

Conditions d'utilisation des contenus du Conservatoire numérique

1- [Le Conservatoire numérique](#) communément appelé [le Cnum](#) constitue une base de données, produite par le Conservatoire national des arts et métiers et protégée au sens des articles L341-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle. La conception graphique du présent site a été réalisée par Eclydre (www.eclydre.fr).

2- Les contenus accessibles sur le site du Cnum sont majoritairement des reproductions numériques d'œuvres tombées dans le domaine public, provenant des collections patrimoniales imprimées du Cnam.

Leur réutilisation s'inscrit dans le cadre de la loi n° 78-753 du 17 juillet 1978 :

- la réutilisation non commerciale de ces contenus est libre et gratuite dans le respect de la législation en vigueur ; la mention de source doit être maintenue ([Cnum - Conservatoire numérique des Arts et Métiers - https://cnum.cnam.fr](#))
- la réutilisation commerciale de ces contenus doit faire l'objet d'une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service.

3- Certains documents sont soumis à un régime de réutilisation particulier :

- les reproductions de documents protégés par le droit d'auteur, uniquement consultables dans l'enceinte de la bibliothèque centrale du Cnam. Ces reproductions ne peuvent être réutilisées, sauf dans le cadre de la copie privée, sans l'autorisation préalable du titulaire des droits.

4- Pour obtenir la reproduction numérique d'un document du Cnum en haute définition, contacter [cnum\(at\)cnam.fr](mailto:cnum(at)cnam.fr)

5- L'utilisateur s'engage à respecter les présentes conditions d'utilisation ainsi que la législation en vigueur. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment passible d'une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.

6- Les présentes conditions d'utilisation des contenus du Cnum sont régies par la loi française. En cas de réutilisation prévue dans un autre pays, il appartient à chaque utilisateur de vérifier la conformité de son projet avec le droit de ce pays.

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

NOTICE DE LA REVUE	
Auteur(s) ou collectivité(s)	Auteur collectif - Revue
Titre	L'Industrie nationale : comptes rendus et conférences de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale
Adresse	Paris : Société d'encouragement pour l'industrie nationale, 1949-2003
Collation	167 vol.
Nombre de volumes	167
Cote	INDNAT
Sujet(s)	Industrie
Note	Numérisation effectuée grâce au prêt de la collection complète accordé par la Société d'encouragement pour l'industrie nationale (S.E.I.N.)
Notice complète	https://www.sudoc.fr/039224155
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?INDNAT
LISTE DES VOLUMES	
	1949, n° 1 (janv.-mars)
	1949, n° 2 (avril-juin)
	1949, n° 3 (juil.-sept.)
	1949, n° 4 (oct.-déc.)
	1949, n° 4 bis
	1950, n° 1 (janv.-mars)
	1950, n° 2 (avril-juin)
	1950, n° 3 (juil.-sept.)
	1950, n° 4 bis
	1951, n° 1 (janv.-mars)
	1951, n° 2 (avril-juin)
	1951, n° 3 (juil.-sept.)
	1951, n° 4 (oct.-déc.)
	1952, n° 1 (janv.-mars)
	1952, n° 2 (avril-juin)
	1952, n° 3 (juil.-sept.)
	1952, n° 4 (oct.-déc.)
	1952, n° spécial
	1953, n° 1 (janv.-mars)
	1953, n° 2 (avril-juin)
	1953, n° 3 (juil.-sept.)
	1953, n° 4 (oct.-déc.)
	1953, n° spécial
	1954, n° 1 (janv.-mars)
	1954, n° 2 (avril-juin)
	1954, n° 3 (juil.-sept.)
	1954, n° 4 (oct.-déc.)
	1955, n° 1 (janv.-mars)

	1955, n° 2 (avril-juin)
	1955, n° 3 (juil.-sept.)
	1955, n° 4 (oct.-déc.)
	1956, n° 1 (janv.-mars)
	1956, n° 2 (avril-juin)
	1956, n° 3 (juil.-sept.)
	1956, n° 4 (oct.-déc.)
	1957, n° 2 (avril-juin)
	1957, n° 3 (juil.-sept.)
	1957, n° 4 (oct.-déc.)
	1957, n° spécial (1956-1957)
	1958, n° 1 (janv.-mars)
	1958, n° 2 (avril-juin)
	1958 n° 3 (juil.-sept.)
	1958, n° 4 (oct.-déc.)
	1959, n° 1 (janv.-mars)
	1959, n° 2 (avril-juin)
	1959 n° 3 (juil.-sept.)
	1959, n° 4 (oct.-déc.)
	1960, n° 1 (janv.-mars)
	1960, n° 2 (avril-juin)
	1960, n° 3 (juil.-sept.)
	1960, n° 4 (oct.-déc.)
	1961, n° 1 (janv.-mars)
	1961, n° 2 (avril-juin)
	1961, n° 3 (juil.-sept.)
	1961, n° 4 (oct.-déc.)
	1962, n° 1 (janv.-mars)
	1962, n° 2 (avril-juin)
	1962, n° 3 (juil.-sept.)
	1962, n° 4 (oct.-déc.)
	1963, n° 1 (janv.-mars)
	1963, n° 2 (avril-juin)
	1963, n° 3 (juil.-sept.)
	1963, n° 4 (oct.-déc.)
	1964, n° 1 (janv.-mars)
	1964, n° 2 (avril-juin)
	1964, n° 3 (juil.-sept.)
	1964, n° 4 (oct.-déc.)
	1965, n° 1 (janv.-mars)
	1965, n° 2 (avril-juin)
	1965, n° 3 (juil.-sept.)
	1965, n° 4 (oct.-déc.)
	1966, n° 1 (janv.-mars)
	1966, n° 2 (avril-juin)
	1966, n° 3 (juil.-sept.)
	1966, n° 4 (oct.-déc.)
	1967, n° 1 (janv.-mars)
	1967, n° 2 (avril-juin)
	1967, n° 3 (juil.-sept)

	1967, n° 4 (oct.-déc.)
	1968, n° 1
	1968, n° 2
	1968, n° 3
	1968, n° 4
	1969, n° 1 (janv.-mars)
	1969, n° 2
	1969, n° 3
	1969, n° 4
	1970, n° 1
	1970, n° 2
	1970, n° 3
	1970, n° 4
	1971, n° 1
	1971, n° 2
	1971, n° 4
	1972, n° 1
	1972, n° 2
	1972, n° 3
	1972, n° 4
	1973, n° 1
	1973, n° 2
	1973, n° 3
	1973, n° 4
VOLUME TÉLÉCHARGÉ	1974, n° 1
	1974, n° 2
	1974, n° 3
	1974, n° 4
	1975, n° 1
	1975, n° 2
	1975, n° 3
	1975, n° 4
	1976, n° 1
	1976, n° 2
	1976, n° 3
	1976, n° 4
	1977, n° 1
	1977, n° 2
	1977, n° 3
	1977, n° 4
	1978, n° 1
	1978, n° 2
	1978, n° 3
	1978, n° 4
	1979, n° 1
	1979, n° 2
	1979, n° 3
	1979, n° 4
	1980, n° 1
	1982, n° spécial

	1983, n° 1
	1983, n° 3-4
	1983, n° 3-4
	1984, n° 1 (1er semestre)
	1984, n° 2
	1985, n° 1
	1985, n° 2
	1986, n° 1
	1986, n° 2
	1987, n° 1
	1987, n° 2
	1988, n° 1
	1988, n° 2
	1989
	1990
	1991
	1992
	1993, n° 1 (1er semestre)
	1993, n° 2 (2eme semestre)
	1994, n° 1 (1er semestre)
	1994, n° 2 (2eme semestre)
	1995, n° 1 (1er semestre)
	1995, n° 2 (2eme semestre)
	1996, n° 1 (1er semestre)
	1997, n° 1 (1er semestre)
	1997, n°2 (2e semestre) + 1998, n°1 (1er semestre)
	1998, n° 4 (4e trimestre)
	1999, n° 2 (2e trimestre)
	1999, n° 3 (3e trimestre)
	1999, n° 4 (4e trimestre)
	2000, n° 1 (1er trimestre)
	2000, n° 2 (2e trimestre)
	2000, n° 3 (3e trimestre)
	2000, n° 4 (4e trimestre)
	2001, n° 1 (1er trimestre)
	2001, n° 2-3 (2e et 3e trimestres)
	2001, n°4 (4e trimestre) et 2002, n°1 (1er trimestre)
	2002, n° 2 (décembre)
	2003 (décembre)

NOTICE DU VOLUME TÉLÉCHARGÉ	
Titre	L'Industrie nationale : comptes rendus et conférences de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale
Volume	1974, n° 1
Adresse	Paris : Société d'encouragement pour l'industrie nationale, 1974

Collation	1 vol. (41 p.) : ill. ; 27 cm
Nombre de vues	48
Cote	INDNAT (106)
Sujet(s)	Industrie
Thématique(s)	Généralités scientifiques et vulgarisation
Typologie	Revue
Langue	Français
Date de mise en ligne	03/09/2025
Date de génération du PDF	08/09/2025
Recherche plein texte	Non disponible
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?INDNAT.106

Note d'introduction à [l'Industrie nationale \(1947-2003\)](#)

[L'Industrie nationale](#) prend, de 1947 à 2003, la suite du [Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale](#), publié de 1802 à 1943 et que l'on trouve également numérisé sur le CNUM. Cette notice est destinée à donner un éclairage sur sa création et son évolution ; pour la présentation générale de la Société d'encouragement, on se reportera à la [notice publiée en 2012 : « Pour en savoir plus »](#)

[Une publication indispensable pour une société savante](#)

La Société, aux lendemains du conflit, fait paraître dans un premier temps, en 1948, des [Comptes rendus de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale](#), publication trimestrielle de petit format résumant ses activités durant l'année sociale 1947-1948. À partir du premier trimestre 1949, elle lance une publication plus complète sous le titre de [L'Industrie nationale. Mémoires et comptes rendus de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale](#).

Cette publication est différente de l'ancien [Bulletin](#) par son format, sa disposition et sa périodicité, trimestrielle là où ce dernier était publié en cahiers mensuels (sauf dans ses dernières années). Elle est surtout moins diversifiée, se limitant à des textes de conférences et à des rapports plus ou moins développés sur les remises de récompenses de la Société.

[Une publication qui reflète les ambitions comme les aléas de la Société d'encouragement](#)

À partir de sa création et jusqu'au début des années 1980, [L'Industrie nationale](#) ambitionne d'être une revue de référence abordant, dans une sélection des conférences qu'elle organise — entre 8 et 10 publiées annuellement —, des thèmes extrêmement divers, allant de la mécanique à la biologie et aux questions commerciales, en passant par la chimie, les différents domaines de la physique ou l'agriculture, mettant l'accent sur de grandes avancées ou de grandes réalisations. Elle bénéficie d'ailleurs entre 1954 et 1966 d'une subvention du CNRS qui témoigne de son importance.

À partir du début des années 1980, pour diverses raisons associées, problèmes financiers, perte de son rayonnement, fin des conférences, remise en question du modèle industriel sur lequel se fondait l'activité de la Société, [L'Industrie nationale](#) devient un organe de communication interne, rendant compte des réunions, publiant les rapports sur les récompenses ainsi que quelques articles à caractère rétrospectif ou historique.

La publication disparaît logiquement en 2003 pour être remplacée par un site Internet de même nom, complété par la suite par une lettre d'information.

Commission d'histoire de la Société d'Encouragement,

Juillet 2025.

Bibliographie

Daniel Blouin, Gérard Emptoz, [« 220 ans de la Société d'encouragement »](#), Histoire et Innovation, le carnet de recherche de la commission d'histoire de la Société d'encouragement, en ligne le 25 octobre 2023.

Gérard EMPTOZ, [« Les parcours des présidents de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale des années 1920 à nos jours. Deuxième partie : de la Libération à nos jours »](#), Histoire et Innovation, carnet de recherche de la commission d'histoire de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale, en ligne le 26 octobre 2024.

L'INDUSTRIE NATIONALE

S. E. I. N.
Bibliothèque

*Comptes rendus et Conférences
de la Société d'Encouragement
pour l'Industrie Nationale*

*fondée en 1801
reconnue d'utilité publique*



Revue trimestrielle
1974 - N° 1



S. E. I. N.
bibliothèque

N° 1 - 1974

SOMMAIRE

TEXTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

— L'hyper-trempe, méthode d'élaboration de structures nouvelles,

par A. REVCOLEVSCHI, p. 3

— Procédé nouveau de surfacage des grands miroirs d'astronomie
et contribution à l'étude de leurs barillels,

par A. BAYLE, p. 19

Publication sous la direction de M. Henri NORMANT

Membre de l'Institut, Président

Les textes paraissant dans *L'Industrie Nationale* n'engagent pas la responsabilité de la
Société d'Encouragement quant aux opinions exprimées par leurs auteurs.

Abonnement annuel : 40 F le n° : 20,00 F C.C.P. Paris, n° 618-48

L'hyper-trempe, méthode d'hyper-trempe de structures nouvelles

par A. BEVCOLEYEN
Chargé de Recherches au Cnam

I. — Introduction

La trempe d'un matériau est généralement définie comme étant une méthode de refroidissement rapide obtenue par

TEXTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

travail. Elle est généralement obtenue dans le but de conserver une structure stable de haute température, soit une structure métastable.

Cette définition de la trempe qui est le plus généralement adoptée ne mentionne pas l'état initial dans lequel se trouve le matériau à tremper. En fait, il est généralement admis que le matériau est à l'état solide.

Or, si l'importance industrielle de la trempe depuis l'état solide a été prise en compte, il existe également des méthodes de trempe beaucoup plus efficaces, et sont les trempe effectuées à partir de l'état liquide et de l'état fondu.

C'est à une méthode de trempe depuis l'état fondu, permettant des vitesses de refroidissement de 10 à 120 millions de degrés par seconde (hyper-trempe) que sera consacré cet exposé.

La technique de l'hyper-trempe depuis l'état fondu a été mise au point il y a

quelques années par le Dr. J. H. Hollomon, de l'Université de Californie, et par le Dr. J. H. Hollomon, de l'Université de Californie.

La méthode d'hyper-trempe depuis l'état fondu a été mise au point par le Dr. J. H. Hollomon, de l'Université de Californie, et par le Dr. J. H. Hollomon, de l'Université de Californie.

La méthode d'hyper-trempe depuis l'état fondu a été mise au point par le Dr. J. H. Hollomon, de l'Université de Californie, et par le Dr. J. H. Hollomon, de l'Université de Californie.

La méthode d'hyper-trempe depuis l'état fondu a été mise au point par le Dr. J. H. Hollomon, de l'Université de Californie, et par le Dr. J. H. Hollomon, de l'Université de Californie.

La méthode d'hyper-trempe depuis l'état fondu a été mise au point par le Dr. J. H. Hollomon, de l'Université de Californie, et par le Dr. J. H. Hollomon, de l'Université de Californie.

La méthode d'hyper-trempe depuis l'état fondu a été mise au point par le Dr. J. H. Hollomon, de l'Université de Californie, et par le Dr. J. H. Hollomon, de l'Université de Californie.

La méthode d'hyper-trempe depuis l'état fondu a été mise au point par le Dr. J. H. Hollomon, de l'Université de Californie, et par le Dr. J. H. Hollomon, de l'Université de Californie.

La méthode d'hyper-trempe depuis l'état fondu a été mise au point par le Dr. J. H. Hollomon, de l'Université de Californie, et par le Dr. J. H. Hollomon, de l'Université de Californie.

La méthode d'hyper-trempe depuis l'état fondu a été mise au point par le Dr. J. H. Hollomon, de l'Université de Californie, et par le Dr. J. H. Hollomon, de l'Université de Californie.

La méthode d'hyper-trempe depuis l'état fondu a été mise au point par le Dr. J. H. Hollomon, de l'Université de Californie, et par le Dr. J. H. Hollomon, de l'Université de Californie.

La méthode d'hyper-trempe depuis l'état fondu a été mise au point par le Dr. J. H. Hollomon, de l'Université de Californie, et par le Dr. J. H. Hollomon, de l'Université de Californie.

La conférence prononcée le 13 décembre 1927 devant le Comité d'Organisation pour l'Industrie Nationale.

TEXTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

Chaque volume est accompagné d'un fascicule de documents techniques et scientifiques.

100 pages, 100 illustrations.

100 pages, 100 illustrations.

100 pages, 100 illustrations.

100 pages, 100 illustrations.

100 pages, 100 illustrations.

L'hyper-trempe, méthode d'élaboration de structures nouvelles ()*

par A. REVCOLEVSCHI
Chargé de Recherches au C.N.R.S.

I. — INTRODUCTION

La trempe d'un matériau est généralement définie comme étant une méthode de refroidissement rapide, obtenue par contact du matériau porté à haute température avec un liquide, gaz ou solide froid. Elle est généralement effectuée dans le but de conserver, soit une structure stable de haute température, soit une structure métastable.

