

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](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 possible d'une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.

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

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

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

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

	1967, n° 4 (oct.-déc.)
	1968, n° 1
	1968, n° 2
	1968, n° 3
	1968, n° 4
	1969, n° 1 (janv.-mars)
	1969, n° 2
	1969, n° 3
	1969, n° 4
	1970, n° 1
	1970, n° 2
	1970, n° 3
	1970, n° 4
	1971, n° 1
	1971, n° 2
	1971, n° 4
	1972, n° 1
	1972, n° 2
	1972, n° 3
	1972, n° 4
	1973, n° 1
	1973, n° 2
	1973, n° 3
	1973, n° 4
	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
VOLUME TÉLÉCHARGÉ	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	1977, n° 2
Adresse	Paris : Société d'encouragement pour l'industrie nationale, 1977

Collation	1 vol. (51-[1] p.) : ill. ; 27 cm
Nombre de vues	58
Cote	INDNAT (119)
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.119

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 reporterà 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 abondant, 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, publient 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 Emtoz, [« 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 EMTOZ, [« 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.

S. E. I. N.
Bibliothèque

L'INDUSTRIE NATIONALE

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

*fondée en 1801
reconnue d'utilité publique*

Revue trimestrielle
1977 - N° 2

• •

N° 2-1977

SOMMAIRE

TEXTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

- L'institut de soudure et le soudage dans les industries mécaniques,

par M. EVRARD, p. 3

- Les techniques de fonderie dans leurs rapports avec les industries mécaniques,

par P. BRUNSCHWIG, p. 21

- Charpentes en bois et technologies nouvelles,

par P. CRUBILÉ, p. 37

Publication sous la direction de M. Henri NORMANT

Membre de l'Institut, Président

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

Abonnement annuel : 60 F le n° : 20,00 F C.C.P. Paris, n° 618-48

NOTIFICATION IMPORTANTE

CHANGEMENT D'ADRESSE

LE PREFET DE PARIS,

Vu l'arrêté préfectoral du 27 janvier 1977 étendant la dénomination « place SAINT-GERMAIN-DES-PRES à la partie de la rue de Rennes comprise entre la rue GUILLAUME-APOLLINAIRE et le boulevard SAINT-GERMAIN,

Arrête :

Article I^r. — Les parcelles riveraines de la place SAINT-GERMAIN-DES-PRES sont identifiées sur cette voie conformément aux indications suivantes :

SOCIETE D'ENCOURAGEMENT POUR L'INDUSTRIE NATIONALE
44, rue de Rennes, 75006 PARIS

devient

SOCIETE D'ENCOURAGEMENT POUR L'INDUSTRIE NATIONALE
4, place Saint-Germain-des-Prés,
75006 PARIS

AVIS

La CEREMONIE DE REMISE DES PRIX ET MEDAILLES, aura lieu le
SAMEDI 8 OCTOBRE 1977, à 16 h
dans l'Hôtel de la Société,
4, place Saint-Germain-des-Prés,
75006 PARIS

TEXTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

TEXTE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

L'Institut de Soudure et le soudage dans les industries mécaniques ()*

par Marcel EVRARD,
Directeur Général de l'Institut de Soudure

Le soudage est une technique d'assemblage très ancienne ; en effet, on peut raisonnablement la faire remonter au moment où l'homme, ayant découvert la fabrication du fer, a travaillé celui-ci par forgeage.

De nombreux documents et des témoins archéologiques montrent que les anciens étaient experts dans l'art du soudage à la forge. Toutefois, cette technique présente quelques inconvénients et, en particulier, celui de ne pas se prêter à toutes les formes et dimensions des pièces. Aussi, les techniciens de l'antiquité ont-ils cherché rapidement à localiser la zone de chauffe en imaginant de souffler avec la bouche sur un foyer convenablement entretenu afin de diriger un certain flux calorifique sur un point donné (fig. 1).

D'améliorations en améliorations, on est ainsi arrivé, en utilisant une flamme plus ou moins portable, à souder des métaux à bas point de fusion, comme le plomb. Il s'agit là, en fait, de la première application industrielle pour la fabrication des tuyauteries que les romains utilisèrent largement, en particulier, lors de la construction des thermes.

Ce n'est qu'à la fin du XIX^e siècle que l'on voit apparaître des flammes à tempé-

ratures élevées, obtenues tout d'abord à partir de mélange oxygène/hydrogène, puis oxygène/gaz de ville, et enfin oxygène/acétylène.

Il convient de noter ici que la mise au point de ce dernier type de flamme, qui a conduit à la naissance du soudage moderne, eut la portée d'une révolution industrielle ainsi que le soulignait Louis Le Chatelier dans la revue des *Chemins de fer et des tramways* en 1909.

Le développement de cette nouvelle technique d'assemblage est, en fait, lié à une série d'inventions françaises majeures entre 1893 et 1903 :

- la création du four électrique par Henry Moissan, qui a permis la fabrication industrielle du carbure de calcium à partir duquel est obtenu l'acétylène ;
- l'extraction de l'oxygène de l'air, par rectification de l'air liquide, due à Georges Claude ;
- enfin, la mise au point du chalumeau oxyacétylénique par Charles Picard.

L'Institut de Soudure — dans sa forme actuelle — a été créé en 1930, époque à

(*) Conférence prononcée dans l'Hôtel de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale, le 20 janvier 1977.



FIG. 1. — Fresque égyptienne représentant l'emploi d'un « chalumeau à bouche » constitué d'un tube en roseau et d'une pointe conique en terre cuite.

partir de laquelle il a repris progressivement, pour les développer, les activités de l'Office Central de l'Acétylène et de la Soudure Autogène qui, lui, avait été créé en décembre 1906. Ce premier organisme avait eu essentiellement pour objet à l'origine de faire connaître les applications du soudage aux gaz. Si au début les efforts ont porté sur ce procédé, il est bien évident que, au fur et à mesure de leur apparition, les techniques nouvelles ont été prises en considération par l'Institut de Soudure.

C'est ainsi qu'aujourd'hui ce dernier se préoccupe d'étudier les applications des

procédés mettant en œuvre le bombardement électronique, le laser, les plasmas d'arc, la friction..., sans négliger cependant les moyens plus classiques et notamment l'arc électrique.

Actuellement, l'Institut de Soudure a le statut d'une Association régie par la loi de 1901. Le choix de ce statut est lié au fait qu'on ne peut considérer le soudage comme une profession. C'est en réalité une technique de fabrication qui couvre un très grand nombre de secteurs de l'industrie ; le soudage est devenu un élément prépondérant pour la construction chaussée, les ponts, la charpente mé-

tallique, l'automobile, pour nombre de fabrications plus familières comme le matériel ménager et aussi pour l'entretien d'équipements de toute nature.

L'Institut de Soudure constitue donc une singularité par rapport à d'autres centres techniques dont le rattachement à une profession est plus évident. Ceci conduit naturellement à des problèmes de financement, les fonds alimentant le budget provenant :

- des cotisations des membres fondateurs ;
- des participations aux frais pour les travaux effectués à la demande des entreprises ;
- des contrats d'études à court ou moyen terme ;

— de subventions éventuelles.

Les participations aux frais pour l'assistance technique constituent, en réalité, l'essentiel des ressources ; il en résulte, du fait de la multiplicité des activités, notamment pour la recherche, quelques difficultés en ce qui concerne l'acquisition des matériels modernes nécessaires aux travaux.

Ces difficultés ont été en partie compensées grâce à des aides spécifiques accordées à l'Institut de Soudure par le Ministère de l'Industrie et de la Recherche pour l'achat d'équipements et la construction de locaux.

