

Essais	A	A	B	B	A-B	C	C	A-C	A-C	C-B	C-B	D	D
		Imax		Acc.			Vmax		K4		Gain		
N°1	1	6	1	70	1	1	600	1	12	1	1	1	1
N°2	1	6	1	70	1	2	900	2	24	2	2	2	2
N°3	1	6	2	140	2	1	600	1	12	2	2	2	2
N°4	1	6	2	140	2	2	900	2	24	1	1	1	1
N°5	2	8	1	70	2	1	600	2	24	1	1	2	2
N°6	2	8	1	70	2	2	900	1	12	2	2	1	1
N°7	2	8	2	140	1	1	600	2	24	2	2	1	1
N°8	2	8	2	140	1	2	900	1	12	1	1	2	2

Et	Imax	Acc.	0	Vmax	Gain	0
N1	1,8	0,65	1,2	0,85	1,35	1,35
N2	0,55	1,7	1,15	1,5	1	1

Ed	Imax	Acc.	0	Vmax	Gain	0
N1	0,05	0,075	0,075	0,075	0	0,1
N2	0,1	0,075	0,075	0,075	0,15	0,05

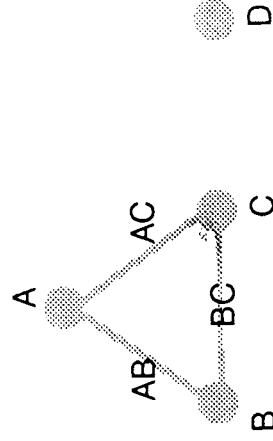
Ee	Imax	Acc.	0	Vmax	Gain	0
N1	0,025	0,3	0,2	0,025	0,2	0,3
N2	0,5	0,225	0,325	0,5	0,325	0,325

T	Imax	Acc.	0	Vmax	Gain	0
N1	2,38	2,43	2,3675	2,735	2,362	2,42
N2	2,422	2,3725	2,435	2,0675	2,44	2,382

Interaction AB	A1	A2	Ed	A1	A2	Ee	A1	A2	T	A1	A2
Et											
B1	1,3	0		B1	0,05	0,1	B1	0	0,6	B1	2,375
B2	2,3	1,1		B2	0,05	0,1	B2	0,05	0,4	B2	2,385

Interaction AC	A1	A2	Ed	A1	A2	Ee	A1	A2	T	A1	A2
Et											
C1	1,4	0,3		C1	0,05	0,1	C1	0,05	0	C1	2,625
C2	2,2	0,8		C2	0,05	0,1	C2	0	1	C2	2,135

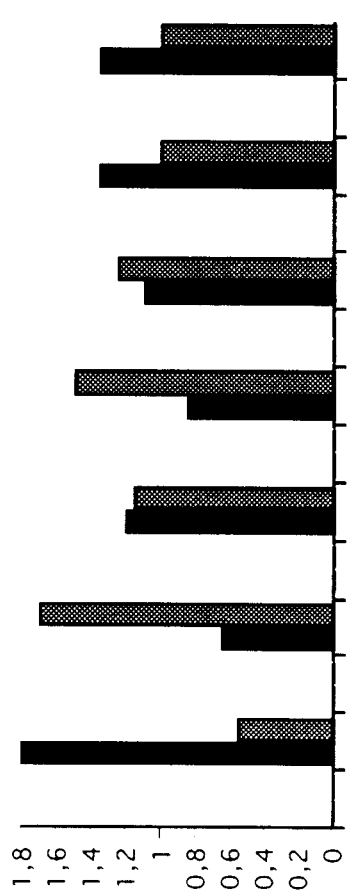
Et	Ed	Ee	T
1	2	3	4
1	0	0	2,6
1,6	0,1	0	2,15
1,8	0,1	0,1	2,65
2,8	0	0	2,12
0	0	0	2,85
0	0,2	1,2	2,12
0,6	0,2	0	2,84
1,6	0	0,8	1,88
1,175	0,075	0,2625	2,40



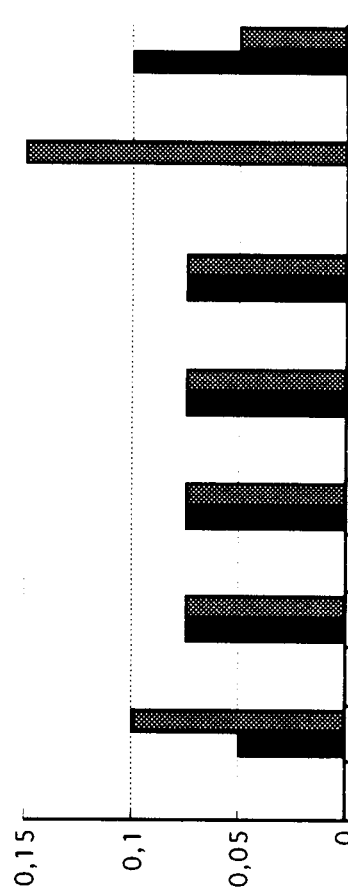
AFFECTATION DES VARIABLES

A	---	Imax
B	---	Acc.
AB	---	0
C	---	Vmax
AC	---	K4
BC	---	Gain
D	---	0

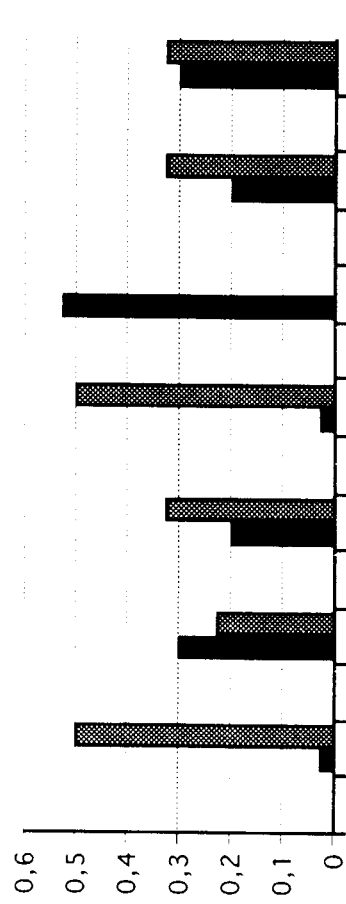
1



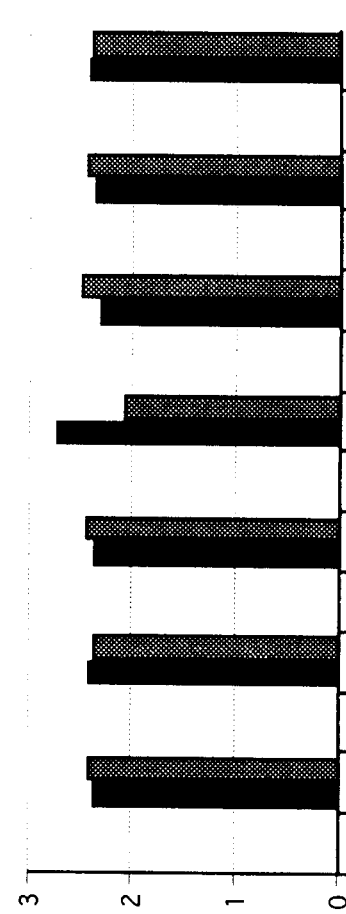
2

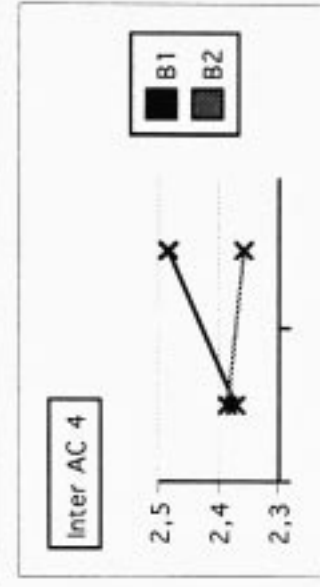
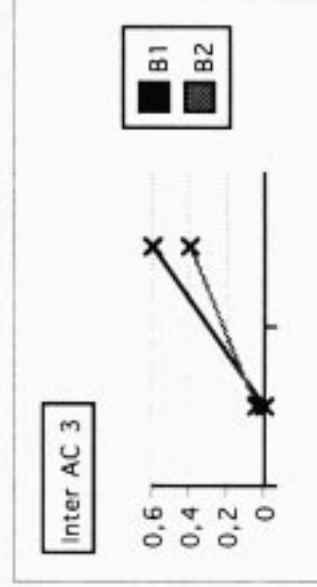
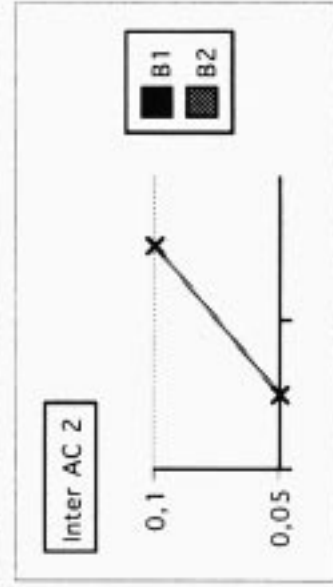
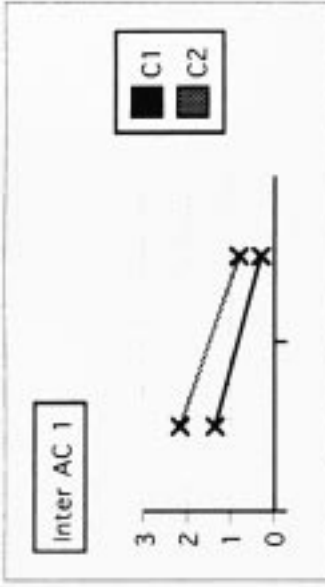
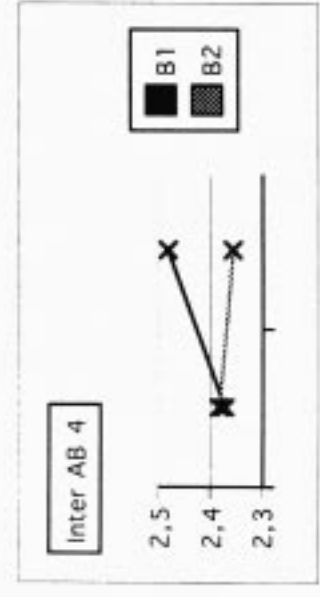
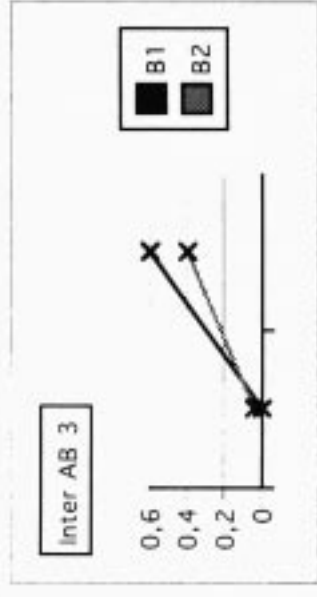
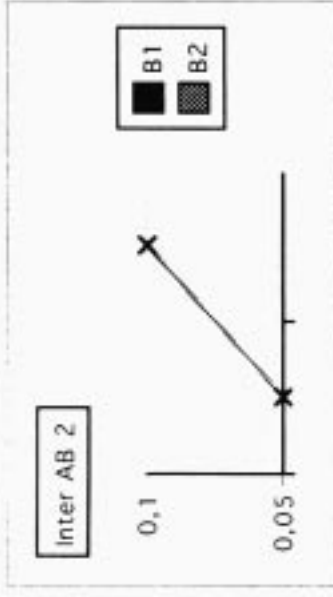
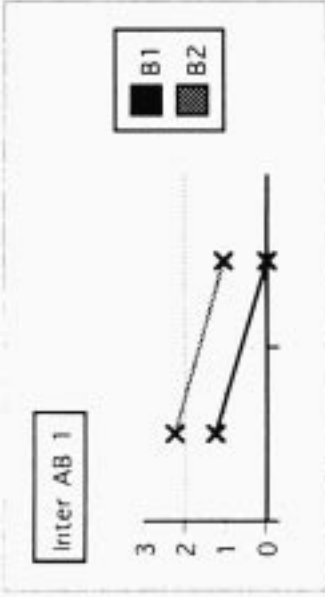


