

C.N.E.D Génie Electrotechnique

## COMPLÉMENTS AU COURS D'ASSERVISSEMENT

# 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 CHAUVEAU  
Jean-Paul CHASSAING

# LES PLANS D'EXPERIENCES

(DESIGNS of EXPERIMENTS)  
*La méthode du Docteur TAGUCHI*

La méthodologie Taguchi de mise en œuvre 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 œuvre 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 efficacité 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 œuvre 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 démérite ...)
- 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 quantifiée (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 où 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 concernent :**

---> 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 concernent :**

---> 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.*

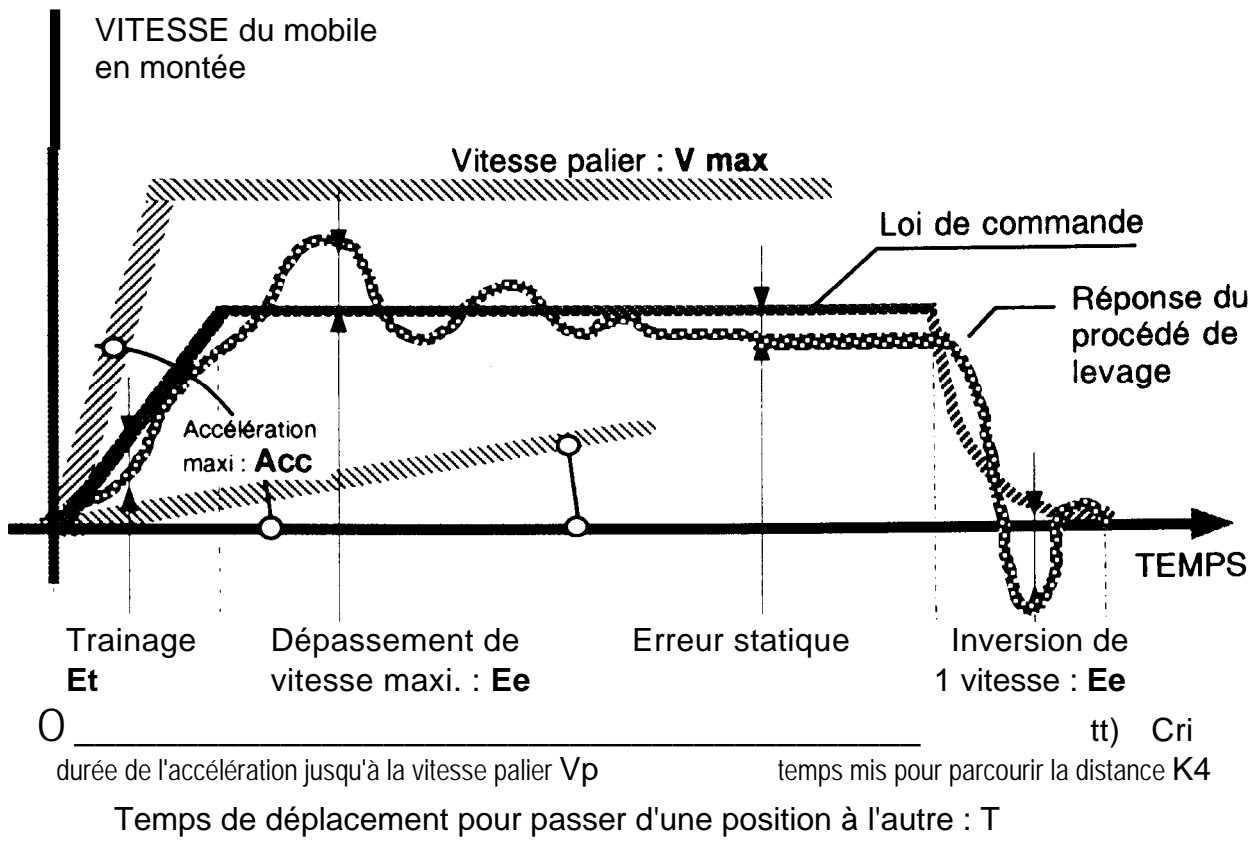
#### **Les réponses sont caractérisées par les observations et mesures suivantes:**

---> 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) .

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



VITESSE du mobile en descente

**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.



## *MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE EXPÉRIMENTALE*

- 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 ».

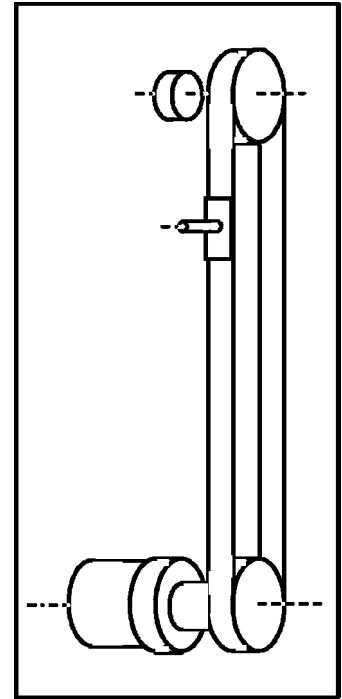
# AXE Z

## 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:

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

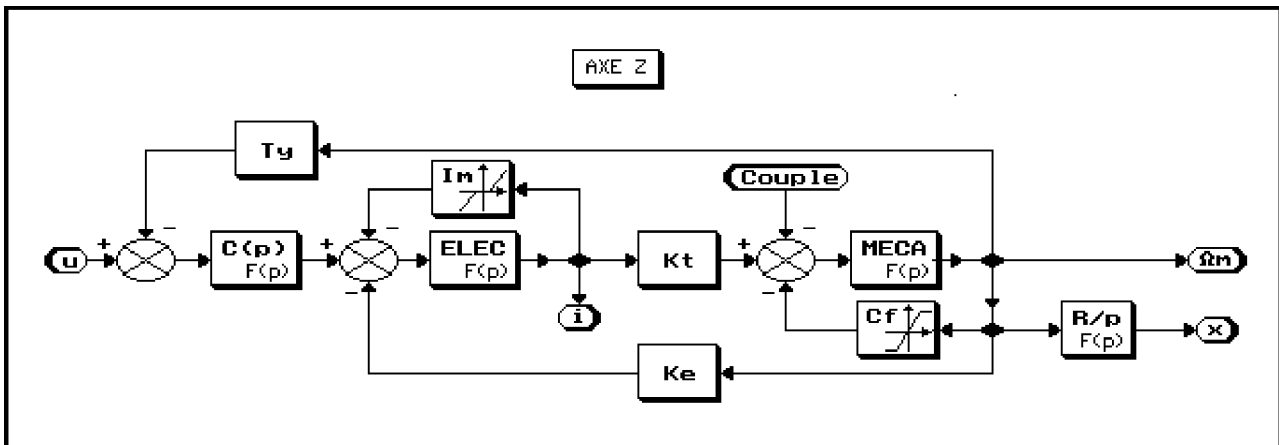
Réducteur : 1/20,  $\varnothing$  poulie = 0,070 m

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



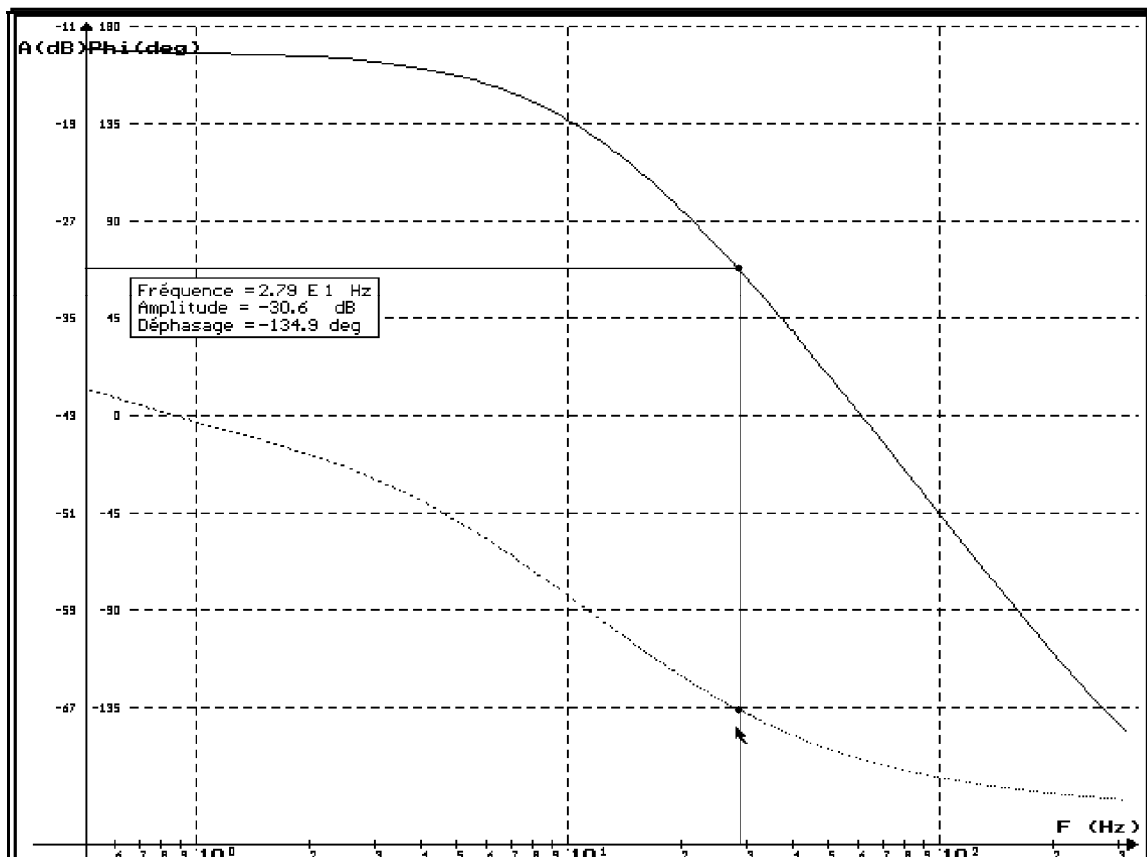
Le bloc  $I_m$  simule la limite de courant ( fonction seuil  $G = 200$ , seuil =  $\pm I_m$  )

### 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**

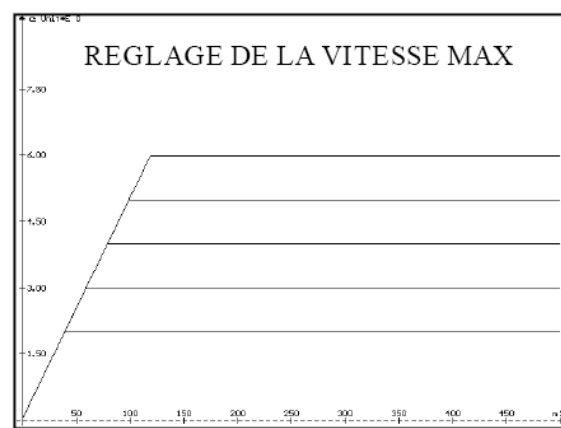
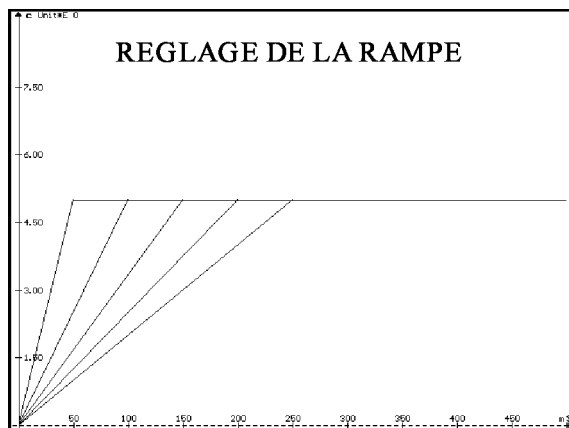
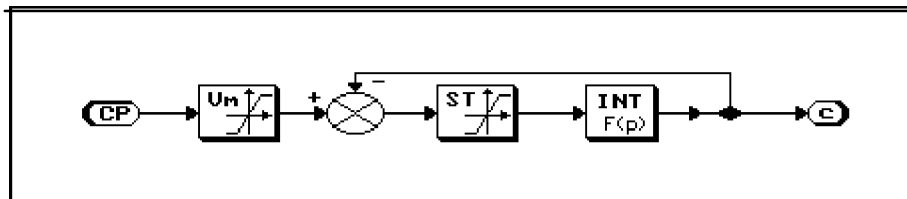
Pour tracer le diagramme de **Bode**, penser à ôter les non-linéarités

## 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 :



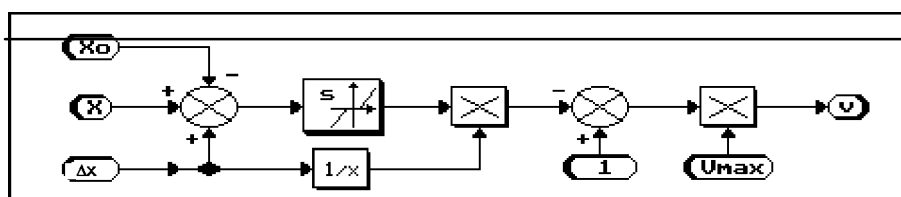
## 2.3 Le calculateur (automate programmable)

2.3.1 Obtention de la loi de vitesse d'approche.

A partir d'un point  $x_1$  distant de  $\Delta_x$  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



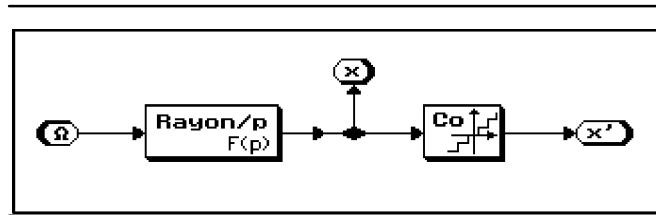
En sortie du premier sommateur nous avons :  $s_1 = x + \Delta x - x_0$ . Si cette somme est  $\geq 0$  la fonction seuil est passante d'où

$$s_2 = \frac{x_0 - x + \Delta x}{\Delta x}$$

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

## 2.4 Passage vitesse / position et codeur

### 2.4.1 Schéma de simulation

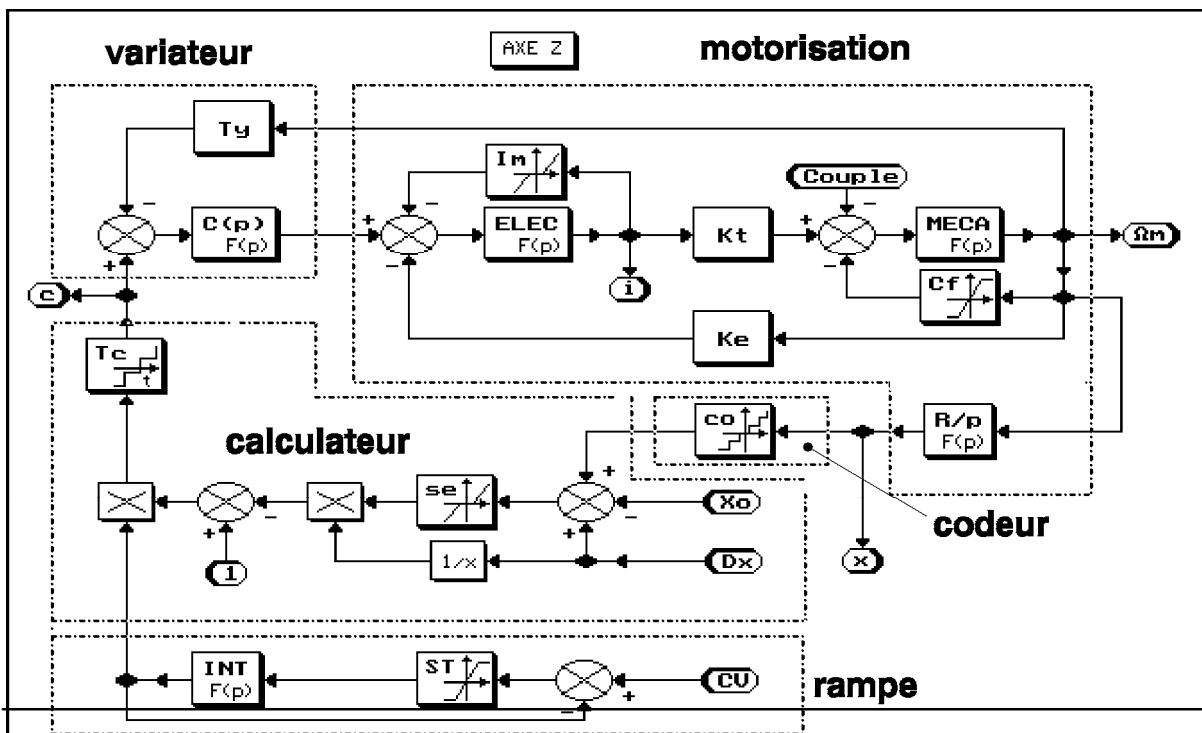


La fonction **Rayon / p** inclut le réducteur d'un 20<sup>ème</sup> et le passage vitesse / position

