

Sc N 60
10

✓
UNIVERSITE DE NANCY ---o--- FACULTE DES SCIENCES

"ETUDE DETAILLEE DU FLEC"

=====

"APPLICATION DE LA METHODE DE MODELAGE AU
CALCUL D'UN CORRECTEUR."

THESE



Présentée

à la FACULTE des SCIENCES de l'UNIVERSITE de NANCY

Pour l'obtention

du DOCTORAT de SPECIALITE (Mathématiques 3ème Cycle)

par

François THOMAS

soutenue le 24 JUIN 1960 devant la Commission d'examen

Jury : MM. J. LEGRAS Président

M. HERVE

Examineurs

J. L. LIONS

UNIVERSITE DE NANCY ---o--- FACULTE DES SCIENCES

"ETUDE DETAILLEE DU FLEC"

=====

"APPLICATION DE LA METHODE DE MODELAGE AU
CALCUL D'UN CORRECTEUR."

THESE



Présentée

à la FACULTE des SCIENCES de l'UNIVERSITE de NANCY

Pour l'obtention

du DOCTORAT de SPECIALITE (Mathématiques 3ème Cycle)

par

François THOMAS

soutenue le JUIN 1960 devant la Commission d'examen

Jury : MM. J. LEGRAS Président

M. HERVE

Examineurs

J. L. LIONS

" UNIVERSITE de NANCY --- FACULTE des SCIENCES "

-o-o-o-o-o-o-o-o-o-

Doyen : M. URION
 Assesseur : M. ECHEVIN

Doyens honoraires : MM. CORNUBERT, DELSARTE

Professeurs honoraires : MM. GUTTON, GROZE, RAYBAUD, FALLOT, LAFFITE,
 LERAY, DONZELOT, JOLY, LAPORTE, EICHHORN,
 CAPELLE, GODEMENT, DUBREIL, L. SCHWARTZ,
 DIEUDONNE, de MALLEMANN, LONGCHAMBON,
 LETORT, DODE, GAUTHIER, GOUDET, OLMER,
 CORNUBERT, CHAFELLE, GUERIN.

Maîtres de conférences honoraires : MM. RAUX, LIENHART.

PROFESSEURS

MM.

CHEVALLIER	Physique	NICLAUSE	Chimie
URION	Chimie biologique	FAIVRE	Physique appliqué
DELSARTE	Analyse supérieure	AUBRY	Chimie minérale
REMY	Zoologie	COMOLET	Mécanique physique
ROUBAULT	Géologie	DUVAL	Chimie
VEILLET	Biologie animale	COPPENS	Radiogéologie
ECHEVIN	Botanique	FRUHLING	Physique
WAHL	Chimie org. ind.	LIONS	M.M.P.
BARRIOL	Chimie théorique	SUHNER	Physique expériment.
BIZETTE	Physique	HILLY	Géologie
GUILLIEN	Electronique	LE GOFF	Génie chimique
GIBERT	Chimie Physique	CHAPON	Chimie biologique
HERVE	Calcul diff. et int.	HEROLD	Chimie industrielle
LEGRAS	Mécan. rationnelle	SCHWARTZ	Exploitation minière
DAVID	Chimie organique	MALAPRADE	Chimie
BOLFA	Minéralogie	MANGENOT	Phytopathologie
	GAYET : Physiologie		

MAITRES de CONFERENCES

MM.

WERNER	Botanique	LERMUSIAUX	Physique
GARNIER	Agronomie	BERNARD	Géologie
BRUHAT	Math. générales	ARAGNOL	Mathématique (prop.)
HADNI	Physique	BONVALET	Mécanique appliquée
Mme ROIZEN	Physique	BASTICK	Chimie
RE GNIEP	Physico-chimie	RENARD	Phys. théor. et nucl.
KERN	Minéralogie	CONDE	Zoologie
WEPPE	Minéral appliquée	GOSSE	Génie chimique
CHAMPIER	Physique	GAY	Chimie biologique
CLIN	Stratigraphie et Paléontologie	N.	Géologie

Secrétaire : M. LAPOINTE

A MES PARENTS,

A MON MAITRE, MONSIEUR LEGRAS.

Le présent mémoire a été effectué sous la direction bienveillante de Monsieur J. LEGRAS, Professeur à la Faculté des Sciences. Je suis heureux d'exprimer ici à mon Maître ma profonde reconnaissance pour l'intérêt constant qu'il a bien voulu témoigner à mon travail et pour les conseils éclairés qu'il n'a cessé de me prodiguer.

Je l'assure de ma sincère gratitude pour la formation qu'il m'a permis d'acquérir dans son Centre de Calcul

Je remercie Messieurs les Professeurs qui ont bien voulu me faire l'honneur de composer le Jury.

J'adresse à la Compagnie Industrielle des Téléphones mes plus vifs remerciements pour les facilités qui m'ont été accordées pour la présente recherche.

Merci enfin à mes camarades pour les services qu'ils m'ont rendus et pour l'ambiance sympathique qu'ils ont su créer au Centre de Calcul.

-- ETUDE DETAILLEE du FLEC --

-o-o-o-

GENERALITES.

I - LA PARTIE INTERPRETATIVE

I - 1 - Les ordres positifs.

I - 1 - a - Les ordres positifs à 3 adresses.

I - 1 - b - Les ordres positifs à 2 adresses (ordres électr.)

I - 2 - Les ordres négatifs.

I - 2 - a - Les ordres négatifs à 3 adresses.

I - 2 - b - Les ordres négatifs à 2 adresses.

II - LES ORDRES DE PERTURBATION

II - 1 - Perturbation simple.

II - 2 - Perturbation générale.

-o-o-o-o-o-

-o-o-o-

-o-

GENERALITES.-

FLEC est une logique extérieure permettant de traiter en virgule flottante simple précision, des calculs en nombres complexes et des problèmes "électriques". Les opérations effectuées en FLEC peuvent porter sur des nombres complexes ou réels.

Un nombre exprimé en virgule flottante s'écrit : CC MMMMMMMM, CC est la caractéristique, MMMMMMMM la mantisse. Ce nombre vaut : $10^{CC-50} \cdot 0,MMMMMM$.

Ainsi, le nombre complexe $2,5364781 + 31,525237 j$ ayant 0100 pour adresse, sera mémorisé sur le tambour de la manière suivante :

0100 : 51.25364781

0101 : 52.31525237

Si la virgule flottante fait passer la précision de dix chiffres à huit chiffres, elle présente le gros avantage de travailler sur des nombres compris entre 10^{-50} et 10^{+50} .

FLEC est particulièrement adapté aux calculs concernant les filtres, égaliseurs, câbles artificiels, etc... Il permet au moyen d'un seul ordre, de calculer directement l'impédance de dipôles classiques ayant jusqu'à quatre éléments. Grâce à la concision des ordres FLEC, l'écriture des programmes est très condensée (le calcul de l'affaiblissement composite d'un égaliseur possédant une quinzaine d'éléments ne nécessite pas plus de dix ordres). Il en résulte une grosse réduction de temps consacré à la mise au point des programmes.

En outre, FLEC se prête aux calculs de dérivées partielles, de tolérances, grâce aux ordres de perturbation.

Enfin il est facile de doter FLEC d'ordres nouveaux écrits dans le langage FLEC (donc prenant peu de place).

Lorsque le problème que l'on envisage de traiter n'est pas un problème électrique, la présence d'ordres électriques est inutile. C'est pourquoi FLEC se présente sous deux formes :

FLEC I (sans ordre électrique) prévu pour les calculs en nombres complexes, occupe les mémoires 910 à 1999.

FLEC II (complet) occupe les mémoires 330 à 1999.

De plus, les ordres cosinus et sinus sont rarement utilisés dans les problèmes électriques ; on peut, si le besoin s'en fait sentir, enlever les cartes correspondantes (oranges) dans FLEC II (330 à 414). De même, dans FLEC I le sous-programme de calcul de cosinus et sinus occupe les mémoires 910 à 996.

La mémoire 0001 ne peut être utilisée au cours d'un problème électrique, car c'est elle qui contient ω pulsation correspondant à la fréquence de travail.

Les instructions sont à 2 ou 3 adresses. Ce sont des nombres de 10 chiffres dont le signe est aussi interprété et qui sont de la forme $\pm \phi_1 . AAA . BBB . CCC$. BBB et CCC sont toujours des adresses de mémoires.

Si ϕ_1 est nul, AAA est un code opération à 2 adresses que nous appellerons parfois ϕ_2 .

Si ϕ_1 est différent de zéro, c'est un code opération à trois adresses où AAA représente une adresse.

Les instructions sont normalement interprétées en séquence.

La partie interprétative que nous allons étudier en détail, occupe une place importante dans le FLEC, on peut la schématiser par un aiguillage à 8 branches (Fig. 1). Les raisons de son importance sont entre autres, l'existence d'ordres positifs et négatifs, les différentes significations d'une adresse comme CCC, par exemple, qui peuvent désigner le mot C, les mots C et C+1, les mots C à C+3 et même les mots C à C+7, et enfin, le fait que la majorité des ordres électriques est rédigée en FLEC.

.../...

I - LA PARTIE INTERPRETATIVE :

La partie interprétative d'une logique extérieure est un vaste sous-programme à embranchements multiples qui décodifie les instructions et permet leur exécution en préparant les entrées et sorties dans les sous-programmes fonctionnels et d'opération.

Entrée en FLEC :

Si nous sommes en langage machine, pour débiter l'interprétation de la première instruction du programme FLEC, que nous supposons placée en N, nous devons mettre en 8003 : 60.N.1550. et aller à 1000.

Exemple : 0100 : 60.0101.1000
 0101 : 60. N .1550
 1000 : Début de la décodification.

L'entrée en FLEC peut être automatique. Lorsque l'on charge FLEC, on place habituellement immédiatement après, le programme et les constantes perforés en "n" mots par carte.

L'ordre de lecture du programme de chargement placé en 1888 : 70.1994.1995, prend 1994 comme instruction suivante si la carte lue est une carte chargement. Si la carte lue est une carte lecture et si elle contient en mot 1 : 60.N.1550, nous obtenons l'entrée en FLEC car en 1995 se trouve : 60.1951.1000

 1995 : 60.1951.1000
 1951 : 60. N .1550
1000 : 21.1927.8001 en 1927 (mot 1 de la zone 1 de perfo de l'analyse)
8001 : 60. N .1550 vient 60.N.1550
1550 : 46.1903.1454 Test sur ϕ_1 .AAA.BBB.CCC - Ordre positif ou négatif -

.../...

I - 1 - LES ORDRES POSITIFS (1454) :

En 1454 on transfère ϕ_1 AAA.BBB.CCC. en 1928 deuxième mot de la zone 1 de perfo et on sépare les adresses "A", "B", "C".

<u>1454</u> :	30.0003	
	24.1928	Transfert de ϕ_1 AAA.BBB.CCC en 1928
	16.8002	
	24.1693	CCC 0..... 0 en 1693
	30.0003	
	16.8002	
	24.1166	BEB 0..... 0 en 1166
	30.0003	
	20.1282.1585	AAA 0..... 0 en 1282
1585	44. <u>1340.1390</u>	Test $\phi_1 \neq 0$.

I - 1 - a - Les ordres positifs à 3 adresses + ϕ_1 AAA.BBB.CCC (1340).

Les ordres positifs à 3 adresses sont de deux types : les ordres d'opération en nombres complexes et les ordres matriciels. En 1461, nous trouvons le test qui les différencie.

<u>1340</u> :	21.1144	0... 0 ϕ_1 envoyé en 1144
	10.1750	$\phi_1 + 3$
	30.0001	
1461 :	44. <u>1565.1216</u>	$\phi_1 + 3 \geq 0$ ($\phi_1 \geq 7$)

I - 1 ^a X - Opérations sur des nombres complexes (1216) Figure 2.

On se propose d'exécuter en virgule flottante une opération concernant le nombre complexe $a + ja'$, placé dans les mémoires A et A + 1, et le nombre $b + jb'$ placé en B et B + 1, et de disposer le résultat $c + ic'$ en C et C + 1 respectivement.

Après avoir formé les ordres d'appels des nombres A et B et appelé ces mêmes nombres dans les mots 1929-1930 et 1931-1932, afin de les perforer lors de l'analyse, on ajoute à ϕ_1 : 1000 et l'on va en $1000 + \phi_1$.

.../...

- En 1001 (correspondant à l'ordre + 1.A.B.C.) débute le sous-programme d'addition complexe.

<u>1001</u>	65.1904.1610	
1610	69.1913.1100*	(1100 est la première instruction du sous-programme d'add. en Virgule Flottante).
1904	00 1929 1931	
1913	20 1933 1386	$a + b \longrightarrow c$
1386	65 1640 1445	
1445	69 1648 <u>1100</u>	
1640	00 1930 1932	$a' + b'$
1648	20 1934 <u>1850</u>	$a' + b' \longrightarrow c'$

- En 1002 débute le sous-programme de soustraction complexe + 2.A.B.C.

<u>1002</u>	66 1904 1660
1660	69 1963 1100
1963	20 1933 1436
1436	66 1640 1445

1003 : Multiplication complexe + 3.A.B.C.
1004 : Division complexe + 4.A.B.C.
1005 : Somme des inverses + 5.A.B.C.

Ce dernier sous-programme exécute $\frac{1}{a+ja'} + \frac{1}{b+jb'} = \frac{1}{c+jc'}$

$$c + jc' = \frac{(a+ja') \cdot (b+jb')}{(a+ja') + (b+jb')} = \frac{p+jp'}{s+j's'}$$

La formule ci-dessus nous montre que l'on est ramené à la division de deux nombres complexes respectivement produit et somme des nombres "A" et "B" ; c'est pourquoi, après avoir placé $(a+ja') \cdot (b+jb')$ en 1929-1930 et $(a+ja') + (b+jb')$ en 1931-1932, nous irons en 1004. Ce processus présente un inconvénient qui est le suivant : Lors de l'analyse, ce ne sont pas les nombres "A" et "B" que nous retrouverons dans les mots 3 à 6, mais leurs produit et somme.

.../...

L'ordre + 6.A.B.C. n'est pas utilisé et reste donc disponible.
Les 5 sous-programmes d'opération en nombres complexes après avoir placé le résultat en 1933-1934 vont en 1850.

On forme alors les ordres d'envoi de 1933 en C et 1934 en C+1.

<u>1850</u>	: 65.1693	Appel de "C"
	30.0003	
	15.1158	24.C + 1.1504
	69.1934.8002	Appel de C + 1
8002	24.C+1 .1504	Transfert en C + 1
<u>1504</u>	65.1693	
	30.0003	
	15.1208	24.C.1554
	69.1933.8002	Appel de C
8002	24. C .1554	Transfert en C
<u>1554</u>	60.8000.1511	Appel de pupître
1511	46.1364.1615	
1364	71.1927.1615	Analyse si le pupître porte un signe moins.
<u>1615</u>	60.1927.1382	60.N.1550
1382	10.1908. <u>1000</u>	60.N+1.1550

Nous passons à la décodification et à l'exécution de l'instruction suivante contenue dans la mémoire N + 1.

*NOTE : Les sous-programmes d'opération en virgule flottante (addit. soust. etc...) supposent qu'avant d'entrer dans l'un de ces sous-programmes, l'on ait placé en 8002 : 00.A.B et une instruction de sortie (instruction suivante) en 8001.

I.1 - a - f - Opérations matricielles (1565) - (Figures 3 et 3bis).

Les ordres matriciels ont été écrits en FLEC et se présentent sous forme de sous-programmes. L'intérêt de l'écriture des ordres matriciels en langage machine en FLEC est indéniable. La multiplication de deux matrices carrées complexes de degré deux en virgule

.../...

flottante nécessite 8 multiplications et 4 additions complexes soit 32 multiplications, 16 additions et 8 soustractions réelles.

Si cet ordre de multiplication était écrit en langage machine il utiliserait environ 200 ordres. Or, les 3 ordres matriciels y compris leur partie interprétative spéciale utilisent moins de 90 mémoires. Dans les 3 ordres matriciels une adresse telle que "A" désigne le contenu des mémoires A à A + 7. L'ordre + 9.A.B.C. fait exception car "B" ne correspond qu'à 4 mémoires B à B + 3 et "C" à 2 mémoires C et C + 1. Au moment du transfert du résultat de l'opération 9 il faudra limiter l'envoi du résultat à 2 mots, contrairement à ce qui se passe pour les 2 ordres + 7.A.B.C et + 8.A.B.C.

L'analyse pose elle aussi un problème particulier puisque "A" "B" et "C" représentent chacun 8 mots ; on perforera donc 4 cartes la première contenant l'adresse de l'instruction analysée et l'instruction elle-même (1927-1928), et les 3 autres cartes contiendront "A", "B" et "C". Enfin il est indispensable de supprimer l'analyse pendant l'exécution des 3 ordres écrits en FLEC et de la rétablir une fois ces ordres exécutés. Trois ordres FLEC spéciaux ont été créés à cet effet, l'un supprime l'analyse, les deux autres rétablissent l'analyse le troisième retournant en plus en langage machine.

<u>1565</u> :	65.8000.	Appel du pupître
	46.0826.0778	Analyse si pupitre négatif
0826	71.1927.	Perfo de la 1ère carte
	69.0831.0484	Aiguillage à distance en vue de
0778	69.0832.0484	la perfo des 3 autres cartes si
0484	24.0513.	l'analyse a lieu.
	69.1927.	60.N.1550 est mis de côté
	24.0936.	
	66.1282.	Appel de - A.
	30.0004.	Mise en position et formation
	15.0807.	de - 8.008.A.977 qui est l'ordre
	20.0502.	d'appel de "A" en 977-984.

.../...

66.1166	
30.0004	Formation de l'ordre
15.0986	- 8.008.B.927
20.0503	
66.1693	Formation de l'ordre
30.0007	- 8.008.877.C. qui
15.0472	permet le transfert du
20.0512	résultat en C - C + 7

Nous effectuons ensuite un test pour savoir si $\phi_1 = 9$.

Dans ce dernier cas, l'ordre de transfert du résultat en C, C + 7 qui est - 8.008.877.C. devient - 8.002.877.C.

0912	45.0868.0918	En 8003 nous avons - $\phi_1 + 9$	
0868	11.0772.1828	0772 : 0.000.000.507	
0918	60.0512.0968	} - 8.008.877.C	
0968	10.0822.0784		+ 0.006.000.000
0784	21.0512.0969		- 8.002.877.C
0969	61.0772.1828	Préparation de l'aiguillage des 3 ordres	
1828	21.0504.0808	0504 : - 0.000.000.(498 + ϕ_1)	
0808	60.0500.1000	} Entrée Interne en FLEC	
0500	60.0501.1550		
501	- 0.031.000.000	Suppression de l'analyse	
(502)	807 - 8.008.000.977	} Appels	
(503)	986 - 8.008.000.927		En fait - 8.008.A.977
(504)	- 0.000.000.498 + ϕ_1		En fait - 8.008.B.927
		Aiguillage	
Ordre+7	505 - 0.000.000.508	L'ordre + 7.A.B.C commence en 508	
+8	506 - 0.000.000.516	" + 8.A.B.C " en 516	
+9	507 - 0.000.000.529	" + 9.A.B.C " en 529	

L'ordre + 7.A.B.C. exécute la somme de la matrice (A) et de la matrice (B) et place le résultat en (C).

.../...

$$(A) = \begin{vmatrix} a_1 + ja'_1 & a_2 + ja'_2 \\ a_3 + ja'_3 & a_4 + ja'_4 \end{vmatrix}$$

$$(B) = \begin{vmatrix} b_1 + jb'_1 & b_2 + jb'_2 \\ b_3 + jb'_3 & b_4 + jb'_4 \end{vmatrix}$$

$$(C) = \begin{vmatrix} c_1 + jc'_1 & c_2 + jc'_2 \\ c_3 + jc'_3 & c_4 + jc'_4 \end{vmatrix}$$

$$c_1 + jc'_1 = a_1 + b_1 + (a'_1 + b'_1) \dots \text{etc....}$$

$a_1, a'_1 ; a_2, a'_2 ; \dots a_4$ qui se trouvaient en A - A + 7 ont été amenés par l'ordre de translation -8.008.A.977 en 977 et la suite. Il en va de même pour $b_1, b'_1 \dots b'_4$.

On se propose de calculer $c_1, c'_1 \dots c'_4$ et de les placer en C, C + 7.

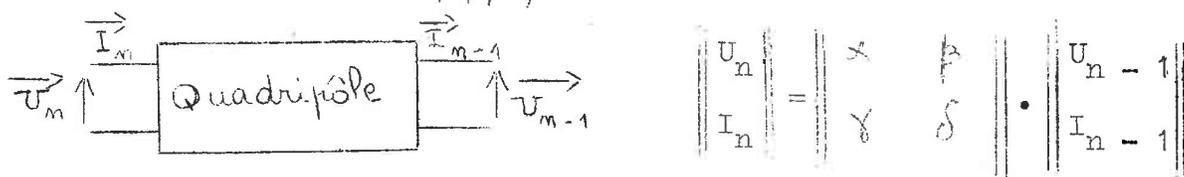
508	+ 1.977.927.877	$a_1 + ja'_1 + b_1 + jb'_1 = c + jc'_1$ en
509	1.979.929.879	877 - 878
510	1.981.931.881	
511	1.983.933.883	L'addition matricielle est effectuée

Nous reviendrons par la suite sur le tronç commun terminal qui débute en 512.

L'ordre + 8.A.B.C exécute la multiplication de la matrice (A) par la matrice (B). (A) x (B) = (C)

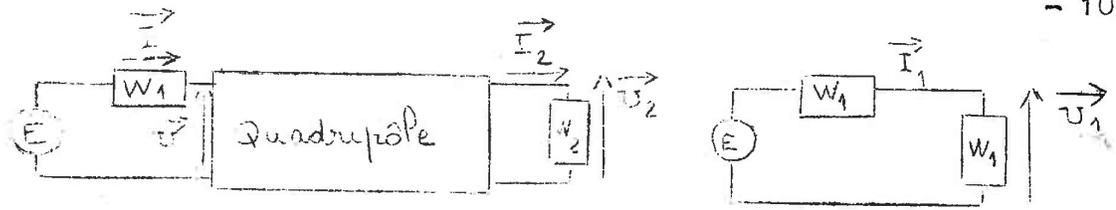
L'ordre + 9.A.B.C calcule l'exposant de transfert composite $\Gamma = A + j\varphi$ d'un quadripôle.

Ce quadripôle est fermé sur deux impédances W_1 et W_2 , A et φ sont fonctions des impédances W_1 et W_2 et des éléments de la matrice de chaîne du quadripôle ; $\alpha, \beta, \gamma, \delta$.



Rappelons que la définition de l'exposant $\Gamma = A + j\varphi$. Elle résulte immédiatement de la considération des figures ci dessous.

...?...



$$e^{2\Gamma} = \frac{\vec{U}_1 \cdot \vec{I}_1}{\vec{U}_2 \cdot \vec{I}_2}$$

$$e^{2\Gamma} = \frac{E^2}{4 W_1 W_2}$$

Cette formule a été obtenue en faisant à priori $I_2 = 1$ ce qui entraîne $U_2 = W_2$

$\vec{E} = \vec{U} + W_1 \cdot \vec{I}$ et par suite des hypothèses simplificatrices $U = \beta + \alpha W_2$;
 $I = \gamma W_2 + \delta$ $E = \beta + \alpha W_2 + W_1 (\gamma W_2 + \delta)$.

529	3.977.929.496	$\alpha \cdot W_2$ en mémoire de travail 496.
530	1.979.496.496	$\beta + \alpha W_2 = U$
531	3.981.929.498	γW_2 en mémoire de travail 498.
532	1.983.498.498	$\gamma W_2 + \delta = I$
533	3.927.498.498	$W_1 I$
534	1.496.498.496	$E = U + W_1 I$
535	3.496.496.496	E^2
536	3.494.927.498	en 494-495 se trouve 4.
537	3.498.929.498	$4 W_1 W_2$
538	4.496.498.496	$E^2 / 4 W_1 W_2 = e^{2\Gamma} = e^{2A} + j2\psi$
539	0.001.496.496	e^{2A} et 2ψ (module et argument de $e^{2\Gamma}$)
540	- 0.022.496.496	$2A, 2\psi$ en 496, 497.
541	- 4.496.492.877	A en 877, ψ en 878 (492 = 2)
542	- 0.000.000.512	Saut inconditionnel vers le tronçon commun.

Étudions maintenant le tronçon commun terminal.

- (512) 472 - 8.008.877.000 En fait - 8.008.877.C. : transfert du résultat en C et la suite.
- (513) contient- 0.033.514.000 (831) Si l'analyse a lieu
- 0.033.515.000 (832) S'il n'y a pas analyse.

Nous sommes revenus en langage machine en même temps que l'analyse était rétablie.

.../...

0514	71.0977.0593	Il y a analyse, on perfore :	"A"
0593	71.0927.0834	"	"
0834	71.0877.0515	"	"
			"C"
0515	60.0936.1382	Rappel de 60. N .1550	
1382	10.1908.1000	Rappel de 60.N+1.1550	

Nous passons à l'instruction suivante contenue dans la mémoire N + 1.

I - 1 - b - Les ordres positifs à 2 adresses + 0. ϕ_2 .B.C. (ordres électriques) (1390).

Les ordres positifs à 2 adresses sont eux aussi de 2 types :

1° Les ordres électriques élémentaires, écrits en langage machine, calculant l'impédance d'un dipôle constitué par un seul élément (self, capacité ou résistance). Nous avons regroupé avec les ordres électriques élémentaires 2 ordres non électriques, l'un calcule le module et l'argument d'un nombre complexe, l'autre est un ordre logique de test sur le module.

2° Les ordres électriques écrits en langage FLEC, à partir des ordres électriques élémentaires et des ordres opérationnels et fonctionnels FLEC. Ces ordres calculent l'impédance de dipôles ayant au moins 2 éléments et 4 éléments au plus ; ils calculent aussi Γ et préparent la matrice de chaîne de quadripôle élémentaire.

1390 35.0002.1348

1348 44.1751.1352 Test $\phi_2 < 10 ?$

I - 1 b - Ordres électriques élémentaires - Figure 4 (1352).

En 1352 et la suite, on appelle "B" (B,B+1) en 1931-1932, puis on forme la quantité $1010 + \phi_1$, que l'on prend comme instruction suivante.

1010 : Ordre + 0.000.B.C. : Il y a saut en C si le module du "résultat précédent", qui se trouve en 1933-1934, est supérieur au module du nombre complexe $b + jb'$ mémorisé en B et B + 1.

Sinon l'instruction suivante est prise en séquence.

.../...

1011 : Ordre + 0.001.B.C, calcule le module et l'argument du nombre $b + jb'$ placé en B et B + 1, place le module en C et l'argument évalué en radians en C + 1.

<u>1011</u>	65.1408.1664	
1664	69.1568. <u>1200</u>	Entrée dans le sous-prog de multiplic.
1408	00.1931.1931	b x b
1568	20.1705.1658	b^2 est envoyé en 1705
1658	65.1790.1746	
1746	69.1949. <u>1200</u>	
1790	00.1932.1932	b' x b'
1949	20.1655.1708	b'^2 est envoyé en 1655
1708	65.1836.1441	
1441	69.1244. <u>1100</u>	Entrée dans le sous-prog d'addition
1836	00.1705.1655	$b^2 + b'^2$ en 8002
1244	69.1999. <u>1300</u>	Entrée dans le sous-prog de racine carrée
1999	20.1933.1936	$b^2 + b'^2$ en 1933
1930	65.1940.1796	
1796	69.1900. <u>1400</u>	Entrée dans le sous-prog de division
1940	00.1932.1933	$b' : \sqrt{b^2 + b'^2}$
1900	69.1648. <u>1650</u>	Entrée dans le sous-prog d'arcsinus
<u>1648</u>	20.1934. <u>1850</u>	

Vers transfert de 1933 et 1934 en C et C+1.

1012 : Ordre + 0.002.B.C.

En B se trouve la résistance R, B + 1 n'intervient pas, on veut placer R en C, et zéro en C + 1. De plus, on fera apparaître ω (0001) la pulsation en 1929 en vue de l'analyse.

<u>1012</u>	60.1931.0485	
<u>0485</u>	21.1933.0436	
0436	69.0001.0954	
0954	24.1929. <u>1648</u>	(Voir dernière instruction de l'ordre précédent).

.../...

1013 : Ordre + 0.003.B.C

En B se trouve la self L exprimée en henrys ; l'impédance correspondant à la pulsation ω , $Z = 0 + jL\omega$ sera placée en C (0) et C + 1 ($L\omega$).

<u>1013</u>	65.0866.0471	
0471	69.0485.1200	Entrée dans le sous-programme de mult.
0866	00.0001.1931	$\omega \times L$

1014 : Ordre + 0.004.B.C

En B, la capacité C en farads. $Z = 0 - \frac{j}{C\omega}$ viendra en C et C+1.

<u>1014</u>	65.0866.0771	
0771	69.0424.1200	
0424	20.1705.0758	$C\omega$ en 1705
0758	65.0761.0765	
0765	69.0468.1400	$-\frac{1}{C\omega}$
0468	66.8002.0485	
0761	00.1310.1705	En 1310 : 51.1000.0000.

1015 : Ordre + 0.005.B.C.

Cet ordre calcule l'impédance d'une self définie à partir d'une capacité C_0 et de la pulsation de résonance ω_0 avec cette capacité C_0 se trouve en B, ω_0 en B + 1, $L_0 = \frac{1}{C_0 \omega_0^2}$ $Z = 0 + \frac{j\omega}{C_0 \omega_0^2}$

<u>1015</u>	65.1790.0846	
0846	69.0449.1200	
1790	00.1932.1932	$\omega_0 \times \omega_0$
0446	20.1929.0432	ω_0^2 en 1929
0432	65.1904.0959	
0959	69.0762.1200	
1904	00.1929.1931	$C_0 \times \omega_0^2$
0762	20.1930.0433	$C_0 \omega_0^2$ en 1930
0433	65.0486.0791	
0791	69.0485.1400	
0486	00.0001.1930	$\omega / C \omega_0^2$

Les ordres + 0.006, 7, 8, 9 restent disponibles.

.../...

I - 1 - b - β - Ordres électriques écrits en FLEC. Figures 5 et 5bis (1751).

Comme les ordres matriciels, les ordres électriques écrits en FLEC se présentent sous forme de sous-programmes, pendant l'exécution desquels l'analyse a été supprimée.

Ici, l'analyse nécessite seulement la perforation de 3 cartes, puisque ce sont des ordres à deux adresses. La première carte contient l'adresse de l'instruction analysée et l'instruction elle-même ; la seconde "B" et la troisième "C". "B" et "C" pourront représenter 2,4, ou 8 mémoires.

<u>1751</u>	35.0001.0858	} Aiguillage principal Préparation de l'ordre : Aller à 537 + ϕ_2 - D.000.000.(537 + ϕ_2)
0858	10.0962.0872	
0872	61.8003.0989	
0989	21.0546.0951	
0951	60.8000.0860	Analyse si "8000" < 0
0860	46.0922.0972	Test sur le signe du pupitre
0922	71.1927.0990	Perfo de 60.N.1550 et de 0. ϕ_2 .B.C.
0990	69.0844.0908	} Aiguillage en vue de la perfo de "B" {(927) et de "C" (877) s'il y a analyse.
0972	69.0832.0908	
0908	24.0592.0958	
0958	69.1927.0894	Mise de côté de 60.N.1550
0894	24.0936.0944	
0944	66.1166.	Préparation de l'ordre de transfert de - B "B" en 927
	30.0004.	
	15.0910.	- 8.004.000.927
	20.0545.	- 8.004. <u>B</u> .927 envoyé en 545
	66.1693.	Préparation de l'ordre de transfert de - C "C" en 877
	30.0007.	
	15.0824.	- 8.002.877.000
	20.0591.0924	- 8.002.877. <u>C</u> envoyé en 591
0924	60.0546.	
	10.0825.	Test ϕ_2 < 45 ?
	46.0925.0975	

.../...

0925	60.0591.	0925 si $\phi_2 > 45$ l'ordre de transfert du résultat en C est modifié il devient :
	11.0822.	
	21.0591.0975	- 8.008.877.C (591)
0975	60.0543.1000	Entrée Interne en FLEC
0543	60.0544.1550	en 544
	544 - 0.031.000.000	Suppression de l'analyse.
(545)	910 - 8.004.000.927	En fait : - 8.004.B.927
(546)	962 0.000.000.537	En fait : - 0.000.000.537 + ϕ_2 .
Ordre + 0.010	Disponible	
+ 0.011	548 - 0.000.000.588	L'ordre 0.011 commence en 588.
+ 0.012	549 - 0.000.000.594	" 0.012 " 594
+ 0.013	550 - 0.000.000.598	" 0.013 " 598
.....		
+ 0.040	577 - 0.000.000.697	" 0.040 " 697
+ 0.041	578 - 0.000.000.700	" 0.041 " 700
+ 0.042	} Disponibles	
+ 0.043		
+ 0.044		

Les ordres dont le code $\phi_2 \geq 45$ fournissent des résultats de 8 mots, "C" signifie alors C à C + 7, au lieu de C, C + 1.

Ordre + 0.045	582 - 0.000.000.705	L'ordre 0.045 commence en 705
+ 0.046	583 - 0.000.000.711	" 0.046 " 711
+ 0.047	584 - 0.000.000.715	" 0.047 " 715
+ 0.048	585 - 0.000.000.723	" 0.048 " 723

Etudions maintenant quelques ordres :

Ordre + 0.011.B.C.



C_0 est placée en B, L_0 en B + 1. On se propose de calculer l'impédance de ce dipôle $Z = 0 + jL_0 \omega - \frac{j}{C_0 \omega}$, de placer $\frac{L_0 C_0 \omega^2 - 1}{C_0 \omega}$ en C + 1, et zéro en C.

.../...

<u>588</u>	0.003.928.979	$Z_1 = jL_0 \omega$
589	0.004.927.977	$Z_2 = -j/C_0 \omega$
590	1.977.979.877	$Z = Z_1 + Z_2$ en 877-878

Nous arrivons au tronc commun qui commence en 591.

(591) 824 -8.002.877.000 En fait - 8.002.877.C ou - 8.008.877.C
Transfert de 877 en "C".

(592) 844 -0.033.593.000 Retour en langage machine en 593 avec
rétablissement, ceci quand il y a analyse.
analyse.

ou bien contient 832 - 0.033.515.000 Retour en langage machine en
515 avec rétablissement de l'analyse, ceci dans le cas où il n'y a
pas analyse.

0593 71.0927.0834 Il y a analyse et on perfore "B" (927-934)
0834 71.0877.0515 "C" (877)

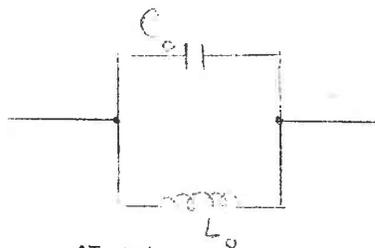
0515 60.0936.1382 Rappel de 60.N.1550 qui devient
1382 10.1908.1000 60.N+1.1550

Nous passons à la décodification de l'instruction suivante N + 1.

Ordre + 0.012.B.C.

C_0 : en B ; L_0 : en B + 1

$$Z = \frac{1}{jC_0 \omega + \frac{1}{jL_0 \omega}}$$

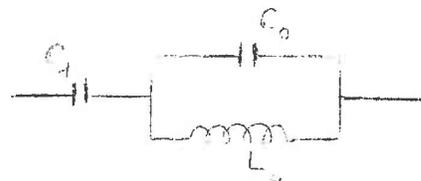


<u>594</u>	0.003.928.979	$Z_1 = jL_0 \omega$
595	0.004.927.977	$Z_2 = -j/C_0 \omega$
596	5.977.979.877	$1/Z = 1/Z_1 + 1/Z_2$
597	- 0.000.000.591	Vers le tronc commun.

Ordre + 0.013.B.C.

C_1 : en B ; C_0 : en B+1 ; L_0 : en B+2

<u>598</u>	0.003.929.979	$Z_1 = jL_0 \omega$
599	0.004.928.977	$Z_2 = -j/C_0 \omega$

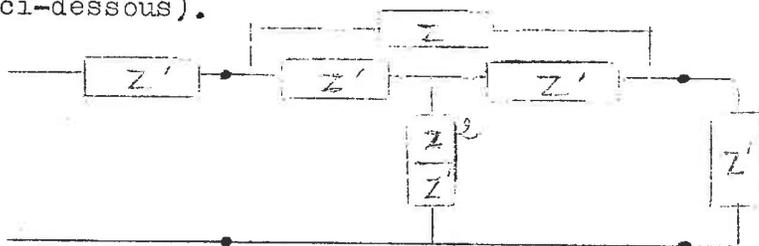


.../...

