



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

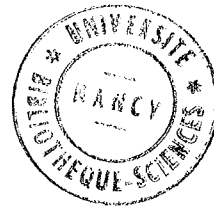
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

T H E S E
présentée à
l'UNIVERSITE DE NANCY I
pour l'obtention du titre de
Docteur de Troisième Cycle
en Génie Electrique, Option Automatique
par

Michel ROBERT



CONCEPTION ET REALISATION
D'UN GRANULOMETRE A SEDIMENTATION

soutenue publiquement le 19 Novembre 1982
devant la commission d'examen

Jury

C. HUMBERT	Président
R. ROUX	Examineur
P. BLAZY	"
R. HUSSON	"
J. RAGOT	"
M. AUBRUN,	Rapporteur

AVANT-PROPOS

Le travail, présenté dans ce mémoire, a été réalisé au Laboratoire d'Automatique et de Recherche Appliquée (LARA).

Je tiens à remercier Messieurs les Professeurs M. AUBRUN et C. HUMBERT pour la bienveillance et les encouragements qu'ils m'ont toujours prodigués.

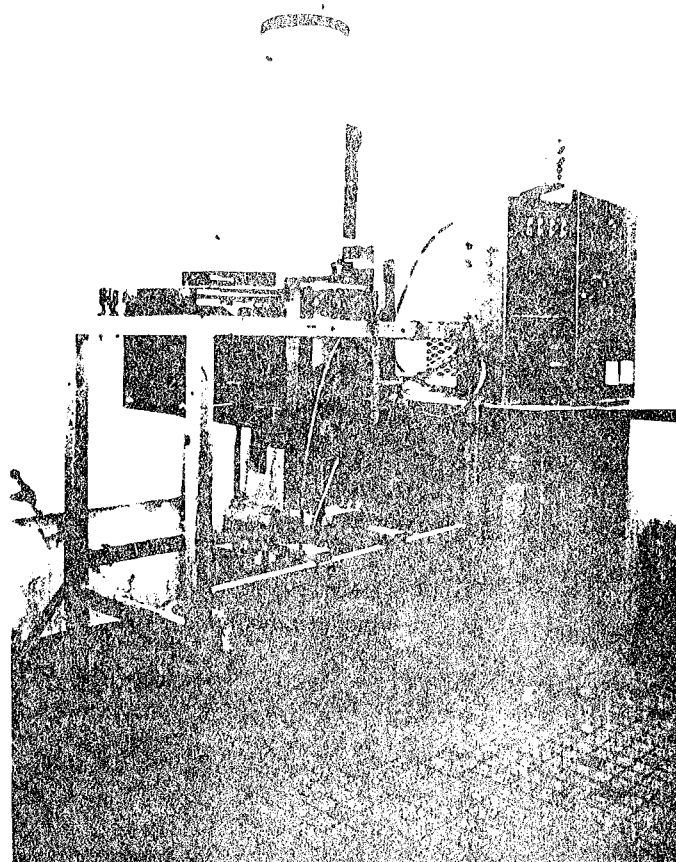
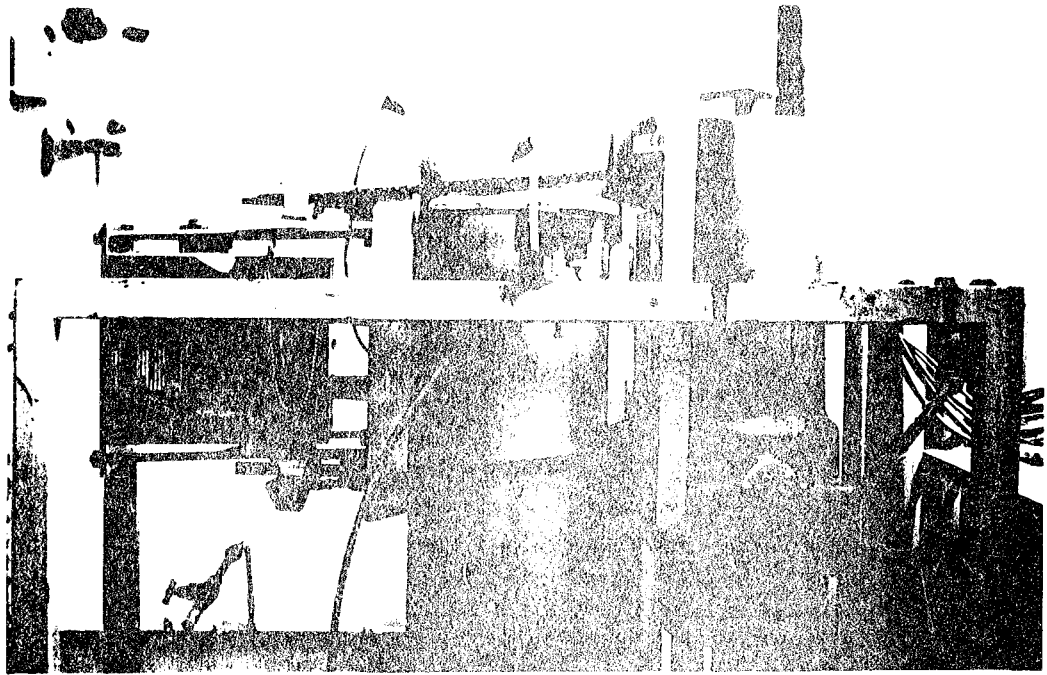
Que Monsieur J. RAGOT trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance pour les conseils et l'aide qu'il m'a apportés.

Je suis très honoré de la présence à ce jury de Monsieur R. HUSSON, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique, et de Monsieur le Professeur P. BLAZY, Directeur du Centre de Recherche sur la Valorisation des Minerais.

Monsieur R. ROUX, Chef du Service Commercial Civil de la Compagnie Industrielle des Lasers (CILAS) me fait l'honneur de participer à ce jury, je l'en remercie vivement.

Enfin, je voudrais associer à ces remerciements tous mes camarades du Laboratoire ainsi que Mademoiselle M. BOERKMANN qui s'est brillamment acquittée de la présentation de ce document.

A mon épouse.



P L A N

	Pages
INTRODUCTION	1
I. METHODES D'ANALYSES GRANULOMETRIQUES	3
1. Généralités	3
2. Méthodes directes	3
2.1. Microscopie	3
2.2. Tamisage	4
3. Méthodes indirectes	5
3.1. Lévigation	5
3.2. Sédimentation	6
3.3. Cyclonage	9
3.4. Méthode optique	10
3.5. Techniques diverses	13
II. LE CAPTEUR	19
1. Approche théorique du phénomène de sédimentation	19
1.1. Loi de Stockes	19
1.2. Autres études de ce phénomène	22
2. Le granulomètre	25
2.1. Généralités	25
2.2. Fonctionnement	25
2.3. Principe de mesure	27
2.3.1. Le densimètre	28
2.3.2. Mesure de température	31
III. MODELISATION DU PROCESSUS DE SEDIMENTATION	33
1. Introduction	33
2. Couplage de la manipulation avec un calculateur	34
2.1. Matériel informatique	34
2.2. Connexion calculateur-granulomètre	35

3. Première campagne de mesure	37
3.1. Déroulement d'un essai de sédimentation	38
3.2. Résultats	39
3.2.1. Influence de la température	39
3.2.2. Phénomène de vieillissement	48
3.2.3. Influence du pourcent solide et normalisation des courbes	50
3.3. Modélisation du processus de sédimentation	52
4. Deuxième campagne de mesure	54
4.1. But de cette campagne	54
4.2. Algorithme de recherche des pourcentages par tranches granulométriques dans un échantillon quelconque	58
4.3. Résultats	63
IV. CONCEPTION DU GRANULOMETRE EN TANT QUE CAPTEUR AUTONOME	66
1. Dispositions générales	66
2. Contraintes d'utilisation	69
V. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	73
ANNEXE I	
MESURE DE DENSITE PAR ABSORPTION DES RAYONNEMENTS GAMMA	75
ANNEXE II	
CONDUITE DE PROCESSUS EN TEMPS REEL	77
BIBLIOGRAPHIE	85

TABLE DES SYMBOLES

d	: diamètre des particules.
ρ_p	: masse volumique des particules.
ρ_f	: masse volumique du fluide de sédimentation.
μ	: viscosité du fluide de sédimentation.
θ	: température du fluide de sédimentation.
J	: paramètre tenant compte de la date à laquelle ont été effectués les essais de sédimentation.
d_0	: signal délivré par le densimètre représentatif de la densité du fluide.
d_{20}	: signal délivré par le densimètre représentatif de la densité du fluide normalisée à 20°C.
P	: poids de l'échantillon.
d_H	: signal délivré par le densimètre représentatif de la densité de la pulpe (eau + échantillon).
$f_i(t)$: fonction modèle de la tranche i .
α_{1i}) coefficients du modèle $f_i(t)$.
α_{2i}	
β_i	: pourcentage des particules appartenant à la tranche i .

INTRODUCTION

Dans de nombreuses applications industrielles la connaissance de la taille des particules produites par un procédé quelconque conditionne les performances des traitements ultérieurs que ces produits devront subir.

Ainsi, dans le domaine du traitement des minerais, il est important de savoir si les particules ont été broyées à la taille requise, permettant leur séparation en matériau "utile" et en partie stérile.

Cette mesure de la granulométrie s'effectue le plus souvent par tamisage d'un échantillon de minerai. De par sa nature, cette opération ne permet qu'une vérification a posteriori de la qualité du broyage.

Dans l'hypothèse de la conduite automatique d'une installation de traitement de minerai il s'avère nécessaire de connaître, à tout instant et généralement en plusieurs points du circuit, la taille des particules qui transitent dans cette chaîne de transformation (1).

Dans cette optique nous avons été amenés à concevoir et à développer un capteur directement implantable en milieu industriel et permettant d'effectuer cette mesure de granulométrie dans un temps relativement court. Le fonctionnement de ce granulomètre repose sur le principe de la sédimentation : la vitesse de sédimentation de particules dans un fluide est liée à leur taille.

Cette étude, financée par une Aide au Prédéveloppement du Ministère de la Recherche et de l'Industrie, associant le Laboratoire à la Société Cilas, s'est déroulée en plusieurs étapes :

- conception et construction du dispositif expérimental permettant d'étudier le phénomène de sédimentation.
- campagnes de mesures.
- traitement, sur minicalculateur, des signaux et de l'information donnant la répartition granulométrique d'un échantillon de minerai.

- transcription des algorithmes sur un microprocesseur couplé au granulomètre assurant son autonomie de fonctionnement.

Le plan du mémoire est le suivant :

. Dans le premier chapitre nous présentons une analyse critique des différents principes utilisables pour réaliser un capteur granulométrique.

. Le deuxième chapitre est consacré à une étude succincte de la sédimentation et à la description du dispositif expérimental.

. Le troisième chapitre est celui de l'analyse des données expérimentales et de leur traitement.

. Dans le dernier chapitre nous indiquons les caractéristiques du capteur autonome.

I. METHODES D'ANALYSE GRANULOMETRIQUE

1. Généralités

La mesure de la granulométrie d'un échantillon est un des problèmes majeurs rencontrés par le minéralurgiste. En effet, la valorisation d'un minerai est fortement conditionnée par la taille des particules, il est important de posséder cette information. Pour ce faire, diverses méthodes d'analyse granulométrique peuvent être utilisées. Ces méthodes présentent souvent l'inconvénient majeur de n'être applicables qu'en discontinu et en temps différé ; le délai d'attente de l'information pouvant atteindre la ou les journées.

Nous proposons dans ce chapitre un recensement non exhaustif des méthodes d'analyse granulométrique les plus usitées, ainsi qu'une présentation succincte des différents capteurs existant sur le marché.

Dans la pratique, les différentes méthodes d'analyse granulométrique peuvent être réparties en deux grandes classes (2) :

- les méthodes directes consistant à mesurer directement un paramètre représentatif de la géométrie de la particule (microscopie, tamisage).
- les méthodes indirectes reposant sur l'existence d'une corrélation entre la taille des particules et leur comportement dans certaines conditions ; on parle alors de classement par équivalence (lévigation, sédimentation ...).

2. Méthodes directes

2.1. Microscopie

Une analyse grain par grain, au microscope, permet l'évaluation d'une caractéristique géométrique de la particule dénommée "diamètre équivalent". A titre d'exemple ce "diamètre équivalent" peut être défini comme étant le diamètre d'un cercle ayant une surface égale à celle de la projection de la particule dans le plan d'observation.

Une technologie plus sophistiquée donne, grâce au couplage microscopique dispositif opto-électronique, une analyse granulométrique beaucoup plus rapide. Avec ce genre de dispositif (3), couramment dénommé analyseur d'image, les particules à analyser sont vues à travers un microscope. L'image obtenue est alors convertie par caméra vidéo en signaux électriques dont :

- l'amplitude est fonction du pouvoir réflecteur ou du coefficient de transmission du matériau, dans une échelle allant du noir au blanc.

- la largeur est proportionnelle à la taille des particules.

Ces dispositifs constituent beaucoup plus des appareillages de laboratoire que des capteurs industriels.

2.2. Tamissage

Parmi ces méthodes directes, la technique la plus employée est sans conteste le tamisage qui permet le classement des particules suivant leur plus petite dimension.

Cependant, jusqu'à ces dernières années, la borne inférieure de la plage de mesure était 40 microns car il semblait difficile de tisser des toiles à mailles plus fines.

L'ouverture d'un tamis, ou taille des mailles, s'exprime habituellement en microns ou plus souvent en meshes, unité qui représente le nombre de mailles rencontrées par pouce linéaire.

Différentes séries de tamis existent actuellement sur le marché, elles se différencient par le rapport de l'ouverture de deux tamis consécutifs ; pour mémoire notons :

- la série Tyler universellement employée, de progression $\sqrt[4]{2}$.
- la série normalisée AFNOR X 11507, de progression $\sqrt[10]{10}$.

De nombreux facteurs influencent le déroulement d'un tamisage, à savoir (4) :

- la durée du tamisage.
- la méthode d'agitation.
- la quantité de produits à tamiser.
- la présence de fines particules.
- la forme des grains.
- la dureté du produit : le tamisage broie les particules friables.

Notons que plusieurs prototypes d'appareils de tamisage automatique ont été réalisés, l'appareil décrit par SHONERT, SCHWENK et STEIER (5) permet la réalisation d'environ 40 tamisages par jour. Cet appareil se présente sous la forme d'un ensemble rotatif permettant le déroulement séquentiel des étapes suivantes :

- tamisage en voie humide.
- séchage.
- contrôle de la température.
- pesage automatique des résidus sur chaque tamis.
- lavage et nettoyage des tamis.

3. Méthodes indirectes

3.1. Lévigation

Cette méthode de classification effectue une suspension au sein d'un courant fluide ascensionnel de vitesse telle que les particules d'une dimension donnée soient maintenues en suspension, les plus fines étant entraînées par le fluide : la loi de Stokes relie la vitesse ascensionnelle du fluide v et le diamètre d des particules en équilibre :

$$v = k d^2$$

k étant un coefficient faisant intervenir l'accélération de la pesanteur, le poids spécifique des particules, la densité et la viscosité du fluide.

Ainsi, n récipients cylindro-coniques ou élutriateurs (Fig. I.1.), placés les uns à la suite des autres de telle manière que chaque élutriateur déborde dans le suivant, permettent d'obtenir n coupures de plus en plus fines et donc n points de la courbe granulométrique.

- B : Bouchon de vidange
C : Bouchon
D : Embout
T : Tube plongeant au
fond de l'élutriateur
→ Sens de circulation
du fluide

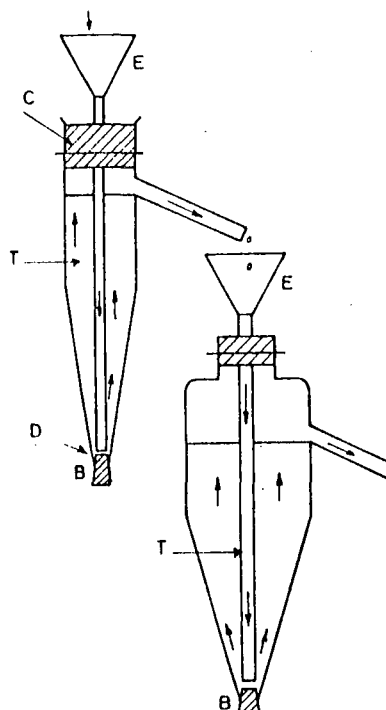


Figure I.1. - Schéma de l'élutriateur Minemet

L'application de cette méthode est limitée aux tranches granulométriques comprises entre 5 et 50 microns, de plus la solution doit être fortement diluée (10 à 20 g de solide par litre, ce qui pose le problème de la représentativité de l'échantillon).

3.2. Sédimentation

Ce principe de mesure sera plus particulièrement développé dans le chapitre suivant. Rappelons brièvement qu'il repose sur la variation de la vitesse de chute des particules dans un fluide quelconque, variation due aux différentes tailles de ces particules.

Les méthodes de la pipette ou de l'hydromètre de Boyoucos sont employées principalement en laboratoire.

- Méthode de la pipette :

A l'aide d'une pipette, immergée à une profondeur constante dans une éprouvette contenant une pulpe en cours de sédimentation, on effectue des prélèvements successifs échelonnés régulièrement dans le temps, ce qui permet, par pesée, après séchage, de déterminer la répartition granulométrique de l'échantillon.

- Méthode de l'hydromètre de Boyoucos :

Cette méthode repose sur la mesure dans le temps de la variation de la densité d'une suspension à l'aide d'un densimètre à immersion.

Ces deux méthodes ne s'appliquent qu'aux fines granulométries ≤ 50 microns et demandent des temps d'analyse très longs. On peut difficilement envisager leur emploi pour réaliser un capteur donnant un signal en temps réel.

D'autres appareils fonctionnent sur ce principe de mesure. En particulier, le "Sedigraph 5000" (6) mesure, par l'intermédiaire d'un mince faisceau de rayons X, la concentration des particules en suspension dans une cellule de mesure. L'originalité de cet appareil réside dans le fait que la cellule est animée d'un mouvement vertical descendant devant le faisceau de rayons X, ce qui a pour effet de diminuer considérablement le temps d'analyse (Fig. I.2). Cet appareil couvre la plage granulométrique 0,1 micron - 100 microns et nécessite l'utilisation d'un échantillon de quelques grammes, l'obtention de la distribution granulométrique entre 2 et 50 microns dure environ 10 mn pour un matériau de densité 2,6.

Cet appareil pourrait effectivement être utilisé comme capteur granulométrique si le problème de la représentativité de l'échantillon ne se posait pas à nouveau.

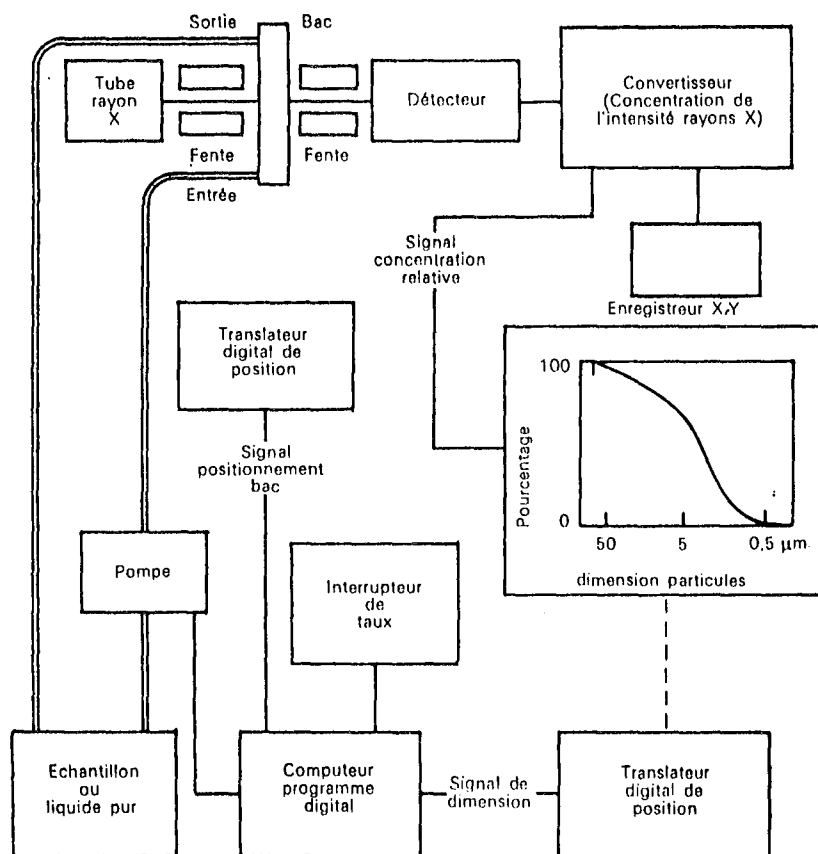


Figure I.2. - Schéma synoptique de fonctionnement du Sedigraph 5000

Une autre méthode consiste à mesurer, en fonction du temps, la masse des particules sédimentées. Les appareils du type balance de sédimentation fonctionnent sur ce principe. L'échantillon à analyser (7) sédimente dans un tube d'environ 200 mm. Le poids des sédiments s'accumulant au fond de la cellule est mesuré à l'aide d'une balance électronique immergée. Le signal délivré par cette balance est alors transmis à un organe de calcul qui exploite ces données afin de déterminer la courbe granulométrique de l'échantillon.

Le constructeur précise les conditions d'emploi suivantes :

- Masse d'échantillon : 1 g pour un produit fin
10 g pour un produit grossier
- Plage de mesure : 0,5 à 4 mm en ce qui concerne les matériaux légers
0,2 à 1 mm en ce qui concerne les matériaux lourds

Cet appareil a été conçu en tant que matériel de laboratoire et, du fait de sa relative fragilité, ne peut être directement implanté comme capteur dans une usine de traitement de minerai.

3.3. Cyclonage (8)(9)

L'hydrocyclone (Fig. I.3.) est un classificateur qui sépare les particules de part et d'autre d'une dimension de coupure, dépendant de plusieurs paramètres (pression, débit, concentration de la pulpe d'alimentation).

Il suffit donc de connaître l'influence de ces paramètres sur la dimension de coupure, de mesurer les débits et densité des deux sorties (surverse et sousverse) pour obtenir un point de la granulométrie.

L'hydrocyclone est surtout utilisé comme "comparateur" dans une boucle de broyage qui réinjecte dans le broyeur toutes les particules de taille supérieure à la dimension de coupure.

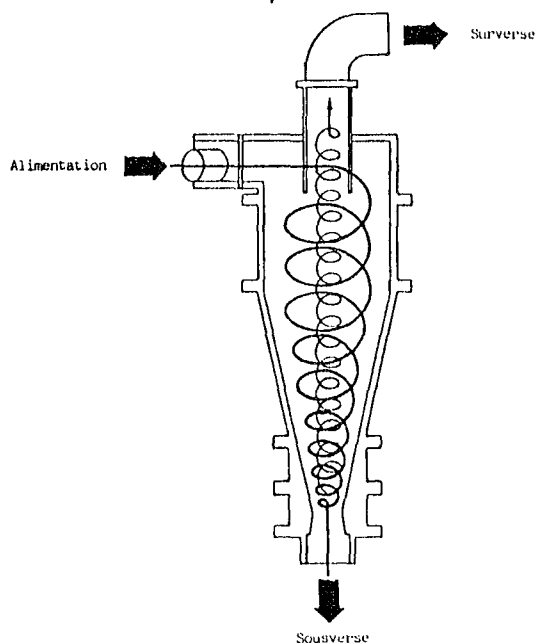


Figure I.3. - Hydrocyclone

Dans la pratique, il est possible de mettre des hydrocyclones en cascade afin d'obtenir plusieurs points de la courbe granulométrique, mais dans ce cas le dispositif de mesure, qui nécessite l'acquisition d'informations sur les débits, pressions et concentrations, la prise d'échantillon, le séchage et le pesage, est complexe et l'information n'est pas immédiate.

Un dispositif reposant sur ce principe est actuellement commercialisé sous la dénomination "Cyclosizer" (4). Il est constitué de 5 cyclones montés en série de manière telle qu'il y ait un recyclage continu de la souverse, ce qui a pour effet d'améliorer la qualité de la classification.

Une utilisation de cet appareil en tant que capteur de granulométrie est possible, mais la durée de circulation de la pulpe est d'environ 30 mn, à laquelle il faut ajouter le séchage et le pesage des résidus recueillis, opérations qui sont difficilement automatisables. De plus, dans sa version commercialisée, le "Cyclosizer" ne permet que l'étude des granulométries fines (\ll 50 microns).

3.4. Méthode optique

L'application du principe de la diffraction a récemment permis la mise au point d'appareils effectuant des analyses dans des délais très courts. Ce type d'appareil, en l'occurrence les "granulomètres à diffraction laser", permet l'obtention d'une granulométrie grâce à la mesure de la surface apparente de la particule, par diffraction d'un rayon lumineux monochromatique. Cette mesure est fondée sur la loi de diffraction lumineuse à l'infini, appliquée au cas des écrans circulaires (10).

Lorsqu'un grand nombre de petits écrans opaques, circulaires et identiques, disposés aléatoirement, interceptent un faisceau de lumière cohérente et monochromatique, on observe dans le plan focal d'une lentille d'analyse une figure de diffraction appelée anneaux d'Airy (Fig. I.4).

Cette figure de diffraction se compose d'une zone claire entourée d'anneaux alternativement clairs et obscurs.

On démontre que (11)(12) :

- l'intensité lumineuse des anneaux clairs est directement proportionnelle au nombre d'écrans interceptant le faisceau lumineux.

- les rayons de ces anneaux sont inversement proportionnels au diamètre des écrans.

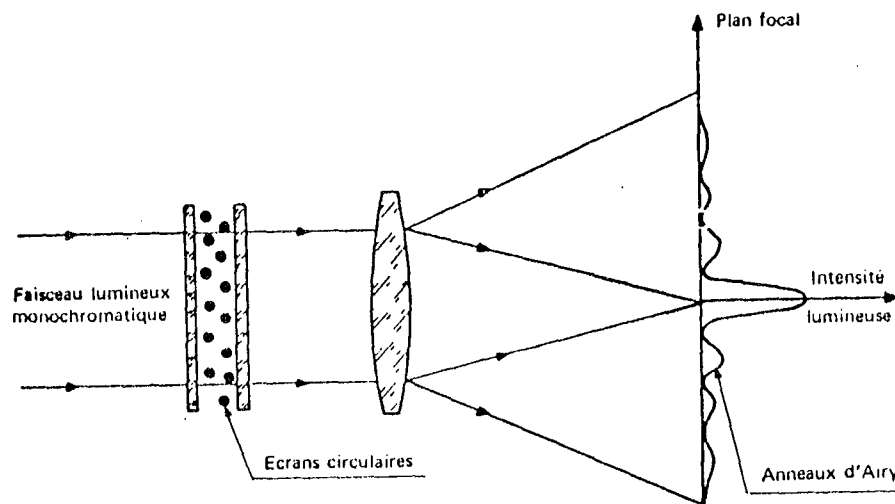


Figure I.4. - Diffraction d'un faisceau monochromatique par des petits écrans circulaires

Ainsi, dans le plan de diffraction, en présence d'une distribution de particules, on observe une distribution d'intensité lumineuse équivalente à la somme des intensités dues à la diffraction provoquée par les différentes tailles de particules. A cette lumière diffractée il faut ajouter l'intensité du flux lumineux non diffracté, ramené après focalisation au centre de la figure (Fig. I.5.).

