

50376

1975

209

N° D'Ordre 176

50376

1975

209

T H E S E

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE 1

pour l'Obtention du titre de

DOCTEUR - INGENIEUR

par

Michel CANONNE

Ingénieur I.D.N.



**CONTRIBUTION A L'AUTOMATISATION DE LA PREPARATION
DU SABLE EN FONDERIE**

Soutenue le 10 Octobre 1975 devant la Commission d'Examen

Messieurs P. VIDAL

L. POVY

J.M TOULOTTE

P. AUBERT

L. BIGARD

Président et Rapporteur

Examineur

Examineur

Invité

Invité



030 051262 6

L'étude que nous présentons a été réalisée au "Centre d'Automatique de l'Université des Sciences et Techniques de Lille" sous l'égide du "Centre Technique des Industries de la Fonderie", maître d'Oeuvre, et en collaboration avec le "Laboratoire d'Automatique et d'Etude des Systèmes de Toulouse".

Les expériences et mesures sur le processus industriel ont été menées sur les sableries des chantiers n° 6 et 7 de la fonderie Gailly à Meung sur Loire.

L'ensemble de ces travaux a fait l'objet du contrat DGRST n° 73/7/1073.

Le procédé, consistant à couler du métal en fusion dans un moule en matière réfractaire comportant une empreinte en creux, est très ancien, et représente un moyen commode de créer des pièces métalliques aux formes souhaitées.

La sixième place occupée par la France, parmi les nations productrices de pièces moulées, témoigne de la permanence du rang de cette industrie dite traditionnelle, et ce mode de transformation qui a accompagné toutes les étapes de la société industrielle, présente aujourd'hui un visage renouvelé marqué par un puissant dynamisme technique.

C'est dans le cadre de cette rénovation que se situe notre étude qui vise à réduire les rebuts de fonderie par une meilleure connaissance et une meilleure maîtrise de ce matériau indispensable au fondeur qu'est le sable de moulage.

Dans une fonderie, les pièces moulées sont produites par coulée de métal en fusion dans un moule réfractaire constitué principalement de sable, d'argile et d'eau. Lorsque le métal est suffisamment refroidi le moule qui l'entoure est détruit et le sable est recyclé en vue d'une réutilisation. Cependant, du fait de la température à laquelle il a été porté, il a perdu une partie de ses propriétés agglutinantes, indispensables à la tenue des moules et doit passer dans un poste de préparation pour y subir un traitement de régénération.

Le traitement consiste en ajouts d'eau et d'argile et en un malaxage destiné à homogénéiser le matériau de moulage ainsi reconstitué.

Suivant le poids et la surface des pièces produites, le sable est plus ou moins dégradé. Jusqu'à présent, les ajouts étaient faits à l'estimé d'après le serrage d'une poignée de sable dans la main, (test qui s'avère assez hasardeux) ou par le contrôle d'un échantillon en laboratoire qui nécessite une durée de mesure assez longue, et ne permet que des rectifications à posteriori alors que le sable a eu le temps d'évoluer.

Notre but consiste à commander les ajouts faits au sable recyclé en vue d'obtenir une régularité des caractéristiques mécaniques des moules qui n'a pu être assurée avec les moyens utilisés jusqu'à présent.

Un certain nombre d'études ont déjà été effectuées dans ce domaine, destinées essentiellement à mettre au point des capteurs adaptés au matériau à tester. Toutes les applications qui ont été faites ont débouché sur une régulation au coup par coup, organisée autour du malaxeur et ne tenant compte ni des problèmes de stabilité du système posés par le recyclage du sable, ni de la nécessité d'un filtrage des mesures du fait de la très grande dispersion liée à la nature même du sable de moulage.

Après un chapitre d'introduction concernant l'industrie de la fonderie et plus particulièrement les problèmes liés au sable, nous présentons les résultats de deux études menées en parallèle dans le cadre de notre contrat. L'une dans le domaine des capteurs, recherche des relations entre les propriétés physiques, chimiques, électriques,... du sable et sa composition, en particulier par des programmes de corrélation, afin d'élaborer un modèle du sable de moulage, utilisable dans une régulation. L'autre applique sur un modèle théorique très simplifié d'une fonderie un certain nombre d'algorithmes de régulation et estime leur efficacité.

Enfin un modèle plus élaboré, incluant capteurs et régulation, permet de simuler le fonctionnement de la fonderie ainsi équipée, et de tester la validité des résultats de l'étude avant sa réalisation.

CHAPITRE I

Objet de l'étude :

Une sablerie de fonderie.

Dans une fonderie la production conventionnelle des moules et des pièces coulées regroupe les activités principales suivantes :

- préparation du sable,
- serrage des moules,
- préparation des moules (pose des noyaux, supports, couches, refroidisseurs...),
- fermeture des moules,
- crampage ou chargement des moules,
- préparation du métal,
- coulée des pièces,
- refroidissement des pièces coulées,
- décochage des pièces.

La machine a remplacé un peu à la fois l'homme pour certaines de ces opérations, notre travail ne représente donc pas la première incursion de l'automatique dans le processus de moulage, mais s'inscrit dans une tendance à l'automatisation intégrale des fonderies, tant au point de vue préparation que manutention des matériaux utilisés.

Le sable de fonderie a posé, de tout temps, de nombreux problèmes aux fondeurs du fait de l'impossibilité où ils se trouvent, de prévoir, d'améliorer le comportement des moules lors de la coulée, en partant d'un échantillon donné de sable. On constate actuellement l'existence d'un taux de rebuts variant d'une part, dans le temps et d'autre part, en fonction de la nature des pièces, qui représente 5 à 15 % de la production globale, et cela malgré l'emploi d'un personnel expérimenté.

Or, si l'on considère l'influence du sable sur la qualité des pièces produites, une étude systématique des rebuts montre que le sable est la cause de plus de 50 % de la totalité des rebuts et que par ailleurs sur 90 défauts de fonderie répertoriés, 31 citent le sable comme cause probable de ceux-ci.

Compte tenu de la faible part que représente sur le plan économique le coût de la section sablerie que l'on évalue à 5 ou 6 % du prix de revient technique, il semble illusoire de négliger la qualité du sable pour la sacrifier à la question prix.

Ces chiffres situent l'importance du facteur sable sur les rebuts et par voie de conséquence sur le prix de revient.

I - A)

Description de la sablerie pilote :

Toute régulation nécessite des mesures : La première étape vers la régulation de la composition du sable de fonderie consiste donc à mettre au point un certain nombre de capteurs susceptibles de fonctionner de façon continue ou échantillonnée, sans intervention humaine, et dont les mesures sont représentatives de cette composition.

Il faut pour cela rechercher sur le sable quelles sont les quantités liées à la présence des différents constituants du sable qui soient mesurables par de tels capteurs.

Deux méthodes s'offrent à nous :

- Soit réaliser les mesures sur des sables de différente composition préparés en laboratoire.
- Soit réaliser ces mesures sur une sablerie réelle, en environnement industriel.

Plusieurs raisons nous ont fait opter pour la deuxième solution.

La première est que cette étude devant déboucher sur une réalisation, il était préférable de prendre en compte, dès le départ, les contraintes techniques propres au processus à équiper.

D'autre part, des tests préliminaires ont montré que les essais effectués "in situ", étaient loin de donner des résultats aussi probants que ceux effectués en laboratoire.

Le sable de fonderie s'est avéré être en effet un matériau très complexe mettant en jeu une multitude de paramètres difficiles à dénombrer et encore plus à analyser, aussi avons nous cherché à nous rapprocher le plus possible du sable industriel, afin de réduire au maximum l'influence de ces paramètres.

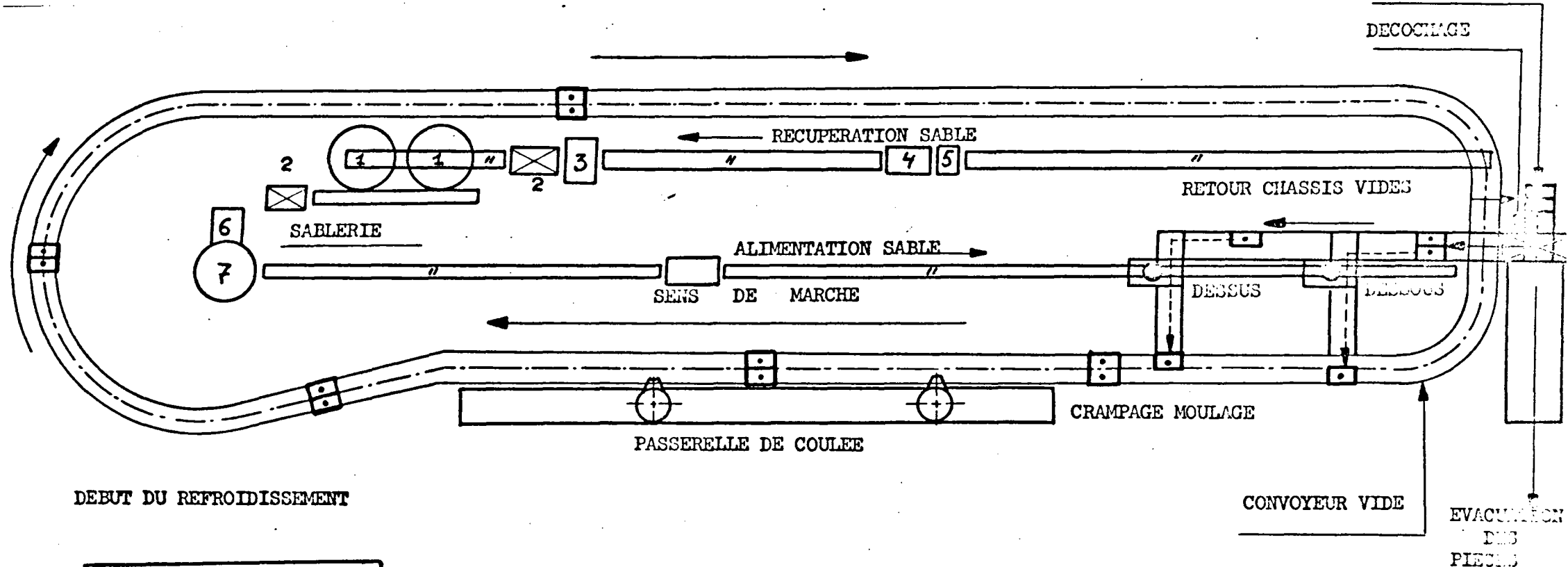
La sablerie du chantier de moulage n° 7 de la fonderie Gailly à Meung sur Loire est alimentée par deux silos de 35 t chacun, qui sont alternativement fournisseur de sable et récepteur de sable décoché, l'inversion du rôle des silos se faisant lorsque le silo récepteur est plein. Le stockage permet une durée de recyclage du sable d'environ 2 heures.

Le sable arrivant du silo d'alimentation est amené au malaxeur par l'intermédiaire d'un doseur volumétrique. La durée du malaxage d'environ 2 minutes porte sur 1 t de sable. C'est à ce niveau que se font les additions d'argile de noir et d'eau destinées à régénérer le sable en vue d'une nouvelle utilisation.

Le sable ainsi préparé tombe dans une trémie située sous le malaxeur d'où il est conduit, par bande transporteuse aux machines à mouler fabriquant les deux moitiés des moules.

Une fois assemblés, les moules sont placés sur une chaîne à défilement continu où ils reçoivent leur contenu de métal en fusion et sur laquelle ils progressent tandis que s'opère le processus de refroidissement du métal.

Lorsque la pièce est suffisamment refroidie, le moule est détruit par vibration, la pièce éjectée, et le sable récupéré et renvoyé au silo de stockage après avoir été aéré, refroidi et débarrassé de ses résidus métalliques.



DEBUT DU REFROIDISSEMENT

SABLERIE

1. SILOS A SABLE
2. ELEVATEURS
3. TROMEL
4. AERATEURS
5. TAMBOUR MAGNETIQUE
6. DOUBLE BATCH
7. MOULIN
- " TAPIS

CHANTIER 7

SCHEMA DE PRINCIPE

FIGURE 1

Les noyaux subissent, à la coulée, une désagrégation du fait de la combustion des agglomérants. Au cours du retour du sable décoché aux silos, cette désagrégation se poursuit et le sable ainsi récupéré, compense les pertes qui se produisent tout au long de la chaîne.

Citons encore quelques caractéristiques de la sablerie :

- Renouvellement du sable par noyautage	: 150 t/mois,
- Volume des moules	: 125 dm ³ ,
- Nombre de moules sur la chaîne	: 115,
- Vitesse de rotation de la chaîne	: 2 tours/heure,
- Débit de la sablerie	: 30 t/heure.

Les pièces produites sur le chantier n° 7 ont une taille très variable, ce qui dégrade le sable d'une manière irrégulière.

Les ajouts d'argile de noir et d'eau sont effectués à l'estimé d'après des tests pratiqués sur certaines broyées antérieures (résistance à la compression, teneur en eau, perméabilité, dureté des moules) et exécutés au laboratoire des sables de l'usine, ou sur simple jugement du conducteur du malaxeur.

Régulièrement, des échantillons de sable préparé sont adressés au C.T.I.F. pour des essais plus complets (granulométrie, argile, teneur en noir, résistance à la compression, perméabilité en fonction de la teneur en eau). Les tests et essais montrent d'importantes variations très rapides en ce qui concerne la teneur en eau, plus lentes en ce qui concerne les teneurs en argile et en noir.

Il s'agit donc en premier lieu de réguler ces éléments de base de la qualité du sable sans chercher une optimisation qui pourra être étudiée à un stade ultérieur après recherche d'un critère de qualité de la production.

I - B)

Le sable de moulage :

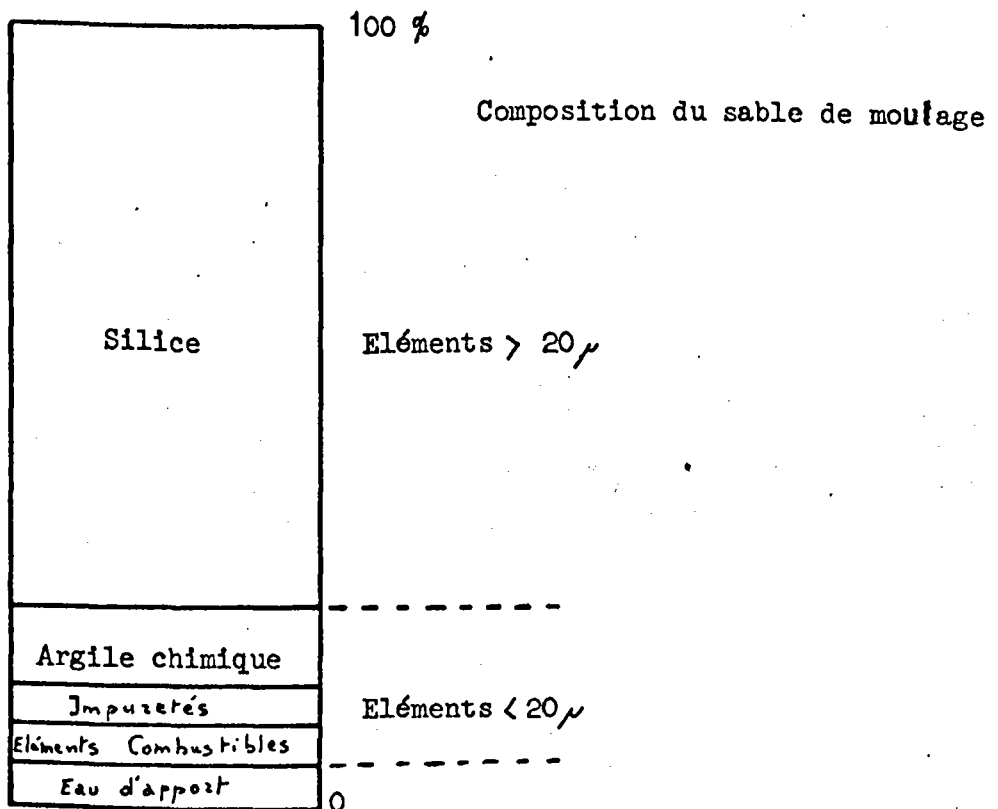
1) Composition du sable :

Les sables de moulage naturels ou synthétiques tels que celui utilisé sur le chantier n° 7 contiennent les éléments suivants :

- Des grains de silice que l'on caractérise par leur dimension, leur répartition granulométrique et leur forme.
- Des éléments de dimension inférieure à 20μ comprenant :
 - * L'argile proprement dite constituée de paillettes fines de l'ordre du micron qui renferment une certaine proportion d'eau de constitution.
 - * Des poussières de silice et autres impuretés telles l'oxyde de fer, la chaux, des matières organiques, des alcalins qui peuvent former des silicates à bas point de fusion.
 - * Des produits d'addition : noir minéral ou brai, destinés à améliorer l'état de surface des pièces, farine de bois.
- De l'eau d'apport qui donne à l'argile ses propriétés de liant, afin de réunir les grains de silice entre eux.

Cette composition peut être schématisée par la figure de la page suivante :

Figure -2



2) Les propriétés d'utilisation du sable :

Pour être apte au moulage, un sable de fonderie doit posséder un certain nombre de qualités fondamentales qui sont :

- La plasticité, c'est-à-dire l'aptitude du sable à prendre la forme du modèle. On la définit aussi comme l'aptitude au serrage du sable sous un effort donné.
- La cohésion qui permet au sable de conserver la forme donnée par le modèle, et de résister aux contraintes prenant naissance lors de la coulée du métal en fusion.
- La perméabilité : Aptitude du sable à se laisser traverser par les gaz au moment de la coulée, gaz emprisonnés à l'intérieur du moule par le métal ou issus de la combustion de certains éléments lors de l'élévation de la température.

- La résistance à la chaleur : Propriété du sable de ne pas se dégrader sous l'influence de la chaleur du métal liquide soit par fusion des éléments fins soit par dilatation excessive de ses constituants, ce qui maintient la cohésion à chaud.

Ces propriétés mécaniques du sable dépendent d'un certain nombre de facteurs physiques liés à ses différents constituants et dont on retrouvera l'influence sur le tableau de la figure 3 :

- La finesse des grains de sable diminue la perméabilité du fait de l'accroissement de la compacité du moule et de l'augmentation de la surface de frottement entre le sable et les gaz. La réfractairité diminue de même, ce qui s'explique par l'augmentation du rapport surface/volume de chaque grain. Par contre, le fini de surface des pièces obtenues est amélioré.
- L'étalement de la granulométrie est défavorable à la plasticité. En effet, une granulométrie concentrée avec des grains de diamètre uniforme donne un sable qui se serre en une masse régulière et ordonnée. La perméabilité diminue les grains les plus fins se logeant dans les interstices laissés par les plus gros. En ce qui concerne la tenue en dilatation, on assiste à deux phénomènes opposés : Pour une granulométrie très concentrée ou très étalée, le sable se serre en une masse compacte où les grains sont gênés pour se dilater alors que par une granulométrie moyennement étalée, il subsiste des vides entre les grains facilitant leur déplacement sans déformer la surface du moule.
- La forme des grains a aussi son importance, car des grains ronds améliorent la plasticité, la cohésion et la perméabilité.

	Plasticité	Cohésion à vert	Cohésion étuvé	Perméa- bilité	Réfrac- tairité	Tenue à dilatation	Cohésion à chaud	Fin de surface
Granulométrie fine	-	-	-	--	--			++
Granulométrie étalée	--	+	+	--		++/--		
Grains ronds	+	+	+	+				
Quantité d'argile	--	++	++	-	--	+	+	
Faible teneur en eau	-	++	++	++				
Teneur en eau optimale	minimale	forte		maximale				
Forte teneur en eau	+	--	++	--		+	+	-
Noir minéral	-	+	+	--			-	++
Impuretés					--			

++ : très favorable

+ : favorable

- : défavorable

-- : très défavorable

Figure 3 : Influence des constituants du sable sur ses propriétés physiques.

- Une teneur en argile élevée est équivalente à une granulométrie fine pour le sable, il y a augmentation de la cohésion, diminution de la plasticité et diminution de la réfractairité, l'argile étant composé d'éléments inférieurs à 20 microns de diamètre.
- La qualité agglutinante des éléments argileux est liée à la finesse de l'argile et à la présence plus ou moins importante de poussières de silice au pouvoir liant négligeable. Une augmentation de la qualité agglutinante améliore la cohésion mais diminue la réfractairité comme nous l'avons vu précédemment.

On distingue d'ailleurs plusieurs types d'argiles :

- * Les argiles colloïdales à pouvoir agglutinant élevé, sensibles à l'humidité mais supportant mal l'étuvage et présentant une résistance faible à haute température.
- * Les argiles réfractaires au pouvoir liant moins élevé, moins sensibles à l'humidité mais supportant mieux que les précédentes, l'étuvage ainsi que les hautes températures.

On définit généralement le rendement d'une argile contenue dans un sable comme le rapport de la résistance à la compression maximale obtenue aux essais d'utilisation, à la teneur en éléments argileux. Pour les sables naturels il est de l'ordre de 65 CN/cm².

- L'influence de l'eau libre présente dans le sable, est prépondérante sur ses propriétés mécaniques.
- * La cohésion à vert passe par un maximum en fonction de la teneur en eau.
- * La cohésion à sec augmente avec cette teneur.
- * La perméabilité passe aussi par un maximum qui ne correspond pas à celui de la cohésion à vert.

- Les produits d'addition tels que le noir minéral, et le brai sont utilisés pour améliorer l'aspect et l'état de surface des pièces. Du point de vue mécanique, ils ont une influence voisine à celle de l'argile : .

Ils diminuent la perméabilité, augmentent la cohésion.

- Les impuretés ont généralement un rôle néfaste, aussi cherche t'on, dans la mesure du possible, à en limiter la proportion dans le sable.

Ces diverses considérations sur l'influence des principaux constituants du sable de moulage, nous montrent que leur choix résulte toujours d'un compromis entre des actions contradictoires, et qu'il n'existe pas dans l'absolu, une composition optimale du sable, mais des compositions adaptées à une utilisation précise.

Le sable de la fonderie Gailly a, quant à lui, les caractéristiques suivantes :

Il est destiné au moulage de pièces en fonte malléable de 10 à 50 kg par la méthode du moulage à vert.

Cette méthode exclut tout traitement thermique du moule avant la coulée et permet d'atteindre une productivité élevée pour de petites pièces ne nécessitant pas une résistance élevée du moule.

Le sable est du type synthétique, reconstitué artificiellement à partir de sable de carrière siliceux introduit uniquement par le noyautage des pièces, et de deux argiles, l'une colloïdale, l'autre réfractaire, mélangées en parties égales.

Le seul produit d'addition complémentaire est le noir minéral.

Les proportions visées pour chacun des constituants sont actuellement les suivantes :

Eau	:	4,5	%
Argile	:	12	%
Noir	:	6	%
Sable siliceux	:	77,5	%

La répartition granulométrique du sable siliceux est approximativement la suivante :

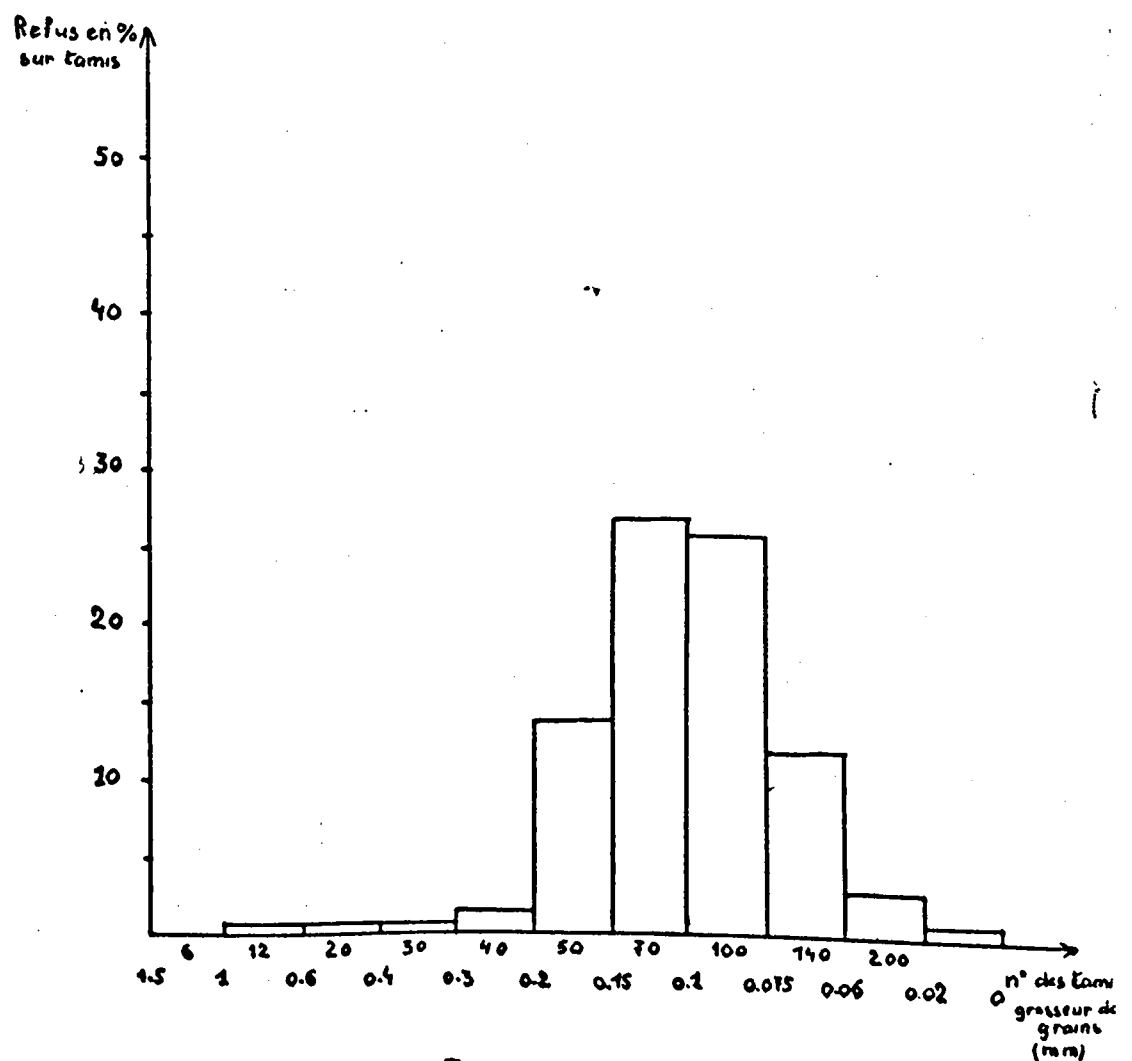


Figure 4

I - C) Le processus de destruction du sable de moulage :

Au moment de la coulée et pendant le refroidissement du métal à l'intérieur du moule, le sable qui constitue ce moule se trouve porté à une certaine température, d'autant plus élevée qu'il est proche de la séparation entre le sable et le métal en fusion.

Cette élévation de température croît aussi avec la masse de métal présente dans le moule et avec le temps de séjour du métal dans le sable. Il en résulte un certain nombre de phénomènes qui tendent à faire perdre au sable son aptitude au moulage.

C'est ce processus de destruction qui a amené les fondeurs à pratiquer un certain nombre d'additions afin de régénérer le sable issu du décochage.

- L'addition d'eau est destinée à compenser la perte d'eau libre. En effet dans toute la partie du moule portée à une température supérieure à 100° C, on assiste à une vaporisation de l'eau qui s'échappe à l'air libre du fait de la perméabilité du sable et qui doit de ce fait, être remplacée à chaque nouvelle utilisation du sable.
- L'addition de noir compense les pertes qui se produisent dans les mêmes conditions que pour l'eau, mais à température plus élevée : Le carbone se transformant en monoxyde de carbone et en gaz carbonique.
- Enfin l'addition d'argile remplace la fraction de ce constituant qui a perdu ses propriétés de liant par un processus que nous allons maintenant examiner plus en détail.

Les argiles sont des silicates d'aluminium hydratés à structure bi-dimensionnelle. Des ions oxygénés, silicium, aluminium et OH constituent le motif du feuillet élémentaire. L'espace entre deux feuillets est occupé par des molécules d'eau dite "eau libre", tandis que dans les interstices laissés par les ions à la surface du feuillet, se trouvent d'autres molécules d'eau plus ou moins liées aux ions environnants et appelées "eau zéolithique" ou "eau d'imbibition".

Considérons ce qui se passe lorsqu'on élève progressivement la température de l'argile :

- * Jusqu'à $100-110^{\circ}\text{C}$, on assiste à l'évaporation de l'eau libre avec, pour conséquence, un rapprochement des feuillets. Si on abandonne alors l'argile à l'air libre, elle absorbe à nouveau l'humidité de l'atmosphère pour reprendre son état initial.
- * A partir de 200°C environ, c'est au tour de l'eau zéolithique de s'évaporer. Ceci se fait de façon progressive jusqu'à 500°C . Comme précédemment, l'argile récupère l'eau zéolithique disparue si on la laisse refroidir à l'air libre.
- * Au delà de 500°C les ions OH constituant les feuillets se combinent entre eux pour former des molécules d'eau qui disparaissent à leur tour. Cette eau est appelée "eau de constitution" et son départ modifie le réseau cristallin de l'argile de façon irréversible. On obtient de la chamothe qui ne possède plus les propriétés liantes et plastiques de l'argile.

Ce phénomène est illustré par les figures 5 et 6 donnant la perte de masse d'une argile en fonction de la température.

- Sur la figure 5, l'élévation de température est de $150^{\circ}\text{C}/\text{H}$.
- Sur la figure 6 la température a été maintenue à 600°C , et montre que dès l'amorce du phénomène du départ de l'eau de constitution, celui-ci se poursuit même si l'on stoppe l'élévation de température ; toute l'eau de constitution est éliminée au bout d'un temps plus ou moins long.

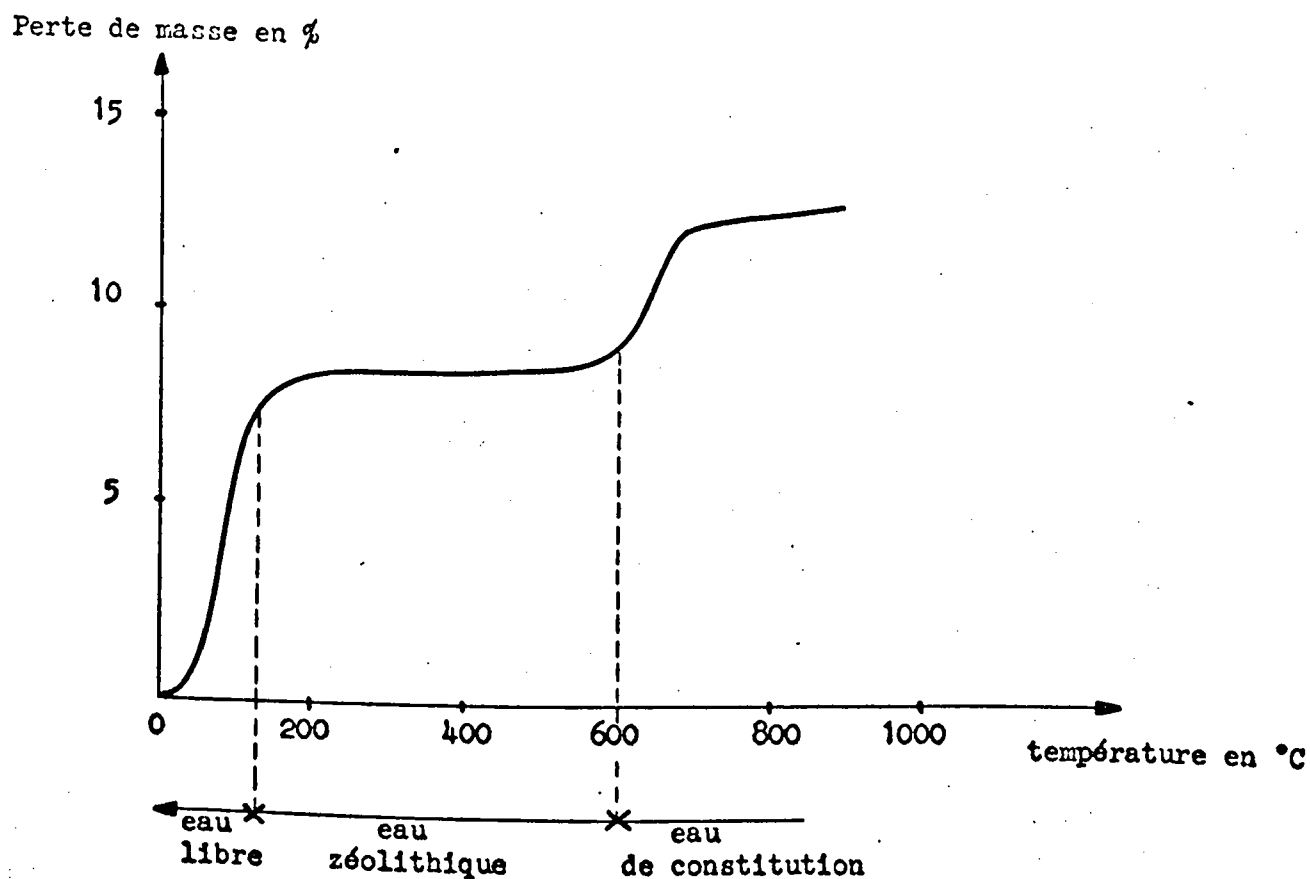


FIGURE 5 Courbe thermogravimétrique d'une argile (relevée pour une élévation de 2,5°C par minute)

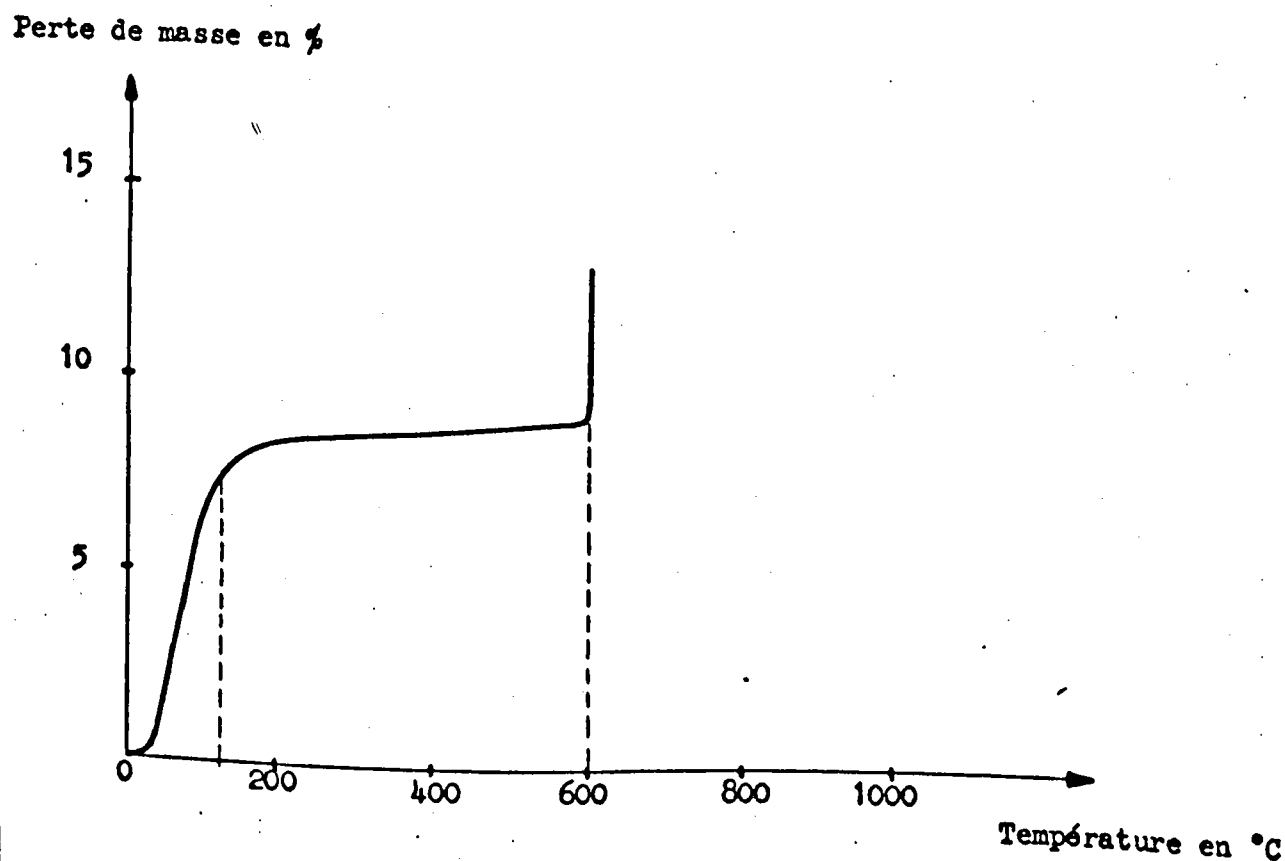


FIGURE 6 Courbe thermogravimétrique avec maintien à 600° C.

Afin de pouvoir commander la régénération du sable à la suite des dégradations qu'il a subies lors de la coulée et du fait qu'il travaille en circuit fermé, nous sommes amenés à étudier d'abord un modèle simplifié de ce qu'il advient d'un constituant du sable au cours de son trajet à travers la sablerie, que nous étudions.

