

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
VOLUME TÉLÉCHARGÉ	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
	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	1970, n° 2
Adresse	Paris : Société d'encouragement pour l'industrie nationale, 1970

Collation	1 vol. (79 p.) : ill. ; 27 cm
Nombre de vues	84
Cote	INDNAT (91)
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.91

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
1970 - N° 2

• •

N° 2. - 1970

SOMMAIRE

TEXTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES.

— Les bactériophages,

par M. Pierre NICOLLE, p. 3

— Les propriétés et les applications des Métaux du groupe IV (Zirconium, Titane, Hafnium),

par M. Pierre LEHR, p. 23

ACTIVITES DE LA SOCIETE D'ENCOURAGEMENT
POUR L'INDUSTRIE NATIONALE.

— Suite des Rapports sur les Prix et Médailles décernés du 25 octobre 1969.

— Médailles de vermeil p. 55

— Médailles d'argent p. 67

— Médailles de bronze p. 75

Publication sous la direction de M. Jacques TREFOUËL

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 : 35 F

le n° : 10,00 F

C.C.P. Paris, n° 618-48

TEXTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

Les bactériophages *

par PIERRE NICOLLE

Chef de service honoraire de l'Institut Pasteur

HISTORIQUE.

En 1915, il y a donc juste cinquante-quatre ans, le savant anglais Frederick William Twort (Fig. 1) a décrit pour la première fois un phénomène de dissolution des cultures bactériennes *in vitro*. Cette dissolution, en apparence spontanée, présentait la particularité très remarquable d'être transmissible indéfiniment de culture atteinte à cultures saines. On connaissait bien quelques cas de bactériolyse : si l'on abandonne, par exemple, des cultures en bouillon ou en eau peptonée de vibrions cholériques, de staphylocoque ou de bien d'autres bactéries, on observe qu'elles s'éclaircissent en plusieurs semaines jusqu'à redevenir aussi limpides qu'avant leur ensemencement. Mais ces bactériolyses très lentes ne ressemblent pas au phénomène rapide décrit par Twort et, d'autre part, elles ne sont pas transmissibles.

Twort ne tarda pas à prouver que l'agent de la dissolution de cette « lyse transmissible » était un ultravirus, c'est-à-dire un agent infectieux trop petit pour être vu au microscope optique et pour être retenu par les filtres. On ne parvenait pas non plus à le cultiver sur les milieux utilisés habituellement en microbiologie. Ce « virus filtrant » était donc comparable, par ses propriétés générales, aux ultravirus de nombreuses maladies de l'Homme, des Animaux et des Végétaux supérieurs, comme par exemple ceux de la variole, de la vaccine et de la mosaïque du Tabac.

Malheureusement pour lui, Twort, mobilisé, fut envoyé comme médecin à Salonique avec le Corps Expéditionnaire Britannique et il dut interrompre ses recherches. Lorsqu'après sa démobilisation, il retrouva son laboratoire à la « Brown Institution », sollicité par d'autres problèmes, il ne reprit jamais ses expériences sur la lyse transmissible.

Peu de temps après, en 1917, le Canadien Français Félix d'Hérelle (Fig. 2) qui travaillait à l'époque à l'Institut Pasteur, sans avoir eu connaissance du travail de Twort, a-t-il toujours affirmé, refit la même découverte. Mais il eut d'abord l'heureuse idée de donner un nom à l'agent du phénomène qu'il avait observé. Il l'appela le « microbe bactériophage », c'est-à-dire le microbe qui mange, qui détruit les bactéries, puis le « Bactériophage » tout court. Aujourd'hui, on a même retranché les quatre premières syllabes et on dit couramment : le « phage », ce qui, étymologiquement, ne signifie pas grand-chose.

* Conférence prononcée à la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale le 23 octobre 1969 à l'occasion de la XXXII^e Conférence Carrion.



FIG. 1. — *Frédéric William Twort*



FIG. 2. — *Félix d'Hérelle*

Ensuite, mieux servi par les circonstances et surtout plus persévérant que Twort, d'Hérelle réussit à faire connaître son bactériophage et à intéresser de nombreux bactériologistes, parmi lesquels des médecins.

Ce qui contribua surtout à éveiller l'attention du Corps Médical, c'est la conception qu'il développa, dès le début, sur le rôle que ce bactériophage pouvait jouer, d'après lui, dans la guérison « spontanée » de certaine maladie infectieuse et dans ce qu'il appela curieusement « l'extinction contagieuse » des épidémies ; au décours d'une épidémie de choléra, par exemple, le bactériophage apparaîtrait dans l'intestin d'un cholérique en voie de guérison. Il serait rejeté au-dehors dans les selles avec le germe pathogène, mais doué d'un pouvoir de diffusion beaucoup plus grand, il gagnerait celui-ci de vitesse dans l'entourage du malade, si bien que lorsque le vibron cholérique atteindrait ces personnes, elles seraient protégées contre l'infection.

Comme corollaire à cette action naturelle du bactériophage, d'Hérelle s'efforça de faire admettre son efficacité en thérapeutique des maladies bactériennes.

Par la suite, après une période de grande vogue en France et dans quelques pays étrangers de 1925 à 1935, l'utilisation thérapeutique des bactériophages fut reléguée au second plan, sans être toutefois abandonnée complètement. Aujourd'hui encore, malgré l'avènement des sulfamides et des antibiotiques, il est encore assez employé, et parfois avec de beaux succès. Mais on s'intéresse, de plus en plus, surtout depuis une trentaine d'années, aux nombreuses possibilités qu'il offre pour la recherche fondamentale en matière d'ultravirus. Le bactériophage est en effet un ultravirus ; il en a les propriétés générales ; mais c'est le plus facile à étudier, le plus économique, puisqu'il dispense à peu près complètement de l'expérimentation sur les animaux, et il se prête admirablement à de multiples recherches d'ordre quantitatif. Il est donc devenu, en quelque sorte, un véritable virus-pilote.

LA BACTERIOPHAGIE — PHENOMENE GENERAL.

En quelques années d'un travail acharné, d'Hérelle démontre que le phénomène de la lyse bactérienne transmissible est extrêmement général. De nombreuses espèces peuvent la subir, tant parmi celles qui appartiennent au groupe des bactéries gram-positives que parmi les gram-négatives, les aérobies comme les anaérobies, les sporulées comme les non-sporulées, les pathogènes comme les non-pathogènes.

Parmi les espèces bactériennes les plus sensibles à la bactériophagie, il faut citer au premier rang celles qui sont les hôtes normaux ou pathologiques de l'intestin de l'Homme et des Animaux, principalement les colibacilles, les *Proteus*, les bacilles pyocyaniques, les bacilles typhiques et paratyphiques, les bacilles dysentériques, les vibrions cholériques, les staphylocoques, etc.

On connaît aussi des bactériophages pour de nombreux autres germes pathogènes : bacille pesteux, *Brucella*, bacille tuberculeux, agents de la gangrène gazeuse. A cette liste de bactéries pathogènes, il faut ajouter des germes habituellement non pathogènes : bactéries de l'air, du sol, de l'eau.

La lyse transmissible s'étend même à des microbes qui ne sont pas des bactéries : les *Streptomyces*, les levures, les algues et même certains protozoaires.

D'autre part, on trouve des bactériophages partout dans la nature ; ils sont surtout abondants dans les milieux où se rencontre une intense pullulation bactérienne : dans l'intestin de l'Homme et des Animaux, dans leurs déjections, dans l'eau des égouts, dans les rivières, surtout en aval des agglomérations urbaines, bref partout où il y a contamination fécale.

On a même proposé d'apprécier le degré de pureté ou de pollution d'une eau destinée à la consommation par la recherche quantitative des bactériophages.

Une source importante de bactériophages doit être rapportée à l'existence très fréquente de bactéries « lysogènes », c'est-à-dire des bactéries qui véhiculent des bactériophages et les libèrent dans le milieu où elles se développent. Nous reviendrons plus loin sur l'importance de ces bactéries lysogènes.

NATURE DU BACTERIOPHAGE.

Twort et d'Hérelle, bientôt suivis par d'autres auteurs, se sont souciés de chercher quelle pouvait être la nature de ce principe lytique. Tous admettaient que c'était un virus filtrant, un ultravirus comme on dit bien à tort aujourd'hui (*). Mais ce n'était pas une réponse à la question.

Pour d'Hérelle, le bactériophage était tout simplement un microbe très petit dont l'activité s'exerçait sur des microbes beaucoup plus gros, les bactéries. C'était donc un parasite de celles-ci, comparable, à une échelle infiniment moindre, à l'hématozoaire du Paludisme, par exemple, qui pénètre dans un globule rouge, s'y multiplie à ses dépens et finit par le détruire. Une culture lysée était donc une suspension de très petits microbes que d'Hérelle appelait les « corpuscules bactériophages ». Il trouvait une preuve à l'état corpusculaire du bactériophage dans la discontinuité de la lyse aux dilutions limites en milieu liquide et sur milieu solide (Fig. 3 et 4).

Les corpuscules, il avait réussi à mesurer très approximativement leurs dimensions par l'ultrafiltration. D'autres auteurs, tout en contestant la conception parasitaire du bactériophage, utilisèrent avec succès, non seulement l'ultrafiltration sur membranes Gradocol beaucoup plus perfectionnées que celles que d'Hérelle avait préparées, mais aussi l'ultracentrifugation. Eugène Wollman proposa dans le même dessein des moyens indirects comme les courbes d'inactivation par les agents physiques : chaleur, lumière, rayons X, car il s'était aperçu que les bactériophages étaient d'autant plus sensibles à la chaleur qu'ils étaient de dimensions plus exiguës. Pour les rayons X, c'était l'inverse : les plus gros présentaient la sensibilité la plus grande ; un gros bactériophage est, en effet, une cible beaucoup plus facile à atteindre par un rayon qu'un petit, il est donc inactivé plus rapidement.

Toutes ces recherches avaient conduit à deux constatations très importantes : les dimensions des corpuscules d'un même bactériophage sont constantes, tandis qu'elles varient dans des proportions importantes suivant les bactériophages considérés. On a pu ainsi établir que le diamètre des plus petits mesurait de 8 à 12 μ et celui des plus gros près de 100 μ (**).

Ces constatations, en apparence favorables aux vues de d'Hérelle, ne désarmèrent pas les adversaires de la théorie parasitaire. Pour les uns, l'agent de la lyse transmissible était une substance chimique, douée de propriétés dissolvantes, élaborée par les bactéries, une enzyme. Ce que d'Hérelle prenait pour des corpuscules, ce devaient être des macromolécules ou des amas de macromolécules capables de se reproduire autocatalytiquement. Pour d'autres, la bactérie subissait, sous certaines influences extérieures, une viciation nutritive héréditaire qui aurait pour résultat de

* Charles Nicolle a fait remarquer que le terme d'ultravirus signifie au-delà des virus dans l'échelle de leurs dimensions, c'est-à-dire plus gros que les virus, ce qui est évidemment exactement le contraire de ce que l'on veut dire. Il a proposé de nommer cette catégorie d'agents pathogènes « inframicrobes », c'est-à-dire plus petits que les microbes, virus et microbes étant dans l'un et l'autre cas synonymes de bactéries. On notera avec intérêt que le terme d'inframicrobes a été repris par un élève de Constantin Levaditi, S. Nicolau, qui a fondé à Bucarest l'Institut d'Inframicrobiologie en l'honneur de l'inventeur du mot inframicrobe.

** Le millimicron ($\mu\mu$) est le millième de millième de millimètre.

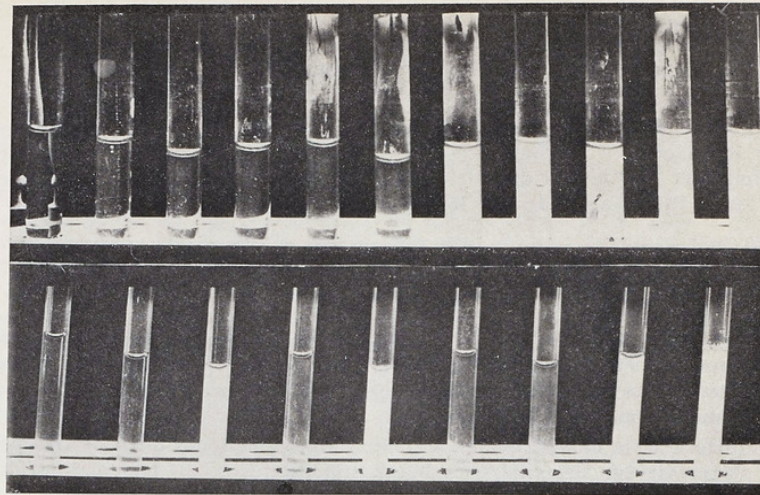


FIG. 3. — 1) *Discontinuité de la lyse en milieu liquide*, preuve pour d'Hérelle, de la nature corpusculaire du bactériophage.

Rangée supérieure : une série décimale de dilutions d'un bactériophage est ensemencée avec la même quantité d'une culture bactérienne sensible. Vingt-quatre heures après, on observe que les six premiers tubes sont lysés et qu'à partir du 7^e, la culture est aussi dense que dans un tube témoin. C'est le phénomène du tout ou rien.

Rangée inférieure : on prépare une dilution du bactériophage correspondant à celle du dernier tube lysé (le 6^e à partir de la gauche dans la rangée supérieure). On répartit les 10 cm³ de cette dilution limite en 9 petits tubes. Chacun de ceux-ci est ensemencé avec la même quantité de culture sensible. Vingt-quatre heures après, on constate que certains tubes sont lysés et d'autres ne le sont pas. Ceci signifie qu'à la dilution limite, certains tubes ont reçu un ou plusieurs corpuscules, tandis que d'autres n'en ont pas reçu.

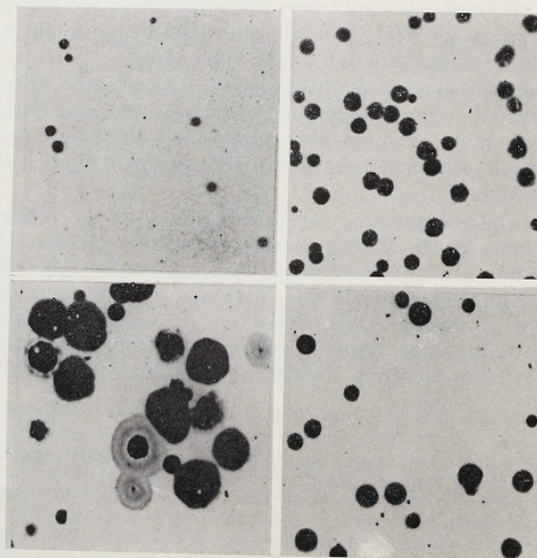


FIG. 4. — 2) *Discontinuité en milieu solide* (phages)

Quatre types de phages bactériologiques :

— En haut et de gauche à droite : Phage Vi I, phage Vi II.

— En bas : Phage Vi III (morphologie très variée) et phage Vi IV.

la faire disparaître tout en en perpétuant l'effet sur plusieurs générations de bactéries, avant que la culture entière ne fût détruite ; c'était en quelque sorte un suicide collectif et contagieux.

Eugène Wollman imagina que le bactériophage devait être analogue à un gène, c'est-à-dire au support matériel des caractères héréditaires des êtres vivants. Cette conception s'est révélée par la suite étrangement prophétique ; non seulement pour les bactériophages, mais pour tous les ultravirus pathogènes pour l'Homme, les Animaux et les Végétaux supérieurs. Mais comme il arrive souvent en pareil cas, elle n'a été prise en considération que beaucoup plus tard.

RECHERCHES MODERNES SUR LE BACTERIOPHAGE.

Avec les procédés d'analyse remarquablement perfectionnés dont nous disposons aujourd'hui, en particulier, le microscope électronique, les isotopes radioactifs, la chromatographie, l'électrophorèse, l'immunochimie, l'immunofluorescence, etc., de très grands progrès ont été obtenus dans la connaissance de la morphologie, de la structure interne, de la composition chimique et de la localisation des diverses fonctions des corpuscules bactériophages.

Qu'on veuille bien me permettre d'ouvrir ici une parenthèse. André Lwoff a proposé de désigner les particules virales des ultravirus du nom de « Virions ». Les bactériophages sont donc également des virions. Mais ce sont des virions très particuliers. Nous verrons que beaucoup d'entre eux présentent au microscope électronique, une morphologie caractéristique qui n'a été retrouvée pour aucun virion des autres ultravirus. D'autre part, comme l'action la plus spectaculaire des bactériophages consiste en la lyse des bactéries, nous avons proposé d'appeler ces virions bactériophages des « lysions ».

ANATOMIE ET STRUCTURE DES LYSIONS.

L'étude de la morphologie au microscope électronique des sept bactériophages du système T (système Type), tous actifs sur la même souche bactérienne, *Escherichia coli* B, ce qui éliminait toute possibilité de différence entre eux provenant de la bactérie propagatrice, a permis de reconnaître des morphologies variées (Fig. 5, 6, 7 et 8). Les phages de la série paire (T2, T4 et T6) possèdent une « tête », une « queue » et une plaque terminale. La tête est un prisme hexagonal (*), coiffé à chacune de ses extrémités de deux pyramides à six faces. Entre la tête et la partie proximale de la queue, on a décrit un « col » muni d'une « collerette ». La queue, dont la longueur est égale à trois fois environ celle de la tête, est formée d'une « cheville axiale » parcourue par un fin canal par lequel, au moment de l'infection, l'acide désoxyribonucléique, qui est l'élément actif de ces phages, passera dans le cytoplasme de la bactérie. Cette cheville est entourée d'une « gaine contractile » dont la nature chimique est analogue à celle de la myosine ou de l'actine des êtres supérieurs animaux ou végétaux.

* La tête des phages pairs a longtemps été considérée comme un prisme hexagonal bi-pyramidal comme nous venons de le dire. On admet cependant aujourd'hui qu'elle est plutôt un icosaèdre (forme de symétrie présentant 20 faces triangulaires) ayant subi une elongation dans sa région équatoriale. Bien que la présence de capsomère (éléments juxtaposés en mosaïque formant la capsid ou enveloppe de protéine des virus), ait été démontrée sur les formes monstrueuses produites par certains mutants létaux conditionnels, on n'a pas réussi à mettre de tels éléments en évidence sur les micrographies électroniques des phages normaux de la série paire du système T.

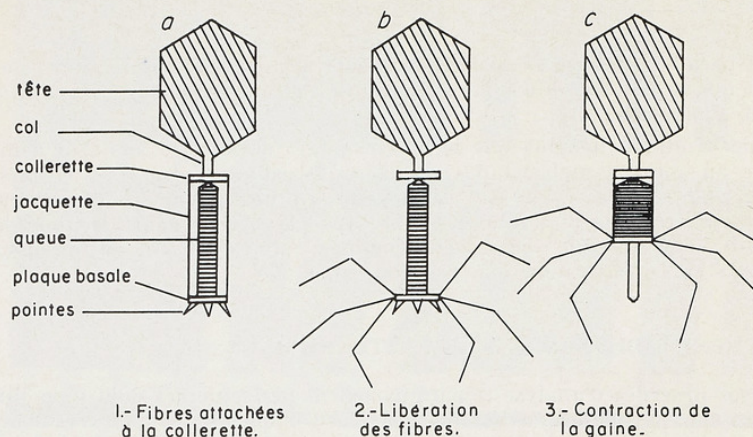


FIG. 5. — Structure d'un lysion du phage T 4.
 a) les différentes parties du lysion ;
 b) les fibres de la plaque basale sont libérés de leur attache sur la collerette lorsque le milieu contient du L. Tryptophome ;
 c) sous certaines influences naturelles, lors de l'infection, ou artificielles, la gaine entourant la cheville axiale se contracte vers la tête, entraînant avec elle la plaque basale et les fibres.

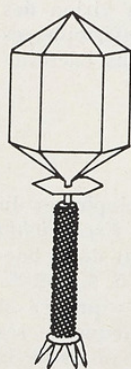


FIG. 6. — Exemple de lysion à tête prismatique bi-pyramidale, à collerette et à plaque basale. Cette morphologie est celle des phages pairs du système T de Demerec et Fano.

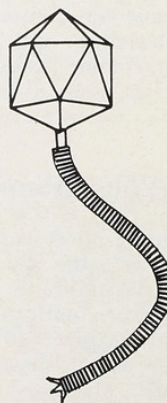


FIG. 7. — Exemple d'un lysion à tête icosaédrique, à queue longue dépourvue de plaque basale apparente.

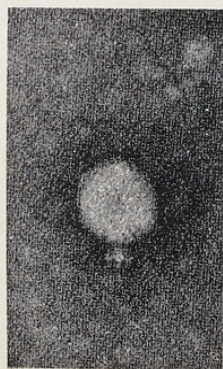


FIG. 8. — Lysion à queue courte et à plaque basale d'un phage « convertisseur » des antigènes somatiques des *Salmonella*. (J.-F. Vieu).

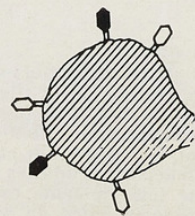


FIG. 10. — Lyse d'un staphylocoque, observée au microscopie électronique. Deux lysions sont intactes (têtes noires). Les trois autres se sont déjà vidés de leur A.D.N. (têtes claires).

A l'extrémité distale de la queue, se trouve une « plaque terminale » formant une sorte de plateau hexagonal, à laquelle sont attachés deux sortes de prolongements : des « pointes » courtes et épaisses et de « fibres » longues et fines. A l'état de repos, ces fibres sont tendues tout le long de la gaine entre la plaque terminale où se trouve leur attache fixe et la collerette, de laquelle elles peuvent se séparer au moment opportun.

Les phages T3 et T7 sont beaucoup plus petits. Leur tête n'est pas hexagonale mais octogonale. Leur queue est très courte (une demi-fois la longueur de la tête), et apparemment dépourvue de plaque terminale.

Il existe encore d'autres variétés morphologiques des lysions : le phage $\varphi \times 174$, qui est l'un des plus petits connus, a une tête icosaédrique. Il semble dépourvu de queue. Cependant, à chaque sommet de l'icosaèdre, on observe de petites expansions qui pourraient jouer dans la fixation le même rôle que la queue des phages caudés.

Les phages à acide ribonucléique (phages à ARN) sont également icosaédriques. Ils n'ont pas de queue, mais à l'un de leurs sommets, se trouverait un « pore » par lequel l'ARN émigrerait de la tête du lysion vers le cytoplasme de la bactérie.

Enfin, on a décrit des « éléments filamenteux » qui semblent, par les circonstances de leur reproduction et l'absence de propriétés lytiques et létales, assez différents des bactériophages.

COMPOSITION CHIMIQUE DES LYSIONS DE LA SERIE PAIRE DU SYSTEME T.

Le lysion est formé de deux parties chimiquement bien distinctes : la capside protéinique ou enveloppe de la tête et son prolongement caudal d'une part et le « nucléoïde » qui emplit cette capside et qui est constitué par une longue molécule d'ADN. Cette molécule est enroulée plusieurs fois sur elle-même. Sortie du lysion et déroulée par un procédé artificiel, elle a été mesurée au microscope électronique. Sa longueur est de 35 à 40 μ ; elle est donc considérable. Le nucléoïde détient les propriétés infectieuses et héréditaires du lysion. C'est son « génome ».

L'INFECTION BACTERIOPHAGIQUE PAR LE PHAGE T2 (Fig. 5).

En l'absence du L-tryptophane, les fibres forment, comme nous l'avons vu, autour de la queue du lysion, une sorte de cage à six barreaux, la « jaquette ». Lorsque le milieu contient du L-tryptophane ou des substances analogues, les fibres sont libérées de leurs attaches sur la collerette. Elles jouent alors un rôle essentiel dans la fixation du lysion sur les récepteurs spécifiques disséminés à la surface de la paroi de la bactérie. Cette fixation est le premier acte de la bactériophagie (d'Hérelle). Elle est nécessaire, car sans fixation préalable, le lysion ne peut agir ; mais elle n'est pas suffisante : un lysion qui s'est fixé ne détermine pas obligatoirement les phénomènes successifs conduisant à la lyse pour lesquels d'autres conditions, qui peuvent faire défaut, entrent en jeu.

L'extrémité distale de la queue du lysion contient une enzyme, appelée « enzyme fixée ou liée », analogue au lysozyme du blanc d'œuf, des larmes ou du mucus nasal. Lorsqu'elle entre en contact avec la paroi bactérienne, elle exerce une « digestion » de celle-ci, limitée à son point de contact avec la paroi. Cette digestion prépare, selon toute vraisemblance, la suite des phénomènes de l'infection. A ce moment, intervient un autre phénomène, la contraction de la gaine vers la tête. Comme le lysion se trouve très solidement arrimé à la paroi bactérienne par ses fibres, et que celles-ci demeurent attachées par leur extrémité distale à la plaque terminale, la contraction

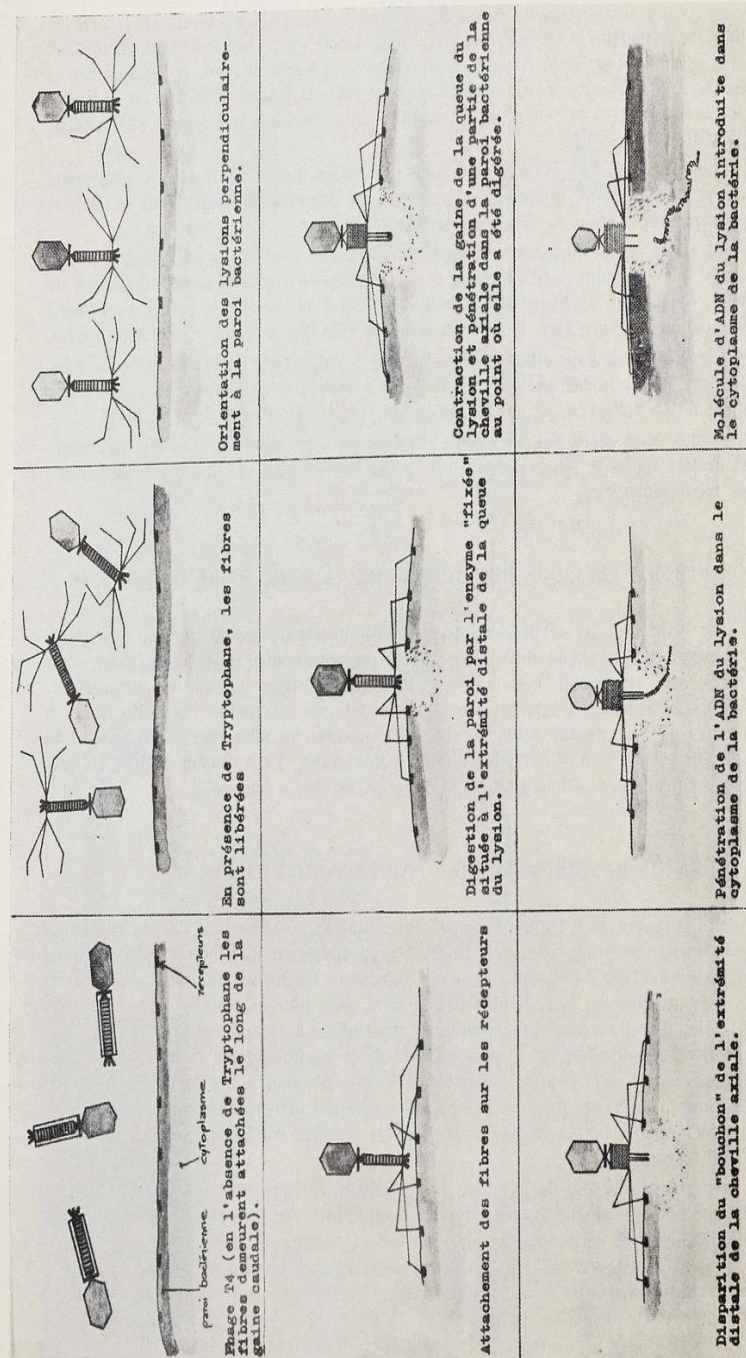


FIG. 9. — Les phases de la fixation et de l'injection intrabactérienne de l'ADN. du phage T 4.

de la gaine a pour effet de faire pénétrer une portion de l'extrémité distale dénudée de la cheville dans la partie de la paroi bactérienne rendue moins résistante par l'action digestive de l'enzyme liée.

