

28 novembre 1974

INIS

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE
CENTRE D'ETUDES NUCLEAIRES DE SACLAY

SERVICES D'ELECTRONIQUE DE SACLAY
SECTION DE GESTION DU MATERIEL ELECTRONIQUE
GROUPE DE GESTION CENTRALISEE D'ELECTRONIQUE

0000000000

MESURES AUTOMATIQUES

Claude RINGEARD

SES/PUB/SGM/74-249

Conférence sur les mesures automatiques. Saclay
(France), 27 février 1975

CEA-CONF--3027



1975

MESURES AUTOMATIQUES - Claude RINGEARD

L'ordinateur, par les possibilités qu'il offre d'enchaînement séquentiel des opérations et de mémorisation des données recueillies, permet d'introduire une approche statistique dans l'évaluation d'un résultat.

Pour bénéficier pleinement de l'avantage d'un système automatisé, un effort particulier doit être effectué pour réduire au minimum la durée de mise au point des programmes et pour faciliter l'interconnexion, au système existant, d'appareils d'origines diverses.

On indique à titre d'exemple, la solution adoptée au laboratoire d'essais du Groupe de Gestion Centralisée d'Electronique du C.E.A.

AUTOMATIC MEASUREMENT - Claude RINGEARD

By its ability to link-up operations sequentially and memorise the data collected, the computer can introduce a statistical approach into the evaluation of a result.

To benefit fully from the advantages of automation, a special effort was made to reduce the programming time to a minimum and to simplify link-ups between the existing system and instruments from different sources.

The practical solution of the test laboratory of the C.E.A. Centralised Administration Groupe (GEC) is given.

TABLE DES MATIERES

- 1 - INTRODUCTION -
- 2 - GENERALITES -
 - 2.1 - Mesures automatiques.
 - 2.2 - Mesures manuelles et automatiques.
 - 2.2.1 - Avantages du traditionnel.
 - 2.2.2 - Avantages de l'automatisme.
- 3 - COMPOSITION D'UN ENSEMBLE DE MESURES AUTOMATIQUES -
- 4 - LA LIAISON ENTRE L'ORGANE DE MESURE ET L'ORDINATEUR -
 - 4.1 - Rappels sur le fonctionnement d'un ordinateur.
 - 4.2 - Communication entre l'ordinateur et les périphériques extérieurs.
 - 4.2.1 - Echange en mode programmé.
 - 4.2.2 - Echange sous contrôle périphérique.
 - 4.3 - Le standard CAMAC.
 - 4.3.1 - Interconnexion de châssis - Transfert des informations.
 - 4.3.2 - Constitution d'un tiroir CAMAC.
 - 4.3.3 - Fonctionnement du tiroir contrôleur.
- 5 - DIFFERENTS TYPES DE SYSTEMES AUTOMATIQUES -
 - 5.1 - Application à la métrologie.
 - 5.1.1 - Notions de fidélité et de justesse.
 - 5.1.2 - Combinaison des erreurs.
 - 5.1.3 - Comparaison à un standard.
 - 5.1.4 - Les régressions
- 6 - EXEMPLE DE REALISATION - DISPOSITIF DE MESURE AUTOMATIQUE -
 - 6.1 - Eléments communs aux divers dispositifs
 - 6.1.1 - Calculateur et téléscripteur.
 - 6.1.2 - Interface.
 - 6.1.3 - Environnement variable.
- 7 - CONCLUSION -

BIBLIOGRAPHIE.

1 - INTRODUCTION -

Les ensembles de mesure automatique se sont considérablement développés au cours des dernières années. Ce développement peut s'expliquer pour les raisons suivantes :

- Nécessité d'une connaissance globale des phénomènes,
- Essor considérable de l'informatique dû à un abaissement du coût des systèmes, avec simultanément une plus grande facilité de mise en oeuvre,
- Possibilité de traiter un volume important de données, ce qui permet d'appliquer les notions de statistique à la mesure,
- Obtention des résultats sous une forme directement exploitable.

2 - GENERALITES -

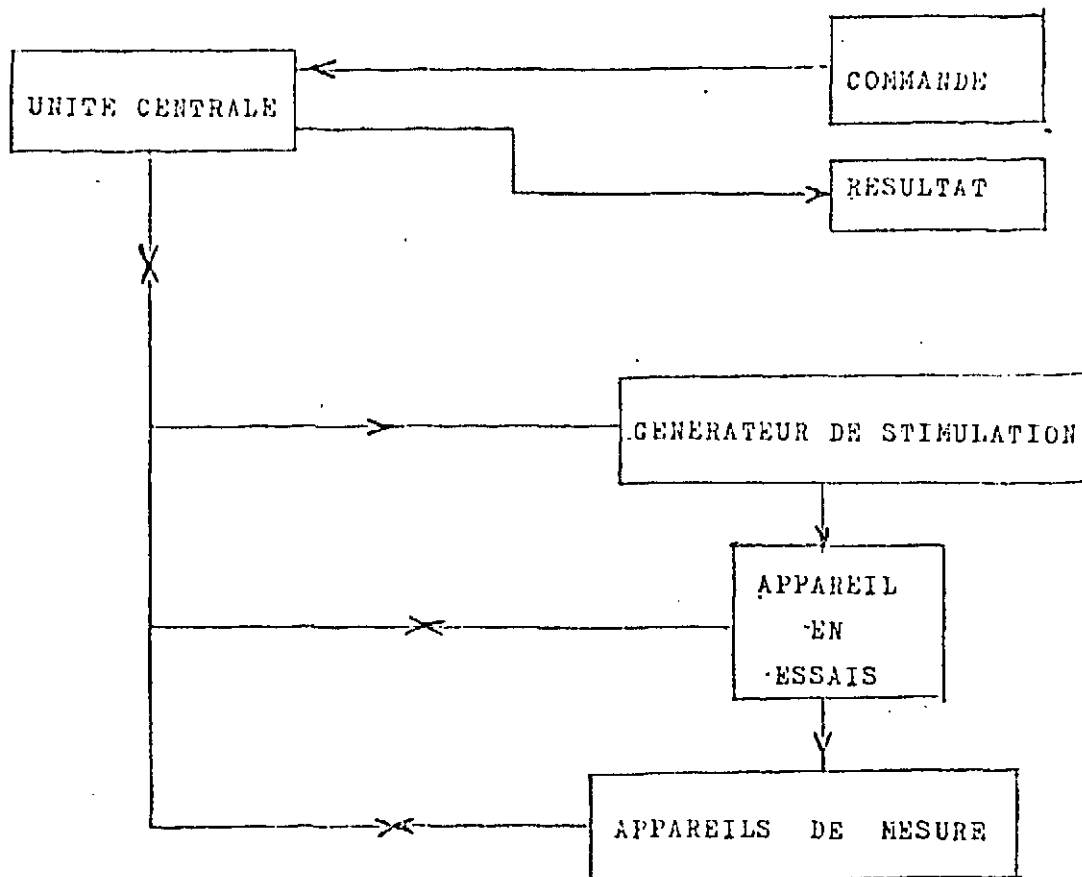
2.1 - Mesures automatiques.

Dans ces termes on peut englober tout le domaine dans lequel une mesure électronique, au sens classique du mot, est effectuée automatiquement. Cela nécessite le déroulement d'opérations élémentaires commandées et contrôlées par un automatisme mécanique ou en général par un moyen de l'informatique.

Les résultats de la mesure peuvent être traités ou non.

Le principe général est le suivant : (fig.1) une unité centrale commande des générateurs de stimuli, qui envoient leurs informations à l'appareil en essais. Les domaines à contrôler sont mesurés par des appareils de mesures adéquats et les résultats édités par l'intermédiaire de l'unité centrale.

Les ensembles ont divers noms, utilisés couramment suivant leur destination, comme banc de mesure, système de test, centrales de mesures... L'ensemble de mesures automatiques est plus particulier à la métrologie élaborée.



- Fig. 1 -

SCHEMA DE PRINCIPE SIMPLIFIE D'UN ENSEMBLE DE
MESURE AUTOMATIQUE

.../...

2.2 - Mesures manuelles et mesures automatiques.

La mesure manuelle traditionnelle s'automatise. Pourquoi cette évolution et pourquoi deux techniques apparemment concurrentes? Qu'est-ce que le traditionnel et quel est son domaine propre? Toutes questions dont la solution est indispensable pour permettre à l'utilisateur d'orienter son choix.

2.2.1 - Avantages du traditionnel.

- Le coût : L'achat et la mise en oeuvre d'un système informatique entraîne un investissement important : coût initial, temps de formation, maintenance, etc... La mesure manuelle reste donc valable lorsque le nombre d'essais ou le nombre de paramètres mesurés, restent faibles.
- Simplicité de mise en oeuvre
- Bruit des relais de commutation : Les relais, très souvent utilisés dans les dispositifs programmables pour commuter des éléments, sont des sources de bruit qui vont introduire une limitation dans le pouvoir de résolution de l'appareillage.

2.2.2 - Avantages de l'automatisme.

