

**SUSPENSION DE GRAPHITE
DANS LE GAZ CARBONIQUE**

par

Roland ROCHE

Rapport C E A - R 2741

1965

CEA-R 2741 - ROCHE Roland, MOUSSEZ Claude, ROUVILLOIS Xavier,
BREVET Roland

SUSPENSION DE GRAPHITE DANS LE GAZ CARBONIQUE

Sommaire. - Depuis 1963 la Division Atomique de la SNECMA conduit, dans le cadre d'un contrat avec le Commissariat à l'Energie Atomique, l'étude expérimentale d'une suspension de fines particules de graphite dans le gaz carbonique. L'objectif principal est d'obtenir des informations d'ordre mécanique et technologique sur la mise en oeuvre de l'écoulement de ce fluide diphasé.

Le circuit expérimental comprend principalement : un compresseur, une pompe "phase lourde", un réchauffeur, un refroidisseur à eau, un tube en U, une section d'essais transparente et un séparateur.

Le fluide circule très aisément dans un large domaine de variation de la masse volumique (30 à 170 kg/m³) et de la vitesse (2 à 24 m/s).

La mise en circulation et la stabilité de l'écoulement sont assurées sans difficulté, même avec la pompe "phase lourde" seule.

On n'observe aucune tendance à l'agglomération ni aucun dépôt de graphite sur les parois.

./.

CEA-R 2741 - ROCHE Roland, MOUSSEZ Claude, ROUVILLOIS Xavier,
BREVET Roland

GRAPHITE SUSPENSION IN CARBON DIOXIDE

Summary. - Since 1963 the Atomic Division of SNECMA has been conducting, under a contract with the CEA, an experimental work with a two-component fluid comprised of carbon dioxide and small graphite particles. The primary purpose was the determination of basic engineering information pertaining to the stability and the flowability of the suspension.

The final form of the experimental loop consists mainly of the following items : a light-phase compressor, a heavy-phase pump, an electrical-resistance type heater section, a cooling heat exchanger, a hairpin loop, a transparent test section and a separator.

During the course of the testing, it was observed that the fluid could be circulated quite easily in a broad range of variation of the suspension density and velocity - density from 30 to 170 kg/m³ and velocity from 2 to 24 m/s. The system could be restarted and circulation maintained without any difficulty, even with the heavy-phase pump alone. The graphite did not have a tendency to pack or agglomerate during operation. No graphite deposition was observed on the wall of the tubing.

./.

Un essai d'endurance (250 heures) a permis de suivre l'évolution des particules. La surface spécifique de la poudre voisine de $20 \text{ m}^2/\text{g}$ au départ (dimension des particules de l'ordre du micron) atteint une valeur asymptotique de $300 \text{ m}^2/\text{g}$ (dimension des particules inférieure à $0,3 \text{ micron}$).

On a aussi examiné l'effet de l'humidité sur la stabilité de l'écoulement, la distribution du débit entre des canaux parallèles, les pertes de pression dans un tube rectiligne ainsi que le rapport de recompression dans un divergent.

1964

35 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

A long period run (250 hours) has shown the evolution of the particle dimensions. Starting with graphite of surface area around $20 \text{ m}^2/\text{g}$ (graphite particles about 1μ), the powder surface area reaches an asymptotic value of $300 \text{ m}^2/\text{g}$ (all the particles less than $0,3 \mu$).

Moisture effect on flow stability, flow distribution between two parallel channels, pressure drop in straight tubes, recompression ratio in diffusers were also investigated.

1964

35 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

Les rapports du COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE sont, à partir du n° 2200, en vente à la Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 16, rue Lord Byron, PARIS VIIIème.

The C.E.A. reports starting with n° 2200 are available at the Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 16, rue Lord Byron, PARIS VIIIème.

- Rapport CEA-R 2741 -

Service des Etudes Mécaniques et Thermiques

SUSPENSION DE GRAPHITE DANS LE GAZ CARBONIQUE

par

Roland ROCHE

Commissariat à l'Energie Atomique

Claude MOUSSEZ, Xavier ROUVILLOIS, Roland BREVET

Division Atomique de la S.N.E.C.M.A.

Ont collaboré à cette étude à la Division Atomique de la S.N.E.C.M.A.

Jean SEGUIN, Jean CRAMBES, Willis JEAN-LOUIS, Arlette MIHAIL

- Janvier 1965 -

TABLE DES MATIERES

	Page
NOTATIONS	1
INTRODUCTION	3
I - DESCRIPTION DU CIRCUIT	4
1° - Circulateur	4
2° - Appareils principaux du circuit diphasé	5
3° - Section d'essais et de mesures	5
4° - Auxiliaires	5
5° - Mesures directes	6
II - CARACTERISATION DES COMPOSANTS DE LA SUSPENSION	6
1° - Gaz carbonique	6
2° - Poudre de graphite	6
3° - Suspension ou mélange des deux phases	7
III - EXPLOITATION DU CIRCUIT	7
1° - Mesures sur le circuit	8
a) - Nomenclature	8
b) - Utilisation des mesures	8
2° - Dépouillement des mesures	8
a) - Méthode de calcul	8
b) - Résultats concernant la détermination de $\bar{\rho}$ et Q_T	10
c) - Résultats concernant la détermination du ρ local dans une section.	11
3° - Définition du champ de fonctionnement	11
4° - Remarques générales concernant le comportement de la suspension.	12

	Page
IV - ESSAIS PARTICULIERS	12
1° - Essai d'endurance	13
a) - But et condition de l'essai	13
b) - Résultats	13
2° - Essai de pollution par la vapeur d'eau	15
a) - But et condition de l'essai	15
b) - Résultats	15
3° - Distribution du débit dans les canaux en parallèle	15
a) - But et condition de l'essai	15
b) - Résultats	15
4° - Pertes de charge	16
5° - Aptitude à la recompression d'une suspension dans un divergent	16
a) - But et condition de l'essai	16
b) - Résultats de visualisation	16
c) - Résultats quantitatifs	16
d) - Effets de contraction de la veine au col de la tuyère	19
6° - Etudes préliminaires d'un circulateur	19
V - CONCLUSION	19

- NOTATIONS -

p	pression
p_u	pression dans le tube en U
p_{uM}	pression dans le venturi mélange
p_1	pression dans la section maximale d'une tuyère
p_2	pression dans la section maximale aval d'une tuyère
p_{col}	pression dans le col d'une tuyère
$p'_{arrêt}$	pression à l'infini aval d'une tuyère
p	pression à l'infini
Δp_{asc}	variation de pression dans la branche ascendante du tube en U
Δp_{des}	variation de pression dans la branche descendante du tube en U
Δp	variation de pression dans un venturi
Δp_{20}	variation de pression dans le tube \varnothing 20 mm
Δp_{40}	variation de pression dans le tube \varnothing 40 mm
Δp_1	$p_1 - p_{col}$
Δp_2	$p_2 - p_{col}$
T_U	température dans le tube en U
T_{vM}	température dans le venturi mélange
T_1	température à l'entrée du réchauffeur
T_2	température à la sortie du réchauffeur
$\bar{\rho}$	masse volumique moyenne de la suspension
ρ	masse volumique locale de la suspension dans une section
ρ_U	masse volumique gaz dans le tube en U
$\frac{\rho_U}{\bar{\rho}_U}$	masse volumique moyenne dans le tube en U, déterminée au moyen de mesures dans le tube en U.
ρ_s	masse volumique de la phase solide
ρ_U^*	masse volumique moyenne de la suspension dans le tube en U, déterminée au moyen du venturi "mélange"

$\bar{\rho}_{vM}$	masse volumique moyenne de la suspension dans le venturi mélange
$\bar{\rho}_{Cp}$	masse volumique moyenne de la suspension dans les canaux en parallèle
ρ_U^{**}	masse volumique moyenne dans le tube en U, déterminée au moyen des venturis des canaux parallèles
W_{el}	puissance électrique
W_{eff}	puissance effectivement transmise au mélange gaz-poudre
Q	débit de gaz
Q_1	débit global du mélange diphasé
ΔH	variation d'enthalpie du gaz
ΔH_s	variation d'enthalpie de la phase solide
π	rapport de pression dans un venturi
$G(\pi)$	fonction caractéristique d'un venturi
C	coefficient de débit ou de contraction relatif à un venturi
s	section au col d'un venturi
N	nombre d'impulsions dans le compteur GM, par unité de temps
N_{HT}	nombre d'impulsions dans le compteur GM, par unité de temps, dans le cas où le faisceau de rayon β ne traverse que l'air
ϕ	diamètre géométrique d'un tube
C_f	coefficient de frottement
D	diamètre hydraulique d'une conduite
L	longueur de la section de mesure de perte de charge
u	vitesse de circulation de la suspension
u_{st}	vitesse standard de circulation de la suspension, rapportée à un tube de ϕ 20 mm dans les conditions du tube U .
u_{col}	vitesse de circulation de la suspension au col d'une tuyère
Re	nombre de Reynolds
η	rapport de recompression, relatif à un divergent

SUSPENSION DE GRAPHITE DANS LE GAZ CARBONIQUE

INTRODUCTION

Les fluides utilisés comme caloporteurs dans les réacteurs nucléaires sont d'autant plus attrayants qu'ils sont plus denses, moins absorbants pour les neutrons, supportent mieux les températures élevées et que leur emploi n'exige pas des conditions spéciales telles que le maintien d'une pression élevée. L'eau est un excellent caloporteur mais sa température d'utilisation est limitée, les métaux liquides posent maints problèmes techniques, quant aux gaz ils n'atteignent des densités suffisantes que sous une pression assez élevée.

Les suspensions de graphite dans un gaz, si elles sont industriellement exploitables, peuvent fournir un type de fluide de refroidissement présentant des caractéristiques globales voisines de celles du gaz avec une densité, donc un pouvoir caloporteur incomparablement plus élevé pour une pression moindre.

Par exemple en utilisant la technologie du prototype EL 4 et en remplaçant le gaz carbonique à 60 bars par une suspension de graphite d'une masse volumique voisine de 160 kg/m^3 exploitée sous une pression de 16 bars, on peut concevoir une centrale nucléaire plus économique que celle utilisant le gaz : par réduction de l'épaisseur du tube de force, réduction de la section et de l'épaisseur du circuit de gaz, réduction du pas et de la masse d'eau lourde, réduction de la puissance de soufflage.

Les techniques de fluidisation qui se sont considérablement développées en Génie Chimique ces dernières décennies peuvent constituer une introduction à l'étude des suspensions. Les ouvrages classiques (1)(2)(3) ayant été étudiés, il a fallu constater qu'il n'était guère envisageable de fluidiser au sens propre, c'est-à-dire de faire circuler le gaz par rapport à la poussière dans des circuits tels que ceux d'un réacteur nucléaire. De même le transport pneumatique classique ne paraissant pas permettre un écoulement suffisamment stable, des études spécifiques devaient donc être entreprises.