CHAPITRE II

Etude d'un modèle simplifié de sablerie de fonderie

L'Automatisation d'un processus industriel suppose que l'on dispose tout d'abord d'un modèle théorique ou simulé de ce processus, à partir duquel on élabore, par la suite, différents algorithmes possibles vis à vis des critères de l'automaticien: stabilité, précision, temps de réponse...

Il existe un certain nombre de méthodes de détermination d'un tel modèle, qui découlent de deux façons opposées d'envisager le système :

Les méthodes qui considèrent le processus de l'extérieur en ne s'attachant qu'aux variations des entrées et des sorties entre lesquelles elles recherchent des relations, et celles qui considèrent son fonctionnement interne, afin de le décomposer en éléments simples dont le comportement est bien connu. C'est cette seconde solution que nous avons employé du fait de sa relative facilité d'application à la sablerie de fonderie, en nous basant sur les remarques suivantes :

De par sa nature même de mélange de constituants inertes, le sable de fonderie se comporte comme un système invariant, c'est-à-dire indépendant du temps . Son transit à travers la fonderie, ne met en jeu que des retards purs et des bilans de matériaux. Dans ce sens, nous avons vérifié que des phénomènes tels que l'évaporation de l'eau sont suffisamment lents pour pouvoir être négligés durant les temps de transfert des matériaux.

En fait, ce sont deux modèles que nous allons utiliser au cours de cette étude . Le premier, que nous verrons au cours de ce chapitre est très simplifié et permet une étude à caractère plutôt théorique, destinée à mettre en évidence les propriétés fondamentales du système. Le second, beaucoup plus élaboré et plus proche de la réalité, permet lors du chapitre IV, de tester la validité des algorithmes de régulation envisagés ici, appliqués à un environnement industriel.

I. Elaboration du modèle :

Nous avons vu au chapitre précédent, que le sable de fonderie était constitué principalement de silice, d'argile, de carbone, et d'eau. Nous nous trouvons donc en présence, de quatre variables à régler.

Quelques remarques vont permettre de simplifier ce problème.

- Le malaxeur est alimenté par une trémie peseuse et traite de ce fait une masse constante de sable à chaque cycle. La somme des quantités des éléments cités précédemment est donc constante à chaque broyée.

- L'argile et le carbone disparaissent dans les mêmes proportions pendant la coulée et le refroidissement du métal. Ce phénomène, constaté par les fondeurs s'explique par le fait que ces deux produits se détériorent à des températures très voisines, proches de 500° C, donc l'épaisseur de la zone au contact du métal, dans laquelle ces constituants sont détruits est la même, et la quantité perdue est alors proportionnelle aux concentrations initiales dans le mélange.

On assiste alors à un processus d'auto-régulation du fait que l'un des deux constituants en excès est détruit en plus grande quantité de par sa concentration plus élevée. Il suffit donc de régénérer le sable par un mélange composé de 1/3 de carbone et 2/3 d'argile pour garder ces deux corps dans les mêmes proportions relatives. C'est ce mélange que nous appellerons désormais "Argile".

Nous en déduisons la relation suivante :

$$\begin{pmatrix} \text{MASSE} \\ \text{EAU} \\ \text{"ARGILE"} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,67 & 0,33 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{silice} \\ \text{eau} \\ \text{argile} \\ \text{carbone} \end{pmatrix}$$

La masse étant déjà constante du fait de la pesée il nous reste deux variables à régler : les teneurs en eau et en argile.

Ces deux variables ont d'ailleurs un comportement très semblable à l'intérieur du sable si ce n'est leur coefficient de destruction qui est d'environ 50 % pour l'eau et 5 % pour l'argile. On peut donc utiliser un même modèle pour ces deux constituants dans le cadre de cette première approche que nous avons voulu simplifiée.

La description de la sablerie pilote qui a été faite au chapitre précédent va donc nous permettre de présenter un modèle du comportement d'un constituant, eau ou argile.

Le fait que le malaxeur travaille de manière discontinue et que les additions, qui représentent la commande du système, se fassent à chaque broyée, nous amène à considérer dès le départ, un système échantillonné dont la période de base est celle du malaxeur, (soit deux minutes), et nous modéliserons ce malaxeur par un retard pur de durée égale à une période d'échantillonnage.

La destruction de chacun des constituants sera matérialisée par un gain inférieur à l'unité.

Le stockage du sable dans les silos sera représenté par un retard pur égal à plusieurs périodes d'échantillonnage. ce nombre pouvant être choisi entier ou non selon que l'on considère le traitement d'une broyée en lui gardant son intégrité, ou qu'il peut y avoir recouvrement de plusieurs broyées à chaque tour de la chaîne.

Comme nous devons nous placer dans le cas le plus défavorable, nous allons étudier chacune de ces possibilités, en considérant la propagation d'une perturbation le long de la chaîne.

Le schéma de simulation est alors le suivant :

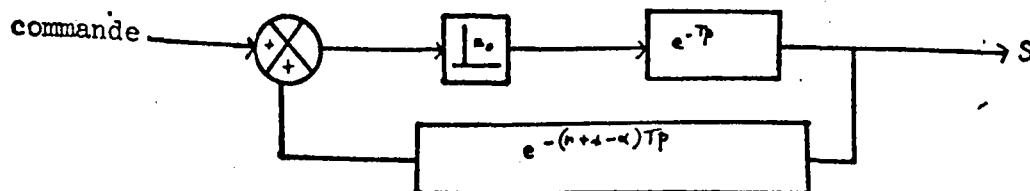


FIGURE 7

Nous avons choisi une simulation purement numérique du fait de la présence de retards purs dans le modèle, difficiles à simuler d'une autre manière.

Elle répond à l'équation suivante :

$$Y_{n+1} = U_n + K \left[\alpha Y_{n-\rho} + (1-\alpha) Y_{n-\rho-1} \right]$$

ou - On représente la commande à l'instant n $U_n \gg 0$

- K le coefficient de destruction du constituant $0 \leq K \leq 1$

- α le coefficient de recouvrement des broyées $0 \leq \alpha \leq 1$

II. Etude de la stabilité propre du système :

Du fait de sa structure qui fait intervenir un retour positif commandé par un gain K , le système a une tendance propre à l'instabilité.

De l'équation de récurrence $Y_{n+1} = U_n + K \left[\alpha (Y_{n-\rho}) + (1-\alpha) Y_{n-\rho-1} \right]$

Nous tirons le domaine de stabilité délimité par les courbes

$$K = 1$$

$$\text{et } K = \frac{1}{1-2\alpha} \text{ pour } \rho \text{ pair}$$

$$\text{ou } K = \frac{-1}{1-2\alpha} \text{ pour } \rho \text{ impair}$$

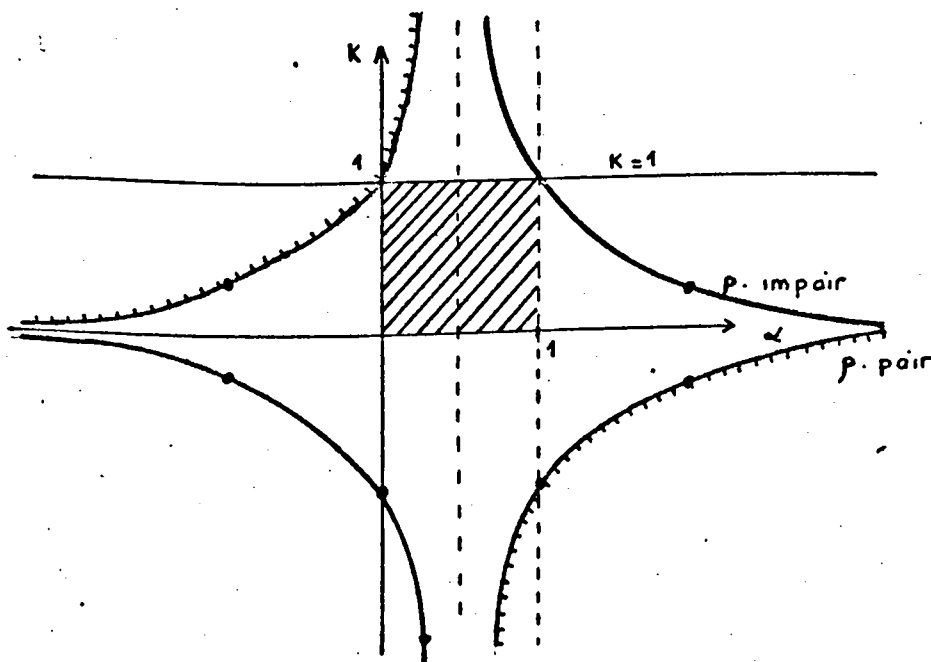


FIGURE 8

Pour la suite nous nous placerons dans le cas le plus défavorable en choisissant par exemple ρ impair et $\alpha = 1$.

D'où l'équation du modèle :

$$Y_{n+1} = U_n + K Y_n - \rho$$

ρ est choisi assez petit de manière à faire apparaître assez rapidement, en cours de simulation, les phénomènes susceptibles de se manifester, mais suffisamment grand pour conserver la disparité qui existe entre les deux retards purs et qui caractérise le système. C'est pourquoi nous lui donnerons la valeur 15.

Rappelons que dans la réalité ρ est variable et peut prendre des valeurs comprises entre 30 et 80.

La stabilité ne dépend plus désormais que de la valeur du gain K qui doit être inférieur à l'unité.

Nous sommes donc en présence d'un système proche de l'instabilité en ce qui concerne l'argile pour laquelle $K = 0,95$. Le problème se pose avec moins d'acuité pour l'eau ($K = 0,5$).

Nous avons illustré les remarques faites dans ce paragraphe par les figures 9 et 10 qui montrent la propagation d'une perturbation courte (une seule broyée) et d'une perturbation longue (plusieurs broyées) pour des valeurs différentes de α , K restant égal à 0,9.

Les figures 11 et 12 montrent les variations de la sortie du modèle lorsqu'il est soumis aux mêmes perturbations que précédemment pour plusieurs valeurs de K avec ρ impair et $\alpha = 1$.

Sur le modèle simplifié que nous venons de mettre au point et dont nous avons illustré quelques caractéristiques nous allons maintenant tester plusieurs algorithmes de régulation en agissant sur la commande U_n .

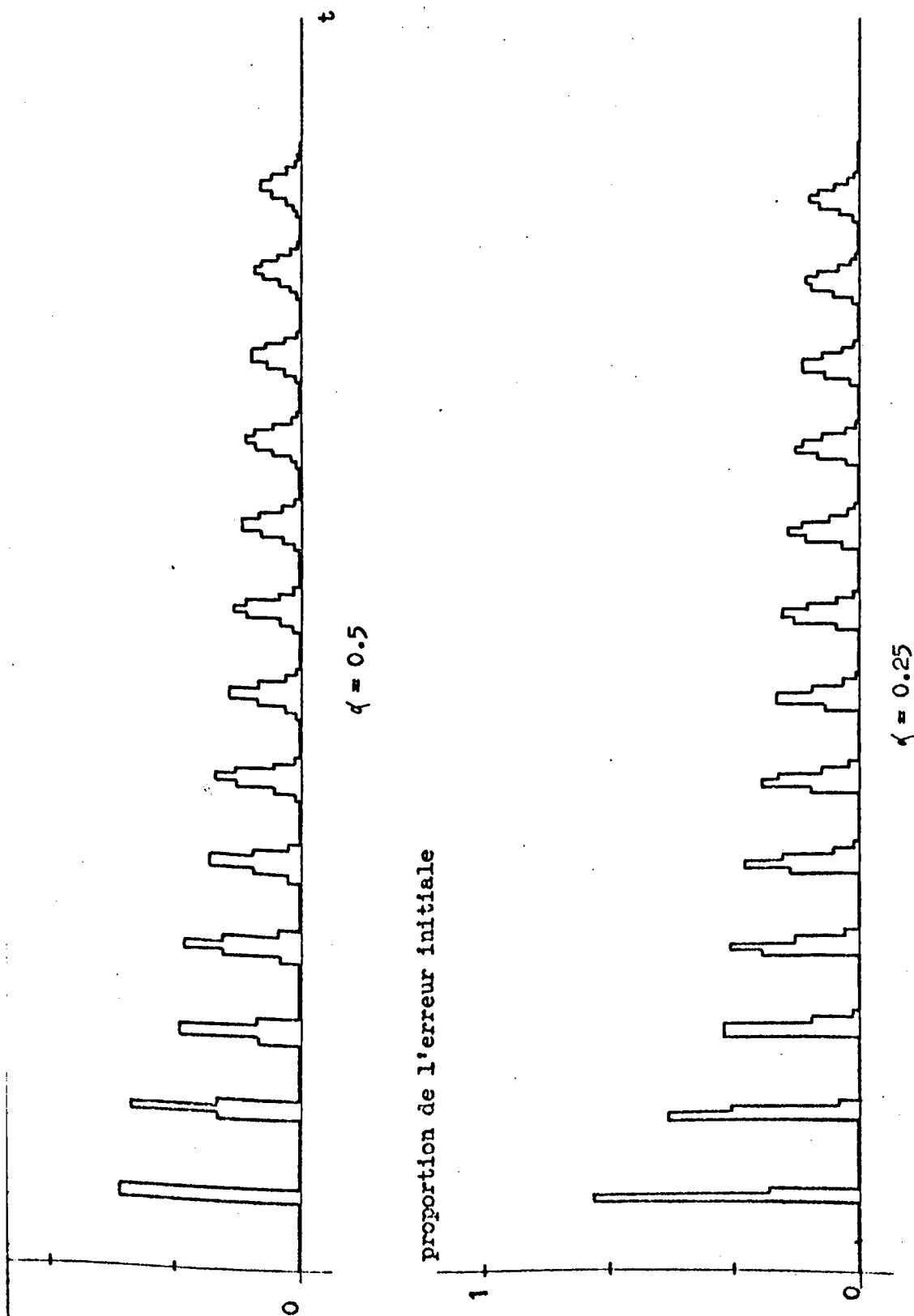
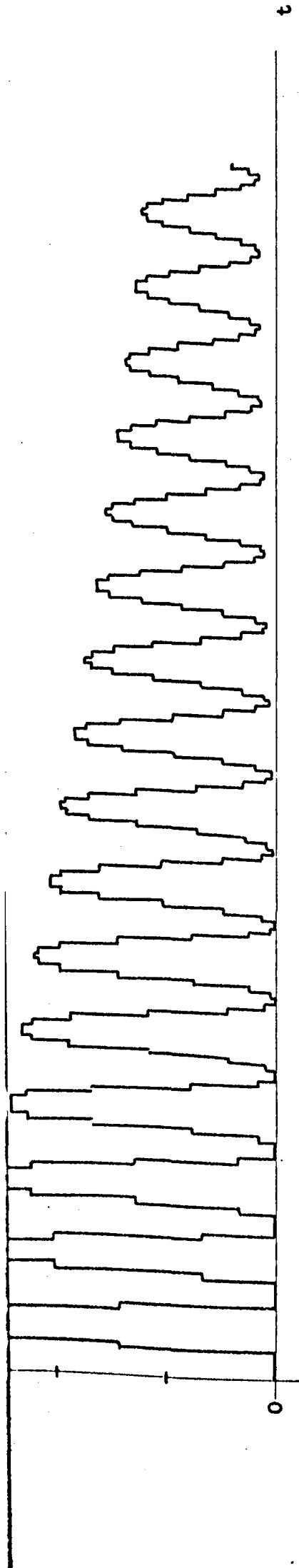
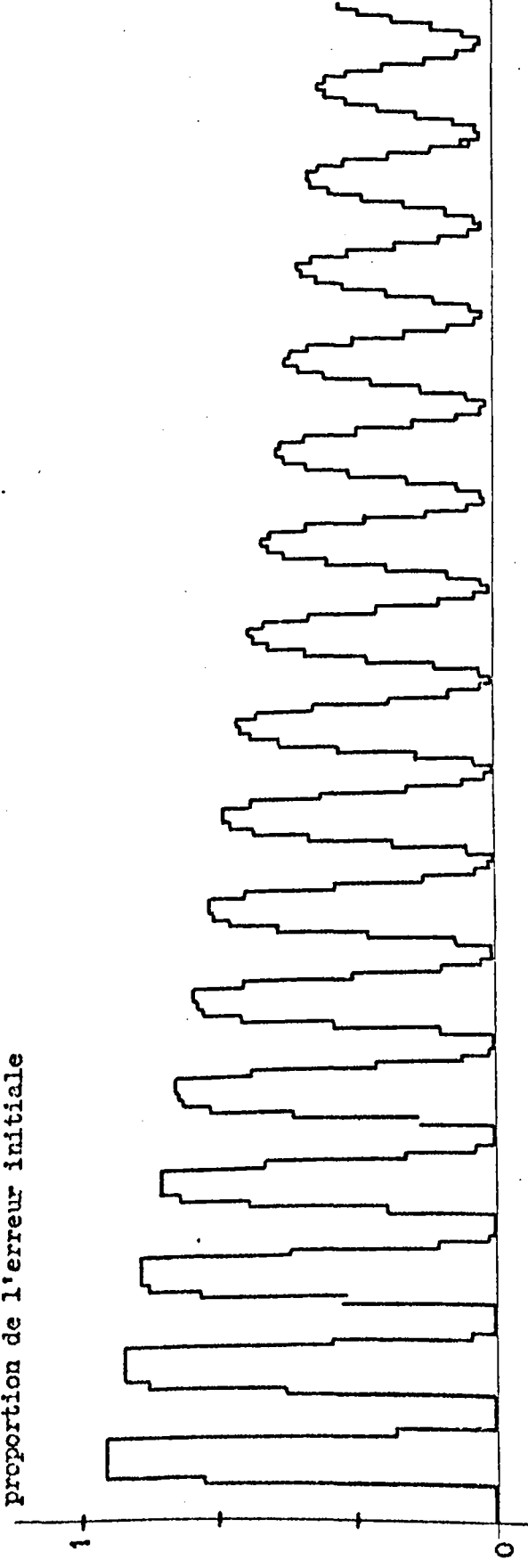


FIGURE 9



$\alpha = 0,5$

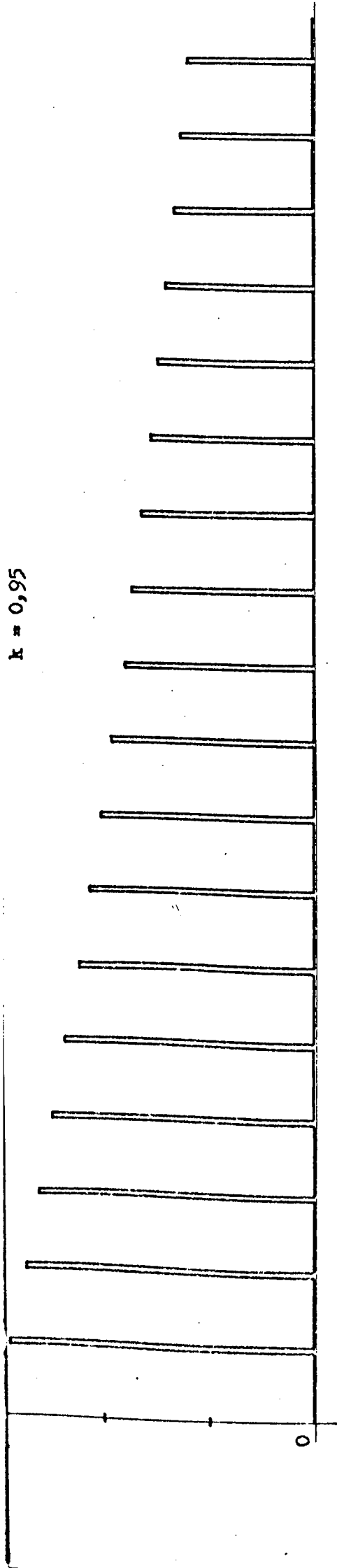
proportion de l'erreur initiale



$\alpha = 0,25$

FIGURE 10

$k = 0,95$



proportion de l'erreur initiale

$k = 0,70$

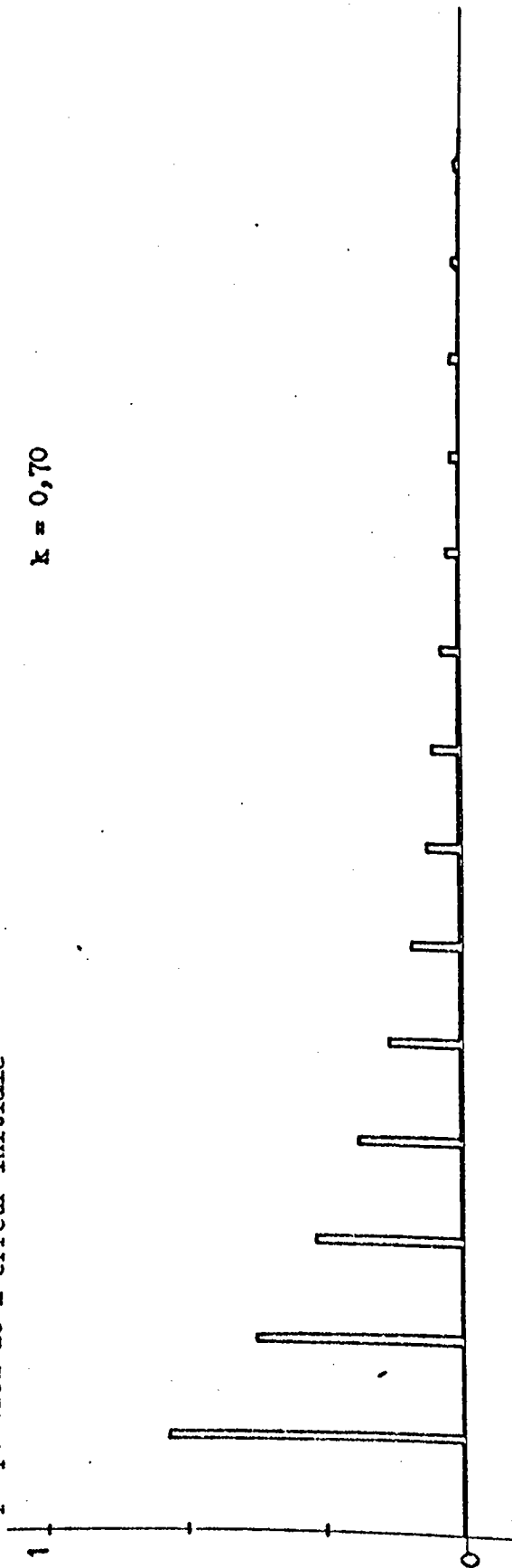
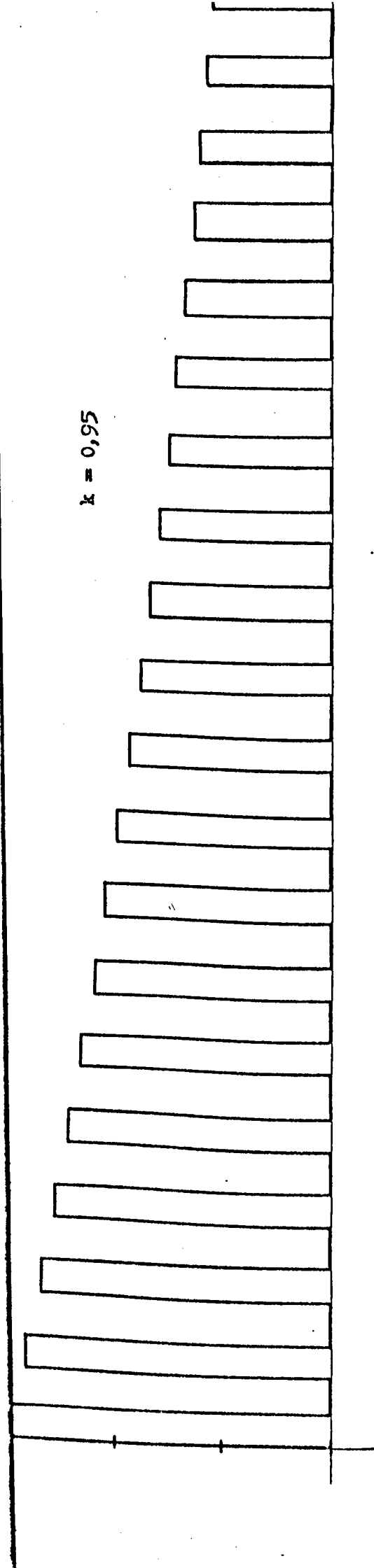
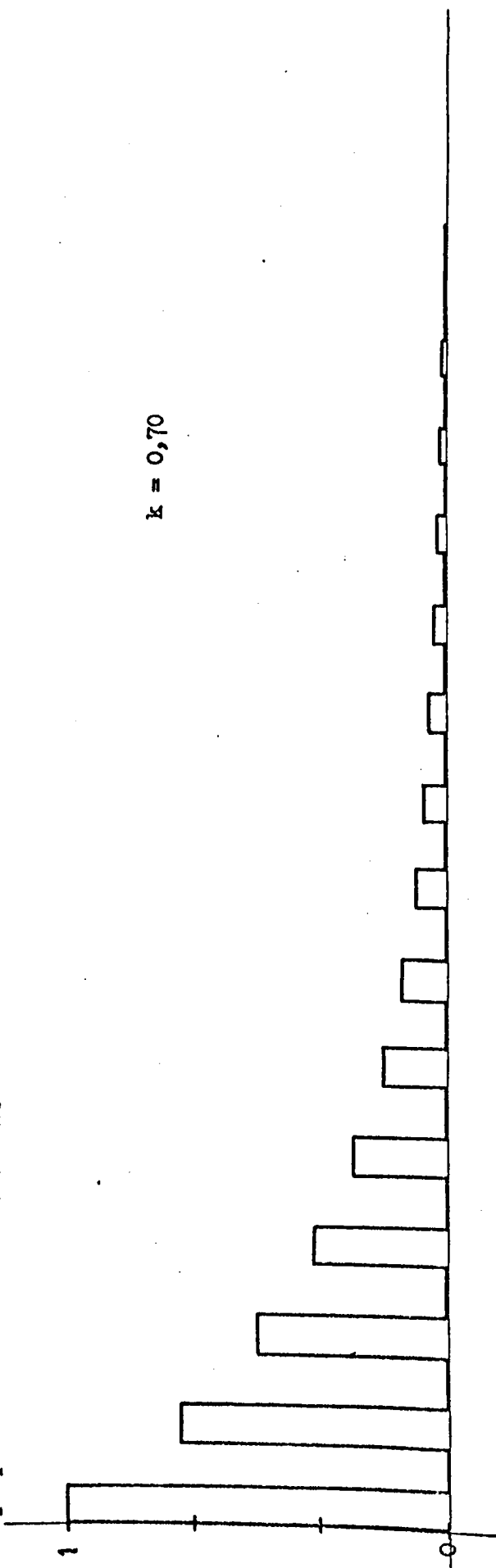


FIGURE 11



proportion de l'erreur initiale



k = 0,70

FIGURE 12

III. Etude de la régulation du système.

La relation $Y_{n+1} = U_n + KY_n - \rho$ caractérise un système d'ordre $\rho + 1$ auquel nous pouvons appliquer l'algorithme général de régulation.

$$U_n = \alpha X_n - \beta Y_n - \delta Y_{n-1} \dots - \xi Y_{n-\rho}$$

Ceci nous amène à étudier la stabilité et la réponse d'un système régi par l'équation de récurrence.

$$Y_{n+1} = +\beta Y_n + \delta Y_{n-1} + (\xi - K) Y_{n-\rho} = 0,$$

et l'équation caractéristique.

$$x^{\rho+1} + \beta x^{\rho} + \delta x^{\rho-1} \dots + (\xi - K) = 0$$

L'étude d'un tel système, même linéaire s'avère rapidement inextricable pour $\rho \gg 3$, valeur pourtant bien loin de l'ordre du système réel.

Nous nous bornerons donc à l'étude et surtout à la simulation de quelques cas particuliers (système non linéaire).

Nous avons vu que la commande du système consistait essentiellement en additions d'argile ou d'eau au niveau du malaxeur. Comme il ne saurait être question de retirer ces constituants du sable ni-même d'ajouter au mélange du sable neuf pour faire baisser la proportion de ces produits d'additions nous devons envisager pour le système une commande positive ou nulle et compter uniquement sur le processus de destruction des constituants pour faire diminuer leur quantité à l'intérieur du mélange, ce qui peut nécessiter un temps assez long (pour l'argile).

La courbe représentative de la non-linéarité est la suivante :

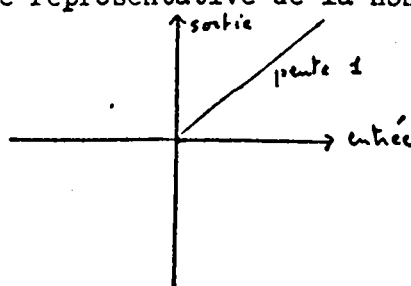


FIGURE 13

et le schéma global de la régulation est donné par la figure 14.

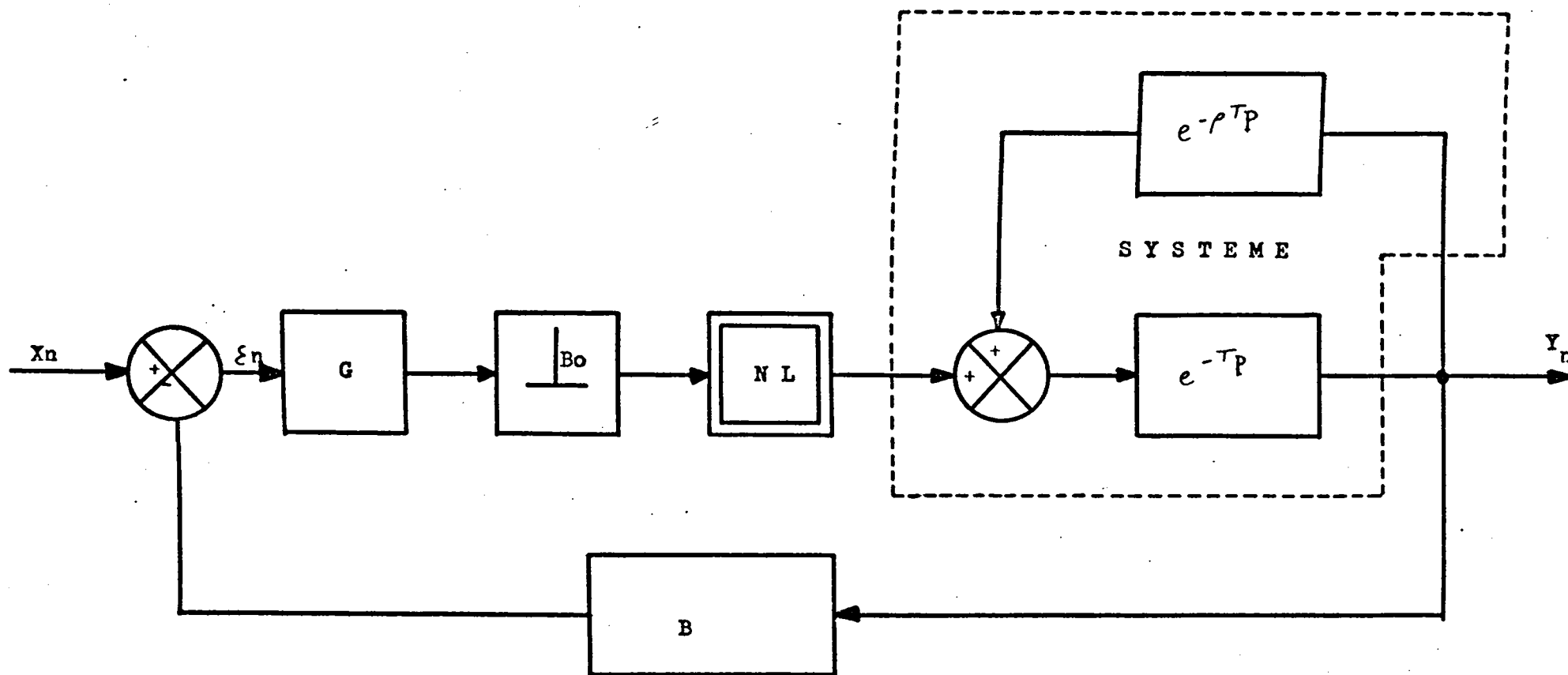


Schéma général de la régulation d'un constituant

FIGURE 14

A)

Etude de la régulation dans le cas où on choisit la période du bloqueur égale au cycle de travail du malaxeur :

1) Etude de la commande :

De l'expression $Y_{n+1} = U_n + KY_n - \rho$ nous tirons

$$U_n = Y_{n+1} - KY_n + \rho$$

Si nous voulons que Y_{n+1} soit égal à la consigne X_n nous obtenons pour la commande la valeur $U_n = X_n - KY_n + \rho$ qui correspond au cas $\alpha = 1, \beta_j, \dots = 0, \xi = K$ de l'expression générale prise précédemment.

La grandeur $KY_n + \rho$ peut être connue de deux façons différentes :

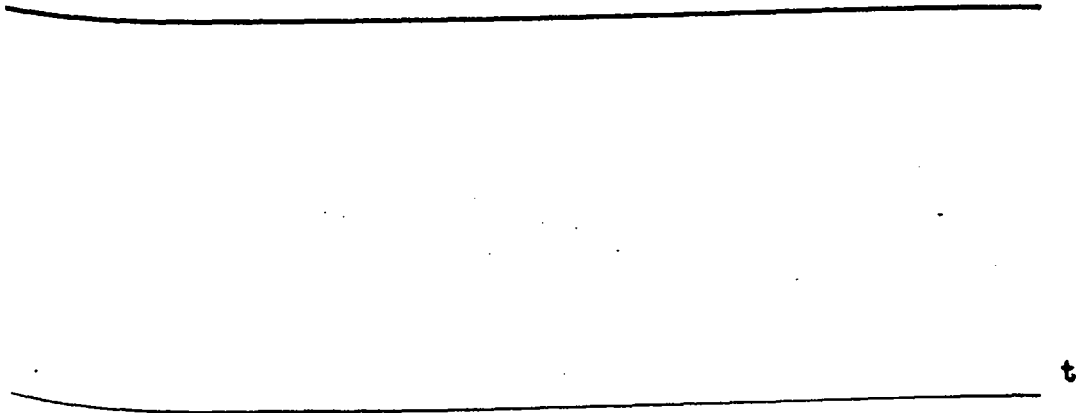
- En mesurant la composition du sable à son entrée dans le malaxeur.
- A partir d'un modèle simulé de la sablerie, fonctionnant en parallèle.

Ces deux méthodes, comme nous le verrons au chapitre 4, ont l'inconvénient d'être très sensibles à la dispersion des mesures fournies par des capteurs. A cela, la seconde ajoute une tendance à être fortement perturbée par une erreur sur l'ordre $\rho + 1$ (voir la figure 15 b). Or du fait de la complexité du circuit du sable il est impossible d'avoir un modèle parfaitement fidèle de la sablerie.

Si non, nous nous trouvons dans le cas de la régulation idéale comme le montre la figure 15 a. La consigne est atteinte dans un temps minimum, c'est-à-dire en une période d'échantillonnage. Cette méthode de régulation pourra cependant être utilisée en boucle ouverte en mesurant la composition du sable à l'entrée du malaxeur pour la corriger ensuite en agissant sur la commande, à la condition que la mesure fournie soit suffisamment représentative de cette composition pour pouvoir être utilisée seule, c'est-à-dire que le capteur ait une faible dispersion de mesures.

Régulation par $U_n = X_n - K Y_n - \rho$

a : ρ correct
b : ρ mal identifié (= $\rho_{\text{réel}} - 1$)



t

% constituant

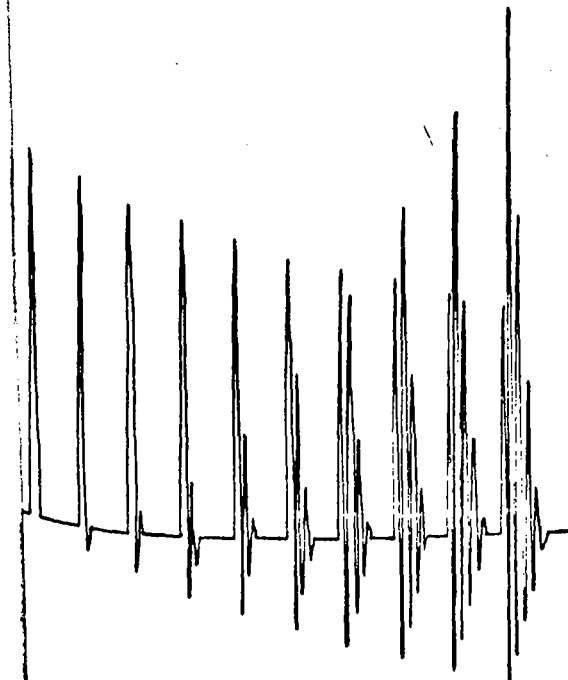


FIGURE 15

2) Méthode de correction de la commande : Comme la méthode précédente ne peut être employée lorsque les mesures fournies par les capteurs sont trop dispersées, nous sommes obligés de trouver une autre méthode de régulation qui pallie cet inconvénient en utilisant plusieurs mesures pour le calcul d'une seule commande. Cette méthode ne peut certes fournir des résultats aussi bons que ceux de la figure 15 a, mais elle est moins sensible aux différences qui peuvent exister entre système théorique et processus réel.

a) La méthode que nous appelons "correction de la commande" paraît peu naturelle mais elle représente plus ou moins l'algorithme de régulation utilisé par le conducteur du malaxeur. Elle consiste à étudier l'effet de la dernière commande à laquelle a été soumis le processus, pour corriger la commande à venir au moyen de la relation :

$$U_n = U_{n-1} + a (X_n - Y_n)$$

Sachant que : $Y_{n+1} = U_n + KY_{n-\rho}$ et donc que

$$Y_n = U_{n-1} + KY_{n-\rho-1}$$

On en déduit :

$$Y_{n+1} - Y_n = a (X_n - Y_n) + K (Y_{n-\rho} - Y_{n-\rho-1}),$$

relation qui fait intervenir la sortie d'ordre $n - 1$.