600	5.979.977.979	$1/Z_3 = 1/Z_1 + 1/Z_2$	↑ + 0.011.B.C
601	- 0.000.000.589	589 est une instruction de l'ordre	
(589	0.004.927.977	$Z_4 = -j/C_1$	
590	1.977.979.877	$Z = Z_3 + Z_4$	

Ordre + 0.041.B.C

Cet ordre, contrairement aux 30 précédents, ne calcule pas une impédance en fonction de ses éléments, mais l'affaiblissement A et le déphasage ψ d'un té ponté équilibré à impédance constante (voir schéma ci-dessous).



$$e^{\Gamma} = e^{A+j\psi} = 1 + \frac{Z}{Z'}$$

$$A = \text{Log} \left| 1 + \frac{Z}{Z'} \right|$$

$$\psi = \text{Argument} \left(1 + \frac{Z}{Z'} \right)$$

Z est placé en B, B+1 et Z' en B+2, B+3.

De plus, $1 + 0j$ (un complexe virgule flottante) est mémorisé en 490-491

700	4.927.929.977	Z/Z' en 977
701	1.490.977.979	$1 + Z/Z'$ en 979
702	0.001.979.877	e^A et ψ en 877-878
703	- 0.022.877.877	A en 877
704	- 0.000.000.591	Vers le tronc commun.

Les ordres + 0.042.B.C, 0.043 et 0.044 sont disponibles.

Si l'on veut les utiliser, il suffit de se rappeler que l'ordre + 0.042.B.C, commence en 579 (42 + 537) par un saut 579 - 0.000.000.XXX, XXX étant l'adresse du début proprement dit du sous-programme constituant le nouvel ordre.

Pour les ordres + 0.043 et 0.044.B.C on ferait de même :

Ordre 043 : 580 - 0.000.000.YYY

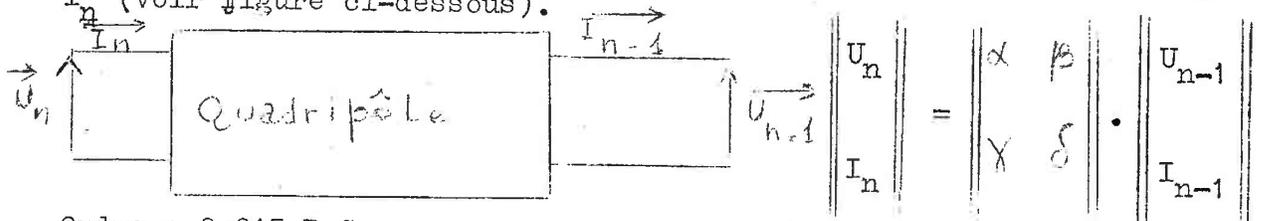
Ordre 044 : 581 - 0.000.000.ZZZ

Les trois sous-programmes constituant ces trois ordres nouveaux devront se terminer obligatoirement par un ordre d'aller au tronc commun :
- 0.000.000.591.

.../...

Les 4 ordres que nous allons envisager à présent, calculent les matrices de chaîne de quadripôles classiques.

Définition de la matrice de chaîne d'un quadripôle : c'est la matrice carrée qui permet, connaissant U_{n-1} et I_{n-1} de calculer U_n et I_n (voir figure ci-dessous).



Ordre + 0.045.B.C

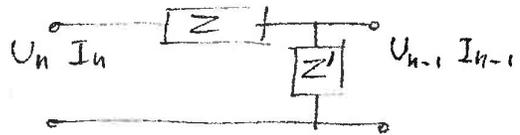
$$U_n = ZI_n + U_{n-1} = \left(1 + \frac{Z}{Z'}\right) U_{n-1} + ZI_{n-1}$$

$$I_n = \frac{U_{n-1}}{Z'} + I_{n-1} = \frac{U_{n-1}}{Z'} + I_{n-1}$$

$$U_n = \alpha U_{n-1} + \beta I_{n-1}$$

$$I_n = \gamma U_{n-1} + \delta I_{n-1}$$

$$\begin{bmatrix} U_n \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z}{Z'} & Z \\ \frac{1}{Z'} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{n-1} \\ I_{n-1} \end{bmatrix}$$



$$\alpha = 1 + \frac{Z}{Z'}; \beta = Z; \gamma = \frac{1}{Z'}; \delta = 1.$$

On placera Z en B et B+1, et Z' en B+2, B+3.

On obtiendra α en C, C+1 ; β en C+2, C+3 ; γ en C+4, C+5 ; δ en C+6, C+7.

705 4.927.929.877 Z/Z'

706 1.877.490.877 $1 + Z/Z' = \alpha$

707 - 8.002.490.883 $1 = \delta$

708 - 8.002.927.879 $Z = \beta$

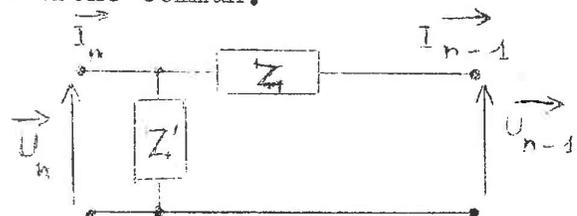
709 4.490.929.881 $1/Z' = \gamma$

710 - 0.000.000.591 Vers tronc commun.

Ordre + 0.046.B.C.

$$\alpha = 1; \beta = Z;$$

$$\gamma = \frac{1}{Z'}; \delta = 1 + \frac{Z}{Z'}$$



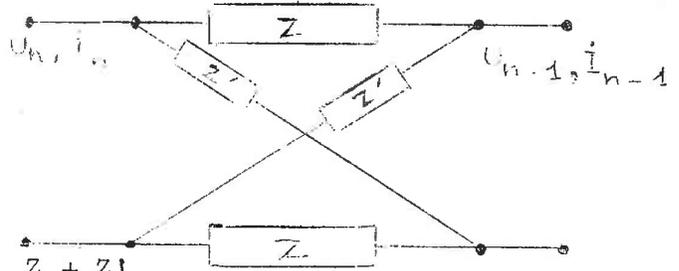
Nous utiliserons une partie du sous-programme constituant l'ordre précédent puisque β et γ sont identiques.

.../...

711	4.927.929.883
712	1.883.490.883
713	-8.002.490.877
714	-0.000.000.708

Z/Z'
 $1 + Z/Z' = \delta$
 $1 = \alpha$

Vers programme précédent
 sous



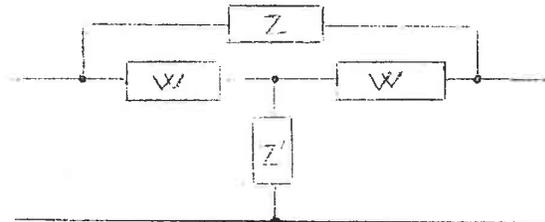
Ordre + 0.047.B.C

$\alpha = \frac{Z' + Z}{Z' - Z}$ $\beta = \frac{2ZZ'}{Z' - Z}$
 $\gamma = \frac{2}{Z' - Z}$ $\delta = \frac{Z' + Z}{Z' - Z}$

715	1.929.927.877
716	2.929.927.883
717	4.877.883.877
718	3.929.927.879
719	4.492.883.881
720	3.881.879.879
721	-8.002.877.883
722	-0.000.000.591

$Z + Z'$
 $Z' - Z$
 $\alpha = Z + Z'/Z - Z'$
 ZZ'
 $2/(Z' - Z) = \gamma$ (2 se trouvait en 492-3)
 $2ZZ'/(Z' - Z) = \beta$
 $(Z + Z')/(Z - Z') = \delta$

Vers tronc commun.



Ordre + 0.048.B.C

$\alpha = \delta = 1 + \frac{Z}{2(W+Z')}$
 $\gamma = \frac{2Z'+W}{2Z'(W+Z')}$ $\beta = \frac{(2Z'+W)Z}{2(W+Z')}$

723	3.927.929.883
724	-0.026.883.879
725	1.879.929.881
726	1.881.929.881
727	1.881.879.877
728	4.927.877.877
729	3.881.877.979
730	4.879.883.881
731	1.490.877.877
732	-8.002.877.883
733	-0.000.000.591

$W^2 = ZZ'$
 W^2 réel positif
 $W = \sqrt{ZZ'}$
 $W + Z'$
 $W + 2Z'$
 $Z/2(W + Z')$
 $Z(W + 2Z')/2(W + Z') = \beta$

Vers tronc commun.

Les ordres + 0.049B.C et + 0.050.B.C du même type que les 4 précédents sont disponibles.

.../...

I - 2 - LES ORDRES NEGATIFS (1903).

1903	21.1928	Transfert de - ϕ_1 .A.B.C en 1928
	61.8003	(mot 2 de la zône d'analyse)
	30.0003	.
	16.8002	
	24.1693	CCC 0.... 0 envoyé en 1693
	30.0003	
	16.8002	
	24.1166	BBB 0.... 0 envoyé en 1166
	30.0003	
	20.1282.1935	AAA 0.... 0 envoyé en 1282
1935	44.1490.1540	Test $\phi_1 \neq 0$.

I - 2 - a - Les ordres négatifs à 3 adresses - ϕ_1 .A.B.C (1490).Fig.6.

Les ordres négatifs à 3 adresses sont de deux types : les ordres d'opération sur des nombres réels et l'ordre d'entrée dans un sous-programme écrit en langage machine d'une part et les ordres de translation et de perforation d'autre part.

<u>1490</u>	11.1743.1498	$\phi_1 - 8$
1498	46. <u>1801.1402</u>	Si $\phi_1 < 8$ aller à 1801
<u>1801</u>	10.1654.1560	$\phi_1 - 8 + 1028 = 1020 + \phi_1$
1560	21.1144.1548	00.0000.1020 + ϕ_1
1548	65.8002.1907	
1907	30.0003.1665	
1665	15.1368.8002	
1368	69.0000.1704	69.A.1704
1704	24.1929.1532	Envoi de A en 1929
1532	65.1166.1521	
1521	30.0003.1629	
1629	15.1582.8002	

.../...

1582	69.0000.1754	69.B.1754
1754	24.1931.1144	Envoi de B en 1931
(1144)	(00.0000.1020+ ϕ_1)	Aiguillage
1402	10.1654.8003	$\phi_1 \geq 8$
(8003)	(00.0000.1020+ ϕ_1)	Aiguillage.

Le nombre désigné par A est un nombre réel exprimé en virgule flottante, mémorisé en A, le contenu de la mémoire A + 1 n'est pas considéré.

- 1.A.B.C exécute $A + B = C$
- 2.A.B.C " $A - B = C$
- 3.A.B.C " $A \times B = C$
- 4.A.B.C " $A : B = C$
- 5.A.B.C permet l'utilisation de sous-programmes écrits en langage machine de type classique. Le contenu de A vient en 8002. Dans le distributeur se trouve une instruction qui envoie le résultat en C et permet le retour en FLEC à l'instruction N + 1. La première instruction exécutée en langage machine est B.

Ordre - 1.A.B.C

<u>1021</u>	65.1904.1910	
1910	69.1714.1100	Entrée dans le sous-programme d'addition en virgule flottante.
1904	00.1929.1931	
1714	20.1933.1504	

Le tronc commun terminal des ordres négatifs à 3 adresses est la seconde moitié du tronc des ordres positifs (voir § I.1.a.α.)

Ordres - 2,3,4.A.B.C

<u>1022</u>	66.1904.1910	Soustraction
<u>1023</u>	65.1904.1661	
1661	69.1714.1200	Multiplication
<u>1024</u>	65.1904.1711	
1711	69.1714.1400	Division.

.../...

Ordre - 5.A.B.C

<u>1025</u>	65.1166.1621	
1621	35.0003.1779	
1779	21.1934.1987	En 1934 : 00.0000. $\overline{0B}$.
1987	65.1929.1533	le contenu de A est en 8002
1533	69.1714.1934	1714 : 20.1933.1504

Nous ne parlerons pas des ordres - 8.A.B.C (Translation d'une séquence de A mots, commençant en B, en C et la suite) et - 9.A.B.C (Perforation en "A mots par carte" de la séquence allant de B à C), ils ne présentent aucune particularité remarquable.

I - 2 - b - Les ordres négatifs à 2 adresses - 0. ϕ_2 .B.C (1540) Fig 7.

- Les ordres négatifs à 2 adresses se divisent en 2 groupes :
- 1) les ordres nécessitant une préanalyse (analyse avant exécution) comme, par exemple, les tests, les compteurs.
 - 2) les ordres normaux, calcul de fonction, ayant une analyse après exécution de l'ordre.

<u>1540</u>	65.1166.1571	
1571	30.0003.1679	
1679	15.1632.8002	
1632	69.0000.1804	69.B.1804
1804	24.1931.1184	B en 1931
1184	65.1282.1587	
1587	35.0003.1395	
1395	11.1598.1854	$\phi_2 - 15$
1854	46. <u>1258.1308</u>	Test $\phi_2 < 15 ?$
<u>1258</u>	10.1561.1715	ϕ_2 est < 15
1715	21.1929.1682	Préparation de 00.0000.1030+ ϕ_2
1682	60.8000.1590	} Préanalyse
1590	46.1793.1929	
1793	71.1927.1929	
(1929)	(00.0000.1030+ ϕ_2)	} Aller à 1030 + ϕ_2
<u>1308</u>	10.1561.8003	} Préparation de 00.0000.1030+ ϕ_2 Aiguillage.
(8003)	(00.0000.1030+ ϕ_2)	

Ordre - 0.000.B.C

Saut inconditionnel en "C"

<u>1030</u>	65.1693.1602	000.....0
1602	30.0003.1712	00.CC.0000.
1712	69.1927.1430	60.N.1550
1430	22.1927.8001	60.C.1550
(8001)	60. C .1550	

Ordre - 0.001.B.C

Arrêt (si l'interrupteur arrêt est sur "effectif") et saut en "C"

<u>1031</u>	01.0000.1030
-------------	--------------

Ordre - 0.002.B.C

Retour en langage machine en "B"

<u>1032</u>	65.1166.1821	B00.....0
1821	35.0003.8003	00.0000.0B.

Ordre - 0.003.B.C

Saut en "C" si 9, en 7ème position du pupitre

Saut en "B" si 8, et erreur si un chiffre autre que 9 ou 8.

<u>1033</u>	69.8000.1990	
1990	97.1943.1030	1030 : Saut en C
1943	65.1166.1602	1602 : Saut en B (voir ordre - 0.000)

Nous passons sur les deux ordres de perturbations que nous considérons à part à cause de leur importance.

L'ordre - 0.006; ainsi que les ordres - 0.011 à 014 n'existent pas mais restent possibles.

Ordre - 0.007.B.C

Saut en "C" si le résultat précédent est supérieur au contenu de la mémoire B. Le résultat précédent se trouve en 1933.

<u>1037</u>	65.1933.1488	
1488	16.1951.1538	
1538	46.1615.1030	1030 : Saut en "C"
		1615 : en séquence (N + 1).

.../...

Ordre - 0.008.B.C

Le contenu du compteur (primitivement à zéro) est comparé au contenu de B.

CTR \neq B on augmente le CTR de 00.0000.0001 et il y a saut en "C".
CTR = B le compteur est ramené à 0 et l'on va en séquence.

1038	65.1008.1716	1008 est la mémoire compteur
1716	16.1931.1788	. CTR - B
1788	45.1692.1344	
1692	15.1931.1838	
1838	15.1354.1766	
1766	20.1008.1030	CTR + 1 \rightarrow CTR et saut en "C"
1344	21.1009.1615	CTR = 0 en séquence (N + 1).

Ordre - 0.020.B.C

Modification d'adresse : addition machine

L'instruction contenue en C est augmentée du contenu de B.

1050	65.1693.1852	CCCC.....0
1852	30.0003.1966	00.00.0000
1966	69.1420.1823	
1823	22.1420.1873	21.C.1554
1873	15.1576.8002	60.C.1905
(8002)	60. C .1905	
1905	10.1931.1420	
1420	21. C .1554	Vers analyse et instruction FLEC N+1.

Nous n'examinerons pas en détail les ordres de calcul de fonction qui sont de simples entrées dans les différents sous-programmes correspondants.

.../...

II - LES ORDRES DE PERTURBATION.-

Considérons un quadripôle dépendant de plusieurs dipôles, chacun de ces dipôles étant fonction de selfs, capacités et résistances. L'étude de l'influence des tolérances de construction des éléments de ce réseau sur l'exposant de transfert composite, par exemple, nécessiterait que l'on repassât le même programme autant de fois qu'il y a d'éléments dans le réseau. Ce processus est non seulement fastidieux, mais encore il introduit une perte de temps considérable que l'on peut éviter.

En effet, calculons la valeur de l'impédance d'un des dipôles et ses "l" valeurs perturbées, si celui-ci dépend de "l" éléments. Procédons de même avec les autres dipôles. Il ne reste plus qu'à écrire un programme calculant l'exposant de transfert en fonction uniquement des quelques dipôles et assez automatique pour aller chercher les unes après les autres les valeurs perturbées des impédances des dipôles. De cette façon, nous ne recalculons pas inutilement à chaque passage les mêmes impédances. C'est d'après ce principe que fonctionnent les deux ordres de perturbation dont nous allons définir les propriétés.

II - 1 - ORDRE DE PERTURBATION SIMPLE - Fig 8.

Soit une fonction complexe $Z(A_1, A_2 \dots A_l)$ dépendant de "l" paramètres réels (1 mémoire) $A_1, A_2 \dots A_l$ mémorisés en séquence à partir de A. On se propose de calculer successivement :

- $Z(A_1, A_2 \dots A_l)$ que l'on placera en R et R + 1
- $Z(A_1^*, A_2 \dots A_l)$ que l'on placera en R + 2 et R + 3
- $Z(A_1, A_2^* \dots A_l)$ que l'on placera en R + 4 et R + 5
-
- $Z(A_1, A_2 \dots A_l^*)$ que l'on placera en R + 2l et R + 2l + 1.

.../...

Notation : A_i^* représente la valeur perturbée de A_i
 $A_i^* = k \cdot A_i$; k est le coefficient perturbateur (il doit être chargé dans la mémoire A - 1).

Exemple : Si l'on veut perturber les paramètres d'une certaine fonction de 1 %, on prendra $k = 1,01$ (k doit être exprimé en virgule flottante FLEC $k = 51.1010.0000$).

Présentation de l'ordre : -0.004.B.C

en B : 1 A R
 xx xxxx xxxx

"C" est la première adresse du sous-programme de calcul de $Z(A_1, A_2 \dots A_l)$ écrit en FLEC. Ce sous-programme doit placer le résultat en 997 - 998 et retourner en langage machine en 0999 (il doit donc se terminer par l'ordre - 0.002.999.000).

"l" est le nombre d'éléments à perturber.

R et R + 1 sont les adresses des mémoires où seront envoyés partie réelle et partie imaginaire de $Z(A_1, A_2 \dots A_l)$.

Les valeurs perturbées de Z viendront se placer en séquence en R + 2 R + 3, etc...

Enfin, nous avons placé en :

- A - 1 : le coefficient perturbateur
- A : A_1 , premier élément à perturber
- A + 1 : A_2 , deuxième élément à perturber
-
- A + l-1 : A_l , l^{ième} élément à perturber.

1034	69.1927.1780	}	Mise de côté de 60.N.1550
1780	24.1584.1494		
1494	65.1693.1806	}	Appel de "C" Préparation de l'entrée en FLEC en C (calcul de Z).
1806	30.0003.1970		
1970	69.1524.1827		
1827	22.1524.1128		

.../...

1128	65.1931.1544	Appel de B : I.A.R
1544	69.1856.1572	
1572	22.1856.1622	00.A.9984
1622	69.1925.1178	
1178	22.1925.1228	20.A.1972
1228	69.1634.1594	
1594	22.1634.1644	20.A.1894
1644	35.0004.1906	
1906	69.1672.1975	
1975	22.1672.1676	24.R.1744
1676	15.1908.1722	
1722	69.1726.1830	
1830	22.1726.1684	24.R+1.1794
1684	30.0008.1772	
1772	69.8003.1278	
1278	22.1734.1694	00.l.0000 : compteur
1694	65.1856.1822	
1822	16.1908.1872	
1872	30.0004.1784	
1784	69.1856.1922	
1922	23.1856.1972	00.A.A - 1. (constante)
1972	60.1524.1000	Entrée en FLEC (calcul de Z)
1524	60.9990.1550	60.C.1550
0999	69.0997.1672	} Transfert de Z en R, R + 1.
1672	24.9989.1744	
1744	69.0998.1726	
1726	24.9988.1794	
1794	60.1672.1328	} Modification d'adresse
1328	10.1756.1574	
1574	21.1672.1776	
1776	60.1726.1834	
1834	10.1756.1624	
1624	21.1726.1844	24.R+2i.1744 24.R+1+2i.1794

.../...

1844	69.1674.1378	Aiguillage, on ne repassera plus en 1844.
1378	24.1624.1428	
<u>1428</u>	65.1856.1724	Calcul de $A_i^* = A_i \times k$ Entrée en FLEC (calcul de Z)
1724	69.1925.1200	
1925	20.9987. <u>1972</u>	Calcul de $A_i = A_i^* : k$
1774	65.1856.1824	
1824	69.1634.1400	
1634	20.9986.1894	
1894	60.1734.1944	Comptage du nombre des éléments à perturber.
1944	11.1908.1874	
1874	21.1734.1924	
1924	44.1478.1528	
1478	65.1856.1974	Modifications d'adresse
1974	15.1908.1826	
1826	20.1856.1876	00.A+i.A-1.
1876	69.1925.1578	20.A+i.1972
1578	22.1925.1628	
1628	69.1634.1926	20.A+i.1894
1926	22.1634. <u>1428</u>	
1528	69.1976.1678	Sortie
1678	24.1624.1728	Aller à l'instruction FLEC "N+1" après retour à l'état initial de l'aiguillage en 1624
1728	60.1584.1382	
1674	21.1726.1774	Constantes
1976	21.1726.1844	
1856	00.9985.9984	

.../...

II - 2 - ORDRE DE PERTURBATION GENERALE - Fig. 9 -

Nous nous proposons de calculer une fonction $F(Z_1, Z_2 \dots Z_p)$ lorsque chaque élément Z_1 puis $Z_2 \dots Z_p$ subit des perturbations. Ces perturbations sont définies par le tableau suivant :

$Z_1, Z'_1, Z''_1, Z'''_1 \dots$	placés en séquence en Z_1 et la suite : N_1 termes occupant $2N_1$ mémoires car Z_1 est complexe.
$Z_2, Z'_2, Z''_2 \dots$	N_2 termes occupant $2N_2$ mémoires à partir de Z_2 .
$Z_p, Z'_p, Z''_p, Z'''_p \dots$	N_p termes occupant $2N_p$ mémoires à partir de Z_p .

L'ordre de perturbation générale place Z_1 en α_1 (2 mémoires) Z_2 en $\alpha_2 \dots Z_p$ en α_p ; il calcule $F(\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_p)$ c'est-à-dire $F(Z_1, Z_2 \dots Z_p)$ qui est envoyé en R et $R + 1$. Ensuite il remplace Z_1 par Z'_1 en α_1 et calcule $F(Z'_1, Z_2 \dots Z_p)$ qui est envoyé en $R + 2$ et $R + 3$, etc...

Après avoir épuisé les perturbations de Z_1 l'ordre de perturbation remet Z_1 en α_1 et c'est Z_2 qui est successivement remplacé par $Z'_2, Z''_2 \dots$ en α_2 et ainsi de suite, les valeurs perturbées de $F(Z_1, Z_2 \dots Z_p)$ venant se placer en séquence.

Présentation de l'ordre : - 0.005.B.C

B contient : 00 R D
 xx xxxx xxxx

"C" est l'adresse de départ en FLEC du sous-programme de calcul de $F(\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_p)$. Ce sous-programme doit placer le résultat en 964 - 965 et retourner en langage machine en 966 (son dernier ordre doit être : - 0.002.966.000).

D contient 00 p 0000 p est le nombre d'éléments à perturber
 xx xxxx xxxx

D + 1 contient N_1 Z_1 α_1 N_1 est le nombre augmenté de 1 de perturbations sur Z_1 . α_1 est l'adresse où Z_1 doit être envoyé pour permettre le calcul de $F(Z_1, Z_2 \dots Z_p)$
 xx xxxx xxxx

.../...

D + 2 contient N_2 Z_2 α_2

 D + p contient N_p Z_p α_p

1035	69.1927.0480	}	Mise de côté de 60.N.1550
0480	24.1584.0837		
0837	65.1693.0847		Appel de "C"
0847	30.0003.0855		
0855	69.1524.0477		
0477	22.1524.0777		Préparation entrée FLEC en "C"
0777	65.1931.0785		Appel de "B"
0785	69.0888.0841		- R -
0841	22.0888.0891		24.R.0780
0891	15.1908.0813		
0813	69.0916.0769		
0769	22.0916.0819		24.R+1.0829
0819	35.0004.0779		- D -
0779	69.0482.0835		
0835	22.0482.0885		65.D.0789
0885	69.0938.0941		
0941	22.0938.0991		65.D.0887
0991	69.0444.0897		
0897	22.0444.0482		65.D.0830
0482	65.9984.0789	}	Mise en place compteur p
0789	20.0793.0896		pour appel des Z_i en α_i .
0896	21.0850.0905		
0905	60.0938.0843	}	Modification d'adresse
0843	10.1908.0863		65.D+i.0887
0863	21.0938.8001		65.D+i.0887
0938	65.9983.0887		
0887	69.0890.0893		
0893	22.0890.0943		69. Z_i ..0434
0943	15.1908.0913		$Z_i + 1$

.../...

0913	69.0817.0770	
0770	22.0817.0820	69.Zi + 1.0867
0820	35.0004.0781	αi
0781	69.0434.0937	24. αi .0817
0937	22.0434.0987	
0987	15.1908.0963	
0963	69.0867.0870	$\alpha i + 1$
0870	22.0867.0890	24. $\alpha i + 1$.0890
0890	69.9982.0434	Appel de Zi
0434	24.9981.0817	envoyé en αi
0817	69.9980.0867	Appel de Zi + 1
0867	24.9979.0782	envoyé en $\alpha i + 1$
0782	60.0850.0955	
0955	10.1908.0464	} Comptage en éléments à perturber
0464	21.0850.0806	
0806	11.0793.0947	
0947	44.0905.0802	
0802	20.0850.0856	
0856	60.1524.1000	RAZ du compteur
0966	69.0964.0888	Entrée en FLEC en "C"
0888	24.9977.0780	Calcul de F
0780	69.0965.0916	} Transfert de F de 964-965 en R, R + 1
0916	24.9976.0829	
0829	60.0888.0993	} Modification d'adresse sur le transfert de F R \rightarrow R + 2 R + 1 \rightarrow R + 3
0993	10.1756.0811	
0811	21.0888.0442	
0442	60.0916.0821	
0821	10.1756.0861	
0861	21.0916.0869	
0869	69.0422.0775	Aiguillage à la sortie de 861
0775	24.0861.0764	On va en 919 au lieu de 869

.../...

0764 60.0444.0799
 0799 10.1908.0814
 0814 21.0444.0898
 0898 20.0906.0444
 0444 65.9975.0830
 0830 69.0483.0786
 0786 22.0483.0836
 0836 69.0859.0792
 0792 22.0839.0842
 0842 15.1908.0864
 0864 69.0917.0920
 0920 22.0917.0970
 0970 69.0773.0476
 0476 22.0773.0776
 0776 35.0004.0988
 0988 69.0892.0946
 0946 22.0892.0996
 0996 69.0849.0852
 0852 22.0849.0902
 0902 15.1908.0914
 0914 69.0967.0871
 0871 22.0967.0921
 0921 69.0474.0827
 0827 22.0474.0428
 0428 30.0002.0935
 0935 21.0940.0919
 0900 60.0906.0911
 0911 10.1354.0460
 0460 21.0906.0760
 0760 11.0940.0948
 0948 44.0839.0952

D + i

RAZ du CTR de perturbations
Appel de D + i (: N_i Z_i α_i)

69.Zi.0892

69.Zi.0849

Zi + 1

69.Zi + 1.0967

69.Zi + 1.0474

α_i

24.α_i.0917

24.α_i.0764

α_i + 1

24.α_i + 1.0764

24.α_i + 1.0856

Compteur en perturbations (N_i)

Comptage des perturbations
sur un élément.

0839	69.9974.0849	$Z_i, Z_i + 1$ en α_i et α_{i+1}
0849	24.9973.0773	
0773	69.9972.0474	Entrée en FLEC en "C"
0474	24.9971.0856	pour calcul de F
0422	21.0916.0919	2ème branche de l'aiguillage 861
0919	60.0839.0794	Modification d'adresse $Z_i \longrightarrow Z_i + 2$ $Z_i + 1 \longrightarrow Z_i + 3$
0794	10.1756.0961	
0961	21.0839.0942	
0942	60.0773.0478	
0478	10.1756.0812	
0812	21.0773.0900	
0952	60.0850.0956	Comptage principal des éléments (p)
0956	10.1908.0815	
0815	21.0850.0457	
0457	11.0793.0899	
0899	44.0483.0757	
0483	69.9970.0892	$Z_i, Z_i + 1$ en α_i et α_{i+1}
0892	24.9969.0917	
0917	69.9968.0967	
0967	24.9967.0764	
0757	69.0810.0865	Sortie : retour de l'aiguillage
0865	24.0861.1728	869 à sa position initiale.
0810	21.0916.0869	Constante
1728	60.1584.1382	Aller à l'instruction FLEC "N+1".

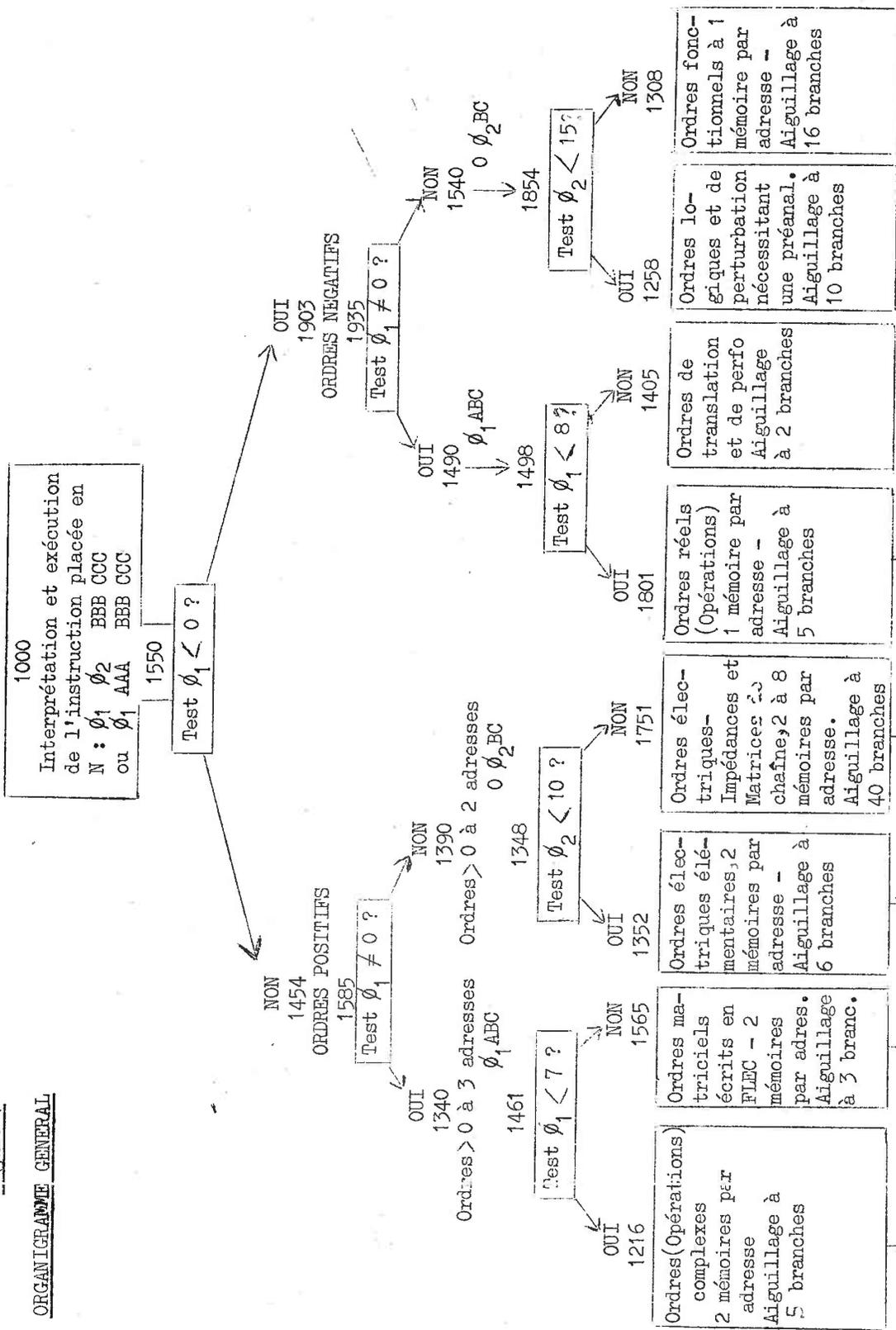
-:-:-:-:-:-:-:-:-:-

-:-:-:-:-:-:-

-:-:-

Figure 1

ORGANIGRAMME GENERAL

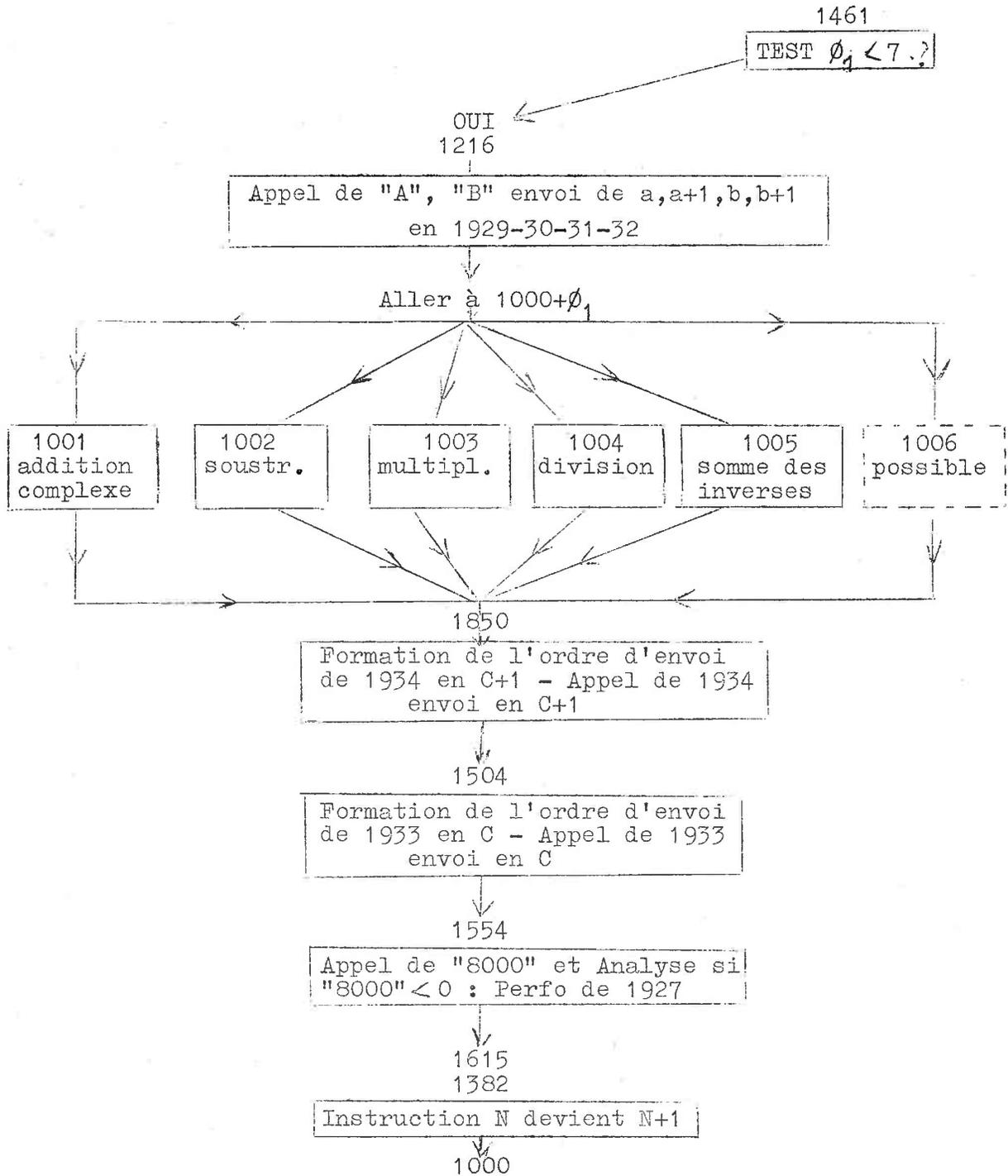


NOTE : Lorsque nous indiquons dans chacune des 8 branches : Aiguillage à N branches, N est le nombre d'ordres utilisés dans cette branche, N est souvent inférieur au nombre d'ordres possibles puisqu'en tout il y a 17 ordres sans emploi.

