

LE CALCULATEUR ANALOGIQUE « DJINN »

PAR

J. GIRERD et A. RIOTTE

Ingénieurs au Centre de Calcul
des Laboratoires R. Derveaux

Le calculateur « Djinn », (fig. 1) du type analyseur différentiel analogique a été conçu et réalisé pour mettre à la portée des laboratoires et des bureaux d'études des diverses branches de la technique, un instrument de calcul à la fois PUISSANT, MANIABLE et PRÉCIS.

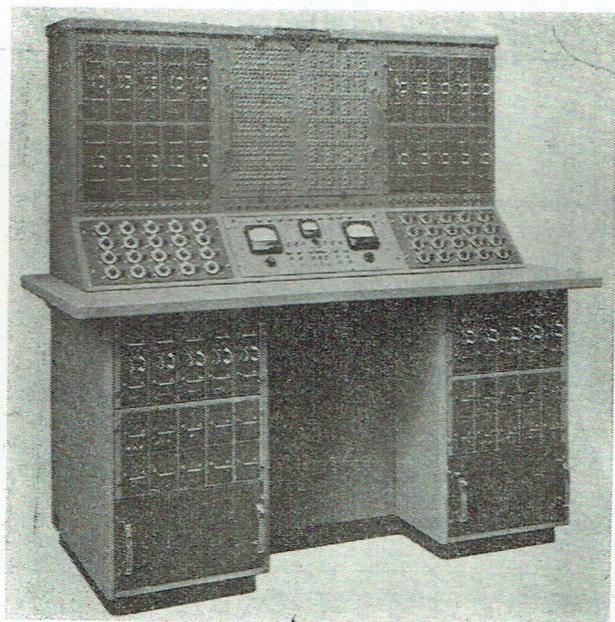


FIG. 1. — Vue générale

Ces caractéristiques ont pu être obtenues :

— par le nombre des éléments opérationnels qu'il comporte ;

— par la réalisation d'un ensemble de panneaux d'interconnexions interchangeables visualisant le « bloc - diagramme » du problème traité ;

— par la mise au point d'un système de mémoire permettant de vérifier le bon fonctionnement dynamique de la machine et de chiffrer la précision des résultats.

1. Description des éléments fonctionnels.

Afin de permettre d'incorporer dans le volume d'un « bloc bureau » le maximum d'éléments fonctionnels, le montage de ceux-ci est réalisé sur châssis fonderie groupés par sous-ensembles de dix (fig. 2). Cette disposition permet d'équiper la version 31 A.S. du « Djinn » de 80 opérateurs, tels qu'amplificateurs, boîtiers fonctionnels, multiplieurs ou générateurs de fonction.

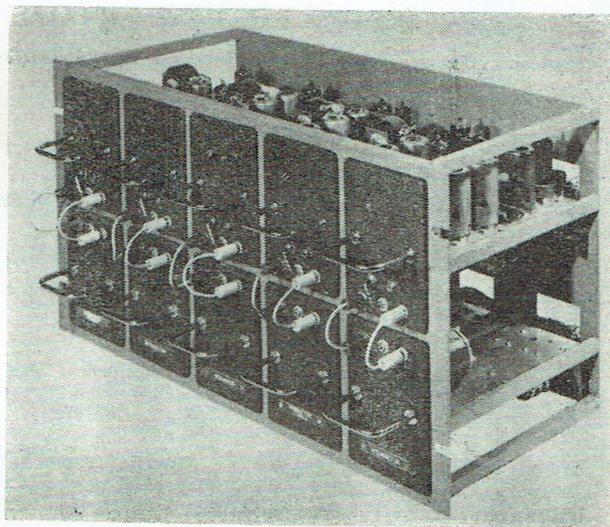


FIG. 2. — Sous-ensemble contenant 5 amplificateurs et 5 boîtiers fonctionnels

1-1. — ÉLÉMENTS FONCTIONNELS LINÉAIRES.

1-1-1. — Amplificateurs.

Le calculateur est équipé d'un groupe d'alimentations permettant l'utilisation de trente amplificateurs du type A 100-10 b. Ces amplificateurs à liaison

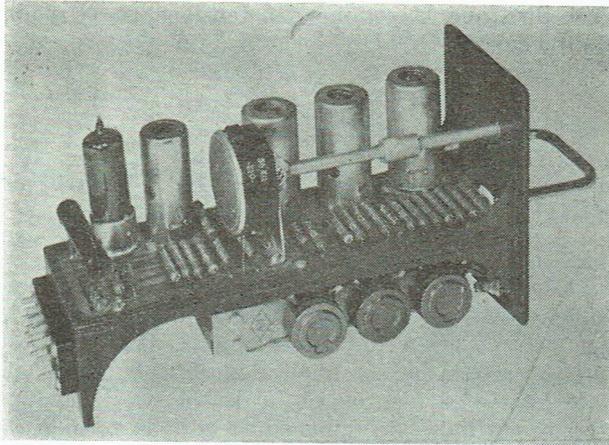


Fig. 3. — Amplificateur circuit imprimé (dessus).