Les moyens de l'Institut de Soudure sont actuellement concentrés sur la région parisienne (fig. 2) et il y a à cela



FIG. 2. — Institut de Soudure à Paris (siège).

plusieurs raisons. La première, d'ordre historique, est en réalité de peu d'importance. La seconde, beaucoup plus fondamentale, est que les matériels disponibles sont utilisés à plusieurs fins et notamment pour la recherche et l'enseignement. Or, ces matériels, souvent très coûteux, ne peuvent être raisonnablement installés en plusieurs exemplaires dans des endroits différents, ce qui deviendrait nécessaire si les activités actuellement déployées devaient être séparées.

Une décentralisation ne pourrait donc être envisagée que pour l'ensemble, ce qui poserait un problème financier actuellement insoluble. Il n'en reste pas moins que le souci de se rapprocher des entreprises qui demandent l'assistance de l'Institut de Soudure est réel et c'est ainsi que, dans les années écoulées, ont été installées à Port-de-Bouc, près de Fos-sur-Mer, à Arles et à Lyon, des antennes

consacrées soit à l'assistance technique, soit à la formation continue, soit aux deux en même temps.

En outre, dans le domaine de l'assistance technique, l'Institut de Soudure dispose de délégations régionales à Lille et à Metz. Enfin, une Unité Mobile de Formation (U.M.F., fig. 3), constituée par une remorque de 35 tonnes entièrement équipée, ainsi que de moniteurs itinérants, permet de répondre sur place, et dans la France entière, aux besoins des industries en matière de formation continue.

Les tâches en relation avec les différentes activités de l'Institut de Soudure sont assurées par divers services dotés des moyens nécessaires à leurs actions. Les interventions peuvent ainsi concer-ner :

- la métallurgie et les essais mécaniques (fig. 4) ;

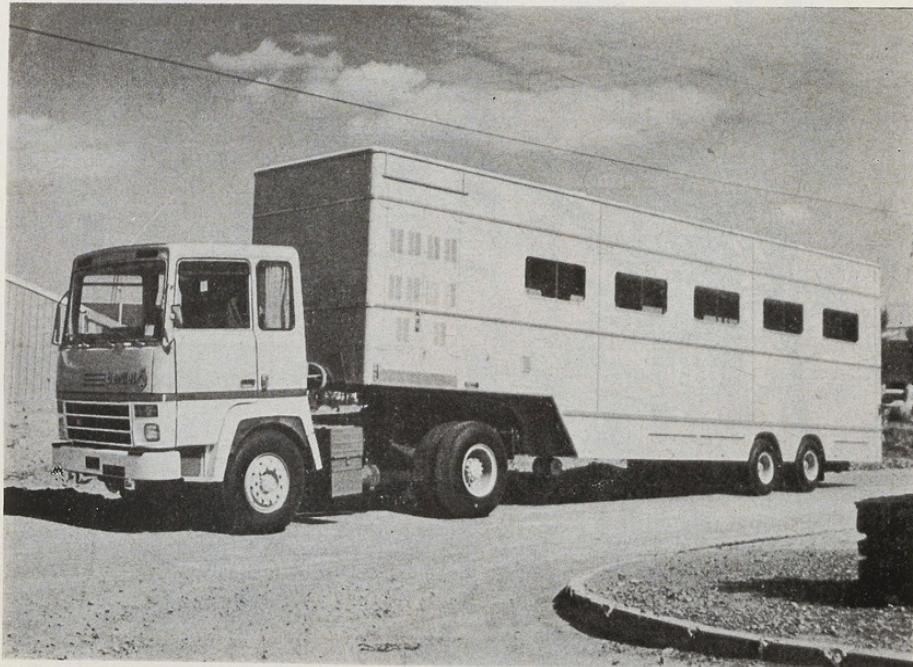


FIG. 3. — Unité mobile de formation Institut de Soudure (U.M.F.).

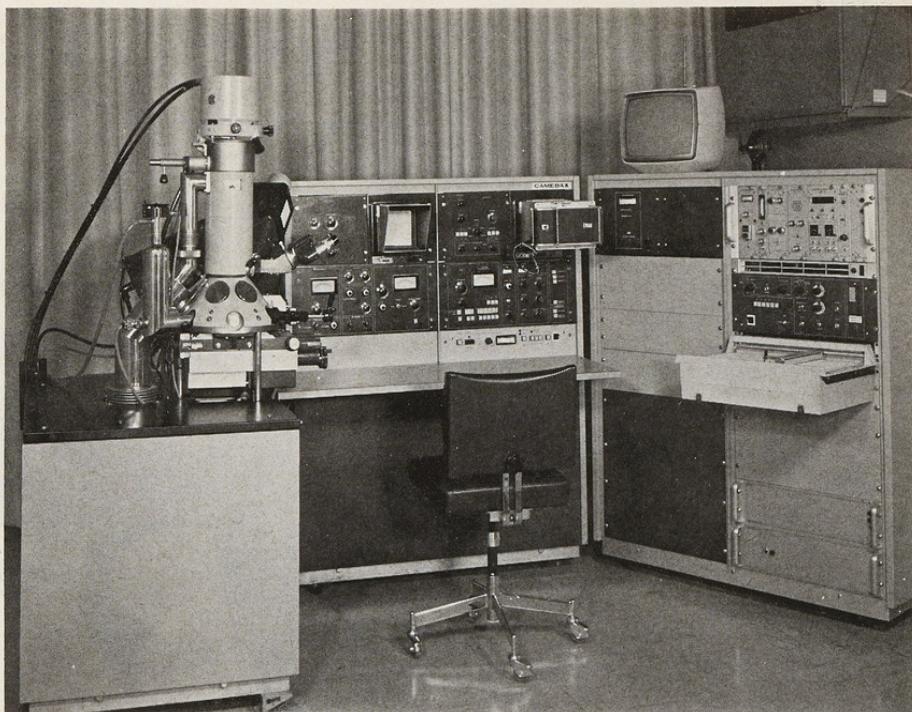


FIG. 4. — Microscope électronique à balayage et microsoudure CAMEBAX utilisé en métallurgie du soudage.

- le contrôle des fabrications ;
- les essais (modes opératoires et examens non destructifs) ;
- les analyses chimiques (fig. 5) ;
- la conception et le calcul des constructions soudées ;
- la documentation ;
- la normalisation (Comité de Normalisation de la Soudure) ;
- l'enseignement et la formation continue.

A cela, il convient d'ajouter la participation à de nombreuses Commissions tant sur le plan national qu'international.

Cet ensemble correspond à un effectif d'environ 420 personnes, en majorité in-

génieurs et techniciens, environ 150 d'entre eux étant pratiquement en déplacements permanents dans les entreprises ou sur des chantiers dont certains sont situés à l'étranger.

L'étude des procédés de soudage et de leurs applications nécessitent un matériel important ainsi que des moyens d'investigation convenables. Il n'est évidemment pas possible de faire ici un inventaire précis des matériels en service qui ont été mis en place au cours des années. Mais, à l'heure actuelle, l'Institut de Soudure dispose de moyens permettant de mettre en œuvre tous les procédés de soudage y compris le faisceau d'électrons, le laser et la friction, par exemple.

