

Basé sur une conception numérique

Un système didactique pour l'étude des asservissements

Mentor Sciences a développé un système didactique destiné à l'étude des asservissements. Appelé SYNUM (SYstème NUMérique pour l'étude des asservissements), il est, tout à la fois, performant et de type industriel (SYNUM permet de reprendre, sous forme pédagogique, de véritables situations industrielles).

Sa conception numérique le rend très flexible (on peut agir sur tous les paramètres).

Modulaire, SYNUM rend possible l'étude des asservissements utilisant des moteurs à courant continu, sans balai ou pas à pas.

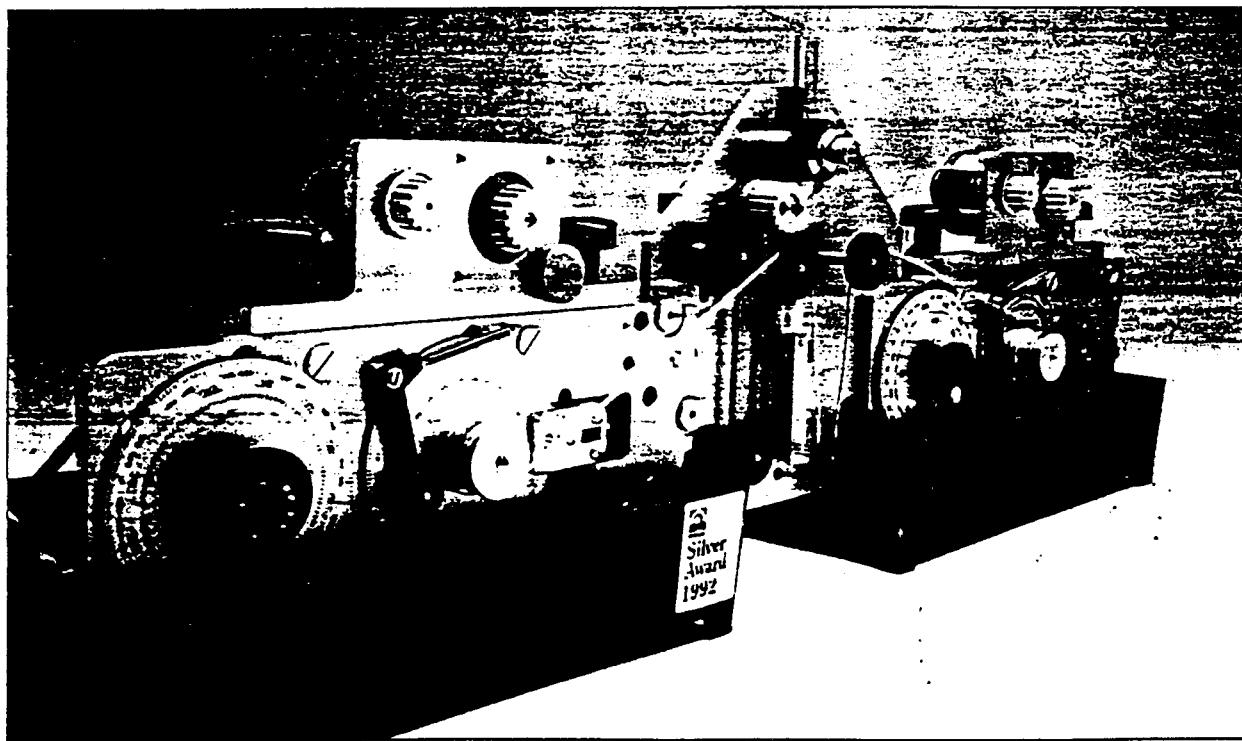
Il est constitué, en version de base, d'une part, d'un moniteur de com-

mande (modèle M 24), conçu autour d'un régulateur numérique intégré, et, d'autre part, d'un moniteur électromécanique (modèle M 26), ce dernier comprenant une alimentation, un châssis, et un capot de protection.

Autres modules : le logiciel (M 24-1) de commande du SYNUM, ou

encore le moniteur d'interface pour moteurs pas à pas et sans balai (modèle M 25) ; citons, aussi, les accessoires tels que : moteurs pas à pas et sans balai (modèle M 26-1), l'option "pont roulant" (modèle 26-2) ou encore l'option "tenseur" (modèle M 26-3).

Avec ces différents constituants, on peut réaliser, par exemple, des configurations telles que : accouplements de machines et transfert d'énergie, enroulement-déroulement à vitesse constante, monte-charge, pont-roulant, simulation décharge. ■



Deux systèmes Synum accouplés : opération d'enroulement-déroulement à tension constante.

Réglage d'asservissements par plans d'expériences

Le comportement d'un procédé industriel, quel qu'il soit, dépend de paramètres dont les opérateurs ont la maîtrise totale, et de paramètres perturbateurs dont ils doivent tenir compte. Dans la plupart de cas, le modèle mathématique, qui lie la ou les grandeurs que l'on désire maîtriser et les paramètres de réglage, n'est pas connu, ou est très complexe.

L'évolution constante des techniques accroît la complexité des modèles rendant la résolution du problème de plus en plus ardue.

En conséquence, très souvent, il faut procéder par expériences.

La méthode traditionnelle, qui consiste à faire varier un paramètre à la fois, est longue et fastidieuse; par ailleurs, elle ne permet généralement pas de vérifier les interactions entre divers paramètres.

La méthode des plans d'expériences organisés de manière statistique réduit très sensiblement le nombre d'essais.

De plus, elle peut être utilisée quelle que soit la complexité du système.

Préambule :

Les plans d'expériences définis par Genichi Taguchi ont été conçus pour améliorer les performances des processus et des produits soumis à l'influence de nombreux facteurs.

Ils ont été développés à destination des ingénieurs pour un usage industriel en vue de l'amélioration des produits et des procédés.

Le réglage des systèmes asservis nous a semblé pouvoir se faire à l'aide de cette méthode expérimentale et nous avons mis au point une démarche maintenant éprouvée.

De nombreuses applications ont montré la pertinence de la méthode.

Les phases de travail sont les suivantes :

1 - Phase de préparation

- définition du cahier des charges du comportement attendu,
- mise en place des sécurités (pour éviter la casse),
- inventaire des manoeuvres à éviter,
- inventaire des facteurs de réglage et la plage de réglage exploitable,
- inventaire des facteurs non maîtrisables mais pouvant influencer sur le résultat et leur plage de variation,
- inventaire des facteurs à maîtriser et leur valeur de réglage,
- inventaire des réponses à mesurer et les moyens de mesure à mettre en oeuvre.

2 - Phases intermédiaires:

Ce sont les phases pendant lesquelles on réalise les essais. Concernant le réglage des asservissements, nous avons identifié les cas d'étude suivants :

- la constitution d'une banque de données utilisable ultérieurement
- l'amélioration d'un réglage existant mais non satisfaisant,
- la recherche d'une zone de réglage favorable,
- la recherche d'une solution particulière.

- la recherche d'une solution robuste (insensibilité aux facteurs externes).

3 - Phase de décision :

Elle succède obligatoirement à une phase intermédiaire. Elle comporte l'analyse des résultats obtenus et la prise de décision.

On peut conclure en exploitant les résultats obtenus ou en améliorant ces résultats par un ajustement simple résultant de l'analyse des tendances.

Parfois, on est amené à réaliser un ou plusieurs plans d'expériences complémentaires.

Dans le cas de la constitution d'une banque de données, les résultats enregistrés permettront ultérieurement d'obtenir toute solution particulière choisie.

Démarche générale :

L'application correcte de la démarche suppose:

- que la technologie de l'équipement étudié soit connue de façon à éviter les manoeuvres dangereuses. Cette connaissance permet également de sélectionner les facteurs dont l'influence est réelle,
- que la méthode des plans d'expériences soit maîtrisée. Une exploitation rigoureuse est indispensable pour obtenir des résultats cohérents.

Planification des articles proposés :

1 - un asservissement de position

- amélioration des performances d'un équipement,
- recherche d'une solution particulière,
- réglage d'un procédé
- réglage d'un procédé avec recherche de robustesse.

2 - un asservissement de vitesse,

3 - un asservissement de température.

Premier réglage

AMELIORATION DES PERFORMANCES d'un asservissement de position angulaire

1 - Présentation

1-1 Le matériel

Le support est le banc d'expérimentation "SYNUM" (voir article séparé sur ce produit).

La partie non intelligente: (arrangement statistique des permutations, relevés des valeurs, tracés des courbes, calculs statistiques) est effectuée par un logiciel.

1-2 Le problème

Un équipement de mise en position doit effectuer un déplacement angulaire sans dépassement de la cible.

Après un certain nombre de réglages infructueux, l'utilisateur se contente d'un comportement qui ne lui donne pas entière satisfaction.

NOUS DEVONS AMELIORER CE COMPORTEMENT.

Les réglages possibles sont identifiés par les lettres :

A, B, K, E.

Chaque paramètre de réglage peut prendre toutes les valeurs entières comprises de 0 à 255.

La documentation concernant la fonction de chaque paramètre de réglage est introuvable.

2 - Relevé de la situation d'origine

Les valeurs actuelles des paramètres de réglages sont:

A=200, B=64, K=10, E=64.

Pour connaître le comportement du système nous enregistrons l'évolution de la position parcourue en fonction du temps.

La figure 1 représente ce phénomène.

Le déplacement angulaire désiré

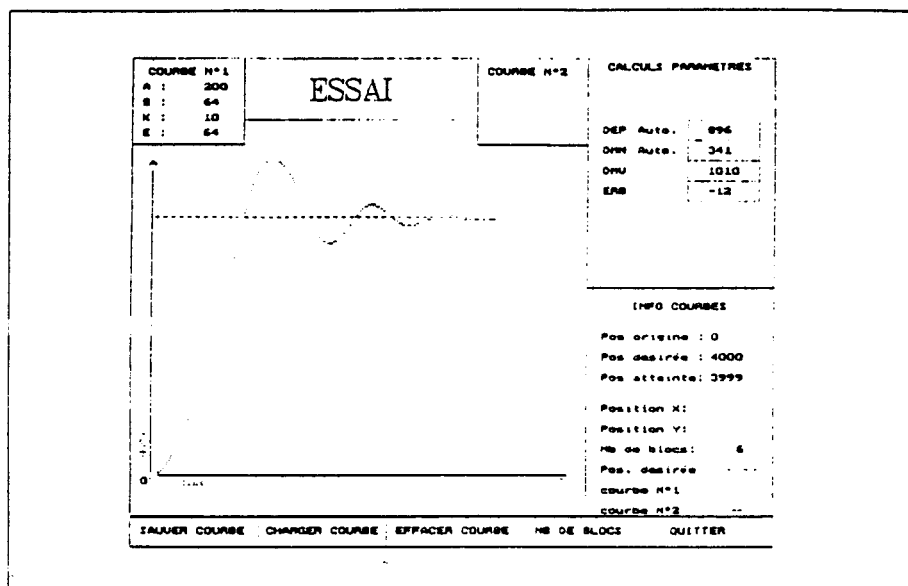


Figure 1.

est repéré "Pos désirée" et correspond à une consigne de 4000 impulsions.

Nous observons que des oscillations précèdent l'arrêt et que le premier dépassement de la cible est de 896 impulsions.

3 - Constitution d'une banque de données

Puisque nous ne connaissons pas l'effet des différents paramètres de réglage sur le comportement du système.

IL FAUT EFFECTUER DES ESSAIS.

Nous allons pour cela exécuter un plan d'expériences autour du réglage actuel.

3-1 Constitution de la table des essais

- Le nombre de paramètres internes (de réglages) est de quatre, en conséquence, il faut utiliser la table L8 2(7)

(8 essais, 2 valeurs par paramètre, 7 paramètres au maximum)

- Choix des niveaux (2 valeurs par paramètre).

Il faut choisir deux niveaux (deux valeurs) pour chaque paramètre interne (exemple pour A, deux valeurs repérées A1 et A2).

Nous allons encadrer chaque valeur du réglage actuel par les 2 niveaux choisis. Pour rester prudent, l'écart sera d'environ 20 % de la

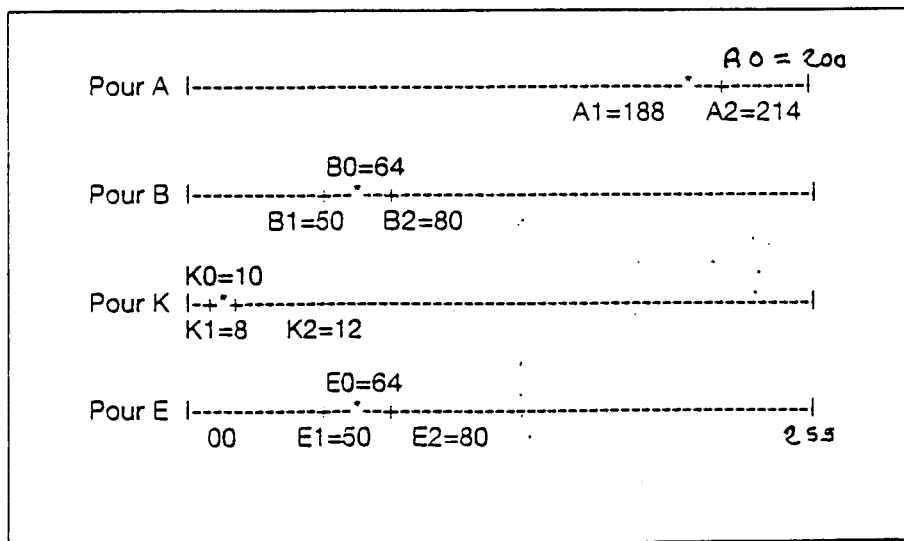


Figure 2.

plage qui sépare la valeur initiale de sa limite la plus proche, ce qui donne la représentation suivante:

L'indice 0 représente la valeur initiale, l'indice 1,

la valeur basse, l'indice 2, la valeur haute prise par chaque paramètre au cours du plan.

Ces valeurs étant choisies, nous confions au logiciel la charge de remplir le tableaux des permutations et d'organiser les essais. Le tableau 1 représente les combinaisons des réglages retenues pour les 8 essais.

3-2 La table des réponses (grandeurs observées)

Il faut préparer la table des réponses (résultats).

Puisqu'il s'agit de se constituer une banque de données, il faut évidemment noter tout ce qui concerne le cahier des charges, mais on peut observer d'autres phénomènes qui peuvent être utiles à l'analyse. Cela ne complique pas les essais et ne prends plus de temps.

Nous relèverons : La valeur du 1er dépassement "DEP", le moment du 1er passage au but "DMN", la durée du mouvement "DMV", l'erreur de position "ERB", dans un soucis de simplicité, pour ce premier exemple, nous ne tiendrons compte que du DEPASSEMENT.

3-3 La réalisation des essais

Les essais sont exécutés, le logiciel se charge de collecter les ren-

Cycle

Choix du cycle

Quitter

- NIVEAUX DES VARIABLES -

essai	A	B	K	E
1	188	50	8	50
2	188	50	12	80
3	188	80	8	80
4	188	80	12	50
5	214	50	8	80
6	214	50	12	50
7	214	80	8	50
8	214	80	12	80

- GRANDEURS OBSERVEES -

DEP	DMN	DMV	ERB
928	340	1270	-8
896	342	1170	-4
896	339	1170	11
928	340	1220	-9
832	341	1090	-19
896	340	1160	13
928	341	1210	-21
800	339	1010	-12

Tableau 1

Tableau 2

seignements et de remplir la table des résultats.

Les tableaux 1 et 2 représentent les résultats des essais.

3-4 Les résultats traités

Le logiciel se charge des calculs statistiques, il fournit un compte rendu sous forme de tableaux qui indiquent l'influence relative de chaque paramètre sur chaque grandeur observée, et de graphes des influences, qui représentent les résultats des tableaux précédents.

Comment lire une table ?

En ce qui concerne les dépassements (DEP) par exemple, le conte-

nu de l'intersection de la ligne 1 colonne NIV(niveau) et de la colonne K(paramètre K) représente statistiquement la valeur moyenne des dépassements lorsque K est à la valeur K1 soit 8, la case située en dessous correspond au niveau 2 de K.

Le contenu de la case située dans la ligne DIFF(différence), indique l'effet statistique de la variation de K sur le dépassement.

Remarque : Le graphique représente les résultats contenus dans les tables précédentes. Les points sont reliés par des droites, il ne faut pas conclure que ces droites représentent l'équation mathématique du phénomène. Mais, ceci ne doit pas nous empêcher de faire des pronostics.

4 - Recherche d'une zone de réglage

4-1 L'analyse des résultats

Elle est effectuée grâce à l'observation simultanée des graphes des influences, du tableau d'essais et des tables des moyennes.

Nous constatons une très faible modification des trajectoires, ce qui prouve que le réglage recherché est éloigné de la solution actuelle.

1 Une analyse plus fine montre que le dépassement est sensible dans l'ordre suivant aux variations de E, de A et de K. Nous constatons que B n'a aucune influence.

Cycle

Choix du cycle

Quitter

depassement (DEP)

NIV.	A	B	K	E
1	912	888	896	920
2	864	888	880	956
DIFF	-48	0	-16	-64

duree montee (DMN)

NIV.	A	B	K	E
1	340	340	340	340
2	340	339	340	340
DIFF	0	-1	0	0

duree mouvement (DMV)

NIV.	A	B	K	E
1	1207	1172	1185	1215
2	1117	1152	1140	1110
DIFF	-90	-20	-45	-105

erreur de bond (ERS)

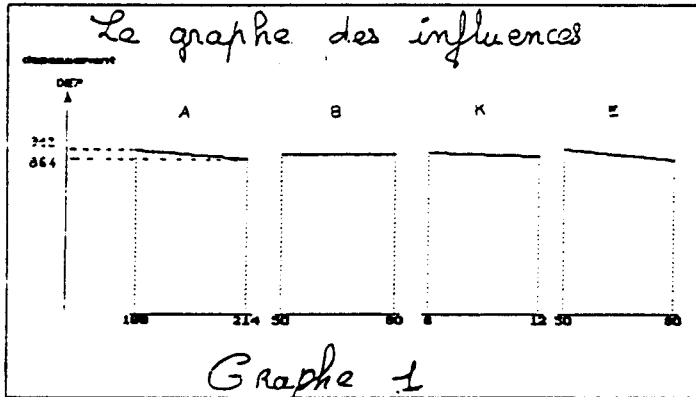
NIV.	A	B	K	E
1	-2.5	-4.5	-9.2	-6.2
2	-9.7	-7.7	-3	-6
DIFF	-7.2	-3.2	6.25	0.25

Tableau 3

- 2 Le meilleur des résultats d'après le graphe serait obtenu pour A=214, B indifférent, K= 12 et E= 80.
- 3 Le tableau d'expériences confirme ce pronostic.
- 4 Le but à atteindre est encore éloigné.
- 5 Pour réduire le dépassement, il faut : Augmenter A, augmenter E, augmenter K, B semble indifférent.

4-2 La décision

Il faut effectuer un nouveau plan et pour cela définir une nouvelle assiette de valeurs.
Compte tenu des réflexions précédentes, nous décidons de doubler K, doubler E, ne pas modifier B et positionner A au milieu de la plage restante.



Là encore, à un moment donné, il faut cesser d'analyser et décider d'une action.

Les valeurs prises par les paramètres seront les suivantes : A=235,

B=80, K=25 et E=160.

Ce qui donne la représentation ci-contre.

4-3 Vérification de la prédiction

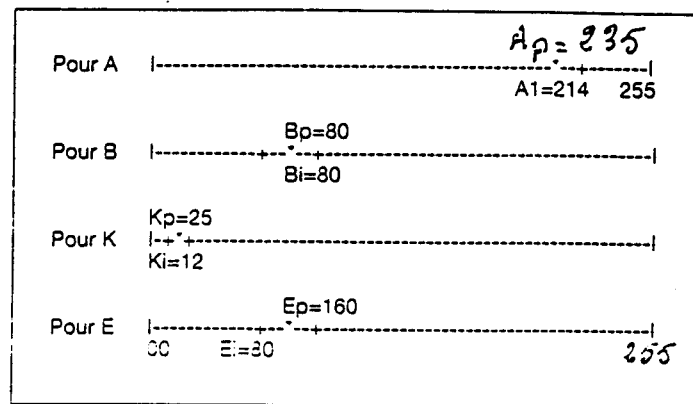
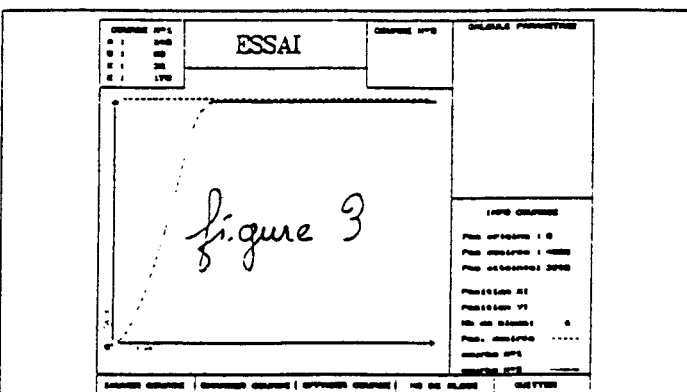
nota :

Avant de choisir la longueur du nouveau plan et de l'exécuter, nous vérifions la justesse de l'analyse par un essai de contrôle.

Par précaution, on effectue les réglages et on vérifie la stabilité à l'arrêt.

La figure 2 montre que nos prévisions s'avèrent exactes.)

Il reste donc 3 paramètres, la table L4 2(3) convient (4 essais, 3 paramètres, 2 niveaux par paramètre.)



5 - Scrutation de la zone de réglage

5-1 Choix de la table le résultat de l'essai contrôle étant proche du but, nous décidons de ne plus faire varier B

Il reste donc 3 paramètres, la table L4 2 (3) convient (4 essais, 3 paramètres, 2 niveaux par paramètre).

5-2 Choix des niveaux

Le dépassement étant maintenant réduit: La tentation, de terminer le réglage intuitivement est grande. Il faut s'en garder car la réalisation d'un plan structuré demande peu de temps. D'autre part, il fournit une banque de données précieuse pour le réglage.

Compte tenu de la situation actuelle, nous donnerons à A, deux valeurs 230 et 240, à B une valeur constante 80, à K, deux valeurs 20 et 30 et à E, deux valeurs 150 et 170.

Cycle	Choix du cycle	Quitter		
- NIVEAUX DES VARIABLES -				
essai	A	E	K	B
1	230	150	20	80
2	230	170	30	80
3	240	150	30	80
4	240	170	20	80

- GRANDEURS OBSERVEES -			
DEP	DMN	DMV	ERS
388	349	492	-6
262	354	520	5
72	381	497	-4
103	383	462	2

5-3 Réalisation des essais

Les essais sont réalisés selon la méthode précédente. Les tableaux 4 et 5 représentent les différents essais et les grandeurs observées.

Tables des essais et des réponses (tableaux 4 et 5)

6 - Recherche de la solution

6-1 Analyse des résultats

L'analyse des résultats montre qu'aucune solution ne convient, que le meilleur des résultats est obtenu lors de l'essai n° 3.

L'analyse du graphe montre qu'une autre solution semble meilleure (A= 240, B= 80, K=30 et E= 170). En effectuant

REGLAGE DU COMPORTEMENT

D'UN

ARBRE ELECTRONIQUE VERTICAL

Jean Filippini
Professeur en génie électrique

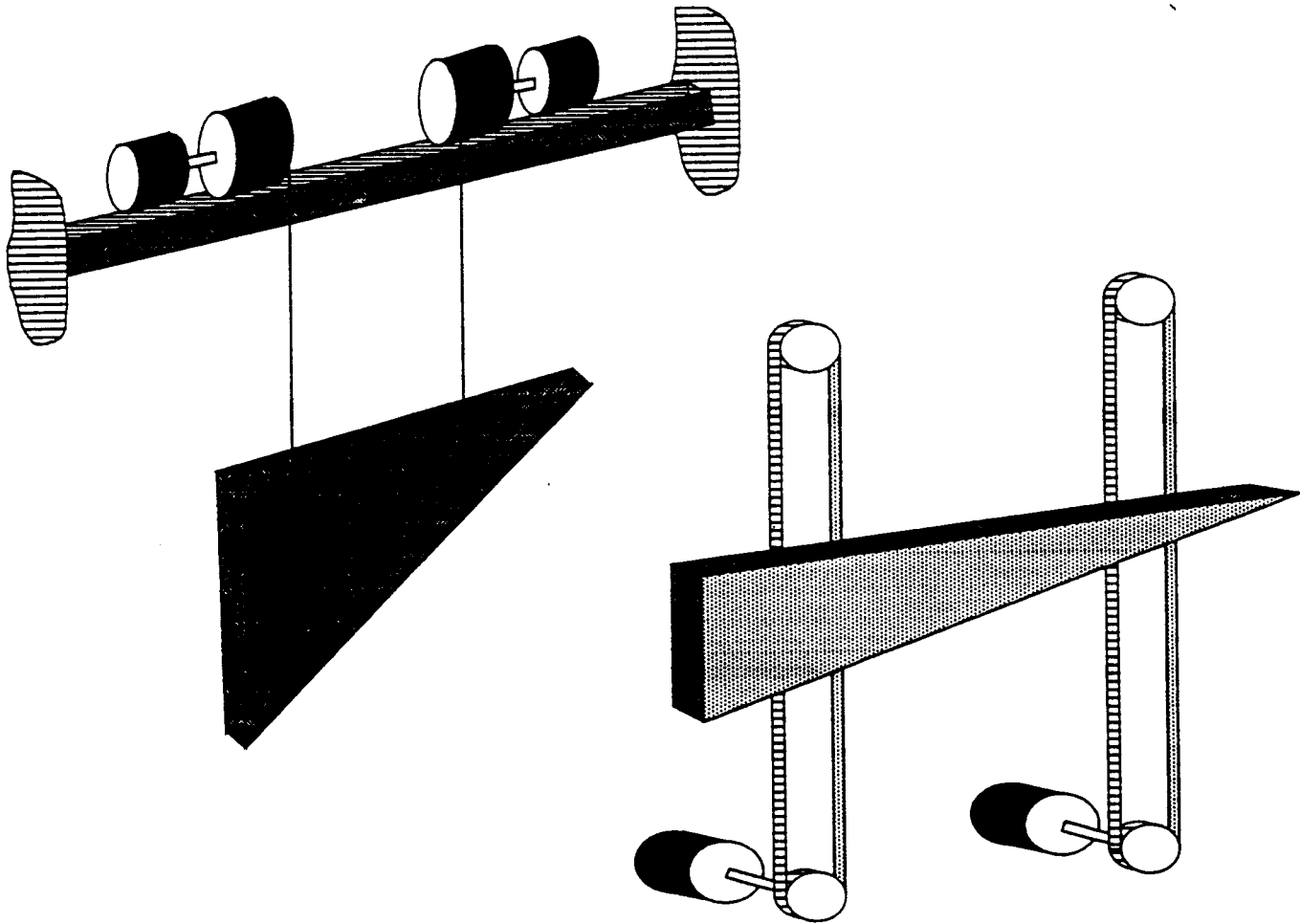
et

Pierre Souvay
Professeur en génie mécanique

L.T.R. Epinal

Définition d'un arbre électronique.