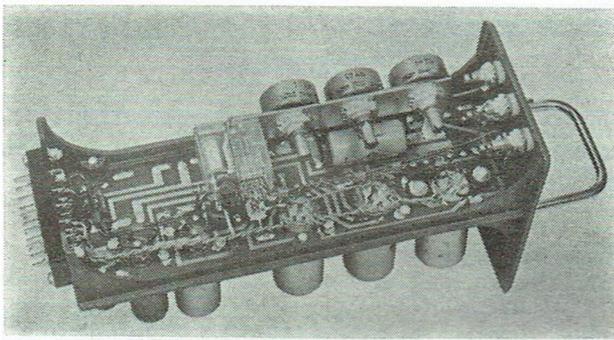


Fig. 3'. — Amplificateur circuit imprimé (dessous)

directe comportent quatre étages d'amplification dont les deux premiers sont symétriques. (fig. 3 et 3').

1-1-1. L'étage d'entrée, constitué par une double triode 12 AX7 fonctionnant en régime sous-chauffé à 4,5 volts, permet :

a) du fait de sa symétrie, rattrapée par un potentiomètre de réglage fin de charge de plaque, de minimiser l'effet des variations des tensions d'alimentation et de chauffage ;

b) du fait de la faible valeur de son courant grille, réduit à 10^{-11} ampères par réglage du point moyen de polarisation, de ne pas introduire de limitation appréciable à la précision des calculs ;

c) du fait de sa charge de cathode élevée, constituée par une lampe à grande valeur de μ , permet un fonctionnement en séparateur avec un mode commun inférieur à 10^{-4} (1) ;

d) enfin du fait du montage de l'étage d'entrée sur support souple, l'effet microphonique est minimisé (fig. 4).

(1) Rappelons que le mode commun est le rapport de la variation de tension entre plaques, au déplacement correspondant du point de polarisation des deux grilles :

$$\frac{V_p}{V_e} = \frac{1}{g}$$

(g étant le gain de l'étage)