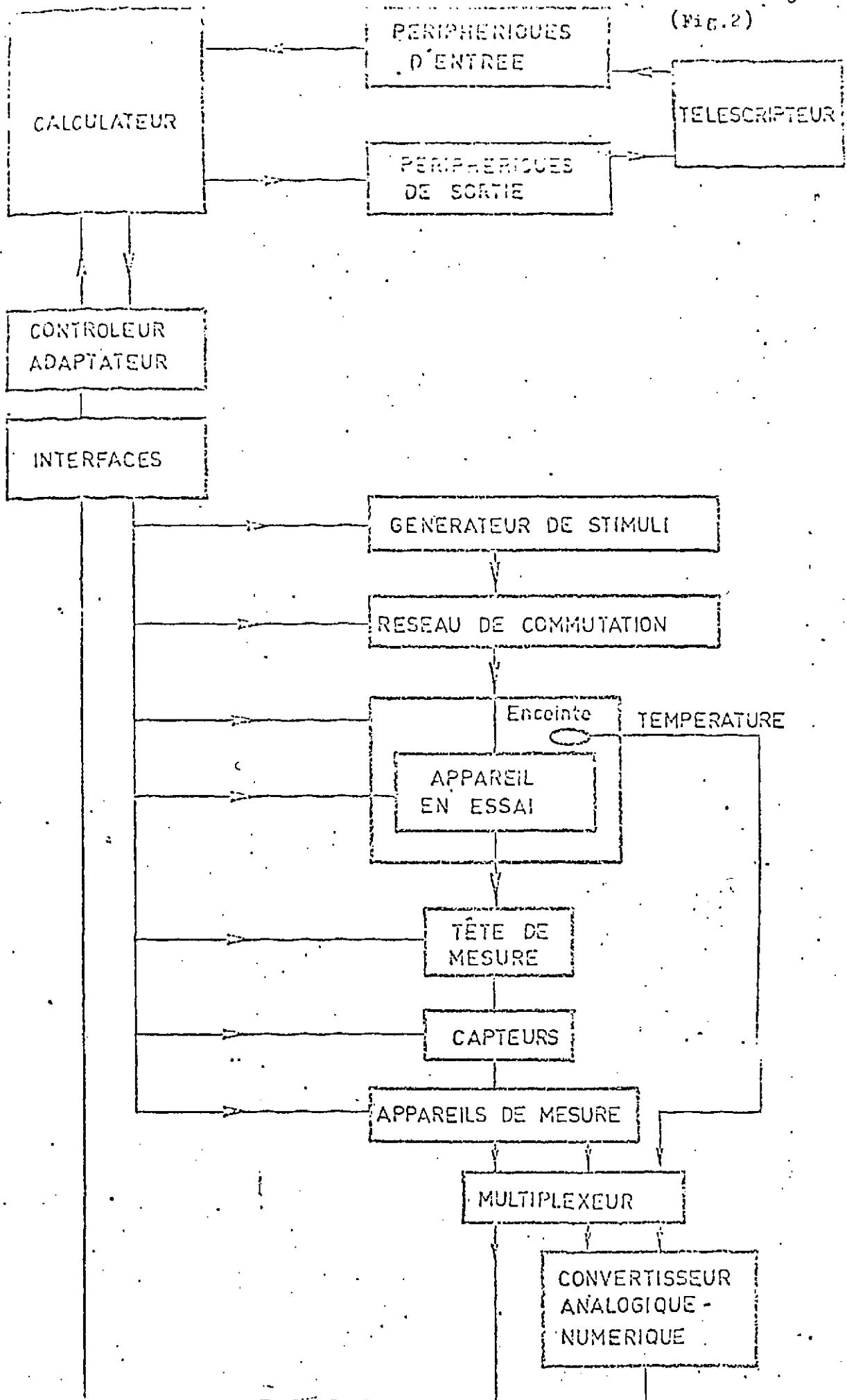
- L'élimination du facteur humain : Cette technique de mesure, à lecture numérique permet d'éliminer tout facteur humain et de diminuer les contestations et les erreurs.
- La rapidité : La mesure est faite en une fraction de seconde et la capacité de l'équipement est multipliée par cent ou mille.
- La reproductibilité : Les essais peuvent être ainsi refaits plusieurs fois de la même façon, soit avec un délai court, soit avec un délai long. La façon de faire personnelle ou le contexte du moment n'intervient pas.
- L'augmentation de la qualité de la mesure : Les conditions d'essais sont connues. Le traitement des données de sorties permet d'obtenir des valeurs directement exploitables.
- L'obtention de distribution statistique : On peut en particulier se permettre de faire des statistiques sur de très nombreuses mesures, par exemple pour le contrôle de la qualité, et calculer par exemple la valeur moyenne, l'écart type et la distribution en classes prédéterminées.

.../...

- La facilité de dépouillement : Les résultats apparaissent en numérique sur bande imprimée, perforée ou magnétique. Ils peuvent être ainsi traités directement ou facilement par ordinateur. Des corrélations cachées peuvent ainsi être découvertes. Un travail fastidieux et souvent inextricable est ainsi évité.

- La régulation et le pilotage : Enfin, le résultat des mesures peut, avec ou sans ordinateur, être utilisé pour réagir directement en contre-réaction sur le système producteur d'informations pour maintenir le dispositif dans un niveau d'activité programmé à l'avance. En particulier, la stabilité d'un processus peut être ainsi assurée.

.../...



Cet ensemble se compose en général des éléments suivants :

- Enceinte : L'appareil devant souvent être essayé à température ambiante constante, on le place dans une enceinte thermique (étuve) dont l'évolution de la température est programmable. Celle-ci permet les essais en température et même climatiques (brouillards salins, hygrométrie, ...). On s'assure toujours de la stabilisation en température des composants de l'appareil.
- Générateurs de stimuli : Suivant les essais à effectuer, il a été choisi un certain nombre de signaux à envoyer à l'appareil. Suivant les précisions à obtenir, on choisit les générateurs nécessaires. Ceux-ci doivent être évidemment programmables, et ce, si possible, d'une façon commode (connecteur et programmation).
- Commutation : Ces divers générateurs sont reliés à un réseau de commutation programmable. Il permet d'aiguiller le signal où et quand il faut. L'appareil peut posséder de nombreuses entrées ou valeurs à faire varier simultanément. Un soin particulier est pris pour les commutateurs coaxiaux.
- Capteurs : Comme pour les générateurs, les capteurs sont choisis en fonction des mesures à effectuer. Souvent, ils ne sont pas nécessaires, et les raccordements se font directement de la sortie de l'appareil, à l'aide des câbles normaux prévus. Une mesure de température est faite dans l'étuve et l'information correspondante est codée.
- Appareils de mesure : De même, les appareils de mesures sont choisis en fonction des informations de sortie désirées. Ils sont programmables et leur sortie est, si possible, codée numériquement. Il y a toujours des difficultés d'adaptation dues à la grande variété des codes existants, et surtout des connecteurs. Les appareils peuvent être auto-commutables (par exemple changement de gamme), ce qui simplifie un peu le système, mais augmente la durée d'essai. Ils peuvent être également très évolués et donner déjà des résultats élaborés. Ils comprennent alors un programme interne plus ou moins complexe (mécanique, mémoire morte, même petit calculateur ...).
- Convertisseur analogique-numérique : Si l'information en sortie de l'appareil de mesure est analogique, un convertisseur analogique-numérique est nécessaire. Ses caractéristiques sont à choisir de façon à ne pas diminuer la précision des informations. Un multiplexeur peut le précéder lorsque le nombre de voies est important.
- Interfaces : On a ainsi un ensemble de matériels pouvant être commandés numériquement et dont les informations de sortie sont numériques. Suivant les cas, il faut alors rendre homogènes les différentes commandes à l'aide d'interfaces entre chaque appareil de mesure ou générateurs et le système de commande choisi. Un choix judicieux des matériels et du système, ainsi que l'utilisation d'appareils répondant aux mêmes règles de constructions, réduit avantageusement le problème des interfaces.
- Contrôleur-adaptateur : Enfin, il s'agit maintenant, à l'aide d'un contrôleur, d'adapter les informations précédentes, issues des interfaces, au calculateur choisi. Cette fonction est spécifique du calculateur.

- Calculateur et périphériques : Les informations sont envoyées au calculateur, plus ou moins puissant, suivant les cas. Celui-ci est relié à divers périphériques d'entrée ou de sortie, choisis suivant les besoins et la commodité recherchée. Un téléscripteur permet l'entrée des ordres ou des renseignements et la sortie des résultats. Une table traçante permet d'obtenir directement des courbes. La reprographie d'une unité de visualisation ou d'un oscillographe permet également d'avoir sur papier la forme de signaux divers.

4 - LA LIAISON ENTRE L'ORGANE DE MESURE ET L'ORDINATEUR -

4.1 - Rappels sur le fonctionnement d'un ordinateur.

Un calculateur est tout d'abord une mémoire dans laquelle il est possible de ranger des instructions et des valeurs numériques. Par le jeu des instructions, on peut effectuer des enchaînements successifs d'actions. Le calculateur est donc capable de garder en mémoire un programme dont le déroulement permettra d'assurer diverses exécutions. Le point important est que ce programme peut être modifié sans toucher à la structure de la machine.

On peut distinguer dans un calculateur, 4 parties essentielles :

- une unité de mémoire,
- une unité arithmétique,
- une unité de contrôle,
- les organes d'entrée-sortie.

Un ordinateur, dans son emballage d'origine, ne sait rien faire si un programme n'a pas été introduit en mémoire.

Ce programme est composé d'instructions représentant des fonctions logiques complexes. Une instruction comporte toujours :

- 1°) Un ordre (ex. : additionner, lire une carte ...)
- 2°) L'indication des données à traiter (ex. : additionner la donnée A à la donnée B).

Pour qu'une instruction garde une valeur générale, quelles que soient les données auxquelles elle se rapporte, il ne faut pas qu'elle soit associée directement à la donnée elle-même, mais à son adresse en mémoire. Ainsi, le contenu de mémoire peut varier dans le temps au fur et à mesure du traitement, mais l'emplacement d'un type de donnée déterminé restera inchangé pendant tout le traitement.

On n'utilisera pas l'instruction additionner 216 à 340, mais additionner le contenu de l'emplacement 200 (qui contient 216) au contenu de l'emplacement 201 (qui contient 340).

..../...

Il faut donc introduire les données, les résultats de calculs et toute autre indication nécessaire au déroulement du programme, dans la mémoire centrale de la machine en des positions parfaitement définies d'avance et non susceptibles de changer pendant le traitement.