Cette expression peut encore s'écrire, en supposant la consigne nulle :

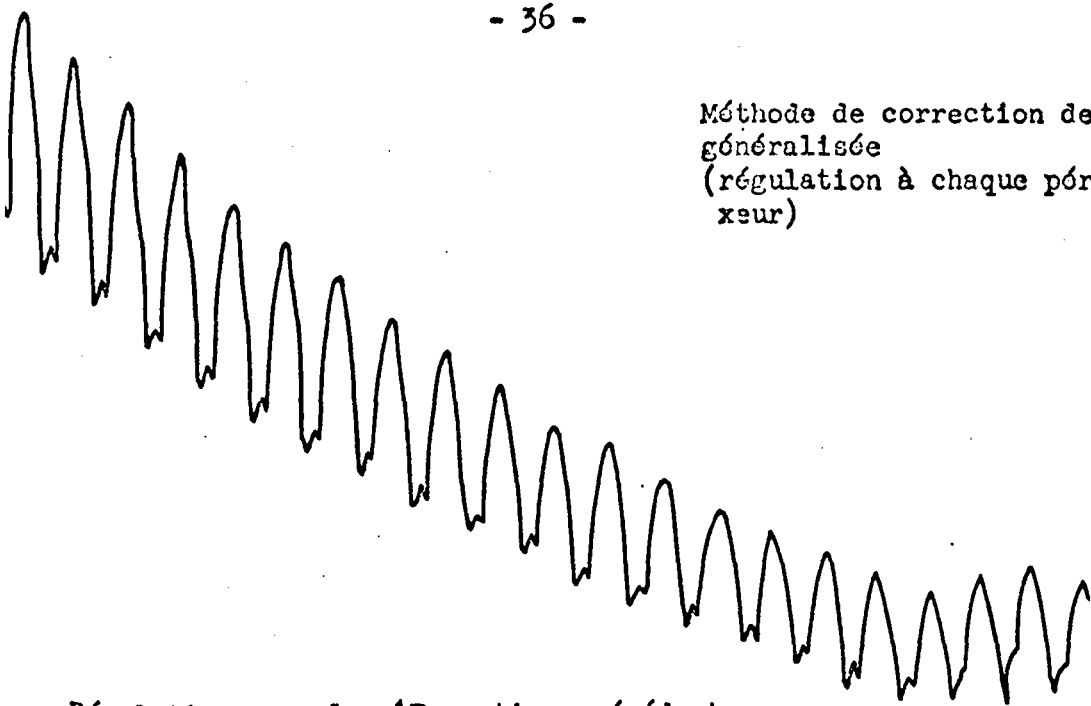
$$\Delta Y_{n+1} = -a Y_n + K \Delta Y_{n-\rho},$$

relation qui indique la présence d'une oscillation permanente d'amplitude minimale relative :

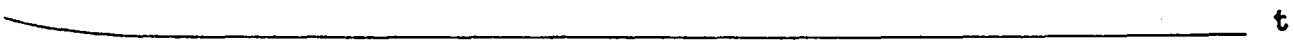
$$\left| \frac{\Delta Y_n}{Y_n} \right| \gg \left| \frac{a}{1-K} \right|$$

Une erreur minimale de 10 % sur Y avec $K = 0,95$ donne pour a la valeur maximale 0.005. Le temps de réponse d'un tel système est alors très élevé.

Méthode de correction de la commande
généralisée
(régulation à chaque période du mala-
xeur)

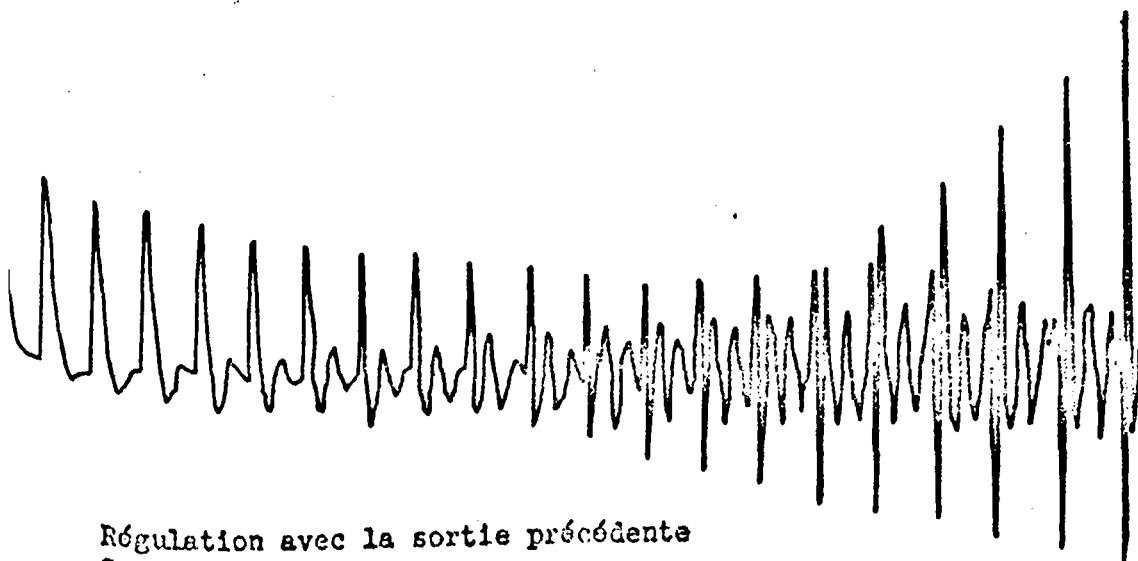


Régulation avec les 17 sorties précédentes
Gain = 0.25



t

stituant



Régulation avec la sortie précédente
Gain = 0.5

- b) Pour éliminer l'influence de la dispersion des mesures des capteurs, comme dans le cas précédent, et pour nous rapprocher de la méthode du conducteur du malaxeur, qui apprécie une tendance de la variation de la composition du sable, nous allons corriger la commande, non pas avec la dernière sortie du système, mais avec la moyenne des sorties précédentes suivant l'expression :

$$U_n = U_{n-1} + a \left(X - \frac{1}{a} \sum_{i=n-q+1}^n Y_i \right)$$

En reprenant les mêmes calculs que précédemment nous aboutissons à l'expression :

$$\Delta Y_{n+1} = \frac{-a}{q} (Y_n + Y_{n-1} \dots + Y_{n-q+1}) + K \Delta Y_n - \rho$$

Or nous savons que :

$$|Y_n + Y_{n-1} + \dots + Y_{n-q+1}| \leq |Y_n| + |Y_{n-1}| + \dots + |Y_{n-q+1}|$$

et cette inégalité a de fortes chances d'être très prononcée du fait que nous nous trouvons en régime d'oscillations.

L'expression de l'erreur relative devient :

$$\left| \frac{\Delta Y_n}{Y_n} \right| \gg \left| \frac{a}{1-K} \right| \cdot \frac{Y_n + Y_{n-1} \dots + Y_{n-q+1}}{q |Y_n|}$$

Le terme $\frac{|Y_n + \dots + Y_{n-q+1}|}{q |Y_n|}$, peut devenir très petit

et autoriser une valeur de ce beaucoup plus grande pour une même erreur relative comme le montre la figure 16. Nous constatons expérimentalement qu'une extension de l'horizon de la commande est équivalente à une diminution du gain de la boucle de régulation, diminution nécessaire pour conserver la stabilité au système.

C'est approximativement par cette méthode qu'a été conduite, jusqu'ici, la sablerie que nous étudions et on comprend que l'expérience humaine joue pour beaucoup, si l'on ne veut pas aboutir à des résultats déplorables.

c) Balayage du domaine de stabilité :

Partant de l'expression de l'algorithme de régulation :

$$U_n = U_{n-1} + a \left(X - \frac{1}{q} \sum_{i=n-q+1}^n Y_i \right) \quad \text{avec } U_n \gg 0,$$

nous avons fait varier systématiquement les paramètres a et q , en simulant le fonctionnement du système ainsi régulé. Nous avons obtenu le domaine de stabilité en a et q de la régulation illustré par la figure 17.

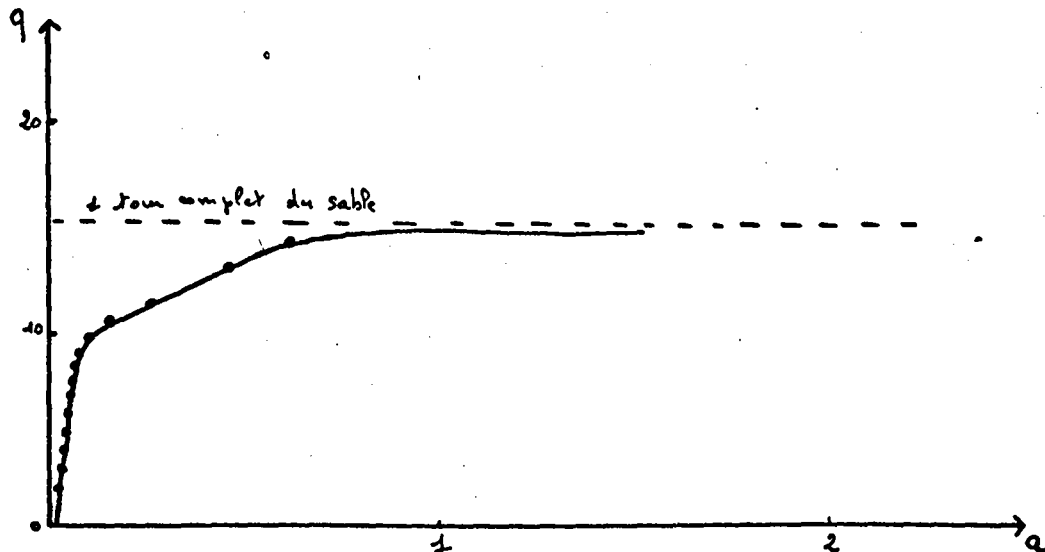


FIGURE 17

On retrouve la compensation mise en évidence entre a et q lors de l'étude du b.

3) Retour unitaire : Nous prenons pour algorithme de régulation l'expression :

$U_n = \alpha (X_n - Y_n)$ correspondant à un retour unitaire sur le processus et à un gain α dans la chaîne d'action.

La valeur de la sortie du système est alors :

$$Y_{n+1} = \alpha (X_n - Y_n) + K Y_n - \rho,$$

et la stabilité assurée pour $|\alpha| < 1 - K$ ce qui correspond dans le cas de l'argile à $0 < \alpha < 0,05$.

Comme précédemment nous pouvons généraliser l'algorithme de régulation en utilisant plusieurs sorties successives du système afin d'éliminer l'influence de la dispersion des mesures.

L'expression de l'algorithme de régulation est alors :

$$U_n = \alpha \left(X_n - \frac{1}{q} \sum_{i=n-q+1}^n Y_i \right)$$

et celle de la sortie :

$$Y_{n+1} = \alpha \left(X_n - \frac{1}{q} \sum_{i=n-q+1}^n Y_i \right) + K Y_n - \rho.$$

Le majorant théorique de α est toujours $(1 - K)$ mais nous remarquerons encore que le fait que la sortie oscille autour de sa valeur de consigne peut rendre la valeur du terme.

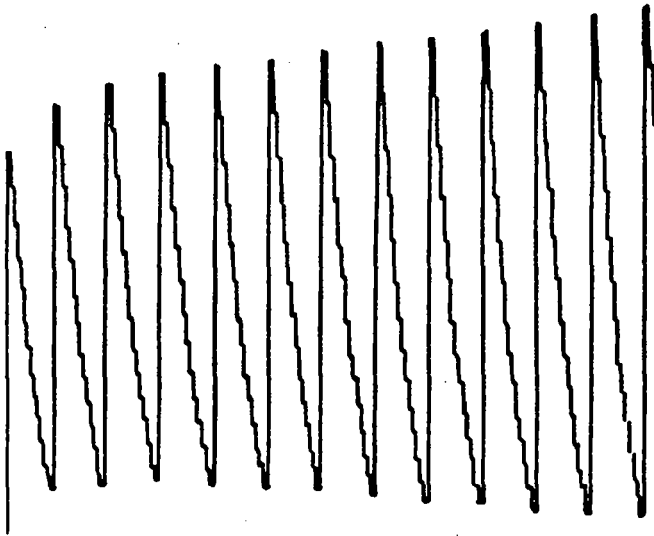
$$\left| X_n - \frac{1}{q} \sum_{i=n-q+1}^n Y_i \right| \text{ très inférieure à } \frac{1}{q} \sum_{i=n-q+1}^n |X_n - Y_i|$$

d'où la possibilité de prendre pour α une valeur supérieure à son majorant théorique.

On assiste encore une fois à un renforcement de la stabilité par augmentation du facteur q dans l'algorithme de régulation. Cette constatation reste bien sûr purement expérimentale (figure 18).

nstituant

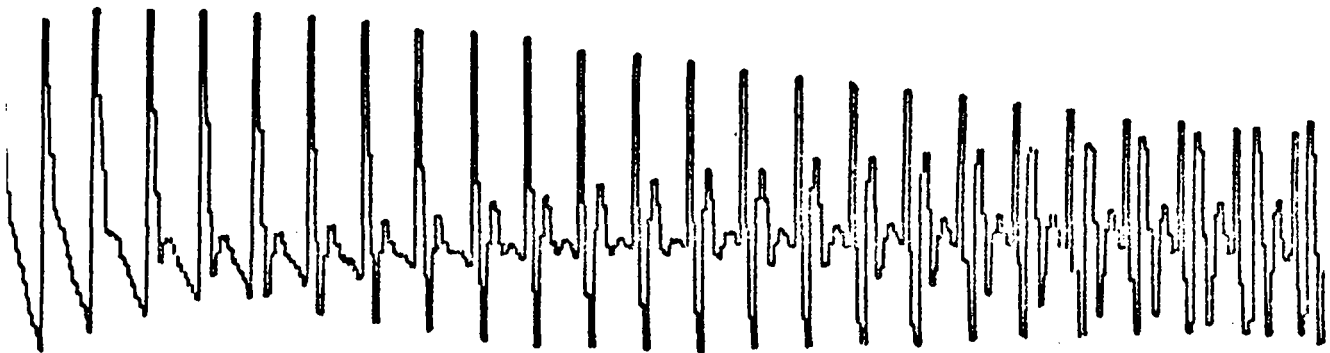
Méthode du retour unitaire généralisé
(régulation à chaque période du mala-
xeur)



Régulation avec les 13 sorties précédentes
Gain = 1.

t

tituant



Régulation avec les 17 sorties précédentes
Gain = 1.

B. Etude de la régulation dans le cas d'une période d'échantillonnage multiple de celle du malaxeur :

Nous venons dans une première partie, d'étudier, par simulation le comportement de quelques algorithmes de régulation échantillonnée, avec pour période de base celle du malaxeur correspondant, de ce fait, à une mesure de la composition du sable à chaque cycle du malaxeur.

Nous allons maintenant prendre, pour période d'échantillonnage, une période de durée supérieure à la précédente (multiple toutefois).

En effet, étant donné que la commande du processus, (qui consiste en additions de constituants au niveau du malaxeur), se fait toujours à chaque cycle de ce dernier, nous en déduisons immédiatement que la nouvelle période d'échantillonnage doit être un multiple de la précédente si nous voulons éviter un décalage dans la commande.

D'autrepart, les mesures effectuées sur le sable ont intérêt à être aussi fréquentes que possible toujours pour diminuer l'effet de dispersion, c'est-à-dire à la fréquence de fonctionnement du malaxeur.

Dans ce cas, deux options s'offrent à nous pour ce qui est de leur utilisation.

- ou bien, nous voulons conserver la notion théorique d'échantillonnage, et nous prenons comme mesure significative la moyenne de quelques mesures précédant l'instant d'échantillonnage,
- ou bien, quitte à nous éloigner sensiblement de cette notion et des résultats théoriques qui s'y rattachent, nous prenons comme valeur la moyenne de toutes les mesures effectuées depuis l'instant d'échantillonnage précédent, ce qui revient à inclure un intégrateur dans la chaîne de retour du système.

Nous étudions successivement les deux méthodes, l'une de façon plus théorique en opérant une majoration de la valeur absolue du gain de la non-linéarité, et la seconde, par simulation dans le cas non linéaire.

1) Méthode de correction de la commande :

a) Nous reprenons les équations de départ :

$$\begin{cases} Y_{n+1} = U_n + K Y_n - \rho \\ U_n = U_{n-1} + \alpha (X - Y_n) \end{cases}$$

d'où nous tirons :

$$Y_{n+1} = U_{n-1} + \alpha (X - Y_n) + K Y_n - \rho$$

$$Y_n = U_{n-1} + K Y_n - \rho - 1$$

$$\text{soit } Y_{n+1} + (\alpha - 1) Y_n - K Y_n - \rho + K Y_n - \rho - 1 - \alpha X_n = 0.$$

Suivant la période d'échantillonnage choisie, cette équation peut prendre les formes simples suivantes :

- Pour une période égale à $\rho/2$:

$$Y_{n+1} + (\alpha - 1) Y_n - K Y_{n-1} + K Y_{n-2} - \alpha X_n = 0,$$

qui nous donne pour $K = 0,95$ les valeurs du gain correspondant aux limites du domaine de stabilité :

- 0,1 et 0,1.

On remarquera que ces valeurs sont peu élevées,

- Pour une période égale à ρ fois celle du malaxeur :

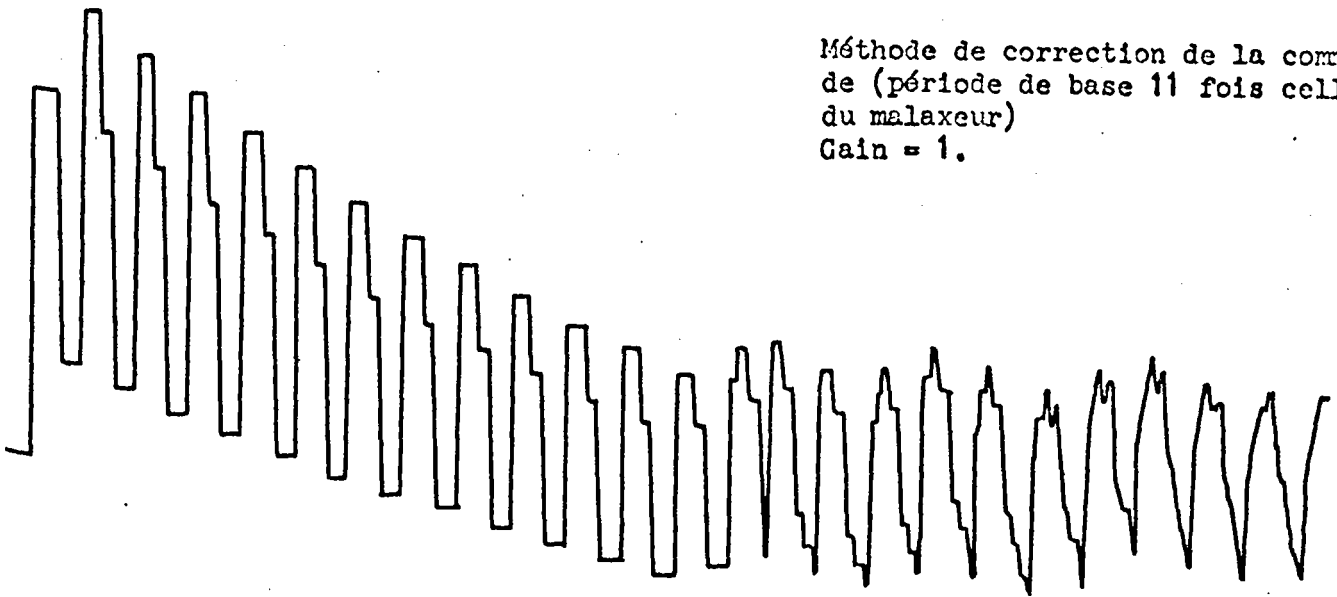
$$Y_{n+1} + (\alpha - 1 - K) Y_n + K Y_{n-1} - \alpha X_n = 0,$$

qui donne les valeurs 0 et 3,9.

Nous avons ici un domaine de stabilité beaucoup plus étendu que le précédent. Dans ces conditions cet algorithme peut être utilisé pour la régulation du processus à la condition de prendre,

à chaque période d'échantillonnage, la moyenne de plusieurs mesures de façon à compenser la dispersion des mesures fournies par les capteurs (figure 19).

Méthode de correction de la commande
(période de base 11 fois celle
du malaxeur)
Gain = 1.



tituant

Période de base = 4 fois celle du
malaxeur
Gain = 0.4

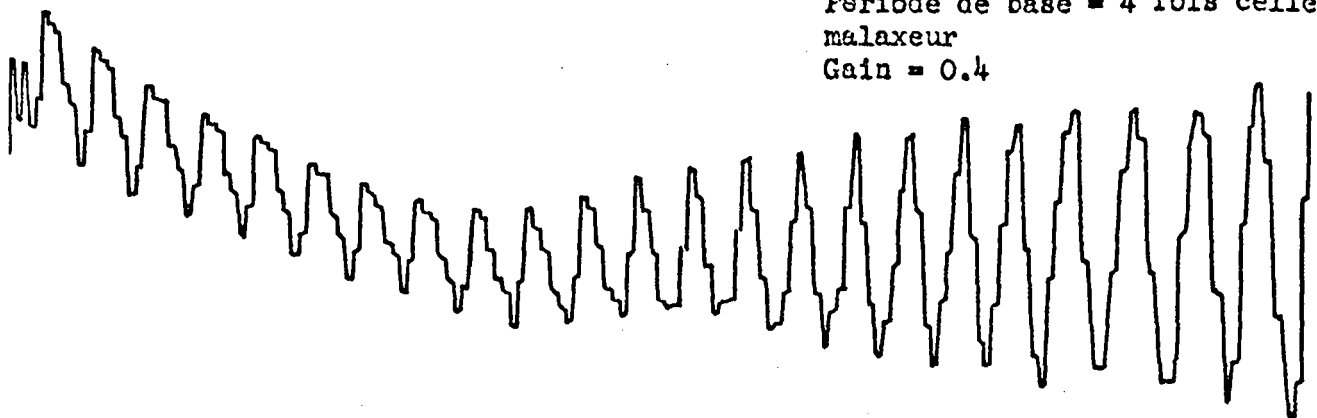


FIGURE 19

- b) Simulations : Comme nous l'avons dit précédemment, nous avons effectué la simulation du comportement du processus régulé par l'algorithme $U_n = U_{n-1} + \alpha(X - Y_n)$, en prenant pour période d'échantillonnage N périodes du malaxeur et pour valeur de la sortie à l'instant de l'échantillonnage, la moyenne des valeurs des N sorties précédentes. En faisant en outre varier α , nous avons obtenu pour le système le domaine de stabilité suivant pour $K = 0,95$:

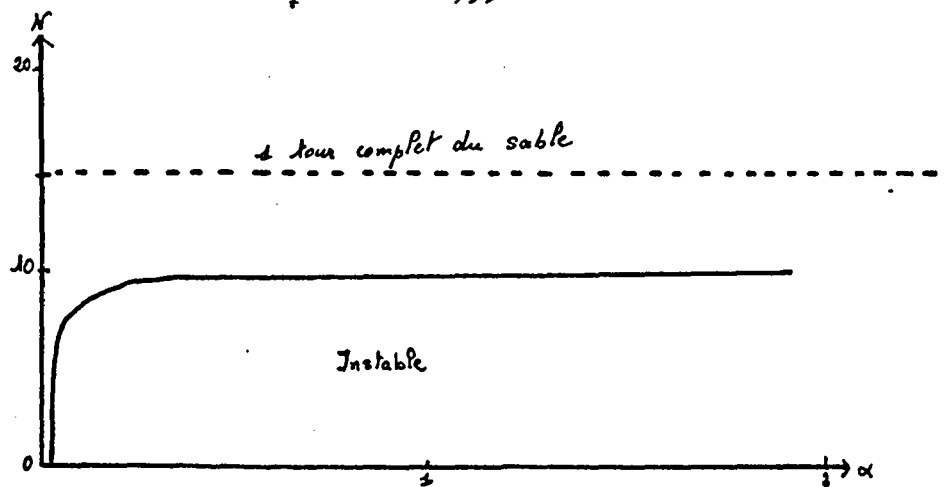


FIGURE 20

Ce domaine a une forme semblable à celui trouvé pour une période égale à celle du malaxeur, toutefois il suffit de prendre en compte une dizaine de valeurs de la sortie pour assurer la stabilité pour de grandes valeurs du gain alors que dans l'exemple précédent, une quinzaine étaient nécessaires. Compte tenu des différences introduites par l'existence de la non-linéarité, on retrouve assez bien les résultats donnés par la théorie pour une période égale à $\rho/2$ et ρ .

- 2) Retour unitaire : Nous avons déjà vu que cet algorithme s'exprimant par la relation : $U_n = \alpha (X_n - Y_n)$.

L'équation de récurrence du système est lors ; pour une période égale à celle du malaxeur :

$$Y_{n+1} = \alpha (X_n - Y_n) + K Y_n - \rho$$

soit pour une consigne nulle :

$$Y_{n+1} + \alpha Y_n - K Y_n - \rho = 0.$$

En passant à une période multiple de celle du malaxeur, cette relation peut rendre les formes simples suivantes :

$$Y_{n+3} + \alpha Y_{n+2} - K Y_n = 0 \quad (\text{période d'échantillonnage égale à } \rho/3)$$

$$Y_{n+2} + \alpha Y_{n+1} - K Y_n = 0 \quad (\rho/2)$$

$$\text{ou } Y_{n+1} + (\alpha - K) Y_n = 0 \quad (\rho)$$

Pour une valeur de K de 0,95 correspondant au taux de destruction de l'argile les valeurs de α représentant les limites du domaine de stabilité sont respectivement:

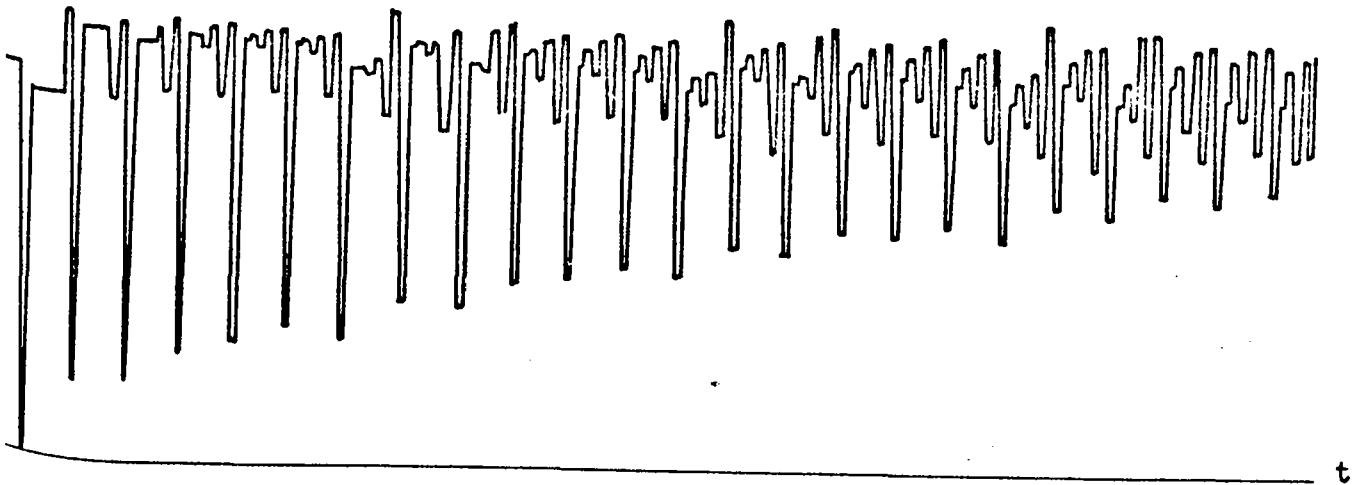
$$0 < \alpha < 0,15$$

$$0 < \alpha < 0,05$$

$$0 < \alpha < 1,95$$

Méthode du retour unitaire

Période de base = 12 fois celle du
malaxeur. Gain = 1.



Période de base = 8 fois celle
du malaxeur.
Gain = 1.

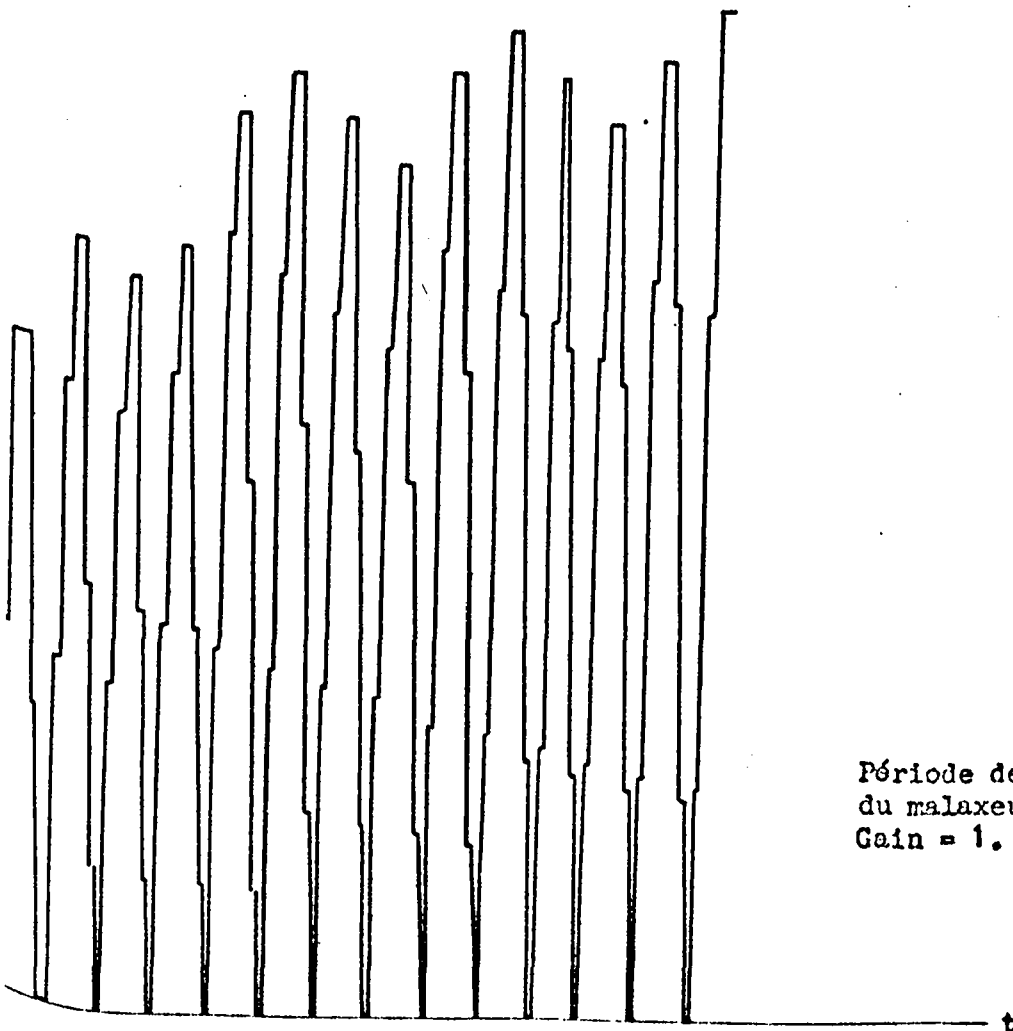


FIGURE 21

Ces résultats sont vérifiés sur simulation effectuée en faisant varier la période d'échantillonnage du système pour une valeur de $K = 0,95$, le gain α restant fixé à la valeur 1. On obtient la stabilité pour $N > 10$ périodes du malaxeur qui correspond bien à une valeur supérieure à $\rho/2$. Deux exemples de résultats de simulations sont illustrés figure 21.

- 3) Reprise de l'algorithme de régulation optimal : Nous avons vu que cet algorithme s'exprimait par :
- $$U_n = X_n - K Y_n - \rho$$
- pour une période égale à celle du malaxeur et qu'il conduisait à la réponse optimale du système lors d'une identification parfaite de l'ordre de celui-ci.

Nous nous intéressons donc ici plus particulièrement aux erreurs d'identification de ce facteur.

- a) Etude de la commande $U_n = X_n - K Y_n - \rho$ calculée toutes les q périodes du malaxeur. Nous avons vu au début du chapitre que pour $q = 1$, cette régulation n'admettait aucune erreur sur l'ordre ρ . On peut noter que si q augmente, le système admet une certaine erreur sur ρ que nous avons recherchée par simulation.