3



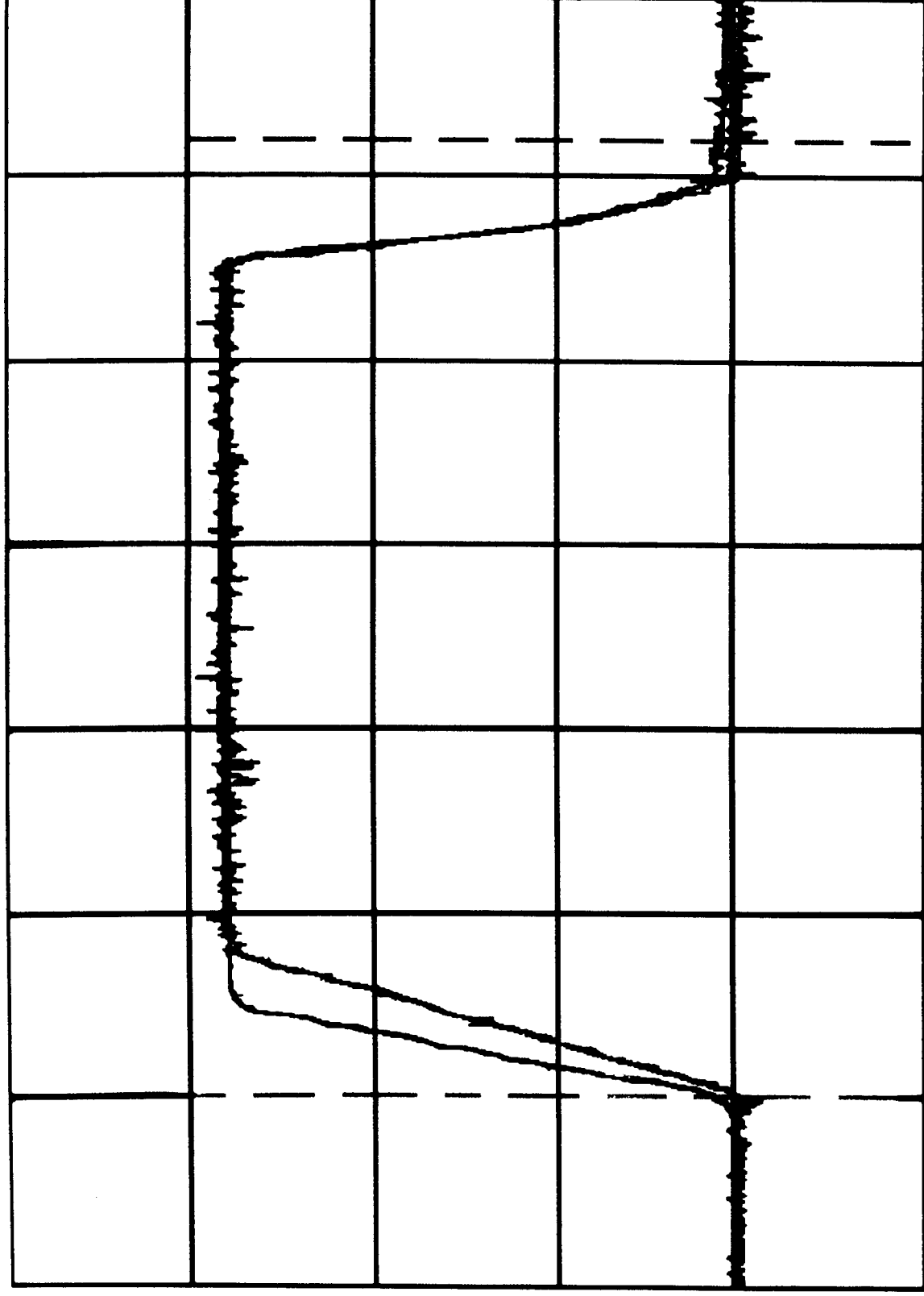
4





CH1 >2V 500 ms

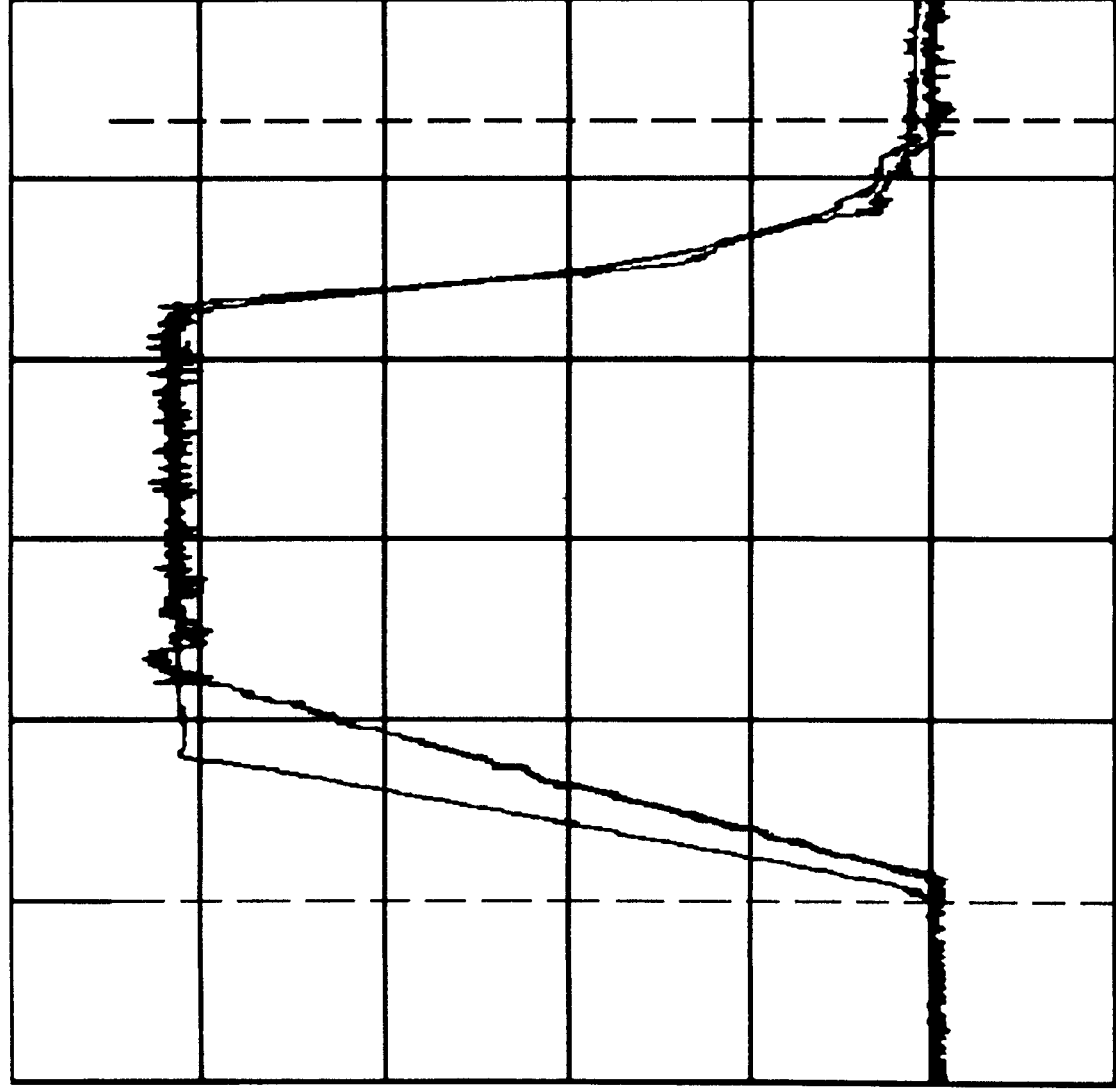
C1



CH2 0,2V 500 ms $\Delta t = 2,605 \text{ s}$

CH1 >2V 500ms

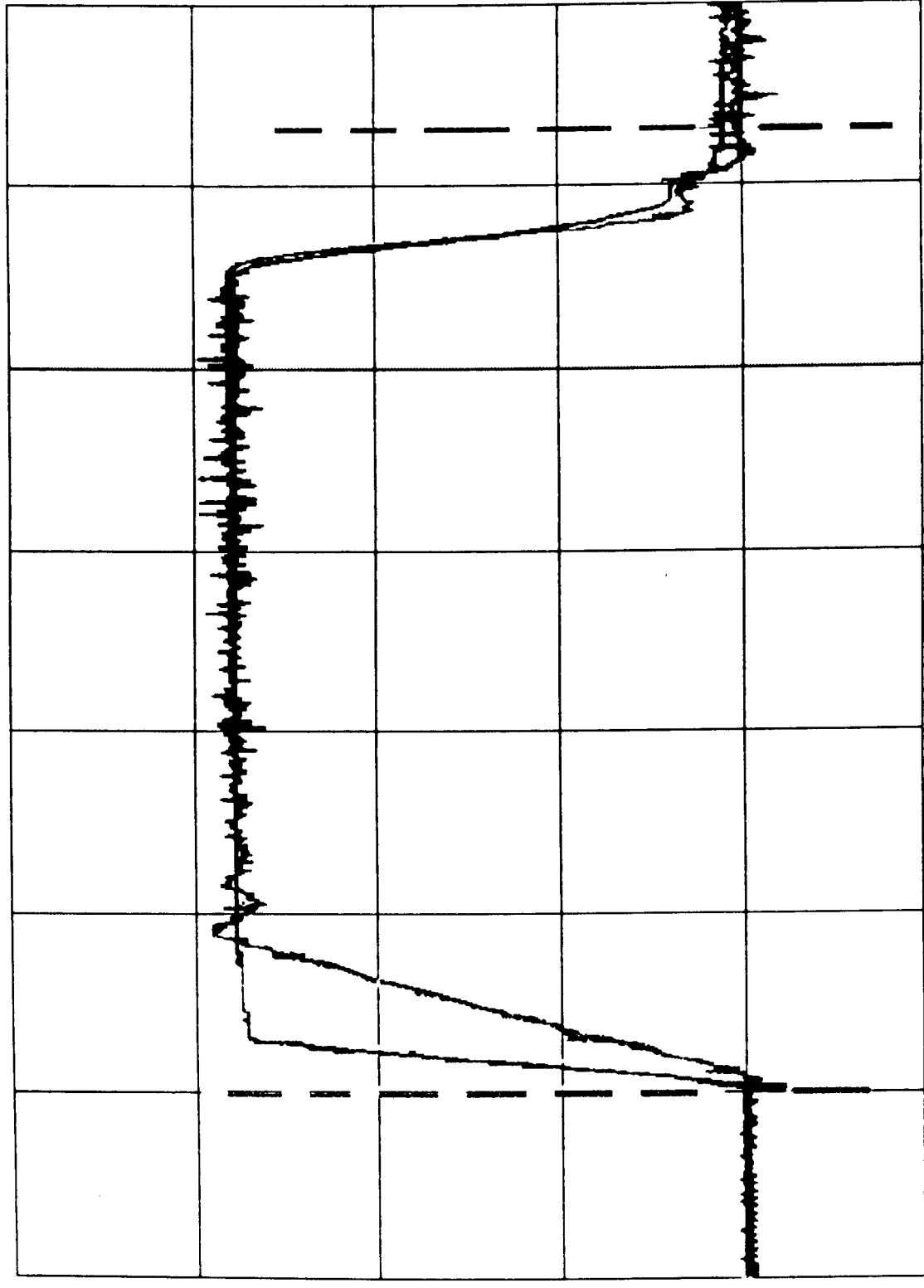
C2



CH2 0,2V 500ms $\Delta t = 2,155$ s

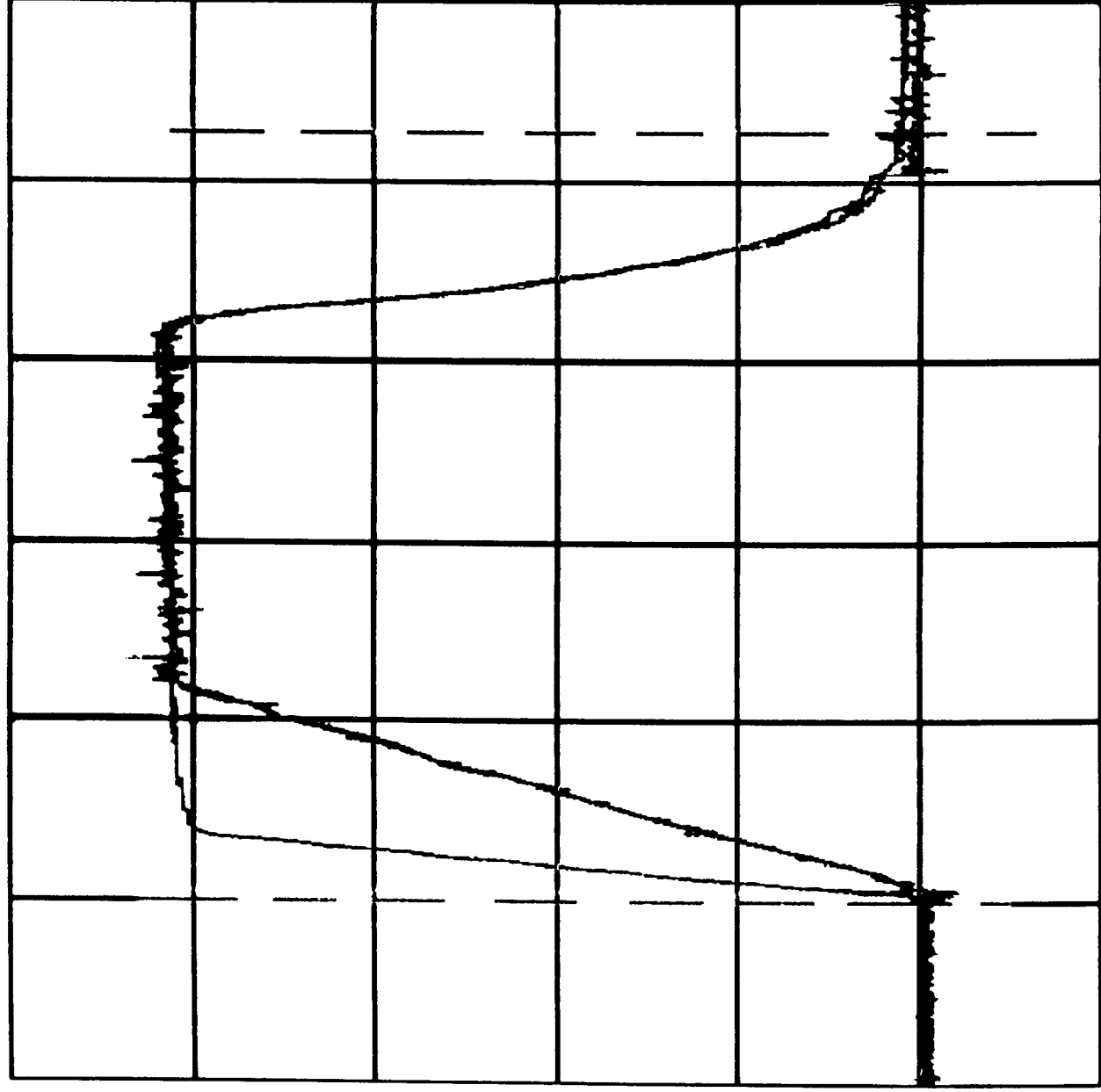
CH1 >2V 500ms

C3



CH2 0.2V 500ms $\Delta t = 2.650$ s

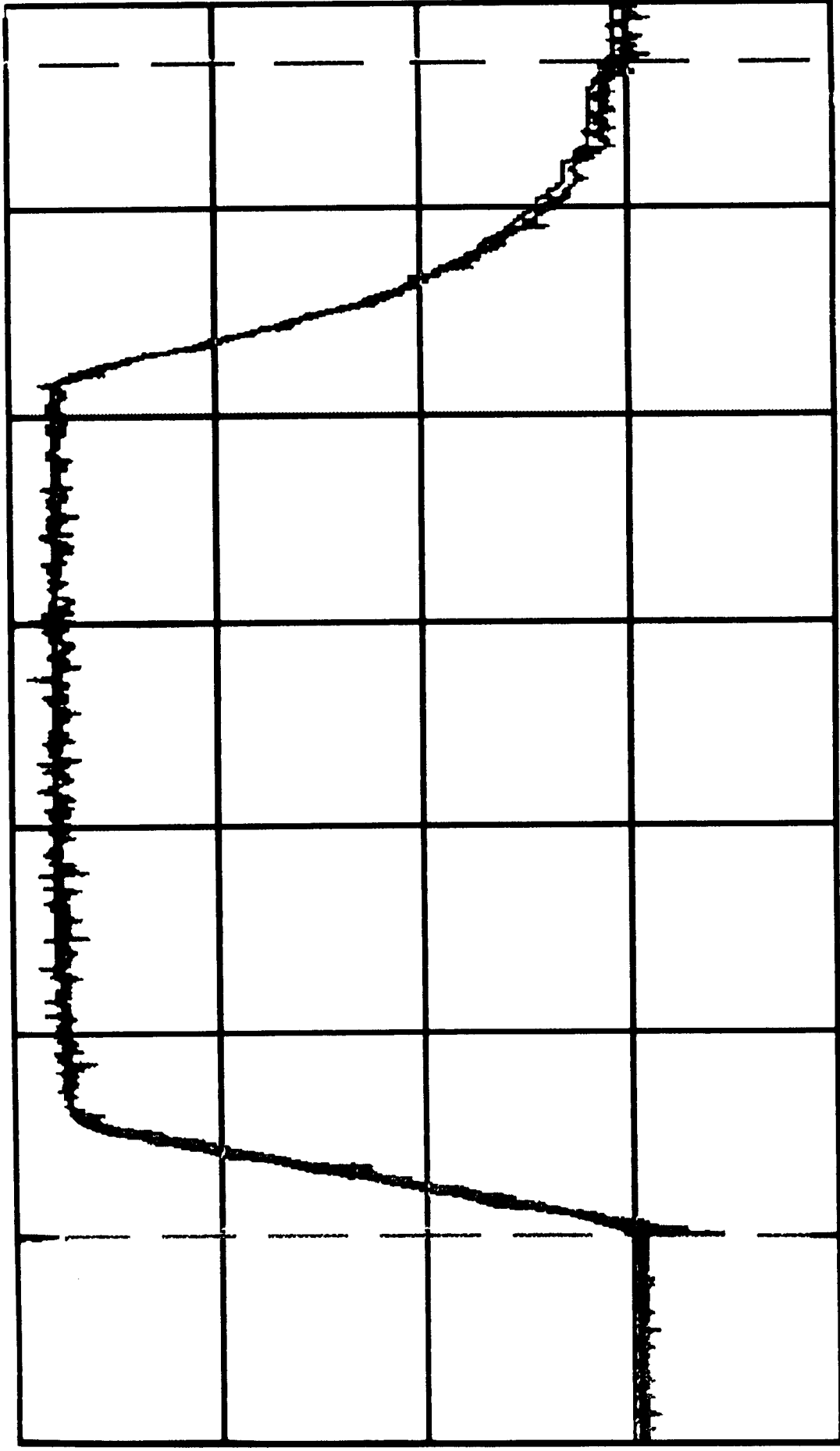
CH1 >2V 500ms



CH2 0,2V 500ms $\Delta t = 2,120 \text{ s}$

C4

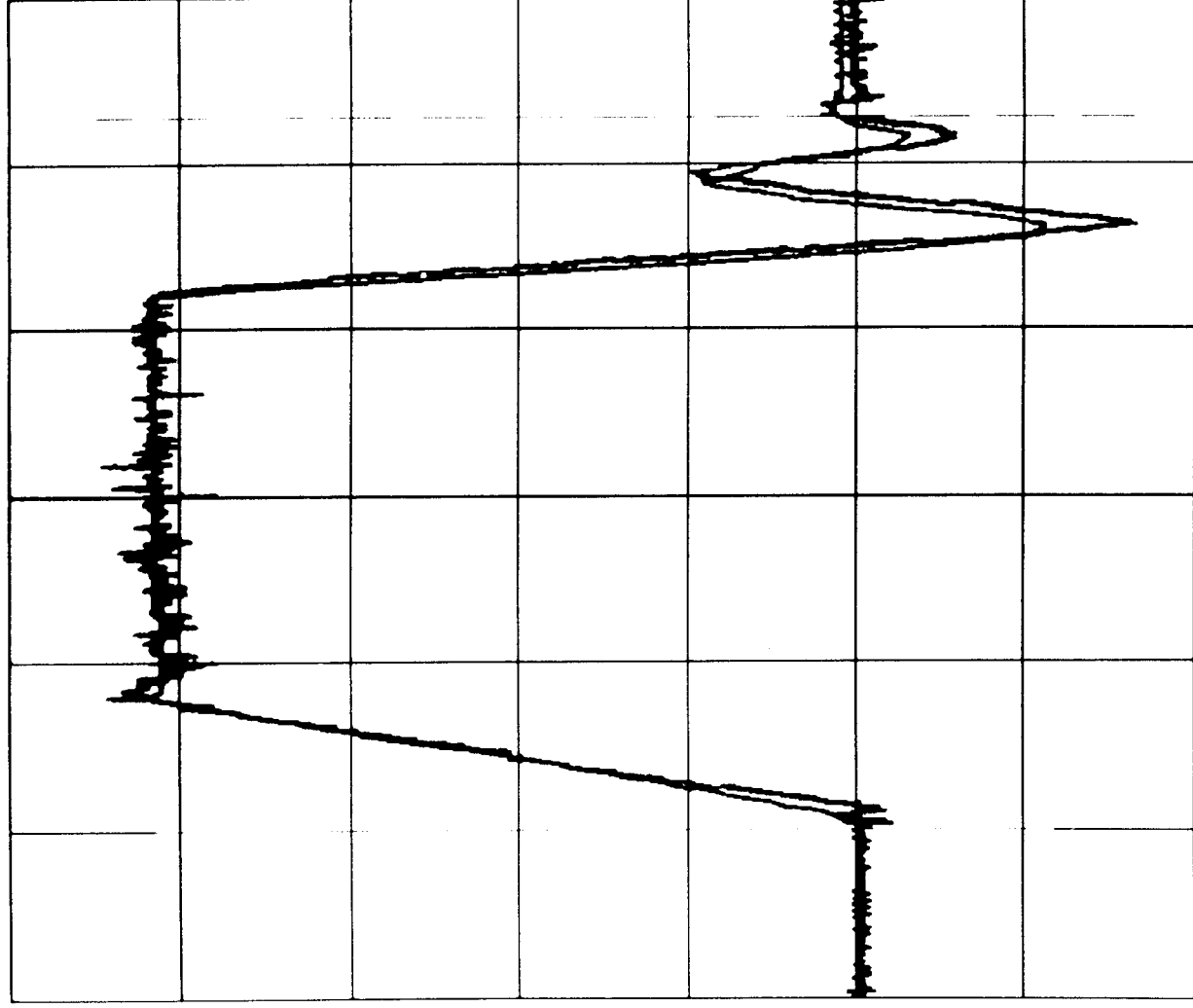
CH1 >2V 500 ms



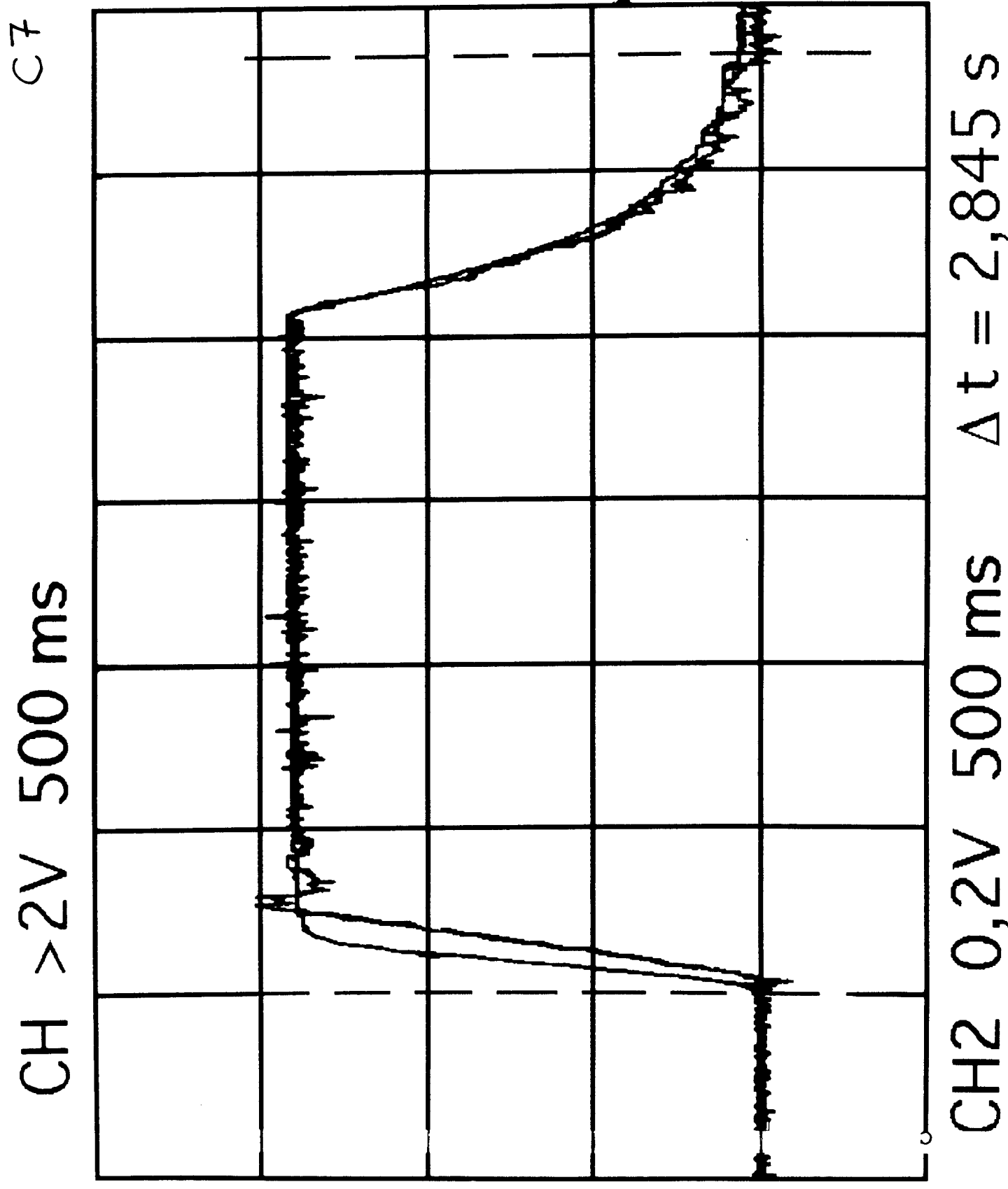
CH2 0,2V 500 ms $\Delta t = 2,850$ s

C6

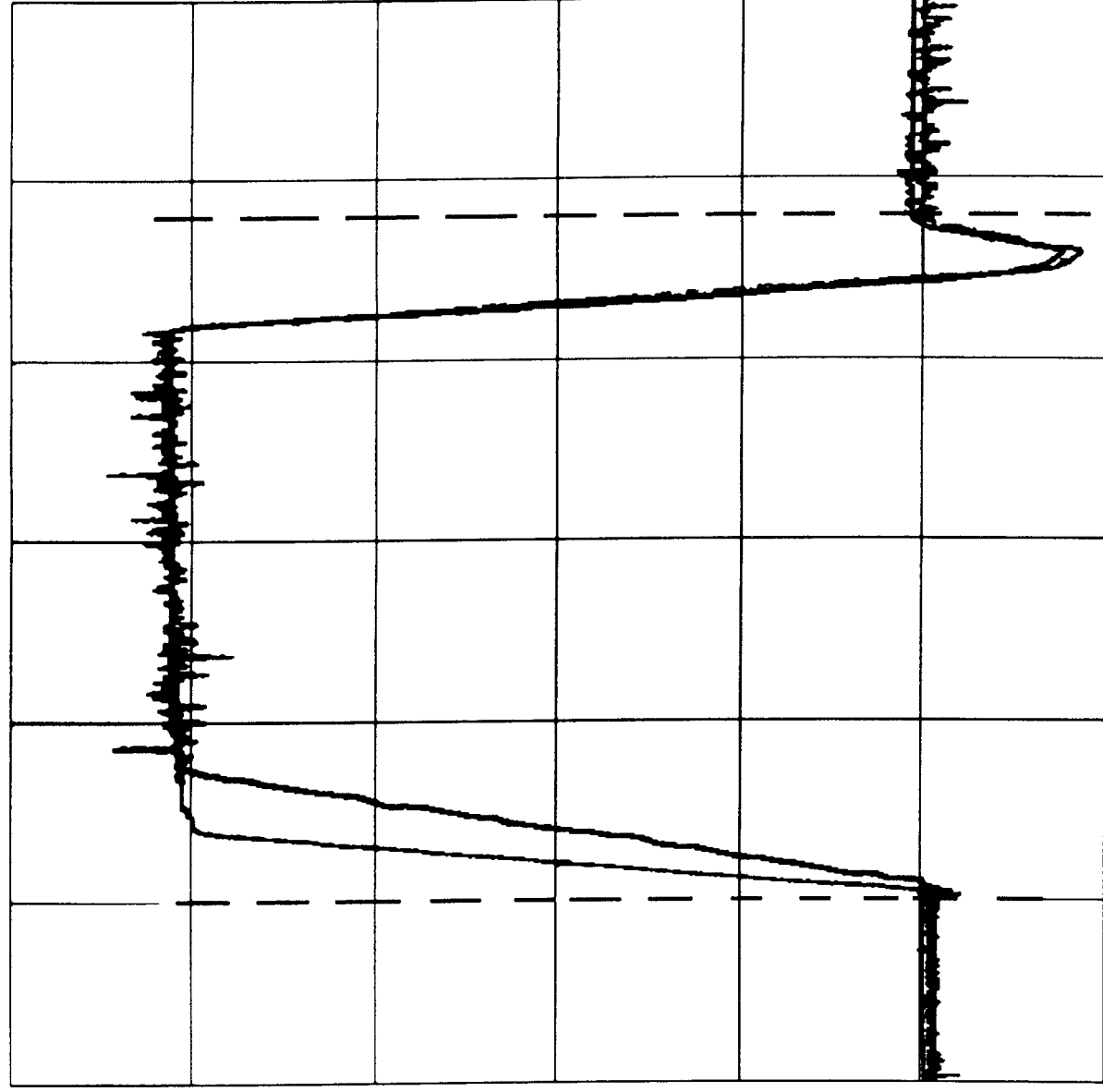
CH1 >2V 500 ms



CH2 0,2V 500 ms $\Delta t = 2,125$

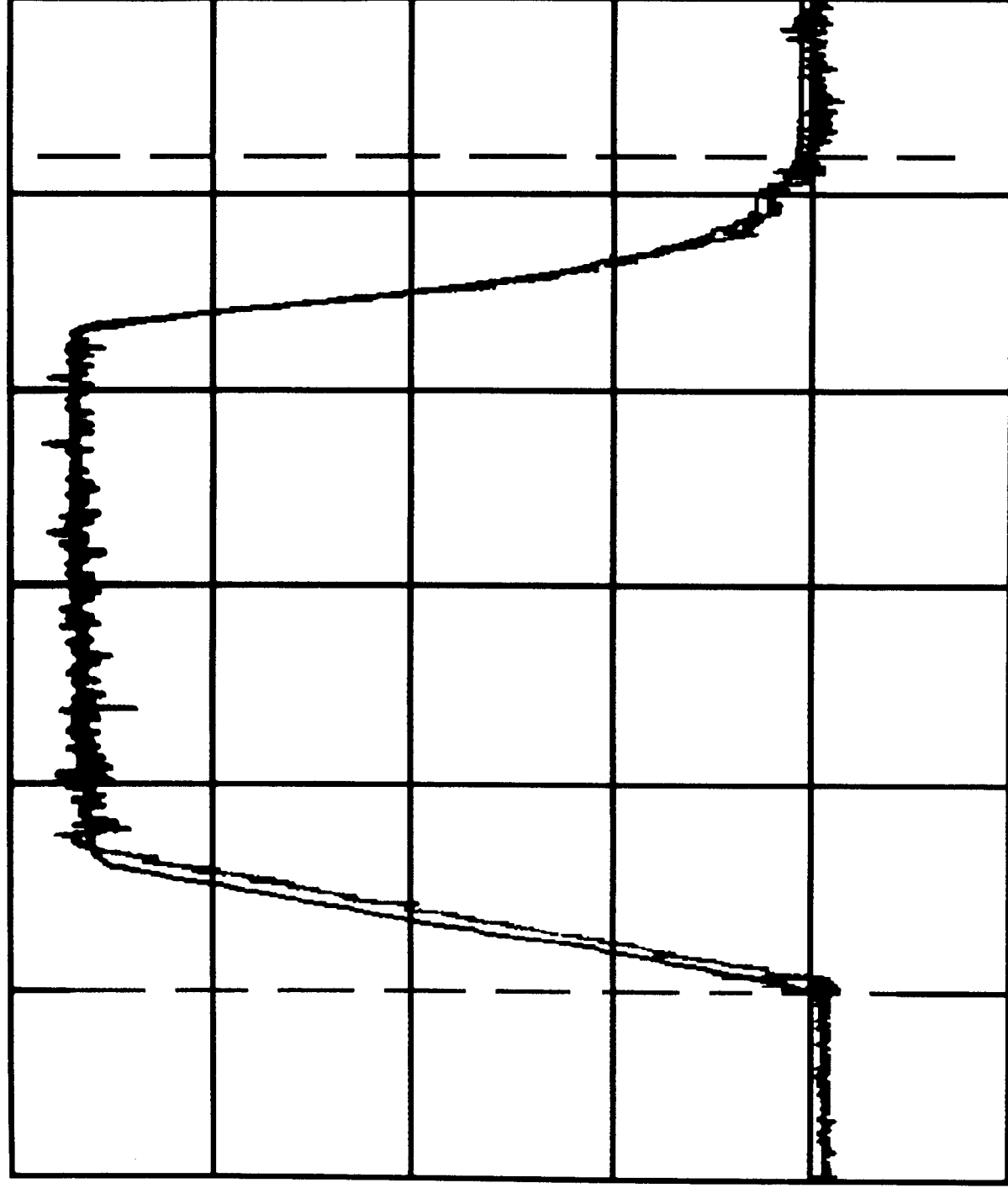


CH1 >2V 500 ms

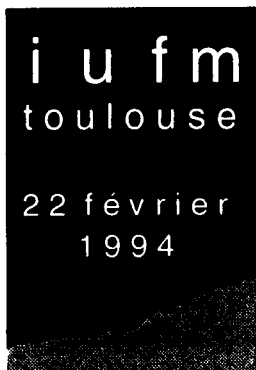


CH2 0,2V 500 ms $\Delta t = 1,885 \text{ s}$

CH >2V 500 ms



CH 0,2V 500 ms $\Delta t = 2,110$ s



P. MAUREL
S. BIASIO
C. CHAMPAGNE

LES PLANS D'EXPERIENCES

Un exemple INDUSTRIEL ...

LE SOUDAGE LASER A L'AEROSPATIALE

► **Présentation Technique**

