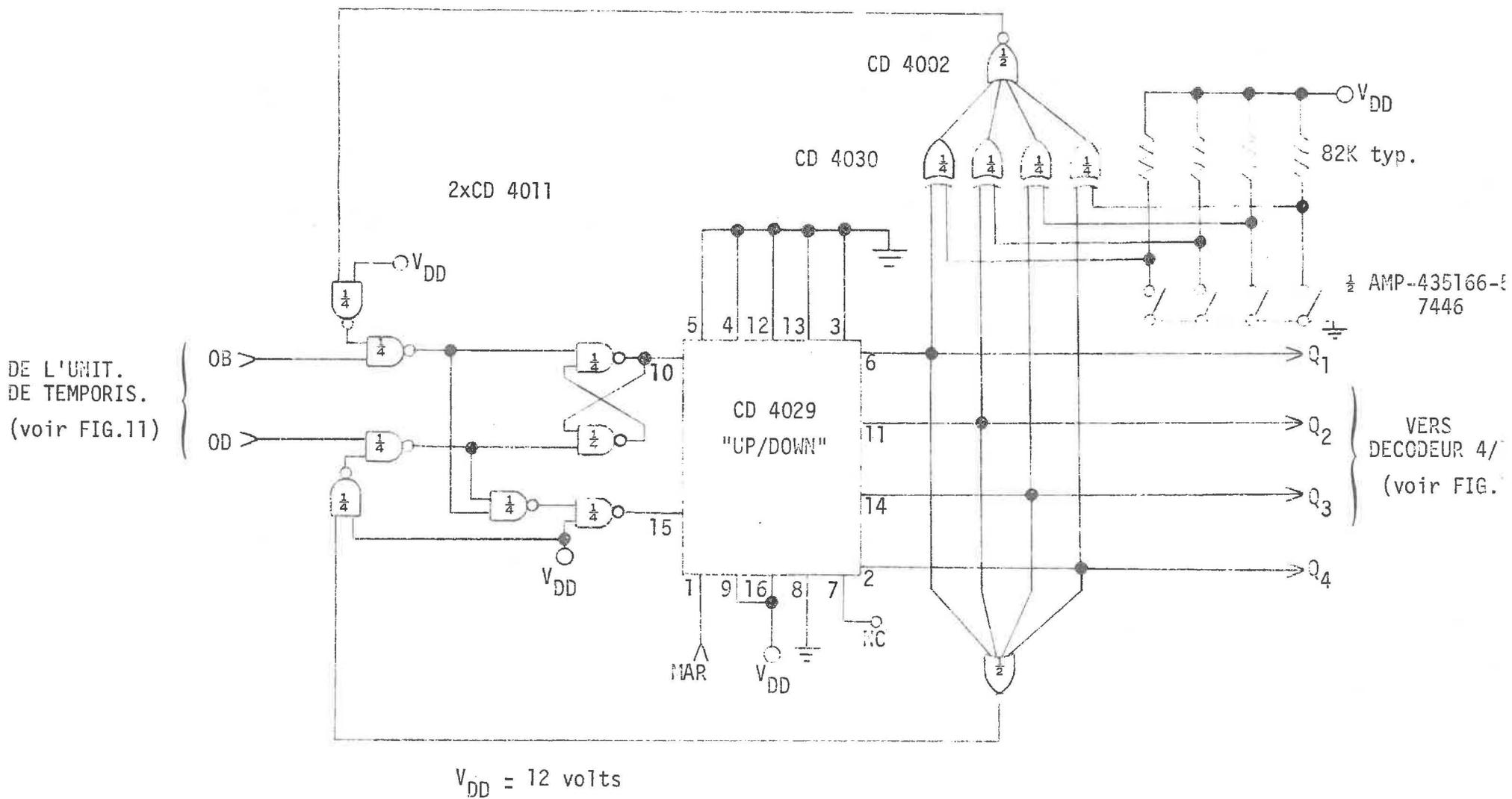


FIGURE 12. CIRCUIT DE L'UNITE DE COMMANDE. (Compt. UP/DOWN)

2 @ 16 contacts electriques effectués par "triac" (240v / 10amp)
 pour actionner les contacteurs magnetiques externes