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

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

## 2.5 Schéma de simulation de l'ensemble



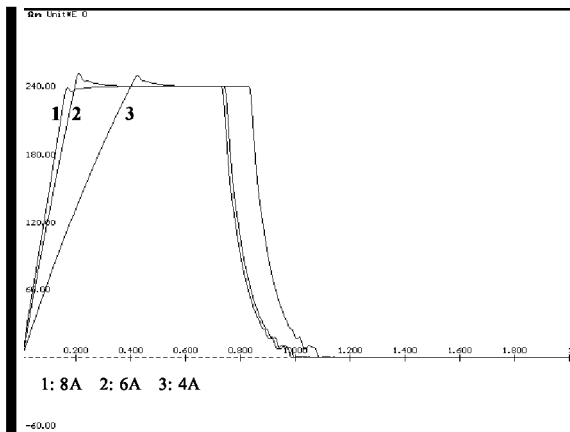
### 3. Optimisation

#### 3.1 Influence des paramètres

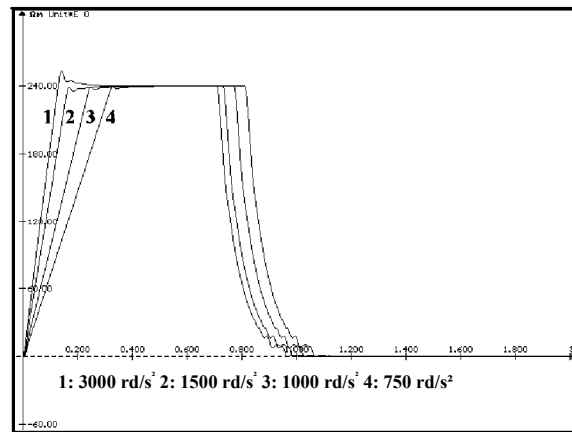
5 paramètres sont accessibles:

$I_{max}$	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 $C(p)$
$\Delta x$	Ecart $x_0 - x_1$	valeur de l'entrée $Dx$

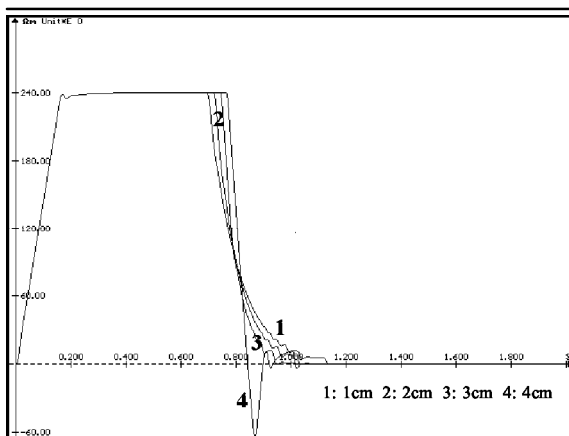
##### 3.1.1 Influence du courant maximal



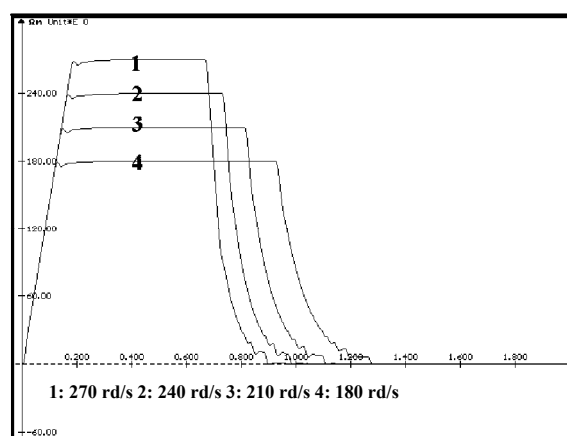
##### 3.1.2 Influence de l'accélération



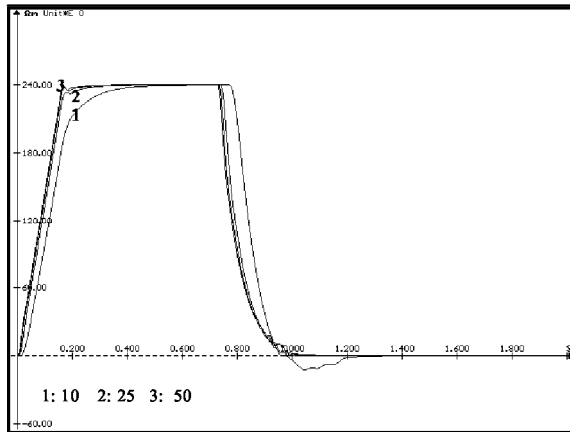
##### 3.1.3 Influence de l'écart $\Delta x$



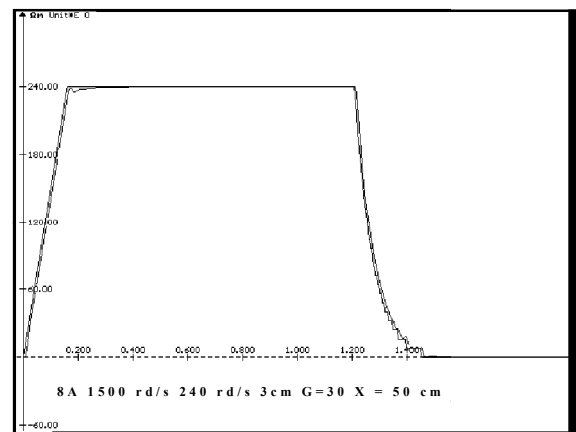
##### 3.1.4 Influence de la vitesse maximale



### 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.

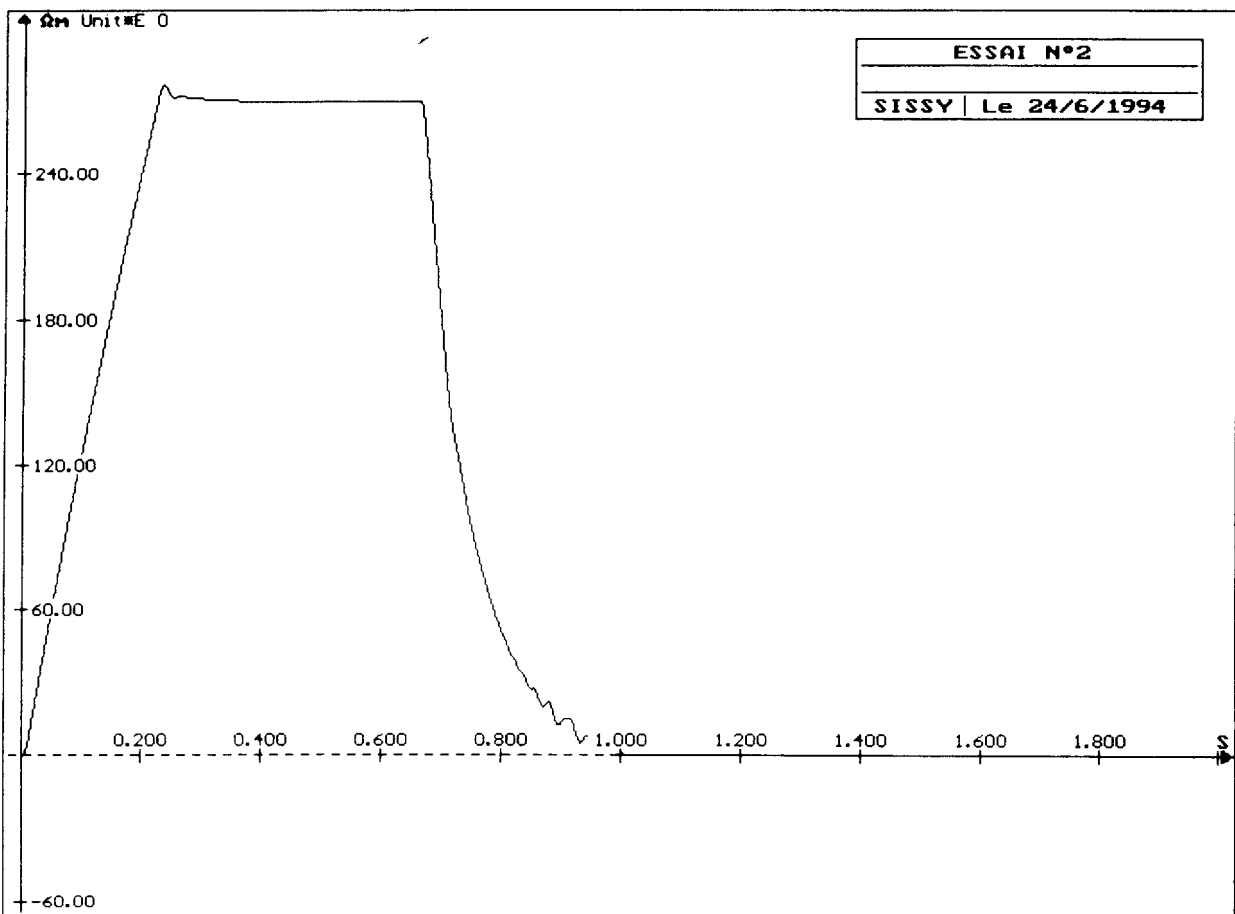
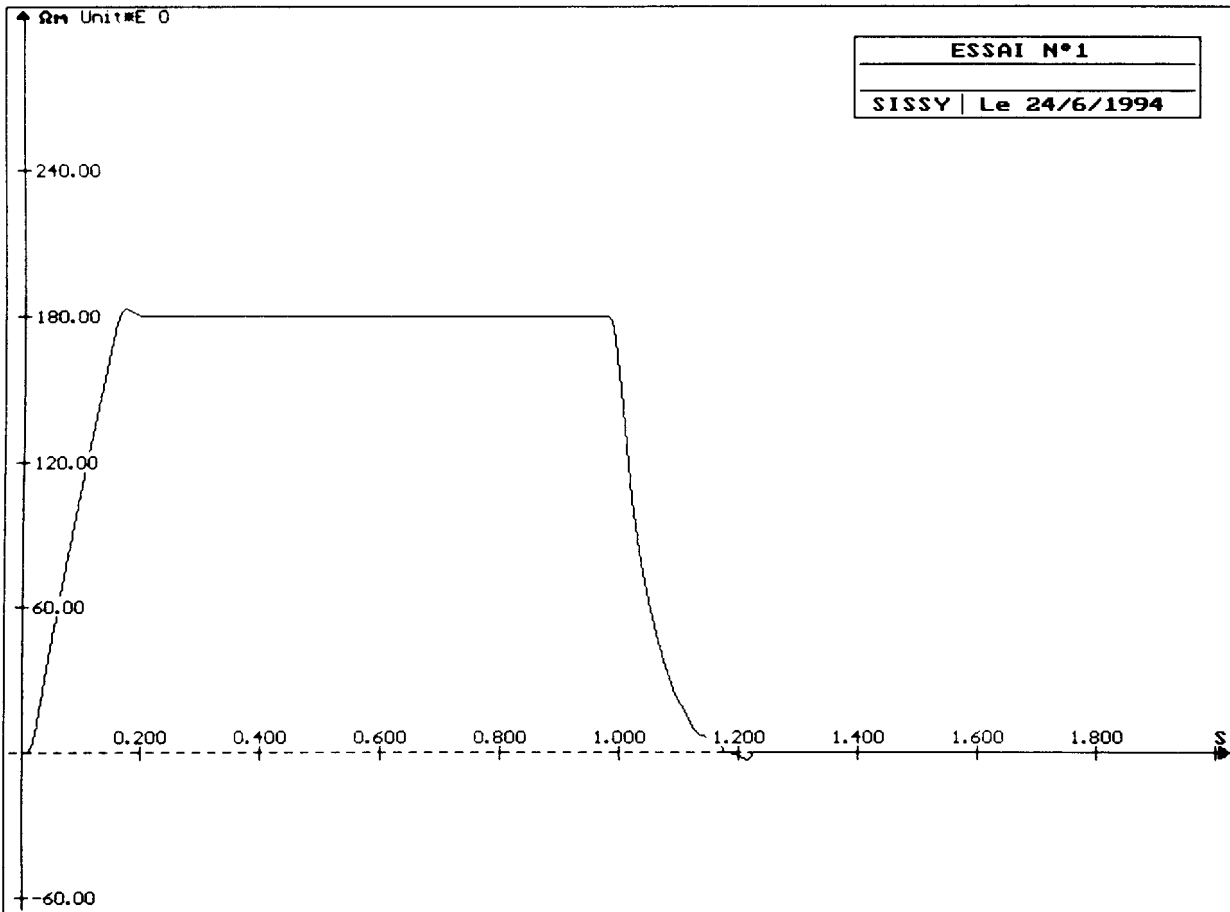
N°	1	2	3	4	5	6	7
	A	B	A-B	C	A-C	C-B	D
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Tableau des essais

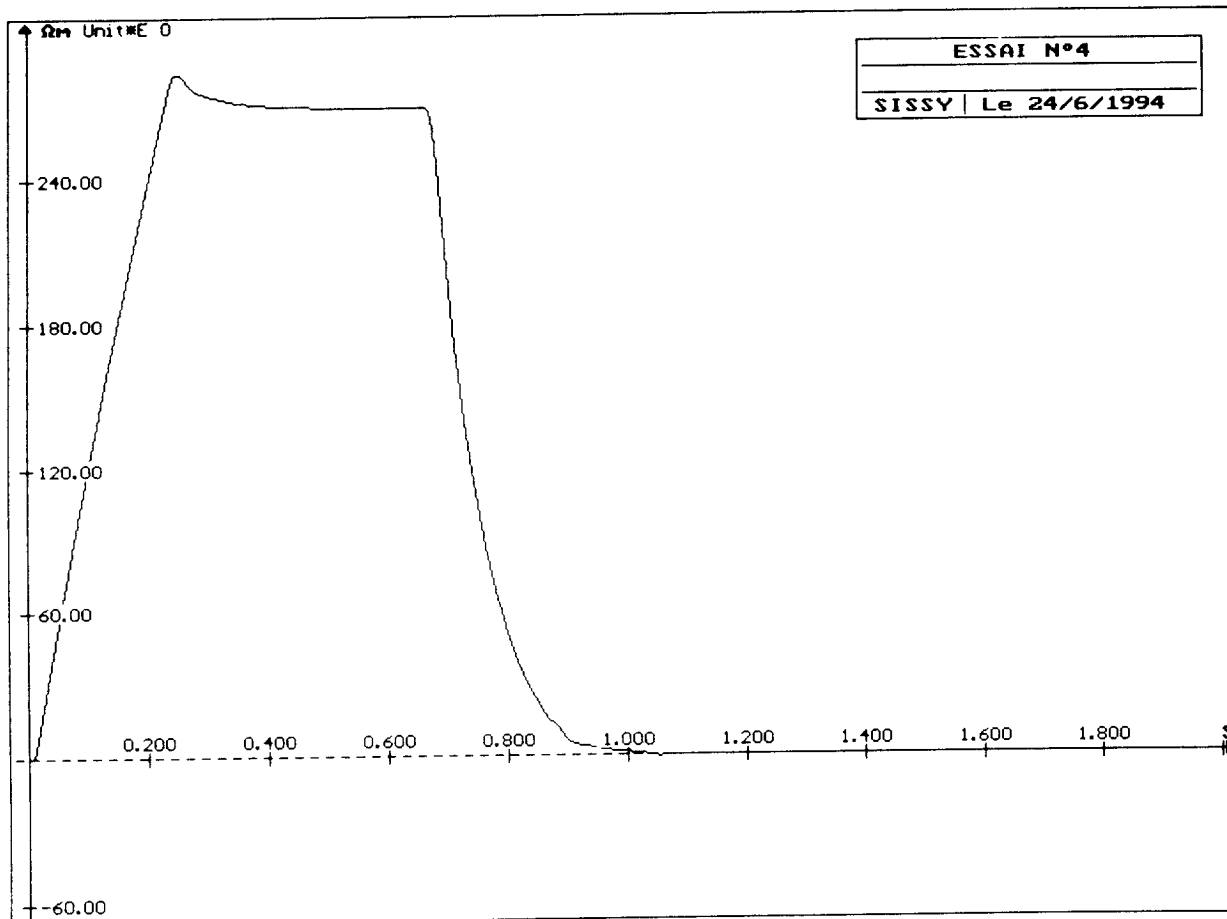
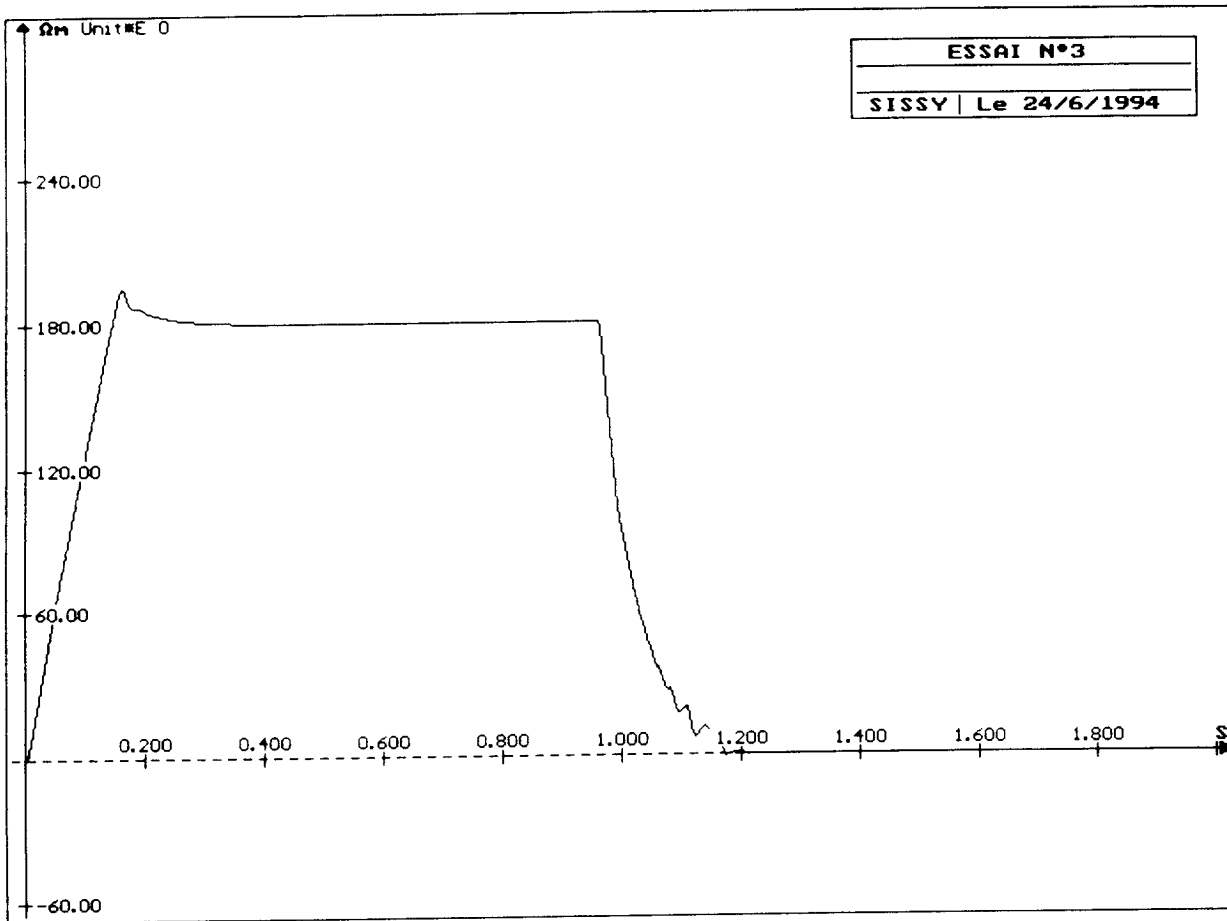
N°	1	2	4	5	6				
	I	Acc	V	Dx	G		D%	X%	t
1	6	1500	180	0,020	10		2	5	1,22
2	6	1500	270	0,040	40		4	0	1,00
3	6	3000	180	0,020	40		8,5	0	1,20
4	6	3000	270	0,040	10		6	0	1,05
5	8	1500	180	0,040	10		0	0	1,40
6	8	1500	270	0,020	40		0	22	0,98
7	8	3000	180	0,040	40		8,5	0	1,40
8	8	3000	270	0,020	10		6	27	0,90