SEPARATION DE LA CAPSIDE PROTEINIQUE ET DE L'ADN AU MOMENT DE L'INFECTION.

En 1952, date très importante dans l'histoire de nos connaissances en matière de bactériophagie, les auteurs américains Hershey et Chase, par l'emploi des isotopes radioactifs ^{35}S et ^{32}P , marquant le premier la capsidie protéinique et son prolongement caudal, le second l'ADN du nucléoïde, ont démontré que le lysion ne pénétrait pas en entier dans la bactérie qu'il infectait, comme le ferait un parasite microscopique classique (bactérie, protozoaire, champignon, levure) dans les cellules ou les tissus de l'organisme hôte : l'enveloppe de protéine (capsidie et queue), son rôle étant terminé, reste à sa surface, tandis que seule la longue molécule d'ADN du nucléoïde, pelotonnée à l'intérieur, se déroule et, passant par le canal de la queue, s'introduit dans le cytoplasme bactérien (Fig. 9, 10, 11 et 12). Cette pénétration serait rendue possible par la disparition du « bouchon » qui retiendrait, à l'extrémité de la cheville, la molécule d'ADN déjà engagée dans le canal de celle-ci, et par la contraction de la capsidie, qui est formée d'après Poglazov, comme la gaine de la queue, d'une protéine contractile. Le lysion fonctionnerait donc comme une micro-seringue qui injecterait l'ADN dans le cytoplasme de la bactérie. Ainsi, se trouve accomplie l'infection bactériophagique des bactéries dans le cas des phages pairs du système T. On ne sait pas grand chose encore de ce qui se passe pour les autres variétés morphologiques des phages à ADN et encore moins pour les phages à ARN qui ne semblent pas ni les uns ni les autres posséder le même système d'injection.

CONSEQUENCES DE L'INFECTION BACTERIOPHAGIQUE.

Quelles sont les conséquences de l'infection bactériophagique que nous venons de décrire pour les phages pairs du système T ? On peut envisager quatre éventualités : le cycle lytique ou productif, le cycle réductif ou lysogénisation, la transduction et la conversion.

1° *Le cycle lytique ou productif.*

C'est le cycle qui aboutit à la lyse massive de la culture et à la libération des nombreux lysions nouvellement formés. C'est le fait de tous les lysions des phages « virulents » (*) et d'une partie seulement des lysions des phages tempérés (**), l'autre partie assurant la lysogénisation.

Dès que l'ADN du phage virulent a pénétré dans une bactérie, celle-ci cesse de se multiplier. La plupart des biosynthèses bactériennes normales ne se produisent plus, en particulier celles des enzymes adaptatives. De nouvelles activités enzymati-

* C'est-à-dire des phages ou des mutants de phages qui opèrent une lyse rapide, complète et définitive des bactéries, sans formation de cultures secondaires et sans lysogénisation.

** Par opposition aux phages virulents, les phages tempérés produisent une lyse rapidement suivie de l'apparition, en quantité massive, d'une culture secondaire (lyse voilée sur milieu solide). La presque totalité des bactéries de cette culture secondaire est devenue lysogène.



FIG. 11. — *Bactérie en voie de lyse*. De nombreux lysions sont fixés sur la paroi. Leur gaine de protéine est contractée et leur cheville axiale (à peine visible) est en contact avec le cytoplasme bactérien. (Photomicrographie électronique de coupes de bactéries infectées, réalisée par L.-D. Simon et T.-F. Anderson, de Philadelphie, à la courtoisie desquels nous devons de pouvoir publier cette photographie qui a paru dans *Virologie*, 1967, 32, 279-297, fig. 6).

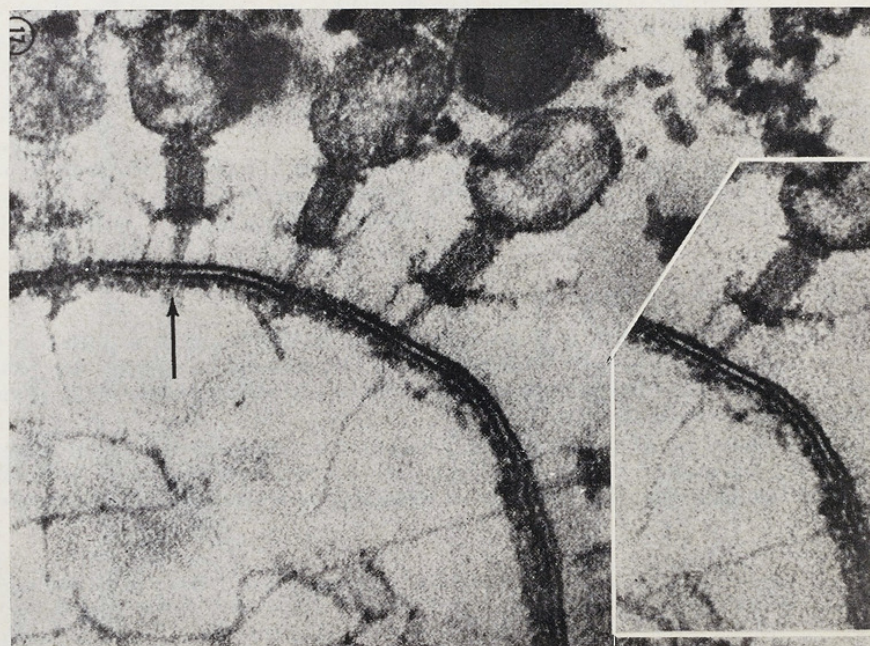


FIG. 12. — *Bactérie en voie de lyse*. Même légende que l'image précédente. On voit plusieurs lysions à gaine contractée et à cheville axiale légèrement enfoncée dans l'épaisseur de la paroi. Dans le cadre de droite, on distingue nettement la molécule d'A.D.N. pénétrant dans le cytoplasme bactérien. (Comme la figure précédente, nous devons le privilège de pouvoir publier cette admirable photomicrographie à la courtoisie de L.-D. Simon et T.-F. Anderson, de Philadelphie ; *Virology*, 1967, 32, 279.

ques apparaissent, qui aboutissent à la synthèse de l'acide 5-hydroxyméthyl-désoxycytidilique qui entre dans la composition de l'ADN du phage, mais non dans celle des bactéries. La molécule de l'ADN du phage se séparerait longitudinalement en ses deux chaînes nucléotidiques. Chacune de ces chaînes servirait de moule pour la formation d'une chaîne complémentaire, et ainsi de suite un très grand nombre de fois.

De cette manière, « se répliquerait » l'ADN du phage dans la bactérie infectée. En outre, l'ADN du phage infectant induirait la formation d'une réplique ribonucléique à laquelle Jacob et Monod ont donné le nom d'ARN-messager. Cet ARN-messager se fixerait sur un ribosome (petite masse d'ARN non spécifique) pour former un système ribosome-messager qui, à son tour, formerait le moule sur lequel seraient fabriquées les enzymes nécessaires à la production de la protéine de la capsid et de la queue du lysion.

Ces substances produites par la bactérie infectée s'organisent à l'intérieur du cytoplasme dont l'ADN propre est détruit. Elles s'assemblent en particules qui sont les lysions complets. Lorsque ceux-ci sont mûrs, ils élaborent une enzyme qui détruit la paroi bactérienne par l'intérieur. La bactérie, bourrée de lysions, éclate alors en répandant ceux-ci dans le milieu (Fig. 13).

Dans le cas du cycle lytique, on le voit, le bactériophage ne se multiplie pas à la manière d'un parasite, d'une bactérie ou d'un protozoaire, par division d'une cellule-mère en deux ou plusieurs cellules-filles. Mais il oblige la bactérie, dans laquelle il a introduit son ADN, à ne pas élaborer désormais que les substances dont il est lui-même composé. A partir du moment où la bactérie est infectée, son métabolisme est complètement dévié vers une seule activité qui est la production du phage. Le mode de reproduction du bactériophage est donc très différent de tout ce que l'on connaît comme exemples de parasitisme.

Il pourrait plutôt être comparé au phénomène de la fécondation : l'ADN infectant, dès qu'il arrive au contact de l'ADN de l'hôte, détermine de la part de celui-ci une activité considérablement accrue et entièrement nouvelle (synthèse en grande quantité des éléments semblables à ceux du phage). De même, lorsque la substance nucléaire (riche en ADN) du spermatozoïde vient se fusionner avec la substance nucléaire de l'ovule (phénomène de l'amphimixie), celui-ci devient également le siège d'une activité considérable et complètement nouvelle.

Mais là, bien entendu, doit s'arrêter la comparaison, car la bactérie fécondée par un phage produit des phages identiques au phage infectant tandis que l'ovule fécondé par un spermatozoïde ne fabrique pas des spermatozoïdes, mais des cellules qui formeront plus tard des êtres semblables les uns à celui qui a fourni le spermatozoïde, les autres à celui qui a fourni l'ovule. On peut se demander si, dans le cas d'une bactérie infectée par un phage, cette fécondation anormale ne serait pas rendue possible par des analogies de structures (des homologies) purement fortuites, entre l'ADN du phage et l'ADN bactérien.

2° La lysogénisation ou cycle réductif.

La bactérie a survécu à son contact avec le phage ; mais elle est devenue lysogène, c'est-à-dire qu'elle a acquis la propriété, désormais héréditaire, d'élaborer spontanément du bactériophage et de la libérer en petite quantité dans le milieu où elle se développe. Le caractère héréditaire de la lysogénie, aussi bien celle que l'on rencontre très fréquemment dans la nature que celle qui prend naissance expérimentalement devant nous, a été bien démontré par André Lwoff en 1949-1950. Il s'est adressé pour ses recherches à un *Bacillus megaterium* qu'il avait rendu artificiellement lysogène et dont le phage était actif sur un *B. megaterium* non lysogène et sensible, la souche asporogène « mutilat ». Le *B. megaterium* lysogène libère du phage en milieu levuré, tandis qu'il n'en libère pas en milieu synthétique. Mettant

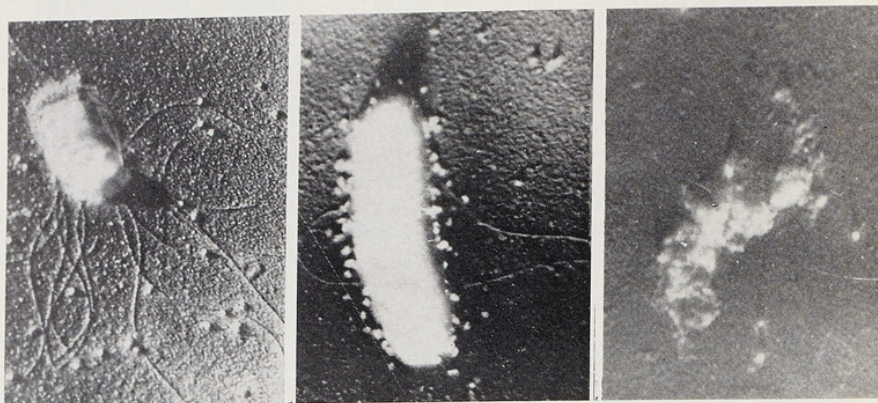


FIG. 13. — La lyse d'un bacille typhique observée au microscope électronique.

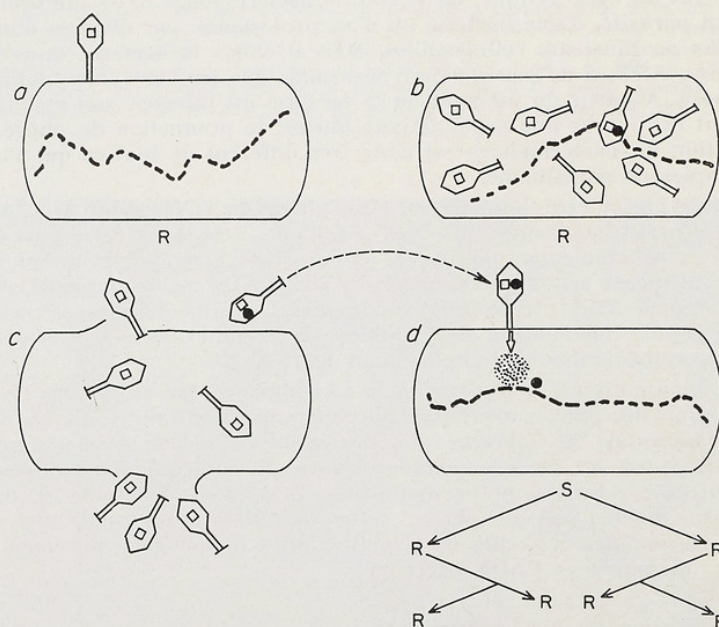


FIG. 14. — Transduction de la résistance à la Streptomycine :

- a) un bactériophage infecte une bactérie résistante.
- b) Il se multiplie. Un des nouveaux lysions englobe par erreur, pourrait-on dire, le gène de la résistance.
- c) la bactérie est lysée et les lysions nouveaux sont disséminés dans le milieu.
- d) le lysion porteur du gène de la résistance rencontre une bactérie sensible. Il lui injecte son A.D.N., et en même temps le gène de la résistance. Ce gène va se fixer sur le chromosome. A partir de ce moment, il va faire partie du génome de la bactérie et il est transmis héréditairement à la descendance qui sera résistante à la Streptomycine.

à profit cette circonstance, il a isolé un élément bactérien au micromanipulateur. Il l'a déposé dans une microgoutte de milieu synthétique. Cet élément s'est multiplié sans libérer de phage. Il a prélevé un nouvel élément de cette seconde génération et il l'a mis dans une autre goutte de milieu synthétique, toujours avec le même résultat négatif. Après une vingtaine de prélèvements de cette sorte, il a placé dans une microgoutte de milieu levuré un descendant de toute cette lignée de bacilles isolés au micromanipulateur et maintenus en milieu synthétique. Immédiatement la libération de phages s'est produite à nouveau.

Il y a donc quelque chose, dans la bactérie lysogène, qui n'est pas tout à fait du phage, mais qui peut se transformer en phage. Ce « quelque chose », Lwoff l'a appelé le prophage, c'est-à-dire le précurseur du phage. Le prophage, c'est l'ADN du phage infectant qui est allé se loger sur le chromosome de la bactérie en un endroit précis qui semble lui avoir été réservé spécifiquement. Il fait désormais partie du chromosome de celle-ci, c'est-à-dire de l'ensemble de ses propriétés héréditaires. Lorsqu'elle se divise, chacune de ses bactéries filles en reçoit un en partage. Ainsi la propriété lysogène se perpétue héréditairement et le prophage tant qu'il reste fixé sur le chromosome, immunise, ou mieux prémunit la bactérie, aussi bien contre l'action intérieure que contre l'action extérieure du phage correspondant. Mais il arrive que le prophage se sépare du chromosome, spontanément ou à la suite d'un traitement particulier. On donne le nom d'épisomes ou de facteurs épisomiques à ces éléments de l'appareil génétique des bactéries qui peuvent, suivant les circonstances, être fixés sur le chromosome ou se trouver libres dans le cytoplasme. D'après François Jacob, ce phénomène de prémunition serait dû à l'élaboration par le prophage d'une substance, un répresseur, qui empêcherait la formation des diverses parties du phage. Lorsque le prophage a quitté le chromosome, le répresseur faisant défaut, la bactérie n'est plus prémunie et l'on revient au cycle lytique avec production de nombreux lysions.

Une telle perte du prophage avec retour au cycle lytique n'affecte normalement qu'une très faible proportion de la population bactérienne lysogène : une bactérie sur mille ou même beaucoup moins. Elle suffit à assurer généralement la présence permanente de phages libres dans le milieu de culture où la bactérie lysogène se multiplie.

Mais si l'on traite une culture lysogène par certains agents physiques (rayons ultra-violets) ou chimiques (eau oxygénée), la proportion de bactéries qui perdent leur prophage et subissent la lyse avec libération de nombreux lysions peut devenir considérable. Dans certains cas, elle affecte la totalité de la population bactérienne. La lyse est alors totale. C'est le phénomène de l'induction, c'est-à-dire l'incitation d'une bactérie lysogène à produire du phage en quantité massive. Cet important phénomène a été découvert par Lwoff et Siminovitch en 1952.

On le voit, lorsque l'ADN phagique est incorporé au chromosome bactérien, c'est-à-dire tant qu'il se trouve à l'état de prophage, il se comporte comme un gène ou plutôt comme un groupe de gènes, puisqu'il fait partie du matériel génétique de la bactérie. C'est un gène « létal ». Mais son caractère funeste ne s'exprime normalement que chez un petit nombre de bactéries qui le portent, par exemple une sur mille, ou sur dix mille ou sur cent mille ou encore moins. Les autres, celles qui survivent, le transmettent sans dommage à leur descendance.

Dans le cas rare où ce prophage est transformé en phage, c'est-à-dire lorsqu'il se sépare du chromosome bactérien, qu'il s'entoure d'une capside de protéine et qu'il se munit d'une queue pour devenir un lysion complet, il se comporte comme un virus puisqu'il est contagieux. Il peut en effet infecter une bactérie, la lyser ou encore la rendre lysogène. Ainsi s'est trouvé vérifiée « l'hérédité contagieuse » de la bactériophagie, prévue il y a plus de trente ans par Jules Bordet et reprise avec conviction par Eugène Wollman.

3° La transduction (Fig. 14).

Il peut arriver qu'il s'introduise, dans le lysion en formation, en même temps que l'ADN phagique, une parcelle de l'ADN de l'appareil génétique de la bactérie, et que cette parcelle soit porteuse, par exemple, du gène de la résistance à la streptomycine. Si le phage est ensuite mis en présence d'une bactérie sensible à cet antibiotique, il peut lui conférer héréditairement la résistance à l'antibiotique en question. Ce transfert d'une propriété héréditaire d'une bactérie « donatrice » à une bactérie « réceptrice » par l'intermédiaire d'un phage a été décrit pour la première fois par Zinder et Lederberg et porte le nom de transduction.

On a pu transduire la résistance à plusieurs autres antibiotiques, diverses propriétés biochimiques, la propriété d'élaborer des caractères antigéniques flagellaires et même le prophage lui-même.

La transduction semble être due à l'infection d'une bactérie par un phage anormal parce qu'elle ne s'accompagne généralement pas, sauf dans le cas du transfert d'un prophage, d'une lysogénisation concomitante. La molécule d'ADN du phage transducteur serait incomplète en raison de la présence, dans la capsid, du gène bactérien qui y était inclus et qui limiterait la place normalement disponible pour l'ADN phagique normal. Un tel ADN phagique incomplet serait donc impropre à assurer la lysogénisation.

4° La conversion.

C'est aussi le transfert, par un phage tempéré, d'une des propriétés d'une bactérie à une autre bactérie qui en était dépourvue. Mais contrairement à ce que l'on observe dans la transduction, la lysogénisation concomitante est de règle.

Le premier exemple de conversion a été donné par Freeman en 1951 : tout bacille diphtérique toxigène, c'est-à-dire capable d'élaborer la toxine diphtérique est nécessairement lysogène. Le phage qu'il libère, mis en contact avec un bacille diphtérique non toxigène lui confère à la fois la lysogénie et la toxinogénèse.

Une conversion analogue a été décrite par Zabriskie pour des streptocoques non toxigènes que l'on a pu rendre capables de fabriquer la toxine érythrogénique en même temps que la lysogénie par l'action d'un phage tempéré isolé de souche de streptocoques toxigènes du groupe A.

Bien d'autres exemples de conversion ont été décrits, notamment chez les *Salmonella* : *Salmonella newington* est caractérisé par les antigènes somatiques 3, 15 et en même temps par la présence du prophage ϕ 15. *Salmonella anatum* n'est pas lysogène et elle possède les antigènes somatiques 3, 10. Par l'action du phage ϕ 15, on convertit cette *Salmonella* en une *Salmonella* antigéniquement identique à *Salmonella newington* et lysogène. Sous certaines influences, on peut guérir cette dernière de sa lysogénie. Par la perte de son prophage, elle retrouve du même coup sa formule antigénique antérieure 3, 10. L. Le Minor a réussi à opérer un nombre considérable d'autres conversions dans le genre *Salmonella*. On peut penser que de telles transformations obtenues facilement au laboratoire doivent s'effectuer naturellement dans l'intestin humain ou animal où coexistent souvent diverses *Salmonella*. Ces conversions « naturelles » expliqueraient comment se serait formée la multitude considérable (plus d'un millier) des espèces du genre *Salmonella*.

LA TERATOLOGIE DES BACTERIOPHAGES.

Certaines bactéries ou leurs mutants produisent dans ces conditions particulières, les lysions anormaux, des monstres. D'autres sont incomplets et, bien entendu, inactifs. Ce sont des queues, des fibres ou des têtes isolées. Récemment, plusieurs

auteurs (Kellenberger et collaborateurs, Wood et Edgar) ont réussi à reconstituer des lysions complets et actifs en réunissant de telles « pièces détachées » en présence de la bactérie sensible (Fig. 15).

APPLICATION DES BACTERIOPHAGES.

La phagothérapie préventive et curative dont il a été question au début de cette conférence est surtout employée contre les infections à staphylocoques, à colibacilles et à bacilles pyocyaniques. Comme toutes les thérapeutiques à base de produits biologiques, les résultats en sont souvent inconstants : parfois on assiste à des guérisons presque miraculeuses, d'autres fois à des améliorations indiscutables, mais partielles. Dans certains cas, aucun effet ne suit l'application. Il convient toutefois de préciser que les accidents ou simplement les inconvénients de cette thérapeutique sont rarissimes. On a souvent avantage à lui associer l'antibiothérapie à condition de commencer toujours par le bactériophage et non par l'antibiotique.

LES METHODES DE LYSOTYPIE.

Par le terme de lysotypie, on désigne l'ensemble des méthodes, très variées dans leurs principes et dans leurs techniques, par lesquelles on peut, au moyen d'un jeu de bactériophages convenablement choisis ou adaptés, distinguer, parmi des souches appartenant à une même espèce bactérienne ou à un même sérotype, des variétés suffisamment nettes et stables pour que leur reconnaissance puisse être utilisée d'une manière efficace en épidémiologie.

Les principales lysotypies actuellement en usage sont celles des staphylocoques, des bacilles diphtériques, des *Brucella* et surtout de nombreuses entérobactéries : bacille typhique (Fig. 16) paratyphique A et B, *Salmonelle typhimurium*, bacille pyocyanique, *Proteus*, etc.

Il existe aussi des lysotypies pour les *Klebsiella*, les vibrions cholériques et les vibrions El Tor. Pour les mycobactéries, il s'agit plutôt d'une lysodiagnose que d'une lysotypie véritable, car à part quelques espèces bien définies comme le bacille tuberculeux, dans la plupart des cas, les bactériophages servent surtout à confirmer le diagnostic de l'espèce ou plutôt à grouper les souches suivant les analogies de leur sensibilité aux bactériophages.

Intérêt de la lysotypie des bacilles typhiques (bacille d'Eberth ou *Salmonella typhi*). A quoi servent les méthodes de lysotypie en général et à quoi sert en particulier la méthode de Craigie et Felix pour le bacille typhique ?

Lorsqu'un individu est atteint de fièvre typhoïde ou de toute autre maladie bactérienne transmissible, ou s'il est porteur de germes, pendant toute la durée de sa maladie ou de son portage, les bacilles que l'on isole chez lui, quel que soit le mode d'isolement, par culture du sang, des selles, de l'urine, de la bile, du pus, du liquide céphalo-rachidien, quel que soit le traitement qu'on fait subir au patient, à l'exception d'un traitement par les bactériophages, appartiennent nécessairement à un même lysotype.

Si ce malade ou ce porteur de germes contamine des personnes de son entourage, quel que soit leur nombre (petits foyers familiaux, épidémies des collèges, épidémies souvent plus importantes des casernes, grosses épidémies dues à la contamination d'une eau de consommation ou d'un aliment), le lysotype sera le même pour tous, le malade ou le porteur et les personnes contaminées.

Il s'ensuit que, par le moyen de la lysotypie, on peut établir la filiation des cas, remonter à la source même de la contagion et prendre en toute connaissance de

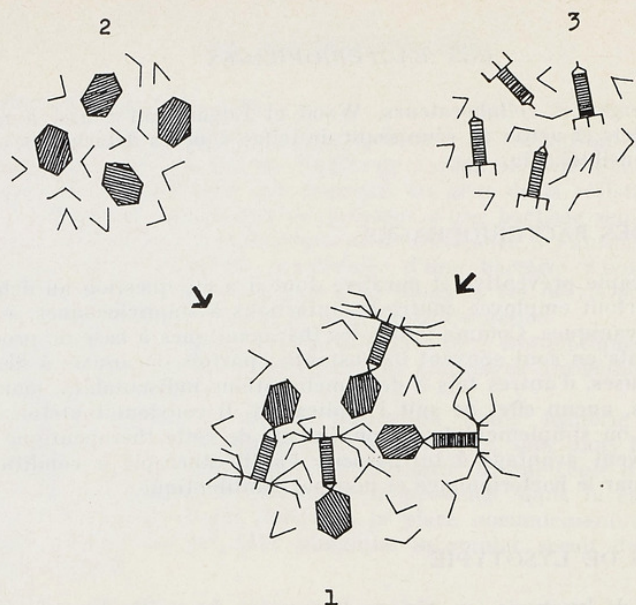


FIG. 15. — *Reconstitution in vitro de lysions actifs du phage T 4* (1), à partir des « pièces détachées » : têtes et fibres (2), et queues engainées et fibres (3), contenues dans deux extraits de mutants défectifs mélangés.

