

Automatisation des mesures comparatives effectuées avec le standard de puissance MIL 2000

But du travail

Le système d'étalonnage de puissance MIL était livré à l'origine avec un programme écrit en QuickBasic permettant de réaliser une balance du système, c'est à dire d'amener le système à réguler sa puissance de sortie (partie active et réactive), sous condition d'une tension ac stable appliquée à son entrée. L'opérateur était obligé de rester auprès de l'installation pour régler manuellement les appareils (notamment tension et fréquence de l'alimentation) et de relancer le processus de balance du système à chaque mesure qu'il voulait faire.

Le but de ce travail a été tout d'abord d'étudier le fonctionnement du système et du programme existants. Dans un second temps, il a été d'automatiser les mesures en permettant à l'opérateur de fixer différents paramètres du système et de lancer le programme une seule fois pour une série de comparaisons entre le standard MIL et un autre standard du laboratoire énergie / puissance (le standard L&G TVH1.3 "bleu" a été utilisé tout au long des travaux décrits dans ce rapport). De plus, des modules de traitement statistique des valeurs mesurées ont été ajoutés ainsi que le stockage des données mesurées et calculées, permettant à celles-ci d'être conservées dans des fichiers utilisables par un logiciel de type tableur (comme Excel).

Description de l'installation de mesure

L'installation de mesure n'a évidemment pas été modifiée et on peut se reporter à la documentation MIL. Outre le standard MIL 2000, les instruments suivants ont été utilisés:

- deux compteurs Hewlett-Packard 5316B *Universal Counter* utilisés en mode fréquence-mètre (SN 3005A07751 pour la sortie du standard de puissance sous test, SN 3005A07753 pour le 50 Hz);
- un amplificateur Fluke 5220A *Transconductance Amplifier* (SN 4380018 du laboratoire d'étalonnage - PA17);
- un voltmètre Hewlett-Packard 3458A *Multimeter* (SN 2823A08549; second 3458 du laboratoire d'étalonnage - PA17);
- un standard de puissance Landis & Gyr modèle TVH 1.3 (le standard "bleu");
- un ordinateur Hewlett-Packard *Vectra QS16S*;
- une imprimante Star NB24-15 *Letter Quality Printer*.

Documentation utilisée

- classeur de l'Office contenant toutes les informations sur le système.
- documentation MIL:
 - MODEL 2000A Power Comparator Operating Manual;
 - MODEL 2001A Detector Amplifier Operating Manual;
 - MODEL 2002 Current Source Operating Manual;
 - MODEL 2003A Current Transformer Operating Manual;
 - MODEL 2000 Power Calibration System Operating Manual;
 - Listing du programme de A.Wachowicz (très bien commenté);
 - "Comments on the flowcharts for the power calibration system software" (par A.Wachowicz): explique quelques subtilités du programme;

- Organigramme du programme principal et du module de balance.
- documentation sur le principe général des comparaisons de puissance:
 - schéma de principe du système de balance de MIL;
 - "A current-comparator-based system for calibrating active/reactive power and energy meters, W.J.M.MOORE, E. SO, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, VOL. IM-32 no 1, p. 147 (1983);
 - "An automatic RMS/DC comparator", L. G. COX, N. L. KUSTERS, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, VOL. IM-23 no 4, p. 322 (1974);
 - "The current comparator", W.J.M.MOORE & P.N.MILJANIC, IEE Electrical Measurement Series 4 (Peter Peregrinus, London, 1988). Le chapitre 6, p. 105-109 décrit très clairement les concepts utilisés dans la réalisation du standard MIL.

Description sommaire des changements apportés au programme original

Si on se reporte à l'organigramme donné par MIL, on voit que le programme est construit autour d'une seule boucle infinie. La touche F1 du clavier permet d'entrer dans la routine appelée **Balnc** et c'est elle qui constitue le coeur du programme.

On s'est contenté dans la nouvelle version du programme de reprendre tous les modules existants permettant de commander l'installation et de les réorganiser de manière à atteindre le but fixé (voir début de ce rapport).

Ces modules n'ont donc pas été modifiés et on peut considérer le nouveau programme comme un programme utilisant l'ancienne version en tant que module appelé, et constitué en plus de différents modules pour la gestion des mesures (acquisition et traitement) et des fichiers de stockage. En réalité c'est un peu plus compliqué et on peut se reporter au nouvel organigramme ci-joint.

Procédure d'étalonnage

Une fois lancé le programme, un premier écran affiche différents paramètres utilisés par défaut ainsi que les touches permettant de les modifier (il s'agit en fait de l'écran, très légèrement modifié, affiché par la version originale du programme).

Après avoir appuyé sur la touche F1, un second écran affiche les paramètres importants liés aux cycles de mesures qu'on veut faire. La figure 1 permet de mieux comprendre à quoi correspondent les variables du programme.