La forme du domaine obtenu est la suivante :

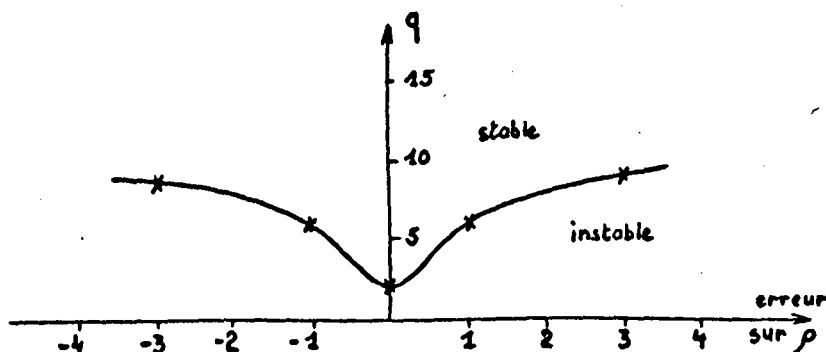
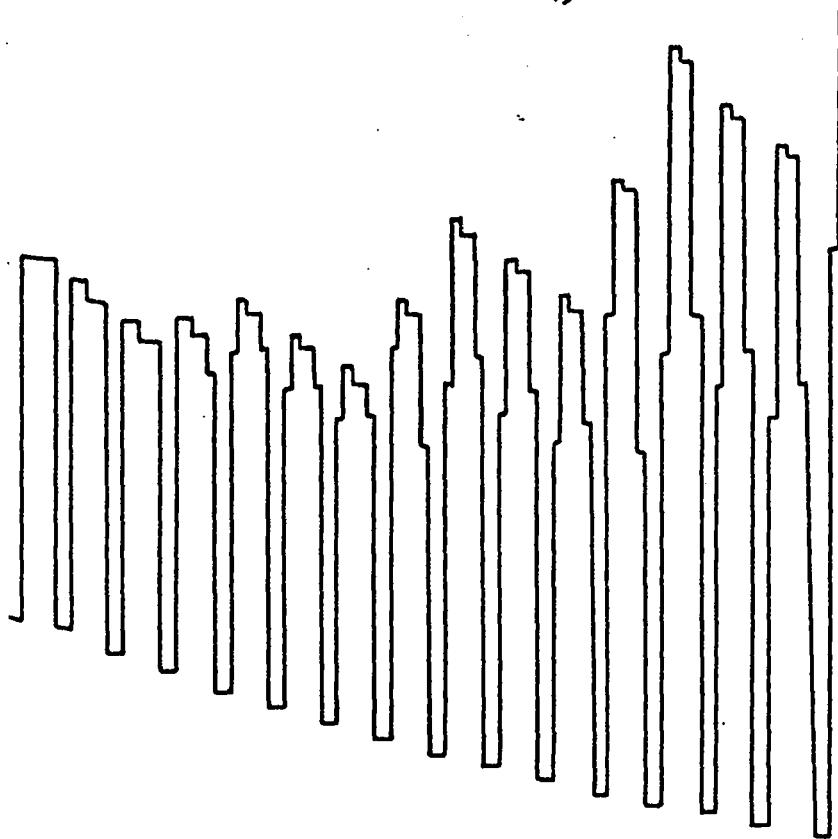
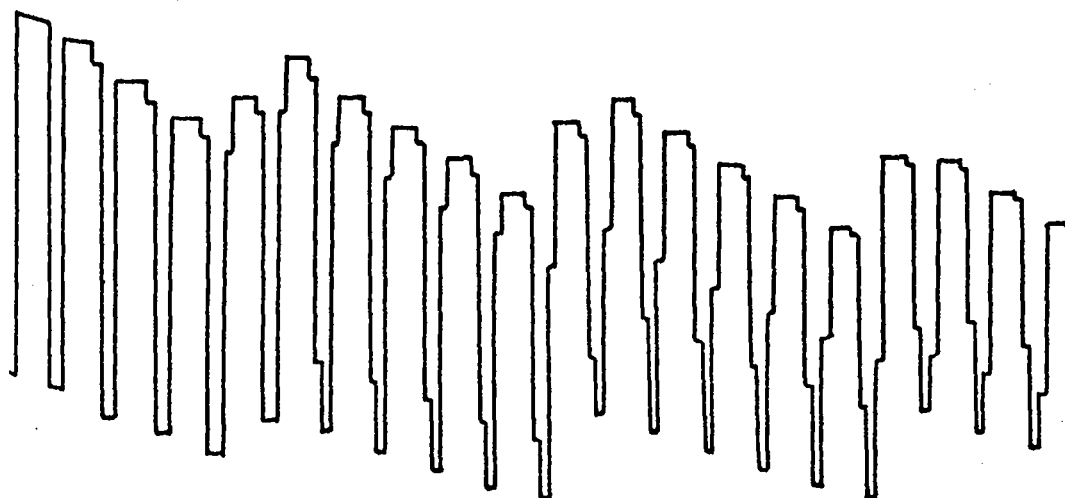


Figure 22



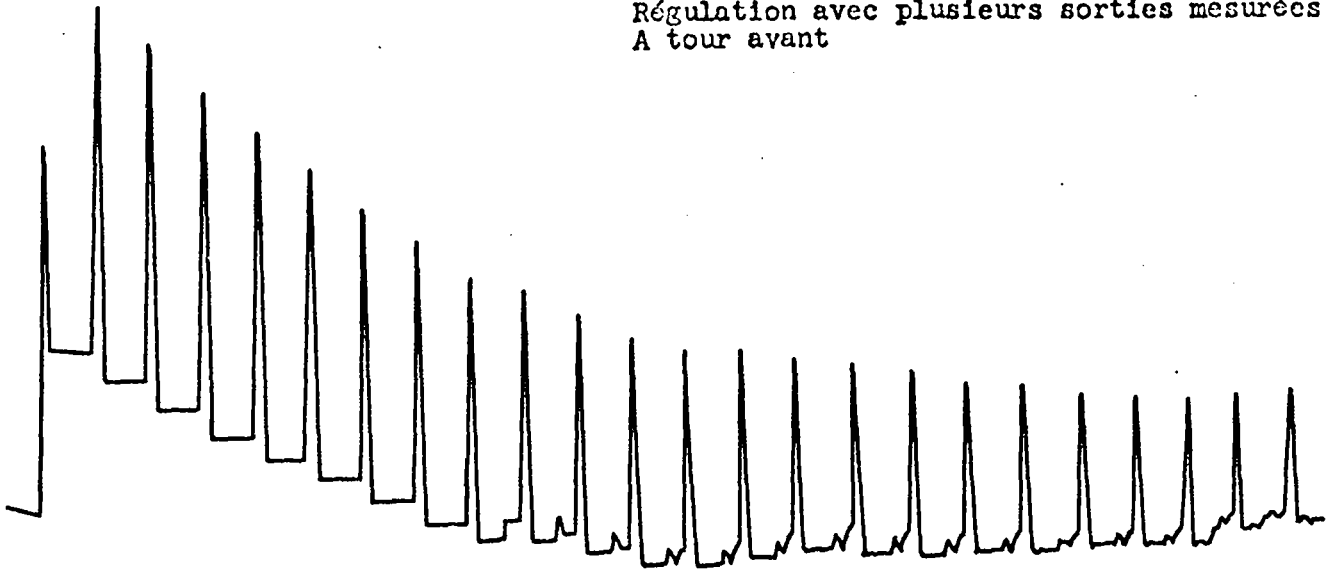
- Régulation avec la sortie un tour avant
- Erreur d'identification du retard, de 3 broyées
- période de base = 8 fois celle du malaxeur

uant



- période de base = 12 fois celle du malaxeur

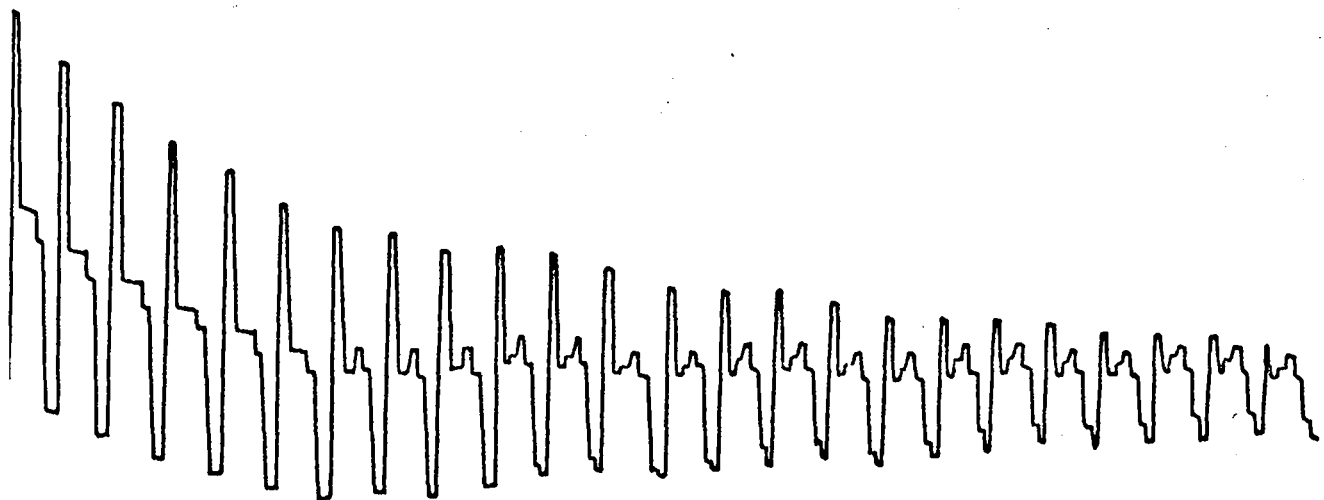
Régulation avec plusieurs sorties mesurées
A tour avant



- période de base = 15 fois celle du malaxeur
- prise en compte de 20 sorties

t

quant



- période de base = 8 fois celle du malaxeur
- prise en compte de 14 sorties

t

FIGURE 24

et le comportement du système est illustré par la figure 23 selon que l'on se place dans la partie stable ou instable du domaine.

Si maintenant nous prenons en compte plusieurs sorties ou bien d'une seule, ρ périodes avant, nous obtenons un élargissement du domaine de stabilité permettant une erreur sur ρ plus grande pour une même période de calcul de la commande, c'est-à-dire une amélioration de la sécurité d'emploi industriel d'un tel algorithme (figure 24).

b) Assimilation d'une sablerie de fonderie à un système du premier ordre :

Après être parti d'un système dont la période d'échantillonnage était égale à celle du malaxeur de la sablerie et avoir étudié ensuite les effets engendrés par le passage à une période multiple de cette période de base, nous allons nous arrêter au cas où la période d'échantillonnage est égale à ρ fois celle du malaxeur, ce qui équivaut à recalculer la commande du processus à chaque cycle du sable à travers la fonderie.

L'équation de récurrence est alors la suivante :

$Y_n + 1 = U_n + K Y_n$, elle peut encore s'écrire :

$$(Y_n + 1 - Y_n) + (1 - K) Y_n = U_n$$

$$\text{ou } \Delta Y_n + (1 - K) Y_n = U_n.$$

Cette équation est la même que celle obtenue par échantillonnage d'un système du premier ordre de fonction de transfert

$$G(p) = \frac{1}{1-K} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{1-K} \cdot p}$$

possédant un gain et une constante de temps de valeur

$$\frac{1}{1-K} \quad (\text{voir figure 25})$$

La valeur de la commande est alors :

$$U_n = \frac{(1 - K) (X - e^{-(1 - K)} Y_n)}{1 - e^{-(1 - K)}}$$

relation qui se simplifie en $U_n = X - K Y_n$ si nous supposons K proche de 1. Comme précédemment, pour éliminer le bruit introduit dans les mesures par les capteurs, nous utiliserons comme valeur de Y_n la moyenne des mesures effectuées sur une période d'échantillonnage.

Nous sommes alors en possession d'un algorithme peu sensible au bruit, bien adapté aux variations lentes de la concentration en argile à la régulation de laquelle nous le destinons. Les simulations dont les résultats apparaissent sur la figure 26 montrent que cet algorithme est, en outre, peu sensible aux erreurs d'identification du système, on constate seulement qu'une inversion du signe de l'erreur maximum de la réponse, accompagne un changement de signe de l'erreur faite sur l'estimation de ρ .

Assimilation de la sablerie à un 1er ordre
 Valeur de la commande = 0,6
 $K = 0,95$

% constituant

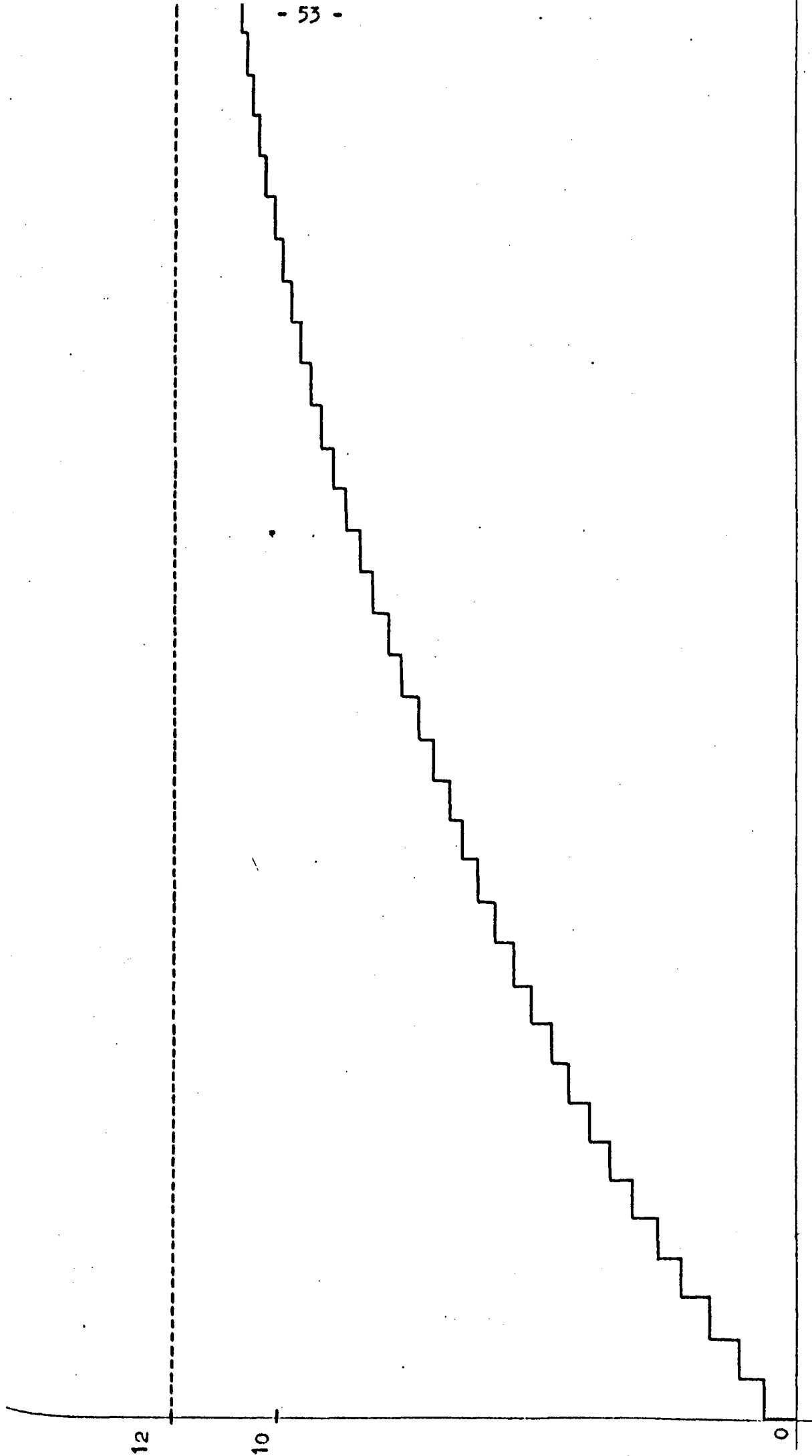
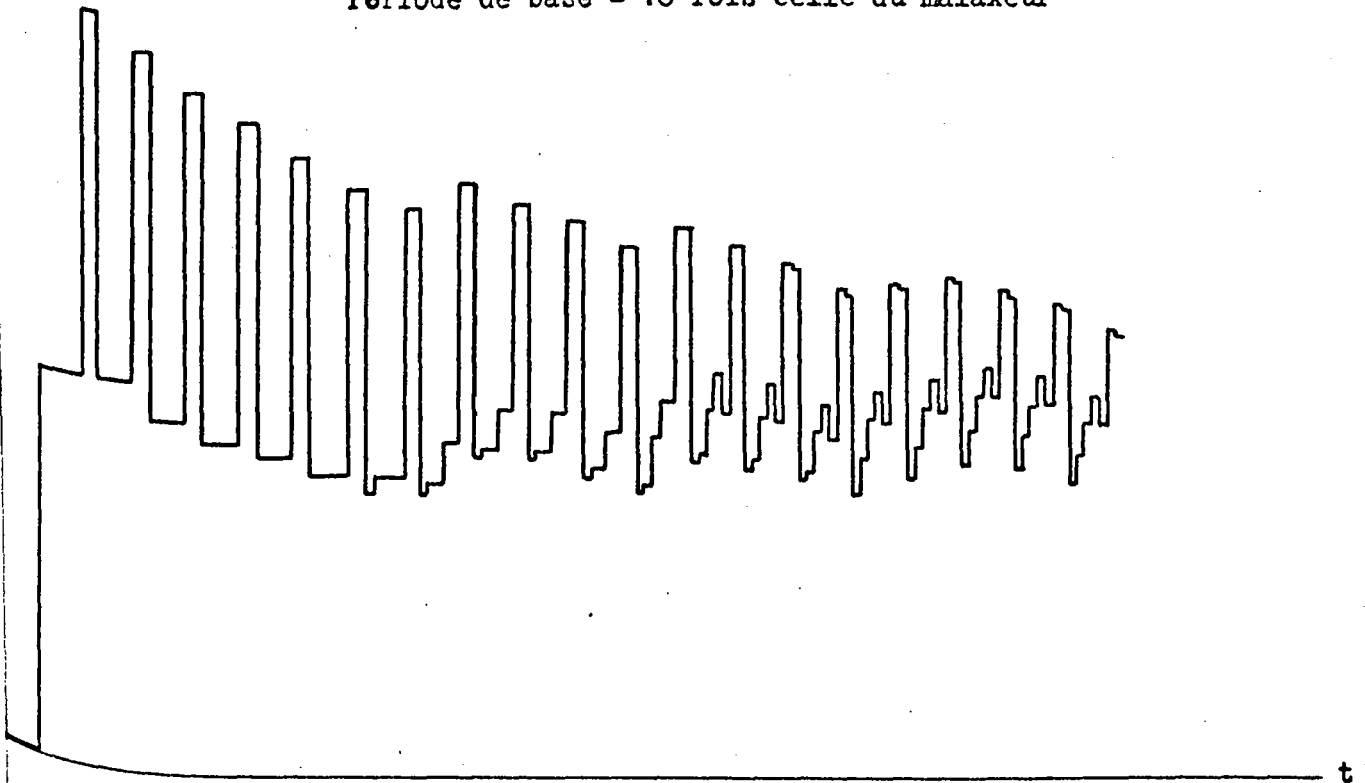


FIGURE 25

stissant

Commande par assimilation à un 1er ordre
Période de base = 18 fois celle du malaxeur



stissant

Période de base = 12 fois celle du malaxeur

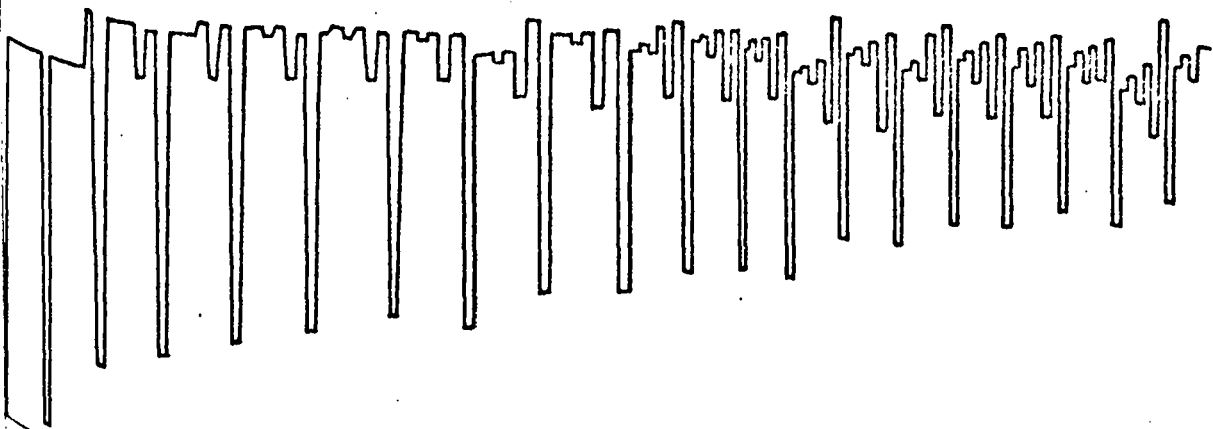


FIGURE 26

CHAPITRE III

Recherche d'un modèle du sable de fonderie

I. Nécessité d'un modèle du sable de fonderie :

Dans le chapitre précédent, nous avons montré à partir d'un modèle théorique très simplifié de la sablerie de fonderie que nous étudions, les différents algorithmes qu'il était possible d'utiliser en vue de réguler les quantités des constituants du sable.

Si nous abordons maintenant le processus réel, nous constatons que les teneurs en eau et en argile, qui représentent les variables du modèle, ne sont pas accessibles directement sur le système alors que la commande, elle, s'exprime toujours en quantités d'eau ou d'argile à ajouter.

Nous nous trouvons donc dans l'obligation d'introduire des variables intermédiaires, facilement accessibles à des capteurs, et dont la correspondance avec la composition effective du sable nous sera donnée par un modèle du sable relatif à ces variables, qu'il restera à déterminer. Nous rétablirons ainsi l'homogénéité des grandeurs utilisées dans le modèle du chapitre précédent.

Le schéma de la régulation aura alors la forme de la figure 27.

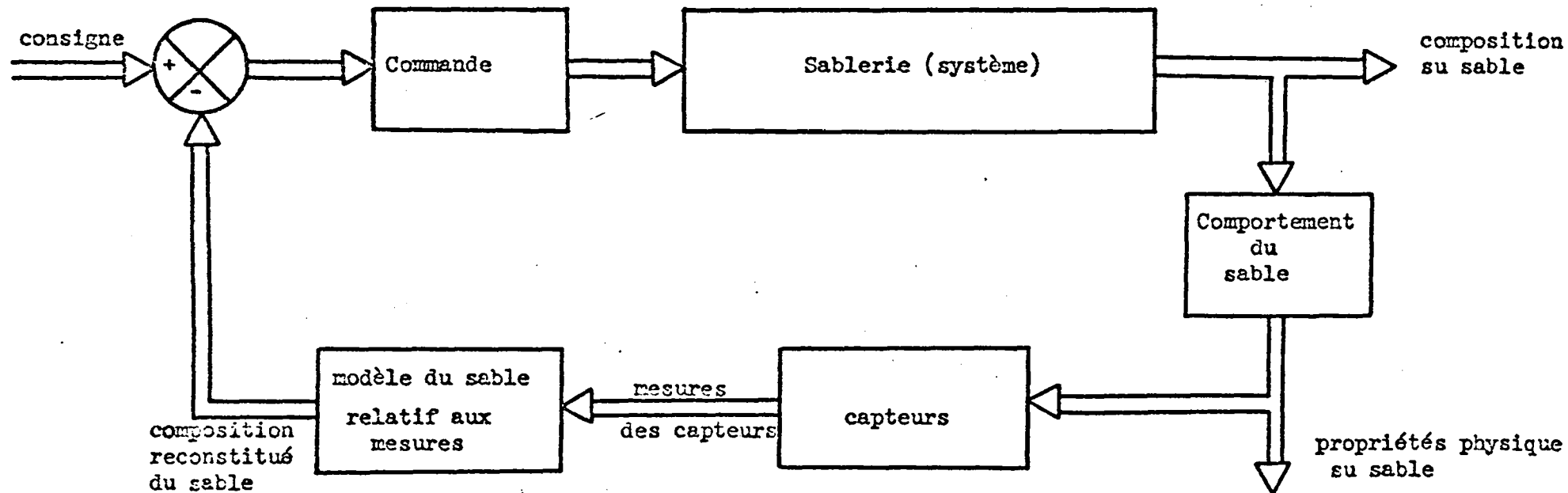


Schéma général de la régulation globale

FIGURE 27

Quant au modèle dont nous aurons besoin, il est défini pour l'instant d'une façon très sommaire au moyen de ses entrées et sorties.

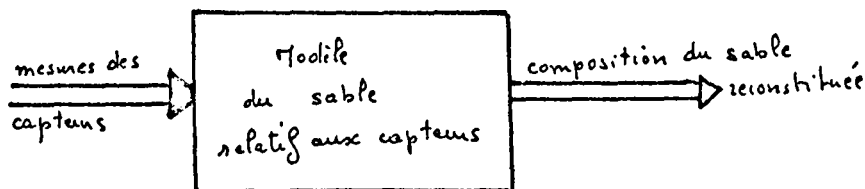


FIGURE 28

Le problème qui se pose a donc un double aspect :

- trouver des variables représentatives des teneurs en eau et en argile du sable, qui soient facilement mesurables au niveau industriel.
- établir un modèle du sable relatif à ces variables, tel que nous venons de le schématiser.

Deux méthodes s'offrent à nous pour le résoudre :

- étudier des échantillons de sable préparés en laboratoire.
- prendre les échantillons sur le processus lui-même, en cours de fonctionnement.

Remarquons que dans les deux cas, c'est le modèle inverse de celui que nous cherchons, qui sera obtenu puisqu'il donnera la valeur de certaines variables en fonction de la composition du sable.

La première méthode envisagée consiste à préparer, dans un malaxeur de laboratoire différents échantillons de sable de composition variable, à partir des constituants de base, et à effectuer systématiquement sur chacun de ces échantillons, des mesures de propriétés physiques, chimiques, électriques, de façon à mettre en évidence des corrélations entre les mesures et la composition du sable.

La seconde méthode consiste à opérer comme précédemment à partir de sable prélevé sur le processus au cours de son fonctionnement et dont on détermine la composition par les méthodes de laboratoire.

L'expérience a montré que les résultats fournis par ces deux méthodes ne sont pas comparables et que tout se passe comme si l'on avait affaire à deux matériaux fondamentalement différents.

Ceci s'explique par le fait que le sable réel subit des pertes et des ajouts continuels et que, statistiquement, un échantillon quelconque, est utilisé en moyenne pendant une semaine sur la chaîne subissant de ce fait, de très nombreux malaxages, des chocs thermiques et qu'il contient de nombreuses impuretés, et à cela s'ajoute l'effet de certains phénomènes encore mal expliqués actuellement.

En choisissant la seconde méthode d'investigation, nous avons donc plus de chances de trouver un modèle représentatif du comportement du sable de moulage malgré les inconvénients qu'elle implique :

Faible plage de mesure due au fait que le processus travaille toujours autour de son point de fonctionnement, aggravé par les incertitudes sur la détermination de la composition du sable par les méthodes classiques de laboratoire.

La série de tests que l'on fait subir au sable dépend autant de l'imagination que de l'expérience des professionnels de la fonderie. Nous en présentons ici quelques uns.

II) Etude de propriétés de sable de fonderie, liées à sa composition.

- 1) Densité en vrac : la densité en vrac du sable est définie comme le rapport de la masse au volume d'une même quantité de sable prise dans certaines conditions.

Du point de vue purement physique, un échantillon de sable est constitué de matériaux minéraux solides ayant une certaine répartition granulométrique, d'air, et d'eau. La densité de cet échantillon dépend donc de sa granulométrie, de son état de tassement, et de la quantité d'eau qui s'y trouve.

Sachant que la répartition granulométrique du sable est relativement constante dans une fonderie donnée, il suffit de prendre le sable avec un degré de tassement toujours identique pour que sa densité ne dépende plus que de son taux d'humidité.

Des mesures ont été faites sur le sable de circuit avant et après malaxage, en prenant des échantillons à différents taux d'humidité. Les résultats sont donnés par les courbes de la figure 29.

- En (1) - Sable avant malaxage et non tamisé, caractérisé par une grande dispersion des points (surtout ceux obtenus à partir d'un certain taux d'humidité) due à des différences de tassement du sable.
- (2) - Sable après malaxage et non tamisé (courbe tracée d'après les relevés de la figure 30).
- (3) - Sable après malaxage et tamisé.

On remarquera que la densité du mélange de α % d'un corps de densité d_1 et $(100 - \alpha)$ % d'un corps de densité d_2 est donnée par la relation
$$d = \frac{100 d_1 d_2}{\alpha d_2 + (100 - \alpha) d_1}$$
. Or les

courbes trouvées sont très éloignées de cette formule théorique ou d_1 et d_2 seraient les densités du sable sec et de l'eau. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'eau en enrobant les grains, crée un réarrangement de ceux-ci, d'où une variation simultanée de la quantité d'air présenté dans le sable, d'autant plus marquée que le sable est malaxé.

Un capteur d'humidité du sable pourrait être constitué en remplaçant la trémie d'alimentation du malaxeur par une trémie à la fois volumétrique et peseuse donnant le poids d'un volume constant de sable.

RELATIONS DENSITE EN VRAC-HUMIDITE (Sable Fonderie GALLY)

ité en vrac

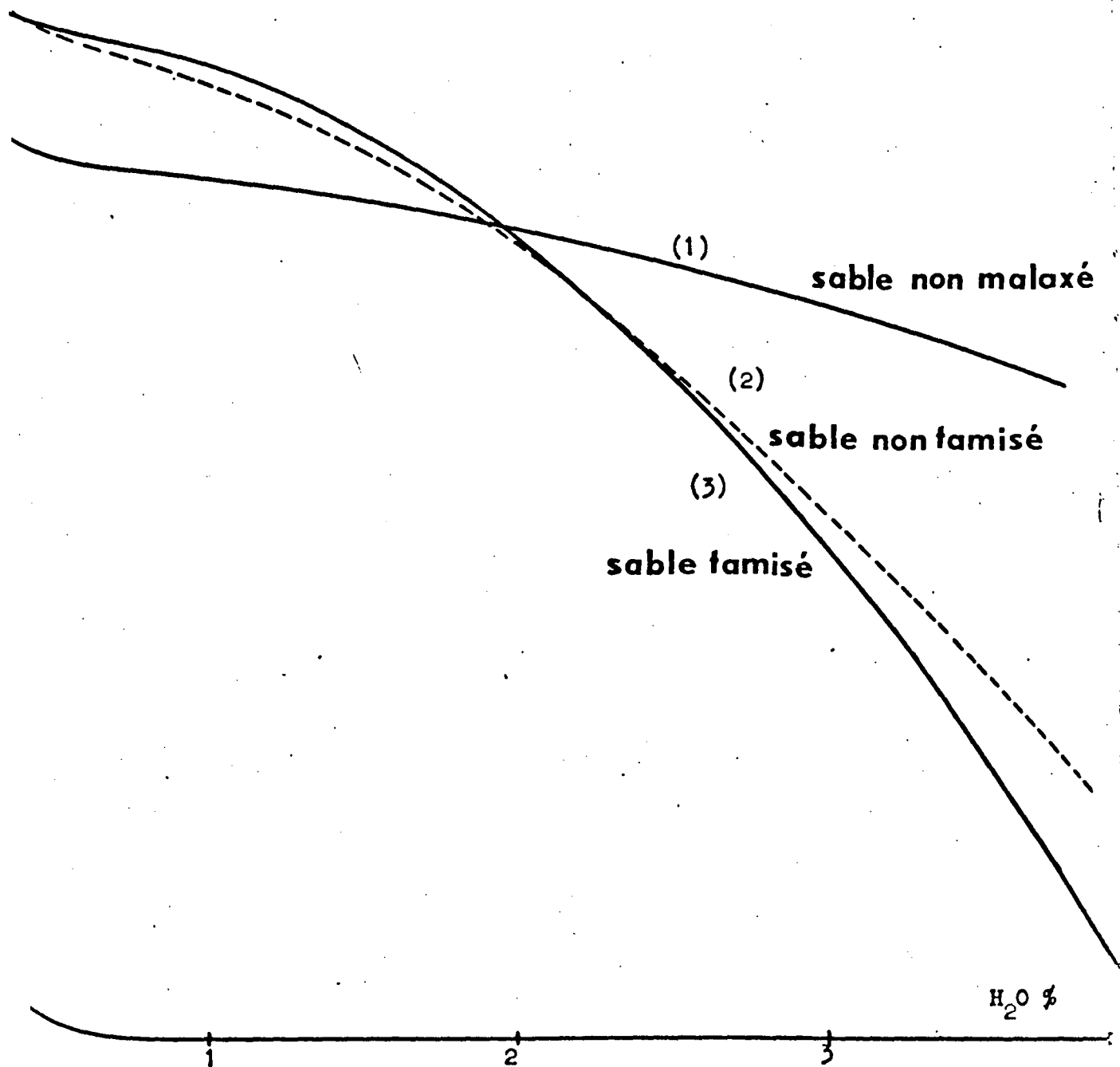


FIGURE 29

En utilisant pour le chargement de la trémie, un système automatique, donc bien répétitif, on pouvait penser que l'on aurait toujours le même degré de tassement et que le fait de travailler sur une grande quantité de sable (1 tonne environ) réduirait la dispersion des mesures. Plusieurs raisons nous ont invité à ne pas adopter cette solution.

Pour réduire effectivement cette dispersion on pouvait envisager après les relevés de la figure 29, de tamiser le sable avant son introduction dans la trémie. L'incorporation d'un tamis dans l'architecture de la sablerie s'est avérée pratiquement impossible (il fallait surélever le bâtiment).

Etant donné le système d'alimentation de la trémie, rendre cette trémie à la fois volumétrique et peseuse, posait un problème mécanique difficile à résoudre et de coût élevé.

En outre, au moment où le sable est introduit dans le malaxeur, il subsiste dans ce dernier une certaine quantité d'eau, difficile à déterminer, ayant servi au rinçage de l'appareil entre deux malaxages successifs, et qui fausse les mesures d'humidité.

Nous avons donc été obligé de rechercher un autre type de capteur.

- 2) Mesure par micro-ondes : Il est relativement facile de mesurer, en hyperfréquence, le coefficient de réflexion d'un matériau diélectrique. Lorsque ce matériau est un mélange, on mesure le coefficient de réflexion global sauf si l'un des composants a un taux de réflexion beaucoup plus élevé que celui des autres. C'est le cas pour l'eau lorsqu'elle est mélangée avec un diélectrique imparfait tel le sable. Dans ce cas, on annule la réflexion due au sable et on mesure celle liée à l'eau. Une étude a été menée, sur ce principe par le Centre d'Etudes et de Recherches de Toulouse.

a) Etudes préliminaires :

Le premier montage a été le suivant : un générateur de micro ondes alimente un circulateur par la porte (1).

Celui-ci transmet l'énergie à la porte (2) qui alimente un capteur à travers un adaptateur. L'énergie réfléchie est aiguillée sur la voie (3) du circulateur et affichée sur un appareil de mesure. Le capteur est constitué par un guide d'onde fermé par une pièce de téflon et plongé au coeur du sable contenu dans une trémie.

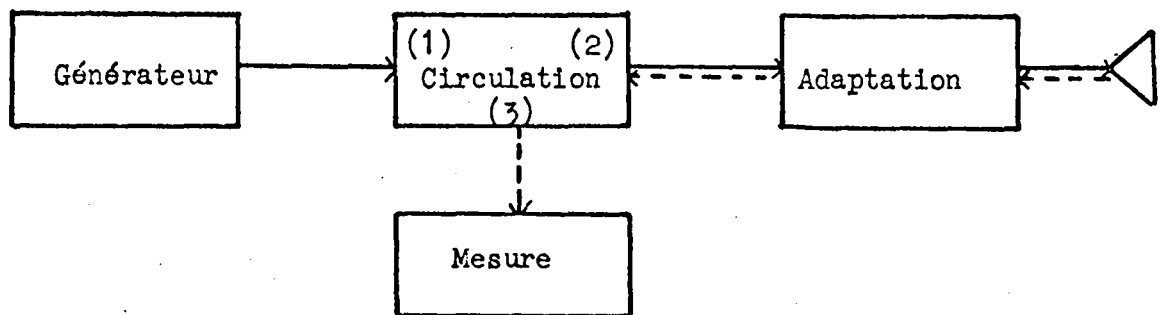


FIGURE 31

La courbe de correspondance obtenue, entre l'humidité du sable et la mesure fournie par l'appareil est donnée à la figure 33.

On constate malheureusement que dans la zone située entre 0 et 8 % la correspondance n'est pas linéaire car, dans ce premier montage, on mesure la reflexion globale sans tenir compte du module ni de la phase de l'onde.

Capteur par micro-ondes
Courbe relevée avec le premier montage

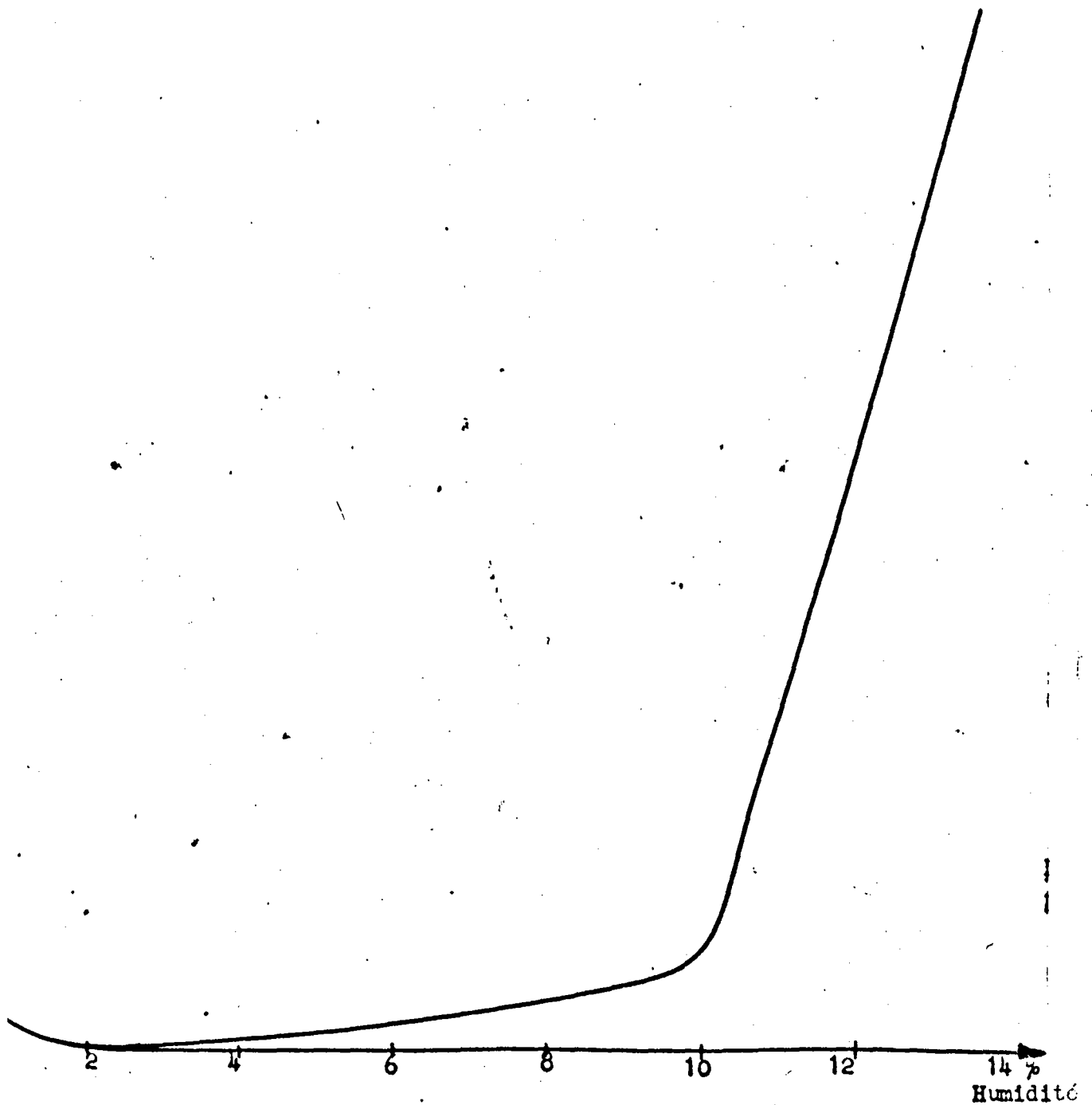


FIGURE 33

Capteur par micro-ondes
Courbe relevée avec le second montage

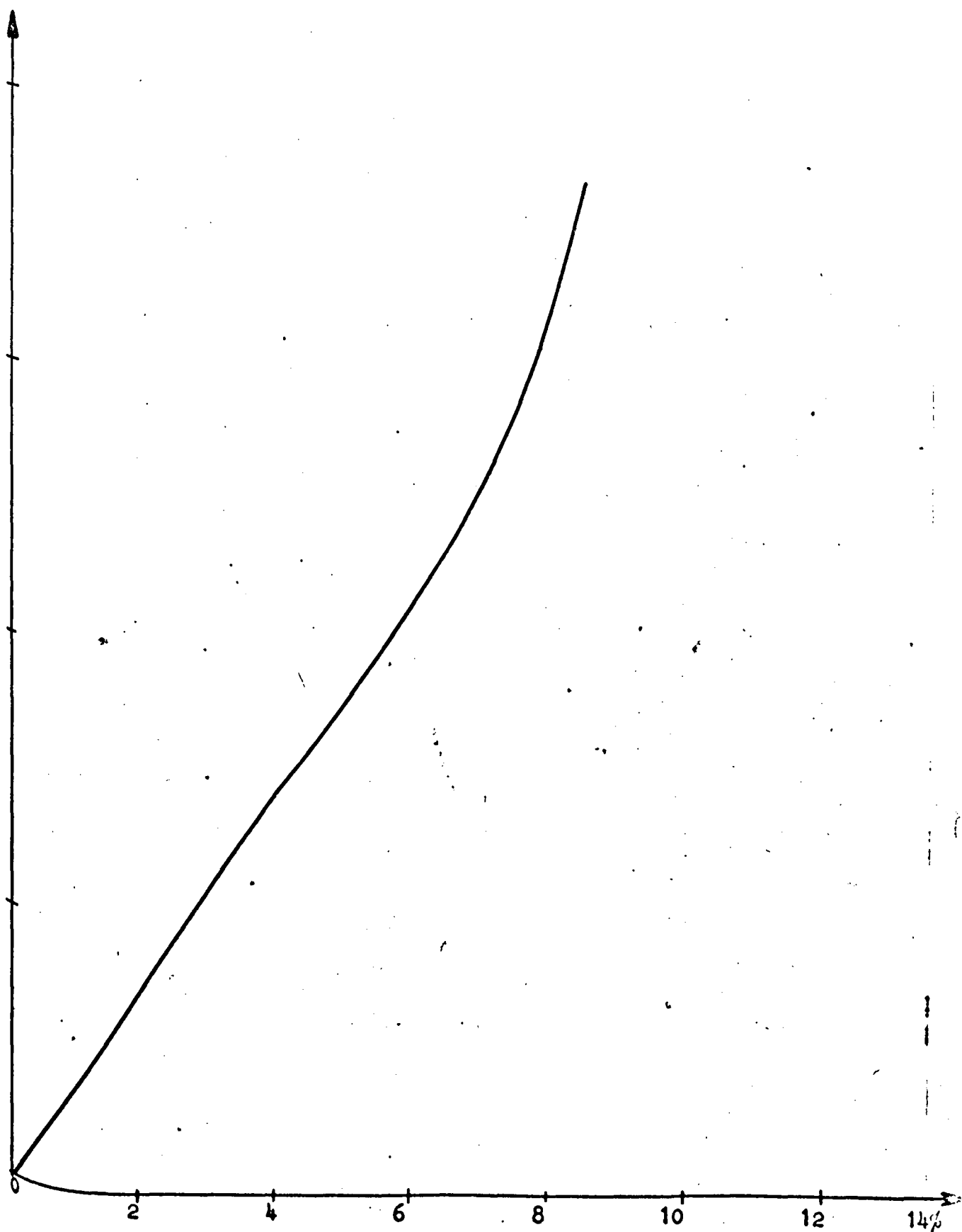


FIGURE 34

Humidité

Nous avons dit au début de ce paragraphe qu'il s'agissait de mesurer le coefficient de réflexion d'un diélectrique et de faire correspondre à ce coefficient une teneur en eau. Il semble bien que les impuretés contenues dans le sable de fonderie, en partie d'origine métallique, que l'eau de constitution contenue dans l'argile et que surtout, des différences de tassement, même très légères, faussent les mesures car, il n'a pas été possible de déterminer l'humidité d'un tel sable avec cet appareil.