Un arbre électronique est un équipement électromécanique constitué de deux axes motorisés identiques reliés entre eux par une liaison électronique qui se substitue à une liaison mécanique (Arbre mécanique) permettant ainsi que toute modification du comportement d'un axe entraîne la même modification de l'autre.

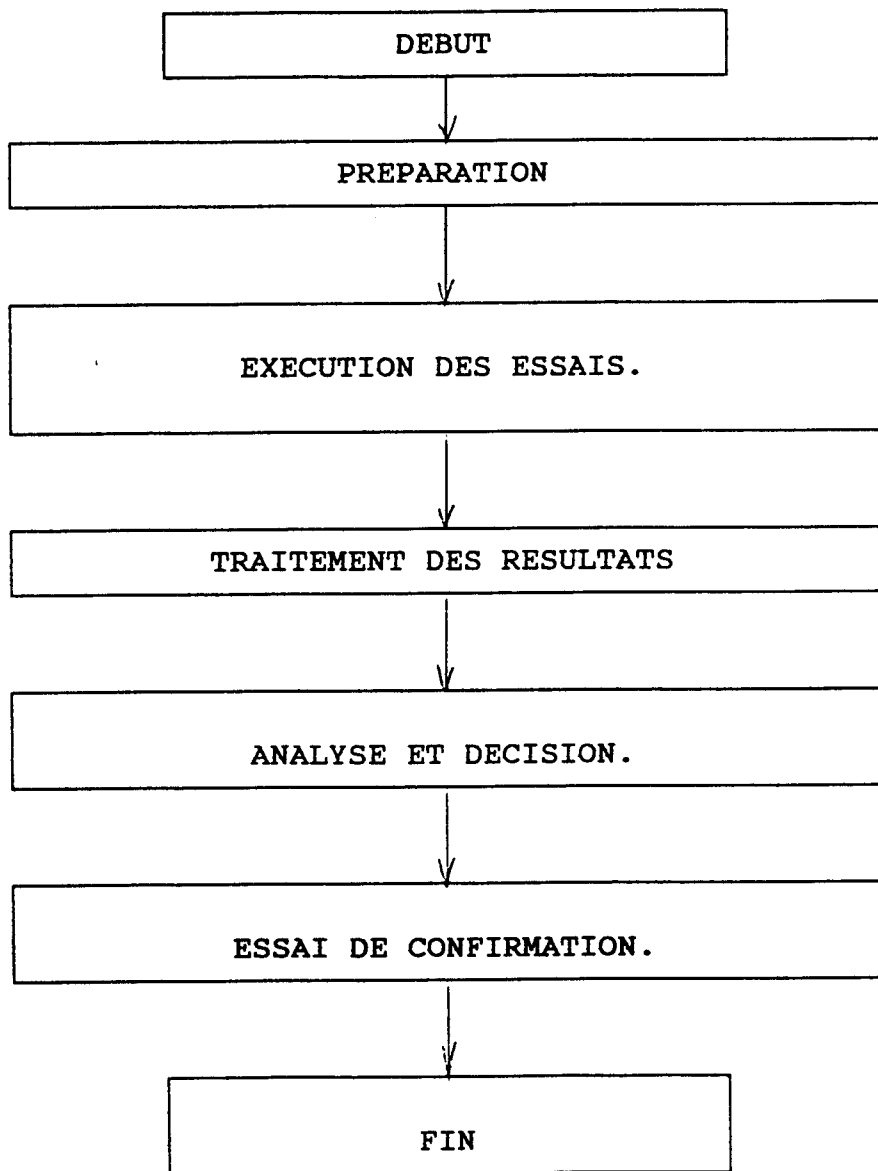


Les phases du réglage.

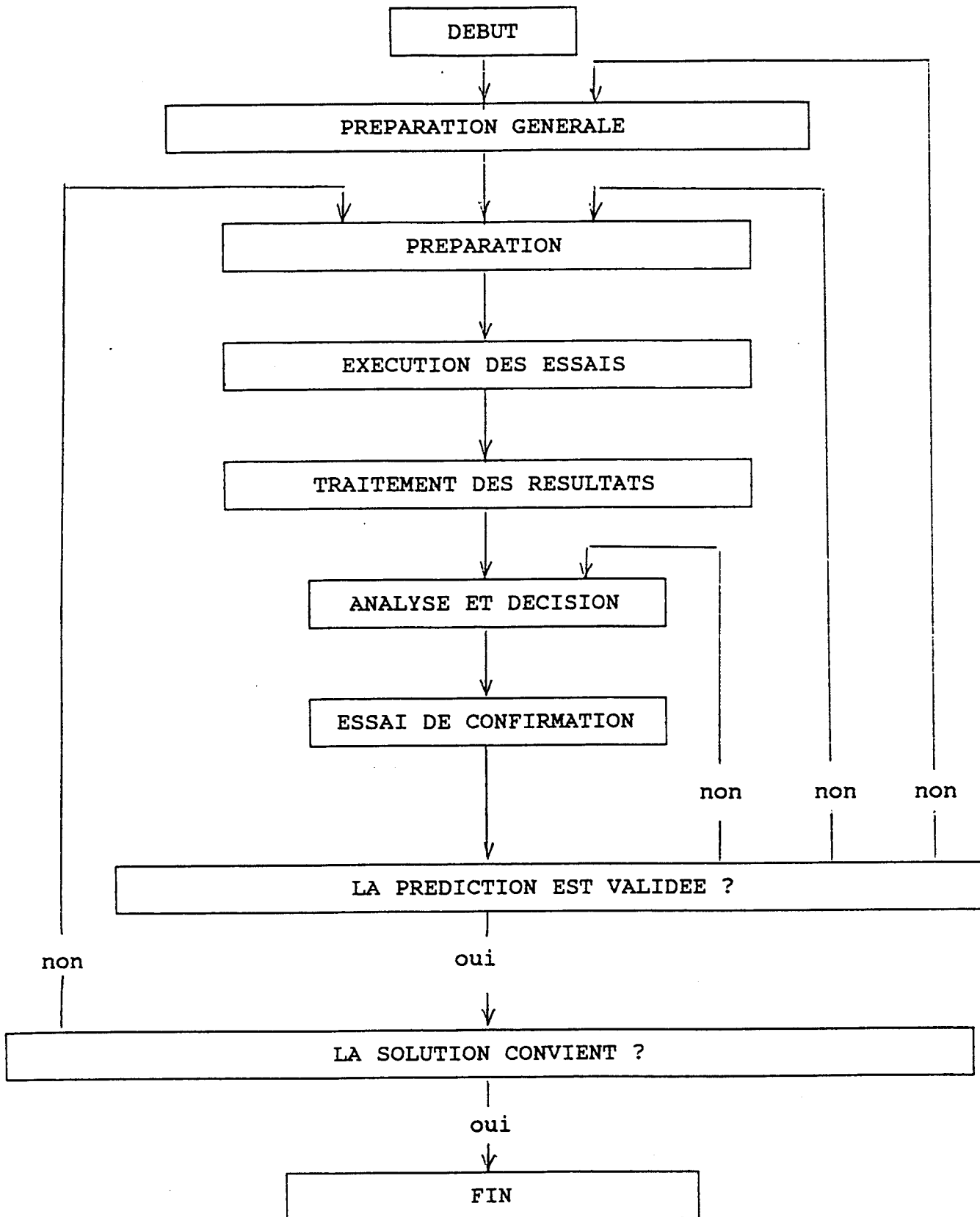
- 1- Etude de l'équipement.
- 2- Recherche d'un réglage calme.(Voir 3^{ème} article).
- 3- Observation du comportement et analyse des défaillances.
- 4- Recherche de l'influence des facteurs sur le comportement souhaité.(Voir 1^{er} article)
- 5- Recherche des facteurs les plus influents.
- 6- Scrutation d'une zone plus favorable(Voir 1^{er} article)
- 7- Choix du réglage retenu.
- 8- Mise en service.

Les articles référencés sont parus en 1993 dans la revue l'automaticien.

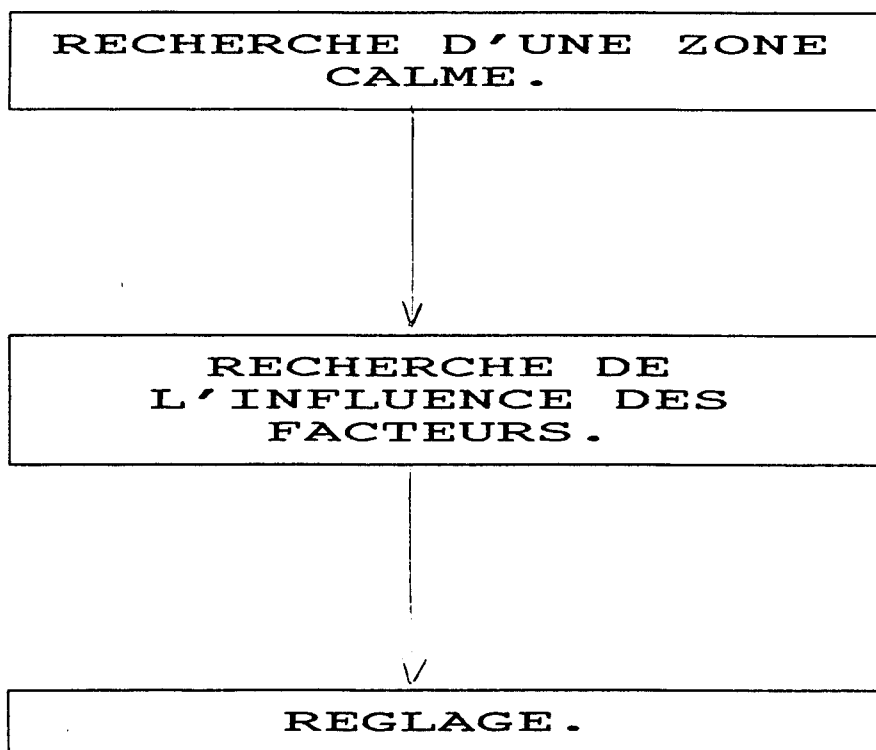
Déroulement d'un plan.



Déroulement d'un réglage.

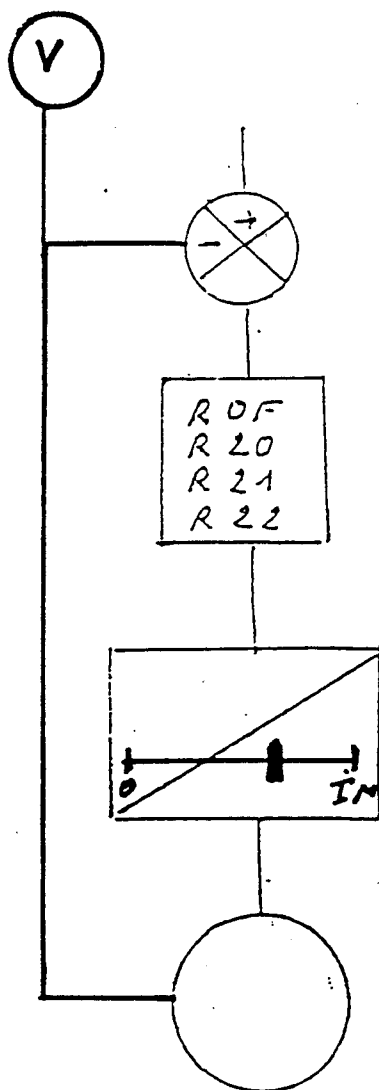


LES TROIS ETAPES OBLIGATOIRES.



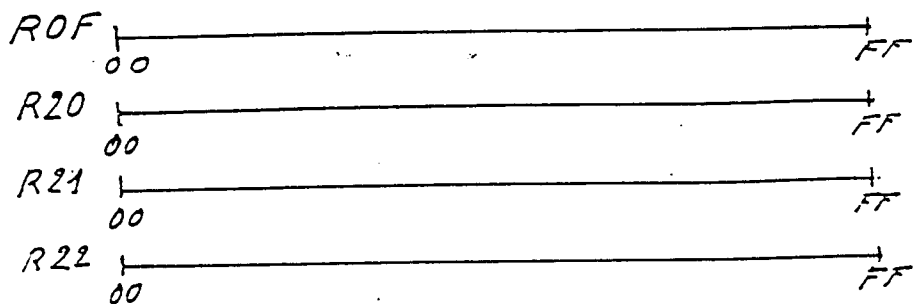
PREPARATION DU PREMIER PLAN

Les points de réglage.
 Les plages de réglage.
 Les niveaux choisis.
 Les moyens d'observation.
 Les précautions. (Limitation du courant)



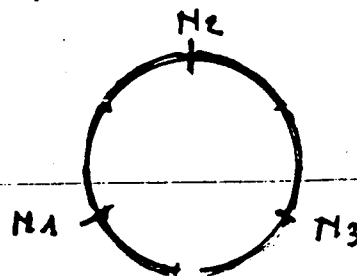
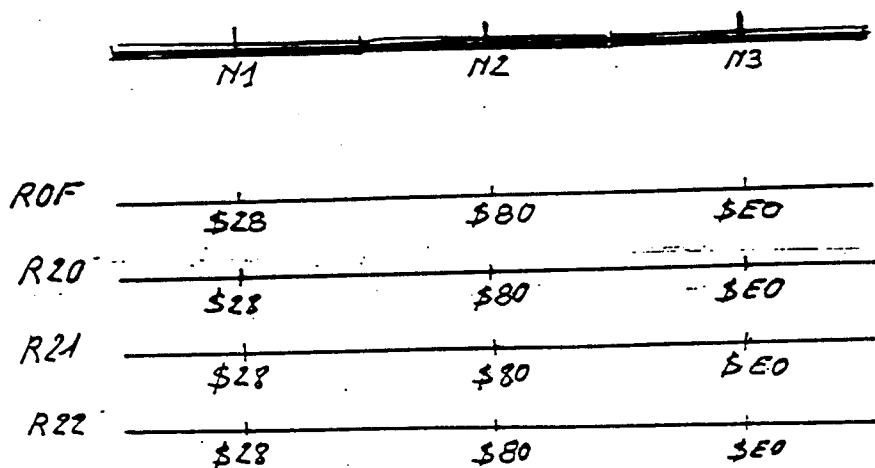
Les Facteurs

Les plages



La Table L9 2⁽³⁾

Les niveaux



PREMIER PLAN

Recherche d'une zone stable

	0F	20	21	22
1	28	28	28	28
2	28	80	80	80
3	28	EO	EO	EO
4	80	28	EO	EO
5	80	80	EO	28
6	80	EO	28	80
7	EO	28	EO	80
8	EO	80	28	EO
9	EO	EO	80	28

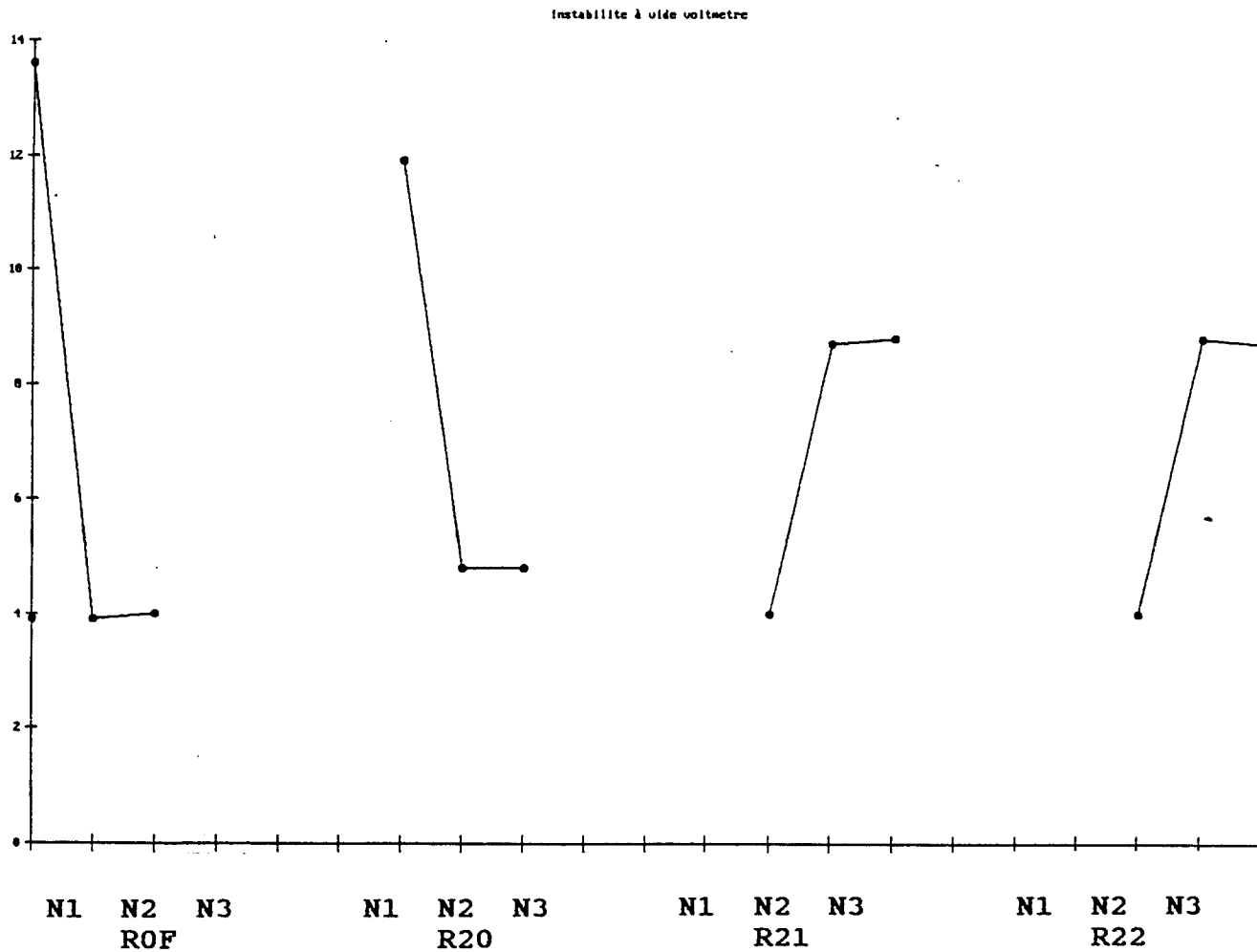
INST	Brut		
4	50		
4,8	5		
4,8	60		
3,9	30		
0	3		
0	35		
4	10		
0	7		
0	0		

N ₁	13,6	11,9	4	4
N ₂	3,9	4,8	8,7	8,8
N ₃	4	4,8	8,8	8,7

N ₁	115	90	92	53
N ₂	68	15	35	50
N ₃	17	95	73	97

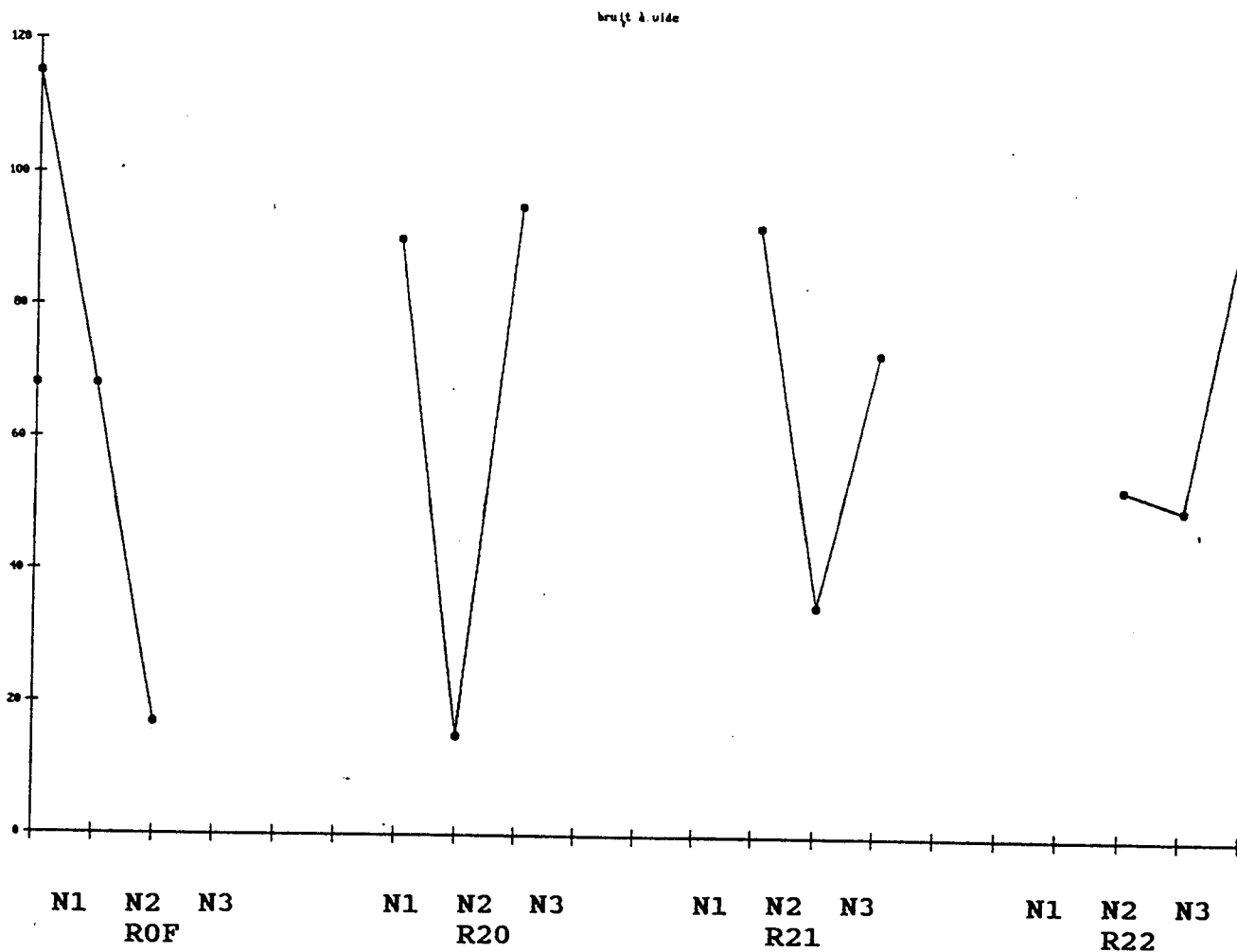
Premier plan

Influence des facteurs sur l'instabilité



Premier plan

Infulence des facteurs sur le bruit

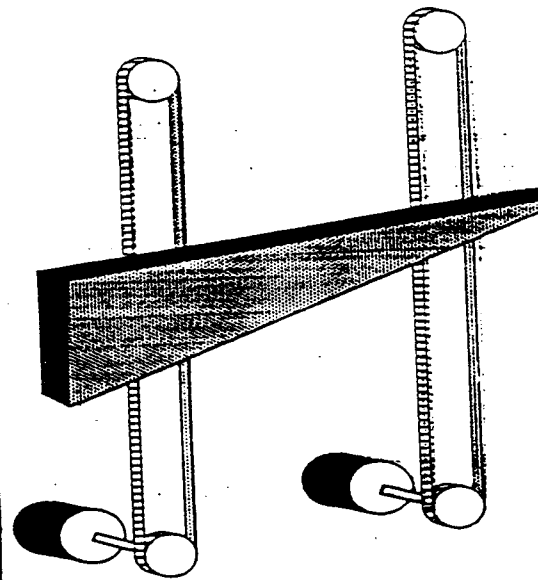
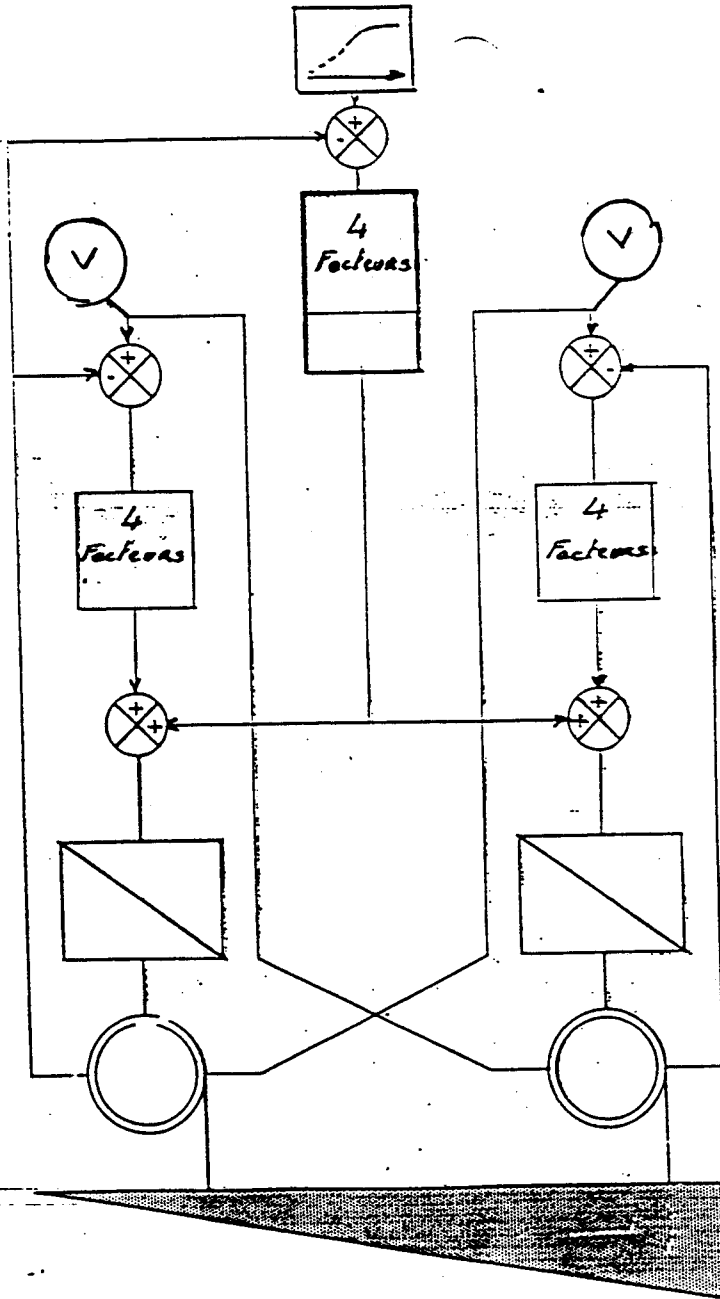


RECHERCHE DE LA ZONE STABLE.