On peut dire aujourd'hui que toutes les sources possibles d'énergie sont utilisées en soudage, depuis l'énergie chimique

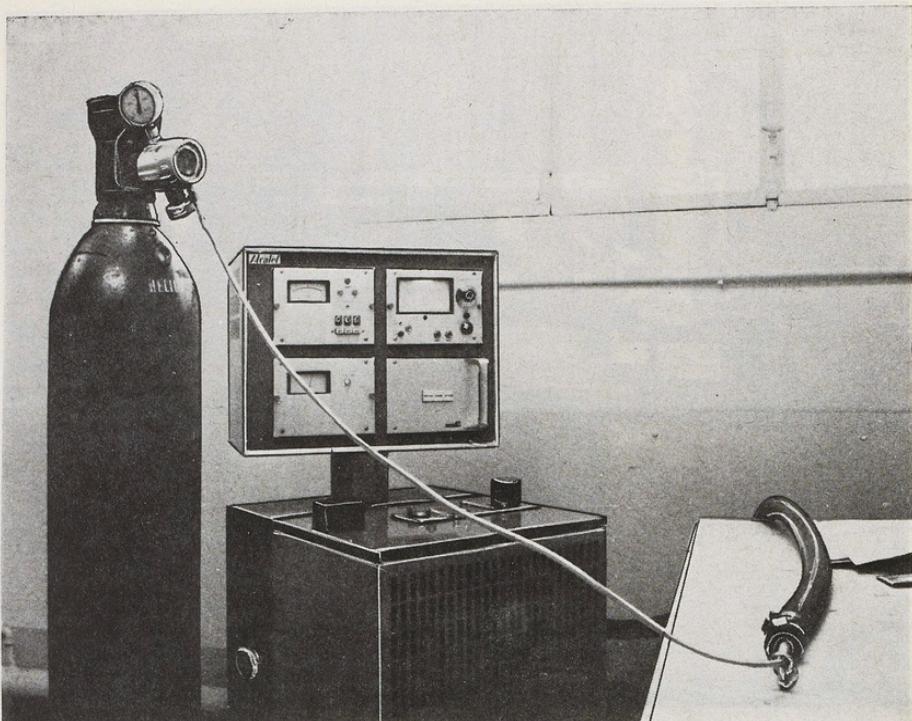


FIG. 5. — Spectromètre de masse pour recherche des fuites.

(flamme) jusqu'à l'énergie lumineuse (laser) en passant par les énergies électriques et mécaniques. Cependant, les quantités de chaleur disponible depuis ces sources n'offrent pas des concentrations identiques.

Un graphique, proposé par Rykaline (fig. 6) illustre les possibilités des différentes sources de chaleur utilisées en soudage. Devant une telle variété de moyens, on peut légitimement se poser la question des domaines d'application propres à chacun d'eux. En fait, le soudage à l'arc électrique, depuis les premiers brevets de Benardos et de Slavianoff, a connu un développement considérable. Actuellement pour la France, les ventes de matériels de soudage à l'arc représentent 40 à 45 % de l'ensemble des matériels de soudage électrique. Mais, à l'intérieur même de cette technique, la

situation des divers procédés a évolué au cours du temps, le soudage semi-automatique et automatique ayant pris, ces dernières années, une extension très importante. Ainsi, si l'on se reporte à la masse de métal déposé, en partant de statistiques disponibles en France, le soudage manuel avec électrodes enrobées, qui représentait 75,8 % du total en 1967, n'arrive pour l'année 1974 qu'à 52,4 %.

Dans le même temps, la part des fils utilisés sous atmosphère gazeuse pour le soudage automatique et semi-automatique est passée de 16,9 % à 37,1 % ; le soudage sous flux s'accroissant de son côté de 7,3 à 8,6 %.

En complément il faut noter que pour l'année 1974 on voit apparaître le soudage avec fils fourrés qui représente maintenant 1,9 % du total.

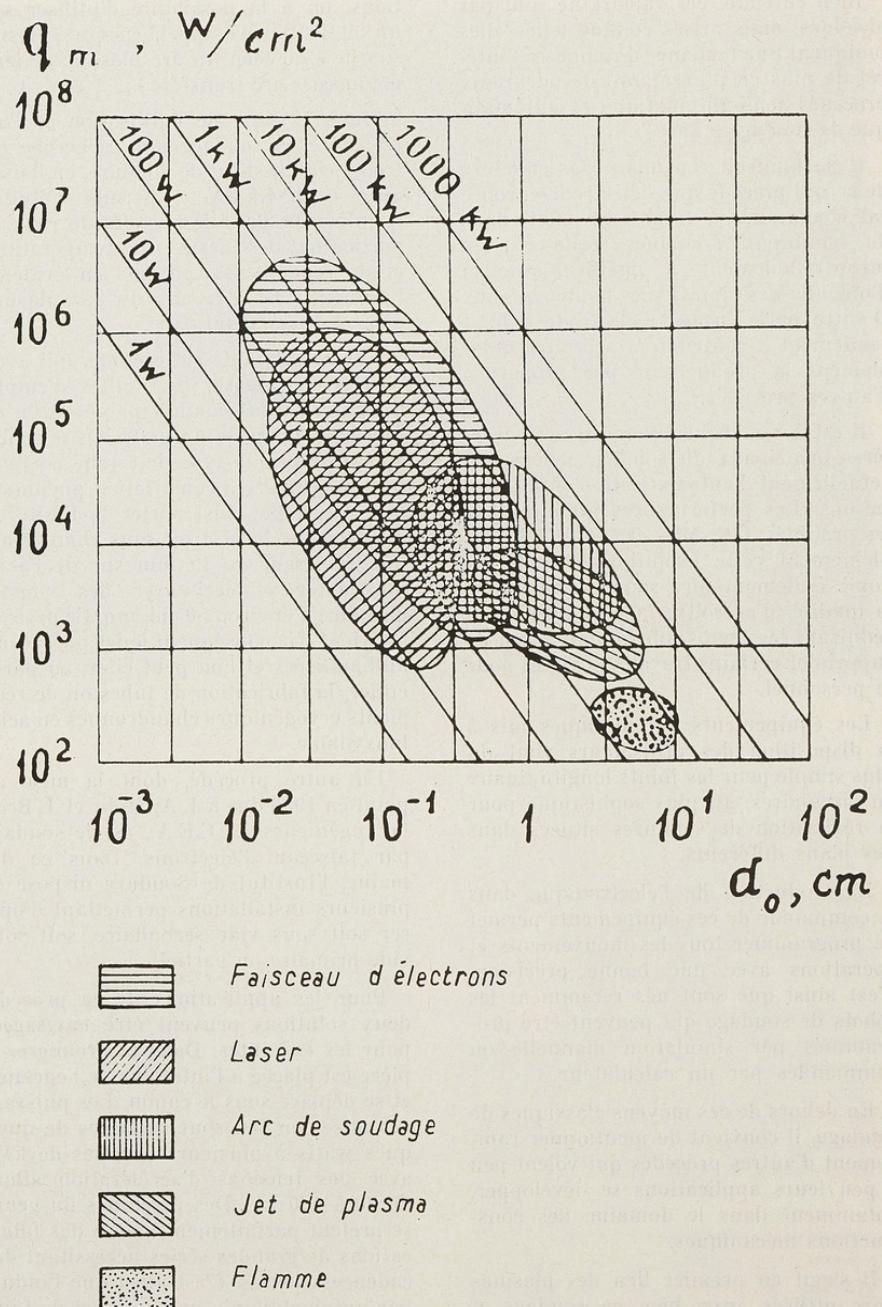


FIG. 6. — Flux thermique maximale et concentration de l'énergie thermique dans les sources de chaleur utilisées en soudage.

Bien entendu, ces valeurs ne sont pas absolues, mais prises comme telles elles indiquent une tendance qui montre l'intérêt de plus en plus manifeste porté aux procédés semi-automatique et automatique de soudage à l'arc.

Il ne faudrait cependant pas conclure de ce qui précède que l'électrode enrobée est condamnée à terme. En effet, dans de nombreux domaines, celle-ci reste incontestablement le meilleur moyen d'obtenir des joints de haute qualité. D'autre part, l'usage d'électrode à haut rendement a contribué à accroître notablement la productivité par rapport à d'autres procédés.