Cette idée semblait se développer simultanément en divers lieux, comme en témoignent certaines demandes de brevets (4), mais il faut attendre 1959-1960 pour voir apparaître dans le cadre d'un programme de recherche cohérent, les résultats des travaux expérimentaux effectués par une équipe de la BABCOK AND WILCOX CIE (5) sous la direction de SCHLUDERBERG D. C. (6).

Cette équipe s'est principalement attachée à définir les transferts de chaleur et pertes de charge associés à des suspensions de graphite dans l'azote ou de l'hélium.

Plus récemment (1961) le FRANKLIN INSTITUTE [7] a publié un rapport faisant le point sur la technologie des suspensions et indiquant dans quelles directions les recherches devraient être poursuivies. Il ressort de ce rapport que, si les avantages d'une suspension en tant qu'agent de refroidissement sont bien claires du fait de sa capacité calorifique volumique élevée, il reste à faire la preuve de la stabilité de la suspension à toutes les températures et dans toutes les configurations géométriques rencontrées dans un circuit de pile ainsi que de la sûreté d'exploitation d'un réacteur utilisant un tel réfrigérant.

Des études sur ce sujet ont également été menées à l'Université RUTGERS (NEW BRUNSWICK) ainsi que dans d'autres organismes [8].

L'étude expérimentale du comportement d'une suspension de particules de graphite dans du gaz carbonique a été entreprise en 1963 par la Division Atomique de la SNECMA dans le cadre d'un contrat avec le Commissariat à l'Energie Atomique. Au cours de la première étape des recherches, dont les conclusions apparaissent dans ce rapport, il s'agissait principalement :

- de définir les domaines de masse volumique et de vitesse pour lesquels on obtenait un écoulement stable,
- de suivre qualitativement et quantitativement l'évolution de la poudre et du gaz au cours d'essais de longue durée,
- d'évaluer la possibilité de recompression du mélange dans un divergent,
- d'étudier le comportement de la suspension vis à vis d'obstacles divers tels que diaphragmes, coudes, etc ...
- d'observer l'influence sur l'écoulement de l'injection d'eau dans une boucle,
- d'examiner d'une façon générale tout ce qui concerne la technique de mise en oeuvre des écoulements des suspensions en insistant sur le côté mécanique et technologique.

On trouvera dans ce rapport, après une brève description de la boucle d'essais, l'ensemble des résultats des observations et des mesures effectuées au cours de cette dernière étape.

Parallèlement, certaines réflexions et études documentaires et théoriques ont été menées dans le but d'application directe à l'expérimentation.

I. DESCRIPTION DU CIRCUIT (Planche 1, 2 et 3)

Le circuit expérimental utilisé est normalement conçu pour pomper séparément les deux phases : la poussière de graphite et le gaz support. Il comprend trois sections principales : une section où circule le mélange que nous appelons circuit diphasé, une section où circule le gaz seul et une section de pompage de la poussière.

1° - Circulateurs.

Dans le but de séparer les fonctions de circulation pour les deux composants du fluide diphasé on dispose :

- pour le gaz, d'un compresseur alternatif de marque CREPELLE

- vitesse de rotation 400 t/min
- pression d'aspiration 10 bars
- pression de refoulement 13,5 bars
- volume refoulé $27 \text{ m}^3/\text{hr}$

- pour la poudre, d'une pompe à vis de marque MONO PUMPS équipée d'un variateur CARTER GEARS de 7,5 CV permettant une variation continue de la vitesse de rotation de 28 à 750 t/min. La pompe assure un débit de 0,65 litre/tour sous un Δp de 3 bars.

2° - Appareils principaux du circuit diphasé.

Les deux circulateurs alimentent un mélangeur qui est le point de départ du circuit diphasé

Le fluide obtenu passe alors dans un tube chauffé par effet Joule (90 kW) et soigneusement calorifugé, qui permet d'effectuer une mesure d'augmentation d'enthalpie.

Le mélange est ensuite refroidi dans un échangeur à eau, circule dans une suite de sections d'essais et de tuyauteries diverses avant d'être introduit dans un séparateur cyclone à double étage qui rejette la phase solide dans une trémie alimentant la pompe à vis et renvoie vers le compresseur le gaz carbonique dans lequel ne doit subsister qu'une quantité de poudre aussi faible que possible.

3° - Sections de mesures et d'essais.

A la suite de la section de chauffage on trouve en série une chambre de mélange permettant de définir la température moyenne du fluide et un venturi destiné à évaluer le débit total.

Entre l'échangeur-refroidisseur et le séparateur on rencontre successivement :

- une canalisation en U de diamètre 40 mm qui sert à tirer une valeur de la densité moyenne du mélange à partir des mesures de pression effectuées sur chacune des branches,
- deux canalisations en parallèle équipées de vannes et de venturis pour étude des écoulements dans des dérivations (pl. 4),
- une maquette à 7 barreaux dans un canal circulaire à paroi transparente pour étude du comportement de la suspension dans un faisceau de barreaux,
- une section d'essais transparente de section rectangulaire $60 \times 20 \text{ mm}^2$ (pl. 5) dans laquelle on peut introduire des obstacles divers (diaphragmes, cylindres perpendiculaires à l'écoulement) ou adapter des contours de formes différentes (convergent-divergent),
- une partie droite de canalisation circulaire pouvant être équipée ou non d'une bande vrillée, sur laquelle sont effectuées des mesures de perte de charge,
- une station de mesure de masse volumique par atténuation du rayonnement β (pl. 6). La source est du Sr^{90} , le compteur un GEIGER MULLER.

Signalons que le by-pass du compresseur phase légère aboutit en amont du séparateur de telle sorte que ce dernier garde son efficacité même pour des vitesses faibles de la suspension.

4° - Auxiliaires.

Une boîte à gants permet d'introduire la poudre avec le maximum de sécurité quant à sa propreté. Elle est reliée directement à la trémie d'alimentation de la pompe à vis.

Le remplissage de gaz se fait à partir d'une bouteille de gaz carbonique comprimé.

Un circuit complexe permet de faire, avant remplissage, le vide dans la totalité de la boucle ou dans certaines parties seulement.

Deux robinets permettent d'effectuer des prélèvements de gaz et de poudre.

5° - Mesures directes.

La répartition radiale des températures du mélange à l'entrée et à la sortie du préchauffeur est obtenue par des sondes qui portent quatre thermocouples chromel-alumel classiques.

Les pressions sont mesurées sur le circuit au moyen de manomètres en U à mercure pour les pressions différentielles et de manomètres métalliques BOURDON pour les pressions absolues. Afin d'éviter l'obstruction des lignes de pression par la poudre, celles-ci sont équipées de vannes d'isolement, de capacités de décantation avec filtre et d'un système de soufflage de CO₂ à contre-courant.

II. CARACTERISATION DES COMPOSANTS DE LA SUSPENSION

Celle-ci comporte une phase gazeuse : le gaz carbonique, et une phase solide : la poudre de graphite.

1° - Gaz carbonique.

Il est livré par la Société "L'AIR LIQUIDE" en bouteilles sous pression. Le taux d'humidité est mesuré au moyen de la détermination de son point de rosée. En moyenne, la livraison portait sur du gaz qui recélait 1 ppm en masse d'eau.

Le taux d'oxygène est obtenu au moyen de la mesure de la résistance d'un fil d'oxyde de cuivre porté à 900°C. Le gaz livré comportait en moyenne 12 ppm \pm 2 ppm en masse d'oxygène.

2° - Poudre de graphite.

Elle est fabriquée par la Société GRAPHOIL à partir de barres de graphite de qualité nucléaire fournies par PECHINEY. Un broyeur à boulets mis en régime rapide permet d'obtenir une poudre très fine (particules de l'ordre du micron) en introduisant cependant quelques traces d'impuretés dont on donne les teneurs au paragraphe IV.

Après concassage la poudre contenue dans une bouteille métallique est dégazée pendant 4 heures à une température de 650°, sous 2/100ème de bar. La bouteille est ensuite mise sous une pression de 1,5 bar de gaz carbonique.

Plusieurs paramètres ont servi à suivre son évolution.

a) - Surface massique.

Elle caractérise le degré de fragmentation de la poudre. Elle a été mesurée au moyen de la méthode dite B. E. T basée sur l'adsorption d'une couche monomoléculaire d'un gaz (azote). A titre d'ordre de grandeur, des échantillons livrés par la Société GRAPHOIL ont une surface massique moyenne de 16 m²/g.

b) - Granulométrie.

Elle a pour objet de classer, dans un échantillon de poudre, les corpuscules en différentes catégories différenciées par une de leurs dimensions. Elle a été effectuée au moyen d'un

microscope optique classique muni d'un objectif spécial visant sur une suspension de la poudre à examiner dans de l'huile synthétique. Une méthode originale développée à la SNECMA permet d'obtenir un pouvoir séparateur inférieur à $0,25 \mu$ et un grossissement constant d'environ 3000 dans l'ensemble du domaine de visibilité des particules. Dans leur numération on introduit une correction tenant compte du fait que le volume utile change avec la dimension des particules. Il a été constaté que dans un échantillon vierge, 92% des particules avaient des tailles inférieures au micron (planche 7, figure A). Par ailleurs il semble que les grains se présentent sous forme de plaquettes d'épaisseur petite devant leur diamètre, qui constitue la dimension caractéristique.

c) - Analyse chimique.

Elle s'effectue par voie spectrographique pour les mesures qualitatives et par voie de fluorescence X pour les mesures quantitatives.

d) - Chaleur spécifique.

Elle a été déterminée par la méthode des mélanges ; c'est la même que celle du graphite solide.

e) - Etude rhéologique.

C'est l'étude des déformations du simili-fluide que représente une poudre. Des essais d'écoulement dans une seringue ont été effectués. L'angle de talus a été trouvé de l'ordre de 37 degrés.

La facilité d'écoulement dépend du tassement initial et de la vitesse de déplacement du piston de la seringue. Plus la vitesse augmente, plus l'écoulement est régulier.

f) - Taux d'humidité.

Cette grandeur a été déterminée au moyen d'une chauffe et d'une absorption dans un réactif hydrophile.

3° - Suspension ou mélange des deux phases.

Elle peut être caractérisée par sa masse volumique apparente, sa viscosité, sa chaleur spécifique, sa conductivité thermique, la vitesse du son qu'elle transmet, sa conductivité électrique, sa faculté de recompression dans un divergent, sa stabilité dans l'espace (séparation) et dans le temps (usure), sa facilité d'écoulement dans une installation industrielle.

Certaines de ces caractéristiques ont fait l'objet des études dont les résultats sont exposés plus loin.