Dans cet exemple, on fait des mesures pour trois facteurs de puissance différents (1, 0.8 et -0.5).

Un facteur de puissance étant fixé (1 ici), on effectue le nombre de balances fixé par l'utilisateur:

□ La première balance se fait de la même manière que dans le programme original MIL, à savoir une balance pour le gain 1, puis pour le gain 2 et enfin pour le gain 3. La boucle de contre-réaction est alors fermée et on commence à faire les mesures sur les appareils: tension fournie par la source (≈ 240 V), fréquence de cette même source (≈ 50 Hz) et fréquence de sortie du standard sous test. Pour chaque balance effectuée, on procède à plusieurs acquisitions (nombre fixé par l'utilisateur) des valeurs fournies sur le bus GPIB par les appareils de mesures, valeurs dont on calcule la moyenne et l'écart-type. Ces résultats sont affichées sur une ligne par l'imprimante. Sur la même ligne, on trouve aussi la puissance effectivement appliquée au standard sous test (cette valeur est calculée, voir comment plus loin), la puissance mesurée par le standard sous test et la différence entre ces deux puissances calculées en ppm. Cette dernière valeur donne l'erreur mesurée du standard sous test par rapport au standard MIL.

Les mesures terminées on passe à la balance suivante et par conséquent on rouvre la boucle de contre-réaction avant toute chose.

□ La seconde balance est en fait une balance partielle du système puisqu'en principe celui-ci ne doit pas son point de fonctionnement changer de manière significative au cours de la mesure : cela signifie qu'on recommence la procédure de balance à partir du gain 3.

Remarque: le programme MIL qui fait cette balance (et qui a été repris tel quel) a la possibilité de passer du gain 3 au gain 2 s'il détecte que les tensions mesurées aux bornes du détecteur sont trop grandes; même remarque pour le gain 2 vers le gain 1; par conséquent, faire une balance partielle n'est pas sujet à caution puisque le système peut de lui-même revenir à une balance complète si nécessaire.

□ La troisième balance et les suivantes (si il y en a) se font de la même manière que la seconde balance.

Le nombre de balances pour un facteur de puissance donné ainsi que le nombre de mesures des appareils pour une balance donnée doivent être au moins égaux à deux, car le calcul des écarts-types fait intervenir des divisions par ces nombres moins 1.

Remarque: on peut fixer un temps d'attente entre deux procédures de mesures à deux facteurs de puissance successifs (variable *FDeltaTime* dans le programme).

Remarques diverses concernant le nouveau programme

• Choix du standard à tester

En l'état, le programme est capable d'étalonner les deux standards Landis & Gyr. Ces standards mesurent une puissance active et fournissent la valeur mesurée sous la forme d'une fréquence linéairement proportionnelle à la puissance active qui leur est appliquée (2 kHz / 240 W).

Le programme permet de sélectionner ces deux standards ainsi qu'un troisième qui est le "Schuster". Toutefois, actuellement, la sélection du Schuster est sans effet; il faut compléter le module **MeasureAndStat** pour que le calcul de la puissance de sortie du standard soit correct, car dans le cas du Schuster la fréquence du signal de sortie dépend quadratiquement de la puissance (donc il faut calculer *PwrMeas* en tenant compte de cette caractéristique).

En outre, actuellement, le calcul de la puissance effectivement appliquée au standard se base sur le fait que ces standards mesurent la puissance active. Si on voulait étendre les possibilités du programme, il faudrait ajouter un champ sur l'écran pour pouvoir choisir de travailler avec des standards mesurant des puissances aussi bien actives que réactives ou apparentes (ceci pourrait aussi se faire dans la fenêtre de choix des standards).

• Choix d'un multimètre

Le programme ne permet pour l'instant de faire les mesures de tension qu'avec un multimètre de type HP 3458.

Il est possible de sélectionner un autre type de multimètre, le Keithley 2001, mais là encore cette sélection est actuellement inopérante, car il reste à compléter les deux modules permettant de configurer correctement le Keithley (cela se fait dans **ConfigureDevices**) et de prendre des mesures (cela se fait dans **MeasDevices**).

Le déroulement de la procédure de mesure actuelle avec le HP 3458 est le suivant: on envoie tout d'abord un signal de trigger au multimètre HP 3458 car il met beaucoup de temps à prendre une mesure (de l'ordre de 30 s dans la configuration choisie pour mesurer en ac à 240 V avec la plus haute précision); on fait ensuite les mesures des fréquences (cela prend environ 5 s pour chaque mesure) puis on attend environ 25 s et on lit la valeur

mesurée par le HP 3458; on est obligé d'introduire explicitement une commande d'attente pour ces 25 s (valeur fixée par l'expérience) sinon le PC fait une erreur de timeout sur le bus.