Cette définition de la trempe qui est celle généralement adoptée ne mentionne pas l'état initial dans lequel se trouve le matériau à tremper. En fait, il est implicitement admis que le matériau est à l'état solide.

Or, si l'importance industrielle de la trempe depuis l'état solide n'est plus à démontrer, il existe aujourd'hui des méthodes de trempe beaucoup plus efficaces : ce sont les trempes effectuées à partir de l'état *liquide* et de l'état *vapeur*.

C'est à une méthode de trempe depuis l'état liquide, permettant des vitesses de refroidissement de 10 à 100 millions de degrés par seconde (« hyper-trempe ») que sera consacré cet exposé.

La technique de l'hyper-trempe depuis l'état liquide a été mise au point il y a

une dizaine d'années par *Pol Duwez* au Caltech dans les circonstances suivantes :

Duwez trouvait étonnant que, dans certains systèmes métalliques binaires, les diagrammes d'équilibre de phases ne satisfassent pas les règles de Hume-Rothery régissant l'existence de solutions solides continues.

C'est ainsi que par exemple, dans le système cuivre-argent, le diagramme d'équilibre de phases comprend une transformation eutectique et deux solutions solides terminales (fig. 1), alors que d'après Hume-Rothery il devrait présenter une miscibilité totale des deux éléments l'un dans l'autre, puisque :

— Cu et Ag cristallisent dans le même système cristallin (c.f.c.) ;

— les deux éléments ont même valence et des électronégativités voisines ;

— la différence entre les rayons atomiques des deux éléments est inférieure à 13 % (valeur limite établie par Hume-Rothery) puisque :

$$\begin{aligned} R_{Ag} &= 1,44 \text{ \AA} \\ R_{Cu} &= 1,28 \text{ \AA} \end{aligned}$$

(*) Conférence prononcée le 13 décembre 1973 devant la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale.

Il semblait donc très tentant pour Duwez d'essayer de retenir à l'état solide par trempe ultrarapide la miscibilité totale existant à l'état liquide et

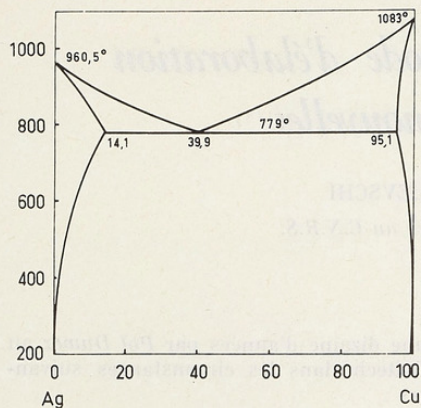


FIG. 1. — Diagramme d'équilibre de phases du système Ag-Cu.

d'éviter ainsi la décomposition eutectique. C'est ainsi que fut conçu un premier appareillage d'hyper-trempe grâce auquel Duwez et ses collaborateurs mirent effectivement en évidence une miscibilité totale de l'argent dans le cuivre (fig. 2) (1).

Une méthode d'élaboration de structures nouvelles venait d'être mise au point et ouvrait des horizons nouveaux aux physiciens et chimistes de l'état solide (2) (3) (4).

II. — TECHNOLOGIE DE L'HYPER-TREMPE

PRINCIPALES METHODES UTILISEES

Pour qu'une trempe depuis l'état liquide soit efficace, il faut que la vitesse de refroidissement du matériau soit exceptionnellement élevée au moment de la transition liquide $\rightarrow$ solide. Ceci suppose une vitesse d'échange thermique extrêmement grande à cet instant précis.

Or on montre que parmi les trois mécanismes principaux d'échange thermique, qui sont : le rayonnement, la

convection — c'est-à-dire le transfert de chaleur lié au mouvement d'un liquide ou d'un gaz — et la conduction — c'est-à-dire l'échange thermique réalisé entre deux corps en contact — la conduction est de loin la méthode la plus efficace, à condition toutefois que les conditions suivantes soient respectées :

1) le substrat sur lequel s'effectue la trempe doit être un excellent conducteur thermique ;

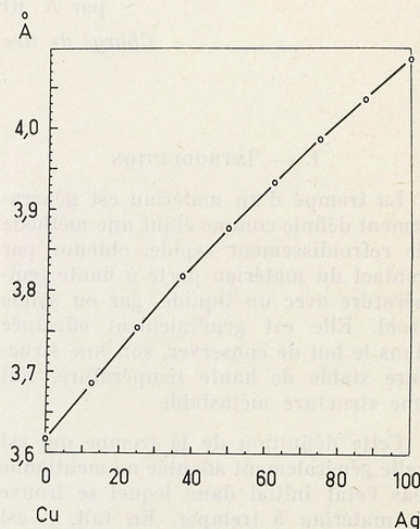


FIG. 2. — Variation en fonction de la teneur en argent du paramètre cristallin des solutions solides Cu-Ag obtenues par hyper-trempe.

2) le contact thermique entre liquide et substrat doit être aussi parfait que possible, c'est-à-dire qu'il faut qu'une force soit exercée sur le liquide pour le plaquer contre le substrat ;

3) la hauteur de liquide dans la direction perpendiculaire au substrat doit être aussi réduite que possible ;

4) le temps écoulé entre le contact initial du liquide avec le substrat et la fin de la solidification doit être aussi court que possible (conséquence des trois points précédents).

La recherche de ces différentes conditions a conduit à trois principales méthodes d'hyper-trempe :

- 1) la méthode de trempe par onde de choc ;
- 2) la méthode du « piston et de l'enclume » ;
- 3) la projection au plasma.

1° Trempe par onde de choc.

Le principe de la méthode consiste à projeter un échantillon fondu de faibles dimensions, c'est-à-dire pratiquement une gouttelette liquide, sur un substrat métallique conducteur de façon à l'étaler (« to splatter » en anglais) sous forme d'une fine pellicule (d'où l'origine du terme « splat-cooling » utilisé par les Anglo-Saxons pour désigner l'hyper-trempe).

La projection de l'échantillon sur le substrat conducteur, qui est généralement un bloc de cuivre massif, se fait par l'intermédiaire d'une onde de choc, créée soit par rupture brutale d'un diaphragme, soit à l'aide d'une charge explosive.

La figure 3 représente le schéma de principe d'un appareillage de trempe par onde de choc. Il s'agit d'un tube constitué par une chambre haute pression A et une chambre basse pression B séparées par un diaphragme C.

L'échantillon métallique à tremper F est placé à l'intérieur d'un creuset de graphite E chauffé par induction de courants de haute fréquence. Une pièce d'alumine noyée dans le graphite permet d'éviter le contact entre l'échantillon et le graphite.

Pour les matériaux métalliques particulièrement réactifs, un dispositif de lévitation peut être utilisé afin d'éviter tout contact de l'échantillon fondu avec le support.

Un gaz inerte sous haute pression est admis brusquement dans la chambre A. Le diaphragme C, généralement en mylar ou polyéthylène, explose : une onde de

choc se propage et entraîne l'échantillon fondu par l'orifice situé à la base du tube et le projette sur le substrat placé quelques centimètres en dessous.

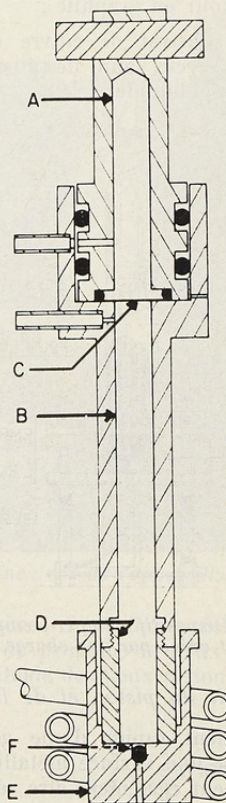


FIG. 3. — Dispositif d'hyper-trempe par onde de choc : schéma de principe.

Des échantillons aussi réfractaires que le carbure de tantale TaC ($\theta_F = 3\,877^\circ\text{C}$) ont pu être fondus en moins d'une seconde avec un tel appareil et trempés par projection. Une telle rapidité de chauffage permet la trempe d'échantillons d'alliages volatils sans que leur composition ne soit altérée (2).

La figure 4 représente une variante du schéma précédent, dans laquelle l'onde de choc est créée par une charge explosive.

L'appareil comprend :

- un pistolet du type de ceux utilisés pour enfoncer des chevilles métalliques dans des murs de béton ;
- un four en graphite ;
- un substrat de cuivre en forme d'arc de cercle, afin de mieux étaler l'échantillon liquide.

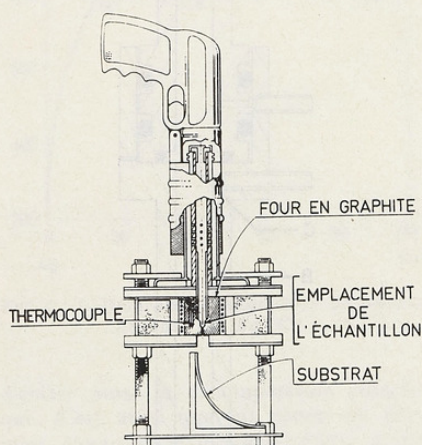


FIG. 4. — Dispositif d'hyper-trempe : l'onde de choc est créée par une charge explosive.

2° Méthode du piston et de l'enclume.

L'étalement rapide d'une gouttelette liquide sur une surface métallique conductrice peut également être réalisé par écrasement du liquide entre deux surfaces conductrices amenées à grande vitesse l'une contre l'autre. C'est la méthode que l'on pourrait appeler celle du « marteau et de l'enclume », ou de façon moins imagée la « méthode des deux pistons ».

La figure 5 représente le schéma de principe de la méthode :

L'échantillon métallique est placé à l'extrémité d'un tube de silice D, puis fondu grâce à un suscepteur de graphite E. Une légère surpression gazeuse fait tomber la gouttelette liquide qui, en passant devant un faisceau lumineux, actionne un dispositif électromagnétique

libérant le piston B maintenu sous forte pression et le projette contre le piston A.

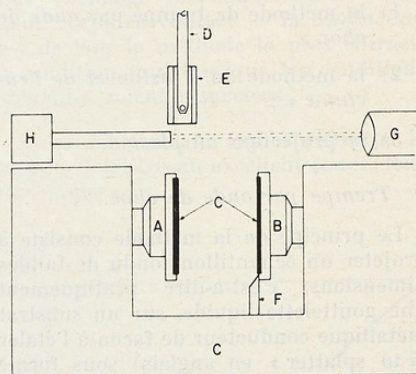


FIG. 5. — Dispositif d'hyper-trempe par écrasement entre deux pistons : schéma de principe.

Les pistons A et B sont en acier. Les embouts C sont des disques de cuivre facilement remplaçables en cas de détérioration.

Pour projeter les deux pistons l'un contre l'autre, différents dispositifs peuvent être envisagés, utilisant soit une force électromagnétique, soit une force d'origine pneumatique.

Des vitesses de déplacement du piston de l'ordre de 100 à 150 km/h peuvent être obtenues au moment de l'écrasement, c'est-à-dire après seulement quelques centimètres de course.

Une possibilité de chauffage par lévitation peut également être utilisée afin d'éviter toute contamination de l'échantillon.

La figure 6 représente le dispositif avec lequel nous avons pu réaliser l'hyper-trempe d'alliages métalliques, notamment d'alliages cuivre-zirconium (5). Le piston de droite joue le rôle d'enclume. Un ressort placé à son extrémité permet d'amortir le choc se produisant lors de l'écrasement de l'échantillon par le piston de gauche. Ce dernier est projeté grâce à une force d'origine électromagnétique exercée sur un disque

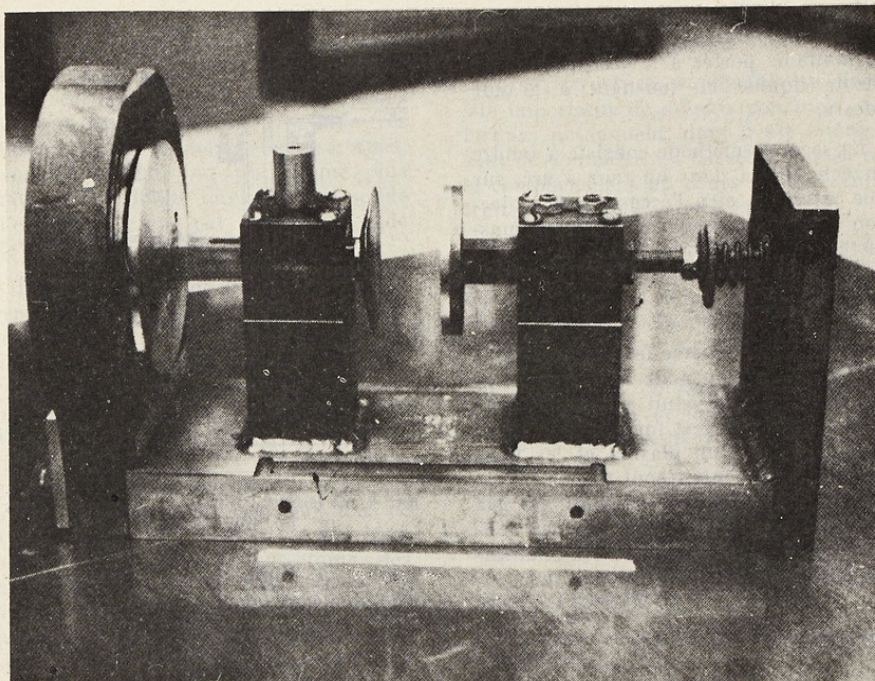


FIG. 6. — Dispositif d'hyper-trempe entre deux pistons : vue de l'appareillage.

de duralumin de grande surface, solidaire du piston : la décharge brutale d'une batterie de condensateurs dans une spire placée à proximité du disque de duralumin est à l'origine de cette force. Un dispositif de blocage du piston de gauche permet de maintenir les deux pistons accolés après écrasement de l'échantillon, évitant ainsi une perte d'énergie et d'efficacité de trempe par rebondissement.

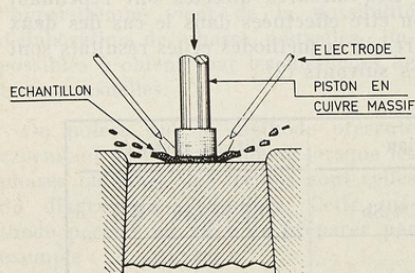


FIG. 7. — Dispositif d'hyper-trempe par écrasement, associé à un four à arc.

Les figures 7 et 8 représentent les schémas de principe de deux variantes de la méthode des deux pistons. La pre-

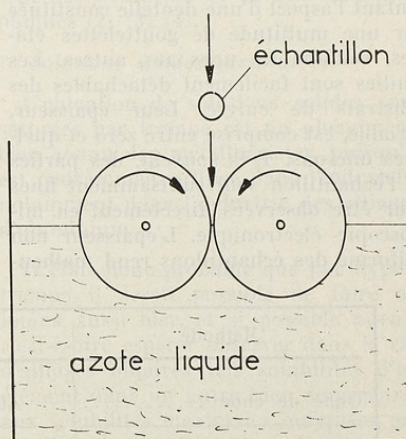


FIG. 8. — Hyper-trempe par écrasement d'un échantillon fondu entre deux rouleaux de laminage.

mière méthode consiste à écraser un échantillon fondu entre deux rouleaux de laminier portés à la température de l'azote liquide et tournant à grande vitesse.

La seconde méthode consiste à fondre un échantillon dans un four à arc, sur sole refroidie, et à l'écraser par projection brutale d'une barre de cuivre massif (6).

3° Plasma.

Enfin, une troisième méthode utilisant un chalumeau ou four à plasma peut être utilisée. Le produit à tremper, sous forme de poudre, est fondu par passage dans le cœur d'un plasma et les fines gouttelettes obtenues sont projetées sur un substrat de cuivre refroidi. Le gaz vecteur de poudre doit être un gaz neutre ou réducteur dans le cas d'échantillons métalliques (fig. 9).

Remarques.

1) Forme et dimension des échantillons préparés par ces méthodes.

Dans le cas du tube à onde de choc, les échantillons se présentent sous forme de feuilles très fines de forme sensiblement circulaire ($\varnothing$ 1 à 2 cm), présentant l'aspect d'une dentelle constituée par une multitude de gouttelettes étalées, soudées les unes aux autres. Les feuilles sont facilement détachables des substrats de cuivre. Leur épaisseur, variable, est comprise entre zéro et quelques microns. Très souvent, des parties de l'échantillon sont suffisamment fines pour être observées directement en microscopie électronique. L'épaisseur non uniforme des échantillons rend malheu-

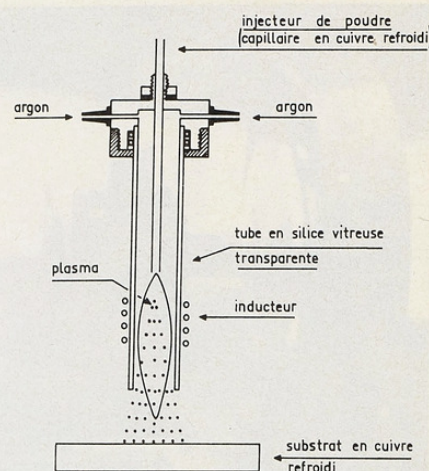


FIG. 9. — Hyper-trempe par projection dans un four à plasma.

reusement impossible l'étude des propriétés mécaniques.