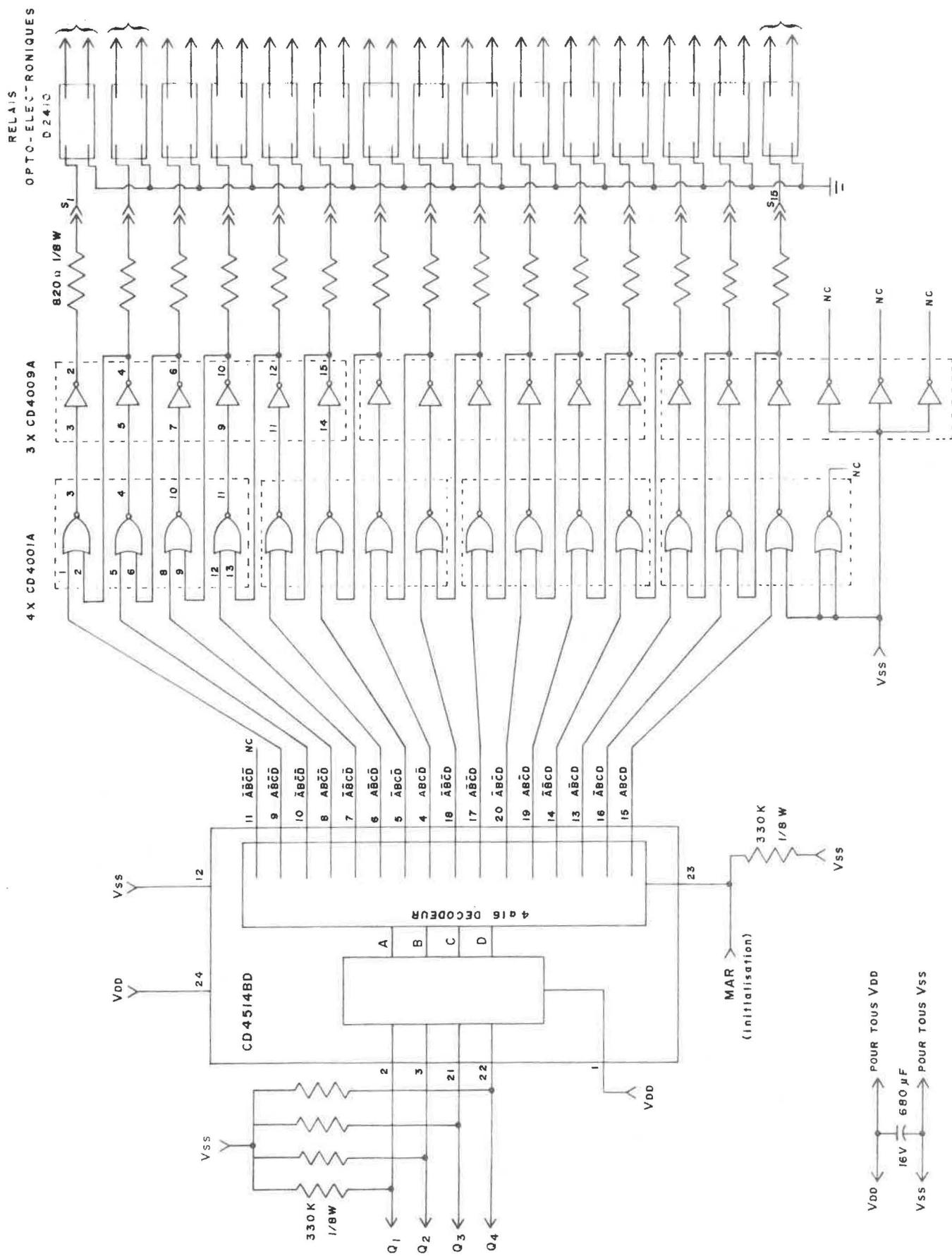


FIGURE 12.7. CIRCUIT DE LA LIGNE DE COMMANDE (DECODEUR)

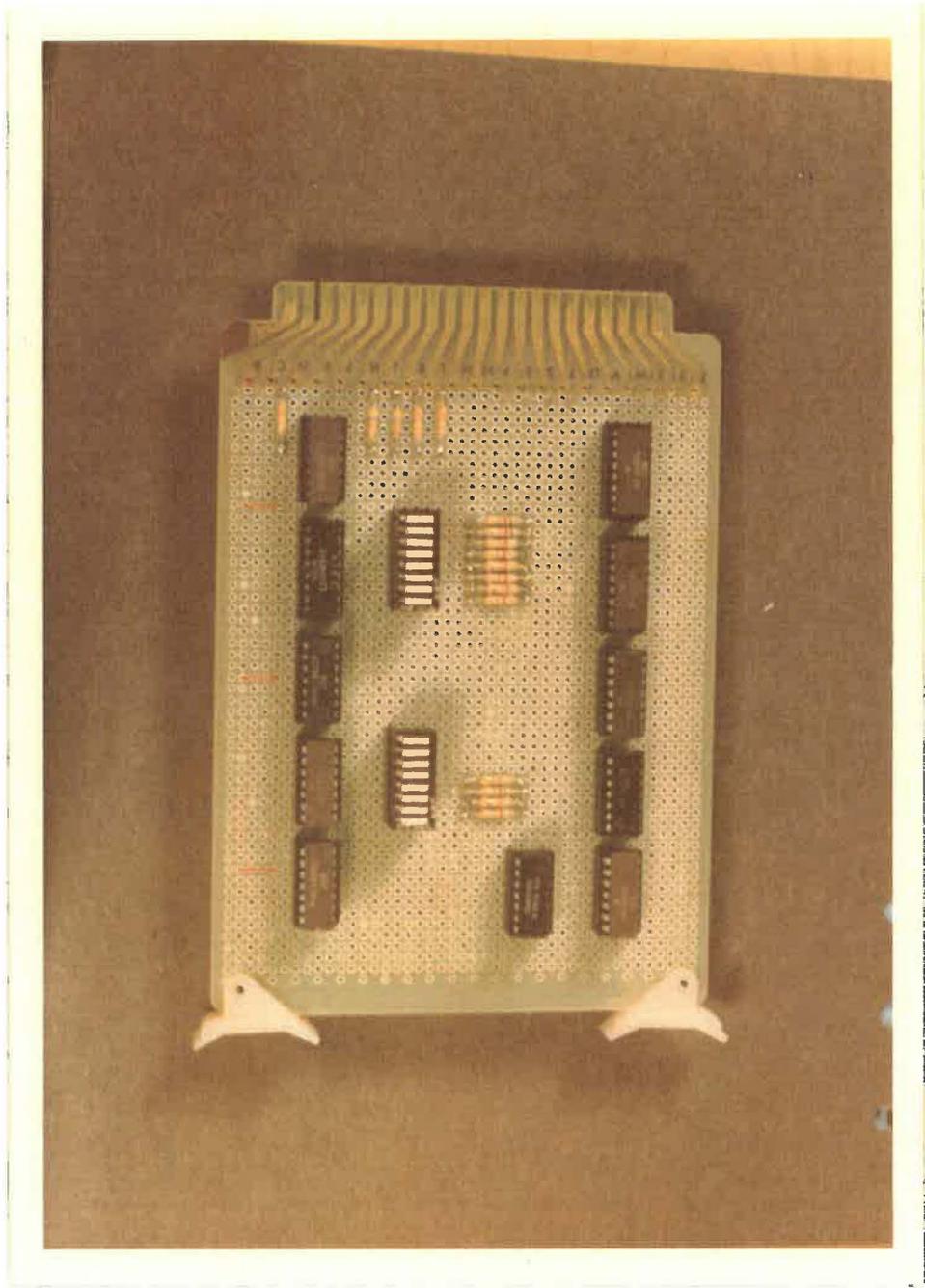


FIGURE 13 . MODULE DE L'UNITE DE TEMPORISATION ET D'UNE PARTIE DE L'UNITE DE COMMANDE (COMPTEUR UP/DOWN ET PORTES LOGIQUES).