Pour des raisons évidentes de confidentialité sur les résultats obtenus, l'entreprise AEROSPATIALE ne nous a pas permis de divulguer par écrit les documents utilisés lors de la présentation du 22 février à l'IUFM de Toulouse. Merci de bien vouloir nous excuser.

► **DIDACTICIEL de formation "Plans d'Expériences"**

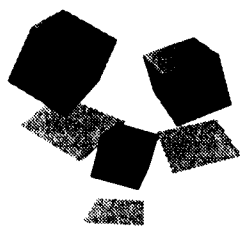
Il nous est par contre possible de faire figurer dans ce compte rendu l'ébauche de la transposition didactique ... Le simulateur de formation sera prêt fin avril 1994.

Pour toute interrogation éventuelle merci de nous joindre à :

IUFM Toulouse UFTI
118 rte de Narbonne
31077 TOULOUSE CEDEX

En vous renouvelant toutes nos excuses,

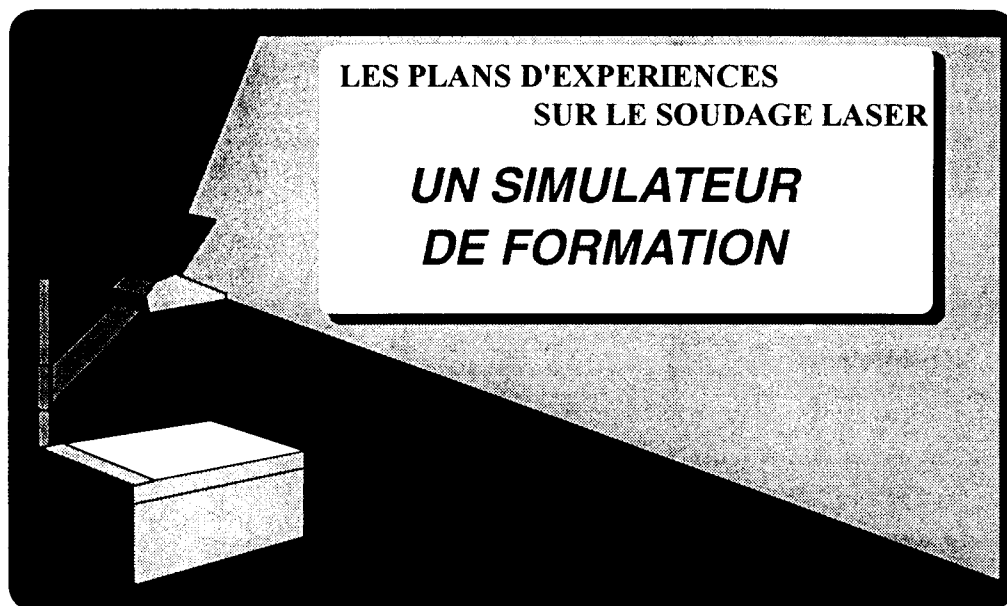
P. MAUREL



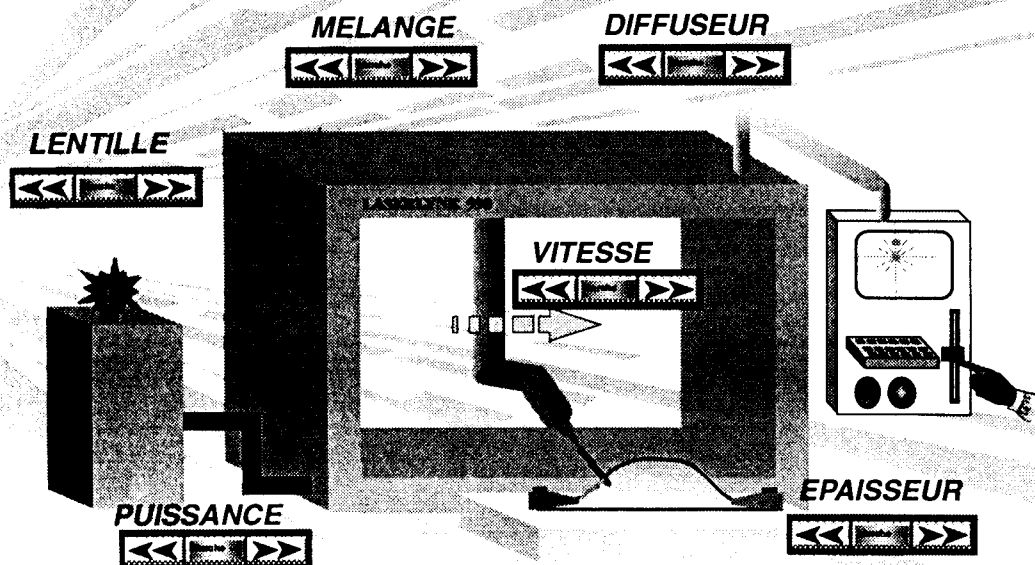
TRANSPPOSITION DIDACTIQUE

 **EN BTS** *Productique*

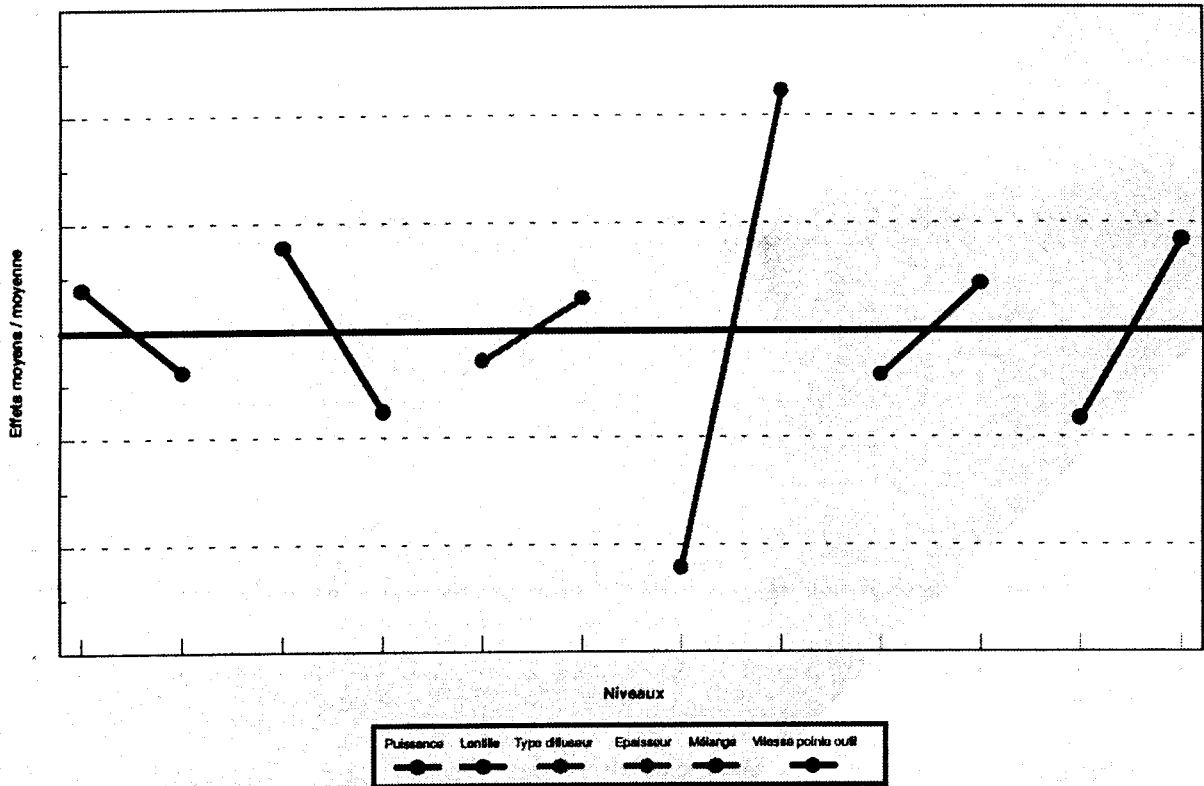
 **EN IUT** *Génie Mécanique et Productique*



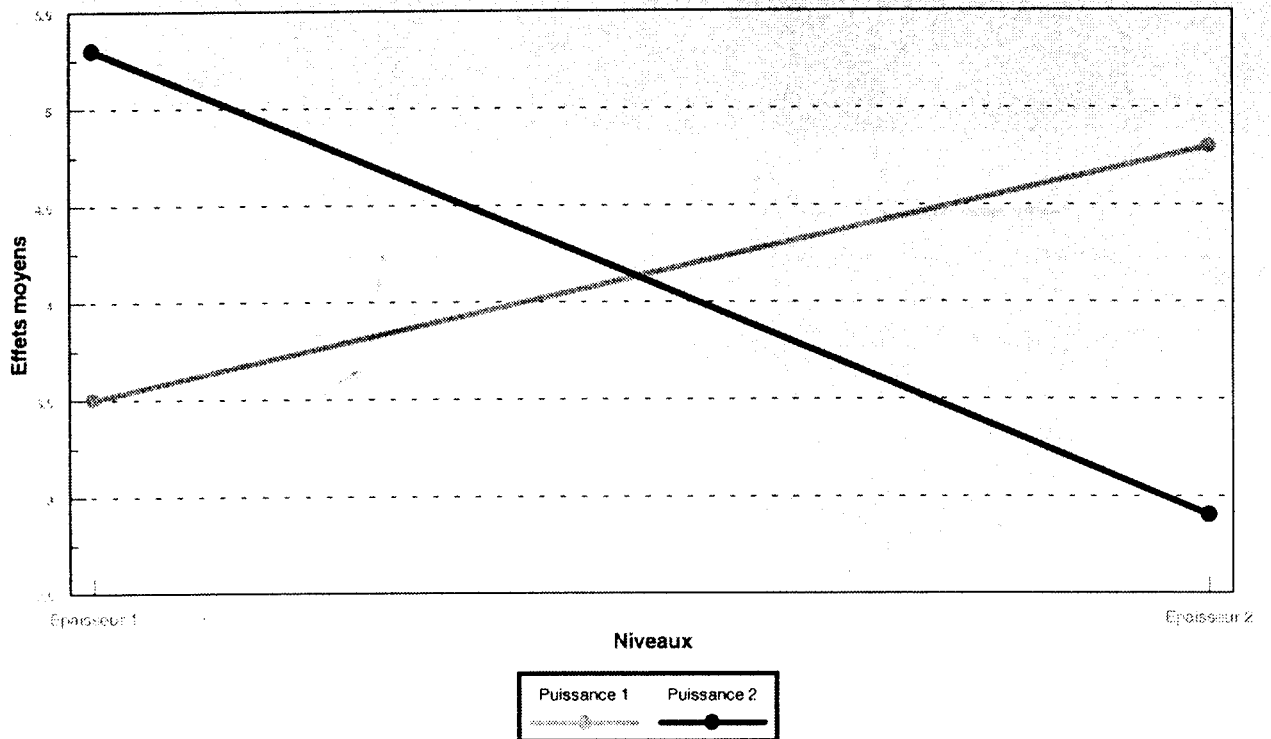
LES 6 PARAMETRES VARIABLES ...



GRAPHE DES EFFETS MOYENS



GRAPHE INTERACTION



➡ ANALYSE ...