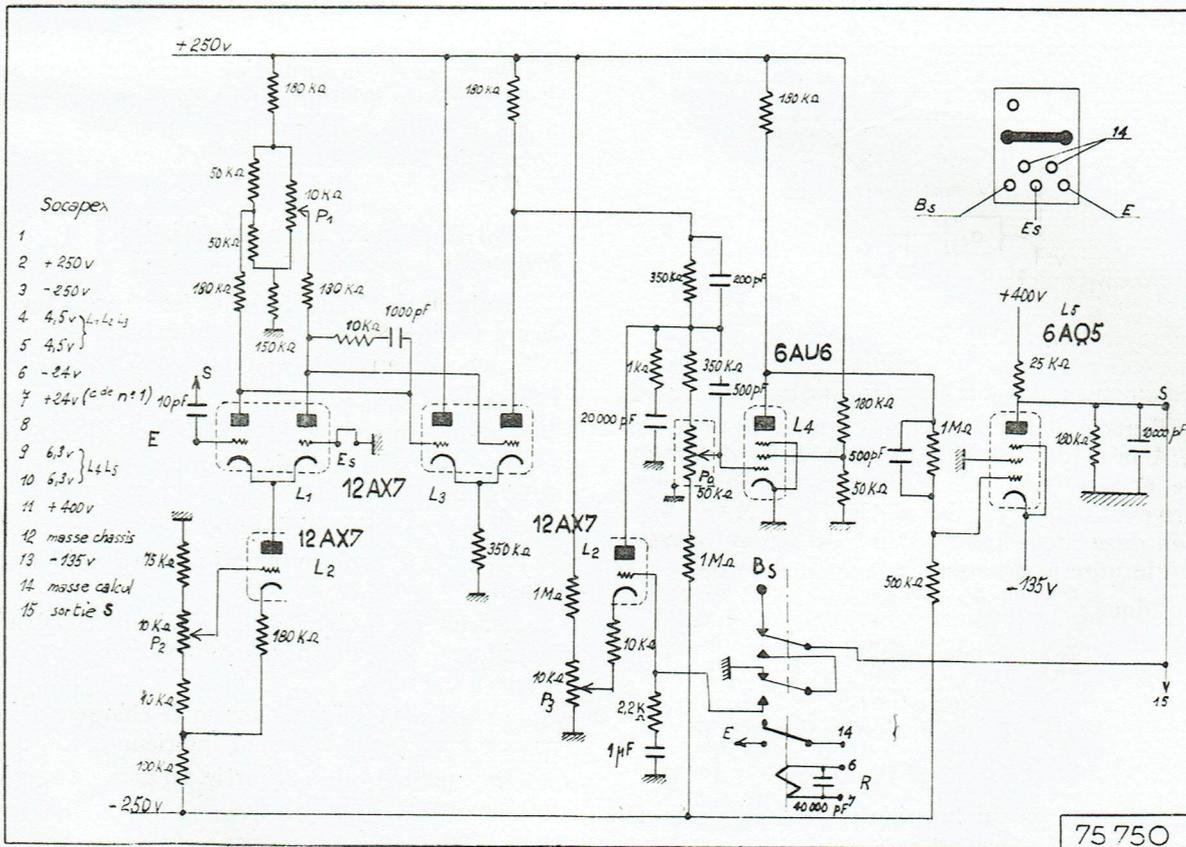


Fig. 4. — Schéma de l'amplificateur

1-1-1-2. L'étage de puissance, constitué par une 6AQ5 fonctionnant avec 400 Volts de haute tension positive et -135 Volts de haute tension négative, l'écran étant à la masse, fournit linéairement sur la plaque ± 100 volts avec ± 115 volts de niveau de saturation pour $10\text{ k } \Omega$ de charge extérieure.

1-1-1-3. Les étages d'amplification intermédiaire comportent une double triode 12 AX7 travaillant dans les mêmes conditions que la lampe d'entrée et une pentode 6 AU6 fonctionnant avec 50 volts d'écran.

1-1-1-4. *Remise à zéro automatique.* — Pendant la période de blocage de la machine, l'amplificateur est déconnecté du boîtier fonctionnel correspondant, son entrée est mise à la masse et la sortie renvoyée, par l'intermédiaire d'un étage comprenant une 1/2 12AX7, sur la grille d'entrée de la 6AU6 ; de plus, la tension de sortie V_s charge une capacité de $1\mu\text{F}$ à grand isolement qui est montée entre la grille d'entrée de la 1/2 12AX7 et la masse. Lorsque la machine est déblocuée, le boîtier fonctionnel réalisant le bouclage est connecté à l'amplificateur et la sortie de celui-ci est renvoyée sur le panneau d'interconnexions ; la capacité « mémoire » reste alors chargée à la tension V_s correspondant à la dérive de l'amplificateur à l'instant du déblocage de la machine : le courant grille de la lampe de remise à zéro étant très faible (quelques 10^{-12} ampères obtenus par un réglage potentiométrique), la capacité ne se décharge pas de façon appréciable pendant la période habituelle de calcul (3 à 5 minutes) et compense la tension de dérive. En effet, soit V_d la tension de dérive ramenée à l'entrée, V_s la tension de sortie,

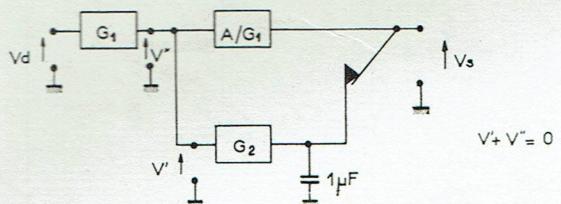


FIG. 5. — Schéma de remise à zéro

G_1 le gain de la première partie de l'amplificateur (entre l'entrée et le retour de la lampe de remise à zéro), A le gain total et G_2 le gain de la chaîne de remise à zéro (fig. 5) : Rappelons que la tension de dérive est définie par la relation $V_s = A(\varepsilon - V_d)$, relation dans laquelle on fait $\varepsilon = 0$ (ce qui correspond à la mise à la masse de la grille d'entrée).

On a donc :

$$V_s = V_d \times G_1 \frac{A/G_1}{1 + A \frac{G_2}{G_1}} \simeq -V_d \frac{G_1}{G_2}$$

la tension ramenée sur la grille de la 6AU6 par la chaîne de remise à zéro est :

$$V' = -V_s G_2 = +V_d G_1$$

c'est dire que la somme des tensions en ce point étant égale à :

$$-V_d G_1 + V_d G_1 = 0$$

la tension de dérive est bien annulée à l'instant du passage en calcul.

1-1-1-5. *Possibilité de remise à zéro manuelle.* — Afin de s'assurer que la lampe de remise à zéro travaille en un point voisin du point d'annulation de son courant grille, un potentiomètre dont l'axe est sorti sur la platine avant de l'amplificateur permet, dans les cas accidentels où la dérive serait devenue trop importante, de ramener au zéro la tension de sortie V_s en jouant sur la polarisation moyenne de la 6AU6. Ce réglage de zéro est fait lorsque la machine est bloquée, c'est-à-dire lorsque les amplificateurs sont déconnectés de leurs boîtiers fonctionnels : la

tension de sortie V_s est alors égale à $V_d \frac{G_1}{G_2}$, ce qui

correspond approximativement à un gain de 40 entre entrée et sortie, donc une possibilité d'annulation précise de la dérive V_d ramenée à l'entrée.

1-1-1-6. *Connections de l'amplificateur.* — L'amplificateur est monté dans un châssis à glissières et s'enfiche, en bout de course, sur une prise Socapex 15 broches réalisant les connexions aux alimentations (hautes tensions, chauffage, 24 volts des relais) ainsi que les liaisons de masse avec les boîtiers fonctionnels et le renvoi de la sortie sur le panneau avant où se trouvent les néons indicateurs de saturation.