Remarque : il importe de ne pas toucher au multimètre pendant la mesure, car on pourrait changer la configuration de ce dernier qui est réalisée une seule fois en début de programme; si cela arrivait toutefois, on peut envoyer "ACV; SET ACV SYNC; RES 0.002; LFILTER ON " ce qui permet de restaurer la configuration établie dans le programme.

- Choix de l'impression

Le programme permet de choisir d'imprimer les résultats ou non. Les formats d'impression sont définis de manière à pouvoir imprimer sur du format 136 colonnes. Si on voulait changer de format de papier, il faudrait modifier la configuration de l'imprimante dans **ConfigureDevices** et surtout changer les lignes du type **LPRINT** se trouvant dans **MeasureAndStat**.

- Introduction des facteurs de puissance

On peut entrer jusqu'à 16 facteurs de puissance pour lesquels les mesures s'effectueront. L'ordre d'introduction des valeurs correspond à l'ordre dans lequel se feront les mesures. Le fait de rentrer plusieurs fois la même valeur n'a aucune importance, les mesures seront simplement faites plusieurs fois pour cette valeur.

Les valeurs, entrées par l'utilisateur dans une fenêtre, sont ensuite automatiquement sauveées dans le fichier **FilePf**. Lorsqu'on relance le programme, les anciennes valeurs utilisées, contenues dans le fichier **FilePf**, sont chargées dans un tableau, ce qui permet d'avoir facilement accès aux valeurs des facteurs de puissance.

Remarque : la valeur du facteur de puissance entrée par l'utilisateur doit correspondre à la valeur numérique du $\cos(\varphi)$ où φ est l'angle de déphasage entre le courant et la tension, angle variant entre $-\pi/2$ et $\pi/2$. Par convention dans le programme, la valeur entrée du facteur de puissance doit être pourvue d'un signe négatif si l'angle φ est négatif; le programme affecte par la suite la valeur absolue de cette valeur à la variable **Pwrfact\$** et "L" ou "G" à la variable **lorg\$** selon que la valeur entrée est positive ou négative; il serait peut-être bon dans une version ultérieure du programme que l'utilisateur puisse entrer ces facteurs de puissance sous la forme 0.5L pour 0.5 et 0.5G pour -0.5, mais cela nécessite de rajouter quelques lignes à la sous-routine **ChangePwrfct** qui se trouve dans le module principal.

- Fichiers de stockage

Le programme a absolument besoin des deux fichiers **Param** et **FilePf** pour pouvoir démarrer correctement. En effet, le programme lit et charge le contenu de ces fichiers en début d'exécution, par conséquent si ces fichiers sont vides ou n'existent pas, on aura des problèmes.

Si par accident ces fichiers étaient détruits, on peut les recréer en dehors du programme: dans ce cas, il faut créer deux fichiers de type ASCII aux noms **Param** et **FilePf**, et les éditer de manière à satisfaire au format utilisé dans le programme (voir les figures 2 et 3). Il faut aussi prendre garde à ce que le programme, les fichiers **Param** et **FilePf** se trouvent dans le même répertoire DOS, sinon le programme ne trouvera pas le chemin pour accéder à ces deux fichiers. Attention aussi à ne pas utiliser un fichier **Param** de l'ancienne version du programme MIL avec la nouvelle version du programme (le fichier **Param** de la nouvelle version contient des données que le fichier **Param** de l'ancien programme ne stockait pas et cela fait "planter" le programme).

D'autre part, avant de lancer les mesures, le programme demande à l'utilisateur de donner un nom de fichier. Ce fichier est destiné à recevoir les valeurs mesurées ou calculées des variables utiles à l'interprétation des mesures. Là encore il s'agit d'un fichier ASCII, que l'on peut lire avec un tableur afin d'en exploiter le contenu (avec Excel par exemple). Le format des données (voir la figure 4) est conçu de telle sorte qu'on puisse traiter facilement les données par la suite.

• Variables utilisées dans le module **MeasureAndStat**

On se place dans la situation où la balance est réalisée pour un facteur de puissance donné; la boucle de contre-réaction est fermée et on a fait *FKNumPoints* mesures de la tension de la source dont la valeur moyenne vaut *Umeas* et l'écart-type *SigmaUmeas*, *FKNumPoints* mesures de la fréquence de la source dont la valeur moyenne vaut *FUmeas* et l'écart-type *SigmaFUmeas*, *FKNumPoints* mesures de la fréquence de sortie du standard sous test dont la valeur moyenne vaut *FWmeas* et l'écart-type *SigmaFWmeas*, *FKNumPoints* évaluations des puissances *PwrCalc*, *PwrMeas* et *DeltaPwr*.

Ces valeurs sont remesurées/recalculées *NumBalanceF* fois (correspond au nombre de balances).