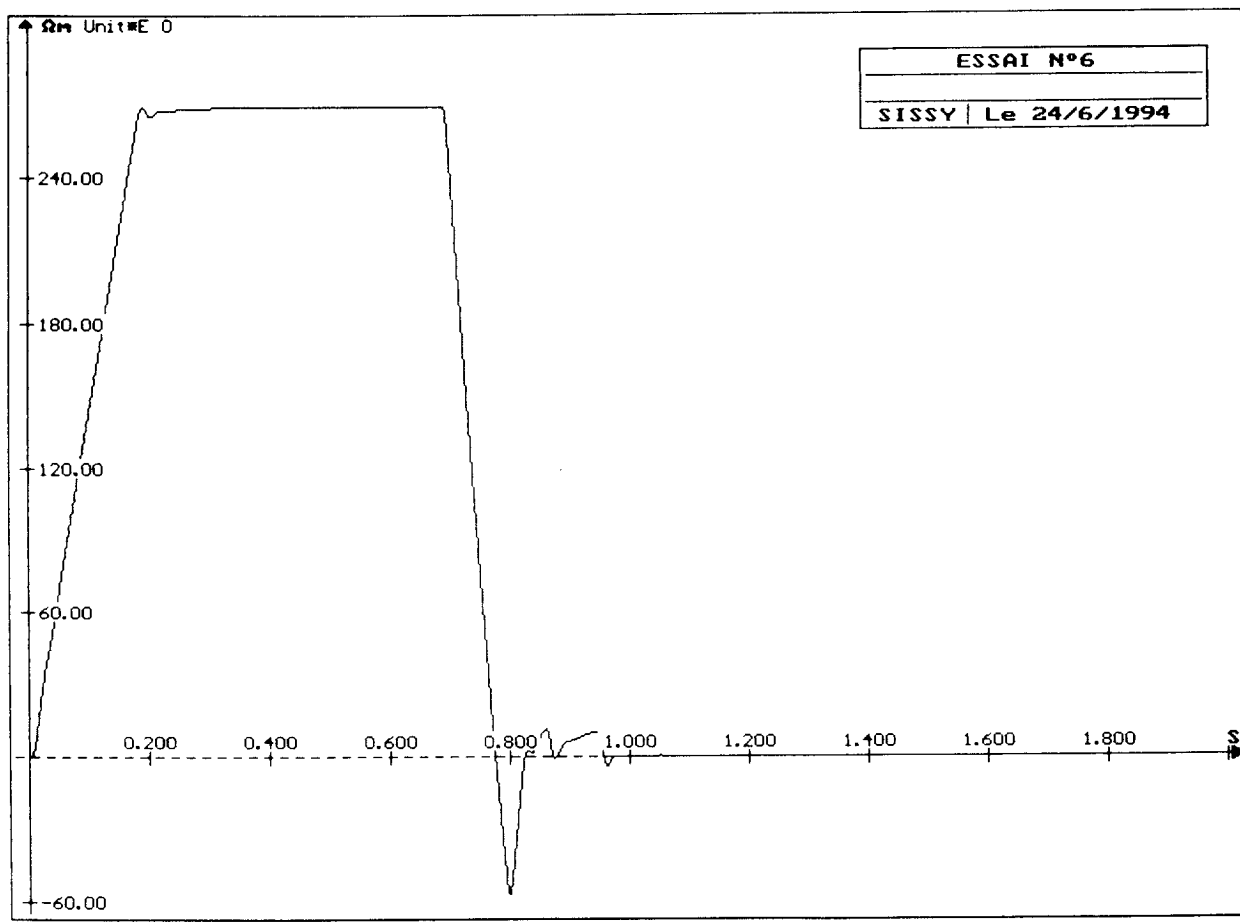
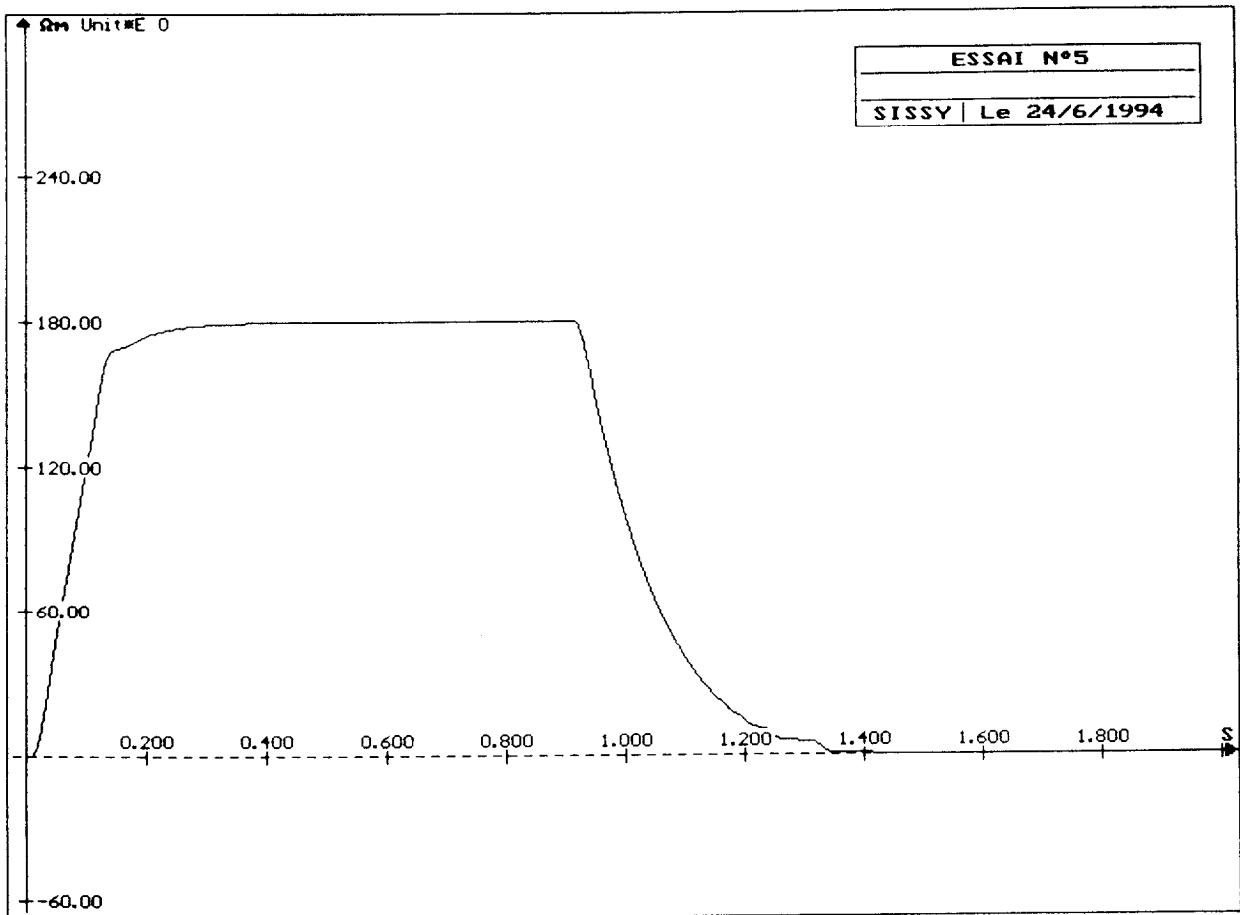
MOY	4,375	6,75	1,143
-----	-------	------	-------

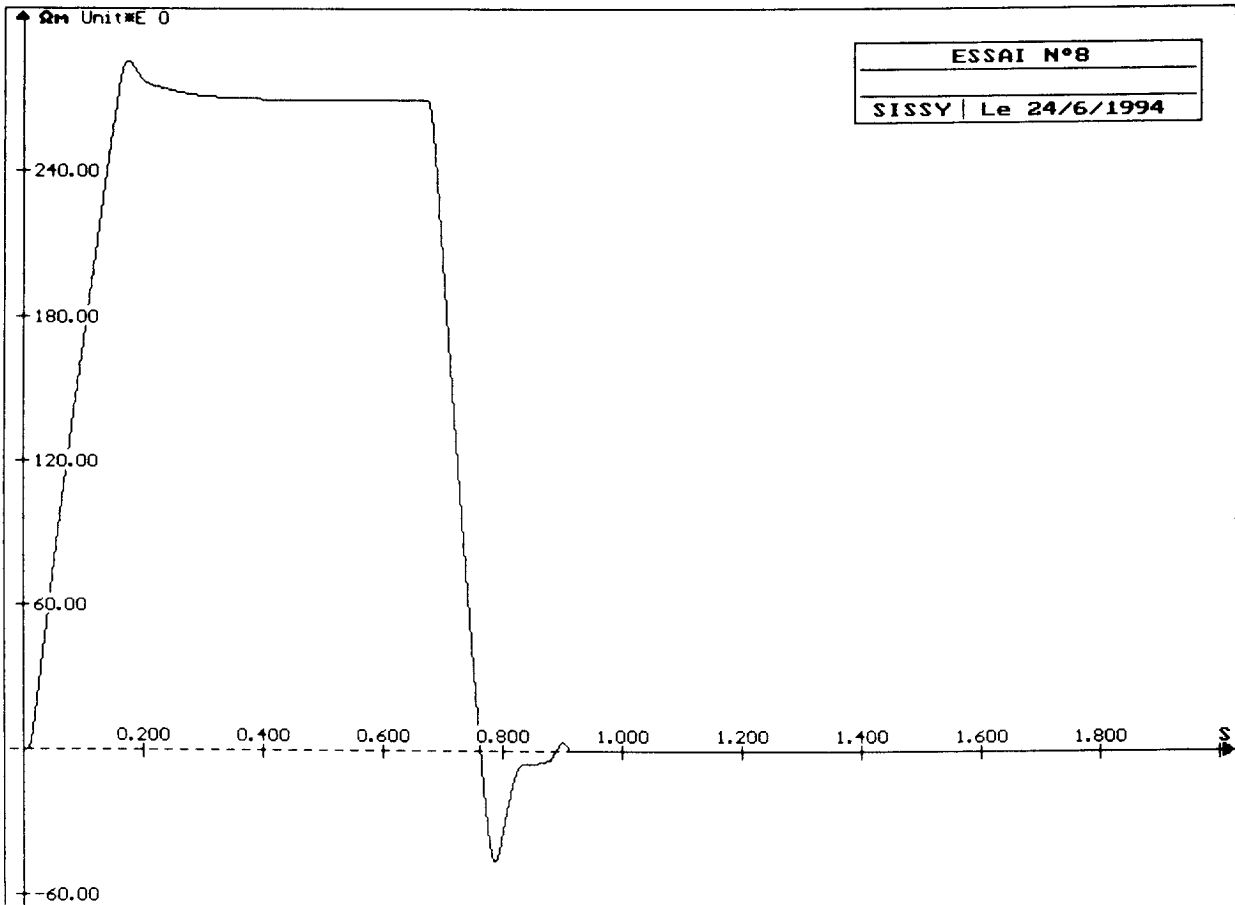
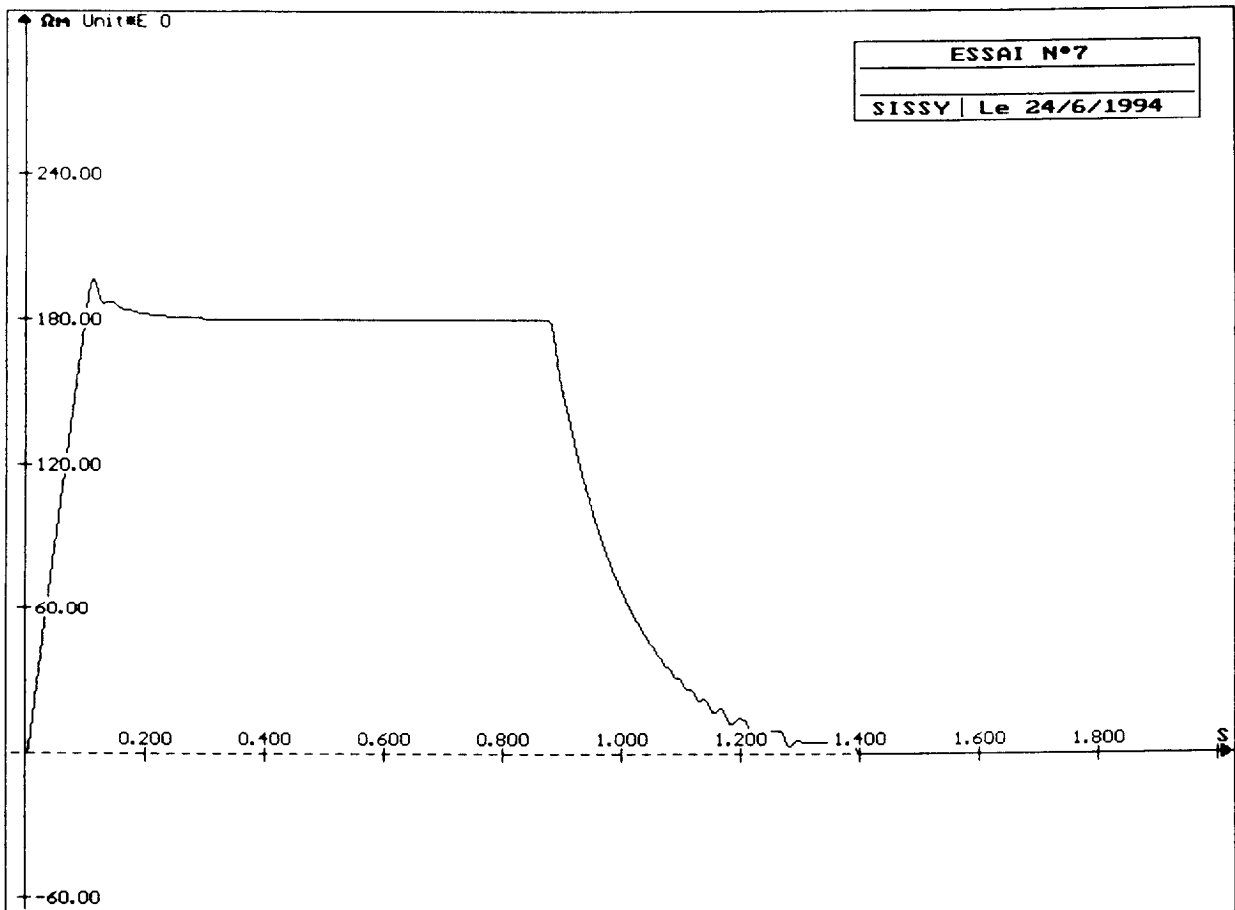
L'interaction 1-2 (colonne 3) pourra éventuellement être analysée.



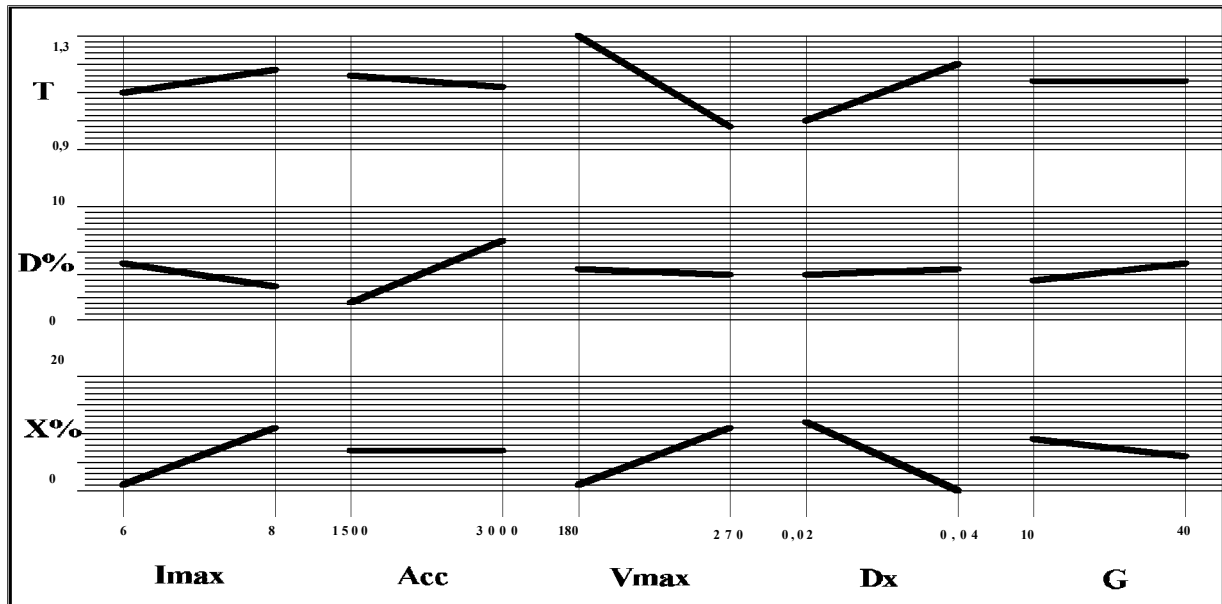








## Analyses des résultats



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/s<sup>2</sup>,  $V_{max} = 270$  rd/s,  $Dx = 0,020$  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  $Dx = 0,04$  m.