III. EXPLOITATION DU CIRCUIT

Nous allons tout d'abord exposer le principe des mesures, leur exploitation, leur dépouillement et les résultats concernant l'utilisation du circuit.

1° - Mesures sur le circuit.

a) - Nomenclature (planche 1)

Elles ont eu pour objet la détermination immédiate des grandeurs suivantes :

- intensité et différence de potentiel dans le tube de chauffe
- température en trois sections de la boucle
- pressions différentielles et absolues
- débits de gaz et de mélange
- atténuation d'un rayonnement β dans la suspension

b) - Utilisation des mesures.

Elles conduisent à la détermination des caractéristiques suivantes, pour certaines redonbantes, mais un souci de recoupement nous a guidé :

- débit de la suspension, à partir du bilan thermique dans le réchauffeur
- débit de poudre, à partir des débits du mélange et du gaz seul
- masse volumique de la suspension à partir des chutes de pression dans le tube en U
- masse volumique de la suspension à partir du débit mesuré, grâce au venturi-mélange. Celui-ci peut donner le débit si l'on connaît la masse volumique, mais aussi la masse volumique si l'on connaît le débit, ici emprunté au bilan thermique du réchauffeur
- masse volumique de la suspension à partir du débit mesuré grâce aux venturis des tubes parallèles
- répartition des phases dans une section et masse volumique de la suspension à partir de la mesure bétamétrique
- perte de charge et loi de frottement (sur la base d'un coefficient de viscosité de la suspension identique à celui du gaz) à partir de mesures de pression dans les tubes, la section à 7 barreaux et un tube muni d'une vrille.

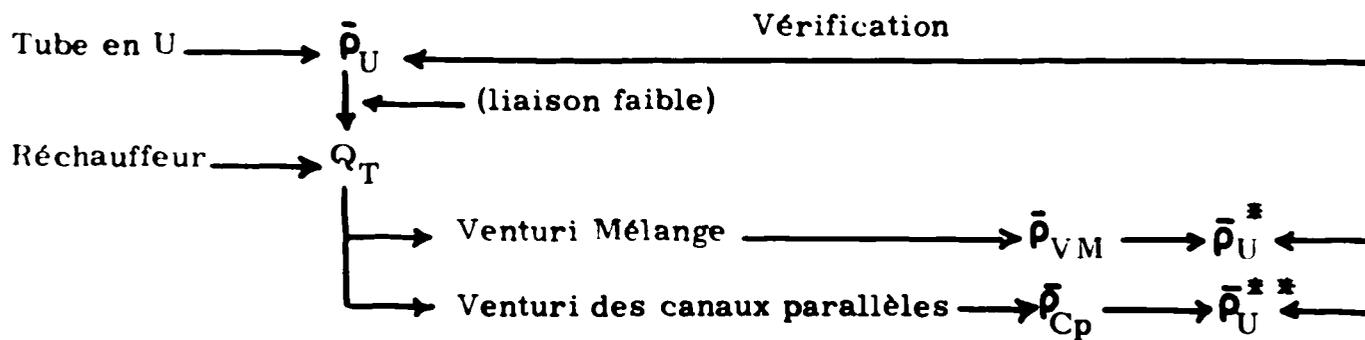
2° - Dépouillement des mesures.

a) - Méthode de calcul.

Il est supposé que les deux phases sont en équilibre thermique et dynamique, ce qui est assez bien vérifié par les conséquences qu'on en tire.

Appareils	Mesures	Méthodes	Grandeur de résultante
Tube en U	Δp_{asc} Δp_{des} p_U T_U	$\bar{p}_U = p_U + 0,34 (\Delta p_{asc} + \Delta p_{des})$ (Δp en bars)	\bar{p}_U
Réchauffeur	W_{el} T_1 T_2 (chambre de mélange)	Correction $W_{el} \rightarrow W_{eff}$ $(T_1, T_2) \rightarrow \Delta H$ et ΔH_s $\bar{p}_U \rightarrow \frac{Q}{Q_T} = \frac{p_U}{p_U} \times \frac{p_s - \bar{p}_U}{p_s - p_U}$ $W_{eff} = Q_T \left(\frac{Q}{Q_T} H + \left(1 - \frac{Q}{Q_T} \right) \Delta H_s \right)$	Q_T
Venturi Mélange	Δp p_m (amont) T_{vm}	π = rapport de pression et $G(\pi)$ est caractéristique du venturi $\frac{Q_T}{s \sqrt{2 p \bar{p}}} = C G(\pi)$ avec $C \approx 0,94$ $\bar{p}_{VM} = \frac{1}{0,88} \frac{1}{2p} \left[\frac{Q_T}{s G(\pi)} \right]^2$ $\bar{p}_U^* = \bar{p}_{VM} \frac{p_U}{p_{VM}} \cdot \frac{T_{VM}}{T_U}$	\bar{p}_{VM} \bar{p}_U^*
Venturi canaux parallèles	mêmes mesures	même méthode	\bar{p}_{cp} \bar{p}_U^{**}
Installation de bétamétrie	$\frac{N}{N_{HT}}$	Compéraisson à un étalon \rightarrow masse graphite locale	ρ_{local}
Tube horizontal de 1 m long et ϕ 20	Δp_{20}	$Cf = \frac{1}{2} \frac{D}{L} \frac{\Delta p}{\bar{p}_U^2}$ toutes valeurs rapportées au tube horizontal	Cf
Tube en U	Δp_{asc} Δp_{des}	$\Delta p_{40} = \frac{1}{2} (\Delta p_{asc} - \Delta p_{des})$ même formule pour Cf toutes les valeurs rapportées au tube en U	Cf

b) - Résultats concernant la détermination de $\bar{\rho}$ et de Q_T
 Recoupement des diverses valeurs de $\bar{\rho}$



- Tableau des résultats.

Toutes les valeurs sont rapportées au tube en U. Les vitesses "standard" sont rapportées à une section de 20 mm de diamètre dans les conditions au tube en U.

Points	Q_T	$\bar{\rho}_U$	$\bar{\rho}_U^*$	$\bar{\rho}_U^{**}$	$\bar{\rho}_U$ choisi	U standard	Observations
	kg/s	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	m/s	
B ₂	0,383	85	90,3	95,5	91	13,3	
B ₃	0,442	64,7	69,3	67,5	68	20,6	
B ₄	0,343	50,7	49,7	52,8	50	21,8	
B ₅	0,278	56,5	61	60,2	59	15	
B ₆	0,250	31,6	36	37	36	22,2	
B ₇	0,440	188,5	165	152 et 148			
B ₇ [*]	0,440	152,6	165	152 et 148	(155)	(9)	
B ₈	0,425	83,5	86,5	92	85	15,9	
B ₉	0,461	97,6	103	101	100	14,65	
B ₁₀	0,288	43	38,6	37,1	39	23,7	
B ₁₁	(0,480)	77,4	(93)	(92)			
B ₁₁ [*]	(0,445)	77,4	(81,3)	(80)	(78)	(18,15)	
B ₁₂	0,425	156	145	146	153	8,9	poudre seule
A ₁	0,300	64,5	62	61,2 et 61,8	63	15,14	
A ₂	0,368	102	105,8	111	105,5	11,1	
A ₃	0,480	116	114	114 et 115	115	13,3	
A ₄	0,604	92	92,3	91,3 et 91,7	92	20,9	

- Tableau des résultats (suite).

Points	Q_T	$\bar{\rho}_U$	$\bar{\rho}_U^*$	$\bar{\rho}_U^{**}$	$\bar{\rho}_U$ choisi	U standard	Observations
	kg/s	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	m/s	
A ₅	0,506	169,3	171,5	170 et 173	171	9,2	poudre seule
A ₆	0,640	100	96,2	101 et 102,5	99	20,55	
A ₇	0,420	116	122	115,5 et 116,7	119	11,3	
A ₈	0,505	84	82,5	89	64	19,2	
S	0,462	59,7	-	72,3	72	20,4	poudre ultra- fine

Les valeurs entre parenthèse désignent des points pour lesquels existe une incertitude sur certaines mesures.

Les points avec astérisque correspondent à un renouvellement de la mesure.

c) - Résultats concernant la détermination du ρ local dans une section.

Les mesures faites au moyen du compteur G. M. ne permettent pas de définir avec une grande précision la répartition de densité d'une section tubulaire mais cependant la densité semble augmenter vers la périphérie du tube, ce qui est en accord avec les profils de température relevés à la sortie du préchauffeur.

3° - Définition du champ de fonctionnement.

La planche n° 8 présente tous les points d'essais retenus dans un diagramme ($\bar{\rho}_U, u_{st}$). Les caractéristiques $\bar{\rho}_U$ et u_{st} de l'écoulement sont déterminées au tube en U pour la densité, dans une section du tube \varnothing 20 mm pour la vitesse.

On note sur le graphique deux limites :

- l'une qui correspond au maximum du débit du compresseur (on atteint des vitesses standard supérieures à 20 m/s jusque vers $\bar{\rho}_U = 100$ kg/m³),

- l'autre qui correspond au maximum du débit de la pompe à poudre.

On remarque que pour des faibles densités et faibles vitesses, on trouve assez peu de points d'essais dans ce graphique. Il ne s'agit pas d'impossibilité ou d'instabilité de fonctionnement de la boucle dans ce domaine, mais d'une difficulté dans le dépouillement des mesures correspondantes due à une dispersion de la mesure de température dans la chambre de turbulence ; toutes les autres mesures donnent des valeurs normalement stables.

Au cours des expériences, les paramètres caractéristiques ont couvert les plages

suivantes :

- pression de 4 à 8 bars
- masse spécifique du mélange $\bar{\rho}_U$ de 30 à 170 kg/m³
- vitesse standard u_{st} de 9 à 24 m/s

(Rappelons que u_{st} est rapportée au tube \varnothing 20 mm et qu'en conséquence la vitesse minimum de la suspension est descendue jusqu'à 2 m/s environ dans certaines parties du circuit).

4° - Remarques générales concernant le comportement de la suspension.

a) - Les essais (*) ont montré que la mise en circulation d'une suspension est aisée et ceci dans des conditions variables de vitesse et de densité. Les limites du champ de fonctionnement obtenues expérimentalement ne sont pas dues à l'apparition de régimes instables ou pulsatoires pour le fluide, mais sont imputables à la perméabilité de l'installation et à la puissance des circulateurs.

Dans ces limites le régime de l'écoulement a toujours montré un caractère de stabilité certain, sans apparition de bouchons de poudre. Un dispositif spécial a permis de constater que la discontinuité provoquée par l'injection locale d'une bouffée de gaz chaud n'est pas décelable quelques dizaines de centimètres plus loin.