INSTRUCTION N + 1

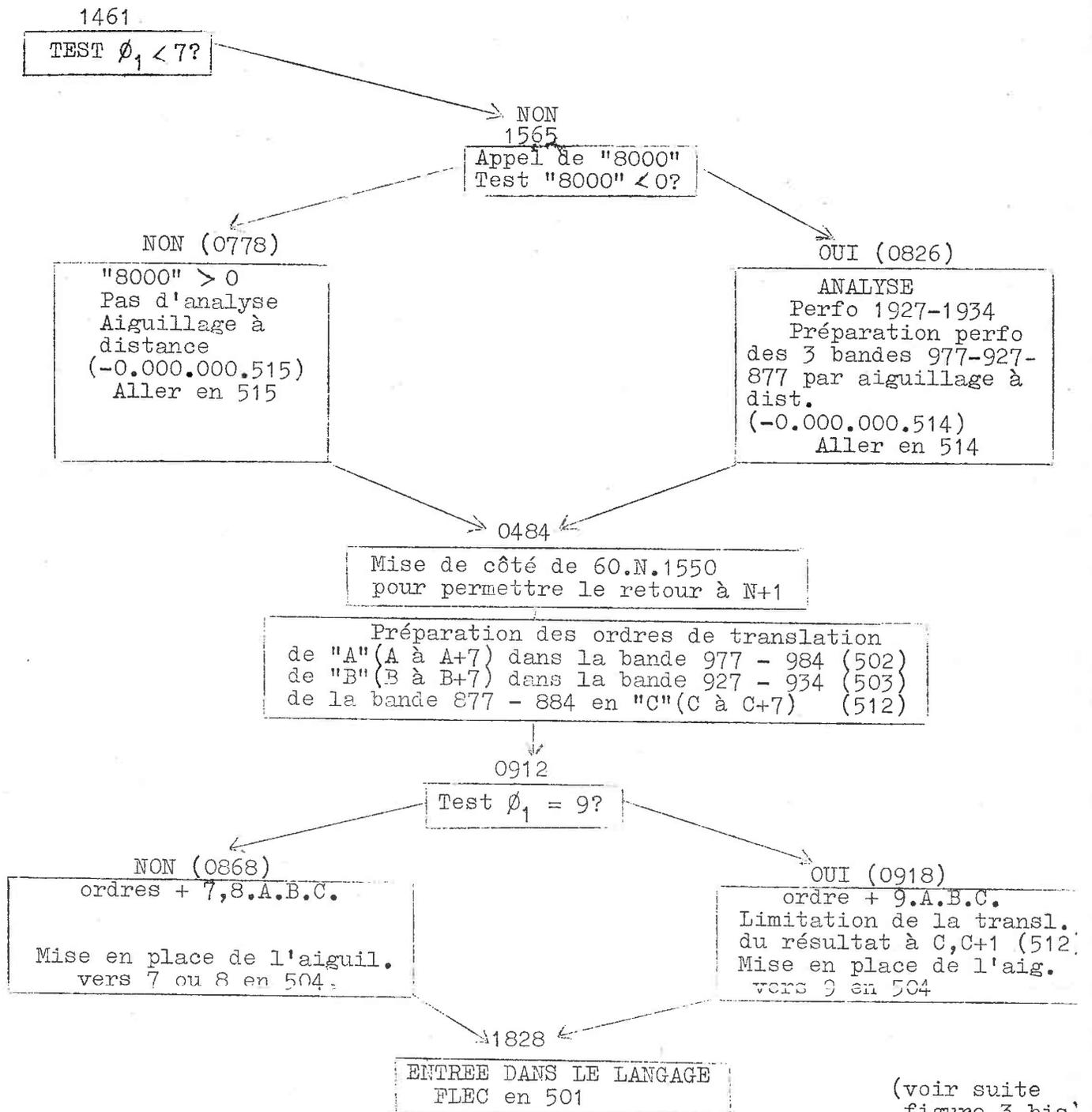
F I G U R E 2

-- OPERATIONS SUR DES NOMBRES COMPLEXES --



F I G U R E 3

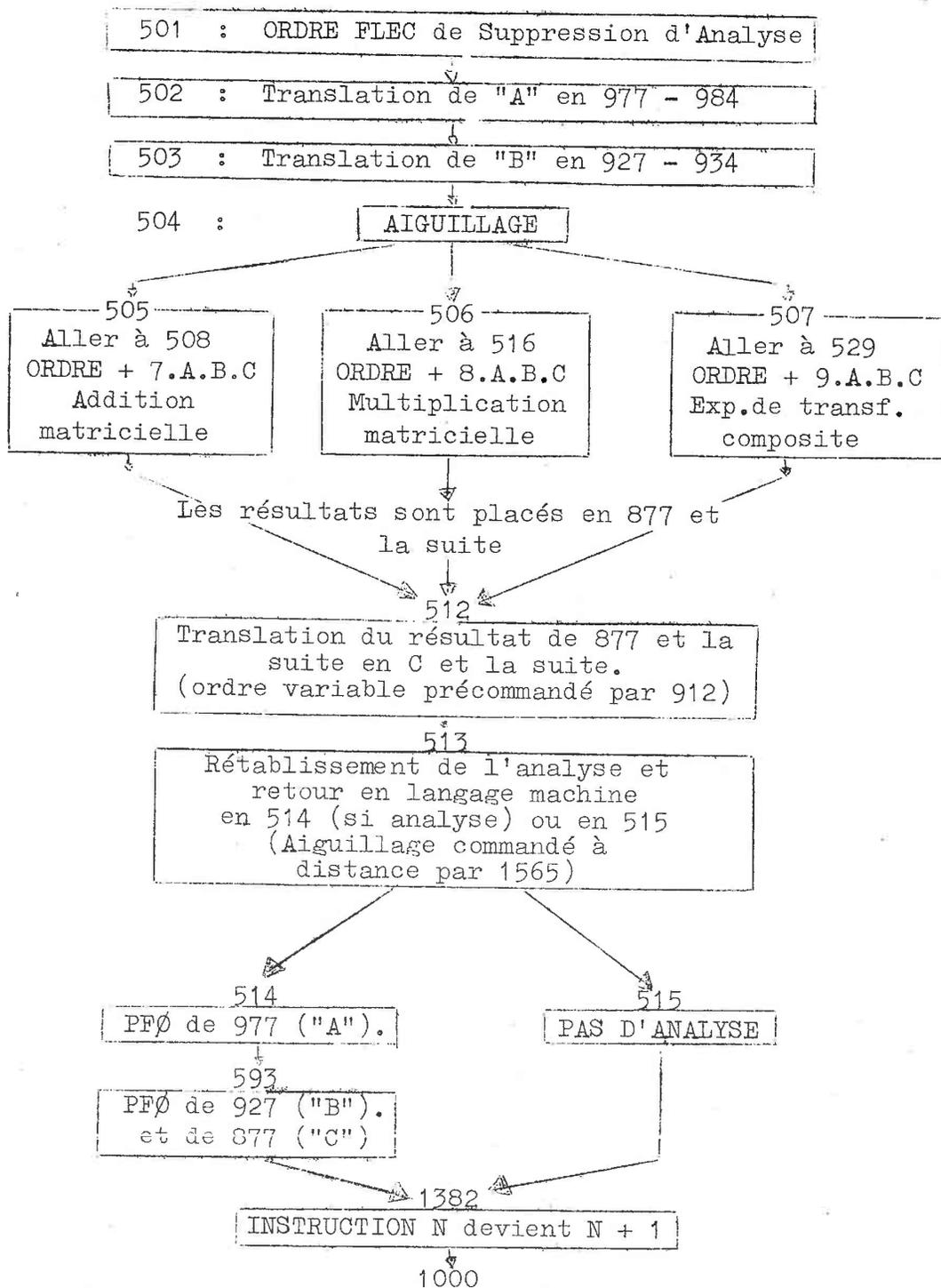
-- OPERATIONS MATRICIELLES --



(voir suite
figure 3 bis)

FIGURE 3 bis

OPERATIONS MATRICIELLES (suite de la figure 3)



F I G U R E 4

--- ORDRES ELECTRIQUES ELEMENTAIRES ---

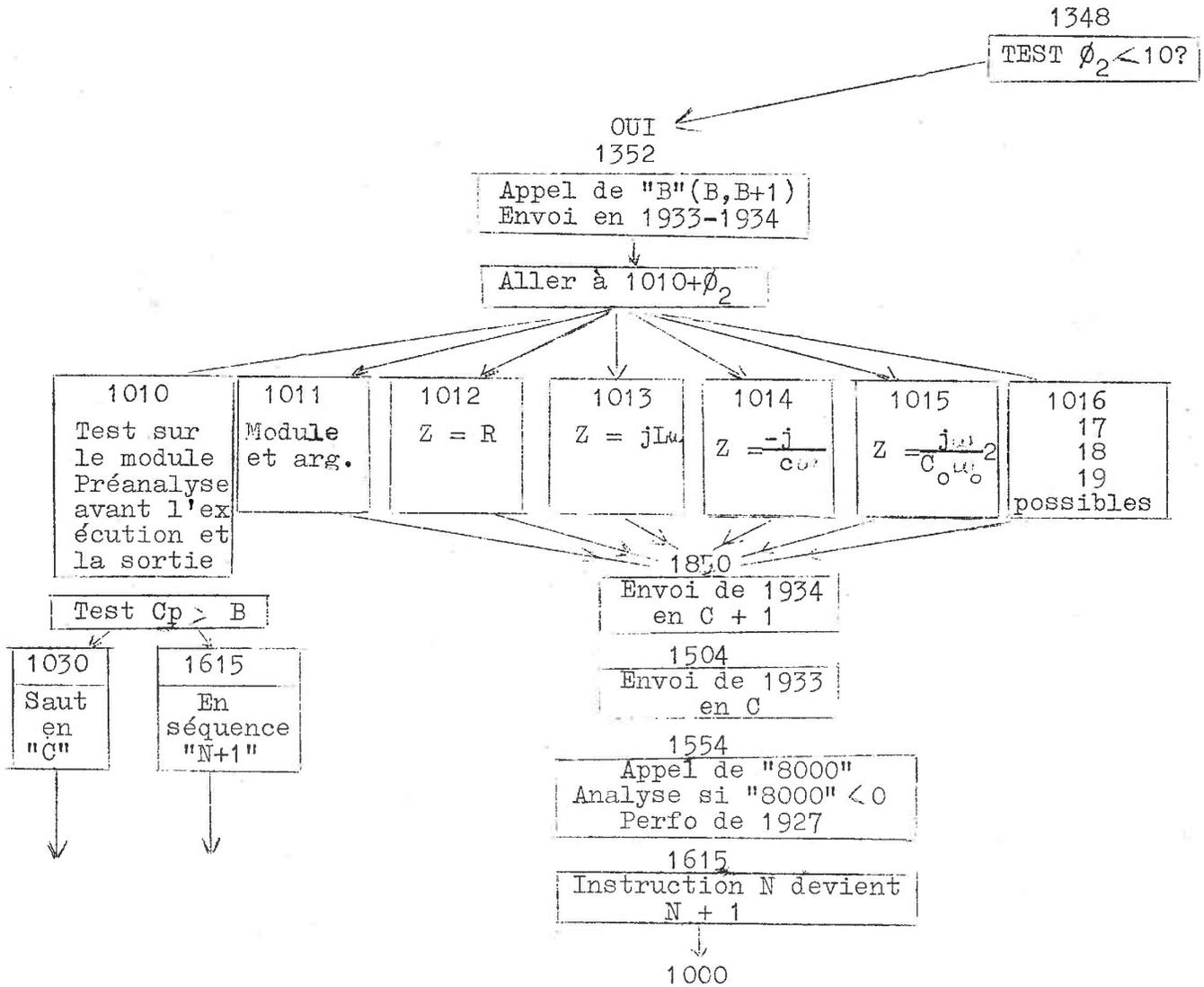
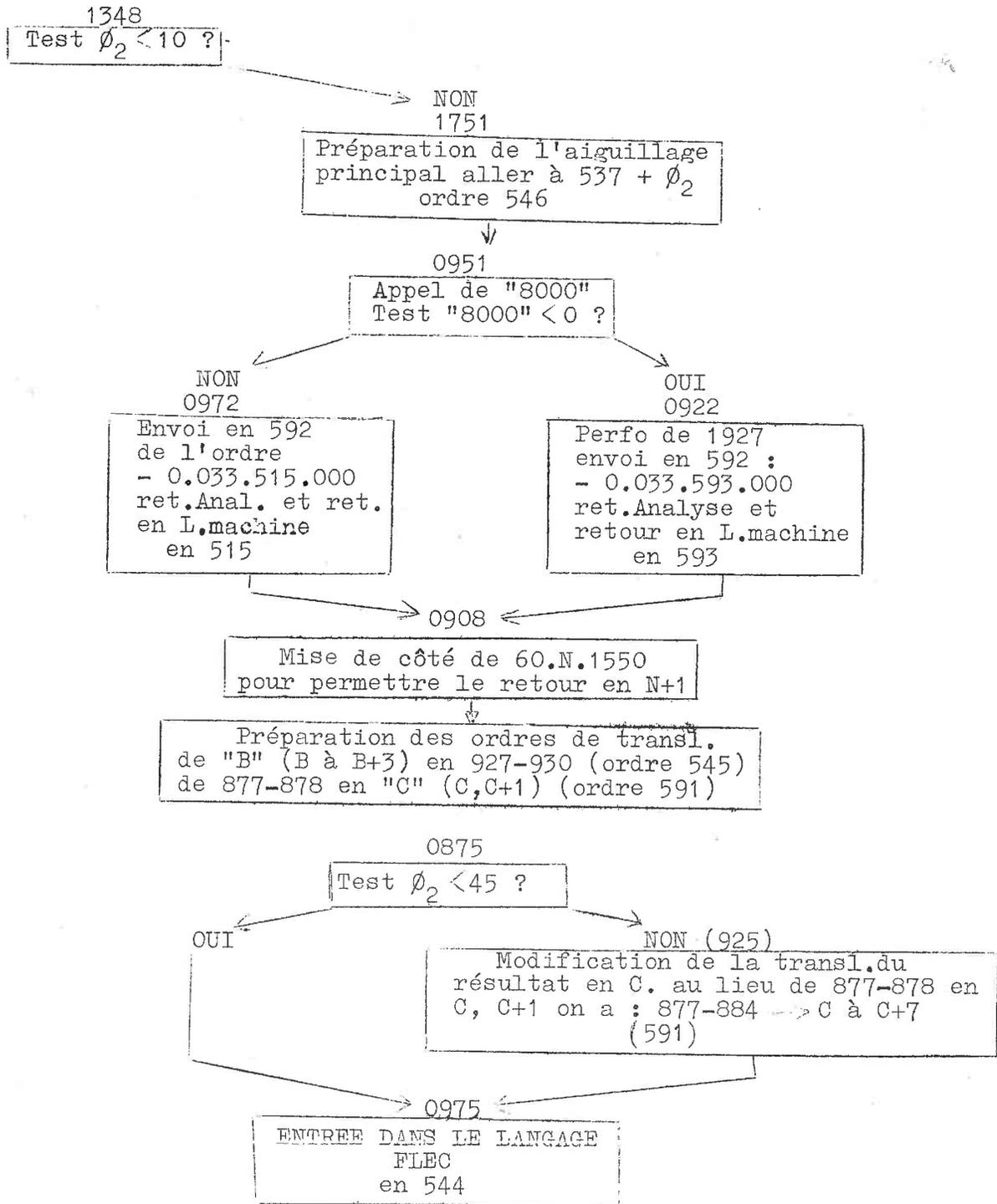


FIGURE 5
ORDRES ELECTRIQUES ECRITS EN FLEC



(Voir suite figure 5 bis).

FIGURE 5 bis

ORDRES ELECTRIQUES ECRITS EN FLEC (Suite de la fig. 5).

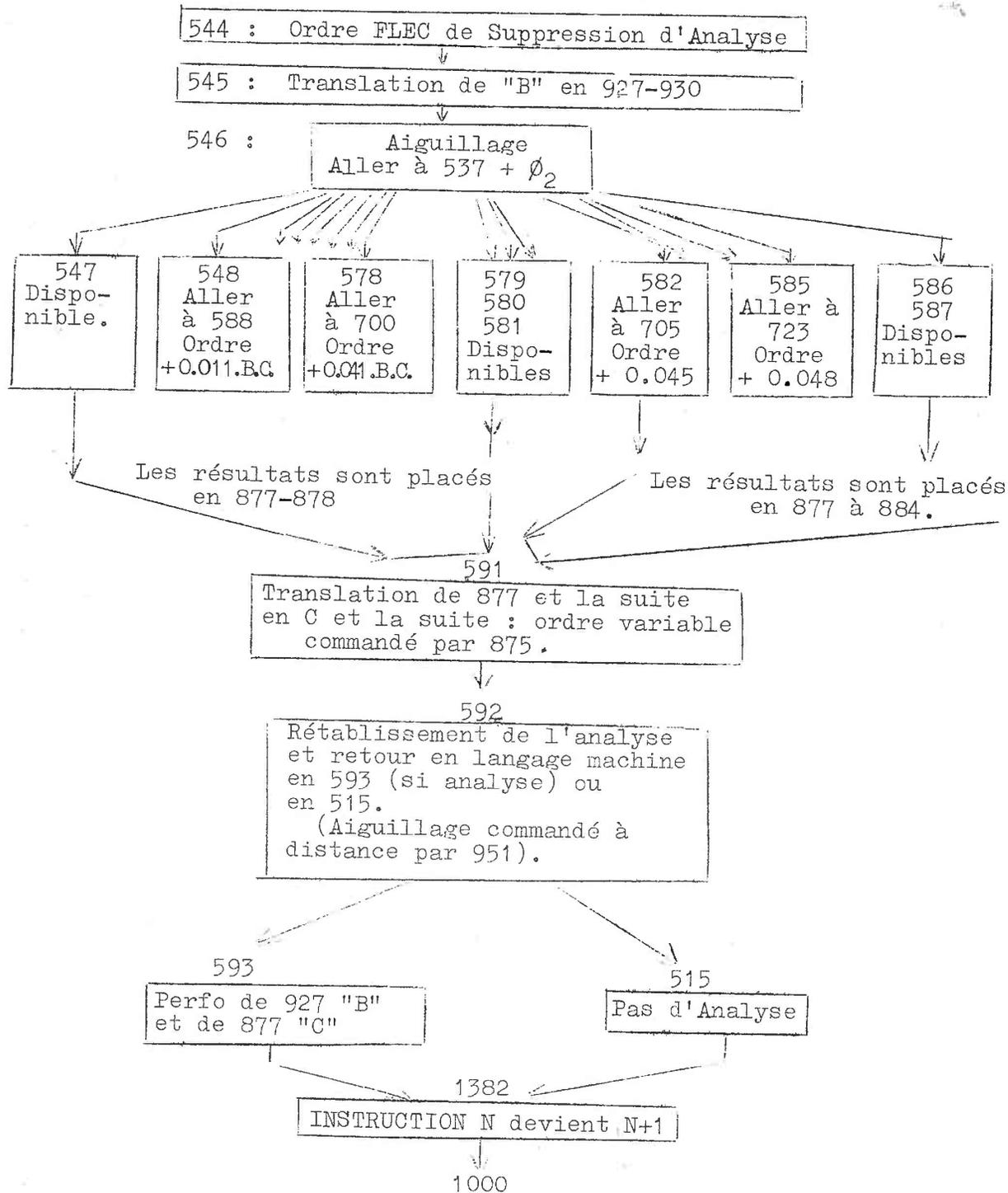


FIGURE 6

ORDRES NEGATIFS A 3 ADRESSES

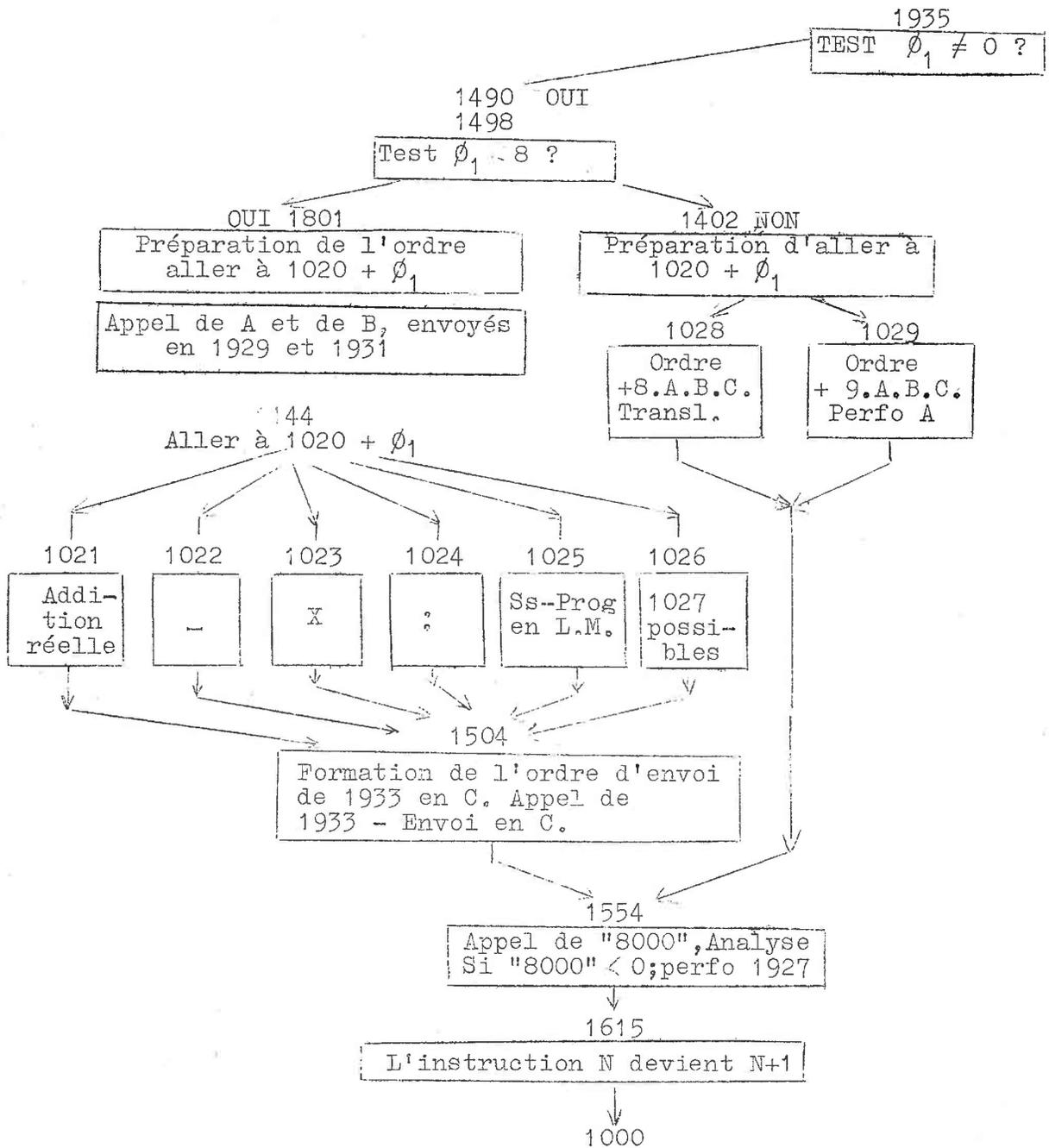


FIGURE 7

ORDRES NEGATIFS A DEUX ADRESSES

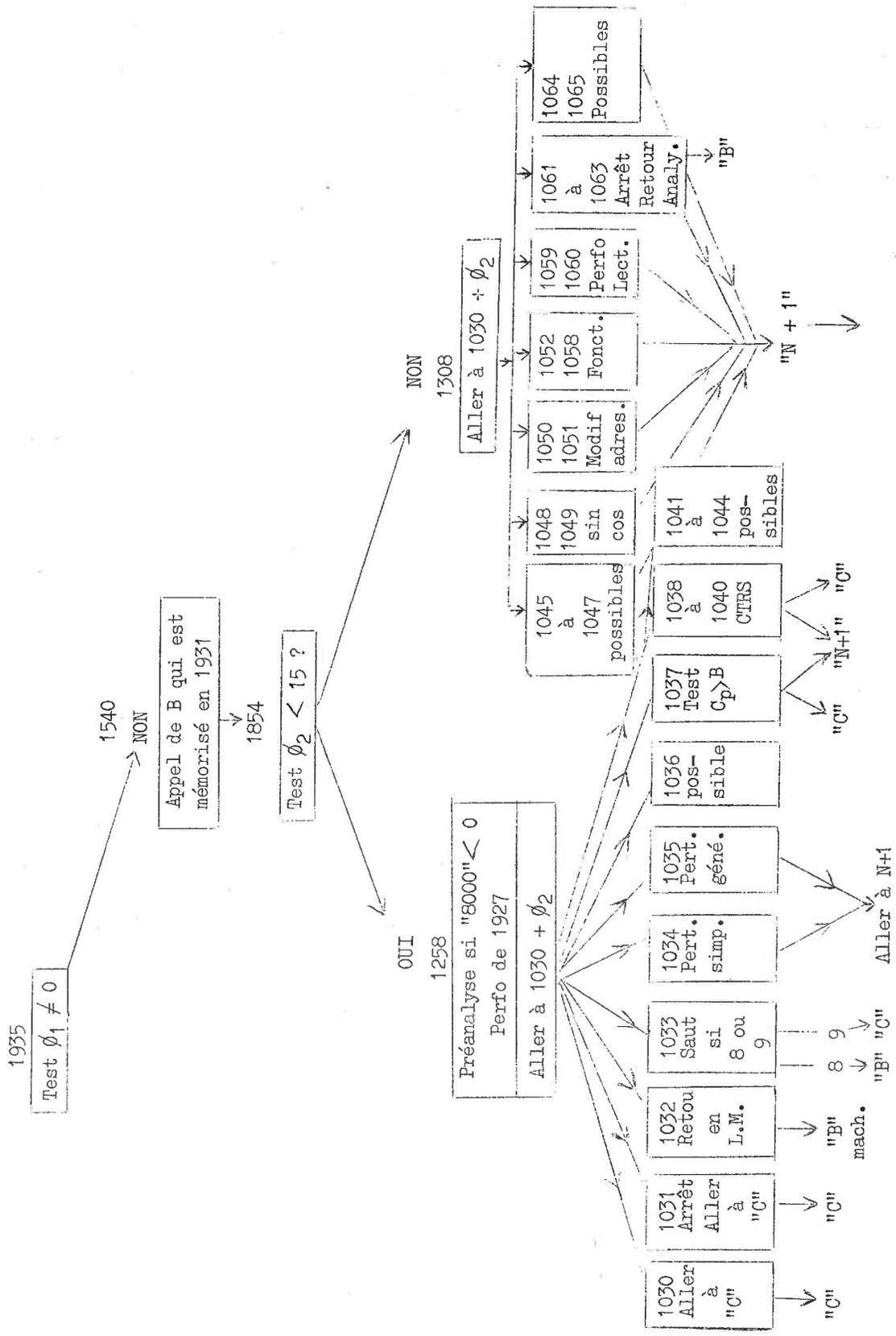


FIGURE 8

ORDRE DE PERTURBATION SIMPLE

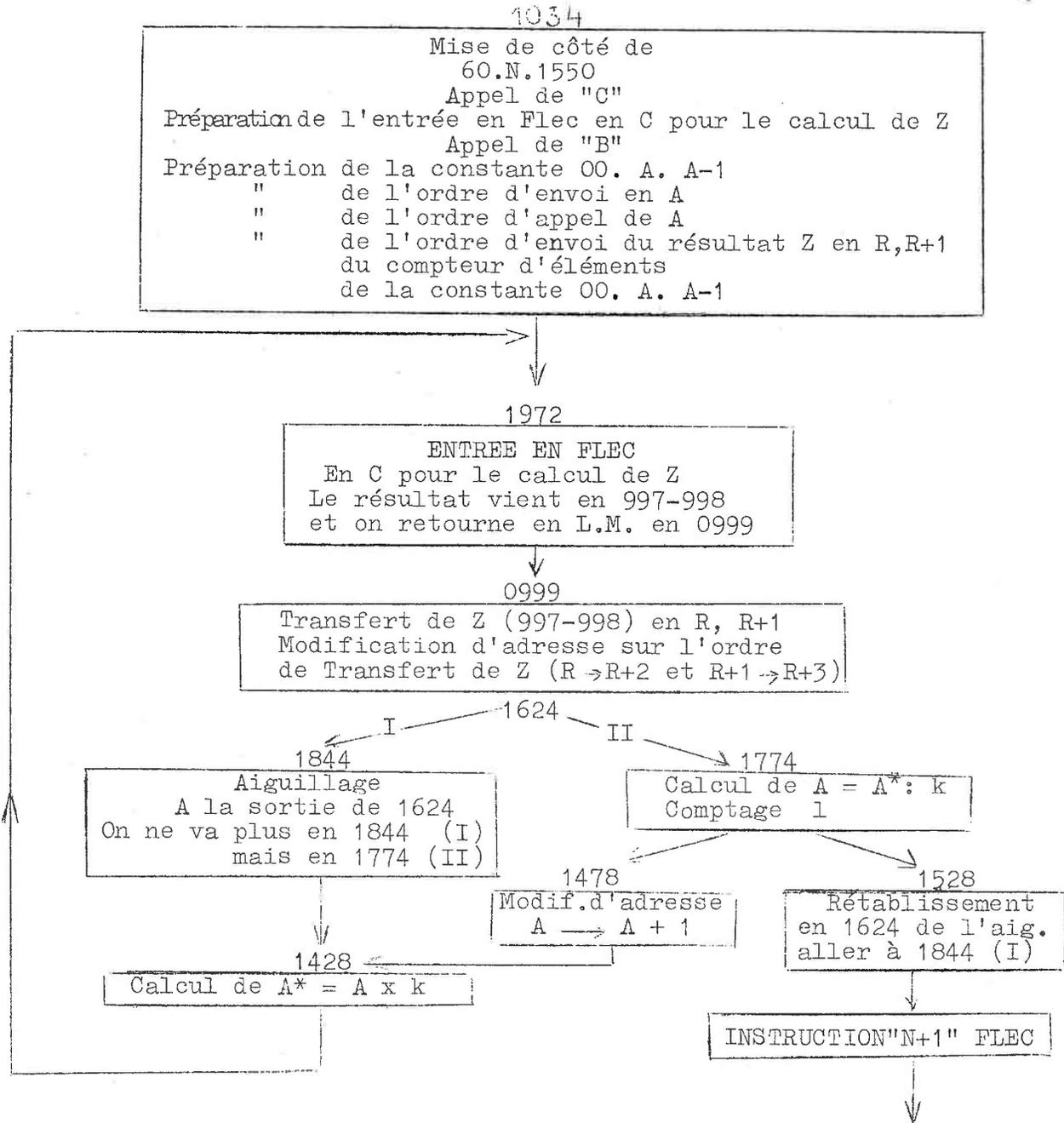
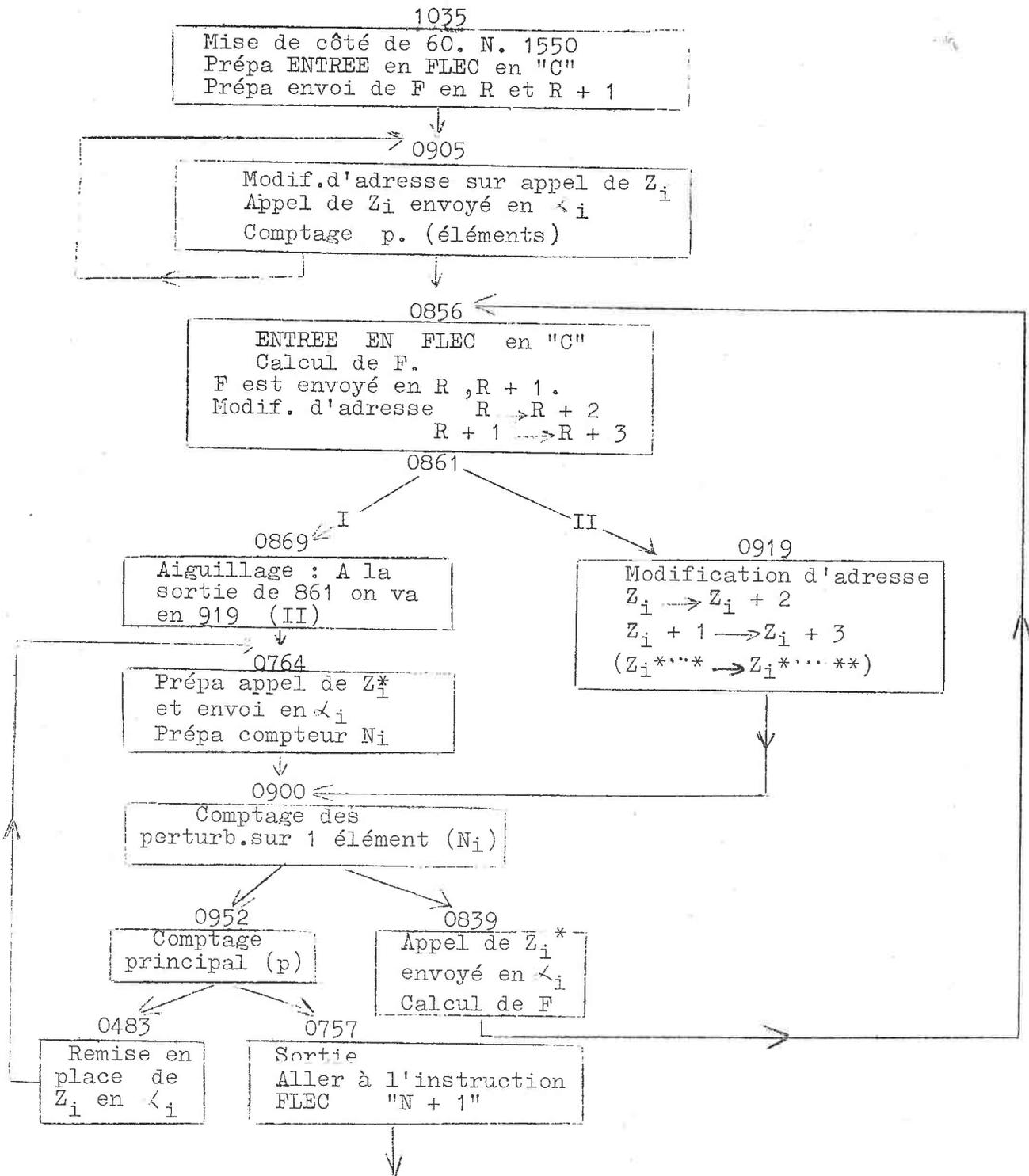


FIGURE 9
ORDRE DE PERTURBATION GENERALE



--- CALCUL d'un CORRECTEUR par la METHODE de MODELAGE ---

-o-o-o-o-

I - Adaptation de la Méthode de Modelage au calcul automatique .

- I - 1 - La Méthode de Modelage.
- I - 1 - a - Principe
- I - 1 - b - Approximation au sens de Tchebycheff
- I - 1 - c - Processus du Modelage
- I - 2 - Le Modelage par pas.
- I - 2 - a - Principe
- I - 2 - b - Organigramme du Modelage par pas
- I - 2 - c - Validité de la Méthode de Modelage par pas
- I - 3 - Théorie de l'approche à la Tchebycheff d'une fonction.
- I - 3 - a - Définition
- I - 3 - b - Théorème de Weierstrass
- I - 3 - c - Théorème sur le nombre minimum d'alternances pour un polynôme de degré n.
- I - 3 - d - Théorème sur l'unicité
- I - 3 - e - Extension au cas du problème non linéaire.
- I - 4 - Le Modelage par actions simultanées de tous les paramètres.

II - Calcul proprement dit du correcteur.

- II - 1 - Problème à résoudre.
- II - 2 - Première tentative
- II - 2 - a - Schéma et programme
- II - 2 - b - Résultats
- II - 3 - Deuxième tentative
- II - 3 - a - Schéma du correcteur
- II - 3 - b - Construction des 3 cellules
- II - 3 - c - Les mesures
- II - 3 - d - Conclusion sur la 2ème tentative
- II - 3 - e - Remarque.