A la dernière balance effectuée, on calcule la moyenne *PwrCalcMean* et l'écart-type *SigmaCalcMean* de la variable statistique *PwrCalc* qui est la puissance calculée comme étant celle effectivement appliquée aux bornes du standard sous test, la moyenne *PwrMeasMean* et l'écart-type *SigmaPwrMeasMean* de la variable statistique *PwrMeas* qui est la puissance mesurée par le standard, la moyenne *DeltaPwrMean* et l'écart-type *SigmaDeltaPwrMean* de la variable statistique *DeltaPwr* qui est l'écart des deux valeurs de puissance.

Il faut noter que les mesures de la fréquence de l'alimentation (*FUmeas* et *SigmaFUmeas*) ne sont pas utilisées dans la version actuelle du programme (car la puissance active ne dépend pas de la fréquence comme cela est explicité ci-dessous). Elles sont prévues pour être utilisées avec les mesures d'énergie réactive.

Remarques sur le calcul des puissances

Le programme calcule dans le module **TurnCode** les valeurs des enroulements *Nx*, *Nc* et *Nr* du comparateur de courant correspondant aux valeurs des paramètres choisies par l'utilisateur:

$$N_x = 1$$

$$N_r = \frac{N_x \cdot I_{nom} \cdot R \cdot \cos(\varphi_{nom})}{U_{nom}}$$

$$N_c = \frac{N_x \cdot I_{nom} \cdot \sqrt{1 - \cos(\varphi_{nom})}}{\omega_{nom} \cdot U_{nom} \cdot C}$$

Ces équations découlent de la relation ci-dessous, calculée dans les références mentionnées au début de ce rapport (équation d'équilibre du comparateur de courant):

$$I = \frac{U}{N_x} \cdot \left[\frac{N_r}{R} \pm j \cdot \omega \cdot C \cdot N_c \right]$$

Une fois la balance effectuée, le comparateur de courant a bien les nombres de tours de ses enroulements fixés aux valeurs calculées ci-dessus. Par contre, les valeurs effectives de la

tension et la fréquence de l'alimentation sont différentes des valeurs nominales introduites par l'utilisateur.

Or, si le pont est à l'équilibre, c'est que le courant qui traverse N_x satisfait à la relation théorique ci-dessus, mais avec des valeurs de tension et de fréquence d'alimentation correspondant à celles mesurées.

Comme dans les mesures effectuées seule la puissance active intervenait, nous avons considéré que la puissance active appliquée aux bornes du standard sous test valait:

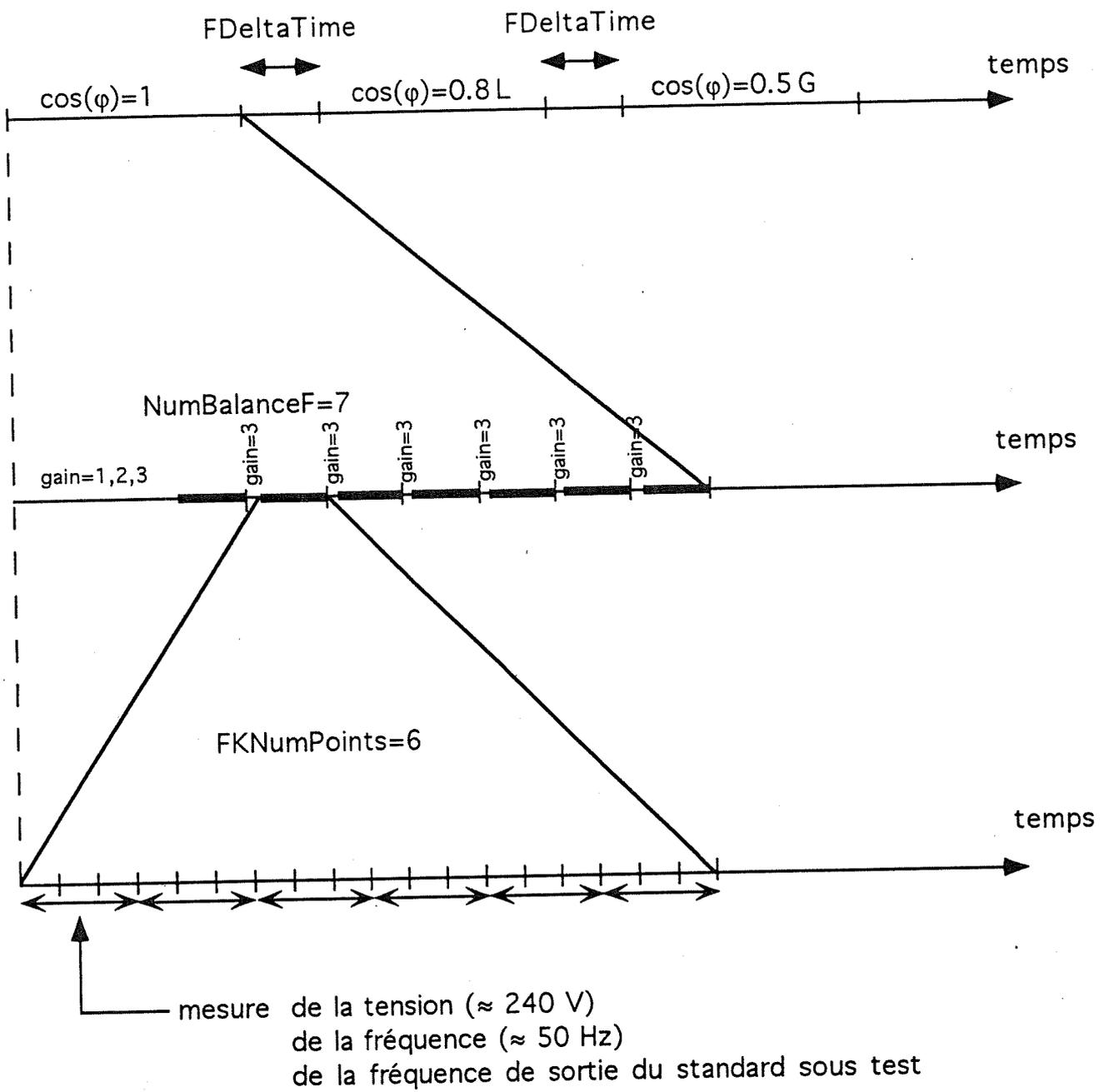
$$\begin{aligned} P_{\text{wrCalc}} &= U_{\text{mesurée}} \cdot \text{Re}[I] \\ &= U_{\text{mesurée}} \cdot \left(\frac{U_{\text{mesurée}} \cdot N_r}{N_x \cdot R} \right) \end{aligned}$$