Dans les langages de haut niveau (Fortran, Basic, etc..) il est possible de réserver des zones mémoire pour ranger des données relatives à un même type de mesure. On aboutit à la notion de tableau et de variable indicée.

L'acquisition, le rangement de 10 mesures s'effectueront simplement par l'écriture du programme suivant :

```

Dimension VS (10) ) Acquisition et rangement
D O 1 I = 1, 10 } de la mesure dans le
V S (I) = ACQV (V) ) tableau V S.
1 continue                               Fin de la boucle

```

Ce simple programme utilise un certain nombre d'outils de programmation pour l'acquisition des mesures:

- D'abord la boucle qui permet de répéter, avec incrémentation d'un index, une série d'instructions. La valeur de l'index est utilisée ici pour ranger en mémoire, dans le tableau VS, les valeurs successives de la mesure.
- Ensuite, le S/Programme qui permet de n'écrire qu'une seule fois une suite d'instructions identiques utilisée dans différentes parties du programme.

4.2 - Communication entre l'ordinateur et les périphériques extérieurs

4.2.1 - Echange en "mode programmé"

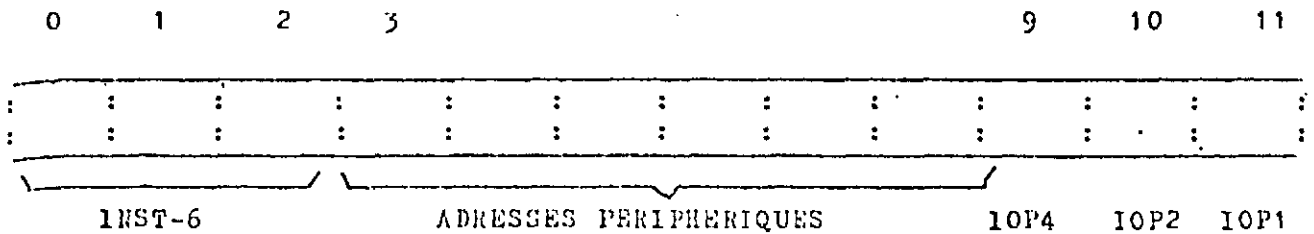
La majorité des échanges d'entrée et de sortie d'informations numériques avec le calculateur s'effectuent sous le contrôle du programme qui a été inscrit dans la mémoire du calculateur. Prenons un calculateur particulier, le PDP8/I par exemple. Les échanges de mots d'informations transitent par le registre accumulateur.

Pour effectuer ces échanges, on dispose avec le calculateur de lignes omnibus qui sont :

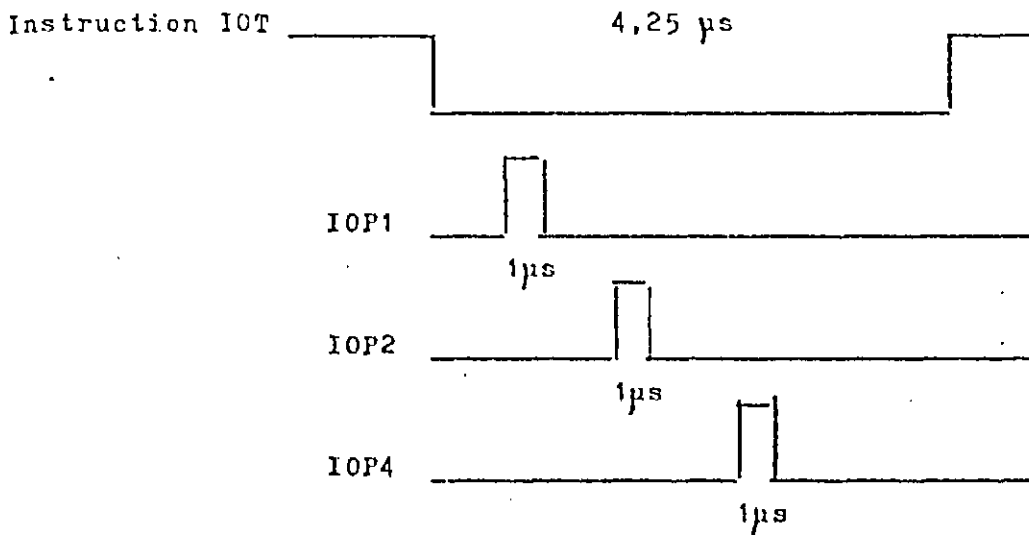
- lignes MB (ADRESSE PERIPHERIQUES) (6bits),
- lignes sorties d'informations BAC₀ à BAC₁₁ (12bits)
- lignes d'entrée d'informations AC₀ à AC₁₁ (12bits)
- 3 lignes signaux d'échantillonnage IOP₁, IOP₂,
- 1 ligne interruption de programme (IT), IOP₄,
- 1 ligne réponse SKIP.

La structure de l'instruction d'entrée-sortie IOT est la suivante :

.../...



La répartition dans le temps des signaux d'échantillonnage est la suivante :



Dans le calculateur, lorsque l'argument présenté par l'IOT apparaît le registre d'instruction décode l' "IOT" et commande l'émission des signaux IOP.

Ces impulsions sont très intéressantes car elles permettent d'effectuer, en une seule instruction, plusieurs fonctions au niveau du périphérique concerné (par exemple échantillonner le registre de sortie sur IOP1, annuler la demande du périphérique sur IOP4).

Les transferts d'ENTREE/SORTIE décrits ci-dessus étaient exécutés sous contrôle du programme; ils peuvent également l'être sous contrôle du périphérique.

4.2.2 - Echange sous contrôle du périphérique

Pour cette opération, nous disposons de deux lignes complémentaires qui sont :

IT (interruption de programme)
SKIP (saut - réponse au test)

Le PDP 8 ne possède qu'une seule ligne d'IT; nous allons voir une des méthodes qui peuvent être utilisées.

L'organe périphérique lorsqu'il veut échanger de l'information, doit émettre un niveau continu sur la ligne IT.

Au reçu de cet ordre d'interruption, le calculateur "déroule" un sous-programme d'interruption qui consiste à envoyer successivement vers les divers périphériques une IOT d'interrogation. Au décodage de son adresse le périphérique demandeur envoie sur la ligne SKIP un ordre de réponse. Le sous-programme d'interrogation exécute alors l'ordre de saut au programme particulier défini pour satisfaire le périphérique (transfert d'information en entrée ou en sortie). Voir figure n°3.

Avec ce type d'organisation, le transfert d'un mot de 24 bits nécessitera deux registres, deux décodeurs d'adresse, et deux adresses périphériques, une pour le poids faible, une pour le poids fort. Les appareils de mesure programmables demandent souvent un mot de commande ayant un nombre de bits important pour l'indication de gamme; la nature de la fonction, la position de la virgule, la valeur de l'information en code BCD. Leur interconnexion vers le calculateur s'effectue par une logique chargée de minimiser les opérations de transfert au niveau du calculateur. Un exemple de réalisation est celle du standard CAMAC qui définit des normes mécaniques, un langage de dialogue entre les appareils de mesure et l'ordinateur et les caractéristiques des signaux échangés.

4.3 - Le Standard CAMAC (fig. n°4)

Les principes de base peuvent se résumer comme suit :

- C'est un système modulaire d'éléments fonctionnels.
- Les éléments fonctionnels sont réalisés sous forme de tiroirs conformes à des normes dimensionnelles et électriques permettant leur association dans un châssis standard (châssis alimentation).
- Chaque tiroir est relié directement, par enfichage, à une "interconnexion" incorporée au châssis qui a pour but de transmettre les données numériques, les signaux de télécommande et les tensions d'alimentation. Cette "interconnexion" est indépendante du type de tiroir utilisé ainsi que de l'organe de traitement des informations.