MODULE D'AIDE A L'ANALYSE

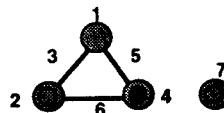
1- Choix de la table d'expérimentation

▲ 6 paramètres
▲ 1 Interaction

TABLE L8

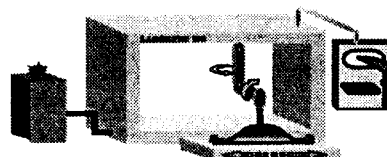
2- Avec les graphes de TAGUCHI ...

on affecte les colonnes



	1	2	3	4	5	6	7	REPONSES (soufflures)
	Puissance	Epaisseur	Type de diffuseur	Mélange	Interaction Puissance - Mélange	Lentille	Vitesse pointe outil	
1	650	1.2	petit	25		usagée	200	
2	650	1.2	petit	50		neuve	300	
3	650	1.5	grand	25		neuve	300	
4	650	1.5	grand	50		usagée	200	
5	750	1.2	grand	25		usagée	300	
6	750	1.2	grand	50		neuve	200	
7	750	1.5	petit	25		neuve	200	
8	750	1.5	petit	50		usagée	300	

3- On réalise les essais:



4- On rentre les résultats

	1	2	3	4	5	6	7	REPONSES (soufflures)
	Puissance	Epaisseur	Type de diffuseur	Mélange	Interaction Puissance - Mélange	Lentille	Vitesse pointe outil	
1	650	1.2	petit	25		usagée	200	10
2	650	1.2	petit	50		neuve	300	5
3	650	1.5	grand	25		neuve	300	23
4	650	1.5	grand	50		usagée	200	12
5	750	1.2	grand	25		usagée	300	34
6	750	1.2	grand	50		neuve	200	15
7	750	1.5	petit	25		neuve	200	9
8	750	1.5	petit	50		usagée	300	27

MODULE D'AIDE A L'ANALYSE

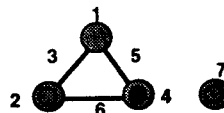
1- Choix de la table d'expérimentation

▲ 6 paramètres
▲ 1 Interaction

TABLE L8

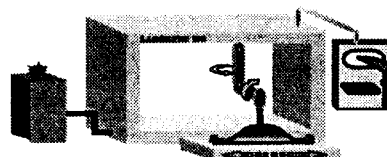
2- Avec les graphes de TAGUCHI ...

on affecte les colonnes



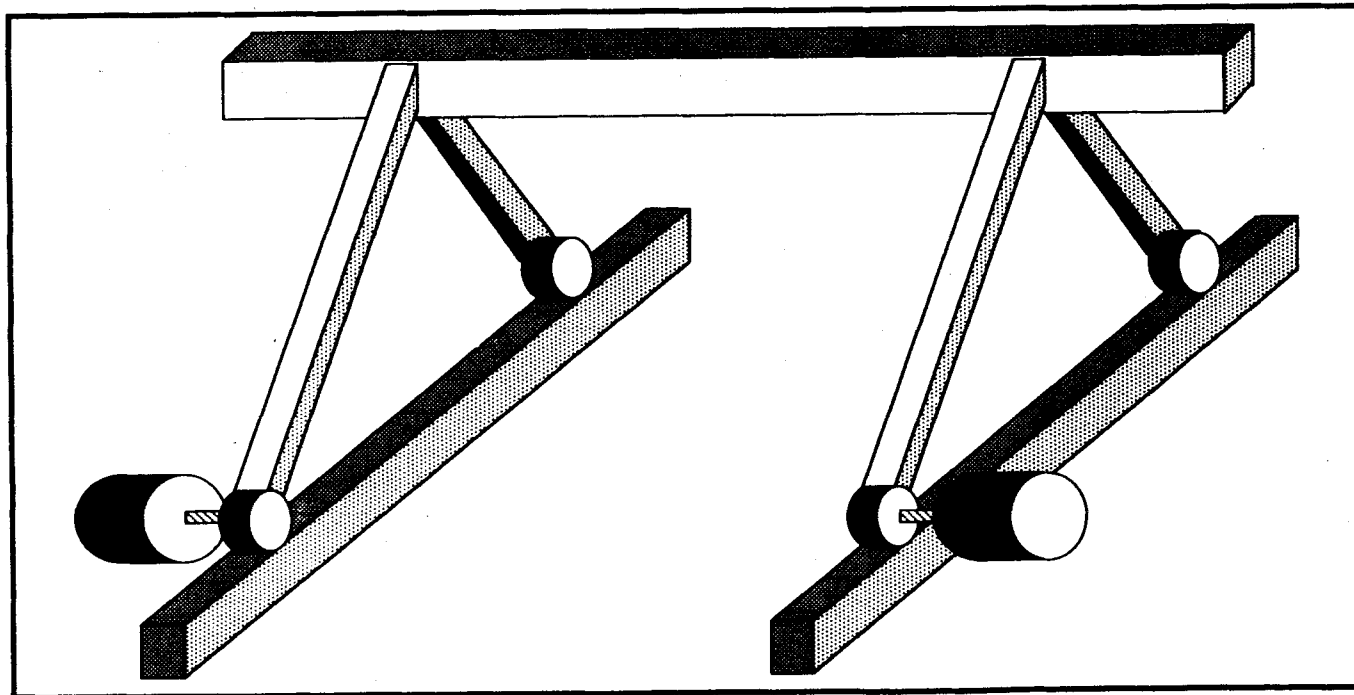
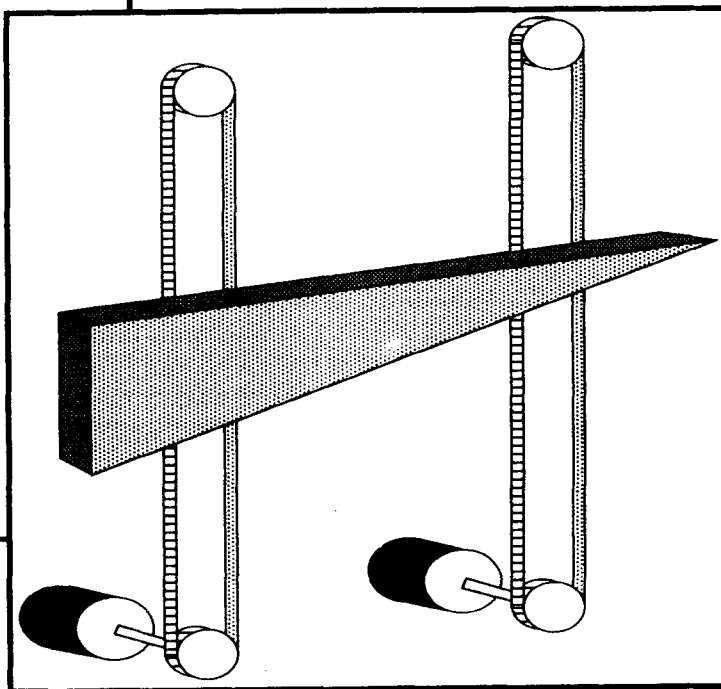
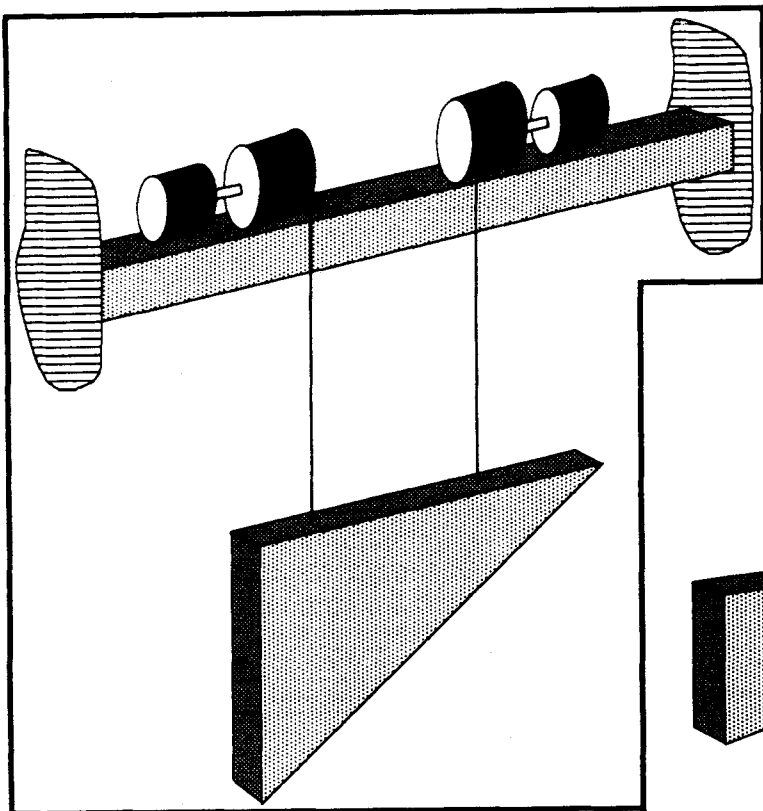
	1	2	3	4	5	6	7	REPONSES (soufflures)
	Puissance	Epaisseur	Type de diffuseur	Mélange	Interaction Puissance - Mélange	Lentille	Vitesse pointe outil	
1	650	1.2	petit	25		usagée	200	
2	650	1.2	petit	50		neuve	300	
3	650	1.5	grand	25		neuve	300	
4	650	1.5	grand	50		usagée	200	
5	750	1.2	grand	25		usagée	300	
6	750	1.2	grand	50		neuve	200	
7	750	1.5	petit	25		neuve	200	
8	750	1.5	petit	50		usagée	300	

3- On réalise les essais:



4- On rentre les résultats

	1	2	3	4	5	6	7	REPONSES (soufflures)
	Puissance	Epaisseur	Type de diffuseur	Mélange	Interaction Puissance - Mélange	Lentille	Vitesse pointe outil	
1	650	1.2	petit	25		usagée	200	10
2	650	1.2	petit	50		neuve	300	5
3	650	1.5	grand	25		neuve	300	23
4	650	1.5	grand	50		usagée	200	12
5	750	1.2	grand	25		usagée	300	34
6	750	1.2	grand	50		neuve	200	15
7	750	1.5	petit	25		neuve	200	9
8	750	1.5	petit	50		usagée	300	27



DESTINATION :

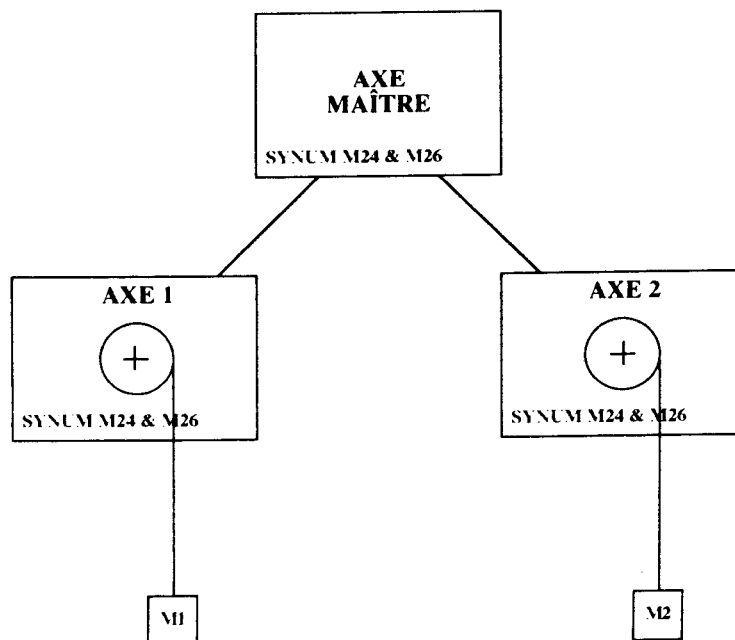
à l'initiative de l'enseignant

OBJECTIF :

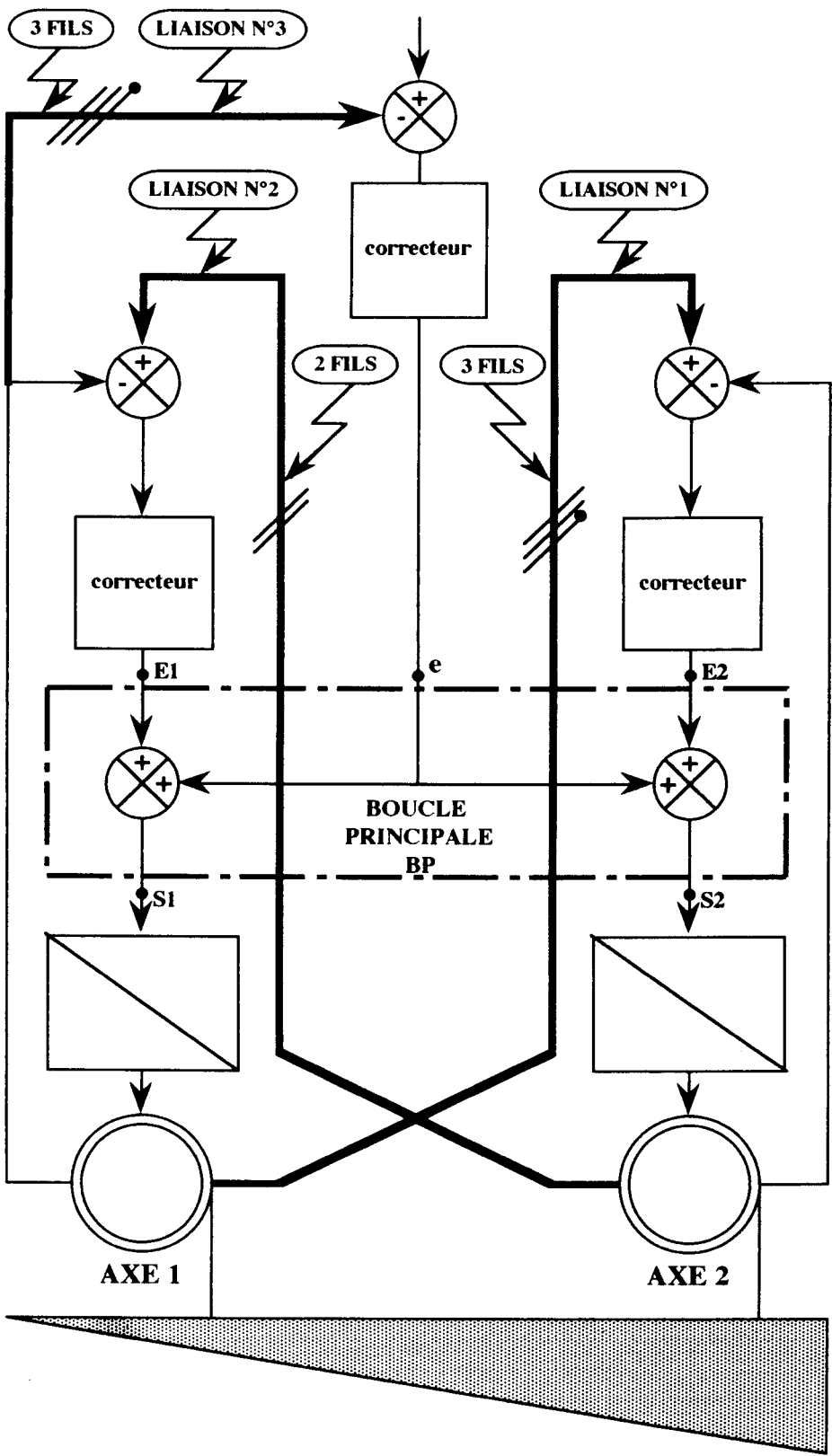
- Découvrir les différentes manières d'organiser la boucle d'asservissement pour obtenir un mouvement synchronisé de deux axes motorisés.
- Rechercher les défaillances, analyser leurs effets et remédier.

ANALYSE :**MOYENS :**

- 3 bancs SYNUM version de base,
- 1 PC,
- 1 oscilloscope à mémoire,
- 1 voltmètre alternatif pouvant mesurer des valeurs max (de type MX 547 par exemple).

CONFIGURATION :

ORGANISATION DE LA BOUCLE D'ASSERVISSEMENT :

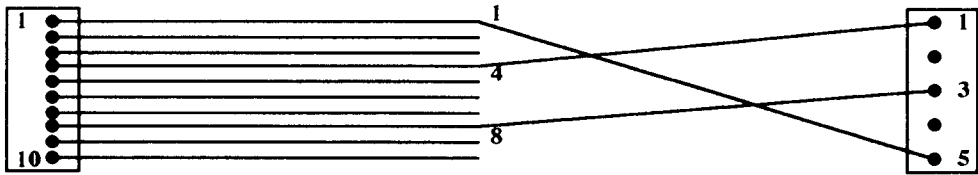


RÉALISATION DES LIAISONS N°1, N°2 & N°3 :

RÉALISATION DES LIAISONS N°1 & N°3 :

connecteur 10 points
identique à celui du
potentiomètre numérique.

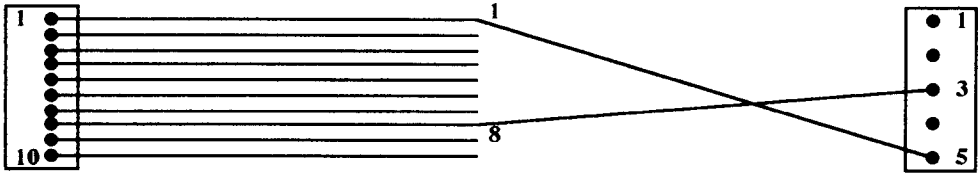
connecteur 5 points
identique à celui du
codeur du moteur.



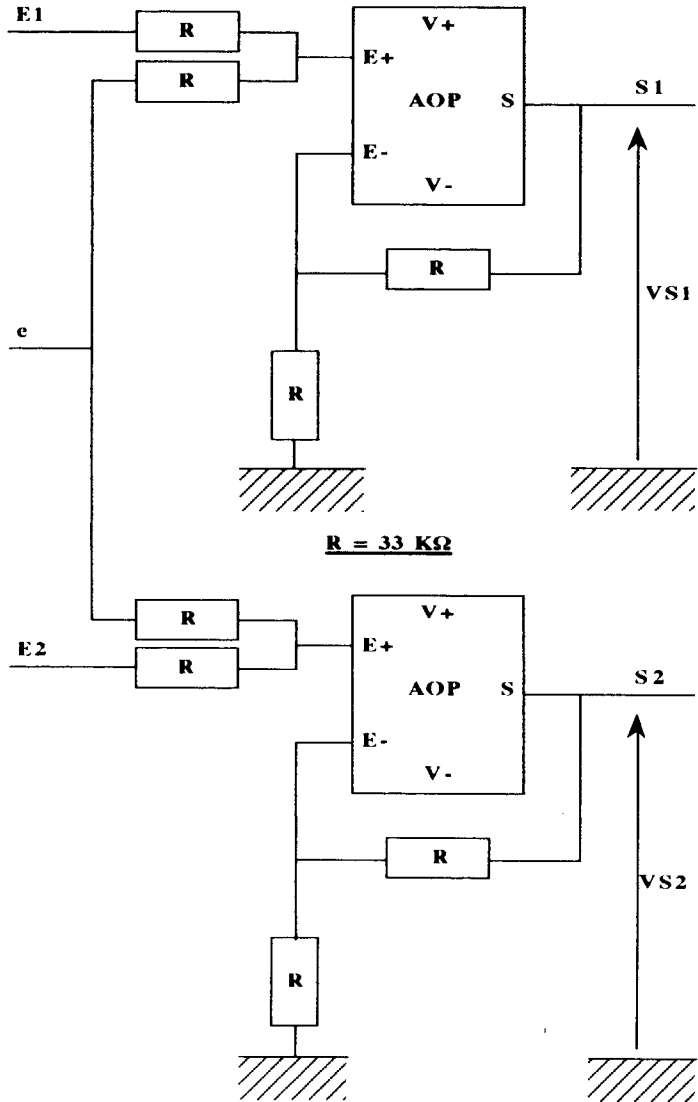
RÉALISATION DE LA LIAISON N°2 :

connecteur 10 points
identique à celui du
potentiomètre numérique.

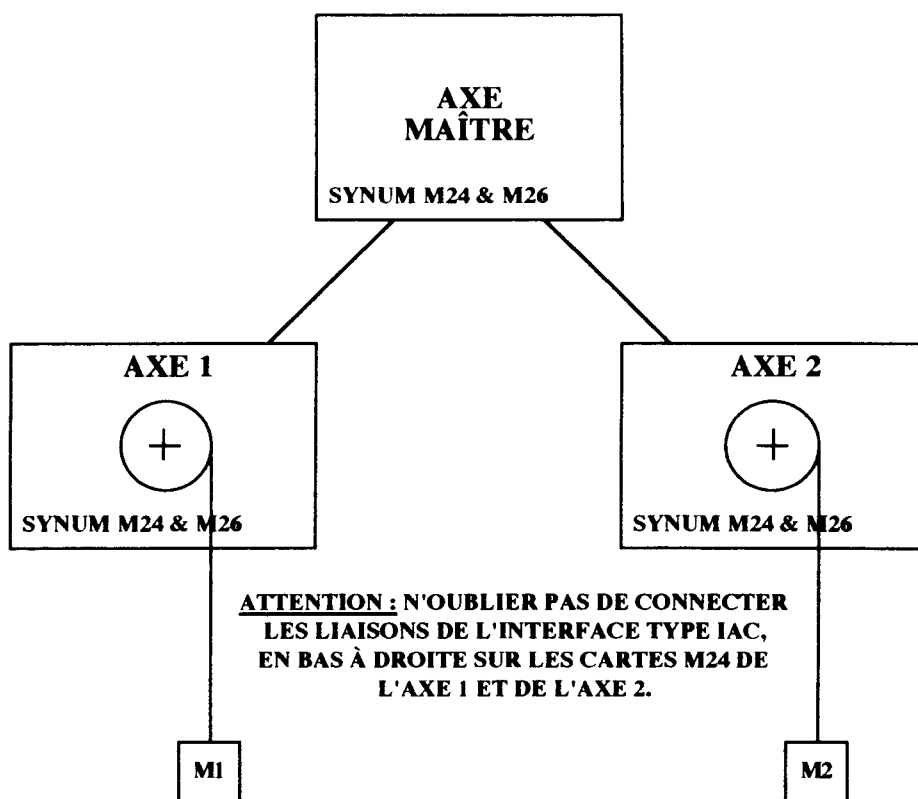
connecteur 5 points
identique à celui du
codeur du moteur.



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.

INTRODUCTION À LA METHODE DES PLANS D'EXPÉRIENCES PAR LA MÉTHODE TAGUCHI

Phases de mise en relation entre modélisation et expérimentation :

- 1- Prédétermination comportementale du système
- 2- Simulation numérique sur ordinateur
- 3- Plan d'expériences : Essais selon TAGUCHI
- 4- Confrontation entre :
 - le **Modèle** de comportement attendu et
 - le comportement **Réel**
- 5- Choix des paramètres de réglage pour optimisation des performances du système selon les critères choisis.