On peut observer que la puissance appliquée aux bornes du standard est indépendante de la fréquence de l'alimentation. Nous avons d'ailleurs pu vérifier expérimentalement ce fait: les erreurs du standard sous test sont très proches, que la fréquence soit fixée à 50 Hz ou à 52.5 Hz.

On peut remarquer que le facteur de puissance réellement appliqué au standard vaut:

$$\begin{aligned} \cos(\varphi_{\text{réel}}) &= \frac{\text{Re}[I_{\text{réel}}]}{\|I_{\text{réel}}\|} \\ &= \frac{N_r}{\sqrt{(R \cdot N_r)^2 + (\omega_{\text{mesurée}} \cdot C \cdot R \cdot N_c)^2}} \end{aligned}$$

et que cette valeur est indépendante de la tension d'alimentation U mesurée.



légende du 2ème axe du temps:

- temps mis pour faire les mesures
- temps mis pour faire une balance

figure 1

Format du fichier " Param " :

Exemple de contenu acceptable :

Volt\$	240
CURRAMPL\$	1000
Pwrfact\$	1
lorg\$	L
res\$	24.000072
resVolt\$	240
cap\$	1000.185
capVolt\$	240
Cout\$	0.1326295
ReactComp\$	30
NumBalanceF\$	10
FDeltaTime\$	0
FKNumPoints\$	25
VoltMeterError\$	-177.7