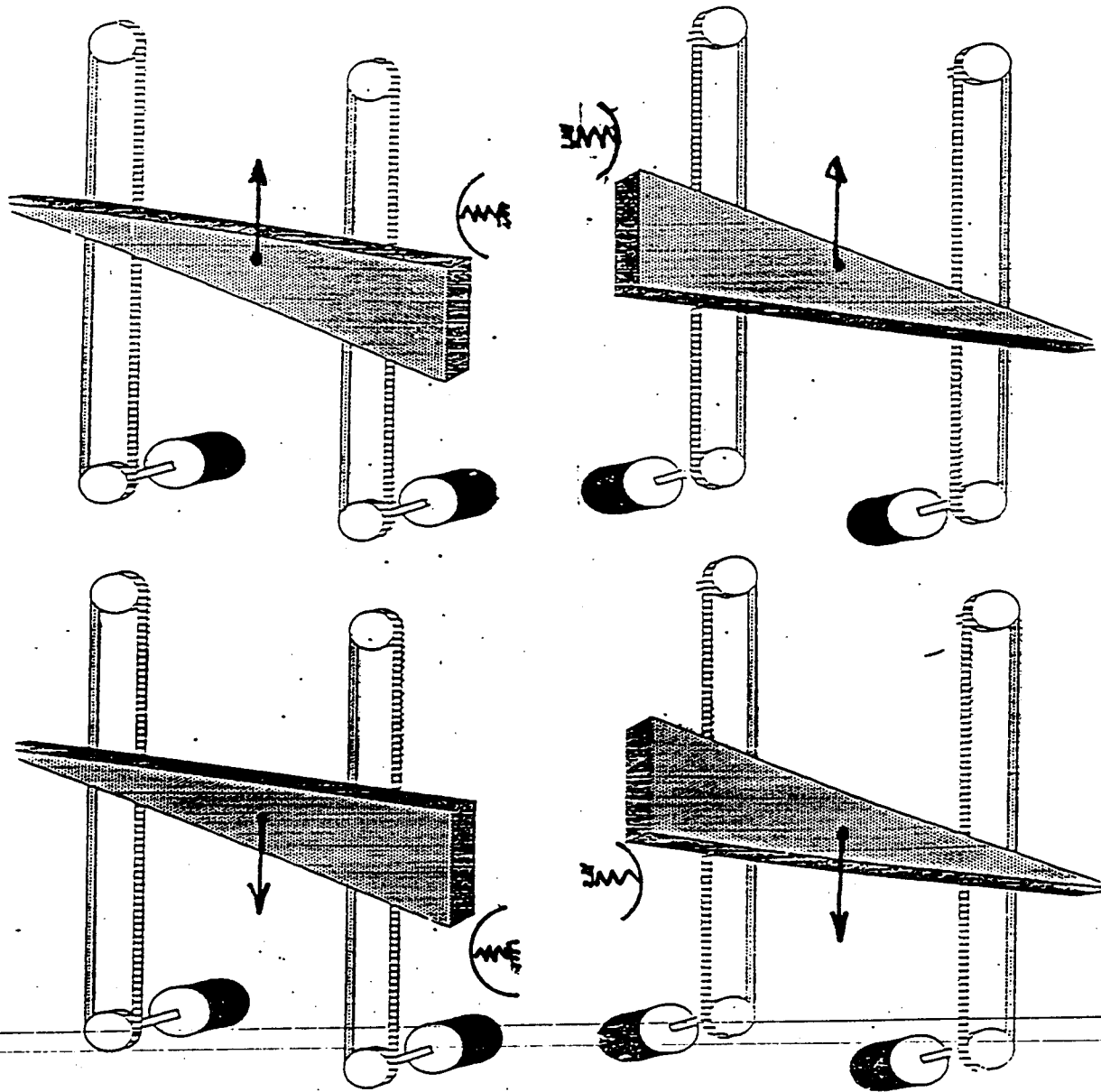
		ROF N1			ROF N2			ROF N3			
R20	N1	4 ₁	5,5	5,5	2,5	2,5	0,9	9,9	2,5	2,5	N1
		5,5	7	7	3,9	3,9	2,5	2,5	4	4 ₇	N2
		5,5	7	7	3,9	3,9 ₄	2,5	2,5	4	4	N3
R20	N2	1,6	3,3	3,3	1,6	1,6	=	0 ₈	1,5	1,5	
		3,3	4,8 ₂	4,8	1,6	1,6	=	=	1,5	1,5	
		3,3	4,8	4,8	0 ₅	0	-1,5	-1,5	0	0	N1 R 22
R20	N3	1,6	3,3	3,3	0	0	-1,5	-1,5	0 ₉	0	
		3,3	4,8	4,8	1,6	1,6	0 ₆	0	1,5	1,5	
		3,3	4,8 ₃	4,8	1,6	1,6	0	0	1,5	1,5	N3
		N1	N2	N3	N2	N1	N2	N3			
R21											

Les numéros encadrés indiquent les combinaisons testées.

L'ENSEMBLE BOUCLE.

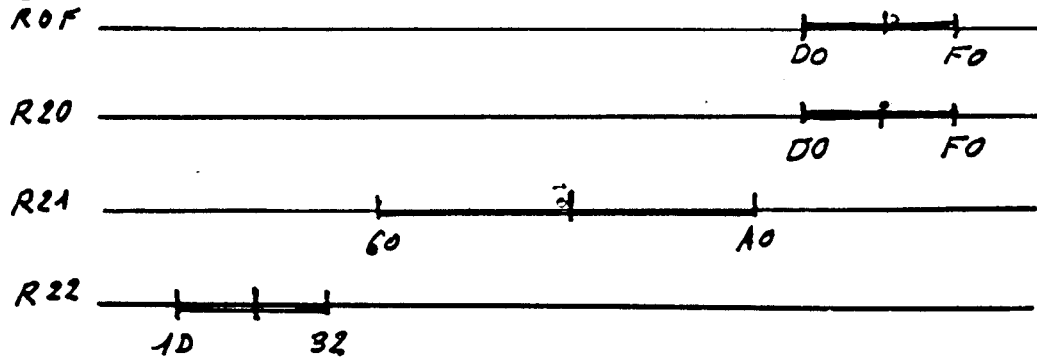


LA RECHERCHE DES CAUSES DE DEFAILLANCES ET DE LEURS EFFETS.

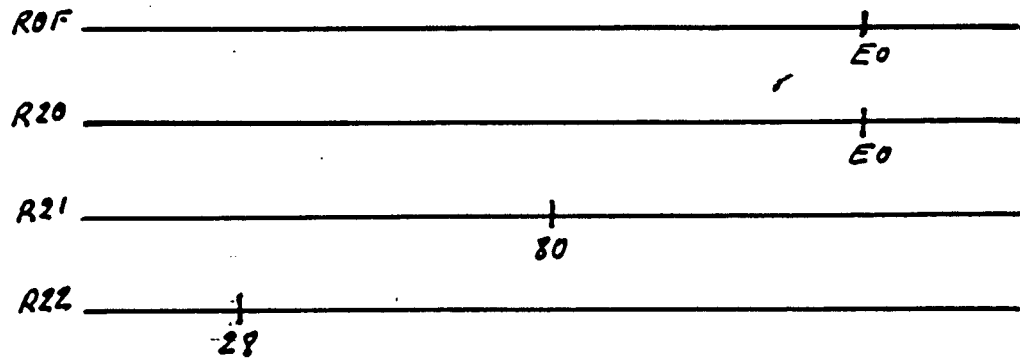


LES PLACES TESTEES.

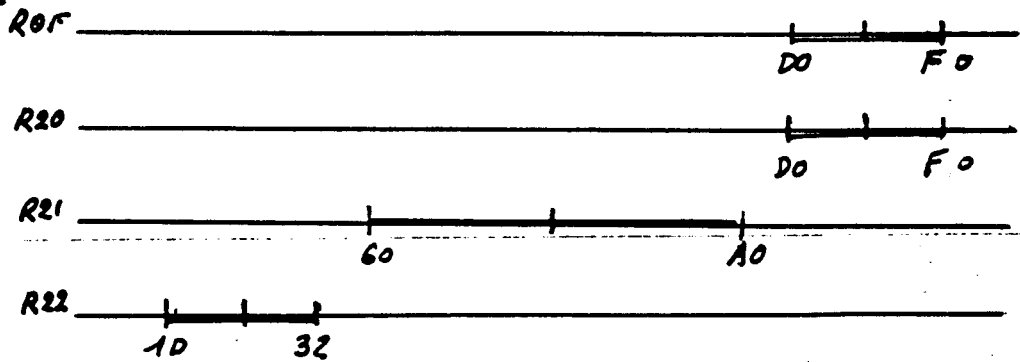
Maitre



Axe 1



Axe 2



DEUXIEME PLAN

Recherche de l'influence des facteurs.

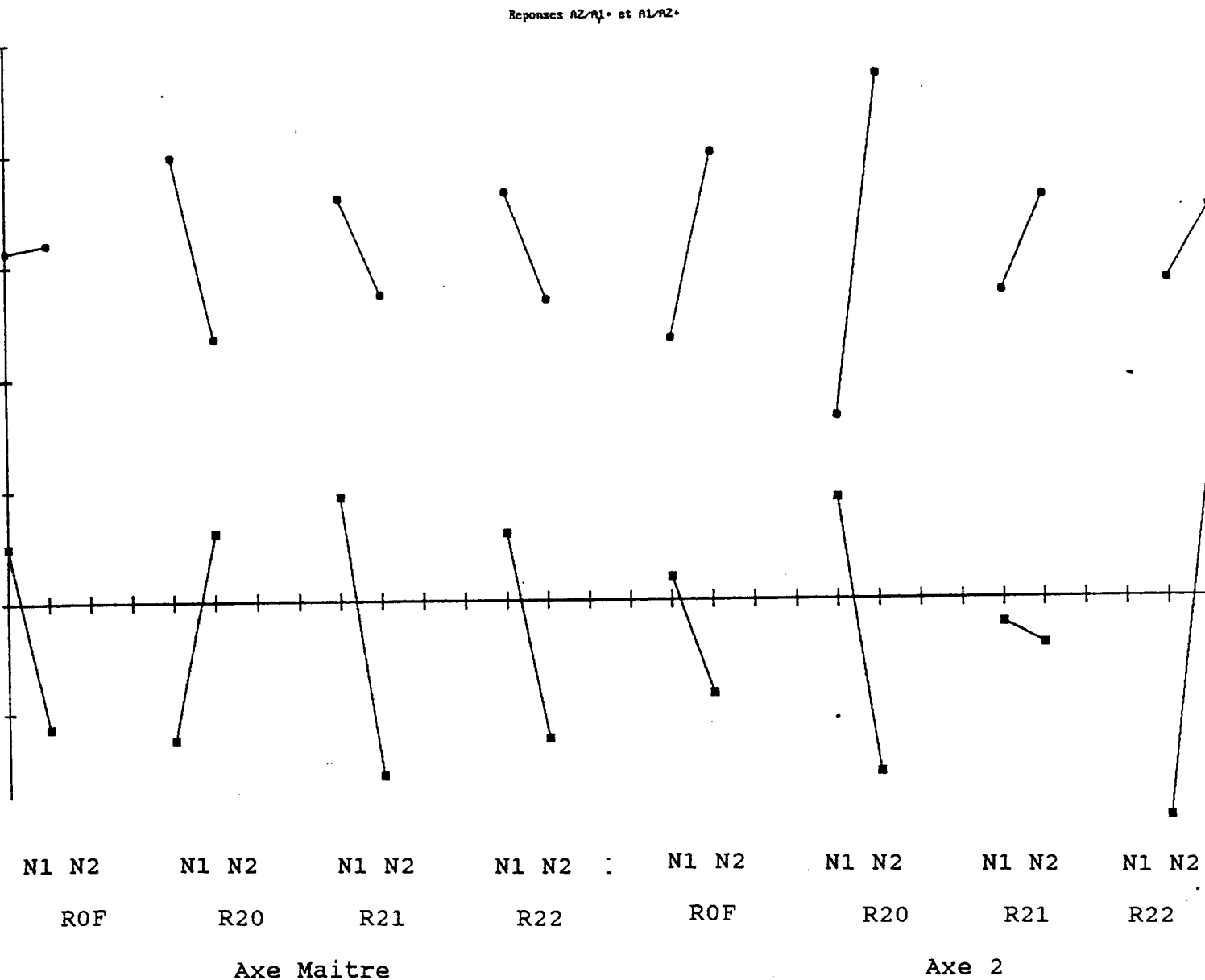
	Axe Maitre				Axe 1						
	OF	20	21	22	OF	20	21	22			
1	¹ DØ	¹ DØ	¹ 60	¹ 1D	¹ DØ	¹ DØ	¹ 60	¹ 1D	¹	¹	¹
2	¹ DØ	¹ DØ	¹ 60	¹ 1D	¹ DØ	² FØ	² AØ	² 32	²	²	²
3	¹ DØ	¹ DØ	² AØ	² 32	² FØ	¹ DØ	¹ 60	¹ 1D	²	²	²
4	¹ DØ	² FØ	¹ 60	² 32	² FØ	¹ DØ	² AØ	² 32	¹	¹	²
5	¹ DØ	² FØ	² AØ	¹ 1D	² FØ	² FØ	¹ 60	² 32	¹	²	¹
6	¹ DØ	² FØ	² AØ	² 32	¹ DØ	² FØ	² AØ	¹ 1D	²	¹	¹
7	² FØ	¹ DØ	² AØ	² 32	¹ DØ	¹ DØ	² AØ	² 32	¹	²	¹
8	² FØ	¹ DØ	² AØ	¹ 1D	² FØ	² FØ	² AØ	¹ 1D	¹	¹	²
9	² FØ	¹ DØ	¹ 60	² 32	² FØ	² FØ	¹ 60	² 32	²	¹	¹
10	² FØ	² FØ	² AØ	¹ 1D	¹ DØ	¹ DØ	¹ 60	² 32	²	¹	²
11	² FØ	² FØ	¹ 60	² 32	¹ DØ	² FØ	¹ 60	¹ 1D	¹	²	²
12	² FØ	² FØ	¹ 60	¹ 1D	² FØ	¹ DØ	² AØ	¹ 1D	²	²	¹

Axe 1 / Axe 2		Axe 2 / Axe 1	
→	←	→	←
0,07	0,56	0,006	-0,005
0,41	2,13	0,78	1,51
0,30	0,56	-0,37	-0,50
0,33	0,83	0,52	0,63
0,76	1,49	0,5	0,43
0,48	0,7	-0,52	-1,08
-0,22	0,45	-0,50	-0,23
-0,72	2,22	-1,13	-2,67
1,19	2,04	-1,17	-0,59
-0,32	0,04	0,91	0,92
0,33	0,79	-0,39	-0,65
0,59	0,85	0,55	1,01

Y1	6,3	8	7,2	7,3	4,7	3,3	5,5	5,7			
M2	6,4	4,7	5,5	5,4	8	9,4	7,2	7			
-M1	0,1	-3,3	-1,7	-1,9	3,3	6,1	1,7	1,3			

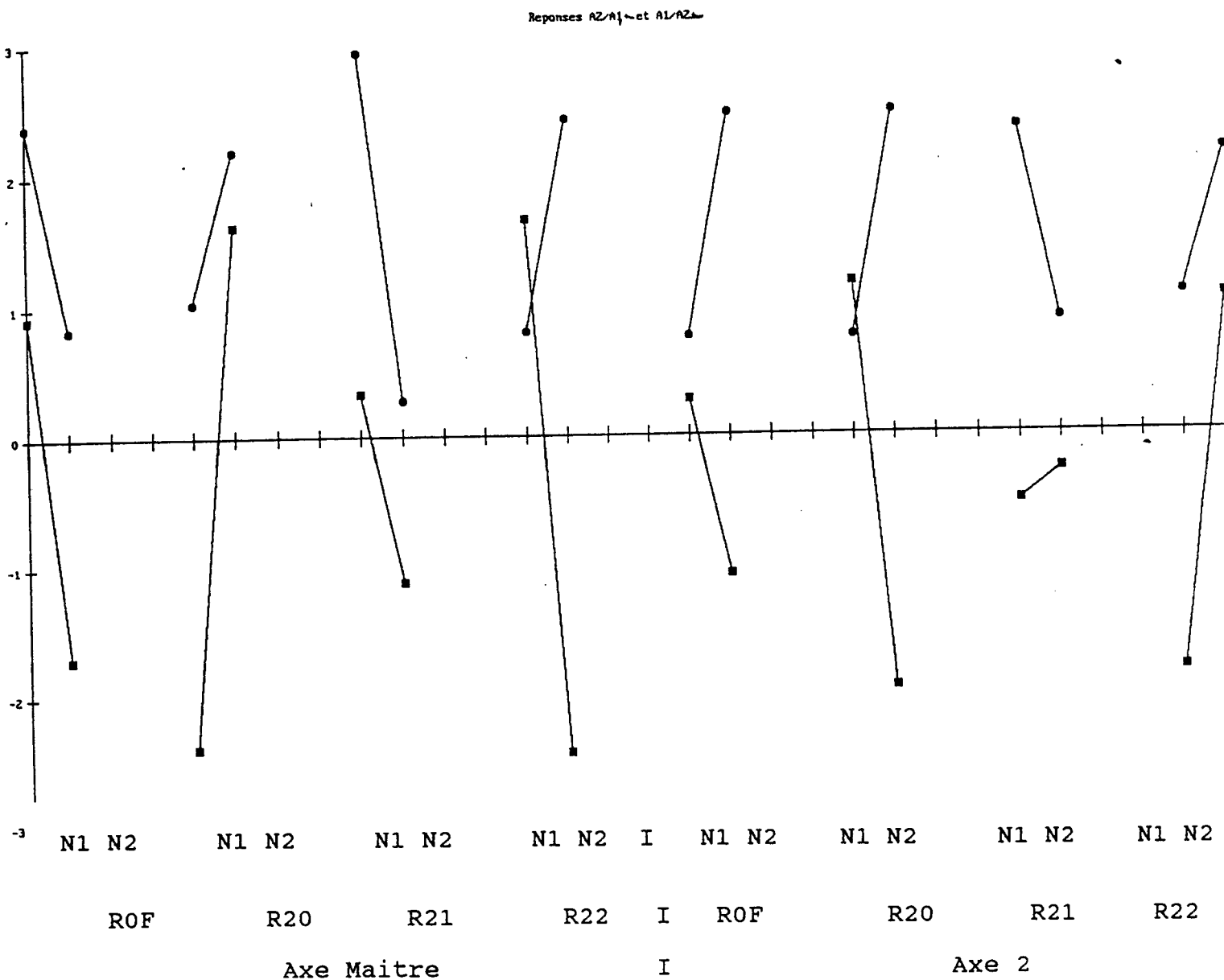
Deuxième plan

Infulence des facteurs sur la réactions aux perturbations positives



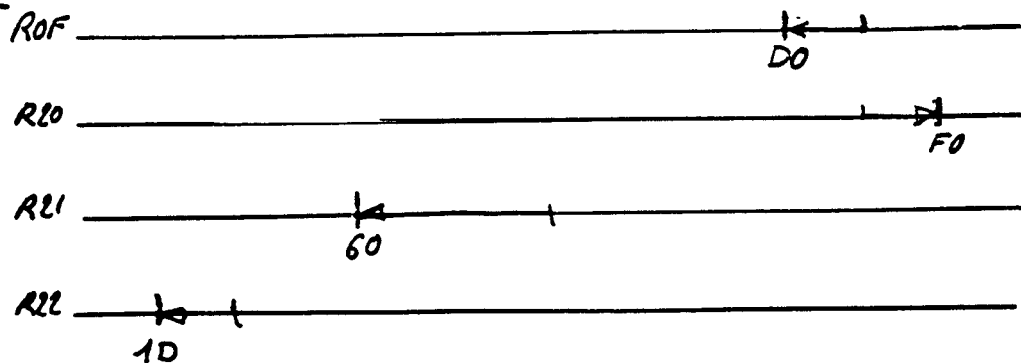
Deuxième plan

Infulence des facteurs sur la réactions aux perturbations négatives

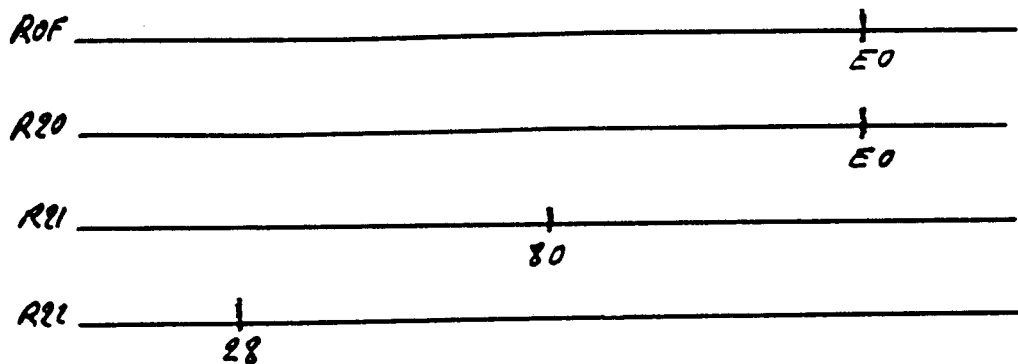


L'ESSAI DE CONFIRMATION.