III - Déséquilibre d'un T₃ ponté.

- III - 1 - Formules concernant un t₃ ponté symétrique
- III - 1 - a - Formules classiques
- III - 1 - b - Formules réduites
- III - 2 - Déséquilibre
- III - 2 - a - Déséquilibre au 1er ordre
- III - 2 - b - Déséquilibre au 2ème ordre.

.../...

IV - Troisième Tentative.

- IV - 1 - Modification de la 2ème cellule
- IV - 2 - Introduction des capacités parasites
- IV - 3 - Modelage semi-automatique par action simultanée d'un petit nombre de paramètres.
- IV - 4 - Résultats finaux
- IV - 5 - Construction du correcteur
- IV - 5 - a - Mesures des capacités
- IV - 5 - b - Réglage des selfs
- IV - 5 - c - Mesures des facteurs de qualité des selfs
- IV - 5 - d - Réglages des cellules.

-o-o-o-o-o-

----- CALCUL d'un CORRECTEUR par la METHODE de MODELAGE -----

-o-o-o-o-o-o-

PREAMBULE.-

Le calcul dont nous allons suivre le développement présente un double intérêt. Il peut en effet être considéré comme l'énoncé d'une méthode d'approche à la Tchebycheff d'une fonction de x dépendant non linéairement de paramètres à déterminer d'une part, et d'autre part comme une étude du déséquilibre de té ponté permettant de trouver un juste milieu entre l'affaiblissement composite et le coefficient de réflexion d'un correcteur.

L'ordre adopté dans l'exposition des différentes méthodes d'application du modelage peut sembler illogique. Il a cependant été conservé car il correspond chronologiquement aux étapes qui ont permis d'arriver au résultat désiré.

La première méthode de Modelage utilisée a été le modelage par pas. Cette méthode n'est efficace que lorsque l'on se trouve au voisinage de la solution. Elle est très facilement adaptable au calcul automatique et on s'en servira pour "finir" un modelage.

La seconde méthode consistant à modeler simultanément tous les paramètres ne convient que dans le cas de problèmes pratiquement linéaires ; ce n'est pas le cas du problème que nous avons traité.

La dernière méthode fondée sur le même principe que la précédente mais ne faisant varier à chaque modelage qu'un nombre restreint de paramètres a été utilisée avec succès. Elle se rapproche beaucoup

.../...

du modelage manuel et de ce fait elle semble peu susceptible d'être entièrement automatisée sur une calculatrice de moyenne capacité, l'habileté de l'opérateur jouant un rôle important. Nous nous sommes orientés vers une solution semi-automatique de loin la plus préférable Elle allie en effet, la rapidité et la précision de la calculatrice à l'intelligence de l'opérateur qui effectue lui-même les choix, guidé par les essais qu'il a réalisés auparavant sur le même problème et par l'expérience qu'il a acquise au cours d'autres modelages.

.../...

I - ADAPTATION DE LA METHODE DE MODELAGE AU CALCUL AUTOMATIQUE.-

I - 1 - LA METHODE DE MODELAGE :

I - 1 - a - Principe :

La théorie du Modelage et différents exemples d'application ont été exposés par Monsieur le Professeur LEGRAS dans la revue "Câbles et Transmissions". Nous énoncerons donc très rapidement les principes de cette méthode de calcul et le lecteur trouvera toutes les précisions qu'il désire en consultant le numéro de la revue précitée.

Lorsque l'on met au point un système physique quelconque, un réseau électrique par exemple, on procède par petites variations successives des différents éléments de ce système jusqu'à l'obtention du résultat désiré ; il arrive même que l'on règle plusieurs éléments simultanément, on peut ainsi amincir ou élargir une courbe de résonance en conservant le produit LC constant. Si, au lieu d'un système physique, c'est une fonction que l'on "règle" par de petites variations de ses paramètres, alors on fait du Modelage.

On désire approcher une fonction $f(x)$ définie et continue dans un intervalle (a,b) ; $f(x)$ peut être formulable ou donnée pour un certain nombre de valeurs de x .

La fonction $g(x)$, qui doit approcher au mieux $f(x)$, est de type bien défini. Dans les cas simples c'est un polynôme de degré n :

$$g(x) = a_0 x^n + a_1 x^{n-1} + \dots + a_{n-1} x + a_n \text{ ou encore un développement en}$$

série trigonométrique limité à un certain nombre de termes :

$$g(x) = a_0 + a_1 \cos \omega x + b_1 \sin \omega x + \dots + a_n \cos n \omega x + b_n \sin n \omega x.$$

Les paramètres que l'on aurait à déterminer serait ici les a et b . Généralement la fonction $g(x)$ ne dépend pas linéairement des paramètres inconnus. Dans les calculs de réseaux, c'est l'affaiblissement

.../...

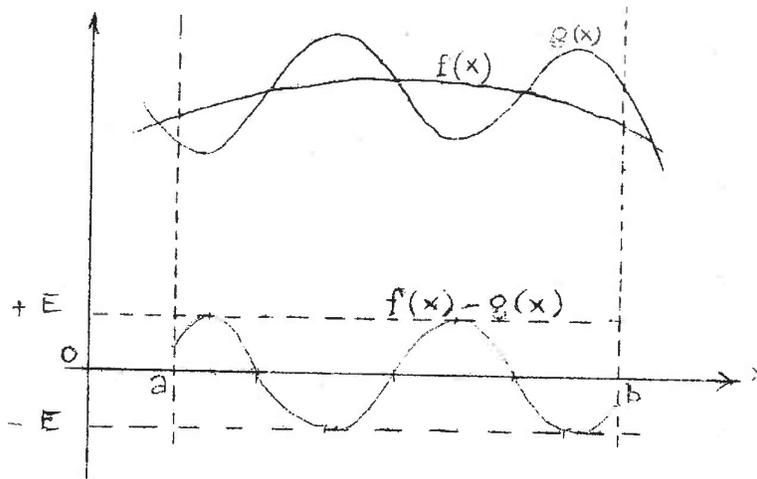
composite A_0 qui a une allure imposée, par exemple de la forme $k\sqrt{f}$, (f est la fréquence) ; ou encore A_0 est donné pour un certain nombre de valeurs de la fréquence f et l'on cherche la structure du réseau qui fournira un affaiblissement A aussi voisin que possible de A_0 . Bien entendu, on partira d'une solution pas très éloignée du résultat, solution fournie par une certaine expérience. En modelant successivement ou simultanément les selfs, capacités et résistances de ce réseau, on s'efforcera de faire de A la meilleure approximation de A_0 .

I - 1 - b - Approximation au sens de Tchebycheff :

Précisons maintenant le sens que nous donnons aux expressions "approcher au mieux une fonction", "rendre aussi voisin que possible" ..

Etant donné $f(x)$: fonction à approcher et une famille de fonctions $g(x, p_1, p_2, \dots, p_n)$ ou plus simplement $g(x)$. On cherche la fonction $g(x)$ telle que : $|f(x) - g(x)| \leq E$, avec E le plus petit possible pour une famille de fonction d'un type bien défini.

Lorsque $g(x)$ est trouvée on dit que : $g(x)$ est la meilleure approximation de $f(x)$ au sens de Tchebycheff.



.../...

I - 1 - c - Processus du Modelage :

Nous partons d'une fonction $g(x) = g(x, p_1, p_2, \dots, p_n)$ pas trop éloignée de $f(x)$; il est souhaitable que moins $g(x)$ dépend linéairement des paramètres p_i , plus l'écart initial E_0 doit être faible.

Posons $f(x) - g(x) = \psi(x)$.

Initialement $|\psi(x)| \leq E_0$ et l'on veut que $|\psi(x)| \leq \epsilon$ donné.

Nous allons modifier les paramètres p_i de façon à obtenir le résultat désiré.

Développons $g(x)$ en série de Taylor en nous limitant aux termes du premier ordre.

$$g(x, p_1 + \Delta p_1, p_2 + \Delta p_2, \dots, p_n + \Delta p_n) \approx g(x, p_1, \dots, p_n) + \Delta p_1 g'_{p_1} + \dots + \Delta p_n g'_{p_n}$$

$$f(x) - g(x, p_1 + \Delta p_1, \dots, p_n + \Delta p_n) = \psi(x) - [\Delta p_1 g'_{p_1} + \dots + \Delta p_n g'_{p_n}]$$

Nous devons choisir les Δp_i assez faibles (pour rester dans le domaine linéaire) tels que :

$$|\psi(x) - [\Delta p_1 g'_{p_1} + \dots + \Delta p_n g'_{p_n}]| \leq E_1 < E_0$$

et recommencer l'opération autant de fois qu'il est nécessaire pour que l'on obtienne $E \leq \epsilon$.

En général, on n'obtient pas le résultat désiré dès le premier essai.

Comme on pourra s'en rendre compte en consultant l'ouvrage de Monsieur LEGRAS, on ne modifie pas simultanément tous les paramètres p_i , mais on procède par "modification simple" (action sur un seul paramètre) ou par "modification groupée" (action simultanée sur plusieurs paramètres) pour aplanir les bosses les plus élevées.

I - 2 - Le Modelage par pas (1er essai de modelage automatique)

.../...

I - 2 - a - Principe :

* Pour résoudre manuellement ou sur calculatrice électronique le problème de l'approche à la Tchebycheff d'une fonction f(x) il est nécessaire de passer du problème continu au problème discret. On donne à x q valeurs dans l'intervalle (a,b): x₁ = a, x₂, ... x_q = b.

On calcule :
f(x₁), g(x₁), ψ(x₁) = f(x₁) - g(x₁)
f(x₂), g(x₂), ψ(x₂) = f(x₂) - g(x₂)
.....
f(x_q), g(x_q), ψ(x_q) = f(x_q) - g(x_q).

On cherche E₀ = maximum de |ψ(x_j)|.

On donne aux n paramètres p_i un accroissement relatif de 10^{-C} (c = 2 ou 3). En général on prend $\frac{\Delta p_i}{p_i} = \frac{1}{100}$

On calcule :

g(x₁, p₁ + Δp₁, p₂, ... p_n) - g(x₁, p₁) = Δg_{p₁}(x₁)
g(x₂, p₁ + Δp₁, p₂, ... p_n) - g(x₂, p₁) = Δg_{p₁}(x₂)
.....
g(x_q, p₁ + Δp₁, p₂, ... p_n) - g(x_q, p₁) = Δg_{p₁}(x_q)

puis Δg_{p₂}(x₁), Δg_{p₃}(x₁), ... et enfin Δg_{p_n}(x₁)
Δg_{p₂}(x₂), Δg_{p₃}(x₂), ... Δg_{p_n}(x₂)
.....
Δg_{p₂}(x_q), Δg_{p₃}(x_q), ... Δg_{p_n}(x_q).

* Commençons maintenant le Modelage proprement dit sur le paramètre p₁, en cherchant le coefficient k₁ tel que

$$|\psi(x) - k_1 \Delta g_{p_1}(x)| \leq E_1 < E_0$$

avec E₁ le plus petit possible.

.../...

x	x ₁	x ₂	.....	x _i	.....	x _k	.....	x _q
ψ(x)	ψ(x ₁)	ψ(x ₂)	.....	ψ(x _i)	.....	ψ(x _k)	.....	ψ(x _q)
$\frac{\Delta g}{\Delta p_1}(x)$	$\frac{\Delta g}{\Delta p_1}(x_1)$	$\frac{\Delta g}{\Delta p_1}(x_2)$	.....	$\frac{\Delta g}{\Delta p_1}(x_i)$	.....	$\frac{\Delta g}{\Delta p_1}(x_k)$	.....	$\frac{\Delta g}{\Delta p_1}(x_q)$

Il n'existe aucune formule donnant k₁, ce n'est que l'examen des deux ^{derniers} lignes ci-dessus qui permet d'évaluer, et avec quelques tâtonnements, la meilleure valeur de k₁.

Supposons que |ψ(x_k)| = E₀ c'est-à-dire que ψ(x_k) soit le plus grand extremum. C'est lui que l'on va essayer d'abaisser en lui soustrayant k₁ fois Δg_{p₁}(x_k) en supposant que ψ(x_k) et Δg_{p₁}(x_k) soient de même signe.

k₁ est déterminé par le fait que

$$|\psi(x_i) - k_1 \Delta g_{p_1}(x_i)| \leq |\psi(x_k) - k_1 \Delta g_{p_1}(x_k)| \quad \forall i \neq k$$

car il ne faut pas en faisant décroître en valeur absolue ψ(x_k), faire apparaître des bosses supérieures à celle que l'on vient de réduire.

Exemple :

	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅
ψ(x)	10	-15	9	18	-13
Δg _{p₁} (x)	1,2	0,8	0,6	0,7	0,9

E₀ = 18

On voit que la meilleure valeur de k₁ est 2.

$2 \Delta g_{p_1}(x)$	2,4	1,6	1,2	1,4	1,8
ψ(x) - 2Δg _{p₁} (x)	7,6	-16,6	7,8	16,6	-14,8

E₁ = 16,6

Si la fonction g(x) dépend peu linéairement des paramètres p_i, de p₁ en particulier, on recalcule g(x₁, p₁ + k₁Δp₁, p₂, ... p_n) ... g(x_q, p₁ + k₁Δp₁, p₂, ... p_n), on cherche E₁ qui doit être assez voisin de E₁ et le Modelage se poursuit cette fois avec la paramètre p₂.

.../...

I - 2 - b - Organigramme du Modelage par pas (Fig. 1 et 1bis) :

On ne peut trouver k_1 directement par Modelage manuel, à priori sur calculatrice électronique. Ce n'est donc que par une suite d'essais que l'on va évaluer k_1 en calcul automatique.

On commence par faire $k_1 = 1$, c'est-à-dire que l'on effectue la soustraction : $\psi(x) - 1 \times \Delta g_{p_1}(x)$, on cherche ensuite $E_{k=1}$, on le compare à E_0 . Si $E_{k_1=1} < E_0$, on recommence en prenant $k_1 = 2$, si $E_{k_1=2} < E_{k_1=1}$ on continue jusqu'au moment où l'on trouve $E_{k=m+1} > E_{k=m}$. On peut alors décider que $k_1 = m$ est la bonne valeur, ou bien chercher la partie décimale de k_1 en calculant $E_{k_1=m+0,1}$ et en le comparant à $E_{k_1=m}$, etc...

Si au début $E_{k_1=1} > E_0$ on prend alors $k_1 = -1$, on procède alors comme pour k_1 positif, on compare $E_{k_1=-1}$ à E_0 etc...

Enfin, si $E_{k_1=\pm 1} > E_0$ on passe au second paramètre p_2 .

Lorsque le calcul que l'on exécute est d'un type connu pour lequel on possède déjà une certaine expérience, et que l'on sache en particulier qu'au début ou en fin de calcul, certains paramètres sont inopérants on peut alors se réserver la possibilité de les "shunter" par un test.

Enfin, certains calculs nous ont permis de constater que des tests autres que $E_{\text{actuel}} < E_{\text{précédent}}$ (nous écrirons cette inégalité par la suite plus brièvement $E_{ac} < E_{pr}$) permettaient une convergence plus rapide, par exemple, on peut se permettre de laisser légèrement croître la bosse principale en faisant décroître notablement d'autres bosses importantes.

.../...

Remarques :

- 1° Problème non linéaire. On limitera par un compteur l'action d'un paramètre $k_i \leq 10$ par exemple.
- 2° Problème physique exigeant que les paramètres restent compris entre des limites. On prévoira donc l'existence de tests $p_i \min \leq p_i \leq p_i \max$.

I - 2 - c - Validité de la méthode de Modelage par pas :

Dans la majorité des problèmes que nous avons rencontrés, ce procédé n'a pas donné des résultats satisfaisants.

La raison de cet échec est simple. Lorsque le nombre d'alternances de $\psi(x)$ est supérieur au nombre d'alternances de l'un quelconque des $\Delta g_{p_i}(x)$ on ne peut plus améliorer $\psi(x)$.

Prenons un exemple simple, on veut approcher $\sin(x)$ dans l'intervalle $0,2 - 1$, par un polynôme du 2ème degré.

$$g(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2.$$

on prendra comme fonction $g(x)$ de départ le développement limité $x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} \dots$ c'est-à-dire $g(x) = 0 + x + 0 \cdot x^2$

$p_1 = a_0$; $p_2 = a_1$; $p_3 = a_2$ pour faire la liaison avec les notations utilisées précédemment.

Comme p_1 et p_3 sont nuls primitivement, nous ne pourrons prendre

$$\frac{\Delta p_1}{p_1} = \frac{\Delta p_2}{p_2} = \frac{\Delta p_3}{p_3} = \frac{1}{100} \quad \text{ce qui n'est d'ailleurs pas une obligation.}$$

Prenons $\Delta p_1 = \Delta p_2 = \Delta p_3 = \frac{1}{100}$, calculons $\Delta g_{p_i}(x)$ qui se résume ici à Δp_1

$$\Delta g_{p_2}(x) = \Delta p_2 x = \frac{x}{100}$$

$$\Delta g_{p_3}(x) = \Delta p_3 x^2 = \frac{x^2}{100}$$

.../...

x	0,2	0,4	0,6	0,8	1	
f(x) = sin x	0,199	0,389	0,565	0,717	0,841	
$\Delta g_{p_1}(x)$	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	
$\Delta g_{p_2}(x)$	0,002	0,004	0,006	0,008	0,010	
$\Delta g_{p_3}(x)$	0,0004	0,0016	0,0036	0,0064	0,010	
$g_0(x) = x$	0,2	0,4	0,6	0,8	1	
$\psi_0(x) = \sin x - g_0(x)$	-0,001	-0,011	-0,035	-0,083	-0,159	$E_0 = 0,159$
						$g_0(x) = x$

Modifions p_1 , la valeur la meilleure de k_1 est - 8

$k_1 = -8$						
$-k_1 \Delta g_{p_1}(x)$	+0,080	+0,080	+0,080	+0,080	+0,080	
$\psi_1(x) = \psi_0(x) - k_1 \Delta g_{p_1}(x)$	0,079	0,069	0,045	-0,003	-0,079	$E_1 = 0,079$
						$g_1(x) = -0,080 + x$

$p_1 = -8 \Delta p_1$

Il est visible maintenant qu'aucune modification sur p_2 ne peut faire disparaître simultanément les 2 bosses de signes opposés + 0,079 et - 0,079 car $\Delta g_{p_2}(x)$ a un signe constant.

De même pour p_3 , aucune modification sur p_3 n'améliorera E_1 . Par contre considérons le groupement $k_2 \Delta g_{p_2}(x) + k_3 \Delta g_{p_3}(x)$ où $k_2 = 40$ et $k_3 = -49$.

$-(k_2 \Delta g_{p_2}(x) + k_3 \Delta g_{p_3}(x))$	-0,061	-0,082	-0,064	-0,006	0,090	
$\psi_2(x) = \psi_1(x) - (k_2 \Delta g_{p_2}(x) + k_3 \Delta g_{p_3}(x))$	0,018	-0,013	-0,019	-0,009	0,011	$E_2 = 0,019$

$$p_2 = 1 + k_2 \Delta p_2 = 1 + 0,040 = 1,40$$

$$p_3 = 0 + k_3 \Delta p_3 = -0,49 \times 0,001 = -0,49$$

$$g_2(x) = -0,080 + 1,40x - 0,49x^2$$

Le modelage par pas n'est pas entièrement à rejeter, car il peut être utile dans le cas où le nombre de bosses maximum est atteint ; en effet, il égalise parfaitement les bosses et sa programmation sur calculatrice est très simple.

.../...

Nous avons eu l'occasion de nous en servir pour "finir" un calcul d'approche de fonction par un polynôme par méthode de Lissage et les résultats ont été satisfaisants.

Cependant si l'on veut traiter complètement un problème par méthode de Modelage il convient d'utiliser les "modifications groupées", c'est-à-dire actions simultanées sur quelques paramètres pour le calculateur manuel. En général, ce dernier ne peut dépasser le nombre de 4 à 5 paramètres, car l'évaluation correcte des 4 ou 5 coefficients k_i correspondant, présente la même difficulté que l'inversion approchée d'une matrice de degré 4 ou 5.

On pourra par contre sur calculatrice envisager la variation simultanée de tous les paramètres.

I - 3 - THEORIE DE L'APPROCHE A LA TCHEBYCHEFF D'UNE FONCTION.-

I - 3 - a - Définitions :

Soit une fonction $f(x) \in C_{ab}$ (ensemble des fonctions définies, continues dans un intervalle fermé (a,b)) et $g_n(x, p_i)$ un polynôme de degré n et de coefficients p_i réels.

Définition 1 : "L'écart du polynôme g_n au point x " est la quantité algébrique $\psi(x) = f(x) - g_n(x, p_i)$

Définition 2 : "L'approximation du polynôme g_n dans (a,b) ", relativement à f est $e_n(f) = e_n = \text{Max} |f(x) - g_n(x, p_i)|$ avec x dans (a,b) .

Définition 3 : Lorsque l'on fait varier les coefficients p_i , n restant constant, on obtient un ensemble de valeurs e_n dont la limite inférieure E_n correspond au "polynôme d'approximation minimum dans (a,b) ". E_n (que nous noterons aussi E) est alors "l'approximation minimum d'ordre n de $f(x)$ dans (a,b) ".

.../...

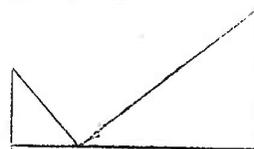
I - 3 - b - Théorème de Weierstrass :

Soit ε un nombre positif donné et $f(x)$ une fonction continue dans l'intervalle $a \leq x \leq b$. On peut trouver un polynôme $g(x)$ tel que :
 $|f(x) - g(x)| \leq \varepsilon$

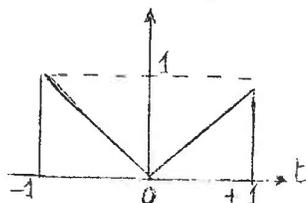
Démonstration élémentaire extraite du Cours de Méthodes de Calcul
(Université de Grenoble)

Remplaçons la fonction continue par une ligne polygonale à $\varepsilon/2$ près. Toute ligne polygonale définie dans (a,b) peut s'obtenir en ajoutant entre elles un certain nombre de lignes à 2 côtés.

Il suffit de montrer que chacune de ces fonctions peut être approchée à ε' près (ε' arbitraire mais donné).



Par une transformation linéaire de y et une transformation linéaire de x , on peut ramener cette fonction à $\sqrt{t^2}$, dans un intervalle intérieur à $-1 \leq t \leq 1$



Or, cette fonction peut s'écrire
$$\left[1 + (t^2 - 1)\right]^{1/2} = 1 + \frac{1}{2}(t^2 - 1) + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}(t^2 - 1)^2 + \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}(t^2 - 1)^3 + \dots$$

série qui converge uniformément pour $0 \leq t^2 \leq 1$.

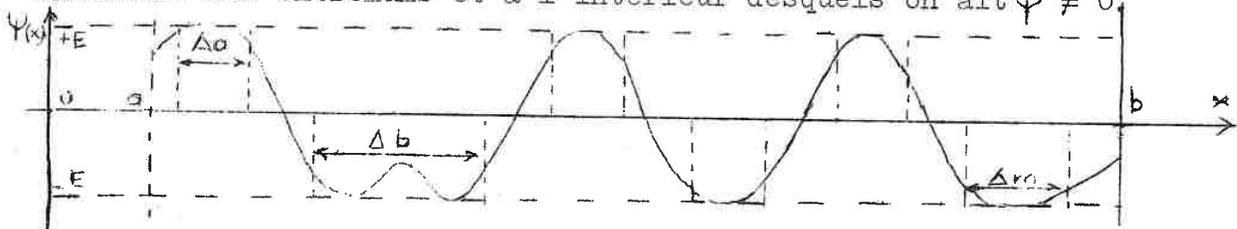
En la coupant après un certain nombre de termes, on obtient un polynôme qui s'en écarte aussi peu que l'on veut.

I - 3 - c - Théorème sur le nombre minimum d'alternances pour un polynôme de degré n.

Soit $g_n(x, p_i)$ le polynôme d'approximation minimum E , représentant $f(x) \in C[a, b]$. On peut trouver $n + 2$ points (au moins) q_i , de l'intervalle fermé (a,b) où $\psi = f - g_n$ atteint les valeurs $\pm E_n$ avec alternance de signe d'un point à un autre.

.../...

Supposons qu'il existe m intervalles partiels consécutifs, tels que dans chaque intervalle, $\psi(x)$ atteigne au moins une fois la valeur $\pm E$ ($\epsilon = \pm 1$) mais pas la valeur $-\epsilon E$. $\psi(x)$ est fonction continue de x , il est donc possible de déterminer des intervalles $\Delta a, \Delta b, \dots$ entourant les extremums et à l'intérieur desquels on ait $\psi \neq 0$.



Prenons $k = m - 1$ valeurs de $x : \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ chacune prise entre deux Δ_i consécutifs, le polynôme $\varphi(x) = \epsilon_1 (\xi_1 - x)(\xi_2 - x) \dots (\xi_k - x)$ a dans chaque Δ_i le signe de $\psi(x)$ et ne s'y annule pas.

($\epsilon_1 = 1$ si le premier extremum est > 0)

$\epsilon_1 = -1$ si le premier extremum de $\psi(x)$ est < 0).

Alors si $\eta > 0$ est choisi convenablement le polynôme $g_n(x) + \eta \varphi(x)$ donne une meilleure approximation que P_n en effet, prenons $\eta / |\varphi| < E - E'$ où E' est le maximum de $|\psi|$ dans (a, b) en dehors des Δ_i

$$\eta < \frac{\sup}{\max} \left| \frac{E - E'}{\varphi} \right|$$

Plus simplement on veut que le polynôme additif $\eta \varphi$ qui va réduire tous les extremums égaux à $\pm E$ ne produise pas, par ailleurs, de bosses supérieures ou égales à $+E$.

Il en résulte que $|f - g_n + \eta \varphi| = |\psi - \eta \varphi|$ est inférieur à E dans tous les Δ_i .

Dans le reste de (a, b) on a de même :

$$|f - (g_n + \eta \varphi)| \leq |f - g_n| + \eta |\varphi| < E' + (E - E') = E$$

Si $k + 1 = m = n + 2$, est un polynôme de degré $n + 1$ ce qui ne permet plus d'améliorer l'approximation de g_n sans augmenter son degré.

.../...

I - 3 - d - Théorème sur l'unicité :

Soit h_n un autre polynôme d'approximation minimum E_n
 $U_n = \frac{g_n + h_n}{2}$ ne peut avoir d'approximation supérieure à E_n

$$\text{car } f - U_n = \frac{f - g_n}{2} + \frac{f - h_n}{2}$$

$$\left| \frac{f - g_n}{2} \right| \leq \frac{E_n}{2} \quad \left| \frac{f - h_n}{2} \right| \leq \frac{E_n}{2} \quad \left| f - U_n \right| \leq E_n$$

U_n a donc une approximation minimum $\leq E_n$.

Elle ne peut par définition être inférieure à E_n , puisque E_n est l'approximation minimum d'ordre n de $f(x)$ dans (a,b) .

Donc U_n est aussi un polynôme d'approximation minimum E_n dans (a,b) , il atteint $n + 2$ fois au moins la valeur E_n dans (a,b) .

U_n étant la demi somme de g_n et h_n , si g_n et h_n n'atteignaient pas simultanément E_n dans (a,b) , U_n ne pourrait atteindre E_n ; il faut que g_n et h_n aient $n + 2$ points communs au moins. Etant de degré n , ils sont identiques.

I - 3 - e - Extension au cas du problème non linéaire :

Considérons une fonction $g_n(x, p_i)$ dépendant de $n + 1$ paramètres p_i . Nous prenons le nombre de paramètres égal à $n + 1$, afin qu'un polynôme de degré n , puisse faire partie de cette famille de fonctions à $n + 1$ paramètres. Nous allons nous efforcer de montrer que $g_n(x)$ ne peut être considérée comme meilleure approximation de $f(x)$ au sens de Tchebycheff que lorsque $\psi(x) = f(x) - g_n(x)$ a au moins $n + 2$ extremums égaux à $\pm E_n$.

Supposons qu'il existe une fonction à $n + 1$ paramètres $g_n(x, p_i)$ telle que la fonction $\psi(x) = f(x) - g_n(x, p_i)$ possède m extremums alternés égaux à E_m

$$|\psi(x)| \leq E_m.$$

Soit $q_1, q_2, \dots, q_j, \dots, q_m$ l'abscisse de ces extremums, calculons les dérivées partielles de $g_n(x, p_i)$ par rapport aux p_i aux points q_j .

.../...

Soit ε_1 le signe de $\psi(q_1)$, ε_j le signe de $\psi(q_j)$, $\varepsilon_j = \pm 1$.

$$\varepsilon_j = \varepsilon_1 (-1)^{j+1}, \quad \psi(q_j) = \varepsilon_j E_m = \varepsilon_1 (-1)^{j+1} E_m$$

Posons : $\frac{\partial}{\partial p_i} g_n(x, p_i) = a_{ji}$ avec $x = q_j$

Réolvons le système linéaire de m équations à $n+1$ inconnues.

$$\delta p_1 a_{11} + \delta p_2 a_{12} + \dots + \delta p_{n+1} a_{1, n+1} = \varepsilon_1 d$$

$$\delta p_1 a_{21} + \delta p_2 a_{22} + \dots + \delta p_{n+1} a_{2, n+1} = -\varepsilon_1 d$$

$$\dots$$

$$\delta p_1 a_{m1} + \delta p_2 a_{m2} + \dots + \delta p_{n+1} a_{m, n+1} = \varepsilon_1 (-1)^{m+1} d$$

d est un nombre positif très petit.

Si $m \leq n+1$ et si la matrice $\| a_{ji} \|$ n'est pas singulière, il existe une ou une infinité de solutions, les δp_i étant eux aussi très petits.

Construisons une nouvelle fonction $g_n(x, p_i + \delta p_i)$ et posons

$$\varphi(x) = g_n(x, p_i + \delta p_i) - g_n(x, p_i).$$

$$\varphi(x) = \sum_i \delta p_i \frac{\partial}{\partial p_i} g_n(x, p_i) + \frac{1}{2!} \sum_i \left[\delta p_i^2 \frac{\partial^2}{\partial p_i^2} g_n(x, p_i) + \delta p_i \delta p_k \frac{\partial^2}{\partial p_i \partial p_k} g_n(x, p_i) \right] + \dots$$

On supposera que les δp_i sont assez petits pour que l'on néglige les termes en δp_i^2 ou $\delta p_i \delta p_k$ et les termes d'ordres plus élevés. Par conséquent on peut écrire : $\varphi(q_j) = \varepsilon_1 (-1)^{j+1} d$

Nous supposons que $g_n(x)$ est une fonction définie et continue dans (a, b) . Considérons les intervalles Δ_j autour de chaque q_j dans lesquels $\varphi(x)$ et $\psi(x)$ gardent un signe constant qui est $\varepsilon_1 (-1)^{j+1}$

Soit E'_m le maximum de $\varphi(x)$ en des intervalles Δ_j et e' le maximum de $\varphi(x)$ en dehors des intervalles Δ_j .

Si $E' + e' < E_m$, alors $g_n(x, p_i + \delta p_i)$ est une meilleure approximation de $f(x)$ que $g_n(x, p_i)$.

Si $E' + e' > E_m$ on peut toujours trouver η positif tel que $E' + e' \eta < E_m$ car $E' < E_m$ par hypothèse.

.../...

$g_n(x, p_i + \delta p_i)$ est une meilleure approximation de $f(x)$ que $g_n(x, p_i)$.

On peut réitérer ce processus de petites variations des p_i jusqu'au moment où $E' = E_m$ (un nouvel extremum apparaît il y a maintenant $m + 1$ bosses égales à E_m .)

Si $m + 1 \leq n + 1$, on peut toujours résoudre le système linéaire considéré précédemment.

Dès l'instant où il y a $n + 2$ bosses, nous ne pouvons plus résoudre un système de $n + 2$ équations à $n + 1$ inconnues. Nous retrouvons un résultat déjà vu dans le cas du polynôme de degré n . Il y a amélioration possible si le nombre de bosses est inférieur ou égal à $n + 1$.

Ce que nous venons d'énoncer n'est pas une démonstration rigoureuse, mais plutôt l'énoncé de la méthode que nous utiliserons pour trouver les paramètres p_i de $g_n(x, p_i)$ dont nous voulons faire la meilleure approximation de $f(x)$.

I - 4 - LE MODELAGE PAR ACTIONS SIMULTANÉES DE TOUS LES PARAMÈTRES :
(2ème essai de Modelage automatique)

Partons d'une fonction $g(x, p_i)$ à n paramètres p_i indépendant qui doit approcher à la Tchebycheff $f(x)$ en q points donnés.

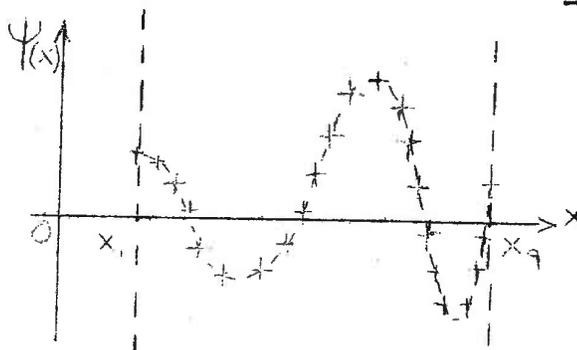
Exemple : On cherche un correcteur dont l'affaiblissement devra être aussi voisin que possible d'un affaiblissement donné pour q valeurs fixées définitivement de la fréquence.

Remarque : Il est préférable que q soit supérieur à $2n$. Plus q est grand, plus on a de chance d'être maître de toutes les bosses que l'on va faire apparaître ; on est bien entendu limité par le volume de calcul qu'entraînerait une valeur trop grande de q .

Supposons que $\psi(x)$ ait l'aspect représenté sur la figure ci-après.

.../...

$$\psi(x) = f(x) - g(x, p_i)$$



Dressons le tableau rectangulaire des dérivées partielles de $g(x, p_i)$ calculées aux points x_j x_1 $x_2 \dots x_j \dots x_n \dots x_q$

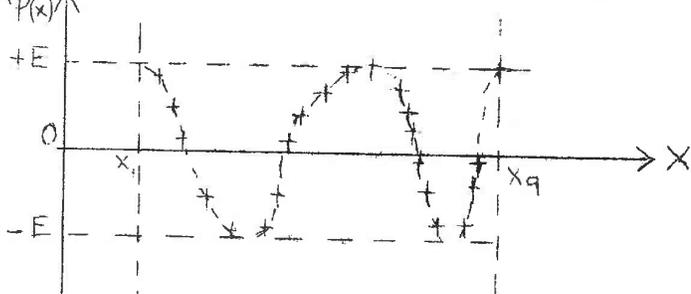
$a_{11} = \frac{\partial g}{\partial p_1}(x_1, p_1)$	\dots	a_{12}	\dots	a_{1i}	\dots	a_{1n}
a_{21}	\dots	a_{22}	\dots	a_{2i}	\dots	a_{2n}
\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
a_{j1}	\dots	a_{j2}	\dots	a_{ji}	\dots	a_{jn}
\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
a_{n1}	\dots	a_{n2}	\dots	a_{ni}	\dots	a_{nn}
\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
a_{q1}	\dots	a_{q2}	\dots	a_{qi}	\dots	a_{qn}

Nous désignerons plus brièvement cette matrice par $\|a_{ji}\|$

Faisons agir successivement les p_i afin d'égaliser quelques unes des bosses les plus importantes. Nous obtenons alors m extremums égaux à E . Si $m > n$, le calcul est

peut-être terminé. Seuls des essais peuvent nous permettre de conclure.

Si $m \leq n$, on choisit (ou on laisse le soin à la calculatrice de le faire) les n x_j pour lesquels $\psi(x_j)$ est le plus grand. Dans ces points sont compris, en priorité, les m points correspondant aux m extremums.



On résoud ensuite le système de n équations à n inconnues:

$$\|a_{ji}\| \cdot \|\Delta p_i\| = \|\psi(x_j)\| \quad \dots / \dots$$

* Si le problème est linéaire on cherche le coefficient k tel que:

$$\left| \psi(x_j) - k \sum \Delta p_i \frac{\partial g}{\partial p_i}(x_j, p_i) \right|$$

soit minimum pour les q valeurs de x_j . On obtient ce résultat en général lorsque une ou plusieurs bosses nouvelles viennent se joindre aux m bosses initiales qui ont décréu et l'on recommence en faisant agir successivement chacun des p_i afin d'égaliser.