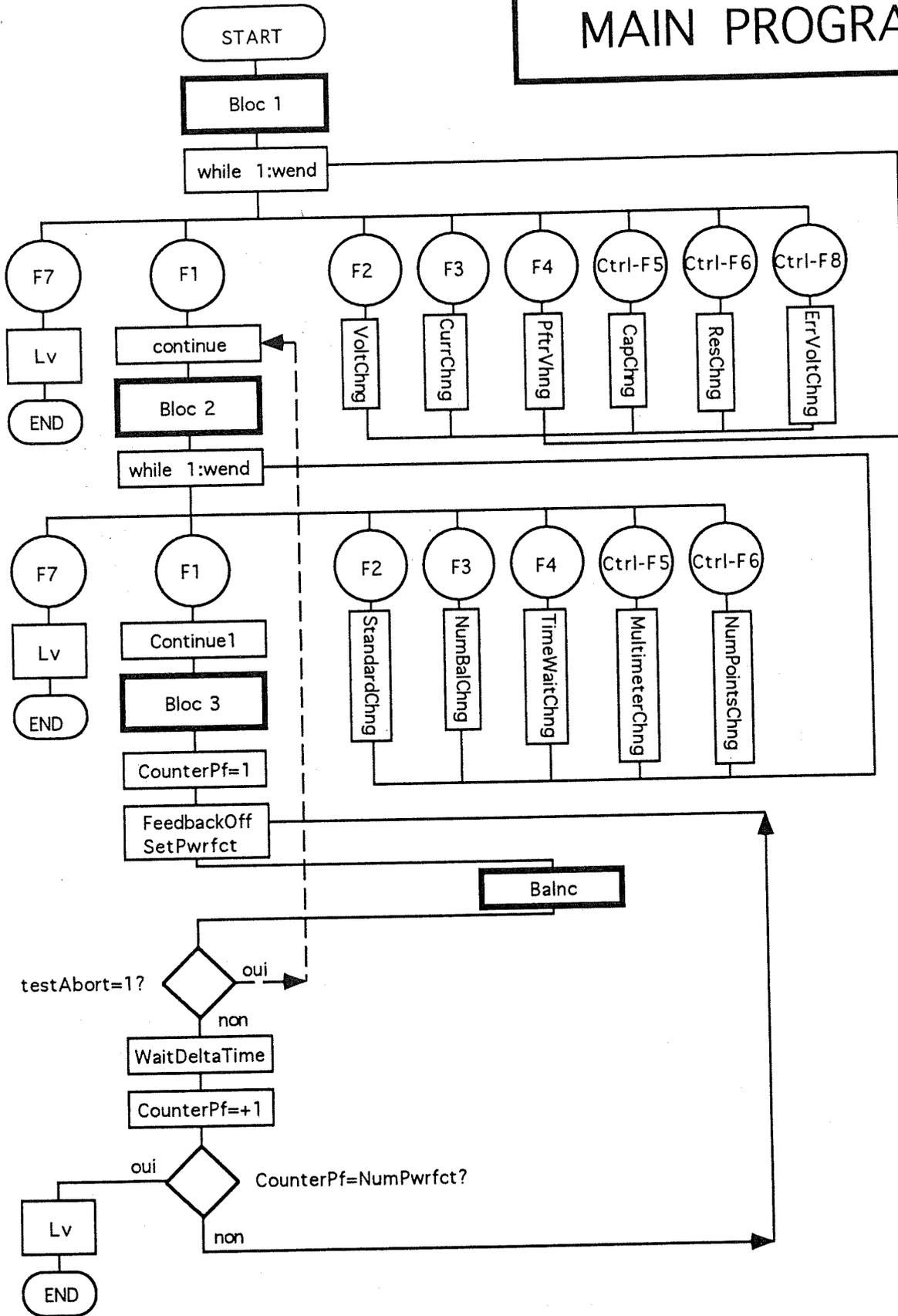
figure 2

Exemple de contenu acceptable du fichier " FilePf ":
(série de coefficients de puissance)

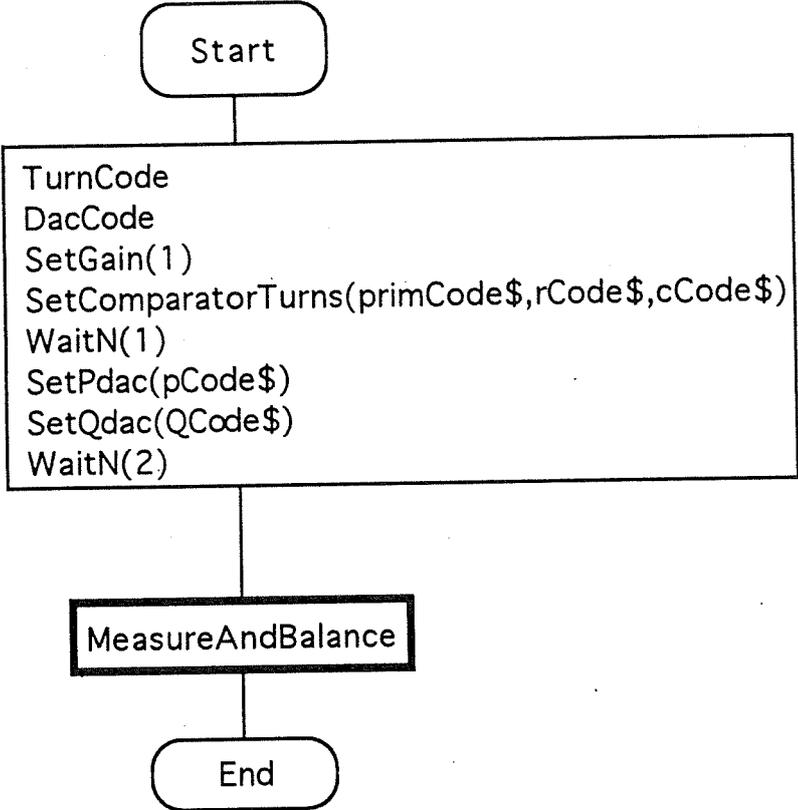
1
.8
.5
.2
-.2
-.5
-.8

figure 3

MAIN PROGRAM



Balnc



BLOCS 1, 2 et 3

Bloc1 :

```
Intro
GPIBInit
SetGain(1)
InitializeSystem
LoadParam("Param")
EnableKeys
Initialize
LoadPwrftct("FilePF")
ConfigureDevices
TextScreen
Ascreen
```