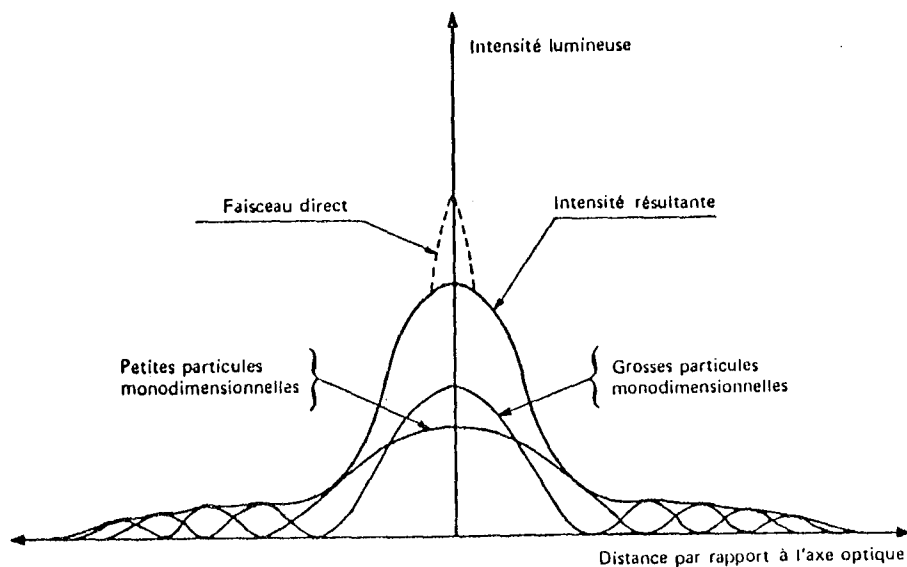
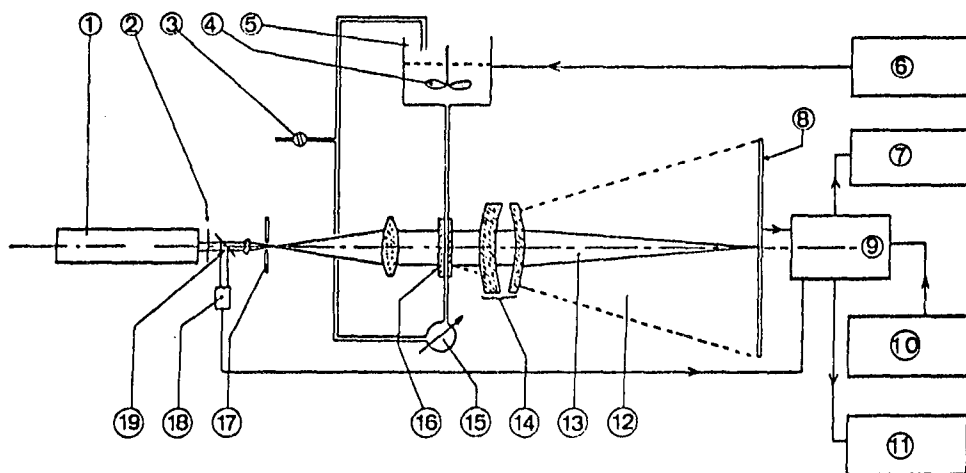
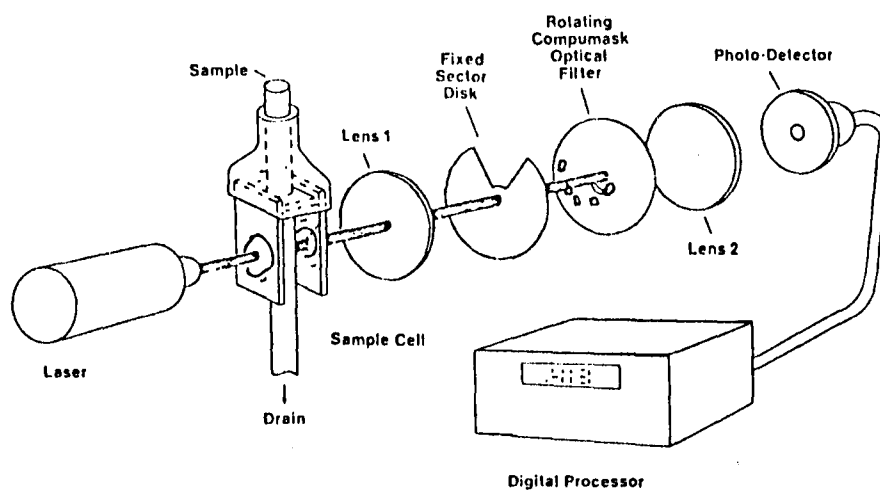


Figure I.5. - Courbe de distribution d'intensité lumineuse diffractée

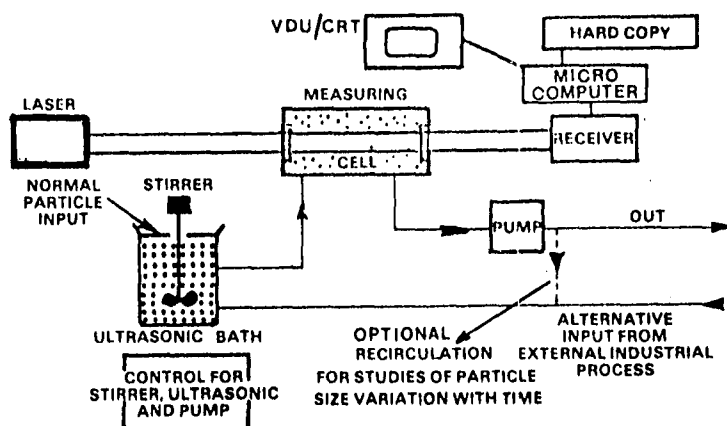


d'après CILAS

- | | | |
|--|--------------------------|--------------------------|
| 1 - Emetteur laser | 8 - Plaque multicellule | 16 - Cuve d'analyse |
| 2 - Modulateur | 9 - Calculateur | 17 - Filtre spatial |
| 3 - Tuyau de vidange | 10 - Panneau de commande | 18 - Cellule de contrôle |
| 4 - Agitateur (hélice) | 11 - Imprimante | 19 - Lame de prélèvement |
| 5 - Cuve à ultrasons | 12 - Faisceau diffracté | |
| 6 - Générateur d'ultrasons | 13 - Faisceau direct | |
| 7 - Ecran de visualisation (matrice de diodes électro-luminescentes) | 14 - Objectif | |
| | 15 - Pompe | |



d'après Leeds & Northrup



d'après Malvern

Figure I.6. - Schémas descriptifs des différents granulomètres à diffraction laser

L'analyse de cette courbe de variation permet d'obtenir la distribution granulométrique de l'échantillon en mesurant l'intensité lumineuse en un certain nombre de points du plan focal judicieusement choisis.

Actuellement, trois constructeurs offrent ce type d'appareils (Fig. I.6.) qui diffèrent sur quelques points de détails relatifs à leur fonctionnement.

Ces appareils, dans l'état actuel de leur commercialisation, sont les seuls qui délivrent une information en temps réel, mais ils sont essentiellement conçus comme des appareils de laboratoire et leur utilisation en tant que capteur est entravée par des problèmes d'échantillonnage, compte tenu de la taille de l'échantillon (quelques grammes).

3.5. Techniques diverses

Diverses autres techniques permettent également de mesurer la taille des particules.

Rappelons pour mémoire l'originalité du principe du compteur de particules Counter (Coulter Counter) (13) (Fig. I.7.).

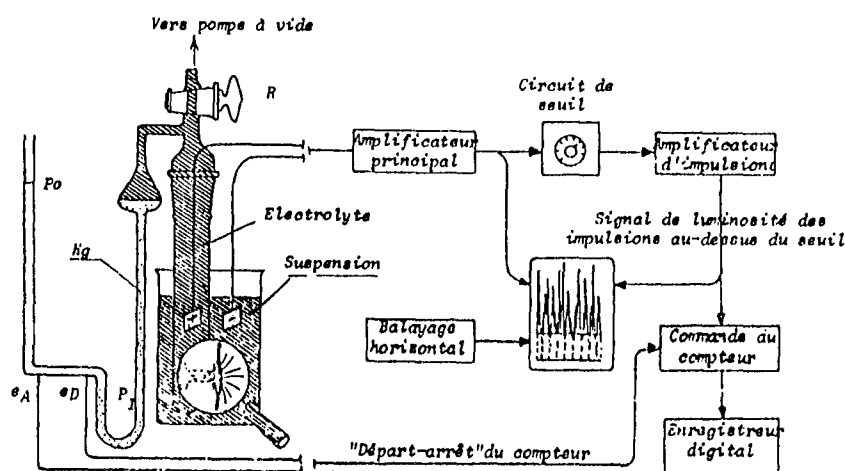


Figure I.7. - Schéma de principe du compteur de particules Counter

L'échantillon à analyser est dispersé et agité en permanence dans un électrolyte. Dans la suspension plonge un tube de verre muni d'une ouverture calibrée. De part et d'autre de la paroi du tube deux électrodes sont baignées par le liquide, la suspension circulant au travers de l'orifice. Pour une concentration convenable, les particules franchiront cet orifice une par une, en déplaçant leur propre volume d'électrolyte ; il s'ensuit donc à chaque passage une variation de la résistance électrique de l'ouverture. Cette variation, amplifiée, permet d'obtenir un signal sensiblement proportionnel au volume de la particule et donc à sa taille. Cet appareil permet l'analyse de la distribution granulométrique d'un échantillon fortement dilué, la plage de mesure se limitant aux fines granulométries (< 20 microns).

Le tableau (Fig. I.8.) présente un résumé des différentes méthodes d'analyses granulométriques. A la lecture de ce tableau, il apparaît :

- d'une part, que la comparaison des résultats obtenus à l'aide de techniques différentes peut s'avérer difficile puisque les grandeurs effectivement mesurées sont différentes,

- d'autre part, un nombre restreint d'appareils utilisant ces différentes techniques peuvent faire l'objet d'une application en tant que capteur. En effet, il semble difficile par exemple d'utiliser un Coulter Counter afin d'effectuer des mesures automatiques de granulométrie du fait de la dilution excessive de l'échantillon. Inversement, le tamisage, qui s'effectue à partir d'un échantillon de quelques hectogrammes, nécessite des manipulations de durée importante et dont l'automatisation n'est pas simple.

A ces grandes méthodes, qui sont susceptibles de donner la courbe granulométrique d'un échantillon, s'ajoutent divers appareils qui ne fournissent qu'un point de cette courbe, mais qui sont de réels capteurs à performances industrielles. Nous citerons les deux principaux à titre d'exemple : le granulomètre à ultra-sons et le granulomètre à hélice.

Méthodes	Appareillage	Plage de mesure en microns	Temps de manipulation	Masse d'échantillon	Grandeur effectivement mesurée	Utilisation en tant que capteur
Tamissage	Série de tamis	0 à 1000	Quelques minutes	Quelques hectogrammes	Plus petite dimension	-
Lévigation	Elutriateur Minemet Bahcot (voie sèche)	5 à 50	Quelques minutes	Quelques grammes	Volume équivalent	-
Sédimentation	Hydromètre	0 à 50	Plusieurs heures	Quelques grammes	Volume équivalent	-
	Pipette	"	"	"	"	-
	Sedigraph	0 à 100	Quelques minutes	"	"	-
	Balance sédimentation	500 à 1000	"	"	"	+
Cyclonage	Cyclosizer	10 à 50	Quelques minutes	"	Volume équivalent	+
Optique	Granulomètre à laser	0 à 200	Quelques secondes	Quelques grammes	Surface équivalente	+
Diverses	Coulter Counter	0 à 20	Quelques minutes	Quelques grammes	Volume équivalent	+

Figure I.8. - Tableau comparatif des différentes méthodes granulométriques

Le granulomètre à ultra-sons, commercialisé par la firme Autometrics (14)(15) repose sur le phénomène d'atténuation des ondes ultrasonores dans une suspension qui dépend de :

- la distance parcourue par les ondes.
- la concentration du produit absorbant.
- la longueur d'onde de l'onde émise.
- la dimension des particules rencontrées par cette onde.

Cette courbe d'atténuation des ultra-sons en fonction de la taille des particules, pour une concentration constante, passe par des maximums et des minimums comme l'indique la figure I.9.

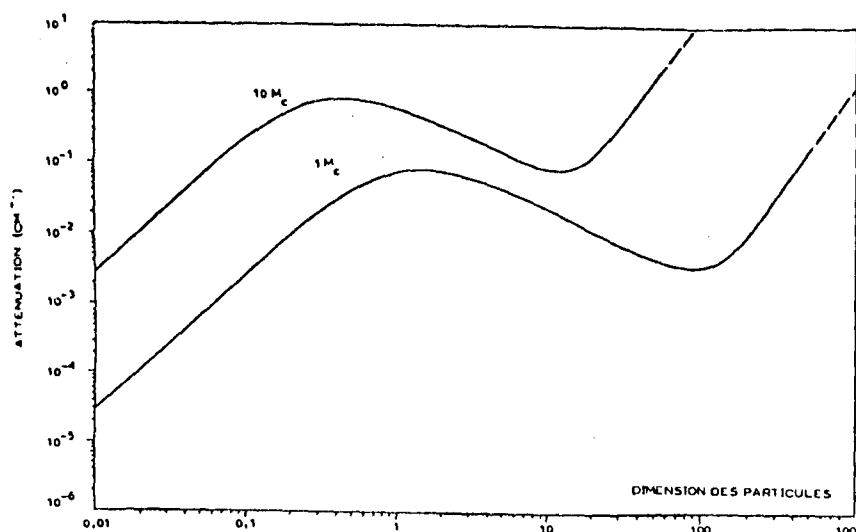


Figure I.9. - Atténuation des ultra-sons en fonction de la taille des particules (en microns)

Ce capteur (Fig. 1.10.) est constitué de deux sondes ultrasonores et de leurs émetteurs disposés de part et d'autre d'une conduite. La pulpe circule dans cette conduite et absorbe partiellement les ondes ultrasonores. La fréquence d'une de ces deux ondes étant choisie de telle manière qu'elle corresponde à une atténuation minimum pour l'ensemble des grains, permet de déterminer une valeur d'atténuation liée au paramètre densité de la pulpe. La deuxième onde permet, en combinant les deux mesures d'atténuation, d'obtenir un point de la courbe granulométrique avec une précision de l'ordre de 5 %.

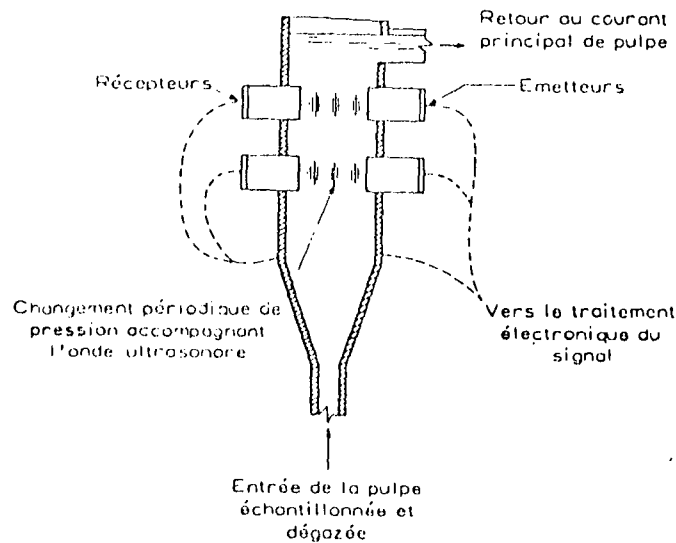


Figure I.10. - Capteur de granulométrie à ultrasons (d'après Autometrics)

Le granulomètre à "hélice" (16), fabriqué par la société Milltronics, repose sur le principe suivant : lorsqu'un flux de pulpe circule dans une tuyauterie présentant une courbure, l'inertie des particules a tendance à les entraîner vers la paroi extérieure, les grosses se dirigeant vers l'extérieur plus rapidement que les fines. Le capteur (Fig. 1.11.) se compose d'un tube dans lequel circule la pulpe et dans lequel on effectue une mesure de densité à l'aide d'une jauge à radio-isotopes permettant de déterminer la masse volumique initiale. L'échantillon pénètre ensuite dans une "hélice" (effectuant la classification) à la sortie de laquelle on réalise une nouvelle mesure de densité en un point choisi, représentatif d'une taille donnée. Cette mesure étant comparée à la densité initiale on obtient un point de la courbe granulométrique.

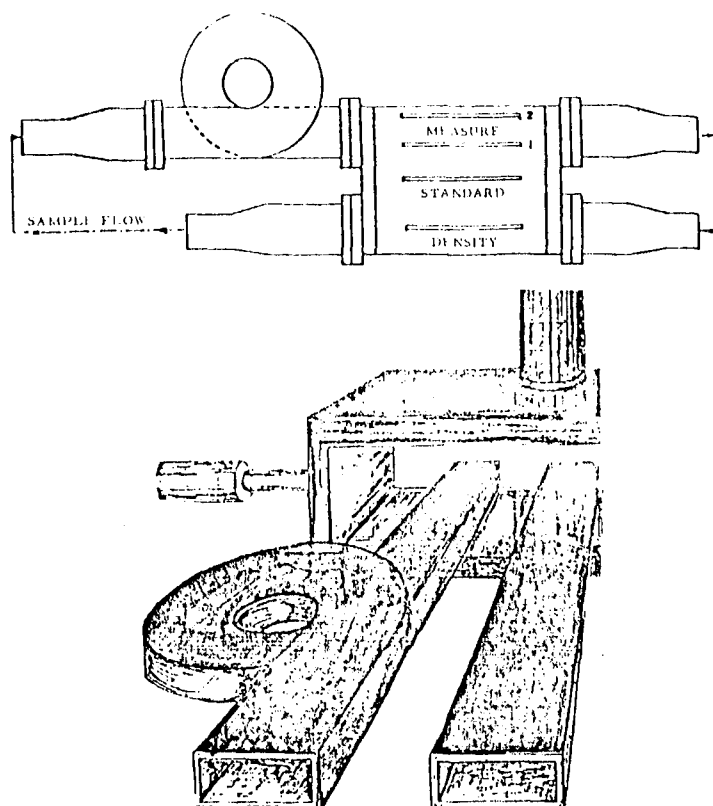


Figure I.11. - Capteur de granulométrie à "hélice" (d'après Milltronics)

En résumé, les principaux problèmes rencontrés lors de la conception d'un granulomètre utilisable "en ligne", dans le domaine du traitement des minerais, résident essentiellement dans la recherche d'un compromis entre la représentativité de l'échantillon et la durée de la mesure qui doit être compatible avec les constantes de temps des différents systèmes (broyeur, classificateur, bêche).

A ces contraintes théoriques s'ajoutent en particulier la robustesse du matériel, sa simplicité ou son autonomie de fonctionnement et la fiabilité de l'information. Ce sont des impératifs qui nous ont conduit à envisager un granulomètre utilisant le principe de la sédimentation sur un échantillon de plusieurs kilogrammes : une pelletée de produit, et autonome tant en ce qui concerne son fonctionnement que le traitement de l'information grâce à un microprocesseur.

II. LE CAPTEUR

1. Approche théorique du phénomène de sédimentation

1.1. Loi de Stokes (17)

Considérons une particule sphérique de diamètre d , de masse m_p , tombant par gravité dans un fluide de densité ρ_f et viscosité μ , l'application des lois de la mécanique donne l'équation suivante :

$$m_p \cdot \frac{dv}{dt} = (m_p - m_f) \cdot g - R \quad (1)$$

où v représente la vitesse de chute de la particule.

m_p , la masse du fluide déplacé correspondant à l'action de la poussée d'Archimède.

g , l'accélération de la pesanteur.

R , la force s'opposant à la chute de la particule, qu'il est usuel d'exprimer sous la forme :

$$- R = \Phi(Re) \cdot S \cdot \frac{\rho_f v^2}{2}$$

où Re est le nombre de Reynolds de la forme :

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho_f}{\mu}$$

S , la surface du maître couple du corps solide, en l'occurrence pour une particule sphérique :

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

- $\Phi(Re)$, la fonction donnant la valeur du coefficient de résistance C que le fluide exerce sur la particule, en fonction du nombre de Reynolds (Fig. II.1.)

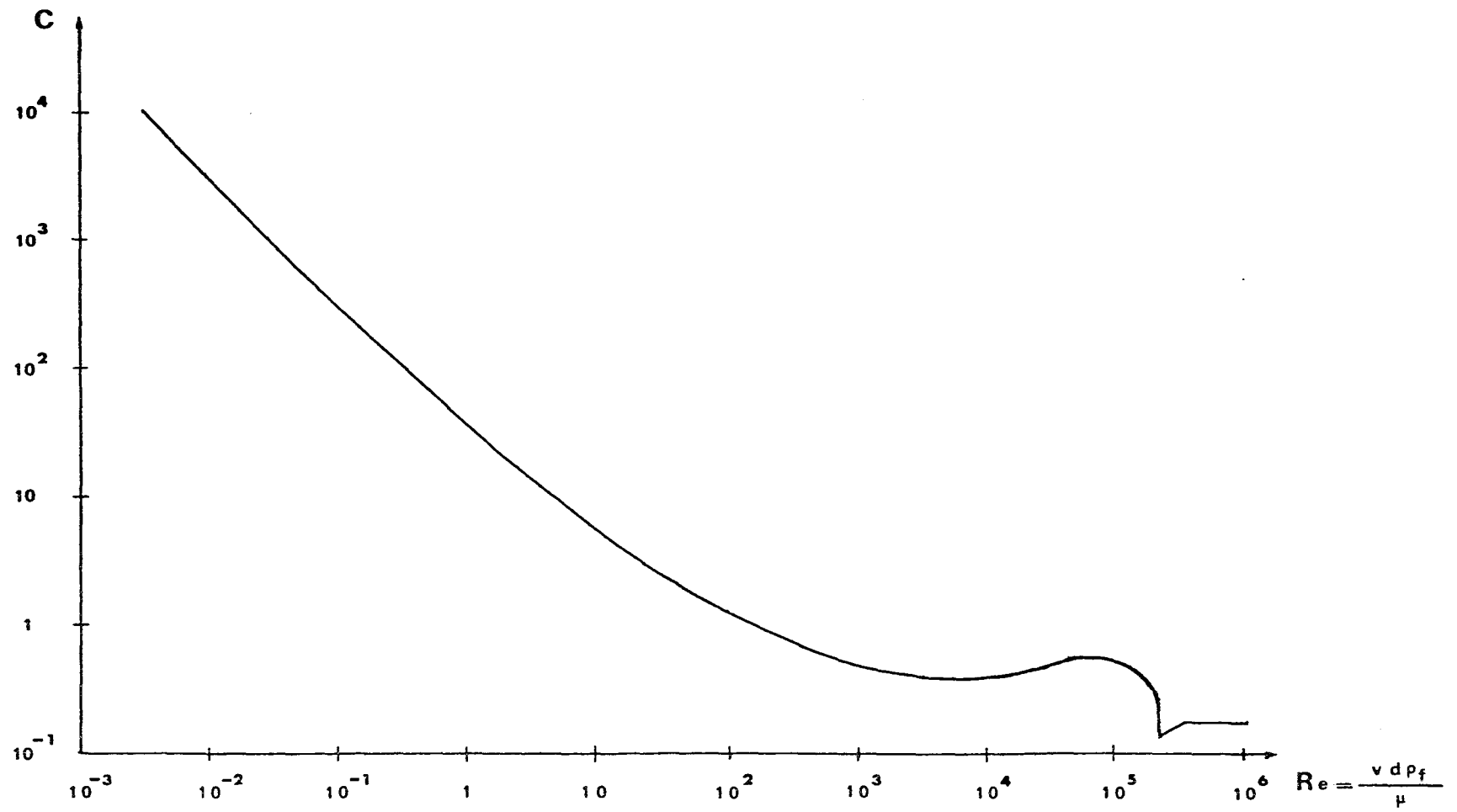


Figure II.1. - Courbe $C = \Phi(Re)$

Si l'on se place dans l'hypothèse d'un régime d'écoulement laminaire ($Re < 1$) on a :

$$\Phi(Re) = \frac{24}{Re}$$

$$= \frac{24}{v \cdot d \cdot \rho_f}$$

d'où : $R = 3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d \cdot v$

De plus : $m_f = \frac{\pi \cdot d^3 \cdot \rho_f}{6}$

$$m_p = \frac{\pi \cdot d^3 \cdot \rho_p}{6}$$

où ρ_p représente la masse volumique de la particule.

Cette formulation suppose que toutes les particules sont de masse volumique identique, ce qui correspond en fait à une pulpe monophasique.

L'équation (1) devient alors :

$$\frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot \rho_p \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot g \cdot 3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot v \cdot d$$

d'où : $\frac{dv}{dt} = \frac{(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p} \cdot g - \frac{18 \cdot \mu \cdot v}{d^2 \cdot \rho_p}$ (2)

Lorsque les particules ont atteint leur vitesse limite de chute v_m , $\frac{dv}{dt} = 0$, l'équation (2) donne la relation entre cette vitesse limite de chute des particules et leur diamètre :

$$d = \sqrt{\frac{18 \cdot \mu \cdot v_m}{(\rho_p - \rho_f) \cdot g}}$$

Remarque :

Ce résultat a été démontré dans l'hypothèse d'un régime d'écoulement laminaire ($Re < 1$), régime caractérisant la sédimentation des particules sphériques de diamètre inférieur à 100 microns (régime de Stokes).