Les démarrages avec introduction progressive de la poudre dans le gaz en circulation ou inversement les arrêts de l'installation par le processus inverse (arrêt de la pompe phase lourde suivi d'un balayage par le gaz seul) n'ont jamais présentés de difficulté.

Le comportement satisfaisant de l'écoulement se retrouve lorsque la pompe à vis fonctionne seule, la masse volumique de la suspension pouvant alors dépasser 200 kg/m³. La mise en circulation de la poudre au repos remplissant les tuyauteries de la boucle s'effectue dès la mise en route de la pompe à vis.

L'expérience décrite ultérieurement montre qu'une injection d'eau ne modifie pas le comportement de l'écoulement.

b) - A la suite des différents démontages de diverses parties du circuit et en particulier de l'échangeur, aucun dépôt solide n'a été observé sur les parois. Ceci confirme les observations faites en cours d'essais sur les parois transparentes de la boucle (section d'essais de visualisation, paroi externe de la section 7 barreaux).

c) - Dans le circuit la poudre ne s'est jamais tassée, c'est-à-dire que ses possibilités d'écoulement ont toujours été conservées : il semble qu'elle reste naturellement dans un état "pré-fluidisé".

IV - ESSAIS PARTICULIERS

Le comportement général de l'installation ayant été très satisfaisant une série d'essais plus complexes a été décidée : essais d'endurance, pollution par la vapeur d'eau, canaux en parallèle, pertes de charge, aptitude à la recompression.

(*) A l'heure actuelle, la boucle a fonctionné pendant 600 heures environ.

1° - Essais d'endurance.

A la suite des résultats positifs obtenus au cours d'un premier essai d'endurance de 120 heures avec une masse volumique de l'ordre de 100 kg/m^3 , un essai de 250 heures a été entrepris.

a) - But et condition de l'essai.

Il s'agissait d'étudier l'évolution dans le temps de la suspension et d'estimer les effets d'érosion.

La durée totale de l'essai fut de 250 heures par périodes continues allant de 50 à 100 heures.

La quantité de poudre était de 12 kg pour un volume de boucle d'environ $0,5 \text{ m}^3$ dans laquelle régnait une pression de quelques bars.

Les conditions de fonctionnement sont définies par les ordres de grandeur suivants :

- pression de remplissage de 5 à 7 bars absolus
- débit de gaz de 0,07 à 0,1 kg/s
- débit de poudre de 0,14 à 0,24 kg/s
- masse volumique moyenne de 35 à 65 kg/m^3
- vitesse "standard" environ 21 m/s

b) - Résultats.

A - Evolution de l'état hygrométrique du gaz.

Le tableau suivant montre une évolution régulière mais peu importante.

Prélèvement à 200 h.	17 mg par kg de CO_2
Prélèvement à 150 h.	19 mg par kg de CO_2
Prélèvement à 200 h.	21 mg par kg de CO_2

B - Evolution de la surface spécifique de la poudre.

Elle a pour but de mesurer le degré de fractionnement de la poudre et s'effectue selon la méthode dite B. E. T. Elle a conduit aux résultats consignés dans le tableau suivant :

Nombre d'heures totalisées	Surfaces spécifiques en m^2/g
0	17,4
35	239 + 6
65	244 + 6
100	250 + 6
155	247 + 6
200	296 + 6
254	295 + 6

Les résultats sont illustrés sur la planche 7 figure B.

La discontinuité observée aux environs de 150 heures est due au fait que la poudre la plus fine, qui s'accumulait dans le sas du cyclone fin, au niveau des séparateurs, a été remélangée à l'ensemble. La limite de la surface spécifique semble être de l'ordre de $300 \text{ m}^2/\text{g}$.

L'essai d'endurance antérieur de durée moindre (120 h.) avait permis d'atteindre des surfaces spécifiques de $290 \text{ m}^2/\text{g}$. A cette surface spécifique on ne trouve plus de particules dont les dimensions sont supérieures à $0,3 \mu$.

C - Erosion.

Deux échantillons en alliage léger ont été placés dans la boucle. L'un a été, au préalable, recouvert d'une pellicule protectrice au moyen d'une oxydation anodique sulfurique froide, l'autre recouvert d'un dépôt de chrome dur. L'épaisseur des dépôts a été mesurée avant l'essai et après l'essai grâce à l'emploi d'une méthode utilisant l'absorption du rayonnement X dans la pellicule superficielle.

Bien que la sensibilité fût de l'ordre de quelques dixièmes de micron, aucune variation d'épaisseur n'a pu être mise en évidence.

D - Impuretés contenues dans le graphite.

Le dosage effectué au moyen de la fluorescence X a montré :

- un enrichissement net en chrome, surtout pendant les premières heures de fonctionnement,
- un enrichissement en fer, plus sensible aux dernières heures de fonctionnement,
- un enrichissement en nickel, régulier,
- il semble y avoir aussi un enrichissement régulier en aluminium,
- du mercure apparaît dès les premières heures et reste constant. Il provient d'un accident antérieur survenu à une ligne de manomètre.

Toutes ces teneurs sont inférieures à 0,1% excepté pour le chrome, comme le montre le tableau suivant :

durée de fonct. (heure) - éléments (teneur en%)	0	35	65	100	155	200	254
Cr	0	0,10	0,14	0,15	0,14	0,16	0,17
Fe	0,002	0,007	0,007	0,020	0,020	0,070	0,075
Hg	0	0,003	0,004	0,004	0,005	0,004	0,004
Mo	0,004	0,006	0,006	0,0065	0,007	0,0075	0,008
Ni	0,001	0,002	0,005	0,006	0,008	0,012	0,015
V	0,005	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004

2° - Essais de pollution par la vapeur d'eau.

a) - But et condition de l'essai.

Il était intéressant de savoir comment une introduction d'eau, sous forme de vapeur, allait modifier l'écoulement.

La vapeur était injectée par quantités discrètes et les conditions de fonctionnement étaient sensiblement identiques à celles de l'essai d'endurance.

Des prélèvements de gaz et de poudre étaient analysés et le comportement de l'écoulement était surveillé, tant sur la section de visualisation qu'aux appareils de mesure.

b) - Résultats.

La quantité totale d'eau introduite dans le circuit a atteint 267 g sans que l'écoulement de la suspension soit perturbé. Elle correspond à un pourcentage d'humidification de la poudre de 2%. Dans ces conditions, la teneur en eau du CO₂ est de 840 mg/kg (point de rosée : - 16°C) pour 3,65 kg de gaz. Quelques dépôts apparaissent sur les vitres de la section d'essais de visualisation dans laquelle l'eau est injectée.

3° - Distribution du débit dans les canaux en parallèle.

a) - But et condition de l'essai.

Il s'agissait de vérifier si, par réglage de vannes, par exemple, on pouvait répartir à volonté le débit global entre deux canaux en parallèle.

On a d'abord constaté que toutes vannes ouvertes les débits mesurés par les venturis situés sur les canaux en parallèle étaient compatibles avec le débit mesuré sur le venturi mélange (débit total de la boucle).

Deux régimes d'écoulement ont été choisis :

- débit total $Q_T = 0,567$ à $0,620$ kg/s et $0,618$ à $0,646$ kg/s
- densité moyenne = 93 kg/m³ et 120 kg/m³

b) - Résultats.

Les résultats sont rassemblés dans le tableau suivant, quant à la confrontation des mesures de débit.

$\bar{\rho}$ (kg/m ³)	Q_T (kg/s)	$\frac{Q_{Cp_1}}{Q_T}$	$\frac{Q_{Cp_2}}{Q_T}$	$\frac{Q_{Cp_{total}}}{Q_T}$
93	0,620	0,515	0,485	1
	0,593	0,634	0,395	1,029
	0,567	0,924	0	0,924
120	0,646	0,492	0,480	0,972
	0,617	0,590	0,410	1

On constate ainsi que, sauf pour un point, le débit total est la somme des débits dérivés à mieux de 3%.

D'autre part, dès l'ouverture d'une vanne, la circulation s'établit immédiatement dans le canal correspondant.

4° - Pertes de charge.

La corrélation entre Cf et Re est exposée dans la planche 9. La valeur du nombre de Reynolds est calculée à partir de la viscosité du gaz et de la masse volumique de la suspension. Les résultats sont exprimés par le tableau suivant :

Points	Tube de ϕ 20 mm			Tube de ϕ 40 mm		
	$\Delta p (10^3 \text{ Pa})$	Cf. 10^3	Re. 10^{-6}	$\Delta p (10^3 \text{ Pa})$	Cf. 10^3	Re. 10^{-5}
B ₂				(0,341)	(4,5)	6,7
B ₃				0,500	3,69	7,74
B ₄				0,325	2,91	6
B ₅				0,173	2,78	4,87
B ₇	3,9	2,89	1,54	0,158	2,66	7,7
B ₈	4,5	1,86	1,49	0,342	3,39	7,43
B ₉	5,5	2,32	1,61	0,289	2,87	8,06
B ₁₀	5	2,08	1,01	0,472	4,58	5,04
B ₁₁	5,2	1,82	1,56	0,368	3,05	7,8
B ₁₂	4	3,11	1,49	0,210	3,69	7,43
A ₁	2,2	1,33	1,05	0,200	2,96	5,25
A ₂	2,5	1,74	1,29	0,250	4,10	6,44
A ₃	4,6	2,05	1,68	(0,410)	(4,67)	8,40
A ₄	6,4	1,32	2,12	0,60	3,2	10,60
A ₅	5,2	3,24	1,77	-	-	-
A ₆	6,4	1,23	2,24	0,50	2,54	11,2
A ₇	3,9	2,27	1,47	(0,55)	(7,7)	7,35
A ₈	5	1,25	1,77	0,42	2,89	8,83
S	6,1	1,75	1,62	(0,55)	(3,9)	8,1

Le graphique de cette corrélation Cf = f (Re) est représenté sur la planche n° 9 ainsi que la courbe de KARMAN.

5° - Aptitude à la recompression d'une suspension dans un divergent.

a) - But et condition de l'essai.

Un problème qui se pose dans la dynamique des suspensions est celui de la possibilité de recompression : dans quelle mesure l'énergie cinétique des particules est-elle récupérable sous forme de pression du gaz porteur. L'étude est importante car elle doit fournir des directives pour

la conception du mode de pompage des suspensions.

Les expériences ont porté sur une tuyère placée dans la section de visualisation. Cette tuyère a les dimensions suivantes :

- longueur de col, à section constante : 34 mm
- aire de la section au col : 152 mm²
- $\frac{\text{aire section amont maxi}}{\text{aire section au col}} = 6,6$
- $\frac{\text{aire section sortie divergent}}{\text{aire section col}} = 3,75$
- angle du divergent 3,7°

b) - Résultats de visualisation.