Il est à remarquer que l'un des caractères principaux du soudage à l'arc est actuellement l'automatisation des fabrications. Les performances atteintes par les procédés TIG, MIG et MAG justifient pleinement cette évolution laquelle répond également aux soucis d'améliorer la qualité, d'accroître la productivité en réduisant les temps morts mais aussi de supprimer certains travaux pénibles pour le personnel.

Les équipements automatiques mis à la disposition des utilisateurs vont du plus simple pour les joints longitudinaux ou circulaires, au plus sophistiqué pour la réalisation de soudures situées dans des plans différents.

L'introduction de l'électronique dans la commande de ces équipements permet de programmer tous les mouvements et opérations avec une bonne précision. C'est ainsi que sont nés récemment les robots de soudage qui peuvent être programmés par simulation manuelle ou commandés par un calculateur.

En dehors de ces moyens classiques de soudage, il convient de mentionner rapidement d'autres procédés qui voient peu à peu leurs applications se développer, notamment dans le domaine des constructions mécaniques.

Il s'agit en premier lieu des plasmas d'arc utilisés aussi bien en soudage et en coupage, qu'en recharge et en projection. Pour ces différentes applica-

tions, on a la possibilité d'utiliser soit un jet de plasma, appelé encore « plasma soufflé » ou bien un arc plasma, dénommé aussi « arc transféré ».

Dans le cadre de l'utilisation de l'arc transféré en soudage une recherche entreprise à l'Institut de Soudure, en liaison avec la SNECMA, a permis d'étudier les plasmas d'arc de ce point de vue ; en particulier, des mesures de températures et de rendements ont mis en évidence l'influence de la nature du gaz plasma-gène et de son débit.

Les résultats de cette étude, qui avait permis de préciser les limites d'emploi du procédé, ont conduit par la suite un fabricant français de matériels à concevoir un nouveau type de torche comportant une tuyère à constriction pneumatique. On a pu ainsi porter la limite du soudage sur bord droit sans chanfrein à une épaisseur de 12 mm sur de l'acier inoxydable et ceci avec des vitesses d'avance d'environ 50 cm/mn. Ce procédé convient par conséquent à des opérations automatisées et l'on peut citer, en particulier, la fabrication de tubes ou de récipients cryogéniques chaudronnés en acier inoxydable.

Un autre procédé, dont la mise au point en 1956 due à J. A. Stohr et J. Briola, Ingénieurs au C.E.A., est le soudage par faisceau d'électrons. Dans ce domaine, l'Institut de Soudure dispose de plusieurs installations permettant d'opérer soit sous vide secondaire, soit sous vide primaire ou partiel.

Pour les applications de ce procédé, deux solutions peuvent être envisagées pour les enceintes. Dans la première, la pièce est placée à l'intérieur de l'enceinte et se déplace sous le canon. Les puissances mises en jeu sont réglables de quelques watts à plusieurs dizaines de kW, avec des tensions d'accélération allant de 30 à 180 kV. Des machines du genre se prêtent parfaitement bien à des fabrications de grandes séries nécessitant des cadences élevées. C'est ainsi que l'industrie automobile n'a pas manqué de faire appel à celles-ci pour la fabrication de pièces mécaniques complexes (fig. 7).

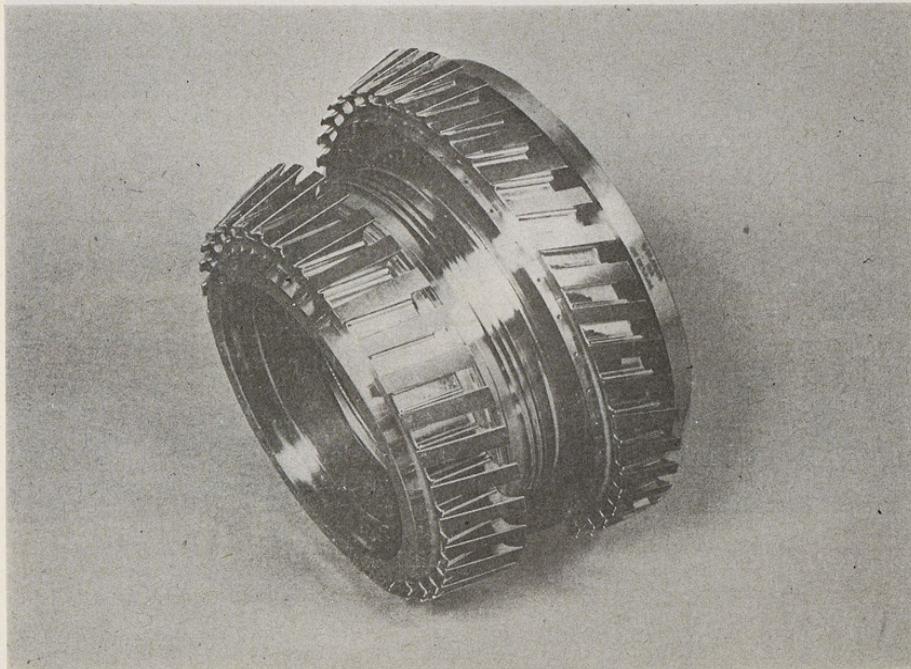


FIG. 7. — *Eléments de boîte de vitesse soudés par faisceau d'électrons.*

La seconde solution en vide partiel fait appel à l'enceinte adaptable à la pièce, la partie à souder avec un élément de celle-ci étant seulement placée sous vide. Cette méthode s'applique particulièrement bien aux grands ensembles à géométrie simple grâce à des ventouses qui constituent des chambres à vide localisées. Malgré ces possibilités, on est obligé de reconnaître que, si le procédé a trouvé de nombreuses applications dans les industries nucléaires, aérospatiales et automobiles, il est loin d'avoir débouché dans le domaine des constructions chaudronnées. Cette situation paraît cependant évoluer en fonction de résultats nouvellement acquis. On peut citer comme exemple une récente étude menée à l'Institut de Soudure en collaboration avec un groupe d'industriels intéressés qui a conduit à la mise au point d'un pistolet portable (fig. 8) et d'une technique opératoire fiable pour le soudage des tubes

sur plaques tubulaires dans le cas de fabrication d'échangeurs. La pénétration du faisceau permet d'obtenir, en des temps très courts, des soudures de liaison d'excellente qualité (fig. 9). Des essais d'applications pratiques sont actuellement entrepris pour la réalisation d'un échangeur expérimental.

Accessoirement, cette recherche a conduit à la mise au point d'un appareillage de contrôle permettant de déterminer, par un faisceau ultrasonore tournant, la qualité du joint et, notamment, l'importance de la pénétration par rapport à une valeur fixée à priori pour celle-ci.