3) Mesure de l'aptitude au serrage du sable de fonderie :

L'examen du comportement des sables de moulage lors du serrage des moules, en fonction de leur degré d'humidification et des conditions de serrage, ont conduit à établir une nouvelle méthode de détermination de la teneur en eau des sables de fonderie.

De nombreuses expériences concernant l'aptitude au serrage ont montré que cette caractéristique était, pour un sable de circuit dont les constituants ne subissent pas de variations importantes, fortement influencée par le taux d'humidité.

Les mouleurs et contrôleurs de sable expérimentés apprécient le degré d'humidification d'un sable par l'essai manuel et prouvent qu'il est possible de déterminer et de reproduire un état d'aptitude au moulage servant de base de comparaison. Cependant, l'expérience montre également que le contrôle à la main est quelque peu subjectif et qu'il n'est manifestement manié avec maîtrise que pour un petit nombre de praticiens de la fonderie. C'est pourquoi, l'essai d'aptitude au serrage a été défini comme suit :

Le sable à essayer, est introduit en vrac et toujours dans les mêmes conditions dans un tube d'essai d'un diamètre de 50 mm et d'une hauteur de 100 mm.

Le sable est arasé puis comprimé sous une pression bien définie, la diminution de hauteur de l'éprouvette, comptée en mm représente l'aptitude au serrage de ce sable. Si l'on opère soigneusement la dispersion des valeurs mesurées sur un même échantillon est inférieure à 1 mm.

Des essais ont été opérés avec différentes pressions pour des sables d'humidité variable, les courbes obtenues sont représentées sur la figure 35 et expliquent le choix d'une pression normalisée de 10 kg/cm^2 . On remarque en effet, qu'après une forte diminution de la hauteur pour une pression comprise entre 0 et 1 kg/cm^2 , celle-ci tend à se stabiliser et varie alors très peu avec la pression diminuant ainsi les risques d'erreur.

Des mesures effectuées en laboratoire sur des sables différents et par nous même sur le sable de fonderie Gailly, ont donné respectivement les courbes des figures 36 et 37. On y remarque bien l'influence de la nature du sable sur la correspondance humidité $\rightarrow$ aptitude au serrage, mais pour un sable donné, cette mesure est très significative et reproductible.

Le fait aussi que le test d'aptitude au serrage soit relativement facile à automatiser de façon à fournir un capteur autonome nous a amené à le choisir, afin d'indiquer l'humidité du sable dans notre boucle de régulation.

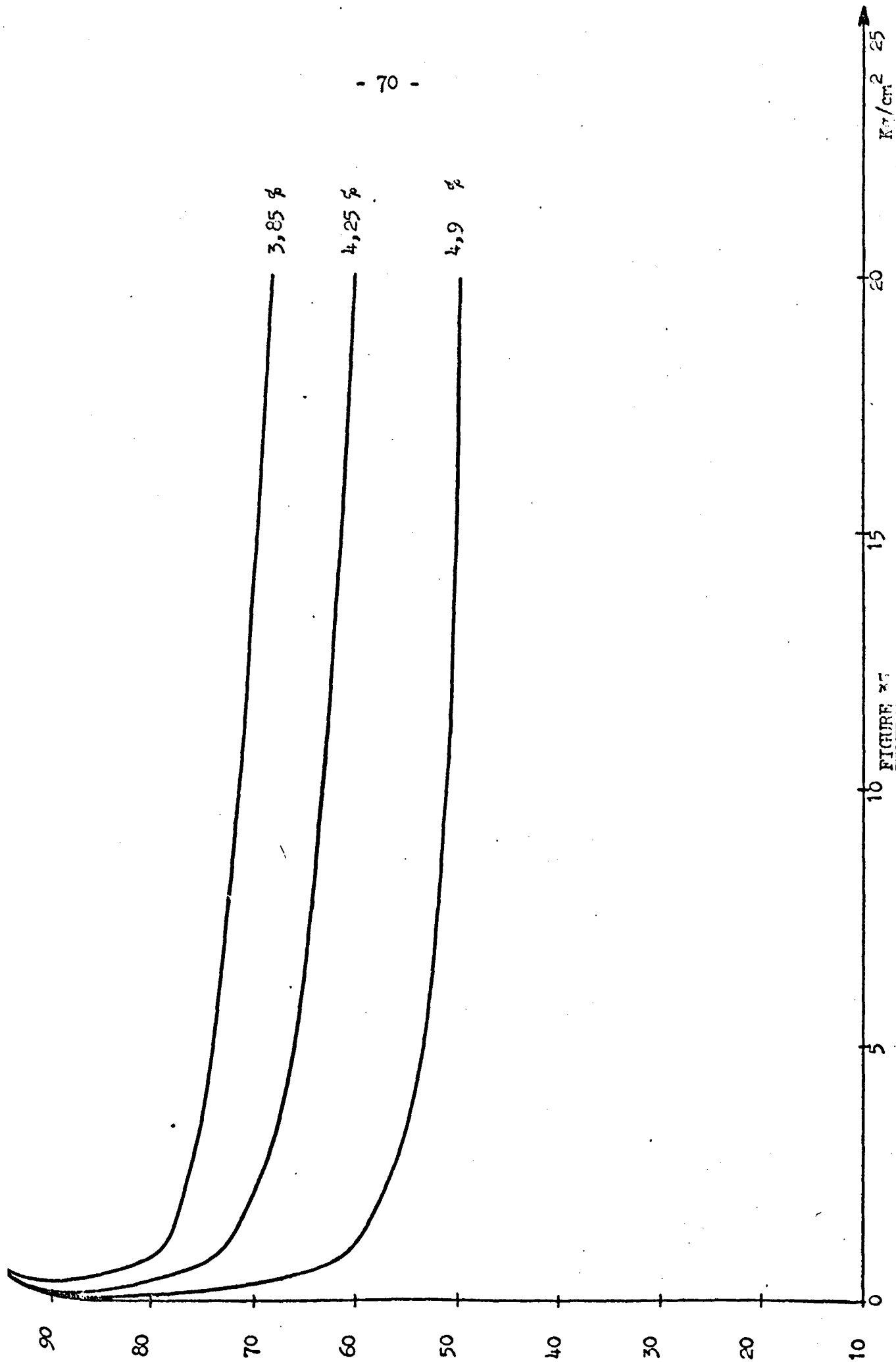
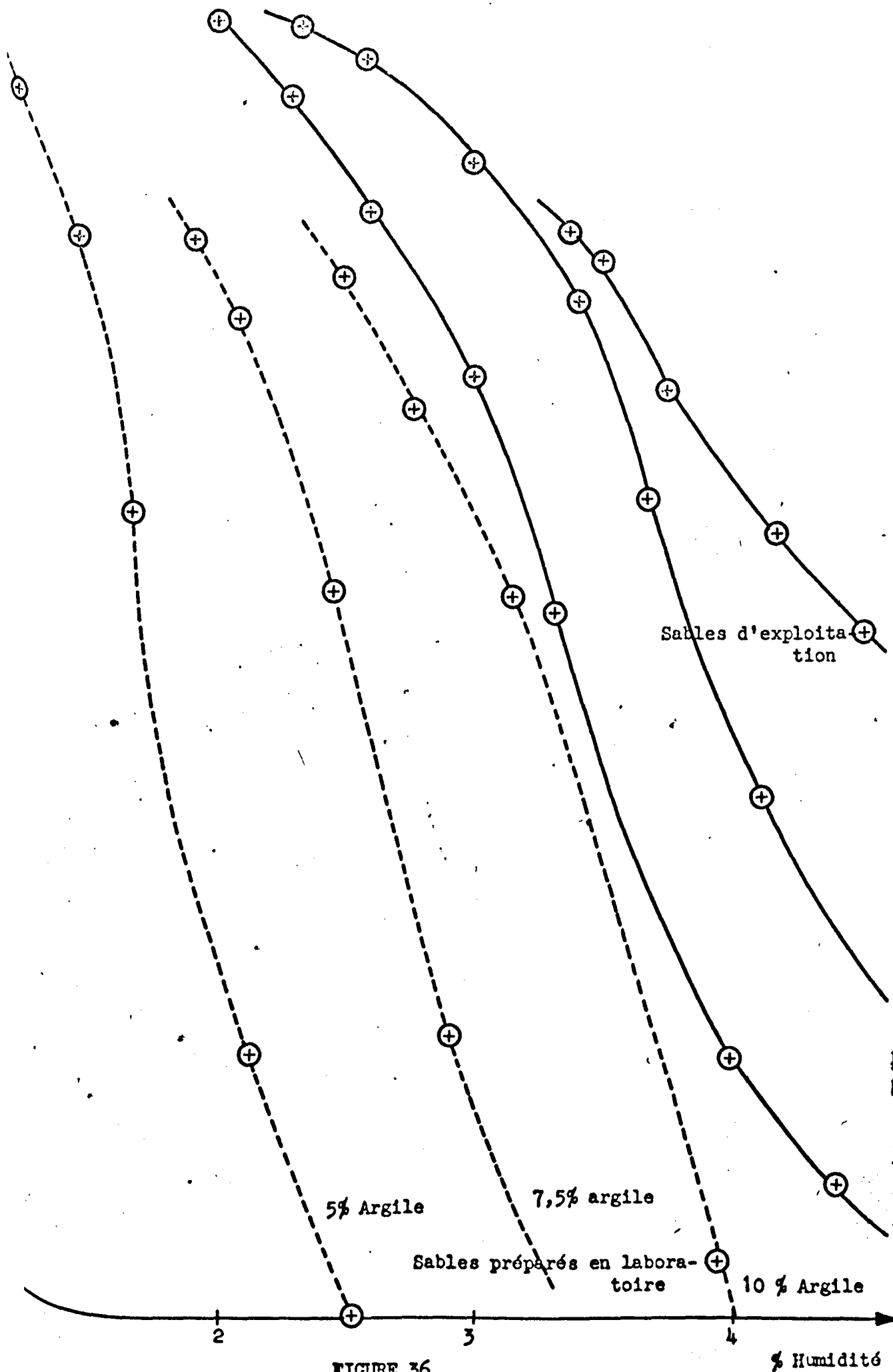


FIGURE 25

Variations de l'aptitude au serrage du sable
en fonction de son humidité, relevées en laboratoire



Variations de l'aptitude au serrage en fonction
de l'humidité sur huit broyées de la fonderie GAILLY

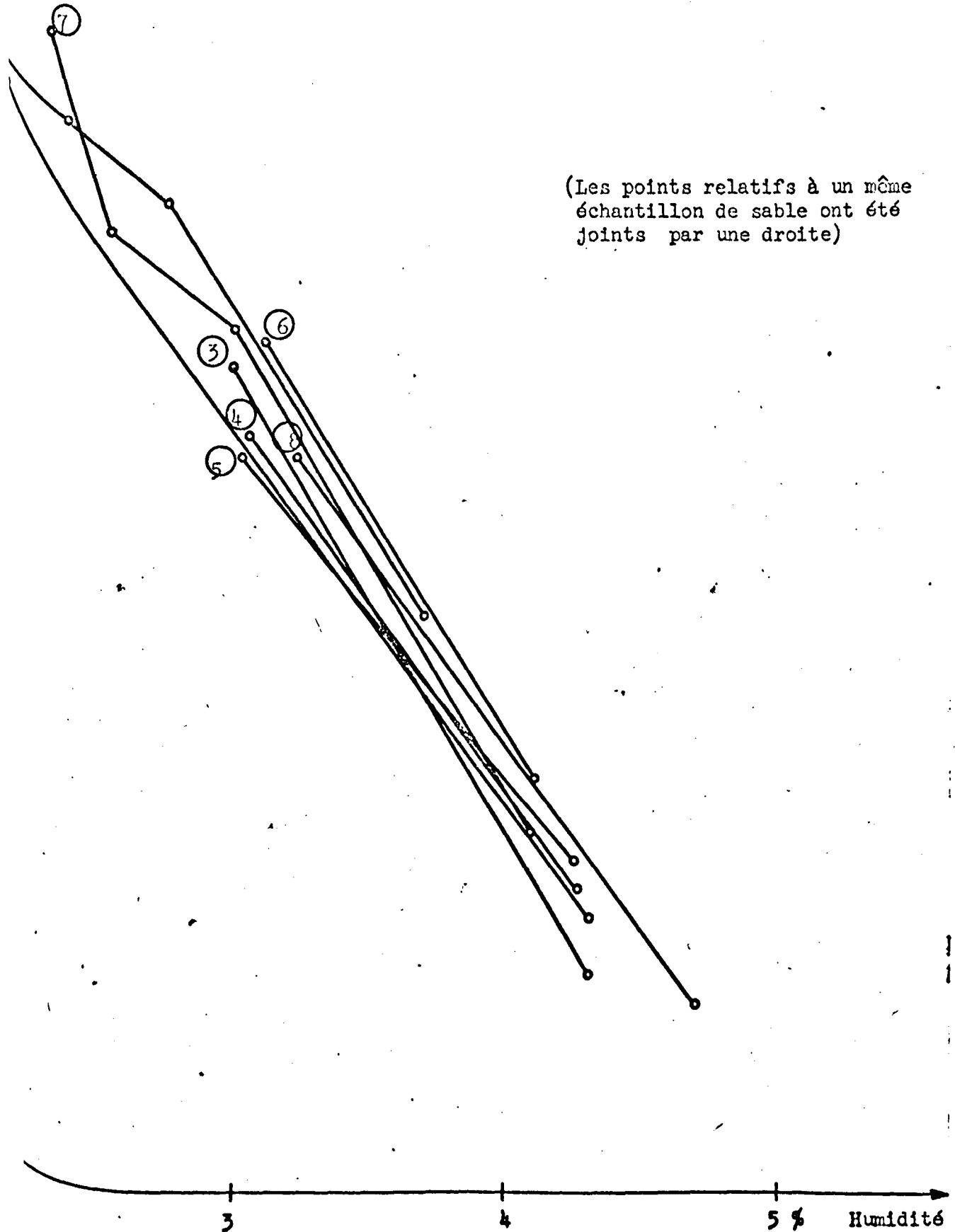


FIGURE 37

4) Evaluation de la teneur en argile par le bleu de méthylène :

L'argile crue, telle qu'elle est approvisionnée en fonderie, est constituée par le mélange plus ou moins complexe, d'un minéral argileux principal, de minéraux argileux secondaires, et d'impuretés de nature et en proportions diverses. On désigne généralement sous le terme d'argile active les minéraux argileux qui confèrent à l'ensemble du mélange, en présence d'eau, ses propriétés de cohésion et de plasticité.

Nous avons vu au chapitre I que dans le sable de circuit, une partie de l'argile, variable selon la masse des pièces coulées, le rapport masse de sable/masse des pièces, la température de coulée, la température de destruction de l'argile, le temps de contact entre pièce et sable, perdait ses propriétés agglutinantes pour devenir ce que nous avons appelé précédemment des impuretés. C'est la proportion d'argile active subsistant après la coulée et le décochage des pièces, que nous cherchons à déterminer grace au bleu de méthylène.

Cette méthode fait appel à la propriété que présentent les argiles d'adsorber les matières organiques et les colorants organiques en particulier.

Cette propriété est d'ailleurs mise à profit dans d'autres industries en particulier, pour la purification de liquides.

Lorsqu'une argile est mise au contact d'une solution aqueuse de bleu de méthylène, elle adsorbe une quantité déterminée de ce colorant dépendant de la proportion d'argile active réellement contenue dans le minéral, de la composition minéralogique de l'argile, et de la nature des ions échangeables.

Pour cela, elle doit subir au préalable un traitement destiné à l'amener à un état ionique déterminé.

Deux méthodes principales de détermination de la rétention du bleu de méthylène par les argiles ont été définies et peuvent être mises en oeuvre :

- une première, consistant à mettre l'échantillon d'argile au contact d'une solution aqueuse de colorant de concentration connue et à mesurer par colorimétrie de différence de concentration avant et après saturation du minéral.
- une seconde, dans laquelle on ajoute progressivement et jusqu'à saturation de l'argile, la solution aqueuse de bleu de méthylène de concentration connue. Cette dernière méthode est dénommée, méthode de la touche.

Ces deux méthodes conduisent à des résultats différents, les valeurs de rétention de bleu de méthylène était souvent plus élevées par la méthode colorimétrique. L'essentiel est cependant que la reproductibilité soit bonne ce qui a été confirmé par diverses expériences :

* On sait que le chauffage d'une argile provoque une succession de départs d'eau, amenant à un rapprochement des feuillets et par voie de conséquence, à une diminution de la surface accessible aux molécules de bleu de méthylène. On peut donc s'attendre à voir la rétention de bleu de méthylène décroître lorsque la température de chauffage augmente ; c'est ce que l'on constate effectivement sur la figure 38, que l'on peut comparer à la figure 5 du chapitre I.

On note une diminution relativement lente de la rétention du colorant en fonction de la température, qui s'accroît vers 500° C, pour se stabiliser à des températures supérieures à 700°C, donnant ainsi une courbe inverse de celle illustrant la perte de poids de l'argile.

* Des mélanges en proportions diverses d'argile crue et d'argile calcinée à 800° C, ont été soumis à l'essai au bleu de méthylène afin de vérifier la possibilité de déterminer, à l'aide de ce test, les proportions de l'une et de l'autre dans un mélange quelconque. Les résultats obtenus ont été très satisfaisants ainsi que le montre la figure 39.

chauffage à différentes températures

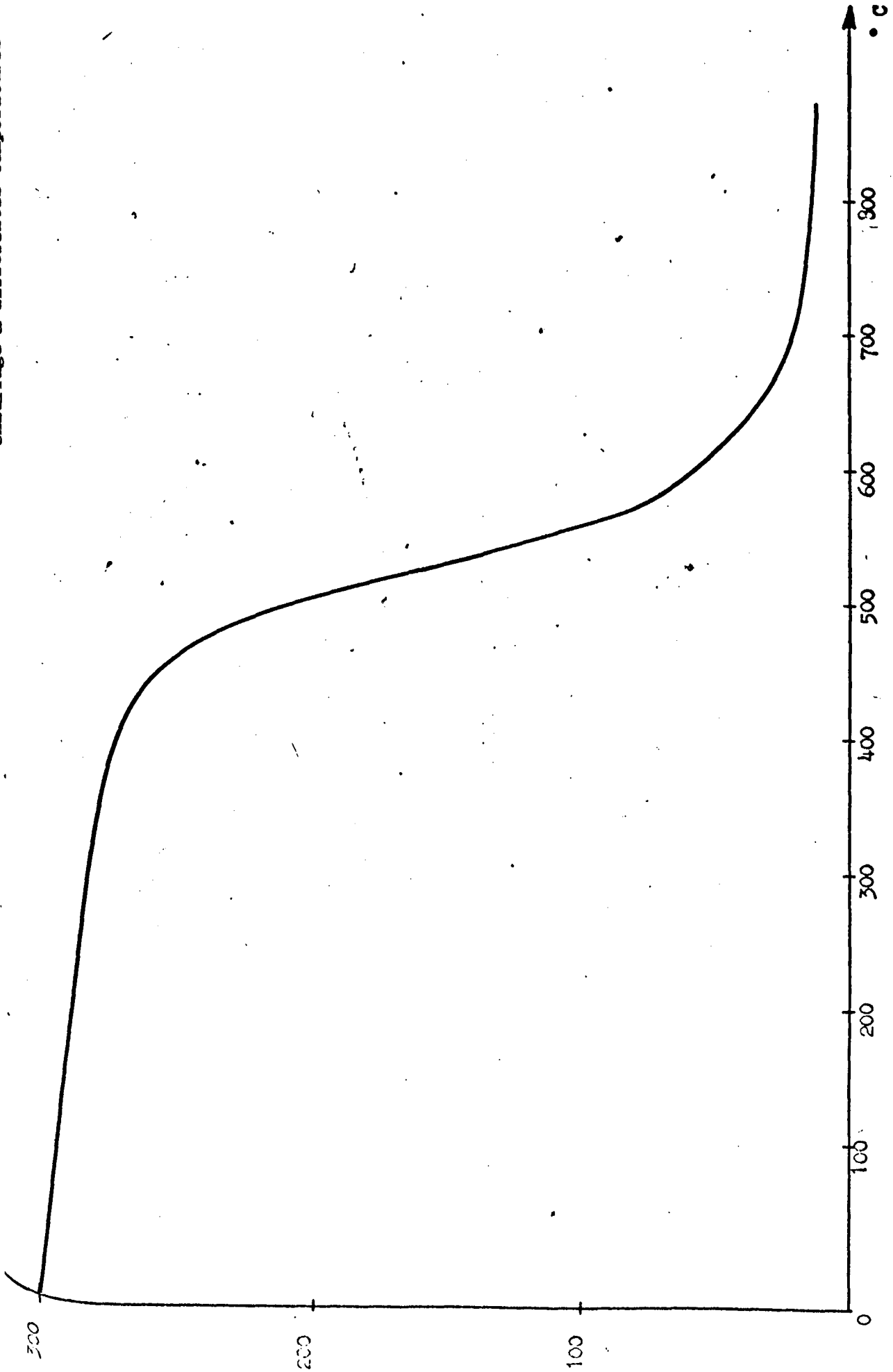


FIGURE 38

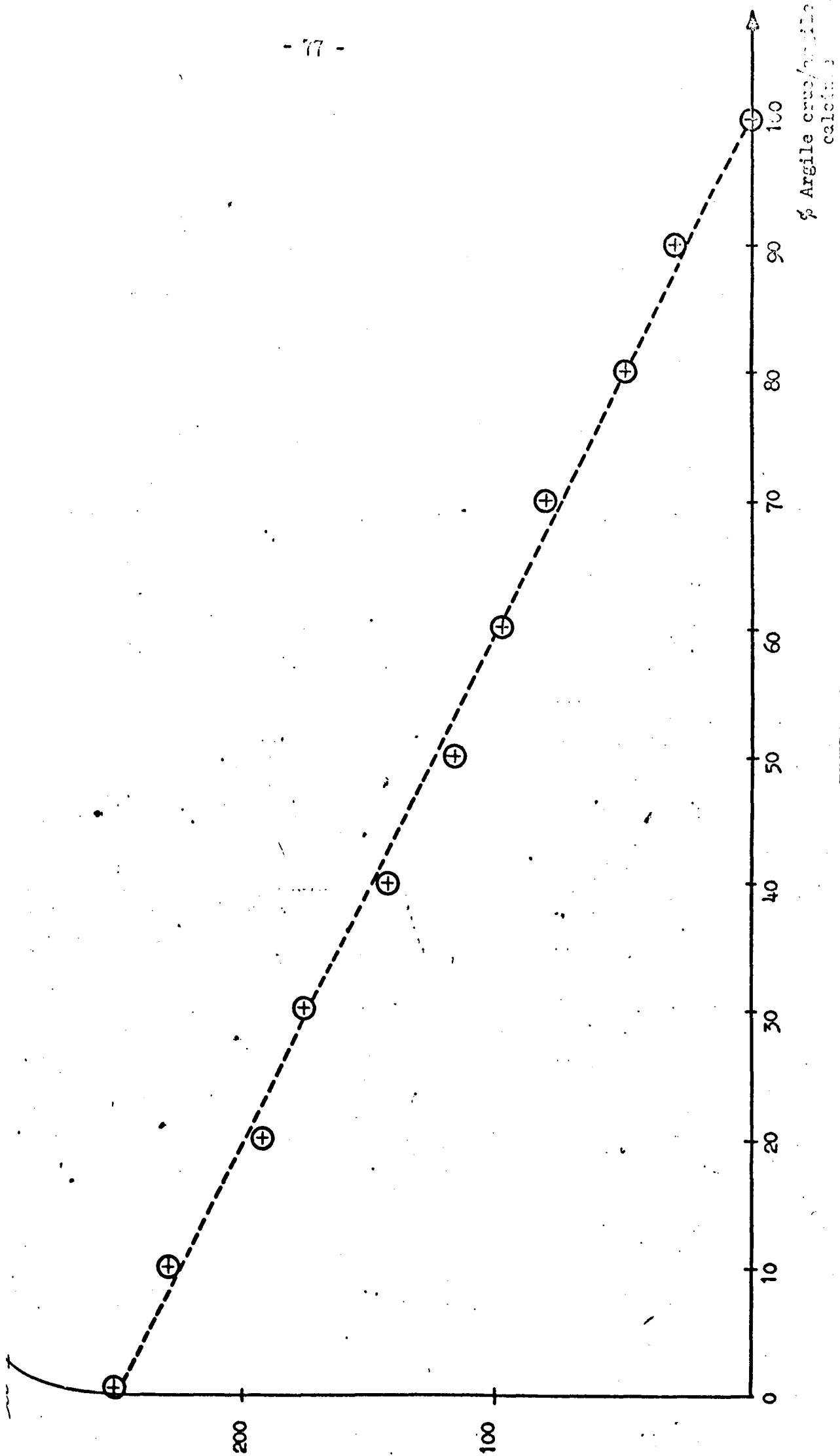


FIGURE 39

Les courbes de rétention du bleu de méthylène pour des proportions croissantes d'argile calcinée forment des droites passant avec une bonne précision par les points expérimentaux. Ainsi, en partant d'une valeur quelconque de rétention du bleu de méthylène, il est possible de déterminer la quantité d'argile "active" contenue dans un échantillon.

Nous disposons donc d'une méthode précise et relativement facile à mettre en oeuvre, pour déterminer la proportion d'argile active présente dans le sable. Cependant, les études menées dans le but d'automatiser cette méthode par voie colorimétrique n'ont pas abouti à l'élaboration d'un capteur du fait du nombre élevé de manipulations à effectuer.

Pourtant, nous garderons pour la suite des recherches, cette technique de mesure de préférence à la méthode par lévigation, beaucoup moins précise, et qui ne donne que la teneur en éléments de grosseur inférieure à 20μ , mesure qui n'a que peu de rapport avec le pouvoir de cohésion du sable.

5) Recherche systématique de corrélations entre les propriétés du sable et sa teneur en argile :

Mesure de la résistance à la compression.

Dans l'impossibilité de mettre au point un capteur d'argile à partir de l'étude de phénomènes particuliers relatifs au comportement du sable, nous avons entrepris une recherche systématique de corrélation entre diverses variables relevées habituellement par les fondeurs et prises en compte de façon plus ou moins empirique pour la conduite des sableries.

Cette recherche est basée sur 424 séries de mesures effectuées sur le sable des chantiers 6 et 7, à raison de une à deux séries de mesures par jour, et porte sur les variables suivantes :

Humidité, perméabilité, résistance à la compression, résistance au cisaillement, aptitude du serrage, mesure de l'argile par le bleu de méthylène, perte au feu. Nous avons mis au point, dans ce but, des programmes de régression linéaire destinés à mettre en évidence toute corrélation pouvant exister entre ces variables prises deux à deux, puis n par n.

Rappelons que la méthode de régression linéaire simple par la méthode des moindres carrés consiste, du point de vue géométrique, à faire passer une droite au milieu du nuage de points de coordonnées x et y représentatifs des mesures dont nous disposons, de façon à avoir la dispersion la plus petite possible, ce qui s'exprime analytiquement par rechercher l'équation $Y = aX + b$ minimisant pour l'ensemble des mesures la somme des $(Y_i - y_i)^2$, soit $\sum (ax_i + b - y_i)^2$ minimale, d'où son nom de moindres carrés.

On contrôle par ailleurs la validité des coefficients obtenus par la grandeur r appelée coefficient de détermination, qui est défini comme la racine du rapport de la variation de la grandeur y expliquée par la relation $Y = aX + b$, à sa variation totale.

$$\text{Soit } r = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \bar{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}} \quad \text{qui s'exprime encore par :}$$

$r^2 = aa_1$ si pour un même ensemble de mesures on a trouvé les corrélations $Y = aX + b$ et $X = a_1 Y + b_1$.

La relation trouvée est donc d'autant mieux vérifiée que r est proche de 1.

La méthode de regression linéaire par les moindres carrés, appliquée à n variables est une extension à un ordre supérieur de la méthode précédente en cherchant une relation linéaire de la forme $Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 \dots + a_n X_n$, entre les variables.

Nous avons écarté la possibilité d'effectuer des regressions non linéaires consistant à rechercher entre les variables, des relations de la forme $Y = a X^n + b X^{n-1} + \dots$, car notre but est de considérer le modèle autour du point de fonctionnement du processus et cela est parfaitement en accord avec le fait que, travaillant sur le système lui-même, toutes nos mesures sont groupées autour de ce point de fonctionnement. Ceci est d'ailleurs illustré par le tableau de la figure 40, ou l'on a indiqué, pour chaque variable, la moyenne et l'écart type des différents relevés.

Le résultat des recherches, en ce qui concerne les variables prises 2 par 2 sont consignés dans le tableau de la figure 41.

Il existe, d'après les mesures, une relation marquée entre

- * Résistance à la compression et au cisaillement.
- * Résistance à la compression et aptitude au serrage.
- * Aptitude au serrage et humidité, que nous connaissions déjà.

La relation compression, humidité découle des précédentes.

En passant à l'ordre 3 nous trouvons cette fois une relation entre trois variables qui sont la résistance à la compression, l'aptitude au serrage et l'adsorption du bleu de méthylène avec les coefficients suivants :

$$\begin{aligned} \text{R.compression} &= -.03 \text{ Apt au serrage} + .1 \text{ bleu de méthylène} + 1.2 \\ \text{Apt au serrage} &= -22 \quad \text{R.compression} + 2.5 \text{ bleu de méthylène} + 36 \\ \text{Bleu de méthylène} &= 6.2 \text{ R.compression} + .22 \text{ Apt au serrage} - 0.81 \end{aligned}$$

Les valeurs de r sont : 0,81, 0,79 et 0,74.

Etant donné que nous mesurons déjà l'aptitude au serrage du sable pour connaître son taux d'humidité, il suffit de mesurer sa résistance à la compression pour en déduire la quantité de bleu de méthylène qu'il est susceptible d'adsorber, donc sa teneur en argile active.

La mesure normalisée de la résistance à la compression telle qu'elle est définie dans les laboratoires de fonderie, consiste à préparer dans un moule métallique, une éprouvette cylindrique avec le sable à tester, mesurant 50 mm de diamètre et 50 mm de hauteur, tassée avec une énergie de 100 Kg/cm, à l'aide d'un fouloir, et à lui faire subir un effort de compression suivant son axe longitudinal. La mesure est alors exprimée en daN/cm^2 de section.

La mesure de résistance à la compression, comme celle de l'aptitude au serrage est aisément automatisable et permettra de disposer d'un capteur autonome ne nécessitant aucune intervention humaine pour déterminer la teneur en argile du sable de fonderie.

FIGURE 40 - Dispersion des mesures effectives sur la fonderie Gailly

	Humidité	Perméabilité	Compression	Cisaillement	Apt. Serrage	Eau Méthylène	Noir
M tier n° 6	4.25	94.4	1.75	.396	43	20.9	5.84
σ	0.46	8.47	0.22	0.07	5.0	1.23	0.45
M tier n° 7	3.73	69.8	1.59	.313	48.3	19.7	5.55
σ	0.42	7.37	0.20	0.07	4.57	1.54	0.49

FIGURE 41 - Coefficients de corrélation entre propriétés physiques du sable

	Humidité	Perméabilité	Compression	Cisaillement	Apt. de Serrage	Eau de Méthylène	Noir
			.42		11.5		
Humidité							
Perméabilité	1.5			.24	- 22		
Compression			2.4				
Cisaillement	.07		- .03				
Apt. de Serrage							
Eau de Méthylène							
Noir							

Les différentes phases par lesquelles nous sommes passés, et que nous venons de décrire rapidement, nous ont permis de remplir les deux conditions que nous nous étions fixés au début de ce chapitre.

Nous avons trouvé deux variables représentatives de la teneur en eau et en argile du sable, qui sont la résistance à la compression, et l'aptitude au serrage, et dont la mesure est aisée à automatiser comme l'a prouvé la mise au point de prototypes de capteurs.

D'autre part, nous disposons aussi d'un modèle du sable relatif à ces deux variables et dont nous rappelons les coefficients pour ce qui est du sable de la fonderie Gailly sur lequel nous avons opéré :

$$\begin{pmatrix} \text{Humidité} \\ \text{Teneur en argile} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} .07 & 0 \\ .11 & 3.1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{Apt au serrage} \\ \text{Résistance à la compression} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.5 \\ -0.4 \end{pmatrix}$$

Les valeurs de l'humidité et de la teneur en argile sont données en %. La connaissance de la masse de sable introduite dans le malaxeur, grace à une trémie peseuse permettra de convertir ce pourcentage en masse de constituants.

Nous allons maintenant dans un nouveau chapitre, simuler l'ensemble des résultats exposés aux chapitres II et III sur un modèle de fonderie plus proche de la réalité.

CHAPITRE IV

Application des résultats précédents à un modèle plus élaboré

d'une sablerie de fonderie.

Dans ce chapitre, nous commencerons par décrire un modèle d'une sablerie de fonderie ; ayant un comportement beaucoup plus proche de la réalité que celui du modèle utilisé au chapitre II. Ensuite, nous commanderons ce modèle au moyen des algorithmes étudiés et cela par l'intermédiaire des capteurs associés aux grandeurs représentatives de la composition du sable, mises en évidence au chapitre III. Ceci permet alors d'avoir une représentation aussi fidèle que possible, du fonctionnement d'une sablerie de fonderie commandée suivant les méthodes que nous avons décrites et de pouvoir ainsi tester ses performances.

- I. Description du modèle : Nous avons utilisé, pour construire ce modèle, le principe employé pour l'élaboration du modèle simplifié. Nous avons décomposé la sablerie en un certain nombre d'éléments simples dont nous nous sommes ensuite attaché à reproduire le comportement de façon aussi proche de la réalité que possible.

Le modèle obtenu est entièrement numérique, écrit en langage Fortran, et sa complexité tend à réaliser un compromis entre la fidélité à la réalité et les temps de calcul mis en jeu. Tous les constituants du sable y sont traités simultanément ce qui permet de prendre en compte leurs inter-actions.

Nous allons maintenant passer en revue les différents éléments constituant ce modèle.

a) Le malaxeur : C'est l'élément qui fournit l'échantillonnage de fonctionnement de la sablerie et acquit correspond, de ce fait, un retard pur d'une période.