Les planches 10 et 11 mettent nettement en évidence un pincement de la veine au col.

La cinématographie (caméra ultra-rapide prenant 3000 images/seconde) ne permet pas de voir les détails de l'écoulement. Il faut noter cependant qu'elle confirme le résultat des photographies pour le pincement au col et montre nettement que la suspension emplit bien toute la section offerte par le divergent.

c) - Résultats quantitatifs.

Les mesures fournissent les grandeurs suivantes :

$p_1 - p_{col} = \Delta p_1$: différence entre la pression dans la section maximale amont et celle existant au col

$p_2 - p_{col} = \Delta p_2$: différence entre la pression dans la section maximale du divergent et la pression au col

u_{st} et $\bar{\rho}_c$: valeurs respectives de la vitesse et de la masse volumique dans la section au col

On suppose que $\Delta p_1 = p_{arrêt} - p_{col}$; une correction itérative permet de passer de Δp_2 à $(p'_{arrêt} - p_{col})$.

Avec ces grandeurs, on calcule le rapport de recompression $\frac{p'_{arrêt} - p_{col}}{\Delta p_1}$ et le terme d'énergie cinétique au col $\bar{\rho}_c u_{col}^2$.

Les résultats sont donnés par le tableau ci-dessous :

Point	ρ_c kg/m ³	$10^{-3} \Delta p_1$ Pa	$10^{-3} (\bar{\rho}_c U_{col}^2)$ J/m ³	$10^{-3} (p_{\infty} - p_2)$ Pa	$10^{-3} \Delta p_2$ Pa	$10^{-3} (p'_{arrêt} - p_{col})$ Pa	η	Remarques
B ₂	77,5	34,5	82,5	1,69	19,8	21,5	0,625	
B ₃	58,7	82	145,6	2,98	46,2	49,18	0,600	
B ₄	43	61,5	119	2,44	35,5	37,94	0,618	
B ₅	54,5	26,9	61,7	1,26	17	18,26	0,685	
B ₆	31,8	41,1	85,6	1,75	24,8	26,55	0,650	
B ₇	143	25,3	58,9	1,25	17	18,25	0,734	
B ₈	75	47,5	104,7	2,14	26	28,14	0,592	
B ₉	88	45	105	2,14	26	28,15	0,628	
B ₁₀	33,4	51,1	108	2,22	27	29,22	0,570	
B ₁₂	143	(24,5)	54,8	1,12	16,2	17,32	(0,715)	poudre seule
B ₁₁	70	61,7	(123,3)	2,52	32,9	35,42	(0,572)	
S	60,2	79,8	154,4	3,16	49,5	52,66	0,665	poudre très fine.

La corrélation $\eta = f(\bar{\rho}_c U_{col}^2)$ est représentée graphiquement sur la planche 12. Si l'on compare au rapport de recompression du gaz seul, qui ne dépasse guère 0,8, on voit que la suspension, pour laquelle η a une valeur comprise entre 0,6 et 0,8, se comporte de façon satisfaisante du point de vue de la recompression.

d) - Effets de contraction de la veine au col de la tuyère.

Des mesures de pression sur le col permettent d'obtenir un ordre de grandeur du rapport de contraction de la veine dans le col. Ce rapport est de l'ordre de 0,94, valeur en accord avec le coefficient de débit utilisé aux venturis.

6° - Etudes préliminaires d'un circulateur.

Dans une première phase de l'étude d'un circulateur capable de véhiculer la suspension, il a paru utile d'examiner les réactions vis à vis de ce nouveau fluide de circulateurs classiques. Compte-tenu des résultats de recompression dans un divergent, un compresseur centrifuge 12 S a été expérimenté. Pour un régime de 3000 à 4000 tr/min le compresseur fait circuler une suspension à masse volumique variable de 50 à 100 kg/m³. Le compresseur au régime de 6000 tr/min est susceptible de monter une suspension peu dense à une hauteur de 8 mètres.

Parallèlement, dans un but de comparaison, on a cherché à véhiculer le mélange au moyen d'une pompe à eau du type SIHI. Une vanne sur le refoulement permettrait de modifier le débit du mélange de masse volumique 180 kg/m³. Le tableau ci-dessous exprime, suivant l'ouverture de la vanne, les caractéristiques de fonctionnement.

Vanne	$10^{-3} \Delta p$ (Pa)	Débit (kg/s)
Ouverte	3,5 à 3,8	0,450
Etranglée	17	0,195
Fermée	35 à 38	0

Dans les deux expériences, on signale qu'aucune précaution particulière n'avait été prise quant à la propreté de la poudre ; le gaz porteur était l'air atmosphérique.

V. CONCLUSION

Au cours des 600 heures d'essais effectués dans le cadre de cette première étape des recherches, on a pu constater le parfait comportement d'une suspension de particules de graphite dans un gaz, confirmant ainsi les observations d'expérimentateurs antérieurs.

La souplesse d'utilisation de ce fluide, qui n'était pas évidente a priori, a été confirmée dans des conditions parfois sévères : mise en circulation du fluide par la pompe phase lourde seule, introduction d'obstacles divers dans la boucle et injection de quantités d'eau importantes sans altération de l'écoulement.

Cette étude a montré que le comportement sous faible pression de suspensions denses restait très voisin de celui d'un fluide classique, ce résultat n'est évidemment valable que dans la zone explorée ici (masse volumique de 30 à 170 kg/m³, pression 4 à 7 bars, vitesse 2 à 24 m/s, températures inférieures à 100°).

Néanmoins on peut, en extrapolant un peu, dire que cette étude ouvre le champ à des recherches quantitatives précises sur les frottements, échanges thermiques etc ... et qu'elle permet d'espérer utiliser un tel fluide dans un réacteur nucléaire.

Manuscrit reçu le 17 décembre 1964

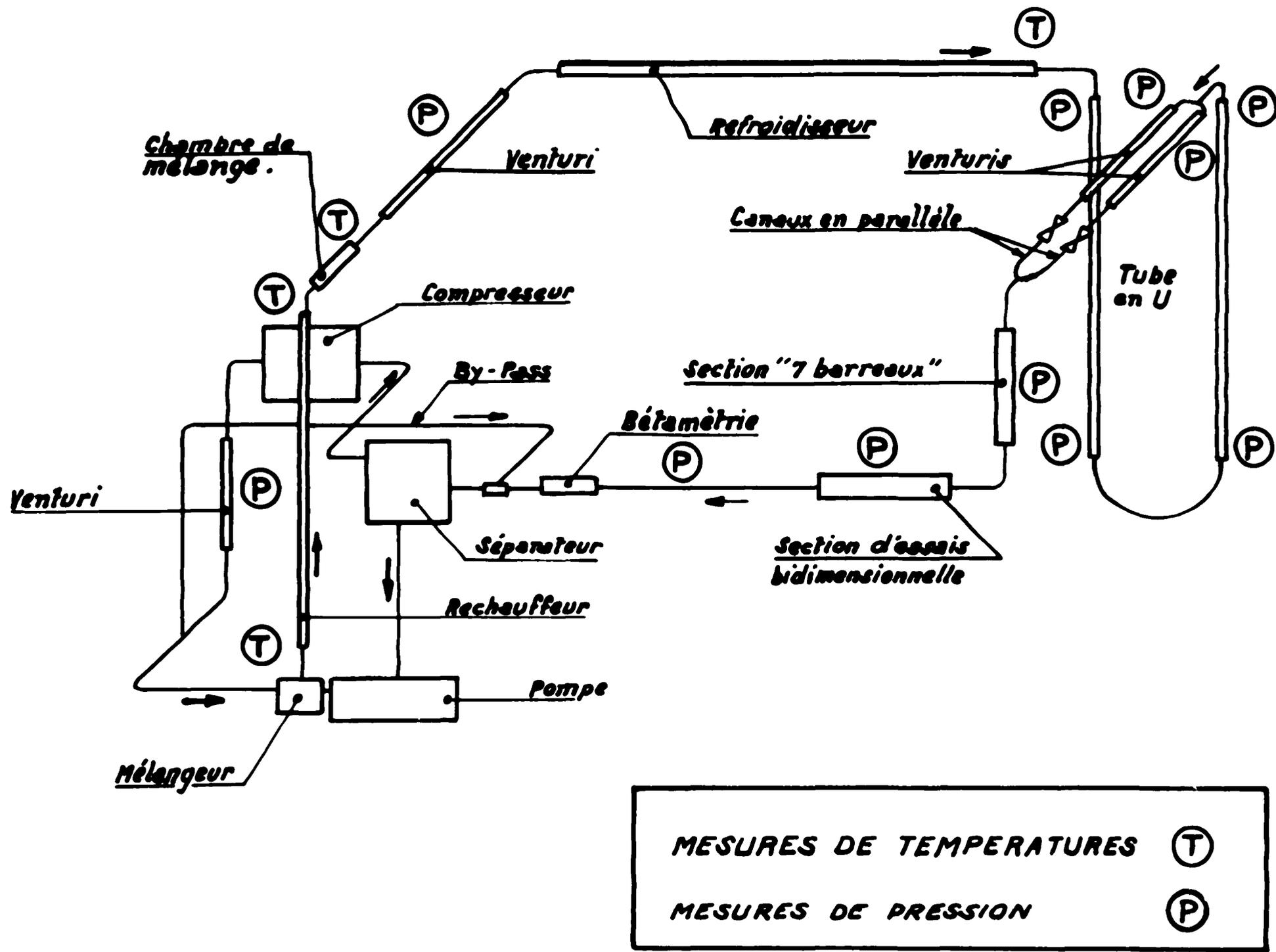
BIBLIOGRAPHIE

- [1] "Fluidisation" de Reboux, Ass. Fr. de Fluidisation 1954
- [2] "Fluidization" de Max LEVA, Mc Graw Hill 1959
- [3] "Fluidization and fluid particle systems", Reinhold 1960
de OTMER et ZENS
- [4] British Patent 824 377, NYC 9672
- [5] BAW 1159 - BAW 1201 - BAW 1207
- [6] Nucleonics August 1961
- [7] Evaluation of gas graphite suspension reactor
coolants
The Frenklin Institute August 1961
- [8] T.I.D. 18 909 - 18 910 - 19 924 - 19 963 -
20 377

Les résultats complets de cette étude font l'objet des rapports SNECMA 1 à 13
sous le titre commun : "ETUDE DES SUSPENSIONS GAZEUSES DE GRAPHITE".