Lorsque les particules présentent un diamètre supérieur à 1 mm, le régime d'écoulement est turbulent ; Re étant compris entre 500 et 20 000, l'expression $\Phi (Re)$ se réduit à une constante :

$$\Phi (Re) \approx 0,4$$

L'équation (2) devient alors :

$$\frac{dv}{dt} = \left(\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_p} \right) \cdot g - \frac{3}{10} \cdot \frac{\rho_f}{\rho_p} \cdot \frac{v^2}{d}$$

d'où :

$$d = \frac{3}{10} \cdot g \cdot \frac{v_m^2}{(\rho_p - \rho_f)}$$

Des particules ayant un diamètre compris entre 100 microns et 1 millimètre sont soumises à un régime d'écoulement turbulent, où régime d'Allen. Dans ce cas, la valeur de :

$$R = \Phi (Re) \cdot S \cdot \frac{\rho_f \cdot v^2}{2}$$

s'obtient en lisant sur une courbe analogue à celle de la figure II.1. la valeur de $\Phi(Re)$ et permet d'exprimer la relation entre le diamètre d et la vitesse de chute v_m .

1.2. Autres études de ce phénomène

De nombreuses équations ont été élaborées, souvent empiriquement, en vue de formaliser le phénomène de sédimentation. OSEEN (1910) (18) proposa une correction de la loi de Stokes, l'étendant au cas des particules de diamètre supérieur à 100 microns sous la forme :

$$v = \frac{-3\mu/2 + \sqrt{36\mu^2/d^2 + 3 \cdot \rho_f (\rho_p - \rho_f) \cdot g^2 \cdot d/2}}{(9/4) \rho_f}$$

RUBEY (1933) (19) combina les lois de Stokes et de Newton en une équation longtemps considérée comme universelle.

Plus récemment, les travaux de BERTHOIS et GENDRE (20) ont mis en évidence les résultats suivants :

- Pour des dimensions nominales de grains inférieurs à 0,009 cm (la dimension nominale ou diamètre nominal d_n correspondant pour ces auteurs à 1,15 fois le vide de maille du tamis qui a retenu les particules), les vitesses de chute sont correctement exprimées par la loi de Stokes :

$$v = \frac{9}{18} \frac{(\rho_p - \rho_f)}{\mu} d_n^2$$

- Pour des dimensions nominales supérieures à 0,009 cm, ces auteurs ont montré que les résultats expérimentaux pouvaient être représentés par des formules empiriques dépendant du diamètre nominal des grains :

$.009 \leq d_n \leq .052$	$v = 334 d_n^{1.309}$
$.052 \leq d_n \leq .152$	$v = 67.795 d_n^{0.76103}$
$.152 \leq d_n \leq 2.043$	$v = 43.33 d_n^{0.52319}$

Les recherches de GIBBS-MATTHEWS et LINK (21) ont également permis la détermination empirique d'une relation entre vitesse de chute d'une particule (en l'occurrence des grains de quartz) et son rayon r :

$$v = \frac{-3\mu + \sqrt{9\mu^2 + gr^2 \rho_f (\rho_p - \rho_f) (0.15476 + 19181r)}}{\rho_f (0.011697 + 14881r)}$$

La figure II.2. illustre ces différentes modélisations du phénomène de sédimentation. On remarque effectivement que la loi de Stokes n'est applicable qu'à la détermination de la vitesse de chute de particules inférieures à 100 microns. Sur cette figure nous avons porté quelques points expérimentaux, relevés lors de nos différentes manipulations, qui sont tout à fait en accord avec les travaux de Berthois-Gendre ou avec ceux de Matthews et Link.

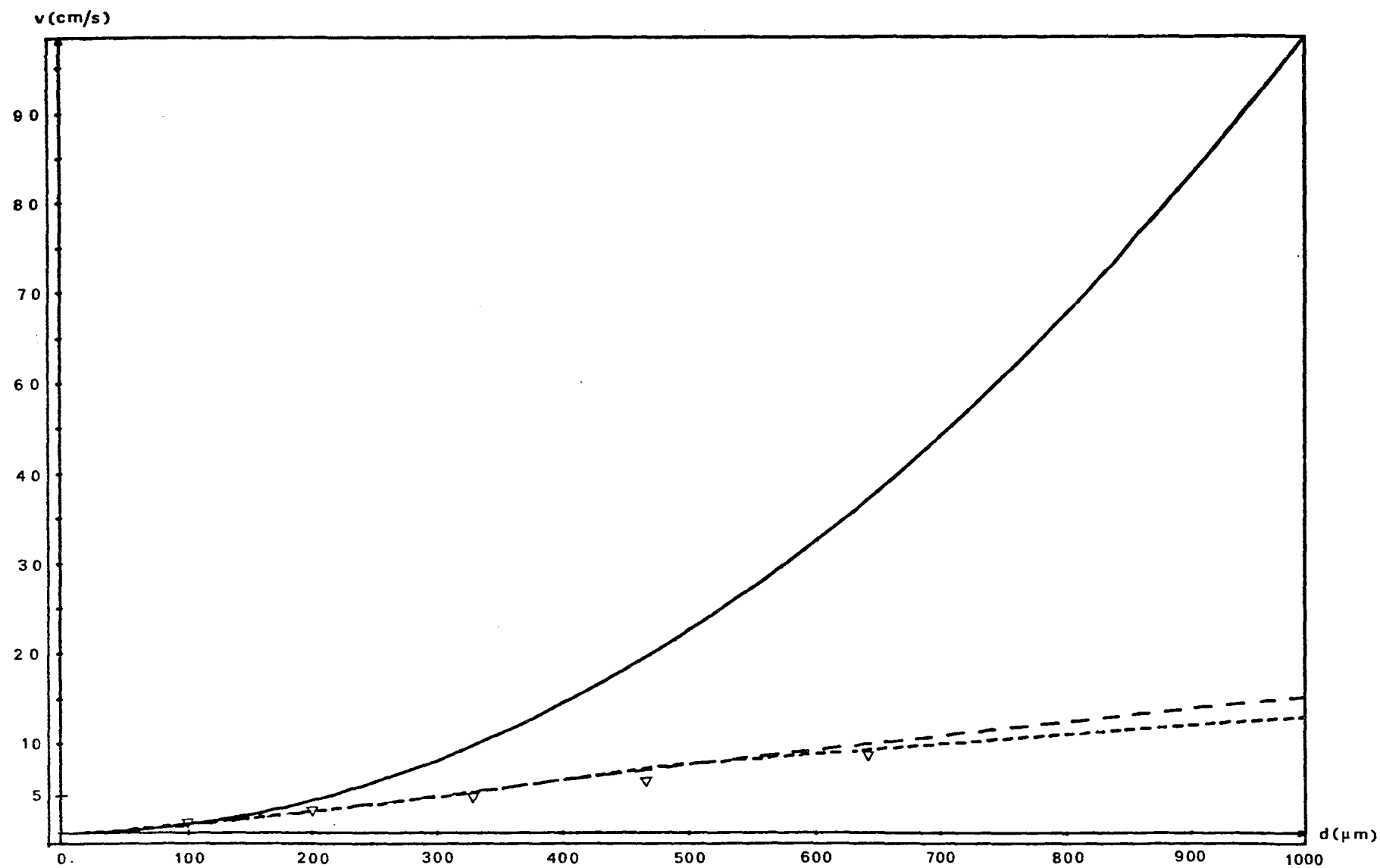


Figure II.2. - Comparaison des différentes fonctions $v = f(d)$

— Loi de Stokes

- - - Modèle de Gibbs

- - - Modèle de Berthois-Gendre

▽ Points expérimentaux

2. Le granulomètre

2.1. Généralités

Le capteur de granulométrie que nous avons réalisé a été conçu en vue d'une implantation dans une usine de traitement des minerais, c'est-à-dire dans l'hypothèse d'une automatisation d'une unité de broyage-classification. Il doit permettre l'élaboration d'un signal représentatif de la granulométrie de la pulpe en un point quelconque du circuit.

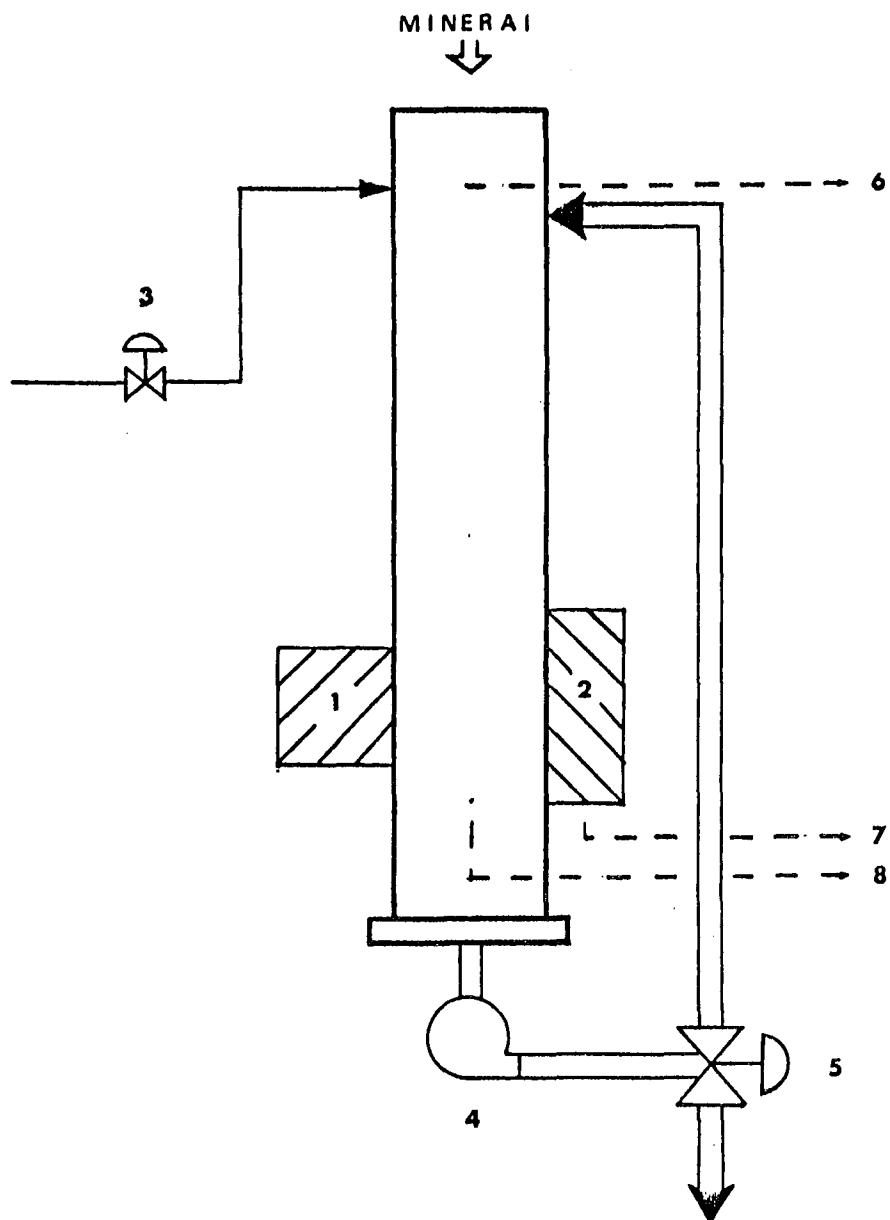
De ce fait, cet appareil doit répondre à certaines exigences :

- L'échantillon traité doit être représentatif des quantités de minerai mises en jeu dans une chaîne de traitement de minerai, c'est-à-dire qu'il doit peser quelques kilogrammes.
- La courbe granulométrique doit pouvoir être obtenue "en continu" par rapport aux constantes de temps du système (de l'ordre de quelques minutes en général).
- La plage de mesure doit s'étendre approximativement en 50 et 1000 microns, cette plage couvrant la plupart des applications minéralurgiques.
- Cet appareil doit également être "robuste" afin de résister à l'agressivité du milieu.
- Ce granulomètre doit être autonome, il doit donc être piloté par un microprocesseur qui, en définitive, délivre un signal électrique représentatif de la granulométrie de l'échantillon.

Le capteur de granulométrie que nous avons mis au point permet donc la détermination de la granulométrie d'une pulpe monophasique grâce à la corrélation entre vitesse de sédimentation et diamètre des particules.

2.2. Fonctionnement (Fig. II.3.)

Le capteur est principalement constitué d'une colonne de sédimentation formée d'un tube d'acier comportant un fond conçu en vue d'éviter l'obstruction ; son diamètre est d'environ 210 mm, sa hauteur de 1 m.



- | | |
|---------------------------------|--------------------------|
| 1. Source radioactive | 5. Vanne de vidange |
| 2. Chambre d'ionisation | 6. Indication de niveau |
| 3. Electrovanne d'arriyée d'eau | 7. Mesure de densité |
| 4. Pompe d'homogénéisation | 8. Mesure de température |

Figure II.3. - Schéma de principe du granulomètre à sédimentation

L'échantillon de minerai est introduit par la partie supérieure de la colonne. Un ajout d'eau commandé par une électrovanne et contrôlé par un capteur de niveau permet d'obtenir un remplissage à volume constant.

L'homogénéité de la pulpe est obtenue à l'aide d'une pompe qui aspire la pulpe à la base de la colonne et la refoule au sommet de cette même colonne. Cette pompe permet en outre la vidange et le nettoyage de la cellule de mesure.

De plus, dans la phase expérimentale, une électrovanne, disposée à mi-hauteur de la colonne, assure la vidange partielle de celle-ci, en conservant le même échantillon de minerai, ce qui nous a permis de recommencer un grand nombre de fois la même manipulation.

2.3. Principe de mesure

La courbe granulométrique est obtenue par interprétation d'une mesure de densité. Cette mesure de densité, effectuée à l'aide d'un densimètre à rayon gamma, permet d'observer l'évolution de la densité de la pulpe pendant la sédimentation des particules.

Positionné à une hauteur h , distante d'environ 30 cm du fond de la cellule, le densimètre enregistre, en fonction du temps, la décroissance de la densité de la pulpe à l'intérieur de la colonne puisque les particules sédimentant, elles quittent plus ou moins rapidement (suivant leur masse, donc leur taille) le domaine compris entre le plan de mesure et le sommet de la cellule de sédimentation. La pulpe à l'instant initial étant homogène, l'ensemble des particules d'une même taille est réparti régulièrement dans la colonne et se comporte comme un "écran" (Fig. II.4.).

Toutes ces particules tombent avec la même vitesse. On peut donc considérer que cet écran se déplace verticalement, à vitesse constante, devant le densimètre ; lorsque la particule, qui était initialement située le plus haut passe devant le densimètre, on peut dire que toutes les particules de taille supérieure ou égale à elle sont déjà sédimentées.

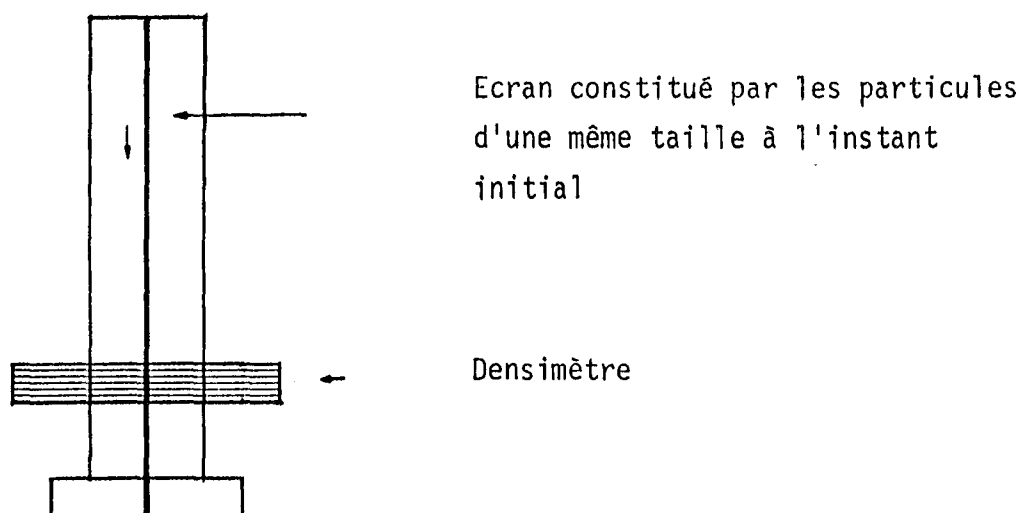


Figure II.4. - Principe de fonctionnement du granulomètre

2.3.1. Le densimètre

Le densimètre à rayons gamma utilisé dans notre manipulation, commercialisé par la firme Schlumberger, est constitué de deux éléments (22) :

- l'ensemble émetteur, ou source radioactive, permettant la production de rayonnement gamma par désintégration d'un élément de césium 137. Cette source radioactive enfermée dans un container en plomb à une intensité de 500 millicuries (cf. Annexe I).

- l'ensemble récepteur, ou chambre d'ionisation qui permet de détecter les rayons qui n'ont pas été arrêtés par les particules en suspension dans la pulpe, le rayonnement reçu par la chambre d'ionisation est donc fonction de la densité du produit (23). Cette chambre d'ionisation est constituée d'un container en acier rempli d'argon sous pression de 150 Atm ; l'utilisation d'un gaz lourd sous pression augmentant les chances de collision entre un photon et une molécule de gaz. Cette chambre d'ionisation est maintenue à une température de 45°C. Le rayonnement pénétrant le gaz produit des paires d'électrons (-) ions (+), les électrons sont attirés par l'électrode centrale (Fil conducteur) et, de ce fait, vont créer un courant i (Fig. II.5.).

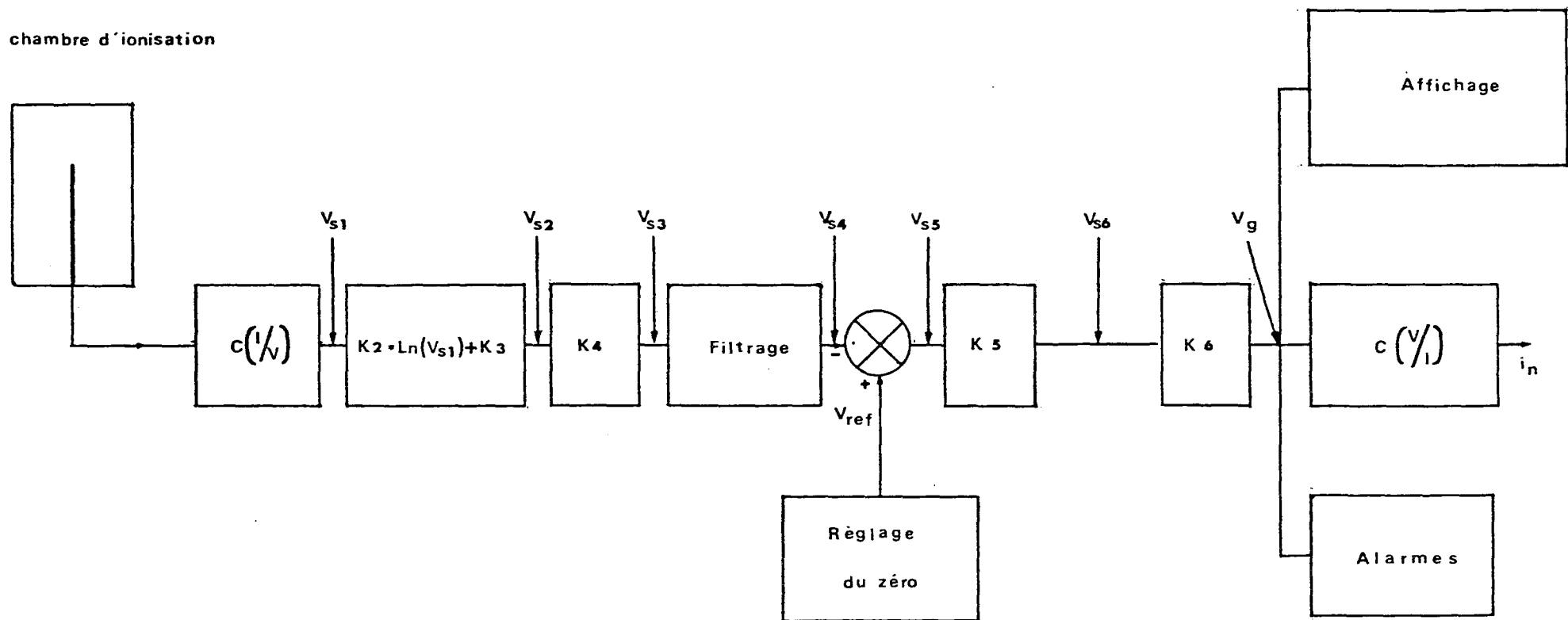


Figure II.5. - Chaîne de mesure du densimètre

Ce courant diminue lorsque la densité augmente et inversement, selon une loi exponentielle du type :

$$i = I_0 e^{-\frac{d}{D}}$$

pour laquelle d est la densité du matériau

D une densité de référence

I_0 le courant détecté en l'absence de matériau.

Le courant recueilli étant faible, de l'ordre de 10^{-8} A à 10^{-13} A, un préamplificateur transforme cette information délivrée sous haute impédance en une tension V_{s1} délivrée sous basse impédance. Cette tension V_{s1} est de la forme :

$$V_{s1} = GV_0 e^{-\frac{d}{D}}$$

où G représente le gain de l'amplificateur,

avec $V_0 = RI_0$, R étant la résistance de charge.

Le but de l'étage suivant est de délivrer une tension V_{s2} directement proportionnelle à la densité en utilisant la propriété que possèdent certains semi-conducteurs, à savoir, pour un transistor de type NPN, le courant de collecteur est lié à la tension base-émetteur par une loi logarithmique. Cette tension V_{s2} est amplifiée en une tension V_{s3} à l'aide d'un amplificateur de gain K_4 , puis filtrée. Un additionneur - soustracteur permet d'effectuer le réglage de la valeur de la densité minimale qu'il est possible de mesurer. Dans notre application, cette densité minimale correspond bien entendu à celle de l'eau pure.

L'étage suivant, constitué d'un amplificateur de tension à gain variable, permet de fixer la densité maximale mesurable (réglage de la plage de mesure). Cette densité maximale équivalente à 90 % de la pleine échelle correspond au signal délivré par le densimètre lorsqu'un échantillon de 5 kg de sable de Fontainebleau est maintenu en suspension par brassage à l'aide de la pompe. L'amplification finale est réalisée à l'aide de deux étages : le premier délivre une tension V_g applicable à un galvanomètre situé sur la face avant de l'appareil, l'étage suivant assure une conversion tension - courant afin d'obtenir un signal i_N , normalisé 4 - 20 mA, directement proportionnel à la densité mesurée.

2.3.2. Mesure de la température

A cette mesure de densité est associée une mesure de température permettant, par l'intermédiaire d'une thermistance placée au niveau du densimètre, de déterminer la température du fluide de sédimentation. Cette mesure de température nous permet d'obtenir des informations concernant la viscosité du fluide, paramètre qui influe sur la vitesse de sédimentation des particules. La figure II.6 représente les variations de ce paramètre viscosité en fonction de la température du fluide, en l'occurrence l'eau. Cette courbe a été modélisée sous la forme :

$$\mu = e^{(a + b.\theta + c.\theta^2 + d.\theta^3)}$$

où θ représente la température Celsius comprise entre 0 et 100°,

avec $a = .573$

$b = -322 \cdot 10^{-1}$

$c = .208 \cdot 10^{-3}$

$d = .705 \cdot 10^{-6}$

Ce modèle nous donne une précision largement compatible avec la précision globale requise.

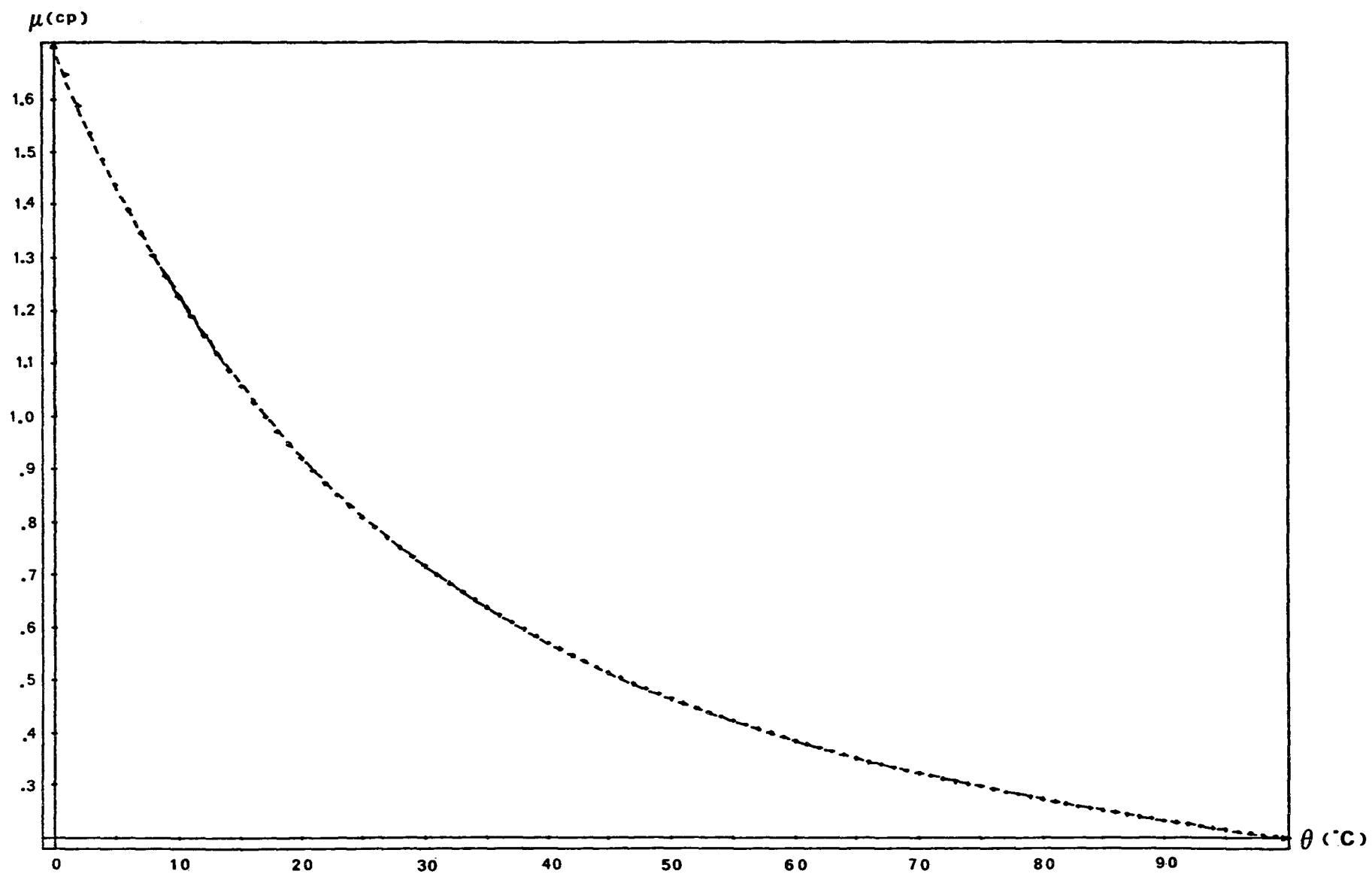


Figure II.6 - Influence de la température sur la viscosité de l'eau

III. MODELISATION DU PROCESSUS DE SEDIMENTATION

1. Introduction

Les différentes méthodes d'analyses granulométriques sont basées, comme nous l'avons vu, sur des principes physiques différents et prennent en compte des paramètres très différents.