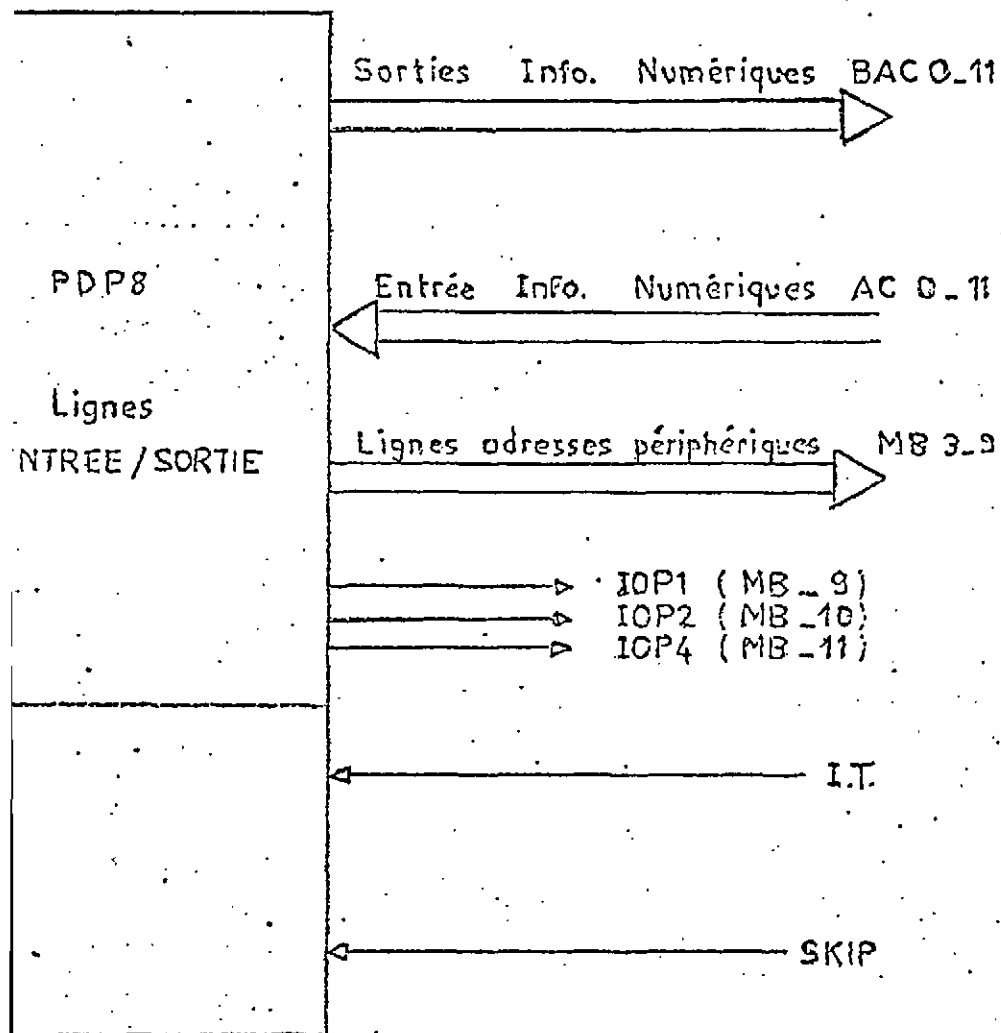
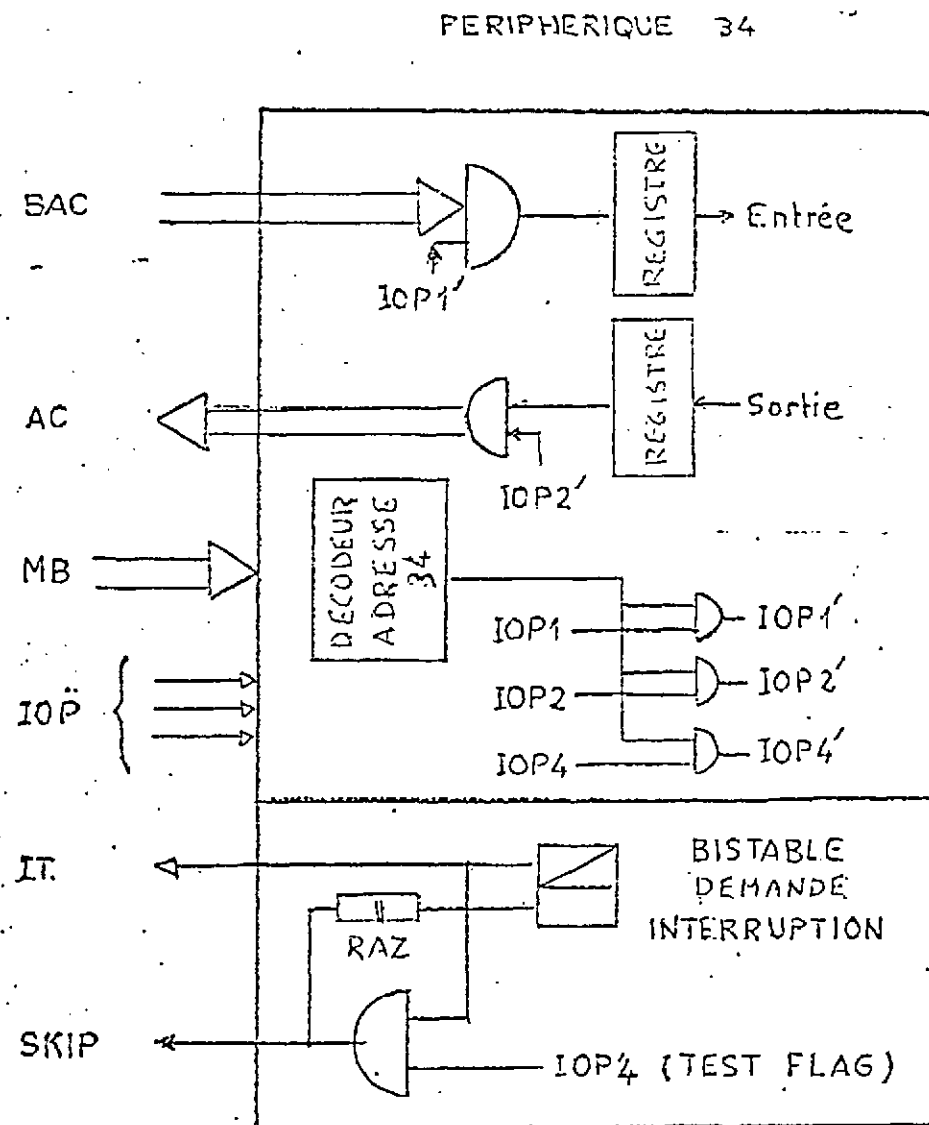


FIG. 3



LIAISON ENTREE-SORTIE PERIPHERIQUE
SCHEMA D'ORGANISATION DE L'UNITE PHERIPHERIQUE

- Le système a été conçu de telle sorte qu'un ensemble composé d'un châssis et de tiroirs puisse être connecté à un calculateur numérique par l'intermédiaire d'un tiroir spécialisé adaptant les exigences du calculateur à celles de l'"interconnexion" (contrôleur).
- Plusieurs châssis peuvent être reliés à une interconnexion verticale dite "interconnexion de branche" pouvant elle-même être connectée à un calculateur par l'intermédiaire d'un châssis spécialisé.

Le système est essentiellement modulaire. Des tiroirs sont placés dans des emplacements définis ou positions dans un châssis.

A chaque position correspond une embase à 86 contacts montée dans le châssis donnant accès à l'"interconnexion". L'"interconnexion" comprend principalement des lignes omnibus reliant les contacts correspondants des embases.

La position située à l'extrême droite du châssis vu de face est nommée "position contrôleur" et n'est pas reliée aux lignes omnibus d'informations, mais par contre possède d'autres lignes de commande provenant ou allant vers chaque "position normale".

Le tiroir "contrôleur de châssis" supervise les opérations sur l'"interconnexion" et assure les liaisons entre le châssis et le système général d'acquisition et de traitement.

Les autres tiroirs (éléments fonctionnels) peuvent être enfichés dans n'importe quelle "position".

Le châssis est prévu pour un montage en baie du standard 19 pouces et assure un nombre de positions pouvant aller jusqu'à 25. Ces positions sont disposées au pas de 17,2 mm. Chaque position est équipée de rainures supérieure et inférieure pour le guidage du tiroir et d'une embase femelle à 86 contacts (2×43 contacts) reliée à l'"interconnexion".

D'une manière générale, un tiroir est constitué essentiellement par une carte en circuit imprimé et par un panneau avant. Les contacts imprimés sur la carte sont guidés vers l'embase à 86 contacts, par les glissières du tiroir s'engageant dans les rainures du châssis. Un tiroir peut occuper autant de positions que nécessite son encombrement. (tiroir multiple).

Le câblage du châssis comporte des lignes destinées à distribuer les tensions d'alimentation nécessaires aux tiroirs.

Les tensions normalisées, sont :

- + et - 24 V pour les circuits du type "analogique" (amplificateurs, discriminateurs, etc...),
- + et - 6 V pour les circuits du type "logique".

Des lignes accessoires sont prévues pour permettre éventuellement de distribuer d'autres tensions d'alimentations (+ et - 12 V par exemple).

- 24 bits d'information lecture ou écriture.

Ce format n'est pas compatible immédiatement avec celui du calculateur, et de plus il varie avec la longueur du mot information. C'est pourquoi le fonctionnement du tiroir sera différent selon le type d'instruction CAMAC à effectuer, celles-ci nécessitant 2, 3 ou 4 Instructions d'Entrée-Sortie calculateur (IOT).

Il y a donc 5 types de fonctions différents :

- Exécution d'un test ou d'un ordre CAMAC ($F_8, F_9, F_{10}, F_{11}, F_{24}, F_{25}, F_{26}, F_{27}$).
- Lecture d'un mot de 12 bits.
- Lecture d'un mot de 24 bits.
- Ecriture d'un mot de 12 bits.
- Ecriture d'un mot de 24 bits.

Pour le réaliser, le tiroir contrôleur comprend :

- a) Des mémoires tampon permettant de mémoriser :
 - . les 5 bits d'adresse "N",
 - . les 4 bits de sous-adresse A,
 - . les 5 bits de fonction F,
 - . les 12 bits information écriture poids forts W_{13} à W_{24} .
- b) Des circuits logiques séquentiels permettant de traiter convenablement les différentes instructions CAMAC.

4 contrôleurs peuvent être associés à un même calculateur pour commander 4 châssis CAMAC. Du point de vue adressage, ils sont considérés comme un périphérique direct du calculateur répondant à une seule adresse appelée "CAMAC".

D'autre part :

- les appels sont transmis sur la ligne Interruption de programme calculateur,
- la ligne Q, résultat des tests, est transmise sur la ligne SKIP du calculateur.

Avec un tel mode de transfert, il est donc possible d'adresser en 4 instructions d'Entrée-Sortie, environ 80 positions pouvant être reliées à autant d'appareils de mesure. Une telle solution simplifie les interconnexions vers le calculateur et facilite la programmation.

Définition: par le Comité Européen ESONE adopté par le comité NIM (U.S.A.)

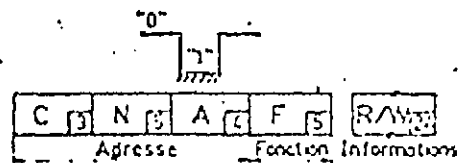
Caractéristiques:

① Standard mécanique modulaire : 19" x 6U

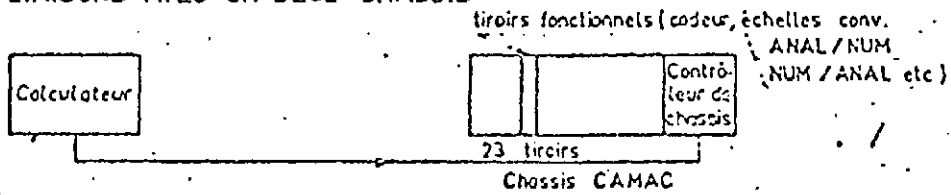
25 Tiroirs par chassis

② Standard électrique 0 - +5V compatible T.T.L.