Les échantillons préparés par la méthode des deux pistons ont généralement la forme de feuillets circulaires de $\varnothing$ 25 mm et 20 à 75 microns d'épaisseur. Celle-ci est uniforme.

Quant à la méthode de projection au plasma, elle conduit à des échantillons trempés de forme pulvérulente.

2) Vitesses de trempe.

La mesure de ces vitesses est délicate, en raison, d'une part, de la rapidité du phénomène, d'autre part, à cause de la faible dimension des échantillons.

Des mesures directes ont cependant pu être effectuées dans le cas des deux premières méthodes et les résultats sont les suivants (2) :

Méthode	Matériau	Vitesse mesurée
Onde de choc	Au — 14 % Sb	1,5 à 3.10^7 ° C/s
Pistons	Al	7.10^5 ° C/s
	Pb	1.10^6 ° C/s

Comme on le voit, la vitesse de trempe varie de façon notable avec la méthode utilisée et de plus dépend du matériau. Dans certains cas, les deux méthodes peuvent conduire à des résultats très différents pour un même composé. Ainsi, pour le système Ag - Cu évoqué plus haut, la miscibilité totale à l'état solide n'est observée que par trempe par onde de choc.

Il existe également une méthode indirecte de mesure des vitesses d'hyper-trempe. Cette méthode utilise, pour un alliage de composition eutectique, la relation existant entre la distance interlamellaire λ de l'eutectique et la vitesse V à laquelle il a été solidifié. Cette relation est du type $\lambda V^n = \text{cte}$ conduisant en coordonnées logarithmiques à une droite comme courbe représentative de λ en fonction de V . Dans le cas d'un alliage de composition eutectique, des mesures effectuées sur des échantillons ayant subi de faibles vitesses de trempe permettent de tracer cette droite. Celle-ci extrapolée dans le domaine des fortes vitesses de trempe permet de déterminer V par simple mesure de la distance interlamellaire : celle-ci est très faible et est généralement mesurée par microscopie électronique effectuée sur des répliques.

Les résultats des mesures directes et indirectes des vitesses de trempe concordent assez bien.

III. — DIFFÉRENTS TYPES DE STRUCTURES ACCESSIBLES PAR HYPER-TREMPE

L'intérêt essentiel de la technique de l'hyper-trempe vient de la possibilité d'élaboration de phases nouvelles, impossibles à obtenir par les méthodes de trempe usuelles.

On notera que la méthode présente cependant de l'intérêt, même lorsque les phases obtenues par trempe sont celles du diagramme d'équilibre. Cette méthode permet en effet de préparer par exemple :

— des solutions solides parfaitement homogènes, utilisables comme étalons

pour des techniques comme la microsonde ou l'analyse par activation ;

— des structures contenant une densité importante de défauts ponctuels, de lacunes notamment, dont il est intéressant de connaître les caractéristiques et le comportement au cours de différents traitements postérieurs à la trempe.

A la suite des premières expériences de Duwez, de nombreuses recherches ont été effectuées dans le domaine de l'hyper-trempe, principalement sur des métaux et alliages.

Les résultats obtenus ont permis la mise en évidence de nombreuses phases nouvelles que l'on peut classer en trois catégories :

1) solutions solides dont le domaine d'existence s'étend au-delà des limites définies par le diagramme d'équilibre de phases et que nous appellerons *solutions solides sursaturées* ;

2) *phases nouvelles hors équilibre ou « métastables »* ;

3) *phases amorphes ou vitreuses*.

Nous allons envisager brièvement, à l'aide de quelques exemples, ces trois types de structures. On trouvera un exposé plus détaillé du sujet dans d'excellentes synthèses et revues bibliographiques (2) (3) (4).

1° Solutions solides sursaturées.

L'obtention de solutions solides sursaturées par trempe est un phénomène bien connu des métallurgistes, puisqu'il est couramment utilisé dans l'industrie, notamment dans l'industrie des alliages d'aluminium.

Il était donc probable que par hyper-trempe il serait possible de faire au moins aussi bien et si possible mieux, c'est-à-dire espérer observer dans le cas d'alliages binaires des solubilités d'un élément dans un autre bien supérieures aux solubilités maximales indiquées par les diagrammes d'équilibre de phases.

C'est ce qui fut essayé par Duwez et nous avons mentionné plus haut un cas

de solubilité totale obtenue à l'état solide dans le système Ag - Cu. Ce cas n'est pas unique puisque des miscibilités totales ont pu être obtenues par hyper-trempe dans d'autres systèmes tels que Ag - Pt, Cu - Rh, Ni - Rh (7) (8).

On notera que, dans ces trois cas encore, le facteur dimensionnel est favorable, puisque les différences de rayon atomique sont respectivement de 5 %, 5 % et 8 %.

Des solubilités totales ont également pu être observées dans des alliages pseudo-binaires tels que Ge - GaSb (9). Dans ce cas encore, la similitude de la configuration électronique des deux constituants, de leur structure cristallographique et de la taille de leur maille élémentaire respective ($a_{\text{Ga}} = 5,66 \text{ \AA}$, $a_{\text{GaSb}} = 6,10 \text{ \AA}$) laissait envisager une

telle possibilité. On notera que, pour ce système, les solubilités d'un constituant dans l'autre, observées à l'équilibre, sont pratiquement négligeables.

Les résultats ne sont pas toujours aussi spectaculaires et la miscibilité totale est loin d'être la règle. Cependant, dans de nombreux systèmes, il est possible d'étendre la solubilité observée à l'équilibre jusqu'à une certaine valeur limite.

La figure 10 indique pour quelques alliages les extensions du domaine d'existence des solutions solides terminales (3). Dans certains cas, les variations observées sont importantes. On remarquera que les solubilités maximales obtenues par hyper-trempe correspondent dans l'ensemble à la composition du point eutectique ou péritectique

Système A - B	S.S. Limite (at. % B)		Concentration Eutectique (E) ou Péritectique (P)
	Equilibre	Trempe	
Ag - Ge	9,6	13,0	25,9 (E)
Al - Mg	18,9	36,8	37,4 (E)
Al - Si	1,6	11,0	11,3 (E)
Mg - Al	11,6	22,6	30,1 (E)
Ni - Ge	12,0	20	22,0 (P)
Pb - Na	12,0	23,8	20,0 (E)
Sn - Bi	13,1	50,0	43,0 (E)
Sn - Mg	0,2	9,0	9,0 (E)

FIG. 10. — Exemples d'extension de solubilité obtenue par hyper-trempe d'alliages métalliques.

dans le diagramme d'équilibre. Ceci est assez compréhensible, car au-delà de cette composition la nucléation de la seconde phase de l'eutectique devient prépondérante et ne peut être facilement supprimée.

La figure 11 indique une extension de solubilité obtenue par hyper-trempe dans le système MgO - Al_2O_3 (10). Il s'agit d'une des rares tentatives d'application de l'hyper-trempe aux systèmes à base d'oxyde. La courbe représente la

variation du paramètre cristallin a_0 des solutions solides de MgO (périclase) et Al_2O_3 dans le spinelle MgAl_2O_4 en fonction de la teneur en cation Al^{3+} : la solubilité de la magnésie dans le spinelle est considérablement augmentée. Le paramètre cristallin correspondant à Al_2O_3 pur est celui de l'alumine γ .

2° Phases métastables.

L'obtention de phases métastables par refroidissement rapide est également un

phénomène bien connu, notamment dans le système Fe-C dont le diagramme d'équilibre de phases comporte une partie généralement représentée en pointillés, correspondant à l'existence de la cémentite Fe_3C . Il était ainsi prévisible que l'hyper-trempe allait également conduire à la découverte de nouvelles phases métastables.

Un assez grand nombre de phases nouvelles métastables ont été préparées par l'hyper-trempe. Elles ont permis

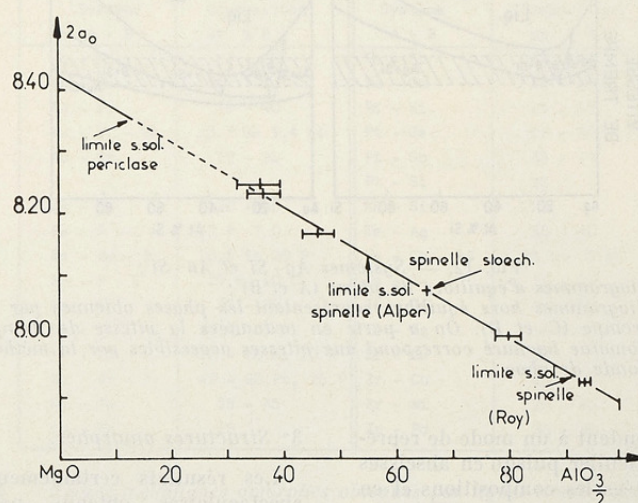


FIG. 11. — Extension de solubilité de MgO et de Al_2O_3 dans le spinelle MgAl_2O_4 , obtenue par hyper-trempe dans le système MgO- Al_2O_3 . Les limites de solubilité observées à l'équilibre sont celles définies par Alper et Roy.

dans de nombreux cas de corriger les anomalies aux règles de Hume-Rothery concernant la formation de phases intermédiaires dans les systèmes métalliques. Le premier exemple de phase nouvelle de ce type a été obtenu par Duwez dans le système Ag-Ge dans un intervalle de compositions compris entre 15 et 26 % Ge (11). La structure de cette phase est hexagonale compacte et le domaine d'existence trouvé comprend la composition de 16,6 % Ge (5 Ag, 1 Ge) pour laquelle le nombre d'électrons de valence par atome est de $3/2$.

Cette valeur de $3/2$ est avec $7/4$ et

$21/13$ celle correspondant aux phases « électroniques » de Hume-Rothery.

Une soixantaine de phases métalliques de ce type ont été mises en évidence à ce jour.

La figure 12 représente les diagrammes d'équilibre de deux autres systèmes dans lesquels ont été trouvées des phases métastables de type Hume-Rothery. Il s'agit de Ag-Si et Au-Si. La figure comporte d'une part les diagrammes d'équilibre, d'autre part les diagrammes mentionnant l'existence des phases métastables. On remarquera que ces der-

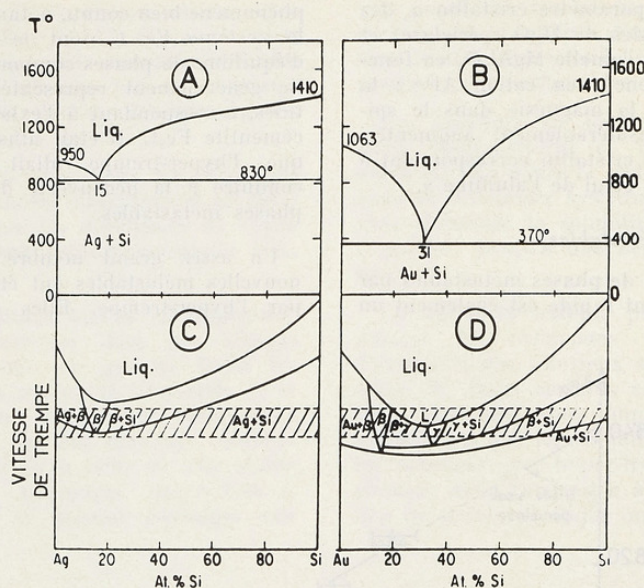


FIG. 12. — Systèmes Ag-Si et Au-Si :

- diagrammes d'équilibre de phase (A et B) ;
- diagrammes hors équilibre représentant les phases obtenues par hyper-trempe (C et D). On a porté en ordonnées la vitesse de trempe ; le domaine hachuré correspond aux vitesses accessibles par la méthode de l'onde de choc.

niers correspondent à un mode de représentation particulier puisqu'en abscisses sont représentées les compositions et en ordonnées les vitesses de trempe au lieu des températures (12).

Il est intéressant de noter que certaines de ces phases métastables ont une structure cubique simple, c'est-à-dire comportant 1 atome/maille (3) (fig. 13). Il s'agit essentiellement de systèmes à base de bismuth et d'antimoine dont on sait qu'il est possible d'obtenir des structures cubiques simples sous forte pression : l'addition au bismuth et à l'antimoine d'éléments dont le rayon atomique est inférieur au leur semble avoir ainsi un effet identique à celui des hautes pressions.

Des phases nouvelles métastables ont été également trouvées par l'hyper-trempe d'oxydes simples, en particulier dans le cas de Ta_2O_5 (13).

3° Structures amorphes.

Les résultats certainement les plus spectaculaires obtenus par l'hyper-

Système	Composition	Paramètre
A - B	B %	a (Å)
Bi - Au	20 - 25	3,123
Sb - Au	16 - 28	2,984
Sb - Cr	13 - 24	3,074
Sb - In	32	3,050
Sb - Mn	20	3,090
Sb - Ni	10 - 20	3,030
Sb - Pb	50	3,113
Sb - Pd	11 - 25	3,022

FIG. 13. — Domaine d'existence et paramètre cristallin moyen de structures cubiques simples (1 atome par maille) obtenues par hypertrempe (3).

trempe d'alliages métalliques concernent l'obtention de phases amorphes, c'est-à-dire de phases pour lesquelles la vitesse de trempe a été suffisamment rapide pour figer à l'état solide la structure de l'état liquide ou du moins une structure qui en est proche.

Dans le cadre de cet exposé, nous qualifierons d'amorphe une structure ne présentant pas d'ordre à grande distance, c'est-à-dire caractérisée par un

diagramme de diffraction des rayons X ou de diffraction électronique comportant seulement deux ou trois anneaux diffus. Nous ne ferons donc pas de distinction ici entre les structures microcristallisées, c'est-à-dire comportant des cristaux de très faibles dimensions, de l'ordre de 10 Å, et des structures totalement désordonnées.

A ce jour, près de 25 phases amorphes ont été mises en évidence dans des sys-

Système A - B	Composition at. % B	Système A - B	Composition at. % B
Ag - Si	17 - 30	Pb - Sb	48
Au - Ge	27	Pd - Ge	18 - 20
Au - Si	15 - 40	Pd - Si	15 - 23
Au - Si - Ge	13,7 Ge 9,4 Si	Pt - Ge	17 - 30
Au - Sn	29 - 31	Pt - Sb	33 - 37
B	-	Pt - Si	25
Cu - Ti	30 - 35	Rh - Si	22
Fe - P - C	13 P 7 C	Te - Ag	33 - 40
Fe - Pd - P	10,5 Fe 20 P	Te - Cu - Au	25 Cu 5 Au
Mn - P - C	15 P 10 C	Te - Ga	10 - 30
Nb - Ni	33 - 78	Te - Ge	10 - 25
Nb - Ni - Al	39 Ni 13 Al	Te - In	10 - 30
Ni - Pd - P	10 - 70 Ni 20 P	Zr - Co	28
Ni - Pt - P	40 - 80 Pt, 25 P	Zr - Cu	40 - 75
Ni - Ta	35 - 45	Zr - Ni	20 - 40
Pb - Au	25	Zr - Pd	20 - 35

FIG. 14. — Phases métalliques amorphes obtenues par hyper-trempe et domaines d'existence correspondants.

tèmes métalliques binaires ou ternaires dans des intervalles de composition allant de 1 à 30 at. %.

Le tableau représenté figure 14 indique la majeure partie de ces alliages. L'examen de ce tableau ainsi que du domaine d'existence des phases amorphes dans chacun de ces systèmes appelle plusieurs remarques :

1) Pour un grand nombre de ces alliages, l'un des éléments constitutifs n'a pas de caractère métallique très marqué et peut même être considéré comme un élément non métallique.

2) Le domaine de composition pour lequel ont été trouvées des phases amor-

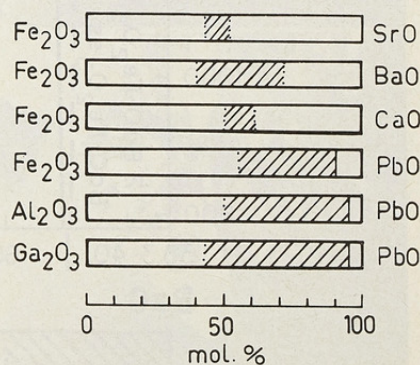


FIG. 15. — Phases vitreuses obtenues par hyper-trempe dans divers systèmes à base d'oxydes (les hachures présentent les domaines d'existence de ces phases).

phes est presque sans exception situé au voisinage d'un eutectique.

Des structures amorphes ont été également obtenues par hyper-trempe d'oxydes ou de mélanges d'oxydes : V_2O_5 , TeO_2 , MoO_3 et WO_3 , ainsi que des mélanges TiO_2 - RO (R = Ca, Sr, Ba) ont pu être préparés sous forme vitreuse (13) (14). La possibilité d'élaboration de verres à base d'oxyde Fe_2O_3 et exempts des « formateurs » usuels (SiO_2 , GeO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 ...) a également été mise en évidence par hyper-trempe (15) : la figure 15 représente les systèmes correspondants ainsi que les domaines d'existence de ces verres. Comme dans le cas des alliages métalliques, on remarquera

que la vitrification est observée au voisinage d'une composition eutectique (fig. 16).