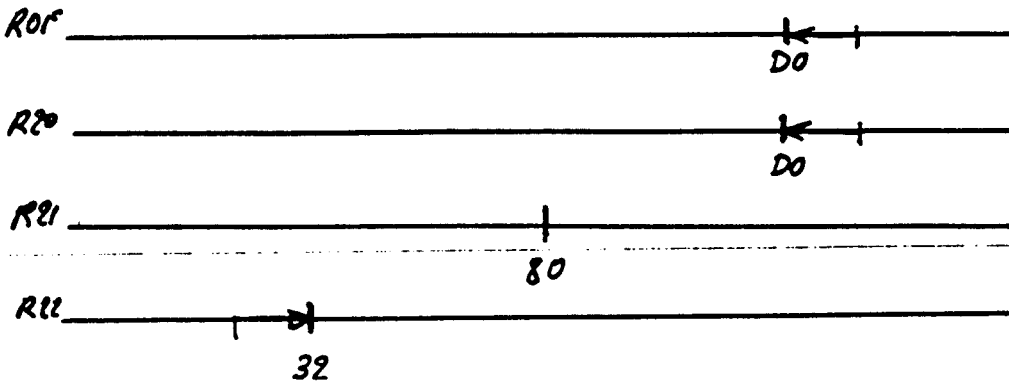
Maitre



Axe 1



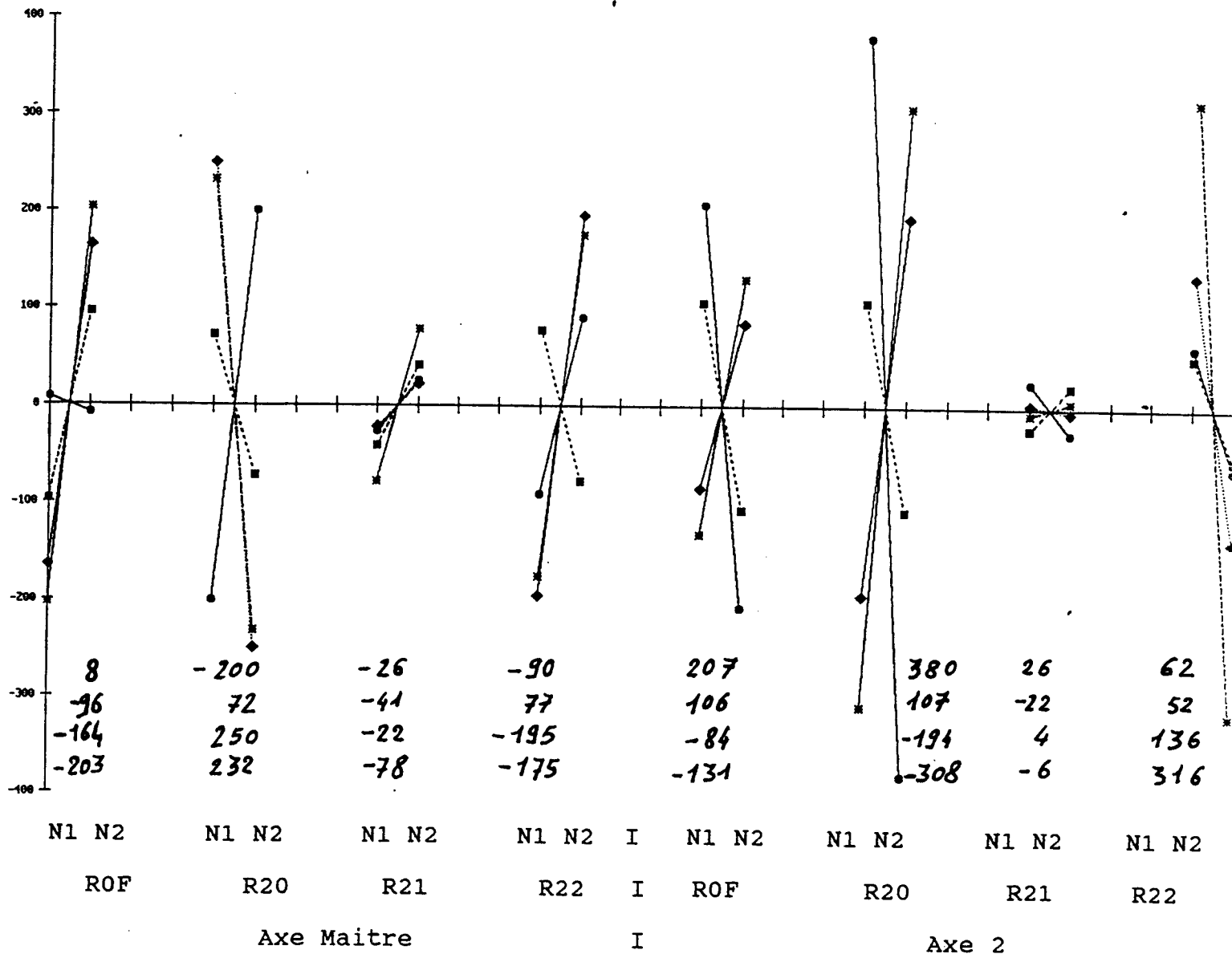
Axe 2



Préparation du troisième plan

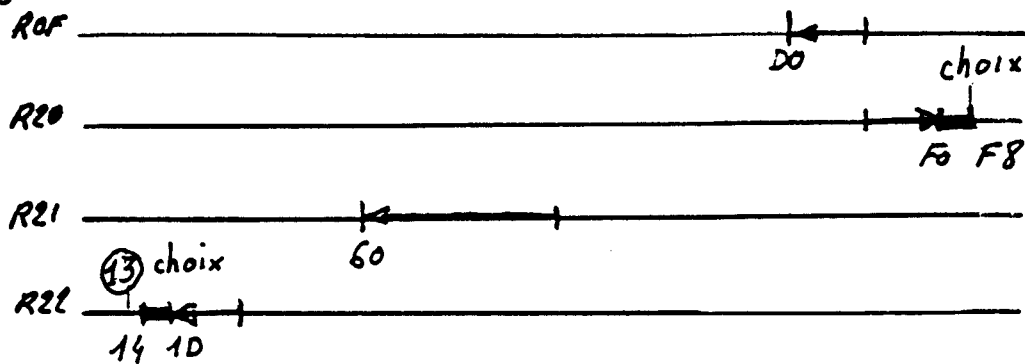
Comparaisons des influences relatives

Comparaison des effets.

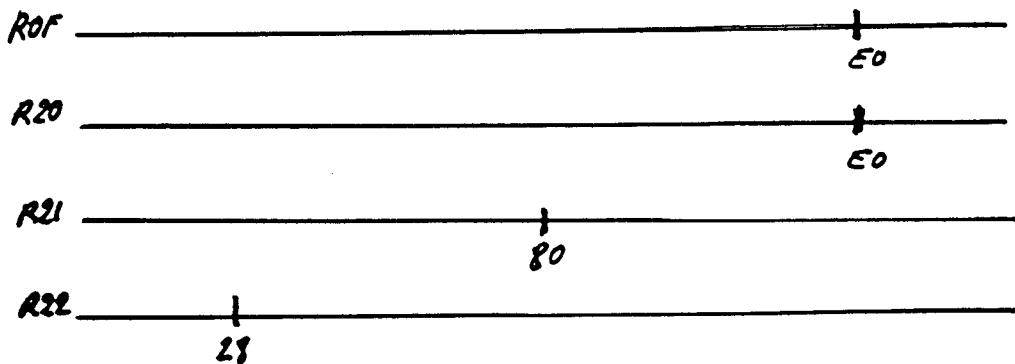


LA ZONE DE REGLAGE et CHOIX FINAL.

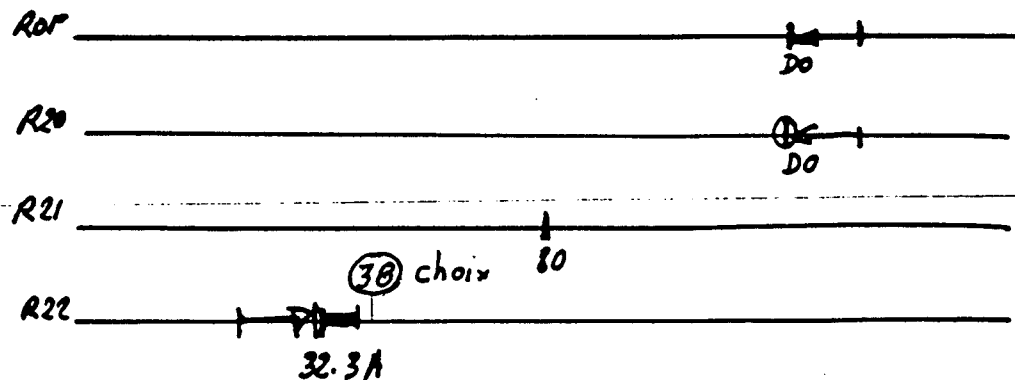
Maître



Axe 1



Axe 2



TROISIEME PLAN

Scrutation de la zone de reglage

	R0FM	R22M	R22A
1	F ϕ	14	32
2	F ϕ	1D	3A
3	F8	14	3A
4	F8	1D	32

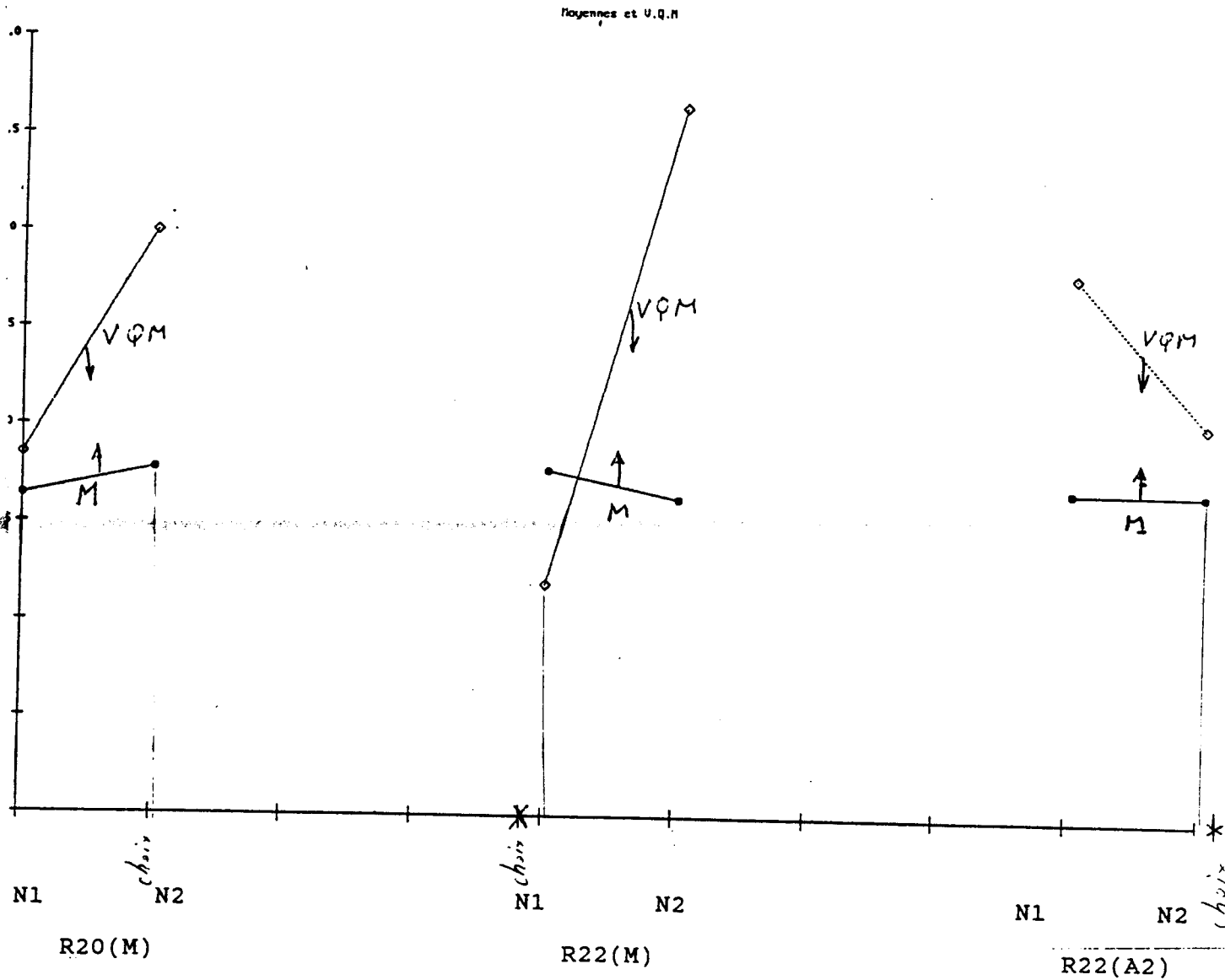
Λ_1/Λ_2 +	M/Λ_2 -	A_2/Λ_1 +	A_2/Λ_1 -	<u>M</u>	J^2
0,8	0,88	0,92	0,82	0,855	10
0,68	0,85	0,74	0,85	0,78	27
0,85	0,95	0,89	1	0,922	14
0,71	0,83	0,97	0,93	0,86	46

N_1	0,82	0,89	0,85
N_2	0,89	0,82	0,85
Δ			

N_1	18,5	12	28
N_2	30	36,5	20,5
Δ			

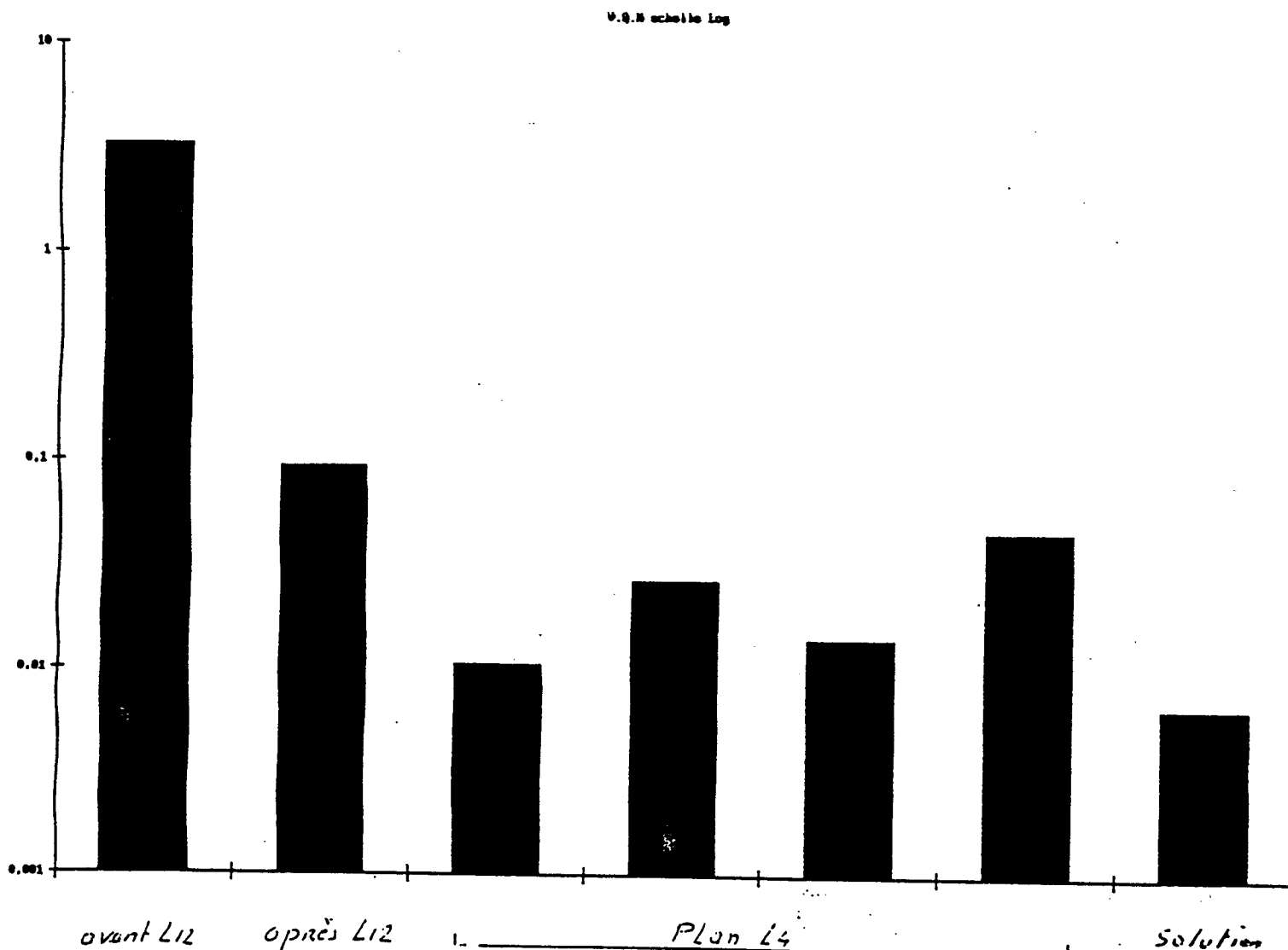
Troisième plan

Comparaisons des influences sur les moyennes et les écarts

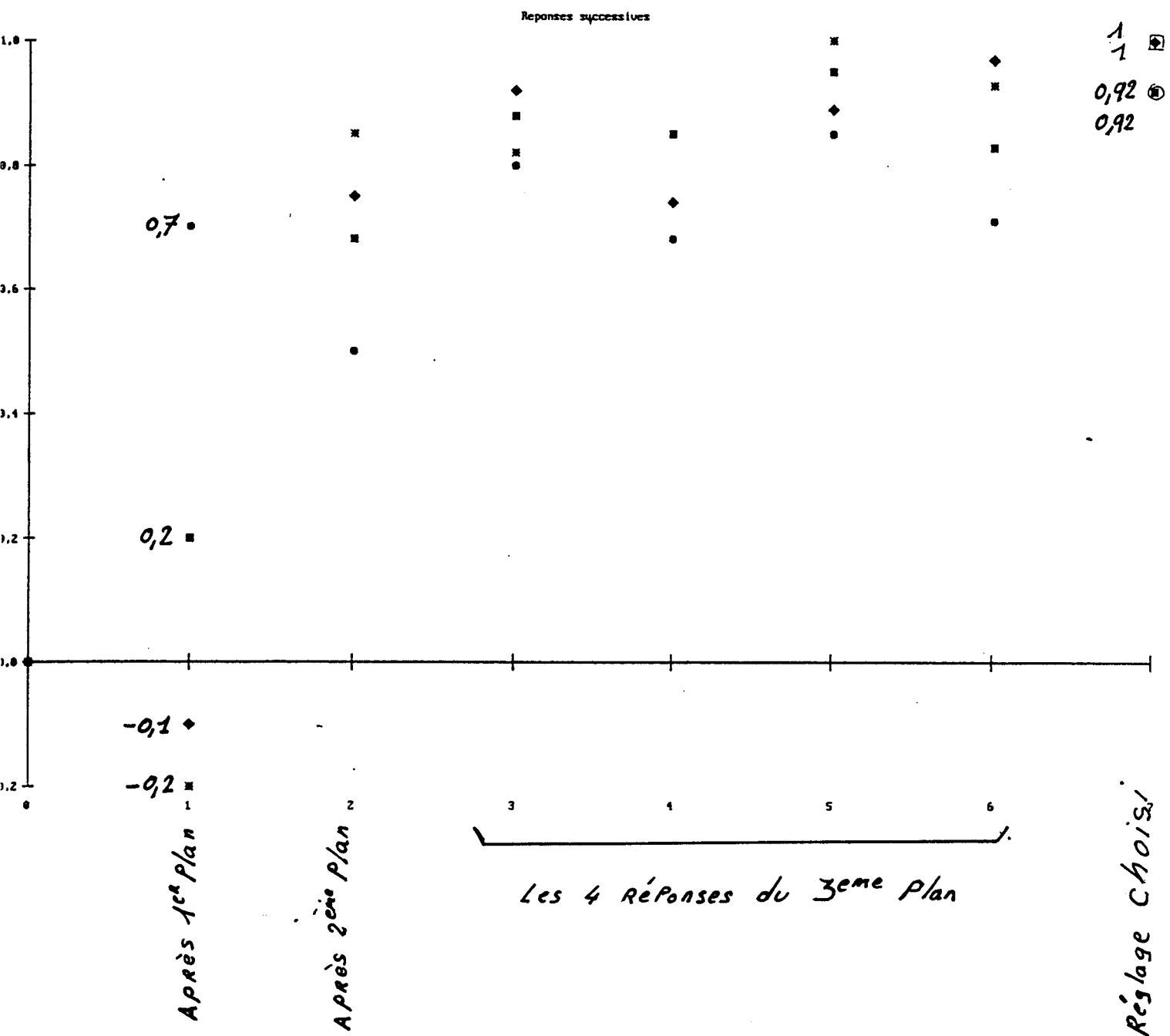


16 Faut augmenter M et réduire VQM.

Comparaisons des V.Q.M successifs (Carré des écarts/Moyenne)