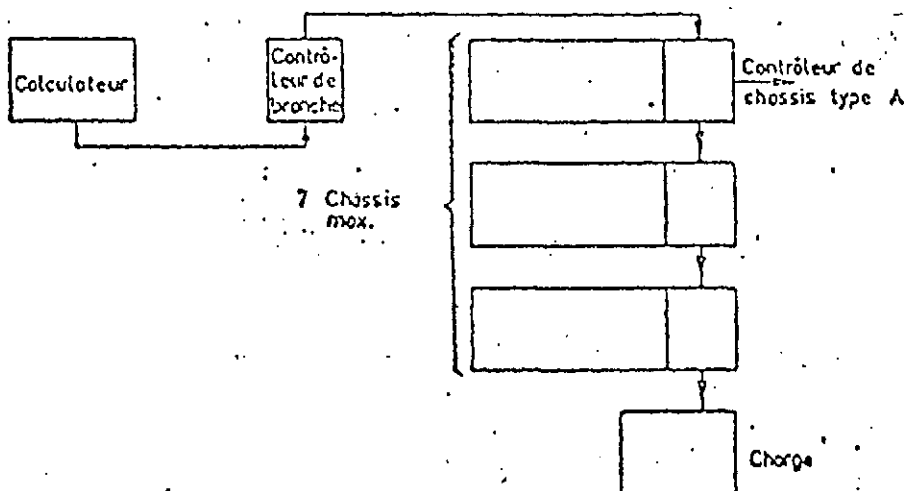
③ Langage de programmation standard



LIAISONS AVEC UN SEUL CHASSIS



LIAISONS AVEC PLUSIEURS CHASSIS

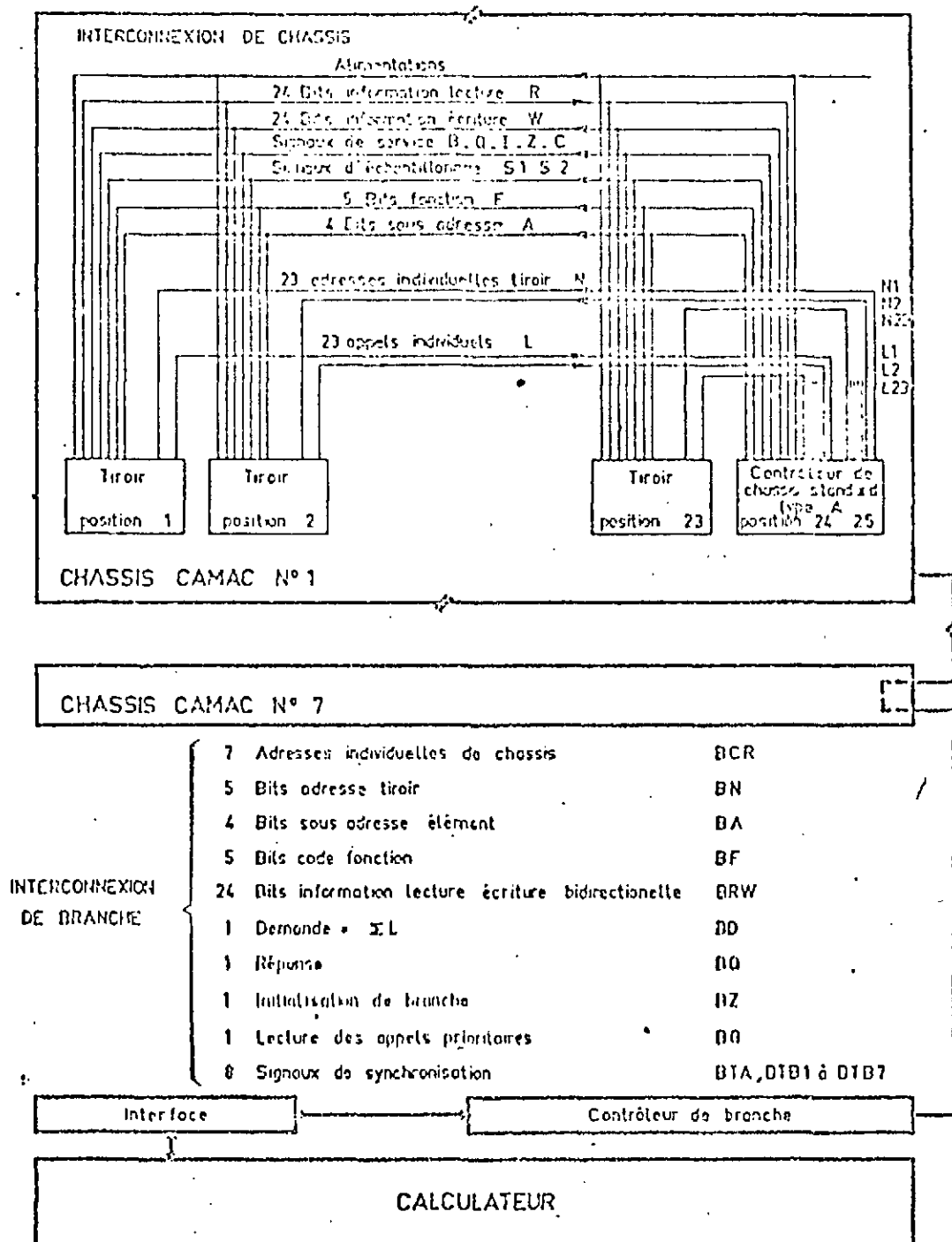


CAMAC

SYSTEME D'INSTRUMENTATION MODULAIRE

POUR LE TRAITEMENT DES INFORMATIONS.

Fig. 4 - DEFINITIONS - LIAISONS.



ORGANISATION DES INTERCONNEXIONS DE BRANCHE ET DE CHASSIS

Fig. 5 ORGANISATION GENERALE.

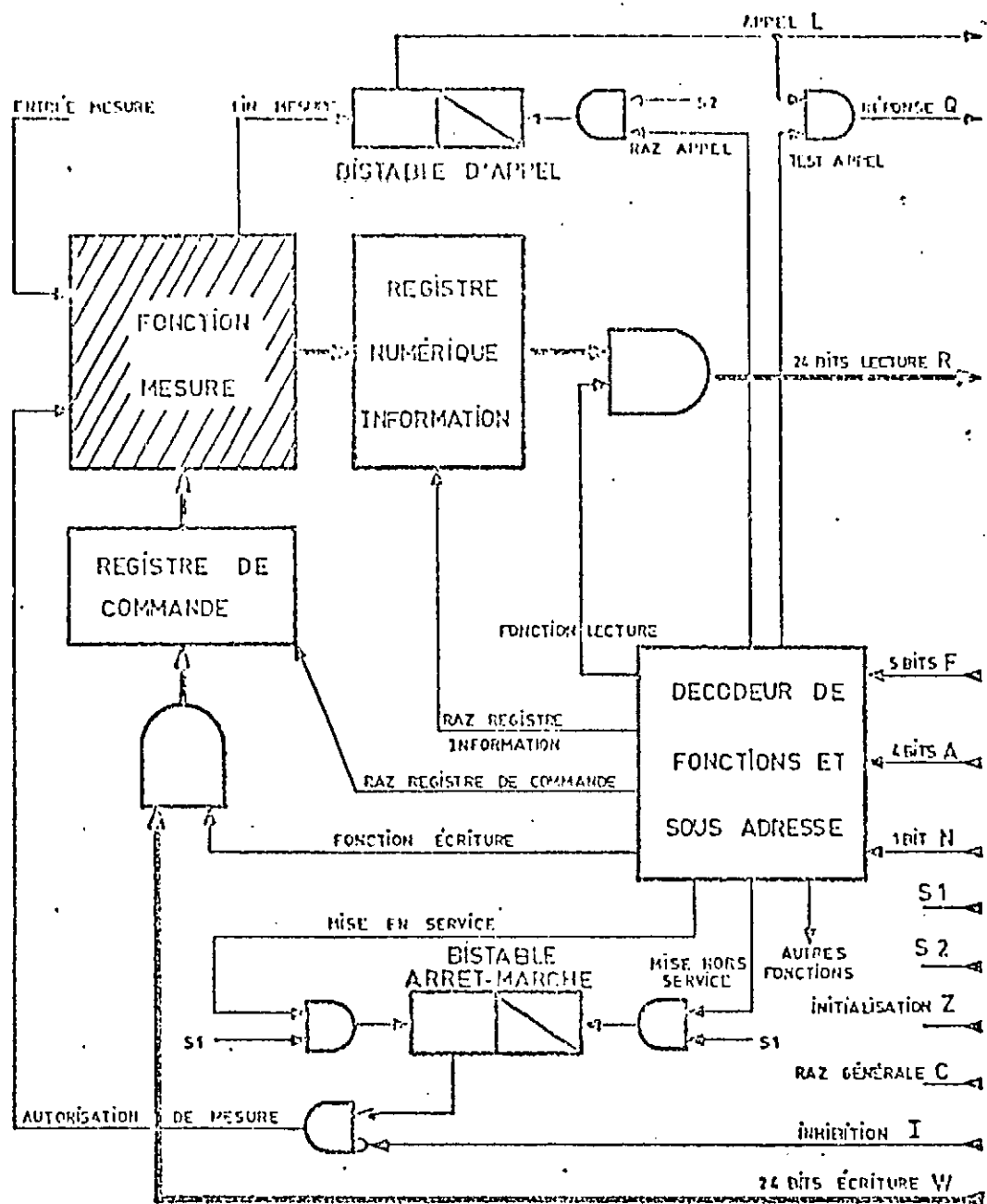


Fig. 6. - ORGANISATION GÉNÉRALE D'UN TIROIR CAMAC.