- PLANCHES -

- PLANCHE 1 - Schéma de l'installation
- PLANCHE 2 - Photographie de l'ensemble de l'installation
- PLANCHE 3 - Photographie de l'ensemble de l'installation
- PLANCHE 4 - Photographie des canaux en parallèle
- PLANCHE 5 - Photographie de la section d'essais bidimensionnelle
- PLANCHE 6 - Photographie du dispositif de mesure de la densité par bétamétrie
- PLANCHE 7 (figure A) - Granulométrie de la poudre de graphite
- PLANCHE 7 (figure B) - Fractionnement de la poudre de graphite
- PLANCHE 8 - Champ de fonctionnement
- PLANCHE 9 - Loi de frottement $C_f = f(Re)$
- PLANCHE 10 - Essai de recompression - Photographie du jet dans un divergent
- PLANCHE 11 - Essai de recompression - Photographie du jet dans un divergent
- PLANCHE 12 - Rapport de compression dans un divergent



PL.1_SCHEMA DE PRINCIPE DE L'INSTALLATION D'ESSAIS



Planche 2 - Vue d'ensemble de l'installation

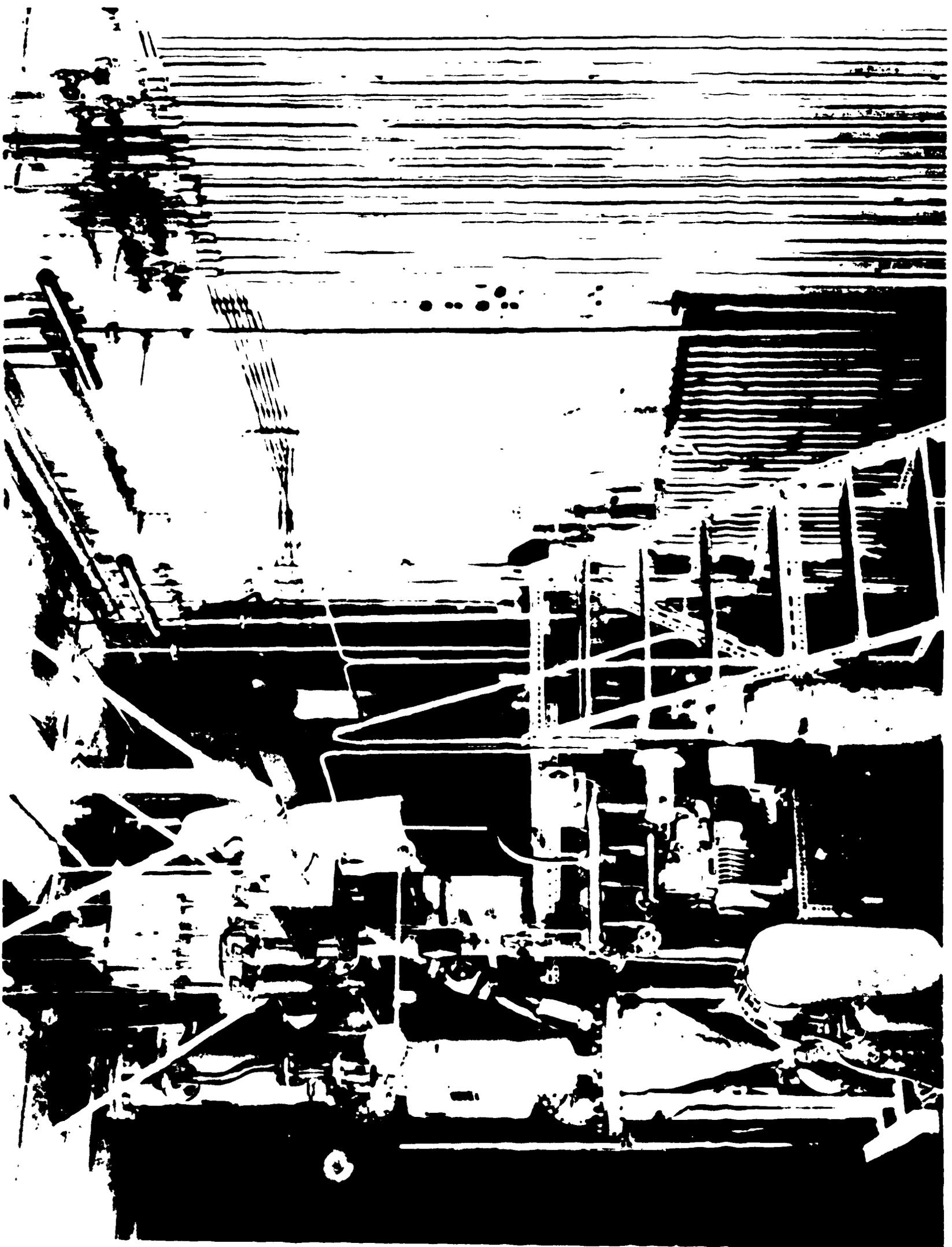


Planche 3 - Vue d'ensemble de l'installation



Planche 4 - Canaux en parallèle

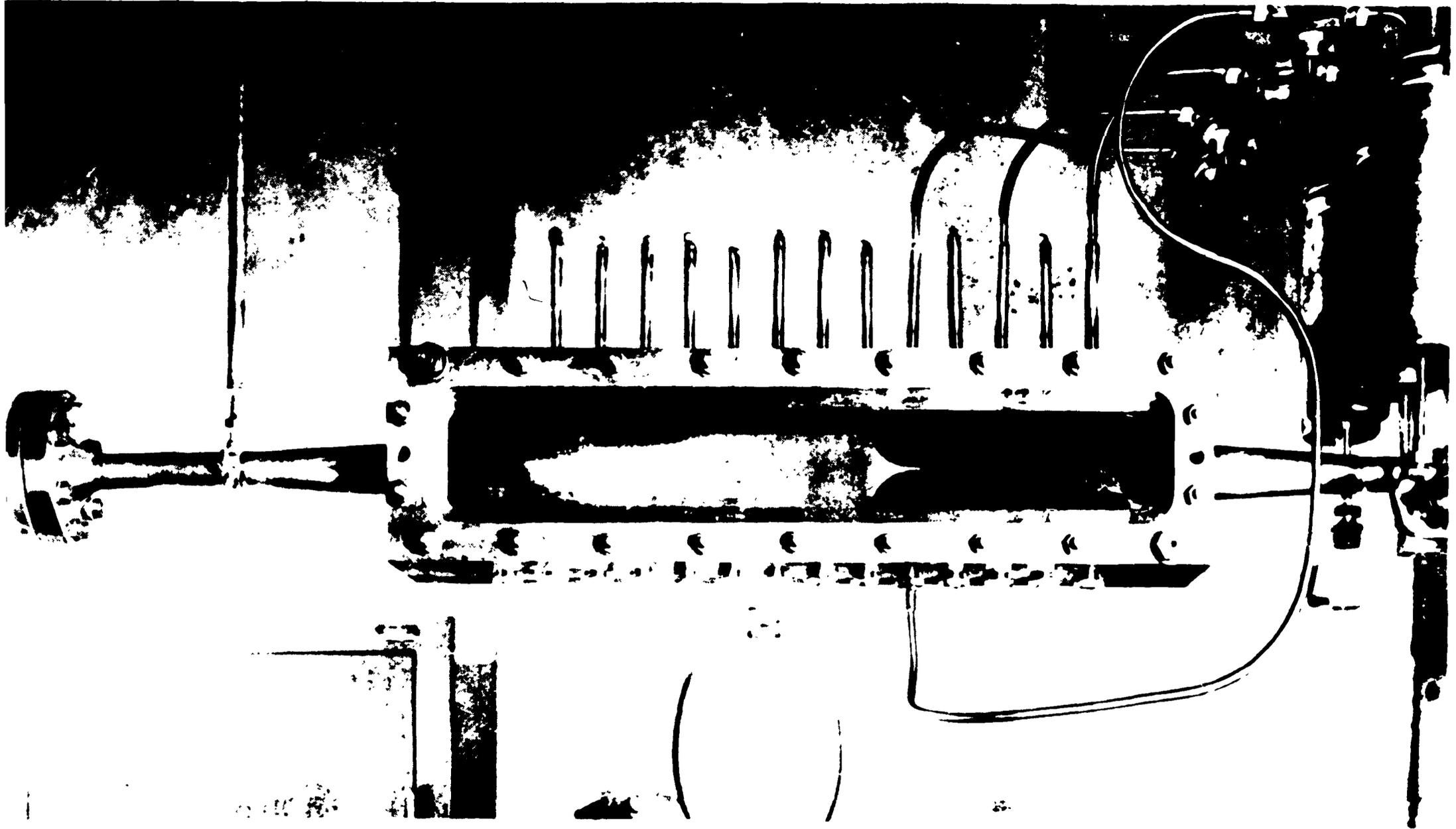
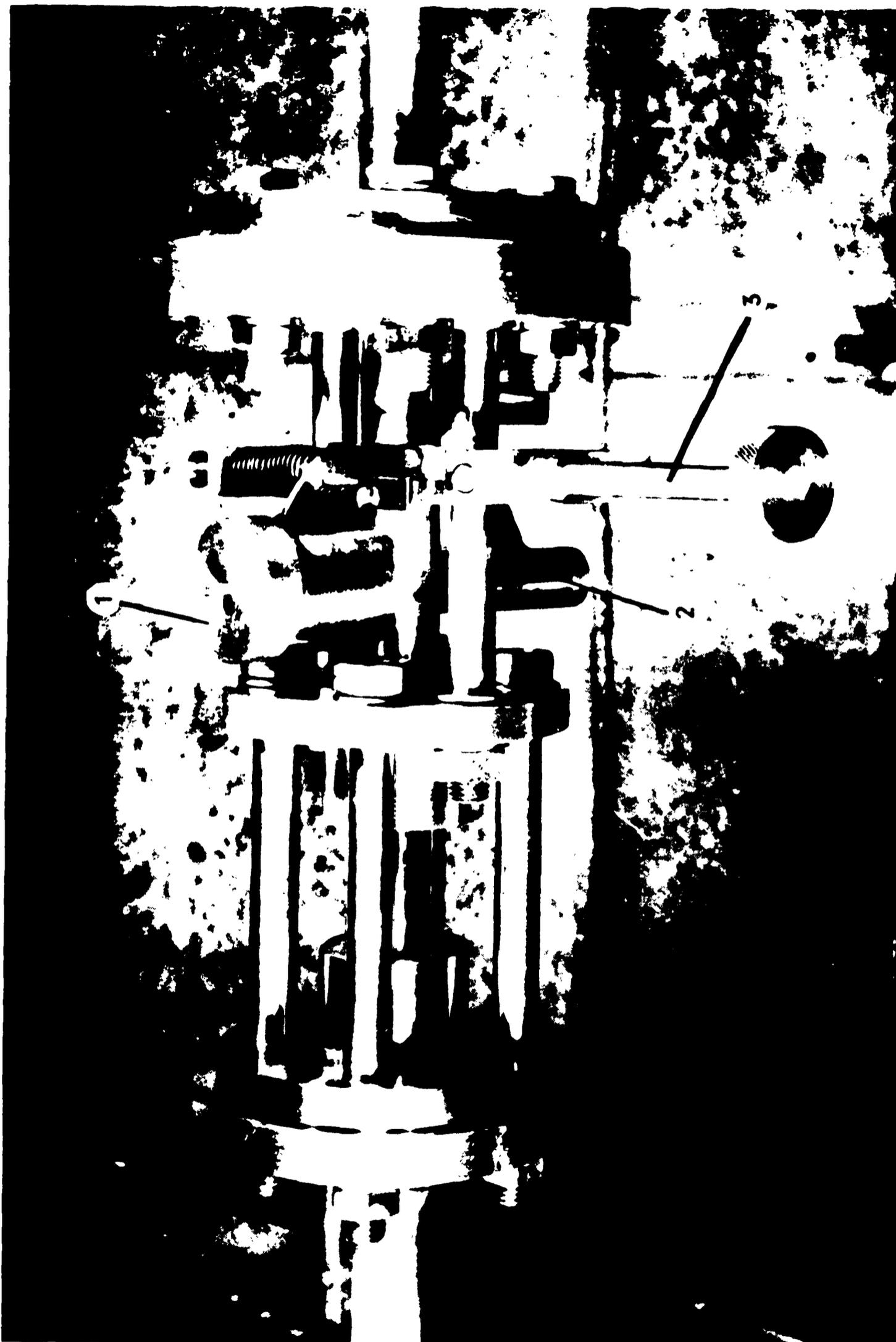