Par ailleurs, les avantages métallurgiques du procédé de soudage par faisceau d'électrons ont été étudiés. En particulier, les vitesses de chauffage et de refroidissement très grandes, dépassant tous les cas connus, ont permis de réaliser des

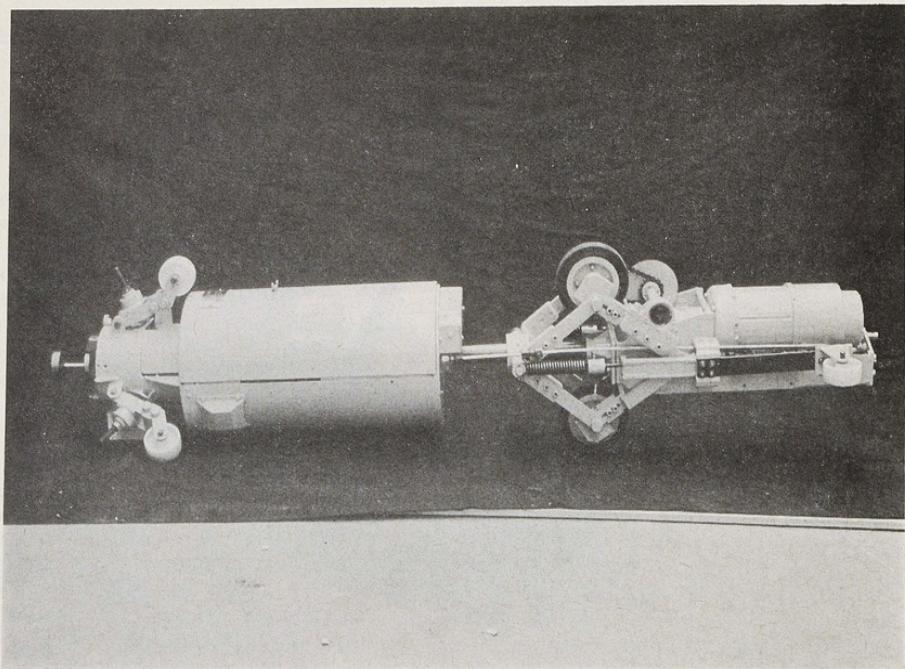


FIG. 8. — Pistolet portable pour soudage par faisceau d'électrons de tubes sur plaque tubulaire.

soudures sur des matériaux réputés difficilement soudables et plus particulièrement des aciers ayant un fort pouvoir trempant ou sensible au grossissement du grain.

En outre, la faible quantité de métal qui participe à l'élaboration du joint et l'absence le plus souvent de métal d'apport rendent possible l'exécution d'assemblages hétérogènes aussi surprenants que du nickel avec du tungstène ou du cuivre avec un acier inoxydable par exemple. Ces résultats ont été acquis pour la résolution de cas précis soumis au laboratoire de l'Institut de Soudure.

Un autre procédé d'application récente est le faisceau laser. Ce faisceau est constitué de lumière monochromatique parallèle et en phase, obtenue à partir d'un amplificateur de lumière par émission stimulée de radiations. Un tel faisceau de lumière cohérente peut être concentré

par des moyens optiques classiques et ceci sans foyer secondaire ni aberration chromatique.

Il en résulte que l'énergie disponible au niveau de la tâche focale très réduite est considérable et peut dépasser 1 MW/cm^2 . L'Institut de Soudure dispose actuellement d'un appareillage d'une puissance de 350 W, constitué d'un laser moléculaire à gaz (CO_2) avec addition d'azote et d'hélium. Cet appareillage est utilisé en coupage (avec addition d'oxygène à la buse) ou en soudage.

De nombreux essais ont été effectués jusqu'à présent, notamment en coupage, mais il convient de souligner l'exemple industriel le plus remarquable dans le domaine du soudage qui est celui de la Société Moulinex. En effet, cette Société utilise, en fabrication de série, un laser de 350 W pour exécuter les soudures de fermeture des calandres de moulins à

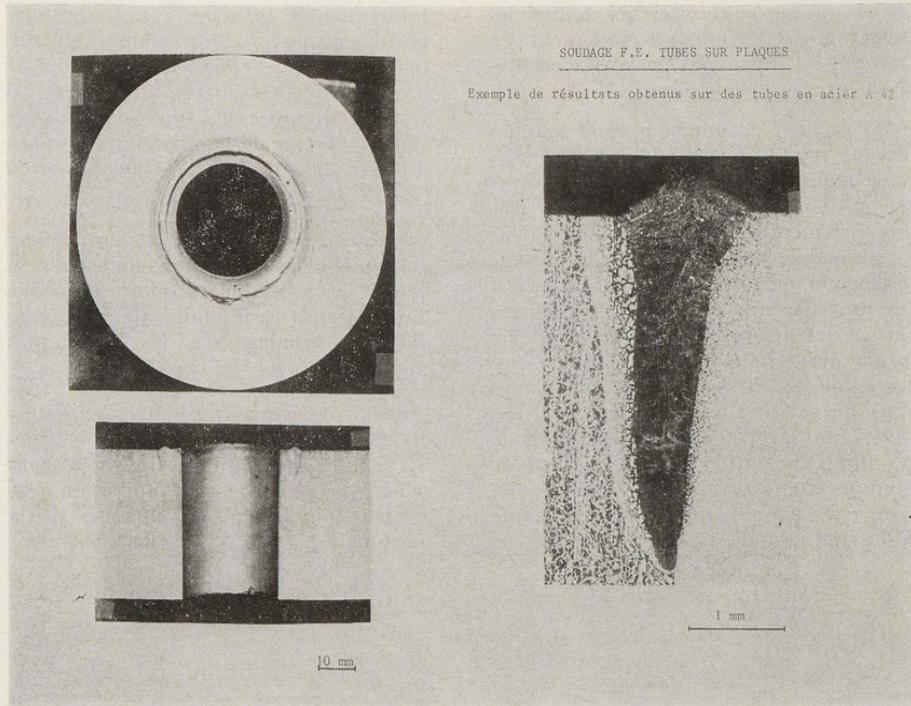


FIG. 9. — Soudage par faisceau d'électrons de tubes sur plaques - exemple de résultats obtenus sur des tubes en acier A 42.

légumes en tôle étamée (ou en acier inoxydable) ou celles des corps de cafetières en tôle électro-zinguée.

Par ailleurs, une étude est actuellement en cours à l'Institut de Soudure en vue de déterminer les possibilités d'applications des lasers de puissance.

La diffusion à l'état solide constitue un moyen d'assemblage entre métaux de même nature ou différents, ou avec interposition d'un métal intermédiaire en feuille mince ou encore déposé en fine couche sur la surface. On peut ainsi réaliser des assemblages qui seraient totalement incompatibles en soudage par fusion. De nombreuses études ont été faites et publiées sur le sujet et l'Institut de Soudure, qui s'est doté d'un appareillage expérimental, a étudié les possibilités d'assemblages de couples de métaux tels

que aluminium/cuivre, aluminium/acier inoxydable, acier/bronze...

Enfin, il convient de signaler le soudage en bout par friction qui s'apparente au soudage à la forge des anciens. Dans ce domaine, l'Institut de Soudure dispose d'une machine permettant de souder des barres jusqu'à 50 cm de Ø, ce qui lui a permis d'étudier différents types d'assemblages, en particulier sur aciers ou sur des couples de matériaux tels que acier/aluminium ou aluminium/cuivre.

On voit par ces quelques exemples que l'Institut de Soudure s'intéresse non seulement aux procédés classiques de soudage, mais également aux procédés modernes dont les plus récents applicables aux fabrications mécaniques.

Toutefois, les études et recherches ne sont pas limitées aux modes opératoires

et, si on ne peut citer ici toutes les recherches et études actuellement en cours, il est cependant possible d'en préciser les axes principaux.

Un premier groupe comprend tous les travaux relatifs à la soudabilité de matériaux métalliques divers et à la métallurgie du soudage. Il s'agit ici d'étudier le comportement des matériaux métalliques sous l'action des cycles thermiques de soudage et, en fonction de leur nature et des procédés mis en œuvre, d'établir, à l'usage des utilisateurs, des règles d'exécution permettant d'obtenir des assemblages de qualité répondant aux conditions de service imposées (fig. 10). Ces études font largement appel à la méthode des implants développée à l'Institut de Soudure. Dans ce groupe, il faut également citer l'application de la mécanique de la rupture aux essais de ténacité sur

joints soudés en acier, l'étude du comportement des produits laminés aux sollicitations dans l'épaisseur sous l'effet de liaisons effectuées par soudage, les travaux sur le processus de solidification et la morphologie de la structure de solidification (fig. 11) et de transformation (fig. 12) lors du soudage.