5 - DIFFERENTS TYPES DE SYSTEMES AUTOMATIQUES

Parmi les nombreux systèmes, on peut faire quelques groupements, en fonction de diverses références, bien que leurs frontières ne soient pas bien déterminées et qu'ils aient des parties communes.

Le banc de mesure est la réunion de quelques appareils pour un usage particulier. Un appareil de mesure complexe, incluant une commande interne, peut remplir la même fonction.

L'ensemble de test est destiné à des mesures rapides, qui ne demandent pas beaucoup de traitements. Il répond en général par oui ou non (vérification, tri, composants électroniques, pannes, diagnostic.)

"La Centrale de mesure" ou ensemble d'acquisition de données, fait en général un grand nombre de mesures, les met en mémoire et les restitue. Elle traite les données en général sommairement.

La commande et le contrôle industriels sont faits de la même façon, mais les résultats traités permettent de corriger le processus industriel (automatisme).

Les mesures automatiques proprement dites qui sont plus spécialement axées sur le côté métrologie. Les systèmes de calibration permettent de régler facilement les appareils électroniques. Ils sont particulièrement intéressants pour les essais d'évaluation et de qualification.

Nous allons plus spécialement étudier les applications de la mesure automatique à la métrologie

5.1 - Application à la métrologie

5.1.1 - Notions de fidélité et de justesse

Soit une grandeur G_r dont la valeur exacte est G et la valeur mesurée g

L'erreur de mesure sera

$$\varepsilon = G - g$$

Si G est la grandeur mesurée elle-même, on a $X = G$ et le résultat de la mesure sera

$$x = X - \varepsilon$$

ε est lié à la précision de l'appareil.

Bien souvent, on appelle précision la valeur maximale que peut prendre $|\varepsilon| = \varepsilon_{\max}$, c'est-à-dire que l'on aura jamais

$$|X - x| > \varepsilon_{\max}$$

5 - DIFFERENTS TYPES DE SYSTEMES AUTOMATIQUES

Parmi les nombreux systèmes, on peut faire quelques groupements, en fonction de diverses références, bien que leurs frontières ne soient pas bien déterminées et qu'ils aient des parties communes.

Le banc de mesure est la réunion de quelques appareils pour un usage particulier. Un appareil de mesure complexe, incluant une commande interne, peut remplir la même fonction.

L'ensemble de test est destiné à des mesures rapides, qui ne demandent pas beaucoup de traitements. Il répond en général par oui ou non (vérification, tri, composants électroniques, pannes, diagnostic.)

"La Centrale de mesure" ou ensemble d'acquisition de données, fait en général un grand nombre de mesures, les met en mémoire et les restitue. Elle traite les données en général sommairement.

La commande et le contrôle industriels sont faits de la même façon, mais les résultats traités permettent de corriger le processus industriel (automatisme).

Les mesures automatiques proprement dites qui sont plus spécialement axées sur le côté métrologie. Les systèmes de calibration permettent de régler facilement les appareils électroniques. Ils sont particulièrement intéressants pour les essais d'évaluation et de qualification.

Nous allons plus spécialement étudier les applications de la mesure automatique à la métrologie

5.1 - Application à la métrologie

5.1.1 - Notions de fidélité et de justesse

Soit une grandeur G_r dont la valeur exacte est G et la valeur mesurée g

L'erreur de mesure sera

$$\varepsilon = G - g$$

Si G est la grandeur mesurée elle-même, on a $X = G$ et le résultat de la mesure sera

$$x = X - \varepsilon$$

ε est lié à la précision de l'appareil.

Bien souvent, on appelle précision la valeur maximale que peut prendre $|\varepsilon| = \varepsilon_{\max}$, c'est-à-dire que l'on aura jamais

$$|X - x| > \varepsilon_{\max}$$

Le "jamais" est bien sûr subjectif, d'où l'intérêt d'une définition plus rigoureuse. D'une façon générale $\varepsilon = \varepsilon(X)$ mais souvent on peut se ramener aux deux cas suivants :

$$\begin{aligned} \varepsilon &= c^{\text{le}} & (\text{erreur absolue constante}) \\ \frac{\varepsilon}{X} &= c^{\text{le}} & (\text{erreur relative constante}) \end{aligned}$$

Précision Aléatoire - Fidélité

Soit n mesures de X effectuées dans les mêmes conditions et avec le même instrument.

On obtient une série de valeurs

$$x_1, x_2, \dots, x_n$$

donnant par

$$\bar{X} = \bar{x}$$

des erreurs

$$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$$

En supposant les erreurs indépendantes les unes des autres, on peut considérer :

ε comme une variable aléatoire

Pour $n \rightarrow \infty$ on a

$$\frac{1}{n} \cdot (x_1 + x_2 + \dots + x_n) \rightarrow E(x) \quad \text{et} \quad E(\varepsilon) = m = \bar{X} - E(x)$$

On peut donc caractériser la dispersion de l'appareil par la différence

$$\varepsilon_a = E(x) - \bar{x}$$

c'est-à-dire par la différence entre la limite de la moyenne d'un grand nombre de mesures et une de ces mesures.

En général, on prend pour dispersion totale la quantité $\pm 2\sigma_a, \sigma_a$ étant l'écart type de ε_a . Plus la dispersion est faible et plus l'appareil est dit fidèle.

La précision aléatoire sera notée $\delta_a X = \pm 2\sigma_a$

Erreur systématique :

C'est l'espérance $E(X - \bar{x}) = E(\varepsilon) = \bar{X} - E(x)$

Si l'erreur systématique est faible, l'appareil est juste

Evaluation de X

L'évaluation de X peut s'effectuer :

- soit à partir d'un instrument dont la précision est supérieure à celle de l'appareil étudié,
- soit en prenant K instruments du même type, et on a dans ce cas :

$$\frac{1}{K} \cdot (\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_K) \rightarrow X$$

On peut définir une précision systématique qui sera liée à la justesse

$$\delta_s X = \pm 2\sigma_s$$

avec

$$\sigma_s^2 = \frac{\sum (\bar{x}_i - \bar{\bar{x}})^2}{N-1}$$

5.1.2 - Combinaison des erreurs

Soit une fonction $G(X, Y)$

on se donne :

- les précisions aléatoires $\delta_a X = 2\sigma_a(X)$ et $\delta_a Y = 2\sigma_a(Y)$
- les précisions systématiques $\delta_s X = 2\sigma_s(X)$

A partir de :

n mesures de $X \rightarrow x_1, x_2, \dots, x_n \rightarrow \bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$

m mesures de $Y \rightarrow y_1, y_2, \dots, y_m \rightarrow \bar{y} = \frac{\sum y_i}{m}$

on estime $G(X, Y)$ par $G(\bar{x}, \bar{y})$. On commet une erreur.

$$\varepsilon(G) = G(X, Y) - G(\bar{x}, \bar{y}). \text{ En supposant}$$

cette erreur petite, on a

$$\varepsilon = \frac{\partial G}{\partial x} (X - \bar{x}) + \frac{\partial G}{\partial y} (Y - \bar{y})$$

et

$$\varepsilon = \frac{\partial G}{\partial x} \left[\underbrace{(X - E(X))}_{\text{erreur aléatoire}} + \underbrace{(E(X) - \bar{x})}_{\text{erreur systématique}} \right] + \frac{\partial G}{\partial y} \left[\underbrace{(Y - E(Y))}_{\text{erreur aléatoire}} + \underbrace{(E(Y) - \bar{y})}_{\text{erreur systématique}} \right]$$

Comme ces erreurs sont indépendantes, les variances s'ajoutent. D'autre part

$$\sigma^2(E(X) - \bar{x}) = \sigma^2(\bar{x}) = \frac{\sigma_a^2(X)}{n} \quad \text{et} \quad \sigma^2(\bar{y}) = \frac{\sigma_a^2(Y)}{m}$$

d'où la formule très importante

$$\sigma^2(\varepsilon) = \sigma^2(G) = \left(\frac{\partial G}{\partial x} \right)^2 \left[\frac{\sigma_a^2(X)}{n} + \sigma_s^2(X) \right] + \left(\frac{\partial G}{\partial y} \right)^2 \left[\frac{\sigma_a^2(Y)}{m} + \sigma_s^2(Y) \right]$$

Si $\sigma_a^2(X) \gg \sigma_s^2(X)$, $\sigma_a^2(Y) \gg \sigma_s^2(Y)$, $m = n$

on a

$$\sigma^2(G) = \frac{1}{n} \left[\sigma_a^2(X) \left(\frac{\partial G}{\partial x} \right)^2 + \sigma_a^2(Y) \left(\frac{\partial G}{\partial y} \right)^2 \right]$$

5.1.3 - Tests de comparaison à un standard

Etant donné une fonction de répartition $F(x, \theta)$ dépendant de un ou plusieurs paramètres, on est amené à faire le test suivant :

θ_0 étant donné, peut-on considérer que $\theta = \theta_0$?

Dans le cadre d'un laboratoire de mesure, θ_0 pourra par exemple être la précision d'un appareil et le problème peut se formuler ainsi. Un constructeur garantit une précision donnée sur un appareil. J'effectue avec celui-ci une série de mesure x_1, x_2, \dots, x_n . J'estime la précision par $\pm 2 S$

$$\text{avec } S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}$$

Je dois ensuite répondre aux deux questions suivantes :

- Quel degré de confiance dois-je accorder à cette mesure ?
- L'appareil tient-il les caractéristiques annoncées par le constructeur ?

Ces réponses sont fournies par l'utilisation de tests statistiques dont les principaux, sont :

- Le test du χ^2 pour l'estimation d'une variance,
- Le test de "student" pour l'estimation d'une moyenne

Ces tests s'appuient sur les considérations suivantes :

- Si X est une v. a. normale, de moyenne m et d'écart type σ , $\frac{x - m}{\sigma}$ est distribué suivant une loi de Gauss réduite.
- Tous les phénomènes qui sont les résultats d'une somme ou d'une moyenne d'événements répétitifs indépendants, sont asymptotiquement Gaussiens.