D'autre part, sur la platine avant, les deux entrées et la sortie de l'amplificateur sont connectées à des fiches « F.R.B. » permettant par l'intermédiaire de cavaliers de les relier extérieurement au boîtier fonctionnel correspondant.

1-1-1-7. *Résumé des caractéristiques de l'amplificateur.*

- gain en continu : 500 000 (sur impédance supérieure à $150\text{ k } \Omega$) ;
- gain à pleine charge : 150 000 (impédance de charge $10\text{ k } \Omega$) ;
- fréquence de coupure (0.dB) = 250 kHz ;
- puissance de sortie pour la gamme linéaire 1 Watt ;
- gamme de linéarité - 100 volts à + 100 volts ;
- remise à zéro automatique, au déblocage du calcul ;
- dérive en intégrateur : inférieure à 50 mV en 3 minutes, soit une dérive ramenée à l'entrée inférieure à 0,3 mV ;
- entrée symétrique à lampe de charge cathodique assurant un mode commun inférieur à 10^{-4} ;
- niveau de bruit à la sortie, en gain de 1, inférieur à 0,2 mV crête à crête ;
- déphasage en gain de 1 : $\frac{1}{1000}$ de degré par cycle/seconde ;

– précision de la remise à zéro : à chaque déblocage de la machine les amplificateurs sont remis à zéro avec une erreur sur la tension de sortie inférieure au millivolt ;

– réalisation en circuits imprimés double-face.

1-1-2. Boîtiers fonctionnels.

A chaque amplificateur est associé un « boîtier fonctionnel » à l'intérieur duquel sont câblées les impédances d'entrée et de bouclage nécessaires à la réalisation de l'opérateur fonctionnel désiré.

Equipés de prises Socapex 15 broches ils sont facilement interchangeables, ce qui permet de ne pas immobiliser le calculateur pour chaque modification de fonction de transfert.

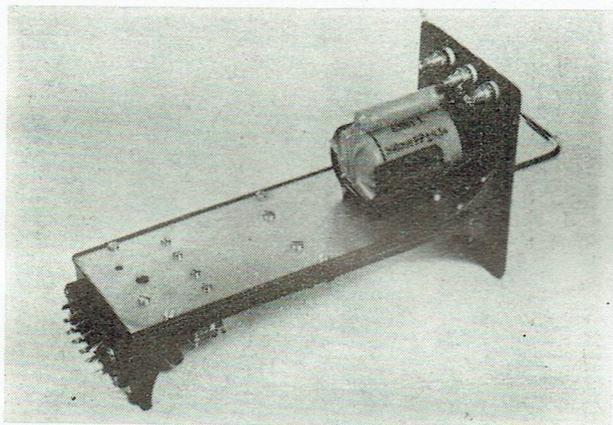


FIG. 6. — Intégrateur

D'autre part un certain nombre de boîtiers sont câblés de façon standard, soit en intégrateurs, déphaseurs ou sommateurs.

Circuits de commande : Dans chaque boîtier fonctionnel est monté un relais miniature Siemens à 4 contacts inverseurs permettant de commander du panneau central, l'affichage des conditions initiales (en chargeant les condensateurs correspondants), ou le maintien en mémoire de la solution à l'instant t donné, ceci en déconnectant simultanément tous les condensateurs des différents boîtiers.

1-1-3. Potentiomètres d'affichage.

Le calculateur, type 31 AS, contient 64 potentiomètres. Ces potentiomètres de valeur $50\text{ k}\Omega$, sont bobinés avec une linéarité supérieure à $0,5\%$ et ont une définition électrique de l'ordre du millième.

Ils sont équipés de cadrans gradués de 0 à 100 se déplaçant par rapport à un vernier au dixième. Les affichages de précision sont faits à l'aide du pont de référence incorporé sur le panneau de commande et contenant un galvanomètre de zéro et un potentiomètre de précision Hélipot 10 tours, linéaire au demi-millième.

Chaque potentiomètre est équipé d'un inverseur tripolaire dont deux bornes sont connectées au panneau d'interconnexions, l'une directement, l'autre par l'intermédiaire d'un pont permettant de renvoyer le dixième de la variable sur l'entrée du potentiomètre et d'afficher les coefficients compris entre 0 et 0,1 avec la même précision relative.

Enfin la troisième position permet de connecter la tension de référence nécessaire à l'affichage au pont.

1-1-4. Caractéristiques des alimentations (1).

Les amplificateurs opérationnels étant à liaison directe les alimentations du « Djinn » comportent une boucle de stabilisation à gain élevé assurant un taux de régulation élevé et une résistance interne faible – leurs caractéristiques sont les suivantes :

– 250 V *continus* – Référence générale de la machine ;

– gain en boucle ouverte de la chaîne de régulation ; 40 000 ;

– résistance interne : inférieure à $3/100\text{ ohm}$ à 1 000 Hz ;

– niveau de bruit : 5 millivolts ;

– débit total admissible : 200 mA ;

– tube de référence : 85 A2 ;

+ 250 V *continus* mêmes caractéristiques de débit et de stabilité

– 135 V *continus* ;

– gain en boucle ouverte de la chaîne de régulation 35 000 ;

– résistance interne : inférieure à $5/100\text{ d'ohm}$ à 1 000 Hz ;

– niveau de bruit : 10 millivolts ;

– débit total admissible : 1,4 ampères.