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

### Choix réalisé

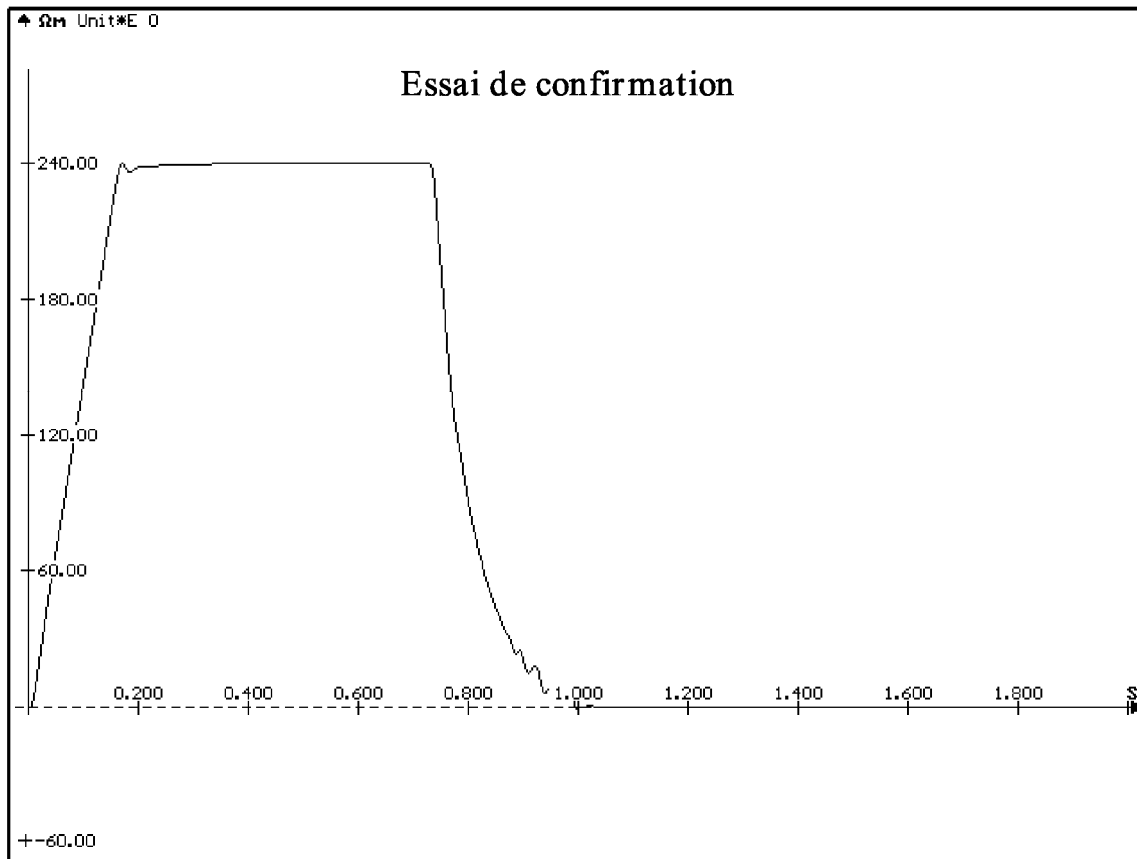
$$I_{max} = 7 \text{ A}, \text{ Acc} = 1500 \text{ rd/s}^2, V_{max} = 240 \text{ rd/s}, Dx = 0,030 \text{ m}, G = 40$$

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

Les valeurs obtenues sont les suivantes :

N°	$I_{max}$	Acc	$v_{max}$	Dx	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.



## 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**.

ANNEXE N°1

MÉTHODE TAGUCHI

# METHODE TAGUCHI

## Exemple d'application ( on recherche une valeur minimale pour la réponse).

1 Niveau des facteurs selectionnés (A ,B, C, E)

Les quatre facteurs sélectionnés seront testés aux niveaux de la figure 1

FACTEURS NIVEAUX	A	B	C	E
NIVEAU 1	54	3	13	4
NIVEAU 2	90	6	23	63

fig 1

2 - Tableau des combinaisons retenues des interactions effectuées et des réponses obtenues

On a utilisé une table L8 ( 2<sup>7</sup> )

- Le facteur C est placé en colonne 1
- Le facteur B est placé en colonne 2
- Le facteur A est placé en colonne 4
- Le facteur E est placé en colonne 7
- la colonne 3 est réservée à l'interaction CB
- la colonne 4 est réservée à l'interaction CA

facteurs	C	B	CB	A	CA	E	Réponses
1	10	3	1	54	-	52	4
2	10	3	1	93	2	63	3
3	10	6	2	54	-	63	10
4	10	6	2	90	2	52	4
5	20	3	2	54	2	63	18
6	23	3	2	90	-	52	10
7	20	6	1	54	2	52	12
8	20	6	1	90	-	E3	8
<b>R̄</b> = 8,625							

fig 2

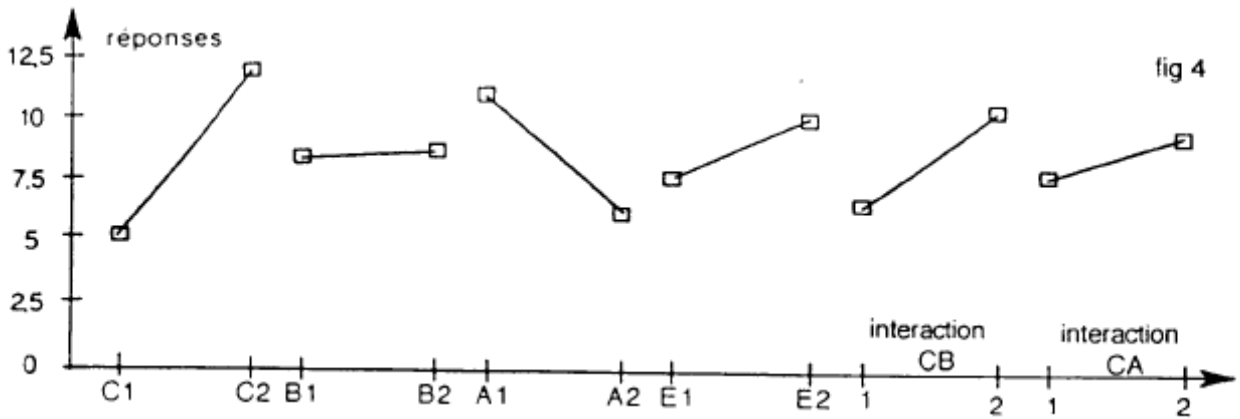
3 - Table des réponses

Les résultats sont obtenus à partir des moyennes des réponses pour chaque niveau des facteurs

facteurs	C	B	A	E	CB	CA
niveau 1	5.25	8.75	11	7.5	6.75	8
niveau 2	12	8.5	6.25	9.75	10.5	9.25
écarts	6.75	0.25	4.75	2.25	3.75	1.25

fig 3

#### 4 - Graphes des effets des facteurs et des interactions



L'observation du graphe des réponses montre que les facteurs C et A ont une influence significative sur la réponse. C1 et A2 fournissent les meilleurs résultats. Les facteurs B et E semblent n'avoir aucune influence significative.

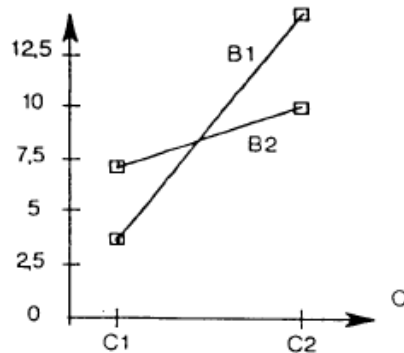
Pour les interactions, nous retiendrons celle de C avec B pour laquelle nous allons déterminer la meilleure combinaison.

table des réponses de l'interaction CB

		C	
		Niv. 1	2
B	1	3,5	14
	2	7	10

fig 5

Graphique des réponses de l'interaction CB



La combinaison C1 B1 fournit une réponse favorable, c'est pourquoi nous retiendrons aussi le facteur B à son niveau 1.

#### 5 - Choix final

Le choix final se porte sur la combinaison des facteurs suivante qui minimise la fonction:

$$A2 = 90 \quad B1 = 3 \quad C1 = 10$$

E sera fixé en fonction de critères économiques (c'est un facteur de coût)

#### 6 - Réponse moyenne attendue et à vérifier par un essai complémentaire ou en exploitation

Réponse moyenne des 8 essais réalisés =  $69 / 8 = 8,625$

Chaque optimisation d'un facteur apporte une réduction de la réponse qui est fonction de l'influence de ce facteur.

Dans notre cas, on peut écrire:

$$Y = \bar{R} + (\overline{C1} - \bar{R}) + (\overline{A2} - \bar{R}) + (\overline{C1B1} - \bar{R}) - (\overline{C1} - \bar{R}) - (\overline{B1} - \bar{R})$$

$$Y = 8,625 + (5,25 - 8,625) + (6,25 - 8,625) + (3,5 - 8,625) - (5,25 - 8,625) - (8,75 - 8,625) = 1,125$$



3	2	1	2
4	2	2	1

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

fig 2

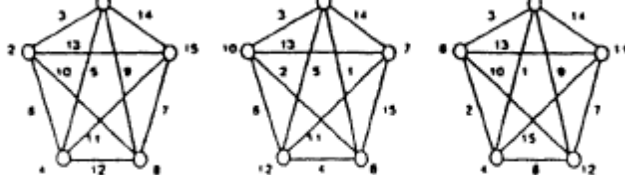


TABLE L8 (2<sup>7</sup>)

Col	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	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

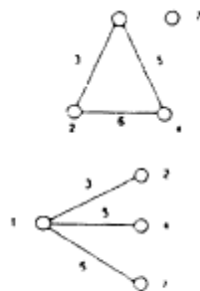


Table L9 (3<sup>4</sup>)

Col	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 lettres a 3 niveaux permettent de détecter le non alignement de certains facteurs

fig 3

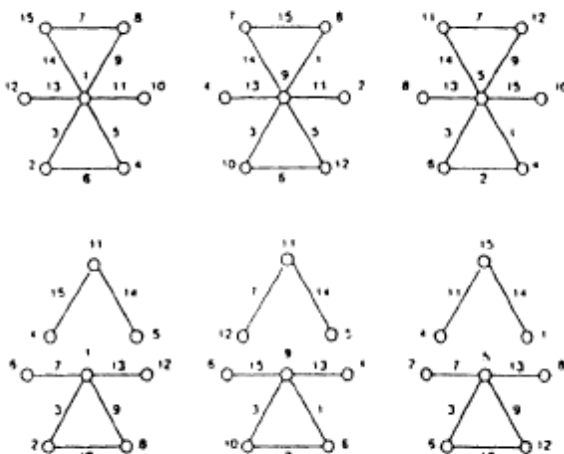


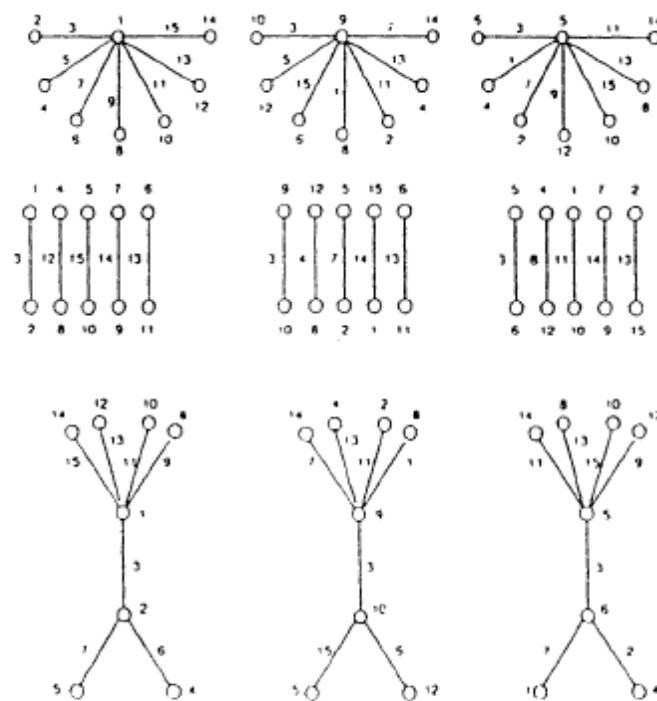
fig 4

Table L16 (2<sup>15</sup>)

Col	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	1	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	1	1	2
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	1	1	1	2
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	1	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	1	1	2	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 L16

fig 5



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

Les interactions se produisent dans les colonnes situées à l'intersection des numéros de colonnes indiqués en haut et entre parenthèses

## BIBLIOGRAPHIE EN FRANCAIS

- . PILLET Maurice  
Introduction aux plans d'expériences par la méthode Taguchi  
Les Editions d'Organisation, 1992
  
- . SERGENT Michelle, MATHIEU Didier et PHAN-TAN-LUU Roger  
Méthodologie de la Recherche Expérimentale  
LPRAI Marseille, 1989
  
- . VIGIER Michel G.  
Pratique des Plans d'Expériences. Méthodologie Taguchi.  
Les Editions d'Organisation, 1988
  
- . Gestion de la qualité. Méthodologie Taguchi  
Revue de Statistique Appliquée, 1989, Vol XXXVII N°2  
CERESTA, 10 rue Bertin Poirée, 75001 Paris
  
- . Sauvay Pierre  
Les plans d'expérience Méthode Taguchi AFNOR
  
- . Articles parus dans l'automaticien  
  
N° 13 Avril 1993  
N° 14 Mai 1993  
N° 15 Juin 1993  
N° 16 Juillet 1993  
  
- Amélioration du comportement d'un procédé  
- Recherche d'une solution particulière  
- Recherche de la stabilité  
- Recherche d'une solution robuste  
Par J. Philipin  
P. Sauvay  
T. Mons
  
- . IUFM de Toulouse  
Réseau National de Ressources en Electrotechnique (sur demande) IUFM,  
complexe scientifique de Rangueil  
118 route de Narbonne  
31078 Toulouse cedex 04  
Tel 05 62 25 21 85 ou <http://www.iufmrese.cict.fr/>

ANNEXE N°2

EXEMPLE D'APPLICATION EN  
GÉNIE ELECTRIQUE

ESSAIS ET RÉSULTATS

# ***Essais pour le réglage du comportement de l'axe Z en levage***

## **Constantes :**

- masse embarquée* *10 Kg*
- Sens* *montée*

## **Variables de réglage :**

- courant max moteur* *I max*
- accélération* *Acc*
- vitesse palier* *V max*
- distance de ralentissement* *K4*
- gain proportionnel et intégral* *Gain*

**LANS D EXPERIENCES - DESIGNS OF EXPERIENCES**

**AXE Z en montée**

Essai	A		B		A-B	A-B	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	8	1	
N°2	1	6	1	70	1		2	900	2	24	2	20	2	
N°3	1	6	2	140	2		1	600	1	12	2	20	2	
N°4	1	6	2	140	2		2	900	2	24	1	8	1	
N°5	2	8	1	70	2		1	600	2	24	1	8	2	
N°6	2	8	1	70	2		2	900	1	12	2	20	1	
N°7	2	8	2	140	1		1	600	2	24	2	20	1	
N°8	j 2	8	2	140	1		2	900	1	12	1	8	2	

Etude du t aine e

Et	Imax	Acc.	O	Vmax	K4	Gain	O
N1	1,025	0	0	0,4	0,4	0,625	0,625
N2	0	1,025	1,025	0,625	0,625	0,4	0,4

Etude du dépassement de vitesse palier

Ed	Imax	Acc.	O	Vmax	K4	Gain	O
N1	0,0625	0,0175	0,0125	0,05	0,055	0	0,005
N2	0,005	0,05	0,055	0,0125	0,0125	0,0675	0,0625

Etude de la mise en position

Ee	Imax	Acc.	O	Vmax	K4	Gain	O
N1	0,15	0,45	0,325	0,15	0,775	0,325	0,45
N2	0,625	0,325	0,45	0,625	0	0,45	0,45

Etude du temps de transit entre la position 1 et la position 2

T	Imax	Acc.	O	Vmax	K4	Gain	O
N1	2,305	2,405	2,32	2,7175	2,3575	2,337	2,392
N2	2,43	2,33	2,415	2,0175	2,3775	2,397	2,342

Interaction AB ( Imax et Acc)

Et	A1	A2	Ed	A1	A2	Ee	A1	A2	T	A1	A2	
	B1	0	0	B1	0,025	0,01	B1	0,15	0,75	B1	2,295	2,5
	B2	2,05	0	B2	0,1	0	B2	0,15	0,5	B2	2,315	2,3

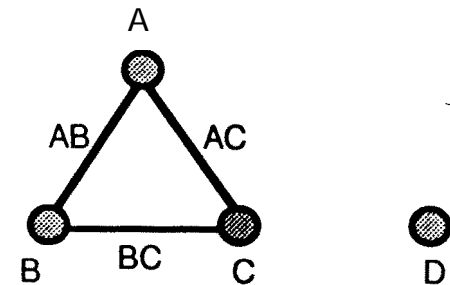
Interaction AC

Et	A1	A2	Ed	A1	A2	Ee	A1	A2	T	A1	A2	
	C1	0,8	0	C1	0,1	0	C1	0,3	0	C1	2,645	2,7
	C2	1,25	0	C2	0,025	0,01	C2	0	1,2	C2	1,965	2,0