La structure de ces phases amorphes est mal connue, quoique dans certains cas il ait été possible de distinguer entre structures amorphes et microcristallines (16).

Un certain nombre de méthodes d'étude (diffractométrie X, analyse thermique différentielle, variation de la résistivité électrique, microscopie électronique...) appliquées principalement aux composés métalliques, permettent cependant à l'heure actuelle de caractériser ces phases solides et de mettre en évidence des

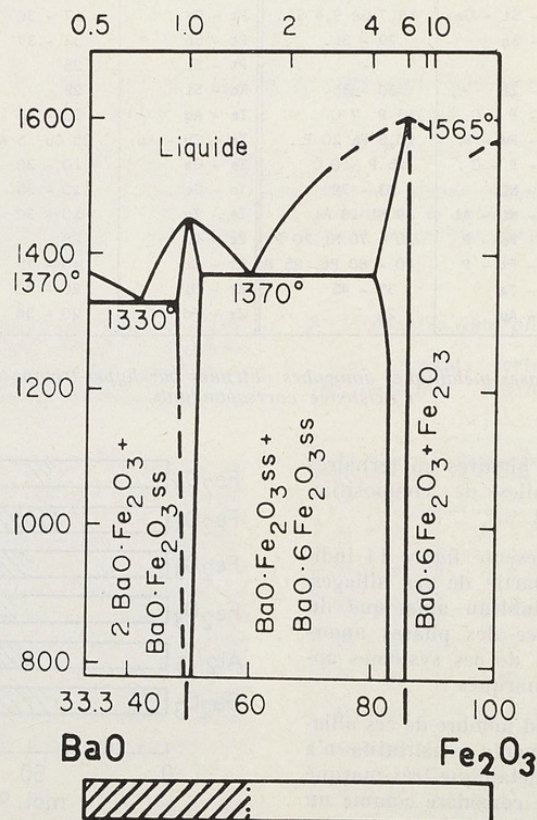


FIG. 16. — Possibilité de vitrification dans le système Fe_2O_3 - BaO : le domaine d'existence des verres (hachurés) est situé au voisinage d'une composition eutectique.

propriétés analogues à celles des liquides (fig. 17 et 18).

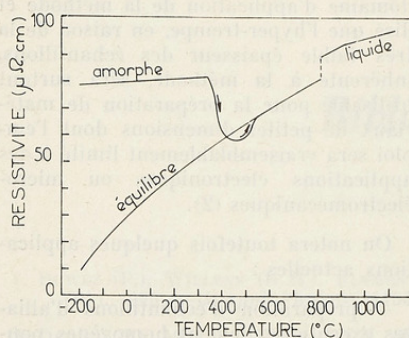


FIG. 17. — Variation en fonction de la température de la résistivité d'un alliage Pd-Si (20 at. % Si) sous forme amorphe, cristallisée et liquide).

La figure 17 représente la variation en fonction de la température, de la résistivité électrique de deux échantillons d'un même alliage, l'un de structure amorphe obtenu par trempe, l'autre cristallisé : dans le cas de ce dernier, la résistivité croît régulièrement jusqu'à la température de fusion de l'alliage à laquelle elle subit une brusque augmentation. Dans le cas de l'échantillon amorphe, la résistivité varie peu jusque vers 300° C, puis décroît brutalement lors de la cristallisation de l'alliage, pour rejoindre les valeurs mesurées sur l'échantillon n'ayant pas subi l'hyper-trempe. On remarquera que la portion de courbe correspondant au liquide se trouve dans le prolongement de celle relative à l'échantillon amorphe, suggérant une analogie de structure entre les deux états (2).

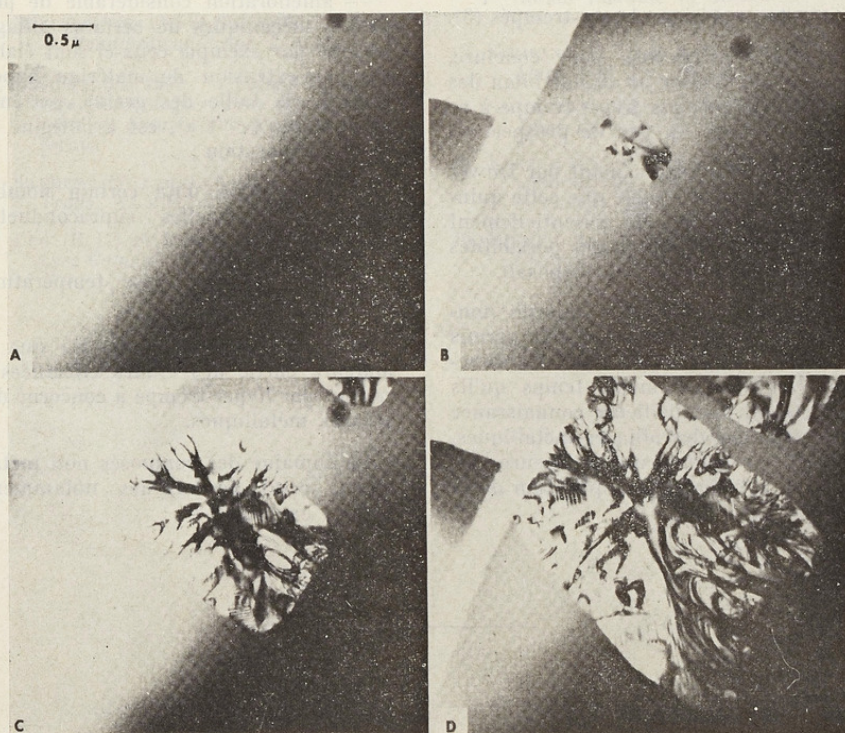


FIG. 18. — Différents stades de la cristallisation d'un alliage amorphe Pt-Si (23 at. % Si) observés sur la platine chauffante d'un microscope électronique.

La figure 18 est un autre exemple mettant en évidence cette analogie : elle représente différents stades de la cristallisation d'un alliage amorphe Pt-Si (77 at. % Pt) observés par microscopie électronique à mesure que la température croît.

Un germe cristallin se développe progressivement aux dépens d'une phase amorphe ne présentant pas de contraste : le phénomène rappelle étrangement la croissance d'un cristal à partir d'une phase liquide (2).

IV. — CONCLUSION

Nous venons d'examiner très brièvement la technologie de l'hyper-trempe ainsi que les types de structures accessibles par cette méthode. On trouvera ailleurs une revue des principales propriétés des matériaux hyper-trempés (3).

Il serait intéressant, pour conclure, d'essayer de dresser un rapide bilan des résultats obtenus par hyper-trempe à ce jour et de faire un peu de prospective.

La méthode mise au point par Duwez date de 1960 et il semble que cette quinzaine d'années ait été essentiellement consacrée à l'exploration des possibilités du nouvel outil dont l'on disposait.

Un grand nombre de composés nouveaux ont été découverts et ont permis d'orienter les recherches dans des directions nouvelles en même temps qu'ils permettaient une meilleure connaissance de la structure des alliages métalliques. Il s'agit probablement, à l'heure actuelle, de la principale application de la méthode.

Il semble, en effet, qu'il soit trop tôt pour penser à des applications industrielles. On peut cependant délimiter le domaine d'application de la méthode et dire que l'hyper-trempe, en raison de la très faible épaisseur des échantillons, inhérente à la méthode, sera surtout utilisable pour la préparation de matériaux de petites dimensions dont l'emploi sera vraisemblablement limité à des applications électroniques ou micro-électromécaniques (2).

On notera toutefois quelques applications actuelles :

- préparation d'échantillons d'alliages exceptionnellement homogènes pouvant servir d'étalons dans différentes techniques analytiques ;

- préparation d'échantillons pour la microscopie électronique ;

- amélioration considérable de propriétés mécaniques de certains alliages lorsque par exemple ceux-ci sont élaborés par extrusion de matériau hyper-trempé ; la taille des grains, extrêmement faible ($< 1 \mu$), est à l'origine de cette amélioration ;

- préparation d'un certain nombre de phases nouvelles supraconductrices (3) ;

- thermométrie basse température, etc.

Pour terminer, on retiendra que la majeure partie des études effectuées à ce jour par hyper-trempe a concerné des alliages métalliques.

Le domaine des composés non métalliques, celui des oxydes notamment, reste à explorer.

Bibliographie

1. DUWEZ (P.), WILLENS (R. H.), KLEMENT (W.), 1960. — *J. Appl. Phys.* 31, 1136.
2. DUWEZ (P.), 1967. — *Trans. A.S.M.* 60, 607.
3. ANANTHARAMAN (T. R.) et SURYANARAYANA (C.), 1971. — *J. of Mater. Sci.* 6, 1111.
4. JONES (H.) et SURYANARAYANA (C.), 1973. — *J. of Mater. Sci.* 8, 705.
5. REVCOLEVSKI (A.) et GRANT (N. J.), 1972. — *Metallurgical Trans.* 3, 1545.
6. REED (T. B.), 1967. — « High Temperature Technology », *Proc. Third International Symposium*, Asilomar, Californie.
7. KLEMENT (W.) et LUO (H. L.), 1966. — *Trans. A.I.M.E.*, 236, 1129.
8. LUO (H. L.) et DUWEZ (P.), 1964. — *J. Less Common Metals* 6, 248.
9. DUWEZ (P.), WILLENS (R. H.) et KLEMENT (W.), 1960. — *J. Appl. Phys.* 31, 1500.
10. SARJEANT (P.-T.) et ROY (R.), 1967. — *J. Appl. Phys.* 38, 4540.
11. DUWEZ (P.), WILLENS (R. H.) et KLEMENT (W.), 1960. — *J. Appl. Phys.* 31, 1137.
12. LUO (H. L.), KLEMENT (W.) et ANANTHARAMAN (T. R.), 1965. — *Trans. of the Indian Institute of Metals* T.P. 355, 214.
13. SARJEANT (P. T.) et ROY (R.), 1967. — *J. Amer. Cer. Soc.* 50, 500.
14. SARJEANT (P. T.) et ROY (R.), 1969. — *J. Amer. Cer. Soc.* 52, 57.
15. KANTOR (P.), REVCOLEVSKI (A.) et COLLONGUES (R.), 1973. — *J. of Materials Science* 8, 1359.
16. DIXMIER (J.) et GUINIER (A.), 1970. — *Fizika* 2, Suppl. 2.

*Procédé nouveau de surfacage des grands miroirs d'astronomie et contribution à l'étude de leurs barillets **

par M. André BAYLE
Ingénieur I.O.
P.D.G. de la Sté. R.E.O.S.C.

AVANT-PROPOS

Nos propos seront relatifs, pour une part importante, à des travaux d'équipe, au sein de la Sté R.E.O.S.C. entre M. Espiard, Ingénieur, M. Favre, Opticien et moi-même.

La réalisation des grands télescopes, et en particulier la taille des miroirs du

réfracteur de 3,65 m de diamètre optique destiné à l'Observatoire européen de l'hémisphère sud dit E.S.O., nous a conduit à imaginer et mettre au point un certain nombre de procédés.

Le barillet du grand miroir m'a conduit aussi à des solutions originales.

PREMIERE PARTIE

SURFAÇAGE ET CONTRÔLES OPTIQUES.

Parlons du Miroir Concave E.S.O.

Avec son diamètre de 3,65 m, son épaisseur de 52 cm, et son poids de 11 tonnes, il faut d'abord le manipuler sans risques.

Nous avons construit à cet effet *un anneau de levage* en acier, muni de 4 patins qui enserrent le miroir par sa tranche. Deux tourillons sont disposés sur un diamètre, chacun de ces tourillons étant placés à égale distance des deux patins voisins. Cette disposition,

imaginée par M. A. Couder, permet à l'anneau de se déformer élastiquement lors du levage sans exercer sur le miroir d'efforts supplémentaires de torsion.

Le transport du miroir du tunnel de contrôle au plateau de la machine comporte, par exemple, les opérations suivantes : levage du barillet contenant le miroir ; la Fig. 1 le montre entrant par une trappe dans l'atelier de polissage ; extraction du miroir de son barillet : le miroir posé sur 3 poteaux qui traversent le fond de ce barillet, il ne reste plus qu'à descendre celui-ci ; la Fig. 2

* Conférence prononcée le 14 mars 1974 devant la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale.

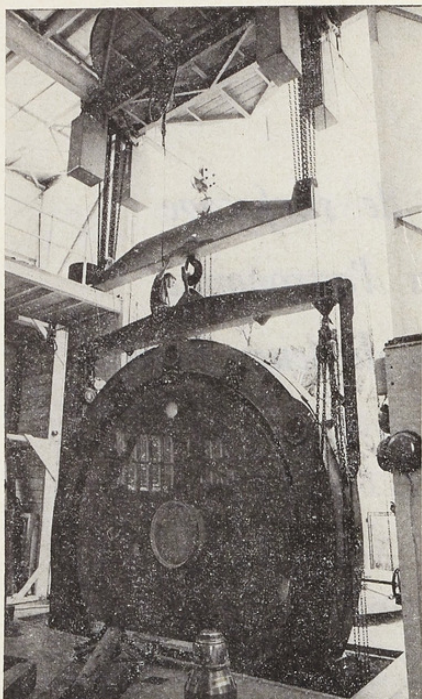


FIG. 1

est prise à la fin de cette opération ; prise du miroir dans la pince (Fig. 3), qui est serrée au moyen d'une clef dynamométrique ; enfin transport sur le plateau de la machine et libération du miroir.

Le tour d'opticien étudié et construit par nous-mêmes comporte un plateau de 3,50 m de diamètre mû par un moteur à courant continu de 10 CV qui permet une gamme très étendue de vitesses.

Cette machine peut se monter en ébaucheuse au moyen d'une rectifieuse à meule diamantée, ou en polisseuse munie de deux excentriques, d'un bras et d'une bielle. Chacun des excentriques est mû par un moteur de 5 CV ; un variateur de vitesse relie chaque moteur au réducteur correspondant.

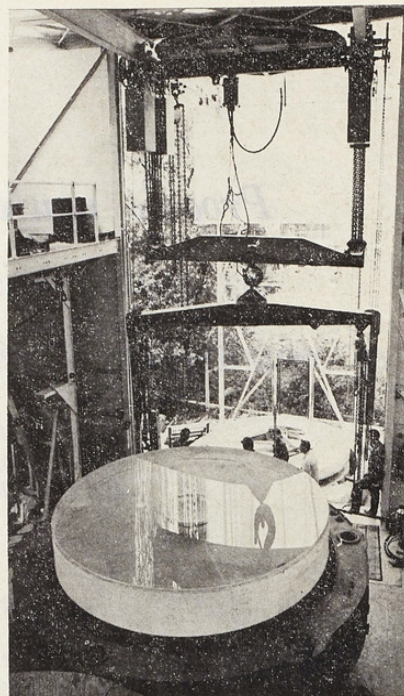


FIG. 2

Les bras s'escamotent facilement au moyen de deux palans pour libérer le miroir lors des contrôles.

Le douci de la surface et la mise en courbure exacte ont d'abord été effectués avec un outil pleine taille rigide et léger en bois de pin, puis avec un outil 2/3 de taille de même type Fig. 4. Nous préférons le bois au métal à cause de la légèreté et de la faible diffusivité thermique de ce matériau.

L'outil est solidement articulé au bras de la machine au moyen d'un triangle d'acier et de trois poutrelles. Les choses sont organisées de manière que les déformations diverses de l'acier ne contraignent pas l'outil.

Pour obtenir de bonnes surfaces, nous réglons la pression de l'outil sur le miroir à 10 ou 12 grammes au cm^2 .