C'est aussi l'endroit où se font les additions d'eau et d'argile représentant la commande du processus.

Le malaxeur reçoit à chaque cycle 1 000 kg de sable venant des silos contenant a % donc $(10 \times a)$ kg d'eau et b % soit $(10 \times b)$ kg d'argile.

On lui ajoute C Kg d'eau et d Kg d'argile. Il en ressort donc $(1\ 000 + c + d)$ Kg de sable contenant $(10 \times a + c)$ Kg d'eau et $(10 \times b + d)$ Kg d'argile.

b) Les capteurs : Ces capteurs peuvent opérer, soit en début de malaxage du broyeur, sur le sable provenant des silos, ce qui correspond à une régulation en boucle ouverte du processus, soit sur le sable sortant du malaxeur après addition des constituants, pour réaliser une régulation en boucle fermée.

La mesure fournie par ces capteurs possède deux composantes :

- Une composante liée à la composition du sable par les relations mises en évidence au chapitre III, lors de l'étude statistique des mesures de la résistance à la compression, de l'aptitude au serrage.
- Une composante aléatoire de distribution Gaussienne, obtenue par pondération, au moyen de la courbe de Gauss cumulée, d'une variable aléatoire de distribution constante prenant ses valeurs sur l'intervalle $] 0 - 1 [$. Pour chacune des variables (aptitude au serrage ou résistance à la compression), l'écart type de cette composante a été choisi du même ordre que celui du capteur réel correspondant, et l'on s'est attaché bien sûr à assurer l'indépendance des composantes aléatoires portant sur chacun des capteurs.

Nous disposons ainsi d'une simulation des mesures fournies par les capteurs, grace aux quelles nous tenterons de reconstituer la composition du sable pour pouvoir ensuite la commander.

c) Chaine de coulée : Elle correspond à un retard pur de 15 périodes de base que nous n'avons pas jugé utile de moduler en fonction le rapport moule métal des pièces produites. Les phénomènes qui s'y produisent, dans la réalité ont été reportés sur le bloc suivant :

d) Poste de décochage : C'est à cet endroit du processus que le sable se trouve dans son état de dégradation le plus poussé, à partir duquel il va être recyclé vers le malaxeur à travers les silos. A ce niveau le modèle simule les phénomènes suivants :

- Destruction des constituants : Ce phénomène se passe, dans la réalité ; à l'intérieur même de la chaîne de coulée : Une partie de l'eau s'évapore et de ce fait disparaît complètement, une partie de l'argile perd ses propriétés, faisant ainsi baisser sa proportion dans le mélange tout en subsistant au point de vue pondéral ; ceci constitue la principale différence existant entre les comportements de ces deux constituants.
- Poste des constituants : Lors de la destruction des moules afin d'en extraire les pièces coulées, une partie du sable reste accrochée à la surface du métal, et fait baisser, de ce fait, le stock total du sable en circulation dans la sablerie.
- Noyautage des pièces : Nous avons vu précédemment qu'il constituait le seul apport en sable neuf pour la sablerie. Ce sable, étant dépourvu d'argile et d'eau, fait baisser d'autant la proportion de ces constituants dans le mélange.
- Arrosage pour le refroidissement du sable : Nous avons supposé que l'on ajoutait au sable, en ce point, un pourcentage constant d'eau. Il en va tout autrement dans la réalité puisque, si le débit de l'eau est constant, celui du sable se fait par petits "paquets" défilants à la cadence de destruction des moules.

En fait nous avons devancé le comportement du processus réel, puisque les fondeurs, conscients qu'il subsistait en ce point, une source de perturbations pour le système, ont résolu de mieux équiper cette portion de la sablerie, afin d'en améliorer la régularité de fonctionnement et l'efficacité.

- Transfert du sable à travers les silos : Contrairement à ce que nous avons supposé dans le modèle simplifié du chapitre II, l'ensemble des deux silos de stockage ne se comporte pas comme un retard pur de durée constante du fait qu'il y a permutation sur les rôles joués par chacun de ces silos lorsque l'un d'eux est plein. Ainsi, deux échantillons de sable passant au décochage dans l'ordre A B, peuvent revenir au malaxeur dans l'ordre B A, une permutation des silos les ayant séparés : ce phénomène est illustré sur la figure 42.

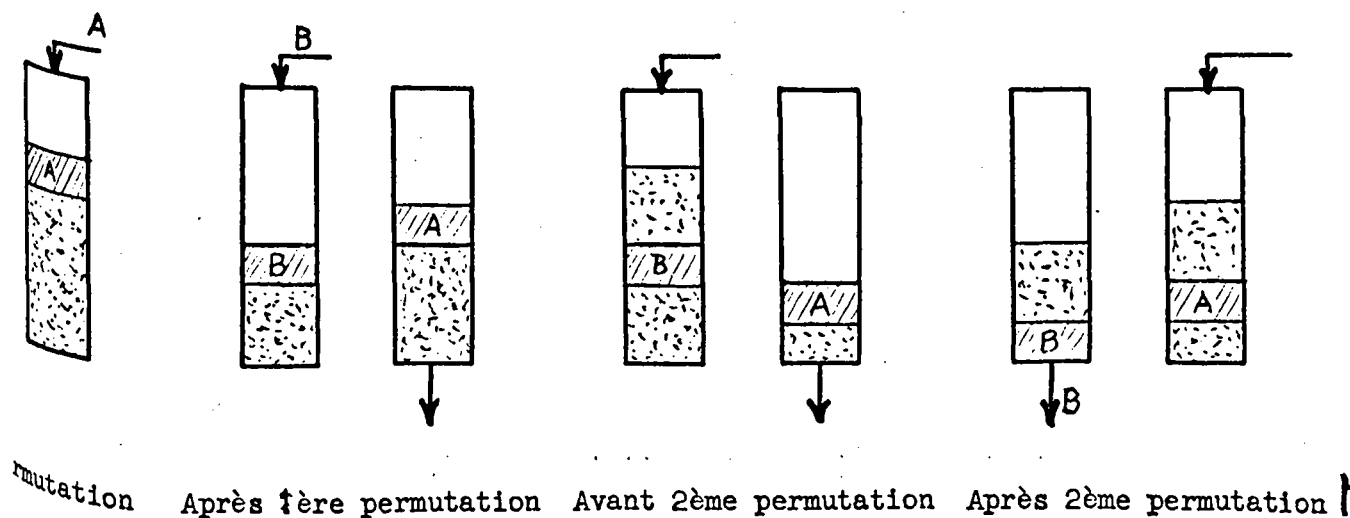


FIGURE 42 : Influence de la permutation des silos

A cela s'ajoute l'influence de la quantité globale de sable contenue dans les deux silos qui crée des permutations d'autant plus fréquentes qu'elle est élevée, il faut en effet, qu'une quantité d'autant plus faible de sable traverse la sablerie pour amener l'un des silos à son niveau maximum.

Outre ces phénomènes, nous avons aussi tenu compte de l'influence de la densité en vrac du sable qui se manifeste par le fait que les silos ne contiennent pas une masse, mais un volume maximum de sable. Ainsi le sable tient d'autant plus de volume, pour un même poids qu'il est humide (cf : figure 30).

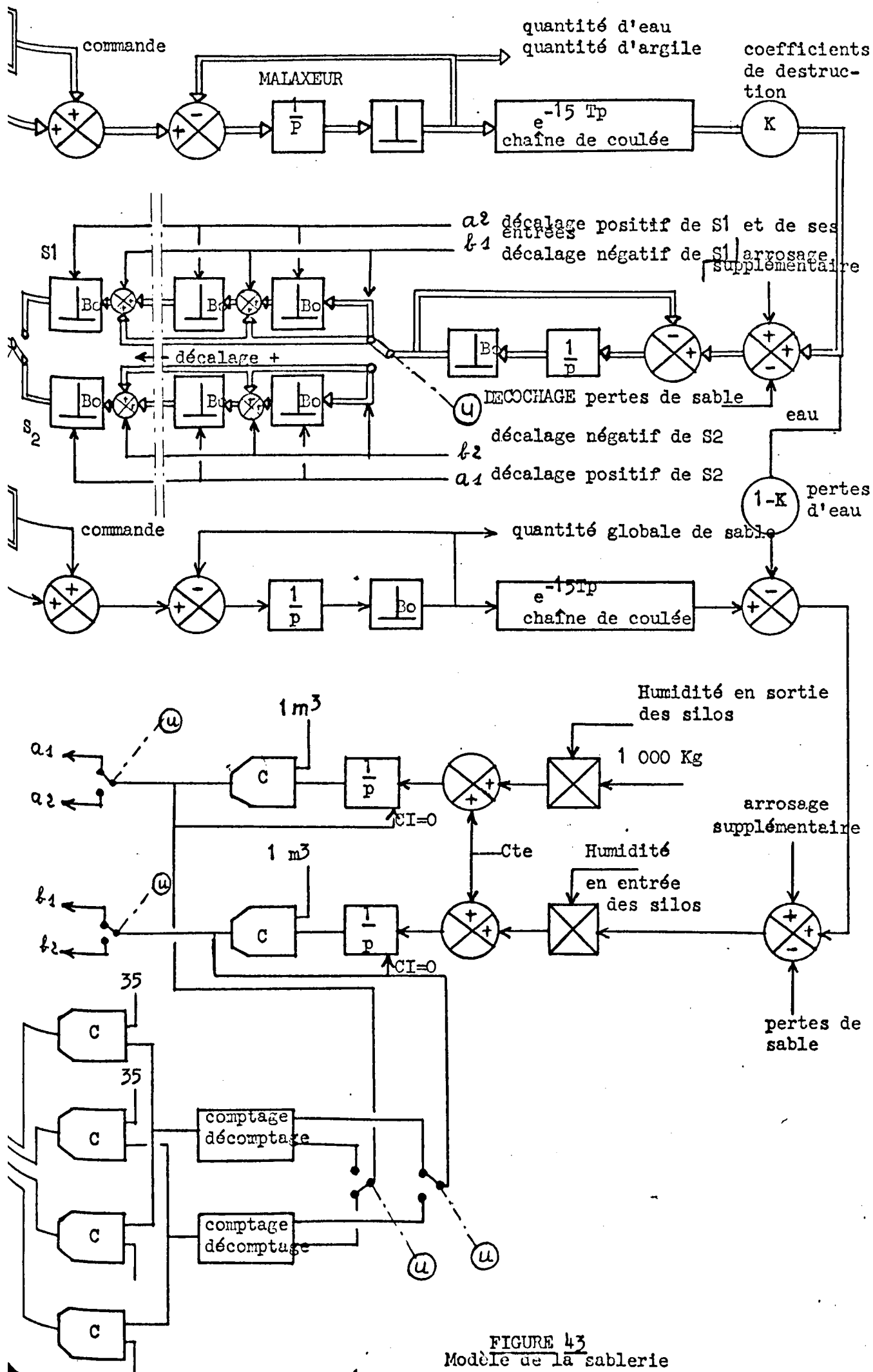
Le sable entre donc dans les silos N Kg par N Kg avec une certaine composition et en occupant un certain volume, il y progresse d'autant plus rapidement que le volume occupé est grand et en ressort avec la même composition mais 1 000 Kg par 1 000 Kg pour alimenter le malaxeur.

Nous avons ainsi fait le tour du circuit de la sablerie, il subsiste encore un problème dont nous n'avons pas tenu compte, qui est celui du collage à l'intérieur des silos, qui se manifeste par une adhérence du sable aux parois et peut être traduit dans le modèle, par une perte d'une certaine quantité de sable dans le circuit et une diminution équivalente du volume des silos. Cependant, les fondeurs n'ont pas encore réussi à lier quantitativement le phénomène aux autres variables du système et nous avons supposé dans cette étude, que le phénomène se manifeste de façon indépendante de l'état du système.

La figure 43 représente les modèles des divers éléments dont nous venons d'exposer le fonctionnement et met en évidence leurs inter-actions. On en déduit l'organigramme du programme de simulation que nous utiliserons dans la suite de ce chapitre (cf : annexe 3). Les résultats en sont disponibles sous deux formes :

- Signaux des capteurs d'aptitude au serrage et de résistance à la compression installés sur le malaxeur.
- Quantités d'argile et d'eau effectivement présentes dans le sable, données en Kg par tonne de sable.

C'est cette dernière série de mesures qui illustrera la suite de ce chapitre.



II. Résultats des simulations.

Au vu des résultats de l'étude effectuée au chapitre II, nous allons tester, sur le modèle, les algorithmes qui ont donné les meilleures régulations, et qui ont, de ce fait, toutes les chances de convenir pour une régulation définitive.

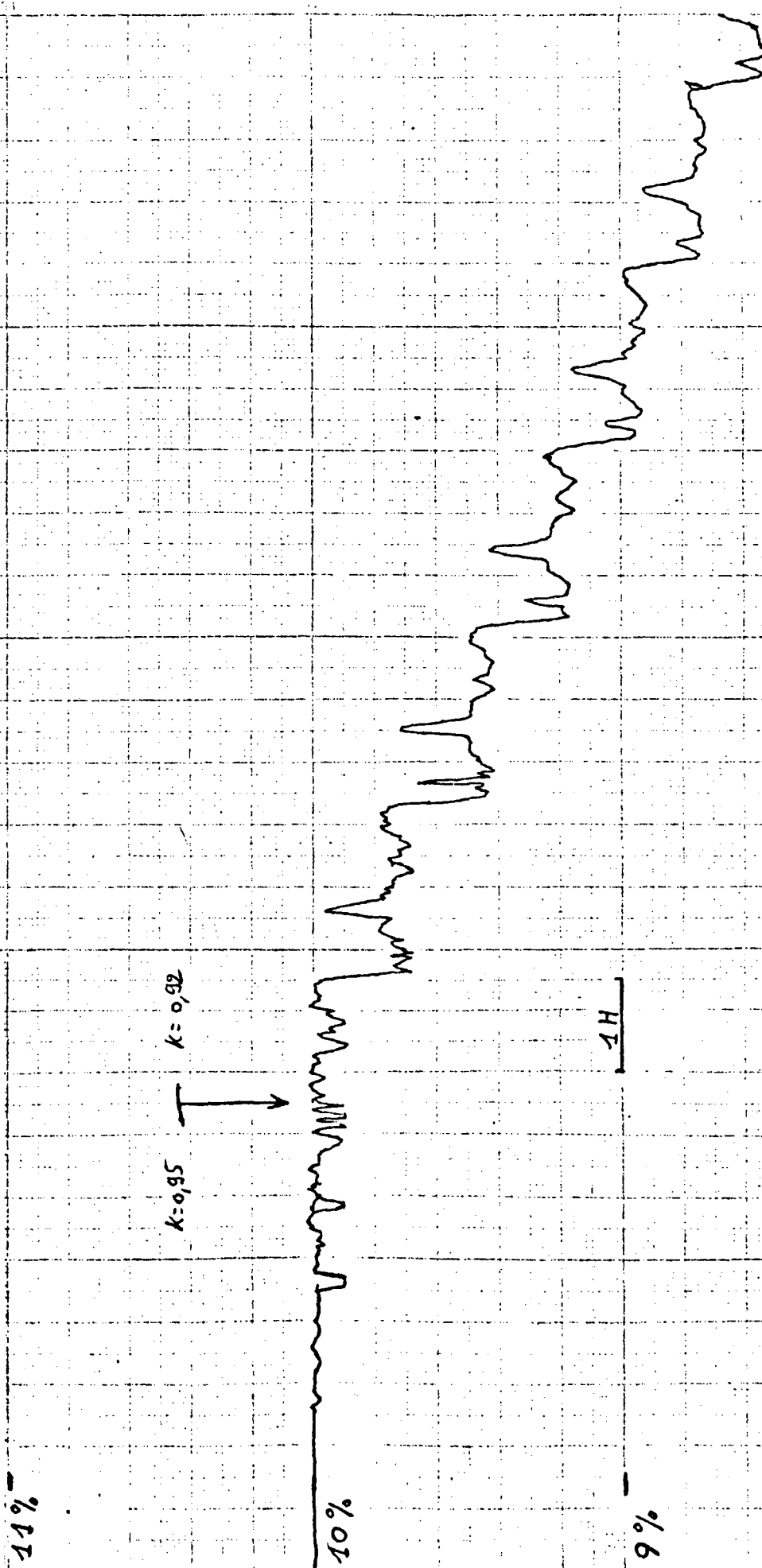
Mais, auparavant nous allons simuler, comme point de départ, les variations de la concentration en argile du sable lors d'un changement du coefficient de destruction de ce constituant, toutes choses restant égales par ailleurs (figure 44).

L'allure de la courbe obtenue nous permet de vérifier que :

Prise à l'échelle d'une journée on apprécie facilement l'assimilation qui a été faite, du système, à un premier ordre, autour duquel existent un certain nombre de fluctuations inhérentes à des facteurs secondaires.

Par contre, si on se place sur une échelle de temps plus réduite, ces effets secondaires prennent une place prépondérante et on conçoit à posteriori que l'identification d'un tel système par des méthodes d'observation en ligne et par corrélation des signaux paraisse ardue. Il y a en effet création spontanée de perturbations lors des changements de silo puis atténuation progressive de celles-ci due au recouvrement des broyées adjacentes. On arrive cependant à mettre en évidence un retard pur de deux heures correspondant à un cycle complet du sable à travers la sablerie.

Absence de régulation
Variation du coefficient de destruction
du constituant



- 1) Régulation en boucle ouverte : Rappelons que cette méthode de régulation consiste à mesurer la composition du sable dès son entrée dans le malaxeur et à en déduire la quantité d'additions qui devront être faites sur cette même broyée, avant malaxage, pour obtenir en sortie la composition voulue.

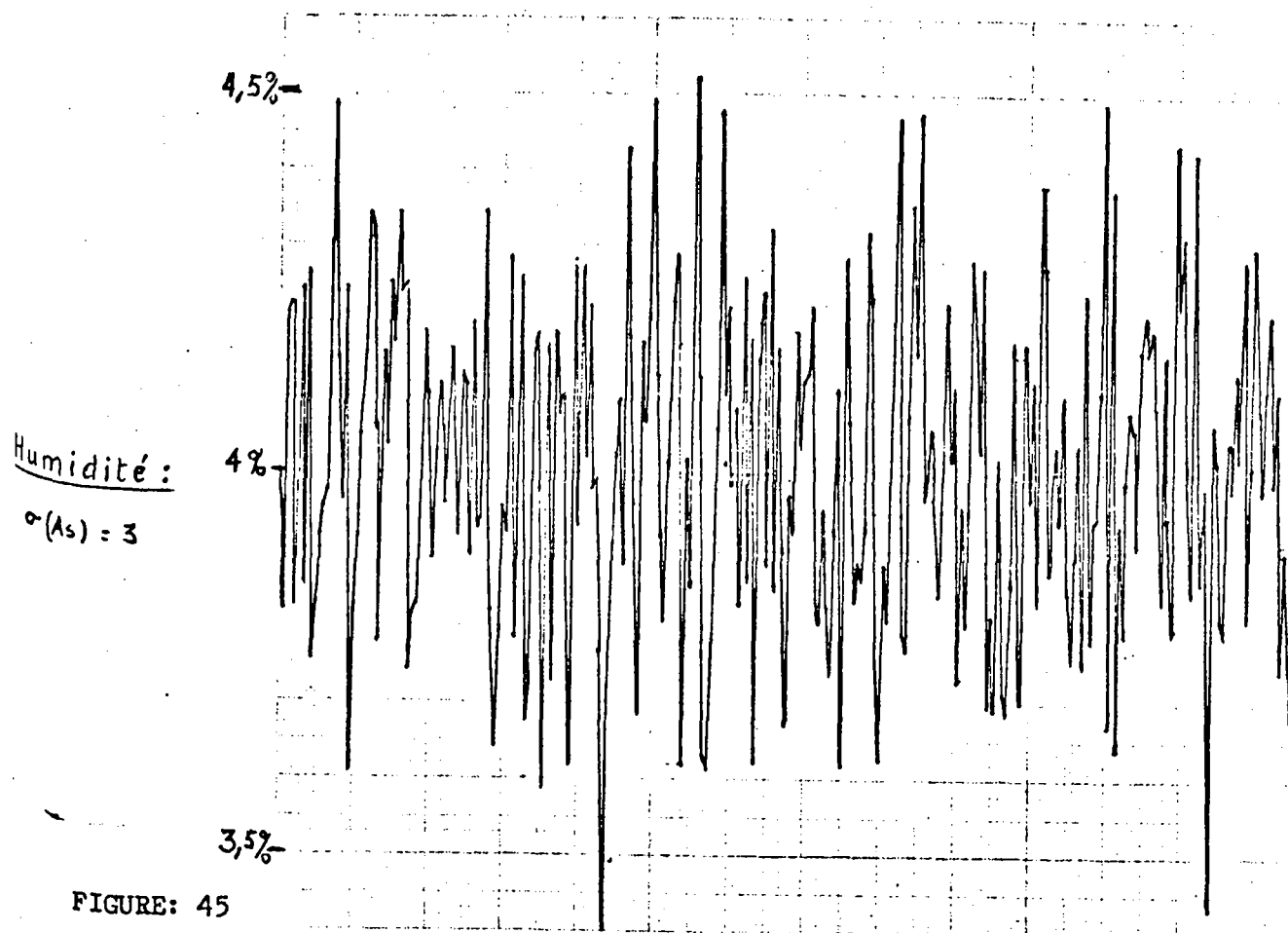
Le principal reproche que l'on puisse faire à cette méthode est de ne se servir que d'une seule mesure pour déterminer la commande à appliquer au système, (d'où la très grande influence prise par la dispersion des mesures fournies par les capteurs). On sait en effet, que le signal du capteur est affecté d'un bruit ayant généralement une distribution gaussienne de moyenne nulle et caractérisé par son écart type S . Cela signifie que, pour une mesure a , fournie par le capteur, il y a 68,27 % chances sur 100 pour que la mesure théorique soit comprise entre $(a + S)$ et $(a - S)$.

Il est d'ailleurs aisé d'évaluer quelle est la dispersion minimale permanente de la composition du sable en sortie du malaxeur par cette méthode de régulation.

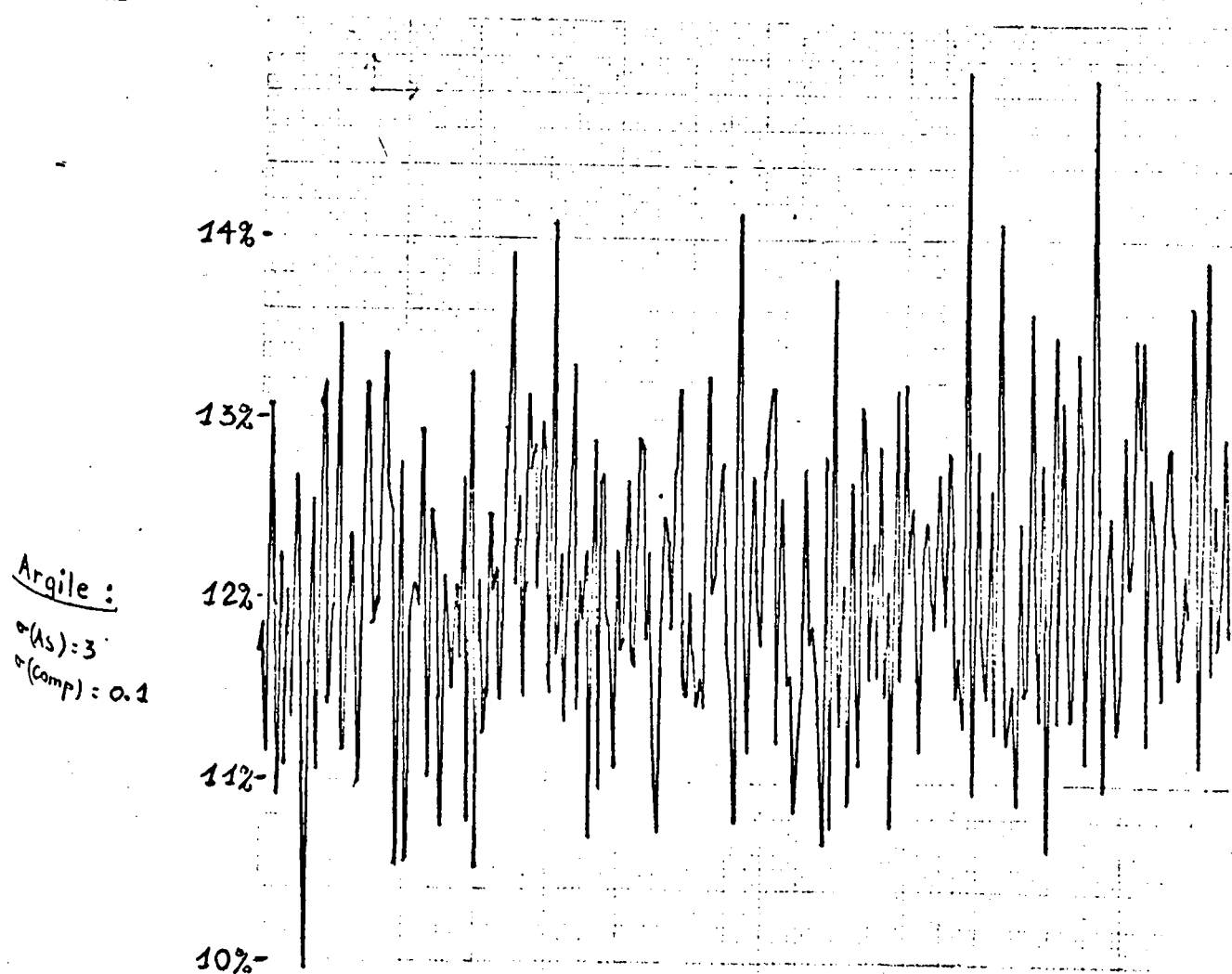
Rappelons que nous avons trouvé au chapitre II la relation :

$K * \text{Argile active} = \text{bleu de méthylène} = 6.2 * R.\text{compression} + 0.22 \text{ Apt au serrage} - 0.84$. D'autre part, la moyenne des mesures faites sur les chantiers 6 et 7 est de 46 pour l'aptitude au serrage et 1.7 pour la résistance à la compression. On constate donc que l'effet de chacune de ces grandeurs entre pour moitié dans la détermination de l'argile ($46 \times 0.22 \approx 1,7 \times 6.2$).

Nous aurons donc, comme écart type minimal sur la régulation, en appelant respectivement $S(AS)$ et $S(\text{comp})$ les écarts types relevés sur la mesure d'aptitude au serrage et de résistance à la compression :



en boucle ouverte à chaque
malaxeur



- Pour l'humidité :

$$\frac{S(H)}{M} = \frac{S(As)}{As}$$

- Pour l'argile :

$$\frac{S(Ag)}{Ag} = \frac{1}{2} \frac{S(AS)}{As} + \frac{1}{2} \frac{S(Comp)}{Comp}$$

Ces valeurs se trouvent vérifiées sur la figure 45 pour laquelle nous avons pris $S(AS) = 3$ et $S(Comp) = 0.1$,

Ce qui nous donne : $S(H) = 0,256 \%$ et $S(Comp) = 0,74 \%$.

Cette méthode est, à notre avis, la seule applicable en ce qui concerne la régulation de l'humidité du fait de son coefficient de destruction élevé et des grandes variations auxquelles elle est sujette en de courts intervalles de temps. On se doit, de ce fait d'avoir une régulation ayant un temps de réponse très court, ce qui est le cas ici, contrairement aux autres algorithmes que nous allons voir maintenant et que nous destinerons plus particulièrement à la régulation de la teneur en argile du sable.

2) Commande par assimilation du système à un premier ordre : Nous avons vu au chapitre II, que cet algorithme de régulation consiste à calculer une nouvelle commande à chaque tour du sable à travers la sablerie, à partir des mesures faites lors du tour précédent. Ici se pose avec acuité, le problème de connaître aussi exactement que possible la durée d'un tour qui est très variable suivant le stock de sable présent dans la sablerie et aux variations duquel l'algorithme est heureusement peu sensible comme nous l'avons vu au chapitre 2.

Deux possibilités s'offrent alors à nous :

La première consiste à prendre une période fixe totalement indépendante de la quantité de sable présent dans la sablerie, (nous avons choisi 160 minutes).

La seconde consiste à essayer d'évaluer le temps de transfert du sable au moyen des remarques suivantes :

Les commutations entre les deux silos de la sablerie sont d'autant plus rapides que le stock de sable est proche du stock maximum admissible. Le temps correspond, en effet, à la quantité de sable qu'il faut ajouter au contenu du silo récepteur pour le remplir, l'autre silo étant plein au départ.

Ainsi en appelant A le volume maximum de sable admissible par la sablerie.

- a le volume de sable traité à chaque broyée, donc toutes les deux minutes, par le malaxeur.
- n le nombre de cycle du malaxeur séparant deux commutations entre les silos.
- V le volume réel de sable présent dans le cycle de la sablerie.

On trouve $V = A - na$ et le temps de transfert du sable s'exprime en minutes par la relation : $T = 2 \frac{V}{a}$.

L'évaluation que nous obtenons ici est un temps de transfert moyen ne tenant pas compte du phénomène de permutation dans l'ordre des broyées que nous avons exposé au début de ce chapitre.

Nous avons simulé le comportement du système suivant ces deux possibilités et alors qu'il était soumis à des variations de consigne ou de structure.

- a) Réponse à un échelon : La figure 46 correspond à l'utilisation d'une période fixe de 160 minutes et rappelle le comportement théorique du système de la figure 26 pour une période d'échantillonnage supérieure à la durée de transfert du sable, l'erreur maximale constatée à chaque période a en effet une valeur positive presque égale à la valeur de l'échelon.

Sur la figure 47 nous avons fait une estimation de T qui conduit à une réponse d'allure mixte caractérisée par des maxima alternativement positifs et négatifs de l'erreur, cela signifie (toujours en référence à la figure 26) qu'une partie du sable parcourt le circuit de la sablerie en un temps supérieur à T et une autre en un temps inférieur, et ceci à cause des permutations de silos.

En augmentant légèrement la valeur de T nous retrouvons sous la figure 48, un comportement analogue à celui d'une période fixe de 160 minutes.

L'amélioration obtenue par l'introduction d'une période variable dans la régulation s'observe sur les figures 49 et 50 pour lesquelles nous avons introduit, dans la simulation une forte perte de sable au décochage, d'où il résulte une variation rapide du stock global de la sablerie. On remarque un amortissement beaucoup plus rapide de la perturbation lors d'une période variable du fait que la régulation agit à chaque tour effectif du sable donc beaucoup plus souvent dans le cas d'un stock réduit.

FIGURE 46

Assimilation à un premier ordre
Réponse à un échelon de consigne
Période d'échantillonnage fixe

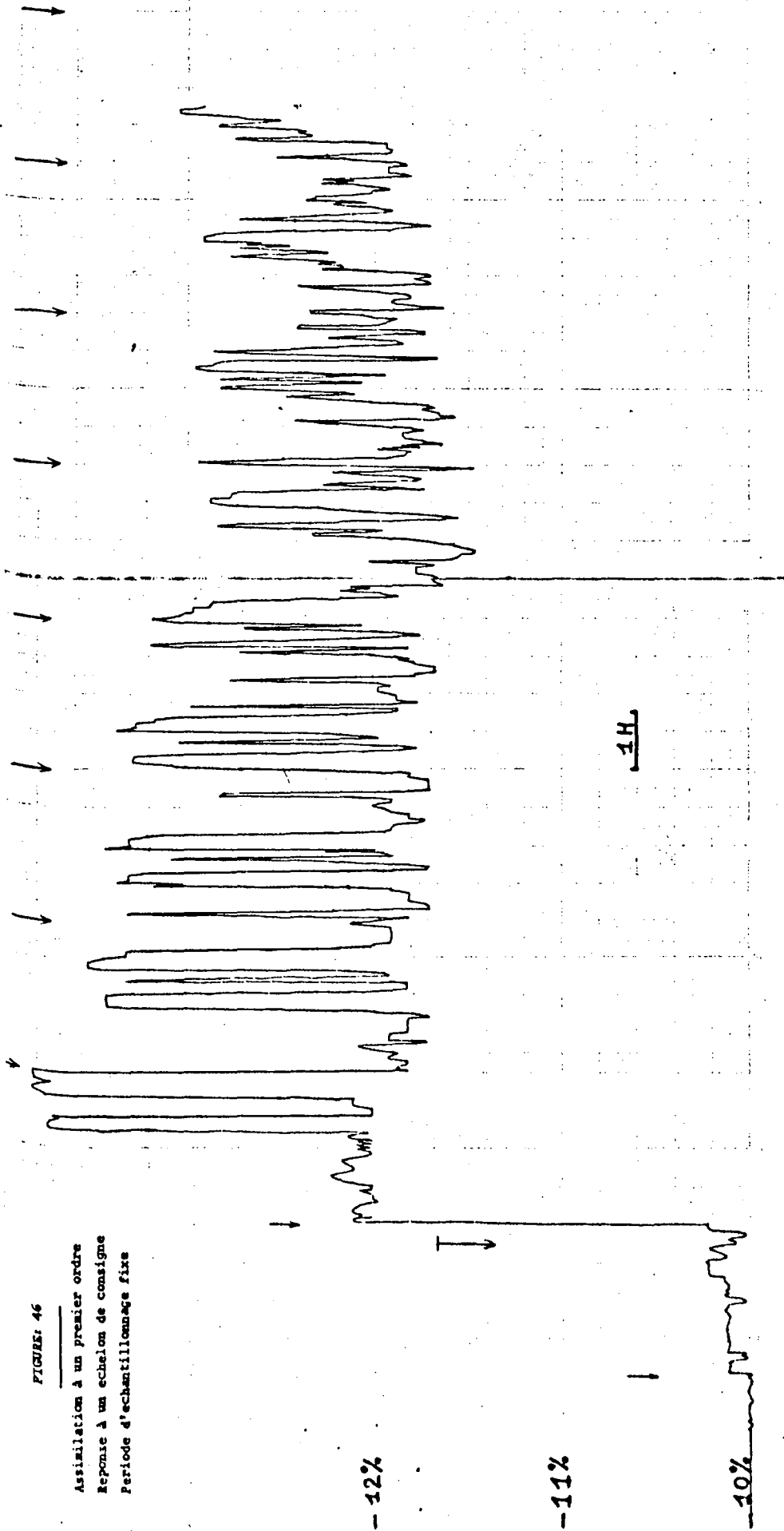


FIGURE 47

Assimilation à un premier ordre
 Réponse à un échelon de consigne
 Période calculée

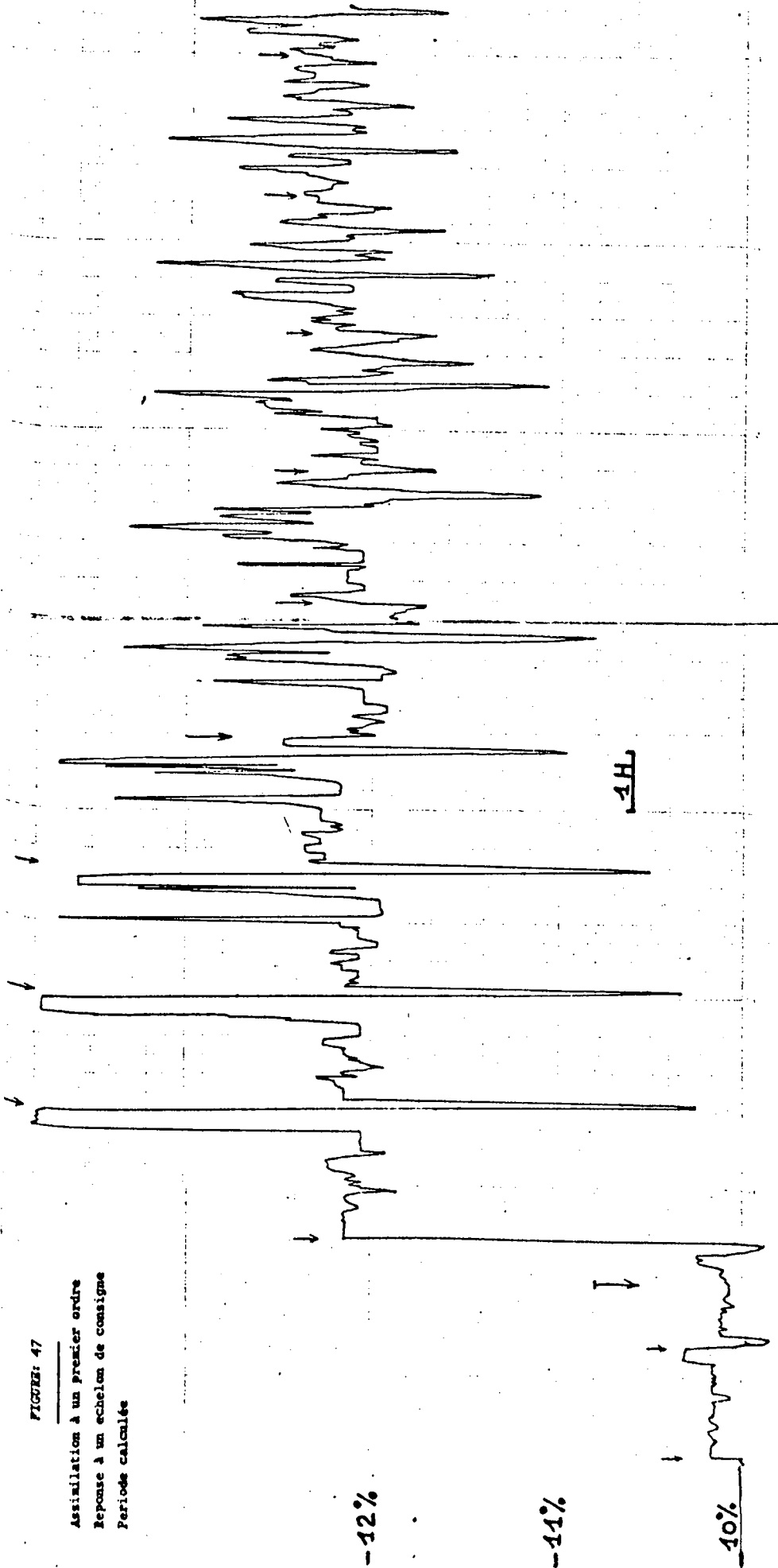


FIGURE 48

Assimilation à un premier ordre
Reponse à un échelon de consigne
Période calculée +20 minutes