Etude réalisée sur l'axe "Z" de levage d'un magasin automatique pour stockage déstockage de pièces.

Jean-Claude CHAUVÉAU
Jean-Paul CHASSAING

LES PLANS D'EXPERIENCES

(DESIGNS of EXPERIMENTS)
La méthode du Docteur TAGUCHI

La méthodologie Taguchi de mise en oeuvre des plans d'expériences est l'un des outils de la qualité, au même titre que l'Analyse des Modes de Défaillance et l'Étude des Criticités (A.m.d.e.c) ou l'Analyse de la Valeur. Comme tout outil, elle n'a d'intérêt que si l'on sait s'en servir, ce qui suppose à la fois de connaître la méthode et de pouvoir cerner les cas où elle apporte un "plus" par rapport aux techniques traditionnelles.

I - INTRODUCTION

La démarche d'Assurance Qualité fait appel à la prévention et au progrès permanent dans les domaines de l'organisation de la qualité, de l'obtention des performances du produit et de la maîtrise des processus associés aux procédés industriels.

Le plan d'expériences peut aider à la conception et à l'industrialisation du produit, ainsi qu'à la résolution de problèmes complexes d'optimisation (réglages) lors de la production du produit. Il s'intègre donc parfaitement dans la démarche qualité.

Nous vous incitons vivement à mettre en oeuvre le plan d'expériences dans les différentes étapes industrielles de conception et de validation du produit.

Les résultats que vous attendez de ces étapes seront obtenus avec un maximum de rigueur et beaucoup plus rapidement qu'avec les méthodes traditionnelles, donc avec une efficience économique certaine.

II - PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE

A quoi sert un plan d'expériences ?

Vous êtes confrontés à un problème technique complexe : de multiples paramètres sont susceptibles d'influer sur la performance du système étudié. La performance que vous cherchez à améliorer est caractérisée par une ou plusieurs réponses.

Quels sont les paramètres responsables des variations observées ?
Telle est la question.

Le plan d'expériences sert à mettre en évidence et à quantifier l'influence des paramètres pris en compte.

Vous devez mettre en oeuvre une série d'essais physiques ou une série de calculs numériques. C'est souvent le cas si vous vous trouvez dans un des contextes suivants :

- études techniques ;
- optimisation de processus ;
- études de moyens de fabrication ;
- amélioration de capacité machine ;
- essais de mise au point ;
- essais d'endurance ;
- essais de laboratoire ;
- etc.

Mais quelles expériences réaliser pour obtenir les informations recherchées ?

Un plan d'expériences est une suite d'essais organisée à l'avance de manière à déterminer en un minimum d'essais et avec un maximum de précision l'influence de multiples paramètres sur une ou plusieurs réponses.

Conditions d'application

Pour appliquer la méthode avec succès, il faut :

- créer un groupe pluridisciplinaire constitué de personnes compétentes, concernées et motivées : ne pas oublier les expérimentateurs ;
- associer un animateur formé à la méthode à un pilote, responsable technique du sujet traité ;
- être en mesure d'expérimenter, de maîtriser les valeurs à donner aux paramètres et de mesurer avec précision la ou les réponses. La méthode devient lourde à utiliser lorsque les paramètres pris en compte sont trop nombreux (néanmoins il est rare que plus de 15 paramètres influencent grandement les réponses du système) ;
- établir une stratégie expérimentale (série de plans) en fonction des objectifs fixés, des moyens disponibles et du délai accordé à l'étude ;
- respecter scrupuleusement la démarche décrite ci-après.

Démarche

Les étapes sont les suivantes :

1. formaliser le problème, si possible au moyen d'un modèle graphique ;
2. sélectionner les paramètres, fixer leurs modalités (niveau de variations des paramètres) et sélectionner leurs interactions ;

3. construire le plan en fonction des tables de Taguchi ;

4. réaliser les essais ;

5. analyser les résultats ;

6. conclure après choix du réglage des paramètres qui peuvent être maîtrisés et essai de confirmation.

ÉTAPE 1 : FORMALISER LE PROBLEME

Identifier le problème : est-ce un dysfonctionnement “produit” et/ou “processus”, un taux de rebut important, une performance insuffisante, une mise au point à réaliser?

Quantifier l'objectif à atteindre en définissant une ou plusieurs réponses. Les réponses étant définies, comment les mesurer ?

- Qui mesure ?
- Que mesure-t-on ?
- Où le fait on ?
- Quand le fait-on ?
- Comment le fait-on ?

Les différentes mesures peuvent être :

- une grandeur quantitative (une longueur, un poids, une dureté, une force...) ;
- un pourcentage (un taux de rebut ...) ;
- un classement ;
- une cotation (un démerite ...)
- etc. .

ÉTAPE 2 : SÉLECTIONNER LES PARAMÈTRES

Fixer leurs modalités et sélectionner leurs interactions.

Le groupe doit identifier les paramètres, qualitatifs ou quantitatifs, à priori responsables des variations des réponses. La manière de procéder est la suivante :

- recenser tous les paramètres possibles (Remue-méninges, diagramme causes-effet (Ishikawa), ADMEC, ...) ;
- sélectionner les paramètres à priori les plus influents pour l'étude, par élimination successive ;
- choisir le nombre de modalités et leurs valeurs pour chacun des paramètres retenus ;
- sélectionner les interactions à priori les plus influentes ;
- déterminer les conditions d'essais : les paramètres listés mais non retenus seront

maintenus constants au cours des essais. La façon de réaliser les essais sera établie et figée.

C'est l'expérience acquise par chacun des membres du groupe qui est utilisée lors de cette étape.

A ce stade, il faut vérifier l'opportunité d'un plan d'expérience :

- l'influence des paramètres est-elle vraiment méconnue, mal quantifié (problème de type "boîte noire") ?
- est-il possible de maîtriser les paramètres au cours des essais ?

Si non, les informations issues des étapes 1 et 2 permettent de s'orienter vers d'autres méthodes : méthode de résolution de problèmes, analyses de données...

ÉTAPE 3 : CONSTRUIRE LE PLAN

Un plan d'expériences évite de combiner toutes les modalités de tous les paramètres. Les plans les plus courants sont répertoriés dans un ensemble de tables disponibles en standard (Cf tables de Taguchi données en annexe 1).

Le nombre de paramètres, de modalités par paramètres et le nombre d'interactions permettent de trouver le plan le mieux adapté au problème à résoudre.

Les paramètres sont affectés aux colonnes en tenant compte des interactions et des paramètres difficiles à faire varier.

ÉTAPE 4 : RÉALISER LES ESSAIS

Il s'agit de reproduire sur le produit et/ou le processus chaque combinaison du plan d'expériences et pour chacune d'entre elles de consigner la ou les réponses dans un tableau. Un soin particulier doit être apporté à la réalisation de ces essais (grande rigueur, respect de la gamme d'essais, relevé des conditions expérimentales.)

Il faut réaliser tous les essais prévus. Il est impossible de s'arrêter sous peine de perdre le bénéfice de l'étude.

ÉTAPE 5 : ANALYSER LES RÉSULTATS

Il existe deux analyses complémentaires.

L'analyse graphique :

Elle donne une représentation simple des résultats. Elle permet de visualiser l'influence des paramètres et de leurs interactions (c f. **annexe n°1**).

L'analyse statistique :

L'analyse de la variance vise à distinguer, dans les variations globales de la réponse, la part due à l'influence réelle des paramètres de la part due au hasard.

Cette analyse :

- complète l'analyse graphique ;
- donne un taux de confiance statistique aux résultats ;
- chiffre la contribution de chaque paramètre à la variation globale de la réponse ;
- quantifie la part du résidu, c'est-à-dire ce qui a varié à l'insu de l'expérimentateur.

ÉTAPE 6 : CONCLURE

L'objectif de cette dernière étape est de faire la synthèse des résultats obtenus et de décider des actions à entreprendre (réglages des paramètres ou reconception).

L'essai de confirmation doit permettre la décision à entreprendre soit :

- > accepter le niveau de qualité obtenu après réglage,
- > mettre en oeuvre un nouveau plan pour améliorer le résultat,
- > changer de stratégie d'analyse ou de conception du procédé.

Le plan d'expériences est un réflexe à acquérir.

Dans la démarche habituelle, l'expérimentateur progresse pas à pas et s'arrête sur la première solution satisfaisante.

A l'opposé, un plan d'expériences permet de mieux comprendre les phénomènes :

- l'influence des paramètres est quantifiée ;
- les paramètres sont hiérarchisés ;
- leur sens de variation est connu ;
- les interactions sont mises en évidence ;
- les réponses sont modélisées.

Ces connaissances permettent d'optimiser le système étudié et d'enrichir la base de données.

Ultérieurement, les informations recueillies pourront orienter d'autres études.

Toutes ces raisons contribuent au développement des plans d'expériences dans le monde industriel.

III - EXEMPLE D'APPLICATION EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

Campagne d'essais pour un réglage optimal de l'axe Z d'un système de magasin automatisé : Transgerbeur

Problème posé :

Il s'agit de réaliser les essais qui mettront en évidence l'influence des paramètres (de configuration et de réglage) sur le comportement du sous-système de levage (axe Z).

Les paramètres sont accessibles au régleur par mots implantés en mémoire dans l'automate programmable et par réglage du variateur de vitesse dédié au moteur électrique de l'axe Z.

Les paramètres accessibles par programme concernant :

---> l'accélération souhaitée durant la phase de mise en vitesse	variable Acc
---> la vitesse nominale souhaitée en atteinte de palier vitesse	variable Vp
---> la distance à partir de laquelle on commence le ralentissement	variable K4

Les paramètres accessibles par réglage du variateur concernant :

---> le courant maximum admissible par le moteur	variable I max
---> le gain proportionnel et intégral (P.I)	variable gain

Le but recherché est d'obtenir le déplacement le plus rapide possible pour aller d'un point à un autre en respectant le profil de vitesse donné par la loi de commande.

Dans cette perspective la campagne de huit essais (table de Taguchi L 8) doit permettre de déterminer le meilleur compromis de réglage.

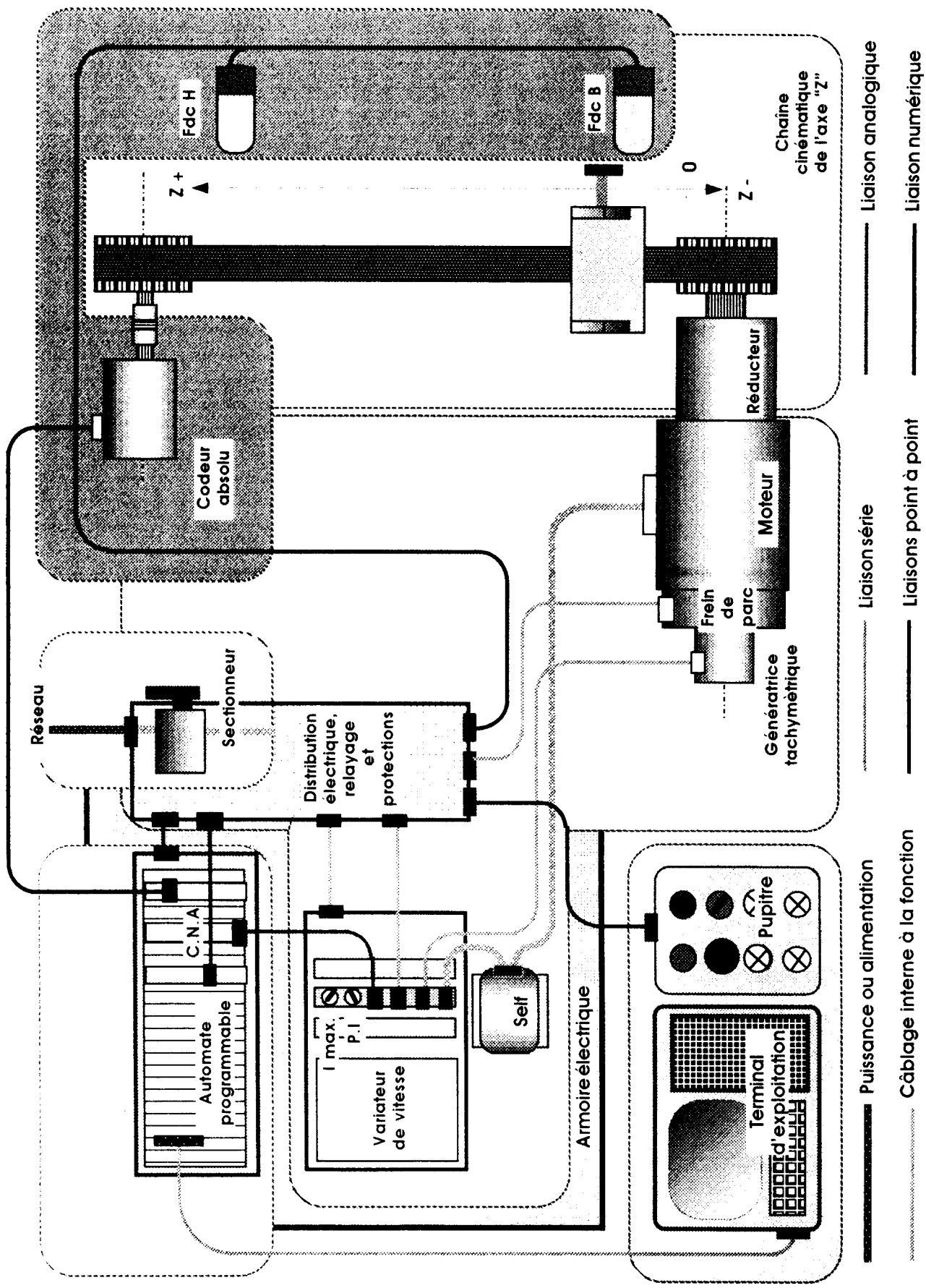
On décide de faire varier chaque facteur entre deux niveaux (N1 et N2) dans l'ordre indiqué par le plan d'expériences et on observe les réponses en regard de ces réglages pour chacun des essais.

Les réponses sont caractérisées par les observations et mesures suivantes:

---> l'erreur de traînage notée	Et
---> le dépassement de vitesse nominale notée	Ed
---> l'oscillation maximale au voisinage de l'arrêt	Ee
---> le temps total mis pour passer d'une position à une autre	T

Le meilleur réglage vise à minimiser Et, Ed et Ee pour un temps minimum de déplacement du mobile en levage.

Les comportements sont quantifiés sur les oscillogrammes enregistrés à la table traçante à partir des mesures de Et, Ed, Ee et T (voir figure page suivante) .

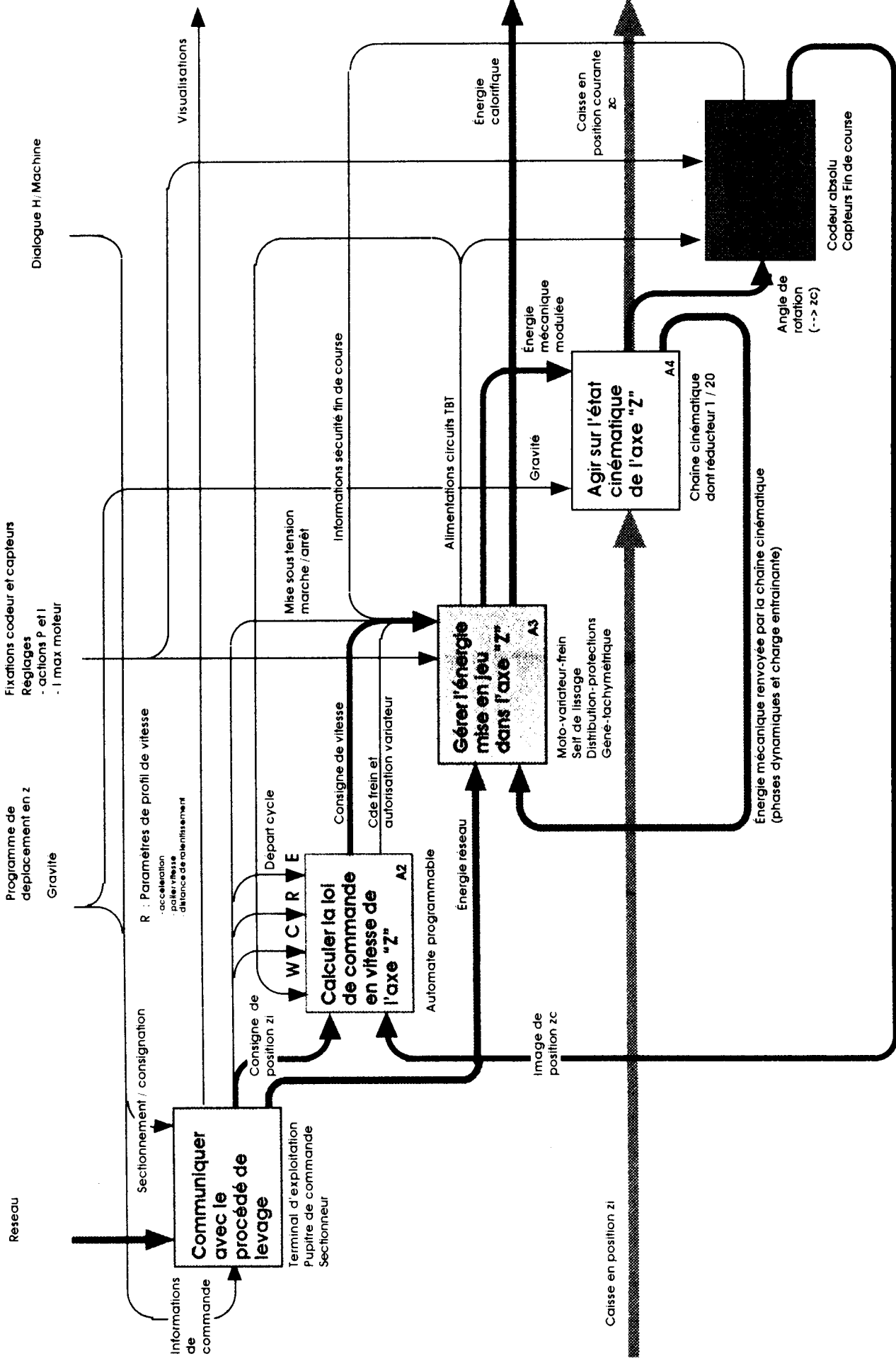


APPROCHE FONCTIONNELLE A0

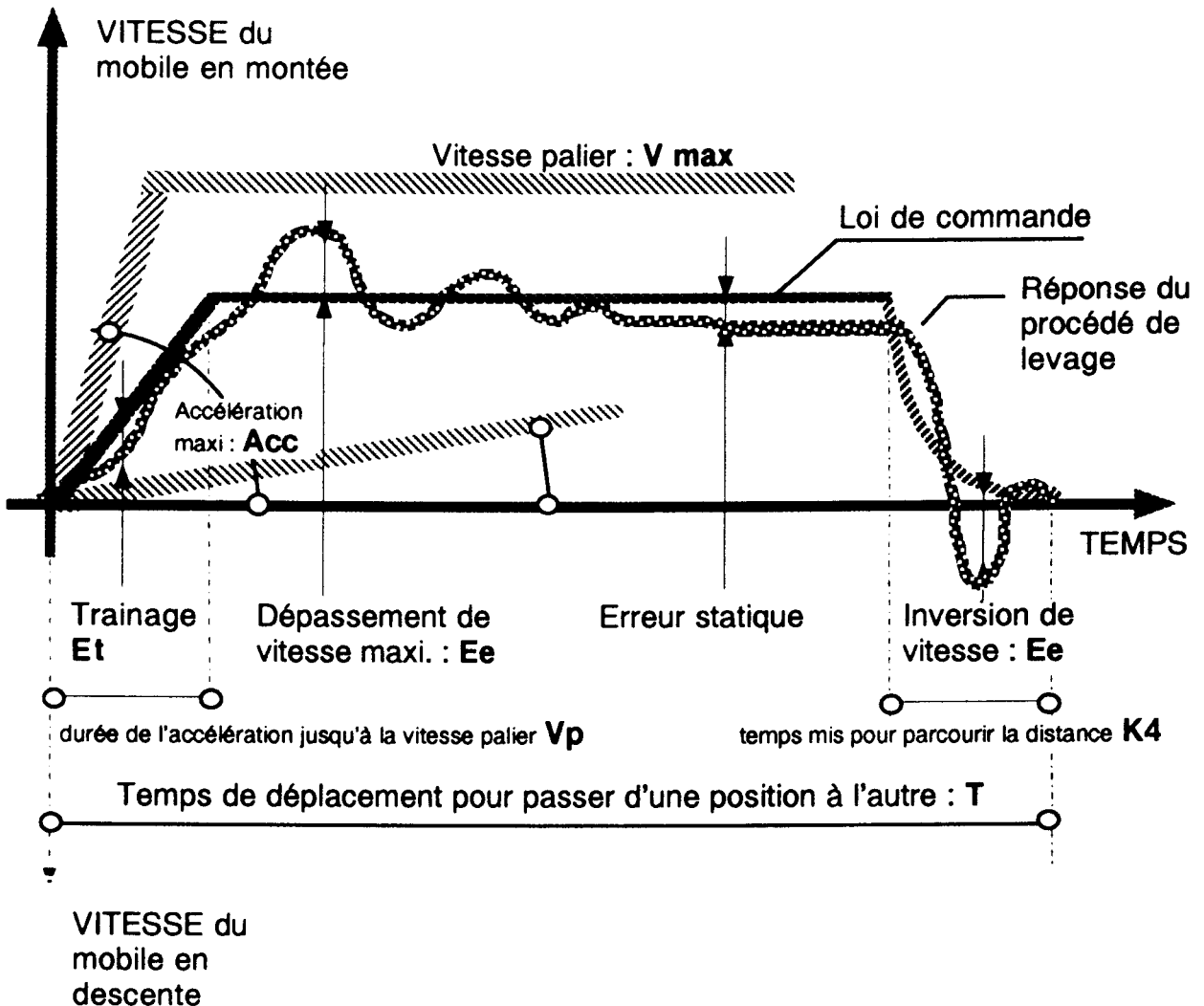
Boucle d'asservissement en position

Chaîne de transformation de l'énergie

Transformation cinématique



Identification des variables de réglage et du comportement de l'axe "Z" en montée (réponses possibles pour T, Et, Ed et Ee).