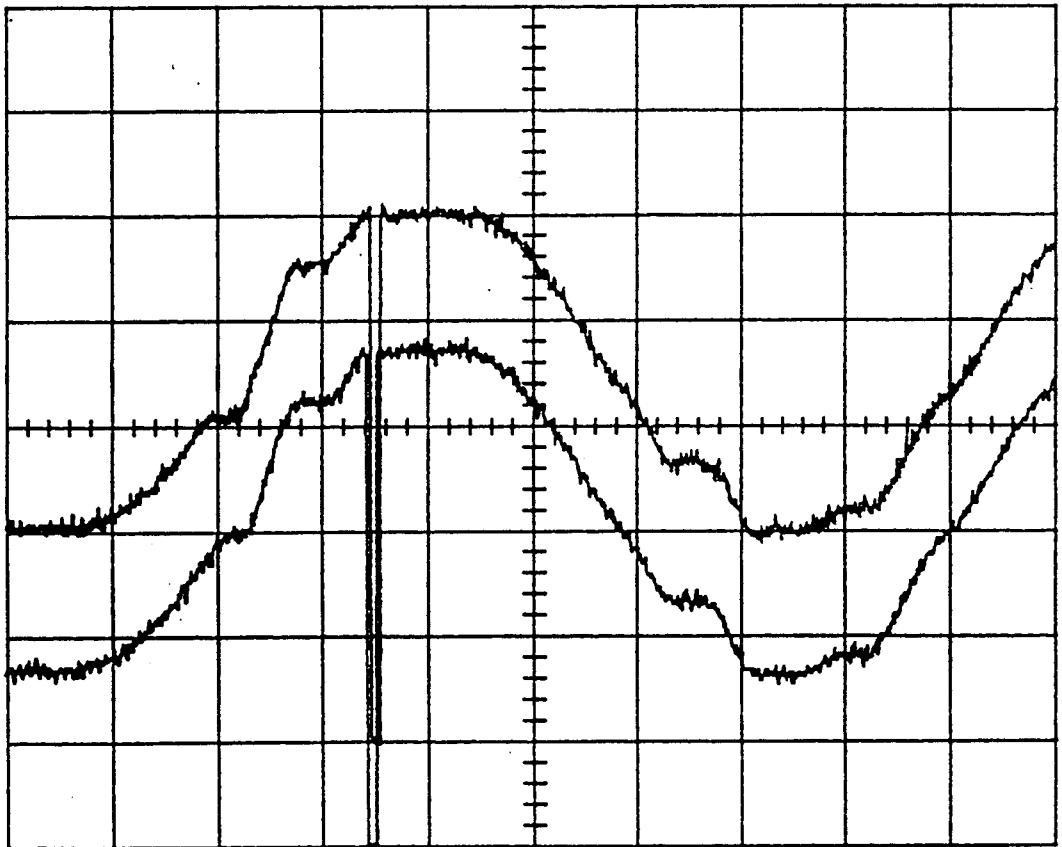


Comparaisons des réponses successives



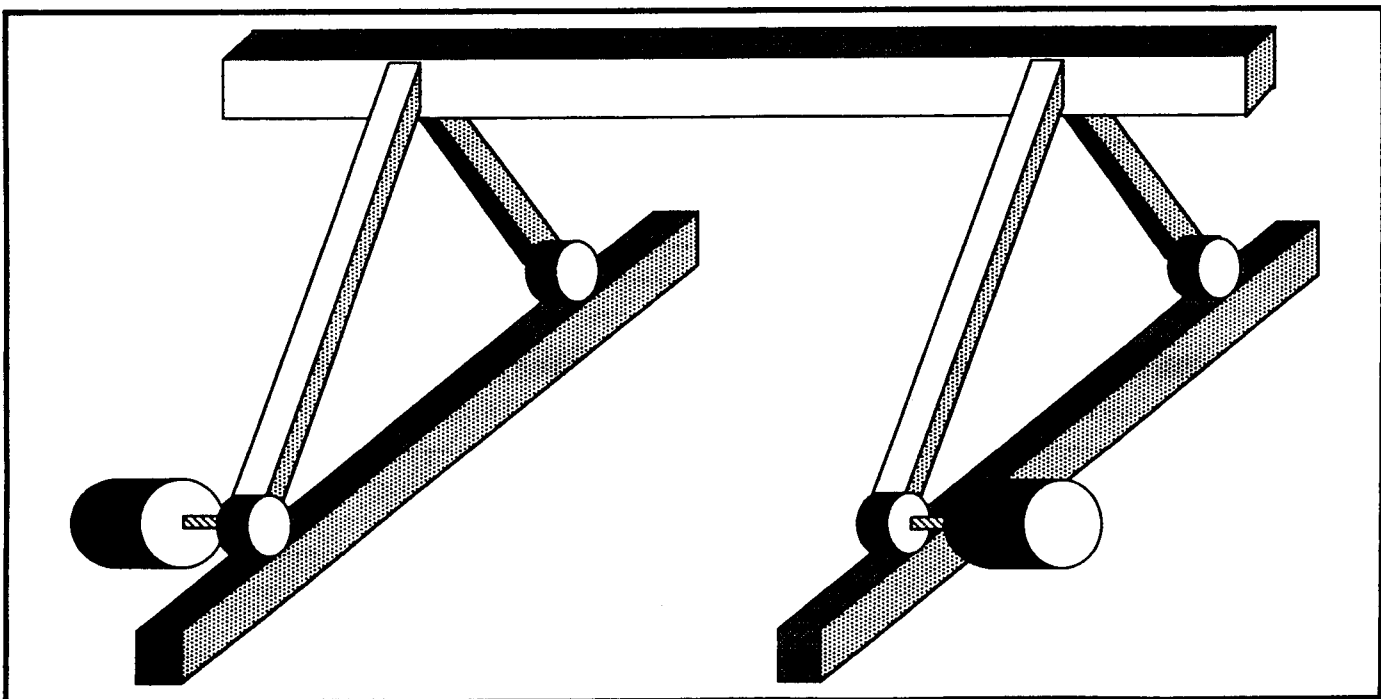
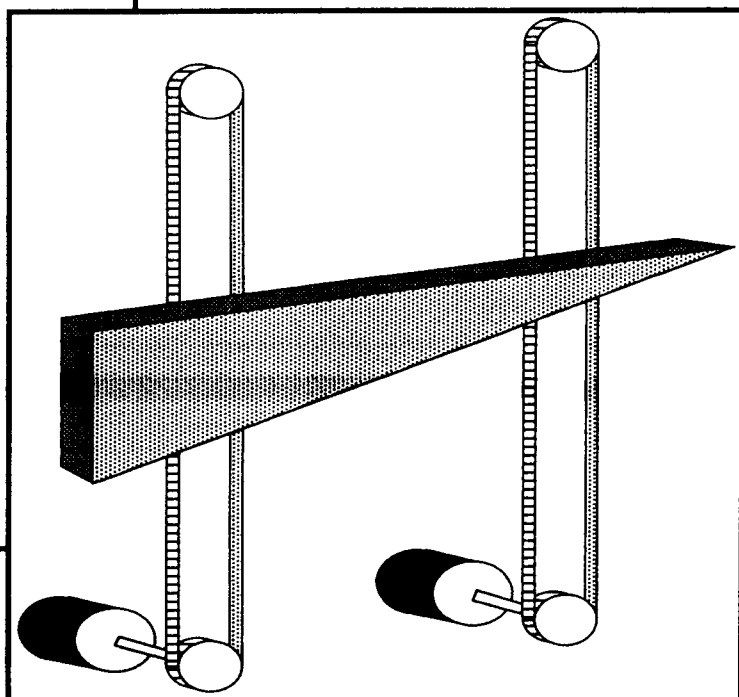
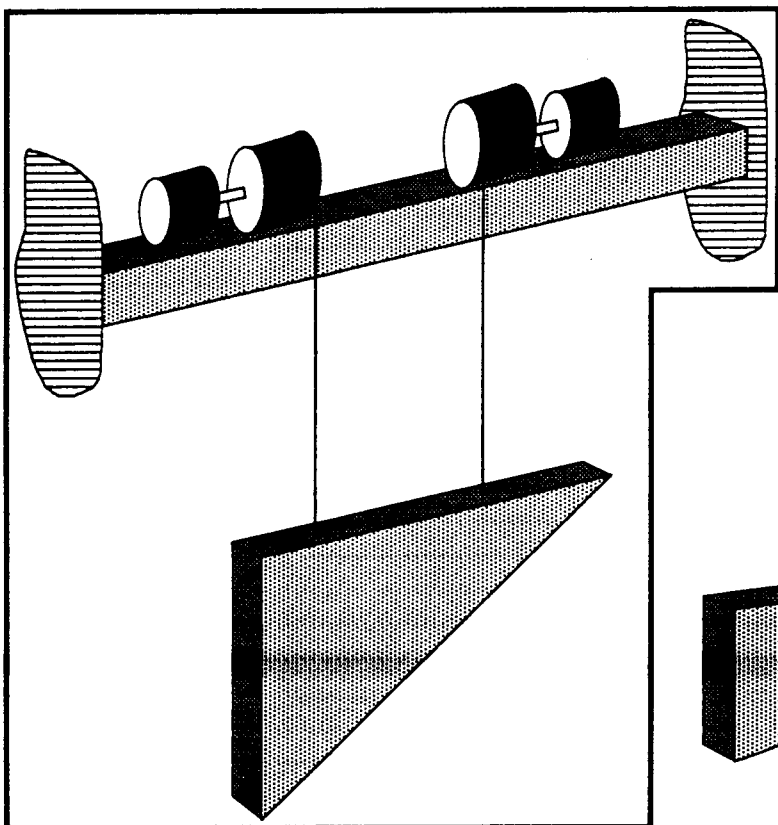
Fonctionnement automatique.
Trajectoires des deux axes
perturbés alternativement.

SCH1 2V 500ms WD T=0k 0215 *1000

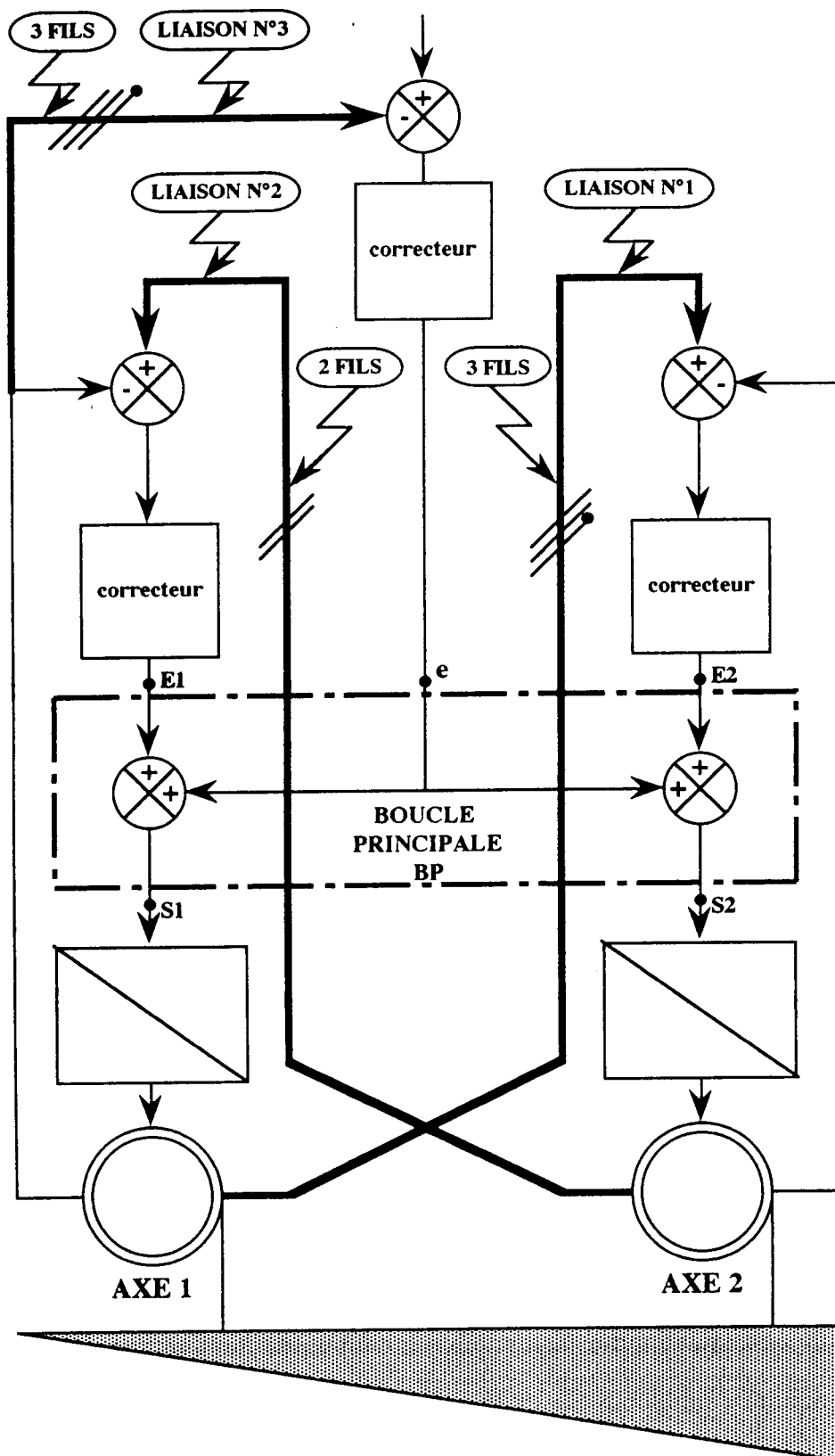


SCH2 2V 500ms 1k

F



ORGANISATION DE LA BOUCLE D'ASSERVISSEMENT :

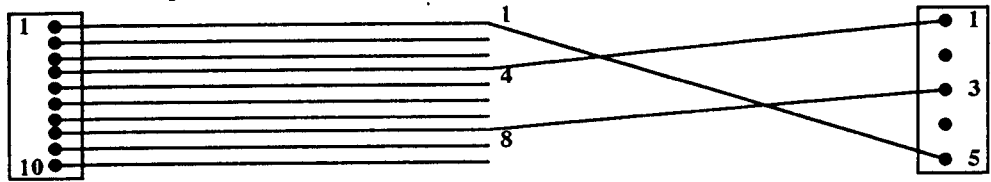


RÉALISATION DES LIAISONS N°1, N°2 & N°3 :

RÉALISATION DES LIAISONS N°1 & N°3 :

connecteur 10 points
identique à celui du
potentiomètre numérique.

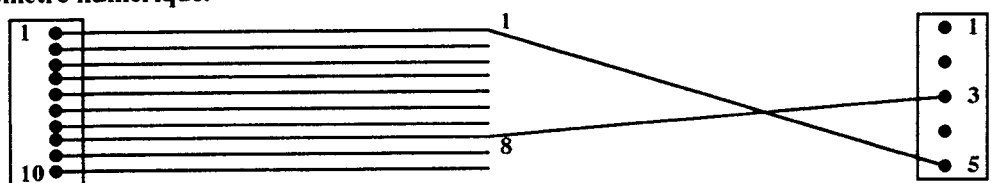
connecteur 5 points
identique à celui du
codeur du moteur.



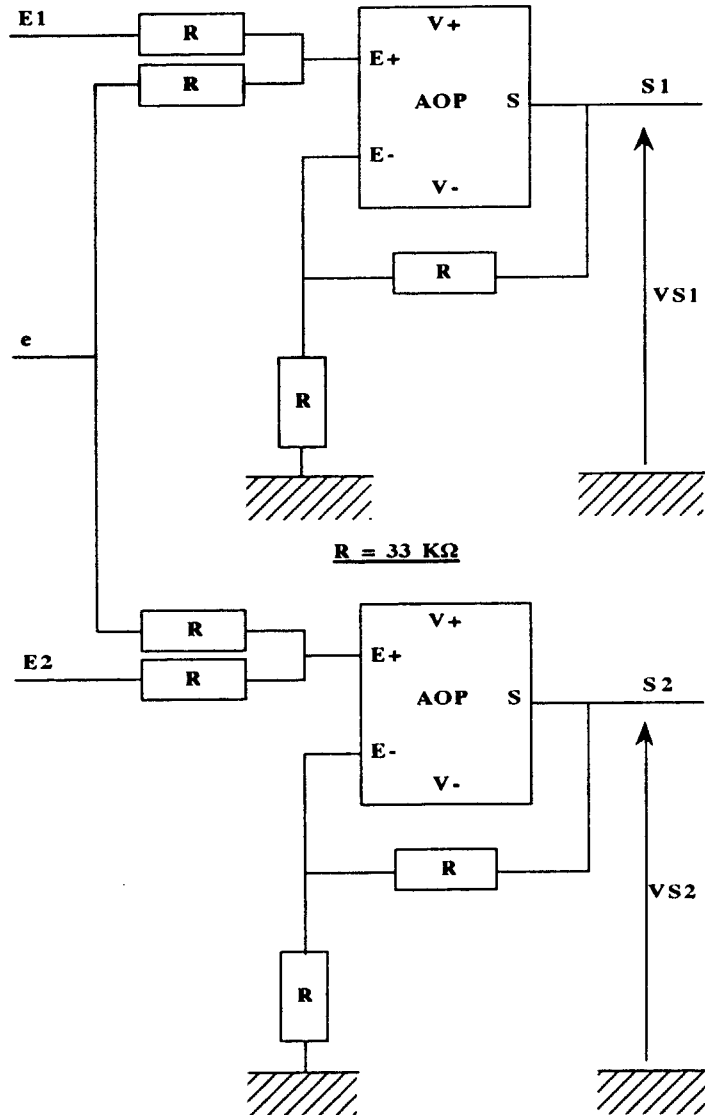
RÉALISATION DE LA LIAISON N°2 :

connecteur 10 points
identique à celui du
potentiomètre numérique.

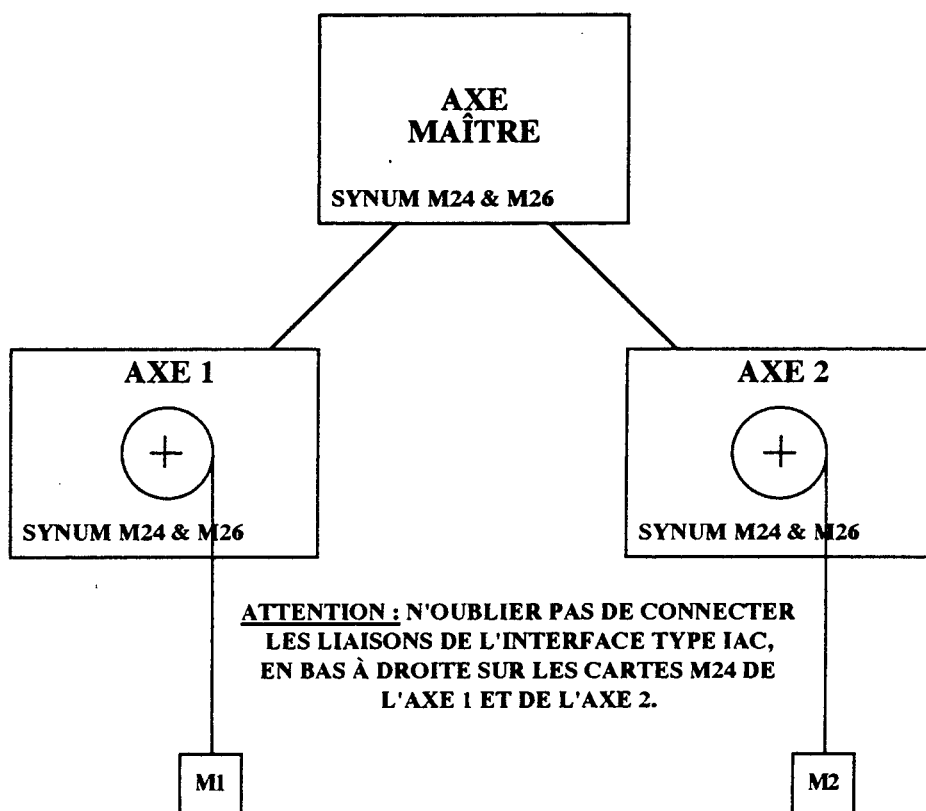
connecteur 5 points
identique à celui du
codeur du moteur.



SCHEMA STRUCTUREL DE LA BOUCLE PRINCIPALE (voir page 2) :



MONTAGE :



AXE 1 ET AXE 2 :

- Sur la carte M26 déconnecter les potentiomètres numériques (CON 3).

LIAISON N°1 (3 fils) :

- Relier le connecteur N°9 (CON 9) de l'axe 1 (carte M26) au connecteur N°4 (CON 4) de l'axe 2 (carte M26).

VÉRIFICATION DE LA LIAISON N°1 (3 fils) :

- Alimenter l'axe 2, entrer en tâche REG, mode position par suivi de consigne.
- Alimenter l'axe 1, tourner son moteur dans le sens horaire, le moteur de l'axe 2 doit suivre dans les mêmes conditions.

LIAISON N°2 (2 fils) :

- Relier le connecteur N°9 (CON 9) de l'axe 2 (carte M26) au connecteur N°4 (CON 4) de l'axe 1 (carte M26).

VÉRIFICATION DE LA LIAISON N°2 (2 fils) :

- Alimenter l'axe 1, entrer en tâche REG, mode position par suivi de consigne.
- Alimenter l'axe 2, tourner son moteur dans le sens horaire, le moteur de l'axe 1 doit suivre dans les mêmes conditions.

LIAISON N°3 (3 fils) :

- Sur la carte M26 de l'axe Maître déconnecter la liaison issue du codeur (CON 8).
- Relier le connecteur N°3 (CON 3) de la carte M26 de l'axe 2 au connecteur N°8 (CON 8) de la carte M26 de l'axe Maître.

VÉRIFICATION DE LA LIAISON N°3 (3 fils) :

- Alimenter les 3 bancs et le montage de la boucle principale. Les tensions -12 v. + 12 v et la masse de cette dernière (BP) sont disponibles sur le connecteur N°2 (CON 2) de la carte M26 de l'axe Maître.
- Sur la carte M24 de l'axe Maître, entrer en tâche PRN, à l'adresse \$08 introduire une consigne positive ou négative, les moteurs des deux axes doivent tourner dans le même sens.

VÉRIFICATION DE L'ENSEMBLE EN FONCTIONNEMENT :

AXE 1 ET AXE 2 :

- Entrer en tâche REG, mode position par suivi de consigne.

AXE MAÎTRE :

- Entrer en tâche REG, mode position par suivi de consigne.
- Tourner le potentiomètre numérique de consigne de l'axe Maître dans un sens ou dans l'autre, les moteurs des axes 1 et axe 2 doivent suivre.

REMARQUE :

Pour obtenir un asservissement :

- de position :

au niveau de l'axe Maître, entrer en tâche REG mode position par suivi de consigne.

- en profil trapézoïdal :

au niveau de l'axe Maître, entrer en mode profil trapézoïdal .

- de vitesse :

au niveau de l'axe Maître, entrer en tâche REG mode vitesse.

LES PLANS D'EXPERIENCES
LES
DEFINITIONS
LES
OUTILS

Jean Filippini
Professeur en génie électrique

et

Pierre Souvay
Professeur en génie mécanique

L.T.R. Epinal

LES PLANS D'EXPERIENCES
LES
DEFINITIONS
LES
OUTILS

Jean Filippini
Professeur en génie électrique

et

Pierre Souvay
Professeur en génie mécanique

L.T.R. Epinal

LES PLANS D'EXPERIENCES.

AVANT PROPOS.

Toute personne ayant un jour saisi un outil pour régler un procédé sait qu'un réglage n'est définitif qu'après plusieurs tentatives.

La méthode des plans d'expériences consiste à organiser la démarche expérimentale et l'analyse décisionnelle en appliquant des règles de calcul statistique qui laissent très peu de place au hasard.

Les domaines d'application de cette méthode sont en particulier,

La conception d'un produit car elle permettent de définir et de dimensionner compte tenu des performances techniques recherchées et des coûts,

La mise au point et le réglage d'un procédé.

La connaissance du comportement d'un procédé.

DEROULEMENT D'UN PLAN.

Le déroulement d'un plan est réglé selon un scénario immuable. Comme l'indique la figure 1, Il débute toujours par une étape de préparation et se termine par un essai de prédiction ou de confirmation.

Les étapes intermédiaires sont :

L'exécution des essais,

Le traitement des résultats,

l'analyse des résultats,

la décision prise pour l'essai de prédiction.

DEROULEMENT D'UN REGLAGE.

Comme le montre la figure 2,

Un réglage est obtenu par l'exécution d'une succession de plans dont les caractéristiques sont redéfinies à chaque boucle.

Un réglage n'est correct que s'il est ROBUSTE. Il convient donc de définir la notion de robustesse.

LA ROBUSTESSE.

Un procédé (produit ou réglage) est qualifié de robuste s'il se comporte comme il est prévu dans le cahier des charges lorsque les conditions non maîtrisables par le concepteur ou le régleur varient dans les fourchettes spécifiées.

pour chaque étape, il existe des outils spécifiques que nous allons découvrir.

SOMMAIRE.

LES OUTILS:

- 1-Les outils de préparation.
 - 1-1 Le diagramme causes, effet.
 - 1-2 Les réponses.
 - 1-3 Les facteurs.
 - 1-4 Les interactions.
 - 1-5 Les tables orthogonales
 - 1-6 Les graphes linéaires.
 - 1-7 les tables de réponses.
- 2-les outils de traitement des résultats.
 - 2-1 Les règles.
 - 2-2 Les moyennes.
 - 2-3 Le choix des moyennes.
 - 2-4 Les calculs.
- 3-Les outils d'analyse et de décision.
 - 3-1 Les influence ou écarts.
 - 3-2 les interactions.
 - 3-3 les prédictions et estimations.
 - 3-4 La table des prédictions.
 - 3-5 Le tableau des prédictions.
- 4-L'essai de prédiction ou de confirmation.
 - 4-1 Les règles.
 - 4-2 Les conséquences.
- 5-Les outils de la robustesse.
 - 5-1 Essais avec répétition.
 - 5-2 Le plan produit.

Annexes

Bibliographie.

Figure 1 : Déroulement d'un plan.

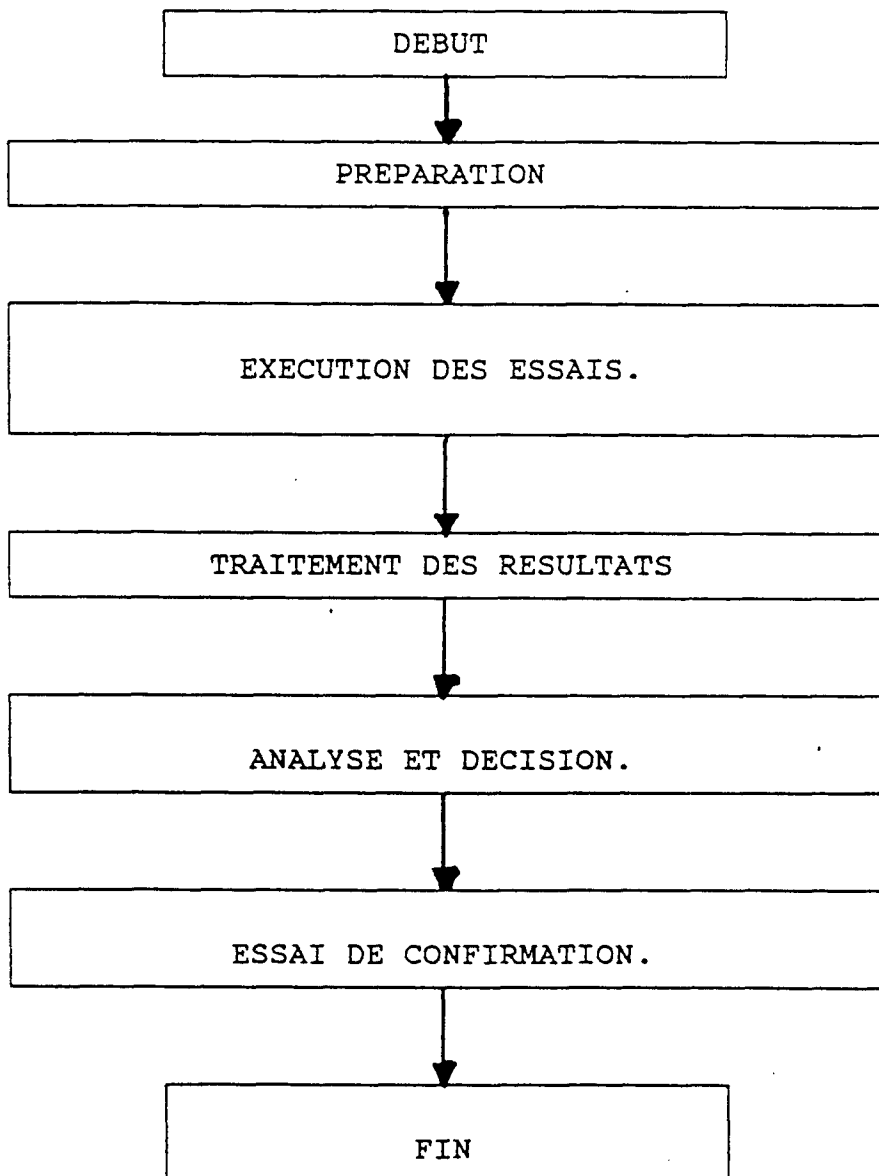
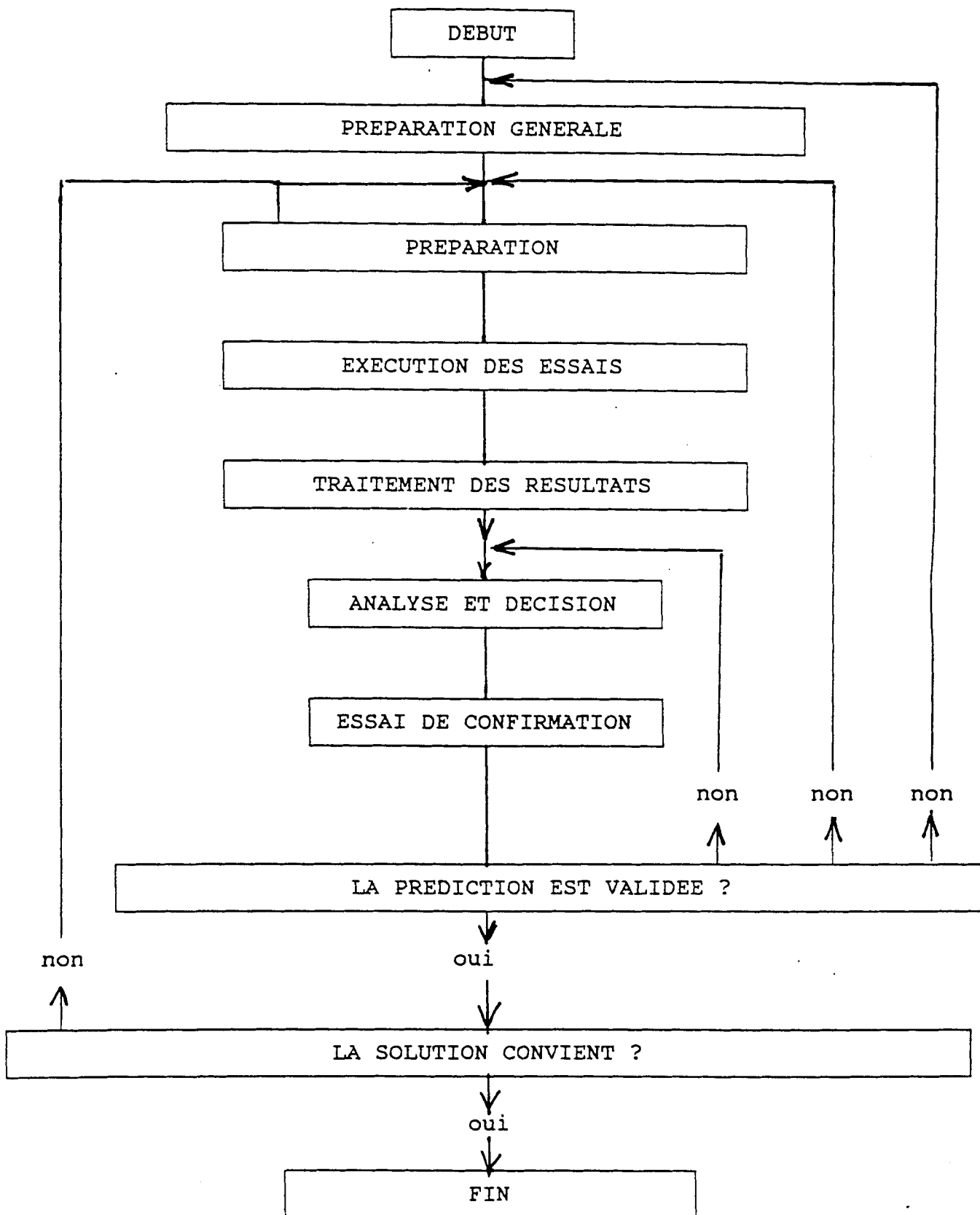


Figure 2: Déroulement d'un réglage.