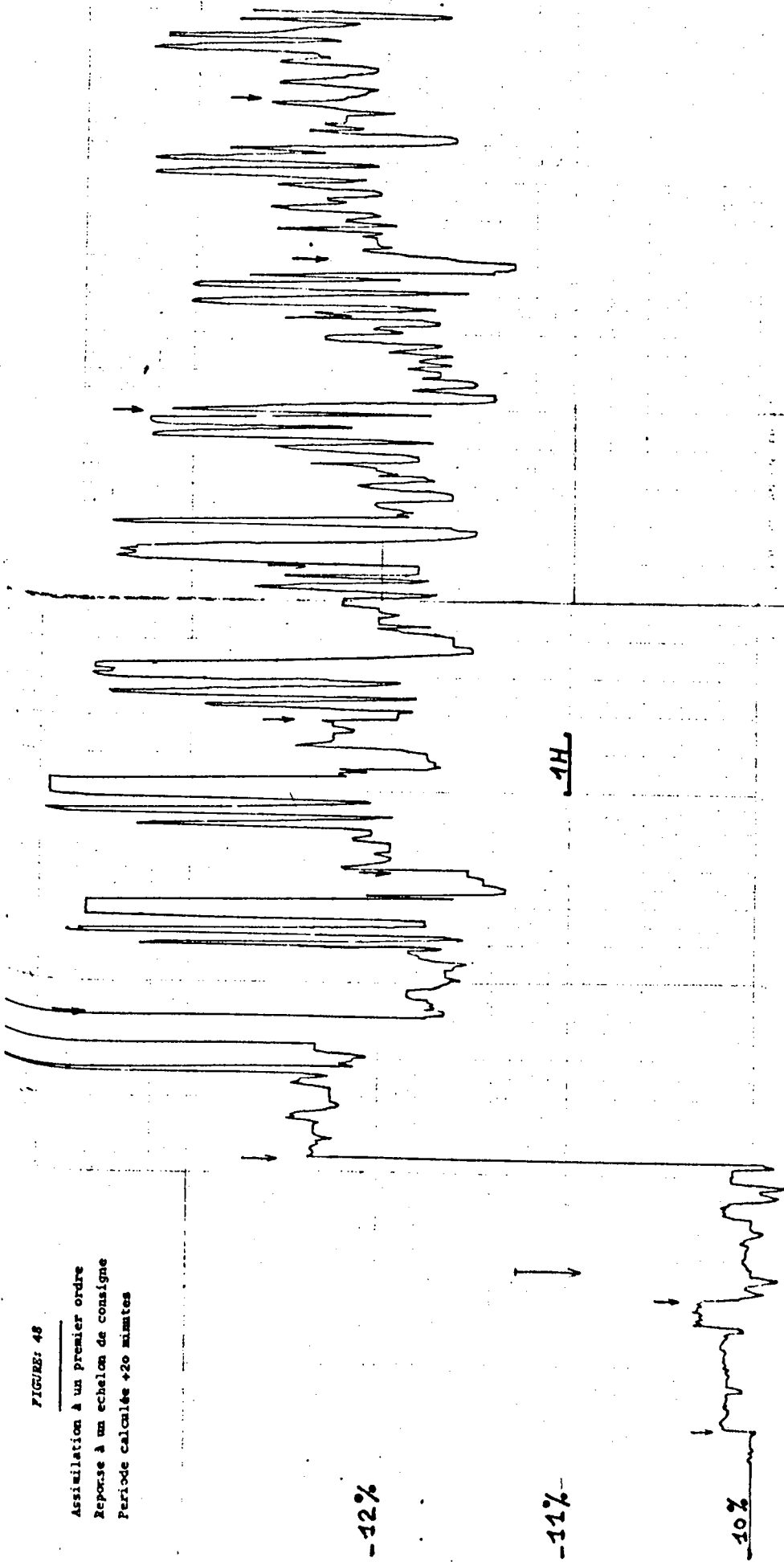


FIGURE: 49

Assimilation à un premier ordre

Reponse à un echelon de consigne

Periode fixe f Fortes pertes

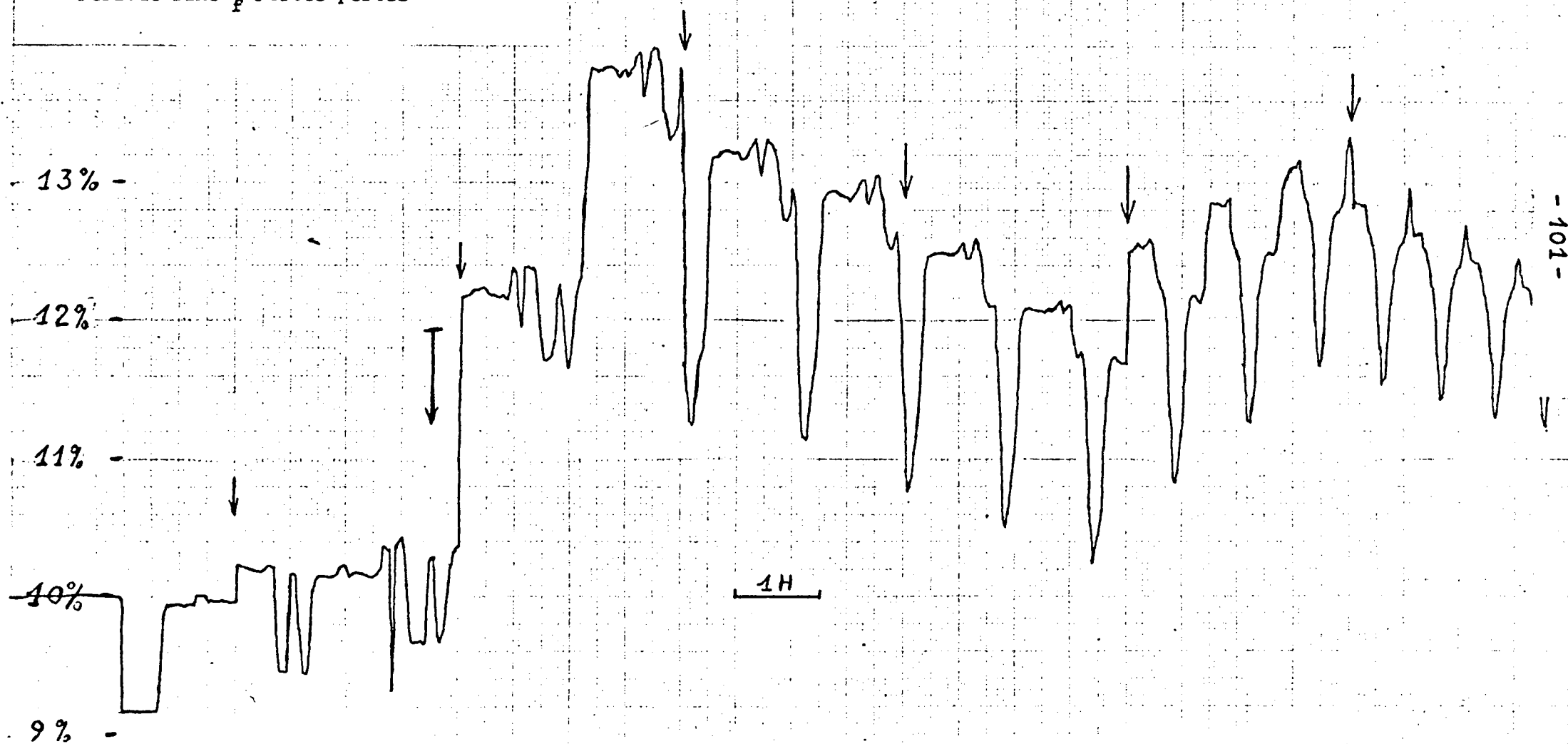


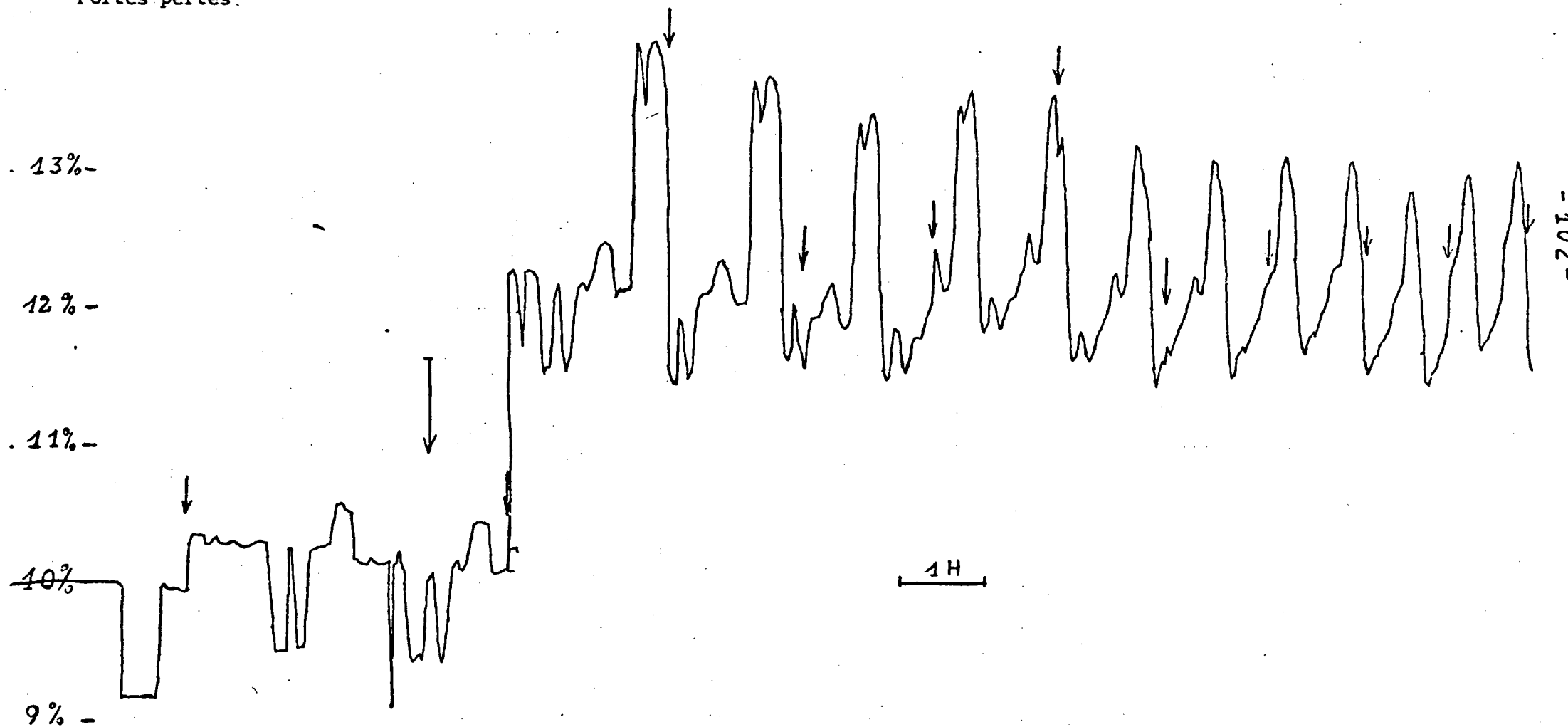
FIGURE 50

Assimilation à un premier ordre

Reponse à un echelon

Periode calculée + 20 minutes

Fortes pertes.



Les figures 51 et 52 montrent le comportement de la régulation dans le cas qui se produit le plus souvent en exploitation, c'est-à-dire, soumise à une variation de structure par variation des coefficients de destruction des différents coefficients du sable.

On a simulé ici le passage du coefficient de destruction de l'eau de 0,5 à 0,7 et celui de l'argile de 0,95 à 0,92 correspondant à la fabrication de pièces plus lourdes. Dans les deux cas, le changement est peu sensible.

La figure 53 illustre la même variation que précédemment, dans le cas d'une période variable, mais avec erreur d'identification sur les coefficients liant les variables : Humidité, teneur en argile, résistance à la compression, aptitude au serrage.

Il en résulte une erreur permanente qui n'affecte pas l'amplitude des oscillations parasites de l'ensemble du système.

FIGURE 51

Assimilation à un premier ordre
Variation du coefficient de destruction
Période fixe

-41%

$k = 0,95$ $k = 0,92$

-10%

-9%

1H

-104-

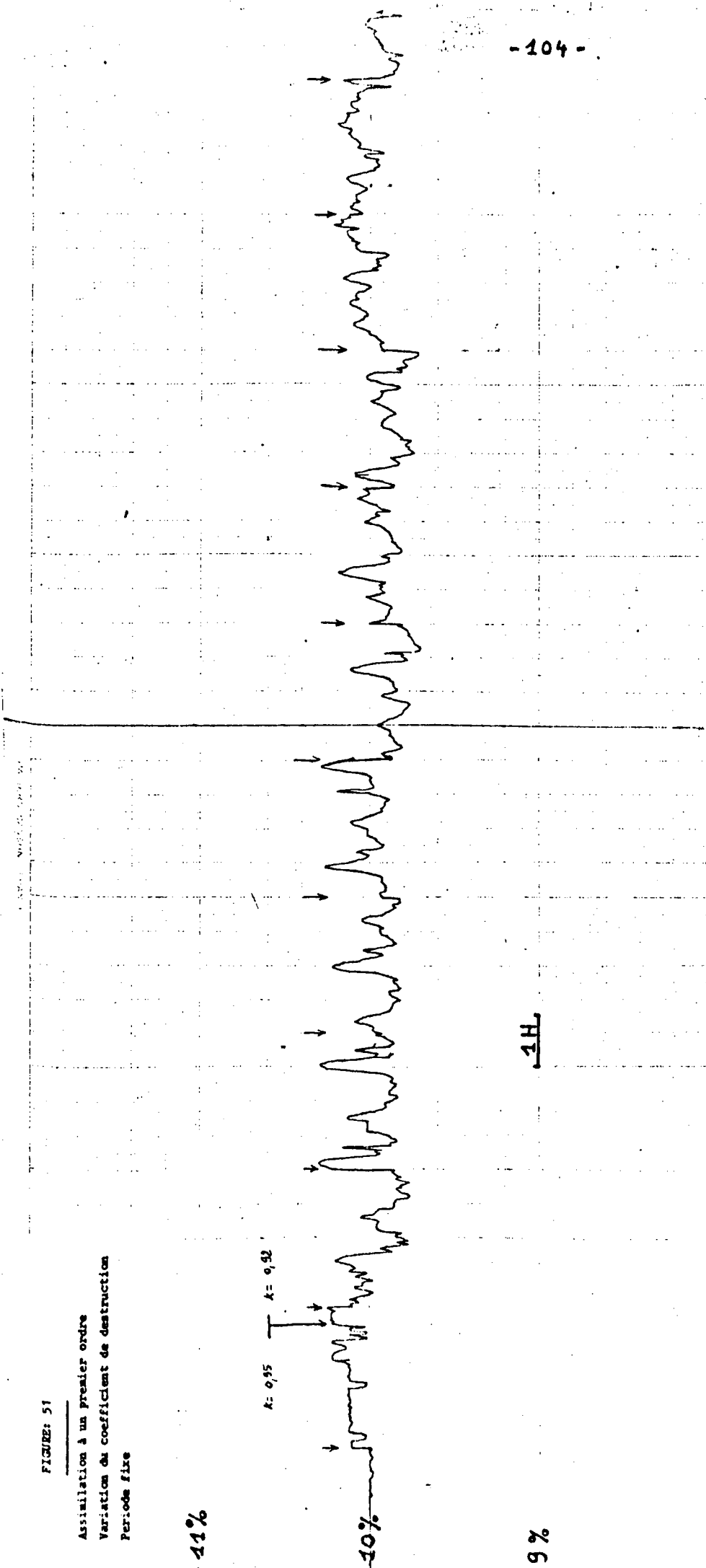


FIGURE 52

Assimilation à un premier ordre
Variation du coefficient de destruction
Période calculée +20 minutes

-11%

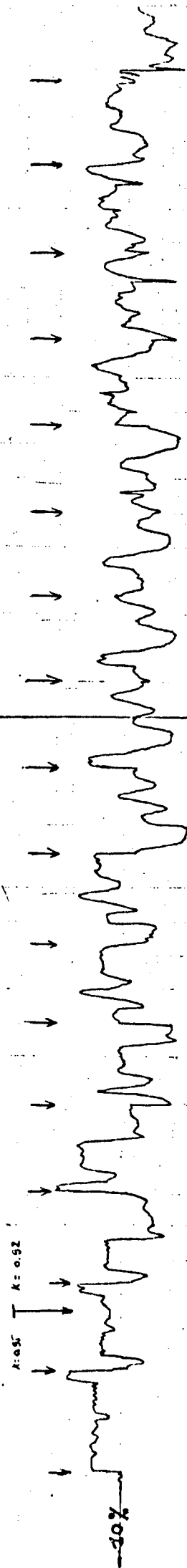
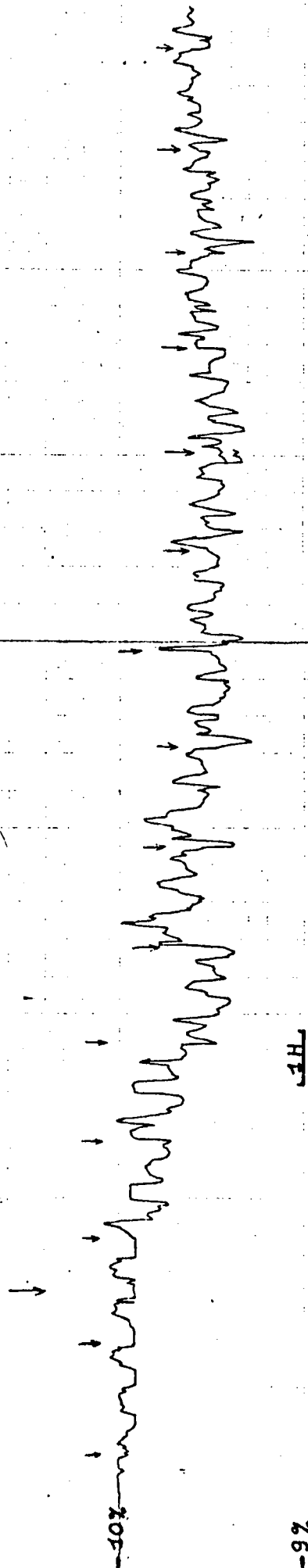


FIGURE 53

Assimilation à un premier ordre
Variation du coefficient de destruction
Période calculée +20 minutes
Erreur d'identification

- 11%



3) Méthode de régulation par "correction de la commande".

Rappelons que l'algorithme utilisé ici est de la forme :

$$U_n = U_{n-1} + \alpha \left(X - \frac{1}{N} \sum_{i=n-N+1}^M Y_i \right)$$

Nous avons vu au chapitre II que cet algorithme n'était stable que pour des valeurs faibles de α mais que l'utilisation de plusieurs sorties du système précédant l'instant N pouvait compenser une valeur plus élevée de ce gain et conserver un régime stable.

Les figures 54 - 55 - 56 illustrent le comportement du système soumis à une telle régulation pour des gains respectifs de 0.1, 0.05 et 0.02 avec l'utilisation, pour le calcul de la commande, des 10 sorties précédentes. Ce calcul se fait à chaque cycle du malaxeur.

Nous retrouvons ici le compromis entre le temps de réponse du système et sa stabilité.

La valeur 0.1 du gain donne une réponse rapide mais une progression très nette à l'oscillation.

La valeur 0.02 au contraire conduit à une réponse lente avec un fort dépassement au bout de 20 heures, mais les oscillations parasites ont presque disparu. C'est pourquoi la valeur 0,05 du gain semble un bon compromis donnant des résultats comparables au type de régulation précédent.

FIGURE 54

Methode de correction de la commande
Reponse à un echelon
Gain = 0,1

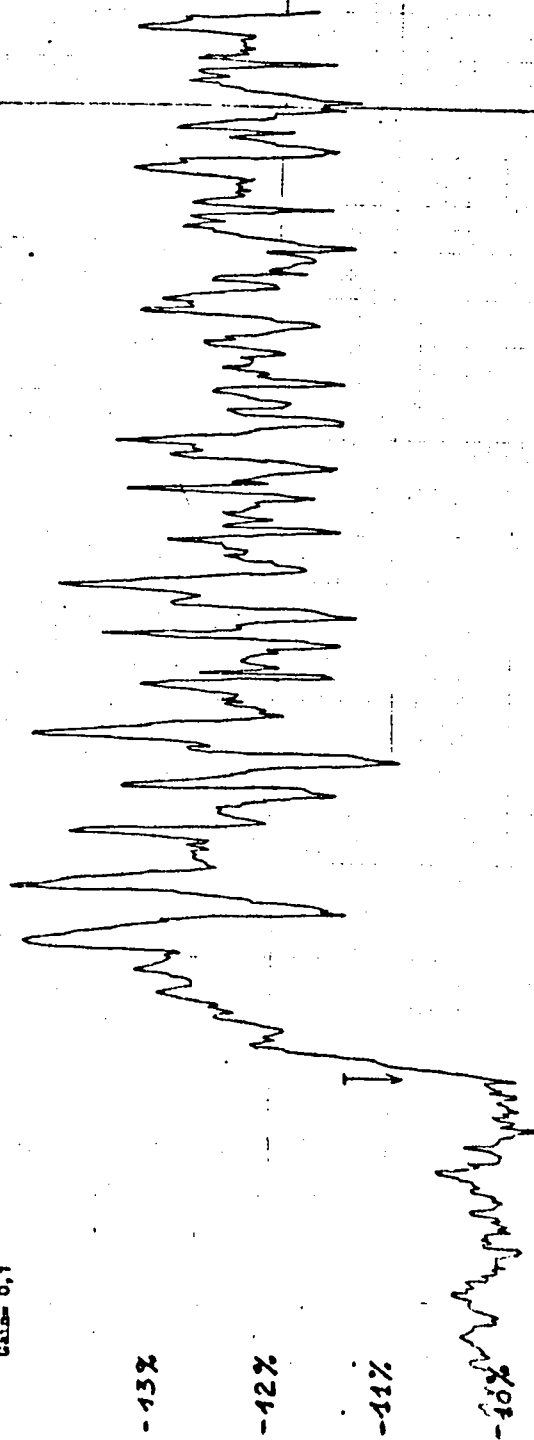


FIGURE 55

Methode de correction de la commande

Reponse A un echelon

Gain = 0,05

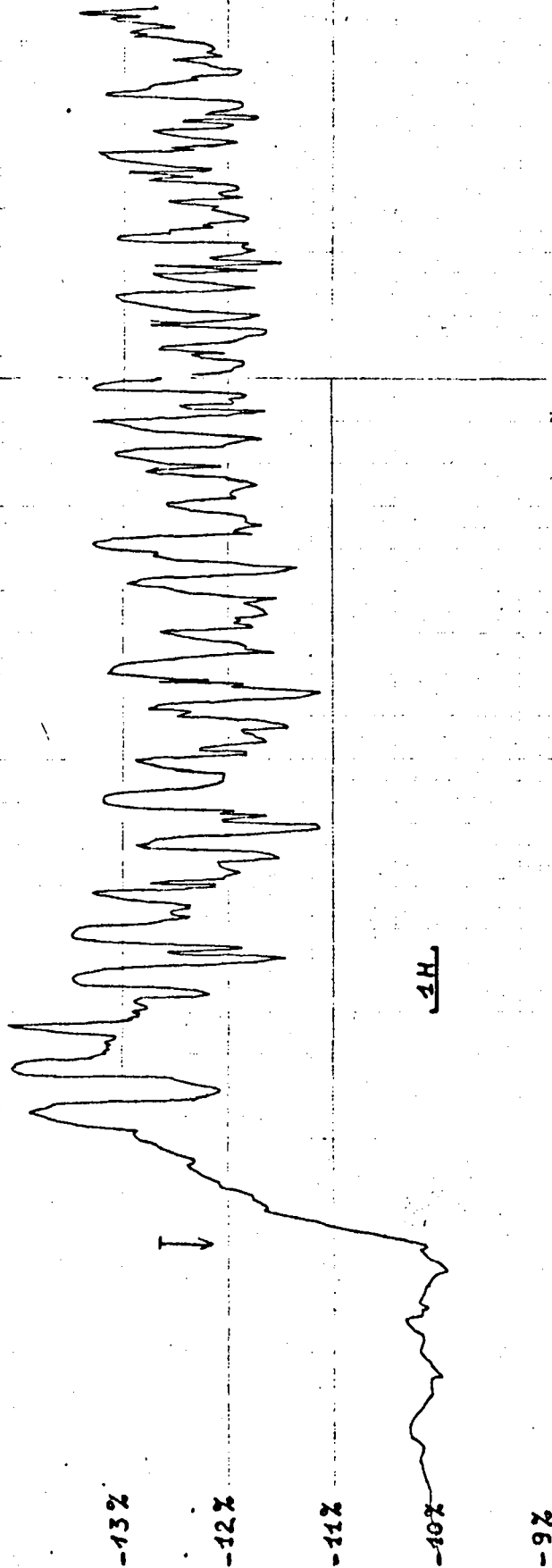
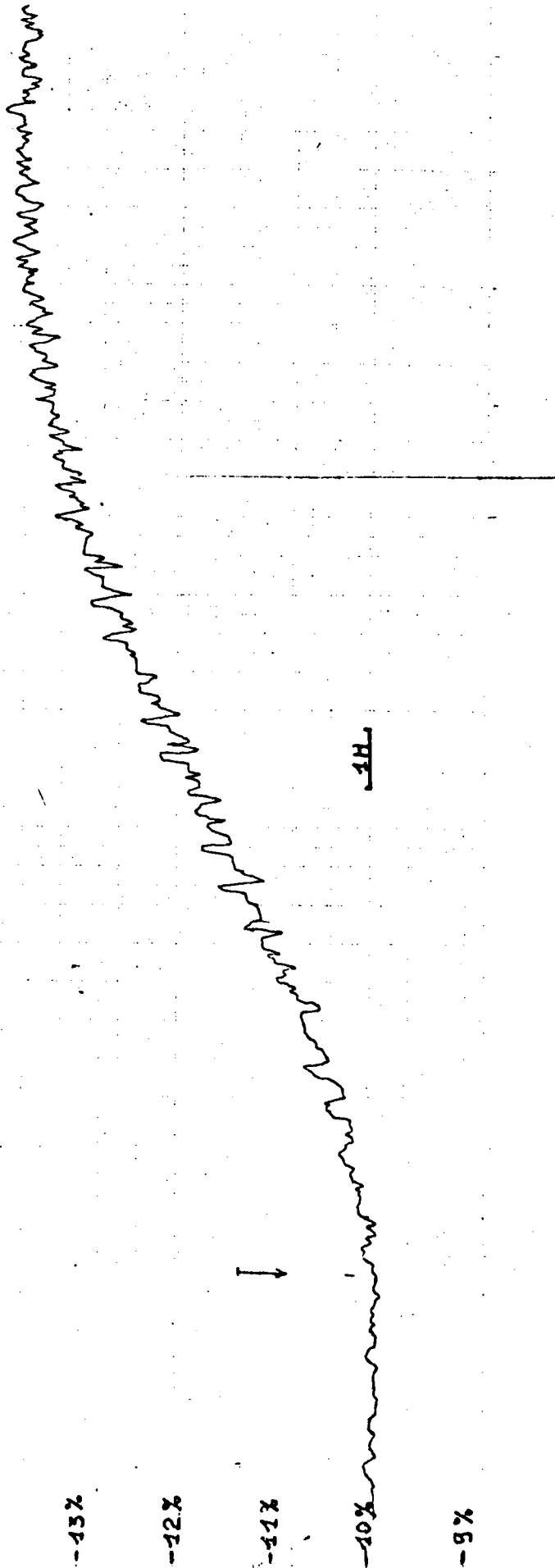


FIGURE 56

Méthode de correction de la commande

Réponse à un échelon

Gain = 0,02



4) Régulation "pile" (figure 57).

Cette régulation a pour algorithme :

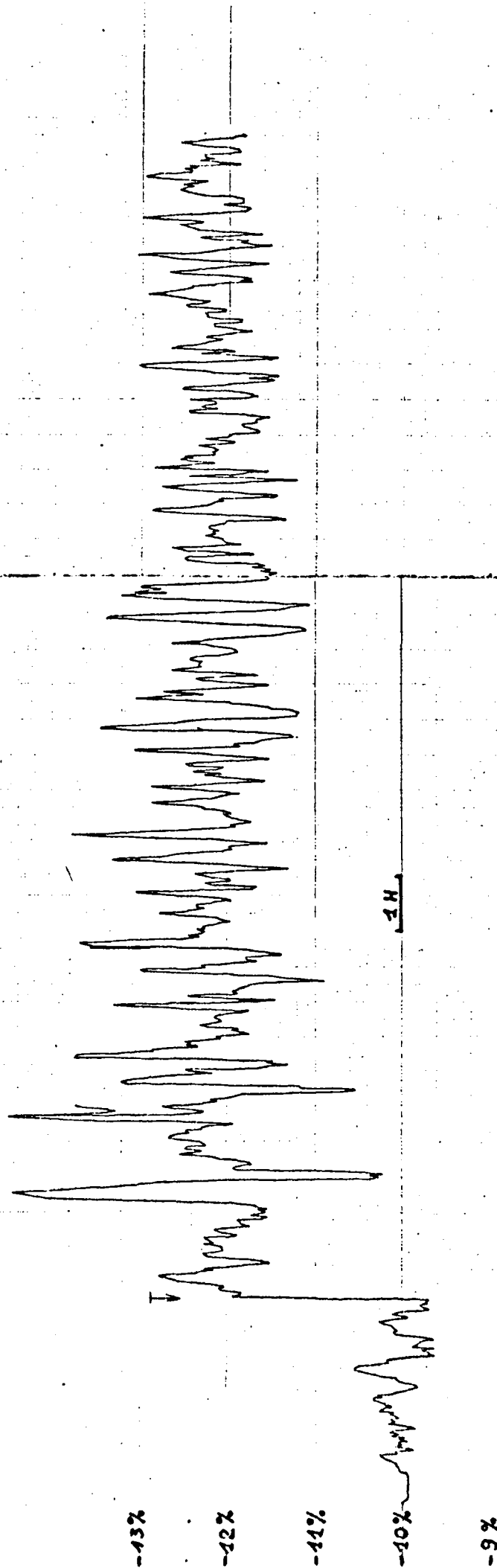
$$U_n = X_n - k Y_{n-p}$$

Nous avons vu qu'elle donnait théoriquement une sortie égale à la consigne en une période du malaxeur, mais était très sensible à une erreur sur l'ordre p du système. A partir de l'évaluation du temps de parcours T du sable à travers la fonderie que nous avons exposé plus haut, nous avons tenté une application généralisée de cet algorithme, au système réel en utilisant 10 sorties prises T minutes avant l'instant n auquel est calculé la commande, ce calcul se faisant à chaque cycle du malaxeur.

Le résultat obtenu se situe effectivement parmi les meilleurs avec un amortissement rapide de la perturbation, mais nous savons qu'il subsiste un fort risque d'instabilité (cf = chp. II), pour une erreur sur le calcul du retard T , erreur qui risque fort de survenir, en particulier dans le cas de "collage" du sable à l'intérieur des silos.

FIGURE 57

Regulation "Pile"
Response A mm echelon



Parmi les différents algorithmes que nous venons de tester, nous choisirons finalement en ce qui concerne le taux d'humidité du sable, une régulation en boucle ouverte avec mesure de l'aptitude au serrage et calcul de la commande lors de chaque cycle du malaxeur au moyen de la relation $\Delta(H) = \Delta AS / 14$. La recherche d'une humidité constante pour un même sable équivaut en effet à travailler à aptitude au serrage constante. Cette régulation à l'avantage d'avoir un temps de réponse très court, ce qui la rend parfaitement adoptée aux variations très rapides de l'humidité du sable en fonction du temps qui sont observées sur le processus. Elle est, par contre, très sensible à la dispersion des mesures fournies par le capteur d'aptitude au serrage, n'utilisant qu'une seule mesure pour chaque calcul de la commande.

En ce qui concerne la régulation de l'argile, nous prendrons, au contraire, l'algorithme résultant de l'assimilation du système à un premier ordre, calculant, à chaque tour du sable à travers la sablerie, la commande à appliquer durant le tour suivant. La période du cycle du sable sera supposée constante ou approchée par observation des commutations entre les deux silos. Nous insistons sur le fait que les observations de la sortie du système se font à chaque cycle du malaxeur comme pour l'humidité, et que tout espacement des mesures fait perdre à cette méthode sa principale caractéristique : réguler sur un horizon étendu par estimation d'une tendance de variation du constituant, éliminant les à-coups et adaptée aux variations lentes de l'argile. Par ces caractéristiques le méthode fournit une réponse médiocre du système aux échelons de consigne mais donne de bons résultats pour les variations de structure que représentent les changements du coefficient de destruction du constituant et qui sont les perturbations les plus fréquentes en exploitation normale.

C O N C L U S I O N

Le travail qui vient d'être présenté, a mis tout d'abord en évidence certains problèmes que posent, à l'automatisation :

- Le sable de fonderie lui-même. Les difficultés de manipulation qu'il occasionne lorsque l'on veut élaborer des capteurs, l'hétérogénéité du matériau, la dispersion des mesures faites en laboratoire ou sur le site, due à la multiplicité des facteurs qui entrent en compte (même les gens expérimentés ne parviennent pas à les recenser dans leur totalité).
- Le recyclage du sable à l'intérieur de la fonderie, qui crée une boucle de déstabilisation du système et met en jeu des retards purs d'une durée variable très difficiles à identifier et à commander.

Nous avons tenté d'apporter une solution à ces problèmes.

Notre étude a abouti à deux régulations très différentes pour chacun des deux constituants étudiés, bien qu'ils se comportent à priori de façon très semblable. En réalité, il faut compter avec les perturbations extérieures appliquées au système, et nous profitons de cette remarque pour insister sur le fait évident mais que l'on oublie trop souvent : à savoir qu'une régulation, quelle qu'elle soit, donne les meilleurs résultats sur un système ayant un fonctionnement régulier. Nous pensons ici, en particulier, aux variations de température, d'humidité, de tassement du sable issu du décochage, qui pourraient être aisément aplanies par l'intermédiaire d'un équipement simple du circuit de la sablerie à ce niveau, au lieu d'être la cause de la majeure partie du travail de la régulation.

En ce qui concerne la réalisation pratique de cette régulation, une solution analogique est à rejeter du fait des durées de mémorisation très grandes de certaines variables (plusieurs heures) et du comportement souvent très médiocre de tels systèmes dans ce milieu industriel (poussière, chaleur, humidité...).

Une solution consistant à utiliser l'opérateur humain (ici le conducteur du malaxeur) dans la boucle de régulation ne peut être non plus envisagée : le surcroît de travail exigé par le calcul des moyennes, sur un tour du sable, le relevé des mesures des capteurs à chaque cycle du malaxeur (ce qui est indispensable comme nous l'avons démontré plus haut) pour en déduire la commande à appliquer pour le tour suivant, semble peu réaliste. Un organe logique semble convenir : étant donné la simplicité des calculs, il peut être très réduit à moins que l'on envisage certaines extensions de son utilisation

- Au point de vue exploitation : par la tenue d'un journal de la production ou de la sortie de statistiques etc...
- Au point de vue scientifique en poursuivant l'identification du processus qui pourrait déboucher sur une auto-correction de l'algorithme de régulation, ou sur une commande optimale grâce à un critère de qualité de la production qui n'est encore qu'une notion très subjective au stade où se situe notre étude.

ANNEXE 1

Exemples de régulations existants en Fonderie

Nous allons donner ici un résumé des différents types de régulations mises au point en fonderie et qui ont donné lieu à des applications industrielles.

Ces applications ne recherchent qu'une régulation du taux d'humidité du sable et diffèrent entre elles essentiellement par le principe de fonctionnement du capteur qui détecte la quantité d'eau présente dans le sable. La multiplicité des procédés employés laisse supposer qu'aucun d'entre-eux n'a donné entière satisfaction à ses utilisateurs. L'algorithme de régulation utilisé pour le calcul de la commande est dans tous les cas, du type "boucle ouverte".

Nous allons classer ces différentes réalisations d'après la propriété du sable utilisée pour la mise au point d'un capteur fonctionnant de façon autonome, sans intervention humaine.

A) La conductivité électrique du sable a été utilisée dans une fonderie d'Allemagne de l'Est. Cette méthode consiste à placer judicieusement dans le sable, deux électrodes, entre lesquelles on mesure la conductivité électrique au moyen d'un pont de mesure. Cette conductivité (inverse de la résistance) croît exponentiellement en fonction de la teneur en eau du sable et peut être utilisée pour commander l'addition de ce constituant, au niveau du mélangeur.