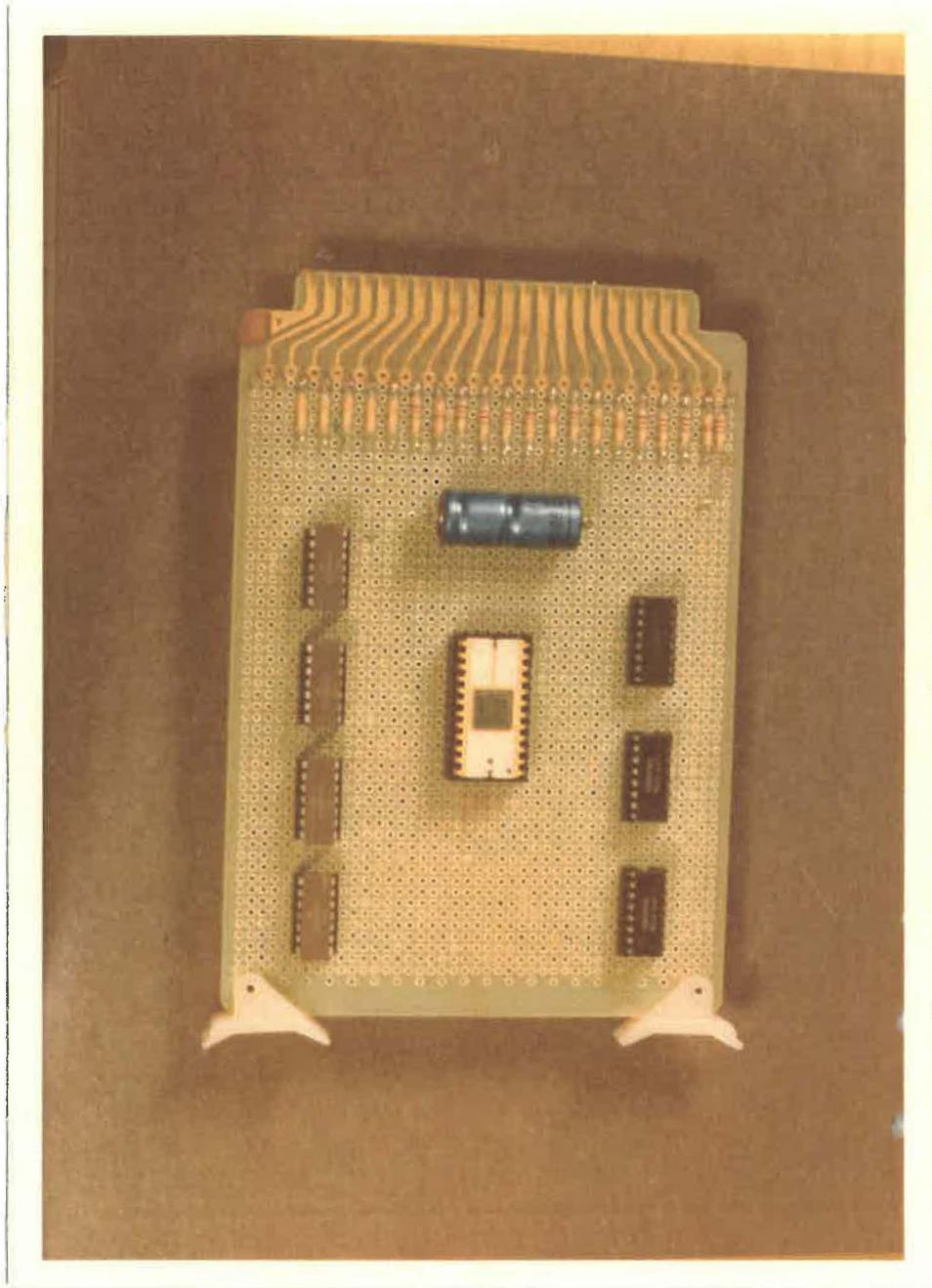
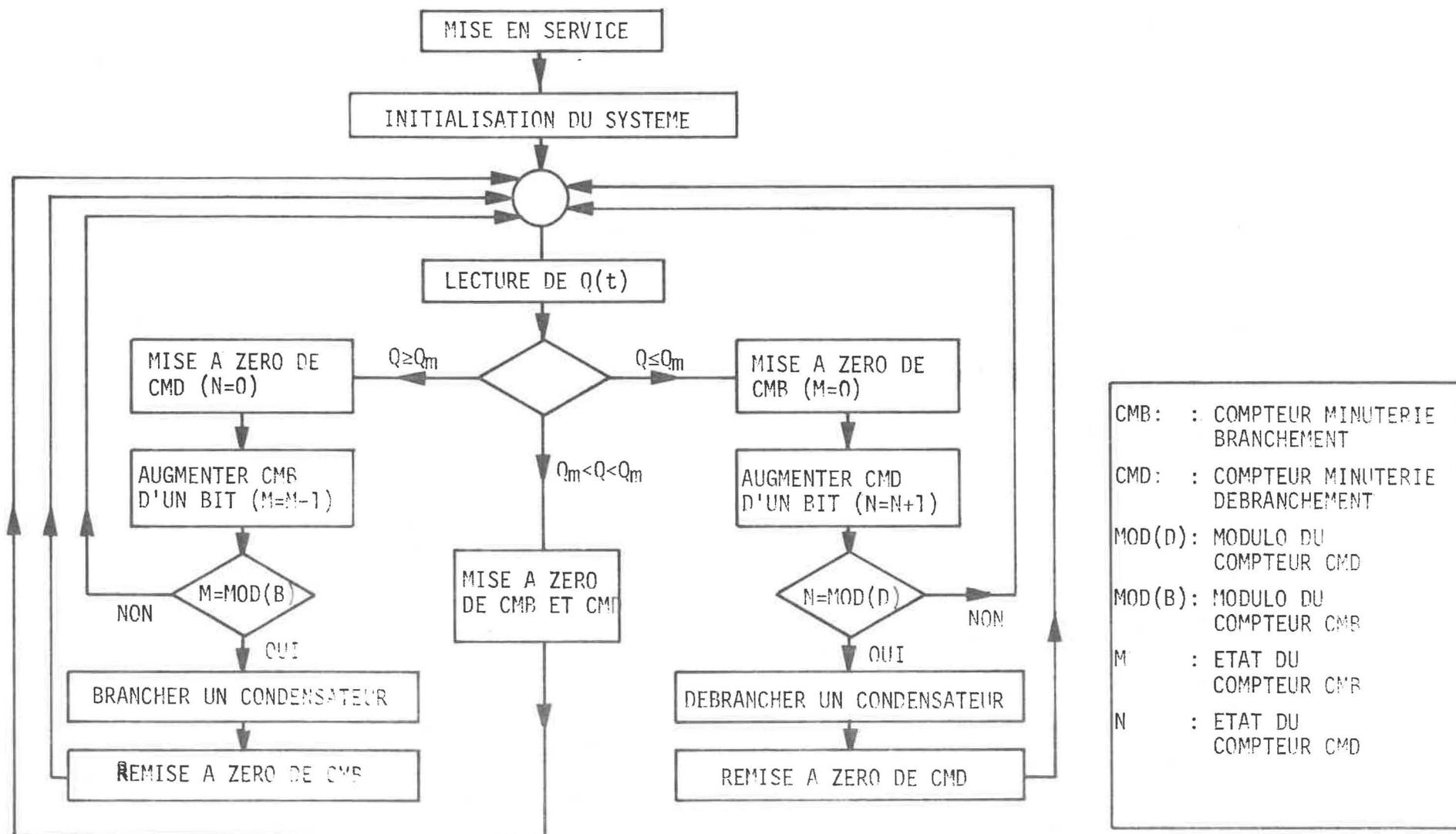