+ 400 V *continus* filtré, stabilisé par amplificateur magnétique « Westinghouse ».

+ 100 V et – V 100 *continus* tensions de référence pour les affichages des coefficients et les envois d'ordre.

– gain en boucle ouverte : 50 000 ;

– résistance interne : inférieure à $2/100\text{ d'ohm}$;

– niveau de bruit : 5 millivolts ;

– débit total : 100 mA ;

24 V et *chauffages* – les relais d'envoi d'ordre étant alimentés en 24 V, une alimentation indépendante est prévue, ainsi que des tensions 4,5 V et 6,3 V de chauffage.

1-2. ÉLÉMENTS FONCTIONNELS NON LINÉAIRES.

1-2-1. Multiplieurs Electromécaniques.

Dans la plupart des cas d'utilisation des simulateurs analogiques, la bande passante utile ne dépasse pas une dizaine de cycles/secondes ; les multiplications peuvent alors être effectuées électromécaniquement.

A cet effet le « Djinn », type 31 AS, peut être équipé de 5 multiplieurs à 4 termes : chaque multiplieur est constitué de deux châssis élémentaires.

1-2-1-1. *Châssis de commande* : constitué d'un préamplificateur discriminateur de gain 50 000 en chaîne ouverte, bouclé en contre-réaction en gain de 100 pour le terme de position et en gain de 300 pour le terme tachymétrique (fig. 7).

Ce préamplificateur attaque un étage symétrique commandant lui-même l'étage de puissance. Gain

(1) Cf. N.T.I. n° 183, J. GAYET, ingénieur aux Laboratoires R. DERVEAUX.