Planche 5 : Section d'essais tridimensionnelle



- 1- Source.
- 2- Compteur.
- 3- Réglage de l'exploration.

Planche 6 - Dispositif de mesure de densité par bétamétrie

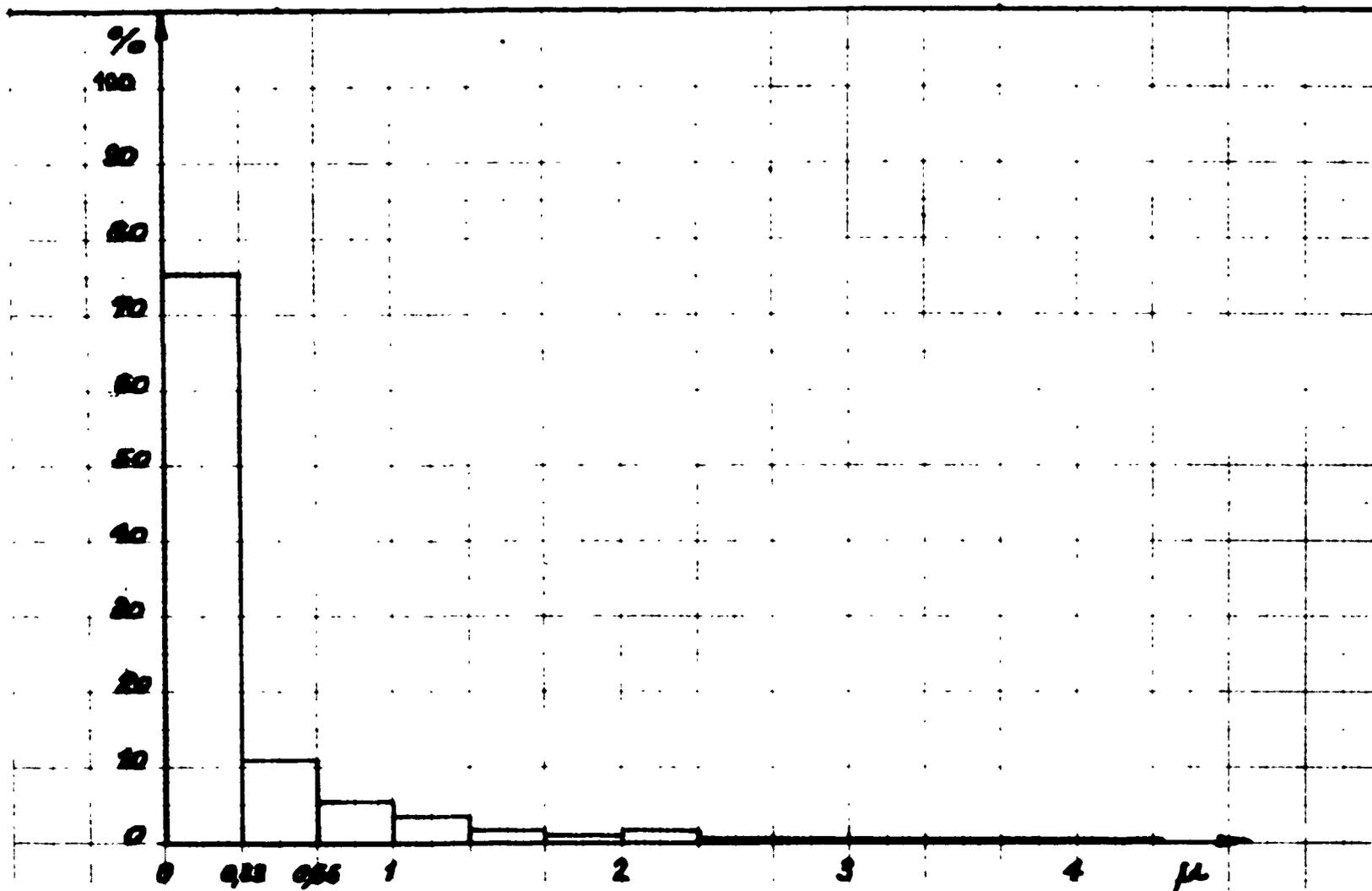


Fig. A. GRANULOMETRIE DE LA POUDRE DE GRAPHITE INITIALE

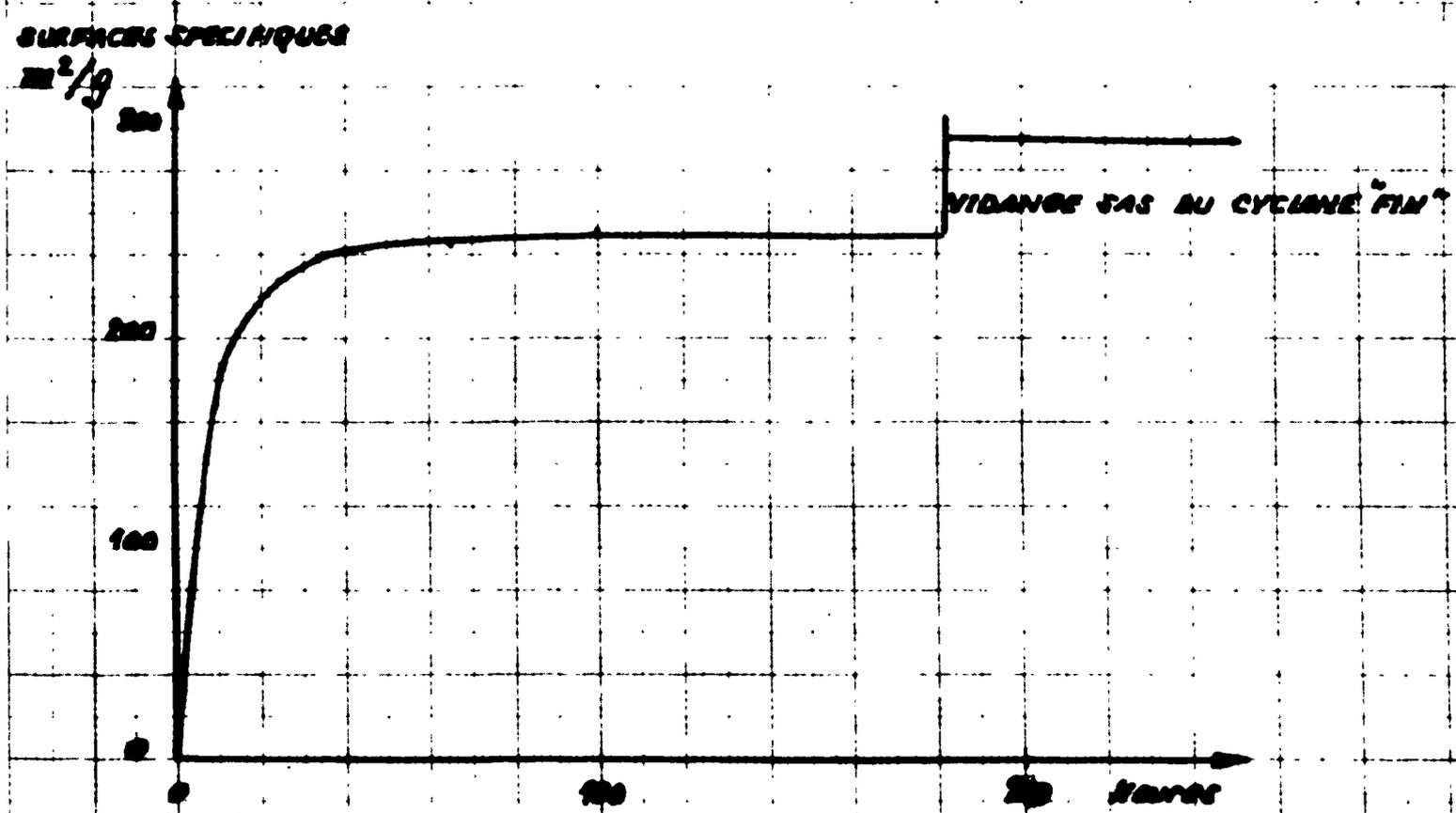


Fig. B. FRACTIONNEMENT DE LA POUDRE DE GRAPHITE

PL. 7. CARACTERISTIQUES DE LA POUDRE DE GRAPHITE