FIGURE 14 . MODULE DE LA DEUXIEME PARTIE DE L'UNITE DE COMMANDE ("DECODEUR ET "BUFFERS DRIVERS") .



CMB: : COMPTEUR MINUTERIE BRANCHEMENT
 CMD: : COMPTEUR MINUTERIE DEBRANCHEMENT
 MOD(D): MODULO DU COMPTEUR CMD
 MOD(B): MODULO DU COMPTEUR CMB
 M : ETAT DU COMPTEUR CMB
 N : ETAT DU COMPTEUR CMD

FIGURE 15 . ALGORITHME DE REGULATION

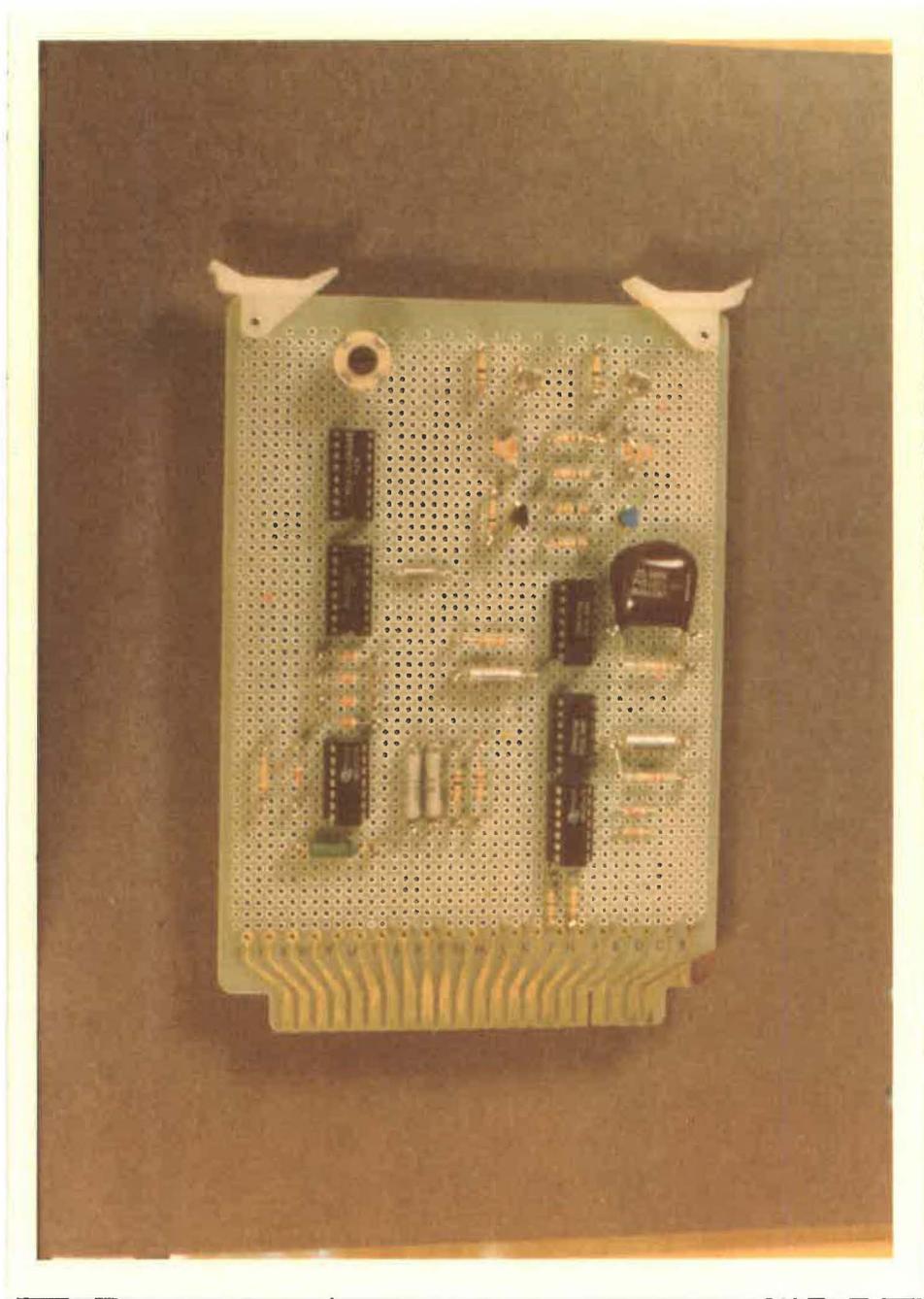


FIGURE 16 . MODULE DE L'ECHANTILLONNEUR ET COMPAREURS.

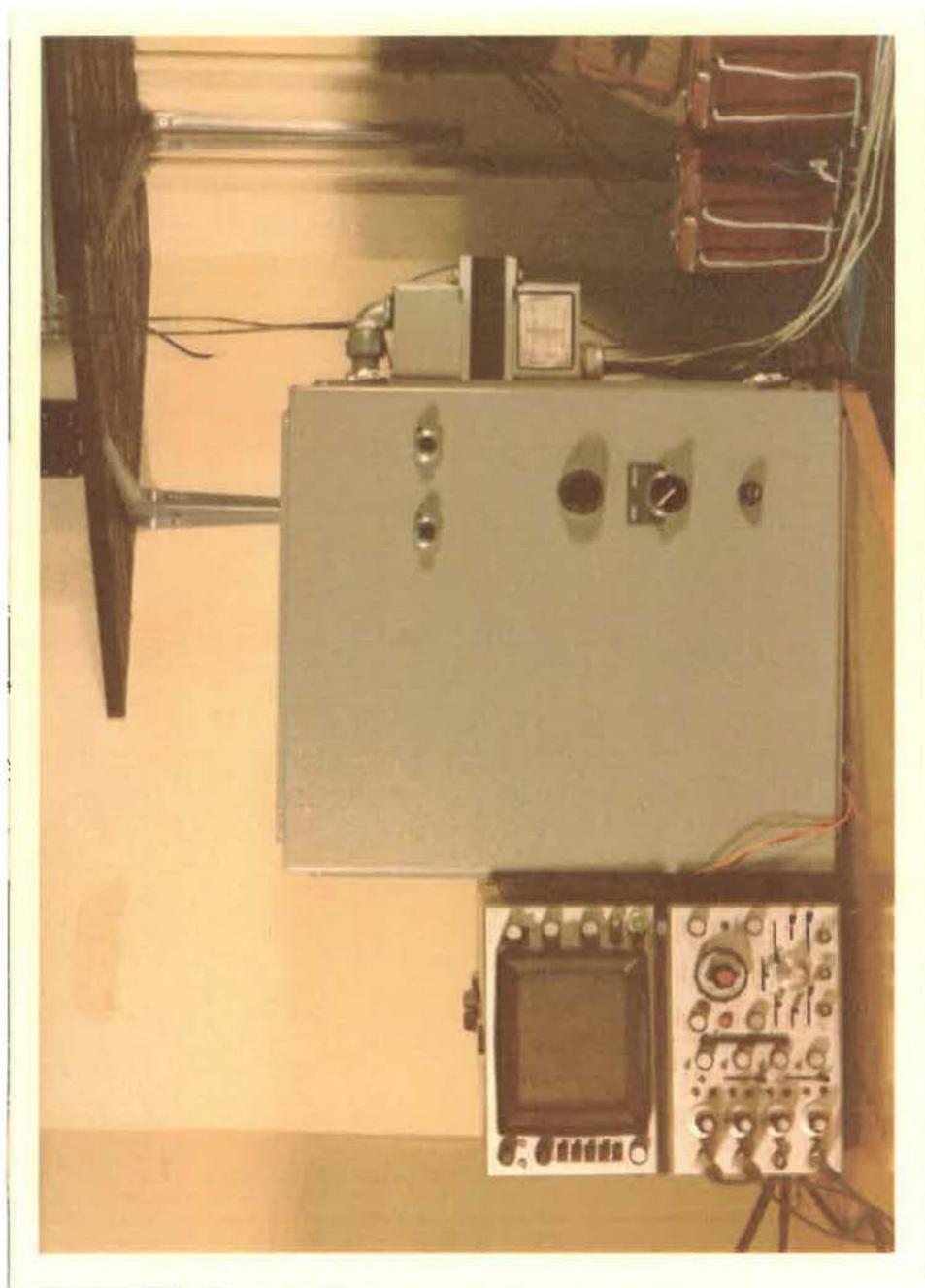


FIGURE 17 . VUE EXTERNE DU REGULATEUR.