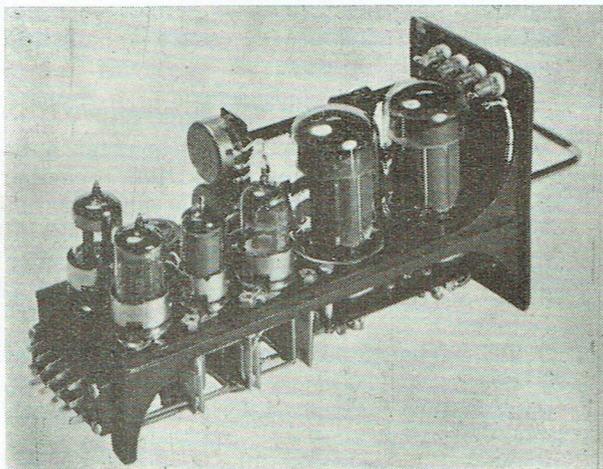


FIG. 7. — Châssis de commande PAP/r

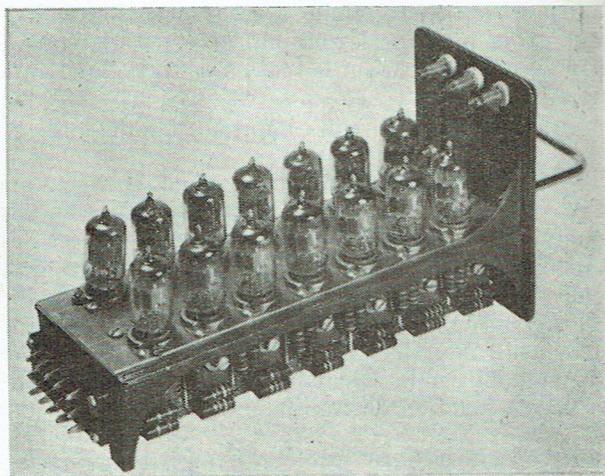


FIG. 9. — Double générateur à diodes

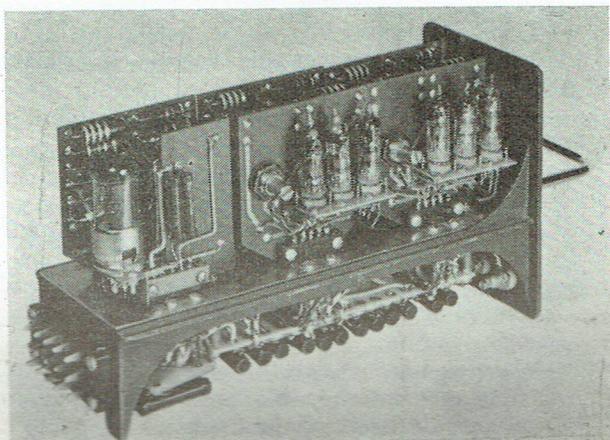


FIG. 8. — Groupe d'amplificateurs subminiatures

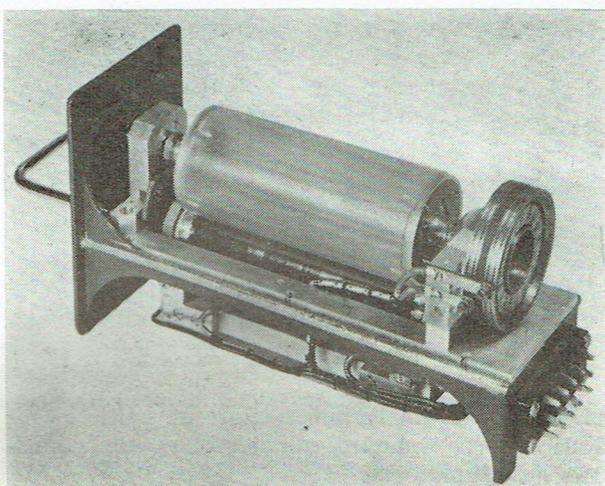


FIG. 10. — Potentiomètre fonctionnel

total en continu de la chaîne électronique par le terme de position : 20 000.

1-2-1-2. *Châssis moteur.* Celui-ci contient :

1° un moteur du type Split série, à commande par l'inducteur à point milieu ;

– puissance de sortie : 10 Watts ;

– rapport couple/inertie = 20 000 rad/s² ;

2° une dynamo tachymétrique ;

3° Cinq potentiomètres linéaires couplés, à haute définition et linéarité supérieure au $\frac{1}{1\ 000}$

1-2-2. *Multiplieurs électroniques.*

Lorsque les caractéristiques dynamiques du problème l'imposent, les multiplieurs utilisés sont du type électronique, basés sur la relation classique :

$$x \cdot y = \frac{1}{4} [(x + y)^2 - (x - y)^2]$$

réalisés en circuits imprimés subminiature. Ils sont contenus dans deux châssis, l'un comportant les amplificateurs de sommation et de changement de signe, l'autre les deux générateurs à diode pour le calcul de $(x + y)^2$ et $(x - y)^2$ (fig. 8 et fig. 9).

1-2-3. *Générateurs de Fonction.*

Il est enfin possible d'introduire des fonctions quelconques à l'aide de « potentiomètres fonctionnels » ; (fig. 10) chaque potentiomètre fonctionnel est constitué par un cylindre frottant à frottement doux sur une résistance bobinée de haute linéarité. Sur le cylindre tournant est fixé un film sur lequel la courbe de variation du coefficient est photogravée en relief et réalise le curseur du potentiomètre. Ce

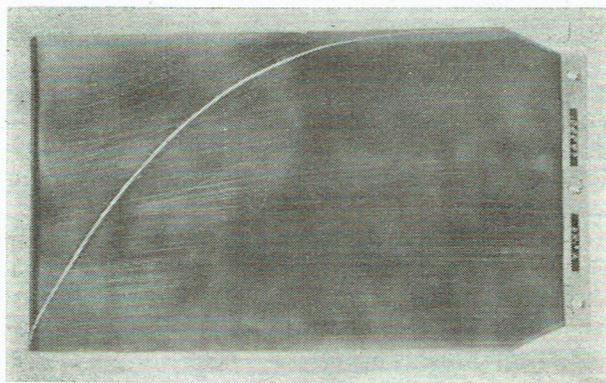


FIG. 11. — Courbe de potentiomètre fonctionnel

procédé permet l'introduction de courbes expérimentales dans une chaîne de calcul, sans opération intermédiaire autre que des manipulations photographiques (fig. 11).

Ce dispositif permet de plus la conservation des différentes lois de variation des coefficients, sous la forme peu encombrante d'une feuille de 10 cm de côté. D'autre part, le montage et le démontage rapide de chaque loi permet une minimisation des temps d'inutilisation du groupe de potentiomètres

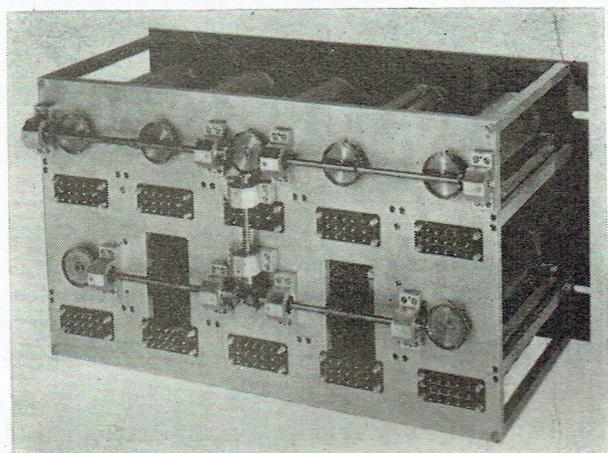


FIG. 12. — Entraînement mécanique des potentiomètres fonctionnels

pour chaque changement de problème. Le moteur et les amplificateurs d'asservissement utilisés sont groupés dans un châssis spécial permettant l'entraînement de 7 potentiomètres fonctionnels (fig. 12).