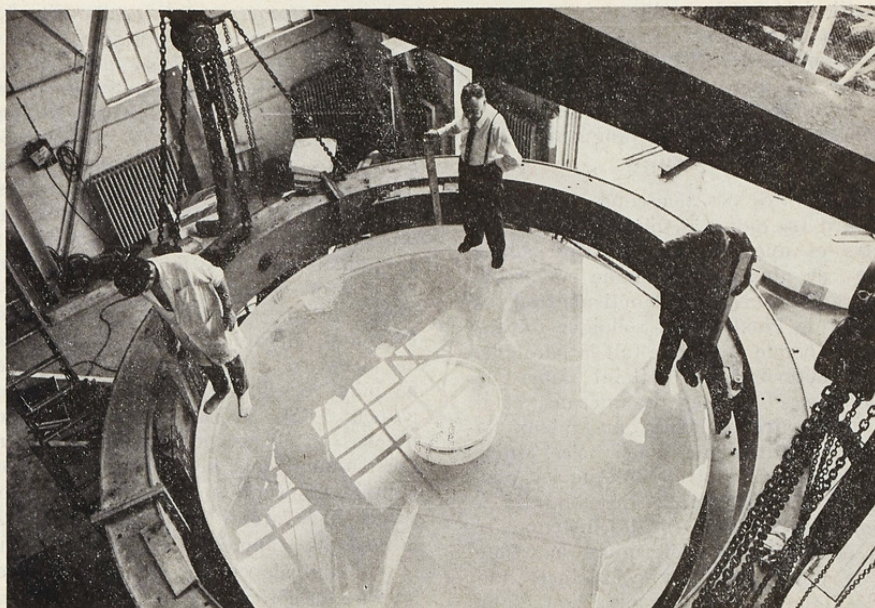


FIG. 3

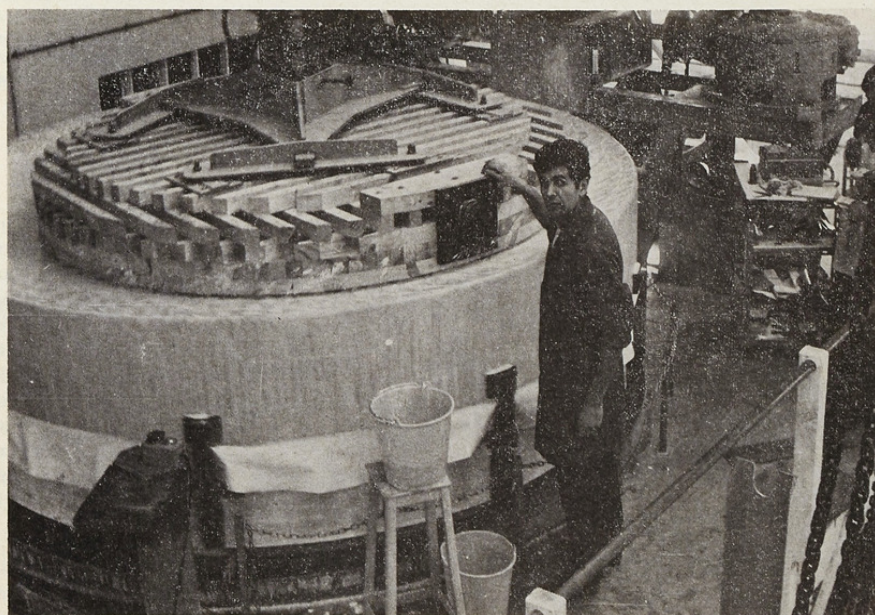


FIG. 4

L'outil rigide pleine taille avec son support en acier et sa garniture de douci en céramique pèse 2.200 kg. Il faut donc l'alléger, ce que nous faisons au moyen d'un cylindre pneumatique relié par un tuyau souple de forte section à un réservoir de grande capacité.

Les miroirs des télescopes construits aujourd'hui ont à la fois un grand diamètre et une grande ouverture angulaire ; de plus la méridienne nécessaire à la réalisation de l'aplanétisme de l'ensemble de l'instrument s'éloigne davantage du cercle que ne le fait la parabole. La « déformation » atteint ainsi de nombreuses dizaines de microns, et il est nécessaire d'obtenir au mieux la forme définitive au douci, c'est-à-dire avant que tout contrôle optique soit possible. Nous avons donc été conduits à trouver une méthode et des instruments qui permettent de déterminer la forme de la méridienne d'une surface non réfléchissante avec une précision d'une fraction de micron, de sorte que le premier polissage ne laisse voir que des défauts de quelques franges.

Les sphéromètres R.E.O.S.C. (Fig. 5) sont des sphéromètres rectilignes, c'est-à-dire que les trois touches sont alignées, ce qui simplifie beaucoup les mesures et les calculs. Ils sont constitués d'un corps tubulaire en acier, de section rectangulaire, pour les plus grands, et d'un corps taillé dans la masse pour les plus petits. Ils comportent à une extrémité une bille d'acier aisément remplaçable ; au milieu une vis à pas fin munie d'un frein énergétique ; à l'autre extrémité, un palpeur électrique de « La Précision Mécanique » ; ils sont munis de deux vis de calage du côté de la bille, et d'une seule du côté du palpeur. Ces trois vis, munies de touches en rilsan, permettent de poser l'instrument sans heurt sur la surface optique. Ils sont en outre munis d'un contrepoids latéral afin que pendant la mesure ils s'appuient sur la bille, sur la vis centrale et sur la vis de calage latérale du côté du contrepoids, les deux autres vis étant desserrées. Le palpeur n'appuie que faiblement sur la surface. Un niveau à bulle fixé sur le dessus du

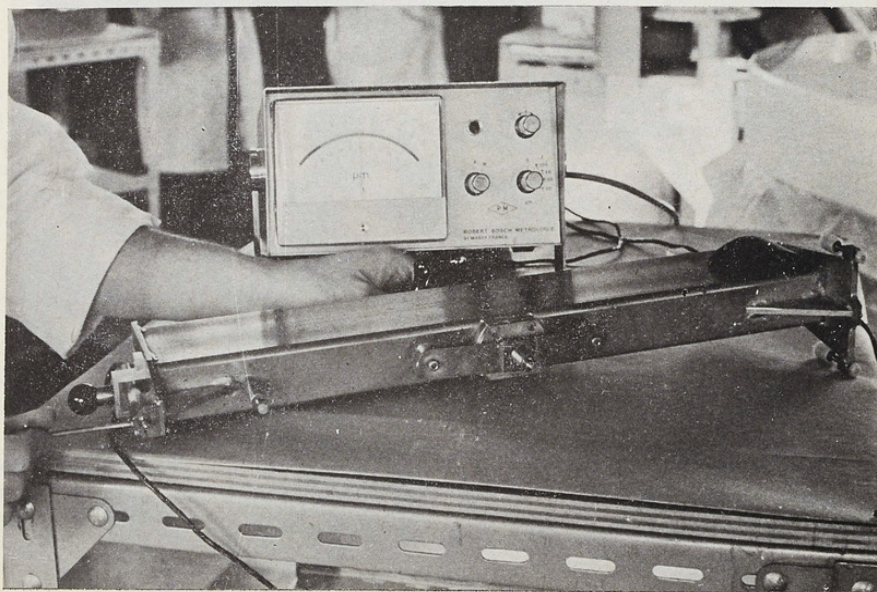


FIG. 5

sphéromètre permet de régler l'aplomb de l'instrument par la manœuvre de la vis côté contrepoids. Le corps est entièrement recouvert d'une couche électrolytique mince de cuivre destinée à empêcher l'échauffement que produirait le rayonnement I.R. du manipulateur. Des poignées en matière isolante permettent de les manipuler sans que les mains les échauffent par contact. Notre jeu comporte actuellement des sphéromètres de longueur totale, entre le palpeur et la bille, de : 1 m, 500 mm, 250 mm, 125 mm, 62,5 mm.

La méthode de mesure est la suivante (Fig. 6) :

Le sphéromètre est au préalable étalonné sur un calibre sphérique de rayon égal à celui de la sphère de référence du miroir. On le place alors une pre-

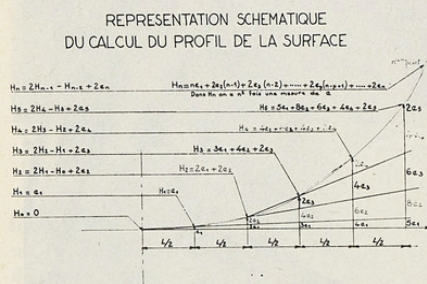


FIG. 6

mière fois sur la surface, la vis centrale coïncidant avec le sommet de cette surface. La mesure donne $2e$, qui est égale à 2 fois la différence H_1 entre la flèche F_s de la sphère et la flèche F_m du miroir mesuré. On a $H_1 = e_1$. On déplace ensuite le sphéromètre sur un rayon de la surface, pas à pas, à chaque fois d'une valeur égale à sa demi-longueur, en posant la bille à la place exacte précédemment occupée par la vis. et l'on obtient les valeurs $2e_1, 2e_2$, etc...

On trace alors une représentation graphique simplifiée des différences totales de flèches entre la sphère et la surface en étude en portant en abscisse n fois la demi-longueur du sphéromètre

et en ordonnée les valeurs $2e$ des différentes mesures suivant la formule de la Fig. 6.

On a, d'autre part, calculé les valeurs $2e$ pour la surface théorique et la sphère de référence choisie ; on calcule les valeurs H et on trace la représentation graphique suivant le même procédé. Chacune de ces représentations n'est pas rigoureuse, mais la différence entre les deux courbes est d'autant plus conforme à la réalité que cette différence est plus petite.

Si l'on se rapporte aux valeurs de H exprimées en fonction des valeurs de e , on voit que pour H_n , l'erreur sur la mesure des quantités $2e$ est multipliée par n^2 .

Pour éviter l'accumulation de ces erreurs, nous choisissons pour commencer le tracé de la courbe, un sphéromètre suffisamment grand pour n'avoir à le reporter que deux ou trois fois, ce qui donne deux ou trois points précis. Nous prendrons ensuite le sphéromètre deux fois plus petit avec lequel nous recommencerons toutes les mesures. Ce sphéromètre n'est pas étalonné directement, mais, par la manœuvre de la vis centrale et celle du palpeur, on règle celui-ci au zéro, lorsque le sphéromètre est placé au centre de la surface. On obtient les valeurs provisoires $0, e'_1, e'_2, e'_n$, et on calcule les valeurs définitives en utilisant les formules d'interpolation ou d'extrapolation de la Fig. 7. Tous ces calculs sont d'ailleurs effectués par un petit ordinateur.

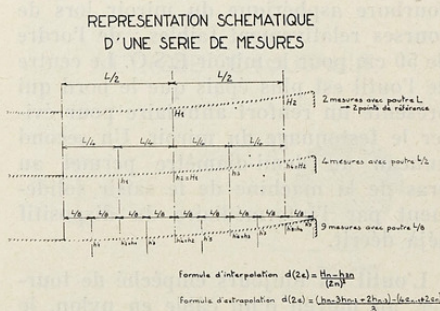


FIG. 7

La précision obtenue avec le palpeur électrique est de $0,2 \mu$ pour les surfaces jusqu'à 1,3 m de diamètre, et elle est encore supérieure au micron pour les surfaces de 3,6 m de diamètre. Les manipulations demandent cependant d'être effectuées avec grand soin pour arriver à ces précisions.

Parlons maintenant du *polissage*, en prenant toujours comme exemple le miroir de 3,65 m de diamètre. Il est effectué avec un outil pleine taille (3,65 m) de souplesse convenable, et toujours construit en bois de pin (Fig. 8).

Nous étudions ce type d'outil de

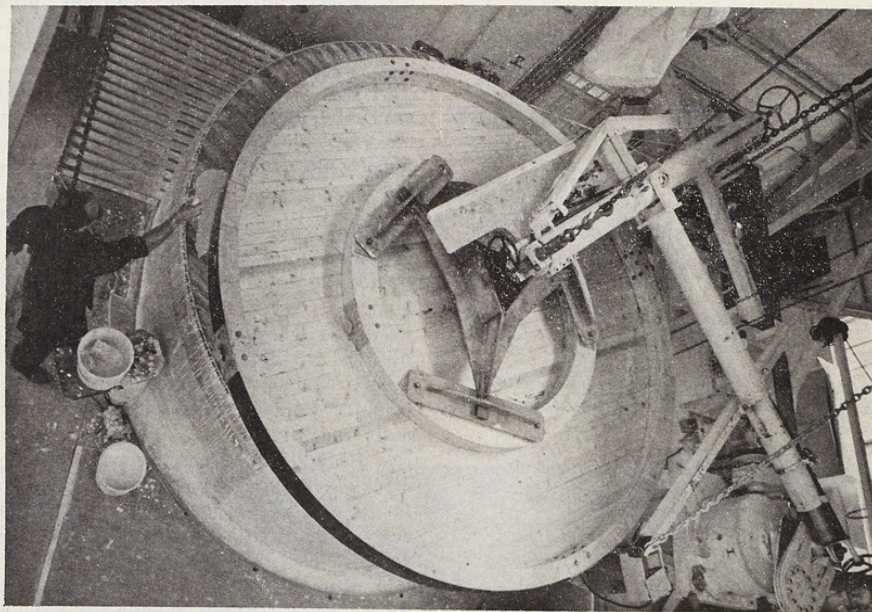


Fig. 8

manière que sa courbe puisse suivre la courbure asphérique du miroir lors de courses relativement faibles : de l'ordre de 50 cm pour le miroir E.S.O. Le centre de l'outil est plus épais que le bord qui présente un renfort annulaire pour éviter le festonnage du miroir. Un second anneau au demi-diamètre permet au bras de la machine de le saisir solidement par l'intermédiaire du dispositif déjà décrit.

L'outil est toujours empêché de tourner, au moyen d'un câble en nylon, le miroir tournant lentement en dessous.

La mise en forme exacte de la surface s'obtient en pratiquant des dégarnis convenables axés sur le diamètre dont la translation est la plus faible : 5 à 8 cm donnés par le petit excentrique de la machine (Fig. 9).

Nous pratiquons le *contrôle optique* de la surface par la méthode de Hartmann et par la méthode de Foucault.

Ces méthodes peuvent être appliquées axe optique vertical dans notre tour de contrôle située au-dessus de la machine, ce qui évite de déplacer le miroir, ou

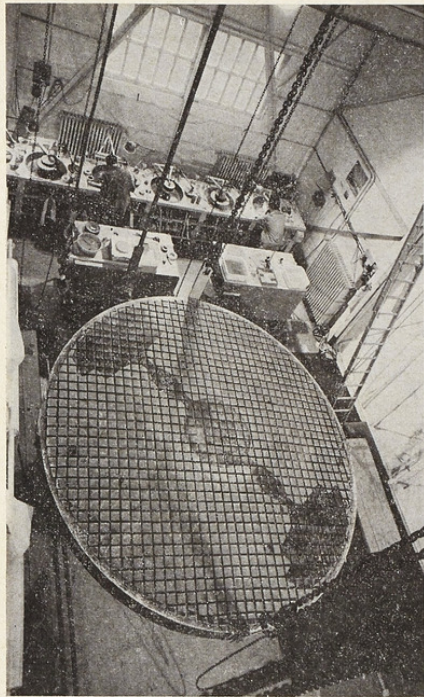


FIG. 9

bien axe optique horizontal dans le tunnel-laboratoire situé sous nos ateliers d'optique.

Avec la première de ces méthodes (Fig. 10), nous plaçons sur le miroir, un écran souple qui en épouse exactement

METHODE DE HARTMANN

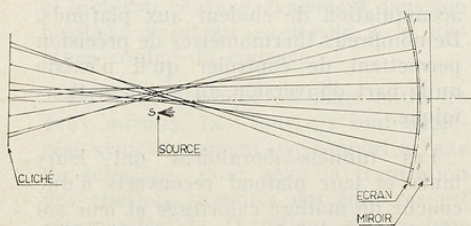


FIG. 10

la forme ; il est percé de 38 trous répartis sur un diamètre du miroir. Au voisinage du centre de courbure paraxiale de la surface, nous plaçons un point lumineux. A 45 cm en arrière, une plaque photographique enregistre les 38 impacts des 38 faisceaux provenant de l'écran. Les distances entre les impacts de chaque paire symétrique de faisceau sont mesurées au comparateur qui perfore une bande. Cette bande alimente un ordinateur auquel on a fourni aussi les données géométriques du montage pour lui permettre de résoudre le problème de triangulation ; il a d'autre part calculé et mis en mémoire les caractéristiques de la surface d'onde idéale en partant de l'équation de la surface théorique du miroir ; cela lui permet de faire la différence algébrique entre les ordonnées de la courbe réelle et de la courbe idéale. On arrive à définir cette différence avec une précision de 0,02 micron ; c'est-à-dire que les défauts de la surface matérielle du miroir sont définis au centième de micron.

On compare donc les chemins optiques de deux rayons lumineux ayant parcouru chacun deux fois le rayon de courbure du miroir : soit environ 44 m. Pour arriver à cette précision de 2.10^{-5} mm sur la surface d'onde, il est nécessaire que la température moyenne d'un des faisceaux ne s'écarte de la température moyenne de l'autre faisceau que d'une valeur inférieure à 5.10^{-4} degrés centigrades.

La méthode de Foucault (Fig. 11) consiste à placer un point lumineux au

METHODE DE FOUCAULT

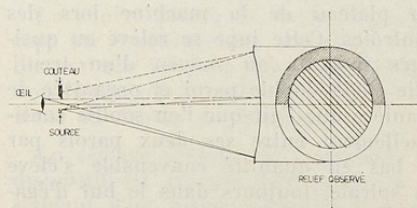


FIG. 11

voisinage du centre de courbure du miroir, et à « couper » au moyen d'un « couteau » l'image de ce point lumineux voisine de la source. Supposons qu'il s'agisse d'un miroir sphérique dont le bord est rabattu. Le couteau arrête les rayons lumineux du bord situé du même côté, laisse à moitié passer ceux venant du centre du miroir, et laisse entièrement passer ceux provenant du bord opposé. De sorte que l'œil placé derrière l'image du point lumineux et regardant le miroir, aperçoit les défauts de celui-ci comme si leur relief était très fort et éclairé par une lumière quasi rasante et provenant d'une source placée du côté opposé au couteau. Cette méthode permet de voir même les défauts de très petite surface.