Une démarche pragmatique s'impose donc à chaque détenteur de granulomètre, dans l'hypothèse où il travaille avec des matériaux de même type, il appelle granulométrie le résultat de classement obtenu à l'aide de son appareil qui est dans ces conditions une information intrinsèque. Il peut également étalonner son appareil à l'aide d'une autre méthode, la granulométrie indiquée est alors conforme à cette méthode.

C'est ce dernier principe que nous avons employé en déterminant, par tamisage, différentes tranches granulométriques qui nous ont servi de référence en vue de la modélisation du phénomène de sédimentation, utilisé comme moyen d'appréciation de la granulométrie.

Nous avons ainsi défini initialement 17 tranches, numérotées de 1 à 17, et couvrant la plage 0 à 1189 microns, répertoriées dans le tableau présenté p. 34.

Dans chacune de ces tranches nous avons rassemblé une masse de quelques kilogrammes de sable de Fontainebleau ou de scheelite, minerais de densité 2,65.

Nous avons alors entrepris deux campagnes de mesure :

- la première, destinée à l'étude du phénomène de sédimentation d'une seule tranche granulométrique.
- la deuxième, permettant l'étude de la sédimentation des particules contenues dans un échantillon constitué de plusieurs tranches granulométriques

Auparavant, nous avons couplé la manipulation au calculateur SOLAR 16-40 du laboratoire, ce qui nous a permis d'effectuer plusieurs centaines d'essais de sédimentation dans de bonnes conditions de répétabilité et de fiabilité, et de mettre en mémoire l'ensemble de nos résultats.

N°	Tranche (microns)	Nature
1	0 - 74	Quartz
2	74 - 88	"
3	88 - 105	"
4	105 - 125	"
5	125 - 149	"
6	149 - 177	"
7	174 - 210	"
8	210 - 250	"
9	250 - 297	Scheelite
10	297 - 350	"
11	350 - 420	"
12	420 - 500	"
13	500 - 590	"
14	590 - 715	"
15	715 - 840	"
16	840 - 1000	"
17	1000 - 1189	"

2. Couplage de la manipulation avec le calculateur (24)

2.1. Matériel informatique

Ce calculateur, largement répandu dans l'industrie, permet la conduite de processus en temps réel (Annexe2) dans de bonnes conditions. Notre SOLAR est équipé d'une mémoire de 256 Kmots et son environnement est constitué des périphériques suivants :

- 2 unités de 2 disques de 5 mégaoctets.
- 1 unité de disque souple.
- 1 lecteur de cartes.
- 2 imprimantes.
- 8 consoles de visualisation.
- 1 ensemble graphique :
 - . console graphique
 - . table traçante
 - . table à digitaliser

En outre, ce calculateur permet une interaction avec le monde extérieur par l'intermédiaire d'entrées - sorties industrielles, se répartissant de la manière suivante :

- 24 entrées analogiques
- 8 sorties analogiques
- 32 entrées numériques
- 32 sorties numériques

La gestion optimale de ces différents périphériques est assurée par le logiciel MPES (Multi Programming Executive System) conçu pour réaliser dans notre configuration les fonctions suivantes :

- temps partagé
- traitement par lots
- temps réel utilisateur

2.2. Connexion calculateur - granulomètre

Les liaisons entre le calculateur et le prototype de granulomètre permettent l'exécution automatique des commandes suivantes :

- remplissage en eau,
- homogénéisation de la pulpe,
- acquisition des mesures,
- impression et stockage sur disque des résultats caractéristiques d'un essai.

Ces différentes opérations sont effectuées grâce à la fonction temps réel, par l'intermédiaire de modules de programmes appelés tâches, produites sur disques par l'utilisation des processeurs du logiciel de base, et ultérieurement chargées en mémoire, puis activées selon un échéancier préalablement défini par l'opérateur.

Lors du déroulement d'un essai de sédimentation, les différentes tâches s'articulent selon le schéma III.1.

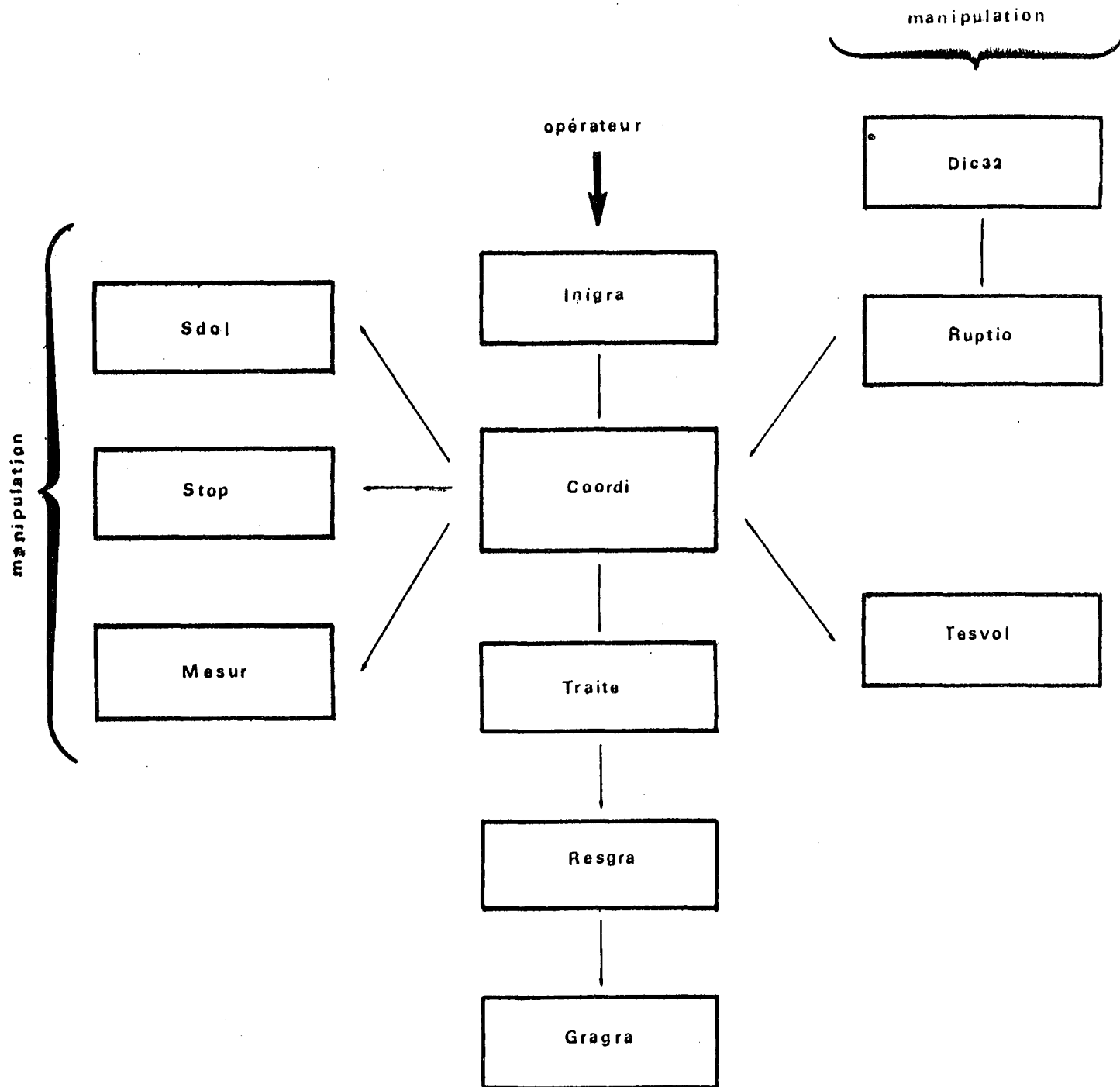


Figure III.1. - Interaction des différentes tâches permettant la conduite, par ordinateur, de la manipulation

Les tâches SDOL, STOP, DIC32 et RUPTIO, dénommées tâches de service, permettent respectivement les actions suivantes :

- SDOL : activation ou désactivation d'une sortie digitale.
- STOP : arrêt de l'exécution d'une tâche.
- DIC32, RUPTIO : traitement des interruptions, prises en compte des entrées numériques.

Les autres tâches propres à l'application réalisent les fonctions suivantes :

- INIGRA : initialisation des divers paramètres, dialogue homme - machine décrivant les caractéristiques de l'essai (nombre de tranches, masse par tranche).

- COORDI : coordination des différentes tâches, actions sur les différents actionneurs permettant le remplissage, l'homogénéisation et la vidange de la cellule.

- TESVOL : remplissage à volume constant.

- MESUR : acquisition des mesures de densité et de température.

- TRAITE : traitement de ces mesures, filtrage des courbes, stockage dans un fichier des caractéristiques de l'essai.

- RESGRA et GRAGRA : impression et sortie sur matériel graphique des courbes de sédimentation relatives à chaque essai.

Dans les paragraphes suivants nous justifions l'existence de ces tâches et leur rôle.

3. Première campagne de mesure

Cette première campagne de mesure nous a permis d'entreprendre une modélisation du processus de sédimentation, c'est-à-dire qu'à partir des données expérimentales nous avons effectué une formulation mathématique de ce phénomène.

Pour ce faire, nous avons observé la sédimentation d'échantillons de minerais (quartz ou scheelite) composés d'une seule tranche granulométrique.

Cette campagne, s'étendant sur plusieurs mois, a permis la réalisation de plus de 200 essais de sédimentation et, grâce à l'utilisation du calculateur, dans de bonnes conditions de reproductibilité de la manipulation ; en effet les actions telles que remplissage, pompage, prises d'informations, sont supervisées par le calculateur.

3.1. Déroulement d'un essai de sédimentation

Un essai s'organise chronologiquement de la façon suivante :

- l'opérateur pèse et dépose dans la colonne de sédimentation l'échantillon de minerai, ensuite il précise et programme les caractéristiques de l'essai :

- . nombre de tranches,
- . numéros des tranches,
- . masse par tranches,
- . temps de pompage,
- . période d'échantillonnage.

- la manipulation est ensuite directement commandée par le calculateur :

- . remplissage de la colonne,
- . homogénéisation de la pulpe,
- . prise de mesure,
- . arrêt de la manipulation et traitement des données.

Les données (environ 2000 mesures de densité sont effectuées lors de chaque essai) sont filtrées et compactées en un ensemble de 100 points représentatifs de la courbe de décroissance de la densité, en fonction du temps.

Ces 100 points sont stockés dans un fichier contenant toutes les caractéristiques de tous les essais effectués. A ces mesures de densité s'ajoutent une détermination de la température et de la viscosité du fluide de sédimentation.

- enfin, l'opérateur a la possibilité d'obtenir une visualisation des courbes obtenues ainsi qu'une trace écrite résumant les caractéristiques de l'essai (Fig. III.2.).

La figure III.3. montre la courbe de variation de densité obtenue lors de la sédimentation d'un échantillon de sable de Fontainebleau de 3 kgs. On observe sur cette courbe la phase de pompage caractérisée par une densité constante, puis le "temps mort" pendant lequel les particules les plus grosses parcourent la distance comprise entre le point le plus haut de la colonne et la fenêtre de mesure. L'allure de cette courbe "bruitée" nous a conduit à filtrer les informations du densimètre à l'aide d'un filtre polynomial numérique du 3ème ordre sur les 10 derniers points. Le résultat acquis à cette étape est suffisant, il est présenté à titre d'exemple en trait pointillé sur cette même figure.

Nous avons effectué un nombre d'essais tels qu'ils nous ont permis de déterminer l'influence des paramètres suivants :

- taille des grains,
- masse de l'échantillon,
- température du fluide de sédimentation.

La plage de température explorée est comprise entre 5 et 45°C, avec des masses de minerais s'échelonnant entre 1 et 4,5 kg.

Le tableau (Fig. III.4.) résume la totalité des essais effectués lors de cette campagne de mesure.

3.2. Résultats

3.2.1. Influence de la température

Les mesures de densité effectuées à l'aide du densimètre à rayon γ étant dépendantes de la température du fluide, nous avons normalisé les résultats, c'est-à-dire que nous avons, par un traitement des données, ramené toutes les températures à 20°C.

Pour ce faire, nous avons analysé les variations du signal densité, liées à la température et relevées en fin de sédimentation, lorsque toutes les particules se sont déposées.

ESSAI NUMERO : -2331

 REALISE LE 19-10-1982

POIDS TOTAL----- 3000

ECHANTILLON GRANULOMETRIQUE:

I I I	TRANCHE	I I I	MASSE PAR TRANCHE	I I I	% PAR TRANCHE	I I I	CUMULE PASSANT	I I I
I	0- 74	I	0	I	0.000	I	0.000	I
I	74- 88	I	0	I	0.000	I	0.000	I
I	88- 105	I	0	I	0.000	I	0.000	I
I	105- 125	I	0	I	0.000	I	0.000	I
I	125- 149	I	0	I	0.000	I	0.000	I
I	149- 177	I	1000	I	33.333	I	33.333	I
I	177- 210	I	1000	I	33.333	I	66.667	I
I	210- 250	I	0	I	0.000	I	66.667	I
I	250- 297	I	0	I	0.000	I	66.667	I
I	297- 350	I	1000	I	33.333	I	100.000	I
I	350- 420	I	0	I	0.000	I	100.000	I
I	420- 500	I	0	I	0.000	I	100.000	I
I	500- 590	I	0	I	0.000	I	100.000	I
I	590- 715	I	0	I	0.000	I	100.000	I
I	715- 840	I	0	I	0.000	I	100.000	I
I	840-1000	I	0	I	0.000	I	100.000	I
I	1000-1189	I	0	I	0.000	I	100.000	I

TEMPS DE POMPAGE-- 190

TEMPS DE MESURE-- 240

PERIODE D ECHANTILLONAGE---- 200

TEMPERATURE---25.130 C.

VISCOSITE----- 0.887 CP

VALEUR 100%---- 8681.00
 VALEUR 0%----- 5489.00

Tableau III.2. - Tableau résumant les caractéristiques
 d'un essai de sédimentation

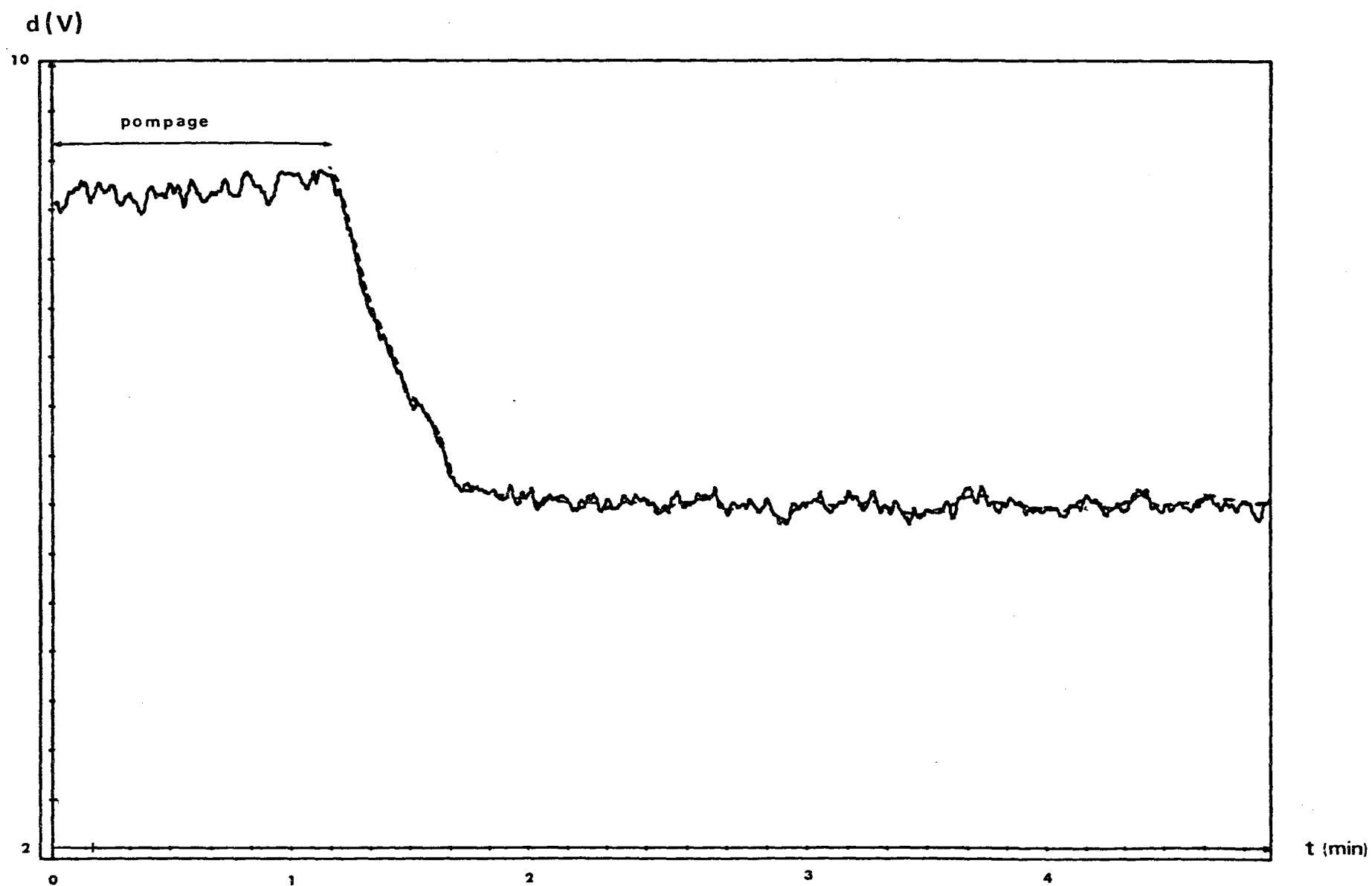


Figure III.3. - Variation de la densité en fonction du temps lors de la sédimentation d'un échantillon de 3 kg de sable

N° de tranche	Tranche (microns)	Masse d'échantillon utilisée (kg)	Nombre d'essais en température	Nombre de jours
7	177-210	2.5, 3, 3.5, 4, 4.5	9, 7, 6, 6, 6	0
8	210-250	1, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5	6, 5, 5, 5, 5, 6, 5	3
9	250-297	1, 2, 2.7	5, 5, 4	8
6	149-177	1, 2, 2.5, 3, 3.5, 4.2	5, 5, 4, 5, 4, 4	12
5	125-149	1, 2, 2.5, 3, 3.6	5, 5, 4, 5	17
4	105-125	1, 2, 2.5, 2.9	5, 5, 5, 5	29
3	88-105	9	5	35
10	297-350	1, 1.6	5, 5	38
11	350-420	1, 2	5, 5	44
12	420-500	1, 2, 3	5, 5	57
12	500-590	1, 2, 2.4	5, 5, 5	63
14	590-715	1, 2	5, 5	65
15	715-840	1, 1.7	5, 5	72

Figure III.4. - Tableau récapitulatif des différents essais effectués

Les 200 dernières mesures de densité moyennées permettent la détermination de cette densité de référence d_0 .

La figure III.5. montre les variations de d_0 en fonction de la température θ , et ce pour plusieurs séries d'essais. Il apparaît que pour chaque tranche i la variation de d_0 en fonction de θ peut être modélisée par une fonction du type :

$$d_{0i} = a_i \cdot \theta + b_i$$

où i caractérise le numéro de la tranche considérée.

Les coefficients a_i peuvent être considérés comme constants, quelle que soit la tranche i considérée. Par contre, les termes b_i , dans une première analyse, semblent dépendre de la tranche granulométrique. En fait, ces différentes séries d'essais se déroulant dans les mêmes conditions opératoires sur une durée de 3 mois, nous avons recherché quel paramètre lié à des dérives ou des vieillissements pouvait entraîner de telles variations du signal de densité.

Ainsi, la figure III.6. représente les variations du paramètre d_{20i} , densité de référence d_{0i} normalisée à 20°C, calculées pour la tranche i en fonction du "jour de manipulation" ; le "jour" 0 étant associé à la date du début de la campagne de mesure.

Le modèle mathématique de ce phénomène est également de type linéaire :

$$d_{20i} = a \cdot J + b$$

où J représente le jour de manipulation.

Le bloc-diagramme (Fig. III.7) illustre l'évolution du paramètre d_0 en fonction de la température du fluide et du phénomène de vieillissement. Dans l'espace orthonormé à 3 dimensions : (d_0 , température, date de la manipulation) la surface obtenue s'apparente à un plan, ce qui nous a conduit à modéliser l'influence de ces deux phénomènes distincts sur les variations de d_0 sous la forme :

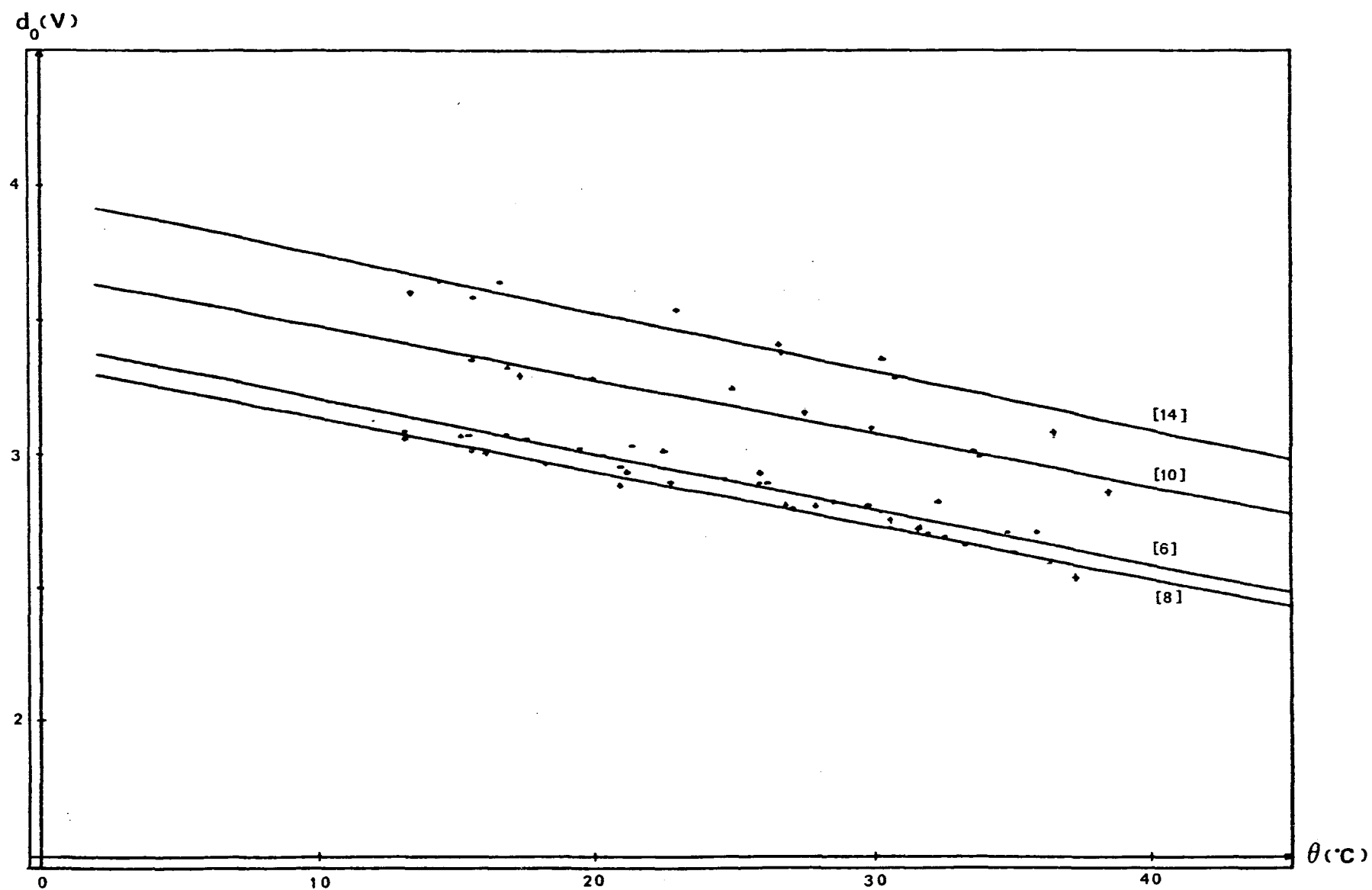


Figure III.5. - Influence de la température sur le signal de densité d_0
 [i] : numéro de série concernée