2. Principes d'affichage.

La résolution d'un système différentiel sur calculateur analogique comporte deux phases :

- mise sous forme de « bloc-diagramme » des équations du système, opération trop connue pour qu'il soit nécessaire d'en détailler la mise en œuvre ;
- transcription du « bloc-diagramme » sur le calculateur, opération qui peut se décomposer comme suit :

2-1. CODAGE DES AMPLIFICATEURS, CHOIX DE LEUR FONCTION.

Les amplificateurs, groupés par cinq unités dans les châssis précédemment décrits, sont connectés un par un à des « boîtiers-fonctionnels » contenant les impédances d'entrée et de bouclage nécessaires à l'opération que l'on désire effectuer.

Le codage consiste à attribuer à chacun des amplificateurs le numéro correspondant à sa fonction, repérée dans le bloc diagramme. Ceci fait, il suffit d'enficher dans l'alvéole associée, le boîtier fonctionnel approprié - (déphaseur, intégrateur, sommateur, etc...) dont les entrées et la sortie sont renvoyées sur le panneau d'interconnexions aux points correspondants du bloc-diagramme.

2-2. AFFICHAGE SUR LE PANNEAU D'INTERCONNEXIONS.

Afin de simplifier l'affichage des problèmes complexes qu'il est possible de traiter avec trente amplificateurs, toutes les entrées et sorties des éléments fonctionnels sont ramenées sur un panneau d'interconnexions sur lequel le code de numérotation des amplificateurs et des potentiomètres est clairement indiqué. C'est sur ce panneau que l'on effectue, par fiches et câbles, les liaisons extérieures représentant les jonctions entre amplificateurs et potentiomètres d'affichage ; ce qui permet une visualisation directe et rapide du bloc-diagramme.

De plus le panneau est relié aux éléments du calculateur par une série de prises enfichables, ce qui le rend amovible et autorise, de ce fait, l'étude de problèmes différents sur une même machine sans nécessiter de modification de câblage. Deux types principaux de panneaux sont habituellement utilisés (fig. 13 et 14) : la figure 13 représente un panneau

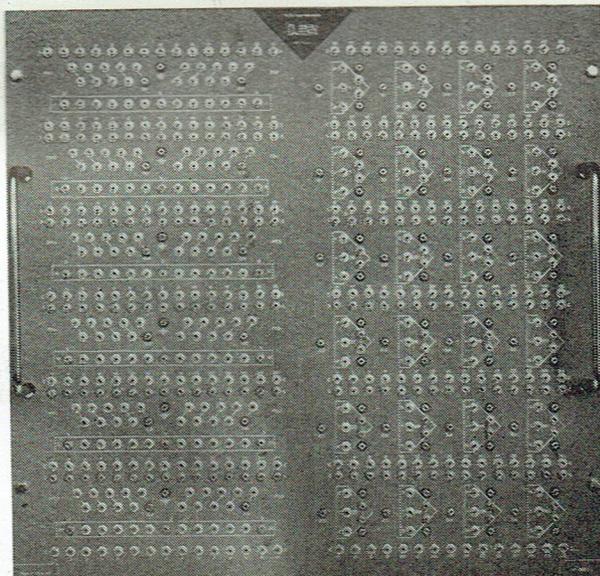


FIG. 13. — Panneau d'interconnexions 6 équations

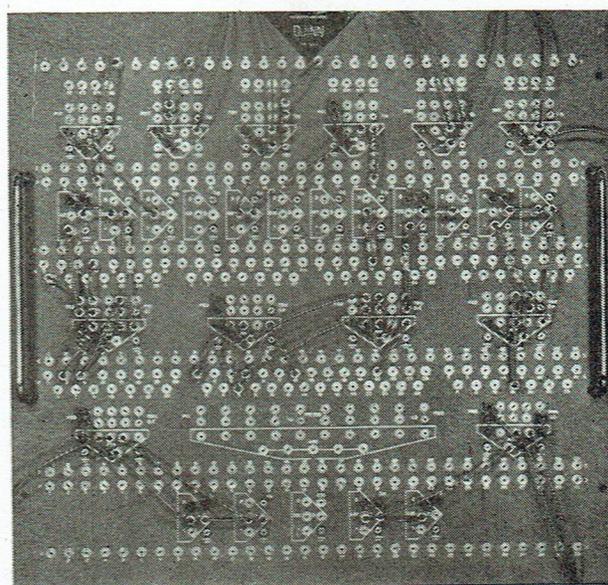


FIG. 14. — Panneau d'interconnexions pour simulation de réacteur nucléaire.

correspondant à la résolution de systèmes de 1 à 6 équations différentielles, chacune pouvant être du 4^e ordre, qui est directement utilisable pour tous les problèmes de stabilité dynamique. La fig. 14 reproduit le panneau adapté à des problèmes comprenant un plus grand nombre d'équations différentielles d'ordre moins élevé, tels que simulation du comportement cinétique d'un réacteur nucléaire ou du fonctionnement d'une machine tournante.

2-3. AFFICHAGE DES COEFFICIENTS NUMÉRIQUES.