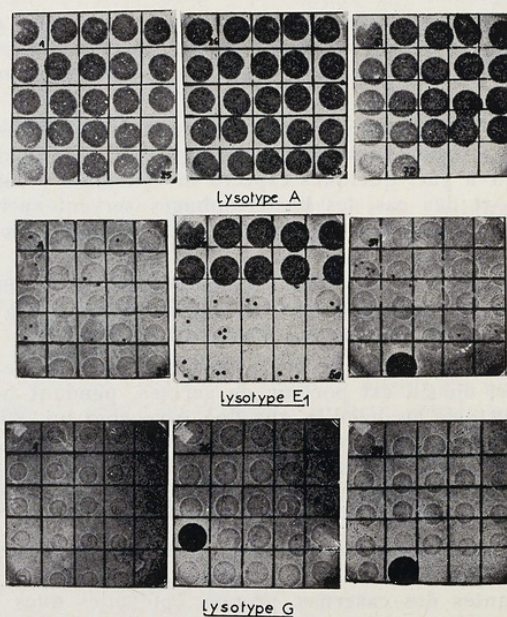


FIG. 16. — *Trois exemples de lysotypes du bacille typhique*. Le lysotype A est sensible à tous les phages. Le lysotype E n'est pleinement sensible qu'au 10 phages du groupe E. Le lysotype G n'est sensible qu'au seul phage G. Le 72^e phage est un phage témoin de la présence de l'antigène V.

cause les mesures appropriées à chaque foyer, pour en enrayer l'extension et même parvenir à l'éradication de la maladie dans une région donnée.

La lysotypie éclaire donc les enquêtes épidémiologiques qui souvent, sans elle, resteraient confuses. On ne peut guère étudier sérieusement une épidémie de fièvre typhoïde sans avoir recours à cette méthode.

Les mêmes conclusions peuvent être formulées pour plusieurs autres infections bactériennes contagieuses.

CONCLUSIONS.

De cet exposé beaucoup trop long et cependant très incomplet, je souhaite avoir réussi à vous convaincre que le bactériophage est un des sujets les plus passionnants de la recherche en biologie. Ce n'est pas seulement mon avis personnel, c'est aussi celui du Comité Nobel de l'Institut Carolin de Stockholm, puisqu'à deux reprises en cinq ans, il a accordé le Prix Nobel de Médecine à des phagologues : en 1965, aux pasteurs André Lwoff, François Jacob et Jacques Monod et, en 1969, il y a huit jours, aux américains Max Delbrück, Alfred Hershey et Salvador Luria.

Voilà le palmarès peu banal du bactériophage ou plutôt la part la plus brillante de ce palmarès.

On me permettra d'y ajouter un Prix Nobel de littérature attribué en 1925 à l'auteur américain Sinclair Lewis dont l'excellent roman « Arrowsmith » accorde une place importante au bactériophage.

Toutes ces récompenses sont parfaitement méritées. Cela ne fait pas le moindre doute. Mais on ne peut s'empêcher de regretter que les deux savants, Twort et d'Hérelle, dont la découverte géniale de la lyse bactérienne transmissible a ouvert la voie à des centaines de chercheurs, parmi lesquels les six que je viens de citer, n'aient pas reçu, eux aussi, en leur temps, la haute distinction internationale.

Les propriétés et les applications des métaux du groupe IV (Zirconium, Titane, Hafnium)

par Pierre LEHR,
Directeur de Recherche au C.N.R.S.

I. — INTRODUCTION.

Les métaux du groupe IV_A, titane, zirconium et hafnium, classés dans l'ordre de leurs masses atomiques croissantes, constituent une famille très homogène. Leurs propriétés physiques, leurs structures cristallographiques, leurs caractéristiques chimiques sont, en effet, très voisines. La parenté est particulièrement étroite entre le zirconium et le hafnium. Ces deux éléments coexistent, en effet, toujours au sein des minerais couramment exploités. Leur séparation chimique, rendue nécessaire par les applications industrielles du zirconium dans le domaine nucléaire, est particulièrement délicate.

Au cours des vingt dernières années, les métallurgies de ces trois métaux se sont considérablement développées et leurs applications industrielles ont pris une importance croissante.

L'intérêt du titane résulte essentiellement de sa densité relativement faible (4,5). Sous forme du métal non

allié, ou sous forme d'alliages à caractéristiques mécaniques supérieures, il trouve son emploi principal dans tous les domaines où l'on recherche un allègement des structures, c'est-à-dire essentiellement dans les domaines de l'aéronautique et de l'espace. Sa résistance mécanique élevée à chaud, sa bonne tenue à l'oxydation en font un matériau tout indiqué pour de telles applications.

L'importance pratique du zirconium découle de sa faible section de capture des neutrons thermiques (0,18 barns). Cette qualité jointe à une bonne résistance à la corrosion à chaud dans l'eau bouillante ou pressurisée, ou dans le gaz carbonique, jointe également à de bonnes caractéristiques mécaniques en fait un élément de choix comme matériau de gainage pour les combustibles nucléaires ou comme matériau de structure dans les réacteurs nucléaires. Le développement de l'industrie du zirconium est ainsi une conséquence directe du développement de l'industrie nucléaire.

28^e conférence Bardy, présentée le 19 février 1970 à la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale.

Le hafnium, homologue supérieur du groupe IV, diffère du zirconium sur un point particulier. Il possède, en effet, une section de capture neutronique particulièrement élevée (115 barns). Il est ainsi considéré comme un poison nucléaire. Le hafnium doit, en conséquence, être éliminé complètement du zirconium dans le cas des utilisations nucléaires de ce dernier métal. Divers procédés industriels de séparation zirconium-hafnium se sont développés.

Le hafnium peut ainsi être considéré comme un sous-produit de la métallurgie du zirconium. Bien que les débouchés industriels du hafnium soient à l'heure actuelle très réduits, il possède cependant une application importante : du fait de ses caractéristiques d'absorption neutroniques élevées, il est utilisé comme barres d'arrêt ou de contrôle dans certains réacteurs nucléaires.

II. — METALLURGIE

EXTRACTIVE (1) (2) (3) (4) (32).

Les métallurgies de ces trois métaux sont très similaires. Leurs élaborations font appel à la même réaction de réduction. Le produit de départ est toujours l'oxyde que l'on cherche à obtenir dans un degré de pureté aussi élevé que possible à partir des minerais naturels.

1) TRAITEMENT DES MINERAIS.

Le titane est un élément très répandu dans la nature. Il représente environ 0,6 % de la croûte terrestre. Comparé aux autres métaux, il vient ainsi au quatrième rang après l'aluminium, le fer, le magnésium. Il est donc plus abondant que des métaux communs tels que le cuivre, le nickel et le chrome.

Ses minerais principaux sont le rutile, forme naturelle du bioxyde de titane, TiO_2 et l'ilménite, titanate de fer impur, FeTiO_3 , beaucoup plus répandue que ne l'est le rutile.

Les minerais naturels subissent un traitement de concentration effectué par flottation et triage magnétique, qui

conduit à une fraction rutile titrant de 90 à 99 % de TiO_2 et à une fraction ilménite contenant de 40 à 60 % de TiO_2 . Pour cette dernière fraction, un affinage complémentaire au four à arc permet d'obtenir un laitier très riche en TiO_2 , le fer étant éliminé sous forme de fonte. Ces opérations conduisent ainsi à l'oxyde TiO_2 , base de la métallurgie du titane.

Le zirconium est beaucoup moins répandu à l'état naturel : on estime que la croûte terrestre contient environ 0,03 % de zirconium.

Ses minerais sont la baddeleyite ou oxyde impur (que l'on trouve notamment au Brésil et qui contient comme impureté principale de la silice) et le silicate naturel ZrSiO_4 , ou zircon, qui se trouve en présence de rutile (TiO_2) et d'ilménite (FeTiO_3). Le hafnium co-existe toujours au sein des minerais de zirconium : bien que le numéro atomique du hafnium soit beaucoup plus élevé que celui du zirconium, son rayon ionique est presque identique et par suite l'ion hafnium se substitue aisément au sein des réseaux cristallins des divers composés de zirconium.

La baddeleyite représente à peu près 98,8 % de zircon (ZrO₂) et 1,2 % d'oxyde de hafnium (HfO_2). Le zircon contient 64,23 % en poids d'oxyde de zirconium et 2 % d'oxyde de hafnium (HfO_2). Le zircon est le minerai le plus couramment utilisé. Dans le procédé français, la décomposition du zircon se fait par frittage avec du carbonate de sodium vers 950-1 000 °C. Le fritté obtenu, pulvérisé, est repris par l'acide chlorhydrique. La silice est filtrée de la solution et l'on précipite simultanément par hydrolyse les deux hydroxydes de zirconium et de hafnium.

Pour les applications nucléaires du zirconium, la séparation zirconium-hafnium est nécessaire. Selon le procédé mis au point par le Commissariat à l'Energie Atomique, elle consiste en une extraction par solvant : une solution nitrique contenant les deux métaux est mise en contact avec un mélange de tributyl-phosphate et de white spirit.

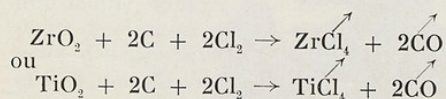
Le zirconium passe dans la phase organique, le hafnium demeurant dans la phase aqueuse (3) (4).

Le zirconium ainsi séparé est remis en solution nitrique, puis est précipité par l'ammoniaque sous forme d'hydroxyde, qui par calcination, conduit à la zircone déhafniée. La teneur en hafnium par rapport au zirconium est alors inférieure à 100 ppm. La zircone déhafniée et l'oxyde de hafnium HfO_2 pur constituent les matériaux de départ des métallurgies respectives de ces deux métaux.

2) STADE DE LA CHLORURATION.

La difficulté de la métallurgie de ces trois métaux réside essentiellement dans la très grande stabilité de leurs oxydes (ZrO_2 , HfO_2 , TiO_2). Bien que la réduction directe des oxydes à l'aide de réducteurs puissants tels que le magnésium, le calcium et le sodium ait été tentée, elle ne conduit cependant pas à des résultats satisfaisants. La réduction est incomplète par suite de l'établissement d'équilibre physico-chimique. Aussi préfère-t-on convertir l'oxyde en chlorure et effectuer une réduction du chlorure.

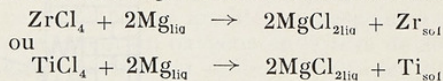
Les oxydes sont ainsi transformés en chlorure, sous circulation de chlore gazeux en présence de coke. La réaction s'écrit :



Cette opération est effectuée en lit fixe (technique américaine) ou en lit fluidisé (technique française) à une température entre 600 et 800 °C. Le tétrachlorure volatil est récupéré par condensation et comme sa pureté n'est pas toujours suffisante, on effectue un stade de raffinage par sublimation (cas de ZrCl_4) ou distillation fractionnée (cas de TiCl_4). Cet affinage s'effectue sous atmosphère inerte (argon ou hélium) ou hydrogène.

3) STADE DE LA RÉDUCTION.

La réduction du tétrachlorure par le magnésium constitue la réaction fondamentale du procédé Kroll. Elle s'écrit :



Cette réduction est une opération discontinue. L'opération est faite sous argon, à la pression atmosphérique, dans un réacteur cylindrique en acier réfractaire à deux zones indépendantes de chauffage. La figure 1 représente le type de réacteur utilisé pour l'élaboration de l'éponge de zirconium ou de hafnium par la Société Ugine-Kuhlmann (3) (4).

La zone inférieure de chauffage assure la fusion des lingots de magnésium purifié et permet de maintenir la température de réaction à 800 °C. Cette réaction se fait au contact entre le magnésium liquide et la vapeur de tétrachlorure.

La zone supérieure permet de porter le chlorure à sa température de sublimation et de régler la vitesse de sublimation afin de contrôler la cinétique de la réduction.

Le zirconium ou le hafnium formé, plus dense que le magnésium liquide, se dépose au fond. Ce dépôt de métal isole des particules de magnésium qui ne peuvent plus réagir, alors que le chlorure de magnésium liquide recouvre l'ensemble. Le rendement en magnésium est donc nécessairement limité. L'élaboration du titane s'effectue d'une manière similaire. Le chlorure de titane TiCl_4 gazeux est introduit lentement dans le réacteur au fur et à mesure de sa consommation.

Après refroidissement, on ouvre le réacteur et on sépare le bloc d'éponge métallique obtenu de la couche de chlorure de magnésium.

L'éponge brute contient alors environ 15 % de magnésium excédentaire et des quantités variables de chlorure de magnésium. Elle est purifiée par distillation sous vide (10^{-4} Torr) dans des fours à cloche à une température de l'or-

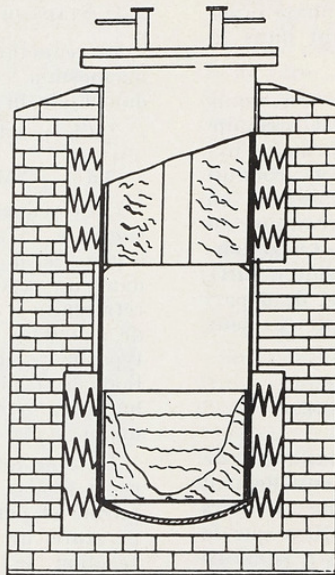


FIG. 1. — Préparation de l'éponge de zirconium. Schéma du réacteur (d'après 3).



FIG. 2. — Eponge de titane obtenu par le procédé Kroll (diamètre des granulés de l'ordre du cm).

dre de 1 000 °C. L'éponge obtenue est ensuite découpée à la presse et broyée en morceaux. Elle est enfin conditionnée pour constituer des lots homogènes correspondant à différentes nuances de pureté (fig. 2).

4) FUSION DU METAL.

Il convient enfin de transformer l'éponge en un lingot massif. Etant donné la très grande réactivité des métaux du groupe IV_A vis-à-vis des gaz usuels, notamment vis-à-vis de l'oxygène, la fusion doit s'effectuer sous vide aussi élevé que possible.

La technique couramment utilisée est celle de la fusion à arc, à électrode consommable, en creuset de cuivre refroidi par circulation d'eau. Le four utilisé doit être équipé d'un groupe de pompage à fort débit afin d'assurer l'évacuation des gaz et des produits volatils libérés par la fusion et de maintenir un vide inférieur à 10^{-3} Torr afin d'éviter l'oxydation du métal.

L'électrode consommable est préparée à partir des granulés d'éponge, en comprimant ceux-ci à l'aide d'une presse hydraulique sous une pression de l'ordre de 4 tonnes par cm^2 . Lorsqu'il s'agit d'élaborer des alliages, les éléments d'addition sont incorporés à l'éponge dans les proportions voulues.

Deux fusions successives (voire même trois) sont indispensables afin d'obtenir une bonne homogénéité des lingots. Le poids des lingots varie de 600 à 2 000 kg pour des diamètres compris entre 350 et 500 mm (3) (5).

Les lingots obtenus sont ensuite transformés selon les techniques classiques de forgeage, filage, laminage et étirage.

5) ANALYSES CHIMIQUES.

Le tableau 1 donne à titre d'exemple des analyses chimiques d'éponges de titane, de zirconium déhafnié, de hafnium. Dans le cas du zirconium, nous avons cité les teneurs extrêmes que l'on peut observer selon la qualité de l'éponge.

Sont à prendre en considération les teneurs en éléments métalloïdiques oxygène, azote, carbone. En effet, ces impuretés affectent notablement la ductilité de ces matériaux. Une éponge dite « douce », de bonne qualité, correspondra à une teneur en oxygène de l'ordre de 250 à 300 parties par million. Parmi les éléments métalliques, l'impureté prépondérante est le fer.

Les lingots ou demi-produits obtenus à partir de l'éponge présentent des teneurs en impuretés comparables à celles de l'éponge de départ. Cependant, certains éléments volatils (principalement le chlore ou le magnésium) s'éliminent largement au cours de la fusion. Par contre, une certaine pollution par l'oxygène ou l'azote peut se produire à la fusion ou au cours des transformations mécaniques à chaud.

A l'échelle industrielle, l'élaboration de ces métaux est effectuée essentiellement par le procédé Kroll, réduction du tétrachlorure par le magnésium. D'autres réducteurs sont également utilisés. C'est ainsi que la firme britannique Imperial Chemical Industries produit de l'éponge de zirconium ou de titane en utilisant la réduction du tétrachlorure par le sodium.

En outre, les possibilités d'obtention de ces métaux par électrolyse, en bains de sels fondus, ont fait l'objet de nombreuses études ainsi que de développement à une échelle semi-industrielle. Les bains d'électrolyse sont constitués par des sels doubles, du type fluozirconate (K_2ZrF_6) ou fluotitanate, ou par les tétrachlorures (ZrCl_4 , TiCl_4) dissous dans des mélanges de chlorure de potassium et de sodium.

III. — OBTENTION DE METAUX DE HAUTE PURETE - METHODES D'AFFINAGE.

Les métaux, élaborés par le procédé Kroll, possèdent un degré de pureté suffisante pour la plupart des applications pratiques. Cependant, pour certains emplois plus spécifiques ou pour des

TABLEAU I

Teneurs en impuretés (ppm)
(éponges obtenues par le procédé Kroll)

Impuretés	Ti	Zr déahafnié	Hf
C	60	100 à 250	
N ₂	200	10 à 50	
O ₂	300	250 à 1400	300 à 1000
Al	< 20	< 30 à 80	< 50
B		< 0,5	< 0,5
Co		< 2 à 20	
Cr	< 25	30 à 200	< 40
Cu	< 10	4 à 30	< 25
Fe	1100	120 à 1500	200 à 300
Hf		150	
Mg	5000	< 100	< 10
Mn	30	12 à 50	< 10
Ni	< 8	10 à 70	< 10
Si	50	< 50	< 50
Ti		< 20	
Zr	500		

recherches sur les propriétés de ces métaux ou d'alliages de haute pureté, des méthodes d'affinage sont nécessaires, afin d'obtenir des teneurs en impuretés très faibles. La plus importante de ces méthodes est la méthode Van Arkel.

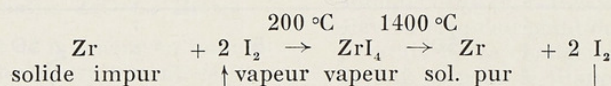
1) PROCÉDÉ VAN ARKEL.

Il consiste en la dissociation thermique du tétraiodure (TiI_4 , ZrI_4 , HfI_4), à l'état de vapeur, au contact d'un fil mé-

talique, chauffé vers 1400 °C par passage d'un courant électrique.

Le métal de départ à affiner peut être l'éponge. L'iode se combine à températures relativement basses au métal impur, vers 200 °C, pour donner la vapeur du tétraiodure qui se dissocie au contact d'un filament chauffé, constitué par le même métal.

Le schéma de la réaction peut s'écrire :



Cette technique permet ainsi d'obtenir un métal compact, de très bonne pureté, présentant en particulier des teneurs très faibles en oxygène et en azote (cf. Tableau II). Cependant, les impuretés susceptibles de former des iodures volatils, telles que Si, Th, Te, Al, B et P, peuvent être transférées dans des proportions notables.

La figure 3 donne l'aspect du métal obtenu par ce procédé : des cristaux de zirconium ou de titane se développent

à partir de la phase vapeur. Leur taille dépend essentiellement de la température à laquelle est portée le filament support. Ce procédé a l'inconvénient d'être onéreux.

2) PURIFICATION PAR FUSION PAR BOMBARDEMENT D'ÉLECTRONS.

La fusion par bombardement d'électrons est une technique relativement récente. Elle permet une purification des

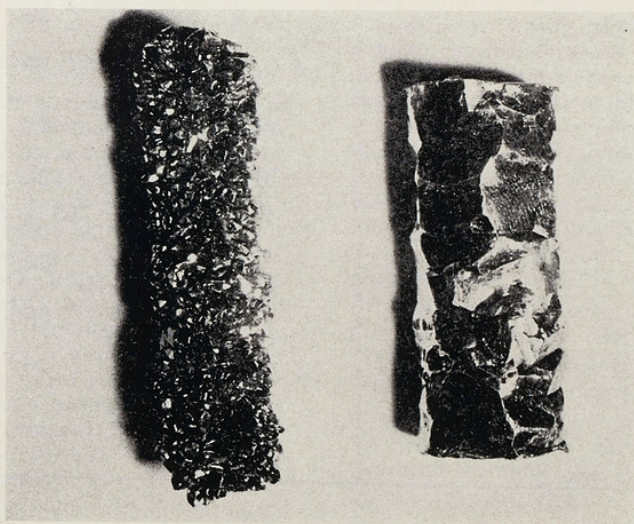


FIG. 3. — Titane (à gauche) et zirconium (à droite) obtenus par la méthode Van Arkel.

TABLEAU II

Analyse de métaux préparés par la méthode Van Arkel
(teneurs en ppm)

Impuretés	Ti	Zr	Hf
Al	50	5	< 50
B		< 0,5	< 0,5
C	10	< 50	
Ca		< 0,2	< 30
Cr		1	< 10
Cu	3	0,7	< 10
Fe	20	12	< 100
Hf		75	
Mg			< 10
Mn		0,5	< 10
Mo		< 0,1	< 10
N	20	13	2
Ni	1	0,1	< 10
O	20	20	10 à 50
Si	50		< 50
Ti			< 50
V		< 0,5	< 10
Zr	500		

métaux à point de fusion élevé, par suite de la distillation préférentielle de certaines impuretés (6). Celles-ci s'éliminent sous vide durant la fusion du métal, soit sous forme élémentaire lorsque leur tension de vapeur est supérieure à celle du métal à purifier, soit sous forme combinée, lorsqu'elles sont susceptibles de former des composés volatils. C'est notamment le cas de l'oxygène présent dans le zirconium et le hafnium qui s'élimine sous la forme des sous-oxydes monovalents, volatils ZrO ou HfO .

L'abaissement de la teneur en impuretés, résultant d'un tel traitement, est évidemment fonction du taux de perte en métal par évaporation. Dans le cas du zirconium, la teneur en oxygène peut être abaissée d'un facteur 5, si l'on admet un taux d'évaporation de l'ordre de 4 % en poids (cf. Gosse) (7) (8).

Cette méthode de raffinage est appliquée industriellement dans le cas du hafnium, afin de diminuer la teneur en oxygène. Par fusion au four à bombardement d'électrons d'éponge de hafnium, la teneur en oxygène peut être abaissée jusqu'à une valeur de l'ordre de 200 ppm. Le lingot ainsi raffiné est ensuite soumis à une nouvelle fusion au four à arc (9).

3) PURIFICATION PAR ZONE FONDUE.

La méthode de purification par fusion de zone a été également utilisée pour produire du métal de très haute pureté. Son application aux métaux du groupe IV, Ti, Zr, Hf, soulève cependant des difficultés sérieuses, par suite de leur très grande réactivité vis-à-vis de l'oxygène et de l'azote. Il est nécessaire d'effectuer une fusion sans creuset, c'est-à-dire d'utiliser la technique de la fusion de zone verticale ou « zone flottante » et de travailler en outre sous un vide très poussé (pression résiduelle inférieure à 10^{-7} Torr). En utilisant comme métal de départ du zirconium Van Arkel déjà très propre, M. Langeron (10) a obtenu au laboratoire de Vitry des résultats remarquables par cette technique, du point de vue de la purification du zirconium.

IV. — PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANQUES DES METAUX DU GROUPE IV.

Dans le tableau III, ont été réunies à titre de comparaison quelques propriétés physiques de ces trois métaux.

Ils peuvent exister sous deux formes allotropiques, une forme α de structure hexagonale compacte, stable aux basses températures, une forme β de structure cubique centrée, stable aux températures élevées jusqu'au point de fusion. La température de ce changement de phase est de 882 °C pour le titane, 862 °C pour le zirconium, 1760 °C pour le hafnium.

L'existence de tels points de transformation est, par ailleurs, très importante, puisque d'elle dépend toute la métallurgie des alliages de ces métaux. Les éléments d'addition peuvent, soit stabiliser la phase α (éléments alphagènes), soit stabiliser la phase β (éléments bétagènes). Ainsi, en jouant sur la nature des éléments d'addition, sur leurs concentrations, on peut, en fonction des traitements thermiques appliqués, obtenir des états structuraux très variés et par suite des propriétés métallurgiques très différentes.

Sous leur forme allotropique hexagonale, ces trois métaux se distinguent des autres métaux hexagonaux par le fait que le rapport axial c/a est relativement faible, inférieur à la valeur idéale, 1,633, correspondant à un empilement compact de sphères rigides. Contrairement à la plupart des autres métaux hexagonaux, le glissement cristallographique ne se fait pas suivant le plan de base, mais le long des plans prismatiques du type $(10\bar{1}0)$, dans la direction à haute densité atomique $[11\bar{2}0]$. Il existe ainsi trois systèmes de glissement indépendants (Fig. 4). Ces métaux présentent, en outre, différents modes de maillage. La macle la plus courante est la macle $(10\bar{1}2)$ (direction de cisaillement $(10\bar{1}1)$ mais il existe également des macles du type $(11\bar{2}1)$, $(11\bar{2}2)$ et $(11\bar{2}3)$.

TABLEAU III

Propriétés physiques des métaux du groupe IV_A

	Ti	Zr	Hf
n° atomique	22	40	72
poids atomique	47,90	92	178,5
densité (25°C)	4,505	6,5	13,1
temp. de transf.	882°C	862°C	1760°C
paramètres a	2,9503 Å	3,2321 Å	3,1952 Å
en α			
(hex. c) c	4,6831 Å	5,1474 Å	5,0569 Å
c/a	1,5873	1,593	1,5827
section de capture (neutrons thermi- ques)	5,6 barns	0,18 barns	115 barns
point de fusion	1668°C	1852°C	2222°C
point d'ébul- lition	3260°C	4371°C	4712°C
résistivité élec- trique (25°C)	$42 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ cm}$	$44 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ cm}$	$35,1 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ cm}$
conductibilité thermique (25°C)	0,155 W/cm/°C	0,211 W/cm/°C	0,223 W/cm/°C
Coefficient de dilatation (25°C)	$8,35 \cdot 10^{-6} / ^\circ \text{C}$	$5,9 \cdot 10^{-6} / ^\circ \text{C}$	$5,9 \cdot 10^{-6} / ^\circ \text{C}$
chaleur spécifi- que (25°C)	5,976 cal/ mole/°C	6,00 cal/ mole/°C	6,39 cal/ mole/°C

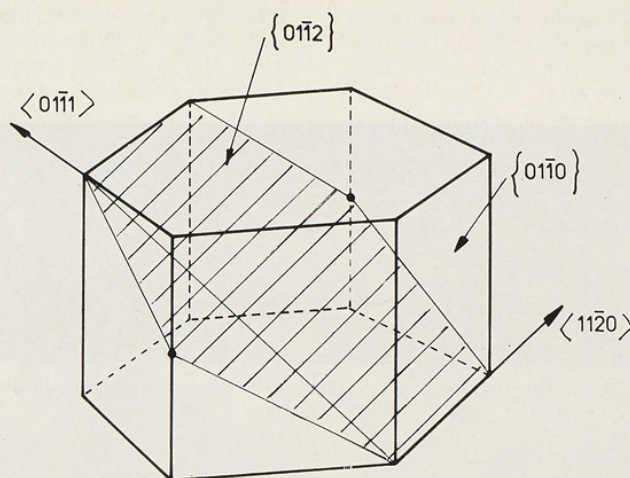


Fig. 4. — Plans de glissement ($10\bar{1}0$) et plan de macle ($10\bar{1}2$) des métaux du groupe IV_A.

De la pluralité de ces modes de déformation, résulte une très grande plasticité, supérieure à celle présentée par les autres métaux hexagonaux courants, tels que le zinc ou le magnésium. M. Brehm (11), au laboratoire de Vitry, a étudié la cristallographie de la déformation plastique de monocristaux de titane. La figure 5, extraite de son étude, est une macrographie d'un monocristal déformé par traction. La déformation dans ce cas s'est effectuée uniquement par glissement prismatique (en glissement simple) et a permis un taux d'allongement important de 40 % à la température ambiante.