Loi du χ^2

Soit X une variable normale réduite ($m = 0, \sigma = 1$)

Sa fonction de répartition est :

$$P(X < x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-x^2/2} dx$$

La f.r. de la variable X^2 est :

$$F(U) = P(X^2 < U)$$

$$U \leq 0 \rightarrow F(U) = 0$$

$$U > 0 \rightarrow F(U) = P[-\sqrt{U} < X < \sqrt{U}] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\sqrt{U}}^{\sqrt{U}} e^{-x^2/2} dx$$

D'où la densité de probabilité

$$f(u) = F'(u) = \frac{e^{-u/2}}{\sqrt{2\pi} \cdot \sqrt{u}}$$

Par définition, on appelle loi du χ^2 à n degrés de liberté, la loi des variables aléatoires définies par :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n X_i^2$$

Quelques propriétés de la loi du χ^2

$$E(\chi^2) = n, \quad \sigma^2(\chi^2) = 2n$$

- On montre que s'il y a k relations linéaires entre les X_i ($k < n$), $\sum X_i^2$ suit une loi de χ^2 à $n-k$ degrés de liberté.

- Application de la loi du χ^2 - Distribution de la variance d'un échantillon, soit :

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}$$

la variance d'un échantillon.

Les variables élémentaires $X_i - \bar{X}$ sont reliées par une relation linéaire puisque $\sum (X_i - \bar{X}) = 0$

D'autre part,

- $X_i - \bar{X}$ est normale.

- $E(X_i - \bar{X}) = 0$

$$\text{Variance } (X_i - \bar{X}) = E(X_i - \bar{X})^2 = \sigma^2$$

donc :

$$\frac{n S^2}{\sigma^2} = \sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{\sigma^2} \quad \text{suit une loi du } \chi^2 \text{ à } n-1 \text{ degrés de liberté.}$$

Loi du Student

Soit, n variables centrées X, X_1, \dots, X_{n-1} ($m=0, \sigma=1$).

La loi de Student à $n-1$ degrés de liberté est par définition celle de la v.a.

$$t = \frac{X}{S_1} = \frac{X}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} X_i^2}}$$

On démontre que si les X_i sont normales, \bar{X} et S_1^2 sont des v.a. indépendantes.

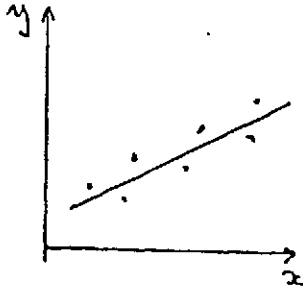
Donc :

$$t = \frac{\sqrt{n-1} (\bar{X} - m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}}$$

suit une loi de student à $n-1$ degrés de liberté.

Ce résultat est très important pour estimer une moyenne.

5.1.4 - Les régressions



a) Définition du problème.

Dans un grand nombre de cas, il arrive qu'on étudie la liaison qui existe entre deux grandeurs physiques mesurées x et y , mais où la grandeur x peut-être souvent choisie au gré de l'expérimentateur, et influe sur y . De toutes façons on considère x comme connu "sans erreur" (c'est-à-dire une erreur négligeable).

En revanche la grandeur y correspondant à x est une v.a. dont on admet :

- 1) Que les différentes valeurs sont indépendantes.
- 2) Qu'elle est distribuée suivant la loi normale.
- 3) Pour la valeur x , $E(y) = a + \beta x$
- 4) Que la variance de y (qu'on nomme "variance résiduelle" de y) est constante :

$$\sigma^2(y) = \sigma^2 \text{ indépendant de } x.$$

- 5) Qu'on n'a pas d'autres renseignements sur a et b .

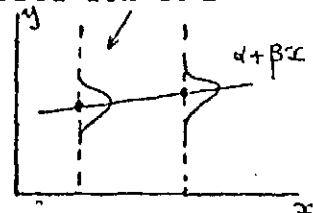
En principe, on aura chaque fois à faire la preuve de ces 5 hypothèses (et ceci évitera des erreurs regrettables).

On voit alors, que si ces 5 hypothèses sont satisfaites, qu'on peut mettre y sous la forme :

$$y = a + \beta x + \varepsilon$$

où ε est une v.a. normale $(0, \sigma)$

distribution de ε



Remarques : Nous avons dit qu'il fallait faire la preuve des 5 hypothèses. Cette preuve peut se faire quelquefois à priori, d'après la nature du phénomène physique. On peut aussi vérifier à posteriori qu'il n'y a pas de contradiction entre les résultats observés et les hypothèses: il existe ainsi un test de linéarité, etc... Souvent la vérification statistique de la linéarité constitue une vérification expérimentale d'une hypothèse physique.

Pour estimer α et β on dispose de n couples de résultats x_i, y_i . La méthode du maximum de vraisemblance conduit à minimiser l'expression :

$$Q = \sum (y_i - \alpha - \beta x_i)^2$$

d'où les relations :

$$\frac{\partial Q}{\partial \alpha} = -2 \sum (y_i - \alpha - \beta x_i) = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \beta} = -2 \sum x_i (y_i - \alpha - \beta x_i) = 0$$

ce qui donne pour a et b les expressions :

$$b = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2}$$

$$a = \bar{y} - b \bar{x}$$

Une fois les valeurs de a et b obtenues, il importe d'en tester le caractère significatif. Il convient de se demander, en effet, si compte tenu du nombre limité de données observées, on est bien en droit de considérer la régression obtenue comme réelle.

Un certain nombre de tests peuvent être effectués pour contrôler la validité de l'hypothèse.

- Etude de l'estimation b de la pente.

On a :

$$b = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) \cdot y_i}{\sum (x_i - \bar{x})^2} - \bar{y} \frac{\sum (x_i - \bar{x})}{\sum (x_i - \bar{x})^2}$$

Comme $\sum (x_i - \bar{x}) = 0$

On voit que

$$b = \frac{x_1 - \bar{x}}{\sum (x_i - \bar{x})^2} y_1 + \dots + \frac{x_n - \bar{x}}{\sum (x_i - \bar{x})^2} y_n$$

b est donc une combinaison linéaire de n v.a. indépendante et normale $y_1 \dots y_n$

donc :

$$\sigma^2(b) = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{(\sum (x_i - \bar{x})^2)^2} \cdot \sigma^2(y_i) = \frac{\sigma^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2}$$

- Estimation de la variance résiduelle.

La valeur de σ^2 supposée constante n'est pas souvent connue, même si elle est connue a priori, il convient de vérifier par un test qu'elle est en accord avec les résultats expérimentaux (un désaccord traduisant que l'une des 5 hypothèses n'est pas vérifiée, ou que la valeur admise a priori pour la dispersion de y n'est pas valable).

Comme y_i suit une loi normale $(\alpha + \beta x_i, \sigma^2)$, on voit que la quantité

$$\frac{1}{\sigma^2} \sum (y_i - a - b x_i)^2 = \frac{\sum (y_i - y'_i)^2}{\sigma^2}$$

suit une loi de χ^2 à $n-2$ degrés de liberté, car 2 paramètres α et β sont estimés (par a et b).

Si on connaît a priori la valeur de σ^2 on peut faire le test en utilisant la table du χ^2 et voir ainsi si cette valeur a priori est compatible avec les résultats expérimentaux interprétés statistiquement. Si on doit estimer la variance résiduelle σ^2 , on prendra comme estimation

$$s_{y;x}^2 = \frac{\sum (y_i - y'_i)^2}{n-2}$$

et on déterminera l'intervalle de confiance en utilisant la table du χ^2 à $n-2$ degrés de liberté.

La mise en oeuvre de ces différents tests est relativement simple au calculateur. L'utilisation de "boucles" dans le programme permettra de ranger les différentes valeurs mesurées et d'en faire ensuite la somme quadratique.

6 - EXEMPLES DE REALISATION - DISPOSITIF DE MESURE AUTOMATIQUE du G-

Cet ensemble est destiné à l'étude des caractéristiques électriques des matériels électroniques.

Conçu à partir d'un système général d'interface, cet ensemble offre la possibilité d'effectuer une grande diversité de mesures programmées à partir d'un calculateur. Le choix du type de mesurage détermine l'emploi des générateurs, des appareils de mesure et des programmes appropriés. Dans tous les cas, l'appareil à essayer est placé sous environnement variable et les principales grandeurs d'influence sont contrôlées.

La reproductibilité permet une normalisation des méthodes de mesure et de l'appareillage. On obtient une meilleure simulation des conditions de fonctionnement des appareils et l'élimination des erreurs d'expérimentation et d'interprétation des résultats.

Cet ensemble comprend plusieurs dispositifs spécialisés :

- Etude de la réponse des appareils électroniques à divers signaux électriques,
- Etude des caractéristiques des sources d'alimentations continues stabilisées basse tension et haute tension,

- Etude des caractéristiques des circuits linéaires, des sous-ensembles ou des ensembles analogiques de spectrométrie nucléaire (préamplificateur, amplificateur d'impulsions, convertisseur analogique-numérique, etc...)
- Etude des caractéristiques des volimètres numériques.

Pour chaque dispositif, le schéma général est celui de la figure N°7. Par l'intermédiaire de l'interface, le calculateur commande les sources de stimuli des grandeurs fonctionnelles et des grandeurs d'influence. Les grandeurs caractéristiques de sortie du matériel en essai sont mesurées à l'aide de divers appareils également reliés à l'interface. Le traitement, le calcul et l'édition des données sont faits suivant des programmes établis. Quelle que soit l'étude, chaque dispositif utilise des éléments communs de l'ensemble.