Nota :

Le réglage du procédé est à réaliser en montée pour la charge nominale de 10 Kilogrammes.

Pour optimiser le fonctionnement et obtenir un temps de cycle minimal, tout en respectant la loi de commande, les paramètres choisis, après réglage en montée, seront testés en descente. Si les valeurs choisies en montée ne conviennent pas il sera nécessaire de faire une nouvelle campagne d'essais en descente.

Voir les relevés effectués et les décisions de réglage sur documents en **annexe n°2**.

Voir également la transposition de la méthode de réglage à un sous-système de conditionnement de flacons pour machine industrielle.

- Formuler clairement le problème étudié
Fixer les objectifs
- Faire la synthèse des connaissances
- Lister les facteurs susceptibles d'avoir de l'influence, les réponses et les contraintes ; définir le domaine expérimental d'intérêt
- Etablir une stratégie expérimentale ou plan d'expérimentation
- Effectuer les expériences
- En déduire les réponses aux questions posées

En conclusion, et bien que ce soit difficile à admettre :

« il n'y a aucune information dans le résultat d'une expérience et toute l'information est contenue dans les conditions expérimentales » (matrice d'information de Fisher)

« la qualité de l'information ne dépend pas du nombre d'expériences ».

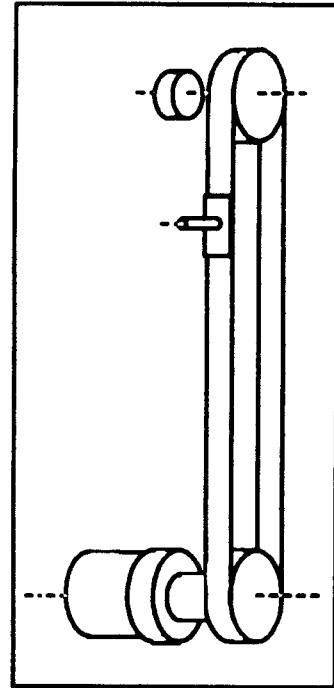
AXE Z

Modélisation et optimisation des performances

1. Présentation du système

Le système comporte 4 parties :

- mécanique : réducteur et entraînement par courroie crantée
- électrique : moteur à courant continu à aimants permanents
- « : variateur 4 Q
- « : calculateur (automate)



2. Modélisation

2.1 Motorisation

Moteur à courant continu :

$U_n = 55V$, $I_n = 7A$, $N_n = 3000 \text{ tr/min}$, $K_t = K_e = 0,146$
 $L = 5,5 \text{ mH}$, $R = 0,56 \Omega$, $J_t = 0,5 \text{ mKg.m}^2$

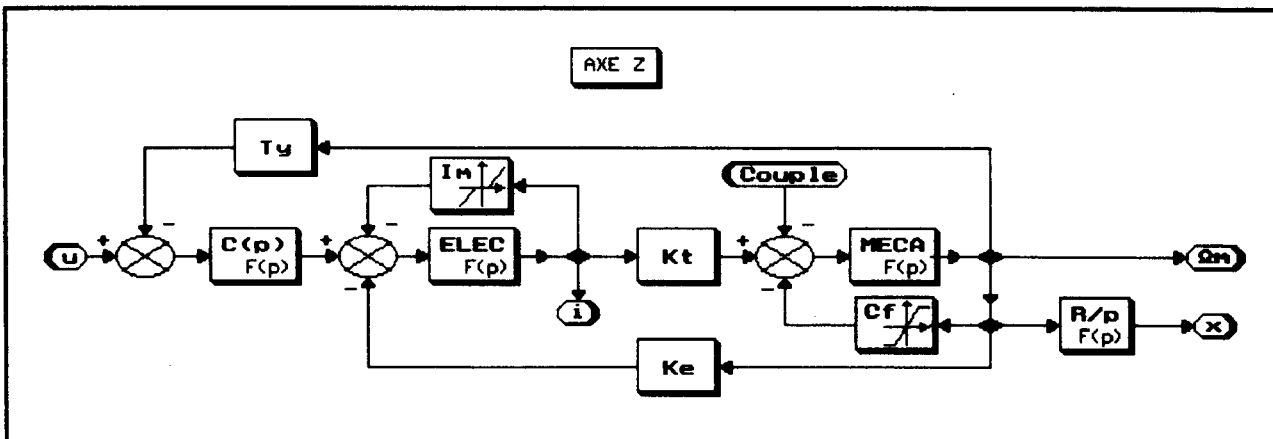
Réducteur : 1/20, \varnothing poulie = 0,070 m

Couple de frottement sec : 0,1 Nm, Coefficient de frottement visqueux : 0,0005 Nm/rd/s

Génératrice tachymétrique : 60 mV/tr/min

Codeur incrémental de position : résolution 1mm

2.1.2 Schéma de simulation de la motorisation



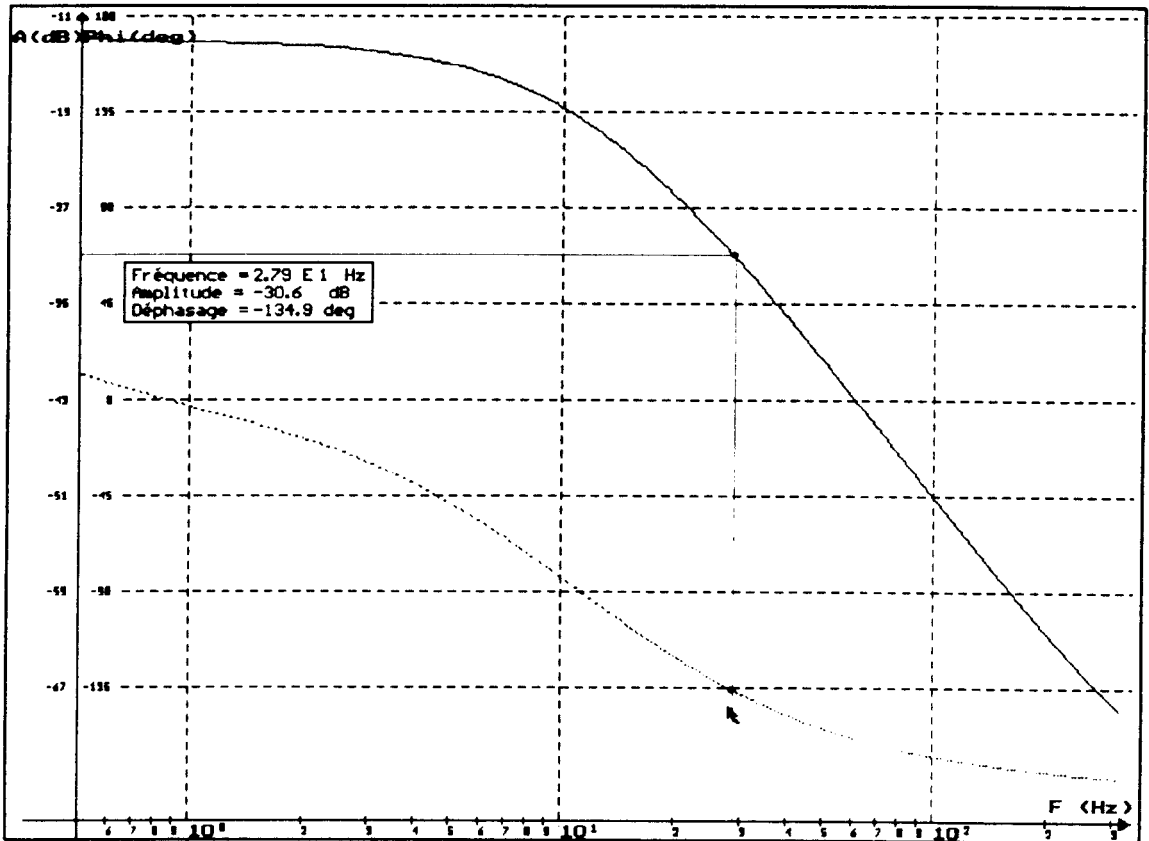
Le bloc I_m simule la limite de courant (fonction seuil $G = 200$, seuil = $\pm I_m$)

2.1.3 Première approche

Il s'agit de régler le correcteur **PI** de la boucle de vitesse par une méthode classique :

- relevé du diagramme de **Bode** de la motorisation en boucle ouverte
- mesure de la pulsation et du gain correspondant à la marge de phase de 45°
- placement du **PI** à une décade de la pulsation critique

Tracé du diagramme de Bode de la motorisation en boucle ouverte



sur ce diagramme on relève : gain = -30,6 dB et $\omega = 175$ rd/s, on peut donc régler le gain du **PI** à 30dB ($A \approx 30$) et $\tau = 10 / \omega = 5$ ms .

$$C(p) = 30 \frac{1 + 0,005p}{0,005p}$$

**** remarque**

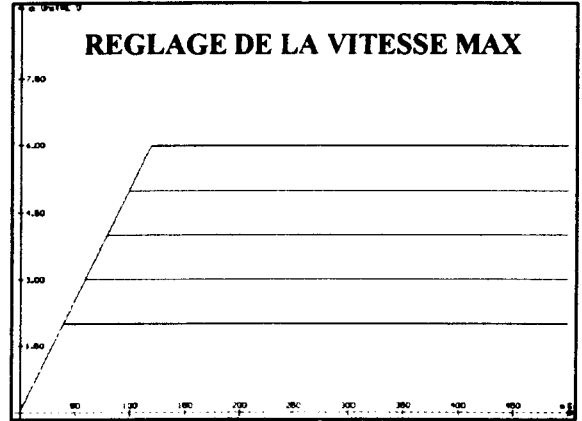
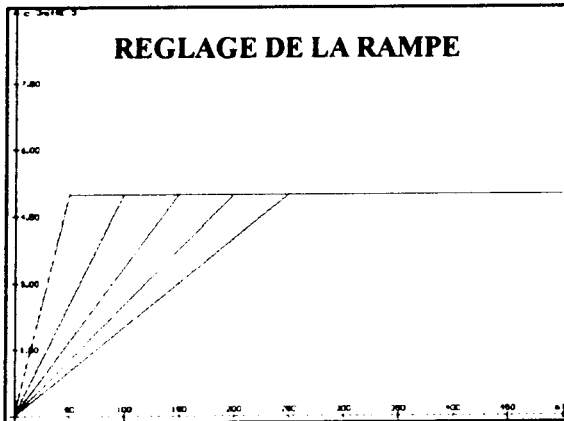
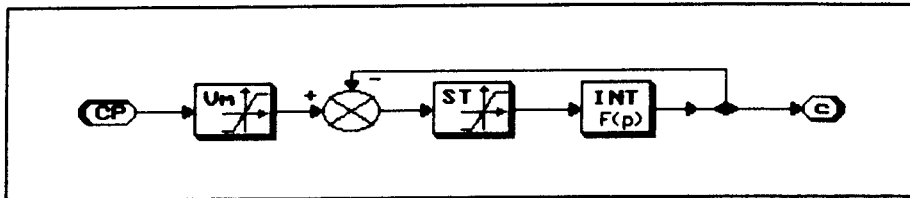
Pour tracer le diagramme de **Bode**, penser à ôter les non-linéarités

2.2 Le variateur et le générateur de rampe

2.2.1 Le variateur est un hacheur 4 Q alimenté sous 60 V. La fréquence de découpage étant grande devant la fréquence de coupure du système, on l'assimilera à un gain pur.

2.2.2 La consigne indicielle est transformée en rampe pour régler l'accélération et celle-ci est limitée en tension pour obtenir la vitesse désirée.

2.2.3 Schéma du générateur de rampe :



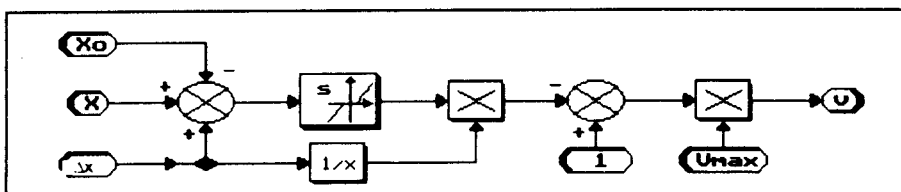
2.3 Le calculateur (automate programmable)

2.3.1 Obtention de la loi de vitesse d'approche.

A partir d'un point x_1 distant de Δ_x de l'arrivée x_0 , la vitesse décroît linéairement de V_{max} à la vitesse nulle.

$$v = V_{max} \frac{x_0 - x}{x_0 - x_1} = V_{max} \frac{x_0 - x}{\Delta_x}$$

2.3.2 Schéma du calcul de v

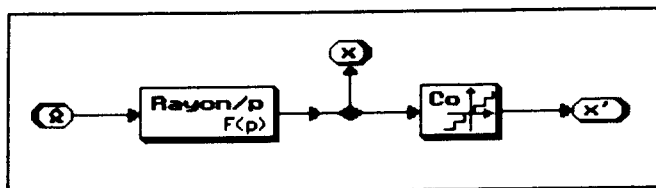


En sortie du premier sommateur nous avons : $s_1 = x + \Delta_x - x_0$. Si cette somme est ≥ 0 la fonction seuil est passante d'où $s_2 = \frac{x_0 - x + \Delta_x}{\Delta_x}$

$$\text{et } v = V_{\max} \left(\frac{x_0 - x + \Delta_x}{\Delta_x} \right) - 1 = \frac{x_0 - x}{\Delta_x} \cdot V_{\max}$$

2.4 Passage vitesse / position et codeur

2.4.1 Schéma de simulation

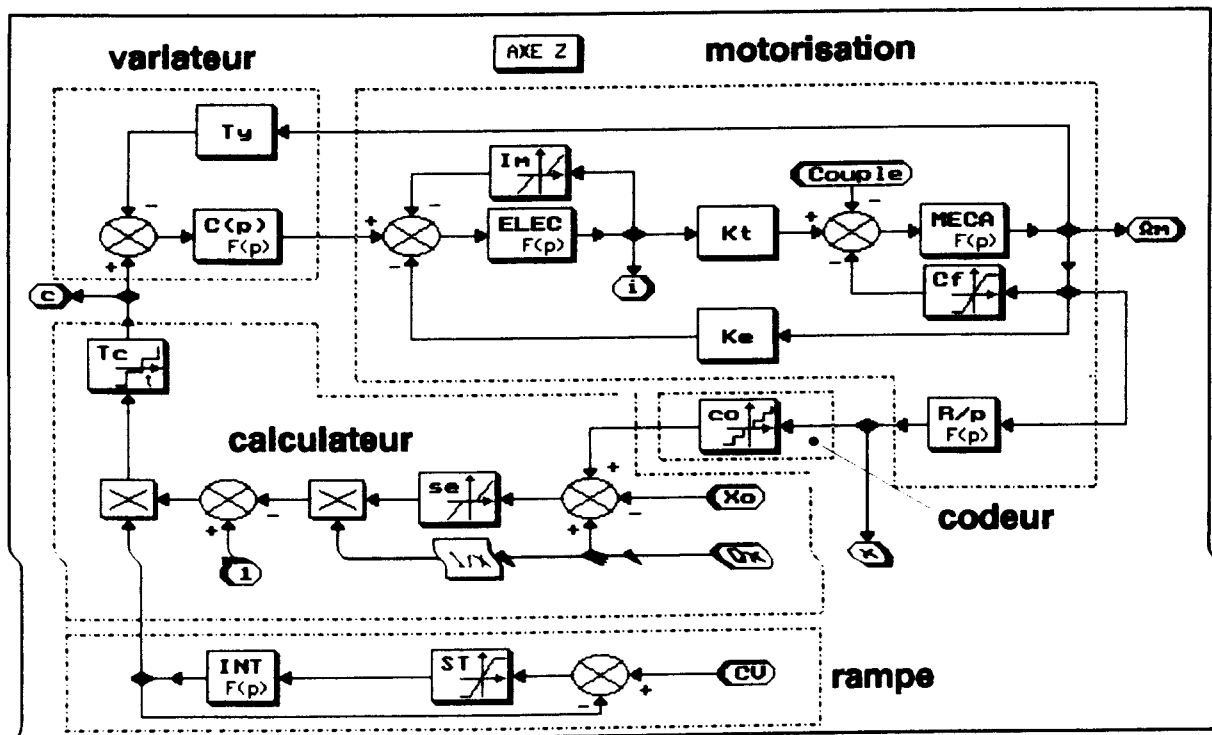


La fonction **Rayon / p** inclut le réducteur d'un 20^{ème} et le passage vitesse / position

$$x(p) = \frac{0,00175}{p} \cdot \Omega(p)$$

La fonction **Co** représentant le codeur est une fonction **discretiseur** de pas 1mm

2.5 Schéma de simulation de l'ensemble



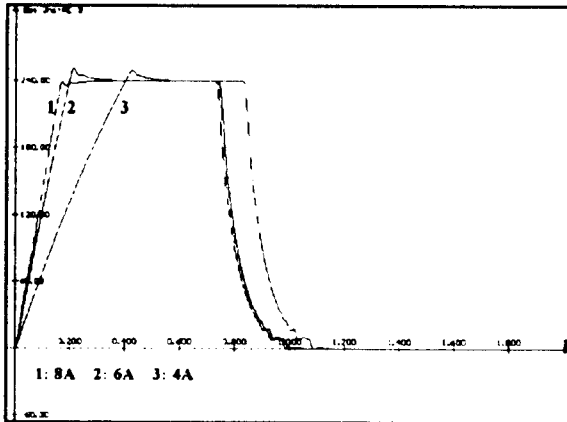
3. Optimisation

3.1 Influence des paramètres

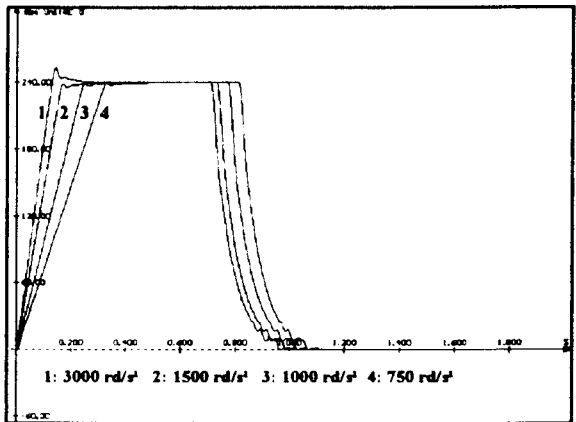
5 paramètres sont accessibles :