Dans le cas d'un miroir parabolique ou Ritchey-Chrétien comme celui de l'E.S.O., la très forte aberration sphérique au centre de courbure oblige à placer une optique correctrice de cette aberration, et formée d'une ou deux lentilles pour que l'ensemble de la surface puisse être utilement observée.

La tour de contrôle comporte une paroi extérieure en maçonnerie, et un cylindre intérieur en acier garni intérieurement d'un revêtement calorifuge en laine de verre et extérieurement enveloppé par un tube de nylon à paroi mince, tube enroulé en spirale et parcouru par un léger courant d'air. Le but de ce courant est d'égaleriser la température du cylindre suivant les plans horizontaux.

Le cylindre d'acier se continue vers le bas par une jupe en tissu plastifié (Fig. 12), qui vient entourer le bord du plateau de la machine lors des contrôles. Cette jupe se relève en quelques instants au moyen d'un treuil. Elle est à double paroi et organisée de manière que l'air que l'on souffle continuellement entre ses deux parois par le bas en quantité convenable s'élève en spirale, toujours dans le but d'égaleriser la température dans chaque plan horizontal.

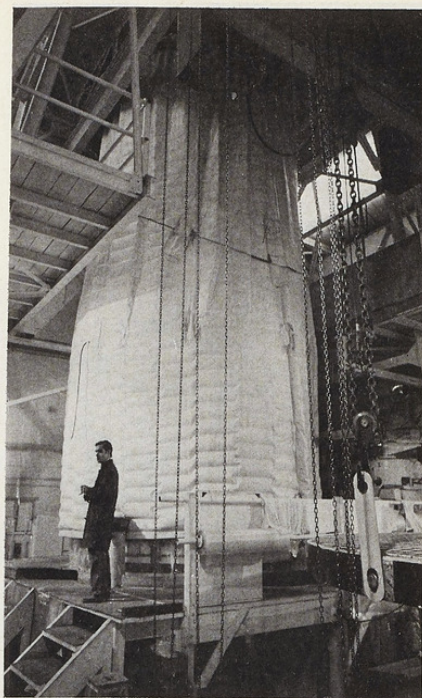


FIG. 12

Les radiateurs de chauffage, en grand nombre, sont chacun munis d'un régulateur thermique, lesquels sont réglés de manière que la température dans la tour augmente régulièrement de bas en haut. Le calcul montre qu'un gradient de quelques degrés en 20 m, s'il stabilise les couches d'air, ne provoque aucune aberration sphérique gênante.

Des ventilateurs, dans le hall et à chaque étage de la tour, brassent l'air de manière à éviter une trop grande accumulation de chaleur aux plafonds. De nombreux thermomètres de précision permettent de contrôler qu'il n'existe nulle part d'inversion du gradient thermique.

Les tunnels-laboratoires ont leurs murs et leur plafond recouverts d'une couche de matière calorifuge et leur sol muni d'un plancher et d'un tapis. Malgré toutes les précautions que l'on puisse

prendre, il subsiste un gradient thermique de bas en haut suffisant pour que seule la méridienne horizontale des miroirs puisse être définie avec la précision de 10^{-5} mm.

Parlons maintenant des *miroirs convexes* des télescopes.

Le contrôle optique (Fig. 13) se pratique, le miroir concave étant terminé,

CONTROLE DES MIROIRS CONVEXES METHODE DES EQUERRES

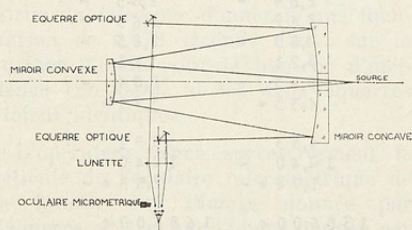


Fig. 13

en reconstituant le télescope, au foyer duquel nous plaçons une source ponctuelle. Les écarts angulaires des rayons du faisceau obtenu, qui devraient être parallèles, donnent directement les pentes de la surface d'onde fournie par le télescope. On mesure ces écarts en prélevant dans le faisceau deux pinceaux symétriques au moyen de deux équerres optiques qui les renvoient dans une lunette à fort grossissement et pourvue d'un oculaire micrométrique.

A partir de 2 m de diamètre, nous reconstituons les télescopes dans notre tour de contrôle. Le miroir concave est placé dans son barillet sur la machine, et le miroir convexe, également dans son barillet, maintenu au-dessus à la distance voulue du concave.

Un banc d'optique est placé entre les deux miroirs. Les équerres sont déplacées symétriquement par rapport à l'axe du télescope. Pour cela, la translation des chariots supports des équerres est commandée de l'extérieur de la tour intérieure depuis la passerelle d'obser-

vation, au moyen de deux volants : un pour chaque chariot. Ces volants peuvent être embrayés l'un sur l'autre, ou au contraire désolidarisés. Les réglages de l'orientation rigoureuse de chaque équerre suivant les trois axes sont obtenus électriquement depuis la passerelle par la manœuvre de 12 boutons-poussoirs.

Une lunette auxiliaire permet d'observer la position de chaque chariot le long du banc d'optique.

La lunette principale de contrôle est munie d'un système autocollimateur permettant de régler suivant deux axes l'orientation des équerres par autocollimation sur leur face de sortie. L'orientation suivant le troisième axe s'opère en plaçant les deux images vues dans la lunette sur la même ligne verticale ; la distance verticale entre ces images est ce que l'on mesure.

La tour intérieure est d'autre part, équipée d'un support triangulaire des barillets des miroirs convexes. Ce support réglé de l'extérieur de la tour intérieure, permet de placer et d'orienter convenablement les miroirs convexes.

Pour éviter les manipulations et limiter le plus possible les transports très nombreux de la polisseuse au poste de contrôle nécessités par les inspections de la surface optique en finition, nous terminons les miroirs convexes au premier étage de la tour, au niveau de l'emplacement de ces miroirs dans le télescope.

Ce premier étage est un laboratoire muni d'un poste d'argenture chimique qui permet d'argenter le miroir sur la polisseuse après chaque séance de polissage.

La source placée au foyer du télescope est constituée par une fente éclairée par une lampe à iode ; une ventilation forcée rejette l'air chaud de la lanterne au dehors du télescope.

Le réglage optique de l'ensemble du dispositif est exécuté avec précision en s'aidant d'un niveau, d'un fil à plomb et d'un laser à faisceau fin.

PLANCHE V
MERIDIENNE A

D

Source centrée

23.127.217,00 <

quatrièmes mesures

$t_m - t_a = 2/25 \text{ } ^\circ\text{C}$	686,00 <	986,00 <	1,286,00 <	1,586,00 <
	3,77	3,72	3,70	3,64
	2,84 -	2,86 -	2,83 -	2,86 -
	3,77	3,72	3,69	3,63
	2,84 -	2,87 -	2,83 -	2,85 -
	3,77	3,71	3,70	3,63
	2,85 -	2,87 -	2,84 -	2,85 -
	3,77	3,70	3,69	3,63
	2,84 -	2,87 -	2,83 -	2,85 -
	3,77	3,72	3,71	3,63
	2,84 -	2,87 -	2,83 -	2,84 -
	4,64 +	4,23 +	4,33 +	3,91 +
	4,64	4,23	4,33	3,91
	10,40 -	10,40 -	10,40 -	10,40 -
	1,12 #	1,94 #	1,74 #	2,58 #
	786,00 <	1,086,00 <	1,386,00 <	1,686,00 <
	3,75	3,70	3,68	3,64
	2,85 -	2,84 -	2,87 -	2,87 -
	3,75	3,70	3,69	3,65
	2,83 -	2,85 -	2,87 -	2,86 -
	3,75	3,70	3,69	3,66
	2,83 -	2,85 -	2,87 -	2,87 -
	3,75	3,70	3,70	3,66
	2,83 -	2,83 -	2,87 -	2,87 -
	3,76	3,70	3,70	3,66
	2,83 -	2,82 -	2,87 -	2,86 -
	4,59 +	4,31 +	4,11 +	3,94 +
	4,59	4,31	4,11	3,94
	10,40 -	10,40 -	10,40 -	10,40 -
	1,22 #	1,78 #	2,18 #	2,52 #
	886,00 <	1,186,00 <	1,486,00 <	1,786,00 <
	3,74	3,72	3,64	3,61
	2,83 -	2,84 -	2,85 -	2,82 -
	3,74	3,71	3,64	3,63
	2,84 -	2,84 -	2,84 -	2,83 -
	3,72	3,71	3,64	3,63
	2,84 -	2,83 -	2,84 -	2,84 -
	3,72	3,70	3,64	3,63
	2,84 -	2,82 -	2,85 -	2,83 -
	3,72	3,71	3,65	3,63
	2,84 -	2,83 -	2,86 -	2,84 -
	4,45 +	4,39 +	3,97 +	3,97 +
	4,45	4,39	3,97	3,97
	10,40 -	10,40 -	10,40 -	10,40 -
	1,50 #	1,62 #	2,46 #	2,46 #

Fig. 14

Parlons maintenant de la *procédure des mesures*.

Disons d'abord que pour faciliter et afin que les deux images ne se confondent jamais, on a réglé une des deux équerres de manière qu'elle dévie un peu plus que l'autre : on lit 104 divisions du micromètre lorsque le faisceau de lumière issu du télescope est rigoureusement parallèle : une division vaut $7,58 \cdot 10^{-7}$ radians. De sorte que une division mesurée entre les déviations des deux équerres placées symétriquement par rapport à l'axe optique à la sortie du télescope donnerait une inclinaison de 0,078 seconde d'arc, sur la surface d'onde pour la hauteur d'incidence considérée si les deux équerres étaient identiques.

L'opérateur place successivement le réticule de l'oculaire micrométrique de la lunette sur l'image donnée par l'équerre n° 1 et sur l'image donnée par l'équerre n° 2 ; c'est la différence de ces mesures qui importe. Ces chiffres sont immédiatement frappés sur une additionneuse, les premiers affectés d'un signe + et les seconds d'un signe —. Si les séquences sont de dix paires de chiffres, la somme algébrique de ces chiffres donne un nombre auquel on ajoute aussitôt la valeur —1040 ; le total donne la valeur de la déviation exprimée en dixièmes de divisions. Nous donnons ici une fiche de mesures relative au miroir Cassegrain du télescope E.S.O. à titre d'exemple (Fig. 14).

En marge des colonnes de chiffres, nous avons noté de temps en temps les différences de température de la surface du miroir de 3,65 mètres, à l'air se trouvant à quelques cm au-dessus. Ces mesures ont été faites sur une chaîne thermo-électrique :

$$t_m - t_a = -\frac{1}{25}$$

indique par exemple que le miroir était plus froid que l'air de $\frac{1}{25}$ de degré C°.

Cette méthode des équerres optiques s'applique très bien au contrôle des miroirs paraboliques puisqu'ils sont

dépourvus d'aberration sphérique au foyer. Elle a sur la méthode de Hartmann deux grands avantages : plus rapide car donnant directement les pentes sans clichés et sans calculs ; et n'exigeant qu'un parcours réduit au tiers des rayons lumineux dans l'air.

Les résultats auxquels nous sommes parvenus sur l'optique E.S.O. sont illustrés par les Figures 15 à 18 incluses.

La Fig. 15 donne la surface d'onde définitive du même miroir, monté dans son barillet, ainsi que les pentes obtenues.

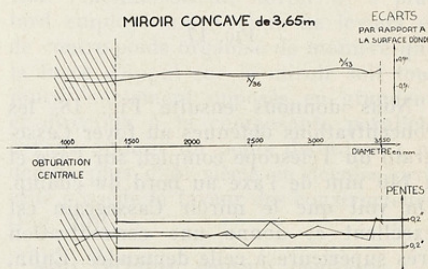


Fig. 15

La Fig. 16 donne la concentration de l'énergie dans la tache au foyer en fonction du diamètre angulaire de cette tache. On voit que le contrat qui était déjà réputé très sévère, nous demandait que 75 % de l'énergie renvoyée par le miroir soit contenue dans un cercle de 0,4 seconde d'arc de diamètre, et que nous arrivons à 99 %, ce miroir étant associé à un convexe parfait.

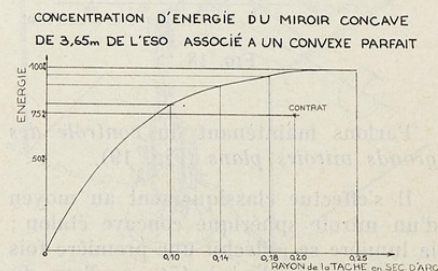


Fig. 16

La Fig. 17 est une reproduction du Foucaultgramme obtenu avec le correcteur d'aberration sphérique que nous avons calculé très exactement.

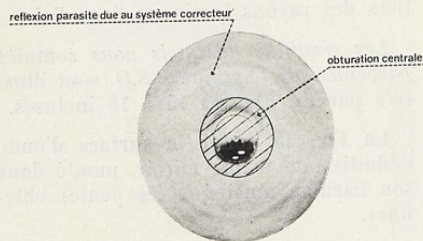


FIG. 17

Nous donnons ensuite Fig. 18, les concentrations obtenues au foyer Cassegrain du Télescope complet, sur l'axe et à 140 mm de l'axe au bord du champ. On voit que le miroir Cassegrain est excellent et donne une concentration très supérieure à celle demandée. Enfin, les concentrations données au foyer coudé montrent que ce dernier miroir est aussi bon que les deux autres.

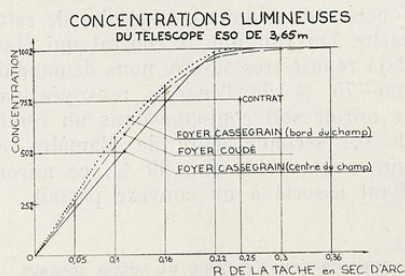


FIG. 18

Parlons maintenant du *contrôle des grands miroirs plans* (Fig. 19).

Il s'effectue classiquement au moyen d'un miroir sphérique concave étalon ; la lumière se réfléchit une première fois sur le plan incliné à 45° sur l'axe du faisceau lumineux, puis sur le concave,

ETUDE VERTICALE DES MIROIRS PLANS

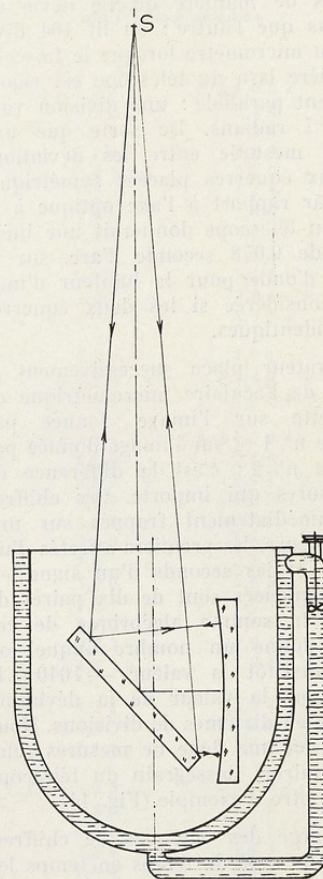


FIG. 19

et une deuxième fois sur le plan. Le point lumineux source est placé dans la tour ; le plan incliné en-dessous devant le concave. Le trajet vertical entre la source et le plan rencontre l'air calme de la tour avec son léger gradient positif ; mais le trajet horizontal entre les deux miroirs ne doit pas subir ce gradient. Nous plaçons donc ces miroirs dans une cuve étudiée pour les entou-

rer d'une atmosphère aussi homogène que possible. Cette cuve présente une double paroi ; l'eau remplit l'espace entre les tôles de cette double paroi, et subit la circulation lente assurée par une hélice contenue dans un tube de

grand diamètre qui part du fond concave pour aboutir par un sifflet à la partie supérieure. L'eau du fond se mélange au niveau du sifflet avec l'eau d'en haut, et redescend en tournant autour de la cuve.

SECONDE PARTIE

RÉFLEXIONS SUR LES BARILLETS DES GRANDS MIROIRS :

Malgré leur grande épaisseur, les miroirs d'astronomie se déforment sous leur poids, s'ils ne sont pas convenablement saisis et soutenus, à tel point qu'ils ne donnent pratiquement plus d'image.

Leur barillet doit être étudié :

1° pour qu'il maintienne le miroir dans une position bien définie ;

2° pour qu'il le soutienne afin de minimiser suffisamment les déformations du verre sous son propre poids ;

3° pour que ses déformations diverses (élastiques sous efforts, dilatations thermiques, etc...) qui sont toujours absolument énormes optiquement parlant, ne se transmettent pas au miroir.