La figure 6 donne la variation de la contrainte critique de cisaillement pour le glissement prismatique du titane, en fonction de la température, dans le domaine 77 K (température de l'azote liquide) et 200 °C. Les deux courbes sont relatives à deux nuances de titane différentes (titanes électrolytiques, refondus par bombardement d'électrons). La courbe inférieure est relative à la nuance la plus pure : la décroissance de la contrainte critique de cisaillement est beaucoup moins marquée dans le cas

du matériau le plus pur. L'une des conclusions de l'étude de M. Brehm (11) est que la mobilité des dislocations associée au glissement prismatique est essentiellement contrôlée par les interactions entre dislocations et impuretés, et plus précisément les atomes étrangers en insertion tels que l'oxygène, l'azote, le carbone.

D'une manière générale, ces éléments ont une influence très marquée sur les caractéristiques des métaux du groupe IV_A. Ils augmentent très nettement la dureté, la limite élastique, la charge à la rupture et entraîne une diminution simultanée de la ductilité (allongement à la rupture). Aussi, dans la pratique, on cherche à maintenir les teneurs en ces éléments à un niveau suffisamment bas.

La déformation plastique peut mettre en jeu simultanément les différents modes de glissement et maclage. La compétition entre glissement et maclage dépend de l'orientation des cristaux, de la pureté du matériau, de la température, du type de déformation : le maclage joue un rôle d'autant plus important que la température est plus basse,

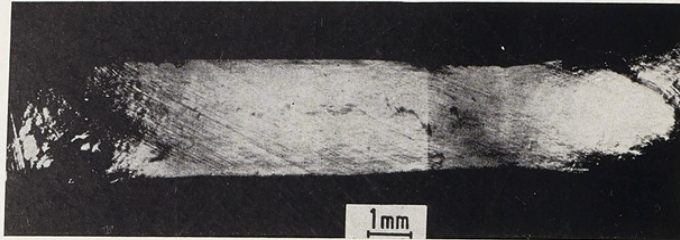


FIG. 5. — Epreuve monocristalline de titane, allongée de 40 % par traction (repère : 1 mm).

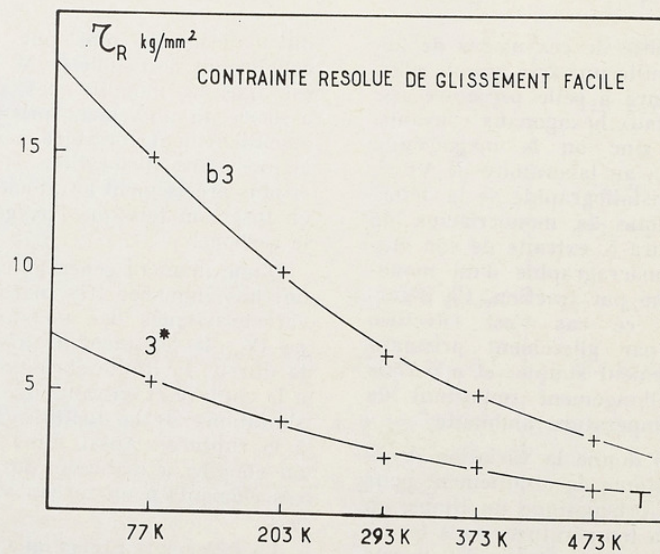


FIG. 6. — Variation de la contrainte critique de cisaillement pour le glissement prismatique du titane en fonction de la température (la courbe inférieure est relative à un titane de pureté plus élevée).

que le matériau est moins pur. La contribution du maillage est plus importante dans le cas du titane que dans le cas du zirconium. Elle est également plus importante, dans le cas d'une

déformation complexe, telle que le laminage, que dans le cas d'une déformation sous contrainte uniaxiale telle que la traction. Ces faits sont illustrés par les micrographies des figures 7, 8 et 9.



FIG. 7. — Zirconium déformé de 20 % par traction à température ambiante (repère de 100 μ).



FIG. 8. — Titane déformé de 35 % par traction à température ambiante (repère de 100 μ) (lumière polarisée).



Fig. 9. — Titane déformé par laminage à température ambiante (réduction de section de 26 %) repère de 100 μ (lumière polarisée).

La figure 7 est relative à du zirconium Van Arkel déformé de 20 % par traction à la température ambiante (éprouvette prélevée, parallèlement à la direction de laminage, dans une tôle laminée, recuite). La déformation s'est effectuée par glissement prismatique : le maillage est pratiquement inexistant.

Par contre, dans le cas du titane (fig. 8), allongé de 35 % par traction, on note une contribution importante du maillage. A titre de comparaison, la figure 9 donne l'aspect du titane laminé, à un taux d'écrouissage comparable. La structure du métal est beaucoup plus altérée dans ce dernier cas.

Une des caractéristiques de ces trois métaux est qu'ils demeurent encore remarquablement ductiles aux très basses températures (domaine de l'azote liquide). Ils ne présentent pas de phénomène de fragilité aux basses températures, ce qui est intéressant pour des utilisations éventuelles de ces matériaux dans les techniques cryogéniques.

Les figures 10 et 11 donnent la variation de la limite élastique σ_0 , de la contrainte σ_s correspondant au début de la striction et de l'allongement ratio-

nel à la striction ϵ_s , en fonction de la température, pour du titane et du zirconium polycristallins. Il s'agit ici de matériaux de pureté élevée : titane électrolytique refondu par bombardement d'électrons, zirconium affiné par le procédé Van Arkel. Les valeurs des contraintes ici présentées (limite élastique et charge à la striction) sont plus basses que celles que l'on observe dans le cas de matériaux de pureté commerciale.

On notera, en particulier, que la limite élastique est beaucoup moins affectée par la variation de la température que ne l'est la contrainte au début de striction. On notera également que la ductilité (représentée par l'allongement au début de striction) a sensiblement la même valeur à la température de l'azote liquide (77 K) et à la température ambiante, dans le cas du zirconium. La ductilité est plus élevée (de l'ordre de 25 %) à basses températures qu'à température ambiante pour le titane.

Ces propriétés mécaniques ont été déterminées sur des tôles laminées et recuites. Les courbes indiquent les valeurs selon la direction de laminage (DL) et la direction transverse (DT).

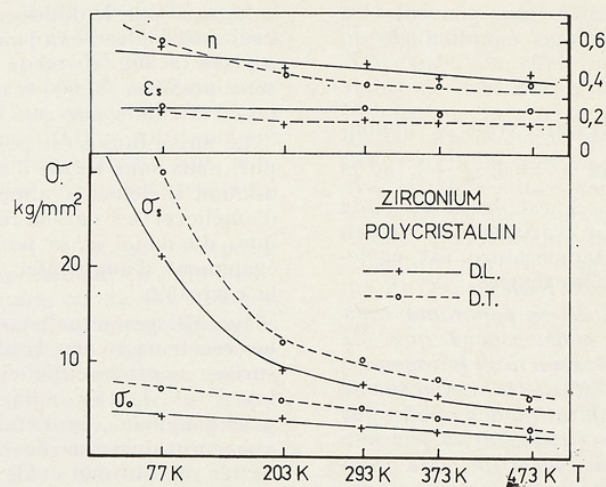


FIG. 10. — Variation des paramètres caractérisant la déformation plastique du zirconium en fonction de la température.

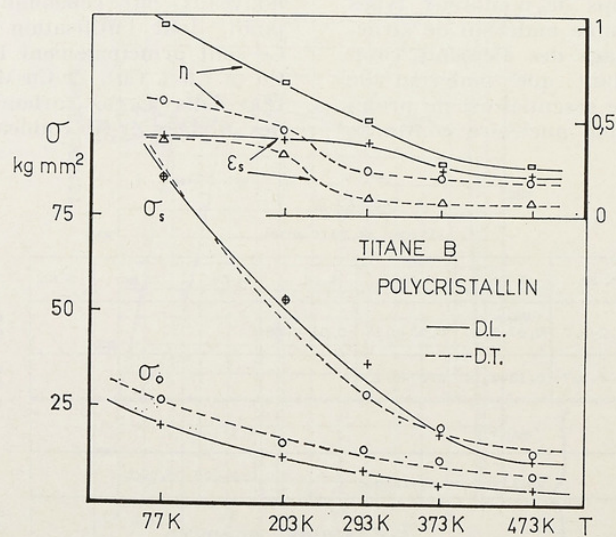


FIG. 11. — Variation des paramètres caractérisant la déformation plastique du titane en fonction de la température.

Les courbes de traction peuvent être représentées par une équation de la forme :

$$\sigma = \sigma_0 + K \varepsilon^n$$

où σ est la contrainte vraie, ε l'allongement rationnel ($\varepsilon = \log \frac{L}{L_0}$), σ_0 la limite élastique, n est le facteur de consolidation. La variation de n en fonction de la température est également donnée sur les figures.

En conclusion de ce panorama rapidement brossé, nous voyons que ces trois métaux, de structure hexagonale, présentent une plasticité remarquable du fait de la pluralité des modes de déformation, par glissement et par macleage et qu'ils conservent une très grande ductilité, même aux très basses températures.

V. — APPLICATIONS NUCLEAIRES DU ZIRCONIUM ET DE SES ALLIAGES. RESISTANCE A LA CORROSION.

Les applications actuelles du zirconium sont essentiellement nucléaires. Il est utilisé dans de nombreux types de réacteurs comme matériau de structure et de gainage des éléments combustibles. En tant que matériau de gainage, son rôle essentiel est de protéger le combustible nucléaire contre la

corrosion par le fluide caloporteur utilisé, c'est-à-dire l'eau bouillante ou pressurisée (à 300 °C) ou le gaz carbonique sous pression (à 600 °C) dans les réacteurs refroidis par gaz.

Le zirconium n'est pas utilisé à l'état pur, mais sous forme d'alliages. L'introduction d'éléments alliants a pour but d'améliorer les caractéristiques mécaniques du métal et sa tenue au fluage et également d'augmenter sa résistance à la corrosion.

Les alliages actuellement utilisés dans les réacteurs à eau bouillante ou pressurisée sont essentiellement les zircaloy 2 et 4. Ces alliages contiennent principalement de l'étain (élément alphagène) ainsi que de faibles quantités de fer, de chrome et de nickel (tableau IV).

Un nombre considérable de recherches ont été entreprises, tant à caractère fondamental qu'à caractère plus technologique, afin de mettre au point des alliages présentant des performances supérieures du point de vue de leur résistance à la corrosion. Mais le résultat de ces études est somme toute relativement décevant. Quelques alliages nouveaux ont cependant été mis au point, dont l'utilisation est envisagée. Ce sont principalement les alliages Zr-Cu (à 1,6 % Cu), Zr-Cu-Mo pour utilisation dans le gaz carbonique ainsi que des alliages Zr-Nb (tableau IV).

TABLEAU IV

Alliages de zirconium

Types	% Sn	% Fe	% Cr	% Ni	% Cu	% Mo	% Nb
Zircaloy 2	1,2-1,7	0,07-0,20	0,05-0,15	0,03-0,08			
Zircaloy 4	1,2-1,7	0,18-0,24	0,07-0,13				
Zr-Cu 1,6	utilisation envisagée				1,4-1,8		
Zr-Cu-Mo					0,4-0,6	0,5-0,6	
Zr-Nb 1						1 %	
Zr-Nb 2,5						2,5 %	

eau bouillante
ou pressuriséeeau bouillante
ou pressuriséeCO₂CO₂eau bouillante
ou pressuriséeeau bouillante
ou pressurisée

Pour des applications nucléaires, il est bien évident que les éléments d'addition doivent posséder des sections d'absorption des neutrons suffisamment faibles, ou tout au moins d'être à des niveaux de concentration suffisamment bas, afin que la transparence aux neutrons de l'alliage n'en soit pas trop affectée.

Mon propos, ici, n'est pas d'exposer en détail le comportement en milieu corrosif du zirconium ou de ses alliages, mais de dégager simplement quelques aspects fondamentaux des processus mis en jeu. En effet, quel que soit le milieu corrosif envisagé (air, oxygène, gaz carbonique, eau...), le processus principal est l'oxydation du zirconium (12) (13) (14) (15) (20) (21) (22).

Si l'on considère le diagramme d'équilibre du système Zr-O (fig. 12), le pro-

blème de l'oxydation du zirconium peut apparaître assez simple à première vue. Il n'existe, en effet, qu'un seul oxyde stable de zirconium, la zircone ZrO_2 . Notons que la zircone peut exister sur un certain domaine de concentrations. Cet écart à la stœchiométrie, qui croît avec la température, correspond à l'existence de lacunes d'oxygène au sein du réseau monoclinique de la zircone.

D'autre part, le diagramme du système Zr-O (comme d'ailleurs les diagrammes des systèmes homologues Ti-O et Hf-O) est caractérisé par l'existence d'une solubilité importante de l'oxygène, dans le zirconium à l'état solide. La solubilité en phase α atteint 29 at %. Il s'agit d'une solution solide d'insertion, les atomes d'oxygène se distribuant parmi les sites octaédriques du réseau hexagonal compact. Cette distribution ne se fait pas obligatoirement au hasard

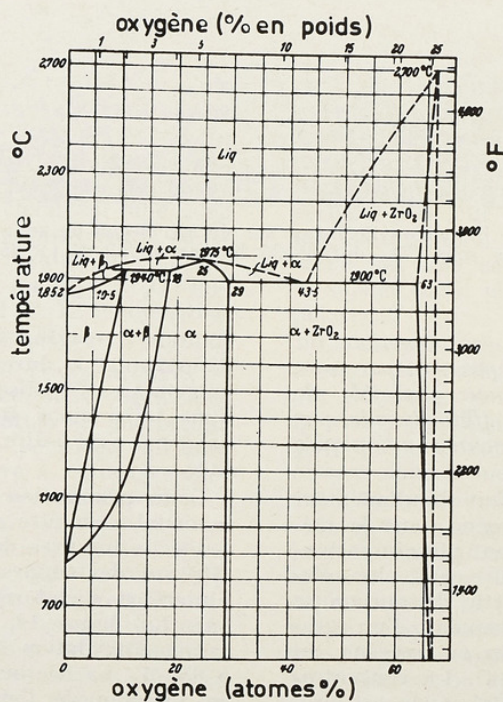


FIG. 12. — Diagramme d'équilibre du système Zr-O.

et certaines surstructures ou arrangements ordonnés se manifestent pour certaines compositions comme l'a montré en particulier M. A. Dubertret (16). La solubilité de l'oxygène est plus élevée en phase α que dans la structure β cubique centrée. L'oxygène stabilise donc la phase α . C'est un élément alphagène.

En conformité avec ces déductions

tirées de l'observation du diagramme d'équilibre, on constate, au cours de l'oxydation du zirconium, la formation à la surface du métal d'un film de zirconone monoclinique, dont l'épaisseur croît en fonction du temps. Ce film d'aspect noir bleuté est très adhérent durant le premier stade de l'oxydation (fig. 13). Bien que la cinétique de l'oxy-

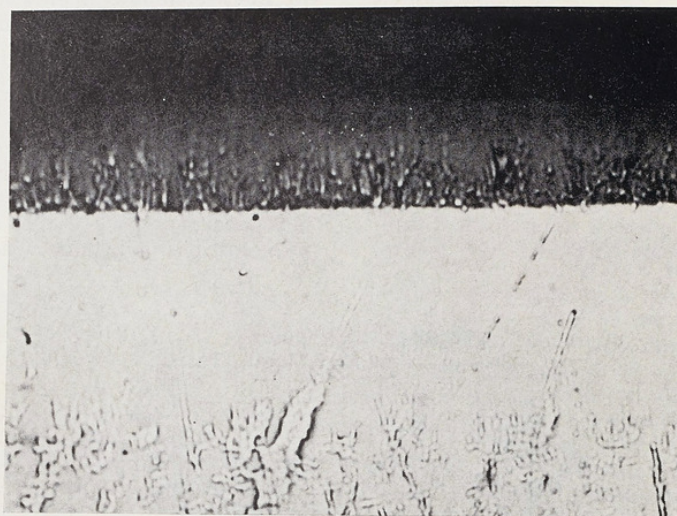


Fig. 13. — Film d'oxyde formé sur du zirconium de zone fondue, oxydé sous CO_2 , durant 35 heures à 750°C ($\times 350$).

dation se ralentisse en fonction du temps, l'oxydation se poursuit par suite de la diffusion toujours possible de l'oxygène à travers le film d'oxyde, par l'intermédiaire des lacunes anioniques d'oxygène.

En outre, il se produit simultanément une dissolution d'oxygène dans le métal sous-jacent, d'autant plus importante que la température est plus élevée (12) (17) (18). Cette dissolution se traduit par l'établissement d'un gradient de concentration en oxygène, au sein du métal (fig. 14). La concentration à l'interface métal-oxyde est proche de la concentration à saturation, c'est-à-dire environ 29 at. %. Cette dis-

solution d'oxygène a pour conséquence d'augmenter la dureté du métal et peut entraîner sa fragilisation, tout au moins dans les régions très contaminées en oxygène, c'est-à-dire proches de l'interface.

Cette pénétration de l'oxygène dans le métal peut être mise en évidence à l'aide de mesures de microduretés (12) (18) sur des coupes perpendiculaires à l'interface métal-oxyde (exemple : fig. 14). La figure 14 est relative à des essais d'oxydation (sous oxygène pur) à 850°C . La décroissance de la dureté en fonction de l'abscisse x_2 s'effectue par paliers : le palier de dureté de 800 Kg/mm^2 observable à proximité de

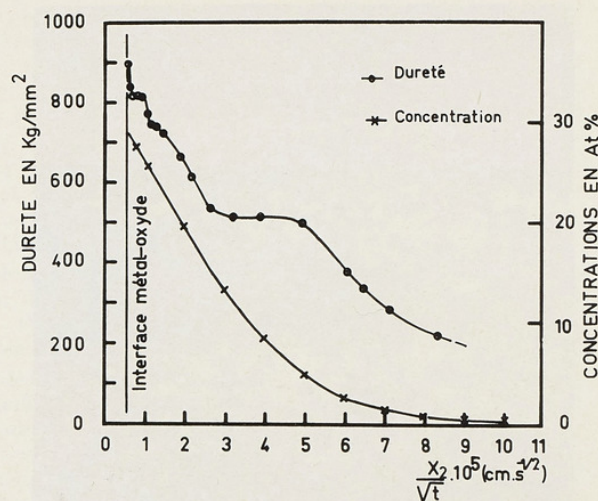


FIG. 14. — Variation de la microdureté Vickers et de la concentration en oxygène en fonction de la distance à l'interface métal-oxyde (oxydation du zirconium à 850 °C).

l'interface métal-oxyde, s'étend sur une zone où la concentration varie entre 27,5 et 25 at. % d'oxygène. Il est en relation avec l'établissement d'une surstructure Zr_3O . Le palier de dureté de 500 Kg/mm² qui s'étend sur une zone où la concentration varie entre 15 et 7 at. % d'oxygène résulterait d'un arrangement ordonné du type Zr_6O (formule correspondant à la composition 14,3 at. % d'oxygène) (16).

Cette diffusion de l'oxygène vers le cœur du métal peut être également visualisée à l'observation au microscope optique, en lumière polarisée, sur une coupe perpendiculaire à l'interface métal-oxyde et polie mécaniquement (15). La micrographie (fig. 15) relative à un alliage de zirconium à 0,5 % de cuivre, oxydé 91 heures à 750 °C sous CO_2 , montre à l'examen en lumière polarisée un évanouissement progressif du contraste entre les cristaux de l'alliage. En effet, les régions métalliques proches de la couche d'oxyde, donc riches en oxygène, possèdent une dureté élevée et ne s'écaillent pas au cours du

polissage mécanique : en lumière polarisée, le contraste entre cristaux d'orientations différentes est alors très marqué. Par contre, les zones à teneurs plus faibles en oxygène conservent une certaine plasticité, le polissage entraîne une perturbation de la structure du métal sur une certaine profondeur et la surface n'est plus active en lumière polarisée.

La corrosion du zirconium et de ses alliages en milieu oxydant (oxygène, air, CO_2 , eau) se traduit donc par un gain de masse dû à l'absorption de l'oxygène qui se retrouve en partie à l'état dissous dans le métal, en partie à l'état combiné au sein de la zircone.

Le gain de masse par unité de surface, m , en mg/cm² peut être représenté pour chaque température par une expression de la forme $m^n = Kt$, où t est le temps exprimé en heures et K une constante appelée constante de vitesse. La valeur de l'exposant n est de l'ordre de 2,3 [oxydation dans l'oxygène pur (12) (13)], de 2,5 à 2,6 [oxydation par le gaz carbonique (14)]. Le phéno-

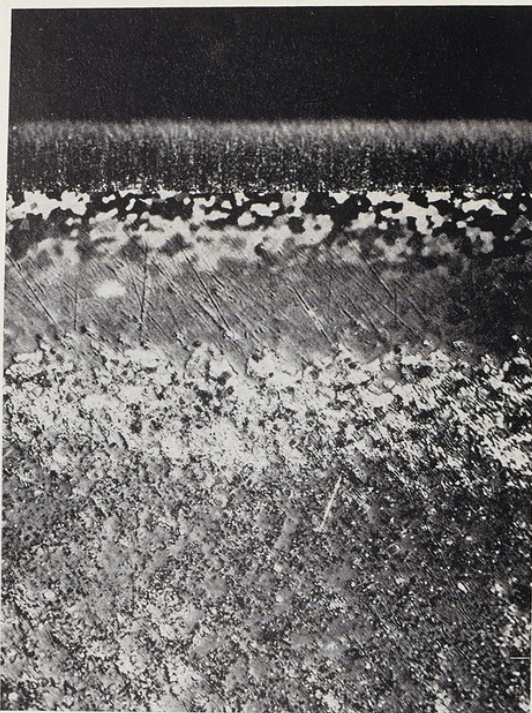


FIG. 15. — Section d'un alliage Zr-Cu 0,5 % oxydé 91 heures à 750 °C sous CO_2 ($\times 250$).

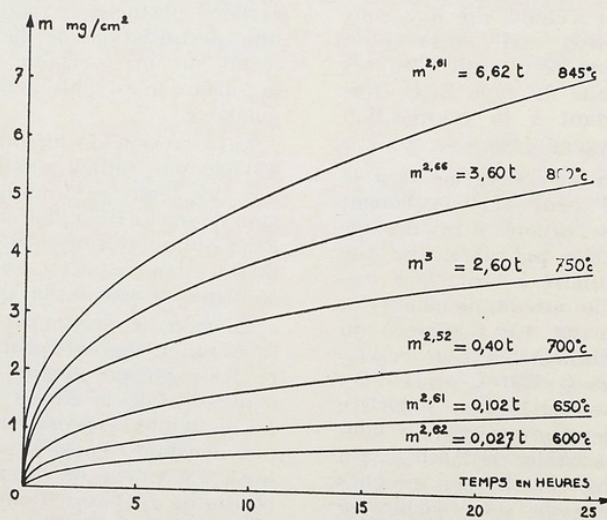


FIG. 16. — Cinétique d'oxydation par le gaz carbonique du zirconium non allié.

mène suit une cinétique intermédiaire entre celles correspondant à une loi parabolique ($n = 2$) ou à une loi cubique ($n = 3$). La constante K obéit à une équation du type Arrhénius :

$K = K_0 \exp \left(\frac{-q}{RT} \right)$ où T est la température absolue et q une chaleur d'activation qui caractérise le phénomène global de l'oxydation.

La figure 16 donne, à titre d'exemple, la cinétique de l'oxydation du zirconium non allié, sous gaz carbonique à pression atmosphérique.

La cinétique de l'oxydation se ralentit donc en fonction du temps. Mais ceci n'est vrai que tant que l'oxyde initialement formé reste adhérent et par suite partiellement protecteur. Durant ce stade initial, la cinétique de la corrosion est contrôlée par la diffusion de l'oxygène à travers le film d'oxyde et par la vitesse de dissolution de l'oxygène dans le métal sous-jacent.

Mais au bout d'un certain temps, d'autant plus long que la température est plus basse (de l'ordre de 1 000 h à 700 °C) intervient un changement dans la cinétique de l'oxydation, lié à la desquamation de l'oxyde superficiel. Celui-ci s'écaille, devient blanc, cesse d'être protecteur et l'oxydation se poursuit d'une manière accélérée selon une cinétique linéaire.

L'origine de ce phénomène de desquamation n'est encore que partiellement comprise à l'heure actuelle (cf. 19), mais nous devons rappeler que le volume molaire de la zircone est supérieur au volume atomique du zirconium. Le rapport de Pilling et Bedworth est de 1,5. La transformation du métal en oxyde monoclinique s'accompagne ainsi d'une dilatation relative en volume $\frac{\Delta V}{V} = 50 \%$. Il en résulte la création de contraintes considérables à l'interface métal-oxyde. Le métal se trouve sous tension, l'oxyde sous compression. Le relâchement de ces contraintes conduit à une fissuration de l'oxyde et, par suite, à sa desquamation. Les propriétés mécaniques des deux phases en

présence constituent certainement un facteur prépondérant, influant l'initiation de la desquamation. La dissolution progressive d'oxygène dans le métal sous-jacent altère sa plasticité, le fragilise et le rend ainsi incapable à relâcher par fluage les contraintes mécaniques à l'interface (12).

La corrosion du zirconium dans l'oxygène pur ou dans le gaz carbonique est similaire. Les gains de masse observés dans les deux cas sont très voisins. En effet, le gaz carbonique se trouve réduit à l'état d'oxyde de carbone et la réaction ne s'accompagne pratiquement pas de dépôt de carbone (14).

Par contre, le comportement dans l'eau bouillante ou la vapeur d'eau du zirconium et de ses alliages est assez différent, bien que là encore, il s'agisse en premier lieu d'une oxydation (22). Il se forme en effet une couche superficielle de zircone, adhérente et protectrice durant les premiers temps de la réaction, mais qui finit également par se desquamer, ce qui conduit à une cinétique d'oxydation accélérée et linéaire. Mais l'une des différences essentielles réside dans l'absorption partielle de l'hydrogène libéré par la réduction de l'eau et dans sa dissolution au sein du métal sous-jacent.

Durant la période initiale de corrosion, c'est-à-dire avant la desquamation, la proportion d'hydrogène absorbé reste sensiblement constante. Elle correspond à environ 10 % de l'hydrogène libéré par la décomposition de l'eau. Lorsque le film cesse d'être protecteur, la proportion d'hydrogène absorbé est notablement augmentée : elle atteint une valeur de l'ordre de 50 %.

La différence entre les comportements dans l'eau et dans le gaz carbonique des alliages de zirconium est très nette, bien qu'assez mal comprise : c'est ainsi que certains alliages ont une excellente tenue à la corrosion dans l'eau (c'est le cas des zircalloys) alors qu'en milieu sec (CO_2 par exemple), leur oxydabilité est catastrophique. L'inverse se produit également. Les alliages de zirconium ont donc un emploi spécifique, selon le milieu corrosif.

Le rôle des éléments d'addition est de ralentir la cinétique d'oxydation, en particulier de retarder l'apparition du phénomène de desquamation et enfin, d'augmenter la résistance mécanique du métal.