**Table des réponses**

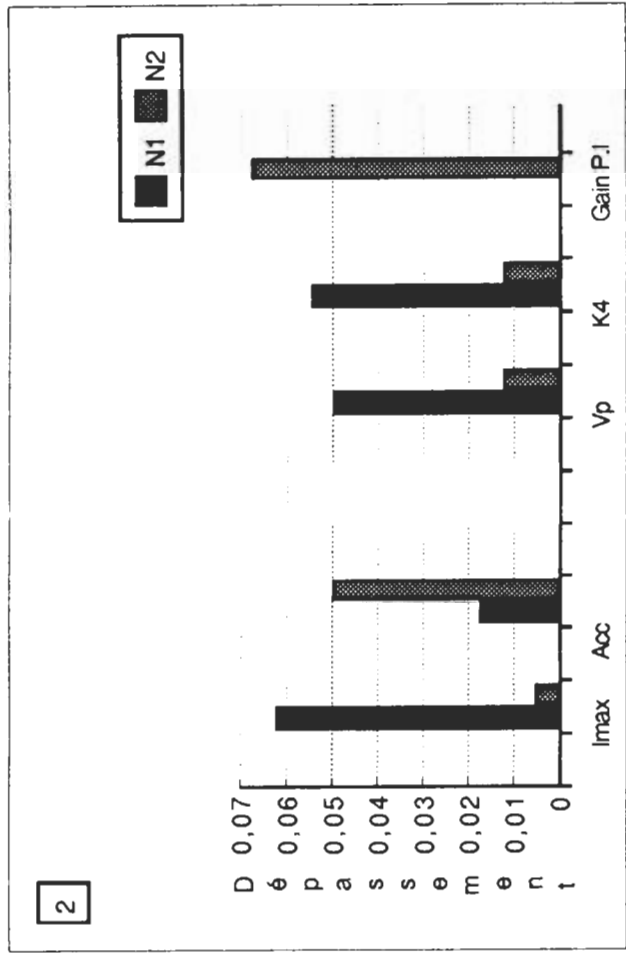
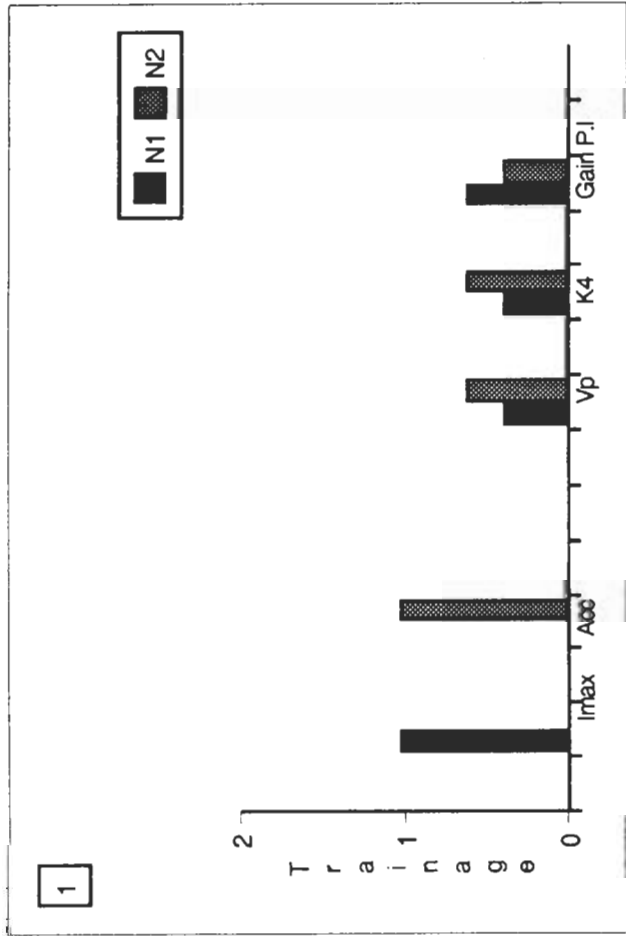
Et	Ed	Ee	
1	2	3	4
0	0	0,3	<b>2,63</b>
0	0,05	0	1,96
1,6	0,2	0,3	2,66
2,5	0	0	1,97
0	0	0	<b>2,82</b>
0	0,02	1,5	2,21
0	0	0	2,76
0	0	1	<b>1,93</b>
0,5125	0,03375	0,3875	2,367

**GRAPHE L8 de TAGUCHI**

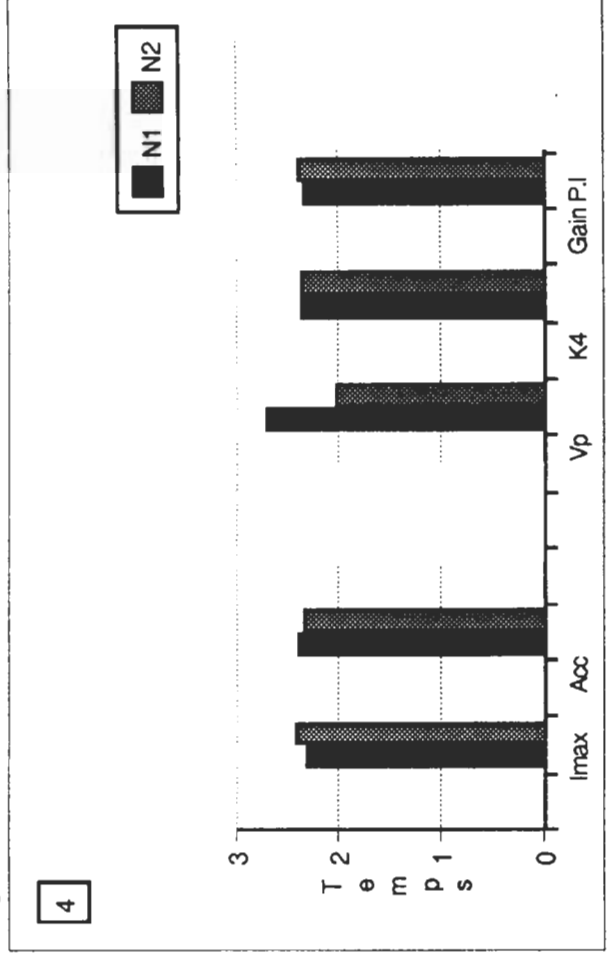
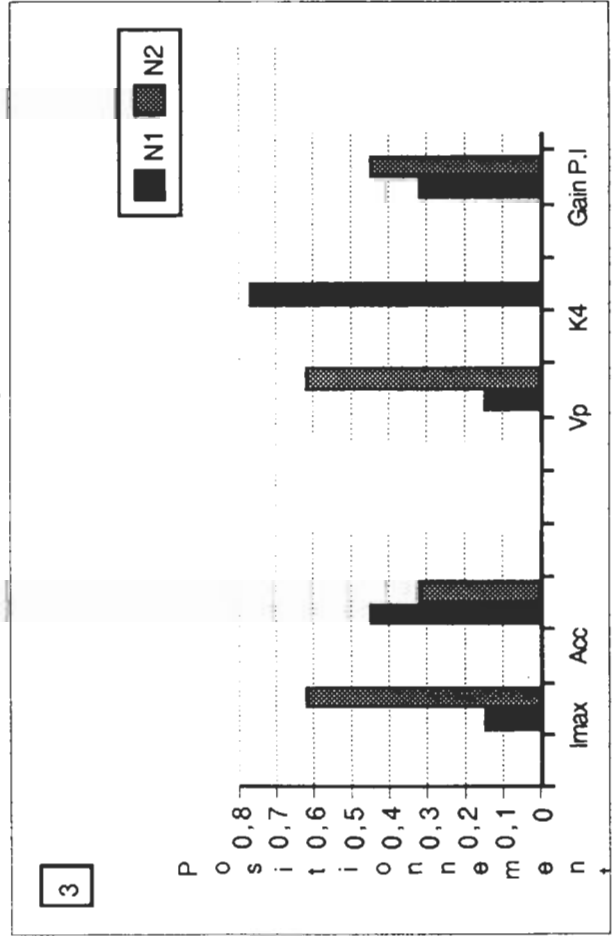


**AFFECTATION DES VARIABLES**

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

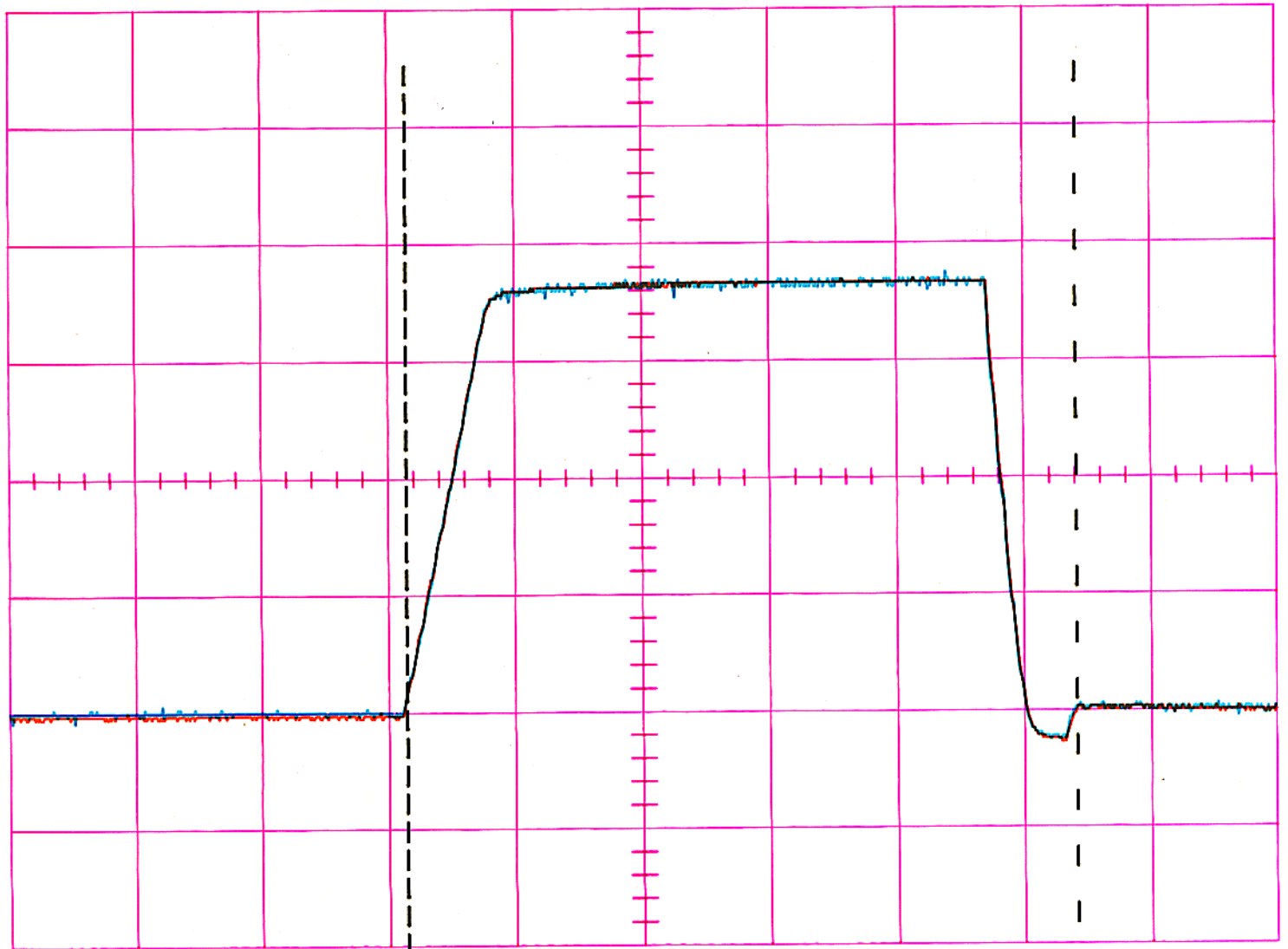


Influence des facteurs sur le comportement de l'axe "Z" en levage



AXE "Z" (Levage) - Mouvement de Montée - ESSAI N°1

CH1 >1V 500ms C2 T=0k 0460 \*1000

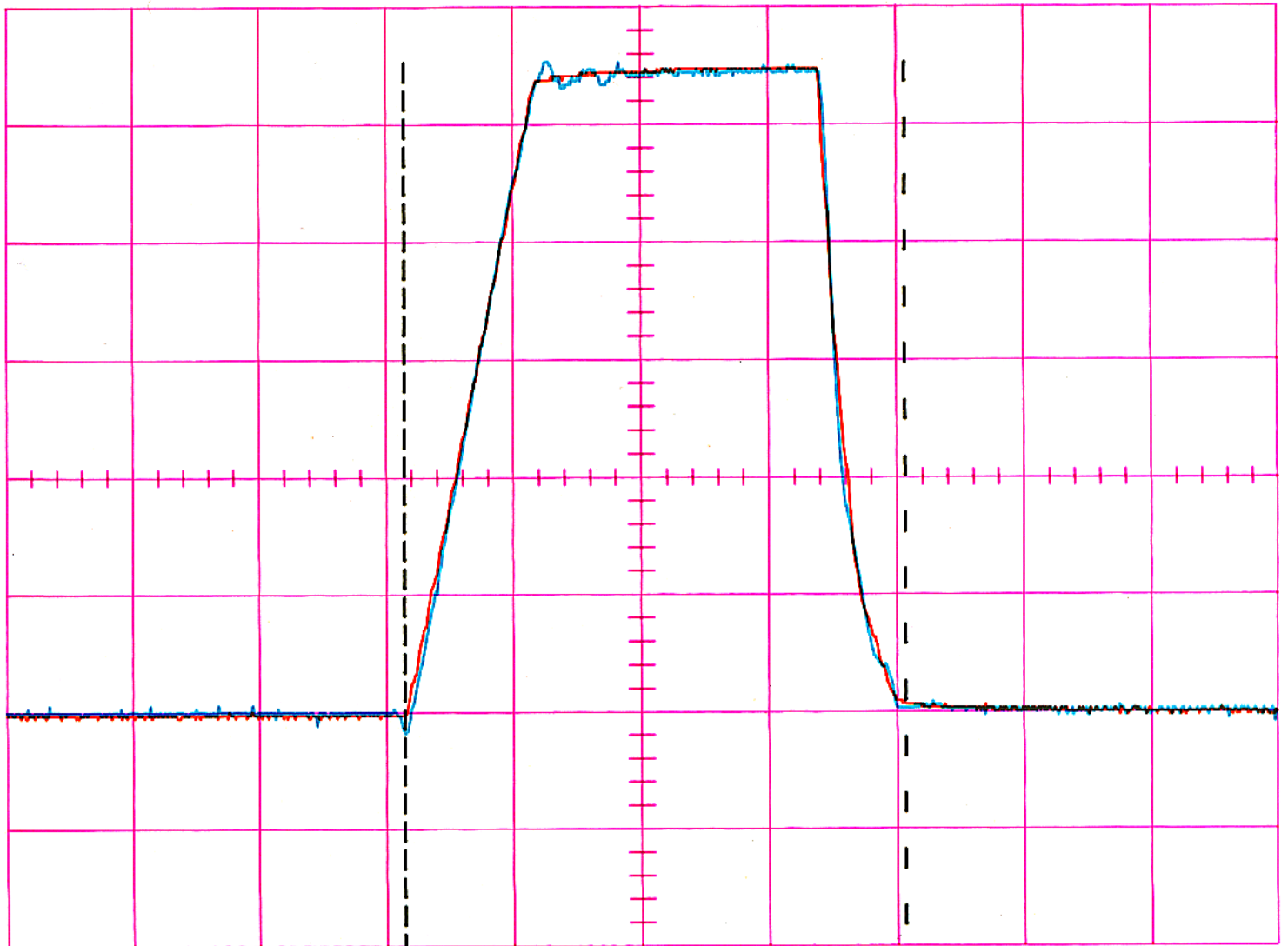


CH2 1V 500ms 1k  $\Delta t = +2.635$  S F

0X7520 ITT Instruments

AXE "Z" (Levage) - Mouvement de Montée - ESSAI N°2

CH1 >1V 500ms C2 T=0k 0273 \*1000



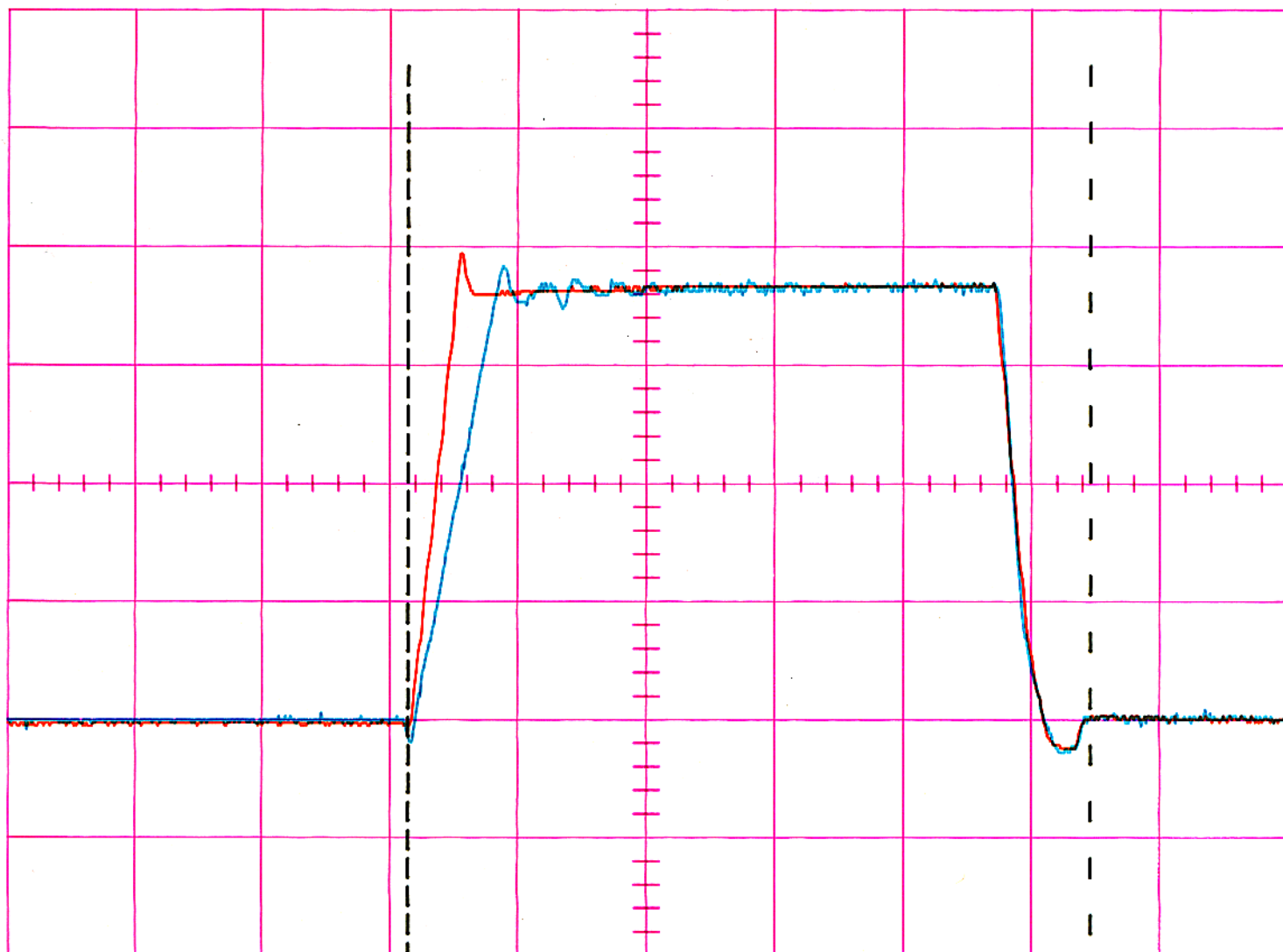
CH2 1V 500ms 1k  $\Delta t = +1.960$  S F