I_{max}	courant maximal	valeur des seuils de la fonction I_m
V_{max}	vitesse maximale	valeur de l'entrée CV
Acc	accélération	valeur de la constante de temps de INT
G	gain du PI vitesse	valeur du gain de C(p)
Δ_x	Ecart $x_0 - x_1$	valeur de l'entrée Dx

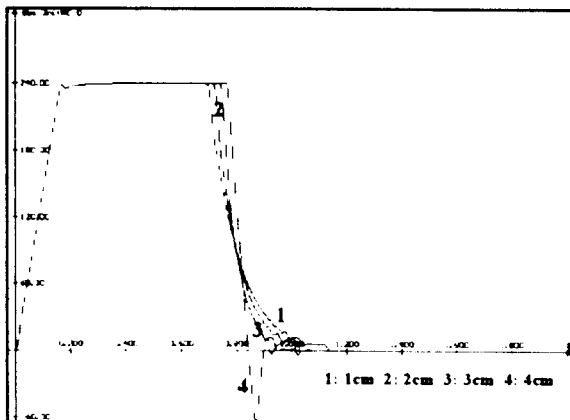
3.1.1 Influence du courant maximal



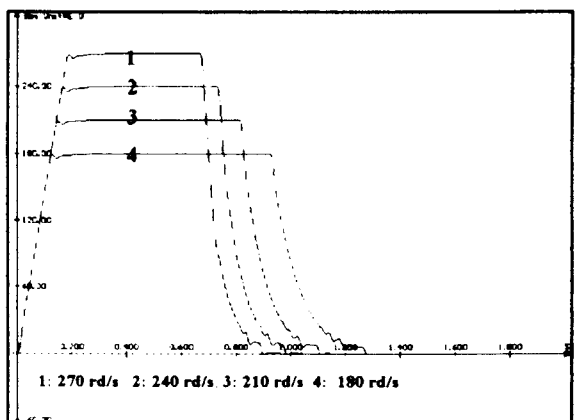
3.1.2 Influence de l'accélération



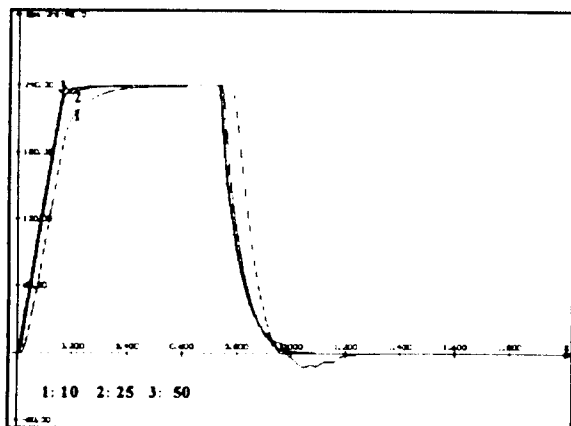
3.1.3 Influence de l'écart Δ_x



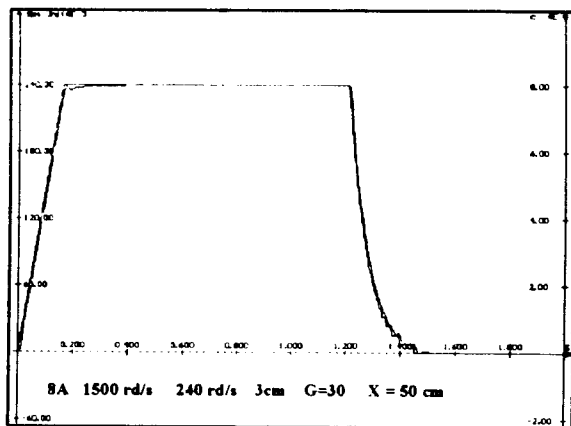
3.1.4 Influence de la vitesse maximale



3.1.5 Influence du gain du correcteur P.I.



3.1.6 Réglage moyen



3.2 Optimisation par la méthode du plan d'expérience (Méthode de Taguchi).

Nous choisirons la matrice orthogonale $L8 (2^7)$ en donnant 2 valeurs possibles à chaque facteur.

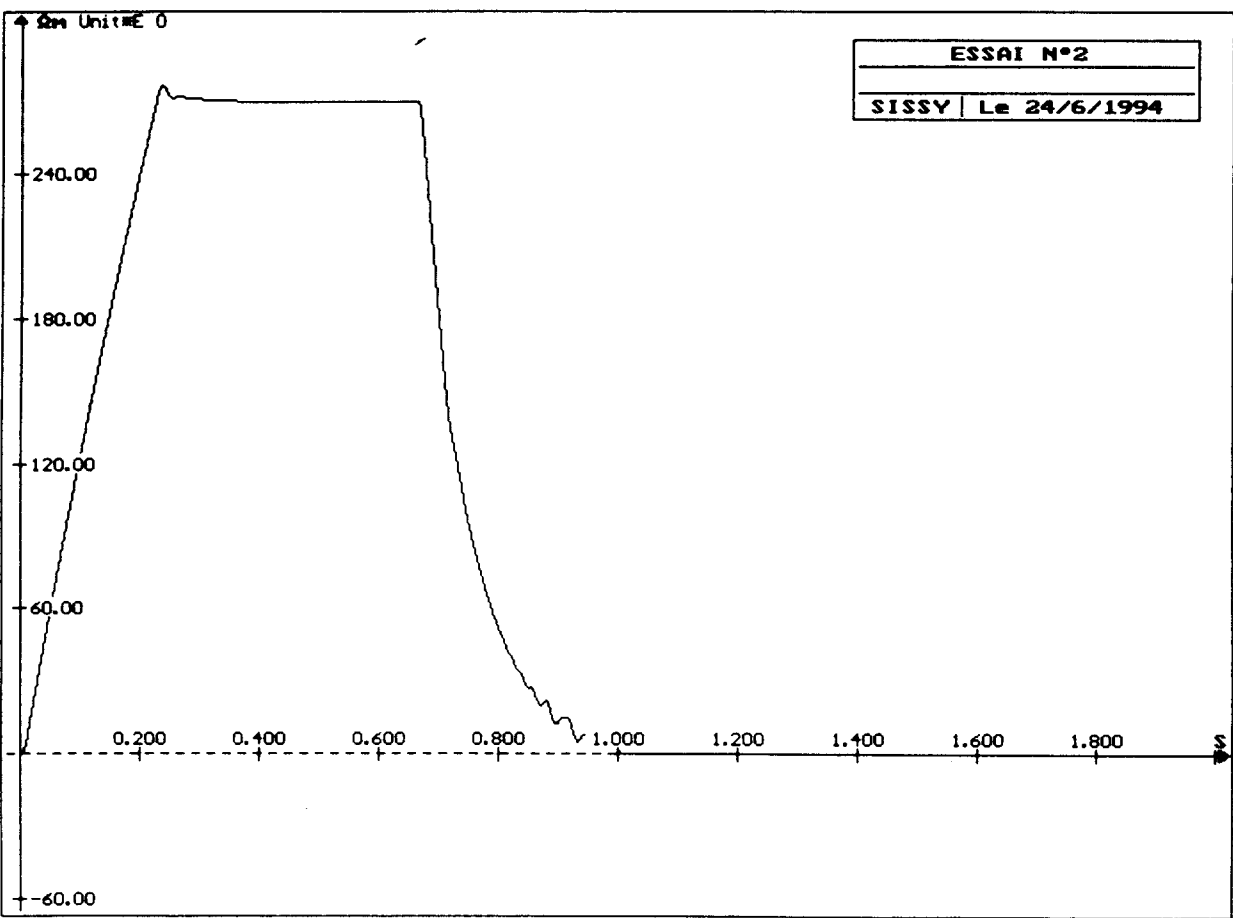
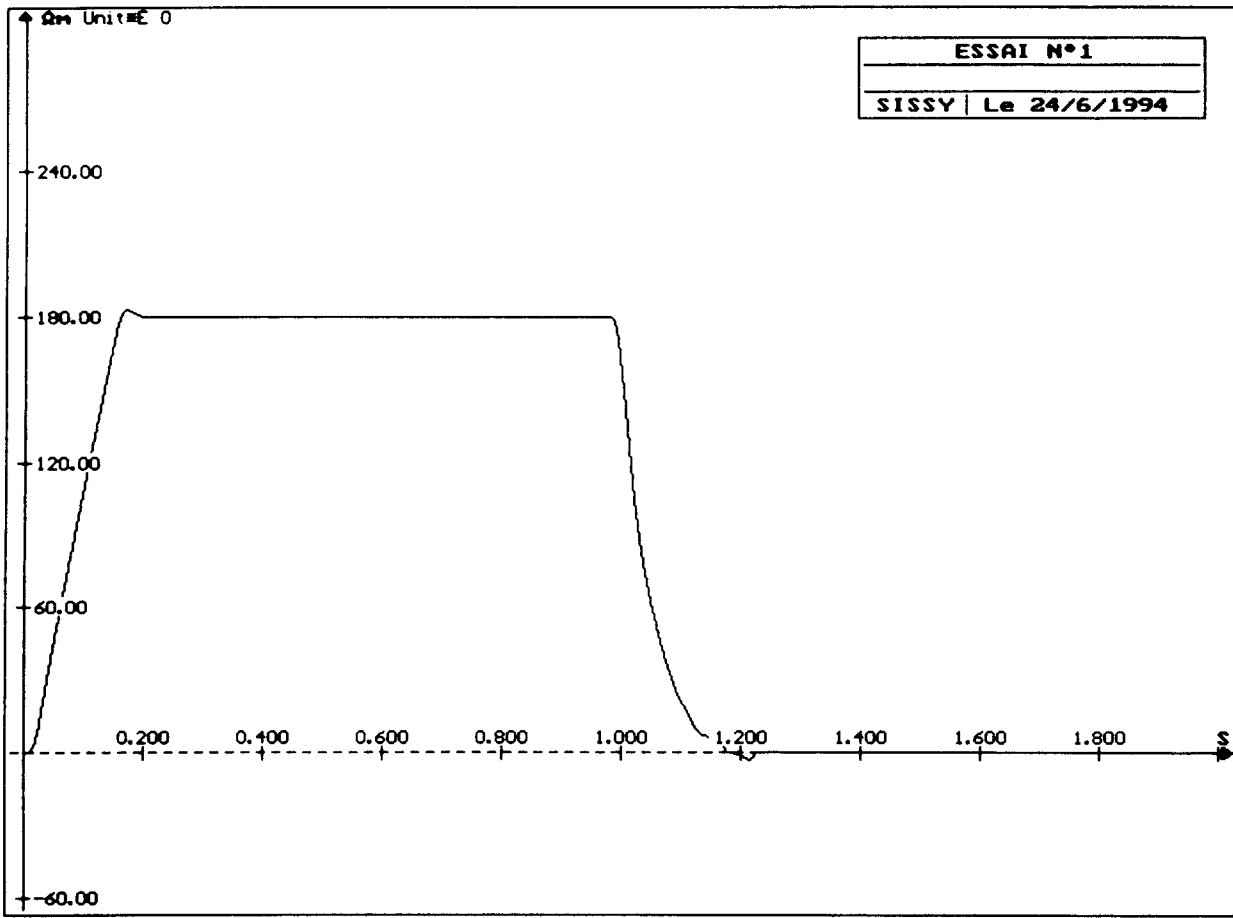
N°		1	2	3	4	5	6	7
		A	B	A-B	C	A-C	C-B	D
1		1	1	1	1	1	1	1
2		1	1	1	2	2	2	2
3		1	2	2	1	1	2	2
4		1	2	2	2	2	1	1
5		2	1	2	1	2	1	2
6		2	1	2	2	1	2	1
7		2	2	1	1	2	2	1
8		2	2	1	2	1	1	2

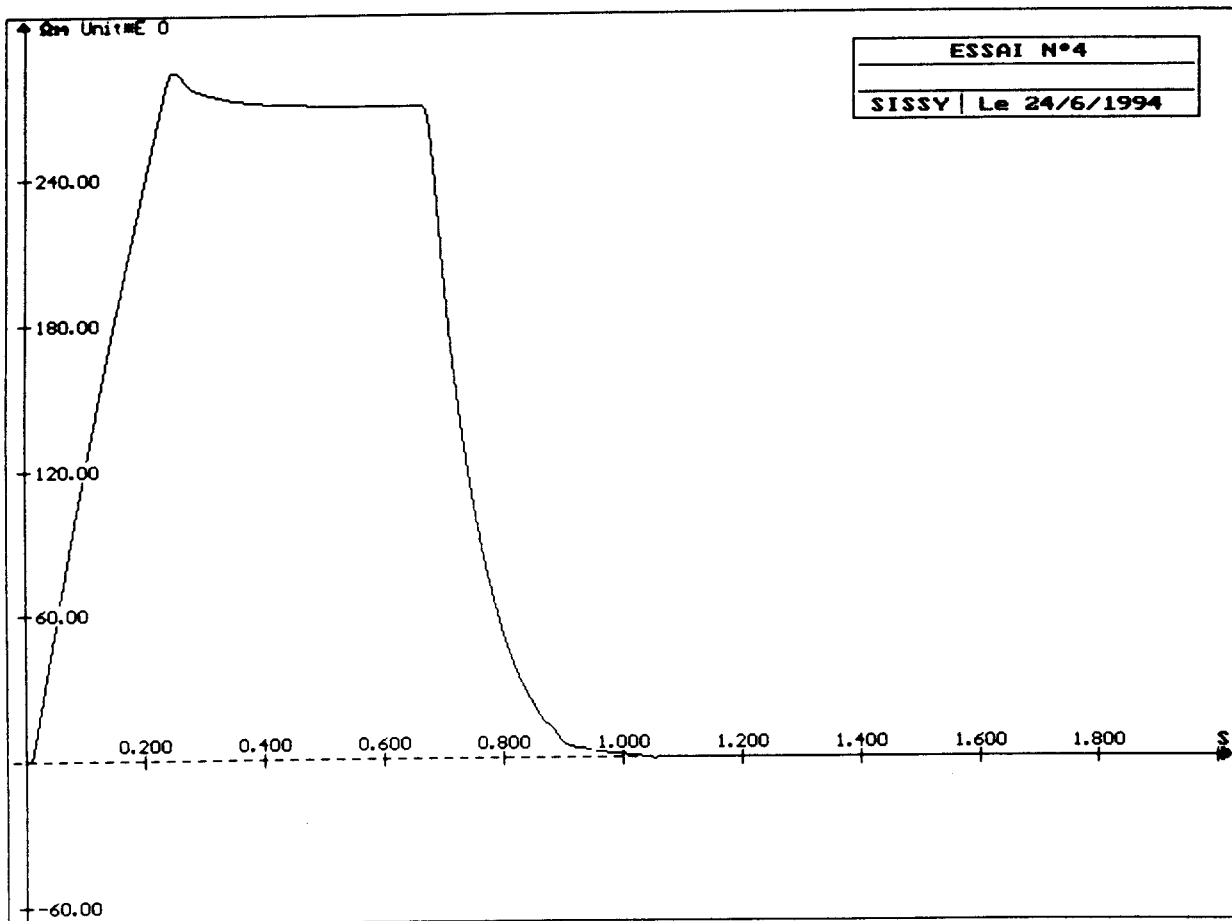
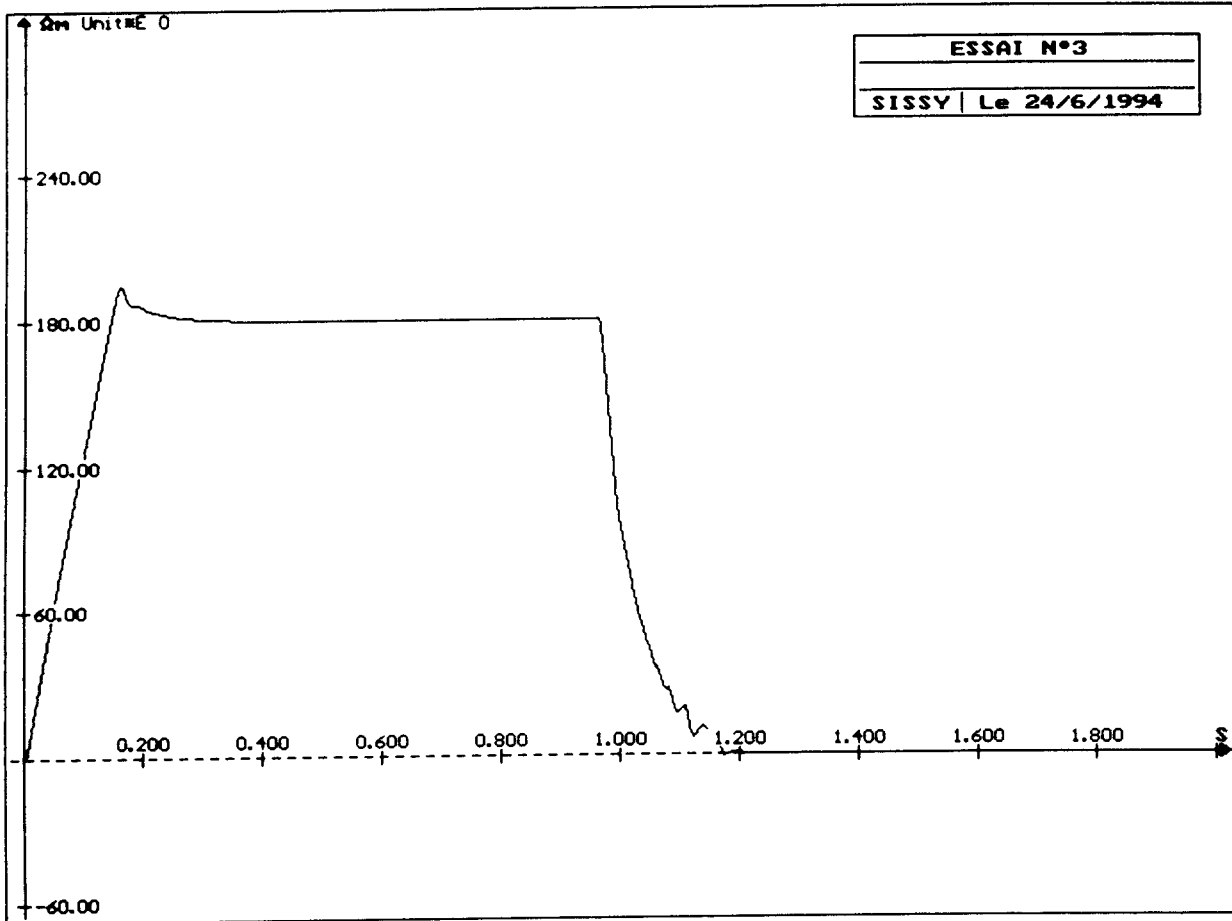
Tableau des essais