* Si le problème n'est pas linéaire on limitera la valeur de k pour rester dans le domaine linéaire ; il est difficile de donner des indications précises sur ce sujet, seuls des essais peuvent nous renseigner. Une fois k déterminé, on recalcule la nouvelle valeur $g(x, p_i)$ qui est $g(x, p_i + k \Delta p_i)$, on reconstruit la matrice $\|a_{ji}\|$ si g a beaucoup varié et on recommence le cycle :

- 1° Egalisation des bosses par modelage par pas ;
- 2° Inversion de la matrice $\|a_{ji}\| \cdot \|\Delta p_i\| = \|\psi(x_j)\|$
- 3° Recherche de k et obtention d'un nouvel E ;
- 4° Vérification par calcul de $g(x, p_i + k \Delta p_i)$ et calcul de E' qui doit être voisin de E ;
- 5° Calcul éventuel de $\|a_{ji}\|$ si g a beaucoup varié.

La figure 2 représente l'organigramme du programme de Modelage par actions simultanées.

Ce programme permet de trouver la meilleure approximation au sens de Tchebycheff de problèmes discrets à n paramètres, pour q valeurs de x ($q \geq n$ et $(q + 4)(n + 3) < 1425$).

Il débute par la lecture de n cartes contenant les Δp_i solutions de $\|a_{ji}\| \cdot \|\Delta p_i\| = \|\psi(x_j)\|$ et se termine par la perforation du nouveau système de n équations : $\|a_{ji}\| \cdot \|\Delta p_i\| = \|\psi(x_j)\|$ qui sera résolu par un programme d'inversion de matrice.

Le programme donne des résultats satisfaisants pour les problèmes linéaires et pseudo-linéaires (un problème pseudo-linéaire

.../...

concerne une fonction $g(x)$ où :

$$g(x, p_i + \Delta p_i) \approx g(x, p_i) + \sum \Delta p_i \frac{\partial g}{\partial p_i} \text{ avec } \frac{\Delta p_i}{p_i} = \frac{1}{100}$$

Par contre, dans le cas de problèmes non linéaires, ce programme est tenu en échec par la petitesse des pas à adopter ($\frac{\Delta p_i}{p_i}$ de l'ordre du $\frac{1}{1000}$ ème) et le nombre considérable d'essais qui en résulte. N'oublions pas que pour inverser une matrice d'ordre 6 par exemple, il faut environ une minute de calcul sur 650 IBM. De plus, les calculs devant être faits en virgule flottante (système de numération semi-logarithmique) pour des Δp_i très petits, imposés par la non-linéarité, les erreurs de chute prennent une telle importance qu'il faut renoncer à faire varier simultanément tous les p_i , ce qui était le principal intérêt de la méthode qui vient d'être exposée.

.../...

II - CALCUL PROPREMENT DIT DU CORRECTEUR.-

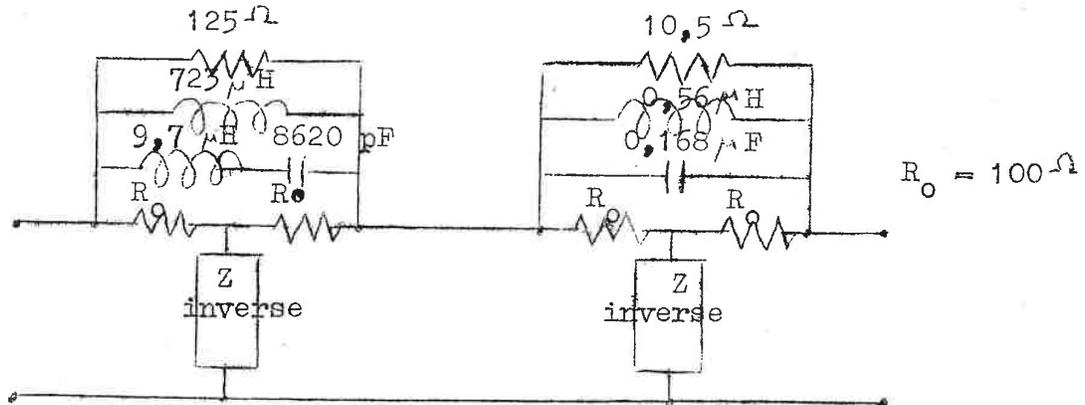
II - 1 - PROBLEME A RESOUDRE :

On se propose de calculer un égaliseur complémentaire d'un répéteur sous-marin (que nous appellerons plus brièvement correcteur) qui doit avoir un affaiblissement conforme au tableau ci-dessous :

Fréquence en k H Z	Affaiblissement en millinépers
24	651
30	740
50	862
60	873
80	860
100	804
125	733
150	654
175	577
200	500
225	431
250	361
264	332
320	208
350	162
375	129
400	105
425	109
450	128
475	145
500	150
525	144
550	120

La précision demandée est de 5 millinépères ou mieux.

Une base de départ nous est fournie par un correcteur de constitution voisine de celle que nous allons adopter.



Fréquence en K H Z	1ère Cellule Affaiblissement en CN	2ème Cellule Affaiblissement en CN	Affaiblissement total en centi- népers
24	59	0	59
30	67,5	0	67,5
50	80	0	80
100	74	0	74
125	66,25	0	66,25
150	58	0	58
175	50,25	0	50,25
200	43	0	43
225	36	0	36
250	30	0	30
264	27	0	27
320	16	0	16
350	11	0	11
375	9	0	9
400	5,5	0,5	6
425	4	1	5
450	1,75	2	3,75
475	1	4	5
500	0,50	7	7,5
525	0,25	8,5	8,75
550	0	5,25	5,25

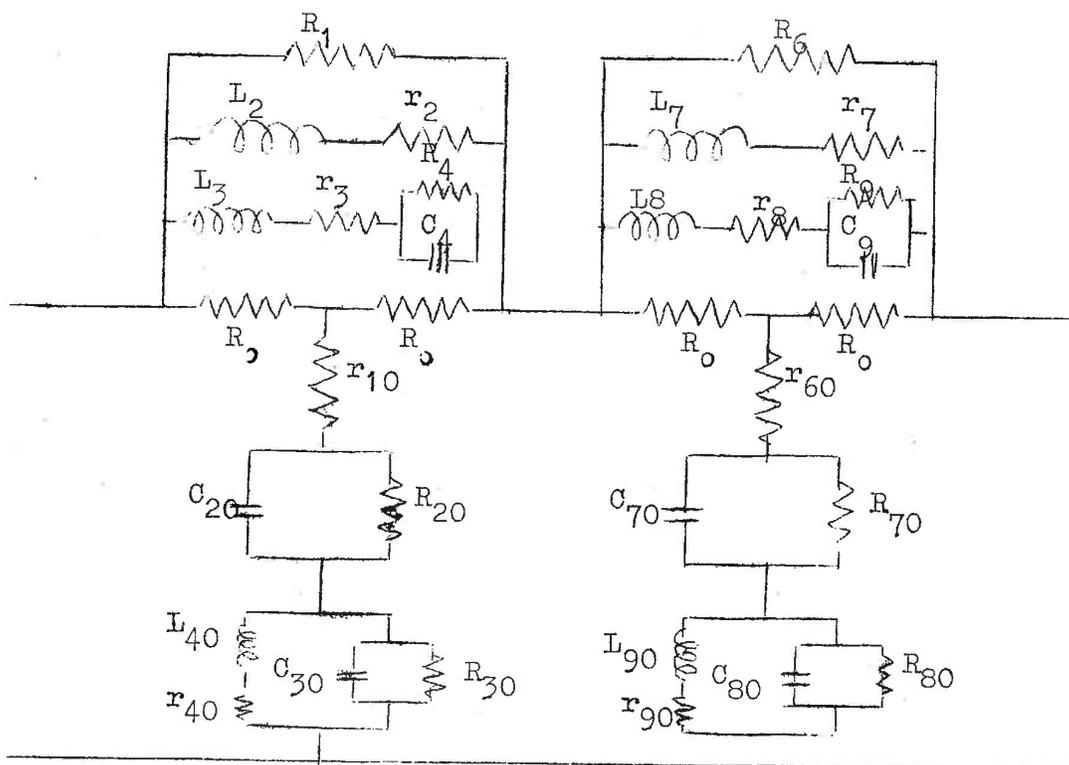
-- TABLEAU I - BASE DE DEPART --

.../...

II - 2 - PREMIERE TENTATIVE :

II - 2 - a - Schéma et Programme :

Voici représenté ci-dessous le schéma que nous avons adopté :

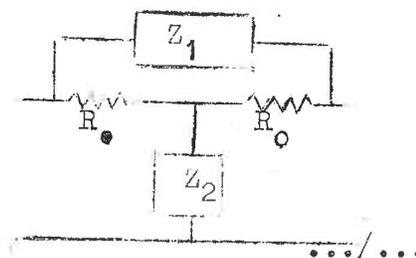


Rappelons les relations liant les éléments correspondants du bras série et du bras parallèle dans un Té ponté équilibré.

$$R_o^2 = r_i R_i = R_i r_{io} = L_i C_{io}^{-1} = C_i^{-1} L_{io}$$

L'affaiblissement (effectif ou composite) d'un Té ponté équilibré ($Z_1 Z_2 = R_o^2$) est donné par la formule :

$$A = \text{Log} \left| 1 + \frac{Z_1}{R_o} \right| = \text{Log} \left| 1 + \frac{R_o}{Z_2} \right|$$



Programme de calcul de $A - A_0$

A : affaiblissement du correcteur étudié

A_0 : affaiblissement à obtenir

Ce programme a été écrit en FLEEC, il débute en 0100

	<u>Adresses</u>	<u>Ordres</u>
1° Lecture d'une carte contenant ω et e^{A_0}	100	$-0.029. \omega . e^{A_0}$
2° Calcul de Z_1 impédance constituée par R_1	101	$0.002.R_1.Z_1.$
3° Calcul de $Z_2 (L_2 R_2)$	102	$0.037.L_2.Z_2.$
4° Calcul de $Z_3 (Z_1$ en parallèle avec $Z_2)$	103	$5.Z_1.Z_2.Z_3.$
5° Calcul de $Z_4 (L_3 R_3)$	104	$0.037.L_3.Z_4.$
6° Calcul de $Z_5 (C_4 R_4)$	105	$0.040.C_4.Z_5.$
7° Calcul de $Z_6 (Z_4$ en série avec $Z_5)$	106	$1.Z_4.Z_5.Z_6.$
8° Calcul de Z 1ère cellule	107	$5.Z_3.Z_6.Z.$
9° Calcul de Z/R_0	108	$4.Z.R_0.Z/R_0$
10° Calcul de $e^{\Gamma} = 1 + Z/R_0$	109	$1.UN.Z/R_0.e^{\Gamma_1}$
11° Calcul de $e^A = |1 + Z/R_0|$		$-0.022.e^{\Gamma_1}.e^A 1$

Nous procédons identiquement pour le calcul de e^{A_2}

22° Calcul de $e^A = e^{A_1} . e^{A_2}$	121	$3.e^{A_1}.e^{A_2}.e^A.$
23° Calcul de $A - A_0 + 1$	122	$4.e^A.e^{A_0}.M.$
24° Calcul de $A - A_0$	123	$2.M.UN.A - A_0.$
25° Perfo des résultats	124	$-0.030. \omega .A - A_0.$
26° Retour à lecture de ω et e^{A_0}	125	$-0.000.000.100.$

La valeur de $A - A_0$ a été obtenue par une formule approchée :

$$A - A_0 = e^{A - A_0} - 1.$$

.../...

Remarque :

Avec les notations utilisées précédemment on aurait pu écrire :

$$f(x) = A_0 \quad g(x) = A \quad \psi(x) = -(A - A_0)$$

II - 2 - b - Résultats :

$R_1 = 145 \Omega$	$R_6 = 16,95 \Omega$
$L_2 = 938 \mu H$	$L_7 = 1,34 \mu H$
$r_2 = 5,4 \Omega$	$r_7 = 0,043 \Omega$
$L_3 = 13,4 \mu H$	$L_8 = 0,025 \mu H$
$r_3 = 0,44 \Omega$	$r_8 = 0,00095 \Omega$
$C_4 = 7000 pF$	$C_9 = 0,0737 \mu F$
$R_4 = 3500 \Omega$	$R_9 = 330 \Omega$

Ces résultats ont été obtenus après 80 essais. La majorité de ces essais a consisté en modelages manuels sur quelques éléments et les reste des essais en modelages automatiques par pas.

Exemple : Bilan d'un essai en Modelage automatique par pas.

A - A_0 initial : 24,2 mN

A - A_0 au bout de 10 minutes de calcul : 17,857 mN

A - A_0 au bout de 15 minutes de calcul : 17,855 mN

on arrête les calculs car le Modelage par pas piétine. Toutefois les essais devront être repris à la main car le nombre minimum d'extrêmes n'est pas atteint.

A - A_0 calculé directement pour vérifier la linéarité de A : 18,6 mN

Le temps total des calculs sur machine requis par le calcul de ce correcteur (Modelage automatique et 80 passages du programme II - 2 - a durant chacun 5 minutes) est d'environ : 15 heures.

Ce correcteur n'a pas été construit car la self L_8 , trop petite, est irréalisable physiquement. De plus, comme le montre le tableau II, la précision de 5 millinépères n'était pas atteinte.

.../...

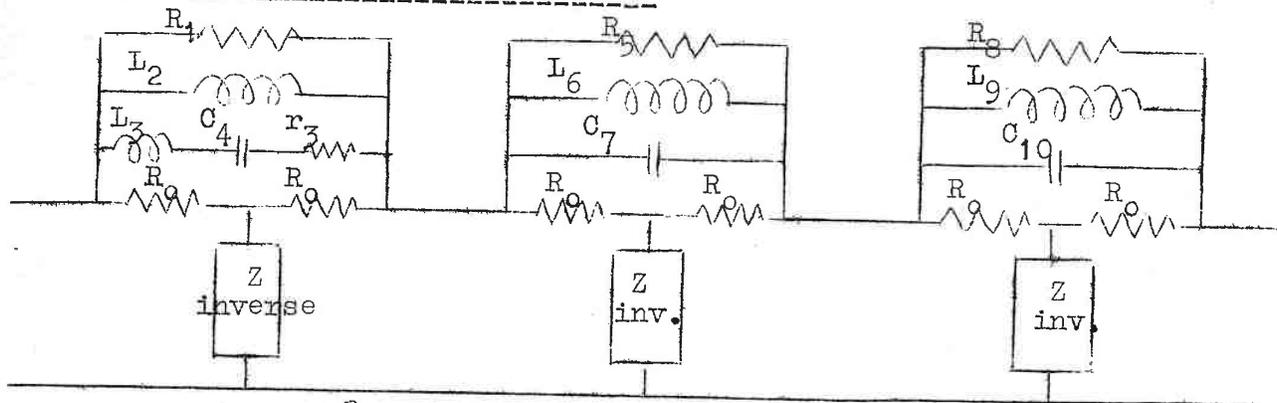
Fréquence k H Z	e^{A_1} 1ère cellule	e^{A_2} 2ème cellule	$e^A = e^{A_1 + A_2}$ total	e^{A_0} à obtenir	$A - A_0$ millimètres
24	1,9287	1,0005	1,9295	1,9175	<u>6,3</u>
30	2,0958	1,0005	2,0968	2,0959	0,4
50	2,3538	1,0006	2,3551	2,3679	- 5,4
60	2,3815	1,0006	2,3829	2,3941	- 4,7
80	2,3439	1,0008	2,3457	2,3632	- <u>7,4</u>
100	2,2457	1,0010	2,2479	2,2345	6,0
125	2,0923	1,0013	2,0951	2,0813	6,6
150	1,9338	1,0018	1,9372	1,9232	<u>7,3</u>
175	1,7841	1,0024	1,7884	1,7807	4,3
200	1,6489	1,0032	1,6541	1,6487	3,3
225	1,5296	1,0043	1,5362	1,5388	- 1,7
250	1,4261	1,0057	1,4343	1,4348	- 0,3
264	1,3747	1,0068	1,3840	1,3938	- <u>7,0</u>
320	1,2112	1,0135	1,2275	1,2312	- 3,0
350	1,1478	1,0202	1,1710	1,1759	- 4,2
375	1,1060	1,0289	1,1380	1,1377	0,3
400	1,0731	1,0425	1,1187	1,1107	<u>7,2</u>
425	1,0480	1,0639	1,1150	1,1152	- 0,2
450	1,0299	1,0958	1,1286	1,1366	- <u>7,0</u>
475	1,0181	1,1335	1,1540	1,1560	- 1,8
500	1,0116	1,1547	1,1680	1,1618	<u>5,3</u>
525	1,0098	1,1402	1,1513	1,1549	- 3,1
550	1,0120	1,1076	1,1210	1,1275	- <u>5,8</u>

--- TABLEAU II - RESULTATS DE LA PREMIERE TENTATIVE ---

.../...

II - 3 - DEUXIEME TENTATIVE :

II - 3 - a - Schéma du correcteur :



$R_1 = 133,3 \Omega$

$L_2 = 875,7 \mu H$

$L_3 = 13,47 \mu H$

$r_3 = 1,464 \Omega$

$C_4 = 7.307 pF$

$R_5 = 2,34 \Omega$

$L_6 = 21,36 \mu H$

$C_7 = 60000 pF$

$R_0 = 100 \Omega$

$R_8 = 13,06 \Omega$

$L_9 = 0,9615 \mu H$

$C_{10} = 106.400 pF$

II - 3 - b - Construction des 3 cellules :

1ère cellule :

- Valeurs réelles des capacités (mesurées)

$C_4 = 7307 pF$ pour $7307 pF$ (valeur théorique)

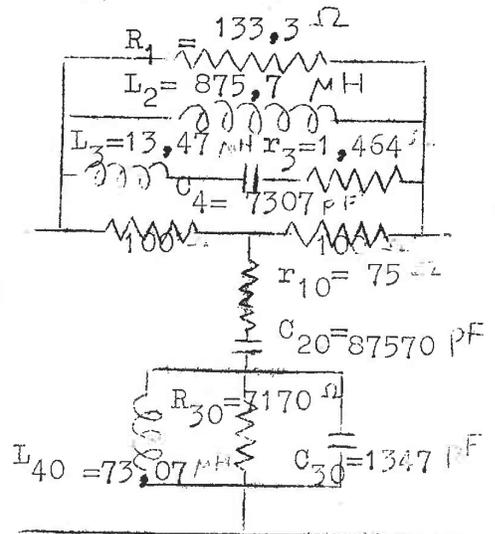
$C_{20} = 87540 pF$ pour $87570 pF$

$C_{30} = 1346 pF$ pour $1347 pF$

- Choix du type des selfs et détermination du nombre de spires.

$L_2 = 875,7 \mu H$. Nous utilisons un pot fer-

mé Ferroxcube type 25/17,5 ajustable par bande de réglage.



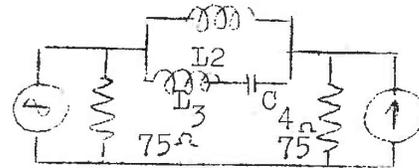
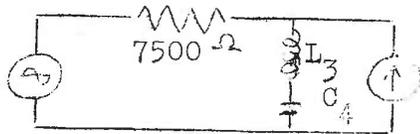
.../...

Pour la qualité 3B3 (de 100 à 700 KHZ) nous trouvons un nombre de spires pour 1 mH $\alpha = 85$. Appliquons la formule : $n = \alpha \sqrt{L}$ en henrys. $n = 85 \sqrt{0,8757} = 79,5$. Nous prenons $n = 78$ tours de façon à nous réserver une certaine marge de réglage.

$L_3 = 13,47 \mu H$ est une bobine sur air ajustable par noyau. Pour obtenir cette self nous partons d'une self déjà existante de 35 spires.

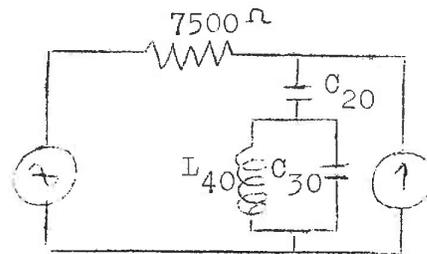
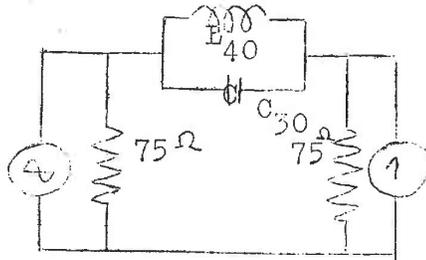
$L_2 = 73,07 \mu H$. Nous choisissons un pot identique à celui de L_2 . On obtient $n = 85 \sqrt{0,073} = 22,95$; nous gardons $n = 22$.

Pour effectuer le réglage des selfs, nous les faisons résonner avec les capacités correspondantes (connues avec une précision suffisante) en utilisant les montages ci-dessous.



Résonance : 507,3 KHZ

Résonance : 62,43 KHZ



La cellule étant réalisée nous effectuons deux mesures d'affaiblissement. L'une correspondant au maximum d'affaiblissement à la fréquence de 60 KHZ, la valeur obtenue est correcte à la précision de l'appareil de mesure qui n'est que de quelques millinépères. La seconde pour 500 KHZ permet de constater que les résistances r_3 et R_{30} doivent être modifiées de 17 %, en plus pour r_3 , en moins pour R_{30} , si l'on

.../...

veut atteindre un affaiblissement de 15 millinépers.

Tableau des affaiblissements théorique et mesuré près de la résonance parallèle

Fréquence en KHZ	400	425	450	475	500	525	550
A.théorique en mN	62,1	41,4	27,0	18,2	14,6	19,5	20,0
A mesuré en mN	57	36	22	15	12	14	20,0

2ème Cellule :

- Valeurs réelles des capacités

$$C_7 = 59.970 \text{ p}^F \text{ pour } 60.000 \text{ p}^F$$

$$C_{60} = 2.132 \text{ p}^F \text{ pour } 2.136 \text{ p}^F$$

- Choix du type de self et dé-

termination du nombre de spires

$L_6 = 21,36 \mu H$ est une self sur air

Pour l'obtenir nous sommes partis

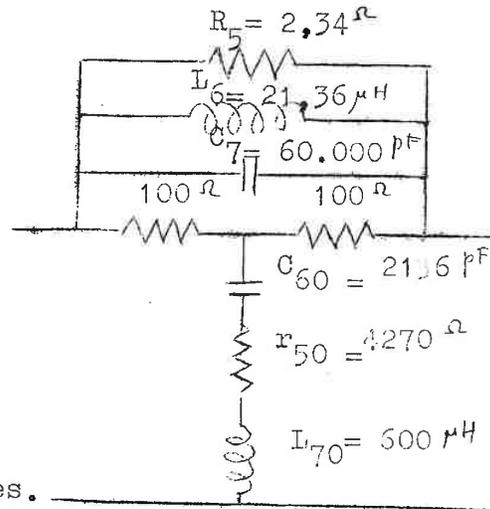
d'une self déjà existante de 46

spires à laquelle nous avons re-

tranché un certain nombre de spires.

$L_{70} = 600 \mu H$. C'est une self constituée par un pot fermé Ferroxcube 25/17,5. $n = \sqrt{L} = 85 \sqrt{0,6} = 65,9$. Nous avons pris 64 spires comme valeur initiale.

Le réglage des deux selfs s'est effectué de la même manière que précédemment à la fréquence de résonance de 140,5 kHz.



3ème Cellule :

- Valeurs réelles des capacités

$$C_{10} = 106.370 \text{ p}^F \text{ pour } 106.400 \text{ p}^F$$

$$C_{14} = 96,6 \text{ p}^F \text{ pour } 96,15 \text{ p}^F$$

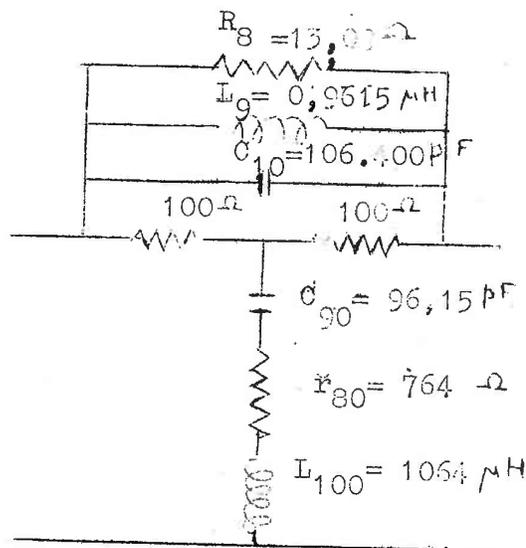
.../...

- Choix du type de self et détermination du nombre de spires
 $L_9 = 0,9615 \mu H$ est une self sur air à 9 spires.

$L_{100} = 1064 \mu H$. Pot fermé Ferroxcube 25/17,5. $n = 85 \sqrt{1,064} = 87,7$

Nous avons pris comme valeur initiale du nombre de spires : 86. Il est à remarquer que lors du réglage nous avons dû débobiner un certain nombre de spires ce qui laisse prévoir l'existence d'une capacité parasite importante.

Fréquence de réglage : 497,6 KHZ



II - 3 - c - Les mesures. (Tableau III en annexe)

Nous avons mesuré séparément les affaiblissements des 3 cellules. Les deux écarts les plus importants sont relevés à 60 KHZ et 500 KHZ. Le premier est dû à une valeur trop élevée de R_1 ; cependant nous n'effectuons pas la correction car une compensation s'introduit dans les deux autres cellules.

Le second écart, de même grandeur que le précédent en valeur absolue, est beaucoup plus important en valeur relative. Il est dû à la courbe d'affaiblissement trop aigue de la cellule 3, la capacité parasite de L_{100} augmentant la valeur apparente de L_{100} .

Nous avons fait un rapide essai avec une cellule 3 modifiée de 25 %. Les résultats obtenus se sont avérés très proches des valeurs théoriques. Ceci provient du fait que les selfs ayant été diminuées, l'influence de la capacité parasite de L_{100} a été compensée.

.../...

Il est intéressant cependant de reprendre la cellule 3 initiale en essayant de diminuer au maximum la capacité parasite de L_{100} . Pour ce faire, le bobinage classique a été remplacé par un bobinage en nid d'abeille.

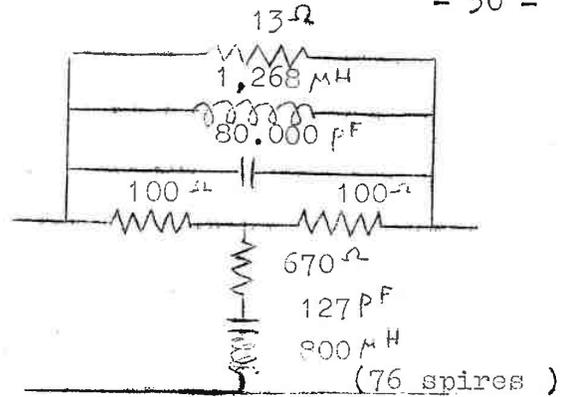
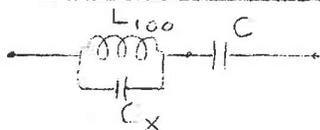


Tableau des affaiblissements des différentes cellules 3 :

Fréquence KHZ	350	400	425	450	475	500	525	550
Valeur théorique	12,8	29,0	45,9	73,2	107,5	122,8	103,0	73,5
Cellule 3 initiale	9	20	33	60	100	120	95	60
Cellule 3 modifiée 25 %	12	32	51	80	105	117	103	73
Cellule 3 à capacité parasite réduite 5 pF	9	21	35	63	103	123	93	65

Certaines valeurs de ce tableau sont différentes de celles du tableau III (annexe) car elles ont été faites sur un appareil moins précis que celui utilisé pour les mesures finales.

Détermination de la capacité parasite C_x de la cellule 3 initiale :



$$L_{100} = 1.064 \mu H$$

$$Z = \frac{1 - L_{100}(C + C_x)\omega^2}{jC\omega [1 - L_{100}C_x\omega^2]}$$

Mesures faites au Q.mètre

Fréquences	350	500	700	790	KHZ
Q	260	161	83	60	
C	211	94,7	40	27,5	pF
$C_x = \frac{1}{L\omega^2} - C$	- 17	0,1	8,4	10,5	pF
$C_x = \frac{C_2\omega_2^2 - C_1\omega_1^2}{\omega_1^2 - \omega_2^2}$		17	17,5		pF
$L_{100}(C_x + C_g)\omega^2$	0,582	1,192	2,335	2,972	

.../...

C'est alors que nous constatons que la résonance ne se situe pas du tout aux environs de 500 KHZ (exactement 497) comme prévu, mais pour une valeur inférieure.

Déterminons la valeur exacte (L_{ex}) de L_{100} .

$$L_{ex} = \frac{1}{(17 + 96,15) 9.77 \cdot 10^{12} \cdot 10^{-12}} = \underline{905 \mu H} \text{ au lieu de } 1064 \mu H$$

Reprenons les calculs précédents :

Fréquence	350	500	700	790	KHZ
$L_{ex} \omega^2 \cdot 10^{-3}$	4,38	8,96	17,56	22,37	
$1/L_{ex} \omega^2$	228	111,6	57	44,7	p^F
$C_x = 1/L\omega^2 - C$	17	16,9	17	20	p^F
$L_{ex}(C_x + C_g)\omega^2$	0,495	1,013	1,986	2,53	
$1 - L_{ex}(C_x + C_g)\omega^2$	0,505	- 0,013	0,986	1,53	
$C_g \omega \cdot 10^4$	2,118	3,015	4,240	4,78	
$L_{ex} C_x \omega^2$	0,0745	0,1522	0,2984	0,3803	
$1 - L_{ex} C_x \omega^2$	0,935	0,848	0,702	0,620	
$C_2 \omega (1 - L_{ex} C_x \omega^2) 10^4$	1,98	2,557	2,975	2,960	
$Z_{ex} = j X_{ex}$	- 2550	51	3310	5170	Ω
$L_{100} C_{g0} \omega^2$	0,495	1,013	1,986	2,53	
$1 - L_{100} C_{g0} \omega^2$	0,505	-0,013	0,986	1,53	
$Z_{th.} = j X_{th.}$	- 2380	43	2320	3140	- 2
$\frac{dX}{X}$	6,7	15,7	30	39	en %

A 500 KHZ $-\frac{dX}{X} = 16\%$ il en résulte un écart relatif pour l'affaiblissement considérable.

Lorsque l'on remplace, pour la self L_{100} , le pot ferroxcube à bobinage en plusieurs couches, par une self sur air à bobinage à nid d'abeille, la capacité parasite qui était de $17 p^F$ n'est plus que de $5 p^F$.

.../...

II - 3 - d - Conclusion sur la 2ème tentative :

On n'a pu obtenir les 7 m N prévus (écart max = 13,6 mN) pour plusieurs raisons :

- Difficultés de réaliser avec précision les faibles résistances
- Léger foisonnement dans le bobinage des selfs.
- Capacités parasites modifiant l'allure des courbes d'affaiblissement.

Les écarts obtenus sont les mêmes que ceux prévus par la méthode de modelage, mais ils sont aggravés.

II - 3 - e - Remarque :

Cette remarque aurait déjà pu être faite après la 1ère tentative. L'écart $A - A_0$ (affaiblissement théorique moins affaiblissement à obtenir) devrait présenter un nombre de bosses supérieur au nombre de paramètres (on a montré qu'il doit y avoir au moins $N+1$ extremum) or il n'en comporte que 8 (pour les fréquences de 24, KHZ, 80, 150, 264, 400, 450, 500 et 550). La raison du nombre limité de bosses est la suivante : considérons le tableau IV. Il contient les écarts de l'affaiblissement théorique final pour une variation de $\frac{1}{100}$ d'un élément et de son inverse (exemple $\Delta L_2 = 8,7 \mu F$; $\Delta C_{20} = 870 p F$). C'est à des facteurs de multiplication près le tableau des dérivées partielles (a_{ji}). En le considérant on se rend compte que 7 éléments seulement ont une importance à peu près égale ($R_1, L_2, L_3, C_4, R_8, L_9, C_{10}$).

La solution théorique que nous avons trouvée est bien (ou à peu de chose près) la meilleure approximation au sens de Tchebycheff.

.../...

Tableau IV - TABLEAU des ECARTS de l'AFFAIBLISSEMENT
THEORIQUE A pour une VARIATION RELATIVE de 1 % d'un
----- ELEMENT et de son CORRESPONDANT -----

Eléments modifiés	24 KHZ	80	150	254	400	450	500	550
R ₁ r ₁₀	1,9 ^{hN}	5,3	2,0	- 0,5	- 0,2	- 0,1	0	0
L ₂ C ₂₀	3,5	- 0,5	- 0,6	- 0,2	0 /	0	0	0
L ₃ C ₃₀	0	0	- 0,3	- 1,4	- 1,5	- 0,9	- 0,1	+ 0,8
r ₃ R ₃₀	- 0,01	- 0,02	- 0,02	+ 0,03	+ 0,12	0,13	0,14	0,14
C ₄ L ₄₀	0,5	- 0,8	- 3,9	- 5,0	- 2,3	- 1,1	- 0,1	0,6
R ₅ r ₅₀	0,05	0,21	0,23	0,21	0,17	0,16	0,14	0,13
L ₆ C ₆₀	0,103	0,014	- 0,001	- 0,004	- 0,005	- 0,005	- 0,005	- 0,004
C ₇ L ₇₀	0,003	0,004	- 0,001	- 0,016	- 0,042	- 0,050	- 0,060	- 0,069
R ₈ r ₈₀	0	0	0	0	- 0,1	0,1	1,1	0,1
L ₉ C ₉₀	0	0	0	0,1	1,3	3,3	- 0,6	- 2,6
C ₁₀ L ₁₀₀	0	0	0	0	0,8	2,7	- 0,6	- 3,2

III - DESEQUILIBRAGE D'UN TE PONTE.-

La deuxième tentative ayant échoué (7,4 mN au lieu de 5 mN) pour réduire l'écart $A - A_0$ deux solutions s'offrent à nous :

1° Compliquer l'égaliseur en augmentant le nombre n d'éléments, par exemple, adjoindre une nouvelle cellule à faible fond de bande. Cette solution est peu satisfaisante du point de vue pratique ; en effet un tel correcteur doit être construit en série et sa mise au point sera d'autant plus délicate qu'il comportera un plus grand nombre d'éléments ; de plus la question du prix de revient n'est pas à négliger. Enfin ce correcteur étant destiné à être immergé dans un câble sous-marin, son volume doit être réduit autant que possible.

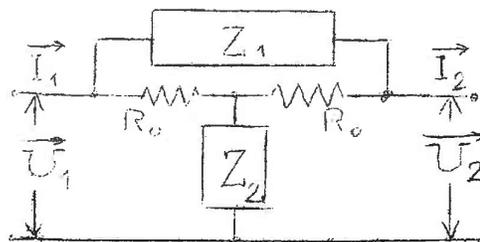
2° Déséquilibrer l'égaliseur. On pourrait reprocher à cette méthode de rendre différent de zéro le coefficient de réflexion. Mais, moyennant un léger déséquilibre, si l'on peut réduire notablement l'écart entre les deux affaiblissements, on pourra s'estimer satisfait. En effet, il est illogique de conserver un coefficient de réflexion nul et un écart d'affaiblissement important alors qu'une solution comportant un coefficient de réflexion raisonnable (5 à 10 %) et un écart d'affaiblissement moindre est plus naturelle.

III - 1 - FORMULES CONCERNANT UN TE PONTE SYMETRIQUE :

III - 1 - a - Formules classiques :

$$\begin{cases} U_1 = Z_{11}I_1 - Z_{12}I_2 \\ U_2 = Z_{21}I_1 - Z_{22}I_2 \end{cases}$$

Ici $Z_{11} = Z_{22}$ et $Z_{12} = Z_{21}$



.../...