OX7520 ITT Instruments



# AXE "Z" (Levage) - Mouvement de Montée - ESSAI N°3

CH1 >1V 500ms C2 T=0k 0136 \*1000

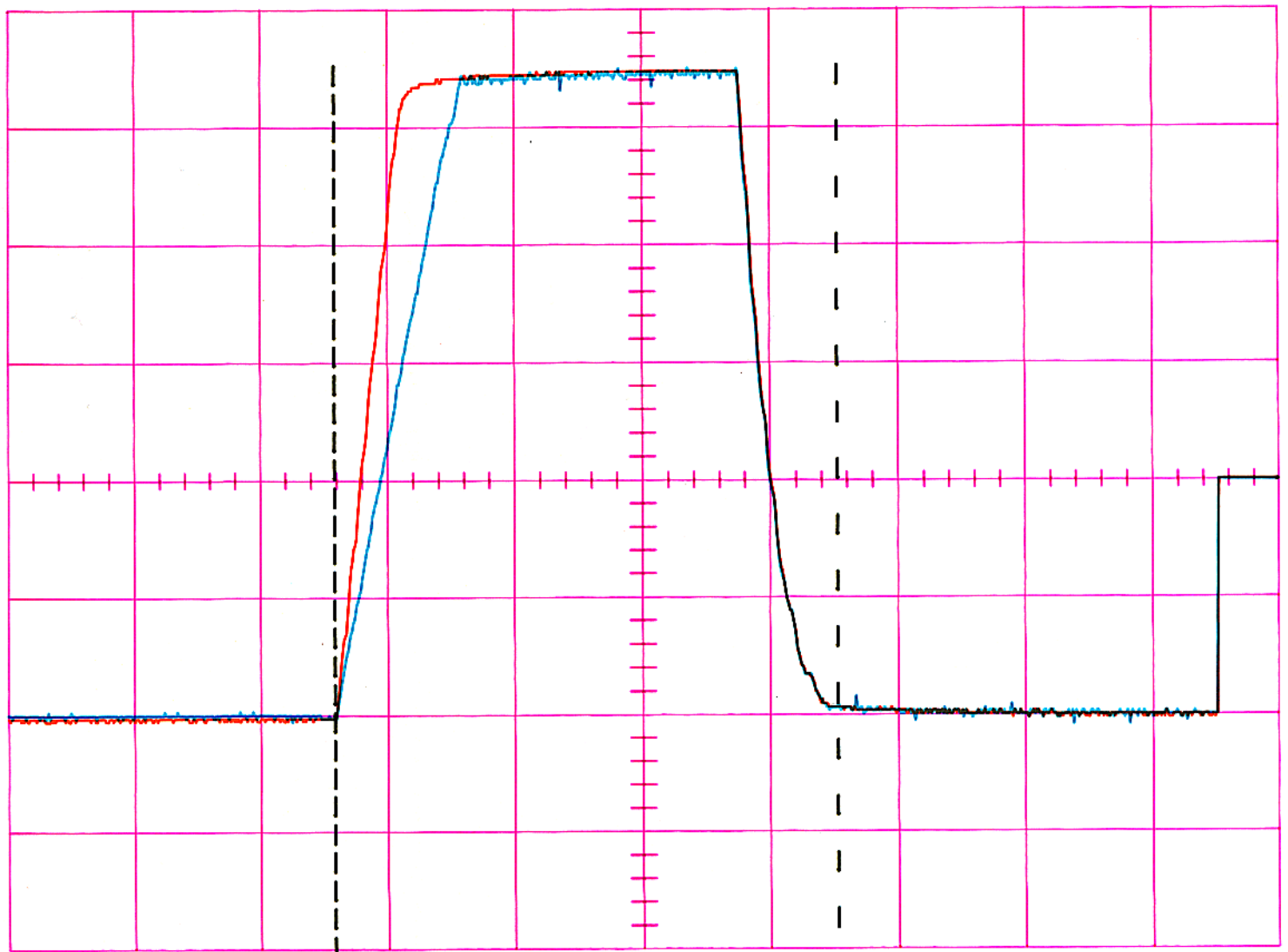


CH2 1V 500ms 1k  $\Delta t = +2.660$  S F

OX7520 ITT Instruments

AXE "Z" (Levage) - Mouvement de Montée - ESSAI N°4

CH1 >1V 500ms C2 T=0k 0000 \*1000

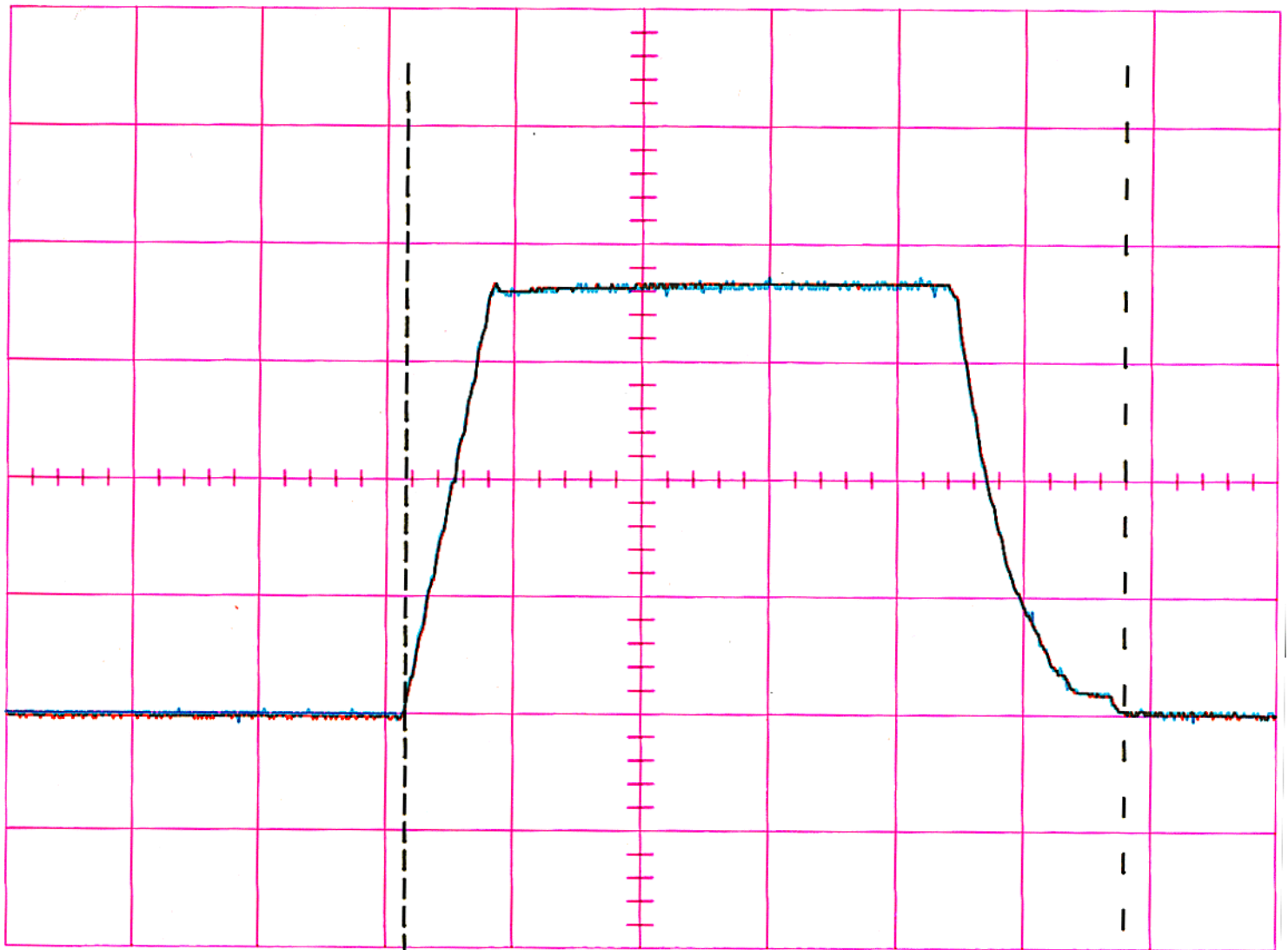


CH2 1V 500ms 1k  $\Delta t = +1.970$  S F

OX7520 ITT Instruments

AXE "Z" (Levage) - Mouvement de Montée - ESSAI N°5

CH1 >1V 500ms C2 T=0k 0142 \*1000

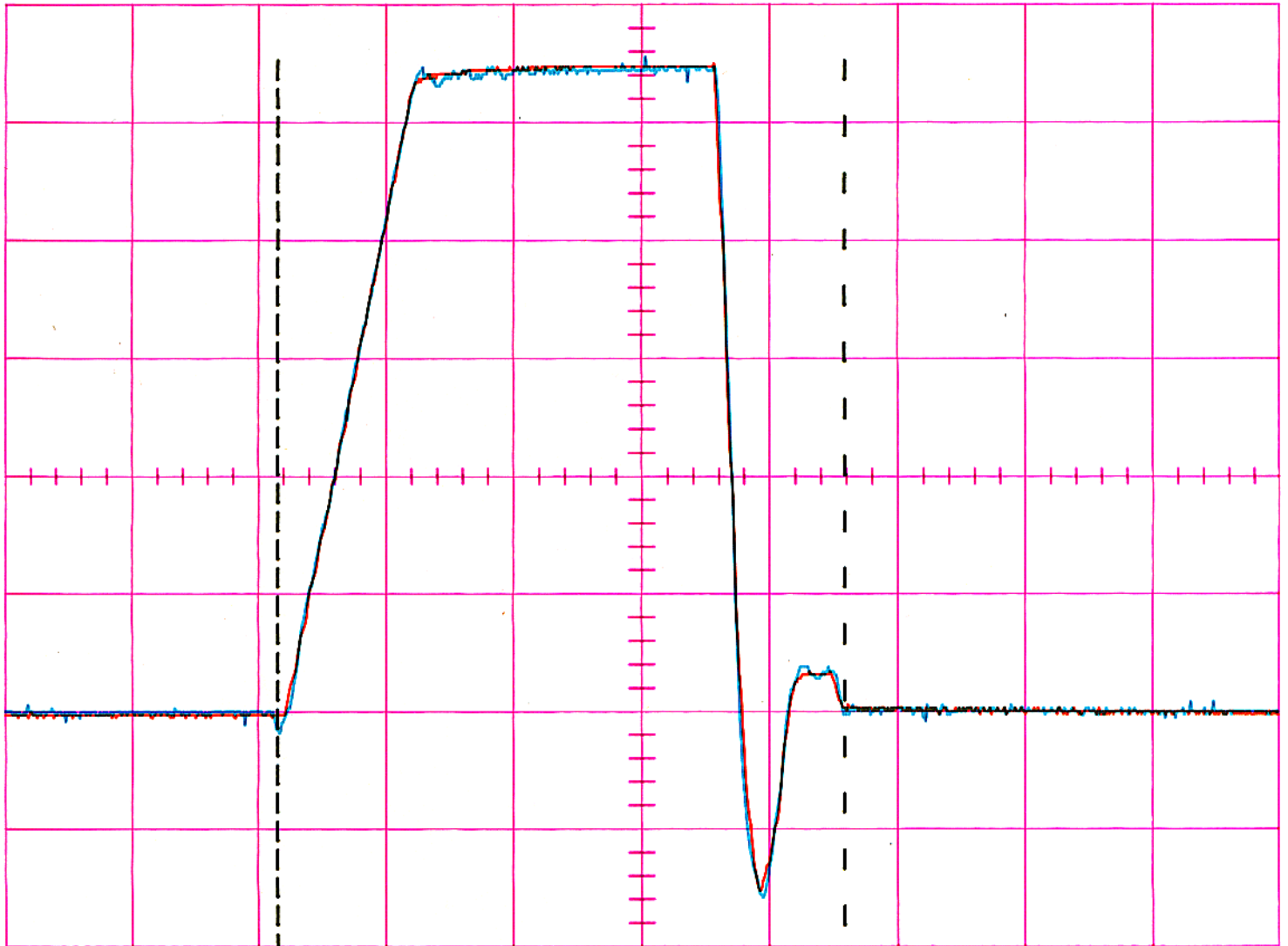


CH2 1V 500ms 1k  $\Delta t = +2.820$  S F

OX7520 ITT Instruments

AXE "Z" (Levage) - Mouvement de Montée - ESSAI N°6

CH1 >1V 500ms C2 T=0k 0136 \*1000

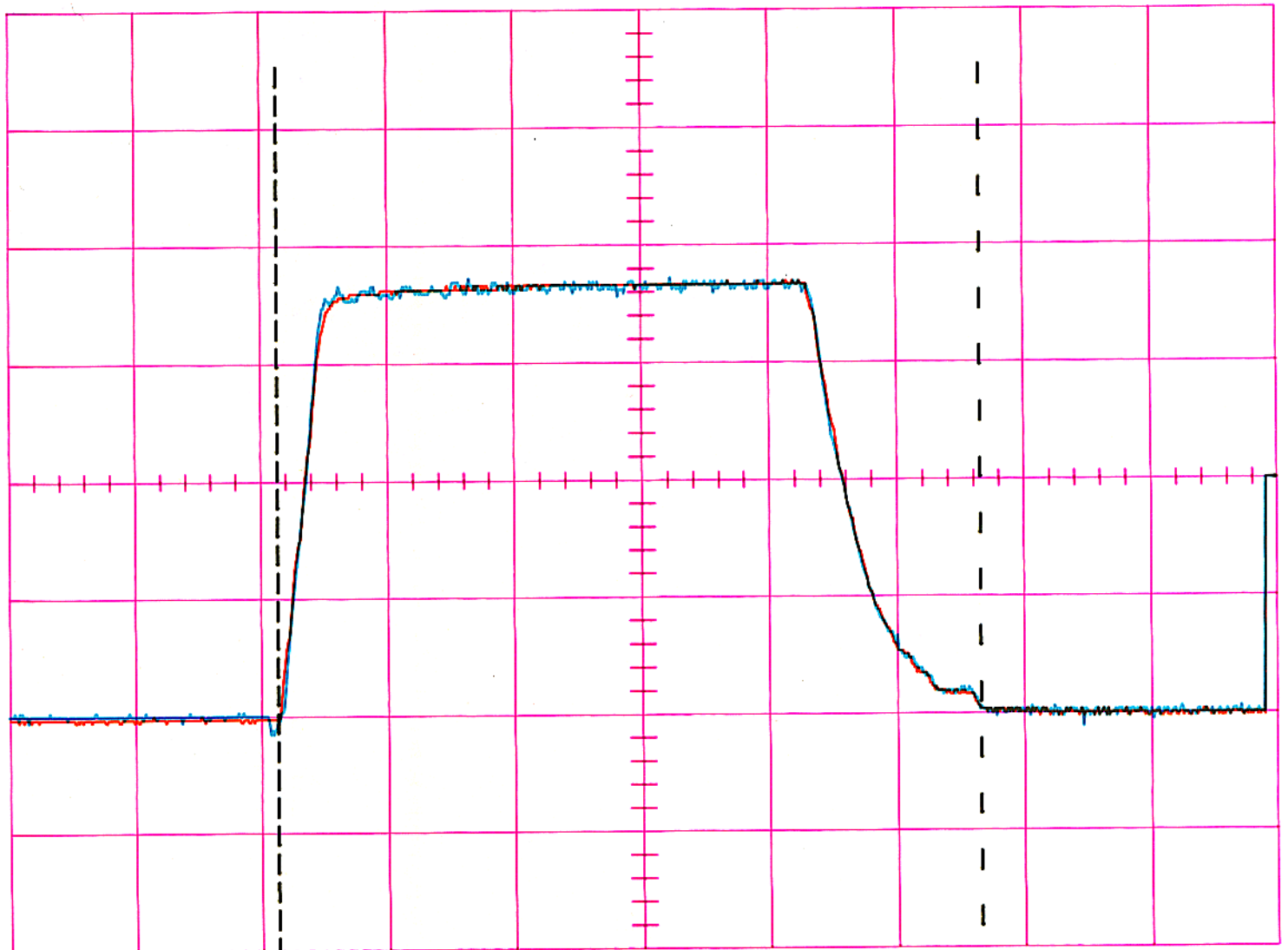


CH2 1V 500ms 1k  $\Delta t = +2.215$  S FLN

OX7520 ITT Instruments

# AXE "Z" (Levage) - Mouvement de Montée - ESSAI N°7

CH1 >1V 500ms C2 T=0k 1058 \*1000

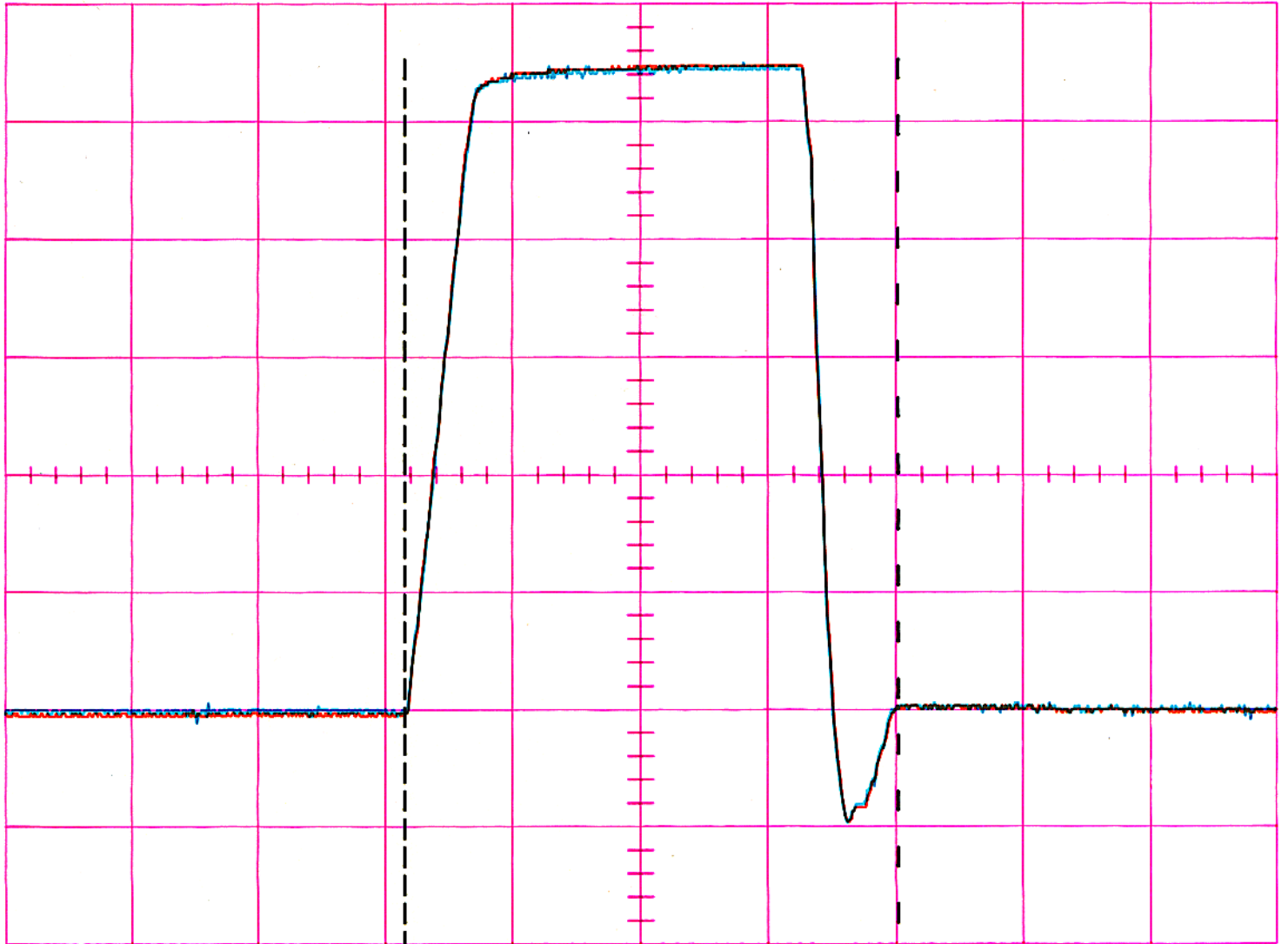


CH2 1V 500ms 1k  $\Delta t = +2.760$  S F

OX7520 ITT Instruments

AXE "Z" (Levage) - Mouvement de Montée - ESSAI N°8

CH1 >1V 500ms C2 T=0k 0106 \*1000



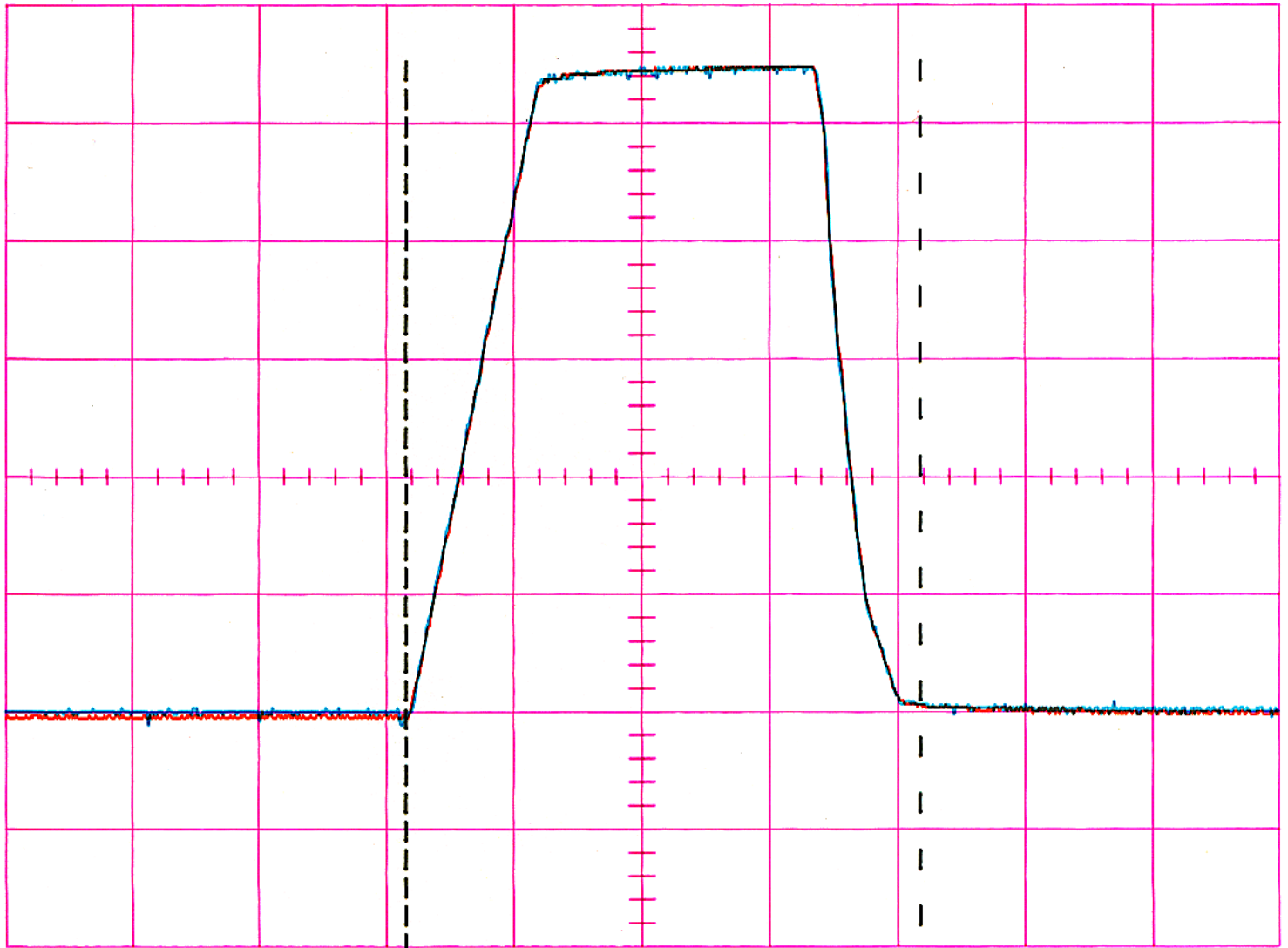
CH2 1V 500ms 1k  $\Delta t = +1.930$  S F

OX7520 ITT Instruments

AXE "Z" (Levage) - Mouvement de Montée -

ESSAI de Confirmation du réglage choisi

CH1 >1V 500ms C2 T=0k 0437 \*1000



CH2 1V 500ms 1k  $\Delta t = +2.010$  S F

OX7520 ITT Instruments

## Reglage du mouvement de descente de l'axe Z

### Paramètre de réglage:

L'intensité  $I_{max}$  délivrée au moteur ainsi que le gain de la chaîne de régulation ayant été réglés pour le mouvement de montée seront maintenus constants pour le réglage du mouvement de descente. Les autres paramètres pouvant influencer sur le comportement en descente sont donc :