Le comportement des éléments d'addition au cours de l'oxydation est gouverné en grande partie par leurs affinités pour l'oxygène :

— Lorsque l'élément d'addition possède une affinité assez faible pour l'oxygène, on observe une oxydation préférentielle et sélective du zirconium. L'élément d'addition tend à se concentrer dans l'alliage au voisinage de l'interface métal-oxyde. Il peut ainsi se créer, à proximité de l'interface, un liseré constitué par des composés intermétalliques. C'est le cas que l'on observe notamment dans le cas des alliages zirconium-cuivre (fig. 17) (alliage Zr-Cu 2,5 % oxydé 97 heures à 750 °C sous CO_2) ou zirconium-nickel. L'élément d'addition se retrouve également en partie noyé au sein de la couche de zircone sous forme de petits amas métalliques.

— Par contre, lorsque l'élément d'addition présente une affinité notable pour l'oxygène, comparable à celle du zirconium, on observe l'oxydation simultanée du zirconium et de l'élément d'addition. Ce dernier se retrouve à l'état oxydé, au sein de la couche d'oxyde, et dans une proportion comparable à sa concentration dans l'alliage. C'est le cas notamment des alliages zirconium-niobium et zirconium-molybdène. La figure 18 est relative à un alliage Zr-Nb 1 % oxydé 100 heures à 750 °C, sous gaz carbonique. On notera la fissuration importante de l'oxyde dont le caractère protecteur est faible.

Dans une étude systématique récente, MM. de Gelas et Lacombe (23) ont analysé l'influence de divers éléments d'addition tels que le Cu, Cr, Fe, Mo, Al, Nb et Sn sur la résistance du zirconium à l'oxydation dans l'oxygène ou le gaz carbonique. Selon la nature de l'élément introduit, on observe une diminu-

tion ou une augmentation de l'oxydabilité du zirconium. Mais aucun alliage n'apparaît beaucoup moins oxydable que le zirconium pur.

VI. — LES ALLIAGES DE TITANE (cf. 25 à 33).

Le titane peut être utilisé sous forme non allié, ou sous forme d'alliages.

A l'état non allié, le titane est caractérisé commercialement par différentes nuances, $T_{3,5}$, $T_{4,0}$, $T_{5,0}$, $T_{6,0}$, correspondant à des degrés de pureté décroissants. Les chiffres correspondent approximativement aux valeurs de la charge à la rupture exprimée en kg/mm^2 . Ces nuances se distinguent par le niveau de concentrations des impuretés présentes, notamment en oxygène, azote et carbone. Ces éléments augmentent la dureté, la résistance mécanique, mais au détriment de la plasticité.

Il existe, en outre, un nombre important d'alliages de titane qui se sont développés au cours des dernières années et sont commercialisés. Nous en donnerons un bref aperçu, en insistant sur les bases fondamentales qui régissent leur état structural et par suite leurs caractéristiques.

1) ÉLÉMENTS D'ADDITION.

Les éléments d'addition peuvent être classés en trois catégories principales :

a) Les éléments d'addition isomorphes du titane

Ce sont les éléments qui appartiennent au même groupe que le titane, c'est-à-dire le zirconium et le hafnium. Ils peuvent exister sous deux formes allotropiques, α de structure hexagonale compacte, β de structure cubique centrée. Leurs rayons atomiques sont voisins de ceux du titane et par suite ils donnent lieu avec le titane à une miscibilité complète dans l'état solide, aussi bien en phase α , qu'en phase β .

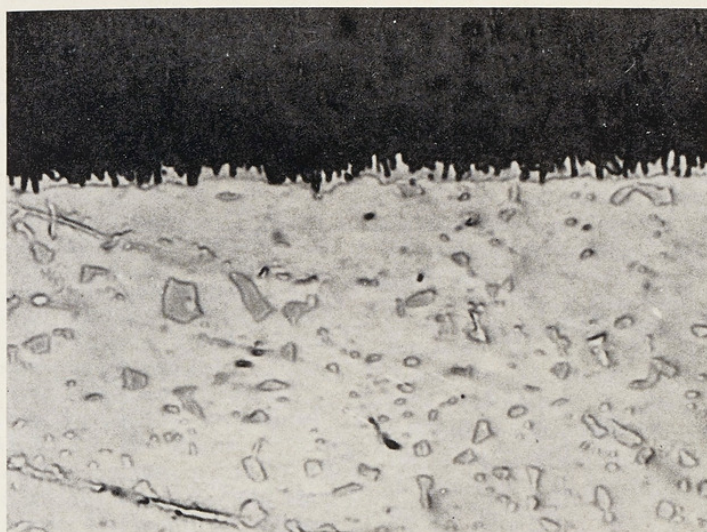


FIG. 17. — Interface métal-oxyde d'un alliage Zr-Cu à 2,5 % oxydé 97 heures à 750 °C sous CO_2 ($\times 600$).

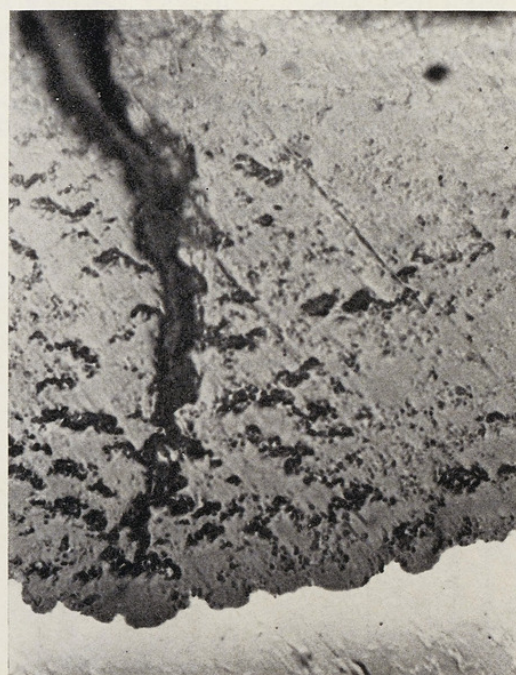


FIG. 18. — Interface métal-oxyde d'un alliage Zr-Nb 1 % oxydé sous CO_2 100 heures à 750 °C ($\times 800$).

Les diagrammes binaires sont du type présenté sur la figure 19.

b) *Les éléments alphagènes*

Ce sont les éléments qui présentent une solubilité importante dans le titane-

ne α et élèvent le point de transformation $\alpha \rightarrow \beta$.

Le diagramme d'équilibre est du type présenté sur la figure 20 : diagramme à péritectoïde.

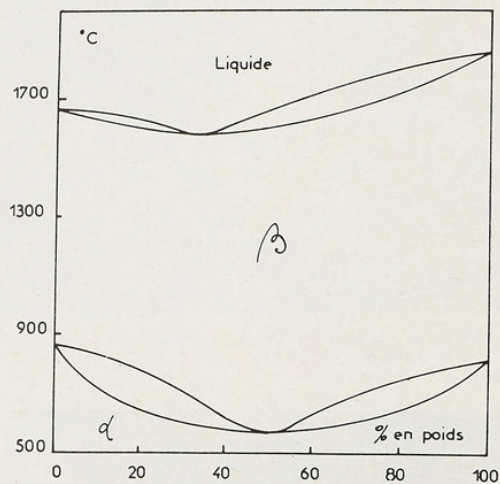


FIG. 19. — Eléments d'additions isomorphes du titane.

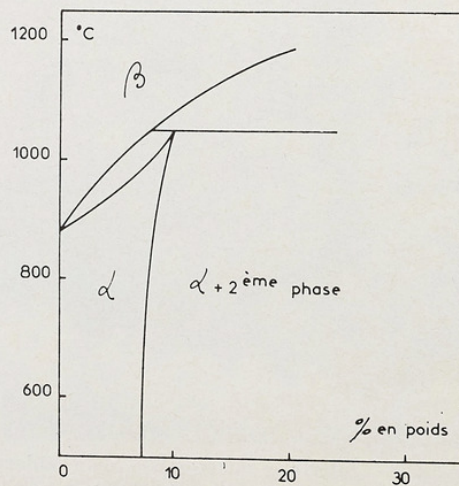


FIG. 20. — Eléments d'addition alphagènes.

Les éléments stabilisant la phase α sont assez peu nombreux. Ce sont principalement l'aluminium et l'étain. L'aluminium est, en fait, un élément d'addition qui entre dans la composition de tous les alliages de titane. Il stabilise la phase α et augmente la résistance mécanique à chaud des alliages de titane. Cependant, la plasticité à froid et à chaud diminuent lorsque la teneur en aluminium augmente. En pratique, la teneur en aluminium est limitée à une valeur maximale de 7 à 8 %, car il apparaît au-delà une fragilité due à la formation d'une phase ordonnée Ti_3Al . (L'aluminium et l'étain entrent conjointement dans la composition de l'alliage TA_5E (Ti-Al 5 % — Sn 2,5 %).

Les éléments métalloïdiques O, N, C sont également des éléments alphagènes. Ils forment des solutions solides d'insertion, en occupant les sites octaédriques du réseau α . Mais on ne peut les considérer, à proprement parler, comme des éléments d'alliages. Ce sont en fait des impuretés considérées comme indésirables à des teneurs supérieures à 0,20 % en poids pour l'oxygène, 0,10 % en poids pour l'azote, car ils engendrent la fragilité.

c) Les éléments bétagènes

Ils donnent lieu à une solubilité importante en phase β et sont des stabilisants β . On peut les classer en deux sous-groupes :

α) Les éléments isomorphes du titane β , qui cristallisent dans le système cubique centré et ont un rayon atomique proche de celui du titane β . Ils donnent lieu à une miscibilité complète en phase β à hautes températures. Le diagramme d'équilibre est du type de la figure 21. La phase β demeure stable à basses températures, voire à température ambiante si la teneur en élément d'addition est suffisamment élevée.

Les éléments bétagènes, isomorphes du titane β , sont les métaux réfractaires du groupe V_A (V, Nb, Ta) et du groupe VI (Mo, à l'exception, cependant, du tungstène).

β) Les éléments qui présentent une solubilité en phase β limitée, soit parce qu'ils donnent lieu à une démixion (diagramme binaire présentant un monotectode, cas du système titane-tungstène), soit parce qu'ils donnent naissance à des composés définis (diagramme à eutec-

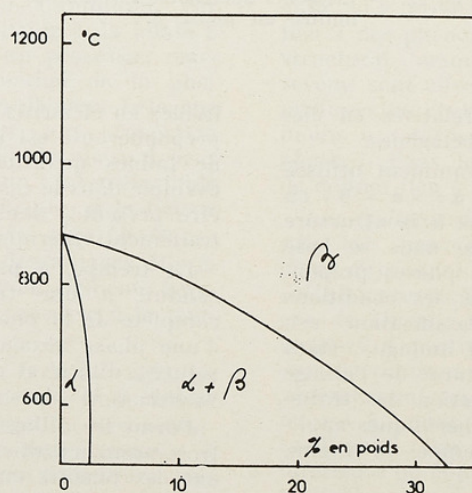


FIG. 21. — Eléments bétagènes, isomorphes du titane β .

toïde) (cas des éléments Fe-Cr-Ni-Co-Mn-Cu-Pb-Si) (fig. 22).

2) LES ALLIAGES COMMERCIAUX.

Les alliages utilisés en pratique sont en fait des alliages ternaires, voire quaternaires. Les principaux alliages sont présentés dans le tableau V.

Il entre dans leur composition l'aluminium en tant qu'élément alphagène, dont la teneur peut atteindre au maximum 8 % et des éléments bétagènes, notamment les éléments réfractaires des groupes V et VI.

Leur structure d'équilibre peut être soit α , soit biphasée $\alpha + \beta$, soit enfin β

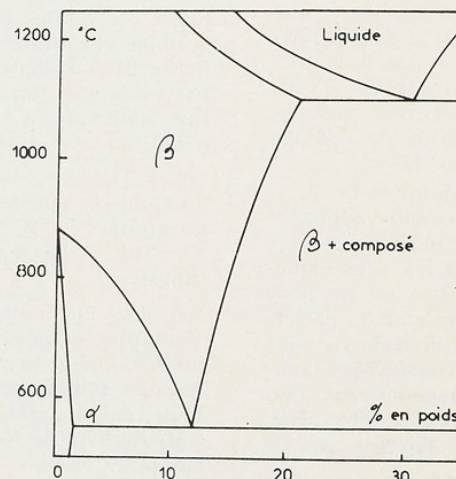


Fig. 22. — Eléments bétagènes, à solubilité limitée en phase β .

selon les proportions relatives en éléments alphagènes et bétagènes.

La classification couramment utilisée par les industriels, en « α » « $\alpha + \beta$ » ou « β » ne correspond pas à la structure d'équilibre des alliages, mais se base essentiellement sur les phases prépondérantes, existant dans les conditions d'utilisation. Cette classification est, par suite, quelque peu ambiguë, étant donné que l'état structural de l'alliage est essentiellement fonction des traitements mécaniques ou thermiques appliqués (traitements de trempe, de revenu, etc.).

Les alliages dits « α » possèdent des teneurs élevées en éléments alphagènes tels que l'aluminium (voire l'étain) et

faibles en éléments bétagènes. La phase prépondérante est la phase α , bien que de faibles quantités de phase β (par exemple dans le cas du TA₈DV) peuvent être présentes dans le cas de certains traitements thermiques.

La trempe, à partir du domaine β , conduit à une transformation quasi complète de la phase β avec formation d'une phase hexagonale compacte, sursaturée, dite α' et de composition équivalente à la phase β de départ.

Parmi les alliages dits « $\alpha + \beta$ », les trois premiers alliages cités (tableau V) ont des teneurs en éléments bétagènes de l'ordre de 4 %, la teneur en aluminium pouvant atteindre 7 %. Pour les trois derniers alliages cités, la teneur

TABLEAU V

Classification courante des principaux alliages de titane

Type	Désignation	Composition
"α"	TA ₅ E	Ti-Al 5 % - Sn 2,5 %
	TA ₈ Nb ₂ Ta	Ti-Al 8 % - Nb 2 % - Ta 1 %
	TA ₈ DV	Ti-Al 8 % - Mo 1 % - V 1 %
"α + β"	TA ₄ M	Ti-Al 4 % - Mn 4 %
	TA ₆ V	Ti-Al 6 % - V 4 %
	TA ₇ D	Ti-Al 7 % - Mo 4 %
	TA ₄ D3V	Ti-Al 4 % - Mo 3 % - V 1 %
	TD ₆ A	Ti-Mo 6 % - Al 3 %
	TV ₁₆ A	Ti-V 16 % - Al 2,5 %
"β"	TV ₁₃ CA	Ti-V 13 % - Cr 11 % - Al 3 %

en éléments bêtagènes augmente jusqu'à 16 %, avec une diminution simultanée de la teneur en aluminium. Par trempe depuis le domaine β, la phase β se décompose selon un processus martensitique avec formation de la phase α', si la teneur en élément bêtagène est faible. Par contre, une proportion plus ou moins notable de phase β peut être conservée dans un état métastable à la température ambiante, si la teneur en élément bêtagène est plus élevée.

Enfin, dans le cas des alliages dits β, à teneurs très élevées en éléments bêtagènes, la phase β se conserve à la température ambiante.

Remarque : Pour certains alliages, contenant des quantités importantes d'éléments de transition, la décomposition de la phase β peut conduire à l'apparition d'une phase transitoire, métastable, dite « ω », que l'on observe dans des alliages à base de titane et de zirconium. La formation de la phase

ω s'accompagne d'une augmentation très notable de la dureté et entraîne la fragilité. La présence de phase ω donne lieu à des phénomènes de durcissement structural lorsque des traitements de revenu sont effectués après trempe. En pratique, on cherche à éviter ou tout au moins à retarder l'apparition de cette phase ω, dans les alliages susceptibles de donner lieu à sa formation.

Les traitements thermiques ont donc une très grande importance, puisque d'eux dépendent l'état structural et par suite les propriétés mécaniques des alliages de titane : On peut effectuer des trempes à partir du domaine β, mais dans la pratique industrielle on préfère généralement des recuits dans le domaine α + β, suivis d'une trempe et éventuellement d'un revenu à température inférieure ou supérieure au palier eutectoïdique.

Notre but était de broser assez rapidement le panorama des principaux

alliages de titane et les bases fondamentales sur lesquelles reposent leurs traitements thermiques. Pour des informations plus détaillées, on se reportera aux articles spécialisés (29), (30), (31), (32), (33), et nous signalerons plus particulièrement les mises au point effectuées par MM. Saulnier et Dévelay (29) et plus récemment par M. Séraphin (32).

APPLICATION DES ALLIAGES DE TITANE (cf. 32).

Les utilisations principales de titane et de ses alliages résultent de leur légèreté relative (densité de l'ordre de 4,5). Ils trouvent donc une application spécifique dans les domaines de l'aéronautique et de l'espace, où la limitation du poids est un impératif.

Les alliages de titane présentent une très bonne tenue mécanique à chaud (26). Si l'on prend comme critère la résistance spécifique à la traction (ou rapport de la charge de rupture à la densité R/d), on constate en effet qu'au-dessus de 200 °C, les alliages de titane sont nettement plus intéressants que les alliages d'aluminium et que, comparativement aux aciers, ils se placent d'une manière tout à fait honorable.

Soixante-dix pour cent des utilisations du titane concernent le domaine de l'aéronautique (50 % pour les réacteurs et 20 % pour les cellules).

Le titane est largement employé, en tant que matériau constitutif dans le réacteur Pratt et Whitney JT 9 qui équipe l'avion géant subsonique, le « Boeing 747 ». Le titane est également utilisé dans le réacteur « Olympus 593 » de 15 900 kg de poussée qui équipe le « Concorde » : à la vitesse de croisière normale du « Concorde » (2 160 km/h), soit un peu plus de « Mach 2 », l'air à l'entrée des compresseurs se trouve à une température d'environ 125 °C. Sortant de deux compresseurs axiaux, lorsqu'il pénètre dans la chambre de combustion, il est déjà à plus de 600 °C avant même qu'aucun combustible ne soit brûlé. Sous forme de divers alliages,

le titane est utilisé dans les premiers étages de compression.

Pour les cellules d'avion, le titane trouve un emploi classique où, en plus de l'allègement, le point de fusion élevé de ce métal est pris en considération. A la vitesse de « Mach 2 », l'échauffement cinétique est de 120 °C, ce qui pose déjà des problèmes considérables d'alliages et nous rappellerons, à ce titre, que la cellule du « Concorde » est en alliage léger AU₂GN. Mais à la vitesse de « Mach 3 », l'échauffement cinétique atteindrait 240 °C. Pour les éléments constitutifs d'un avion trisonique, l'emploi d'alliages à base de titane deviendrait une nécessité.

Vingt pour cent des applications du titane concernent le domaine de l'espace. Il est utilisé dans les fusées et satellites et en particulier pour la fabrication de réservoirs cryogéniques pour gaz liquéfiés et de réservoirs à propergols liquides. C'est ainsi que l'ensemble « Saturne-Apollo » qui a permis les vols circumlunaires et l'atterrissage des premiers hommes sur la lune comportait plus de 7 tonnes de produits en titane.

Outre l'utilisation spectaculaire du titane dans ces domaines de pointe, un autre champ d'application du titane résulte de son excellente tenue à la corrosion dans certains milieux (eau de mer, milieux contenant des chlorures, hypochlorites, sulfures, sulfates, composés chlorés, ainsi qu'aux acides oxydants tels que l'acide nitrique). Cette résistance à la corrosion due à la formation d'un film passif protecteur dans les milieux oxydants lui ouvre des débouchés intéressants dans l'industrie chimique. Mais, compte tenu du prix de revient encore relativement élevé de ce métal, ce domaine d'application ne représente qu'environ 10 % de la production du titane.

En conclusion, nous avons cherché, dans notre exposé, à esquisser un panorama de la métallurgie, des propriétés et des applications de ces métaux nouveaux que sont le titane, le zirconium et le hafnium.

Le développement de la métallurgie de ces métaux résulte des besoins croissants de l'industrie nucléaire, de l'industrie aéronautique et spatiale. Ce sont des métaux nouveaux, mais également des métaux d'avenir : outre les applications que nous avons présentées et qui concernent évidemment des domaines de pointe, ces métaux devraient trouver également leur emploi dans des domaines beaucoup plus classiques. C'est ainsi que le titane devrait être employé sur une échelle beaucoup plus large dans l'indus-

trie chimique, compte tenu de sa remarquable résistance à la corrosion. Il est vrai que le prix de revient de ces matériaux est encore élevé. Mais ce prix est une fonction de la demande et des quantités produites. Au cours de ces dernières années, le prix de ces métaux a déjà notablement diminué.

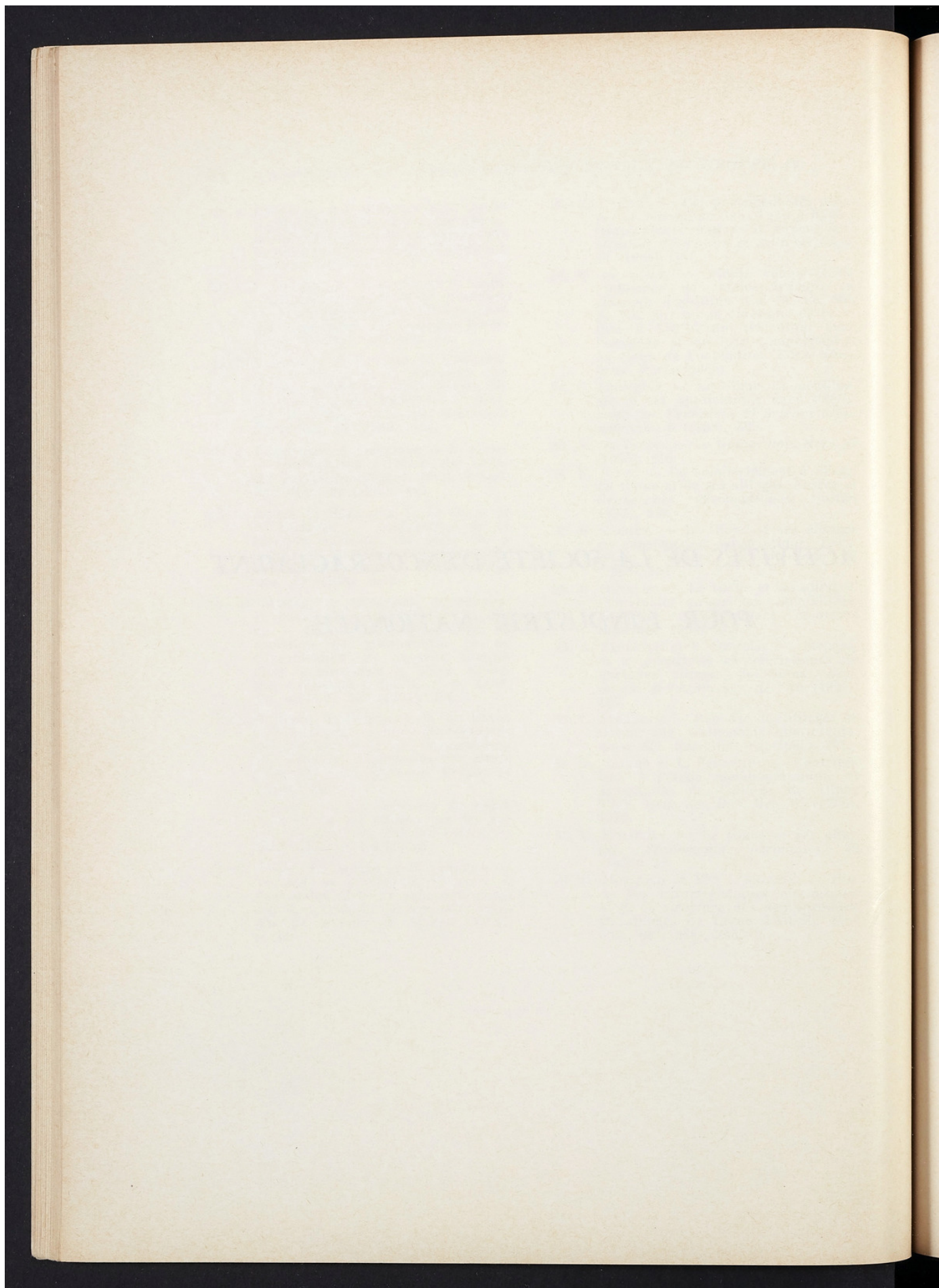
On peut espérer que le titane, en particulier, occupe dans l'avenir la place qui, compte tenu de son abondance à l'état naturel, lui reviendrait de droit parmi les autres métaux courants.

Bibliographie

1. P. PASCAL. — *Nouveau traité de Chimie minérale*, tome IX (Masson) (1963).
2. J. HERENGUEL. — Le zirconium et ses alliages. *Métallurgie Spéciale*, tome III (Bibliothèque des Sciences et Techniques Nucléaires) (1962).
3. M. ARMAND. — Hafnium et Zirconium et leurs applications nucléaires. *Revue Electro-nucléaire*.
4. Y. MICHAUD. — Le zirconium et ses alliages, *Revue « Arts et Manufactures »*, n° 163 (avril 1966).
5. M. ARMAND. — « Les alliages de zirconium et leurs transformations », IX^e Colloque de Métallurgie (1965), Presses Univ. de France, p. 107.
6. P. LEHR et Ph. ALBERT. — La fusion par bombardement électronique et ses applications et métallurgie. *Rev. Hautes Températures et Réfractaires*, 2 (1965), 31.
7. G. GOSSE. — Application du four à bombardement électronique à l'étude physico-chimique de la purification et de l'élaboration du zirconium et du hafnium. *Thèse Doctorat*, Paris (1968).
8. G. GOSSE, P. LEHR et Ph. ALBERT. — Etude des cinétiques et des mécanismes d'évaporation au cours de la fusion d'alliages Zr-O et Zr-Si au four à bombardement électronique. *Rev. Int. Hautes Températures et Réfractaires*, 5 (1968), 299.
9. M. ARMAND, J.-P. GIVORD, M. SALMON et P. TORTIL. — Influences des conditions d'élaboration du hafnium sur ses propriétés mécaniques et sa résistance à la corrosion. *Rev. Mét.*, 5 (1966), 415.
10. J.-P. LANGERON. — Application de la méthode de fusion de zone à la purification du zirconium et étude de certaines propriétés de ce métal. *Thèse Doctorat*, Paris (1964) (*Annales de Chimie*, 1965).
11. C. BREHM. — Contribution à l'étude de la déformation plastique du titane et du zirconium. *Thèse Doctorat*, Paris (1970).
12. J. DEBUIGNE. — Contribution à l'étude de l'oxydation du zirconium et de la diffusion de l'oxygène dans l'oxyde et le métal. *Thèse Doctorat*, Paris (1966), *Métaux, Corrosion, Industries*, nos 499, 501, 502 (1967).