Nous satisfaisons à la première et à la troisième de ces conditions de la manière la plus simple et la plus classique en saisissant le miroir par trois paires de points à 120° : trois points sur le dos au bord du disque, et trois points exactement en regard des premiers sur la tranche. Nous regrettons que cette manière simple et sûre soit remplacée parfois dans la construction actuelle de plusieurs télescopes par des systèmes compliqués et, à notre avis, dangereux.

Le dos des miroirs d'astronomie est toujours supporté en plusieurs points. d'autant plus nombreux que le miroir est plus grand. A partir d'une certaine dimension, soit environ 2,50 m de diamètre, ces miroirs doivent être aussi maintenus sur leur tranche, outre les

trois patins habituels par d'autres organes plus ou moins nombreux.

Foucault avait utilisé un coussin dorsal qu'il gonflait plus ou moins suivant l'inclinaison du miroir. Il a plus tard employé un système de leviers et de contre-poids organisé de manière que la force d'appui sur le miroir soit toujours exactement opposée en grandeur et direction à la composante parallèle à l'axe optique du poids du miroir ; et depuis plus d'un siècle ce dernier procédé possède la faveur des constructeurs (Fig. 20).

Mais certains, pensant peut-être ver, sont revenus aux coussins d'air avec des systèmes plus ou moins compliqués.

Nous-mêmes, à la Sté R.E.O.S.C., préférons toujours les « balances ».

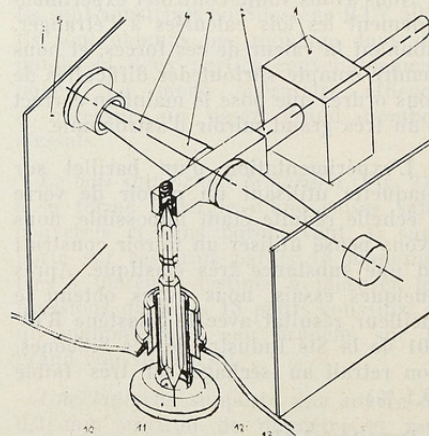


FIG. 20

Les forces surnuméraires latérales peuvent être aussi exercées soit par des balances, soit par des coussins pneumatiques. Ici, la question est plus complexe. On peut exercer sur la tranche du miroir uniquement des forces d'appui, ou bien ce qui paraît plus logique, des forces d'appui sur la partie inférieure du disque, et des forces de traction sur la partie supérieure. Mais, comme nous le verrons, les forces latérales doivent être très exactement alignées sur une droite passant par le centre de gravité du disque. Nous avons imaginé un système qui permet automatiquement cette dernière condition s'il ne s'agit que de force de poussée. Les forces tirantes obligent évidemment la fixation par collage de pièces métalliques sur le miroir. L'extraction du miroir de son barillet devient plus compliquée et plus longue. Le barillet ne peut plus envelopper le miroir, et se trouve être en forme de plateau : son poids s'élève et sa rigidité diminue quand même. Enfin, les éléments métalliques collés sur la tranche augmentent dangereusement la fragilité du disque de silice ou de verre cérame, fragilité d'autant plus grande que le miroir est plus lourd.

De sorte que nous choisissons le système d'appui latéral à coussins pneumatiques.

Nous avons voulu contrôler expérimentalement les lois calculées à l'étranger, donnant la valeur de ces forces, et nous rendre compte surtout des difficultés de tous ordres que pose le maintien correct d'un très grand miroir d'astronomie.

L'expérimentation d'un barillet sur maquette utilisant un miroir de verre à échelle réduite étant impossible, nous avons pensé utiliser un miroir construit en une substance très élastique. Après quelques essais, nous avons obtenu le meilleur résultat avec le Silastène RTV 601 de la Sté Industrielle des Silicones. Son retrait au séchage est très faible (0,1 %).

Densité : 1,31.

Dureté shore : 42.

Coefficient de poisson : très voisin de 0,5.

Nous avons adopté un *diamètre de 20 cm*, une épaisseur de 3 cm et un rayon de courbure de 120 cm. La flexibilité de ce miroir est $R^4/E^2 = 1111 \text{ cm}^2$. A cette échelle, les miroirs présentent des déformations considérables sous leur propre poids.

Nous avons constitué *le moule* en cinq morceaux :

1) une balle, ou disque convexe en marbre blanc que nous dissolvons dans l'acide chlorhydrique étendu pour dégager le moulage,

2) un entourage cylindrique se démontant en trois parties, construit en AG 5.

3) un couvercle en marbre donnant à la partie arrière du miroir en plastique sa forme plane et que nous éliminons par dissolution. Ce couvercle présente un trou central.

Le premier barillet d'essai est du type à coussin d'air dorsal (Fig. 21).

Le barillet, construit en bois contre-plaqué, présente un fond de 25 cm de diamètre et un bord de 21 cm de diamètre intérieur, et 4 cm de hauteur. Il est tenu par un arbre en acier suivant son axe de symétrie, sur un second axe qui, lui, est horizontal. Le miroir peut ainsi prendre toutes les positions que peut présenter un miroir de télescope en service.

Le barillet est muni de trois touches fixes en laiton, dites dorsales, et destinées à supporter le miroir par trois points de l'extrême bord de son dos. Ces touches sont percées d'un trou central, que le miroir obstrue lorsqu'il s'appuie dessus. Exactement, en regard de ces touches, trois autres touches dites latérales, de $2 \times 2 \text{ cm}$ de surface, épousent la forme cylindrique du miroir et le maintiennent latéralement.

Les touches dorsales sont réglées de manière que, lorsque le barillet est placé axe horizontal, le miroir soit en

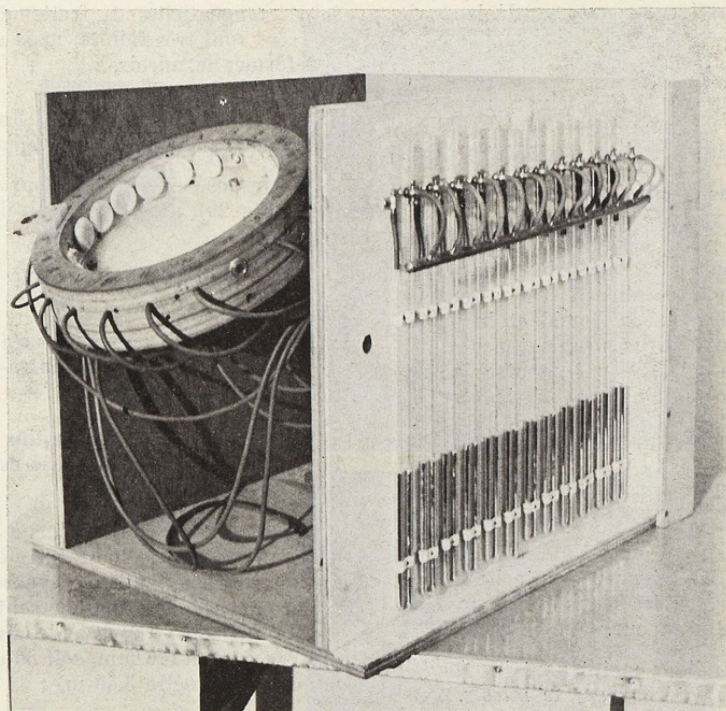


FIG. 21

équilibre instable sur les touches latérales.

Un coussin d'air recouvre le fond du barillet. Son diamètre est exactement celui du miroir. Les trois touches dorsales le traversent librement. Ce coussin est construit en polyéthylène mince thermosoudé. Une canalisation d'air comprimé aboutit, d'une part au coussin et, d'autre part, en parallèle, aux trois touches dorsales. Lorsqu'on souffle avec un débit très faible dans cette canalisation, le coussin se gonfle jusqu'à ce que le miroir dégage les touches en se soulevant. Les fuites sont réglées de manière qu'il suffise que le miroir se soulève de quelques centièmes de mm pour que le gonflage du coussin n'augmente plus.

Dix-huit coussins latéraux sont uniformément répartis autour du miroir, le

centre de leur surface étant exactement placé à la même distance du fond du barillet que les trois touches latérales. Ils sont construits en Silastène RTV 501. Ils sont obtenus par moulage dans un moule en deux parties convenablement polies. Le mode opératoire efficace a nécessité un assez grand nombre d'essais.

Le bâti supportant le barillet (Fig. 21) a la forme générale d'une caisse sans couvercle et sans paroi avant. Il supporte sur ses trois parois 18 manomètres à mercure destinés à mesurer les pressions dans les 18 petits coussins, et un manomètre à eau branché sur le grand coussin dorsal.

Une lanterne supporte une source de 0,3 mm environ de diamètre et une platine apte à recevoir soit un écran, soit un châssis photographique.

Cette lanterne peut se déplacer le long d'un tube d'acier fixé sur le bord du barillet.

Les Fig. 22 à 25 incluse, montrent la qualité optique réalisée pour le miroir n° 10 et illustrent sa flexibilité.

Pour ces essais, l'axe optique du miroir était vertical. La Fig. 22 a été obtenue avec le coussin dorsal gonflé, la lanterne au centre de courbure du miroir. L'image est excellente. On a ensuite dégonflé le coussin dorsal et le miroir repose alors sur ses trois touches. On obtient la Fig. 23 qui montre la très forte déformation à symétrie ternaire du miroir.

Les curieuses Fig. 24 et 25 sont obtenues lorsque la lanterne est 19 cm au-dessous du centre, et ensuite à 8,5 cm au-dessus.

Toutes les Figures des taches lumineuses présentées dans ce texte sont à l'échelle grandeur.

Nous étudions maintenant la *réaction des patins latéraux sur le miroir*.

Les trois patins fixes latéraux qui ont servi aux premiers essais s'appuyaient au moyen d'une crapaudine sur une tige rigide et maintenue rigidement par le barillet.

Les vues suivantes montrent la nécessité d'éviter, non seulement la composante axiale de la force de frottement dont l'effet était dès l'abord redouté, mais aussi la composante tangentielle perpendiculaire à l'axe et au rayon d'appui.

Dans tous ces essais, nous avons au préalable soigneusement placé le miroir bien en équilibre sur les patins posés à 120° l'un de l'autre, et réglé son axe bien horizontalement.

Les deux figures 26 et 27 montrent les taches intra-centrales lorsque l'on fait exercer sur le miroir des efforts tangentiels en rapprochant (Fig. 26) ou éloignant (Fig. 27) les patins latéraux du centre du miroir, ce qui les rapproche ou les éloigne l'un de l'autre. Les

PROCEDE NOUVEAU DE SURFAÇAGE

forces tangentielles de frottement ainsi exercées sont très faibles, mais suffisent à déformer le miroir.

Dans les vues suivantes, les patins n'exercent aucune force tangentielle :

Miroir posé en équilibre sur un seul patin (Fig. 29), pose extra-centrale focale horizontale.

Miroir posé en équilibre sur un seul verticale ;

Miroir posé sur deux patins à 120° l'un de l'autre (Fig. 30), pose intra-centrale focale verticale ;

Miroir posé sur deux patins à 120° l'un de l'autre (Fig. 31), pose extra-centrale focale horizontale ;

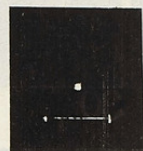
Miroir posé sur deux patins à 85° l'un de l'autre (Fig. 32), pose intra-centrale, tache sans astigmatisme apparent. On remarquera la déformation centrale du miroir due à la trop grande dimension du trou central (46 mm, soit 80 cm pour le miroir, diamètre 3,50 m) ;

Miroir posé sur deux patins à 85° l'un de l'autre (Fig. 33), tache au centre ayant une certaine surface, mais ne présentant pas d'astigmatisme.

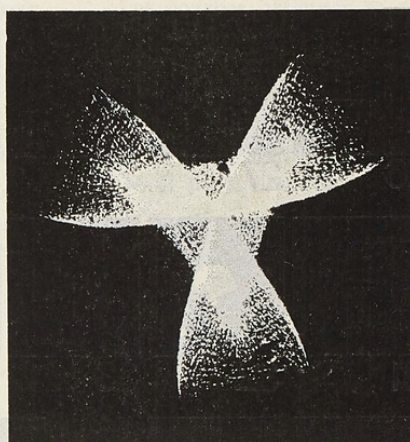
On remarquera que l'astigmatisme de flexion s'inverse lorsque l'on écarte progressivement les patins. Cet astigmatisme s'annule pour un angle de 85° entre les patins, mais la déformation complexe du miroir donne une image assez floue.

Passons maintenant à la *détermination expérimentale de la loi de gonflage des coussins latéraux*.

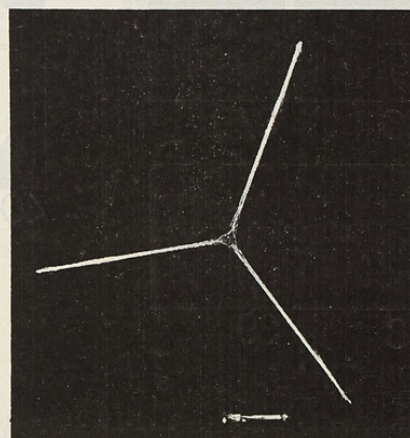
On procède au gonflage des coussins latéraux, en ajustant les pressions jusqu'à ce que la tache lumineuse extra-centrale donnée par le miroir soit bien ronde. On note ces pressions. On répète cette opération de gonflage en tournant successivement l'ensemble barillet-miroir autour de l'axe optique, faisant ainsi un certain nombre de poses réparties sur 360°. La moyenne des mesures



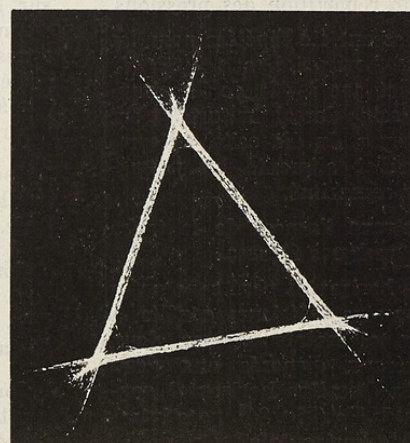
22



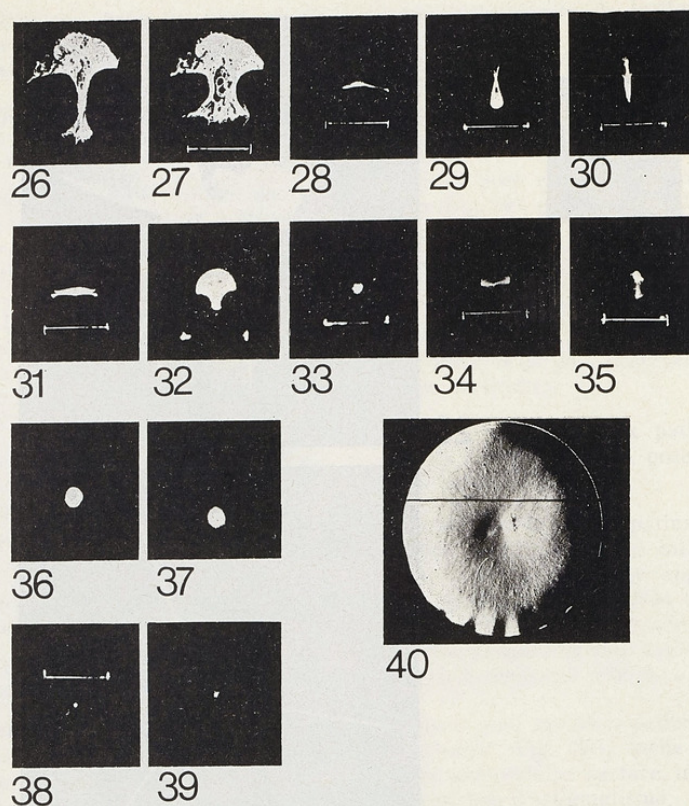
23



24



25



opérées donnera finalement la courbe recherchée de répartition des pressions.

Ces mesures ont été répétées pour les positions axe horizontal, axe à 10° de l'horizontale et axe à 40° de l'horizontale, le coussin dorsal naturellement gonflé au moyen du dispositif automatique du barillet alimenté en permanence en air comprimé.

Nous illustrons l'aspect de la tache obtenue par quelques figures.

Miroir axe horizontal posé sans patin sur les 5 coussins inférieurs gonflés à 7 cm de Hg, et maintenus par deux coussins latéraux disposés aux deux extrémités du diamètre horizontal gonflés à 27 mm de Hg (Fig. 34), pose intracentrale, focale horizontale ;

Miroir axe horizontal posé sans patin sur les 5 coussins inférieurs gonflés à 7 cm de Hg, et maintenus par deux coussins latéraux disposés aux deux extrémités du diamètre horizontal gonflés à 27 mm de Hg (Fig. 35), pose extra-centrale, focale verticale ;

Coussins correctement gonflés, miroir axe horizontal (Fig. 36), pose extra-centrale, exemple de tache ;

Coussins correctement gonflés, miroir axe incliné à 40° de l'horizontale (Fig. 37), pose extra-centrale, exemple de tache ;

Coussins correctement gonflés, miroir axe horizontal (Fig. 38), pose au centre de courbure, exemple de tache ;

Coussins correctement gonflés, miroir axe horizontal (Fig. 39), pose au centre de courbure, exemple de tache.