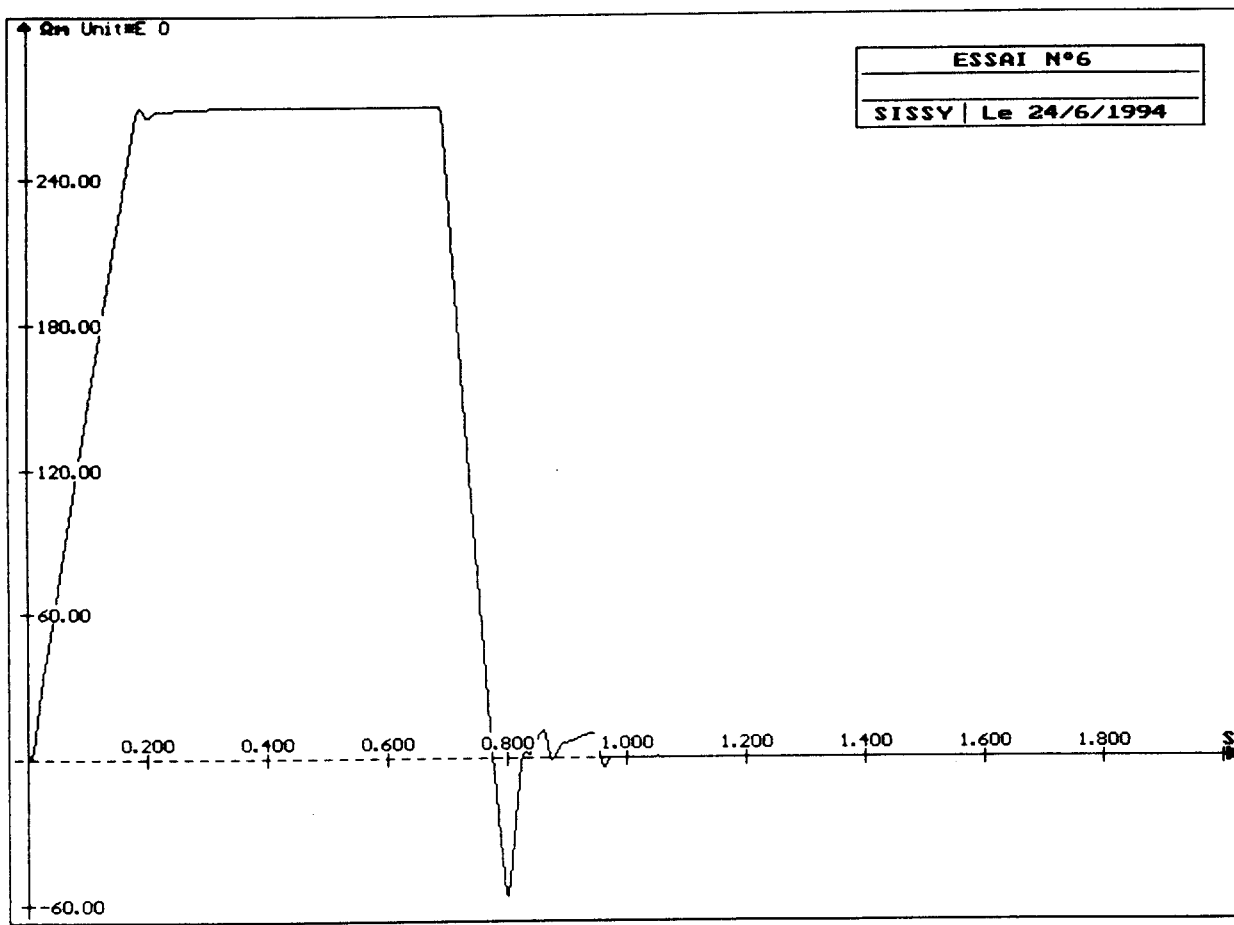
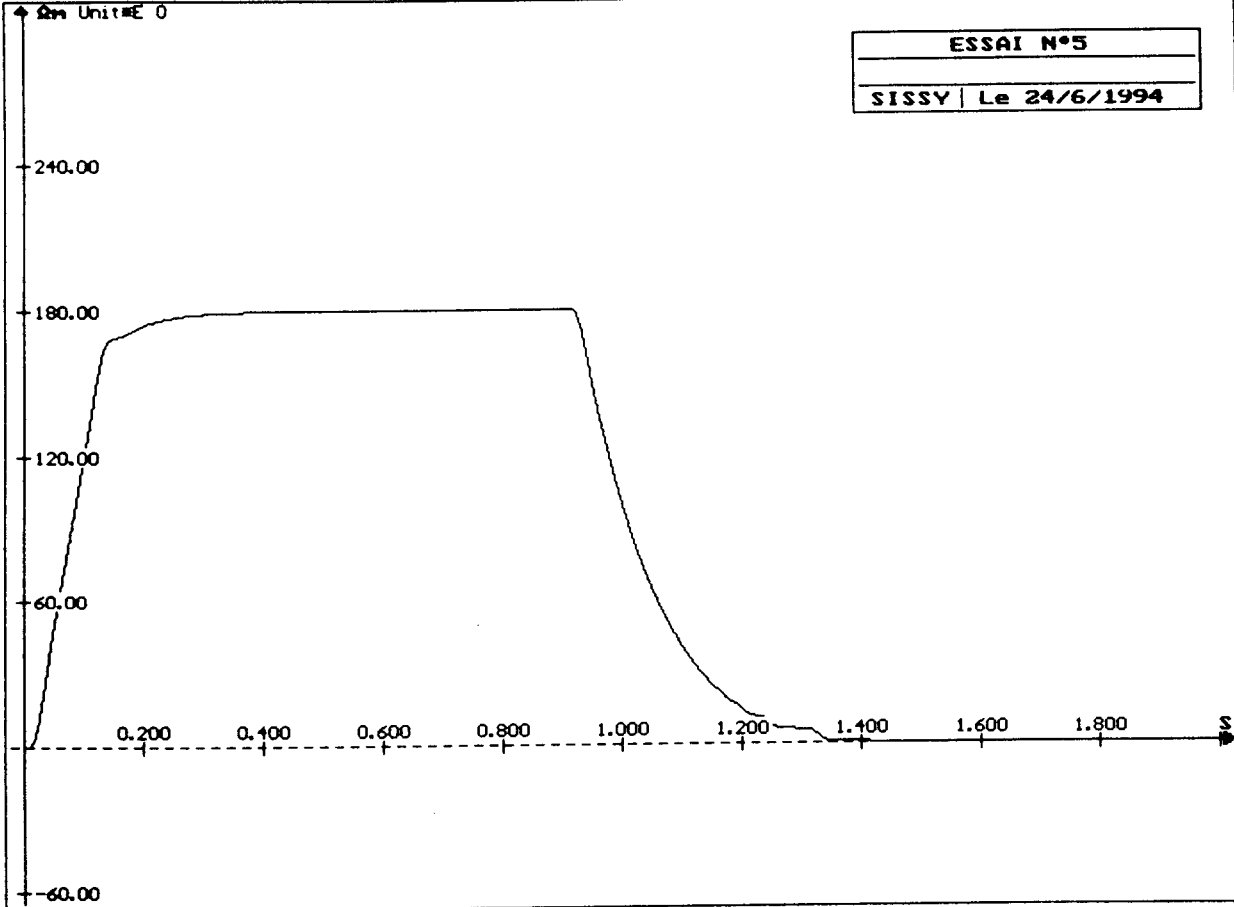
N°	1	2	4	5	6				
	I	Acc	V	Dx	G		D%	X%	t
1	6	1500	180	0,020	10		2	5	1,22
2	6	1500	270	0,040	40		4	0	1,00
3	6	3000	180	0,020	40		8,5	0	1,20
4	6	3000	270	0,040	10		6	0	1,05
5	8	1500	180	0,040	10		0	0	1,40
6	8	1500	270	0,020	40		0	22	0,98
7	8	3000	180	0,040	40		8,5	0	1,40
8	8	3000	270	0,020	10		6	27	0,90

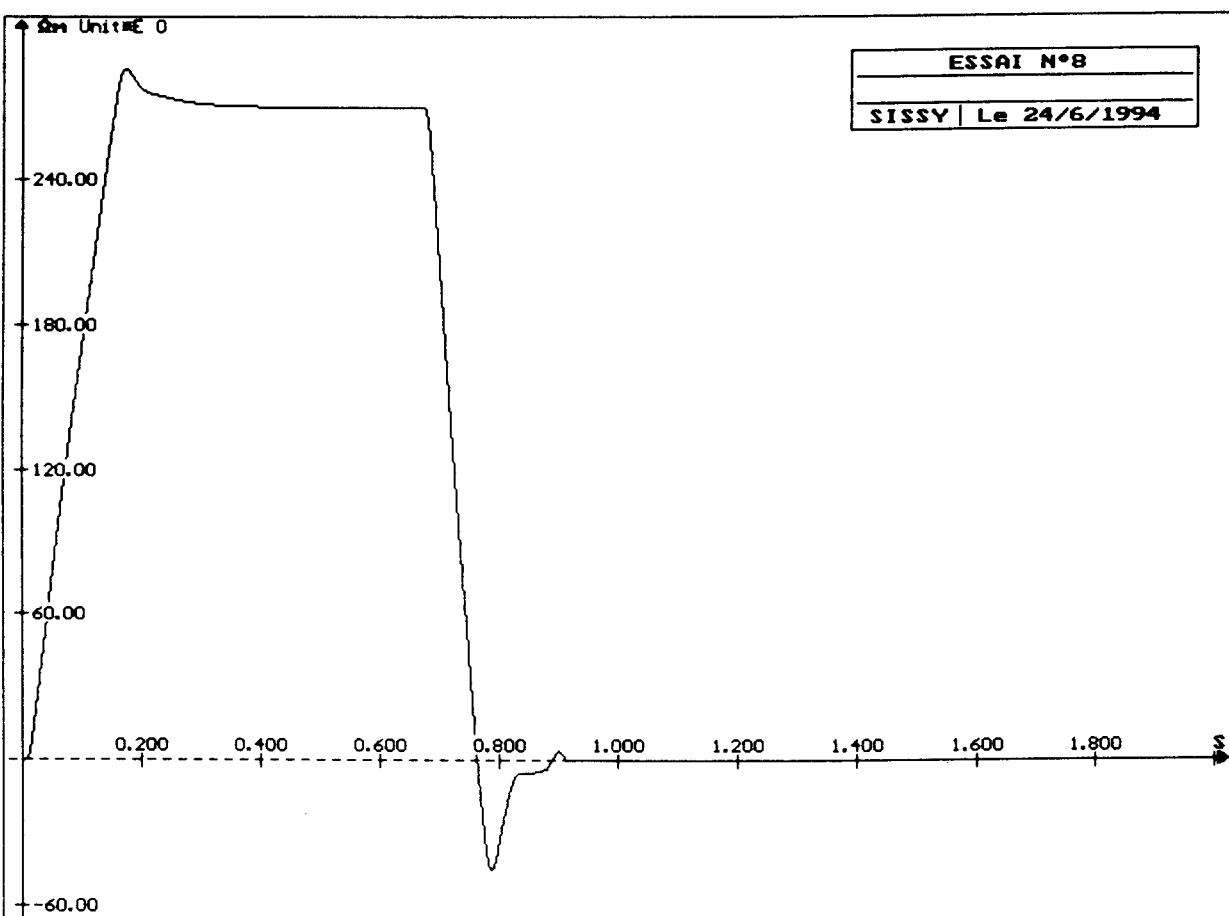
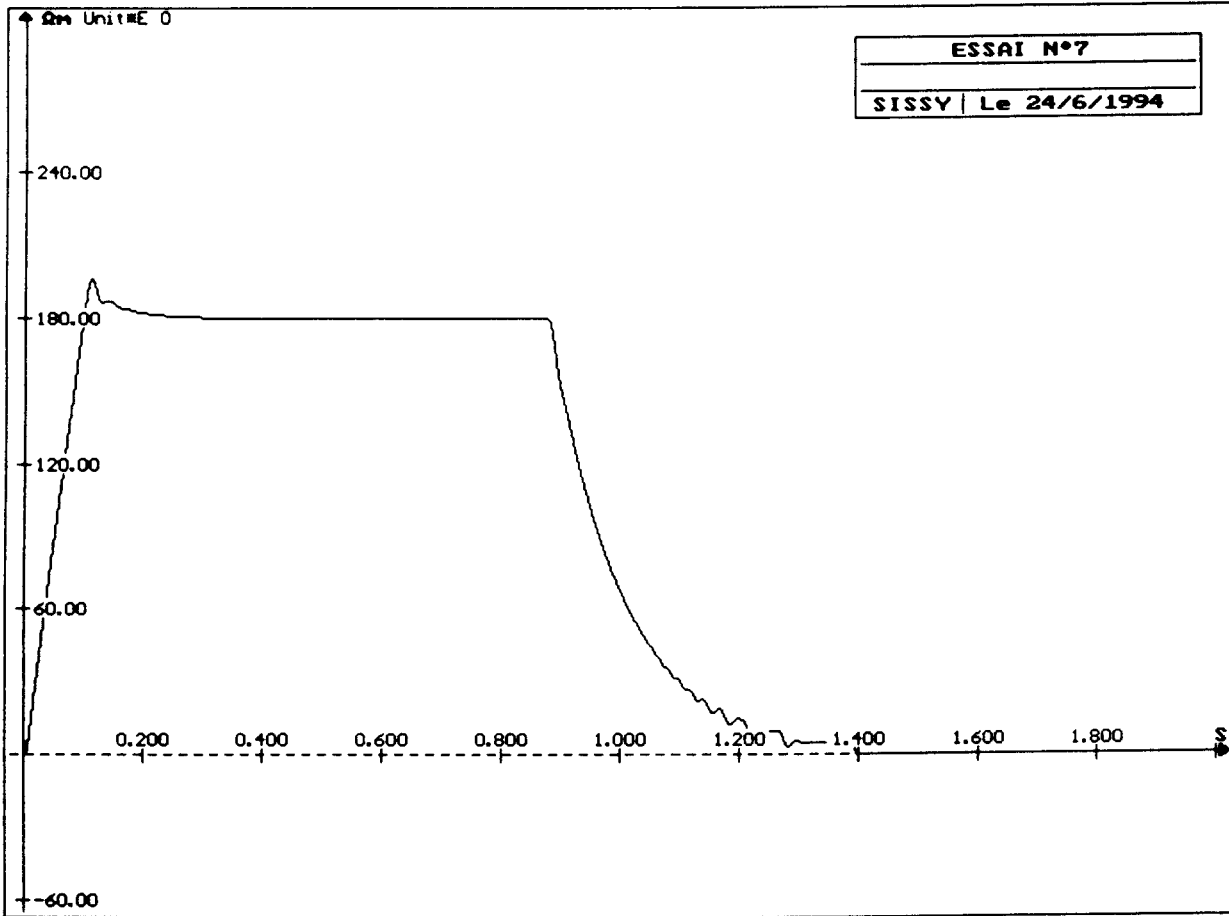
MOY	4,375	6,75	1,143
-----	-------	------	-------

L'interaction 1-2 (colonne 3) pourra éventuellement être analysée.

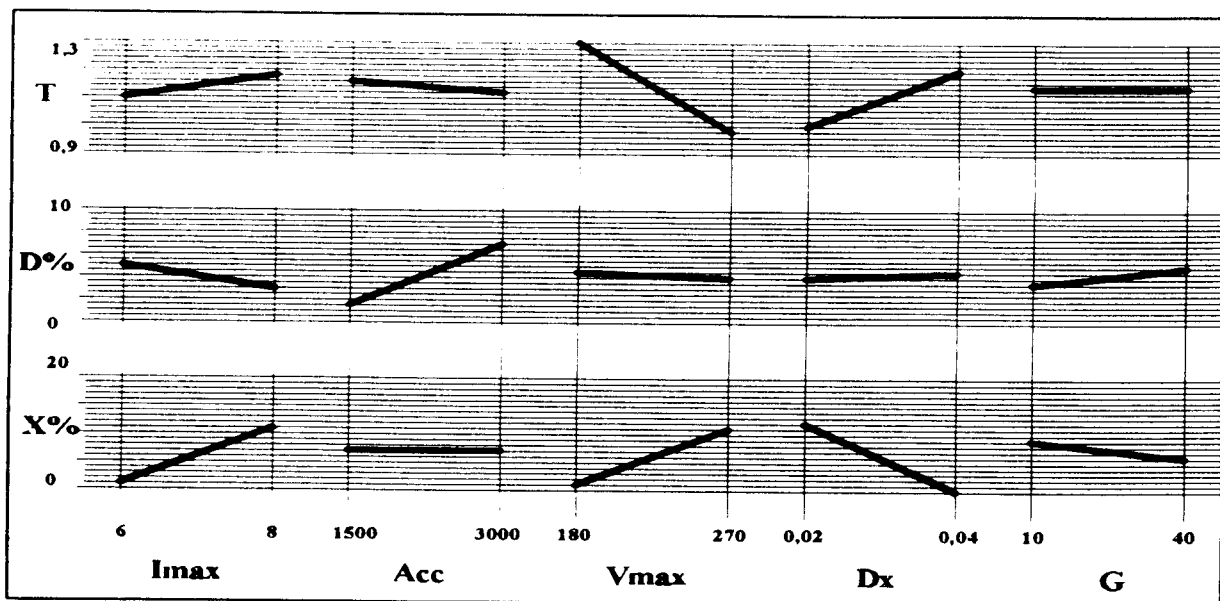








Analyses des résultats



L'observation des résultats nous montre que :

- si on s'attache au temps de parcours, la meilleure combinaison est obtenue pour le choix $I_{max} = 6$ A, $Acc = 3000$ rd/s², $V_{max} = 270$ rd/s, $D_x = 0,020$ m et le gain G n'a pas d'influence. Le paramètre le plus significatif est la vitesse maximale.
- si on s'attache à la valeur du dépassement, le seul paramètre influent est l'accélération.
- Pour le positionnement final le choix se porte sur $V_{max} = 180$ rd/s et $D_x = 0,04$ m.

Si on veut garder un temps correct avec peu de dépassement et un positionnement rapide le compromis s'effectuera sur V_{max} et D_x , les autres paramètres étant moins déterminants.

Choix réalisé

$I_{max} = 7$ A, $Acc = 1500$ rd/s², $V_{max} = 240$ rd/s, $D_x = 0,030$ m, $G = 40$

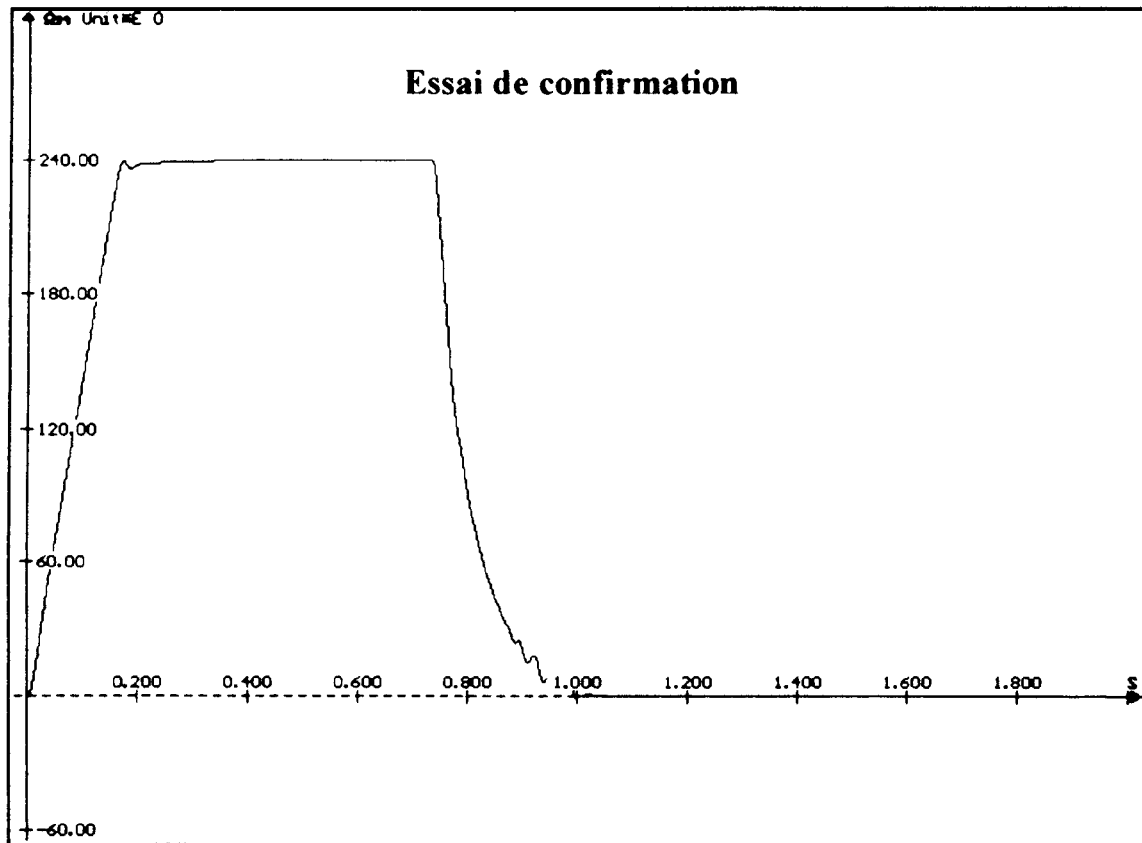
Ces valeurs étant choisies, un essai de confirmation est réalisé.

Les valeurs obtenues sont les suivantes :

N°	I_{max}	Acc	V_{max}	D_x	G		temps	D%	X%
final	7	1500	240	0,030	40		1,00	2	0

On remarquera que les résultats obtenus sont meilleurs que les moyennes des 8 essais.

Essai de confirmation



Conclusion

Cette méthode permet, en peu d'essais, de parvenir à un résultat très performant.

La méthode classique qui consiste à ne faire varier qu'un paramètre à la fois aurait nécessité $2^5 = 32$ essais. De plus les interactions entre paramètres peuvent être mises en évidence. Par exemple, on retrouve l'interaction du courant maximal et de l'accélération en étudiant la ligne 3 du tableau L8.