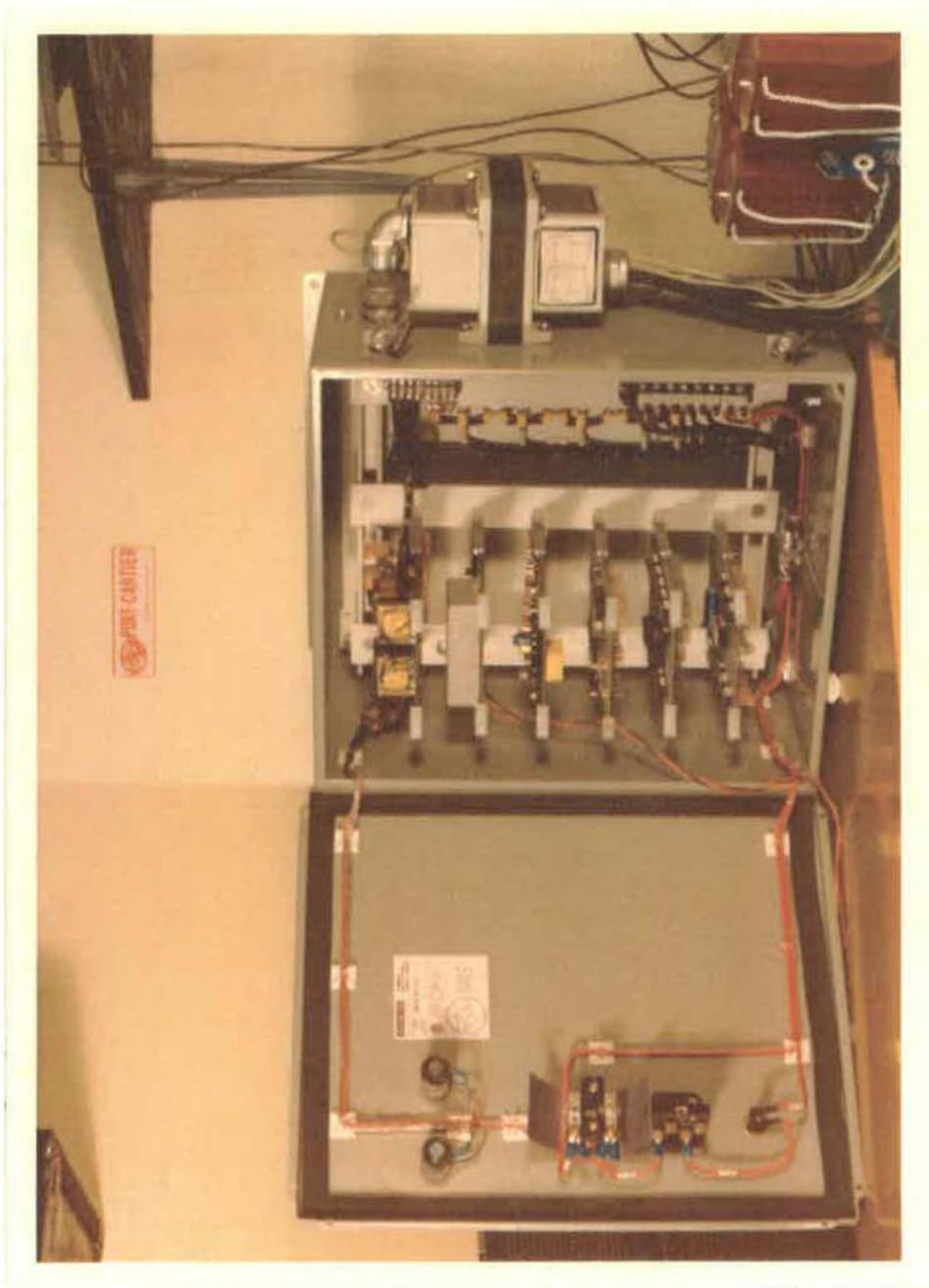


FIGURE 18 . MONTAGE ET ASSEMBLAGE DU REGULATEUR .