Nous reproduisons aussi un Foucault-gramme (Fig. 40) obtenu axe horizontal, les coussins latéraux convenablement gonflés.

On remarque que le miroir est fortement asphérique, mais c'est l'absence de déformation astigmatique qu'il faut noter.

Les courbes représentées (Fig. 41) résument tous les résultats. En ordonnée

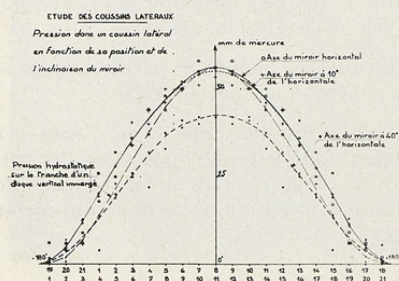


FIG. 41

nous avons porté la pression dans les coussins en mm de mercure. En abscisse nous avons porté l'angle φ que fait l'axe du coussin avec la ligne de plus grande pente descendante du miroir (Fig. 42).

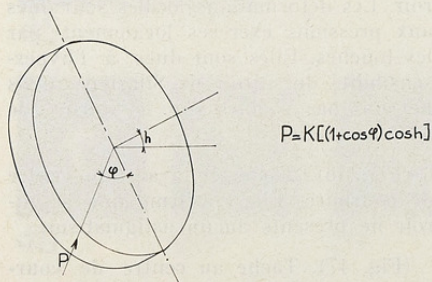


FIG. 42

Les courbes obtenues se rapprochent de la formule :

$$P = K [(1 + \cos \varphi) \cos h]$$

qui donne les pressions exercées sur la tranche d'un disque plongé en équilibre hydrostatique dans un liquide ; K étant un facteur de proportionnalité.

La petite différence constatée provient sans doute du fait que nos mesures ont porté sur un miroir concave très creux, ouverture angulaire F/3.

Quant à la relation en $\cos h$, elle est bien confirmée : nous avons, en effet, trouvé les rapports :

$$\frac{\text{max. de la courbe } h = 10^\circ}{\text{max. de la courbe } h = 0^\circ} = 0,985$$

qui est bien égal à $\cos 10^\circ$ et :

$$\frac{\text{max. de la courbe } h = 40^\circ}{\text{max. de la courbe } h = 0^\circ} = 0,766$$

qui est bien égal à $\cos 40^\circ$.

Tous les essais nous ont convaincus de la nécessité absolue d'empêcher les coussins latéraux d'exercer la moindre force qui ne serait pas exactement normale à l'axe optique ; l'axe de poussée doit passer exactement par le centre de gravité du miroir.

En fait, l'exactitude de l'orientation des forces latérales a bien plus d'importance que la grandeur de ces forces.

Enfin, le réglage de la pression du coussin dorsal doit être opéré avec une précision extrême. Le système simple de réglage automatique de cette pression, que nous avons imaginé, s'est, à l'usage, révélé à lui seul insuffisant, et nous avons dû, pour chaque inclinaison du miroir, régler l'admission de l'air comprimé de manière que la poussée de la lame d'air fuyant entre le dos du miroir et les trois touches fixes compense exactement le manque de poussée donnée à ces endroits par le coussin dorsal ; ce manque local de poussée du coussin étant dû aux échancrures destinées au passage des touches fixes.

La surface utile des coussins doit être définie de façon parfaite, ce qui est très difficile.

Nous avons construit un *deuxième barillet expérimental* pour lequel l'expérience acquise lors de la première partie de cette étude nous a incités à adopter les dispositifs suivants :

Nous avons construit le *support dorsal* avec 30 dispositifs astatiques mécaniques à levier et contrepoids du type A. Couder.

Les leviers sont conformes, aux dimensions près, à ceux que nous construisons couramment pour supporter nos miroirs de précision astronomique. Ils sont munis de roulements à rotule sur billes, et comportent tous les réglages nécessaires.

Le miroir est en équilibre instable sur les coussins latéraux, puisque les tiges de support des coussins (que l'on a intérêt à faire aussi longues que possible pour que leur angle d'inclinaison reste faible) sont appuyées par leur extrémité extérieure sur le barillet, et guidées avec une certaine souplesse par le barillet au voisinage de leur fixation par rotule sur billes aux coussins, les déformations du barillet ne devant pas déformer le miroir.

Nous constituons la surface du barillet d'appui des tiges (Fig. 43) par une sphère dont le centre coïncide avec le centre de gravité du miroir ; la surface terminale des tiges est sphérique et le centre de la sphère coïncide avec le centre de la fixation semi-souple sur le barillet. La force d'appui sur le miroir passant par le centre des 2 sphères est

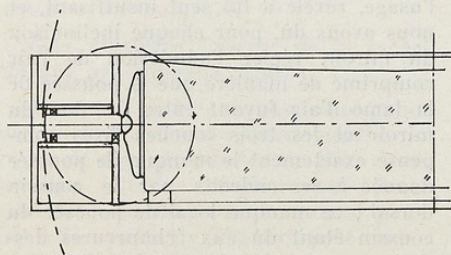


FIG. 43

toujours dirigée sur le centre de gravité de ce miroir avec une précision très grande. Le déplacement du centre de la sphère dû aux déformations du miroir est très faible.

Ce deuxième barillet expérimental a été pourvu d'un système automatique de réglage des pressions pneumatiques dans les coussins, suivant la loi que nous venons de définir.

Nous arrivons à ce résultat par un procédé uniquement mécanique comprenant une came à trois dimensions et agissant sur 18 détenteurs spéciaux. Le système est assez complexe. Chaque détenteur agit sur le coussin correspondant. L'axe de l'ensemble doit être parallèle à l'axe du télescope.

La Fig. 44 montre le barillet retourné à l'envers et vu par l'arrière.

Nous présentons une série d'épreuves photographiques obtenues avec le miroir N° 8 percé d'un trou central de 45 mm, soit 80 mm à l'échelle du miroir E.S.O.

A. — Essais axe optique vertical montrant l'influence des leviers astatiques dorsaux.

Première série d'épreuves obtenues avec un réglage des leviers ne donnant au miroir aucune déformation d'ensemble.

Foucaultgramme (Fig. 45) montrant l'aberration sphérique naturelle du miroir. Les déformations locales sont dues aux pressions exercées localement par les touches. Elles sont dues à l'hypermensibilité du miroir de Silastène, mais ne sont pas visibles sur le miroir de 3,65 m en silice.

(Fig. 46). Tache en avant du centre de courbure. Elle confirme que le miroir ne présente aucun astigmatisme.

(Fig. 47). Tache au centre de courbure. Remarquablement ponctuelle pour un miroir en caoutchouc.

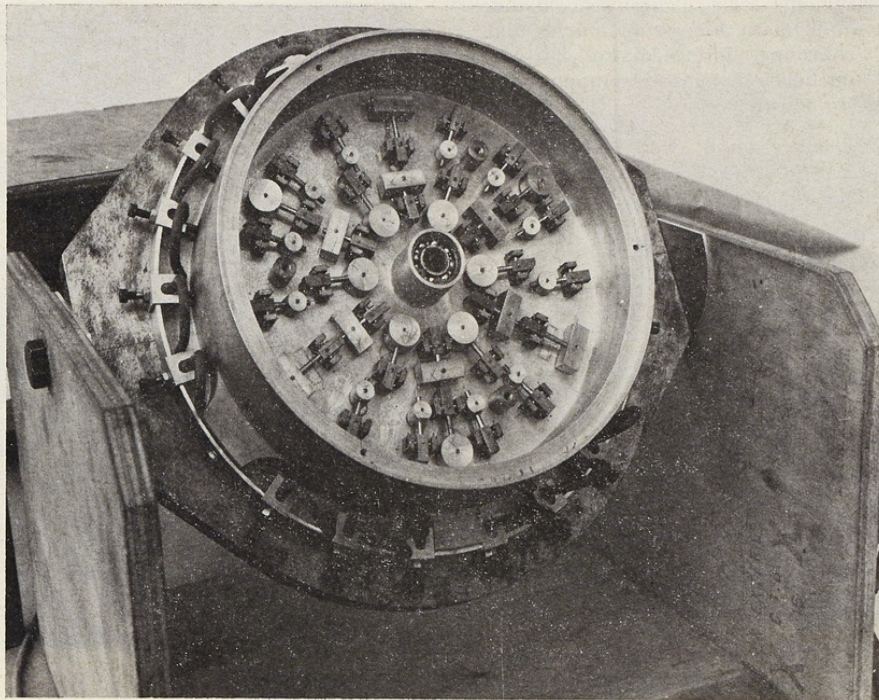
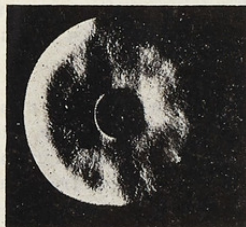


FIG. 44



45



46



47



48



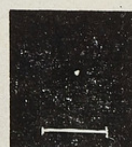
49



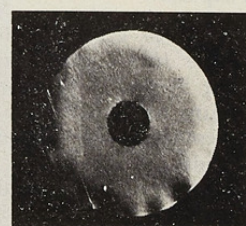
50



51



52



53

Deuxième série d'épreuves, obtenues en supprimant *une seule touche* (dans la couronne intermédiaire) sur les 33 touches qui, au total, supportent le dos du miroir.

Foucaultgramme (Fig. 48) montrant une considérable déformation de l'ensemble du miroir.

(Fig. 49). Tache en avant du centre, complètement déformée.

(Fig. 50). Tache au centre de courbure. De dimensions très importantes.

Cette série démontre encore une fois la grande sensibilité de la méthode.

B. — *Essais du barillet axe optique incliné de 20° par rapport à l'horizontale.*

Le système automatique de réglage des coussins pneumatiques fonctionne :

— Patin n° 21 en haut (les patins latéraux sont numérotés dans l'ordre de 1 à 21).

(Fig. 51). Tache en avant du centre.

(Fig. 52). Tache au centre de courbure.

(Fig. 53). *Foucaultgramme*.

Les résultats sont les mêmes lorsqu'on recommence les opérations après avoir tourné le miroir et le barillet sur leur axe.

Nous avons réalisé *le barillet du miroir concave E.S.O. de 3,65 m de diamètre* sur les principes que nous venons d'exposer.

Le corps est constitué par un ensemble de tôle d'acier soudée électriquement. Il pèse 8 tonnes. La photo 54 le montre en construction ; le tore enveloppant le miroir n'a pas encore sa paroi cylindrique extérieure ; on aperçoit les fortes nervures du fond.

La photo 55 montre l'intérieur du barillet, un des 3 patins fixes latéraux à

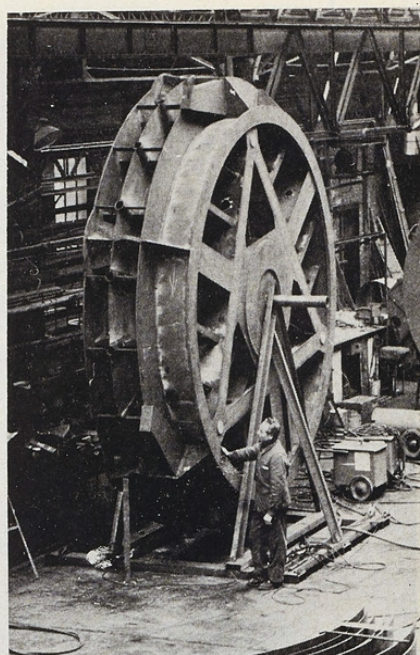


FIG. 54

compensation des dilatations thermiques et 3 coussins pneumatiques ; un patin fixe dorsal et 6 patins des balances.

La Fig. 56 montre une des 30 « balances » *exceptionnellement rigides*, de manière à ne pas fléchir sensiblement lors des secousses sismiques si fréquentes sur le site des Cordillères des Andes Chiliennes de l'E.S.O. Il est, en effet, très important que les forces exercées sur le miroir par les balances restent synchrones avec la pesanteur, sinon le disque se soulevant pourrait se briser en retombant sur ses touches fixes. Cette considération est d'ailleurs un argument supplémentaire en faveur des balances, la pression pneumatique des grands coussins dorsaux étant plus difficile à maintenir synchrone avec les variations si rapides de la pesanteur lors des secousses sismiques.

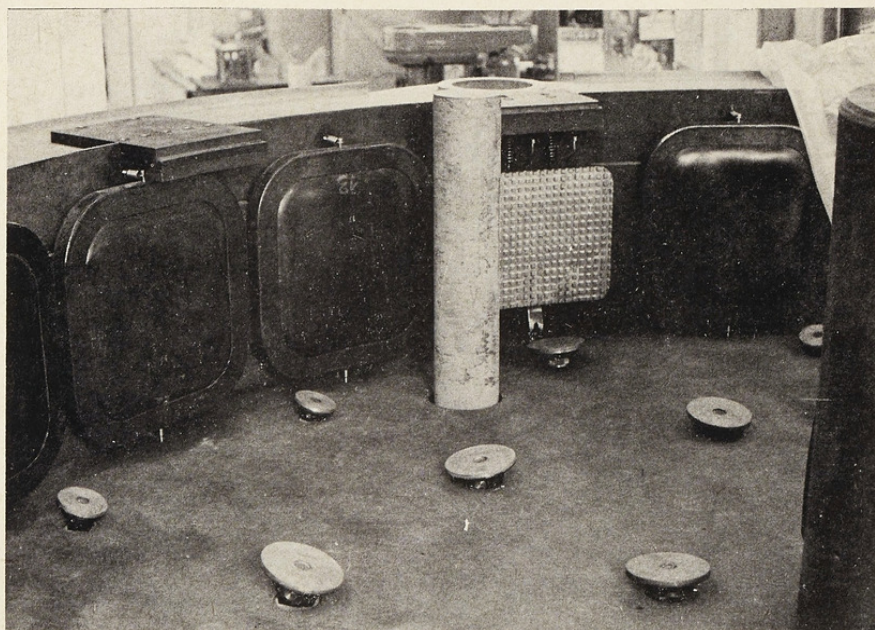


FIG. 55

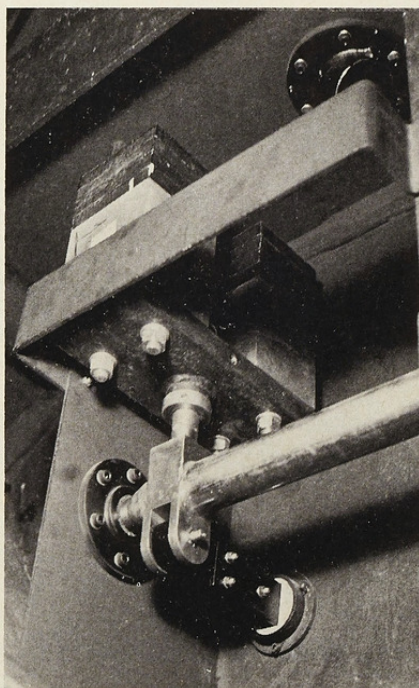
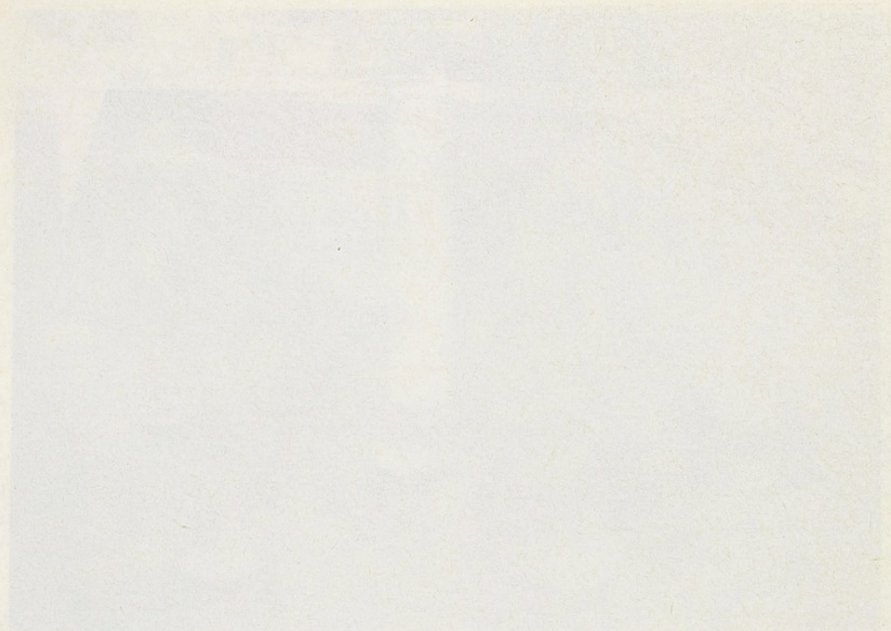


FIG. 56



Le Président de la Société, Directeur de la publication : H. NORMANT, D.P. n° 1080

I.T.Q.A.-CAHORS. — 40171. — Dépôt légal : III-1974