Plusieurs facteurs, autre que l'humidité, influencent la conductivité du sable et doivent de ce fait être neutralisés dans la mesure du possible : ce sont :

- 1) La compacité du sable : Lorsque le sable est tassé, les particules constitutives se rapprochent les unes des autres, augmentant leur surface de contact donc, la conductivité du mélange. Les électrodes doivent donc être placées en un lieu où le sable possède toujours la même densité.

- 2) Disposition des électrodes : Il doit toujours y avoir un bon contact entre le sable et les électrodes. On donne à celles-ci une section carrée et on les recourbe à leur extrémité inférieure en les taillant de façon à ce qu'elles attaquent le sable sous une incidence de 20° .
- 3) Température du sable : Celle-ci augmente la conductivité dans de fortes proportions (30 % pour 10°C) et nécessite l'utilisation de systèmes compensateurs, tels un pont de mesure avec résistances en matériau semi-conducteur, possédant un coefficient de température équivalent à celui du sable.
- 4) La composition du sable possède, elle aussi, une certaine influence sur sa conductivité. Le pourcentage et la nature des constituants peuvent amener des perturbations non négligeables qui obligent à n'utiliser cette méthode que sur un circuit aussi régulier que possible.

Les meilleurs résultats d'application ont été obtenus en ajoutant l'eau en même temps que le sable dans le mélangeur.

La détermination de l'humidité est effectuée ensuite pour commander une correction éventuelle de la quantité d'eau.

- B) Constante diélectrique du sable : Les méthodes de détermination de l'humidité du sable, basées sur ce principe, consistent à faire jouer, à l'échantillon en cours de test, le rôle de diélectrique d'un condensateur monté dans un circuit oscillant, dont il modifie la fréquence de résonance. L'écart de fréquence peut être mesuré soit directement, soit par battement avec un émetteur de fréquence fixe. Comme pour l'application précédente, de nombreux facteurs, autres que l'humidité peuvent modifier la constante diélectrique du sable, à commencer par la proportion en éléments solides qui interviennent séparément par leur constante diélectrique propre, puis la conductivité du sable, sa densité, la forme des particules, la température...

Plusieurs applications industrielles utilisent cette méthode de détermination de l'humidité.

- a) Hygrotester : L'installation fonctionne selon le principe des émetteurs à superposition. Le capteur est placé sur la trémie peseuse, envoie ses mesures à un central électronique qui les corrige en fonction de la température et de la quantité de sable et agit sur une électrovanne pour régler la quantité d'eau ajoutée.

Le constructeur garantit une précision de la teneur en eau de $\pm 0,3 \%$ quelles que soient les conditions régnant en service.

Cette installation fonctionne de façon satisfaisante depuis 1955 dans les fonderies de Norrahamar (Suède). Elle comprend deux groupes de mélange d'une capacité totale de 40 t de sable par heure. Chaque groupe comprend notamment :

une trémie à vieux sable de	45 m ³ ,
une trémie à sable neuf de	6,5 m ³ ,
une trémie à bentonite de	1,5 m ³ ,
et une trémie à noir minéral de	1,5 m ³ .

- b) Installation à réglage en deux stades (end-point). La détermination de l'humidité est faite, cette fois, à l'intérieur du mélangeur et permet ainsi de profiter d'une meilleure homogénéisation du mélange d'arrivée, pour la détermination de sa teneur en eau. La régulation se fait en deux temps :

- addition d'une quantité d'eau déterminée de façon grossière pendant le prémalaxage.
- mesure et malaxage final avec correction de l'addition précédente. La mesure est issue d'un capteur de constante diélectrique du sable, placé dans le fond du malaxeur et travaillant en synchronisme avec le passage de la meule afin d'obtenir une densité régulière du matériau.

Une correction en température équipe aussi cette installation.

Des essais ont montré que la précision de mesure obtenue est de l'ordre de $\pm 0,2 \%$ en exploitation normale.

Cette installation est d'origine Suisse.

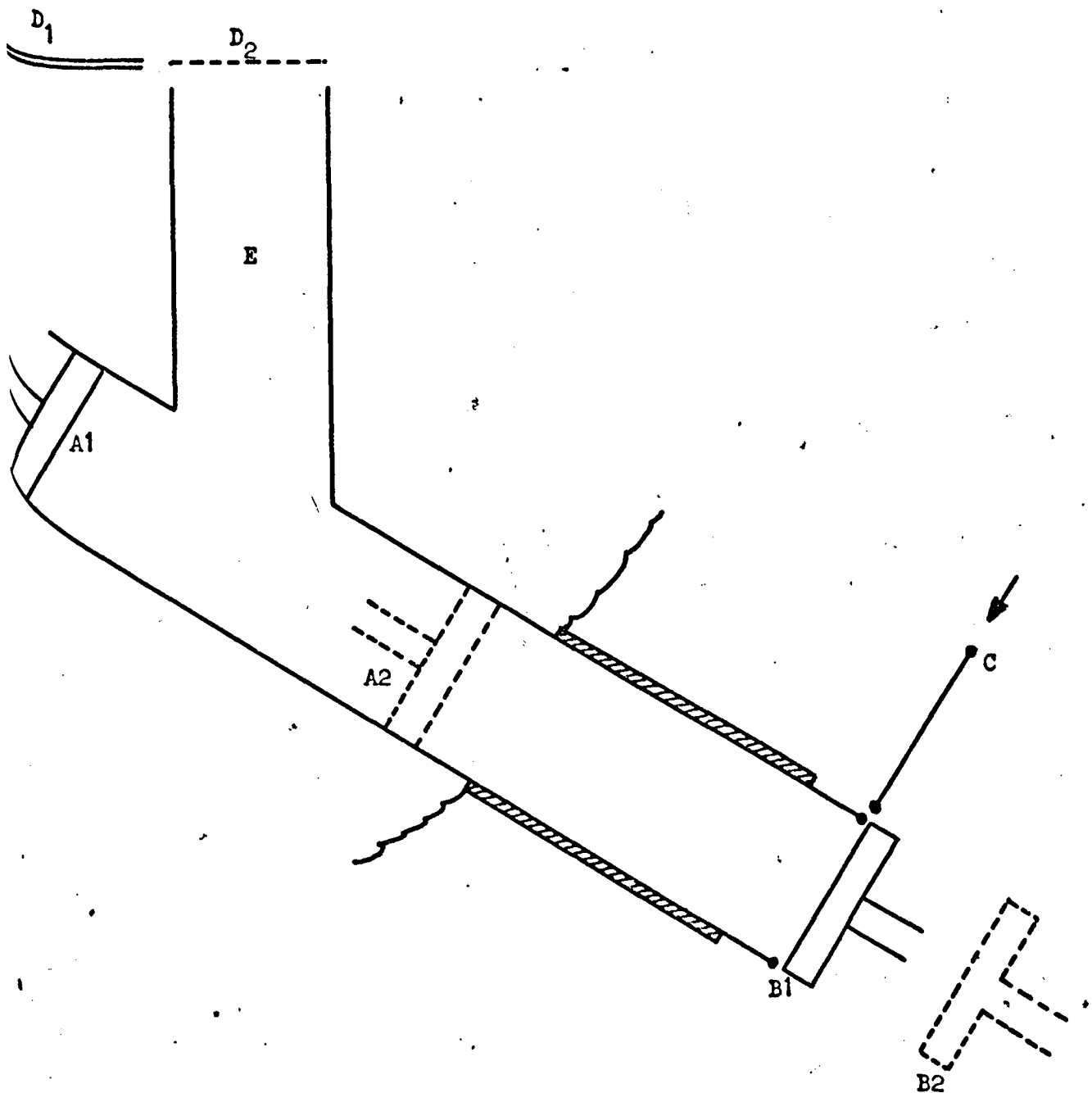
- c) Méthode par compression du sable : Cette méthode repose sur l'utilisation d'un capteur comprimant le sable sous une pression de 21 daN/cm^2 , de façon à éliminer l'influence de la densité de ce matériau sur la détermination de son humidité faite par mesure de la constante diélectrique.

L'appareil est représenté sur la figure 58 et fonctionne de la façon suivante :

Le sable pénètre par le tube E, lorsque l'obturation D est en position 1, les pistons A et B se trouvant également en position 1.

L'alimentation en sable est arrêtée par l'obturation D occupant la position 2. Le piston A est poussé alors vers le bas, il comprime le sable jusqu'à ce que l'effort atteigne 450 kg. Lorsque la pression exercée atteint cette valeur à $\pm 5 \%$, le piston B est ramené vers l'arrière, laissant le sable comprimé, toujours poussé par A, dépasser d'environ 25 mm le bord inférieur du tube. Lorsque le piston A atteint la position 2, il retourne automatiquement en position 1. Le couteau C, tranche la carotte de sable dépassant du tube et B revient en position 1, ainsi que D, et le cycle recommence. La durée de ces opérations est de l'ordre de 6 s. Le tube dans lequel est comprimé le sable est réalisé en matière plastique et supporte deux plaques de cuivre permettant de déterminer la constante diélectrique du sable.

FIGURE 58 : Capteur de constante diélectrique du sable après compression
(BCIRA journal Septembre 1963 p 646 fig. 5).



Des essais effectués en milieu industriel on montré qu'une précision de $\pm 0,2 \%$ était obtenue. De plus, la solidité, la friabilité et la précision de l'appareil et de ses équipements électroniques ont été éprouvés. Les variations de température influencent encore la mesure mais peuvent être corrigés de façon simple. Cette réalisation est due à la BCIRA.

- C) Utilisation des hyperfréquences : Le principe de fonctionnement de tels capteurs est d'envoyer, à travers le sable humide, une onde électromagnétique de fréquence proche de la période d'oscillation des dipôles que constituent les molécules d'eau à l'intérieur du sable. Suivant la fréquence de l'onde et la quantité d'eau présente, il se produit des phénomènes d'amortissement aboutissant à une absorption plus ou moins grande de l'énergie transportée par le faisceau d'ondes. Cette technique a fait l'objet de plusieurs réalisations industrielles :

	AEI	Philips
Fréquence de l'onde :	10 680 MHz	9 100 MHz
Puissance d'émission :	20 mW	20 mW

l'atténuation de l'onde obtenue est de l'ordre de 5 à 10 db par % d'humidité.

Le schéma de l'installation est donné par la figure : 59 .

Un Klystron-reflex (1) émet une onde électromagnétique qui se propage à travers un système de guides d'onde constitué de tubes en laiton de section rectangulaire (2)

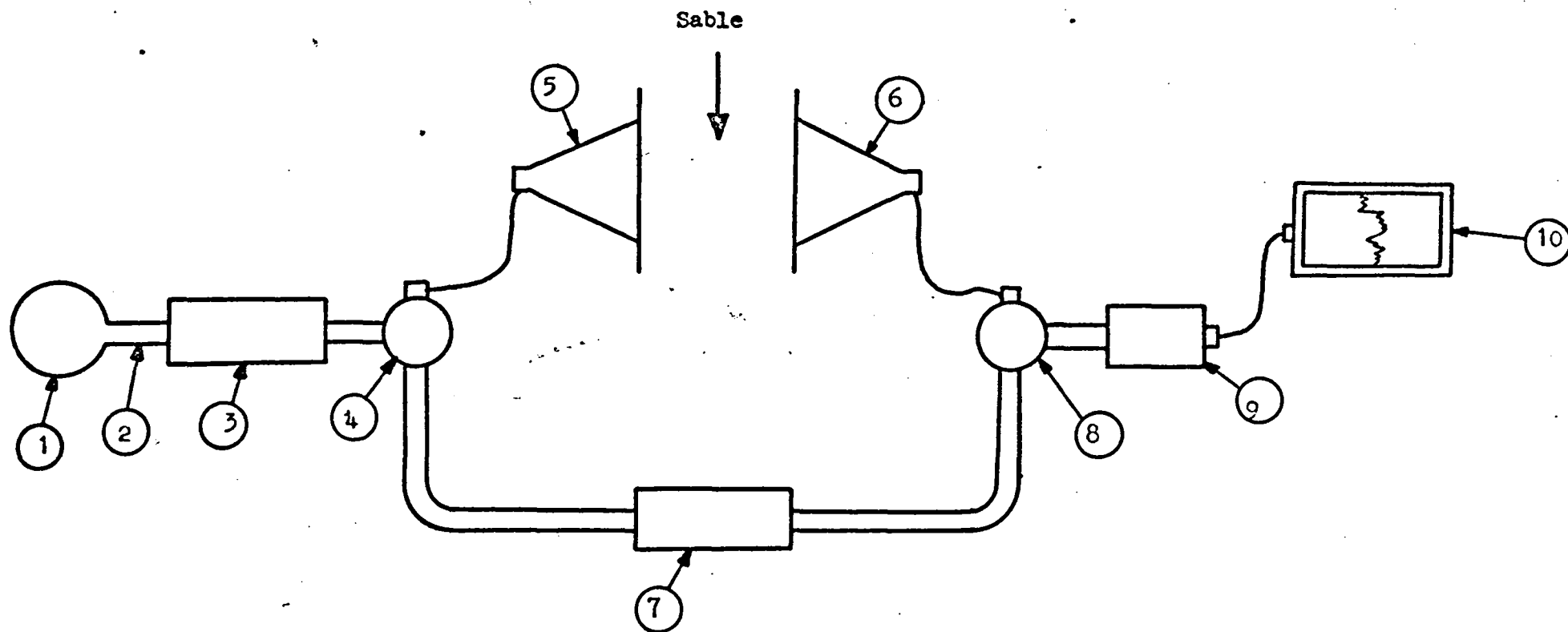


FIGURE 59 : principe de la mesure de l'humidité du sable par les hyperfréquences.

Un atténuateur (3) permet d'ajuster le niveau du signal qui passe dans un commutateur (4) l'aiguillant soit vers une cellule de mesure comportant deux cornets (un émetteur (5) et un récepteur (6)) solidaires de deux plateaux entre lesquels est dirigé le sable, et constituant le capteur proprement dit, soit vers un atténuateur (7) de façon à ramener, sur le commutateur (8), deux signaux d'un niveau équivalent. Le signal est détecté en (9) puis affiché directement en % d'eau en (10).

D) Ralentissement des neutrons rapides : On sait que les neutrons rapides issu, par exemple, d'isotopes radio actifs, peuvent voir leur énergie progressivement réduite par les chocs successifs sur les atomes d'hydrogène notamment. Ainsi, lorsqu'un matériau humide est bombardé par des neutrons rapides, il y a formation d'un nuage de neutrons lents dont la densité correspond à la teneur en eau de l'échantillon si celui-ci ne contient pas d'hydrogène à l'état combiné. Cette propriété a été mise en application dans une fonderie d'Allemagne de l'Est, et dans les fonderies de la Général Motors à Danville.

La source de neutron rapide est constituée par une sonde d'environ 5 cm de diamètre, comportant une enveloppe en aluminium, et contenant un mélange de 5 mg de radium et de béryllium. Un écran en plomb arrête le rayonnement α et γ et un ensobage de paraffine, ralentit déjà les neutrons dans une certaine mesure.

Le nuage de neutrons lents est détecté au moyen d'un ou plusieurs compteurs Geiger. Certains aménagements supplémentaires ont été nécessaires pour éliminer l'influence de la densité du sable et des éthérogénéités d'humidité à l'intérieur de la trémie où se fait la mesure.

L'erreur minimale obtenue sur la teneur en eau est alors de 0,15 % par cette méthode.

E) Réglage technologique de la teneur en eau : Contrairement à ce qui a été vu précédemment, cette méthode imite la manière de faire d'un conducteur de malaxeur en délivrant un sable qui possède toujours les mêmes propriétés technologiques, sans s'attacher à un pourcentage d'humidité prescrit. Pour cela, le système utilise un couloir vibrant, muni de fentes et de cellules photo-électriques, placé près d'un orifice pratiqué dans la paroi du malaxeur. La propriété utilisée est que le sable apte au moulage acquiert une cohésion telle, qu'il se rassemble en édifices d'autant plus gris qu'il est humide. Ainsi, de l'eau est ajoutée au malaxeur tant que le sable peut passer à travers une ouverture assez fine, et l'addition d'eau est stoppée automatiquement lorsqu'il cesse de franchir cette orifice.

En utilisant plusieurs orifices, il est possible d'arriver à un réglage grossier, puis fin de l'aptitude à la cohésion du sable convenant au moulage.

En résumé, les méthodes que nous venons de voir permettent d'automatiser le réglage de la teneur en eau des sables avec une précision de l'ordre de 0,2 % à 0,5 % d'humidité.

Cependant, les appareillages utilisés sont, dans l'ensemble, complexes et nécessitent un entretien soigneux, peu compatible avec les contraintes d'exploitation régnant sur un site normal.

ANNEXE 2

Description de quelques défauts de fonderie dus au
sable de moulage

Nous nous proposons ici de passer en revue quelques défauts de fonderie dus à un mauvais comportement du sable de moulage et nous allons, pour cela, les classer selon la cause qui leurs a donné naissance.

A) Défauts dus à un manque de perméabilité : Ces défauts résultent de la présence de cavités à l'intérieur ou à la surface du métal, ayant pour origine une mauvaise évacuation des gaz lors du remplissage du moule.

On distingue, par ordre de taille :

- Les refus : Dus à un remplissage incomplet résultant de la contre-pression des gaz, généralement emprisonnés à la partie supérieure du moule.
- Les soufflures : Ce sont des bulles de gaz, réparties dans la masse ou présentes seulement à la surface du métal.
- Les piqûres : Petites soufflures.
- les bouillonnements : Emission violentes de gaz à travers le métal liquide.

Les gaz causant ces défauts peuvent provenir, soit du moule (excès d'humidité ou présence d'éléments susceptibles de créer, à chaud, un dégagement gazeux), soit du métal qui a été gazé au cours de son élaboration ou de sa manutention (humidité des poches de coulée), soit enfin du mode de coulée du métal (décollement de la veine de métal dans le système d'attaque du moule).

B) Défauts liés à la cohésion à vert.

- 1) Manque de cohésion à vert : Ces défauts résultent du fait que la pression métallostatique dépasse, en un point du moule, la résistance à la compression du sable. Il s'en suit une pénétration du métal à l'intérieur du sable qui se fissure, créant ce que l'on appelle un forçage.

Le manque de résistance du moule prévient d'un manque de cohésion du sable qui peut être dû :

- à une teneur en argile insuffisante,
- à une argile de qualité insuffisante au pouvoir agglutinant trop faible,
- à une régénération incomplète du sable ne compensant pas toute l'argile détruite,
- à une humidité trop forte ou mal répartie,
- à un malaxage insuffisant,
- à un serrage trop faible du moule créant une compacité médiocre.

- 2) Excès de cohésion à vert : On est ici, en présence d'un défaut de plasticité du sable qui cause un mauvais serrage et une mauvaise répartition du matériau lors de la constitution du moule. Il subsiste, à la surface de l'empreinte, des cavités génératrices de rugosités.

C) Défauts liés à la mauvaise tenue à chaud du sable de moulage :

Ces défauts sont très variés du faits des nombreuses causes qui peuvent être à leur origine. Nous étudierons successivement

- 1) Défauts dus à une pénétration du métal dans le sable : Cette pénétration peut être due à l'existence d'espaces entre les grains (granulométrie trop grosse) ou à une fusion de certains éléments fins du sable.

Elle est donc favorisée par une augmentation de la pression métallostatique ou une élévation de la température du métal.

Les défauts constatés vont de la grippure qui est une adhérence de sable à la surface de la pièce, jusqu'à une métallisation totale d'une partie du moule qui ressemble alors à une éponge métallique imprégnée de sable : l'abreuvage.

- 2) Réaction moule métal : Les phénomènes de pénétration du métal dans le sable ont ici pour cause une réaction chimique prenant naissance entre les oxydes du métal, qui ont un caractère basique, et le silice à caractère acide, avec formation de silicates. Si l'oxyde est soluble dans le métal, il pourra alors y avoir pénétration avec apparition des mêmes défauts que précédemment.
- 3) Perte de cohésion à chaud du sable : Si le sable perd sa cohésion lors de la coulée du métal en fusion, il peut être entraîné par celui-ci et se retrouver dans la pièce sous forme d'inclusions. Ce phénomène peut provenir d'un certain ramollissement des éléments fins, pouvant aller jusqu'à la fusion, ou de la combustion des matières organiques présentes telles la farine de céréales ou de bois. On appelle encore ces défauts : entraînements ou ramassis.
- 4) Défauts dus à la dilatation du sable : Les gales et les queues de rat, résultent d'un manque de souplesse du sable qui ne peut absorber la dilatation du moule au moment de la coulée. Il se crée alors un soulèvement de la surface de l'empreinte permettant la pénétration du métal. Ces défauts peuvent être liés à une trop forte compacité du moule résultant d'une granulométrie trop étalée entravant le "jeu" des grains, ou à un excès de dilatation du moule résultant d'une exposition prolongée à la chaleur, conséquence d'une coulée trop longue.

ANNEXE 3

Programme de simulation du comportement du sable
dans une sablerie de fonderie

Ce programme est écrit en FORTRAN II sur calculateur industriel T 2000 de 16 K mots + 16 K mots d'extension de la mémoire sur disque.

Plutôt que de décrire, dans le détail, l'organigramme de ce programme qui se compose d'une boucle, à l'image du circuit du sable à l'intérieur de la sablerie, nous avons préféré donner, à la figure 60, l'implantation des différents modules composant ce programme, dont on trouvera d'édition à la suite.

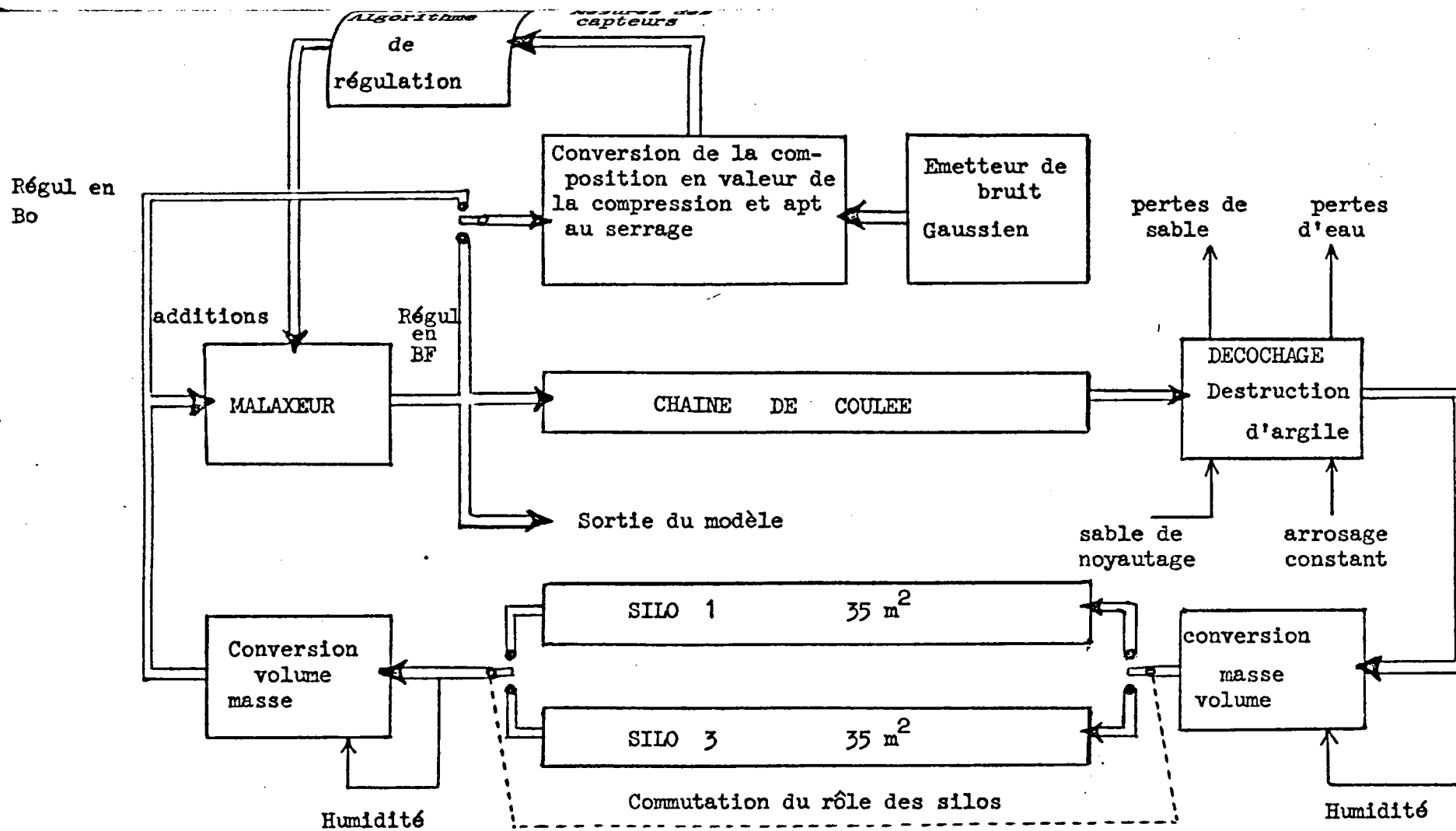


FIGURE 60 : schéma de fonctionnement du modèle


```

200 N=1,L
201 NA=1,15
202 EN SORTIE DU MALAXEUR
203 FKA+KN-KP+1 .+.DELNI
204 IFIX(FN.I)
205 N1=FN1-N1
206 LE IT DE SABLE EN SORTIE LE SILO
207 VL=1 .+. / (165 .-.25.*ENH)+DELNV
208 L=IFIX(FNVL)
209 NV=FVOL NVOL
210 IAR1 NVOL)22,22,23
211 EMENT DE TABLE CIRCULANTE POUR ARGILE EN SORTIE DE SILO
212 PI=IAR1
213 A=IDEP1+999
214 C(12,1)NREC
215 IAC 12
216 25 J=IDEP1,IAR1
217 C(J)=IFIX(D(1)*1 .+. )
218 TE(12,102)NREC
219 IAC 12
220 EMENT DE TABLE CIRCULANTE POUR HUMIDITE EN SORTIE DE SILO
221 C(13,1)NREC
222 IAC 13
223 26 J=IDEP1,IAR1
224 C(J)=IFIX(DH(1)*1000.)
225 TE(13,102)NREC
226 IAC 13
227 IS-1
228 3 I=2,35
229 I-1
230 A)=DH(I)
231 A)=D(I)
232 I=IAR1+1
233 IS)5 .,5 .,24
234 EMENT DE TABLE CIRCULANTE POUR ARGILE DANS LE MALAXEUR
235 C(12,1.2)NREC
236 IAC 12
237 28 J=1,NVOL
238 A+NREC(J)
239 S/NVOL/1000.
240 29 J=NVOL,IAR1
241 J=NVOL+1
242 C(JP)=NREC(J+1)
243 TE(12,102)NREC
244 IAC 12
245 EMENT DE TABLE CIRCULANTE POUR HUMIDITE DANS LE MALAXEUR
246 C(13,1)NREC
247 IAC 13
248 30 J=1,NVOL
249 A+NREC(J)
250 S/NVOL/1000.
251 31 J=NVOL,IAR1
252 J=NVOL+1
253 C(JP)=NREC(J+1)
254 TE(13,102)NREC
255 IAC 13

```

```

I=IARI-NVOL
TES D EAU ET D ARGILE DANS LE MALAXEUR
IA+FKA
IH+FKAH
ENA
ENH
USION DE LA CHAÎNE DE COUÉE
K=1,14
15-K
KK+1
(KK1)=DH(KK)
(KK1)=V(KK)
(KK1)=CH(KK)
(KK1)=C(KK)
(KK1)=CL(KK)
(KK1)=CLH(KK)
I)=Y
(1)=YH1
I)=NI
I)=YH
DES CAPTEURS EN SORTIE DU MALAXEUR
L GAUSS(CK,NGG)
(1)=(1.5*YH/(1.+(FKA+FKAH)/100.))-10.+3.*GK
L GAUSS(CK,NGG)
(1)=(.019*Y)-(0.45*YH)/(1.+(FKA+FKAH)/100.))-8.+1.5+.1*GK
DES CAPTEURS EN ENTRÉE DU MALAXEUR
L GAUSS(CK,NGG)
(1)=(1.5*YH1)-10.+3.*GK
L GAUSS(CK,NGG)
(1)=(.019*Y1)-(0.45*YH1)+1.5+.1*GK
I=ISO+1
FI+CL(1)
FIA+CLH(1)
DE LA DURÉE APPROXIMATIVE D UN TOUR DU SABLE DANS LA SABLERIE
I=IS+JS+25
(I=ISO-KAD)47,46,46
DE EN ARGILE (ICI 1 FOIS PAR TOUR DU SABLE PAR ASSIM A 1ER ORDRE)
I=KCNA-.95*((1.5*FIA)+(52.5*FI))/ISO-63)
(I=KKA)34,35,35
DE EN EAU (ICI EN BO A CHAQUE MALAXAGE)
I=KDH-(CLH1+10.)/1.5
(I=KKAH)19,45,45
I=CH(15)*(1.-KDH/100.))-DH(15)+KARR
I=(N(15)+CHF)/100.
I=C(15)*(1.-KL/100.)*(1.-KP/100.)/VOL
I=(CH(15)*(1.-KDH/100.)*(1.-KP/100.))+KARR)/VOL
I=.019*(N(15)+CHF)/(1650.-25.*TERMH)+DELSAM
I=FIX(SAM)
I=SAM-MAS
I=ENT DE TABLE CIRCULANTE POUR ARGILE EN RETOUR DE DECOCHAGE
I=IDEP+MAS-1
I=(1,1,2)NREC
I=10

```

```

6 J=IDEP,IAR
C(J)=IFIX(TEMP*1000.)
TE(1,102)NREC
END 10
MENT DE TABLE CIRCULANTE POUR HUMIDITE EN RETOUR DE DECOCHAGE
C(11,102)NREC
END 11
16 J=IDEP,IAR
C(J)=IFIX(TEMP*1000.)
TE(11,102)NREC
END 11
P=IAR+1
ICLP 1001,10,20,20
GEMENT DE TABLE CIRCULANTE POUR ARGILE DANS SILO
C(10,102)NREC
END 10
7 I=1,1000
NREC(I)
S=S/100.000.
10 IJ=1001,IDEP
=IJ-1000
C(IJ1)=NREC(IJ)
TE(1,102)NREC
END 10
GEMENT DE TABLE CIRCULANTE POUR HUMIDITE DANS SILO
C(11,102)NREC
END 11
13 I=1,100
NREC(I)
S=S/100.000.
14 IJ=1001,IDEP
=IJ-1000
C(IJ1)=NREC(IJ)
TE(11,102)NREC
END 11
P=IDEP-100
S+1
S-35)17,17,5-1
VIDE
S-1
15)68,68,15
16 I=1,35
1)=RH(I)
1)=R(I)
C 24
PLEIN
S+1
13
15-35)18,69,69
16 I=1,35
1)=RH(I)
1)=RH(I)
1)=INT
C(I)
1)=R(I)

```

```

I=INT
C 17
U=ISO
TRAITEMENT D UNE BROYEE
TE(7,120)(CH(16-NB),NB=1,15),IS,PISO
TE(7,120)(C(16-NB),NB=1,15),JS,FKA
MAT(15F7.2,15,F6.2)
TRAITEMENT DE 15 BROYEEES ET SORTIE DE 2 LIGNES DE RESULTATS
MAT(8)
C 777
LOS VIDES
TE(1,130)
C 75
LOS PLEINS
TE(1,140)
MAT(5H VIDE)
MAT(5H PLEIN)

```

GENERATION D UN NOMBRE ALEATOIRE

```

ROUTINE GAUSS(G,NG)
ENSION X(31,15)
NG)1,15,1
76543.
3 I=1,31
C(6,1,1)(X(I,J),J=1,15)
MAT( 10F7.5)

```

```

.*8
1.0 001.*IFIX(A/1.11000.)
100 010.
R-.5)2,3,3

```

C 4

*-R

+1

+1

X(I,J)-R)5,6,6

J-10)11,15,15

7,7,8

ELCAT(10*I+J-11)/100.

9

ELCAT(10*I+J-11)/100.

CRN

COURBE DE GAUSS CUMULEE

5.45	0.5800	0.5120	0.5160	0.5199	0.5239	0.5279	0.5319	0.5359
5.48	0.5478	0.5517	0.5557	0.5596	0.5636	0.5675	0.5714	0.5753
5.52	0.5871	0.5910	0.5948	0.5987	0.6026	0.6064	0.6103	0.6141
5.55	0.6255	0.6293	0.6331	0.6368	0.6406	0.6443	0.6481	0.6517
5.59	0.6628	0.6664	0.6701	0.6736	0.6772	0.6808	0.6844	0.6879
5.62	0.6985	0.7019	0.7054	0.7088	0.7123	0.7157	0.7191	0.7224
5.65	0.7324	0.7357	0.7389	0.7422	0.7454	0.7486	0.7517	0.7549
5.68	0.7642	0.7673	0.7704	0.7734	0.7764	0.7794	0.7823	0.7852

7910 0.79390 .79670 .79950 .80230 .80510 .80780 .81060 .8133
7916 0.82120 .82380 .82640 .82890 .83150 .83410 .83650 .8389
7938 0.84610 .84850 .85180 .85310 .85540 .85770 .85990 .8621
7965 0.86860 .87080 .87290 .87490 .87700 .87910 .88110 .8832
7969 0.88830 .89070 .89250 .89440 .89620 .89810 .89970 .9015
7949 0.90660 .90820 .90990 .91150 .91310 .91470 .91620 .9177
7927 0.92220 .92360 .92510 .92650 .92790 .92920 .93060 .9319
7934 0.93570 .93700 .93820 .93940 .94060 .94180 .94290 .9441
7963 0.94740 .94840 .94950 .95050 .95150 .95250 .95350 .9545
7964 0.95730 .95820 .95910 .95990 .96080 .96160 .96250 .9633
7949 0.96560 .96640 .96710 .96780 .96860 .96930 .96990 .9706
7919 0.97260 .97320 .97380 .97440 .97500 .97560 .97610 .9767
7979 0.97830 .97880 .97930 .97980 .98030 .98080 .98120 .9817
7926 0.98300 .98340 .98380 .98420 .98460 .98500 .98540 .9857
7964 0.98680 .98710 .98750 .98780 .98810 .98840 .98870 .9890
7996 0.98980 .99010 .99040 .99060 .99090 .99110 .99130 .9916
7920 0.99220 .99250 .99270 .99290 .99310 .99320 .99340 .9936
7940 0.99410 .99430 .99450 .99460 .99480 .99490 .99510 .9952
7955 0.99560 .99570 .99590 .99600 .99610 .99620 .99630 .9964
7966 0.99670 .99680 .99690 .99700 .99710 .99720 .99730 .9974
7975 0.99760 .99770 .99775 .99780 .99790 .99795 .99800 .9981
7982 0.99825 .99830 .99840 .99845 .99850 .99855 .99860 .99865
7990 0.00000 .00000 .00000 .00000 .00000 .00000 .00000 .00000

BIBLIOGRAPHIE

- 1) Recueil des méthodes de contrôle courant des sables de fonderie (publication du CTIF 1971).
- 2) Quelques notions sur les défauts de fonderie liés au sable de moulage (publication du CTIF 1971).
- 3) Détermination et réglage de l'humidité des sables de moulage (synthèse bibliographique CTIF 1967).
- 4) Défauts de fonderie tenant à la génération du métal dans le sable (publication CTIF 1956).
- 5) Les sables synthétiques de moulage (publication du CTIF 1959).
- 6) Mesures du taux d'humidité dans les sables de fonderie (Etude du CERT - DERMIO 1972).
- 7) La mesure de l'aptitude au serrage, nouveau principe de détermination du degré d'humidification, de l'état propre au moulage et du comportement en service des sables de moulage F HOFMANN 1968 (traduction CTIF).
- 8) Etude des sables de moulage Silico-Argileux (conférence ATF R.SANZ 1963).
- 9) Détermination de l'échauffement du moule au cours du refroidissement d'une pièce coulée, application au calcul du taux de régénération de l'argile en sablerie. G.SCIAMA et R.SANZ 1972.
- 10) Défauts de fonderie liés à l'anomalie de dilatation du quartz : Ver, gale, queue de rat : FONDERIE n° 239.
- 11) Destruction des argiles par la chaleur contrôle de cette destruction dans le sable en circuit : FONDERIE n° 324.
- 12) " 1d" : FONDERIE n° 325.
- 13) Théorie et applications de la statistique : MURRAY R. SPIEGEL 1972.
- 14) Technique et calcul pratique des systèmes asservis P.NASLIN 1968.
- 15) La conduite automatique des processus : Journées d'études de Lille 1971.
- 16) Analyse des signaux discrets fournis par les capteurs sur calculatrice analogique : F.LAURENT - JM. TOULOTTE. - L.POVY 1969.

- 17) Automatique complexe : P.VIDAL 1970.
- 18) Systèmes échantillonnés non-linéaires P.VIDAL 1969.
- 19) Introduction au filtrage numérique : JC. RADIX 1970.
- 20) Identification expérimentale des processus industriels J.LOEB.
- 21) Régulation automatique industrielle ECKMANN 1963.
- 22) Optimal estimation, identification and control RC. LEE 1964.
- 23) Mesure et régulation en automatique industrielle FARDIN 1964.