Impédance en circuit ouvert :

$$Z_{11} = \frac{U_1}{I_1(I_2=0)} = Z_2 + \frac{1}{\frac{1}{R_0} + \frac{1}{Z_1 + R_0}}$$

$$Z_{11} = Z_2 + \frac{R_0^2 + R_0 Z_1}{2R_0 + Z_1} \quad (1)$$

Impédance de transfert en circuit ouvert :

$$Z_{12} = \frac{U_1}{I_2(I_1=0)} = \frac{R_0 I}{I_2} + Z_2$$

$$Z_{12} = Z_2 + \frac{R_0^2}{2R_0 + Z_1} \quad (2)$$

Impédance caractéristique :

$$W = \sqrt{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}^2}$$

Ici $W^2 = Z_{11}^2 - Z_{12}^2 \quad (3)$

Impédance effective : $We_1 = We_2$

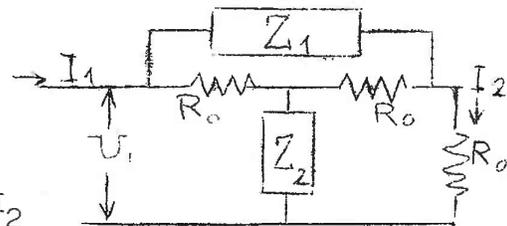
$$We_1 = \frac{U_1}{I_1} = Z_{11} - Z_{12} \frac{I_2}{I_1}$$

$$U_2 = R_0 I_2 = Z_{12} I_1 - Z_{22} I_2$$

$$R_0 + Z_{22} = Z_{12} \frac{I_1}{I_2} \quad We_1 - Z_{11} = -Z_{12} \frac{I_2}{I_1}$$

$$(We_1 - Z_{11})(R_0 + Z_{22}) = -Z_{12}^2 \quad We_1 = Z_{11} - \frac{Z_{12}^2}{R_0 + Z_{22}}$$

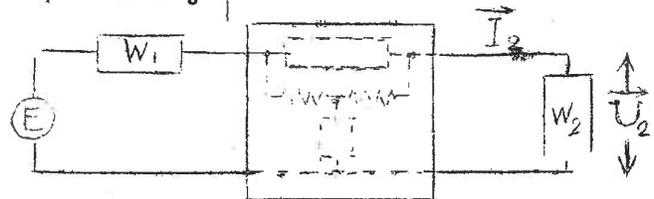
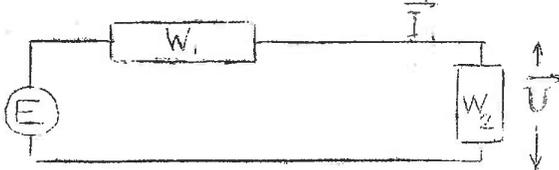
$$We_1 = \frac{R_0 Z_{11} + W^2}{R_0 + Z_{11}} \quad (4)$$



Coefficient de réflexion :

$$\rho = \left| \frac{We_1 - R_0}{We_1 + R_0} \right| \quad (5)$$

Exposant de transfert composite : $\Gamma = A + j\varphi$



.../...

$$e^{2\Gamma} = \frac{U_1 I_1}{U_2 I_2} \quad U_1 I_1 = \frac{E^2}{4W_1} \quad U_2 I_2 = \frac{U_2^2}{W_2} \quad e^{2\Gamma} = \frac{E^2 W_2}{4W_1 U_2^2}$$

$$e^{\Gamma} = \frac{E}{2 U_2} \sqrt{\frac{W_2}{W_1}} \quad (6)$$

$$e^{\Gamma} = \frac{E}{2 I_2 \sqrt{W_1 W_2}} \quad E = W_1 I_1 + U_1 \quad E = W_1 I_1 + Z_{11} I_1 - Z_{12} I_2$$

$$U_2 = W_2 I_2 = Z_{12} I_1 - Z_{22} I_2$$

$$E = (W_1 + Z_{11}) I_1 - Z_{12} I_2 \quad Z_{12} I_1 = (W_2 + Z_{22}) I_2$$

$$\frac{E}{I_2} = (W_1 + Z_{11}) \frac{I_1}{I_2} - Z_{12}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{W_2 + Z_{22}}{Z_{12}} \quad \frac{E}{I_2} = \frac{(W_1 + Z_{11})(W_2 + Z_{22}) - Z_{12}^2}{Z_{12}}$$

$$e^{\Gamma} = \frac{(W_1 + Z_{11})(W_2 + Z_{22}) - Z_{12}^2}{2 Z_{12} \sqrt{W_1 W_2}}$$

ici
$$e^{\Gamma} = \frac{R_0^2 + 2R_0 Z_{11} + W^2}{2 Z_{12} R_0} \quad (7)$$

III - 1 - b - Formules réduites :

$$Z_{11} = \frac{Z_{11}}{R_0} ; Z_{12} = \frac{Z_{12}}{R_0} \quad W = \frac{W^2}{R_0^2} ; \dots$$

$$Z_{11} = Z_2 + \frac{1 + Z_1}{2 + Z_1} \quad (8)$$

$$Z_{12} = Z_2 + \frac{1}{2 + Z_1} \quad (9)$$

.../...

$$W_{e_1} = Z_{11} - \frac{Z_{12}^2}{1 + Z_{11}} \quad W^2 = Z_{11}^2 - Z_{12}^2 \quad W_{e_1} = 1 + \frac{W^2 - 1}{1 + Z_{11}} \quad (10)$$

$$\rho = \left| \frac{W_{e_1} - 1}{W_{e_1} + 1} \right| \quad (11)$$

$$e^{\Gamma} = \frac{1 + 2Z_{11} + (W^2)^2}{2Z_{12}}$$

$$(W^2)^2 = \frac{(2Z_{2+1})Z_1}{2 + Z_1}$$

$$W_{e_1} = 1 + \frac{2(Z_1 Z_2 - 1)}{Z_1 Z_2 - 1 + 2Z_1 + 2Z_2 + 4} \quad (13)$$

$$\rho = \left| \frac{Z_1 Z_2 - 1}{2(Z_1 Z_2 - 1) + 2(Z_1 + Z_2) + 4} \right| \quad (14)$$

$$e^{\Gamma} = 1 + \frac{Z_1 Z_2 + 2Z_1 + 1}{Z_1 Z_2 + 2Z_2 + 1} \quad (15)$$

Lorsque le té est équilibré nous savons que $Z_1 Z_2 = R_0^2$
 ($Z_1 Z_2 = 1$) la forme (15) devient $e^{\Gamma} = 1 + \frac{2 + Z_1}{2 + Z_2}$

$$e^{\Gamma} = 1 + \frac{2 + Z_1}{2 + \frac{1}{Z_1}} = 1 + \frac{(2 + Z_1)Z_1}{2 + Z_1} = 1 + Z_1 = 1 + \frac{Z_1}{R_0}$$

.../...

III - 2 - DESEQUILIBRAGE .

III - 2 - a - Déséquilibre au 1er ordre :

Faisons varier Z_1 d'une quantité très petite et gardons Z_2 constant.

$$\boxed{Z_1 = Z(1 + \varepsilon), \quad Z_2 = \frac{1}{Z}} \quad (16) \quad \begin{aligned} Z_1 &= Z + dZ \\ Z_1 Z_2 - 1 &= \varepsilon \end{aligned}$$

$$\boxed{\varepsilon = \frac{dZ}{Z}} \quad (17) \quad \varepsilon \text{ est bien entendu complexe.}$$

Calcul de ρ :

$$\rho = \left| \frac{Z_1 Z_2 - 1}{2(Z_1 Z_2 - 1 + Z_1 + Z_2 + 2)} \right|$$

$$\rho = \left| \frac{\varepsilon}{2 \left[Z + \frac{1}{Z} + 2 + \varepsilon(1 + Z) \right]} \right| = \frac{1}{2} \left| \frac{Z \varepsilon}{(Z+1)^2 \left[1 + \frac{Z \varepsilon}{1+Z} \right]} \right|$$

$$\boxed{\rho = \frac{1}{2} \left| \frac{Z \varepsilon}{(Z+1)^2} \left[1 - \frac{\varepsilon Z}{Z+1} \right] \right|} \quad (18)$$

ou plus simplement

$$\boxed{\rho = \left| \frac{dZ}{2(Z+1)^2} \right|} \quad (18') \quad \boxed{\rho = \left| \frac{dZ_1}{\frac{2}{R_0} (Z_1 + R_0)^2} \right|}$$

Calcul de e^r

$$e^r = 1 + \frac{Z_1 Z_2 + 2Z_1 + 1}{Z_1 Z_2 + 2Z_2 + 1} = 1 + \frac{1 + \varepsilon + 2Z(1 + \varepsilon) + 1}{1 + \varepsilon + \frac{Z}{Z} + 1}$$

$$e^r = 1 + \frac{2 + 2Z + Z\varepsilon + Z\varepsilon + \varepsilon}{\frac{1}{Z} (2 + 2Z + \varepsilon Z)}$$

.../...

$$e^{\Gamma} = 1 + Z + \frac{\epsilon(1+Z)}{\frac{Z}{2}(1+Z) + \epsilon Z} \neq 1 + Z + \frac{\epsilon Z}{2}$$

$$\boxed{e^{\Gamma} = 1 + \frac{Z_1}{R_0} + \frac{dZ_1}{2R_0}} \quad (19)$$

Conclusion sur le déséquilibre au 1er ordre :

Pour de petites variations de Z_1 (imposées par le fait que le coefficient de réflexion doit rester faible), faire varier Z_1 de $dZ_1 = \frac{dZ}{2}$, revient à faire varier simultanément Z_1 de $\frac{dZ}{2}$ et Z_2 de $-\frac{dZ}{2} \frac{R_0^2}{Z_1}$. Or, ce genre de variation n'est plus efficace lorsque l'approximation à la Tchebycheff est atteinte.

Il est inutile de faire varier seulement l'impédance de l'un des bras du Té ponté car, non seulement nous introduisons un coefficient de réflexion non nul, mais encore l'écart qui en résulte pour A aurait pu être obtenu en conservant le Té équilibré.

III - 2 - b - Déséquilibre au 2ème ordre :

Nous allons nous efforcer en faisant varier Z_1 et Z_2 simultanément, de ne pas faire apparaître de terme en $\frac{dZ}{R_0}$, qui peut s'intégrer dans le terme en $\frac{Z}{R_0}$ et de faire apparaître un terme en $(\frac{dZ}{R_0})^2$ qui introduira peut-être pour dA des bosses nouvelles.

$$\boxed{Z_1 = Z(1 + \epsilon) \quad ; \quad Z_2 = \frac{1}{Z(1 - \epsilon)}} \quad (20)$$

Calcul de ρ : $Z, Z_2 = \frac{1+\varepsilon}{1-\varepsilon} \approx 1+2\varepsilon+2\varepsilon^2$

$$\frac{Z_1}{Z_2} = Z(1+\varepsilon)Z(1-\varepsilon) = Z^2(1-\varepsilon^2)$$

$$\rho = \frac{1}{2} \left| \frac{Z_1 - \frac{1}{Z_2}}{Z_1 - \frac{1}{Z_2} + \frac{Z_1}{Z_2} + 1 + \frac{Z}{Z_2}} \right| = \frac{1}{2} \left| \frac{2Z\varepsilon}{2Z\varepsilon + Z^2 - Z^2\varepsilon^2 + 1 + 2Z - 2Z\varepsilon} \right|$$

$$\rho = \left| \frac{Z\varepsilon}{Z^2 + 2Z + 1 - Z^2\varepsilon} \right| = \left| \frac{Z\varepsilon}{(Z+1)^2} \left[1 + \frac{Z^2\varepsilon^2}{(Z+1)^2} \right] \right|$$

$$\rho = \left| \frac{dZ}{(Z+1)^2} \left[1 + \left(\frac{dZ}{1+Z} \right)^2 \right] \right| \quad (21)$$

ou plus simplement

$$\rho = \left| \frac{R_0 dZ}{(Z+R_0)^2} \right| \quad (21')$$

Calcul de e^Γ :

$$e^\Gamma = 1 + \frac{Z_1 + \frac{1}{Z_2} + 2\frac{Z_1}{Z_2}}{Z_1 + \frac{1}{Z_2} + 2} = 1 + \frac{Z(1+\varepsilon) + Z(1-\varepsilon) + 2Z^2(1-\varepsilon^2)}{Z(1+\varepsilon) + Z(1-\varepsilon) + 2}$$

$$e^\Gamma = 1 + \frac{2Z + 2Z^2(1-\varepsilon^2)}{2Z + 2} = 1 + \frac{Z(1+Z) - Z^2\varepsilon^2}{1+Z}$$

$$e^\Gamma = 1 + \frac{Z}{R_0} - \frac{(dZ)^2}{R_0(Z+R_0)} \quad (22)$$

Remarque : la formule 22 est parfaitement rigoureuse.

.../...

$$e^{\Gamma_0} = 1 + \frac{Z}{R_0} \quad e^{\Gamma - \Gamma_0} = 1 - \frac{(dZ)^2}{R_0(R_0+Z)} \frac{R_0}{(R_0+Z)}$$

$$\boxed{e^{\Gamma - \Gamma_0} = 1 - \left(\frac{dZ}{R_0+Z} \right)^2} \quad (23)$$

Nous savons que $\Gamma = A + j\psi$. C'est l'affaiblissement composite A qui est intéressant

$$A - A_0 = \text{Log} \left| 1 - \left(\frac{dZ}{R_0+Z} \right)^2 \right|$$

Posons $R_0 + Z = Me^{j\psi}$ Il vient $\begin{cases} M = \sqrt{\frac{(R_0+X)^2 + Y^2}{R_0+X}} \\ \psi = \text{Arctg} \left(\frac{Y}{R_0+X} \right) \end{cases}$ avec $Z = X + jY$

$$\left(\frac{dZ}{R_0+Z} \right)^2 = \left(\frac{dM}{M} \right)^2 - d\psi^2 + 2j \frac{dM}{M} d\psi$$

$$A - A_0 = \text{Log} \left| 1 - \left(\frac{dZ}{R_0+Z} \right)^2 \right|$$

$$A - A_0 = \text{Log} \left| 1 - \left(\frac{dM}{M} \right)^2 + (d\psi)^2 - 2j \frac{dM}{M} d\psi \right|$$

$$A - A_0 = \text{Log} \left| \left[1 - \left(\frac{dM}{M} \right)^2 + (d\psi)^2 \right] \left[1 - 2j \frac{dM}{M} \frac{d\psi}{1 - \left(\frac{dM}{M} \right)^2 + (d\psi)^2} \right] \right|$$

Sachant que $|1 - j\varepsilon| = \sqrt{1 + \varepsilon^2} \neq 1 + \frac{\varepsilon^2}{2}$

$$A - A_0 = \text{Log} \left\{ \left[1 - \left(\frac{dM}{M} \right)^2 + (d\psi)^2 \right] \left[1 + 2 \left(\frac{dM}{M} \right)^2 \frac{d\psi^2}{\left[1 - \left(\frac{dM}{M} \right)^2 + (d\psi)^2 \right]^2} \right] \right\}$$

$$A - A_0 = \text{Log} \left[1 - \left(\frac{dM}{M} \right)^2 + (d\psi)^2 \right]; \quad \text{Log}(1-u) = -u + \frac{u^2}{2} \dots$$

$$\boxed{A - A_0 = (d\psi)^2 - \left(\frac{dM}{M} \right)^2} \quad (24)$$

.../...

$$\boxed{d\psi = \frac{(R_0 + X)dY - YdX}{(R_0 + X)^2 + Y^2}} \quad (25) \quad \boxed{\frac{dM}{M} = \frac{(R_0 + X)dX + YdY}{(R_0 + X)^2 + Y^2}} \quad (26)$$

Calcul de W_{e_1} :

$$\begin{aligned} W_{e_1} &= 1 + \frac{2(z_1 z_2 - 1)}{z_1 z_2 - 1 + 2z_1 + 2z_2 + 4} = 1 + \frac{2(z_1 - \frac{1}{z_2})}{z_1 - \frac{1}{z_2} + 2 + \frac{2z_1}{z_2} + \frac{4}{z_2}} \\ &= 1 + \frac{2(2z\varepsilon)}{2z\varepsilon + 2 + 2z^2(1-\varepsilon^2) + 4z(1-\varepsilon)} = 1 + \frac{2z\varepsilon}{(z+1)^2 - z\varepsilon - z^2\varepsilon^2} \end{aligned}$$

$$\boxed{W_{e_1} = 1 + \frac{2dZ}{(Z+1)^2} \left[1 + \frac{dZ}{(Z+1)^2} \right]} \quad (27)$$

Conclusion sur le déséquilibre au 2ème ordre :

Pour obtenir un déséquilibre efficace il est nécessaire de travailler à module constant (apparition de bosses) ou à phase constante (apparition de creux) en ce qui concerne $R_0 + Z$.

Quant à savoir si le déséquilibre sera effectivement utile (apparition de bosses ou de creux compensateurs) seule l'expérience peut le montrer.

.../...

IV - TROISIEME TENTATIVE.-

Nous garderons une structure identique à celle de la 2ème tentative mais nous allons nous efforcer de donner de l'importance aux éléments de cellule n° 2. En effet, le correcteur, dont le prix de revient est proportionnel au nombre d'éléments qui le constituent, ne doit pas comporter d'éléments à peu près inutiles.

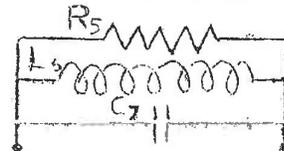
Nous introduirons les capacités parasites des selfs dont nous avons vu l'importance au cours de la deuxième tentative. Nous leur donnerons des valeurs fixes nettement supérieures aux valeurs réelles des capacités des selfs de ce type et lors de la construction nous complèterons les valeurs effectives des capacités parasites afin d'obtenir les valeurs définies à priori. Il est difficile de procéder autrement, car ce n'est que lorsque la self est construite et mise en place que l'on peut mesurer sa capacité parasite. Nous n'effectuerons pas de modelage sur les capacités parasites.

Enfin, nous déséquilibrerons les tés afin d'obtenir un juste milieu entre l'affaiblissement et le coefficient de réflexion. Remarquons que l'introduction de capacités parasites produit un déséquilibre qui ne peut être compensé par l'adjonction de selfs sur le bras opposé, car les capacités parasites étant inférieures à 30 p^{F} , les selfs correspondantes vaudraient moins de $0,3 \text{ } \mu\text{H}$, or on peut difficilement descendre en dessous de $0,5 \text{ } \mu\text{H}$.

IV - 1 - MODIFICATION DE LA 2ème CELLULE :

La base de départ choisie est constituée par les résultats de la 2ème tentative. En particulier pour la 2ème cellule nous avons :

$$R_5 = 2,34^{\Omega} \quad L_6 = 21,36 \text{ } \mu\text{H}$$
$$C_7 = 60.000 \text{ p}^{\text{F}}$$



Bras supérieur de la 2ème cellule

.../...

Considérons le tableau ci-dessous qui représente l'affaiblissement A_2 de la cellule 2 et l'écart $A - A_0$.

Indice i	Fréquence kHz	A_2 mN	$A - A_0$ mN
1	24	15,6	2,2
2	30	17,8	4,8
3	50	21,2	6,5
4	60	21,9	5,1
5	80	22,6	+ 7,3*
6	100	23,0	- 6,2*
7	125	23,1	- 6,7
8	150	23,1	- 7,3
9	175	23,1	- 4,2
10	200	23,0	- 3,0
11	225	22,8	2,0
12	250	22,6	0,5
13	264	22,5	7,1
14	320	22,0	2,4
15	350	21,7	3,3
16	375	21,4	- 1,0
17	400	21,2	- 7,3
18	425	20,9	0,8
19	450	20,6	7,3
20	475	20,2	- 0,7
21	500	19,9	- 7,0
22	525	19,6	6,1
23	550	19,3	7,4

Nous constatons la présence d'une variation brusque de $A - A_0$ pour les fréquences 5 et 6 (on désignera par la suite les fréquences plus souvent par leurs indices que par leurs valeurs).

Efforçons-nous en modelant la 2ème cellule de faire décroître cet écart en premier, car c'est là que se situe la principale difficulté du Modelage que nous allons exécuter. De même qu'il est plus difficile de représenter correctement une fonction à l'endroit où elle présente une discontinuité de même en Modelage il est plus difficile

.../...

d'abaisser deux extremums très voisins et de signes opposés.

En déplaçant l'extremum de A_2 de la fréquence 8 vers les fréquences 3 et 4, la cellule 2 au lieu de participer à la discontinuité, la compensera en partie. On suivra en annexe (tableau V) l'évolution de $A - A_0$ au cours des essais.

$$\text{Posons } d = [(A - A_0) \text{ fréquence } 5] - [(A - A_0) \text{ fréquence } 6]$$

Initialement $d = 13,54 \text{ mN}$

N° de l'essai	Remarques	Nom de l'élément modifié	Valeurs de l'élément modifié		d
			Ancienne	Nouvelle	
E ₁		C ₇ L ₆	60.000 p ^F 21,36 μH	200.000 p ^F 40 μH	12,67 mN
E ₂	On relève A-A ₀ aux hautes fréquences en relevant R 8	R ₈	13,06 Ω	14,5 Ω	12,66
E ₃	En augmentant C ₇ on accentue l'action compensatrice	C ₇	200.000 p ^F	250.000 p ^F	12,33
E ₄	On diminue l'influence de la cellule 1	R ₁	133,3 Ω	125 Ω	17,65
E ₅	afin de pouvoir augmenter l'influence de la cellule 2	R ₅	2,34 Ω	6 Ω	9,53

Au 5ème essai, nous constatons que d ne vaut plus que 9,53 mN, si l'on pratique un recadrage il en résultera en 5 et 6, 2 bosses de 4,8 mN inférieures à 5 mN.

Comme certains éléments ont été modifiés fortement nous reconstruisons un tableau des écarts de l'affaiblissement pour des variations de 1 % de chacun des éléments. (Tableau V)

Efforçons nous de réduire les bosses qui sont apparues.

.../...

Essai 6 : Une combinaison entre R_1 et R_5 va permettre de réduire notablement la bosse en 5 ; il est toutefois nécessaire de faire une correction à la modification mixte R_1, R_5 , si l'on veut éviter que la bosse en 1 ne croisse que dans des proportions trop importantes, on modifiera donc légèrement en même temps L_2 .

ESSAI 6 : $R_1 : + 1 \%$; $R_5 : - 2 \%$; $L_2 : - 0,5 \%$.

Nous ne commenterons plus sauf exception chacun des essais, car d'une part, nous allons en effectuer un nombre important, d'autre part, le but que nous poursuivons à chaque essai est en principe toujours le même, à savoir:réduire une ou plusieurs bosses et il apparaît clairement par les résultats obtenus dans les tableaux où figure $A - A_0$ (Tableau VI, VII et suivants).

ESSAI 7 : $C_{10} : - 4,5 \%$; $L_9 : + 6,5 \%$

ESSAI 8 : $C_4 : - 1 \%$; $C_7 : + 3 \%$; $R_5 : + 2 \%$; $C_{10} : - 2 \%$; $L_9 : + 1 \%$

ESSAI 9 : $C_4 : - 1 \%$; $C_7 : + 3 \%$; $R_5 : + 2 \%$; $C_{10} : - 6,5 \%$; $L_9 : + 7,5 \%$

ESSAI 10: $R_3 : + 20 \%$; $L_9 : + 0,82 \%$

ESSAI 11; $L_2 : + 1 \%$; $C_6 : - 9 \%$; $R_5 : - 1,8 \%$

ESSAI 12 : $L_2 : + 1 \%$; $C_6 : - 9 \%$; $R_5 : - 1,8 \%$

ESSAI 13: $R_1 : + 0,5 \%$; $L_2 : + 1 \%$; $R_3 : + 2 \%$; $R_5 : - 1,8 \%$; $L_6 : - 9 \%$

Au cours de l'essai 14, 7 éléments ont été modifiés simultanément, il est intéressant de comparer l'écart prévu pour $A - A_0$ par rapport à l'essai 13, à l'écart effectivement obtenu (tableau VI)

ESSAI 14 : $R_1 : + 0,1 \%$; $C_4 : - 0,2 \%$; $L_3 : + 0,165 \%$; $C_7 : + 2 \%$;

$L_6 : - 2 \%$; $C_{10} : - 0,5 \%$; $L_9 : - 0,51 \%$.

ESSAI 15 : $R_1 : - 0,1 \%$; $C_4 : - 0,25 \%$; $L_3 : + 1 \%$; $R_5 : + 0,8 \%$;
 $L_9 : + 0,7 \%$.

.../...

ESSAI 16 : R_1 : - 0,07 % ; C_4 : - 1,175 % ; L_3 : + 3,2 % ; C_7 : + 3 % ;
 L_6 : + 3 % ; R_5 : + 3,56 % ; C_{10} : - 1 % ; L_9 : 1,09 % .

ESSAI 17 : R_1 : - 0,2 % ; C_4 : - 0,5 % ; L_3 : + 2 % ; R_5 : 1,6 % ; L_9 :
+ 1,4 % .

Le tableau des écarts de A n'étant plus valable par suite de modifications importantes subies par certains éléments, nous en recalculons un autre. Nous augmentons le nombre des fréquences : car des extremums sont apparus en dehors des 10 fréquences que nous étudions :

ESSAI 18 : L_3 : - 0,8 % ; C_7 : + 2 % ; R_5 : + 2 % ; C_{10} : - 0,1 % ;
 R_8 : + 0,8 % .

ESSAI 19 : R_3 : + 1 % ; C_{10} : - 0,1 % ; L_9 : + 0,05 % ; R_8 : - 0,2 % .

ESSAI 20 : C_4 : - 0,2 % ; L_3 : + 0,4 % ; C_7 : + 1,5 % ; L_6 : - 1 % .

Nous arrêtons ici les essais avec la structure de la 2ème tentative car ce n'est pas la structure définitive, puisque nous devons introduire des capacités parasites. Nous ne sommes d'ailleurs pas loin d'un écart à la Tchebycheff car la bosse la plus importante est - 5,63 et la plus faible - 4,53.

Remarquons la meilleure utilisation que nous avons fait de la 2ème cellule, en effet, l'écart maximum est actuellement de 5,63 mN alors qu'avec une structure identique lors de la 2ème tentative nous avons obtenu un écart de 7,3 mN.

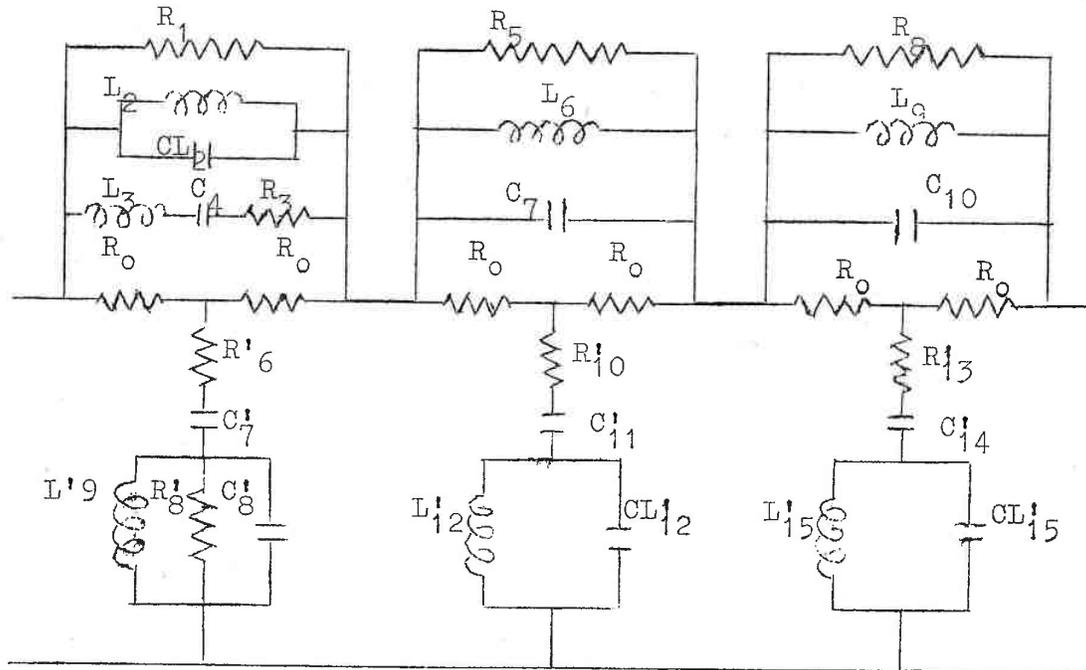
IV - 2 - INTRODUCTION DES CAPACITES PARASITES :

Les selfs L_2 (897,4 MHz) et L'_{15} (845,4 MHz) auront sans doute une capacité parasite répartie d'environ 15 p^F que nous compléterons par une capacité en parallèle de façon à obtenir une capacité parallèle de 30 p^F que nous appellerons CL_2 pour L_2 et CL'_{15} pour L'_{15} .

.../...

La self L'_{12} est plus importante ($2879,50 \mu\text{H}$) et sa capacité parasite répartie sera au mieux : 30 p^{F} ; nous prendrons $CL'_{12} = 50 \text{ p}^{\text{F}}$.

Ci-dessous la nouvelle structure qui sera la structure définitive :



$R_1 = 126,537 \Omega$	$C_7 = 287,950 \text{ p}^{\text{F}}$	$C_{10} = 84,539 \text{ p}^{\text{F}}$
$L_2 = 897,439 \mu\text{H}$	$L_6 = 27,94 \mu\text{H}$	$L_9 = 1,215 \mu\text{H}$
<u>$CL_2 = 30 \text{ p}^{\text{F}}$</u>	$R_5 = 6,38099 \Omega$	$R_8 = 14,587 \Omega$
$C_4 = 6,994,6 \text{ p}^{\text{F}}$		
$L_3 = 14,271 \mu\text{H}$		
$R_3 = 1,8039 \Omega$		
$C'_{7} = 89,743,9 \text{ p}^{\text{F}}$	$C'_{11} = 2794 \text{ p}^{\text{F}}$	$C'_{14} = 121,5 \text{ p}^{\text{F}}$
$R'_{6} = 79,0283 \Omega$	$R'_{10} = 1567,15 \Omega$	$R'_{13} = 685,542 \Omega$
$C'_{8} = 1427,1 \text{ p}^{\text{F}}$	$L'_{12} = 1879,5 \mu\text{H}$	$L'_{15} = 845,39 \mu\text{H}$
$L'_{9} = 69,946 \mu\text{H}$	<u>$CL'_{12} = 50 \text{ p}^{\text{F}}$</u>	<u>$CL'_{15} = 30 \text{ p}^{\text{F}}$</u>
$R'_{8} = 5543,54 \Omega$		

.../...

Avant de donner aux 3 capacités supplémentaires les valeurs 30, 50 et 30 p^F, donnons leur les valeurs 1, 1 et 1 p^F, afin de déterminer avec quelle précision elles devront être construites (voir tableau VIII en annexe)

ESSAI 21 : $CL_2 = 1 \text{ p}^F$; $CL'_{12} = 1 \text{ p}^F$; $CL'_{15} : 1 \text{ p}^F$.

A la fréquence 23, l'écart avec l'essai 20 est de 1,7 mN. Cet écart est très important car C'_{14} qui est en série avec L'_{15} vaut 121,5 p^F et CL'_{15} n'est pas négligeable devant C'_{14} . Par conséquent il faudra mesurer la capacité parasite répartie de L'_{15} avec une précision inférieure au p^F et la compléter par une capacité mesurée avec une précision identique.

ESSAI 22 : $CL_2 = 30 \text{ p}^F$; $CL'_{12} = 50 \text{ p}^F$; $CL'_{15} = 30 \text{ p}^F$

A - A₀ est complètement perturbé et on se rend compte qu'il a été inutile de poursuivre les essais du paragraphe 4 - 1 aussi loin qu'ils ont été poussés.

Comme nous sommes maintenant très éloignés d'un écart à la Tchebycheff nous ferons varier simultanément les éléments correspondants sur chaque bras d'un Té de façon à ne pas déséquilibrer inutilement le correcteur. Ce n'est que lorsque nous aurons atteint un écart à la Tchebycheff que nous déséquilibrerons.

ESSAI 23 : (L_6 et C'_{11}) : + 1 % ; (L_9 et C'_{14}) : - 14 %

ESSAI 24 : $R_3 = 2^\Omega$; $R'_8 : 5000^\Omega$; $R_8 : 16^\Omega$; $R'_{13} : 625^\Omega$.

ESSAI 25 : $R_3 = 2,2^\Omega$; $R'_8 : 4545^\Omega$; $R_8 : 17,5^\Omega$; $R'_{13} : 571,4^\Omega$

ESSAI 26 : $R_3 = 2,6^\Omega$; $R'_8 : 3846^\Omega$; $R_8 : 20,5^\Omega$; $R'_{13} : 487,8^\Omega$

ESSAI 27 : (L_3 et C'_8) : - 5 %

ESSAI 28 : (C_{10} et L'_{15}) : - 1 %

.../...

ESSAI 29 : (C_7 et L'_{12}) : - 5 % ; $R_3 = 2,652^{\Omega}$; $R'_8 = 3771^{\Omega}$

ESSAI 30 : (L_9 et C'_{14}) : + 0,75 % .

Au vu du tableau VIII, on pourrait croire que l'écart maximum est de 5,02 mN ; mais le tableau IX nous montre la présence d'une bosse très importante (18,3 mN) à la fréquence 20. On voit le danger de travailler "à l'économie" sur un nombre de fréquences restreint sans effectuer de temps à autre un essai sur toutes les fréquences.

Comme la cellule 3 a été fortement modifiée par l'adjonction de CL'_{15} on recalcule les variations de A pour des variations de 1 % des couples $C_{10}L'_{15}$, $L_9C'_{14}$, $R_8R'_{13}$. En les comparant aux variations correspondantes sur le tableau VII on constate d'importantes modifications, pour la ligne R_8 et on est amené à donner successivement et non plus simultanément un accroissement à R_8 et à R'_{13} . R_8 (+ 10 %) puis R'_{13} (- 10 %).

ESSAI 31 : R'_{13} : + 20 % ; (C_4 et L'_9) : + 0,1 %.

ESSAI 32 : R_8 : + 2 % ; R'_{13} : 4 %.

ESSAI 33 : (L_9 et C'_{14}) : + 1 %.

ESSAI 34 : R'_{13} : + 2 %.

ESSAI 35 : (L_3 et C'_8) : + 0,5 %.

ESSAI 36 : (C_4 et L'_9) : + 0,5 % ; R_8 : + 1 %.

ESSAI 37 : (C_7 et L'_{12}) : - 1 % .

ESSAI 38 : C_4 et L'_9 : + 0,3 %.

Le coefficient de réflexion vaut actuellement 7,22% (bas du tableau IX). Il convient maintenant de ne plus le laisser augmenter et de chercher même à le faire décroître tout en égalisant $A - A_0$.

ESSAI 39 : (L_6 et C'_{11}) : - 2 % ; (R_5 et $\frac{1}{R'_{10}}$) : - 0,4 % ; (C_{10} et L'_5) : - 0,1 % .

.../...

ESSAI 40 : (L_6 et C'_{11}) : - 0,5 % ; (R_5 et $-\frac{1}{R'_{10}}$) : - 0,5 %.

ESSAI 41 : (C_{10} et L'_{15}) : - 0,2 %.

ESSAI 42 : (L_9 et C'_{14}) : + 0,5 % ; R'_{13} : + 1,5 %.

Le Modelage devenant de plus en plus difficile, nous allons pratiquer le déséquilibre au 2ème ordre. C'est-à-dire que si l'on fait varier L_2 de + 1 %, par exemple, on fera varier simultanément C'_7 de - 1 % de façon à obtenir une ligne d'écart pour A différente de celle que l'on aurait obtenue avec des variations identiques et de même sens pour L_2 et C'_7 . On constate sur le tableau X en annexe, qu'effectivement dans la majorité des cas, les lignes d'écart pour A obtenues par variations simultanées, soit de même sens ou de sens opposé des éléments correspondants, sont bien différentes.

On peut comparer également les lignes correspondant à $L_2 + 1$ %, $C'_7 - 1$ % et à $L_2 + 10$ %, $C'_7 - 10$ % et vérifier l'exactitude de la formule (23) du paragraphe III - 2 - b.

ESSAI 43 : (R_3 et $-R'_8$) : - 4 % ; (L_3 et C'_8) : + 0,3 % ; (C_{10} et L'_{15}) : - 0,2 % ; (C_{10} et $-L'_{15}$) : + 0,2 %.

(Remarque : ici C_{10} n'a pas varié).

ESSAI 44 : (R_1 et R'_6) : + 9,95 % ; (R_1 et $-R'_6$) : + 0,05 %.

Un certain nombre d'éléments correspondants sont assez différenciés pour qu'on puisse les faire varier individuellement. C'est le cas en particulier des éléments de la 3ème cellule ainsi qu'en témoigne le tableau XI (annexe).

Notons en passant que le calcul du tableau XI avec les 23 fréquences (ici il n'y a que 14 fréquences qui sont figurées) a demandé 1 h 30 en Flec et en utilisant les ordres de perturbations.

ESSAI 45 : C'_{11} : - 8,46 % ; R'_{10} : + 0,54 % ; L'_{12} : + 2,5 %.

.../...

Les 3 accroissements ci-dessus à donner à C'_{11} , R'_{10} , L'_{12} , n'ont pas été obtenus comme pour les essais précédents d'une manière approximative. Nous nous sommes imposés une ligne d'écart ΔA à obtenir pour 3 fréquences.