- L'accélération K2 , la vitesse nominale en descente Vnd et la distance de ralentissement en descente K5

### Grandeurs observées:

Et : Ecart de traînage maximum dans la phase d'accélération

Ed : Ecart de dépassement maximum

Ee : Ecart de dépassement au moment de l'arrêt en position

T : Temps du mouvement de descente

### Niveau des paramètres:

Accélération K2: Niveau 1 : 140; niveau 2 : 200

Vitesse nominale en descente: niveau 1 : -600; niveau 2 : -900

Distance de ralentissement K5 : niveau 1 : 12; niveau 2 : 24

### Table L4 du Plan d'expérience:

Essai	Paramètres de réglage			Observations			
	Accél. K2	Vnd	Raient. K5	Et	Ed	Ee	T
1	140	-600	12	0	0	0.4	2.63
2	140	-900	24	0	0, 1	0.1	2.17
3	200	-600	24	0	0	0	2.74
4	200	-900	12	0	0.3	2.2	2.15

### Dépouillement des résultats

Pas d'influence sur la réponse Et

*Ed*

*Ee*

7-

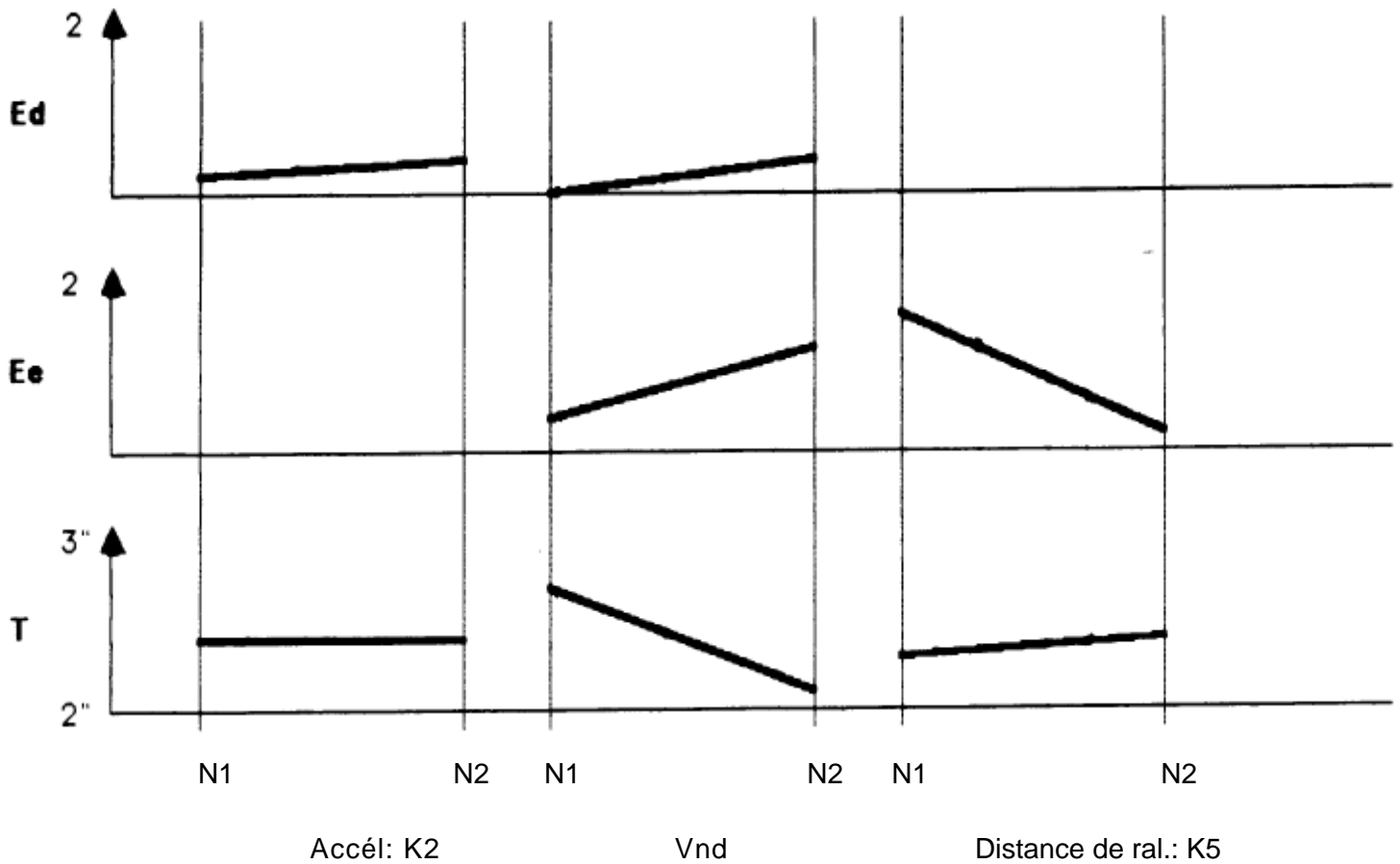
	Acc K2	Vnd	Rai K5
N1	0.05	0	<del>X</del>
N2	0.15	0.2	<del>X</del>

	Acc K2	Vnd	Rai K5
N1	<del>X</del>	0.2	1.7
N2	<del>X</del>	1.15	0.05

	Acc K2	V Vnd	Rai K5
N1	2.4	2.68	2.39
N2	2.45	2.16	2.45



### Analyse des résultats:



### Décision:

Accélération : Niveau 1 soit 140

Vitesse nominale en descente: Vnd : -850

Distance de ralentissement: K5 : Niveau 2 soit 24

### Rappel de la décision pour la montée:

Imax : 7.25 A

Accélération : Niveau 1 : 70

Vitesse nominale en montée : Vnm 850

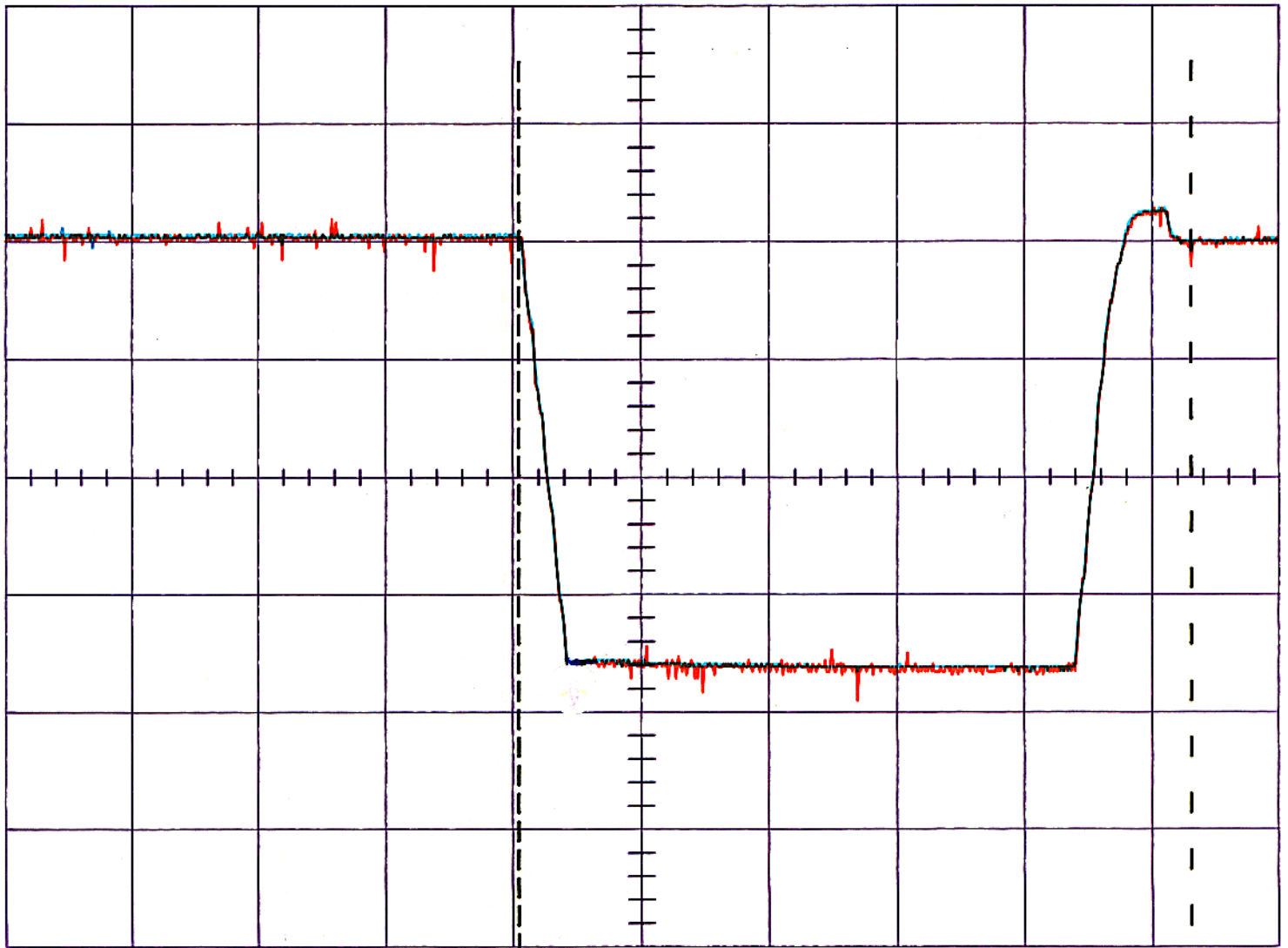
Distance de ralentissement en montée: Niveau 2 : 24

Gain de la chaîne de régulation : 10

Voir résultat final sur la courbe de réponse en montée et en descente de l'essai de confirmation.