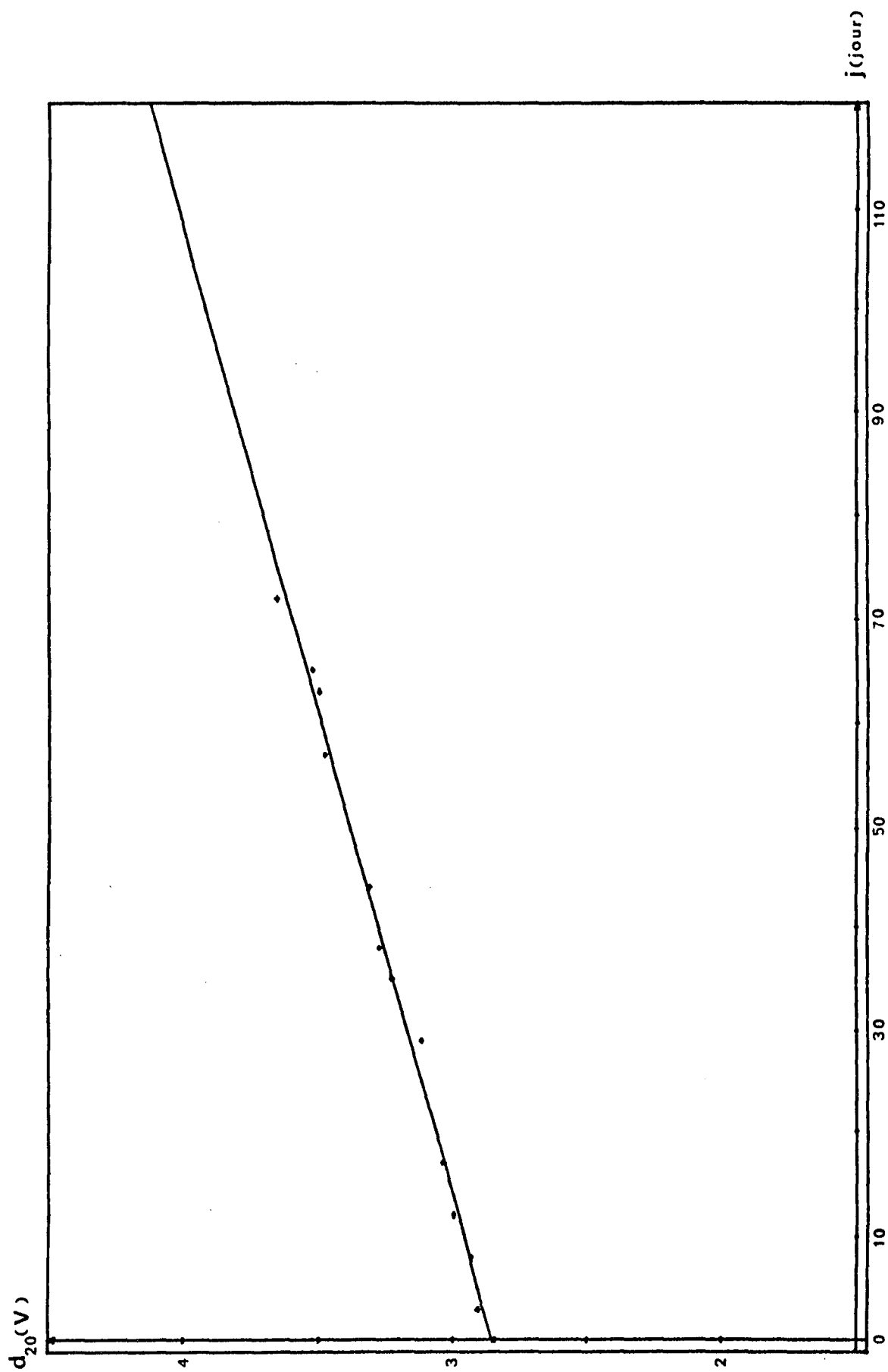


Figure III.6. - Influence du paramètre "Jour" sur le signal de densité d_{20}

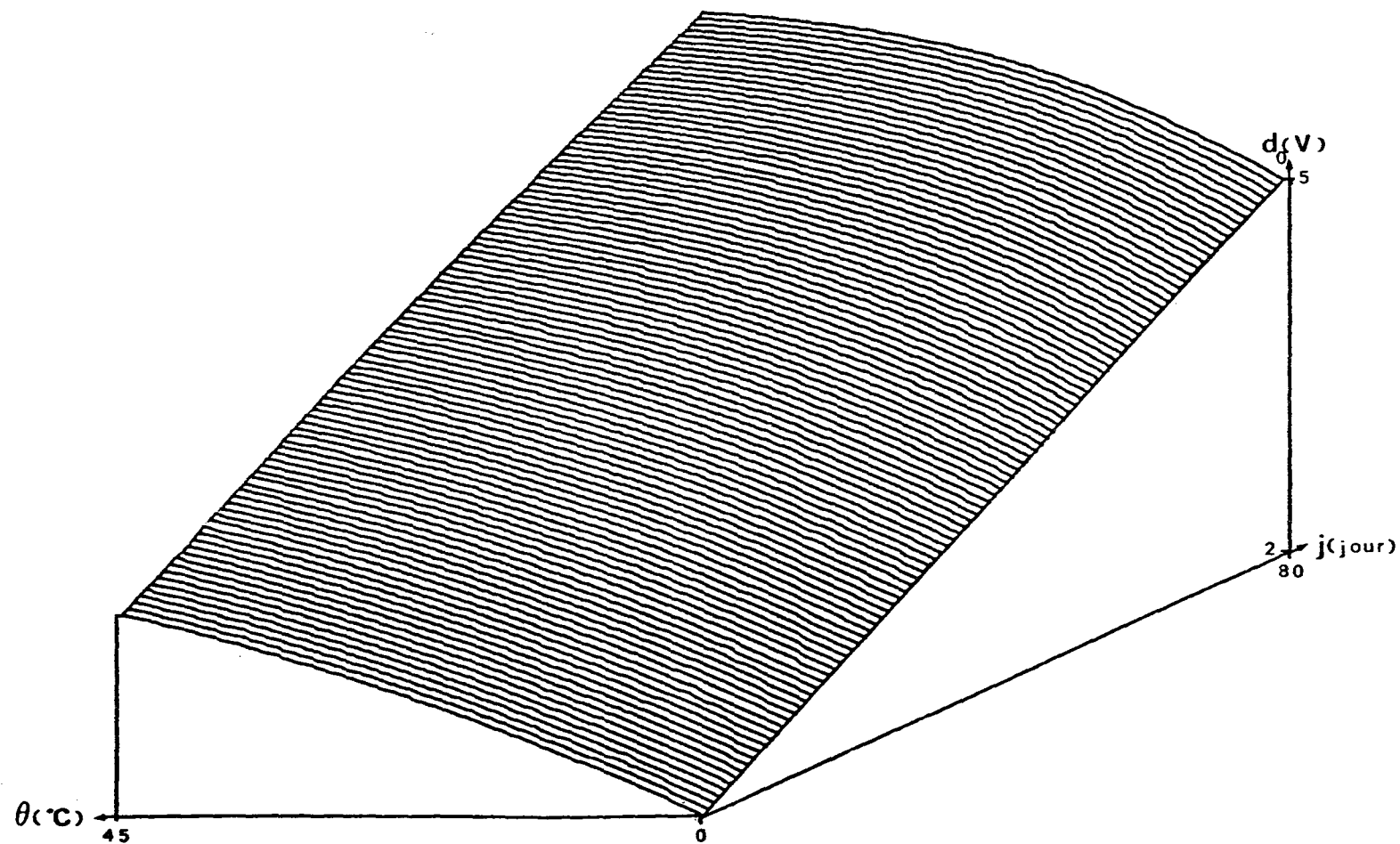


Figure III.7. - Influence des paramètres θ et J sur le signal représentatif de la densité du fluide

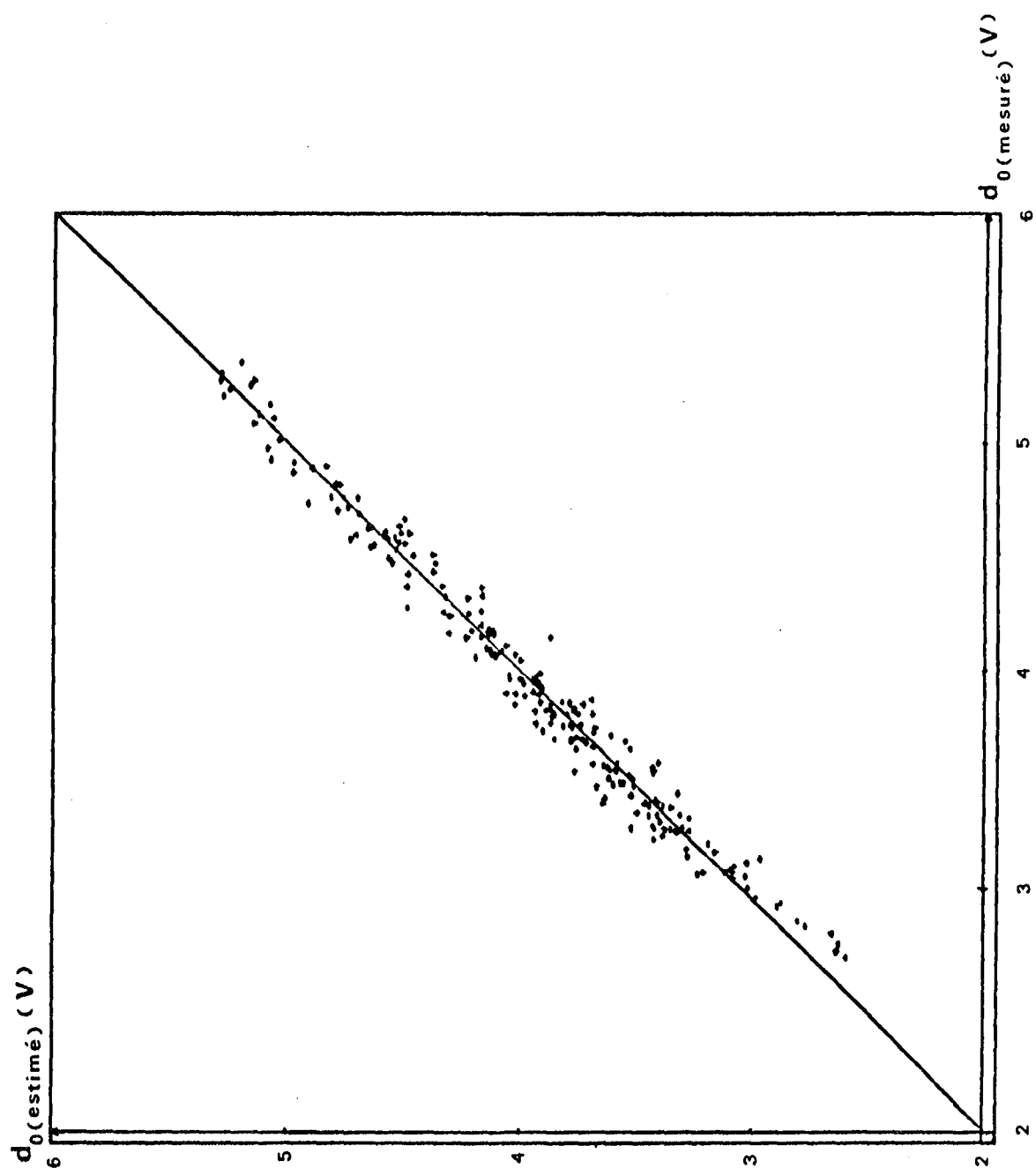


Figure III.8. - Dispersion associée au modèle $d_0 = f(\theta, J)$

$$d_0 = a \times "J" + \theta \times b + c$$

avec $c = 3797.8$

$b = - 22.003$

$a = 10.396$

La figure III.8 présente la dispersion associée à ce modèle et permet ainsi de juger de sa qualité.

3.2.3. Phénomène de vieillissement

L'étude de nos résultats nous a conduit à observer en 72 jours une dérive du signal représentatif de la dérivée initiale d_{20} d'environ 800 millivolts, la plage de mesure s'étendant entre 2500 et 9000 millivolts, soit une variation de 12,3 %.

Il nous est apparu que ce phénomène de vieillissement pouvait être imputé à la décroissance de l'activité de la source, bien qu'il y ait aucune commune mesure entre la durée de vie de la source (33 ans) et la décroissance observée. En effet, lorsque la plage de mesure est très étroite et lorsque la quantité de produit se trouvant entre la source et le détecteur est faible, il est possible que la variation de radiation due au vieillissement de la source ne soit plus négligeable quand on la compare aux variations dues au changement de densité dans le produit à mesurer, du fait de l'existence de décalages de zéros dans la chaîne de mesure.

L'additionneur soustracteur (Fig. III.5) permet la réglage du zéro de la mesure de densité. La tension V_{ref} correspond à la tension générée par la chaîne de mesure lorsque la densité est minimale (dans notre application, lorsque la colonne est uniquement remplie d'eau).

Soit I_{R0} l'intensité du flux de rayonnement qui pénètre la chambre d'ionisation ; dans cette hypothèse la tension de correction V_{ref} compense la tension V_{S4} générée par la chaîne de mesure. Par contre, lorsque la densité à l'intérieur de la cellule est maximale, le rayonnement I_{max} , recueilli dans la chambre d'ionisation, est inférieur à I_{R0} . C'est cette différence $I_d = I_{R0} - I_{max}$, caractérisant le "domaine actif" du flux de rayonnement total émis par la source, qu'il nous a paru intéressant de déterminer.

Pour ce faire, la cellule étant uniquement remplie d'eau, nous avons intercepté le flux de rayonnement par une épaisseur d'acier de 1 mm ; nous avons alors observé une variation du signal utile, délivré en fin de chaîne de 2500 mV à 8000 mV.

Le paramètre "demi-valeur" d'un matériau (25) (demi-valeur d'un matériau : épaisseur de matière nécessaire pour abaisser de 50 % l'intensité du rayonnement qui le traverse ; pour le couple Cs 137 - acier, la demi-valeur est de 15 mm) nous a permis d'évaluer ce domaine actif.

La figure III.9 représente le pourcentage de l'intensité I_s du flux de rayonnement en fonction de l'épaisseur d'une plaque d'acier interceptant le rayonnement I_d :

$$I_s = \frac{I_d}{2^n} \quad \text{où } n \text{ est le nombre de demi-valeur}$$

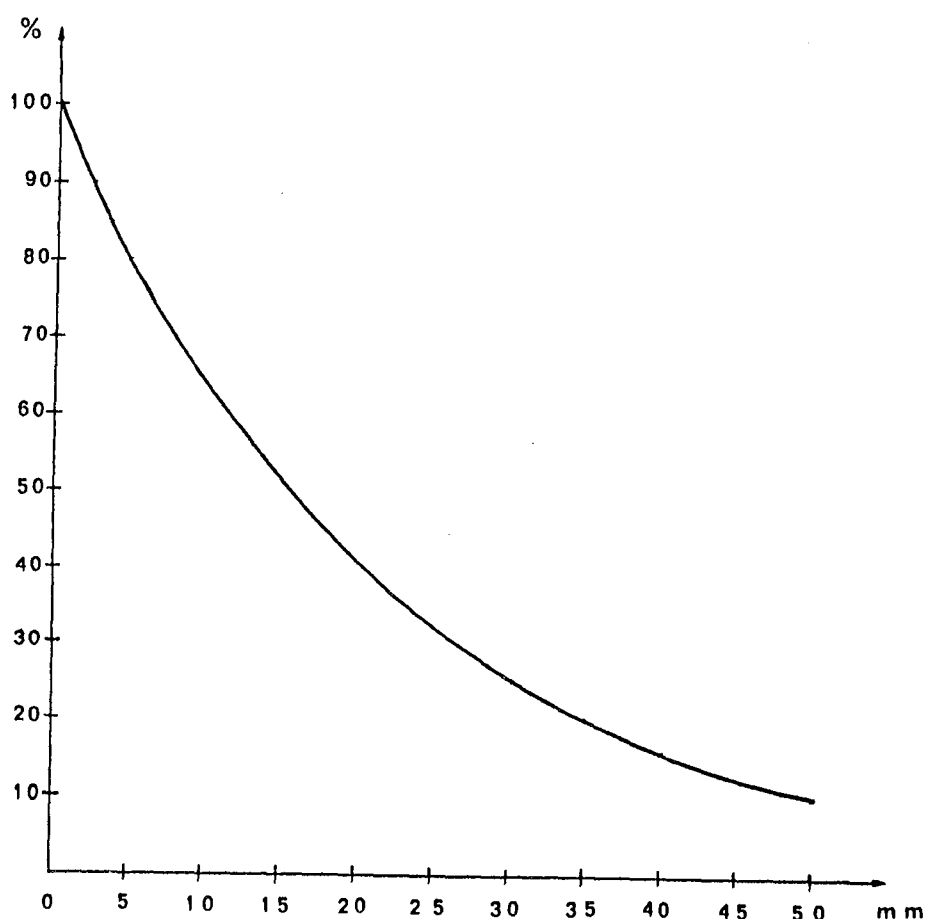


Figure III.9. - Pourcentage de rayonnement γ traversant différentes épaisseurs d'acier

L'interception du rayonnement par 1 mm d'acier apportant un déplacement du zéro de 84,6 %, nous pouvons donc admettre qu'environ 1,2 mm d'acier absorbe totalement le "domaine actif" du rayonnement.

Or la connaissance de la demi-valeur de l'acier nous permet de préciser que 1,2 mm d'acier absorbe 5,4 % du rayonnement total émis, d'où une estimation du "domaine actif" du rayonnement, $I_d = 5,4 \%$ du rayonnement total émis.

De plus, la demi-vie du Cs 137 étant de 33 ans, en 72 jours l'activité de la source a diminué de 0.5 %. Ce pourcentage représente 10 % du "domaine actif" du rayonnement ; ce qui permet d'expliquer les variations relevées lors de cette campagne de mesure.

3.2.3. Influence du pourcent solide et normalisation des courbes

Afin de pouvoir comparer les différentes courbes de sédimentation et surtout d'éviter à l'utilisateur de calibrer la masse de son échantillon, nous avons normalisé les résultats sur la masse de référence de 3 kg.

Le signal de densité observé pendant la phase d'homogénéisation nous permet de déterminer le pourcent solide de la pulpe.

La figure III.10 présente les variations de cette grandeur d_H (densité de la pulpe pendant la phase d'homogénéisation) préalablement corrigées en température et en nombre de jours de manipulation ; en fonction de la masse de minerai déposée dans le granulomètre. Cette variation est bien entendu linéaire puisque le densimètre délivre un signal directement proportionnel au pourcent solide de la pulpe. Nous l'avons modélisée sous la forme :

$$d_H = a P + b$$

où P représente la masse de l'échantillon,

avec $a = 1.248$

$b = 3606.805$

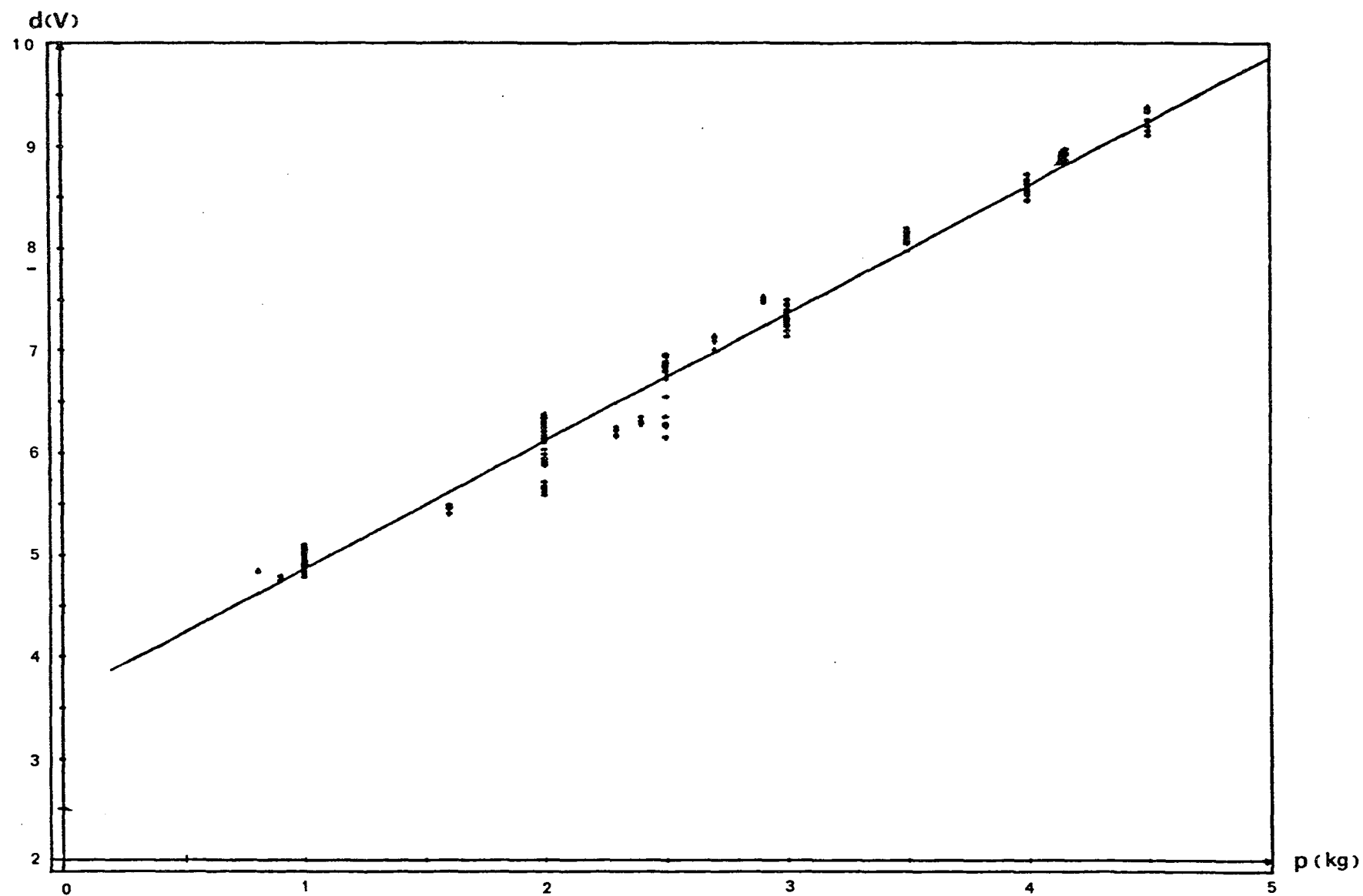


Figure III.10. - Influence de la masse de l'échantillon sur le signal de densité

Ce modèle $d_H = f(P)$ associé au modèle $d_0 = f(\theta, J)$ normalise les courbes de sédimentation autour du point de fonctionnement suivant :

$$\theta = 20^\circ\text{C}$$

$$J = 50$$

$$P = 3 \text{ kg}$$

Tous les essais résultant de cette campagne de mesure ont donc subi cette transformation et nous ont donc permis d'élaborer un modèle mathématique susceptible de représenter la sédimentation par tranche granulométrique indépendante.

La méthodologie globale que nous avons mise sur pied consiste à modéliser une granulométrie complète à partir de l'information densité de la pulpe en effectuant une somme pondérée des modèles des tranches élémentaires. Les coefficients de pondération sont représentatifs de la concentration en particule de la tranche considérée, c'est-à-dire donnent la répartition granulométrique.

3.3. Modélisation du processus de sédimentation

Reprenant les essais effectués pour chaque tranche i , nous avons standardisé les courbes obtenues afin de ramener ces variations de densité à l'intérieur d'une plage fictive 0,1. De plus nous avons orienté l'axe des densités vers le bas afin de s'imposer une valeur initiale ainsi qu'une dérivée première nulle à l'origine. Les courbes ainsi transformées présentent donc une dérivée première continûment croissante entre les valeurs 0 et 1.

Plusieurs modèles différents ont été appliqués à ces mesures afin d'obtenir une expression mathématique représentative de la sédimentation d'une tranche granulométrique en nous limitant aux expressions dépendant d'un nombre réduit de paramètres. Citons en particulier une forme mathématique tirée des travaux de LYNCH caractérisant la courbe de partage d'un hydrocyclone (26)(27), courbe qui présente une similitude avec celles observées dans notre application :

$$f(t) = \frac{e^{-\alpha_1 \cdot t} - 1}{\frac{\alpha_2 \cdot t}{e^{\alpha_2 \cdot t}} + e^{\alpha_3} - 2}$$

expression qui dépend des paramètres α_i à déterminer expérimentalement.

Le modèle qui nous a donné les meilleurs résultats, compte tenu de sa simplicité, est :

$$f_i = (1 - \exp(-\alpha_{1i} \cdot t))^{\alpha_{2i}}$$

où t représente le temps écoulé depuis le début de la sédimentation.

f_i , la densité et où α_{1i} et α_{2i} sont les deux seuls paramètres dépendant de la tranche granulométrique.

Le tableau (Fig. III.11.) résume les résultats obtenus.

Tranche	α_1	α_2	Φ
3	6.87	99.4	. 07
4	7.04	55.52	. 03
5	8.24	33.43	. 03
6	14.24	89.44	. 05
7	15.33	49.44	. 03
8	16.45	29.44	. 02
9	17.34	19.44	. 05
10	16.34	9.44	. 03
11	18.72	9.44	. 02
12	20.01	9.44	. 02
13	21.30	9.44	. 04
14	25.59	9.44	. 03
15	26,21	9.44	. 04

Fig. III.11 - Tableau présentant les coefficients des modèles

Remarquons qu'il est tronqué de part et d'autre des séries 3 et 15 ; en effet, des particules appartenant aux tranches granulométriques inférieures à 105 microns, sédimentent trop lentement, et l'analyse de leur répartition demande un temps de mesure trop important. Inversement, des particules ayant un diamètre supérieur à 840 microns sédimentent trop rapidement et il n'est pas possible d'effectuer avec notre appareil une mesure précise et représentative de leur sédimentation. Malgré cela, l'information finale rend compte de ces particules.

La variable Φ caractérise l'écart quadratique moyen entre valeur prédite par le modèle et valeur vraie :

$$\Phi = \sum_{j=1}^n (d_j^0 - \hat{d}_j)^2$$

où n est le nombre de points de la courbe

d_j^0 , le signal de densité effectivement mesuré

\hat{d}_j , les valeurs de densité annoncées par le modèle

La figure III.12 présente les différentes courbes modèles de sédimentation des tranches granulométriques numérotées 3 à 14.

De plus, nous avons également étudié les fonctions dérivées des courbes "modèles" de sédimentation. Ces fonctions dérivées présentent toutes un maximum qui nous a semblé être un "point caractéristique" de la sédimentation d'une tranche granulométrique. La figure III.13 donne une représentation de ces fonctions dérivées, normées de sorte que la valeur maximum soit 1.

4. Deuxième campagne de mesure

4.1. But de cette campagne

Cette deuxième campagne de mesure avait pour but la mise au point d'un algorithme permettant de déterminer la granulométrie d'un échantillon quelconque de minerai.

Pour ce faire, nous avons réalisé des essais de sédimentation à l'aide d'échantillons de minerai reconstitué par mélange de plusieurs tranches granulométriques voisines ou non. Nous avons donc constitué des échantillons "réels" comportant des proportions connues de minerai appartenant à des tranches granulométriques différentes. Ces essais effectués sur de nombreux cas de figures nous ont en fait orienté dans le choix du modèle le plus performant.

Notons que cette campagne de mesure a permis la constitution de répartitions granulométriques purement théorique, telles que celles donnant la courbe de la figure III.14.