1-LES OUTILS DE PREPARATION.

1-1 LE DIAGRAMME CAUSES-EFFET.

Il sert lors de l'établissement du contrat comme schéma directeur pour inventorier tous les facteurs susceptibles d'agir sur le comportement du procédé étudié.

Il faut naturellement établir autant de diagrammes qu'il y a de réponses à maîtriser.

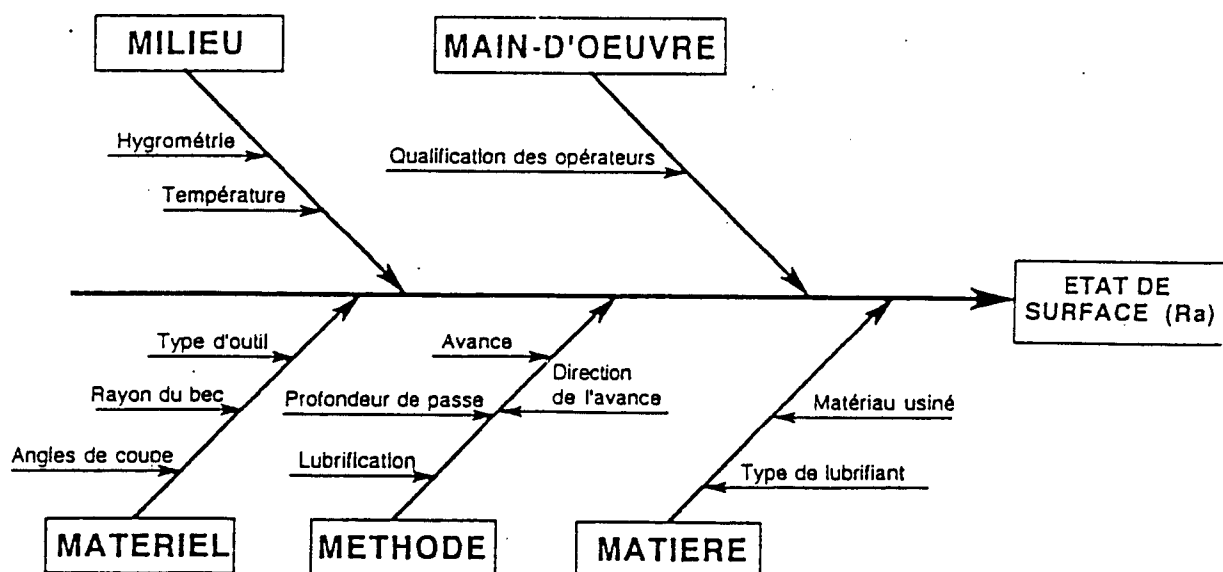


Figure 3 : Diagramme causes-effet.

1-2 LES REPONSES.

On nomme réponse, la valeur du résultat de la grandeur que l'on désire maîtriser.

Il convient lors de la préparation de bien définir ce que l'on veut, c'est à dire la nature de la grandeur à maîtriser et la cible à atteindre. Trois cas peuvent se présenter:

- 1-La cible est une valeur minimale ce qui se traduira par l'expression "Plus c'est petit, mieux c'est.",
- 2-La cible est une valeur maximale qui donne l'expression "Plus c'est grand, mieux c'est."
- 3-La cible est une valeur nominale. Dans ce dernier cas, on peut manipuler une réponse de substitution qui est l'écart par rapport à la cible ce qui nous ramène au premier cas.

1-3 LES FACTEURS.

Ce sont les opérateurs que l'on fera varier au cours de la réalisation du plan. Ils sont de 2 types.

- 1 Les facteurs internes
- 2 Les facteurs externes.

1-Les facteurs internes.

Ce sont des éléments variables dont on a la parfaite maîtrise et pour qui on veut connaître l'influence sur le comportement du procédé en question.

2-Les facteurs externes.

Ce sont des grandeurs dont on n'a pas la maîtrise en cours d'exploitation et de l'influence desquelles on doit s'affranchir.

règle:

Si au cours de l'exécution d'un plan, il est prévu de manipuler simultanément des facteurs internes et externes, il est recommandé d'exécuter un plan produit.

1-4 LES INTERACTIONS.

Ce sont des indicateurs qui découlent de l'analyse des résultats et qui renseignent du degré de dépendance de différents facteurs sur le comportement du procédé.

Exemple:

Pour clarifier la partition énoncée ci dessus.

Cherchons à identifier quelques facteurs qui interviennent dans un transport en commun par autobus sur la durée d'un trajet.

1-Les facteurs internes:

le type de moteur,
La qualité du carburant,
La personnalité du conducteur,
Le prix du billet,
etc...

Il existe bien au sein de l'entreprise quelqu'un qui peut ordonner la modification de ces facteurs.

2-Les facteurs externes:

Les conditions météorologiques, par exemple:

la température ambiante et
l'humidité de l'air.

Le climat social,...

La valeur de ces facteurs ne sont pas du ressort de la compagnie de transport, elle doit "Faire avec".

3-Les interactions

Essayons de prévoir l'action, sur la durée du trajet, de la température de l'air et du degré d'humidité.

l'air est sec, il fait chaud, la durée du trajet est certainement normale.

L'air est sec, il fait froid, la durée de trajet est également normale.

L'air est humide, il fait chaud, cela peut engendrer de la pluie ou du brouillard ce qui implique une réduction réglementaire de la vitesse et donc provoque l'allongement de la durée du trajet.

l'air est humide, il fait froid, l'apparition de verglas est à craindre ce qui entraîne une réduction de la vitesse, probablement une augmentation du nombre de passagers qui préféreront laisser leur véhicule au garage et certainement des encombrements sur les routes.

Ces effets contribuent à l'augmentation de la durée du trajet par réduction de vitesse et par allongement des temps d'arrêt.

On dit qu'il y a interaction entre la température ambiante et le degré d'humidité de l'air sur la durée du trajet parce que c'est la présence simultanée de deux valeurs particulières qui engendre l'effet en chaîne.

REMARQUE:

Une attribution réfléchie des facteurs testés aux colonnes de la table des essais, permet de découvrir l'existence d'une interaction et de quantifier son influence.

1-5 LES TABLES ORTHOGONALES ou TABLES D'ESSAIS.

Ce sont des matrices rectangulaires.

Lorsqu'elles sont vierges, elles permettent l'organisation correcte des essais relatifs au plan.

Lorsqu'elles sont remplies, elles récapitulent tous les essais à exécuter et précisent les valeurs ou les états que devront prendre les différents facteurs qui doivent être testés.

1-Repérage d'une table.

Une table est repérée de la manière suivante

$L \times y(z)$

x: Nombre de lignes,

y: Nombre de niveaux que doit prendre chaque facteur,

z: Nombre de colonnes.

Table L8(2 ⁷)							
Col. N°	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Figure 4: Table L8.2(7) 8 lignes,
7 colonnes,
2 niveaux.

2-Les lignes (x).

Le nombre de lignes représente le nombre STRICT d'essais qu'il faut exécuter pour permettre le traitement des résultats et obtenir des renseignements significatifs.

Le nombre de lignes est lié au nombre de facteurs qui doivent être testés.

3-Les colonnes (z).

Le nombre de colonnes représente le nombre MAXIMUM de facteurs, interactions comprises dont on désire connaître l'influence sur le comportement étudié.

4-Les niveaux (y).

Un niveau est une valeur ou un état particulier que l'on donne à un facteur au cours de l'exécution du plan.

Le nombre de niveaux que prend chaque facteur au cours de la réalisation du plan est généralement de 2 quelques fois de 3. Néanmoins, on peut envisager un nombre quelconque de niveaux. Les y niveaux relatifs à un facteur particulier sont repérés par les indices 1, 2, 3

Ces mêmes indices figurent dans les cellules de la table vierge. Ils précisent pour chaque facteur le niveau auquel ils devra être fixé au cours de chaque essai. Pour les interactions, ils précisent le niveau qui s'y manifeste.

5-Le catalogue de tables.

Les tables les plus courantes sont données en annexe 1. On y trouve des tables à 2 et à 3 niveaux.

1-6 LES TABLES D'INTERACTIONS et les GRAPHES LINEAIRES.

1-Les tables d'interactions.

Elles récapitulent toutes les interactions qui peuvent se manifester deux à deux dans les différentes colonnes. On peut constater que chaque colonne est le siège de plusieurs interactions. Lors des étapes de préparation, il conviendra de tenir compte de ces manifestations.

Col N°	1	2	3	4	5	6	7
(1)		3	2	5	4	7	6
(2)			1	6	7	4	5
(3)				7	6	5	4
(4)					1	2	3
(5)						3	2
(6)							1
(7)							

comment lire dans la table?

figure 5 : interactions dans une table L8.2⁽⁷⁾

comment lire dans la table?

Exemple: L'effet de l'interaction qui peut exister entre le facteur de la colonne 2 et celui attribué à la colonne 5 se manifeste dans la colonne 7.

2-Les graphes linéaires.

Ce sont des graphiques, résultant de l'observation de la table précédente qui permettent de récapituler pour le plan en cours, les attributions aux colonnes des facteurs et des interactions entre ces facteurs compte tenu de leur présumée indépendance.

3-Rôle des tables d'interactions et des graphes linéaires.

Ils servent lors de l'attribution des facteurs aux colonnes: pour tester la présence d'une interaction, pour attribuer à un facteur une colonne insensible aux interactions qui risquent d'exister.

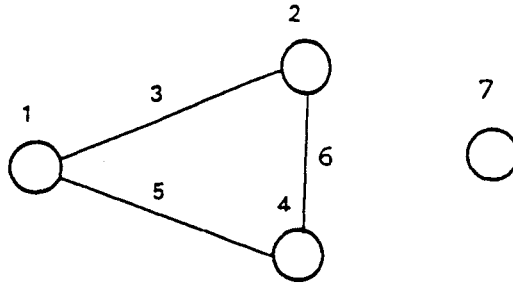


figure 6: graphe linéaire relatif à l'exemple précédent.

le moteur, le carburant, le conducteur occupent les colonnes 1, 2 et 4. Le prix du billet la colonne 7. Nous pouvons présumer que l'action de ce dernier sur la durée du trajet ne dépend pas des précédents facteurs. En conséquence, les colonnes 3, 5 et 6 ne subissent qu'une seule interaction.

1-7 LES TABLES DE REPONSES.

Ce sont des tables dans lesquelles seront consignés les résultats relatifs à chaque essai. Ces tables sont constituées d'autant de colonnes qu'il y a de réponses à noter au cours de chaque essai.

Une réponse est un résultat consécutif à un essai, ce résultat peut être:

Une mesure,

Une observation,

Un calcul.

Au cours de la réalisation d'un plan, le nombre de réponses n'est pas limité.

N° d'essai	FACTEURS							REPONSES	
	1	2	3	4	5	6	7	R1	R2
1	1	1	1	1	1	1	1		
2	1	1	1	2	2	2	2		
3	1	2	2	1	1	2	2		
4	1	2	2	2	2	1	1		
5	2	1	2	1	2	1	2		
6	2	1	2	2	1	2	1		
7	2	2	1	1	2	2	1		
8	2	2	1	2	1	1	2		

figure 7:tableau L8.2(7) avec deux tables de réponses.

Exemple:

On veut améliorer le comportement d'un procédé en agissant sur le dosage ou la provenance de certains facteurs internes.

Ces derniers sont repérés A, B, C, D et E.

Le comportement souhaité est matérialisé par la réponse R. Dans cet exemple, plus R est petit, plus le procédé est bon.

On soupçonne l'existence d'interactions entre les facteurs B et C d'une part et A et C d'autre part.

Au cours de la phase de préparation, compte tenu de l'expérience acquise et des possibilités, nous décidons de réaliser un plan à deux niveaux pour chaque facteur et de leur attribuer les états suivants.

Facteurs	A	B	C	D	E
Niveaux					
Niveau1	54	3	10	60	RG
Niveau2	90	6	20	12	FH

Le facteur E correspond à 2 fournisseurs RG et FH d'un composant.

Choix de la table:

le nombre de facteurs internes à tester est de 5,

le nombre d'interactions à isoler est de 2.

En se reportant à l'annexe 1, on constate que la table de plus petites dimensions qui puisse convenir est une table L8.2⁽⁷⁾, elle permet en 8 essais de tester jusqu'à 7 facteurs. La table sera saturée.

Affectation des facteurs aux colonnes.

L'expérience montre qu'il est fortement conseillé d'effectuer les essais dans l'ordre indiqué. En conséquence, on attribue à la colonne N°1 le facteur dont la modification pose le plus de difficultés. On constate en effet qu'au cours de l'exécution du plan, ce facteur ne sera modifié qu'une seule fois alors que celui affecté à la colonne 5 devra être modifié après chaque essai.

Pour la raison invoquée ci dessus, on affecte la facteur C à la première colonne. Les autres facteurs ne posant pas de problèmes particuliers, nous décidons de régler le cas de l'interaction entre B et C. Pour cela, nous consultons en annexe 1 les graphes linéaires qui nous indiquent que si nous affectons la colonne 3 au facteur B alors, l'interaction entre B et C sera perceptible dans la colonne 2. C'est ce que nous décidons. En suivant une démarche identique, en affectant le facteur A à la colonne 4, son interaction avec C se manifestera dans la colonne 5.

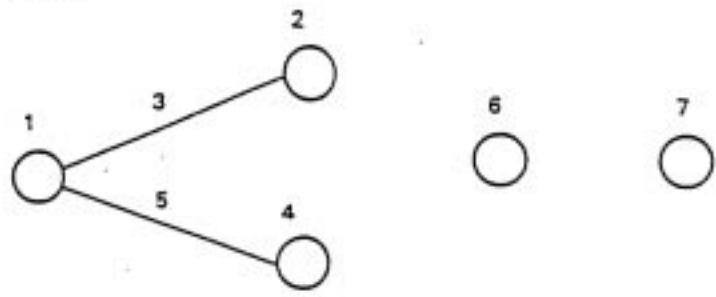


figure 8: graphe linéaire compte tenu des interactions à tester.

Les autres facteurs étant indépendants, les attributions sont:

- colonne 1 : C,
- colonne 2 : B,
- colonne 3 : Interaction B.C,
- colonne 4 : A,
- colonne 5 : Interaction A.C,
- colonne 6 : E,
- colonne 7 : D.

Tableau des essais réalisés.

Les 8 essais sont tous exécutés selon la configuration des facteurs spécifiée par chaque ligne.

facteur	C	B	CB	A	CA	E	D	Réponses R
1	10	3	1	54	1	RG	60	13
2	10	3	1	90	2	FH	120	18
3	10	6	2	54	1	FH	120	25
4	10	6	2	90	2	RG	60	13
5	20	3	2	54	2	RG	120	28
6	20	3	2	90	1	FH	60	23
7	20	6	1	54	2	FH	60	24
8	20	6	1	90	1	RG	120	18
$\bar{R} = 20,25$								

figure 9:Résultats des essais

Par exemple pour l'essai N°4, le facteur C prend la valeur 10, B la valeur 3, A la valeur 90, E est le composant livré par le fournisseur RG. La réponse (résultat) vaut 13. Les résultats relatifs aux essais sont consignés dans la ou les tables des réponses.

Règle:

Il ne faut jamais se contenter d'une réponse obtenue lors de la réalisation d'un plan. Il existe certainement une meilleure solution que l'on pourra découvrir à peu de frais lors de l'analyse des résultats.

2- LES OUTILS DE TRAITEMENT DES RESULTATS.

2-1 LES REGLES.

Chaque réponse est traitée de manière indépendante et spécifique.

Pour chaque réponse, on détermine l'influence de chaque facteur ou l'effet de chaque interaction recherchée.

L'influence d'un facteur est le résultat de la différence de deux moyennes.

Chaque moyenne est effectuée sur x/y valeurs : x est égal au nombre total d'essais et y le nombre de niveaux qui est généralement deux, quelques fois trois.

C'est dans le calcul des moyennes que réside la spécificité du traitement de la réponse.

2-2 LES SORTES DE MOYENNES.

Les plus courantes sont:

- 1- la moyenne arithmétique "MA",
- 2- La moyenne des écarts types "ET",
- 3- la variations quadratique moyenne "VQM" ou pour les nostalgiques, son image le rapport signal sur bruit "S/B":
 $S/B = -10 \log \text{rac}(VQM)$.

2-3 LE CHOIX DE LA MOYENNE.

La moyenne arithmétique "MA" peut être utilisée si les $x/2$ réponses qui entrent dans un calcul sont toutes de même signe. Dans le cas contraire, cet indicateur n'est plus suffisant pour tenir compte de la dispersion.

L'écart type "ET" est utilisé pour tenir compte de la dispersion et si la valeur moyenne des x réponses correspond à la cible.

La variation quadratique moyenne "VQM" est préconisée si on calcule les écarts par rapport à la cible et que l'on veut tenir compte de la dispersion.

Remarque:

Si la moyenne des x réponses est égale à la cible, la VQM est égale au carré de l'écart type.

2-4 LES CALCULS.

Pour une réponse déterminée "R" et pour chaque facteur "Z", on calcule y moyennes (y est égal au nombre de niveaux choisis pour les facteurs).

La nature de la moyenne employée est à définir.

Les résultats sont généralement consignés dans une table appelée table des moyennes.

CAS D'UNE TABLE A DEUX NIVEAUX.(y=2):

Il faut donc calculer 2 moyennes car y=2.

A-La moyenne des niveaux 1 "N1"

c'est la valeur moyenne des x/2 réponses obtenues chaque fois que le facteur en question "Z" à été fixé à son niveau 1.

B-La moyenne des niveaux 2 "N2"

On effectue un calcul analogue au précédent sur les x/2 réponses obtenues chaque fois que le facteur "Z" a été fixé à son niveau 2. Dans cet exemple puisque y=2, les réponses manipulées dans ce calcul, sont toutes celles qui n'ont pas été utilisées lors du calcul de "N1".

facteur	C	B	CB	A	CA	E	D	Réponses, R
1	10	3	1	54	1	RG	60	13
2	10	3	1	90	2	FH	120	18
3	10	6	2	54	1	FH	120	25
4	10	6	2	90	2	RG	60	13
5	20	3	2	54	2	RG	120	28
6	20	3	2	90	1	FH	60	23
7	20	6	1	54	2	FH	60	24
8	20	6	1	90	1	RG	120	18
								$\bar{R} = 20,25$

facteurs	C	B	A	E	D	CB	CA
niveau 1	17,25	20,5	22,5	18	18,25	18,25	19,75
niveau 2	23,25	20	18	22,5	22,25	22,25	20,75

Figure 10: Tableau des moyennes arithmétiques.

les moyennes relatives au tableau de la figure 9 sont consignées dans ce tableau. Pour le facteur E par exemple, la moyenne des niveaux 1 est obtenue en divisant par quatre les réponses des essais N° 1, 4, 5 et 8 Soit $N1(E) = (13+13+28+18)/4 = 18$. Celle des niveaux 2 est obtenue par la même opération sur les réponses des essais 2, 3, 6 et 7 soit $N2(E) = (18+25+23+24)/4 = 22,5$.

CAS D'UNE TABLE A TROIS NIVEAUX. $y=3$.

Il faut dans ce cas calculer 3 moyennes($y=3$)

A-La moyenne des niveaux 1

Obtenue en effectuant la moyenne des $x/3$ réponses obtenues lorsque le facteur est à son niveau 1.

B-La moyenne des niveaux 2

Obtenue en effectuant la moyenne des $X/3$ réponses obtenues lorsque le facteur est à son niveau 2.

C-La moyenne des niveaux 3

Obtenue en effectuant la moyenne des $X/3$ réponses obtenues lorsque le facteur est à son niveau 3.

3-1 LES INFLUENCES ou ECARTS.

On détermine l'influence de chaque facteur et chaque interaction pour chaque réponse envisagée. Les valeurs numériques des influences sont obtenues en effectuant la différence des moyennes.

$$I(A/R)=N2(A)-N1(A)$$

Convention:

lorsque la confusion est impossible, nous décidons de noter A2, la moyenne N2(A) , A1 la moyenne N1(A). En conséquence, l'influence du facteur A sur la réponse R peut s'écrire:

$$I(A/R)= A2-A1$$

Lors d'un plan à deux niveaux , les ECARTS ou INFLUENCES sont généralement calculés et notés dans les tables des moyennes.

facteur	C	B	CB	A	CA	E	D	Réponses R
1	10	3	1	54	1	RG	60	13
2	10	3	1	90	2	FH	120	18
3	10	6	2	54	1	FH	120	25
4	10	6	2	90	2	RG	60	13
5	20	3	2	54	2	RG	120	28
6	20	3	2	90	1	FH	60	23
7	20	6	1	54	2	FH	60	24
8	20	6	1	90	1	RG	120	18
$\bar{R} = 20,25$								

facteurs	C	B	A	E	D	CB	CA
niveau 1	17,25	20,5	22,5	18	18,25	18,25	19,75
niveau 2	23,25	20	18	22,5	22,25	22,25	20,75
écarts	6,05	-0,5	-4,5	4,5	4	4,05	1

Figure 11: Table des influences

L'influence du facteur D sur la réponse R est

$I(D)/R = 22,25 - 18,25 = 4$

Les graphes d'influences.

Ce sont les résultats précédents présentés sous forme de graphes. Les deux ou les trois points (selon que $Y = 2$ ou 3) correspondants aux moyennes calculées sont réunis par des segments de droite.

Le degré d'inclinaison d'un segment manifeste de l'influence du facteur sur la réponse.

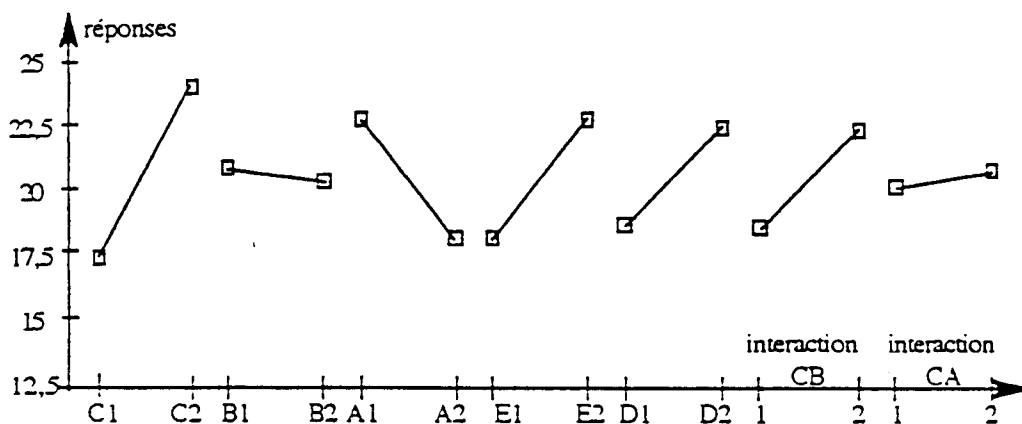


figure 12: Graphe des influences de l'exemple.

La simple observation du graphe montre que le facteur C est le plus influent, le facteur B est presque inefficace, les facteurs A et B produisent des effets contraires...ect.

Il faut toujours avoir à l'esprit que ces constatations ne valent que pour les valeurs choisies pour les facteurs et que les graphes résultent de résultats d'expériences et d'un traitement probabiliste des réponses. Il ne faut donc s'intéresser qu'aux effets les plus significatifs.

Nota:

En cas de difficulté, le test de FISCHER permet d'identifier les effets significatifs.