La dernière opération comprend, enfin, l'affichage des valeurs numériques des coefficients. Ceci est réalisé par une méthode de zéro par l'intermédiaire d'un pont de mesure comprenant un micro-ampèremètre et un potentiomètre de précision Heli-pot 10 tours, linéaire au 1/2 millième.

Ce pont de mesure est alimenté par les tensions de référence + 100 V, - 100 V, + 10 V et - 10 Volts.

3. Précision.

Afin de réduire les causes d'erreurs systématiques, un soin particulier a été apporté au choix des pièces détachées.

3-1. CARACTÉRISTIQUES TECHNOLOGIQUES DES ÉLÉMENTS FONCTIONNELS.

La précision du calcul analogique dépendant essentiellement des éléments passifs, résistances et condensateurs utilisés pour réaliser les éléments fonctionnels tels que sommateurs, déphaseurs, intégrateurs, ces pièces détachées ont été sélectionnées avec soin et répondent aux caractéristiques suivantes :

- Résistances : au carbone sous couches vieilles artificiellement.

valeur : $2 \text{ M}\Omega \pm 0,2 \%$
coefficients de température : $- 0,5 \times 10^{-3} \%$ par degré C

- Capacité : au Styroflex

valeur : $0,5 \text{ }\mu\text{F} \pm 0,1 \%$

résistance d'isolement supérieure à $10^7 \text{ M}\Omega$

coefficient de température : $- 2 \times 10^{-7}$ par degré C

De plus, afin de supprimer tout risque de mauvais contact, les liaisons sont faites par fiches F.R.B. 3 mm, multicontacts à ressorts.

Enfin les supports isolants sont réalisés en Super-Pertinax.

3-2. COMPENSATION DES DÉRIVES D'AMPLIFICATEURS.

Comme il l'a été décrit en détail au paragraphe 1, l'amplificateur A 100-10 b comporte une compensation automatique de la dérive, par l'intermédiaire d'une capacité mémoire attaquant une grille de lampe sous-chauffée et sous-voltée et fonctionnant de ce fait avec un courant grille inférieur à 10^{-11} ampères.

De plus la lampe d'entrée de l'amplificateur fonctionnant en un point similaire les dérives dues au courant grille n'excèdent pas 0,3 mV ramenés à l'entrée.

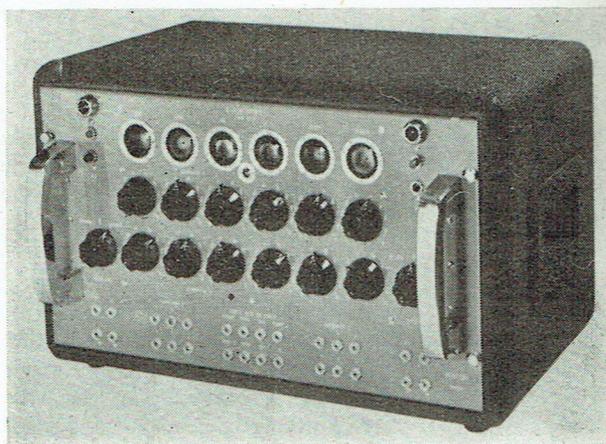


FIG. 15. — Chronoscope

Pratiquement, pour une période de calcul de trois minutes, un amplificateur bouclé en intégrateur de constante de temps égale à 1 seconde a une dérive toujours inférieure à 50 mV et dans la plupart des cas de l'ordre de 15 mV.

3-3. PRINCIPE DE VÉRIFICATION AUTOMATIQUE PAR CIRCUIT MÉMOIRE.

Enfin le « Djinn » est équipé d'un système de commutation permettant de conserver la charge de toutes les capacités d'intégration et, de ce fait, permettant de relever la tension de sortie des amplificateurs opérationnels utilisés dans la chaîne de calcul.

Ce dispositif permet de reporter directement, dans les équations à résoudre les valeurs relevées à un instant donné et de s'assurer que celles-ci sont vérifiées, ou tout au moins de chiffrer la précision avec laquelle sont effectués les calculs.

Pour compléter ce dispositif un appareil supplémentaire peut être incorporé dans la machine : celui-ci, le « chronoscope », type GT1, permet de bloquer le calcul en « mémoire » au bout d'un temps préaffiché, ou éventuellement, à l'aide d'un circuit à coïncidence de précision, de passer en mémoire lorsqu'une variable ou ses dérivées passent par une valeur déterminée ; ce qui par exemple assure une lecture précise des maxima et minima (fig. 15).

*
*
*

Cette brève description du calculateur analogique des Laboratoires Derveaux, ne saurait donner qu'un aperçu de ses caractéristiques. Néanmoins il convient d'insister sur le fait que cette machine n'est pas un prototype de laboratoire mais un appareil de série réalisé avec les méthodes industrielles les plus modernes et les contrôles technologiques les plus sévères.

Dans ces conditions, il est permis d'espérer que le « Djinn » contribuera efficacement au développement des méthodes analogiques dans l'industrie.