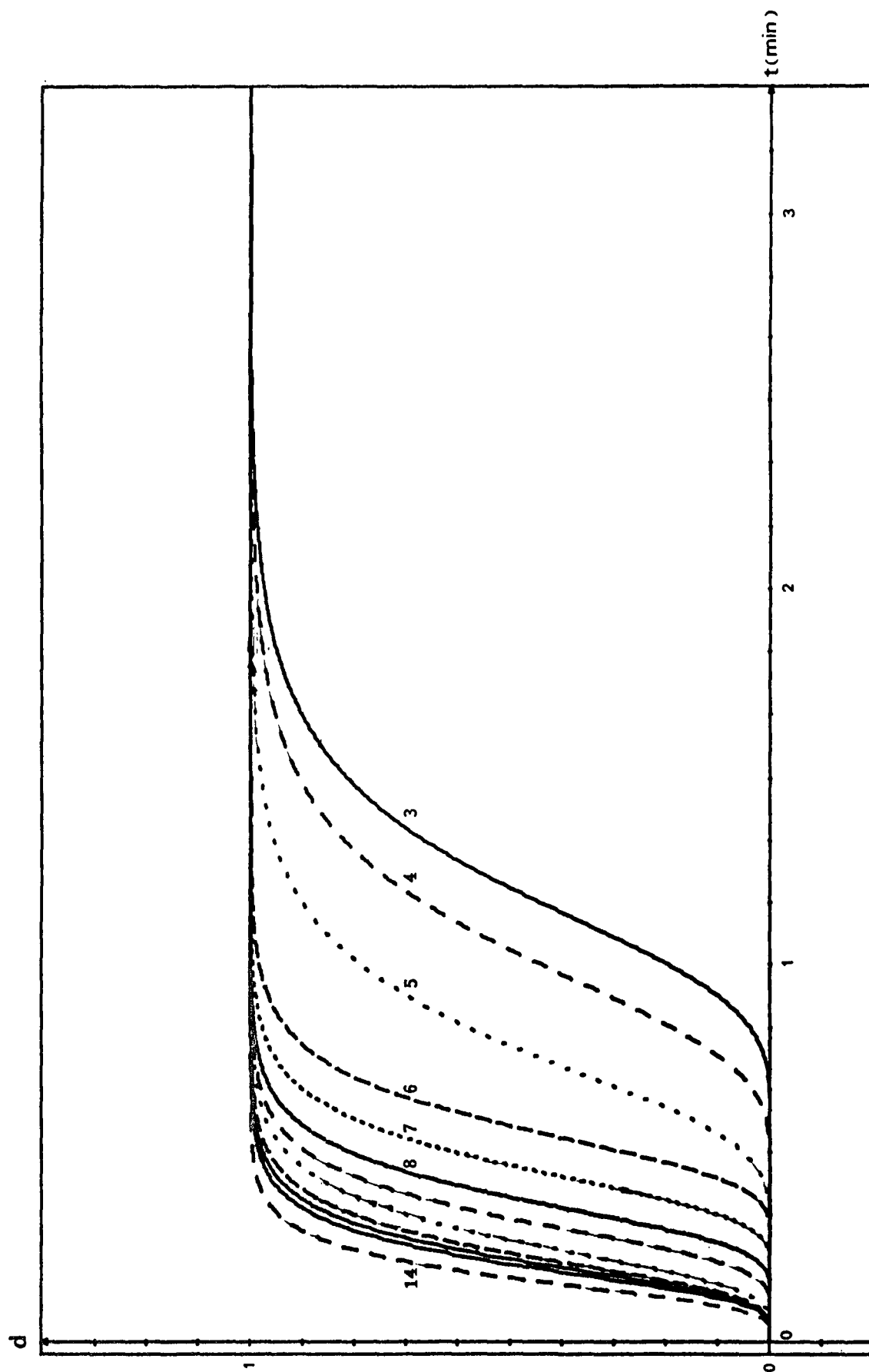


Figure III.12. - Fonctions "modèles"

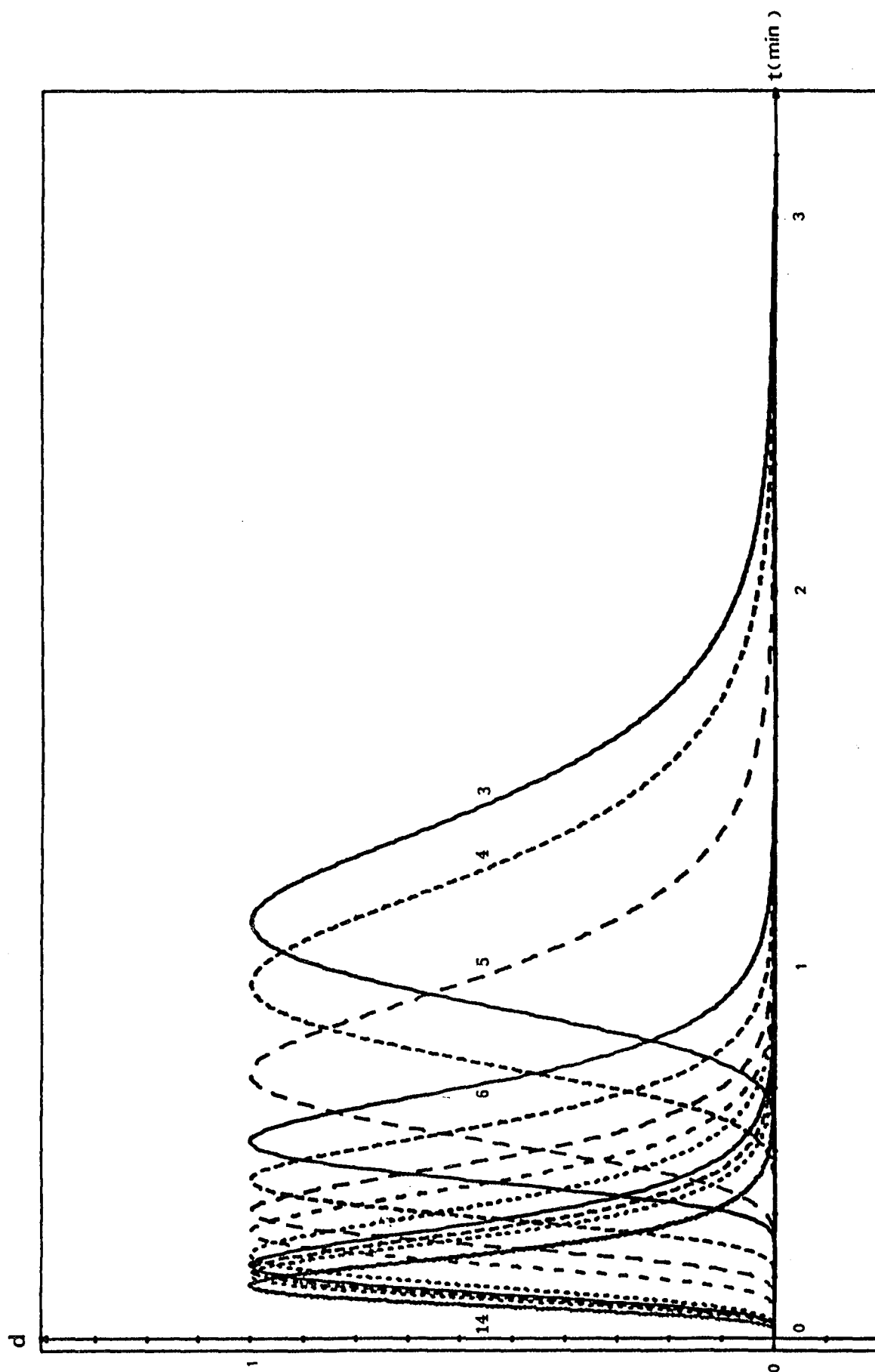


Figure III.13. - Fonctions dérivées des fonctions "modèles"

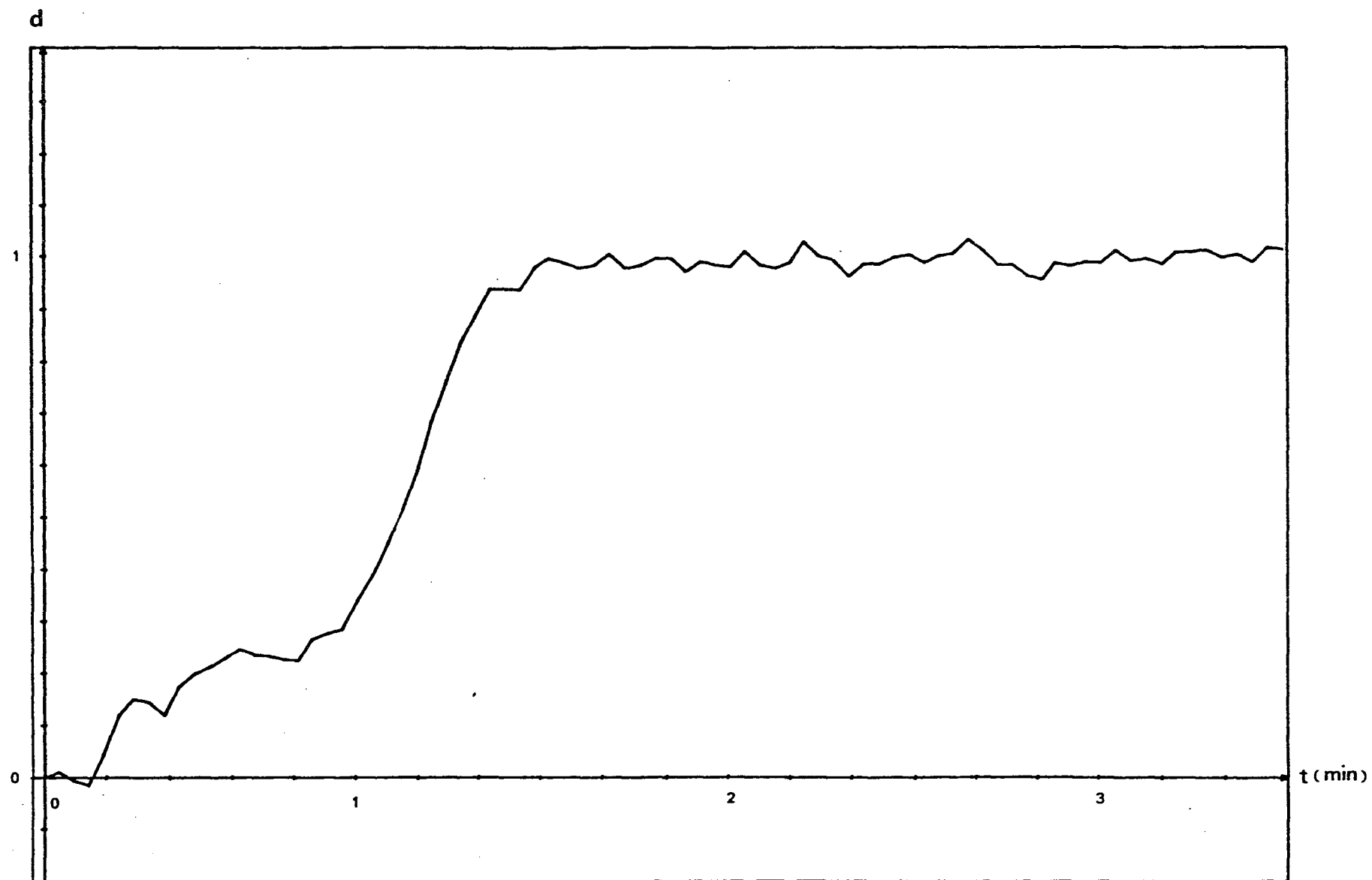


Figure III.14. - Courbe obtenue lors de la sédimentation d'un échantillon de minéral constitué de :
20 % de la tranche 14
80 % de la tranche 4

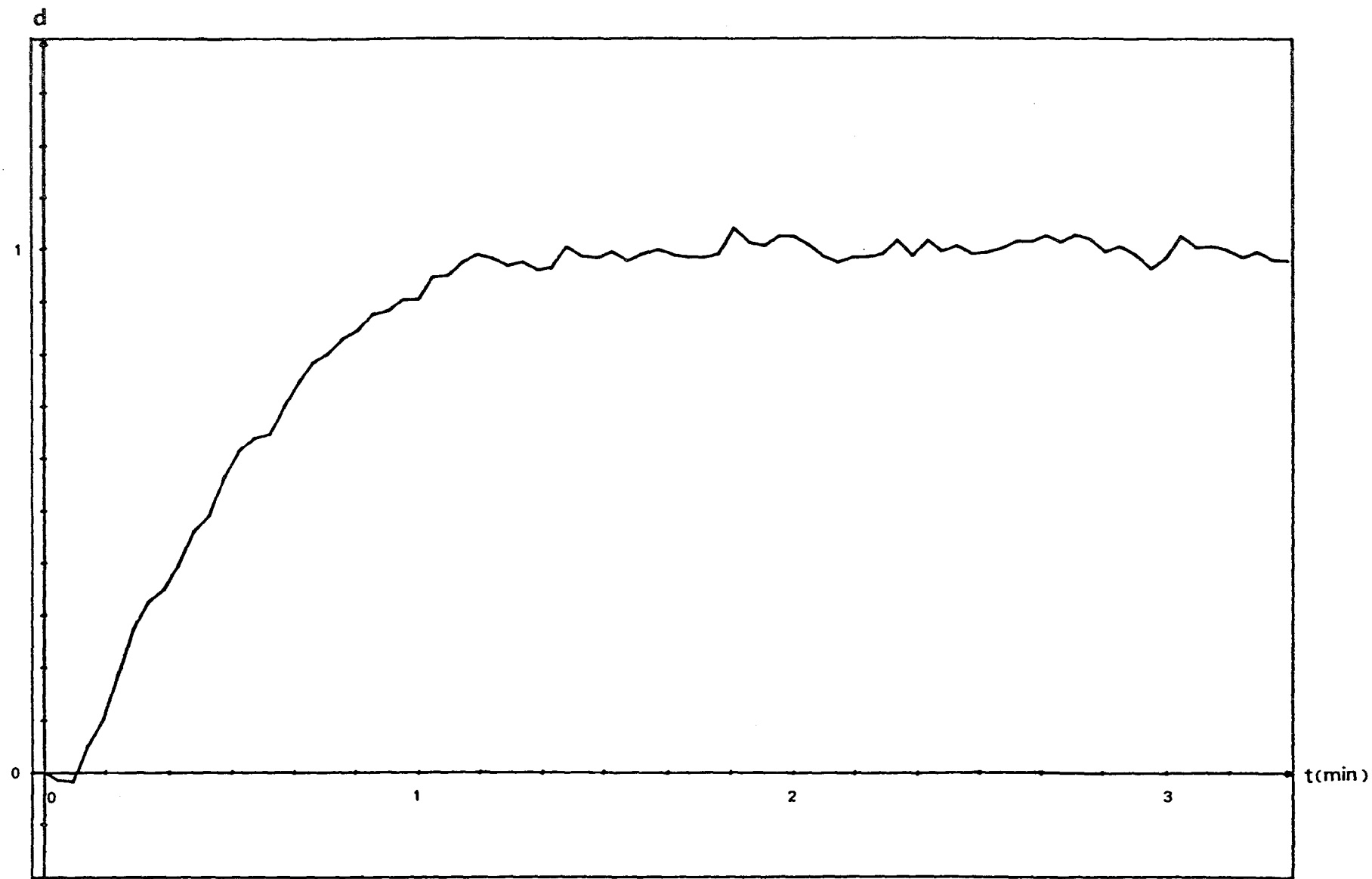


Figure III.15. - Courbe obtenue lors de la sédimentation d'un échantillon de minéral constitué de 5 tranches granulométriques consécutives

Sur cette courbe on observe effectivement deux paliers, dûs à la sédimentation de deux tranches granulométriques distinctes et éloignées l'une de l'autre. Cet essai de sédimentation portait effectivement sur un échantillon composé de 80 % de sable appartenant à la tranche 4 et 20 % de sable appartenant à la tranche 14. Par contre, la courbe figure III.15 représente la sédimentation des particules constituant un échantillon des particules constituant un échantillon composé de 5 tranches réparties dans 5 tranches consécutives ; dans ce cas la courbe ne présente pas de palier.

Notons que cette seconde campagne de mesure nous a permis de confirmer les résultats mis en évidence lors de la première campagne de mesure, à savoir :

- influence de la température du fluide,
- influence de la décroissance de l'activité de la source.

4.2. Algorithme de recherche des pourcentages par tranches granulométriques dans un échantillon quelconque

Au vu de la courbe de variation de densité engendrée par la sédimentation d'un échantillon quelconque de minéral, nous avons été amenés à faire l'hypothèse suivante : la courbe variation de densité observée lors de la sédimentation d'un échantillon de n tranches granulométriques peut être assimilée à une combinaison linéaire des n fonctions "modèles", ce qui peut se traduire mathématiquement par :

$$\delta(t) = \sum_{i=1}^n \beta_i f_i(t)$$

où $\delta(t)$ représente la fonction "variation de densité"

β_i représente un coefficient, image du pourcentage véritable d'un minéral appartenant à la tranche i contenu dans l'échantillon analysé.

$f_i(t)$ est la fonction "modèle" de la forme $f_i(t) = (1 - e^{-\alpha_{1i} \cdot t})^{\alpha_{2i}}$

Auparavant, il est indispensable d'éliminer les points de discontinuité observée sur la courbe de mesure directement délivrée par le densimètre.

Pour ce faire, les courbes de variations de densité sont lissées à l'aide d'un filtre polynomial réalisé numériquement qui, schématiquement, se déplace le long de la courbe. Cette opération nous permet d'obtenir une

courbe ne présentant plus de discontinuité au 1er, et même 2ème ordre (les dérivées 0ème, 1ère et 2ème sont continues en tout point de la courbe) (28).

Des algorithmes reposant sur des méthodes de moindres carrés et permettant de rechercher de façon globale les coefficients β_i ne nous ayant pas apporté de résultats positifs, nous nous sommes orientés vers une autre solution, plus intuitive.

Les points, que nous avons désignés sous le vocable "points caractéristiques" (page 54) de la sédimentation d'une seule tranche granulométrique, nous permettent d'approcher les valeurs réelles des pourcentages véritables β_i des différentes tranches constituant l'échantillon, par des valeurs $\hat{\beta}_{i1}$ approchées (l'indice 1 représentant la 1ère étape du calcul).

Ensuite, une procédure itérative reconstruisant la courbe $\hat{\delta}(t)$:

$$\hat{\delta}(t) = \sum_{i=1}^n \hat{\beta}_i f_i(t)$$

nous permet de rechercher les $\hat{\beta}_i$ qui autorise la coïncidence entre la courbe réelle $\delta(t)$ et la courbe $\hat{\delta}(t)$.

Le schéma synoptique (Fig. III.16) présente le déroulement de la recherche de ces coefficients $\hat{\beta}_i$.

De plus, la figure III.17 représente l'évolution de la recherche itérative de ces mêmes coefficients $\hat{\beta}_i$; la courbe $\delta(t)$ étant représentée en trait plein, la courbe $\hat{\delta}(t)$ étant représentée en trait discontinu à chaque étape j de la recherche des coefficients.

Remarques

Les vitesses de sédimentation relativement proches des particules appartenant aux tranches 14 et 15 nous ont contraint à confondre ces deux tranches en une seule tranche granulométrique.

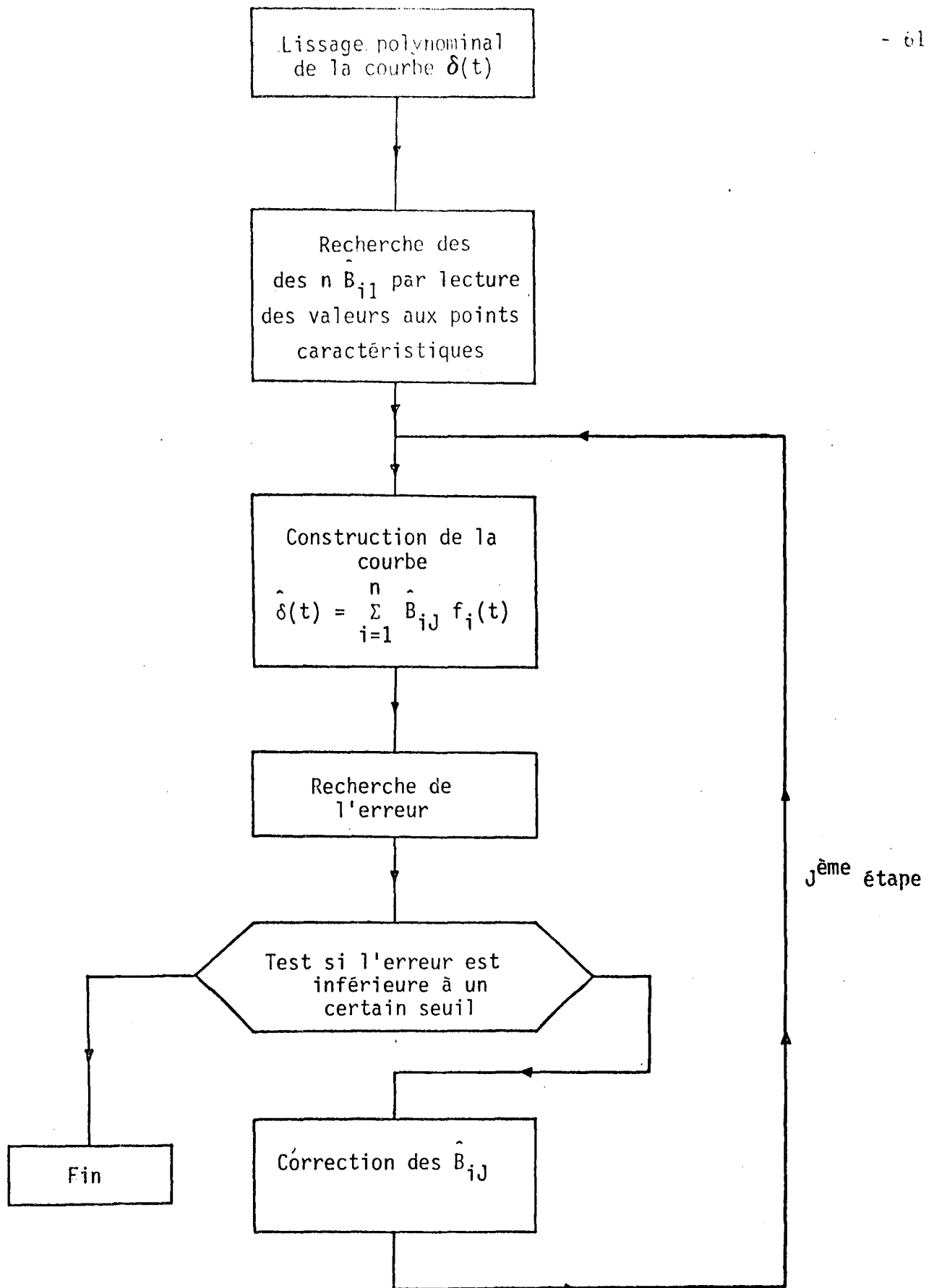


Figure III.16 - Algorithme de recherche des coefficients B_i

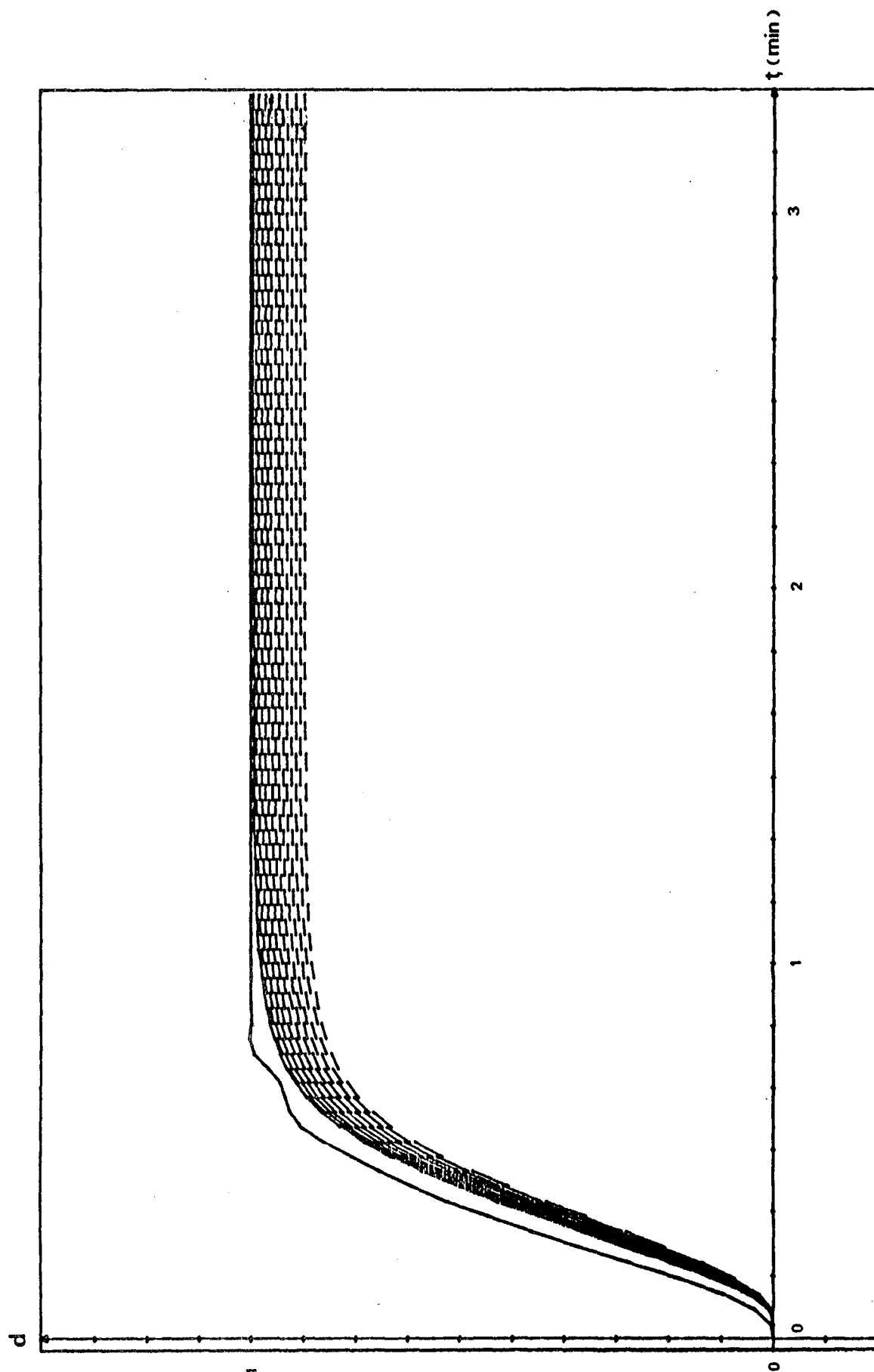


Figure III.17. - Evolution de la recherche itérative des coefficients B_i

La recherche des pourcentages β_i s'effectue sur 12 tranches granulométriques numérotées 3 à 14, couvrant la plage 88 microns - 840 microns. A ces 12 tranches granulométriques sont adjointes les 2 tranches extrêmes 0.88 microns et > 840 microns ; les pourcentages β_i de minerai dans ces deux tranches sont respectivement calculés de la façon suivante :

- tranche 0.88 microns : connaissant l'instant t après lequel les particules appartenant à la tranche 3 sont sédimentées devant la fenêtre de mesure par simple différence entre le signal observé après cet instant t et la densité de l'eau pure, il est possible de déterminer le pourcentage de grains ayant une taille < 88 microns.