3-2 LES INTERACTIONS.

Les colonnes sujettes à interactions subissent le même traitement que les facteurs et sont également représentées par des graphes.

analyse d'une interaction.

Plus la pente du segment représentative de l'interaction est importante, plus elle est active.

Nota:

En terme de probabilité, il est préférable de remplacer les mots "effet important, actif etc..." par "effet significatif".

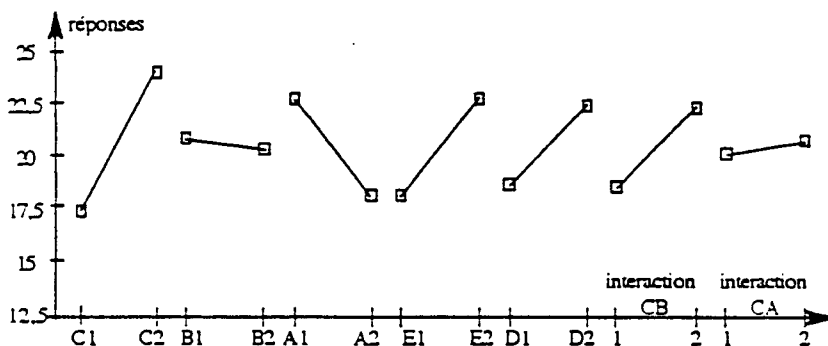
Recherche de la combinaison des facteurs appropriée.

Lorsque une interaction est influente, on peut rechercher la solution la plus adaptée grâce à l'analyse des résultats. On compare alors les moyennes respectives dues à des couples de niveaux identiques des facteurs en présence. Pour une table à deux niveaux, chaque moyenne est calculée à propos de $x/4$ réponses pour lesquelles les facteurs en question prennent toujours les mêmes niveaux.

Nous allons traiter l'exemple d'une interaction significative et d'une interaction non significative.

Exemple d'une interaction significative.

A l'observation du graphe des influences, on remarque que le facteur B semble inefficace mais qu'il existe une forte interaction entre les facteurs B et C sur la réponse R, ce qui prouve que l'effet produit par B a été en moyenne annulé par la manipulation de C et vice versa.



Recherche de la meilleure des combinaisons de facteurs B et C .

Il faut établir la table des moyennes de l'interaction BC et tracer les graphes associés.

Calcul des moyennes.

Exemple calcul pour B2.C1

$$B2.C1 = (25+18)/2 = 19$$

facteur	C	B	CB	A	CA	E	D	Réponses R
1	10	3	1	54	1	RG	60	13
2	10	3	1	90	2	FH	120	18
3	10	6	2	54	1	FH	120	25
4	10	6	2	90	2	RG	60	13
5	20	3	2	54	2	RG	120	28
6	20	3	2	90	1	FH	60	23
7	20	6	1	54	2	FH	60	24
8	20	6	1	90	1	RG	120	18
								$\bar{R} = 20,25$

Les quatre moyennes correspondent aux couples de niveaux des facteurs en présence sont:

Moyenne des réponses pour la combinaison B1,C1 : $B1.C1 = 15,5$

Moyenne des réponses pour la combinaison B1,C2 : $B1.C2 = 25,5$

Moyenne des réponses pour la combinaison B2,C1 : $B2.C1 = 19$

Moyenne des réponses pour la combinaison B2,C2 : $B2.C2 = 21$

J.Filippini/P.Souvay.PPlans d'expérience:Les outils.

Les moyennes calculées sont représentées sous forme graphique par deux segments de droites avec en abscisse la réponse et en ordonnée l'un des facteurs, l'autre facteur faisant office de paramètre.

Table des réponses
de l'interaction CB

		C	
		Niv. 1	Niv. 2
B	1	15,5	25,5
	2	19	21

Graphe des réponses de l'interaction CB

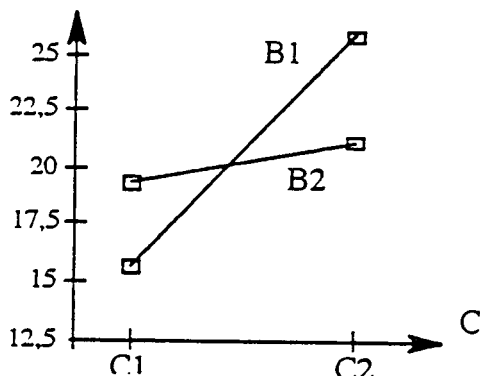


figure Table et graphes de l'interaction B.C

on constate que les deux segments se croisent franchement, ce qui est le signe de l'influence importante de l'interaction étudiée. Il faut bien noter la manifestation de l'interaction est caractérisé par le croisement des droites supports des segments et non pas uniquement des segments d'où la règle: Une interaction significative est représentée par le non parallélisme très marqué des segments.

Exemple d'une interaction non significative.

L'observation du graphe des influences montre que le segment représentatif de l'interaction CA est très peu incliné ce qui semble prouver qu'il n'y a pas interaction entre les facteurs A et C sur la réponse considérée.

Pour satisfaire notre curiosité, effectuons des calculs comparables aux précédents.

Calcul des moyennes.

Exemple de calcul pour A1.C2

$$A1.C2 = (28 + 24)/2 = 26$$

facteur	C	B	CB	A	CA	E	D	Réponses R
1	10	3	1	54	1	RG	60	13
2	10	3	1	90	2	FH	120	18
3	10	6	2	54	1	FH	120	25
4	10	6	2	90	2	RG	60	13
5	20	3	2	54	2	RG	120	28
6	20	3	2	90	1	FH	60	23
7	20	6	1	54	2	FH	60	24
8	20	6	1	90	1	RG	120	18
								$\bar{R} = 20,25$

Les quatre moyennes correspondent aux couples de niveaux des facteurs en présence sont:

Moyenne des réponses pour la combinaison A1,C1 : $A1.C1 = 19$

Moyenne des réponses pour la combinaison A1,C2 : $A1.C2 = 26$

Moyenne des réponses pour la combinaison A2,C1 : $A2.C1 = 15,5$

Moyenne des réponses pour la combinaison A2,C2 : $A2.C2 = 20,5$

Représentation graphique et tableau.

Les moyennes calculées sont représentées sous forme graphique par deux segments de droites avec en abscisse la réponse et en ordonnée l'un des facteurs, l'autre facteur faisant office de paramètre.

Table et graphes de l'interaction AC

Table des réponses de l'interaction CA

		C	
A	Niv.	1	2
A	1	19	26
	2	15,5	20,5

Graphe des réponses de l'interaction CA

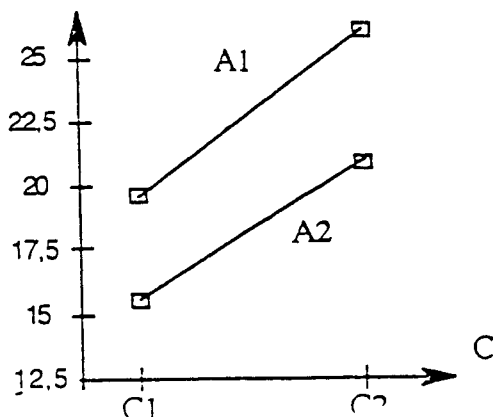


Figure 14: Tables de réponses et graphes de l'interaction "BC"

Comme on pouvait s'y attendre, les segments représentatifs de cette interaction sont presque parallèles, ce qui indique que celle ci n'est pas significative.

1-prédiction d'une réponse.

On nomme prédiction, la réponse calculée pour une configuration quelconque prise parmi les "Nc" possibles.

Soit "f" le nombre de facteurs en jeu dans l'exécution d'un plan à "y" niveaux. Le nombre "Nc" de combinaisons possibles est de "y" à la puissance "f". Le nombre de combinaisons testées est égal à "x" fixé par le nombre de lignes de la table.

$$Nc = y^f$$

2-estimation d'une réponse.

On nomme estimation, la réponse calculée pour une configuration autre que les "Nc" possibles.

Lorsque les réponses obtenues lors de l'exécution d'un plan sont différentes du comportement attendu, on peut estimer la réponse de l'équipement pour des valeurs voisines des niveaux testés par interpolation linéaire.

Cette estimation repose sur l'hypothèse de linéarité des influences à proximité des niveaux testés.

Dans tous les cas, prédictions ou estimations seront vérifiées par un essai.

3-Calcul d'une prédiction

la prédiction d'une réponse est obtenue par la relation suivante

$$R_p = R_{moy} + \text{Somme des effets significatifs des facteurs et des interactions.}$$

nota:

Un effet significatif peut être déterminé soit par l'observation des graphes, soit par le test de Fischer Snédécour. Le résultat du test peut se résumer de cette manière: L'influence d'un facteur est significative si le résultat "F" du test de FISCHER est supérieur au nombre figurant dans la table à 5%.

4-Effet d'un facteur.

Pour une réponse "R" L'effet "E" d'un facteur "Z" lorsqu'il est à son niveau "a" est obtenu de la manière suivante

$$E(Za) = Za - R_{moy}$$

Exemple:

L'effet du facteur A lorsqu'il prend son niveau 2 vaut:

$$E(A2) = A2 - R_{moy}$$

$$\text{valeur chiffrée} \quad 18 - 20,25 = -2,25$$

5-Effet d'une interaction.

L'effet "E(Za.Wb)" d'une interaction sur la réponse "R" entre les facteurs "Z" au niveau "a" et "W" au niveau "b" est obtenu de la manière suivante:

$$E(Za.Wb)/R = [(Za.Wb - R_{moy}) - (Za - R_{moy}) - (Wb - R_{moy})]$$

Cette expression forme un ensemble immuable.

Exemple :

recherchons l'effet de l'interaction entre B et C sur la réponse R lorsque B est à son niveau 1 et C à son niveau 2.

$$B1.C2 = 25,5$$

$$B1 = 20,5$$

$$C2 = 23,5$$

$$R_{moy} = 20,25$$

$$E(B1.C2) = (B1.C2 - R_{moy}) - (B1 - R_{moy}) - (C2 - R_{moy})$$

$$E(B1.C2) = (25,5 - 20,25) - (20,5 - 20,25) - (23,5 - 20,25) = 2$$

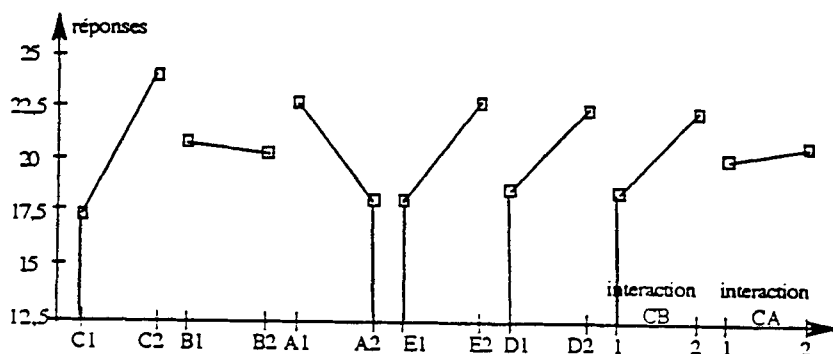
5-Recherche d'un maximum ou d'un minimum.

Remarque:

Lorsqu'il n'y a pas de contradiction entre les niveaux à choisir pour deux facteurs et la représentation de leur interaction dans le graphe des influences, il suffit d'effectuer le calcul directement en traitant l'interaction comme un facteur ordinaire.

6-recherche de la réponse minimale.

La recherche d'une valeur minimale est très souvent obtenue par l'observation du graphe des influences. Ce minimum est obtenu lorsque tous les facteurs significatifs produisent leur effet minimum.



L'observation du graphe des influences montre que le minimum est obtenu pour : C=C1=10, B=B1=3, A=A2=90, D=D1=60 et E=E1 soit la pièce du fournisseur 1.

Ce qui donne :

$$R_{\min} = R_{\text{moy}} + E(C1) + E(B1) + E(C1.B1) + E(A2) + E(C1.A2) + E(D1) + E(E1).$$

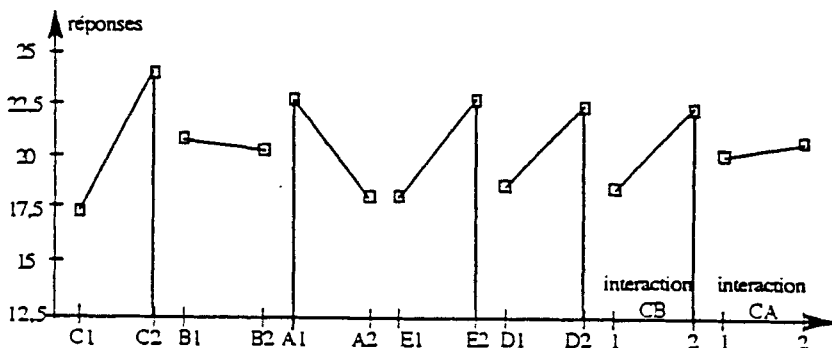
Soit en négligeant les effets de l'interaction C.A et du facteur B tous deux non significatifs.

$$R_{\min} = 20,25 - 3 + (-4,75 + 3 - 0,25) - 2,25 - 2,25 - 2 = 8,75$$

La Réponse prédite est: $R_{\min} = 8,75$

7-Recherche de la réponse maximale.

L'observation du graphe des influences montre que le minimum est obtenu pour : C=C2=20, B=B1=3, A=A1=54, D=D2=120 et E=E2 soit la pièce du fournisseur 2.



$$R_{\max} = R_{\text{moy}} + E(C2) + E(B1) + E(C2.B1) + E(A1) + E(C2.A1) + E(E2) + E(D2).$$

Ce qui donne en négligeant toujours l'effet de l'interaction C. et le facteur B.

$$R_{\max} = 20,25 + 3 + (5,25 + 3 - 0,25) + 2,25 + 2,25 + 2 = 31,75$$

La Réponse prédite est: $R_{\max} = 31,75$

3-~~Y~~ LA TABLE DES PREDICTIONS.

Lorsque la cible est autre qu'un minimum ou, un maximum, on peut éprouver le besoin de connaître les réponses de toutes les combinaisons.

le nombre "Nc" de combinaisons des "f" facteurs ($f \leq Z$) testés lors d'un plan L X.Y(Z) est de "f" à la puissance "Y" alors que le nombre d'essais exécutés n'est que de "X".
On calcule alors toutes les réponses possibles que l'on regroupe sous le nom de Table des prédictions.

C	B	CB	A	CA	E	D	Réponses
C1	B1	C1B1	A1	C1A1	E1	D1	13,25
C1	B1	C1B1	A1	C1A1	E1	D2	17,25
C1	B1	C1B1	A1	C1A1	E2	D1	17,75
C1	B1	C1B1	A1	C1A1	E2	D2	21,75
C1	B1	C1B1	A2	C1A2	E1	D1	8,75
C1	B1	C1B1	A2	C1A2	E1	D2	12,75
C1	B1	C1B1	A2	C1A2	E2	D1	13,25
C1	B1	C1B1	A2	C1A2	E2	D2	17,25
C1	B2	C1B2	A1	C1A1	E1	D1	17,25
C1	B2	C1B2	A1	C1A1	E1	D2	21,25
C1	B2	C1B2	A1	C1A1	E2	D1	21,75
C1	B2	C1B2	A1	C1A1	E2	D2	25,75
C1	B2	C1B2	A2	C1A2	E1	D1	12,75
C1	B2	C1B2	A2	C1A2	E1	D2	16,75
C1	B2	C1B2	A2	C1A2	E2	D1	17,25
C1	B2	C1B2	A2	C1A2	E2	D2	21,25
C2	B1	C2B1	A1	C2A1	E1	D1	23,25
C2	B1	C2B1	A1	C2A1	E1	D2	27,25
C2	B1	C2B1	A1	C2A1	E2	D1	27,75
C2	B1	C2B1	A1	C2A1	E2	D2	31,75
C2	B1	C2B1	A2	C2A2	E1	D1	18,75
C2	B1	C2B1	A2	C2A2	E1	D2	22,75
C2	B1	C2B1	A2	C2A2	E2	D1	23,25
C2	B1	C2B1	A2	C2A2	E2	D2	27,25
C2	B2	C2B2	A1	C2A1	E1	D1	19,25
C2	B2	C2B2	A1	C2A1	E1	D2	23,25
C2	B2	C2B2	A1	C2A1	E2	D1	23,75
C2	B2	C2B2	A1	C2A1	E2	D2	27,75
C2	B2	C2B2	A2	C2A2	E1	D1	14,75
C2	B2	C2B2	A2	C2A2	E1	D2	18,75
C2	B2	C2B2	A2	C2A2	E2	D1	19,25
C2	B2	C2B2	A2	C2A2	E2	D2	23,25

figure 15: Table des prédictions de l'exemple.

Il ne faut pas s'étonner de trouver quelques différences entre les résultats expérimentaux et les réponses prédites pour la même combinaison de facteurs car il s'agit d'un calcul probabiliste qui néglige les effets non significatifs.

1-Recherche d'une valeur nominale.

On recherche la valeur la plus proche de la cible qui est 20.
On constate que le résultat le plus proche de la cible est 19,25 et que ce résultat peut être obtenu soit avec le composant RG et les réglages c2, b2, a1, d1, soit avec le composant FH et les réglages c2, b2, a2, d1.
Ces deux réponses ne sont que des prédictions, il faut donc faire un essai de confirmation.

3-2 LE TABLEAU DES PREDICTIONS.

On l'utilise lorsque l'on recherche un réglage qui ne figure pas dans les Nc combinaisons

C'est une représentation du type tableau de karnaugh des Nc combinaisons possibles qui permet de découvrir une zone dans laquelle le compromis semble possible ou qui présente pour les réponses traitées un puits de bonnes conditions.

exemple: on désire atteindre la cible 20 avec le moins de modification possible par rapport à une combinaison.

			C1	C1	C2	C2
			B1	B2	B2	B1
RG	A1	D1	13,25	17,25	19,25	23,25
RG	A1	D2	17,25	21,25	23,25	27,25
RG	A2	D2	12,75	16,75	18,75	22,75
RG	A2	D1	8,75	12,75	14,75	18,75

Dans ce tableau, à partir de la réponse entourée, il suffit d'une petite variation de B2 vers B1 ou de D1 vers D2 pour atteindre la cible.

FH	A2	D1	17,75	21,75	23,75	27,75
FH	A2	D2	21,75	25,75	27,75	21,75
FH	A1	D2	17,25	21,25	23,25	27,25
FH	A1	D1	13,25	17,25	19,25	23,25

Dans ce tableau, à partir de la réponse 19,5, on atteint la cible par une petite variation de D1 vers D2 ou de B2 vers B1 ou A1 vers A2.

Nota: Avant de procéder à une estimation de ce type, il est prudent de réaliser un essai de confirmation de la combinaison des facteurs, origine de l'estimation.

4-L'ESSAI DE PREDICTION.

S'agissant de la recherche expérimentale d'un état satisfaisant, Il y a peu de chances que dans les combinaisons testées figure l'optimum. En conséquence, on peut toujours améliorer à bon compte la meilleure des réponses obtenues, ce qui conduit à éditer la règle suivante:

4-1-Règle:

Un plan n'est terminé que si les X essais du tableau sont suivis d'une analyse des résultats et d'un essai de prédiction.

4-2-Conséquences de l'essai de prédiction.

A la suite d'un essai de prédiction, il faut poser la question:

Le résultat obtenu confirme t'il la prédiction.

1-la réponse est "non"

alors, on peut dénombrer les causes classiques qui sont:

- L'existence d'une interaction qui n'a pas été prise en compte
- la précipitation et le peu d'importance que l'on accorde aux étapes de préparation et d'analyse.

Il faut revoir dans l'ordre:

- L'analyse,
- la préparation du plan,
- le cahier des charges.

2-la réponse est "oui"

-Si la réponse obtenue convient, le réglage est terminé.

-Si la réponse obtenue bien qu'elle soit améliorée n'est pas conforme au but recherché, il faut alors s'orienter vers la réalisation d'un nouveau plan de dimensions plus petites.

Pour cela, il faut d'une part retirer du plan les facteurs dont l'influence est non significative et d'autre part hiérarchiser les facteurs retenus afin de leur fixer des écarts de niveaux leur permettant d'agir sur les réponses de manière comparables.

3-Hiérarchisation et test influence.

La hiérarchisation est effectuée en observant le graphe des influences. La mise à l'écart des facteurs non significatifs est généralement obtenue de la même manière. En cas de difficulté, l'outil statistique permettant de chiffrer le degré d'influence est le test du "F" de Fischer.

Calcul du "F" de Fischer.

Soit à calculer Le "F" de l'efficacité probable d'un facteur à la suite de la réalisation d'un plan avec une table $Lx.y^{(z)}$.

Il faut quantifier les grandeurs suivantes:

1-La S omme "S" des "x" réponses

$$S = (R_1 + R_2 + + + R_x)$$

2-Les "y" sommes S_1, S_2, S_3 des réponses relatives à chaque niveaux pris par le facteur en question.

3-La R éponse Q uadratique M oyenne "RQM"

$$RQM = S^2 / x$$

4-La R éponse Q uadratique I nterniveaux._"RQI"

$$RQI = y/x (S_1^2 + S_2^2 + S_3^2)$$

5-La S omme Q uadratique des R éponses."SQR"

$$SQR = (R_1^2 + R_2^2 + + + R_x^2)$$

On calcule alors les S ommes des_E carts des C arrés:

$$SCEa = RQI - RQM$$

$$SCEr = SQR - RQI$$

Les D egrés d e l iberté Ddl:

$$Ddl I = (y-1) \text{ et } Ddl J = (x-y)$$

Les C arrés m oyens C_m :

$$Cma = SCEa/I \text{ et } Cmr = SCEr/J.$$

Le F de Fischer Observé Fobs:

$$Fobs = Cma/Cmr$$

On compare le Fobs aux valeurs des F tabulés correspondants à la table des essais.

La probabilité d'efficacité du facteur est celle de la colonne tabulée si le Fobs est supérieur ou égal au F tabulé.

5- LES OUTILS DE LA ROBUSTESSE.

Un réglage est qualifié de robuste lorsqu'il se comporte comme prévu par le cahier des charges dans une ambiance précisée. Cette dernière peut être précisée soit par un certain nombre de facteurs externes connus et maîtrisables lors de l'exécution des essais, soit par une série de facteurs externes inconnus et par conséquent non maîtrisables.

Il résulte que, lorsque le procédé à régler est soumis à des influences de facteurs externes, la question à poser est: Lors des essais, pourrions-nous reproduire et maîtriser ces variations ?. De la réponse à cette question dépend la démarche des essais.

5-1 on ne peut pas maîtriser les facteurs externes.

Essais avec répétitions.

On réalise plusieurs fois la même série d'essais concernant les niveaux des facteurs internes à des instants différents.

La répétition des essais permet d'obtenir des réponses influencées différemment par les facteurs externes et de disposer d'un indice de dispersion dû précisément aux facteurs non maîtrisés.

Le calcul du "VQM" variation quadratique moyenne ou du rapport "S/B" signal sur bruit sont les moyens qui permettent le mieux de mettre en évidence la dispersion qui est la manifestation de la variation d'un facteur aléatoire.

Le choix de la solution robuste est effectuée comme pour un plan ordinaire à partir du graphe des influence tracé à propos des "VQM" et accessoirement des moyennes "MA" arithmétiques.

N°	1	2	3	réponses				\bar{y}	σ^2	S/B
	A	B	AB							
1	1	1	1	→ y11	y12	y13	y14			
2	1	2	2	→ y21	y22	y23	y24			
3	2	1	2	→ y31	y32	y33	y34			
4	2	2	1	→ y41	y42	y43	y44			

figure 14: Tableau d'essais avec répétition.

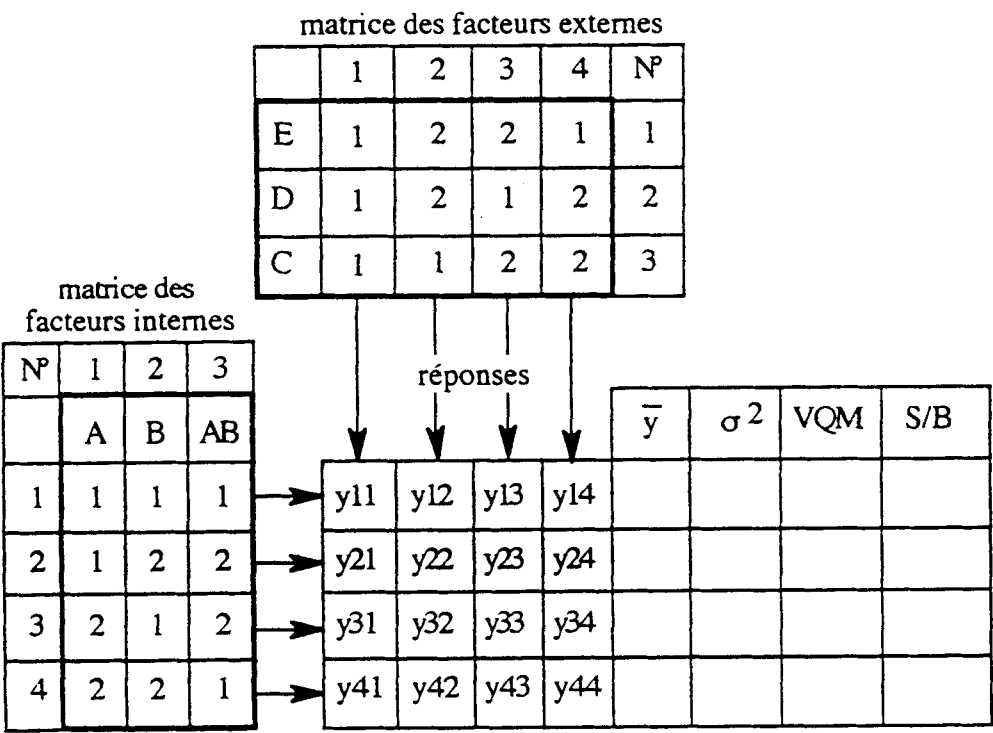
5-2 on peut maîtriser les facteurs externes.