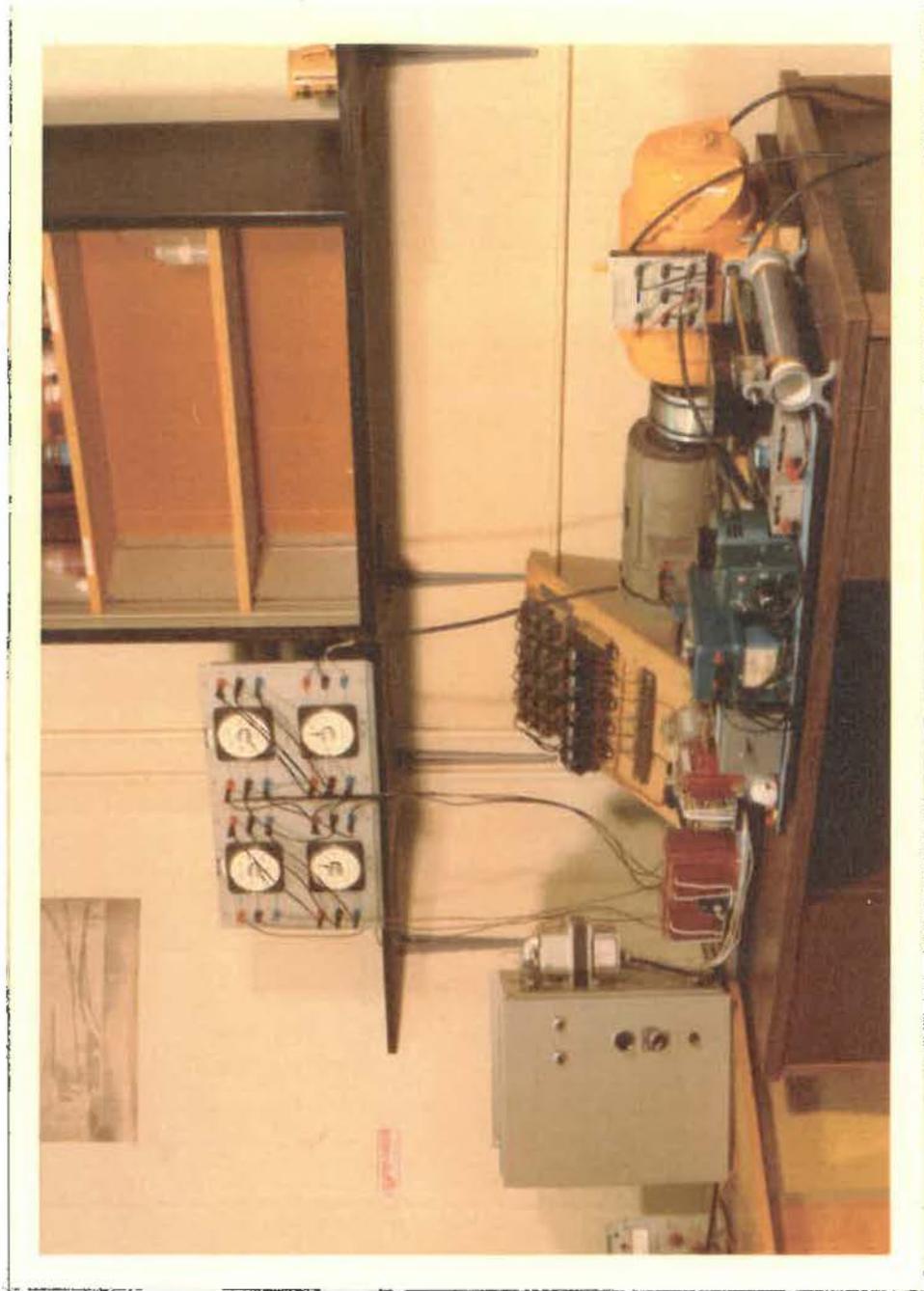


FIGURE 19 . MONTAGE D'ESSAIS

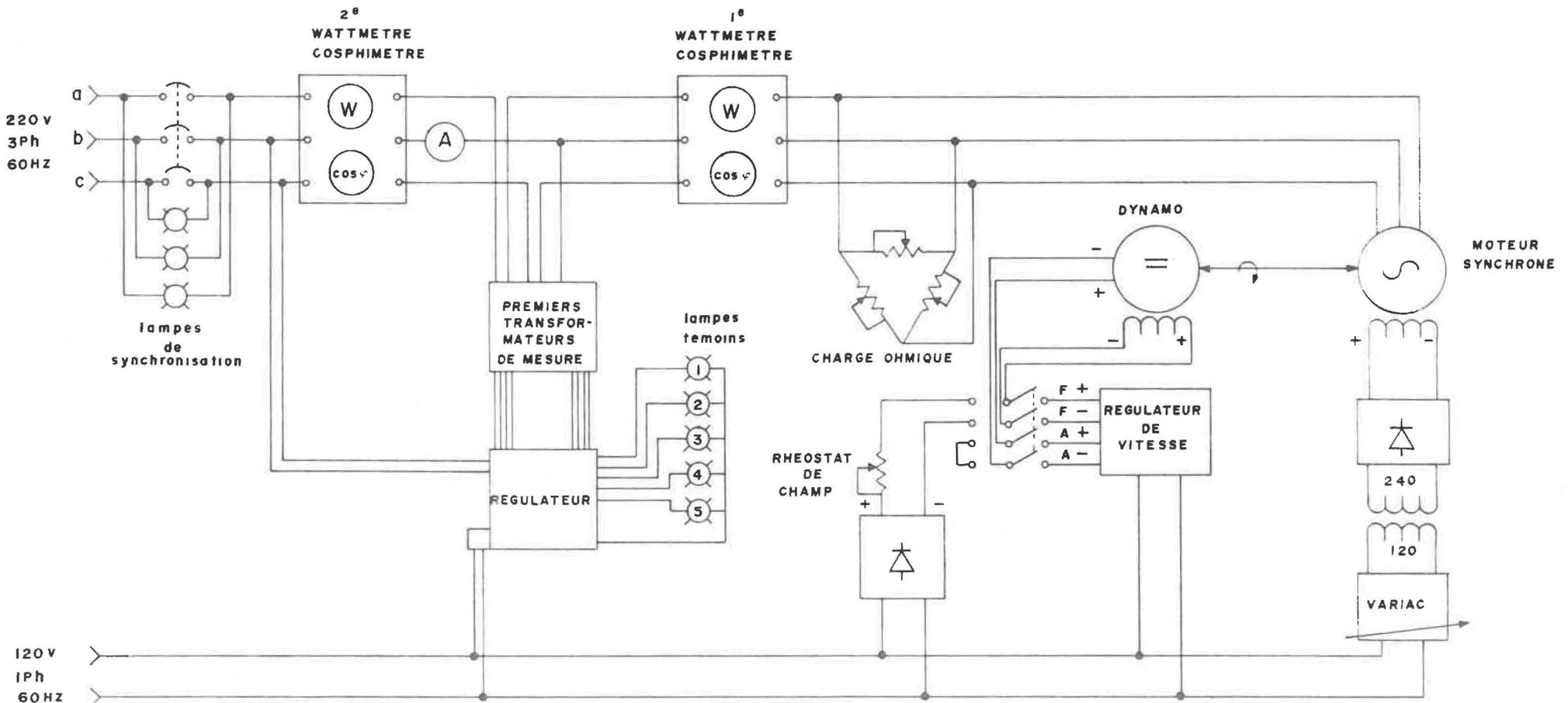


FIGURE 20 SCHEMA DU MONTAGE D'ESSAI POUR LA VERIFICATION DU FONCTIONNEMENT DU REGULATEUR.