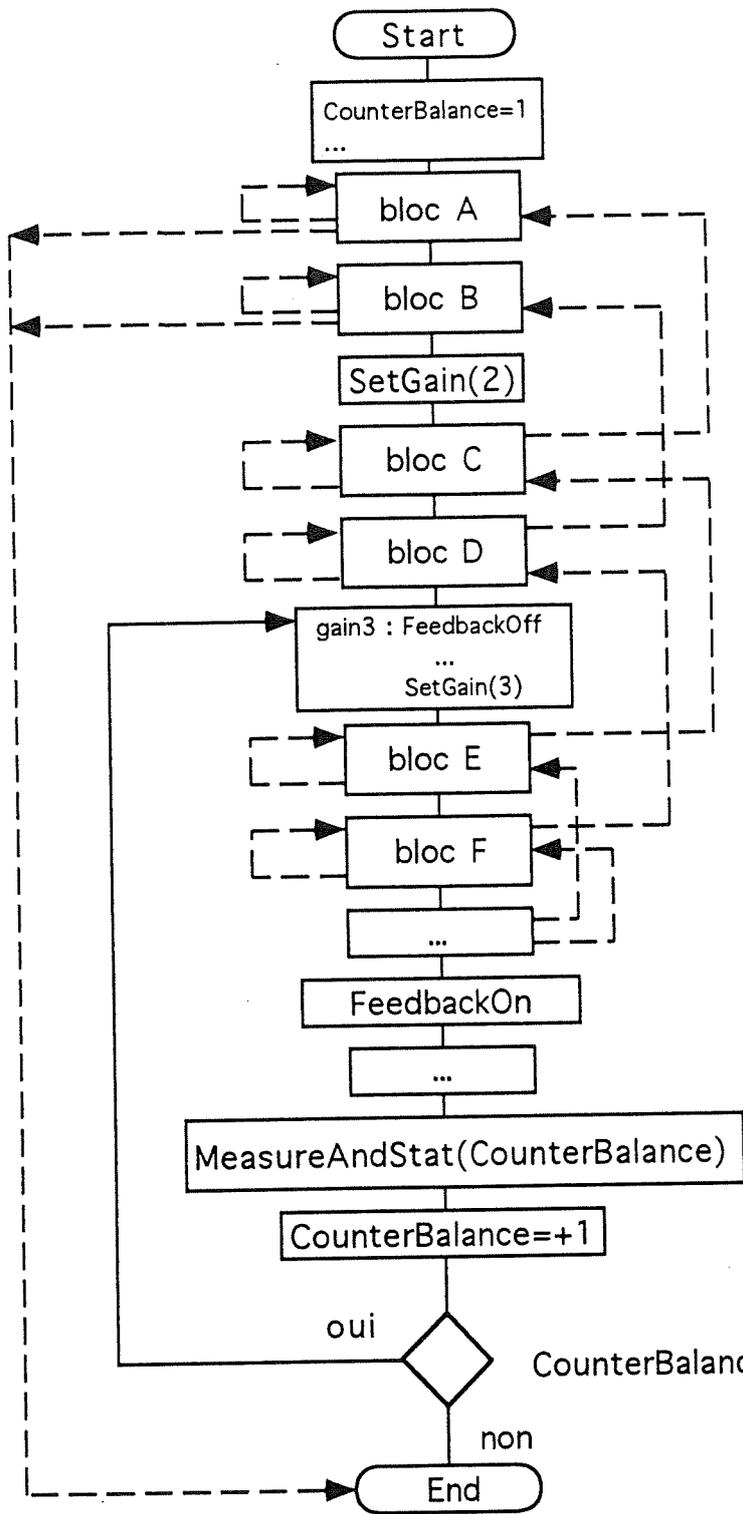
Bloc2 :

```
DisableKeys
KEY(18) OFF
TestAbort=0
EnableKeys1
Ascreen1
```

Bloc3 :

```
DisableKeys
AskFileName
AskPrinter
Ascreen1
```

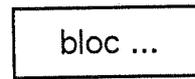
MeasureAndBalance



REMARQUES:



bloc contenant principalement (mais pas uniquement!) des instructions d'impression à l'écran