Un autre axe de recherche correspond aux méthodes d'essais applicables à l'étude des assemblages soudés ainsi que des matériels et produits mis en œuvre dans le soudage et les techniques connexes.

Enfin, il reste à considérer l'ensemble des études ayant trait aux essais destructifs et non destructifs de joints et d'ensembles soudés. Sous ce chapitre, on peut évoquer tous les travaux effectués sur la machine de la S.E.D.E.M. à Saint-Ouen :

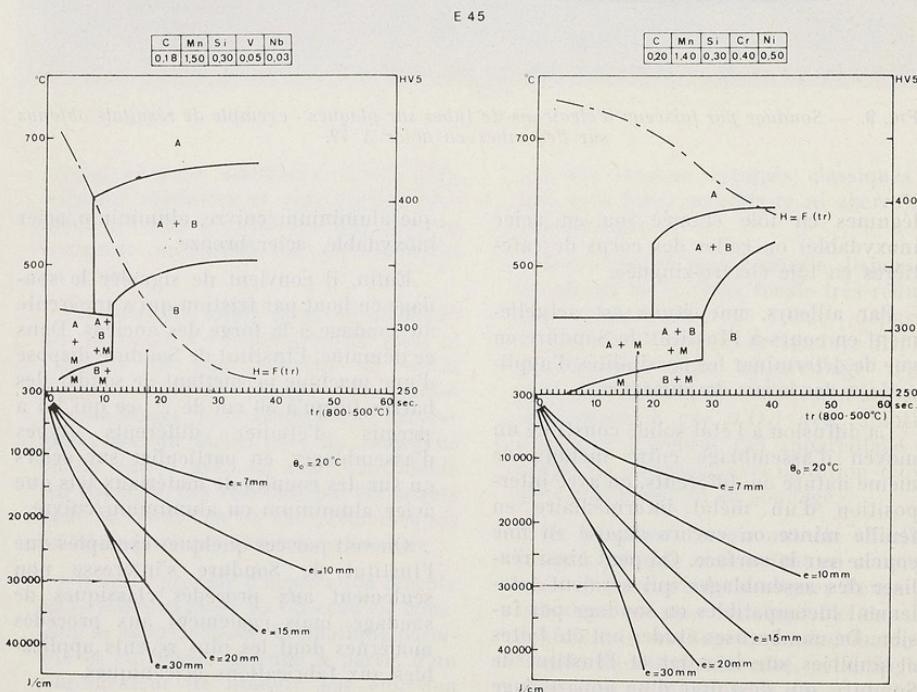


FIG. 10. — Courbe concernant l'acier E 45, extraite de la documentation pratique sur la soudabilité des aciers.



FIG. 11. — Cratère final d'une soudure par faisceau d'électrons, d'alliage à base de nickel à durcissement structural ; cliché microscope électronique à balayage, grossissement 1000.

essais de fatigue sur poutres ou sur ensembles divers, ainsi que les études concernant les contrôles non destructifs appliqués aux assemblages soudés. Dans ce domaine, l'Institut de Soudure a été conduit à mettre au point des matériaux originaux qui ont donné lieu à prise de brevets, comme par exemple l'appareil de contrôle gammagraphique à chariot automoteur et source au centre (fig. 13).

Comme cela a été dit précédemment, l'Institut de Soudure, pour des raisons de financement, a été conduit à développer largement ses actions d'assistance technique au service des entreprises. Ceci lui permet, en retour, par ses nombreux contacts avec la fabrication, de bien connaître les problèmes qui se posent

dans l'industrie et par suite, grâce à cette connaissance, de proposer des sujets de recherche à finalité industrielle.

Sous le titre général d'assistance technique sont regroupées des actions qui se rapportent au contrôle de qualité, aux essais et aux conseils. Aux concours apportés sous forme de contrôle qualité, il faut ajouter des actions très diversifiées qui correspondent à des conseils et avis répondant à des questions posées par les industriels.

La plus large part des interventions de l'Institut de Soudure se situe sur le territoire français. Cependant, un nombre non négligeable d'interventions concerne les pays étrangers, soit pour le

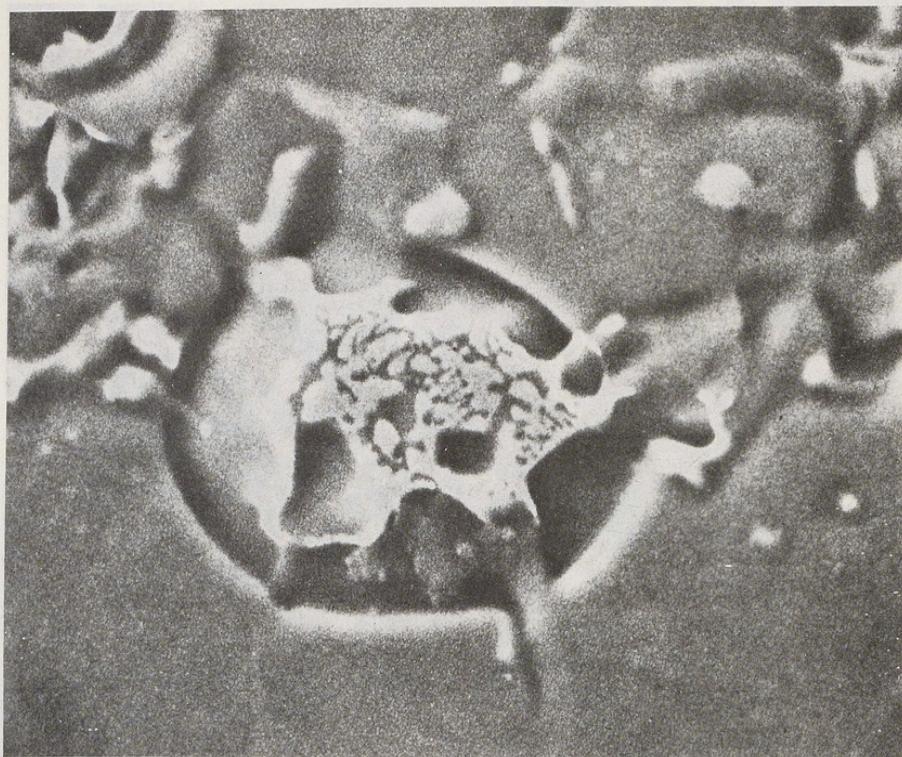


FIG. 12. — ZAT d'une soudure par faisceau d'électrons sur un alliage à base de nickel à durcissement structural ; mise en évidence d'un phénomène de liquation ; cliché microscope électronique à balayage ; grossissement 1000.

compte de maîtres d'œuvre ou constructeurs français, soit à la demande d'entreprises de pays demandeurs. On peut citer parmi les pays concernés, sans que cette liste soit limitative, l'Algérie, le Gabon, l'Iran, l'Irac, l'U.R.S.S., la Chine, la Corée..., sans oublier le champs pétrolier de la Mer du Nord. Sur ce dernier point, il est intéressant de souligner que la première soudure de raccordement d'une canalisation sous-marine reposant sur un fond situé à 135 m sous le niveau de la mer, a été exécutée selon une technique mise au point dans les laboratoires de l'Institut de Soudure.

Les activités du Service Contrôle-Qualité sont orientées soit sur des opérations de courtes durées qui correspondent

généralement au suivi des fabrications de matériels dans les usines, soit à des actions de longues durées plus spécifiquement réservées aux travaux sur chantiers. Pour ces diverses missions, ce Service dispose du personnel compétent ainsi que des moyens, notamment en véhicules spécialisés permettant, par exemple, des examens radiographiques ou développements de films sur place dans des camions laboratoires.