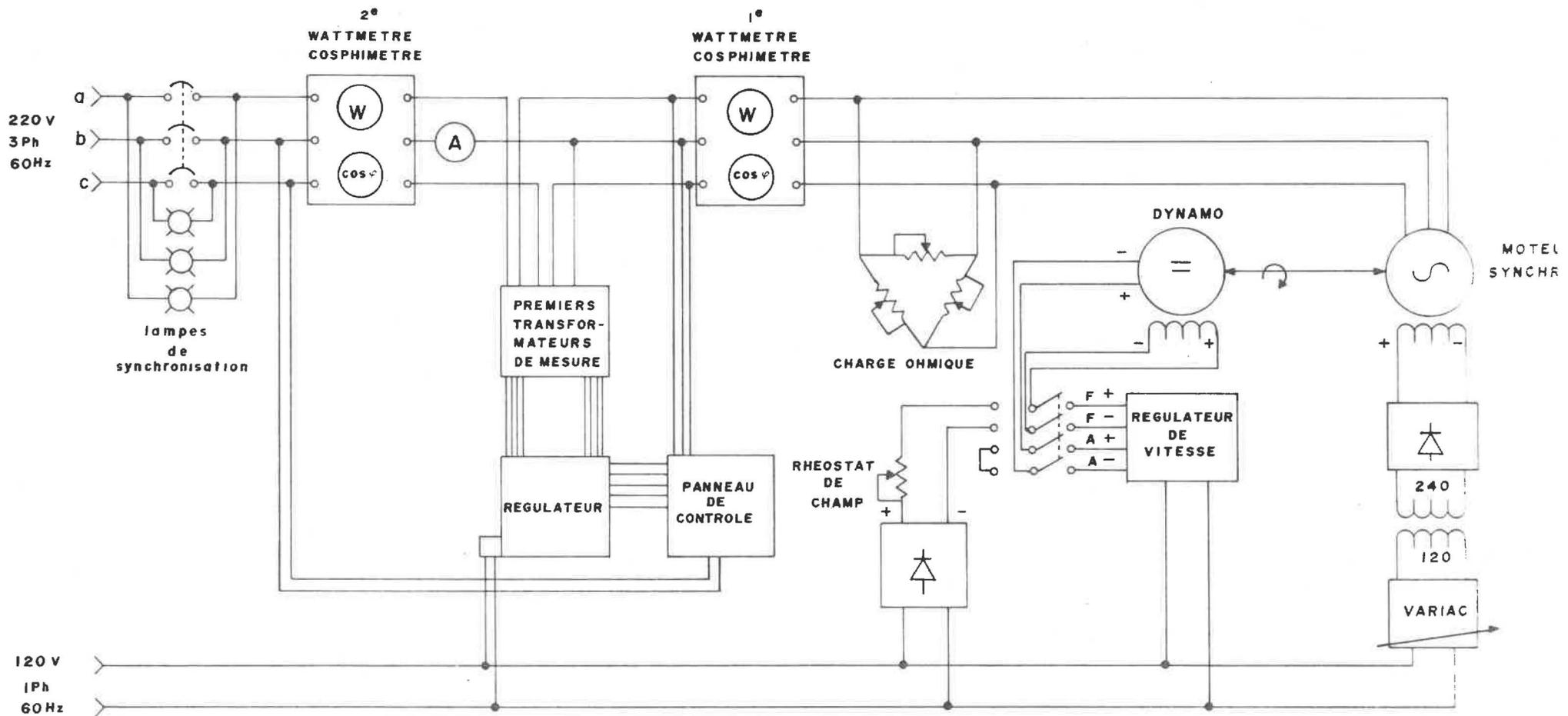


FIGURE 21 . SCHEMA DU MONTAGE D'ESSAI EN REGULATION

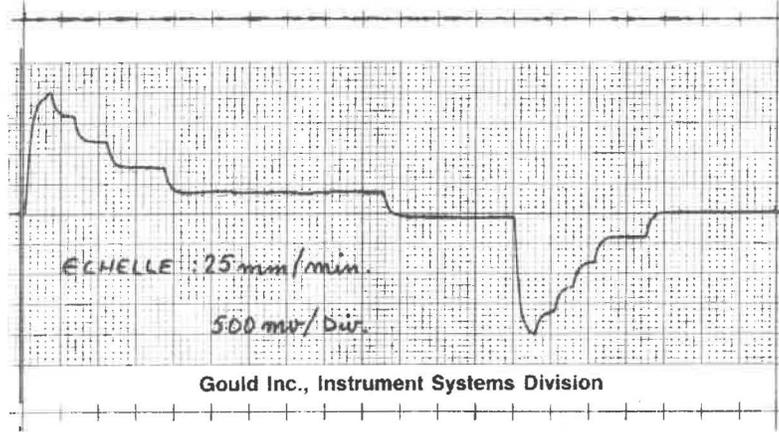


FIGURE 22 . REPONSE DU SYSTEME A UNE VARIATION INSTANTANEE DE LA PUISSANCE REACTIVE DEPUIS UNE VALEUR NULLE JUSQU'A LA VALEUR MAXIMUM.

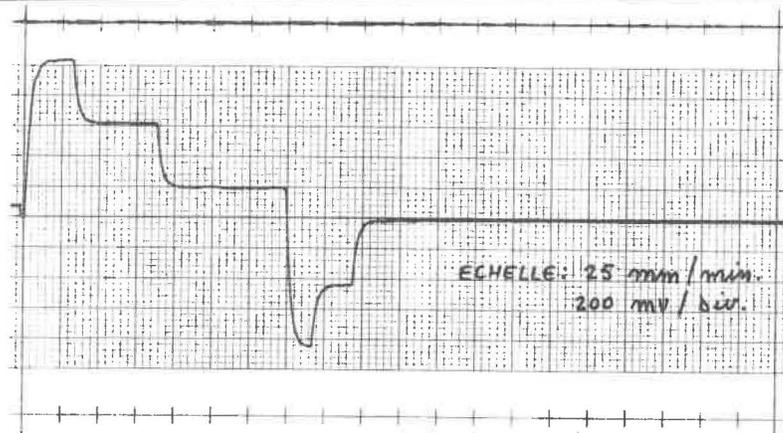


FIGURE 23 . REPONSE DU SYSTEME A UNE VARIATION INSTANTANEE DE LA PUISSANCE REACTIVE DEPUIS UNE VALEUR NULLE JUSQU'A 50% DE LA VALEUR MAXIMUM.