6.1 - Eléments communs aux divers dispositifs

6.1.1 - Calculateur et téléscripteur

Le calculateur utilisé est un PDP8/I dont la mémoire centrale comporte 12 K mots de 12 bits avec un cycle de base de 1,5 μ s.

Un téléscripteur TTY-ASR 33 (10 car./s) est relié directement au calculateur. Il permet la conversation avec celui-ci et l'impression des résultats des mesures. Les programmes et les sous-programmes de commande et de calcul, sont disponibles sur ruban perforé (lecture rapide : 300 car./s) ou enregistrés sur bande magnétique (lecture : 7.500 car./s).

Un tiroir spécialisé appelé "contrôleur" adapte les exigences du calculateur à celles du standard CAMAC.

6.1.2 - Interface

L'interface est réalisée dans le système modulaire CAMAC, suivant les recommandations qui sont applicables à ce système. Elle comprend une alimentation avec son "interconnexion", les fonctions de lecture et d'écriture, les commutations, le tiroir contrôleur précédent et les diverses liaisons.

a) Fonctions de lecture

Elles sont destinées à recueillir les résultats des mesures numériques ou analogiques et à les transférer sous forme numérique vers le calculateur. Ces fonctions, réalisées sous forme de tiroirs amovibles, comprennent des multiplexeurs analogiques et numériques, et des convertisseurs analogiques-numériques.

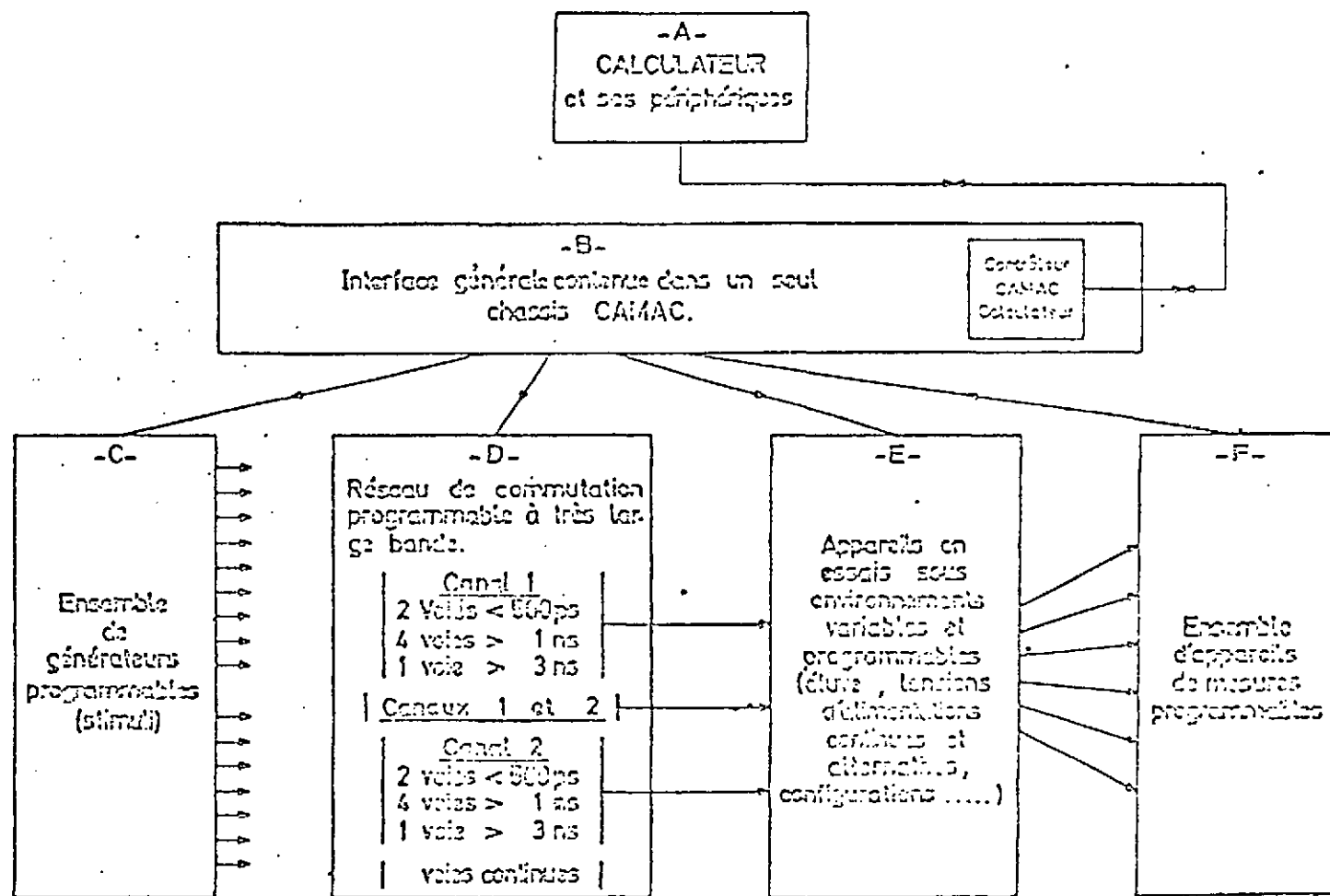


Fig. N° 8

Schéma fonctionnel d'un ensemble de mesure automatique -

b) Fonctions d'écriture

Ces fonctions assurent le transfert sous forme numérique ou analogique, des informations provenant du calculateur vers les divers générateurs. Egalement réalisées sous forme de tiroirs amovibles, ces fonctions comprennent principalement des distributeurs de données numériques ou analogiques et différents tiroirs spécialisés pour la commande des générateurs utilisés.

c) Réseau de commutation

Un réseau de commutation programmable à très large bande est utilisé pour diriger vers l'entrée de l'appareil en essais les signaux fournis par les générateurs. Il comprend deux canaux principaux. Pour chacun d'eux, les signaux émis par les générateurs peuvent être acheminés sur des voies différentes : deux voies à très large bande, de temps de montée inférieur à 500 ps, ou quatre voies moins rapides de temps de montée de 1 ns, ou enfin une voie à temps de montée de 3 ns.

6.1.3 - Environnement variable

Il comprend essentiellement :

- une enceinte climatique dont la température peut être programmée entre - 50° et + 150°,
- un régulateur permettant de simuler des variations de $\pm 10\%$ de la tension réseau,
- un ensemble de charges actives permettant de faire varier le débit des sources de tensions.

La mise en oeuvre des différents types de mesures s'effectue par des programmes spécialisés. Un moniteur permet un étiquetage des programmes et la gestion d'outils de programmation nécessaires à l'écriture, la compilation et l'exécution des Programmes. Les programmes de mesure, actuellement disponibles, permettent le test des sources d'alimentation, des amplificateurs pour usage nucléaire, des convertisseurs analogique-numérique, des voltmètres, des générateurs, etc...

7 - CONCLUSION -

La mise en oeuvre d'un dispositif de mesure automatique, mêle étroitement les notions de programmation, conception de système informatique et de statistique.

Les problèmes à résoudre concernent principalement:

- La liaison entre l'ordinateur et les dispositifs de mesure afin d'obtenir simultanément une certaine simplicité des programmes d'acquisition, et une standardisation des opérations logiques de couplage.
- L'analyse du type de mesure à effectuer en vue d'en déduire le nombre de données à acquérir pour une précision donnée, la recherche de corrélation et la nature des tests de validité à utiliser.
- La définition précise des paramètres mesurés. Par exemple, dans notre cas, nous avons défini la précision comme étant ± 2 fois l'écart-type de la distribution obtenue. Il est évident que ce 2 est arbitraire, et que tout résultat de mesure doit préciser les conventions adoptées.

- BIBLIOGRAPHIE -

Cours de Statistique appliquée
A.ROSENGARD

CAMAC - Système d'instrumentation modulaire pour le traitement
des informations. Description et spécifications.
CEAA - EURATOM - ESOE - EUR 4100f et EUR 4600f.

BIN - Bulletin d'instrumentation nucléaire n° 40
(BIST-CEA) - Instrumentation CAMAC.

Bulletins CAMAC.

Caractéristiques et méthodes d'essais des alimentations BT et HT.
C.E.A. - G.E.F.R. 1.
C.GUYOT - R.LEFEVRE - H.ROQUEFORT.

Erreurs de mesure d'un appareil linéaire ou logarithmique.
H.ROQUEFORT - Note CEA-N/1412.

Caractéristiques et méthodes d'essais des amplificateurs linéaires
d'impulsions.
C.E.A. - G.E.F.R. 2.
C.GUYOT - A.BLIN - R.BARRANDON - C.RINGEARD - R.VATIN - H.ROQUEFORT.

Ensemble de mesures automatiques géré par un ordinateur PDP8I
utilisé pour la détermination de la réponse linéaire d'un conver-
tisseur analogique-numérique.
Note C.E.A.-N/1300.
K.BARTHELEMY - B.GRIMONT - J.FUAN - P.GIRARD.

Centrales de mesures. Le ordinateur lié à la Centrale de mesures.
CEA-CONF-1482 - 1970
G.ROBIN

Calcul, pour des impulsions aléatoires, des relations liant les
distributions des amplitudes d'entrée, de sortie et la réponse
impulsionnelle d'un circuit en vue de déterminer les mesures à
effectuer sur les circuits linéaires et la stabilité du générateur
à utiliser.
Rapport CEA-R-4236.
C.JOLLEC - J.KERMORGANT - C.RINGEARD

Mesures Automatiques.
Rapport CEA-CONF-2212.
H.ROQUEFORT.

DIFFUSION

M. le Chef des SES —> ADS
M. le Chef de la SCM
M. le Chef de la SEG
M. le Chef du SAI
M. le Chef du SERF
M. GUITTON - BT/CdE
M. RINGEARD - SES/GEC (50 ex.)
M. le Chef du GEC

Paul