L'accroissement d'activités dans ce domaine confirme l'intérêt que portent de nombreux secteurs industriels (pétrochimie, énergie nucléaire, sidérurgie, transports métallurgiques, transports de gaz...) aux actions contrôle qualité développées par l'Institut de Soudure, ces

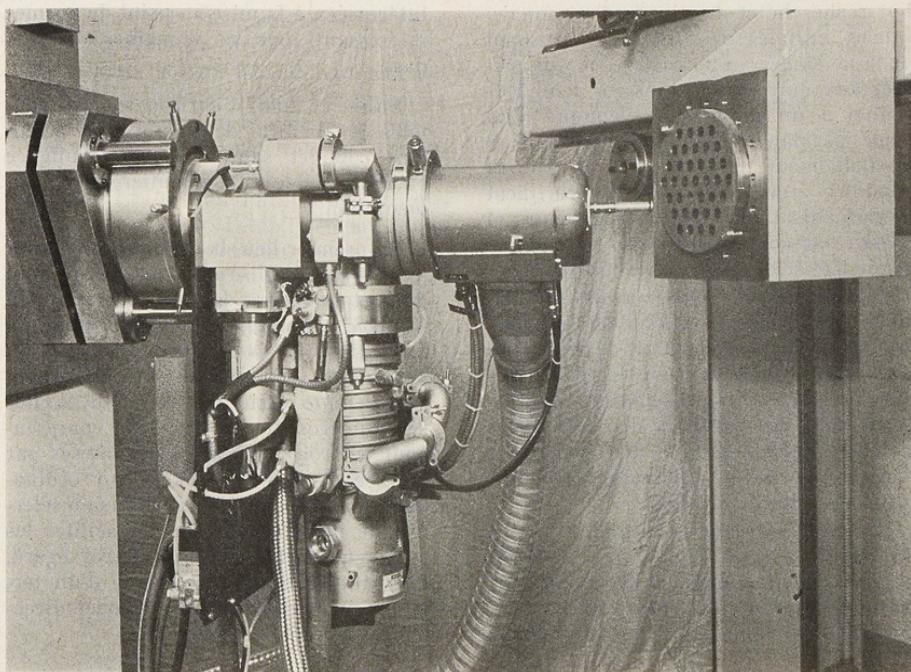


FIG. 13. — Appareil de contrôle gammagraphique à chariot auto-moteur et source au centre.

actions étant conçues comme une assistance technique à tous les niveaux et non comme une simple opération de réception.

Dès l'origine, l'Institut de Soudure a consacré une part importante de ses activités à l'enseignement du soudage. La diffusion des connaissances s'exerce sous divers aspects qui relèvent conjointement de la première formation et de la formation continue.

La première formation est assurée dans le cadre de deux Ecoles, l'Ecole Professionnelle de Soudure Autogène (E.S.S.A.) et l'Ecole Professionnelle de Soudure (E.P.S.).

Les cours dispensés par l'E.S.S.A. correspondent à une formation technique supérieure et s'adressent à des ingénieurs déjà diplômés ou à des techniciens supérieurs. Ceux dispensés par l'E.P.S. concernent des élèves de lycées et collèges

en vue de les amener à un niveau professionnel de techniciens qualifiés ou d'ouvriers professionnels, suivant leurs performances scolaires.

La formation continue a toujours été une des actions majeures de l'Institut de Soudure qui a considéré que la préparation aussi bien du personnel d'exécution que du personnel d'encadrement était une tâche prioritaire pour la bonne application des techniques de soudage. Les interventions dans ce domaine se sont trouvées largement accrues en fonction des nouvelles dispositions en matière de formation permanente intervenues en juillet 1971. Le nombre annuel des stagiaires à tous niveaux se situe entre 5 000 et 6 000, cette formation ayant lieu soit dans les locaux de l'Institut de Soudure à Paris et à Arles, soit dans les entreprises.

Pour les ouvriers soudeurs, la durée d'un stage est valable en fonction du

but recherché et du niveau des connaissances initiales de l'intéressé. Il s'agit donc de stages « à la carte », ce qui permet aux entreprises d'insérer leur personnel à un moment quelconque d'un stage permanent dans une progression préalablement établie et qui pourra conduire éventuellement à un certificat de spécialisation. Pour les ingénieurs et cadres par contre, les stages sont d'une durée fixe selon les sujets abordés.

Il convient de souligner ici que les stages de formation technologique bénéficient de l'apport constant des résultats obtenus au cours des études et recherches dont il est question plus haut. Ce passage permanent des résultats des recherches à l'enseignement permet d'actualiser les programmes dans un domaine aussi évolutif que celui du soudage.

En matière de normalisation, l'Institut de Soudure, sous l'égide de l'AFNOR, assure le fonctionnement du Comité de Normalisation de la Soudure (C.N.S.). Ce dernier contribue, avec les professions

intéressées, à la mise au point de normes intéressant tous les domaines du soudage.

Enfin, ce tour d'horizon sur les activités de l'Institut de Soudure ne saurait être complet sans que soit soulignée l'activité déployée en matière de documentation.

En premier lieu, la collaboration entre le centre spécialisé de l'Institut de Soudure et le Centre de Documentation du C.N.R.S. a conduit à la publication du fascicule 745 « Soudage, Brasage et Techniques Connexes » du *Bulletin Signalétique* édité par le C.N.R.S. Les dix numéros du fascicule 745 comprennent environ 3 500 à 4 000 analyses par an ; celles-ci sont stockées sur ordinateur afin de permettre une diffusion sélective de l'information ou de faciliter les recherches rétrospectives. A cet égard, l'Institut de Soudure est doté d'un terminal lui permettant d'interroger directement l'ordinateur (fig. 14).

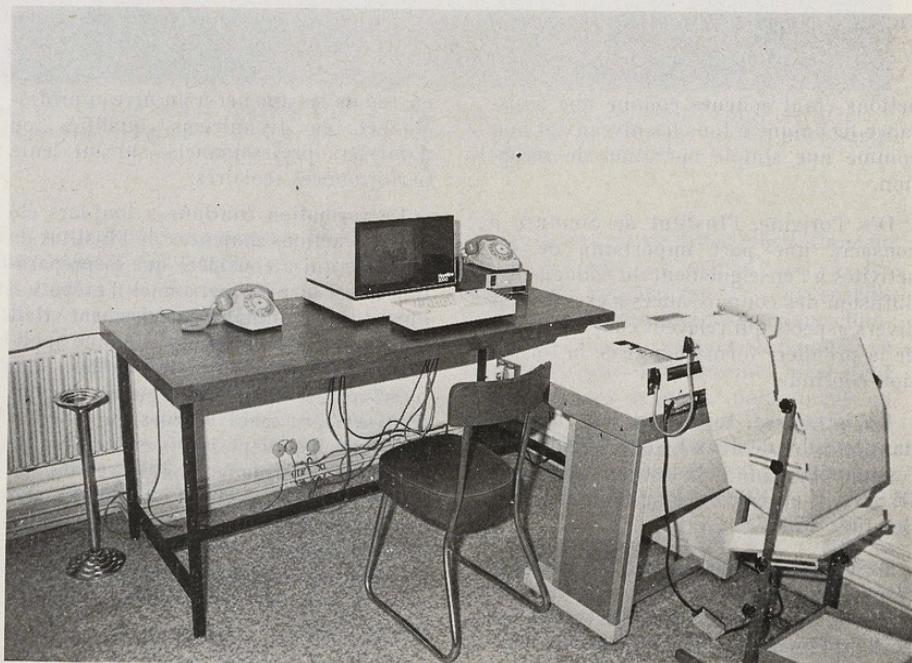


FIG. 14. — Terminal utilisé pour la documentation en télé informatique sur le réseau Cyclades.