- tranche > 840 microns : une simple différence entre la valeur 100 % et la somme des différents pourcentages calculés précédemment permet de définir la contribution de cette tranche.

Notons que le temps de calcul est relativement court, moins d'une minute avec le calculateur SOLAR 16-40. Ce temps de calcul devrait être équivalent lors de l'implantation de cet algorithme sur le microprocesseur.

4.3. Résultats

Les différentes manipulations entreprises nous ont permis de préciser que l'échantillon de minerai devait avoir une masse minimum de 3 kgs.

Lors d'essais de sédimentation comportant des tranches granulométriques qui ne sont pas réparties de façon continue (par exemple 20 % de la tranche 11 et 80 % de la tranche 4), la méthode employée ne nous a pas permis de retrouver les pourcentages véritables des tranches considérées. Par contre, notre mesure n'est pas aberrante puisqu'elle donne une tendance, c'est-à-dire que l'algorithme permet de préciser que, par exemple, 80 % des particules sont réparties dans les tranches 5, 4, 3, les 20 % restants se distribuant dans les autres tranches.

Par contre, lorsque l'échantillon est effectivement conforme à la réalité, c'est-à-dire constitué d'une "pelletée" de sable, nous obtenons les résultats relevés dans le tableau présenté page 64.

Tranche	% mesuré par tamisage	% reconnu par le granulomètre
15	0	2.8
14	0	2.9
13	0.8	0
12	2.5	0
11	7.1	4.4
10	9.1	12
9	13	7
8	7.4	12.9
7	22.2	17.1
6	18.2	22.9
5	16.2	15.4
4	2.5	2.0
3	2	0
2	2	0

Il apparaît que, dans ce cas, l'écart maximum entre les résultats donnés par tamisage et ceux obtenus à l'aide de notre méthode, est de 6 %. La répétition d'essais de ce type nous permet de dire que l'erreur maximale est de 10 %.

Nous avons constaté expérimentalement, ce qui était d'ailleurs prévisible compte tenu de la méthode employée, que le résultat est beaucoup plus lissé que celui obtenu par tamisage : des variations brusques de pourcentages entre deux tranches consécutives sont atténuées. L'histogramme (Fig. III.18) présente la comparaison des résultats obtenus à l'aide des deux méthodes.

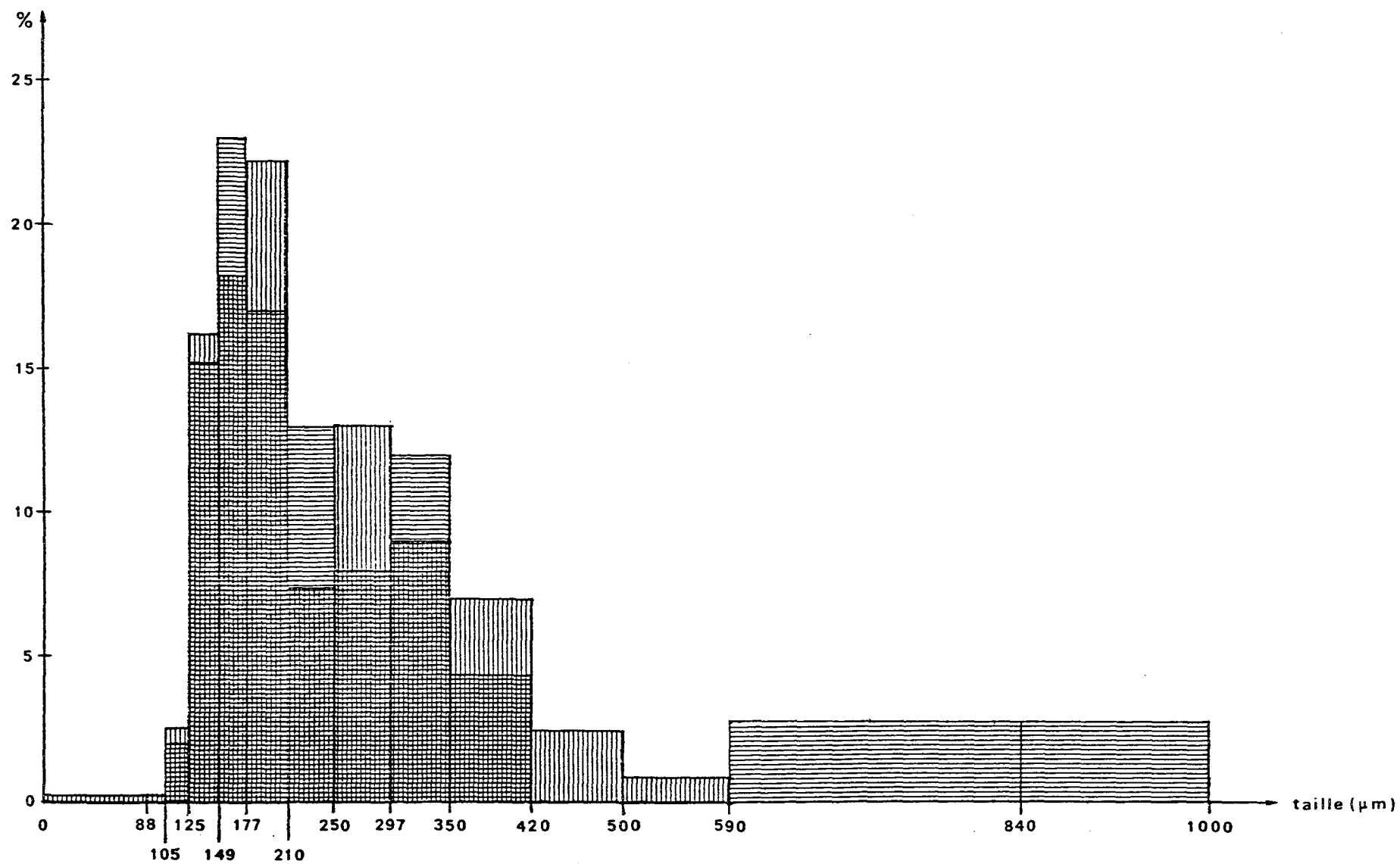


Figure III.18. - Histogramme comparatif des résultats obtenus :

. par tamisage

. à l'aide du granulomètre

IV. CONCEPTION DU GRANULOMETRE EN TANT QUE CAPTEUR AUTONOME

1. Dispositions générales (29)

Ce granulomètre étant appelé à être inclus dans une chaîne automatisée de traitement de minerai, il doit se comporter comme un capteur, c'est-à-dire que, sur demande d'un organe de calcul, il délivre, dans un temps relativement court, un signal représentatif de la granulométrie de l'échantillon.

Le SOLAR 16-40, associé jusqu'à présent au prototype de granulomètre, a conduit au modèle et nous a permis de mettre au point l'ensemble des tâches de service de ce capteur. L'étape suivante, qui est en cours d'exécution, remplace le calculateur par un microprocesseur.

Ce système de commande architecturé autour d'un circuit 8085 Intel assure le déroulement complet d'une manipulation de sédimentation et la détermination de la granulométrie de l'échantillon.

Le dispositif constituant le capteur autonome de granulométrie se présente dans la configuration schématisée par la figure IV.1.

Chronologiquement, les différentes opérations nécessaires au déroulement d'une mesure de granulométrie s'enchaînent dans l'ordre suivant :

- départ de la manipulation.

Cet ordre est adressé au capteur :

- . soit par un opérateur qui, par l'intermédiaire d'un clavier, demande l'exécution d'une mesure.
- . soit par un calculateur de commande à l'aide d'une liaison RS 232.

- prise de l'échantillon.

L'échantillon de minerai peut être introduit manuellement, ou en mode automatique. Le système peut demander à un organe quelconque (échantillonneur statistique par exemple) de déposer un échantillon de minerai dans la cellule.

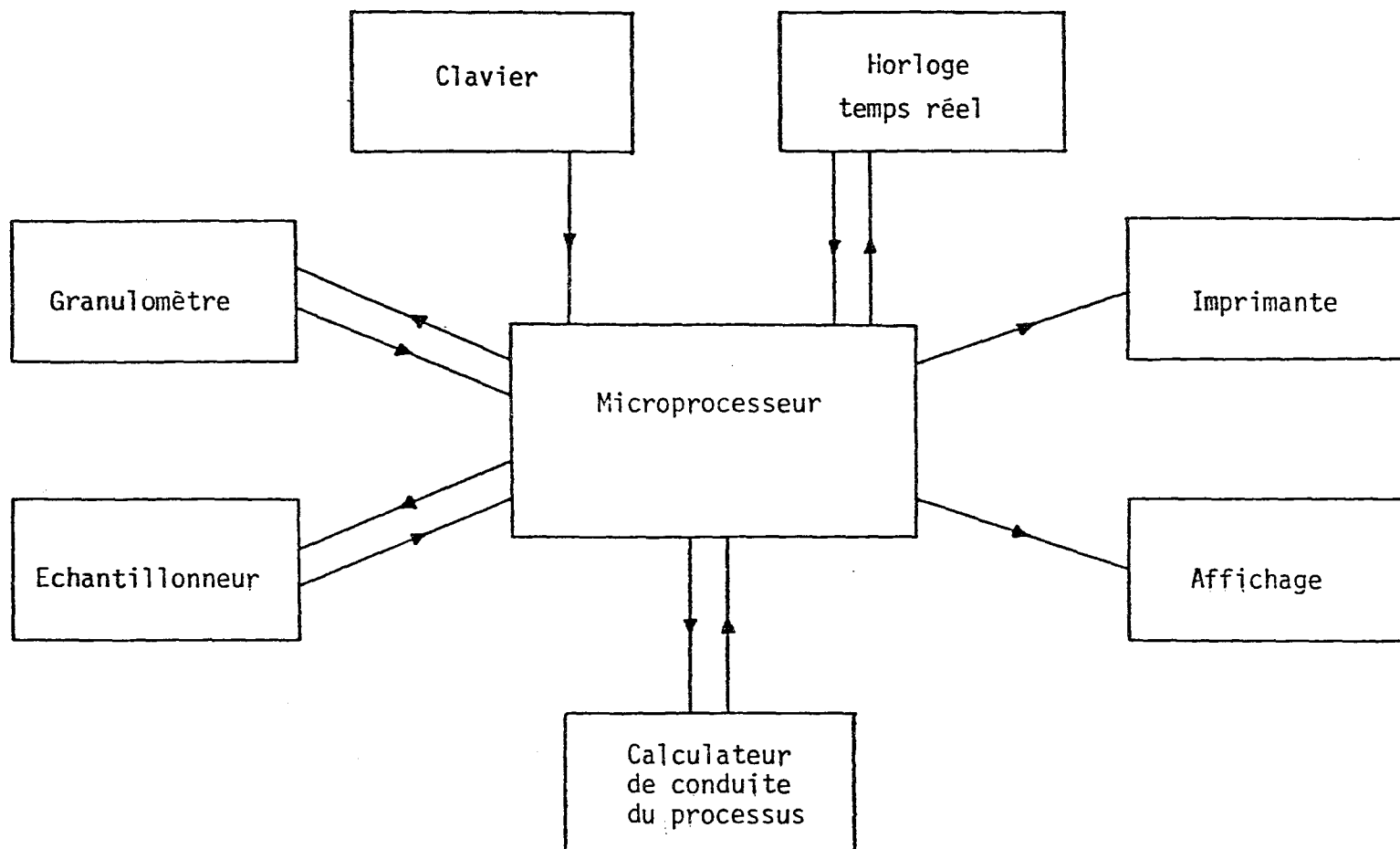


Figure IV.1. - Structure du capteur autonome de granulométrie

- déroulement de la manipulation.

Le système effectue alors le remplissage en eau, puis homogénéise la pulpe obtenue. Lors de cette phase d'homogénéisation, la mesure du signal de densité permet de vérifier si la quantité de minerai est suffisante pour obtenir une mesure correcte.

- mesure de densité et de température.

Le microprocesseur effectue ces séries de mesures par l'intermédiaire d'une électronique appropriée, suivant le schéma IV.2.

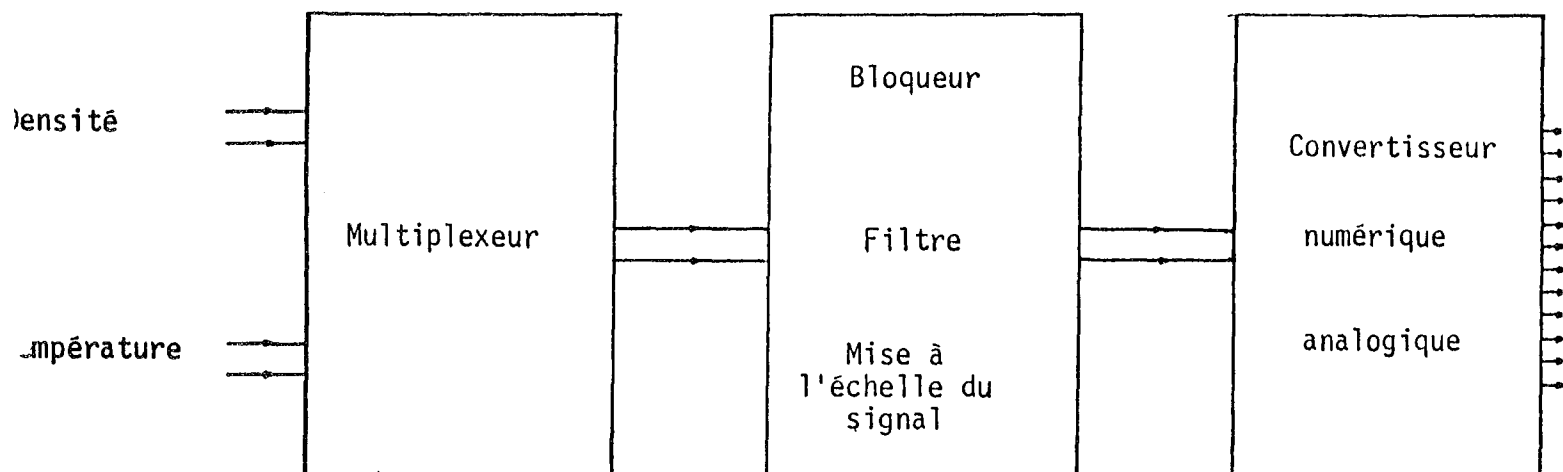


Figure IV.2. - Electronique de mesure

- fin de la manipulation.

Tout en effectuant les calculs nécessaires à la correction des mesures et à la détermination de la répartition granulométrique de l'échantillon, le système réalise la vidange et le rinçage de la cellule de mesure.

- édition des résultats.

Par l'intermédiaire d'une imprimante et d'un module d'affichage, le système édite les résultats de l'analyse granulométrique. De plus, le microprocesseur peut faire parvenir ces résultats à un calculateur de conduite de processus.

Etant destiné à être utilisé en milieu industriel, ce granulomètre doit présenter des sécurités de fonctionnement.

Par exemple, en cas de coupure de l'alimentation électrique, une sauvegarde de l'état du système est prévue afin que le microprocesseur puisse reprendre son cycle de fonctionnement de façon convenable.

D'autre part, un mode de fonctionnement local est prévu afin qu'un opérateur puisse contrôler la bonne marche de l'appareil par l'intermédiaire d'un clavier implanté sur la face avant de l'appareil.

De plus, une procédure d'arrêt d'urgence permet de stopper le déroulement d'une manipulation. Dans cette hypothèse, le microprocesseur agit de façon adéquate sur les différents actionneurs pour placer le système dans une situation de sécurité.

Enfin, l'adjonction d'une horloge temps réel autonome, permet de tenir à jour une base de temps, même en cas d'arrêt du capteur. Les informations fournies par cette horloge temps réel permettent de prendre en considération le temps écoulé depuis un instant t_0 et donc de compenser les variations du signal de densité dues à la décroissance de l'activité de la source. Un signal représentatif de la variation de décroissance est alors synthétisé par le microprocesseur et injecté dans la chaîne de mesure du densimètre.

2. Contraintes d'utilisation

En milieu industriel, l'exploitation de ce capteur demandera une phase d'étalonnage et d'adaptation aux besoins de l'utilisateur relativement importante. En effet, pour chaque type de matériau, il est nécessaire d'ajuster les "courbes modèles". Les programmes effectuant cette correction pourront être directement implantés sur le système. Compte tenu de l'importante quantité

d'informations détenues par le microprocesseur, le système peut fournir à l'utilisateur tout un ensemble de résultats, qu'il pourra obtenir systématiquement ou à la demande, en fonction des périphériques dont il dispose : console de visualisation, imprimante, table traçante, etc ...

L'environnement périphérique de la version de base se compose d'une liaison RS 232, d'un clavier de commande auquel sont associées des touches fonctions permettant la réalisation d'actions prédéfinies (vidange, remplissage, etc ...) d'une visualisation (affichage à plasma) informant l'opérateur de l'état du granulomètre, d'une imprimante de tableau permettant d'obtenir une trace écrite relative aux résultats granulométriques (Fig. IV.3).

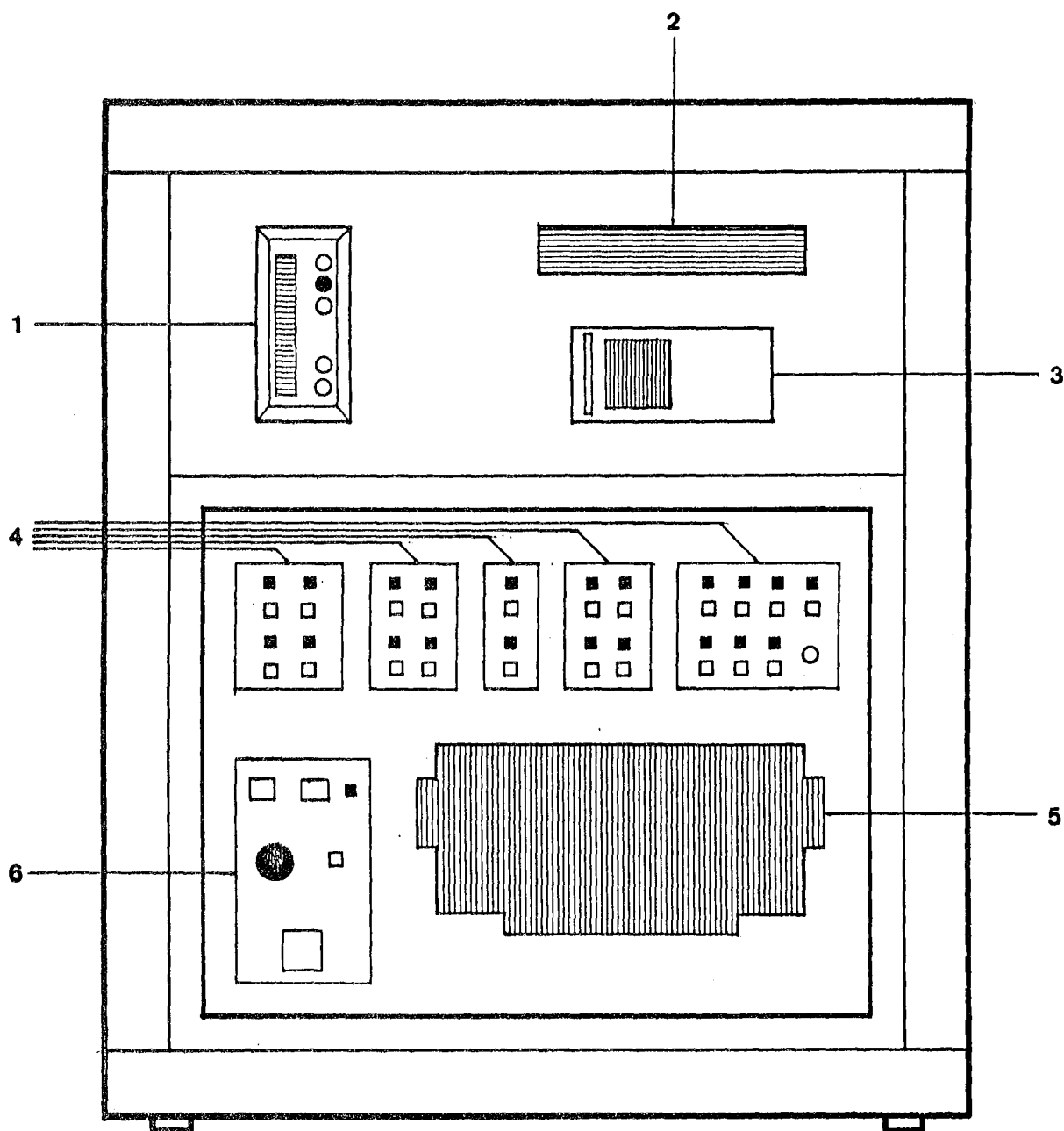
Notons un autre problème que nous n'avons pas résolu actuellement : à chaque mise sous tension de l'appareil, il est nécessaire d'attendre environ 3 heures (Fig. IV.4), que la chambre d'ionisation du densimètre ait atteint sa température de fonctionnement nominale, ce qui présente un inconvénient assez grave. Ce phénomène n'étant pas reproductif, il n'a pas pu faire l'objet d'une modélisation qui aurait permis une correction de ce défaut.

Enfin, nous avons été amenés à résoudre quelques problèmes inhérents au matériel utilisé :

- Nous avons constaté une usure importante de certaines pièces appartenant à la pompe d'homogénéisation ; cette usure due aux propriétés abrasives du sable nous a contraint à remplacer, à plusieurs reprises, ces pièces défectueuses.

- Les propriétés abrasives du matériau employé lors des essais de sédimentation ont également entraîné la détérioration de la vanne motorisée, assurant la vidange de la cellule. Nous avons envisagé son remplacement par un dispositif plus fiable, susceptible de résister à l'abrasion du matériau.

Une étude de faisabilité devra être entreprise, pour chaque type de matériau, en vue de rechercher les composants technologiques les mieux adaptés.



1. Electronique associée
au densimètre

2. Affichage à plasma

3. Imprimante

4. Touches fonctions

5. Clavier alphanumérique

6. Clavier de commande

Figure IV.3. - Face avant d'armoire de commande associée au capteur

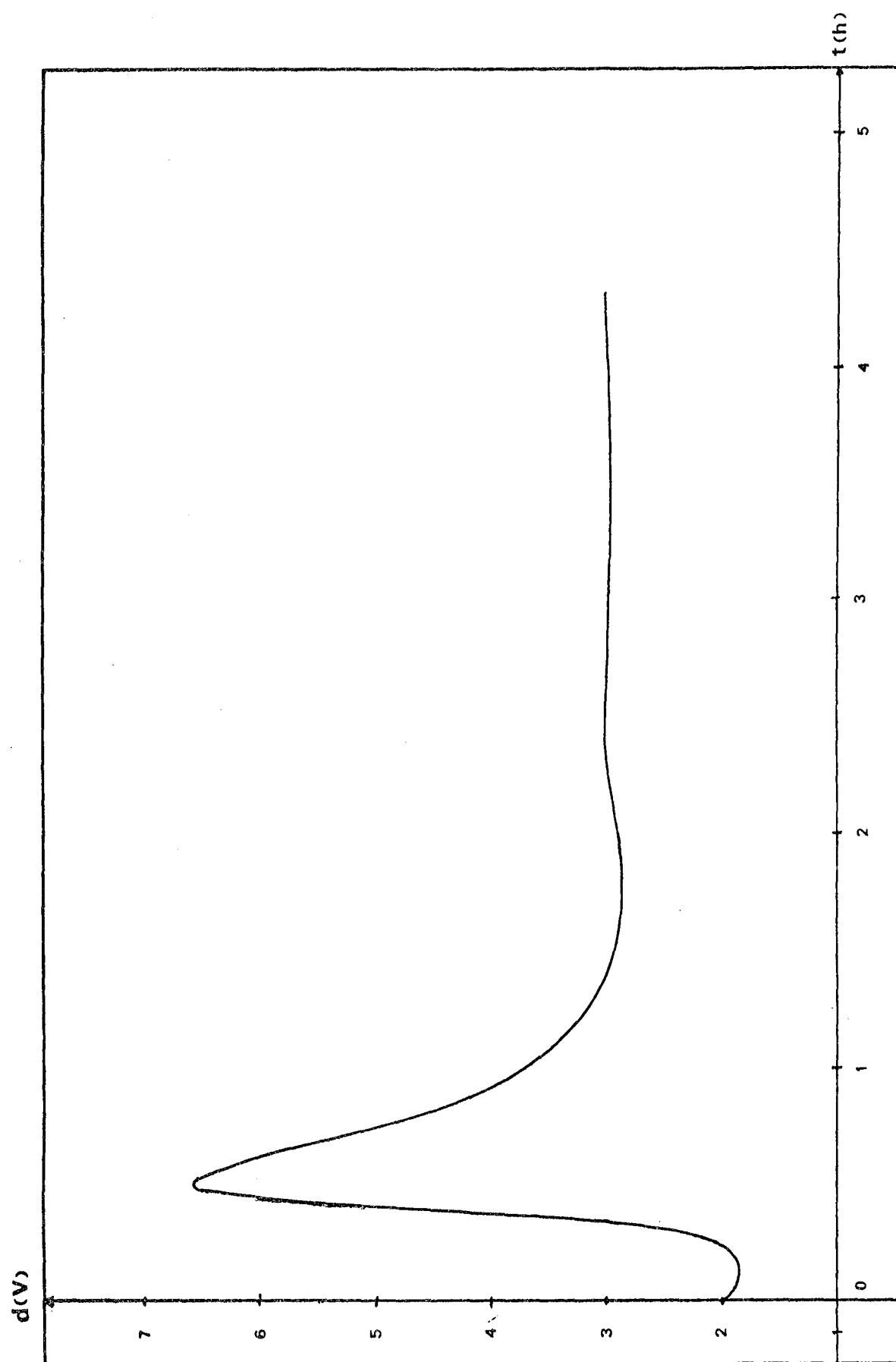


Figure IV.4. - Evolution du signal délivré par le densimètre lors d'une mise sous tension

V. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Bien que ce capteur ne puisse prétendre atteindre une précision comparable à celle annoncée par d'autres appareils, il semble pourtant qu'il puisse constituer un apport important dans l'industrie minéralurgique. Conçu comme un capteur industriel, il permet d'obtenir une courbe granulométrique suffisamment précise pour améliorer de façon notable la conduite par ordinateur d'une installation d'enrichissement de minerai. En effet dans ce domaine, la mesure de la granulométrie d'une pulpe ne peut actuellement être effectuée de façon automatique et des techniques purement informatiques d'équilibrage de bilan-matière peuvent faire appel à ces mesures de granulométries délivrées par ce capteur et autoriser une conduite optimale de ces installations qui sont grandes consommatrices d'énergie.