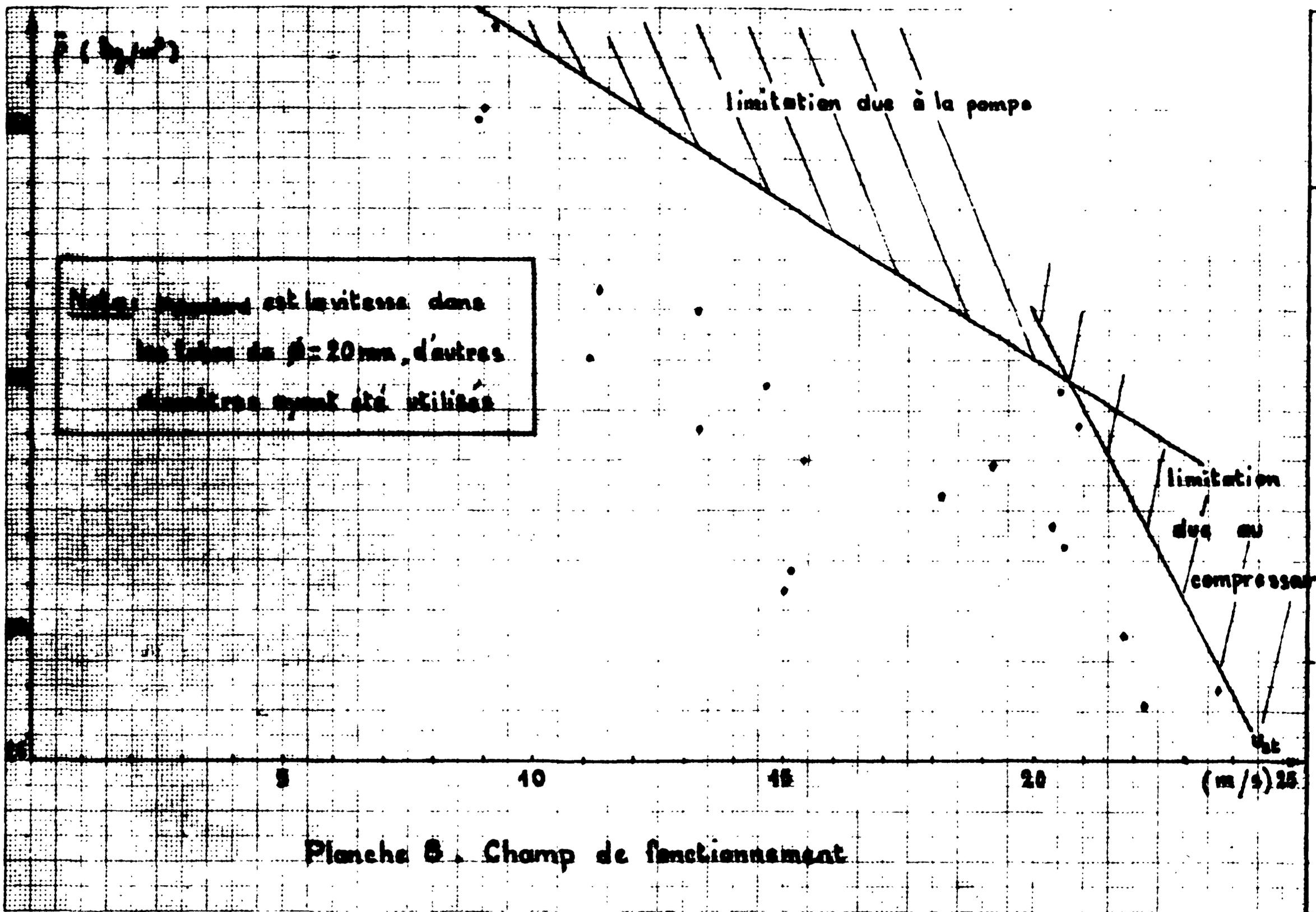


Planche 8. Champ de fonctionnement

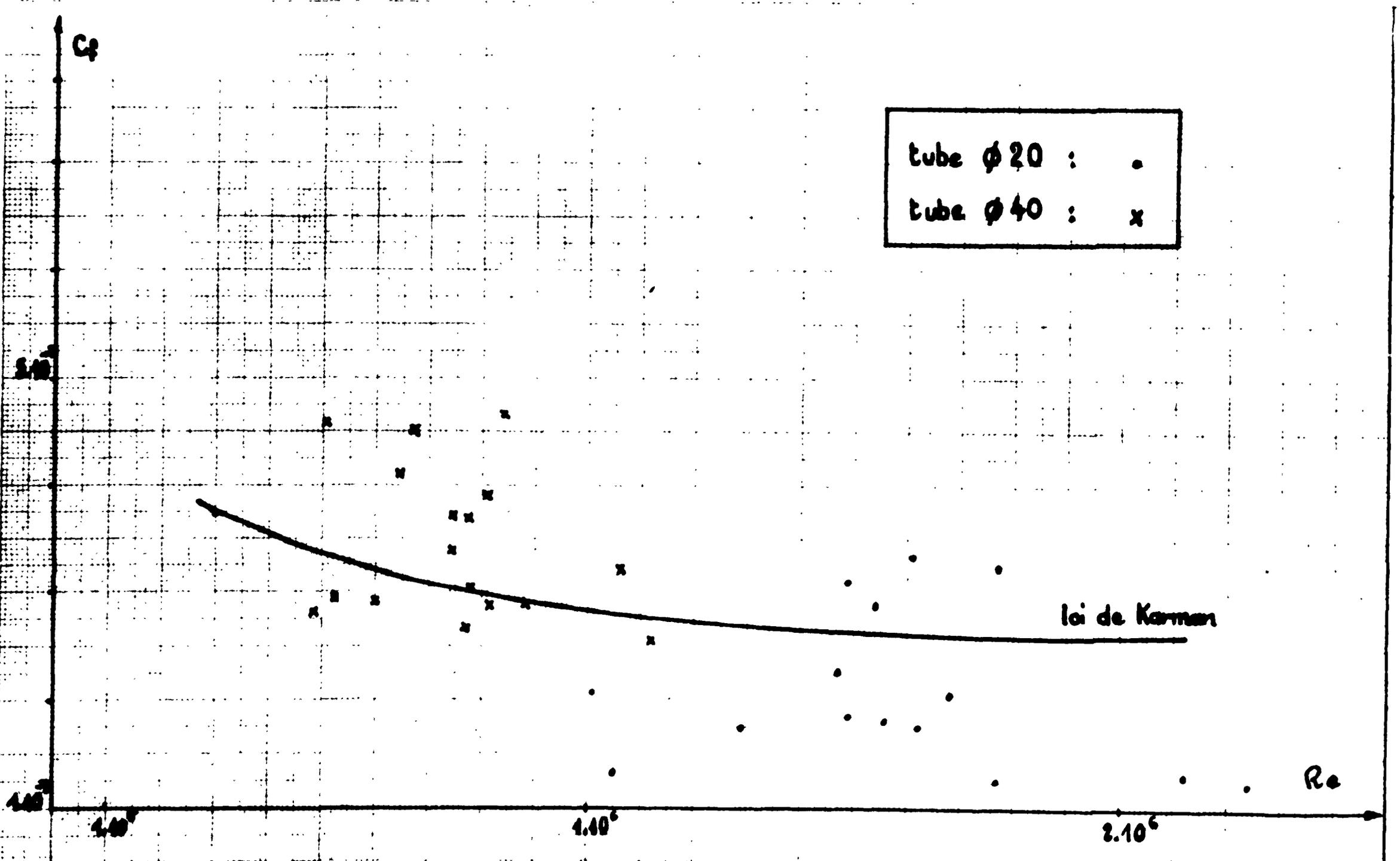


Planche 9. Loi de frottement $C_f = f(Re)$



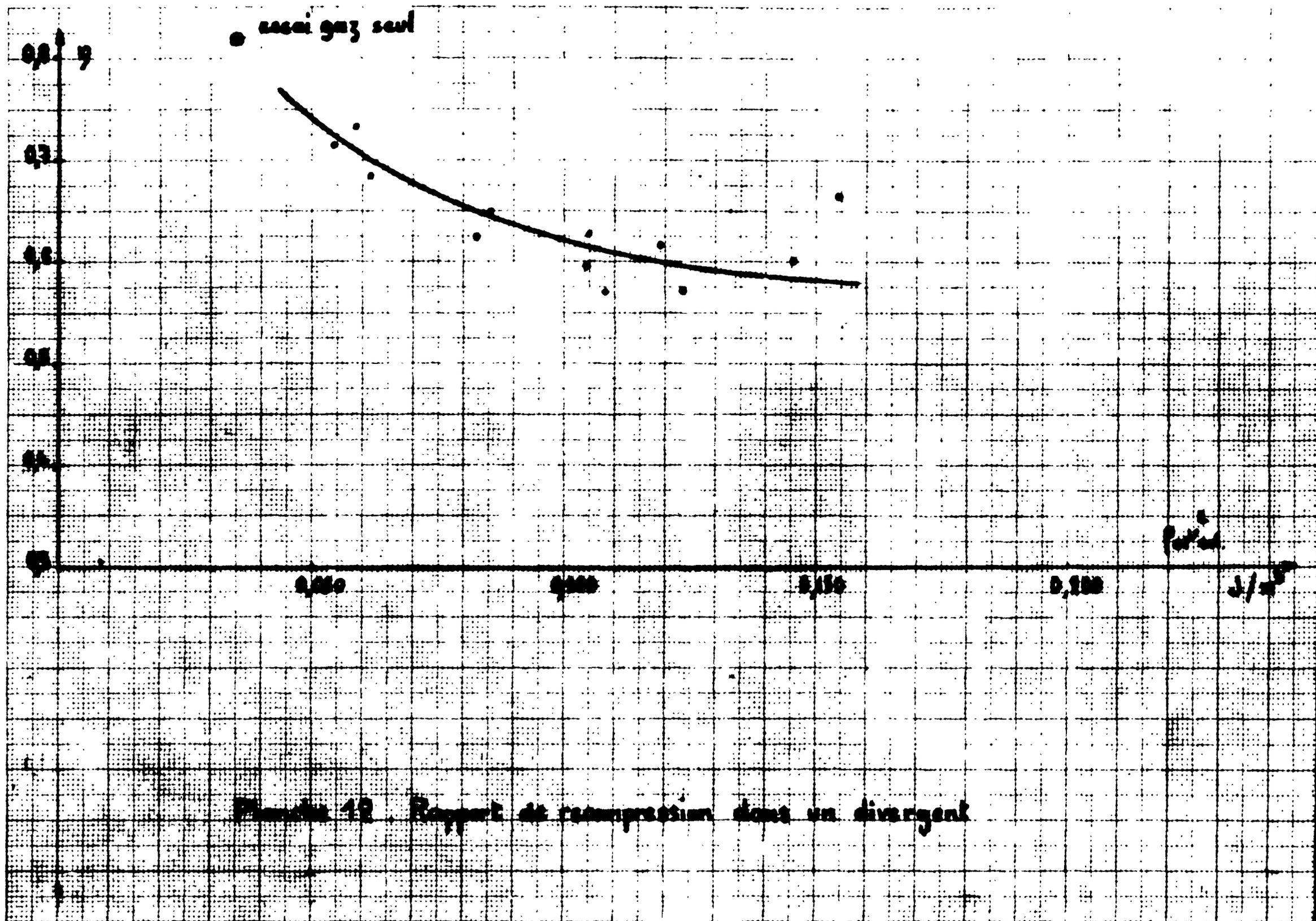
Sens de l'écoulement →

Planche 10 - Essais de recompression dans un divergent



Sens de l'écoulement →

Planche 11 - Essais de recompression dans un divergent



FIN