Fréquences	4	5	6
ΔA à obtenir ^{mN}	- 0,100	0,200	0
$C'_{11} : + 1 \%$	- 0,010	-0,083	-0,069
$R'_{10} : + 1 \%$	- 0,292	-0,181	-0,058
$L'_{12} : + 1 \%$	- 0,010	-0,160	-0,220

Rappel des écart sur A

Nous avons soumis au programme d'inversion de matrice le système linéaire suivant :

$$\begin{aligned}
 - 0,010 \Delta C'_{11} - 0,292 \Delta R'_{10} - 0,010 \Delta L'_{12} &= - 0,100 \\
 - 0,083 \Delta C'_{11} - 0,181 \Delta R'_{10} - 0,160 \Delta L'_{12} &= 0,200 \\
 - 0,069 \Delta C'_{11} - 0,058 \Delta R'_{10} - 0,220 \Delta L'_{12} &= 0
 \end{aligned}$$

Solution : $\Delta R'_{10} = + 0,54$; $\Delta C'_{11} = - 8,46$; $\Delta L'_{12} = 2,50$

ΔA observé	- 0,135	0,252	0,054
--------------------	---------	-------	-------

Bien que C'_{11} ait varié de plus de 8 %, on retrouve le ΔA prévu. Ce résultat encourageant nous invite à procéder par résolution de petits systèmes linéaires pour choisir les accroissements des éléments sur lesquels nous travaillons à chaque essai. Nous avons déjà au cours de cette 3ème tentative essayé d'utiliser le programme d'inversion de matrice pour des matrices d'ordre 10 ; mais, non seulement il résultait une grosse perte de temps dans sa mise en oeuvre (écriture des constantes, perforations des cartes, détection des erreurs de transcription), mais encore les solutions étaient inutilisables. En effet, en général les accroissements étaient trop importants, il fallait les réduire si bien que l'amélioration de $A - A_0$ devenait

.../...

négligeable et même disparaissait derrière les erreurs de chute (n'oublions pas que nous travaillons en virgule flottante).

Pour éviter les tâtonnements de la recherche manuelle plus rapide mais moins directe et moins précise qu'une inversion de matrice nous allons nous efforcer d'élaborer un procédé utilisant le programme d'inversion de matrice, en réduisant la perte de temps qu'elle entraîne au minimum.

IV - 3 - MODELAGE SEMI-AUTOMATIQUE PAR ACTION SIMULTANEE d'un PETIT
NOMBRE de PARAMETRES

La base de travail est toujours la matrice des écarts de A, rectangulaire : 23 fréquences x 22 éléments.

Nous nous proposons de supprimer la manipulation indispensable lorsque l'on veut extraire de cette matrice une petite matrice de degré plus élevé.

Le programme d'inversion de matrice (ref. 05.2.003.VN) impose que le système soit rangé ligne par ligne sur le tambour. Nous disposons de la matrice principale 23 x 22 perforée en 8 mots par carte ligne par ligne.

Pour réaliser rapidement l'inversion de matrice de l'essai 45 nous donnons au programme complémentaire du programme I.M (d'inversion de matrice) 6 nombres caractérisant notre choix.

4, 5, 6 (fréquences n° 4, 5 et 6)

14, 15, 16 (éléments C'₁₁, R'₁₀ et L'₁₂). (les éléments ont été numérotés de 1 à 22).

Le programme complémentaire lit alors l'ensemble de la matrice principale et prélève la petite matrice carrée (3 x 3) que nous avons

.../...

définie et la range convenablement sur le tambour. Il ne nous reste plus qu'à charger le vecteur second membre que nous avons choisi (dans l'essai 45 ce serait : - 0,100 ; + 0,200 ; 0,000).

Les indications que l'on fournit au programme complémentaire concernant le choix des fréquences et des éléments, tiennent dans les 45 (23 + 22) premières colonnes d'une carte contrôle ; la présence d'un 8 ou 9 permettant de savoir si tel ou tel élément ou fréquence a été choisi.

1 2 3 <u>4 5 6</u> 7 8 9 10 21 22 23	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 <u>141516</u> 21 22
8 8 8 9 9 9 8 8 8 8 8 8 8	8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 9 9 9 8 8
Fréquences	Eléments

Carte Contrôle

Alors que pour résoudre un système linéaire de degré n il fallait perforer $n^2 + n$ mots, il n'en faut plus maintenant que n et une carte contrôle. Les risques d'erreur sont pratiquement éliminés et la perte de temps due à la perforation des n mots et de la carte contrôle est minime.

ESSAI 46 : L_2 : + 0,29 % ; R_1 : - 0,03 % ; C_7 : - 0,35 %
 L_6 : - 1,07 % ; R_5 : + 0,04 %.

Fréquences choisies pour effectuer le calcul des 5 accroissements que l'on donnera à L_2 ; R_1 ; C_7 ; L_6 ; R_5 : fréquences n° 2,4,5,6,13.

Fréquences	2	4	5	6	13
$A - A_0$	- 3,92	3,83	- 3,78	3,93	- 3,89
ΔA demandé	0,1	-0,05	0	-0,01	0,01
ΔA obtenu	0,1	-0,05	0,01	0	0,01

.../...

La linéarité est bonne. On peut regretter de ne pas avoir demandé pour la fréquence 6 un $\Delta A = - 0,1^{\text{mN}}$ au lieu de $- 0,01^{\text{mN}}$. Nous ne l'avons pas fait car ΔA aurait été très défavorable pour les fréquences 15 et 17 ainsi que l'ont montré des expériences précédentes ^{non} mentionnées dans cette étude.

ESSAI 47 : Pour compenser le déséquilibre que nous venons d'introduire inutilement en ne faisant varier que des éléments de bras supérieurs, nous faisons varier maintenant des quantités correspondantes les 5 éléments C'_7 ; R'_6 ; L'_{12} ; C'_{11} ; R'_{15} , sans utiliser le programme I.M.

$$C'_7 : + 0,29 \% ; R'_6 : + 0,03 \% ; L'_{12} : - 0,35 \% ; C'_{11} : -1,07 \% \\ R'_{10} : - 0,04 \%$$

Nous gagnons sur $A - A_0$ pour les fréquences : 2,4,5 et nous perdons en 6 et 13.

$$\text{ESSAI 48} : L_2 : + 0,67 \% ; R_1 : - 0,14 \% ; C_7 : - 0,75 \% ; L_6 : -2,69 \% \\ R_5 : + 0,91 \%$$

Fréquences choisies : 2,4,5,6,13.

$$\text{ESSAI 49} : C'_7 : + 1,23 \% ; R_6 : + 0,49 \% ; C'_{11} : - 1,01 \% ; R'_{10} : \\ - 4,41 \% ; L'_{12} : - 3,99 \%$$

Fréquences choisies : 2,4,5,6,13.

Nous arrêtons là l'énumération assez fastidieuse des essais qui maintenant ne présentent plus d'intérêt. Mentionnons seulement que l'on a dû aller jusqu'à l'essai 80 pour obtenir un écart sur l'affaiblissement à la Tchebycheff.

.../...

IV - 4 - RESULTATS FINAUX :

En annexe, le tableau XIII porte en colonnes 3 et 5, respectivement l'affaiblissement calculé et l'écart $A-A_0$, entre l'affaiblissement calculé et l'affaiblissement à obtenir.

$A - A_0$ possède 10 alternances, l'écart maximum a lieu pour la fréquence n° 17 et il vaut 3,495 mN.

Le coefficient de réflexion est maximum pour la fréquence n° 22 il vaut à droite 6,3 %, à gauche 5,7 %.

Cellule I :

$R_1 = 138,954 \Omega$	$R'_6 = 87,5309 \Omega$
$L_2 = 918,81 \mu H$	$C'_7 = 92\,580,8 p^F$
$CL_2 = 30 p^F$	
$C_4 = 6707,79 p^F$	$L'_9 = 73,6201 \mu H$
$r_3 = 2,10661 \Omega$	$R'_8 = 4026,95 \Omega$
$L_3 = 13,823 \mu H$	$C'_8 = 1338,76 p^F$

Cellule II :

$R_5 = 6,3193 \Omega$	$R'_{10} = 1499,48 \Omega$
$L_6 = 23,7377 \mu H$	$C'_{11} = 2260,92 p^F$
$C_7 = 266\,507 p^F$	$L'_{12} = 2741,26 \mu H$
	$C'L'_{12} = 50 p^F$

Cellule III;

$R_8 = 20,9079 \Omega$	$R'_{13} = 610,939 \Omega$
$L_9 = 1,05921 \mu H$	$C'_{14} = 111,887 p^F$
$C_{10} = 86\,478,2 p^F$	$L'_{15} = 807,222 \mu H$
	$C'L'_{15} = 30 p^F$

.../...

IV - 5 - CONSTRUCTION DU CORRECTEUR :

IV - 5 - a - Mesures des capacités :

Connaissant avec quelle précision les capacités ont été réalisées on peut, en consultant le tableau des écarts de l'affaiblissement correspondant à des variations de 1 % des différentes capacités (tableau XIII), en déduire l'écart qui en résultera pour l'affaiblissement.

Capacités en p ^F	Valeur à réaliser	Valeur obtenue	Précision
C ₄	6707, 79	6707, 0	1. 10 ⁻⁴
C ₇	266.507	266.680	7. 10 ⁻⁴
C ₁₀	86.478, 2	86.495	2. 10 ⁻⁴
C' ₇	92.580, 9	92.550	3. 10 ⁻⁴
C' ₈	1338,76	1338, 4	3. 10 ⁻⁴
C' ₁₁	2260,92	2262,6	8. 10 ⁻⁴
C' ₁₄	111, 887	111, 7	1,7. 10 ⁻³

Dans les conditions d'utilisation (24 à 550 KHZ), l'angle des pertes des condensateurs étudiés est très faible et bien inférieur au facteur de pertes des bobines avec lesquelles ils sont connectés et l'hypothèse, adoptée dans les calculs précédents, selon laquelle les condensateurs sont parfaits, est justifiée.

IV - 5 - b - Réglage des selfs :

Selfs en pots : L₂ = 918,8 μH (80 spires)
 L₉ = 73,62 (22 spires)
 L'₁₂ = 2741,3 (139 spires)
 L'₁₅ = 807,2 (74 spires)

.../...

Selfs sur air : $L_3 = 13,823 \mu^H$ (35 spires)
 $L_6 = 23,74$ (45 spires)
 $L_9 = 1,059$ (10 spires)

Self L'_{12} : Elle a été réalisée avec un compartimentage. Sa capacité parasite vaut $3 p^F$. On avait prévu une capacité en parallèle sur L'_{12} de $50 p^F$. On a donc complété la capacité répartie par une capacité de $47 p^F$.

Réglage de L'_{12} :

Eléments résonnants	Fréquence calculée	Fréquence mesurée
$L'_{12} (C'L'_{12} + C'_{11})$	63.234 HZ	63.234 HZ
$L'_{12}(C'L'_{12})$	429.900 HZ	430.400 HZ

Self L_2 : Capacité parasite : $16 p^F$ complétée à $30 p^F$ par une capacité de $14 p^F$

$L_2 (CL_2 + C_4)$	63.965 HZ	63.965 HZ
$L_2(CL_2)$	958.620 HZ	970.000 HZ

Self L'_{15} : Capacité parasite : $15 p^F$ complétée à $30 p^F$ par une capacité de $15 p^F$

Self L'_9 : Nous réglons L'_9 avec C'_7 et C'_8 à $60.536,5$ HZ.

Puis nous faisons résonner L'_9 avec C'_8 . La fréquence de résonance vaut $503,97$ KHZ au lieu de $506,96$ (*) = $-2,99$ KHZ est dû à la présence d'une capacité pour L'_9 de valeur ΔC

$$\Delta C = -2 \frac{\Delta f}{f} \cdot C = -2 \cdot \frac{-2,99}{507} \cdot 1340 p^F = 16 p^F$$

Nous diminuons C'_8 de $16 p^F$ et nous obtenons une résonance avec C'_8 à $506,91$ KHZ, ce qui est correct. Nous ne referons pas le réglage de L'_9 avec C'_7 et C'_8 car $16 p^F$ est négligeable devant les $92.550 p^F$ de C'_7 .

(*) L'écart $\Delta f = 503,97 - 506,96 = -2,99$ KHZ

.../...

IV - 5 - c - Mesures des facteurs de qualité des selfs : Q

Selfs	Fréquence	Q	$L\omega$	$R=QL\omega$	$r = \frac{L\omega}{Q}$	Résistance connect.	
						Valeur théorique	Nouvelle valeur
L_2	64 KHZ	332	370	120 K Ω		138,9 Ω	139 Ω
L_3	523	53	45		0,85 Ω	2,1 Ω	1,25 Ω
L_6	63,3	42	9,4	395 Ω		6,3 Ω	6,35 Ω
L_9	526	27	3,5	95 Ω		21 Ω	27 Ω
L'_9	507	250	234	58 K Ω		4027 Ω	4325 Ω
L'_{12}	63	320	1080		3,3 Ω	1500 Ω	1497 Ω
L'_{15}	470	115	2350		20 Ω	611 Ω	591 Ω

Les différentes bobines étant connectées en série ou en parallèle avec des résistances il convient d'inclure la résistance d'une bobine à la résonance, dans la résistance correspondante.

Par exemple, L_3 à 523 KHZ présente une résistance de 0,85 Ω ; pour obtenir la résistance r_3 en série avec L_3 , qui vaut 2,1 Ω , nous placerons en série avec L_3 une résistance de 1,25 Ω .

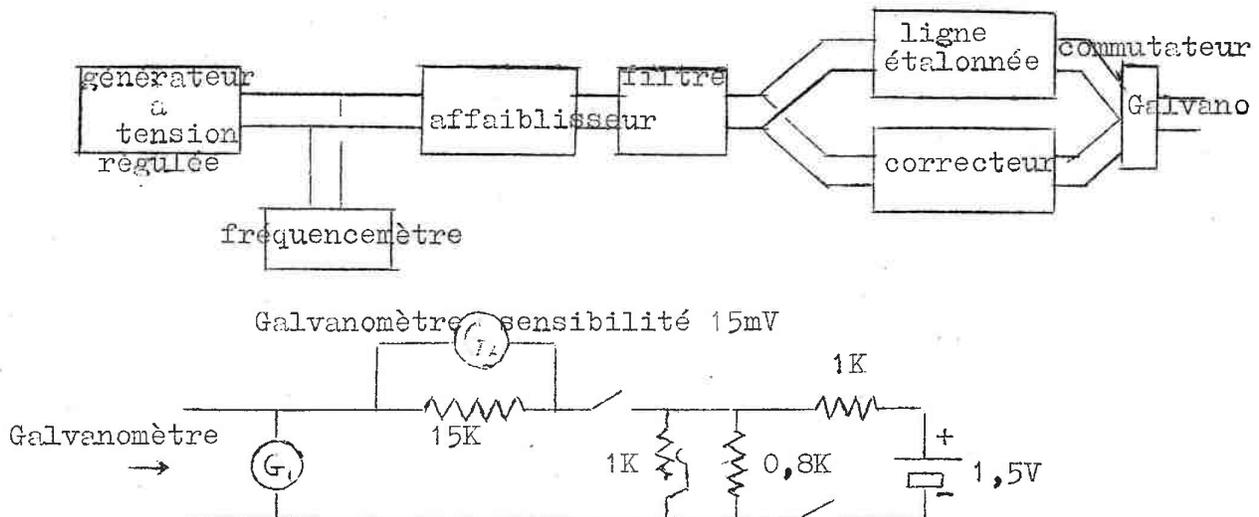
Remarquons que dans les calculs préparatoires nous avons admis que la résistance des selfs était constante ce qui est inexact. Cependant, cette résistance en série avec la self ou forte devant la résistance en parallèle, l'erreur commise est minime. L'erreur est d'autant plus négligeable que le facteur de qualité est grand.

* \times étant toujours faible devant la résistance ...

.../...

IV - 5 - d - Réglages des cellules :

Montage utilisé



L'affaiblissement du correcteur est comparé à celui d'une ligne étalonnée pouvant varier de centinépér en centinépér.

Une variation d'un centinépér produisant en G_2 un déplacement du spot de 30 mm, nous pourrions apprécier facilement le demi-millinépér.

Réglage de la 1ère cellule :

La première mesure (colonne (4) du tableau ci-dessous) effectuée sur la cellule I donne un écart (5), avec la valeur théorique prévue (3), compris entre - 2,7 mN et + 2,2 mN.

En consultant le tableau XIII, nous constatons que l'écart de - 2,7 mN pour la fréquence n° 5 sera très bien réduit par une variation de - 1 % de R'_6 .

Quant à l'écart de + 2,2 mN pour la fréquence n° 12 il impose une variation de 0,8 % sur C_4 .

.../...

① indice	② fréquence en KHZ	③ affaiblis. valeur théorique	④ affaiblis. essai initial	⑤ écart ④ - ③	⑥ correct. - 1 % R'6	⑦ correct. - 1 % R'6 et 0,68% C4	⑧ écart ⑦ - ③
1	24	635,8	637	+ 1,2	636	636	+ 0,2
3	50	804,7	803	- 1,7	805	805	+ 0,3
5	80	799,7	797	- 2,7	800	799,5	- 0,2
6	100	763,7	761	- 2,7	763	763	- 0,7
8	150	634,8	633	- 1,8	634	633	- 1,8
10	200	490,9	492,6	- 1,7	493	492	+ 1,1
12	250	354,8	357	+ 2,2	357	356	+ 1,2
15	350	144,3	145,3	+ 1	145	144	- 0,3
17	400	78,4	79,2	+ 0,8	79	78,5	+ 0,1
23	550	26,4	27	+ 0,6	26,3	26	- 0,4

L'écart, finalement, est compris entre -1,8 mN et + 1,2 mN. Nous n'insisterons pas ; il est possible de faire d'autres corrections mais elles seront délicates car l'écart de - 1,8 mN se trouve à la fréquence n° 8, fréquence qui n'est le sommet d'aucune ligne d'écart.

Réglage de la cellule 2 :

L'écart entre les valeurs de l'affaiblissement mesurée et calculée varie entre + 0,2 mN et - 2,2 mN. Nous n'avons pas cherché à améliorer cette cellule car il eût fallu faire varier la totalité des éléments. L'écart de - 2,2 mN est dû vraisemblablement à la faible valeur du facteur de qualité de L₆ (Q = 42)

.../...

Réglage de la cellule 3 :

Le premier essai est assez mauvais puisqu'il révèle à la fréquence n° 20 un écart de - 11,5 mN et un écart de + 7,5 mN à la fréquence n° 22.

En ^{nous}inspirant du tableau XIII nous faisons varier les éléments les plus faciles à modifier : R_8 (- 8 %) R'_{13} (- 10 %) et nous retirons la bande de réglage de L'_{15} (L'_{15} diminue).

Indice	fréquence KHZ	valeur théorique	essai initial	R_8 (-8%) R'_{13} (-10%)	et L'_{15}	et R_8 (+3%)	Ecart essai % final
17	400	27,9	27		25	25	- 2,9
18	425	48,1	49	49	46	43,5	- 4,6
19	450	84,4	83	87	82	80	- 4,4
20	475	118,5	107	113	118,4	121,5	+ 3
21	500	124,5	118	116	125	128,5	+ 4
22	525	119,5	127	119	123,5	116,5	- 3
23	550	89,6	89	87,5	89,3	89,5	- 0,1

Le dernier essai (avant dernière colonne du tableau ci-dessus) peut paraître plus mauvais que le précédent ; mais il a été obtenu dans un réglage d'ensemble des 3 cellules.

La cellule 3 est moins bonne que les précédentes à cause du mauvais facteur de sustentation de la self L_9 ($Q = 27$). A la résonance, la résistance de L_9 vaut (schéma parallèle) 95Ω , et L_9 est placé en parallèle avec une résistance de 21Ω . C'est ce qui explique pourquoi il est pratiquement impossible de faire coïncider correctement les résultats des mesures faites sur la 3ème cellule avec les valeurs prévues par le calcul.

.../...

Le tableau XIV nous montre que, dans le domaine 24 KHZ à 450 KHZ où la cellule 3 n'intervient pas, les résultats pratiques suivent les calculs théoriques à moins de 3 millinépers (- 2,8 mN à + 0,4 mN).

L'écart entre l'affaiblissement mesuré et l'affaiblissement à obtenir est inférieur à 6 millinépers.

Le coefficient de réflexion mesuré coïncide à quelques % près avec le coefficient de réflexion calculé.

Conclusion sur cette dernière tentative :

- On peut réaliser une cellule au millinéper près si l'on tient compte des capacités réparties des bobines et si ces bobines ont de bons facteurs de qualité (> 100).
- Les méthodes de Modelage s'appliquent très efficacement au réglage d'un réseau. Le tableau des écarts par exemple renseigne quantitativement sur les variations à faire subir aux éléments afin d'obtenir les résultats désirés. Il est certain que même une longue expérience des réseaux ne peut permettre d'obtenir des indications aussi précises ; en particulier lorsqu'il convient de faire varier simultanément plusieurs éléments.
- Il semble difficile de serrer de plus près la réalité en compliquant les schémas équivalents des résistances, bobines et condensateurs, car il est difficile de prévoir à priori les éléments parasites des résistances, inductances et capacités.

Tout au plus peut-on facilement englober les capacités réparties des selfs dans des capacités en parallèle. Et quand bien même prévoirait-on avec plus ou moins de précision les divers éléments parasites, que les complications importantes introduites dans les formules de calcul seraient inutiles, puisque les connexions aux fréquences radioélectriques ne peuvent être considérées comme des liaisons équipotentielles.

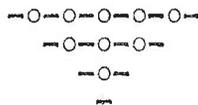
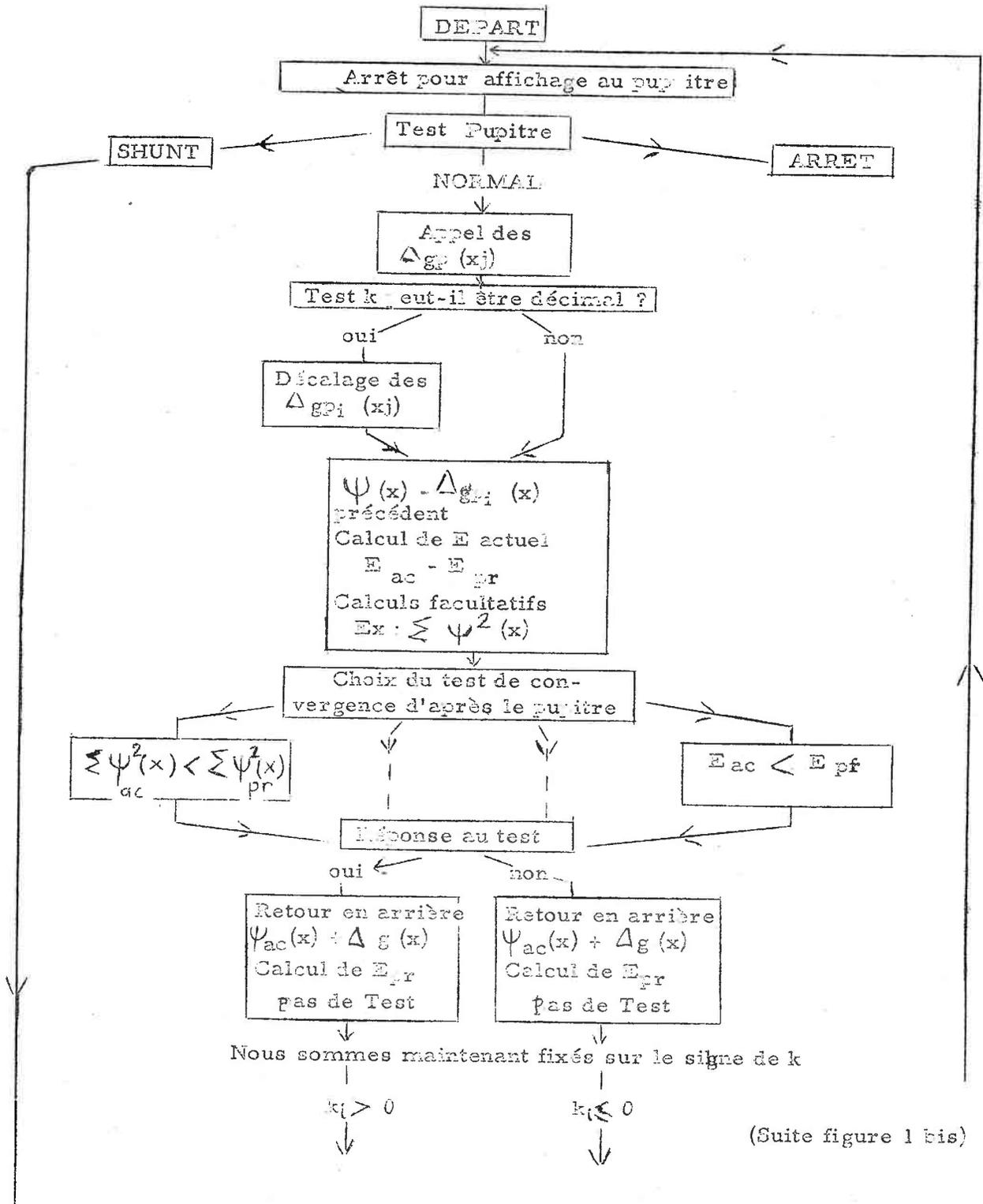


Figure 1

ORGANIGRAMME du MODELAGE par PAS (I-2-t)



(Suite figure 1 bis)

Figure 1 bis

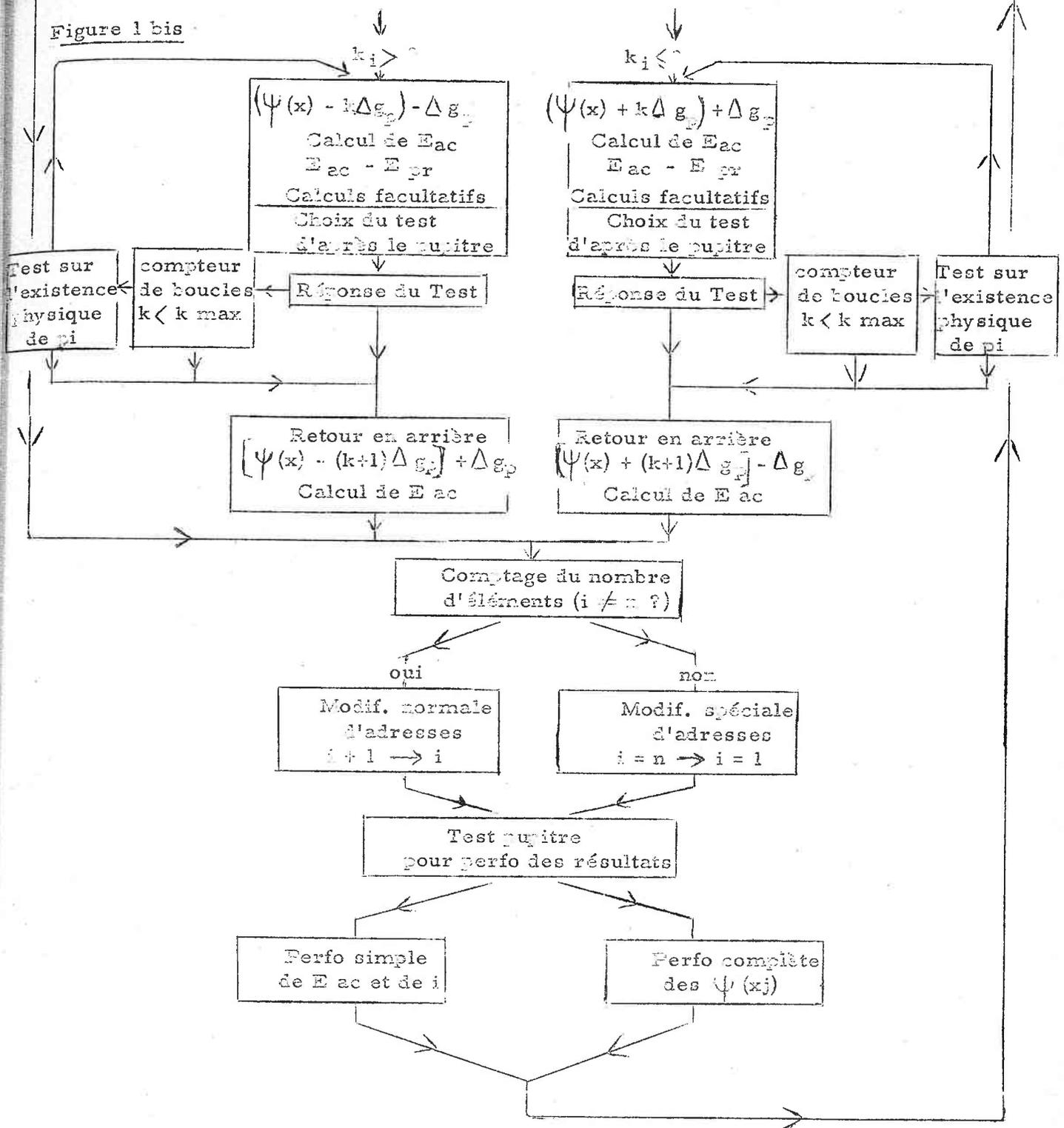


Figure 2.

ORGANIGRAMME DU MODELAGE SIMULTANE

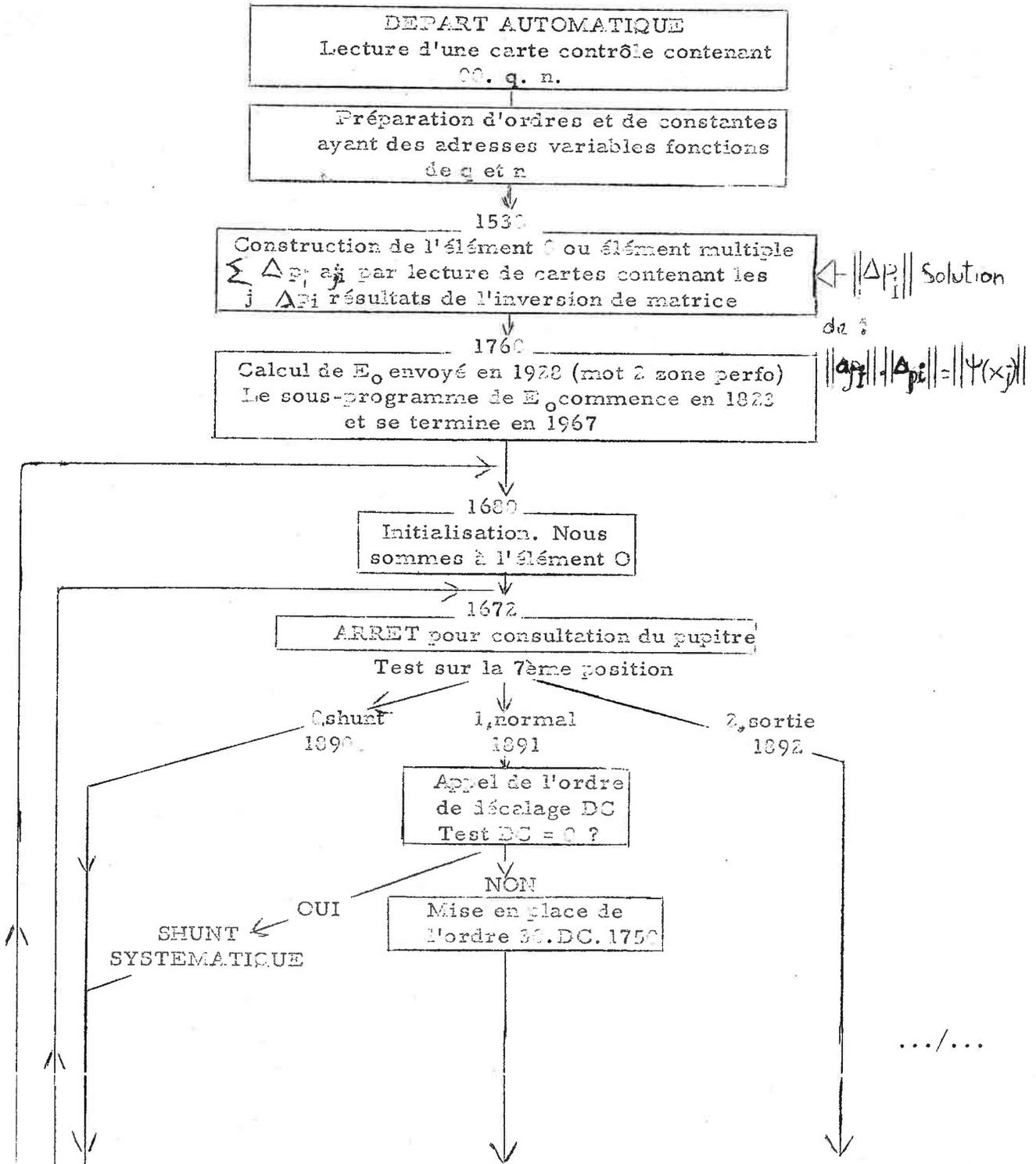
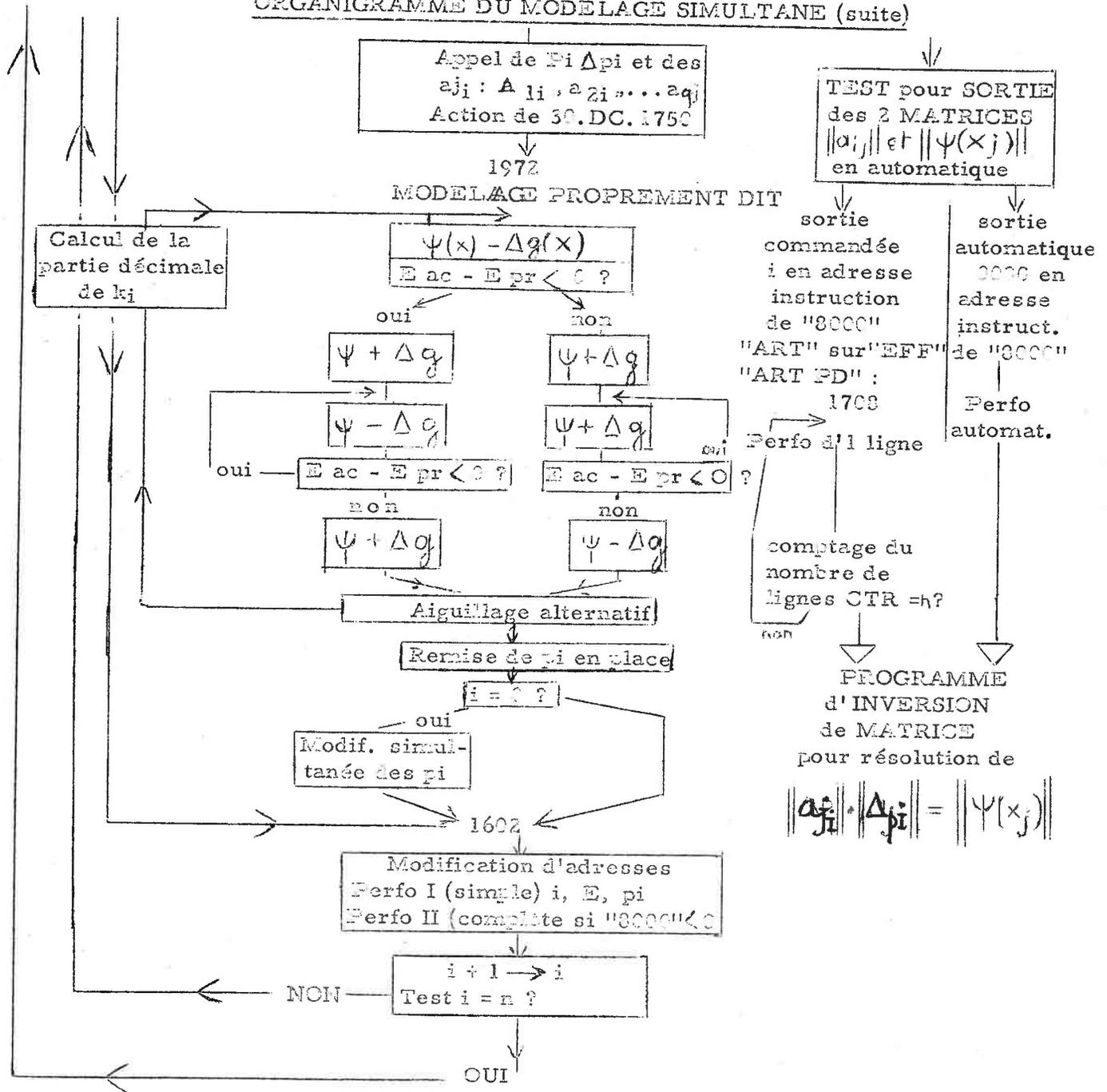