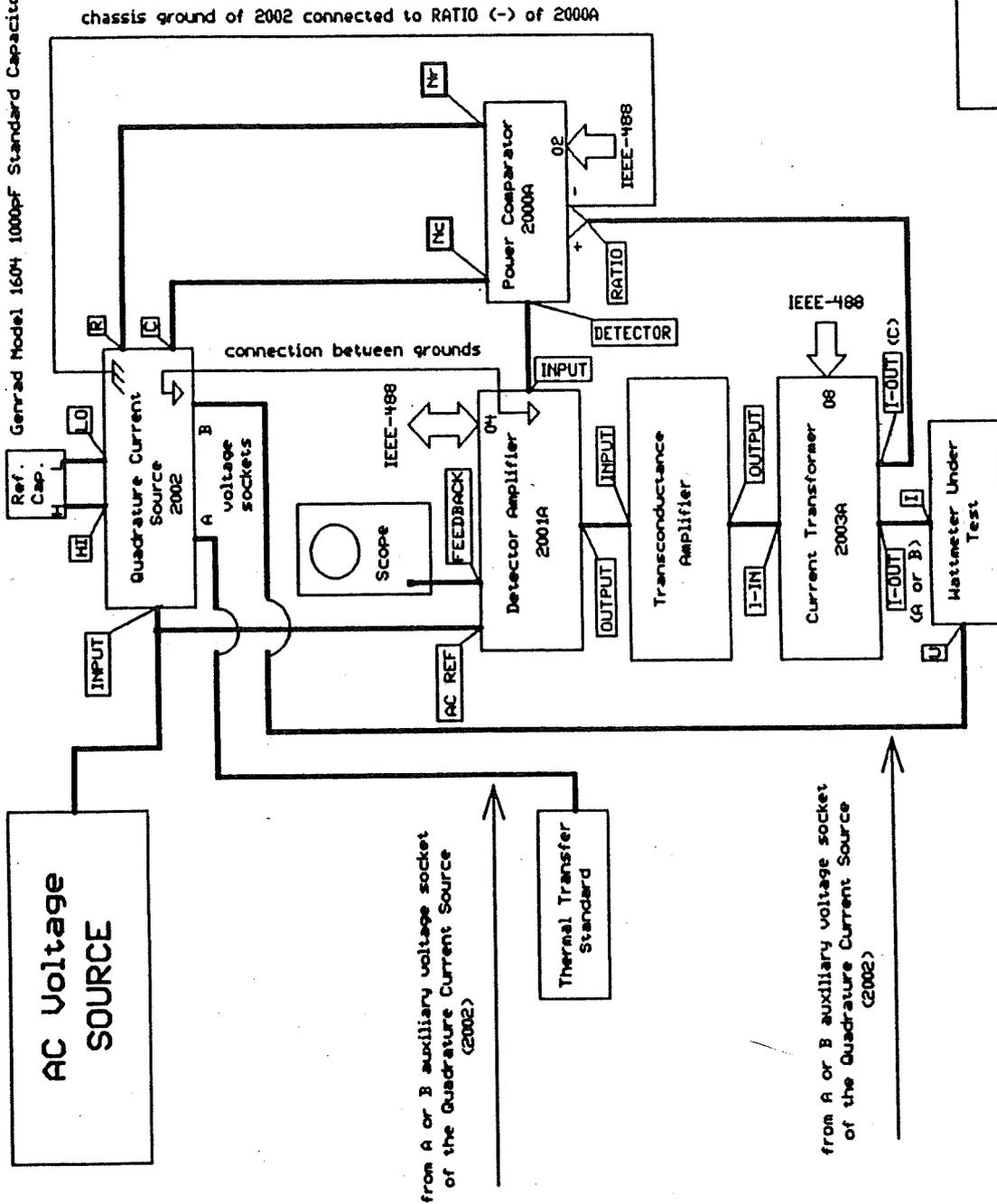
blocs servant à balancer le système pour un gain donné



indique un chemin possible; se reporter au programme pour savoir quand ces chemins sont empruntés

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Umeas	SigmaUmeas	FUmeas	SigmaUmeas	FWmeas	SigmaFWmeas	PwrCalc	PwrMeas	DeltaPwr	date_heure	PwrCalcMean	SigmaPwrCalcMean	PwrMeasMean	SigmaPwrMeasMean	DeltaPwrMean	SigmaDeltaPwrMean
1															
2															
3															
4	240.1	4.64119949	50	0.1144371	1001	26.3508729	120.13	120.11	-200.98						
5	240.1	10.6957915	50	0.9474929	1001	26.3508729	120.13	120.11	-203.01						
6									09-21-1993 14:59:02	120.1345	1.43015524	120.110238	1.026049081804755D-02	-201.99502	1.42988417
7															
8	240.1	3.41389011D-02	50	1.49890001	2002	52.3064573	240.24	240.25	32.6936						
9	240.1	6.45809152	50	0.83424632	2002	26.7708023	240.25	240.26	14.5156						
10									09-21-1993 15:01:53	240.24799	25.9388506	240.253665	13.0853131	23.6046083	12.8538309

Genrad Model 1604 1000pf Standard Capacitor



chassis ground of 2002 connected to RATIO (-) of 2000A

connection between grounds

from A or B auxiliary voltage socket of the Quadrature Current Source (2002)

from A or B auxiliary voltage socket of the Quadrature Current Source (2002)

Note: Thermal Transfer Standard and voltage source supplied by user.

POWER CALIBRATION SYSTEM			
sz	ident	drawing no.	
scale			sheet