1-règle:

Il faut éviter de faire coexister dans une même table des facteurs internes et des facteurs externes.

2-Le plan produit ou plans croisés.

Le plan proposé est constitué de 2 tables rectangulaires dont les dimensions sont adaptées pour l'une au nombre de facteurs internes (facteurs et interactions) et pour l'autre au nombre de facteurs externes. voir en annexe 2.
Le nombre d'essais est égal au produit du nombre de lignes de chaque table.
Pour chaque combinaison d'une table, on réalise tous les essais prévus par l'autre table.



- \bar{y} = moyenne des réponses,
- σ^2 = variance des réponses,
- VQM = variation quadratique moyenne des réponses,
- S/B = signal sur bruit des réponses au sens de la méthode des plans d'expériences de Taguchi.

Figure 15: Plans croisés.

3-Traitement des résultats.

la moyenne la plus significative est la "VQM" ou le rapport "S/B"

On calcule la "VQM" sur les résultats relatifs à une configuration des facteurs internes.

Les résultats obtenus sont ensuite traités comme ceux d'un plan ordinaire.

les calculs sont généralement réalisés à propos des facteurs internes mais rien n'empêche de rechercher les influences des facteurs externes.

les interactions entre facteurs de même type sont calculées comme dans le cas d'un plan simple.

les interactions entre facteurs internes et externes sont calculées de la manière suivante.

4-Interaction entre un facteur interne et un facteur externe.

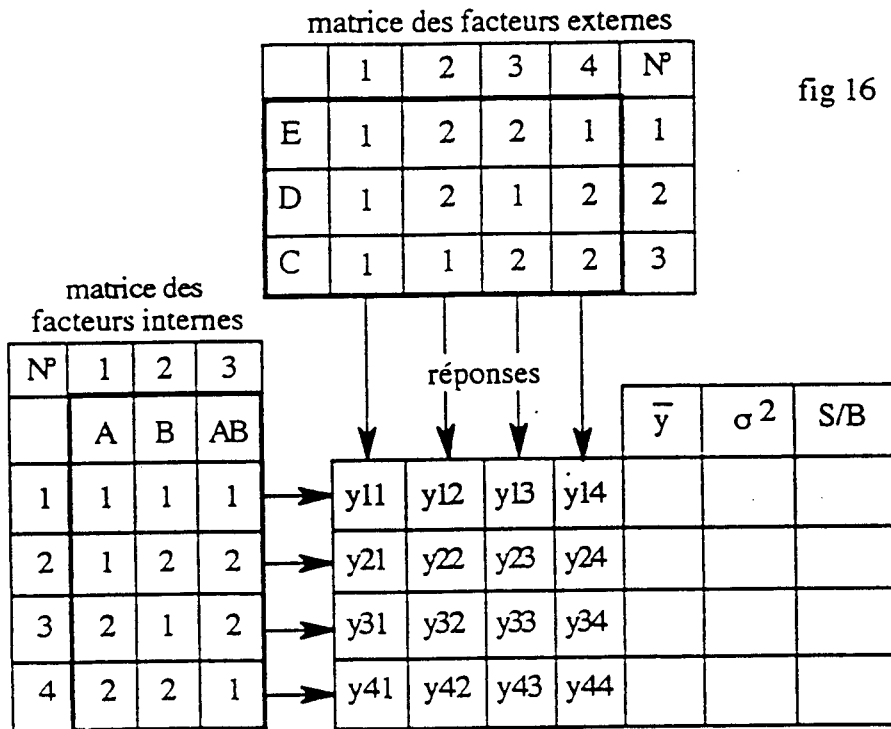


fig 16

Comme dans le cas de plans simples, on calcule les moyennes des couple de niveaux identiques pour les facteurs impliqués.

La moyenne des niveaux pour B1 et D1: $B1.D1 = (Y11 + Y13 + Y31 + Y33) / 4$

La moyenne des niveaux pour B1 et D2: $B1.D2 = (Y22 + Y24 + Y42 + Y44) / 4$

La moyenne des niveaux pour B2 et D2: $B2.D2 = (Y12 + Y14 + Y32 + Y34) / 4$

La moyenne des niveaux pour B2 et D1: $B2.D1 = (Y21 + Y23 + Y41 + Y43) / 4$

Le niveau 1 de l'interaction vaut: $I1 = (B1.D1 + B2.D2) / 2$

Le niveau 2 de l'interaction vaut: $I2 = (B1.D2 + B2.D1) / 2$

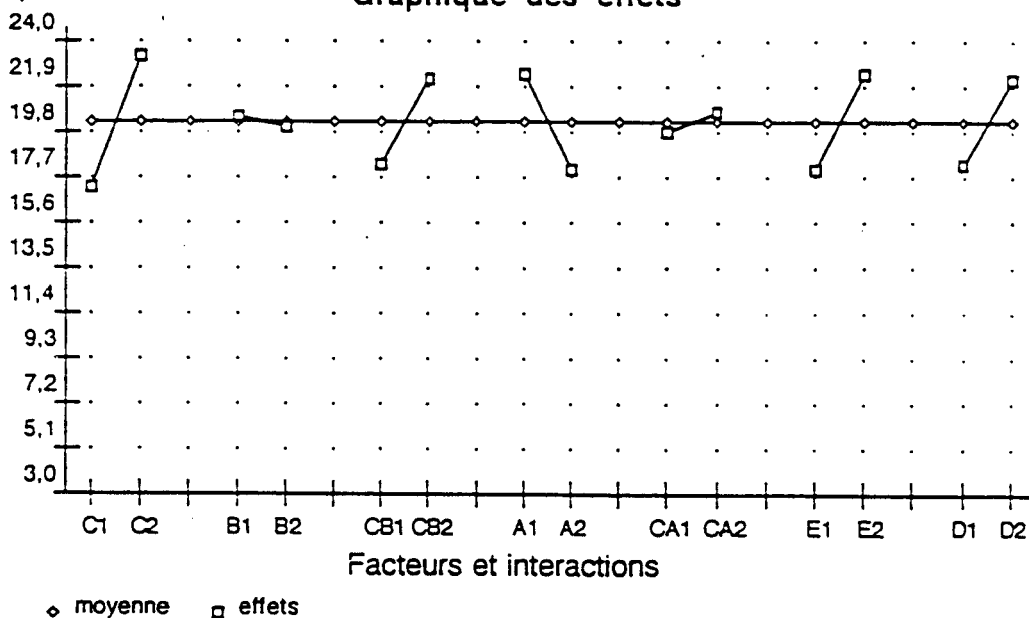
Traitement informatique de l'essai effectué dans le texte du cours

N° essai	C	B	CB	A	CA	E	D	Réponses
1	10	3	1	54	1	FG	60	13
2	10	3	1	90	2	FH	120	18
3	10	6	2	54	1	FH	120	25
4	10	6	2	90	2	FG	60	13
5	20	3	2	54	2	FG	120	28
6	20	3	2	90	1	FH	60	23
7	20	6	1	54	2	FH	60	24
8	20	6	1	90	1	FG	120	18
Analyse réponses				moyennes				20,25

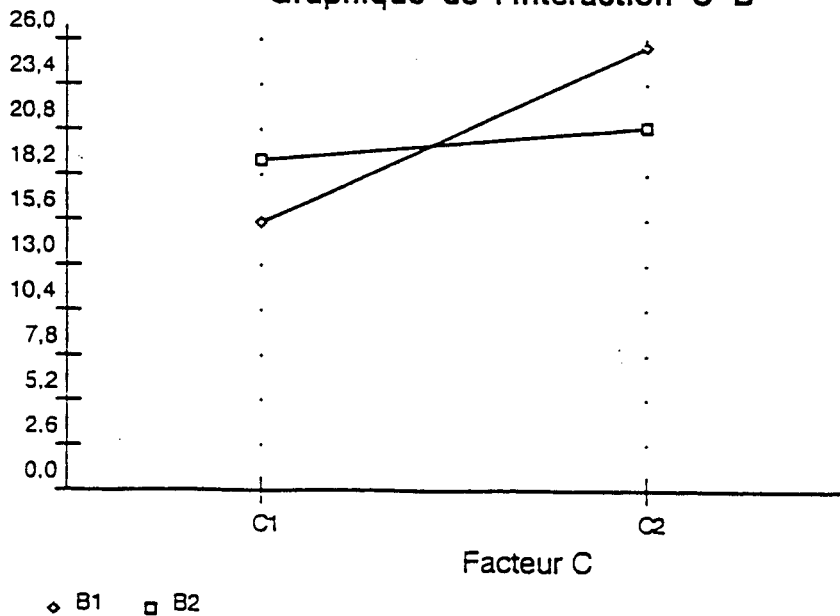
Niveau	C	B	CB	A	CA	E	D
1	17,25	20,5	18,25	22,5	19,75	18	18,25
2	23,25	20	22,25	18	20,75	22,5	22,25
Ecart	-6	0,5	-4	4,5	-1	-4,5	-4

Interaction CB		
	C1	C2
B1	15,5	25,5
B2	19	21

Graphique des effets



Graphique de l'interaction C B

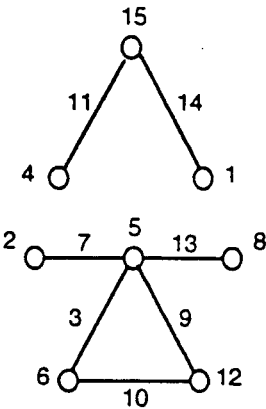
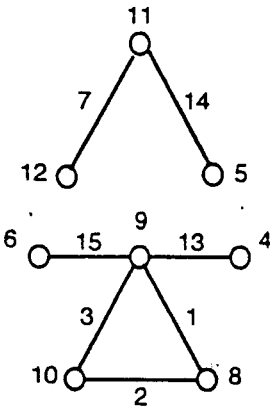
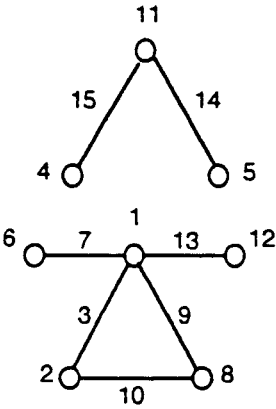
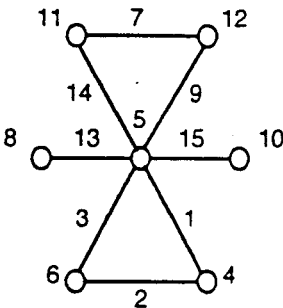
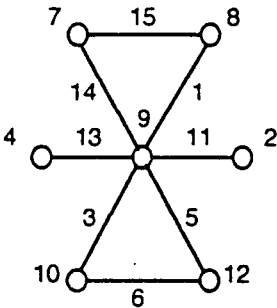
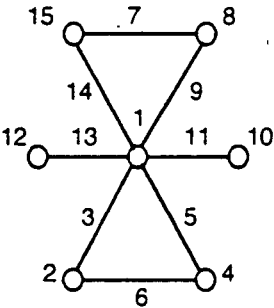
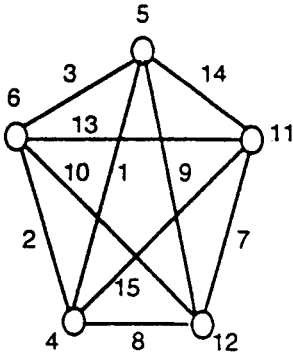
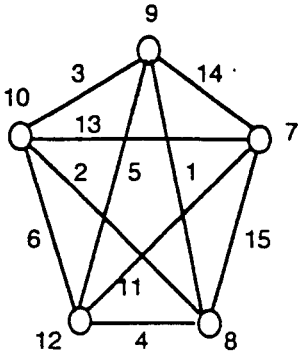
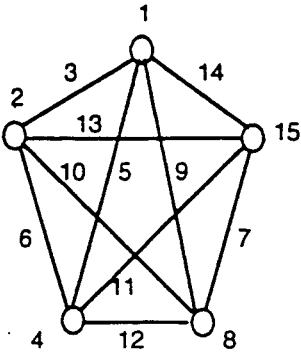


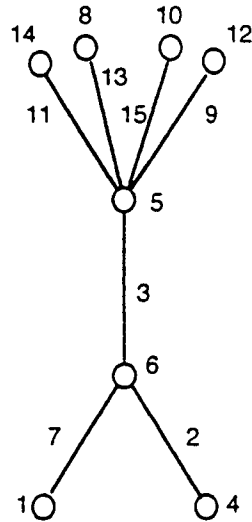
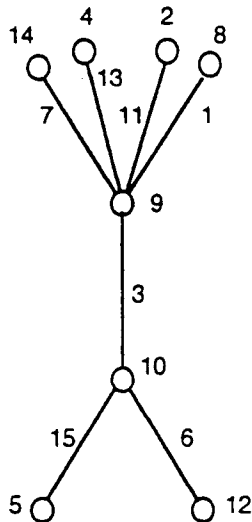
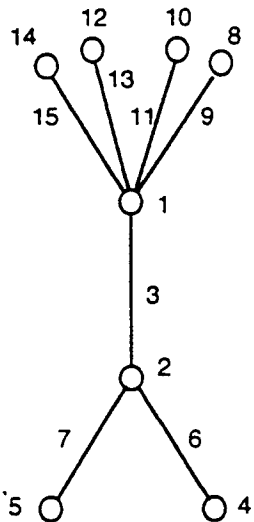
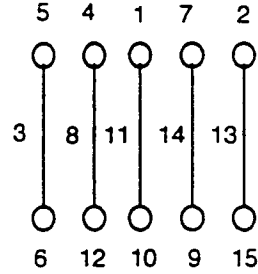
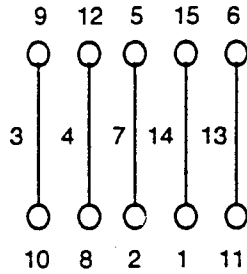
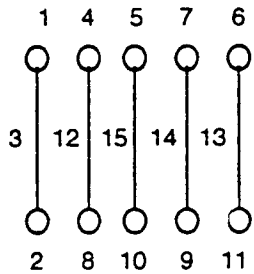
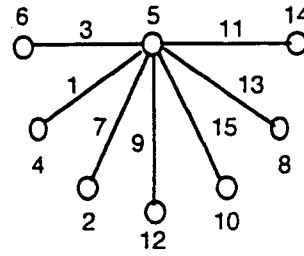
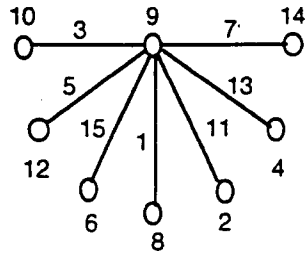
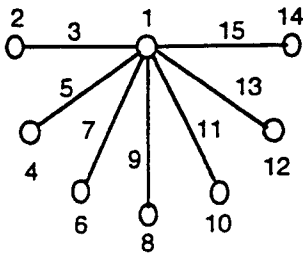
Col. N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

Interactions entre deux colonnes de la table L 16

Col. N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
(1)	3	2	5	4	7	6	9	8	11	10	13	12	15	14	
(2)	1	6	7	4	5	10	11	8	9	14	15	12	13		
(3)	7	6	5	4	11	10	9	8	15	14	13	12			
(4)	1	2	3	12	13	14	15	8	9	10	11				
(5)	3	2	13	12	15	14	9	8	11	10					
(6)	1	14	15	12	13	10	11	8	9						
(7)	15	14	13	12	11	10	9	8							
(8)	1	2	3	4	5	6	7								
(9)	3	2	5	4	7	6									
(10)	1	6	7	4	5										
(11)	7	6	5	4											
(12)	1	2	3												
(13)	3	2													
(14)	1														

Les interactions se produisent dans les colonnes situées à l'intersection des numéros des colonnes indiqués en haut et des numéros entre parenthèses.
Exemple: la colonne 5 est le siège de l'interaction entre les facteurs placés dans les colonnes 4 et 1





$L_{12}(2^{11})$

No.	Col.											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2		1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
3		1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
4		1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2
5		1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1
6		1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1
7		2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1
8		2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2
9		2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1
10		2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2
11		2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2
12		2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1
		Group 1					Group 2					

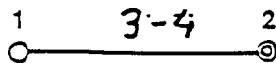
Note : Les interactions entre deux colonnes sont confondues avec les neufs colonnes restantes. Une analyse séquentielle est nécessaire pour trouver les interactions. Cette matrice ne devrait donc pas être utilisée pour des expériences comportant des interactions.

$L_{18}(2^1 \times 3^7)$

Col. No.	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1
	Group 1	Group 2	Group 3					

 $L_9(3^4)$

Col. No.	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1
	Group 1	Group 2		



$L_{27}(3^{13})$

Interactions entre deux colonnes

Col. No.													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2
Group 1													
Group 2				Group 3									

Col. No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
(1)	3	2	2	2	6	5	5	9	8	8	12	11	11
(2)	4	4	3	7	7	6	10	10	9	13	13	13	12
(3)	1	1	8	9	10	5	6	7	5	6	7	5	6
(4)	4	3	11	12	13	11	12	13	8	9	10	9	10
(5)	1	9	10	8	7	5	6	6	7	5	6	7	5
(6)	1	1	2	3	4	2	4	2	4	2	4	2	4
(7)	3	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2
(8)	1	1	2	3	4	2	4	2	4	2	4	2	4
(9)	1	4	2	3	2	4	2	4	2	3	2	4	2
(10)	3	4	2	4	2	4	2	4	2	3	2	4	2
(11)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
(12)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
(13)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

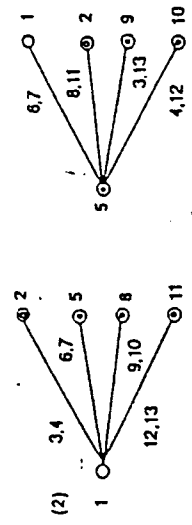
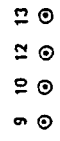
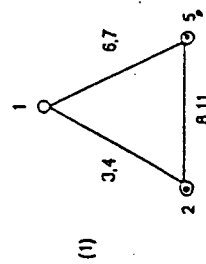
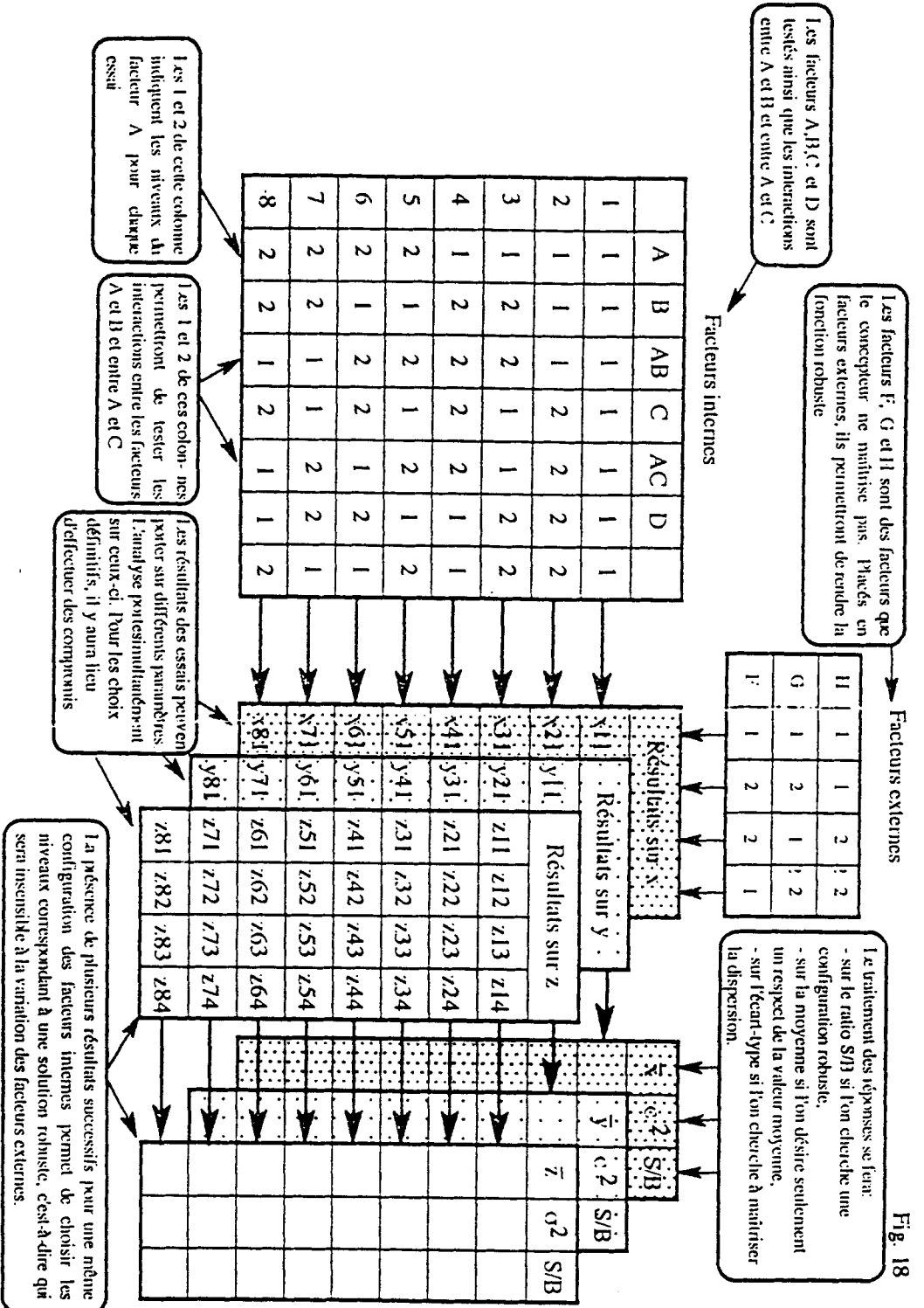


Fig. 18



facteurs externes

	1	1	2	2
	1	2	1	2
	1	2	2	1

facteurs internes

1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Résultats sur :			

moy.	σ^2	S/E

Table de Fischer à 5%

Extrait de la table du F pour un risque α de 5 %

Extrait de la
table du F
pour $v_1 = 1$

v_2	F
1	161
2	18,5
3	10,1
4	7,71
5	6,61
6	5,99
7	5,59
8	5,32
9	5,12
10	4,96
11	4,84

METHODE TAGUCHI - BIBLIOGRAPHIE

- **Les méthodes Taguchi dans l'industrie occidentale**
Traduit de Lance A. Ealey "Quality By Design"
Editions d'Organisation 1990
- **Initiation à l'Engineering de la qualité**
Manuel de formation du séminaire de 5 jours
Institut des méthodes Taguchi à Issy les Moulineaux (92)
Manuel de formation d'un institut, créé par Taguchi, et chargé de la diffusion des méthodes Taguchi .
- **Les plans d'expériences**
Goupy Editions DUNOD (ne traite pas des méthodes Taguchi)
- **Pratique des plans d'expérience - Méthodologie Taguchi**
Michel G. Vigier Editions d'organisation 1988
- **Taguchi Techniques for Quality Engineering**
P.J. Ross Mac Graw Hill (U.S.A.) 1988
- **Articles parus dans Qualité Magazine**
Bulletin du Mouvement Français pour la qualité (ex.AFCIQ)
- **La méthode Taguchi**
Article de P. Souvay Technologies Sciences et techniques industrielles CNDP (N° 44-45 1991)
- **Approche expérimentale des asservissements**
Article de Pierre Souvay et Jean Filippini Technologies et Formations N° 38
- **Optimisation de la constitution du copeau en tournage**
Article de Christophe Petitjean et Pierre Souvay Technologie oct/nov 1993
- **Introduction aux plans d'expériences par la méthode Taguchi**
Maurice Pillet Les Editions d'organisation Université
- **Articles "Réglages des asservissements par plans d'expériences"**
Articles de Jean Filippini, Pierre Souvay et Thierry Hans Revue l'automaticien 1993

L4 (2³)

Col. N°	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

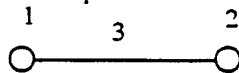
graphe linéaire
pour L4

fig 19

L4 (2³) signifie que la table comporte 4 lignes que le nombre de colonnes est de 3 et que chaque facteur est à 2 niveaux (8 combinaisons)

Le graphe linéaire nous indique que la colonne 3 est le siège de l'interaction entre les facteurs placés dans les colonnes 1 et 2

Table L8 (2⁷)

Col. N°	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

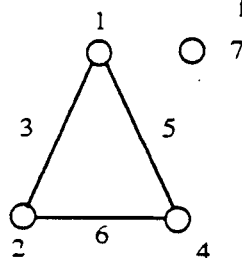
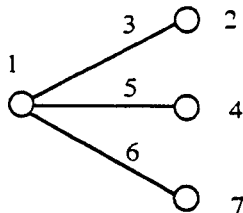


fig 20

Table L9 (3⁴)

Col N°	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Les tables à 3 niveaux (et plus) permettent de détecter la non linéarité de certains facteurs

Fig. 21