AXE "Z" (Levage) - Mouvement de Descente - ESSAI N°1

CH1 >1V 500ms C2 T=0k 0714 \*1000

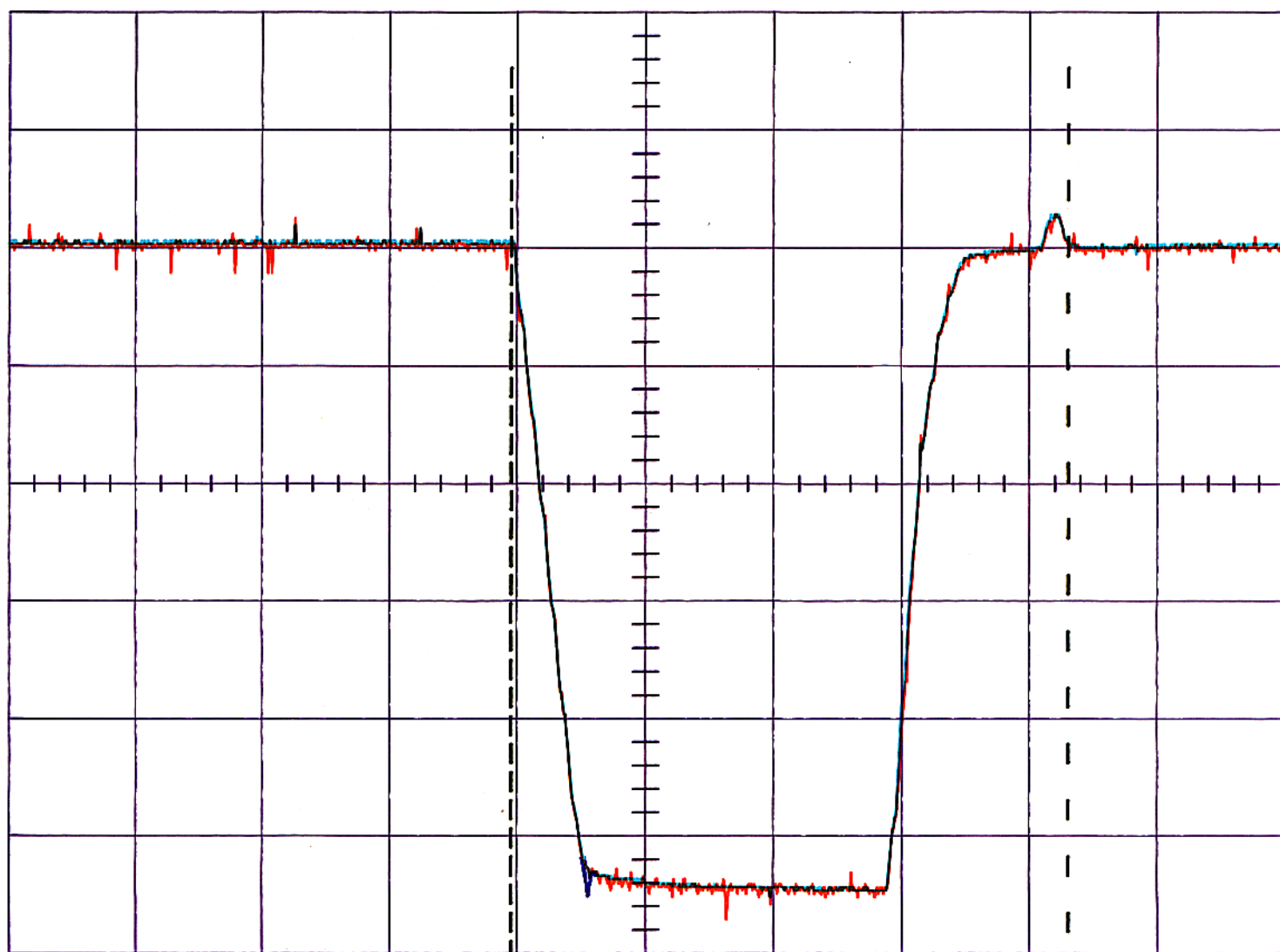


CH2 0.5V 500ms 1k  $\Delta t = +2.630$  S FLN

0X7520 ITT Instruments

# AXE "Z" (Levage) - Mouvement de Descente - ESSAI N°2

CH1 >1V 500ms C2 T=0k 0989 \*1000

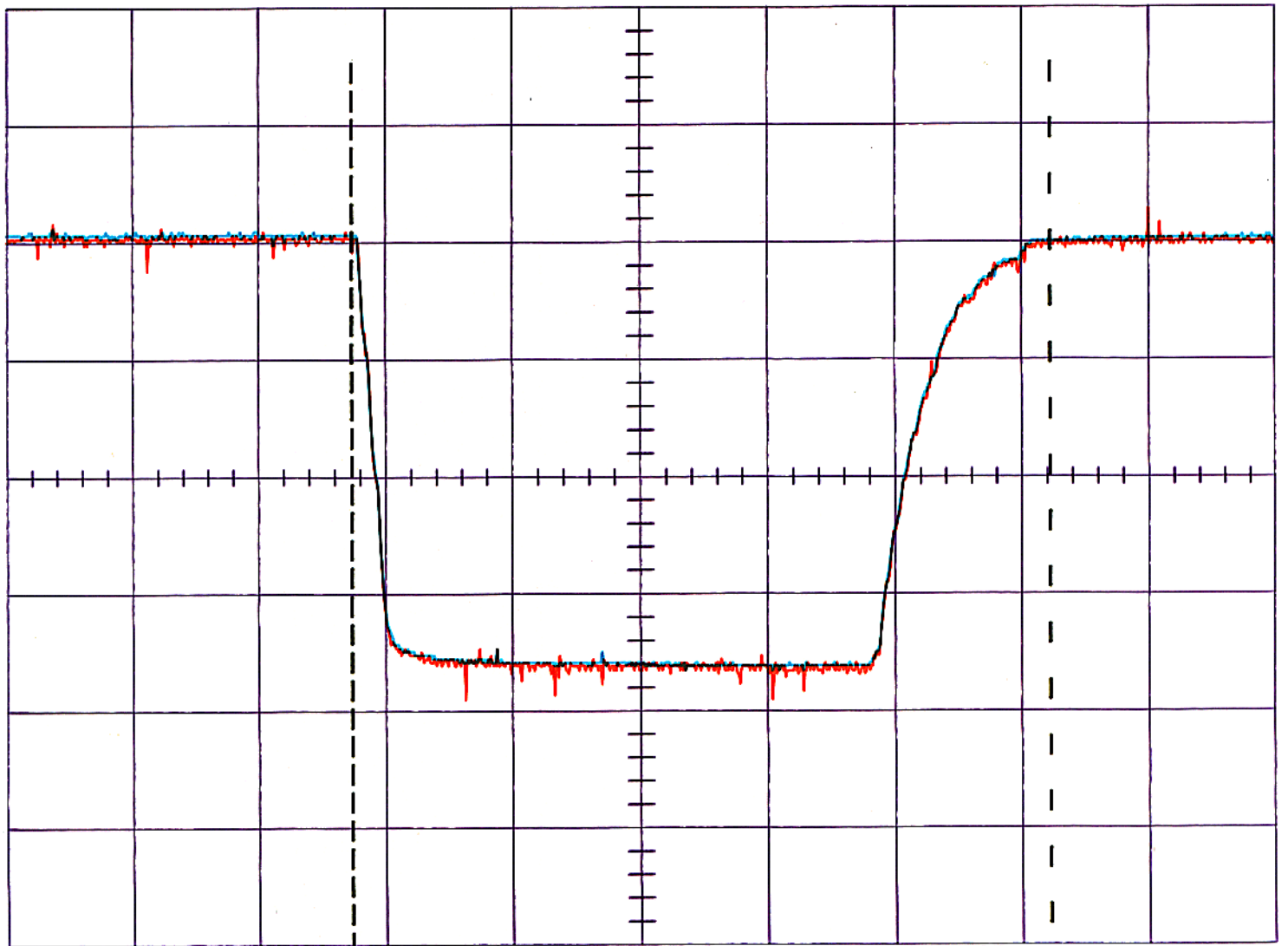


CH2 0.5V 500ms 1k  $\Delta t = +2.175$  S FLN

OX7520 ITT Instruments

AXE "Z" (Levage) - Mouvement de Descente - ESSAI N°3

CH1 >1V 500ms C2 T=0k 0989 \*1000

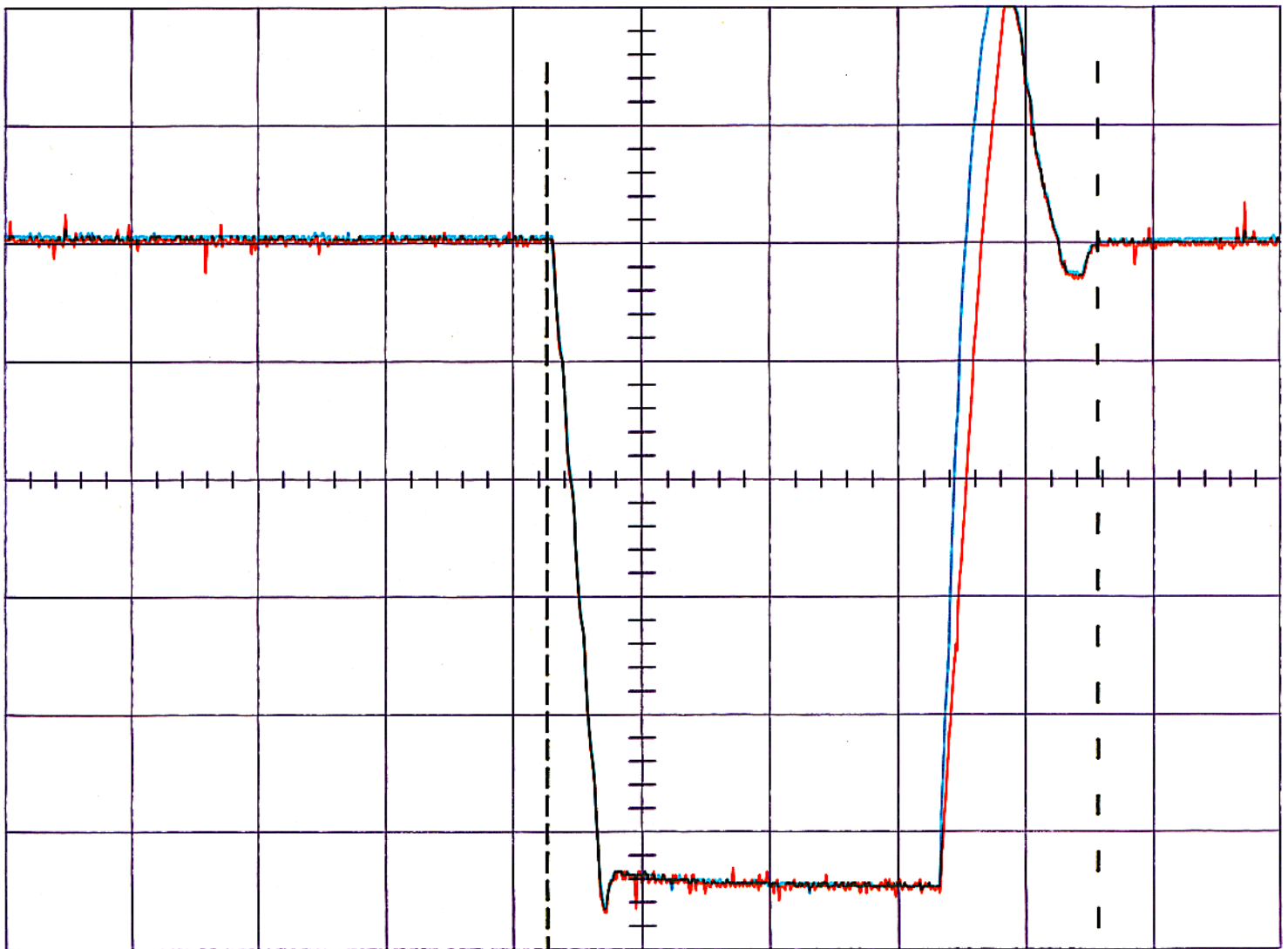


CH2 0.5V 500ms 1k  $\Delta t = +2.745$  S FLN

OX7520 ITT Instruments

AXE "Z" (Levage) - Mouvement de Descente - ESSAI N°4

CH1 >1V 500ms C2 T=0k 0989 \*1000



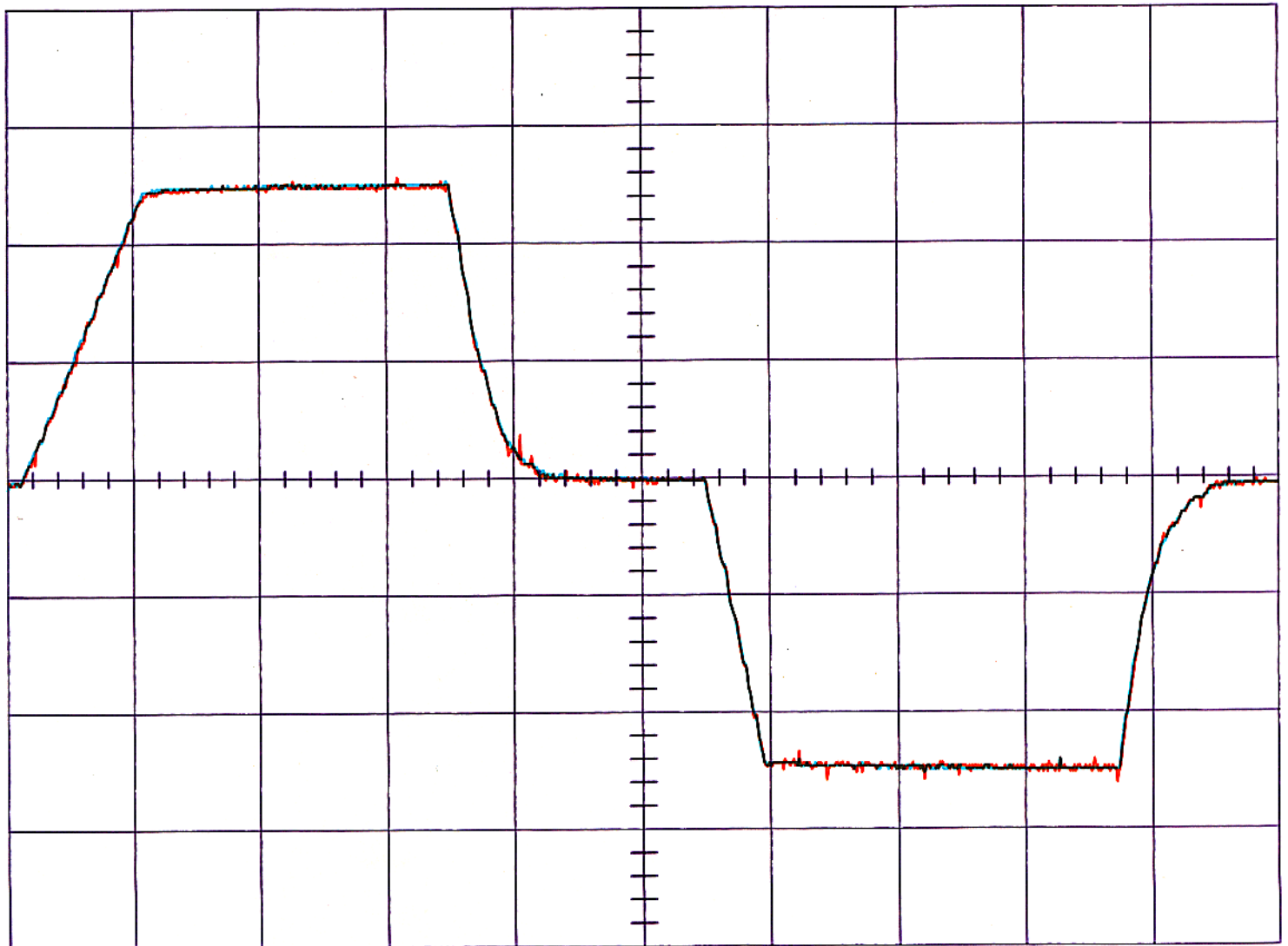
CH2 0.5V 500ms 1k  $\Delta t = +2.150$  S FLN

0X7520 ITT Instruments

# AXE "Z" (Levage) - Mouvement de Montée et Descente -

## ESSAI de confirmation du réglage choisi

CH1 >2V 500ms WD T=0k 0849 \*1000



CH2 1V 500ms 1k F

OX7520 ITT Instruments