13. J. DEBUIGNE, J.-P. GUERLET et P. LEHR. — Aspects fondamentaux des phénomènes d'oxydation du zirconium sous oxygène pur. *IX^e Colloque Métallurgie* (Saclay) (1965), p. 9.
14. J.-P. GUERLET, J. DEBUIGNE et P. LEHR. — Etude de l'oxydation du zirconium et de certains de ses alliages sous gaz carbonique. *IX^e Colloque Métallurgie* (Saclay) (1965), p. 27.
15. J.-P. GUERLET et P. LEHR. — Contribution à l'étude de la corrosion par le gaz carbonique des alliages de zirconium. *J. des Matériaux Nucléaires*, 28 (1968), 152. *J. des Matériaux Nucléaires*, 28 (1968), 165.
16. A. DUBERTRET, J. DEBUIGNE et P. LEHR. — Contribution à l'étude des alliages zirconium-oxygène. *Mém. Scient. Rev. Mét.*, 64 (1967), 895.
17. G. AMSEL, G. BÉRANGER, B. DE GELAS et P. LACOMBE. — Application de la réaction nucléaire $O^{16}(d,p)O^{17}$ à l'étude de la diffusion de l'oxygène dans le zirconium. *J. Applied Physics*, 39 (1968), 2246.
18. G. AMSEL, G. BÉRANGER, P. BOISOT, D. DAVID, B. DE GELAS et P. LACOMBE. — Comparaison des courbes de variation de microdureté et de concentration en oxygène dissous dans le zirconium α , après oxydation prolongée à 850 °C. *C.R. Acad. Sc.*, série C, 267 (1968), 301.
19. L. H. KEYS, G. BÉRANGER, B. DE GELAS et P. LACOMBE. — Etude micrographique du processus de desquamation au cours de l'oxydation du zirconium. *J. Less. Common Metals*, 14 (1968), 181.
20. R. DARRAS. — La corrosion du zirconium et de ses alliages par les gaz aux températures élevées. *Industries atomiques*, n° 1-2 (1963).
21. P. BAQUE, R. DARRAS et H. LORIER. — Alliages de zirconium résistant à l'oxydation dans le gaz carbonique aux températures élevées. *IX^e Colloque de Métallurgie*, Saclay (1965), p. 39.
22. H. CORIOU. — Comportement des alliages de zirconium dans l'eau à hautes températures et dans la vapeur surchauffée. *Corrosion et Anticorrosion*, 14 (1966), 351.
23. B. DE GELAS. — Etude comparée de l'influence de faibles teneurs en éléments d'addition (Cu, Cr, Fe, Mo, Al, Nb, Sn) sur la cinétique de réaction à 750 °C du zirconium avec l'oxygène et de leur comportement au cours de l'oxydation. *Thèse Doctorat*, Paris (1968).
24. R. CHEVIGNY. — Le titane, sa métallurgie et ses applications dans l'aéronautique, *Technique et Science aéronautique*, 6 (1953), 365.
25. R. DE VITRY. — Le titane. *Rev. Mét.*, 53 (1956), 915.
26. R. SYRE. — Le comportement à chaud du titane et de ses alliages. *Fusées et Recherches aéronautiques* (juillet 1957), 229.
27. P. VACHET. — Le titane et ses alliages en construction aéronautique. *Technique et Science Aéronautique*, 10 (1958), 221.
28. R. DEVELAY. — Le titane et ses alliages. Principales propriétés. Soudabilité. *Soudage et techniques connexes* (nov.-déc. 1960), 409.
29. A. SAULNIER et R. DEVELAY. — Structure et propriétés caractéristiques de quelques alliages de titane. *Bull. Scient. et Techn. Min. de l'Air* (1961), 127.
30. L. SÉRAPHIN. — Réponse des alliages de titane aux traitements thermiques. *Mém. Sci. Rev. Mét.*, 62 (1965), 291.
31. R. CASTRO et L. SÉRAPHIN. — Contribution à l'étude métallographique et structurale de l'alliage de titane TA.V. *Mém. Sci. Rev. Mét.*, 63 (1966), 1025.
32. L. SÉRAPHIN. — Le titane et ses alliages. *Traitements thermiques*, 42 (1969), 19.
33. R. MOLINIER et M^{me} J. MOULIN. — Etude des caractéristiques mécaniques et de la structure des demi-produits en alliages de titane TA.V.E₂. *Rev. Mét.*, 65 (1968), 295.

*ACTIVITÉS DE LA SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT
POUR L'INDUSTRIE NATIONALE*



Prix et médailles

décernés par la Société d'Encouragement pour l'année 1968

Médailles de Vermeil

Rapport présenté par M. Hénin, au nom du Comité de l'Agriculture, sur l'attribution d'une Médaille de Vermeil à M. Jean Cochard, pour le talent et la foi avec lesquels il a su faire de son exploitation un magnifique exemple de réussite professionnelle et familiale.

M. Cochard est né à Paris en 1908.

Après avoir fait ses études secondaires dans notre capitale, il est entré comme élève à l'Ecole d'Agriculture d'Angers d'où il est sorti en 1927 ayant acquis la formation non seulement agronomique mais générale que l'on dispense dans cet établissement.

Les hommes de cette génération se souviendront combien l'avenir était noir pour des jeunes récemment sortis de l'école dans cette période de crise économique ; n'ayant pas de fortune personnelle, M. Cochard effectue un certain nombre de tentatives, il est ainsi successivement Stagiaire, Chef de cultures, Métayer, Magasinier dans une exploitation viticole, Contremaître.

En dépit de ces difficultés et du talent très réel de notre lauréat, celui-ci reste attaché à la profession agricole et finit par entrer comme Chef de cultures à la Ferme de Bissy en 1936. Il y est encore actuellement, mais cette fois comme associé au propriétaire de l'exploitation. Celle-ci s'étend sur 240 hectares et il pratique la polyculture et l'élevage. Bien qu'il ait su dans ce domaine utiliser les ressources les plus modernes de la technique et faire de cette exploitation un Modèle, son souci de progrès l'amène maintenant à ouvrir une branche maraîchère.

M. Cochard est père de six enfants ; malgré les difficultés qu'il a connues, sa passion pour l'Agriculture est telle que trois de ses fils travaillent à ses côtés dans son exploitation. C'est donc un magnifique exemple de réussite professionnelle et familiale basé sur le talent et la foi en un métier dont il a fait une véritable mission.

Ses mérites sont connus et on lui a confié de nombreuses responsabilités. C'est ainsi qu'il est Président du Syndicat des Producteurs de lait de l'Ile-de-France, Administrateur à la F.N.C.E.T.A., au G.R.C.E.T.A. de l'Ile-de-France, à l'I.T.C.F., à la France Agricole, ce qui illustre la confiance que lui témoigne la profession à laquelle il appartient. Mais sa valeur intellectuelle lui a valu de se voir confier la Présidence de l'Institut Supérieur de l'Agronomie Rurale d'Angers et il est actuellement Président de l'Association Française pour la Production Fourragère et Correspondant de l'Académie d'Agriculture.

La médaille que la Société d'Encouragement lui décerne figurera dans un palmarès déjà riche et bien mérité. Elle témoignera de l'intérêt que notre Société porte à des talents aussi variés et dont nous avons pu apprécier l'efficacité lors de la série de conférences que nous avons organisée au sujet de l'industrialisation de l'Agriculture.

Rapport présenté par M. Jean Lhoste, au nom du Comité d'Agriculture, sur l'attribution d'une Médaille de vermeil à M. Robert Longchamp, pour les perfectionnements qu'il a apportés aux techniques de désherbage.

M. R. Longchamp, à la fin de ses études supérieures, entra en 1944 au Centre National de la Recherche Agronomique où M. Morel, alors Chef de Travaux à la Station de Phytopharmacie, l'engagea comme agent technique. Sous l'impulsion de ce chercheur, puis sous celle du Professeur Gautheret, M. Longchamp ne tarda pas à se passionner pour la Recherche.

En 1948, M. Longchamp commence à étudier les applications agronomiques possibles des substances de croissance : effet sur la chute des fruits, sur les maladies à virus, sur les plantes adventices des cultures.

C'est en étudiant ce dernier point que M. Longchamp devait trouver sa voie.

Depuis lors, il n'a cessé d'étudier les différentes techniques de désherbage chimique, de préciser les époques d'application, d'évaluer les effets non intentionnels des herbicides, sans oublier ni les aspects botaniques de ces questions, ni les incidences économiques.

Les efforts de M. Longchamp ont permis dans une large mesure de mettre au point des techniques de désherbage chimique des céréales, des betteraves, du riz...

M. Longchamp est donc un des fondateurs d'une nouvelle science qui porte un nom encore peut-être provisoire, mais qui la définit bien : il s'agit de la « Malherbologie ».

La renommée de ce chercheur a largement débordé nos frontières. M. Longchamp fut, entre autres, Président de 1961 à 1964 du Comité Européen de Recherche sur le Désherbage.

Actuellement Directeur de Recherche au Centre National de la Recherche Agronomique qui l'accueillit il y a vingt-cinq ans, il est l'animateur d'une équipe de chercheurs et de techniciens qui honorent l'agronomie française.

Notre Société, en décernant une Médaille de vermeil, rend un hommage bien mérité à M. Longchamp.

Rapport présenté par M. Paul Vayssière, au nom du Comité d'Agriculture, sur l'attribution d'une Médaille de vermeil à M. Alexandre Tsalpatouros, pour ses travaux sur la conservation et la maturation des fruits.

M. Tsalpatouros est diplômé de l'Ecole Centrale des Arts et Manufactures. Depuis plus de quinze ans, cet ingénieur a entrepris des recherches sur la conservation et la maturation des bananes.

Après avoir précisé les qualités que ces fruits doivent présenter, il a recherché d'abord sur un plan théorique, puis sur le plan pratique, les techniques à appliquer chez le mûrisseur pour que ces caractéristiques se conservent ou se développent jusqu'à l'arrivée au consom-

mateur, quelles que soient les difficultés d'ordre économique susceptibles de se produire au cours de cet acheminement.

M. Tsalpatouros a publié, sur cet important problème, huit notes à l'Académie des Sciences, quatre à l'Académie d'Agriculture entre 1956 et 1969.

Notre Société, sur la proposition du Comité d'Agriculture, lui accorde une Médaille de vermeil.

Rapport présenté par M. Jean Brocart, au nom du Comité des Arts Chimiques, sur l'attribution d'une Médaille de vermeil à M. Pierre Boutillier, pour ses travaux sur les matières plastiques.

M. Pierre Boutillier, après des débuts modestes dans un bureau d'études de menuiserie, s'est consacré à la mise en œuvre des matières plastiques.

Il a successivement travaillé à des procédés nouveaux pour la production

des polyesters armés, du polystyrène et de ses copolymères.

Il est l'auteur de plusieurs brevets relatifs à l'extrusion d'un polystyrène allégé, procédé révolutionnaire dont des licences ont été accordées à l'étranger.

Rapport présenté par M. Georges Chaudron, membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Chimiques sur l'attribution d'une Médaille de vermeil à M. Robert Fromageau, pour ses recherches sur les métaux de haute pureté.

M. Robert Fromageau a poursuivi des recherches particulièrement intéressantes sur les métaux de haute pureté. La thèse de Doctorat préparée au Laboratoire de Vitry du C.N.R.S. a porté sur la recristallisation de l'aluminium très pur préparé par la méthode de la zone fondue. Il met en évidence pour la première fois le rôle concomitant de deux facteurs principaux : la haute pureté

et l'orientation du cristal. La vitesse de germination des cristaux est influencée par ces deux facteurs. Dans le cas de la vitesse de croissance c'est la pureté qui devient le facteur prépondérant.

M. Fromageau poursuit activement ses recherches dans un domaine analogue. Nous pensons qu'il mérite grandement une récompense de la Société d'Encouragement.

Rapport présenté par M. Paul Chovin au nom du Comité des Arts Chimiques, sur l'attribution d'une Médaille de vermeil à M. Armand Marie de Ficquelmont, pour ses travaux personnels, ainsi que pour les recherches effectuées par lui au Laboratoire central de la Préfecture de Police.

M. Armand Marie de Ficquelmont, né le 22 octobre 1908, a effectué ses études à la Sorbonne où il a acquis le grade de Licencié ès Sciences. Puis il a préparé, au Collège de France, sous la direction du Professeur Henri Moureu, une thèse de Doctorat ès Sciences physiques très remarquée, qu'il a soutenue en 1939. En 1942, il a été nommé Ingénieur au Service de Recherches Scientifiques.

Les dispositions naturelles de M. A. Marie de Ficquelmont pour tout ce qui touche à l'organisation administra-

tive ont orienté sa carrière dans ce sens. En 1946, il a été nommé simultanément Ingénieur en Chef du Service technique et administratif et Ingénieur en Chef du Service de Recherches scientifiques.

Sa très grande activité dans ses nouvelles fonctions ne l'ont pas détourné des problèmes purement scientifiques et c'est ainsi qu'il a attaché son nom — pour ne citer que ce travail — à une étude approfondie du mécanisme de fonctionnement des piles à dépolarisation par l'air. En outre, il a dirigé tous

les travaux de recherches demandés au Laboratoire Central par les diverses administrations préfectorales ou ministérielles, dont il n'est pas possible de donner ici la liste, certains d'entre eux étant effectués à titre confidentiel.

Il convient d'ajouter que M. Marie de Ficquelmont, père de neuf enfants, n'a pas hésité à se porter volontaire comme membre du Service des Explosifs et de la Permanence des Services de Sécurité

du Laboratoire Central, au moment où il a été nécessaire de renforcer ce service, malgré les dangers présentés par cette nouvelle activité et qu'il ne pouvait ignorer.

Pour ses qualités d'homme, d'organisateur et de scientifique, on peut estimer qu'il mérite amplement la Médaille de vermeil du Comité des Arts chimiques.

Rapport présenté par M. Jean Brocart, au nom du Comité des Arts Chimiques, sur l'attribution d'une Médaille de vermeil à M. Francis Weiss, pour ses différents travaux, notamment dans le domaine des monomères acryliques.

Francis Weiss est né le 4 janvier 1928. Sorti major de sa promotion à l'Ecole supérieure de Chimie de Mulhouse en 1950, il passe une thèse de doctorat en 1954 et entre dans l'industrie.

Il est devenu chef du service organique au Centre de recherches de Lyon de la Société Ugine Kuhlmann où il a travaillé principalement dans le domaine

des monomères acryliques : acrylates, méthacrylates, acrylonitriles, acroléine, caprolactone.

Il a à son actif une vingtaine de publications en Chimie organique ; ses qualités lui ont valu d'être appelé par l'Université à participer à des jurys de thèse.

Rapport présenté par M. Jean Fressinet, au nom du Comité des Constructions et Beaux-Arts, sur l'attribution d'une médaille de vermeil à M. Jacques Le Chevallier, pour avoir réalisé de nombreuses créations, notamment dans le vitrail.

Cette médaille ne récompense pas seulement l'un des principaux maîtres-verriers français qui participèrent à la rénovation du vitrail mais aussi un artiste de grand talent et un excellent professeur dont les recherches et les réussites peuvent servir d'exemple aux nombreux élèves qui ont eu le privilège de recevoir son enseignement.

Né à Paris en 1896, Jacques Le Chevallier y fit ses études puis il entra à l'Ecole Nationale Supérieure des Arts Décoratifs qu'il fréquenta jusqu'à la guerre de 1914-1918 pour laquelle il fut mobilisé. Il reprit en 1919 ses recherches

et ses études de peinture, de décoration et de gravure sur bois.

C'est en 1920 qu'il choisit sa voie en collaborant avec Louis Barillet à de nombreuses et importantes réalisations de vitraux et de mosaïques.

Les Expositions internationales de 1925 et de 1937 révélèrent ses œuvres au public et permirent d'apprécier la forte personnalité de leur auteur. Il présenta, en particulier, dans la dernière de ces manifestations, l'une des douze verrières destinées à la cathédrale Notre-Dame ainsi que des peintures murales, prouvant qu'il était également capa-

ble d'exprimer son talent sans utiliser les colorations translucides du vitrail. Il confirma d'ailleurs l'étendue de ses possibilités d'expression en présentant du Petit-Palais, en 1939, quatre tapisseries exécutées à Aubusson puis, plus tard, des peintures murales et des mosaïques à Rome, à Blois et à Luxembourg.

C'est surtout à partir de 1946, date de l'ouverture de son atelier personnel de vitraux, à Fontenay-aux-Roses, que Jacques Le Chevallier réalisa la partie principale de son œuvre destinée non seulement à de nombreux édifices civils ou religieux en France, mais aussi en Suisse, en Italie, en Allemagne et au Luxembourg.

L'Etat, la Ville de Paris et la Direction des Monuments historiques lui confièrent d'importantes réalisations, parmi lesquelles il convient de citer les vitraux des cathédrales d'Angers, de Beauvais, de Besançon et de Toulouse, des basiliques du Sacré-Cœur de Paris, de Lutterbach, de Marienthal et d'Echternach, des églises de Rilly-sur-Aisne, La Roche-Posay, Saint-Gervais-de-Falaise, Saint-Paulien, Saint-Michel-d'Aiguilhe, Saint-Georges-d'Haguenau, Saint-Martin-de-Colmar, Notre-Dame-de-Granville, la collégiale de Thann, Saint-Léon-d'Alfortville et Saint-André-de-Montreuil.

On lui demanda plus tard la composition et l'exécution des trente verrières modernes de Notre-Dame de Paris, destinées aux baies de la haute nef et à celles des tribunes.

Il n'est pas possible de citer toutes les églises d'Alsace, de Normandie et d'autres provinces françaises ornées de vitraux de Jacques Le Chevallier. Suivant l'exemple donné en 1925 par Robert Mallet-Stevens, plusieurs architectes modernes français ou étrangers lui demandèrent également des vitraux pour des bâtiments civils.

Mais, outre les qualités plastiques de son ordonnance des surfaces et la sensibilité de ses colorations, l'un des grands mérites de Jacques Le Chevallier est certainement sa compréhension

de l'architecture monumentale, son aptitude à créer dans les édifices religieux le climat spirituel, l'atmosphère de mystère et de recueillement qui convient et incite à la méditation.

Il y parvient sans pasticher les vitraux anciens et sans trahir les intentions du maître d'œuvre, simplement en appliquant ce que Paul Valéry exprime ainsi : « La véritable tradition dans les grandes choses n'est point de refaire ce que les autres ont fait, mais de retrouver l'esprit qui a fait ces grandes choses et qui en ferait de tout autres en d'autres temps. » Les œuvres du passé doivent être considérées comme un message et non comme une formule.

Les recherches techniques auxquelles s'est livré Jacques Le Chevallier s'étendent de la rénovation du vitrail classique et de la dalle de verre maintenue par du béton jusqu'à l'utilisation de la dalle sous plombs spéciaux et enfin de la dalle sciée et collée en contact direct, permettant l'insertion de grands éléments en hauteur dans des structures métalliques sans divisions horizontales.

Quant à son action pédagogique, elle commença à se manifester en 1948, lorsqu'il reprit, avec J. Pichard et M. Rocher, les Ateliers d'art sacré fondés par Maurice Denis et Georges Desvallière. Il y enseigna jusqu'en 1953 où il fut enfin chargé d'un cours de vitrail à l'Ecole Nationale Supérieure des Beaux-Arts de Paris, ce qui lui permit de poursuivre son prosélytisme en faveur d'un art mieux adapté à notre temps.

Depuis 1925, il a participé aux principaux Salons de Paris ainsi qu'à de nombreuses expositions à l'étranger, parmi lesquelles celles de Bruxelles, de Montréal, de Trieste, de Stockholm, de Göteborg et à la Triennale de Milan. Les jurys de ces diverses manifestations ont rendu hommage à son talent en lui décernant les plus hautes récompenses. Jacques Le Chevallier a ainsi largement contribué au rayonnement de l'art français contemporain et de ses techniques d'application.

Rapport présenté par M. Jacques Rueff, de l'Académie Française au nom du Comité des Arts Economiques, sur l'attribution d'une Médaille de vermeil à M. André Arnoux, pour l'ensemble d'une carrière aux activités multiples et fécondes.

M. André Arnoux est né le 20 mars 1895.

Il a le grade de Commandeur dans l'Ordre national de la Légion d'honneur.

Il est Président-Directeur général et Directeur scientifique et technique de la Société Chauvin-Arnoux.

ACTIVITÉS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES.

Il est entré dans l'affaire à l'âge de 20 ans, alors qu'elle occupait 15 ouvriers.

Ceux-ci sont aujourd'hui au nombre de 1 200 et les matériels fabriqués par la Société sont connus dans le monde entier.

Homme de science et de laboratoire, André Arnoux a fait à 21 ans sa première communication à l'Académie des Sciences.

Inventeur, il a, au long de sa carrière, fait prendre plus de 400 brevets dont un grand nombre d'entre eux sont à l'origine de 15 familles d'instruments allant des mesures physico-chimiques aux relais ultra-sensibles.

Plusieurs licences de ces brevets sont actuellement en exploitation aux U.S.A., en Angleterre, en Allemagne et en Italie.

Après un séjour en Amérique du Nord, il met au point en 1928, dans son usine, une première chaîne de fabrication en série qui constitue une véritable révolution dans un domaine jusqu'alors entièrement artisanal.

Présentement, tous les matériels de série sont fabriqués sur des chaînes, dont plusieurs automatisées à 80 %.

ACTIVITÉS SYNDICALES ET COLLECTIVES.

Fondateur de la première Fédération des Chambres syndicales de la Construction électrique,

Ancien Vice-Président du Syndicat des Compteurs et Appareils de mesure,

Ancien Président du Comité pratique du Téléphone,

Fondateur et Président d'honneur du Syndicat national des Constructeurs d'Appareils électriques et électroniques de mesure et d'automatisme,

Initiateur et fondateur de l'Association intersyndicale Mesucora (Mesure, Contrôle, Régulation, Automatisation), qui rassemble les douze Chambres syndicales « Mesure »,

Président d'honneur du Gipno (Groupe des Industries de Paris-Nord-Ouest), etc., M. André Arnoux a accompli de nombreuses missions à l'étranger. On peut citer, entre 1928 et ce jour : Amérique, Canada, Japon, Chine, Norvège, Brésil, Argentine, Chili, U.S.A., Allemagne, Italie, etc.

En 1957, il fonde le Comité d'Expansion de la Mesure française à l'étranger, à la tête duquel Chauvin-Arnoux s'est trouvée la première en 1960 à Moscou, en 1964 à Pékin, en 1966 à Shanghai. Durant cette même période, les exportations françaises de la Mesure ont augmenté de 8 à 10 % par an.

ACTIVITÉS SOCIALES.

André Arnoux a développé, dans sa Société, une Association « Arts et Loisirs », très active, avec des sections intéressant les principaux sports.

Périodiquement, il organise une exposition de travaux personnels des membres de l'entreprise (peinture, sculpture, dessin, broderie, fruits ou fleurs du jardin...). Il pousse chacun à trouver en lui-même une source de joie pure, un Violon d'Ingres. S'il découvre, à l'occasion de ces expositions, des hommes ou des femmes chez lesquels pointe un certain talent, il les encourage et n'hésite pas à les orienter dans une voie nouvelle.

Depuis 1936, il n'y a pas eu une heure de grève dans son usine.

Enfin, il faut citer qu'il a créé une équipe pour la réadaptation des handicapés physiques.

ŒUVRES LITTÉRAIRES.

Philosophe actif, André Arnoux travaille le jour dans son usine et consacre une large part de ses nuits et de son temps de loisir à exprimer ses pensées et les réflexions que lui inspire sa connaissance des hommes et du monde.

Il a publié successivement « Petites choses pour le cœur », « Les Joies », « L'Appel intérieur », « Le Livre de la Tendresse », un roman « La Fiancée morte », le « Livre de la Plénitude », préfacé par le général Weygand, et enfin, un ouvrage qui domine l'ensemble de son œuvre : « La Voie du Bonheur », tiré à 140 000 exemplaires qui, par la maîtrise de la méditation dont il témoigne et l'ampleur de l'expérience qu'il apporte, est devenu le livre de chevet de beaucoup d'hommes d'action.

Rapport présenté par M. Pierre Auger, au nom du Comité des Arts Economiques, sur l'attribution d'une Médaille de vermeil à M. Michel Yves Bernard, pour ses travaux scientifiques, ainsi que pour son rôle dans l'enseignement et la diffusion des sciences.

M. Michel Yves Bernard, né le 1^{er} juillet 1927, est agrégé de Physique et Docteur ès Sciences.

Il a enseigné dans le secondaire, puis est nommé Maître de Conférences à la Faculté des Sciences de Caen. Il est actuellement professeur d'électronique au Conservatoire national des Arts et Métiers.

Ses travaux scientifiques se situent principalement dans le domaine de la dynamique des particules chargées sous l'influence des champs électro-magnétiques, sujet qui a fait l'objet de plusieurs articles.

Il s'intéresse vivement à l'enseigne-

ment et à la diffusion des Sciences, et a publié un ouvrage d'initiation à la Mécanique quantique et à la Physique statistique, chez Hachette. Aux P.U.F. il a publié un remarquable ouvrage sur les Masers et Lasers.

Dans sa fonction actuelle de Conseiller technique auprès du Directeur général des Enseignements supérieurs, il a pris une part très active au lancement des Instituts universitaires de Technologie. Son expérience très étendue de l'enseignement des sciences, aux élèves des lycées, aux étudiants, aux ingénieurs, lui permet de jouer un rôle exceptionnel dans les réformes actuelles.

Rapport présenté par M. Jacques Ruelle, de l'Académie Française, au nom du Comité des Arts Economiques, sur l'attribution d'une Médaille de vermeil à M. Lucien de Sainte-Lorette, pour son rôle en matière de formation continue et de perfectionnement.

Lucien de Sainte-Lorette a été :

— Initiateur en 1946 du Collège des sciences sociales et économiques (perfectionnement des cadres), et directeur depuis cette date.

— Initiateur en 1965 de l'Institut de préparation à l'administration et à la gestion (formation des futurs cadres), et directeur depuis cette date.

— Initiateur en 1967 de l'Institut d'administration et de gestion (recycla-

ge de cadres supérieurs), et directeur depuis cette date.

Auteur de :

- memento du commerce extérieur, 1946
- l'intégration économique de l'Europe, 1953
- l'idée d'union fédérale européenne, 1955
- la integration europea, 1957
- le Marché commun européen, 1958
- nombreux articles et cours sur l'administration des entreprises, l'automatisation et l'informatique.

— Lauréat de l'Académie des sciences morales et politiques

— Autres activités :

- président du Cercle culturel du Pré-aux-Clercs et des éditions Celse ;
- administrateur de la Maison de l'Europe de Paris, de la Ligue européenne de coopération économique, du Comité français pour l'union paneuropéenne, de l'Association européenne des enseignants, etc. ;
- membre de la Chambre syndicale des conseils sociaux, de l'Association française des responsables de formation et de la société d'économie politique, etc.

Rapport présenté par M. Pierre Naslin, au nom du Comité des Arts Mécaniques, sur l'attribution d'une Médaille de vermeil à MM. Marcel Kadosch et Cyrille Pavlin, pour leur contribution aux réalisations françaises en matière de fluidique.