Figure 2 bis

ORGANIGRAMME DU MODELAGE SIMULTANE (suite)



--- TABLEAU III - 2ème TENTATIVE ---

MESURES FINALES AFFAIBLISSEMENTS EN MILLINEPERS

Fréquence KHZ	1ère Cellule			2ème Cellule			3ème Cellule			Cx = 5 pF	écart cal-5pF
	A ₁ calculé	A ₁ mesuré	écart cal-mes.	A ₂ calculé	A ₂ mesuré	écart cal-mes.	A ₃ calculé	cellule initiale	modifié 25 %		
24	633,2			15,6			0,0				
30	717,4	718	- 0,6	17,8	15,2	2,6	0,0			-1,8	1,8
50	834,2	842,8	- 8,6	21,2	18,7	2,5	0,1			-1,9	2
60	845,9	855,7	- 9,8	21,9	19,4	2,5	0,1			-1,9	2
80	829,8	838,9	- 9,1	22,7	20,2	2,5	0,2			-1,2	1,4
100	787,0	791,5	- 4,5	23,0	20,4	2,6	0,3			-1,9	2,2
125	716,1	718,0	- 1,9	23,2	20,5	2,7	0,5			-1,7	2,2
150	637,3	638,0	- 0,7	23,2	20,5	2,7	0,8			-1,4	2,2
175	556,9	556,6	0,3	23,1	20,4	2,7	1,2			-1	2,2
200	478,3	477,0	1,3	23,0	20,4	2,7	1,7			-0,6	2,3
225	404,9	401,0	3,9	22,8	20,2	2,6	2,3	0,5		-0,2	2,5
250	334,7	330,7	4,0	22,6	20,0	2,6	3,2	1,0		0,5	2,7
264	298,5			22,5	19,9	2,6	3,9	1,5		1,1	2,8
320	175,3			22,0	19,4	2,6	8,3	4,4		4,8	3,5
350	124,2	131,0	- 6,8	21,7	19,1	2,6	12,8	9,0	12	9,2	3,6
375	89,6	98,3	- 8,7	21,4	18,8	2,6	19,0	13,8		14,3	4,7
400	62,1	60,3	1,8	21,2	18,6	2,6	29,0	22,5	32	23,3	5,7
425	41,4	40,2	1,2	20,8	18,2	2,6	45,9	37,7	51	39,3	6,6
450	27,0	26,8	0,2	20,5	17,9	2,6	73,2	63,2	80	66,0	7,2
475	18,2	18,5	- 0,3	20,2	17,7	2,5	107,5	100,9	105	103,7	3,8
500	14,6	14,7	- 0,1	19,9	17,5	2,4	122,8	121,8	117	124,6	-1,8
525	19,5	16,6	2,9	19,6	17,3	2,3	103,0	93,6	103	90,4	9,6
550	20,0	21,1	- 1,1	19,2	16,9	2,3	73,5	62,9	73	67,1	6,4

TABLEAU III - (SUITE)

Fréquence KHZ	AFFAIBLISSEMENT TOTAL DES 3 CELLULES					
	calculé	mesuré	écart cal-mes.	à obtenir	écart cal-obt.	écart mes-obt.
24	648,8	645,0	3,8	651	- 2,2	- 6,0
30	735,2	736,3	- 1,1	740	- 4,8	- 3,7
50	855,5	863,9	- 8,4	862	- 6,5	1,9
60	867,9	878,4	-10,5	873	- 5,1	5,4
80	852,7	860,0	- 7,3	860	- 7,3	0
100	810,3	817,6	- 7,3	804	6,3	13,6
125	739,8	741,5	- 2,3	733	6,8	8,5
150	661,3	662,1	- 0,8	654	7,3	8,1
175	581,2	581,3	- 0,1	577	4,2	4,3
200	503,0	501,5	1,5	500	3,0	1,5
225	429	426,9	2,1	431	- 2,0	- 4,1
250	360,5	359,7	0,8	361	- 0,5	- 1,3
264	324,9	321,3	3,6	332	- 7,1	-10,7
320	205,6	202,7	2,9	208	- 2,4	- 5,1
350	158,7	155,2	3,5	162	- 3,3	- 6,8
375	130	128,8	1,2	129	1	- 0,2
400	112,3	109	3,3	105	7,3	4
425	108,1	103,8	4,3	109	- 0,9	- 5,2
450	120,7	118,6	2,1	128	- 7,3	- 9,4
475	145,9	146,5	- 0,6	145	0,9	1,5
500	157,3	163,3	- 6,0	150	7,3	13,3
525	138,1	141,1	- 3,0	144	- 5,9	- 2,9
550	112,7	112,0	0,7	120	- 7,3	- 8

TABLEAU V

--- VALEURS de A - A₀ au COURS des ESSAIS 1 à 5 ---

Indice de la fréq.	1	4	5	6	8	13	17	19	21	23
Départ	- 2,23	- 5,08	- 7,31	6,24	7,26	- 7,09	7,30	- 7,35	7,05	- 7,39
Essai 1	3,27	- 3,88	- 7,14	5,53	4,42	-14,5	- 3,79	-19,2	-5,31	-20,0
Essai 2	3,26	- 3,89	- 7,16	5,50	4,35	-14,9	- 5,34	-18,2	7,28	-19,0
Essai 3	3,47	- 3,98	- 7,54	4,79	2,81	-17,5	- 7,81	-20,4	5,18	-20,9
Essai 4	- 9,64	-40,1	-41,5	- 23,9	- 10,8					
Essai 5	6,52	- 6,34	-15,2	- 5,71	- 6,13	-18,1	- 9,69	-23,1	2,43	-23,1

Elément ayant varié de 1%

TABLEAU DES ECARTS DE A POUR DES VARIATIONS DE 1% DES ELEMENTS

	1	4	5	6	8	13	17	19	21	23
R ₁	2,09	5,52	5,21	4,42	2,17	- 0,42	- 0,24	- 0,07	0	- 0,03
L ₂	3,26	0,08	- 0,41	- 0,57	- 0,51	- 0,15	- 0,01	0	0	0
C ₄	0,48	0,06	- 0,73	- 1,62	- 3,59	- 4,97	- 2,39	- 1,16	- 0,11	0,67
L ₃	0	0	- 0,02	- 0,06	- 0,31	- 1,36	- 1,50	- 0,93	- 0,11	0,79
R ₃	0	- 0,01	- 0,01	- 0,02	- 0,02	- 0,03	0,12	0,14	0,14	0,14
C ₇	0,08	- 0,10	- 0,27	- 0,34	- 0,31	- 0,16	- 0,08	- 0,06	- 0,05	- 0,04
L ₆	0,34	- 0,07	- 0,10	- 0,09	- 0,04	- 0,01	0	0	0	0
R ₅	0,10	0,52	0,32	0,14	- 0,05	- 0,06	- 0,04	- 0,03	- 0,02	- 0,02
C ₁₀	0	0	0	0	0	0,03	0,82	3,06	- 0,81	- 3,61
L ₉	0	0	0	0,01	0,02	0,10	1,26	3,72	- 0,79	- 2,94
R ₈	0	0	0	0	- 0,01	- 0,03	- 0,15	0,06	1,26	0,07

-- TABLEAU VI --

-- VALEURS DE A - A AU COURS DES ESSAIS --

Indice de la fréquence	1	4	5	6	8	13	17	19	21	23
ESSAI 6	6,71	- 1,92	- 10,5	- 1,27	- 3,60	- 18,3	- 9,86	- <u>23,1</u>	2,47	- 23,1
ESSAI 7	6,71	- 1,91	- 10,4	- 1,23	- 3,51	- 17,8	- 7,06	- <u>19,1</u>	2,53	- 18,7
ESSAI 8	6,89	- 0,21	- 9,25	- 0,05	- 0,86	- 12,9	- 1,98	- <u>14,8</u>	2,59	- 13,7
ESSAI 9	6,84	0,36	- 8,82	0,77	0,58	- 7,77	2,35	- <u>13,4</u>	2,55	- 5,83
ESSAI 10	6,84	0,22	- <u>9,08</u>	0,42	1,46	- 7,20	5,81	- 7,98	5,49	- 5,44
ESSAI 11	6,51	0,18	- 8,87	0,53	1,37	- 7,20	5,86	- 7,93	5,54	- 5,40
ESSAI 12	5,87	0,01	- <u>8,56</u>	0,79	1,37	- 7,19	5,92	- 7,88	5,58	- 5,36
ESSAI 13	4,83	2,45	- 5,08	3,85	2,71	- 7,26	6,23	- <u>7,27</u>	5,91	- 5,34

-- CALCULS PRELIMINAIRES EN VUE DE L'ESSAI 14 --

0,1 % R ₁	0,20	0,55	0,53	0,45	0,23	- 0,04	- 0,03	- 0,01	- 0,00	- 0,00
-0,2 % C ₄	- 0,10	- 0,02	0,14	0,31	0,71	1,01	0,50	0,26	0,04	- 0,12
0,165% L ₃	0	0	0	- 0,01	- 0,05	- 0,22	- 0,26	- 0,17	- 0,03	0,12
+2 % C ₇	0,18	- 0,28	- 0,63	- 0,74	- 0,61	- 0,28	- 0,14	- 0,11	- 0,09	- 0,08
-2 % L ₆	- 0,74	0,18	0,23	0,18	0,07	0,01	0	0	0	0
-0,5 % C ₁₀	0	0	0	0	0	- 0,02	- 0,46	- 1,33	- 0,06	1,72
+0,5 % L ₉	0	0	0	0	0,01	0,07	0,73	1,65	0,06	- 1,43
Δ A prévu	- 0,45	0,44	0,27	0,19	0,35	0,52	0,35	0,29	- 0,08	0,22
Δ A observé	- 0,74	0,56	0,55	0,40	0,40	0,52	0,35	0,29	- 0,08	0,23
ESSAI 14	4,09	3,01	- 4,52	4,25	3,11	- 6,74	6,58	- <u>7,00</u>	5,83	- 5,11
ESSAI 15	3,72	2,88	- 4,58	4,28	3,45	- 6,72	<u>6,73</u>	- 5,35	5,56	- 6,54
ESSAI 16	4,09	4,19	- 4,17	4,65	5,27	- 5,56	4,16	- <u>8,61</u>	5,16	- 2,74
ESSAI 17	3,37	3,92	- 4,38	4,61	<u>5,95</u>	- 5,43	4,57	- 5,25	4,62	- 5,22

--- TABLEAU VII ---

A ou A - A₀ pour les essais 17 à 20

Indice de la fréquence	1	4	5	6	8	10	13	15	17	19	21	22	23
TABLEAU DES ECARTS DE A POUR UNE VARIATION DE 1 % DE CHAQUE ELEMENT													
Elément ayant varié													
R ₁	2,15	5,55	5,27	4,52	2,31	0,64	- 0,38	- 0,45	- 0,24	- 0,06	0	- 0,01	- 0,04
L ₂	3,23	0,10	- 0,38	- 0,55	- 0,51	- 0,33	- 0,16	- 0,04	- 0,01	0	0	0	0
C ₄	0,47	0,07	- 0,68	- 1,54	- 3,52	- 4,75	- 5,08	- 3,75	- 2,46	- 1,15	- 0,03	0,43	0,80
L ₃	0	0	- 0,02	- 0,06	- 0,31	- 0,76	- 1,42	- 1,84	- 1,58	- 0,93	- 0,03	0,47	0,97
R ₃	0	- 0,01	- 0,02	- 0,02	- 0,03	- 0,01	0,03	0,10	0,14	0,16	0,17	0,17	0,16
C ₇	0,07	- 0,05	- 0,32	- 0,40	- 0,32	- 0,22	- 0,14	- 0,08	- 0,06	- 0,05	- 0,04	- 0,04	- 0,03
L ₆	0,36	- 0,05	- 0,16	- 0,13	- 0,05	- 0,02	- 0,01	0	0	0	0	0	0
R ₅	- 0,04	0,58	0,35	0,12	- 0,06	- 0,07	- 0,06	- 0,04	- 0,03	- 0,02	- 0,02	- 0,02	- 0,02
C ₁₀	0	0	0	0	0	0,01	0,04	0,31	1,06	2,79	- 0,70	- 3,12	- 3,28
L ₉	0	0	0,01	0,01	0,03	0,06	0,15	0,63	1,63	2,36	- 0,68	- 2,76	- 2,65
R ₈	0	0	0	- 0,01	- 0,01	- 0,02	- 0,05	- 0,12	- 0,15	0,28	1,25	0,78	0,24
ESSAI 17	3,37	3,92	- 4,38	4,61	5,95	5,21	- 5,43	- 6,77	4,57	- 5,25	4,62	- 6,34	- 5,22
ESSAI 18	3,41	4,96	- 4,33	4,07	5,43	5,23	- 4,71	- 5,65	5,44	- 4,67	5,61	- 5,85	- 5,53
ESSAI 19	3,41	4,95	- 4,35	4,05	5,41	5,22	- 4,67	- 5,52	5,59	- 4,68	5,56	- 5,66	- 5,21
ESSAI 20	3,04	4,90	- 5,53	3,88	5,59	5,60	- 4,39	- 5,60	5,38	- 4,89	5,49	- 5,63	- 5,05

-- TABLEAU VIII --

A - A pour les essais 20 à 30

Indice de la fréquence	1	4	5	6	8	10	13	15	17	19	21	22	23
ESSAI 20	3,04	4,90	- 4,53	3,88	5,59	5,60	- 4,39	- 5,60	5,38	- 4,89	5,49	- 5,63	- 5,05
ESSAI 21	3,05	4,90	- 4,55	3,85	5,53	5,53	- 4,45	- 5,60	5,60	- 3,99	5,17	- 7,13	- 6,79
ESSAI 22	3,16	4,84	- 5,32	2,35	2,97	2,69	- 6,94	- 5,05	17,5	16,3	- 37,2	- 50,4	- 40,5
ESSAI 23	2,82	4,86	- 5,23	2,35	2,72	2,06	- 8,64	- 12,7	- 5,53	- 13,9	- 29,7	- 32,4	- 18,2
ESSAI 24	2,81	4,75	- 5,42			1,77		- 12,5	- 5,43	- 8,59	- 23,4	- 25,5	- 12,6
ESSAI 25	2,81	4,64	- 5,61			1,50		- 12,1	- 5,30	- 5,59	- 17,5	- 18,4	- 7,07
ESSAI 26	2,79	4,43	- 5,98	1,31	1,31	1,01	- 8,44	- 11,2	- 4,76	1,15	- 7,69	- 4,62	3,34
ESSAI 27	2,79	4,42	- 5,91	1,56	2,57	4,01	- 2,87	- 3,87	1,68	5,24	- 6,99	- 5,83	0,20
ESSAI 28	2,79	4,42	- 5,91	1,56	2,56	4,00	- 2,89	- 4,05	0,84	0,32	- 5,59	- 4,79	3,74
ESSAI 29	2,46	4,69	- 4,18			5,00		- 3,49	1,41	0,88	- 5,04	- 4,26	4,24
ESSAI 30	2,46	4,69	- 4,17	3,73	4,15	5,02	- 2,18	- 3,23	2,27	4,47	- 4,72	- 4,32	2,12

--- TABLEAU IX ---

A ou A - A pour les essais 30 à 38

In dice de la fréquence	i	4	5	6	10	13	15	17	18	19	20	21	22	23
ESSAI 30	2,46	4,69	4,17	3,73	5,02	2,18	3,23	2,27	4,45	4,47	18,3	4,72	4,32	2,12
$(C_{10}^{L'_{15}}) : + 1\%$	0	0	0	0	0,01	0,02	0,18	0,89	2,32	5,02	0,71	1,14	1,27	3,63
$(L_9^{C'_{14}}) : + 1\%$	0	0	0	0,01	0,03	0,08	0,36	1,21	2,63	4,88	0,56	0,61	0,45	2,97
$(R_{8\text{ et }13}^{R'_{13}}) : + 1\%$	0	0	0	0	0,01	0,03	0,08	0,16	0,18	0,16	0,69	0,33	0,67	0,43
$(R_8 : + 10\%$	0	0	0	0	0	0,1	0,4	0,6	0,9	1,1	0,4	2,8	7,6	4,9
$(R'_{13} : - 10\%$	0	0	0	0	0,1	0,2	0,4	0,9	0,9	2,5	7,1	0	1,1	0,8
ESSAI 31		4,70	4,23		4,66	2,43	2,83	3,53	3,40	0,31	6,29	6,00	2,70	3,59
ESSAI 32	2,51	4,70	4,23	3,59	4,67	2,41	2,76	3,65	3,42	1,43	4,24	5,74	0,93	4,90
ESSAI 33						2,32	2,37	4,88	1,01	2,35	5,72	4,60	1,26	1,83
ESSAI 34					4,71	2,30	2,30	5,01	0,96	1,83	4,80	4,73	1,13	1,96
ESSAI 35	2,51	4,71	4,23	3,57	4,36	2,95	3,17	4,23	1,62	1,32	4,47	4,85	1,03	2,28
ESSAI 36	2,38	4,17	4,70	2,98	2,57	4,91	4,68	3,16	2,46	0,70	4,16	4,59	0,14	3,00
ESSAI 37	2,32	4,21	4,38	3,40	2,78	4,79	4,62	3,20	2,43	0,73	4,18	4,57	0,13	3,01
ESSAI 38	2,23	4,19	4,24	3,71	3,71	3,80	3,87	3,71	2,05	0,99	4,33	4,53	0,18	2,89
coefficients de réflexion en %														
à droite	0,01	0,02	0,09	0,24	0,28	0,38	0,64	1,18	1,95	3,53	5,66	6,95	7,22	6,44
à gauche	0	0,01	0,02	0,05	0,07	0,17	0,46	0,98	1,68	3,14	5,16	6,45	6,74	5,99

--- TABLEAU X ---

Comparaison des écarts sur A obtenus par variations simultanées d'éléments correspondants dans des sens identiques ou opposés.

Indice de la fréquence	1	2	4	5	6	10	13	15	17	18	20	21	22	23
L ₂ 1% C' 7 1%	3,23		0,10	-0,38	-0,55	-0,33	-0,15	-0,04	-0,01	0	0	0	0	0
L ₂ 1% C' 7 -1%	-0,04	-0,03	-0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L ₂ 10% C' 7 -10%	-3,61	-3,06	-0,47	-0,19	0,45	0,34	0,17	0,04	0,01	0	0	0	0	0
R ₁ 1% R' 6 -1%	2,15		5,54	5,26	4,51	0,67	-0,34	-0,42	-0,23	-0,13	-0,01	0,01	0	0
R ₁ 10% R' 6 10%	-0,64	-0,56	-0,30	-0,35	-0,47	-0,64	-0,31	0,04	0,07					
C ₄ 1% L' 9 1%	0,47		0,06	-0,69	-1,55	-4,71	-5,00	-3,67	-2,41	-1,76	-0,57	-0,05	0,39	0,75
C ₄ 10% L' 9 -10%	-0,01	-0,03	-0,32	-0,55	-0,74	0,17	2,30	5,04	5,51	5,33	4,31	3,60	2,83	2,07
L ₃ 1% C' 8 1%	0	0	0	-0,02		0,75		-1,79	-1,54			-0,05	0,43	0,91
L ₃ 10% C' 8 -10%	0	0	0	0	-0,01	-0,10	-0,17	0,31	1,11	1,61	2,59	2,98	3,26	3,42
R ₃ 1% R' 8 -1%	0	0	-0,01	-0,02	-0,03	-0,02	0,04	0,15	0,20	0,22	0,24	0,24	0,24	0,24
R ₃ 10% R' 8 10%	0	0	0	0	0	0	0,02	0,06	0,08	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10
C ₇ 1% L' 12 1%	0,07		-0,08	-0,36	-0,44	-0,19	-0,11	-0,05	-0,03	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	0
C ₇ 10% L' 12 -10%	0,01	0,01	-0,19	0	0,26	0,16	-0,04	-0,18	-0,22					
L ₆ 1% C' 11 1%	0,36		-0,06	-0,17	-0,13	-0,01	0	0	0	0	0	0	0	0
L ₆ 10% C' 11 -10%	-0,05	-0,20	-0,16	0,15	0,13	-0,03	-0,02	-0,01	-0,01	0	0	0	0	0
R ₅ 1% R' 10 -1%	-0,05		0,59	0,31	0,08	-0,06	-0,04	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
R ₅ 10% R' 10 10%	-0,09	-1,39	0,24	0,13	0,04	-0,07	-0,13	-0,15	-0,13					
C ₁₀ 1% L' 15 1%	0	0	0	0	0	0,001	0,04	0,19	0,94	2,19	0,47	-0,21	-1,50	-3,94
C ₁₀ 10% L' 15 -10%	0	0	0	0	0	0	-0,04	-0,46	-2,64	-6,69	15,6	50,3	9,58	-16,1
L ₉ 1% C' 14 1%	0	0	0	0	0,01	0,03	0,08	0,36	1,20	2,50	1,43	1,25	-0,04	-3,19
L ₉ 10% C' 14 -10%	0	0	0	0	0	-0,01	-0,04	-0,32	-1,96	-5,04	23,2	44,1	-0,48	-20,2
R ₈ 1% R' 13 -1%	0	0	0	0	0	-0,01	-0,03	-0,08	-0,16	-0,18	0,69	0,33	0,67	0,43
R ₈ 10% R' 13 10%	0	0	0	0	0,01	0,02	0,05	0,16	0,13	-0,75	-6,14	2,16	8,64	5,21

--- TABLEAU XI ---

Ecartis sur A pour une variation de + ou - 1 % de chaque élément

Indice de la fréquence	1	2	4	5	6	10	13	15	17	18	20	21	22	23
$I_2 : + 1 \%$	1,76	1,33	0,05	0,21	0,30	0,18	0,08	0,02	0,01	0	0	0	0	0
R_1	1,01	1,60	2,73	2,58	2,20	0,28	0,19	0,21	0,12	0,07				
C_4	0,26	0,30	0,04	0,39	0,86	2,50	2,57	1,83	1,21	0,91	0,34	0,10	0,11	0,28
L_3	0	0	0	0,01	0,03	0,38	0,69	0,86	0,75	0,63	0,30	0,10	0,11	0,33
R_3	0	0	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,07	0,10	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12
C_7	0,03	0,05	0,01	0,15	0,20	0,11	0,07	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
L_6	0,17	0,20	0,01	0,02	0,07	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0
R_5	0,03	0,02	0,30	0,13	0,08	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
C_{10}	0	0	0	0	0	0	0,01	0,07	0,24	0,48	2,13	2,88	0,12	3,09
I_9	0	0	0	0	0,01	0,02	0,04	0,16	0,42	0,75	2,62	3,18	1,18	2,81
R_8	0	0	0	0	0	0,01	0,01	0,04	0,07	0,10	0,03	0,36	0,80	0,46
$C'_7 - 1 \%$	1,50	1,12	0,05	0,17	0,25	0,16	0,08	0,02	0,01	0	0	0	0	0
$R'_6 + 1 \%$	1,15	1,73	2,82	2,68	2,32	0,41	0,13	0,22	0,13	0,08				
$C'_8 - 1 \%$	0	0	0	0,01	0,03	0,33	0,64	0,88	0,81	0,70	0,35	0,14	0,09	0,33
$L'_9 - 1 \%$	0,21	0,25	0,03	0,30	0,69	2,18	2,41	1,92	1,35	1,03	0,42	0,15	0,09	0,29
$R'_8 + 1 \%$	0	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,07	0,09	0,10	0,12	0,12	0,12	0,12
$C'_{11} - 1 \%$	0,17	0,20	0,01	0,08	0,07	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0
$R'_{10} + 1 \%$	0,03	0,02	0,29	0,18	0,06	0,03	0,01	0	0	0	0	0	0	0
$L'_{12} - 1 \%$	0,03	0,05	0,01	0,16	0,22	0,10	0,05	0,02	0,01	0	0	0	0	0
$C'_{14} - 1 \%$	0	0	0	0	0,01	0,02	0,05	0,24	0,84	1,67	0,78	2,03	1,04	0,44
$R'_{13} + 1 \%$	0	0	0	0	0,01	0,01	0,02	0,05	0,09	0,03	0,63	0,12	0,08	0,09
$L'_{15} - 1 \%$	0	0	0	0	0	0,00	0,02	0,14	0,67	1,58	0,96	3,18	1,94	0,99

--- TABLEAU XII ---

A - A₀ pour les essais 39 à 49

Indice de la fréquence	1	2	4	5	6	10	13	15	17	18	20	21	22	23
ESSAI 39	1,54	- 1,65	4,00	- 4,06	3,93	3,77	- 3,77	- 3,88	3,62	- 2,26	4,27	- 4,50	- 0,03	3,29
ESSAI 40	1,37	- 1,85	3,95	- 4,02	3,99	3,79	- 3,77	- 3,88	3,62	- 2,26	4,27	- 4,50	- 0,03	3,29
ESSAI 41						3,78	- 3,77	- 3,92	3,44	- 2,68	4,13	- 4,44	0,23	4,07
ESSAI 42	1,37	- 1,85	3,96	- 4,01	4,00	3,81	- 3,70	- 3,65	<u>4,19</u>	- 1,41	4,00	- 3,96	0,09	2,60
ESSAI 43	1,38	- 1,85	4,01	- 3,92	<u>4,14</u>	4,10	- 3,47	- 3,76	3,60	- 2,54	3,76	- 3,62	- 0,21	1,82
ESSAI 44	0,84	- 2,25	<u>3,97</u>	- 4,03	3,88	3,50	- 3,79	- 3,74	3,65	- 2,49	3,77	- 3,62	- 0,21	1,83
ESSAI 45	- 0,56	- 3,92	3,83	- 3,76	<u>3,98</u>	3,32	- 3,89	- 3,77	3,64	- 2,49	3,78	- 3,60	- 0,18	1,86
ESSAI 46	- 0,27	- 3,81	3,78	- 3,77	<u>3,93</u>	3,31	- 3,88	- 3,75	3,66	- 2,48	3,79	- 3,59	- 0,18	1,87
ESSAI 47	- 0,06	- 3,78	3,72	- 3,74	<u>3,95</u>	3,29	- 3,88	- 3,75	3,66	- 2,48	3,79	- 3,60	- 0,18	1,86
ESSAI 48	0,47	- 3,70	3,63	- 3,74	3,86	3,21	- <u>3,87</u>	- 3,71	3,69	- 2,46	3,80	- 3,59	- 0,17	1,87
ESSAI 49	1,27	- 3,65	3,59	- 3,59	3,76	3,11	- 3,76	- 3,58	3,76	- 2,42	<u>3,78</u>	- 3,63	- 0,22	1,82

--- TABLEAU XIII ---

--- TABLEAU DES ECARTS DE L'AFFAIBLISSEMENT COMPOSITE CORRESPONDANT A DES .../...

indice	fréq. KHZ	A théorie	A ₀ à obt.	Δ A ₀	R ₁	R' ₆	L ₂	C' ₇	L ₃	C' ₈	C ₄
1	24	654,4	651	3,4	1,04	- 1,23	1,73	1,40	0	0	0,24
2	30	736,6	740	- 3,4	1,62	- 1,79	1,30	1,02	0	0	0,29
3	50	861,6	862	- 0,4	2,61	- 2,70	0,31	0,21	0	0	0,19
4	60	876,3	873	3,3	2,72	- 2,78	0,06	0,02	0	- 0	0,04
5	80	856,5	860	- 3,5	2,59	- 2,62	- 0,20	- 0,18	- 0,01	- 0,01	- 0,35
6	100	807,5	804	3,5	2,23	- 2,25	- 0,29	- 0,25	- 0,03	- 0,03	- 0,79
7	125	733,8	733	0,8	1,68	- 1,69	- 0,30	- 0,25	- 0,08	- 0,08	- 1,32
8	150	656,3	654	2,3	1,15	- 1,16	- 0,27	- 0,22	- 0,15	- 0,15	- 1,79
9	175	578,9	577	1,9	0,70	- 0,70	- 0,22	- 0,18	- 0,24	- 0,24	- 2,15
10	200	503,4	500	3,4	0,35	- 0,34	- 0,18	- 0,15	- 0,35	- 0,35	- 2,41
11	225	431,5	431	0,5	0,09	- 0,07	- 0,14	- 0,11	- 0,48	- 0,47	- 2,55
12	250	364,1	361	3,1	- 0,09	0,11	- 0,10	- 0,08	- 0,60	- 0,59	- 2,60
13	264	328,8	332	- 3,2	- 0,16	0,17	- 0,09	- 0,07	- 0,67	- 0,65	- 2,58
14	320	207,8	208	- 0,2	- 0,25	0,25	- 0,04	- 0,03	- 0,87	- 0,82	- 2,28
15	350	158,6	162	- 3,4	- 0,22	0,22	- 0,02	- 0,02	- 0,91	- 0,84	- 2,00
16	375	127,7	129	- 1,3	- 0,18	0,17	- 0,01	- 0,01	- 0,90	- 0,80	- 1,72
17	400	108,5	105	3,5	- 0,14	0,12	- 0,01	- 0,01	- 0,85	- 0,71	- 1,43
18	425	105,6	109	- 3,4	- 0,09	0,07	- 0	- 0	- 0,76	- 0,57	- 1,13
19	450	125,0	128	- 3,0	- 0,05	0,03	- 0	- 0	- 0,60	- 0,42	- 0,80
20	475	147,5	145	2,5	- 0,02	0,01	- 0	- 0	- 0,34	- 0,31	- 0,40
21	500	147,9	150	- 2,1	- 0	- 0	- 0	- 0	- 0,08	- 0,15	- 0,08
22	525	143,2	144	- 0,8	0	0	0	0	0,08	+ 0,15	+ 0,07
23	550	117,6	120	- 2,4	- 0,01	0,01	0	0	0,21	0,47	0,18

--- TABLEAU XIII (suite) ---

--- VARIATIONS DE 1 % DES 22 ELEMENTS CONSTITUANT LE CORRECTEUR ---

L'9	R ₃	R' ₈	R ₅	R' ₁₀	L ₆	C' ₁₁	C ₇	L' ₁₂	R ₈	R' ₁₃	L ₉	C' ₁₄
0,22	- 0	0	- 0,03	0,04	0,16	0,15	0,03	0,02	- 0	0	0	0
0,25	- 0	0	0,01	0,02	0,20	0,21	0,05	0,05	- 0	0	0	0
0,14	- 0	0	0,24	- 0,23	0,10	0,16	0,07	0,10	- 0	0	0	0
0,0	- 0,01	0,01	0,29	- 0,31	0	0,03	0	0,03	- 0	0	0	0
0,35	- 0,01	0,01	0,20	- 0,21	- 0,08	- 0,11	- 0,14	- 0,18	- 0	0	0	0
0,76	- 0,01	0,01	0,08	- 0,06	- 0,07	- 0,09	- 0,20	- 0,26	- 0	0	0	0
1,25	- 0,02	0,02	0	0,02	- 0,05	- 0,05	- 0,19	- 0,23	- 0	0	0	0,01
1,68	- 0,02	0,02	- 0,03	0,04	- 0,03	- 0,02	- 0,17	- 0,18	- 0	0	0,01	0,01
2,02	- 0,01	0,01	- 0,03	0,04	- 0,02	- 0,01	- 0,14	- 0,13	- 0	0,01	0,01	0,02
2,25	- 0,01	0,01	- 0,04	0,03	- 0,01	- 0,01	- 0,11	- 0,10	- 0,01	0,01	0,01	0,02
2,38	- 0	- 0	- 0,03	0,02	- 0,01	- 0	- 0,09	- 0,07	- 0,01	0,01	0,02	0,03
2,41	0	- 0,01	- 0,03	0,02	0	- 0	- 0,08	- 0,05	- 0,01	0,02	0,03	0,05
2,38	0,01	- 0,02	- 0,03	0,01	0	- 0	- 0,07	- 0,04	- 0,01	0,02	0,03	0,06
2,04	0,04	- 0,05	- 0,02	0	0	- 0	- 0,05	- 0,02	- 0,02	0,04	0,08	0,15
1,74	0,06	- 0,07	- 0,02	0	0	- 0	- 0,04	- 0,01	- 0,04	0,05	0,14	0,28
1,44	0,07	- 0,08	- 0,02	0	0	0	- 0,04	- 0,01	- 0,05	0,07	0,23	0,49
1,12	0,08	- 0,09	- 0,01	0	0	0	- 0,04	- 0	- 0,07	0,08	0,39	0,92
0,80	0,09	- 0,10	- 0,01	0	0	0	- 0,03	0	- 0,09	0,02	0,72	1,76
0,53	0,10	- 0,11	- 0,01	0	0	0	- 0,03	0	- 0,11	- 0,36	1,41	2,17
0,35	0,10	- 0,11	- 0,01	0	0	0	- 0,02	0	- 0,03	- 0,64	2,65	- 0,97
0,15	0,10	- 0,12	- 0,01	0	0	0	- 0,02	0	0,36	- 0,14	3,25	- 1,97
0,14	0,10	- 0,12	- 0,01	0	0	0	- 0,02	0,01	0,80	0,08	- 0,06	- 1,03
0,39	0,09	- 0,12	- 0,01	0	0	0	- 0,02	0,12	0,43	0,09	- 2,89	- 0,45

10 : 0 ; - 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0,01 ; 0,01 ; 0,03 ; 0,06 ; 0,12 ; 0,23 ; 0,47 ;
1,03 ; 2,17 ; 2,97 ; - 0,06 ; - 3,19.

15 : 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0,01 ; 0,01 ; 0,02 ; 0,07 ; 0,16 ; 0,33 ; 0,74 ; 1,69 ;
2,45 ; - 1,34 ; - 3,08 ; - 1,86 ; - 0,95.

-- TABLEAU XIV --

indice	fré- quence	1	2 ensemble		4	Cellule I		Cellule II		Cellule III		
		A à obt.	A mesuré	écart 2 - 1	théorie	écart 2 - 4	théorie	A 1 mesuré	théorie	A ₂ mesuré	théorie	A ₃ mes.
1	24	651	653,5	+ 2,5	654,4	- 0,9	635,8	635	18,6	19	0	0
2	30	740	736	- 4	736,6	- 0,6	708,7	708	27,9	28,5	0	0
3	50	862	861	- 1	861,6	- 0,6	804,7	804,5	56,8	57	0,1	0
4	60	873	876	+ 3	876,3	- 0,3	813,6	813,5	62,6	61,5	0,1	0
5	80	860	855,5	- 4,5	856,5	- 1	799,7	799,5	56,7	55,5	0,2	0
6	100	804	805,5	+ 1,5	807,5	- 2	763,7	763	43,4	41,5	0,3	0
7	125	733	731	- 2	733,8	- 2,8	703,5	702	29,9	28	0,5	0,5
8	150	654	654	0	656,3	- 2,3	634,8	633	20,9	19,5	0,7	0,5
9	175	577	578	+ 1	578,9	- 0,9	562,9	562	15,0	14	1,1	1
10	200	500	501,5	+ 1,5	503,4	- 1,9	490,9	492	11,1	10	1,5	1,5
11	225	431	431,5	+ 0,5	431,5	0	421,0	421,5	8,4	7,5	2,1	2
12	250	361	364,5	+ 3,5	364,1	0,4	354,8	355,5	6,4	5,5	2,9	2,5
13	264	332	329	- 3	328,8	0,2	319,7	320	5,6	4,5	3,5	3
14	320	208	206,5	- 1,5	207,8	- 1,3	196,28	196,5	3,3	2	7,4	6,5
15	350	162	158	- 4	158,6	- 0,6	144,3	144	2,6	1,5	11,9	10
16	375	129	127	- 2	127,7	- 0,7	107,97	108	2,2	1	17,4	16,5
17	400	105	107	+ 2	108,5	- 1,5	78,4	78,5	1,8	1	27,9	25
18	425	109	103,5	- 5,5	105,6	- 2,1	55,6	55,5	1,6	0,5	48,1	43,5
19	450	128	123	+ 5	125,0	- 2	39,2	38,5	1,5	0,5	84,4	80
20	475	145	148,5	+ 3,5	147,5	+ 1	28,6	28,5	1,4	0,5	118,5	121,5
21	500	150	153,5	+ 3,5	147,9	+ 5,6	23,4	23	1,3	0	124,5	128,5
22	525	144	146,5	+ 2,5	143,2	+ 3,3	22,9	22,5	1,3	0	119,5	116,5
23	550	120	118	- 2	117,6	+ 0,4	26,4	26	1,3	0	82,6	89,5
		<i>valeurs extrêmes des écarts.</i>		- 5,5 à + 5		- 2,8 à 5,6		- 1,8 à + 1,1		+ 0,6 à -1,9		- 4,6 à + 4

Vu et Approuvé

Nancy, le

Le Doyen,

E. URION.

Vu et Permis d'Imprimer

Nancy, le

Le Recteur :

Président du Conseil de
l'Université.

G. MAYER