Le fonctionnement de ce capteur peut, bien entendu, être amélioré, il suffirait par exemple d'augmenter la hauteur de la cellule de mesure, ce qui autoriserait l'exploration des tranches granulométriques supérieures à 800 microns, mais ce serait alors au détriment du temps de réponse du capteur.

Par contre, une amélioration sensible des performances de ce capteur est possible grâce au remplacement du densimètre par des capteurs moins encombrants, plus précis que sont les capteurs de pression. Tout en conservant le principe de la sédimentation, il est en effet possible de déterminer la taille des particules par la mesure de la pression exercée par le fluide en différents points de la cellule. Dans cette optique, des capteurs de pressions ont été installés sur le dispositif expérimental et nous ont permis d'effectuer quelques séries de mesures (Fig. V.1) qui nous ont laissé entrevoir cette nouvelle possibilité de recherche.

Enfin, rappelons que ce granulomètre, dans sa constitution actuelle, ne peut traiter que des substances monophasiques, mais que l'on peut envisager son extension à des solutions polyphasiques, ce qui augmenterait nécessairement la durée de la mesure.

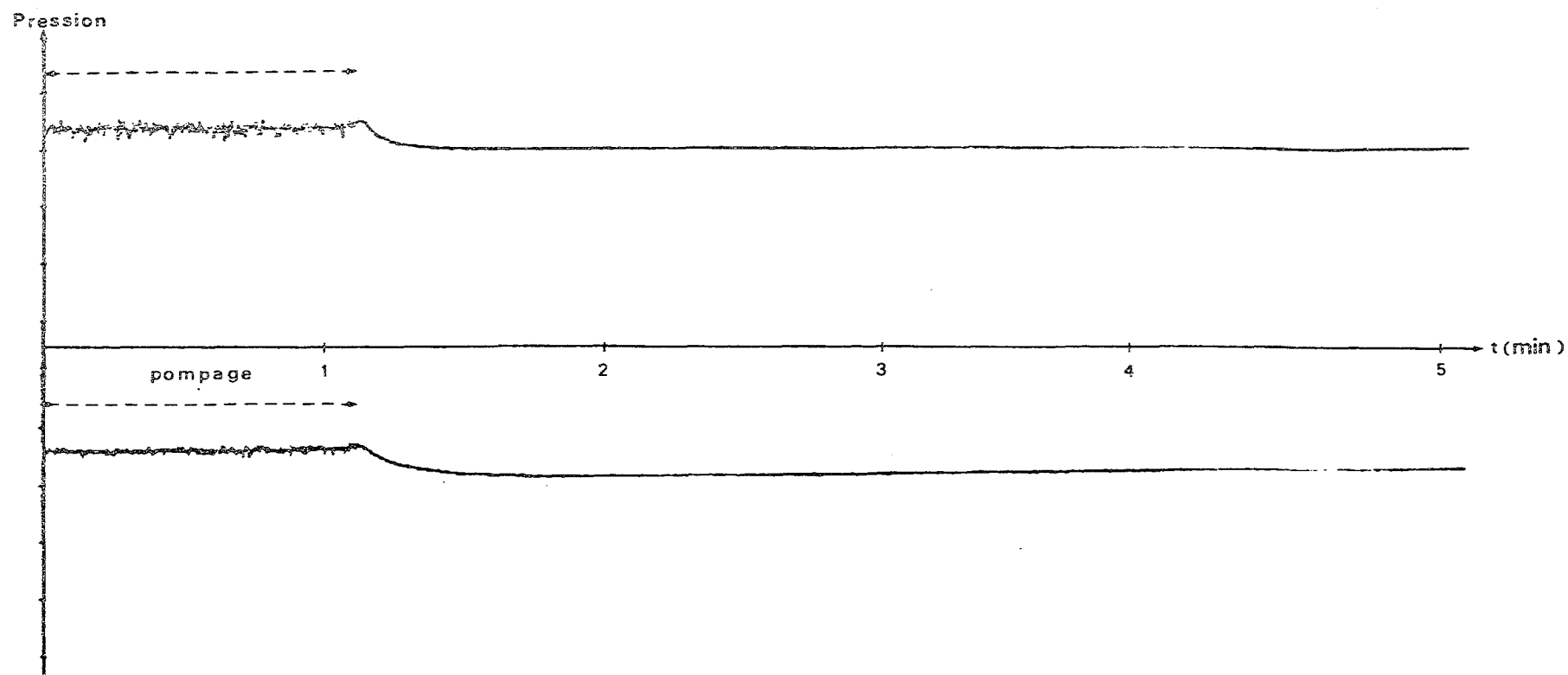


Figure V.1. - Signaux délivrés par deux capteurs de pression, lors de la sédimentation d'un échantillon de 3 kgs de sable

ANNEXE I

MESURE DE DENSITE PAR ABSORPTION DES RAYONNEMENTS GAMMA

(25)

Un rayonnement quelconque est absorbé par le milieu qu'il traverse suivant la loi :

$$I_r = I_i e^{-c \cdot \rho \cdot x}$$

où I_r représente l'intensité du rayonnement résultant.

I_i l'intensité du rayonnement incident.

c le coefficient d'absorption exprimé en cm^2/g qui est une caractéristique du produit absorbant.

ρ la masse volumique du produit absorbant, exprimée en g/cm^3 .

x la longueur d'absorbant traversé.

Les trois types de radiation émise par des radioisotopes sont les suivants :

- Alpha : la particule émise est constituée de deux protons et de deux neutrons.
- Bêta : la particule émise est un électron.
- Gamma : la particule émise est un photon.

Ce dernier type de rayonnement est utilisé couramment en densimétrie car les niveaux d'énergie ("forces de pénétration") des différents isotopes émetteurs de rayons gamma autorisent le passage de ceux-ci au travers des parois relativement épaisses des réservoirs et tuyauteries utilisés dans les processus industriels.

Différents isotopes, en particulier cobalt, radium, americium, sont générateurs de rayons γ , mais en raison de certaines de ces caractéristiques (période, énergie, coût, sécurité), le césium 137 est le radio-élément le plus utilisé en densimétrie.

Période d'un radio-élément

La période d'un radio-élément est une appréciation du niveau de désintégration de ces atomes. En effet, la transformation spontanée par désintégration d'un noyau I en un noyau J plus stable, se fait avec une probabilité

constante λ , caractéristique du noyau considéré. Si N est le nombre de noyaux N non encore désintégrés au temps t , le nombre dN de noyaux qui se désintègrent entre les instants t et $t + dt$ s'écrit : $dN = - \lambda N dt$. d'où, en intégrant cette équation entre les instants 0 et τ :

$$N = N_0 \exp (- \lambda \tau)$$

A partir de cette équation de décroissance radioactive on définit la période T , temps nécessaire à la désintégration de la moitié des atomes présents à l'instant initial :

$$T = \frac{0.693}{\lambda}$$

Ce "vieillissement" de la source entraîne une dérive du zéro qu'il faut parfois prendre en considération.

Activité d'un radio-élément

L'activité d'un radio-élément est un paramètre représentatif du nombre de particules émises par unité de temps (désintégration par unité de temps) ; il est exprimé en curie, ou, dans la pratique, en millicurie (mCi).

$$1 \text{ mCi} = 3.70 \times 10^7 \text{ désintégrations par seconde}$$

Il est intéressant de noter que l'activité d'un radio-élément est indépendante de la température, ce qui permet de le considérer comme une source d'énergie particulièrement stable.

ANNEXE II

CONDUITE DE PROCESSUS EN TEMPS REEL

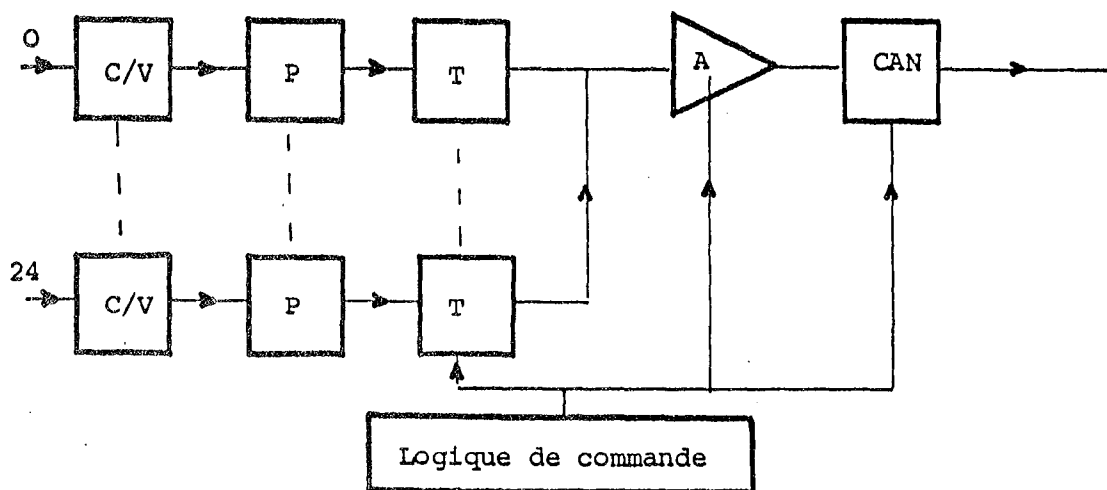
(30)(31)

I. PERIPHERIQUES SPECIALISES

Les "périphériques industriels" permettent l'interaction entre un organe de calcul et un processus quelconque ; il est intéressant de connaître leur principe, leurs performances, ainsi que leur influence au niveau de la bande passante et de la précision de la mesure.

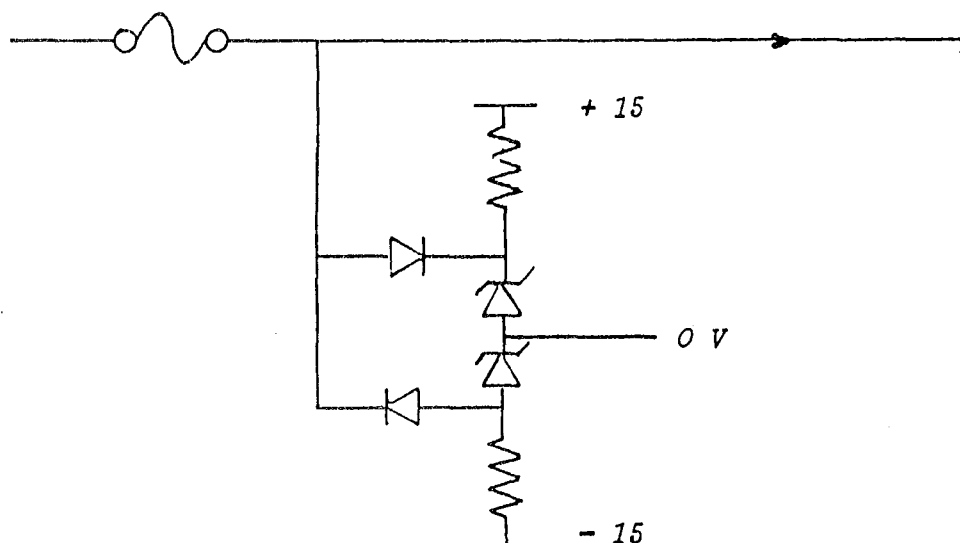
I.1. Coupleur d'entrée analogique IML

Les signaux aux normes 4 - 20 mA sont convertis en tension, passent dans un circuit de protection, puis dans un ensemble à transfert capacitif, qui fait office d'isolement, de bloqueur et de multiplexage ; ensuite, ils sont amplifiés et convertis en grandeurs digitales.

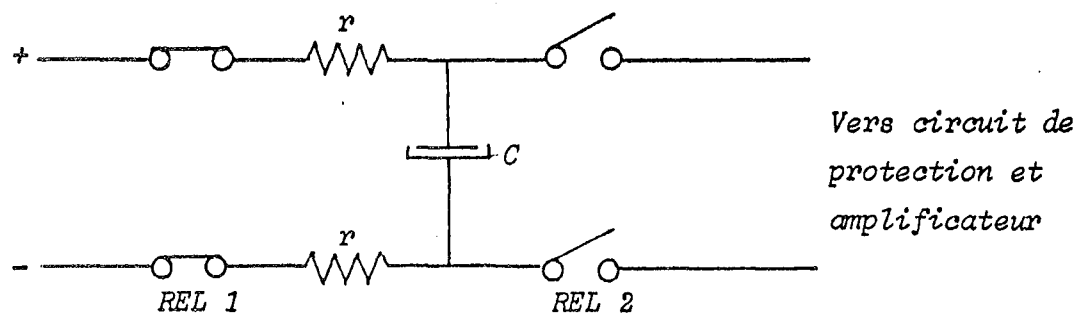


C/V : convertisseur courant tension par passage du courant dans une résistance de précision de $500 \text{ ohms} \pm 0,1 \%$.

P : circuit de protection. Protège les entrées de l'amplificateur contre les surtensions d'entrée en différentiel et en mode commun.



T : transfert capacitif.



Lorsque la voie N est sollicitée, le relais 1 s'ouvre et le relais 2 se ferme.

$2r \times C$ est la constante de temps de filtrage. Cette constante de temps et la vitesse de commutation des relais permettent de lire jusqu'à 50 voies par seconde.

A : amplificateur de gain programmable.

CAN : convertisseur analogique numérique rapide avec une résolution 11 bits + signe.

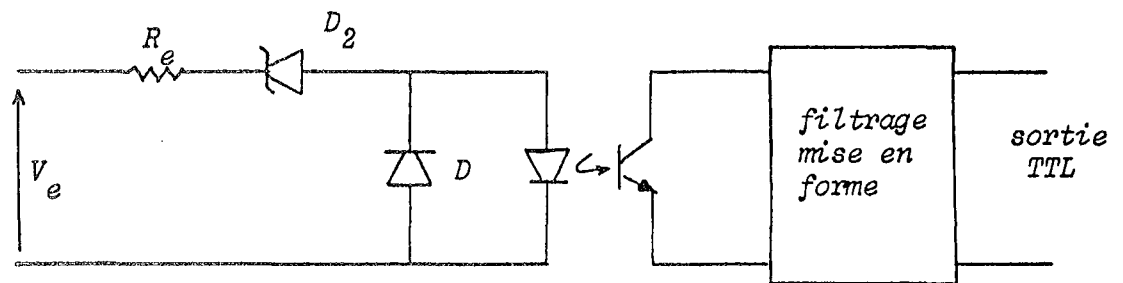
T_1 : Générateur de tension auxiliaire pour alimenter les 4 photocoupleurs.
 T_2, T_3 : Mise en puissance.
D : Protection
P : Photocoupleur

La plupart des charges Z sont des relais 24 volts.

I.4. Coupleur d'entrée digitale DIC

Il permet l'acquisition de 32 informations tout ou rien et génère une interruption de programme sur changement d'état d'une ou plusieurs entrées.

Chaque entrée est isolée galvaniquement par composant opto-électrique.
Le signal est filtré, puis remis en forme ($f = 50$ hertz).



R_e et D_z définissent :

- le courant consommé,
- le seuil de liaison pour l'immunité au niveau zéro.

D : protection.

II. LE SYSTEME TEMPS REEL

Les performances du processus commandé sont en grande partie liées aux possibilités d'action en temps réel du calculateur et, par là-même, à la qualité de son moniteur temps réel.

II.1. Le système et son rôle

Le système temps réel est un logiciel qui, dimensionné aux besoins du problème, est prêt à accepter les programmes qu'il doit gérer en temps réel. Il doit être configuré à partir du noyau de base fourni par le constructeur.

Le système gère un ensemble de tâches de priorités différentes, constituant l'application temps réel : son rôle est de réaliser l'enchaînement des tâches (Scheduler) et l'allocation des ressources (utilisation de l'unité **centrale**, de la mémoire, des périphériques). Il peut aussi utiliser les ressources laissées libres pour exploiter un ensemble de programmes qui, eux, ne dépendent pas directement du processus à contrôler, tel que le calcul scientifique, le traitement de données en différé ou la production de nouveaux programmes.

II.2. Organisation de la mémoire

La mémoire est divisée en cinq zones :

1. La zone occupée par le système : elle dépend de la configuration physique de l'installation (nombre de disques, nombre et type de périphériques, etc ...).
2. La zone réservée à la gestion des informations dynamiques du système. Cette zone, configurée par l'utilisateur, est l'espace de travail du système. Il y gère les demandes d'activation des tâches, les attentes d'événements, les ressources définies par l'utilisateur, les opérations sur horloge, les demandes d'ouverture et d'accès aux fichiers.
3. La zone des blocs de contrôle de tâches. Elle est également **configurée lors de la génération** du système et contient les renseignements concernant les tâches, tels que la valeur des registres au moment de l'interruption d'une tâche par une autre plus prioritaire.
4. La zone de données résidentes (Z.D.R.). Elle permet le transfert d'informations entre tâches et la sauvegarde de données modifiables entre deux exécutions d'une même tâche.

5. La zone des partitions des tâches de l'application. Elle s'implante sur toute la mémoire résiduelle. La taille de chaque partition et le nombre de partitions sont définis lors de la configuration de l'application par l'utilisateur.

Les partitions sont régies par un certain nombre de règles :

- A un instant donné, une seule tâche peut occuper une partition.
- A un instant donné, une tâche présente en mémoire occupe une seule partition (pas de chevauchement sur deux ou plusieurs partitions).
- Dans le temps, une même tâche peut être exécutée dans différentes partitions, plus précisément dans le sous-ensemble des partitions déclarées accessibles à cette tâche par l'opérateur.
- Au moment de son activation, une tâche non présente est chargée, depuis le disque, dans une partition qui lui est accessible avec son image initiale.

II.3. Les tâches utilisateur

Dans un contexte "temps réel" l'unité de base de programme est la "tâche" ; elle consiste en un module ou un ensemble de modules écrits en langage FORTRAN, PL16 ou ASSEMBLEUR.

Elle est produite sur disque par l'utilisation des processeurs (compilateur, éditeur de liens, etc ...) ; elle est mise sous contrôle du système "temps réel" par l'opérateur.

Au niveau externe, elle est identifiée par son numéro d'appel. L'opérateur lors d'interventions en ligne, ou d'autres tâches lors de requêtes programmées, font référence à ce numéro.

Au moment de l'écriture, l'utilisateur lui assigne une "priorité et un type par défaut". Ce sont les caractéristiques fonctionnelles avec lesquelles elle s'exécutera si l'opérateur par la commande appropriée ne les modifie pas.

Nous avons vu que la zone de mémoire où s'exécute la tâche est la partition. Au moment de l'écriture, l'utilisateur lui assigne une partition "par défaut" : c'est la partition dans laquelle elle s'exécutera normalement si l'opérateur, par la commande appropriée, ne modifie pas en ligne cette affectation.

Les tâches nécessitant un temps de réponse minimum résident en permanence dans leur partition. Les autres résident sur disques et sont chargées en mémoire centrale dans une partition avant leur exécution. L'état de résidence d'une tâche est figé, non pas à sa création, mais au moment de son introduction sous le système temps réel.

Une tâche résidant sur disque libère sa partition en fin d'exécution ; elle n'est pas réécrite sur disque, et lors de sa prochaine activation, si la partition antérieurement allouée a été occupée par une autre tâche, elle sera lue sur disque dans sa version initiale. D'une exécution à l'autre, une tâche résidente sur disque ne pourra donc pas se communiquer des données par des mémoires de travail.

Ceci intervient de façon critique lorsqu'on veut simuler un processus séquentiel en temps réel. En effet, lors de chaque activation, on calcule de nouvelles valeurs en fonction des anciennes. Dans ce cas, il faut utiliser un moyen de communication entre tâches ou encore utiliser une tâche résidente en mémoire.

Les états de fonctionnement des tâches, correspondant à l'état des files systèmes du "Scheduler" microprogrammé sont :

- **inexistante** : la tâche n'a pas été intégrée sous le système.
- **armée** : le système a enregistré au moins une demande d'activation immédiate.
- **en attente** : la tâche est masquée ou en attente d'une fin d'opération sortie, d'un accès à une ressource, d'un événement ou d'une combinaison d'événements, d'un délai, etc ...
- **éligible** : armée et non masquée.

- non prête : la tâche est éligible, mais le système doit réaliser une action supplémentaire avant de la lancer (la charger en mémoire si elle n'est pas présente ; attendre qu'elle soit validée si elle est inhibée).
- activable : éligible et prête.
- active : la tâche activable de plus haute priorité est la tâche active.

Notons que les tâches de très grandes dimensions peuvent être fractionnées par la technique de "l'overlay".

Il existe deux moyens de communication entre tâches :

- la zone des données résidentes, c'est un moyen d'accès rapide aux données, mais il crée un encombrement en mémoire centrale.
- les fichiers sur disque.

Le temps d'accès à l'information est alors important.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) J. RAGOT, M. AUBRUN, C. HUMBERT - Conduite automatique des installations d'enrichissement de minerais.
Le Point en Automatique, vol. 1. Technique et Documentation, 1981.
- (2) G. CSRESTY, R. VENKATESWAR - Particle size analysis. A review.
Fine Particles Processing. Las Vegas, Nevada, February 24/08/1980.
- (3) J.M. PREVOSTEAU, J.P. RAGOT - Possibilités d'utilisation du microscope téléviseur quantitatif pour l'étude de la texture et de la granulométrie des minerais.
Revue de l'Industrie Minérale - Mines. Supplément revue n° 4, Avril 1971.
- (4) V. FORMANEK, N. LALOY - Description des méthodes d'analyses granulométriques couramment utilisées au Centre d'Etude et d'Analyse des Minerais et Métaux.
Revue de l'Industrie Minérale - Mines. Supplément revue n° 4, Avril 1971.
- (5) K. SHONERT, W. SCHWENK, K. STEIER - Un appareil entièrement automatique pour les analyses granulométriques.
Aufbereit. Techn. Dtsch n° 7, 1974.
- (6) Sedigraph 5000. Notice d'utilisation.
- (7) Balance de sédimentation. Plaquette publicitaire.
- (8) P. JACQUEMIN - Principes de fonctionnement et caractéristiques générales des instruments de mesure en continu de pulpes abrasives.
Table ronde sur les capteurs de mesure.
Revue de l'Industrie Minérale - Les Techniques. Mars 1980.
- (9) Y. VINCENT - Recensement et comparaison des différents granulomètres utilisables comme capteur dans des circuits automatisés de traitement de minerai.
Examen probatoire en automatique CNAM. Février 1981.
- (10) T. NGOC LAN, M. DUPAS - Le granulomètre à laser.
Bulletin de Liaison des Laboratoires Ponts-et-Chaussées. Nov.-Déc. 1973.
- (11) J. CORNILLAULT - Particle size analyser.
Applied Optics, vol. 11, n° 2, February 1972.
- (12) J. MERIC - Mesure en continu de la granularité par diffraction d'un faisceau laser.
Bulletin de la Société Française de Céramique n° 95, Avril-Juin 1972.
- (13) G. BAUDET - Emploi de la méthode de Coulter pour les granulométries très fines.
Revue de l'Industrie Minérale - Mines. Supplément revue n° 4, Avril 1981.
- (14) Granulomètre à ultrasons. Notice du constructeur.
- (15) P.W. DART, J.A. SAND - Benefits to be expected from a real time measurement of particle size.
Conference of Metallurgists. Canadian Institute of Mining and Metallurgy. Quebec City, Canada. August 29, 1973.

- (16) B.F. OSBORNE - A complete system for on-stream particle size analysis.
Document Milltronics Limited.
- (17) ANONYME - Etude théorique et expérimentale du mouvement des corps solides dans un fluide.
Revue de l'Industrie Minérale. Préparation des Minerais. Document SIM LI, 1958.
- (18) C.W. OSEEN - Über den Galtigkeitsbereich der Stockes schon Widerstand Formel.
Ark. Mat., Astron. Fys. vol. 6, 1910.
- (19) W. RUBEY - Settling velocities of gravel, sand and silt particles.
Am. Journ. Sci., vol. 25, 1933.
- (20) L. BERTHOIS, A. GENDRE - Recherche sur le comportement hydraulique des particules sédimentaires.
Cahiers Océanographiques, XIX, 1967.
- (21) R.J. GIBBS, M.D. MATTHEWS, D. ALINK - The relationship between sphere size and settling velocity.
Journal of Sedimentary Petrology, vol. 41, n° 1, March 1971.
- (22) Schlumberger - Division Nucléomètre.
Notice technique du densimètre.
- (23) Schlumberger - Division Nucléomètre.
"Ce qu'il faut savoir sur les jauges à isotopes".
- (24) M. ROBERT - Réalisation et modélisation d'un granulomètre à sédimentation conduit par microprocesseur.
DEA Génie Electrique. Université de Nancy I, Octobre 1980.
- (25) D.R. CARLON - L'utilisation des jauges nucléaires pour les mesures sans contact de niveau et de densité.
Documentation Kay Ray Incorporated.
- (26) A.J. LYNCH - The use of simulation models in the design optimization and control of wet grinding circuits.
AIME Annual Meeting. San Francisco, 1972.
- (27) D. SAUTER - Commande auto-adaptative d'une unité de broyage - classification.
Thèse de 3ème Cycle Génie Electrique. Université de Nancy I. Juillet 1982
- (28) M. AMIRCHANY, D. NEEL - Analyse de données et informatique.
Cours de la Commission des Communautés Européennes.
- (29) J.L. NOIZETTE - Conduite d'un granulomètre à sédimentation par micro-processeur.
DEA Génie Electrique. Université de Nancy I. Octobre 1982.
- (30) SEMS - Documentation SOLAR.
- (31) P. HEITZMANN - Conception et réalisation de la commande d'un circuit de broyage - classification.
Thèse de Doctorat de Spécialité Automatique. Université de Nancy I
Juin 1979.

NOM DE L'ETUDIANT : ROBERT Michel

NATURE DE LA THESE : Doctorat 3ème cycle en génie électrique

VU, APPROUVE

ET PERMIS D'IMPRIMER

NANCY, le 1. NOV. 1982 2746

LE PRESIDENT DE L'UNIVERSITE DE NANCY I,



Cette étude est relative à la conception et à la réalisation d'un granulomètre permettant la mesure de la taille des particules appartenant à une pulpe monophasique.

La courbe granulométrique est obtenue par interprétation d'une mesure de densité. Effectuée à l'aide d'un densimètre à rayon gamma, elle permet d'observer l'évolution de la densité de la pulpe pendant la sédimentation des particules.

Dans une première étape, les traitements numériques nécessaires à l'élaboration de la courbe granulométrique ont été réalisés sur minicalculateur.

Dans une seconde étape, l'ensemble des algorithmes permettant la réalisation d'une mesure de granulométrie sont implantés sur un microprocesseur, qui rend autonome le granulomètre et en fait un capteur directement implantable dans une industrie de traitement de minerais.

Mots-clés : Granulomètre à sédimentation.

Microprocesseur.

Capteur de granulométrie.