Dès 1948, M. Marcel Kadosch a étudié à la S.N.E.C.M.A., sous la direction de l'Ingénieur en chef Bertin, des procédés originaux de déviation de jets de réacteurs fondés sur l'interaction de courants de fluides, sans aucune pièce mobile. Il était donc naturel qu'après la création par M. Bertin de la société d'études qui porte son nom, M. Kadosch s'intéresse très tôt aux possibilités de la fluidique — science et technique des composants à fluides sans pièces mobiles. Dès ses premières explorations dans ce domaine, à partir de 1963, il avait à ses côtés M. Cyrille Pavlin. Leurs efforts conjoints aboutirent à diverses réalisations — parmi lesquelles il faut citer un respirateur artificiel étudié en liaison avec l'Hôpital Foch — qui attirèrent l'attention du Comité d'Action concertée « Automatisation » de la D.G.R.S.T. Depuis trois ans, les travaux effectués dans le cadre de contrats de recherche passés par la D.G.R.S.T. ont abouti à la mise au point de modules logiques et analogiques originaux et à une meilleure connaissance des phénomènes dont ils

sont le siège. Certains de ces modules, en particulier l'amplificateur logique à bords rentrants et l'amplificateur analogique à bords courbes, ont été présentés dans les congrès internationaux de fluidique et y ont suscité le plus vif intérêt. De plus, les modules fluidiques mis au point à la Société Bertin par MM. Kadosch et Pavlin sont progressivement commercialisés par la Société Générale du Vide (S.O.G.E.V.), à la suite d'un accord entre les deux sociétés.

Dans le cadre des travaux français accomplis dans le domaine de la fluidique avec l'appui des pouvoirs publics, auxquels il est juste d'associer également les réalisations de la Compagnie des Compteurs et celles de l'Institut mécanique des Fluides de Toulouse, les efforts de MM. Kadosch et Pavlin et de l'équipe qu'ils animent constituent une contribution de choix. C'est pourquoi le Comité des Arts mécaniques a proposé, sur rapport de l'Ingénieur en chef Naslin, que leur soit remise conjointement une Médaille de vermeil à l'occasion de leur conférence du 22 mai 1969.

Rapport présenté par M. Jean-Jacques Trillat, membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques, sur l'attribution d'une Médaille de vermeil à M. Pierre Bortaud, pour ses travaux sur les produits réfractaires.

M. Pierre Bortaud est Ingénieur des Arts et Métiers, Licencié ès Sciences physiques. Il travailla d'abord à la Société Schneider de 1935 à 1951, puis fut affecté au Laboratoire du Professeur Bastien, en liaison avec le Professeur Pascal, où il avait commencé la préparation d'une thèse de Doctorat. De 1947 à 1951, il fut Ingénieur de Recherches au Creusot.

En 1951, il entra à la Société l'Electroréfractaire en vue de la création et du développement d'un Laboratoire de Recherches destiné au Contrôle et à l'amélioration des réfractaires électrofondus. C'est là où il donna toute sa mesure, en créant un Centre de Recherches atteignant maintenant 90 personnes (dont 17 cadres). Nommé Directeur des Recherches en 1963, il sut effectuer, dans ce Laboratoire, des recherches d'un haut intérêt sur les réfractaires et en tirer les applications à son industrie.

Auteur de plusieurs publications, il

sut faire accomplir des progrès considérables pour l'amélioration de la qualité ou des conditions de préparation des réfractaires électrofondus et pour la recherche de produits supérieurs pour la verrerie ; je citerai en particulier la découverte et l'application industrielle généralisée d'un produit de fusion électrique permettant la réalisation d'oxydes fondus, non plus réduits, mais bien à leur état d'oxydation maximum.

Aidé par une excellente équipe de collaborateurs à laquelle il a su insuffler son enthousiasme pour la recherche, M. Bortaud a toujours cherché à viser les applications industrielles résultant de recherches parfois fondamentales. Grâce à cela, la Société l'Electroréfractaire est l'une de nos plus importantes industries exportatrices.

Pour toutes ces raisons, M. Bortaud mérite largement que lui soit attribué notre Médaille de vermeil.

Rapport présenté par M. Jacques Pomey, membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques sur l'attribution d'une Médaille de Vermeil à M. Louis Colombier, pour son œuvre considérable en métallurgie et métallographie.

M. Colombier Louis est né le 25 août 1896 à Annonay (Ardèche). Il a fait ses études au lycée de Saint-Etienne puis à la Faculté de Lyon. Ensuite il entre au Laboratoire municipal de chimie de Saint-Etienne comme chimiste (1921) et y devient sous-directeur (1925), puis directeur (1928). Pendant son séjour dans ce laboratoire il prépare une thèse de doctorat ès sciences sous la direction du Professeur A. Travers : thèse brillamment soutenue en janvier 1936.

En 1937, il entre aux Aciéries Jacob Holtzer à Unieux, comme chef du service des recherches. Il y devient ingénieur

principal (1942), puis ingénieur en chef (1948).

En 1954, à la formation de la Compagnie des Ateliers et Forges de la Loire, il est ingénieur en chef, chargé de la Direction des Recherches, fonction qu'il conserve jusqu'au 31 décembre 1961 où il est atteint par la limite d'âge.

A partir du 1^{er} janvier 1962 il devient ingénieur conseil de l'Institut de Recherches de la Sidérurgie.

Il est promu chevalier de la Légion d'honneur le 8 avril 1961.

Il est président du Cercle d'Etudes des Métaux de 1930 à 1944 et depuis 1962 :

— vice-président de la Société Française de Métallurgie en 1947 ;

— de 1938 à 1962, président de la Commission « Etudes métallurgiques Sidérurgie fine » de la Chambre syndicale de la Sidérurgie ;

— de 1946 à 1948, président de la Commission « lingots de forge » de l'Institut de Recherches de la Sidérurgie ;

— depuis 1964, président de la Commission « Traitement thermique » de la Société Française de Métallurgie ;

— membre depuis l'origine de la Commission scientifique de l'Institut de Recherches de la Sidérurgie.

Il a été chargé de mission au Brésil en 1962 pour faire un cours à l'Association brésilienne de Métallurgie à São Paulo et des conférences dans diverses villes.

L'œuvre de Louis Colombier en métallurgie et métallographie est considérable. Tous ceux qui ont écrit des livres scientifiques savent le travail énorme que cela représente. Les quatre livres écrits par L. Colombier sont de très haute valeur en raison de la grande expérience de l'auteur et de leur caractère scientifique, ils concernent la métallurgie du fer, les aciers inoxydables ou réfractaires, le contrôle et la qualité des fabrications métallurgiques, le molybdène dans les aciers inoxydables. En outre il a pris une participation importante à la rédaction des techniques de l'ingénieur. Tous ces ouvrages sont de véritables livres de chevet journalièrement consultés par les spécialistes.

En outre il est l'auteur de plus d'une soixantaine de mémoires originaux de haute teneur scientifique dont une dizaine de notes à l'Académie des Sciences. Ses travaux et publications ont porté sur la fabrication des aciers spéciaux au four à induction sur l'emploi du vide en aciérie, sur la coulée sous vide, sur la refusion à électrode consommable à arc sous vide ou par effet Joule sous laitier électrolytique, sur la fonderie sous vide.

Il a étudié tout au long de sa carrière

le rôle des oligo-éléments tels que le soufre, l'oxygène, le carbone, etc., et surtout leurs interactions.

Il a consacré de nombreux travaux aux traitements thermiques des aciers. Il a en particulier étudié la surchauffe, la brûlure, la régénération, l'homogénéisation, la déshomogénéisation, la diffusion, l'influence des atmosphères de traitement, la température de trempe, la température d'arrêt de trempe, la capacité de trempe, la vitesse de chauffage lors du revenu, la fragilité de revenu, le durcissement par précipitation de phases dispersées, les particularités de traitement des aciers spéciaux, le critère de décision dans le choix et dans l'exécution d'un traitement thermique.

Il a en particulier étudié les aciers à aimants, les aciers pour outillage, les aciers à coupe rapide, en particulier l'influence du traitement à froid et la nature des carbures présents dans ces aciers. Il a apporté une contribution importante à la connaissance des rôles du vanadium dans les aciers spéciaux.

Dès sa thèse de doctorat qui portait sur l'état passif des métaux avec le potentiel électrochimique du nickel, l'influence de l'acidité, il s'est toujours occupé de résistance à la corrosion. Ses travaux portent ensuite sur la corrosion intergranulaire, la corrosion en solution aqueuse des aciers inoxydables, la résistance à la corrosion par les acides forts, les usages des aciers inoxydables dans l'industrie chimique, les aciers tenaces à chaud résistant à la corrosion à températures élevées.

Ainsi, toute la vie de Louis Colombier a été consacrée à la recherche et aux perfectionnements des fabrications d'aciers spéciaux de toute nature et il a toujours apporté le concours de sa haute compétence en la matière à tous ceux qui ont eu recours à lui. Sa contribution exceptionnelle à la science des métaux et à l'industrie métallurgique justifie l'attribution de la Médaille de vermeil de notre Société sur proposition du Comité des Arts physiques.

Rapport présenté par M. François Canac, au nom du Comité des Arts Physiques, sur l'attribution d'une Médaille de vermeil à M. Henri-Jean Latière, pour ses travaux divers, et notamment ses dernières études sur les trichites métalliques.

Né le 10 mars 1924 à Marseille, M. Latière est entré en octobre 1950 dans le Laboratoire de Rayons X dirigé par M. Michaud, du Centre de Recherches scientifiques industrielles et maritimes de Marseille, dirigé par M. Canac. Docteur ès Sciences physiques d'Etat en 1956, et après avoir rapidement franchi les divers échelons de la hiérarchie, M. Latière est devenu Directeur de Recherche titulaire. Il dirige, toujours dans le même Laboratoire devenu Laboratoire des Structures cristallines, dans le même Centre devenu « Centre de Recherches physiques », sous la haute compétence des mêmes maîtres, le département de Physique métallurgique qui comporte six chercheurs, quatre techniciens et trois étudiants de troisième cycle.

M. Latière a présenté aux Journées métallurgiques d'automne 1968 sa cinquante-cinquième publication. Il étudie les effets de la déformation plastique et du recuit sur les éprouvettes métalliques mono et polycristallines.

Au cours de ses travaux, M. Latière a conçu et mis au point divers appareils facilitant ces études (Chambre de rayons X à deux films, Stéréographe permettant d'orienter commodément les cristaux...). Il a trouvé et étudié plusieurs types de bandes de déformation qui se forment quand on impose un allongement aux monocristaux. Dans un de ses Comptes Rendus à l'Académie des Sciences, il a notamment montré le caractère brusque et imprévisible de la

croissance des monocristaux, les positions successives des frontières constituant les amorces de certaines de ces bandes.

M. Latière a pu mettre au service de certains Industriels, notamment Sud-Aviation, l'Association des Propriétaires d'appareils à vapeur, la Société des Blancs de Zinc de la Méditerranée, etc., ses connaissances en métallurgie et résoudre ainsi des problèmes importants : ruptures causées par un écrouissage critique, efficacité des oxydes de zinc en fonction du groupement des cristaux, etc.

M. Latière se passionne ces dernières années pour les trichites métalliques, ces fameux filaments monocristallins dont la limite élastique réelle est voisine de la limite élastique théorique. Qu'on juge : pour atteindre la déformation plastique, il faut exercer sur les trichites un effort cent fois à mille fois plus grand que sur les monocristaux massifs. De plus, au cours de ses dernières publications, M. Latière a notamment apporté la preuve du rôle des dislocations en hélice dans la croissance des trichites, ainsi que celle de la mobilité de leurs défauts ; on explique ainsi le rajeunissement constant des trichites, même après une très forte déformation, qui tend toujours à leur rendre les propriétés mécaniques exceptionnelles de leur état initial et en fait le supermétal dont rêvent tous les constructeurs.

M. Latière contribue à la connaissance de ce matériau promis à un très brillant avenir industriel.

Rapport présenté par M. Albert Arnulf, au nom du Comité des Arts Physiques, sur l'attribution d'une Médaille de vermeil à M. Claude Véret, pour ses réalisations très variées, notamment en ce qui concerne les appareils d'optique.

M. Claude Véret est ingénieur diplômé de l'Ecole Supérieure d'Optique et a obtenu, au cours de sa carrière le grade de Docteur-Ingénieur. Dès sa sortie de l'Ecole, en 1946, il a travaillé comme

Ingénieur de Recherches à l'Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (O.N.E.R.A.) où il est actuellement chef de la Division Optique.

Jusqu'en 1954, il a été le principal

collaborateur d'une équipe chargée de l'étude de la transparence de l'atmosphère dans l'infra-rouge proche et moyen. Il a dirigé l'élaboration et la réalisation de plusieurs ensembles d'appareils, les uns ayant travaillé sur des brouillards artificiels, d'autres sur le terrain ; alors il a dû s'attaquer aux problèmes posés par l'installation de bases étendues et adaptées aux mesures de précision, et à d'autres problèmes plus délicats provenant de la nécessité de faire travailler ensemble de nuit et dans des conditions difficiles, les équipes de disciplines différentes nécessaires pour le travail. Bien qu'interrompue prématurément, cette expérience reste la plus complète sur la transparence des brumes et des brouillards, et ses résultats sont, encore maintenant, à peu près les seuls à être utilisés.

Dans le même temps, Claude Véret a été chargé de la réalisation des appareils optiques destinés à visualiser les écoulements dans les souffleries aérodynamiques. La contribution personnelle s'est traduite par la création d'un dispositif stéréoscopique de strioscopie à couteau, par la réalisation d'un appareil de strioscopie interférentielle sur un principe indiqué par M. Nomarski, et d'un autre appareil à grille colorée remplaçant le précédent dans les cas où la biréfringence des glaces optiques limitant la veine rend son emploi impossible.

Pour l'étude des flammes il a réalisé un spectrographe enregistreur rapide permettant de réaliser 50 spectres/seconde, le temps de balayage de l'ensemble du spectre restant inférieur au $1/1.000^{\circ}$ de seconde. Dans le même but, il a mis au point un interféromètre Fabry-Pérot permettant d'isoler une seule des raies du doublet du sodium, et a pu montrer, à cette occasion, que l'emploi d'une raie double pour la mesure interférentielle des écarts entre une surface à étudier et une surface de référence permettait d'améliorer beaucoup la précision ; une étude très poussée du montage mécanique lui a permis de faire fonctionner cet appareil à 1 mètre de la flamme

d'un réacteur en essai ; son dispositif a, depuis, été souvent utilisé par d'autres chercheurs.

Plus récemment, c'est sur son initiative qu'ont été entreprises les premières applications pratiques du laser aux problèmes posés à l'O.N.E.R.A., en interférométrie et en télémétrie. En particulier il a eu l'idée d'essayer de photographier l'écho lumineux renvoyé par un satellite équipé de cataphotes, éclairé par un faisceau laser puissant. Cette expérience réalisée avec succès par M. Dürrenberger a pour résultat de fournir, à partir d'un seul point de la terre de coordonnées connues, la position précise d'un satellite et inversement. C'est là une grande simplification pour la géodésie à l'aide des satellites. Il a proposé les expériences optiques réalisées à bord des fusées Ta-cite, sur la mesure de la position de la limite apparente entre la terre et l'espace, mises en œuvre par M^{me} Lemaître et M. Girard, et dont les dépouillements ne sont pas totalement terminés.

Cette revue, bien sommaire, de l'œuvre scientifique de Claude Véret, ne doit pas faire passer au second plan son rôle de chef de division. Continuant l'action de son regretté prédécesseur, le Commandant Curé, il a su, au fur et à mesure du développement de sa division, conserver entre des services aussi différents qu'un atelier d'optique de très haute précision, le service photographique et cinématographique de l'O.N.E.R.A., les divers laboratoires de vocations très différentes, une cohésion et un esprit d'équipe particulièrement remarquable par l'entente qui s'est établie entre techniciens et ingénieurs. A son action personnelle, tant du point de vue scientifique et technique que du point de vue humain, doit être attribuée la part principale des succès obtenus par la division optique de l'O.N.E.R.A. Les réalisations industrielles issues de travaux effectués sous sa direction ajoutent un titre supplémentaire pour l'attribution de la Médaille de vermeil que la Société d'Encouragement à l'Industrie Nationale se fait un honneur de lui remettre.

Médailles d'Argent

Rapport présenté par M. Jean Lhoste, au nom du Comité d'Agriculture, sur l'attribution d'une Médaille d'argent à M. François Ramade, pour ses travaux sur la résistance aux toxiques de diverses souches d'insectes.

M. François Ramade est Maître-Assistant au Laboratoire de Zoologie, dirigé par le Professeur Pesson, à l'Institut national agronomique.

Ingénieur agronome de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, F. Ramade s'est consacré aux études entomologiques, notamment depuis 1959 où, en collaboration avec M. Pesson, il présenta sa première communication devant l'Académie d'Agriculture de France. Depuis lors, son activité de chercheur a été principalement orientée vers la résistance aux toxiques que peuvent présenter certaines souches d'insectes et sur les aspects physiologiques que soulève ce phénomène.

Tout récemment, F. Ramade a soutenu devant la Faculté des Sciences de l'Université de Paris sa thèse de Doctorat ès Sciences qui fait le bilan de ses recherches.

L'Industrie Française des Insecticides, concernée par ces travaux, a largement participé à la publication du travail de F. Ramade, montrant ainsi l'intérêt pratique des recherches de cet entomologiste.

En décernant une Médaille d'argent à F. Ramade, notre Société rend hommage à un jeune scientifique qui, en plus de son rôle d'enseignant, a su mener à bien des recherches difficiles.

Rapport présenté par M. Paul Chovin, au nom du Comité des Arts Chimiques, sur l'attribution d'une Médaille d'argent à M^{me} Yolande Prat, pour ses études sur les constituants de la vanille.

M^{me} Prat, née le 13 mai 1919, est entrée au Laboratoire Central de la Préfecture de Police, en qualité de Technicienne, le 9 mars 1942. Elle a fait l'effort de préparer le concours d'admission aux fonctions de Chef de Travaux pratiques au Laboratoire Central de la Répression des Fraudes du Ministère de l'Agriculture mais, après quelques mois passés dans cet organisme, a préféré revenir poursuivre au Laboratoire Central de la Préfecture de Police les travaux qu'elle avait entrepris.

Spécialisée dans l'étude des constituants de la vanille, étude à laquelle

elle a consacré plusieurs années de travail assidu, elle a pu mettre en évidence des constituants qui n'avaient encore jamais été décelés, tel l'aldéhyde parahydroxybenzoïque et l'alcool correspondant, ou alcool parahydroxybenzylique. En outre, elle a mis au point une technique de détection et de caractérisation des pigments naturels des gousses de vanille qui présente un très grand intérêt dans la caractérisation du produit naturel dans les aliments ou entremets. M^{me} Prat a collaboré, par ailleurs, à l'étude de la détection et de la caractérisation de polysaccharides dans les aliments et les boissons.

Ces travaux revêtent, sur le plan de la lutte contre les fraudes alimentaires, une importance toute particulière et ont

contribué grandement au développement des techniques analytiques dans ce domaine.

Rapport présenté par M. Boris Vodar au nom du Comité des Arts Physiques, sur l'attribution d'une Médaille d'argent à M. Claude Chevalier, pour un ensemble d'études et réalisations dans lesquelles est intervenue l'utilisation des hautes pressions.

M. Claude Chevalier, âgé actuellement de 42 ans, est un Ingénieur des Arts et Métiers et Ingénieur de l'Ecole Supérieure d'Electricité. Il est Chef du Département « Matériel Loire » de la Société Financière et Industrielle des Ateliers et Chantiers de Bretagne.

Sous son impulsion, le Département « Matériel Loire » de la Société Financière et Industrielle des Ateliers et Chantiers de Bretagne a développé l'utilisation des hautes pressions (1 à 10 kilobars).

Ont été étudiées et réalisées notamment au cours des dernières années des enceintes isostatiques pour le gainage des métaux, la compression des poudres frittées, le calibrage et le formage de pièces pour les industries de pointe. Ces réalisations, dont la plupart de grandes

dimensions (jusqu'à 98 cm de diamètre pour 1 500 bars), représentent une réalisation de premier plan pour l'Industrie française, réalisation qui lui a donné une place prépondérante dans ce domaine dans les pays du Marché Commun. L'objet de ces résultats repose sur la mise en œuvre de calculs et d'essais très poussés, ainsi que sur des conceptions originales, en particulier celle d'un joint autoserreur double qui a fait l'objet de dépôts de brevets en France et à l'étranger, joint qui semble être le seul, avec celui de Zeitlin aux Etats-Unis, vraiment satisfaisant pour les réservoirs de grand diamètre.

L'attribution d'une médaille d'argent de la Société pour l'Encouragement à l'Industrie Nationale est une juste récompense des mérites de M. Chevalier.

Rapport présenté par M. Boris Vodar, au nom du Comité des Arts Physiques, sur l'attribution d'une Médaille d'argent à la C.O.D.E.R.G., pour ses réalisations remarquables dans le domaine de la spectroscopie instrumentale et, en particulier, pour le spectromètre Raman, très apprécié sur le plan mondial.

Après avoir été au Laboratoire de l'E.N.S. Ingénieur du C.N.R.S., M. da Silva, dès 1964, soit à 29 ans, est entré à la C.O.D.E.R.G. (Société de Conversion des Energies), dont il a été un animateur remarquable, réalisant, avec une équipe

dynamique, d'abord des spectromètres infra-rouges, puis à partir de 1967 mettant en route la réalisation d'un Spectromètre Raman laser et réussissant à le mettre sur le marché dans un temps record.

Cette dernière réalisation pour laquelle M. da Silva a eu le mérite de s'entourer des compétences nécessaires, en particulier de celle du Professeur Delhay, est particulièrement remarquable, car grâce à cet appareil la Spectrométrie Raman a connu en Europe un développement probablement plus rapide qu'aux Etats-Unis, et en tout état de cause, le nombre des Spectromètres Raman Coderg vendus dépasse l'ensemble des appareils si-

milaires en provenance des autres constructeurs.

La Médaille d'argent de la Société pour l'Encouragement à l'Industrie Nationale ne saurait être attribuée à un meilleur lauréat, car M. da Silva, mettant à profit des progrès récents de la physique, a su rapidement les transposer dans l'industrie au grand profit de toute la communauté scientifique et technique.

Rapport présenté par M. Léopold Escande, membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques, sur l'attribution d'une Médaille d'argent à M. Ly Dang-Phuoc, pour ses études et réalisations à l'Institut de Mécanique des Fluides à Toulouse.

M. Dang-Phuoc Ly s'est particulièrement attaché à l'étude des conditions réelles de fonctionnement du « Générateur à effet Hall ». Il a ainsi pu apporter des améliorations remarquables au comportement de ce composant aux fréquences élevées, étendant très largement de la sorte, son emploi.

Dans la recherche de nouvelles applications du Générateur à effet Hall », M. Dang-Phuoc Ly a mis au point de nouveaux circuits de « calcul analogique et de génération de fonctions » dont la solution apporte sur le plan pratique une importante économie de matériel, par rapport aux dispositifs habituels et une plus grande précision dans les résultats.

Les réalisations faites par M. Dang-Phuoc Ly ont été jugées suffisamment originales dans ce domaine, pour que le C.N.R.S. lui accorde trois brevets récents.

Les publications parues sous sa signature dans les revues spécialisées, ont attiré l'attention des chercheurs qui s'attachent au calcul analogique.

Dans sa collaboration aux travaux de l'Institut de Mécanique des Fluides, M. Dang-Phuoc Ly applique les propriétés de son « opérateur-générateur de fonctions analogiques à effet Hall » à la linéarisation de la fonction de transfert des « capteurs », facilitant ainsi leur incorporation aux dispositifs de régulation des systèmes fluides.

Enfin, M. Dang-Phuoc Ly apporte le concours de sa compétence au Laboratoire d'Applications de Radioéléments et d'Hydraulique humaine pour certains travaux ayant plus spécialement trait à l'Electronique médicale et au Génie biologique.

La très haute qualification scientifique de M. Dang-Phuoc Ly et ses aptitudes intellectuelles qui lui permettent d'aborder souvent les questions les plus ardues, tant dans le domaine de l'Electronique que dans celui de la Mécanique des Fluides, en ont fait notre plus précieux Collaborateur, et pour ces raisons, nous estimons que M. Dang-Phuoc Ly mérite sans nul doute, la distinction que nous sollicitons pour lui.

Rapport présenté par M. Léopold Escande, membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques, sur l'attribution d'une Médaille d'argent à M. David Decomps, pour sa coopération technique à l'Institut de Mécanique des Fluides à Toulouse.

Il est éminemment souhaitable de rappeler, aujourd'hui, les mérites de M. D. Decomps qui, au terme d'une carrière d'une indiscutable valeur technique, a pris sa retraite depuis voici bientôt deux ans.

Notre excellent collaborateur a, durant les trente-huit années passées au Service du Laboratoire de Banlève, à l'Institut de Mécanique des Fluides, fait la preuve constante d'un dévouement et d'une conscience professionnelle, placée au-dessus de tous éloges. Jointe à ses qualités, sa valeur professionnelle en a fait un des principaux artisans du développement de nos Laboratoires, et plus particulièrement, de la soufflerie de Banlève.

M. Decomps, au titre de Technicien, s'était acquis une spécialité unique en France, dans le domaine du modelage et de la réalisation de maquettes. Il a eu, en outre, la charge des essais en soufflerie, comme Chef-Opérateur, et parmi ceux-ci, il est bon de rappeler sa participation à l'étude des maquettes de l'engin marine « Malafon 233 », aujourd'hui construit en série.

Participant aux principales activités du Laboratoire de Banlève, M. Decomps a très efficacement coopéré aux études demandées par E.D.F. portant sur la pollution atmosphérique, consécutive aux effluents gazeux de la Centrale Nucléaire de Chinon. Il a, ainsi, réalisé divers modèles de ce complexe industriel à différentes échelles et participé aux essais en soufflerie, tendant à mettre en évidence les écoulements gazeux et leur concentration.

Ayant débuté dans sa carrière, comme ouvrier qualifié, M. Decomps avait déjà acquis, après fort peu de temps, une

grande expérience des modèles réduits qu'il a réalisés sous forme de barrages, prises d'eau, cheminées d'équilibre, etc.

Ses excellentes aptitudes manuelles l'ont, non seulement très rapidement conduit à la réalisation des maquettes d'avions et d'engins, mais également, au montage d'une balance aérodynamique à 6 composantes.

Ne refusant aucun travail difficile, et plus récemment, M. Decomps a encore abordé le domaine supersonique, réalisant l'appareillage (construction, plaques, éléments de prises de pression) et participant aux mesures.

L'énumération de toutes les recherches auxquelles M. Decomps a apporté son concours serait évidemment fort longue. Il nous suffira de dire que chaque fois sa collaboration, largement consentie et discrète, fut toujours fructueuse.

Enfin, M. Decomps a été également chargé pendant de nombreuses années de la fabrication, du montage, du réglage et de l'entretien du matériel de travaux pratiques d'aérodynamique expérimentale, utilisé par les élèves de l'E.N.S.E.I.H.T. et de l'E.N.I.C.A. Dans cette tâche délicate, M. Decomps a su mettre à profit son expérience personnelle et ses connaissances, acquises tout au long de l'exercice de sa profession, pour le plus grand bénéfice de nos étudiants.

Sa carrière exemplaire, sa conscience professionnelle, ses aptitudes intellectuelles et physiques qui en ont fait l'un de nos plus sûrs collaborateurs (dont nous avons beaucoup regretté le départ) nous amènent à reconnaître que M. Decomps mérite, sans nul doute, la distinction que nous sollicitons pour lui.

Rapport présenté par M. Jean-Jacques Trillat, membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques, sur l'attribution d'une Médaille d'argent à M^{me} Denise Fautret, pour ses travaux de photographie scientifique, au Laboratoire du C.N.R.S., à Bellevue.

M^{me} Fautret est née en 1926 ; toute sa carrière s'est déroulée dans une ambiance photographique.

D'abord photographe-portraitiste durant dix années, elle entre en 1956, au C.N.R.S. à Bellevue, dans le Laboratoire de Microphotographie du D^r Commandon, où elle acquiert l'expérience de techniques nouvelles et délicates. Au départ de ce dernier, M^{me} Fautret développe un Laboratoire de photographie scientifique ; d'abord, au Laboratoire du P^r Trillat, puis dans le cadre d'un service général qui est créé à Bellevue.

Sous son impulsion, ce Laboratoire, doté de plusieurs collaborateurs qu'elle a elle-même formés et de matériel très moderne, se développe parallèlement à l'activité du groupe des Laboratoires de Bellevue. M^{me} Fautret le dirige avec beaucoup de compétence et rend les plus grands services aux Chercheurs de Bellevue ; elle s'occupe également de la formation des jeunes à la photographie scientifique, tant au C.N.R.S. qu'au Conservatoire National des Arts et Métiers.

Elle mérite largement l'attribution d'une de nos Médailles d'argent.

Rapport présenté par M. Jacques Pomey, membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques, sur l'attribution d'une Médaille d'argent à M. François Goutel, pour ses travaux divers, notamment en matière de traitements thermiques.

François Goutel est né le 5 juillet 1918 à Aurillac (Cantal), il est orphelin de mère à 7 ans, bachelier en 1936. Il poursuit, au Lycée Saint-Louis, à Paris, la préparation à l'Ecole Centrale des Arts et Manufactures où il est admis en 1938.

La guerre interrompt ses études et mobilisé en 1939, il suit les cours d'E.O.R à l'Ecole Militaire d'Artillerie de Poitiers, d'où il sort en mars 1940 avec le grade d'Aspirant. Affecté à une Batterie Divisionnaire antichars, il est fait prisonnier et sa captivité dure jusqu'en 1945. Pendant celle-ci, il a cependant la possibilité, en liaison avec le Corps Professoral de l'Ecole Centrale, d'apprendre les matières faisant l'objet des cours de 2^e année et de faire parvenir tous les projets correspondants. Ce travail est sanctionné dès son retour en juin 1945, par les Examens Généraux et Soutenances de ces Projets, ce qui lui permet de suivre les cours de 3^e année

dès le 4^e trimestre. Il sort donc de l'Ecole Centrale, avec le Diplôme d'Ingénieur en avril 1946.

François Goutel est attiré par la Métallurgie, il rentre au Laboratoire de la Régie Renault dès mai 1946, où il s'occupe d'abord de la mise au point d'essais mécaniques sur microéprouvettes (appareils du P^r Chevenard, de traction, compression, flexion, etc.).

Ces travaux l'orientent vers la mise en évidence de contraintes dont la difficulté réside dans la mesure de leur valeur.

Il construit le premier appareil de mesure des contraintes résiduelles superficielles à partir de la dureté hertzienne, méthode locale, non destructive et de plus, directe, puisqu'elle oppose une force de pression à des contraintes, alors que toutes les autres méthodes sont indirectes, et procèdent par mesure de déformation. Il détermine les contraintes

résiduelles en profondeur sur éprouvettes cylindriques par la méthode d'enlèvement de matière de Mesnager, méthode très délicate et laborieuse mais qui a été nécessaire à l'établissement dans le laboratoire de la Régie Renault de la théorie des durcissements et précontraintes superficielles et à la mise au point rationnelle de tous les traitements métallurgiques.

Orienté donc vers les traitements thermiques de cémentation, il était logique d'être dirigé vers la définition des atmosphères carburantes. Et c'est au cours de cette période que les études en laboratoire l'ont conduit à connaître tout l'intérêt de la carbonitruration et à définir les différents types de traitement à appliquer.

C'est ainsi qu'après avoir expérimenté les diverses compositions d'atmosphère permettant de réaliser la carbonitruration, il a été appelé à mettre en pratique, sur le plan industriel, cette technique qui a été appliquée sur grande échelle à la Régie Renault dès 1949.

Les difficultés de mise au point en atelier des divers procédés étudiés en laboratoire l'ont alors conduit vers une présence quasi continue dans les ateliers de traitement thermique. En raison de sa haute compétence dans ce domaine, François Goutel a été chargé de mettre sur pied un Service de Méthodes Traitements Thermiques, dont il est responsable depuis 1953.

A ce titre, il a eu non seulement à poursuivre l'œuvre, mais encore à appli-

quer en atelier l'invention brevetée d'atmosphère fabriquée à partir d'azote-méthanol.

Indépendamment de ces prolongements de travaux de laboratoire vers les ateliers, François Goutel a eu la responsabilité :

- de créer des ateliers de traitements thermiques, dont celui de Cléon qui, il y a 11 ans, présentant une automatisation très poussée, en faisait le premier en son genre ;

- de développer les applications du chauffage par induction dont actuellement plusieurs centaines de mille d'opérations sont quotidiennement réalisées ;

- d'orienter le choix de nombreux ateliers de traitements thermiques pour les usines étrangères (Espagne, Pays de l'Est, etc.).

Parallèlement à ces travaux d'ordre spécifiquement professionnel, ses origines modestes et ses quatre enfants à charge le portent naturellement vers les problèmes de l'enseignement. C'est la raison pour laquelle, dès 1947, il donne des cours à l'Ecole Professionnelle d'Apprentissage et aux Cours d'Adultes de la Régie, qui lui valent les Médailles de bronze d'abord, et d'argent ensuite, du Ministère de l'Education Nationale, et une Médaille de vermeil des Industries de la Mécanique.

Aussi M. François Goutel mérite bien une Médaille d'argent du Comité des Arts Physiques.

Rapport présenté par M. Jacques Pomey, membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques, sur l'attribution d'une Médaille d'argent à M. Pierre Mathon, pour sa contribution précieuse à la recherche métallurgique.

M. Pierre Mathon est né en juillet 1910. Il est Ingénieur de l'Ecole des Travaux Publics en 1933, de l'Ecole Supérieure de Perfectionnement Industriel, Docteur-Ingénieur en 1938. Sa thèse

se porte sur l'étude des bobines inductives de compensation à dissonance. Il entre comme Chargé de Recherches aux Laboratoires de Recherches de la Régie Nationale des Usines Renault, où il

devient chef de groupe de recherches métallurgiques et où il est encore en pleine activité.

Son œuvre qui porte sur 30 ans de travail continu est considérable et d'intérêt industriel. Elle a donné lieu à un très grand nombre de mémoires dont la plupart sont restés confidentiels, mais en outre, seul ou en collaboration, il a publié 16 mémoires scientifiques.

Ses travaux principaux ont porté sur des techniques purement françaises de fonderie de précision à cire perdue et sur la mise au point industrielle pour soupapes, culbuteurs, sièges de soupapes, fraises et outils divers. En ce qui concerne les outils coupants pour tournage, il a aussi mis au point la technique de coulée en coquille. Il a pris une part importante à la mise au point de pièces en fonte à graphite diffus de recuit et l'a appliquée avec succès aux culbuteurs, aux bielles, et, sous forme de coulée coquille, centrifuge, aux bagues de roulements. Il a déterminé l'influence des éléments en particulier Mg et Pb dans la fonte G.S. et par analyse thermique l'influence des éléments normaux sur le solidus des fontes grises ou G.S. Il a apporté des perfectionnements dans le traitement thermique des fontes malléables perlitiques.

Il a apporté une contribution importante au formage à froid par extrusion en étudiant les conditions de globulisation rapide, le rôle des éléments divers,

les propriétés mécaniques en fonction de la déformation plastique imposée.

Il a poursuivi d'importantes études sur la coupe des métaux et mis au point des techniques d'essais rapides portant sur petits échantillons. Il en a montré la pleine validité. Il a défini ainsi la capacité de coupe des aciers à outils et établi l'influence de la composition chimique. Il a défini de même l'usinabilité. Pour la fonte, ses essais sur toutes petites éprouvettes permettent une définition locale en fonction de la forme et des dimensions du moulage de la vitesse de solidification et de la structure.

Sur acier, il définit l'usinabilité en fonction de la dureté, de la structure, de la composition, du taux d'étréage. Dans les aciers de décolletage ou à usinabilité améliorée, il précise le rôle des éléments S, Pb, Te, etc., et leurs interactions.

Il a poursuivi des études sur les garnissages et les laitiers de fusion d'acier, sur les aciers réfractaires pour installations de traitements thermiques et cémentation.

Il prend une part très importante à l'établissement de normes sur les matériaux communs aux constructeurs d'automobiles Français.

Pour l'ensemble de son œuvre, Pierre Mathon a bien mérité l'attribution d'une Médaille d'argent du Comité des Arts Physiques.

Rapport présenté par M. Albert Arnulf, au nom du Comité des Arts Physiques sur l'attribution d'une Médaille d'argent à M. Michel Philbert, pour ses réalisations expérimentales, notamment en strioscopie.

M. Philbert, après de brillantes études à l'Ecole Supérieure d'Optique, où il a obtenu son diplôme d'ingénieur, a travaillé à l'Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales comme ingénieur de recherches. Il possède une égale maîtrise de l'électronique et de l'optique, qui lui a permis des réalisations instrumentales remarquables.

Une part importante de son activité a été consacrée au perfectionnement des appareils optiques de visualisation des écoulements gazeux. Une première série de travaux a porté sur la strioscopie à couteau.

Dans certaines souffleries supersoniques, l'amplitude des vibrations est telle que toute strioscopie devient très diffi-

cile visuellement, et complètement impossible à cinématographier. M. Philbert a surmonté cette difficulté en asservissant le couteau aux mouvements de l'image dans laquelle il travaille.

Les variations de la masse volumique des gaz dans l'écoulement peuvent être connues à partir de mesures photométriques effectuées sur des clichés ou des vues cinématographiques de la figure strioscopique ; ce sont des opérations extrêmement longues et délicates. M. Philbert gagne un temps considérable, et améliore la précision par deux procédés : le premier explore la figure strioscopique par lignes parallèles, au moyen d'un dispositif à miroir tournant ; les intensités transmises aux divers points de la veine gazeuse sont reçues par un photomultiplicateur, qui transmet sa réponse à un oscillographe cathodique.

Le deuxième procédé consiste, dans l'image strioscopique enregistrée par une installation de télévision, de sortir le signal video correspondant à une ligne du balayage choisie à volonté, et de l'envoyer sur un oscillographe cathodique où il fournit directement le profil des variations de la masse volumique dans l'écoulement. Un circuit intégrateur fournit, sur une deuxième piste, le profil des déformations de la surface d'onde. Cet appareil a été conçu à l'origine pour la mesure des défauts des surfaces optiques, et continue à être utilisé dans ce but. Il est construit par l'industrie et a donné lieu à plusieurs publications.

M. Philbert a effectué la mise au point de l'utilisation en soufflerie de la strioscopie interférentielle et de divers autres dispositifs, en particulier du contraste de phase, dont la sensibilité ne peut être atteinte par aucun autre procédé optique, et qui a fourni des résultats intéressants dans le domaine des très grandes vitesses en atmosphère très raréfiée.

Il est le premier à avoir mis au point les installations de lasers à rubis puissants en service à l'O.N.E.R.A. Il s'est attaché à la mesure de l'énergie des éclairs laser, ainsi que de la distribution des flux émis en fonction du temps. Ce travail, très difficile en raison de l'énorme disproportion entre les éclaircissements produits par le laser et par la source de référence, a permis d'établir un des tous premiers appareils étalonnés en valeur absolue. Ce photomètre a, depuis, servi de modèle à diverses réalisations.

M. Philbert s'est intéressé au calcul optique, et on lui doit plusieurs réalisations récentes.

M. Philbert, par les réalisations instrumentales, dont plusieurs sont construites industriellement, a apporté des perfectionnements importants à l'étude des écoulements gazeux, comme à celle des systèmes optiques, ainsi que les premières mesures précises de la puissance des lasers à grande intensité. Son œuvre mérite très largement la médaille d'argent de la Société d'Encouragement à l'Industrie Nationale.

Rapport présenté par M. Boris Vodar, au nom du Comité des Arts Physiques, sur l'attribution d'une Médaille d'argent à M. Michel Rapin, pour ses travaux divers et notamment sur les hautes pressions.

Ingénieur de l'Ecole Centrale des Arts et Manufactures, M. Rapin a fait carrière au C.E.A. dans son Centre de Bruyère-le-Châtel.

Ses travaux portent sur les transformations de phase et les propriétés des

métaux sous très hautes pressions, sur la soudure par bombardement électronique, et sur la fragilisation des aciers par l'hydrogène.

Ayant fait brillamment ses preuves sur des études métallurgiques, notam-

ment aux très hautes pressions sur le plutonium et l'uranium, M. Rapin est devenu le chef d'un Service de Métallurgie.

En une dizaine d'années les travaux de M. Rapin et de ses collaborateurs ont fait l'objet de 28 publications scientifiques et communications ou conférences. M. Rapin a ainsi contribué au renom international de la science et de la technique française ; il est fréquemment invité à des réunions internationales, et il a été le premier représentant français à l'European High Pressure Research Group, qui lui a confié l'organisation d'une Conférence sur la Recherche aux Hautes Pressions, qui a eu lieu à Cadarache en 1967 et a été un grand succès.

Les travaux sur la soudure ont fait l'objet du dépôt de deux demandes de brevets d'invention et de nombreuses communications.

J'insisterai particulièrement sur les

travaux de M. Rapin sur les très hautes pressions. Le groupe qu'il dirigeait personnellement (avant de s'être vu confier récemment des responsabilités plus larges) a rapidement acquis une réputation internationale. Il a mis en œuvre des recherches dans divers domaines, notamment sur les propriétés mécaniques sous pressions, importantes pour les techniques du formage des métaux, notamment pour l'« extrusion dite hydrostatique ». Le travail personnel de M. Rapin, qui a fait l'objet d'une soutenance de Thèse de Doctorat, a porté sur une étude d'une difficulté extrême, et cela pour plusieurs raisons évidentes : celle du diagramme d'état du plutonium, qu'il a étendu jusqu'à 135 kilobars.

Pour l'ensemble des raisons qui viennent d'être successivement rappelées, la Société pour l'Encouragement à l'Industrie Nationale a choisi M. Rapin pour l'attribution de sa Médaille d'argent au titre du Comité des Arts Physiques.

Médailles de bronze

Rapport présenté par M. Paul Laffitte, membre de l'Institut au nom du Comité des Arts Chimiques, sur l'attribution d'une Médaille de bronze à M. Maurice Lanquetin, pour la coopération technique qu'il a apportée à l'atelier de mécanique du Centre de Recherches de Microcalorimétrie.

M. Maurice Lanquetin, père de cinq enfants, est entré au Centre de Recherches de Microcalorimétrie et de Thermochimie du C.N.R.S. à Marseille le 1^{er} avril 1960, à l'atelier de mécanique où il travaille depuis en équipe avec un autre tourneur, un fraiseur, un tôlier et un mécanicien d'horlogerie.

M. Lanquetin est un excellent technicien, tourneur de précision, qui n'est pas

un simple exécutant. Il est non seulement à même de répondre aux exigences du personnel aussi bien technique que chercheur, non seulement capable d'assurer une production de haute qualité, mais encore de concevoir la réalisation d'appareillages nouveaux à partir de principes ou de qualifications souhaitées par les chercheurs, bien souvent incompetents en mécanique.

Citons deux exemples : grâce à lui des appareils brevetés ont pu être mis au point : par exemple la réalisation mécanique du calorimètre C.R.M.T. Grâce à lui encore, nous avons pu mettre au point un calorimètre de précision travaillant à la température de l'azote liquide. Les essais terminés la semaine dernière sont très concluants et nous envisageons d'en confier la commercialisation à une Société spécialisée dans la construction d'appareils scientifiques.

Pour éviter le givrage à ces très basses températures, M. Lanquetin a réalisé un appareil absolument étanche : on peut atteindre un vide de 10^{-6} torr. Cette étanchéité a posé quelques problèmes délicats, compte tenu des écarts importants de température au cours des cycles thermiques (température ordinaire à température de l'azote liquide), dont M. Lanquetin est très bien venu à bout.

M. Lanquetin participe activement à la vie du Centre, grâce à l'intérêt qu'il porte à toutes les réalisations que nous sommes amenés à décider. C'est en fait grâce à lui que notre atelier de méca-

nique est à même de réaliser tout ce qu'il y a de plus délicat.

Sur le plan humain, il a d'excellentes qualités qui lui permettent d'obtenir de chacun à l'atelier le meilleur de lui-même. Délégué élu du personnel de l'atelier au Comité de gestion du Centre, il réussit parfaitement à concilier l'intérêt du Centre dans son ensemble avec celui de chacune des personnes qui le constituent. En tant que Directeur, j'apprécie beaucoup son jugement sûr et équilibré.

J'ajoute pour terminer que, sans lui, nous serions incapables de réaliser les appareils prototypes mis au point au laboratoire et que l'Agence Nationale pour la Valorisation de la Recherche (A.N.V.A.R.) a décidé de faire commercialiser dans les prochains mois par l'industrie locale, sans parler des appareils déjà commercialisés.

Pour toutes ces raisons, qui montrent succinctement le rôle que joue pour nous M. Lanquetin dans cette liaison recherche fondamentale-recherche appliquée-industrie, je propose que soit attribuée à ce dernier une Médaille de bronze.

Rapport présenté par M. Jacques Tréfouël, membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Chimiques, sur l'attribution d'une Médaille de Bronze à M^{me} Lucienne Sadorge, pour la longue coopération, compétente et dévouée, qu'elle a apportée aux travaux scientifiques de l'Institut Pasteur.

Mieux que personne, je puis rappeler ce que furent les diverses activités de M^{me} Sadorge au Laboratoire de Chimie Thérapeutique de l'Institut Pasteur pendant les trente-cinq ans de sa vie qu'elle y a consacrés.

Entrée, en principe, comme femme de ménage, elle se glissa peu à peu à des places de plus en plus importantes, veillant à ce que le laboratoire ne manque jamais de matières premières, s'intéressant aux manipulations chimiques

avec tant d'intelligente curiosité que certaines d'entre elles pouvaient lui être confiées en toute tranquillité.

Seul, l'âge de la retraite a éloigné de son travail cette précieuse collaboratrice, tout d'abord de mon patron Ernest Fourneau — depuis, de ma femme et de moi-même — enfin du Professeur Marc Julia qui a tout tenté pour faire prolonger ses activités. Elle laisse un grand vide parmi tous ceux qui s'étaient habitués à sa vigilante attention.

Rapport présenté par M. Léopold Esconde, membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques, sur l'attribution d'une Médaille de bronze à M. Gaston Escudé, pour ses travaux personnels et son activité au Laboratoire d'Electronique industrielle de l'Ecole Nationale Supérieure d'Electronique, d'Informatique et d'Hydraulique de Toulouse.

M. G. Escudé a très efficacement contribué à la mise au point de divers dispositifs électroniques et électrochimiques, tendant au contrôle de la vitesse des machines à courant alternatif, et plus particulièrement, à l'élaboration de systèmes électroniques appliqués sous moteurs asynchrones, à rotor bobiné, en vue du réglage de la vitesse.

Il a également participé aux travaux concernant les circuits de régulation et synchronisation de la vitesse de ces machines, dont l'ensemble a permis la réalisation du dispositif connu sous le nom de : « Thyrsyntrol » et qui a fait l'objet de plusieurs brevets et d'une exploitation industrielle.

Dans le cadre de son activité au Laboratoire d'Electronique Industrielle de l'E.N.S.E.I.H.T., M. Escudé a également, très largement collaboré à l'étude et à la réalisation de systèmes de commandes des convertisseurs statiques d'énergie, plus spécialement adaptés aux redresseurs et onduleurs, mettant en jeu les propriétés des composants semi-conducteurs, connus sous le nom de « Thyristors ».

Apportant sa collaboration aux travaux de recherches faisant l'objet de thèses de Doctorat, M. Escudé a également apporté son précieux concours à la réalisation et à l'application de systèmes électroniques aux machines électriques statiques et tournantes. Il a, ainsi, participé à la mise au point de nouveaux

procédés de mesure des inductances de fuite totale des transformateurs.

— A la régulation du facteur de puissance des machines asynchrones synchronisées.

— A l'étude des compensateurs des puissances fluctuantes.

— Aux travaux de recherche portant sur l'échauffement des machines électriques (travail important qui a suscité l'intérêt de l'industrie électromécanique).

Enfin, M. Escudé a été amené de la sorte à approfondir dans le domaine de l'électronique à basse énergie, un grand nombre de circuits, concourant à la régulation, à l'étude de la fiabilité, au traitement du signal et à l'exploitation des informations.

Il est remarquable de noter que tout en assurant un service difficile, M. Escudé a continué ses études, visant à une promotion scientifique supérieure et qu'il est titulaire actuellement de cinq Certificats de Licence.

Ses efforts dans son travail et dans le désir d'une meilleure formation scientifique et professionnelle, font que nous devons reconnaître les grands mérites de notre collaborateur, dont le dévouement, les aptitudes intellectuelles et physiques et la haute qualification professionnelle, nous conduisent à considérer qu'il mérite la distinction que nous sollicitons pour lui.

Rapport présenté par M. Jacques Pomey, membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques, sur l'attribution d'une Médaille de bronze à MM. Henri Josselin et Maurice Tong-Cuong, pour leur participation aux études entreprises à la Régie Renault, sur les problèmes d'emboutissage.

M. Josselin et M. Tong Cuong sont tous les deux désignés pour une Médaille de bronze de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale.

L'exposé des motifs est commun pour ces deux lauréats en raison du fait que cette distinction récompense un même travail fait en collaboration par MM. Jos-

selin et Tong Cuong aux laboratoires de recherches de la Régie Renault.

M. Henri Josselin est né le 3 décembre 1929. Il a passé avec succès les diplômes E.N.P. puis d'Ingénieur métallurgiste du C.N.A.M. Il est entré à la Régie Renault en novembre 1951 comme Agent technique puis est passé Ingénieur en mai 1963.

M. Maurice Tong Cuong est né le 20 septembre 1936. Il a passé son B.E.P.C., a été à l'Ecole Dorien puis a obtenu le titre d'Ingénieur métallurgiste du C.N.A.M. Il est entré à la Régie Renault en juin 1957 comme Agent technique puis est passé Cadre en janvier 1967 et Ingénieur en avril 1969.

Les études entreprises à la Régie Renault sur l'emboutissabilité des tôles minces entrent dans le cadre des recherches effectuées ces dernières années tant en France qu'à l'étranger. Elles ont pour but, à partir de l'analyse des problèmes posés dans une fabrication industrielle de contribuer à une meilleure connaissance des modes de déformation mis en jeu dans les zones à rupture et de rechercher des critères d'essais de laboratoire représentatifs des propriétés de plasticité nécessaires à un matériau pour satisfaire de façon économique à une opération donnée.

Dans un premier stade, MM. Josselin et Tong Cuong étudient les emboutis par analyse des déformations d'un réseau de cercles tangents préalablement déposé sur le flan à emboutir. La mesure des longueurs des axes des ellipses obtenues après emboutissage permet d'établir des cartes donnant les courbes d'égal allongement, et d'égal contraction, de délimiter les zones d'expansion et de rétraint. L'interprétation des cartes conduit à une appréciation mesurable du niveau de déformations du métal et à un repérage des zones critiques. Dans ces régions, la comparaison entre les niveaux de déformation atteints sur

la pièce et la limite de formage du métal conduit à :

— définir la sévérité d'un emboutissage.,

— chiffrer la marge de sécurité de l'opération,

— juger de l'incidence d'une modification d'outillage ou de réglage d'une machine, d'une lubrification éventuelle et de l'état de la tôle d'acier employée.

Cette méthode de travail, utilisée tant pour la mise au point de pièces nouvelles que pour le choix du matériau permettant le meilleur compromis entre le prix et la sécurité de fabrication, s'avère fructueuse.

Dans une seconde étape, MM. Josselin et Tong Cuong ont cherché à établir des corrélations entre les résultats d'emboutissage sous presse et les propriétés de plasticité des tôles mesurées par essais de laboratoire. Le manque de progressivité des résultats d'une fabrication industrielle rend difficilement applicable les corrélations linéaires ou corrélations des rangs. Une méthode de seuil, c'est-à-dire de repérage des valeurs des caractéristiques mesurées en laboratoire, au-delà desquelles l'emboutissage est parfaitement réussi, est instructive. On obtient ainsi un classement satisfaisant en associant un critère de base à un critère complémentaire, chacun d'eux caractérisant un mode de déformation différent expansion et rétraint. Au cours de ces études, il est apparu que les coefficients d'écrouissage et d'anisotropie sont fondamentaux en emboutissage et que leur influence sur le comportement du métal est simultanée. En associant ces deux critères des faisceaux de droites séparant des lots de métal donnant de bons et mauvais résultats en fabrication ont été établis pour chaque cas étudié. La position relative et la pente de ces droites sont indicatives de la sévérité de l'emboutissage réalisé d'une part et des propriétés de plasticité minimales que doit avoir le métal pour donner satisfaction à l'emboutissage.

Rapport présenté par M. Léopold Escande, membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques, sur l'attribution d'une Médaille de bronze à M. Henri Léger, pour son rôle et ses initiatives précieuses, dans le cadre de l'enseignement technique et technologique.

M. H. Léger, Responsable de l'atelier de Mécanique Générale et Machines-Outils, contribue, avec beaucoup de compétence, à la formation pratique des élèves de l'E.N.S.E.I.H.T. par le moyen de Travaux Pratiques d'atelier, dont il a l'entière charge.

Il assure, en outre, la délicate responsabilité de faire réaliser le matériel nécessaire au développement des travaux scientifiques, en liaison avec tous les Laboratoires de l'E.N.S.E.I.H.T. Sa contribution aux résultats obtenus dans les divers domaines de ces travaux est importante et indispensable à leur bonne conclusion.

En particulier, M. H. Léger a pris une grande part dans la réalisation du dispositif original, permettant de mesurer « le débit sanguin cérébral avec indicateurs radio-actifs » qui, utilisé par le Service de Neurologie au C.H.U. de Purpan, a permis l'avancement rapide des Recherches en Neuropathologie et la soutenance de plusieurs thèses dans cette spécialité.

En outre, et plus récemment, M. Léger a réalisé le premier caisson à oxygène hyperbare hypotherme à perfusion continue, devenu opérationnel et fonctionnant depuis quelques mois déjà au Laboratoire de Chirurgie expérimentale du C.H.U. de Purpan.

En relation avec l'Institut de Mécanique des Fluides, il a également réalisé des prototypes d'amplificateurs fluides dont on sait l'intérêt qu'ils présentent dans de nombreux domaines. Pour ce même Institut de Recherches, il a réalisé des fusées, modèles étudiés dans la soufflerie supersonique.

Dans le cadre de ses activités, en relation avec l'enseignement et la recherche M. H. Léger, apporte un concours indispensable au bon développement de ces disciplines.

La très haute qualification professionnelle de M. Léger, ses aptitudes intellectuelles et physiques en ont fait notre plus précieux Collaborateur, et pour ces raisons, nous estimons qu'il mérite sans nul doute la distinction que nous sollicitons pour lui.