Le Centre de Documentation de l'Institut de Soudure participe activement, par ailleurs, soit à l'échelon national, soit à l'échelon international, à l'organisation de réseaux documentaires. Un projet, soutenu par le Bureau National de l'Information Scientifique et Technique (B.N.I.S.T.), prévoit l'utilisation du système Titus pour l'établissement d'une base de données multilingue en soudage avec production de bandes magnétiques permettant l'édition de bulletins en français, allemand et anglais, ainsi que la diffusion sélective de l'information et la recherche rétrospective en télé-informatique.

Ceci montre combien l'Institut de Soudure est attentif à suivre l'évolution des

techniques documentaires en vue d'apporter aux utilisateurs toutes les informations technologiques et scientifiques dont ils peuvent avoir besoin.

**

Cet exposé, vraiment très schématique, montre combien les activités de l'Institut de Soudure sont orientées vers une meilleure connaissance et, par suite, vers une utilisation plus rationnelle des procédés de soudage et ceci dans tous les domaines de fabrication, notamment celui des industries mécaniques. Ainsi, l'Institut de Soudure apporte sa part, sans doute modeste mais utile, aux développements de l'industrie nationale.

Berlino, 10 Janvier 1977
L'Institut de Soudure
de la Société Nationale
d'Énergie et de Mécanique

Sur les trois secteurs fondamentaux de l'industrie, l'auto et l'aéronautique, les industries domestiques, les industries minières et marquées pour diversifications, hydrocarbures, chimie, métallurgie, le chauffage central, les industries appartenant au secteur et de l'industrie automobile, ceux qui sont très directement liés à l'application des méthodes collectivisées publiques, foyers, énergies, etc., il n'en est pas moins précis que ces dernières issues des fonds des deux modèles dont une part importante va aux entreprises de construction aéronautique, postes très importants à longs horizons prometteurs.

Les deux domaines privatisés sont très diversifiés, automobile, avion, et autres véhicules, machines et tracteurs agricoles, industrie des mines, travaux publics et infrastructure, structures-outils, industries de transformation, fabrication pétrolière, industrie chimique, textiles, etc.

Paris, 10 Janvier 1977
L'Institut de Soudure
de la Société Nationale d'Énergie et de Mécanique

Les techniques de fonderie dans leurs rapports avec les industries mécaniques ()*

par Pierre BRUNSCHWIG

Directeur Général du Centre Technique des Industries de la Fonderie

L'industrie française de la Fonderie occupe le sixième rang dans le monde, en masse de production, selon les statistiques de 1975, après l'U.R.S.S., les Etats-Unis, le Japon, l'Allemagne fédérale et la Grande-Bretagne. Et, dans la communauté européenne, sa place est la troisième.

Si, pour les trois spécialités Fontes d'hydraulique, Fontes sur album, Cuisine et chauffage domestique, les produits fabriqués (tuyaux et raccords pour canalisations d'hydraulique, chaudières et radiateurs de chauffage central, baignoires, appareils de cuisine et de chauffage domestique, etc.) sont mis directement à la disposition des utilisateurs (collectivités publiques, foyers domestiques, etc.), il n'en est pas de même pour les demi-produits issus des fonderies sur modèles, dont une part importante va aux entreprises de constructions mécaniques, pour être incorporée à leurs propres productions.

Les orientations privilégiées sont très diverses : automobile, cycle et motocycle ; machines et tracteurs agricoles ; matériels de mines, travaux publics et sidérurgie ; machines-outils ; lingotières d'aciéries ; robinetterie, raccords, pompes et compteurs ; cylindres de lami-

noirs ; chemins de fer ; construction électrique et électromécanique ; construction navale ; appareils ménagers ; serrurerie et quincaillerie. Elles varient, en intensité, selon les alliages considérés.

Avec plus de dix secteurs importants, absorbant ensemble 90 % de l'activité des fonderies sur modèles, on conçoit combien les produits de fonderie sont présents dans ceux de la mécanique. Il est peu d'appareils, peu de machines, peu d'engins qui ne comportent d'éléments venus de fonderie. Ses techniques se révèlent irremplaçables pour produire une grande variété de types de pièces, de volumes simples ou complexes, et pour satisfaire à la diversité des besoins en nombre, du moulage unitaire — tels que biens d'équipement — aux séries impliquées par les productions de masse (automobiles, vélomoteurs, appareils ménagers, etc.).

Ce ne sont pas là des propos triomphalistes, car la Fonderie est soumise, en tant que fournisseur de la Mécanique, à la rude concurrence d'autres modes de mise en forme des alliages métalliques, voire à celle d'autres matériaux. Moyennant quoi la Fonderie de ces dernières années s'est profondément transformée dans son aspect, ses méthodes, ses équi-

(*) Conférence prononcée dans l'Hôtel de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale, le 10 février 1977.

pements... Non seulement elle participe à l'évolution des industries mécaniques, mais encore elle leur propose des possibilités considérablement accrues. Certaines pièces, qui étaient par exemple forgées, estampées, ou encore obtenues par soudage et par usinage de produits métallurgiques sont maintenant réalisées par moulage à un prix de revient amélioré (fig. 1). Ce dynamisme s'appuie sur l'évolution qui a modifié progressivement la palette des alliages, des méthodes d'élaboration, des procédés et matériaux de moulage, des équipements et des contrôles dans le sens de la productivité et de la qualité. Une telle évolution appelle les efforts des entreprises elles-mêmes, et ceux du Centre technique des industries de la fonderie, créé pour promouvoir le progrès des techniques et contribuer à la garantie de la qualité. Il accompagne, par ses études et par ses interventions auprès des entreprises, l'action continue de progrès de la profession, action dont la suite de l'exposé porte témoignage, à l'aide de quelques exemples.

EXEMPLES DE DEVELOPPEMENTS CARACTÉRISTIQUES

Avant toute chose, un dialogue doit s'établir entre le fondeur et son client pour fixer la qualité nécessaire et suffisante de la pièce, le fond étant une réflexion technique approfondie qui, bien conduite, a pour but d'apporter au maximum les avantages typiques de la fonderie. C'est à ce moment qu'on peut alléger la pièce, agir sur sa forme pour lui conférer plus de rigidité, prévoir les dégagements d'outils, la venue des appendices utiles à l'usinage, ménager les trous devant venir bruts de moulage, munir les pièces en alliages d'aluminium d'appendices rivetables ou sertissables, etc.

Les Guides de tracé, établis par le C.T.I.F. avec la collaboration des techniciens de fonderie, respectivement pour l'acier moulé, les fontes, les alliages d'aluminium et les alliages de cuivre

constituent une aide précieuse, car ils récapitulent, sous un volume réduit, à l'usage des bureaux d'études, toutes les précautions à prendre pour assurer la bonne venue des pièces, à la satisfaction des deux parties. Ainsi, par la conjugaison de l'application des règles de tracés qui y sont contenues et des indications précises données par le constructeur au fondeur sur ce qu'il attend de la pièce, se trouvent remplies deux importantes conditions pour qu'une pièce moulée donne pleine satisfaction.

Face à des machines qui tournent plus vite, à des assemblages soumis à des contraintes élevées, à des pièces travaillant à des températures extrêmes, etc., le fondeur affine ses connaissances métallurgiques et ses méthodes d'élaboration. Dans les domaines des fontes, des aciers, des alliages légers et cuivreux, des alliages de zinc, sans compter nombre d'alliages spéciaux, il propose aux constructeurs un éventail adapté à toutes les exigences : de résistance mécanique, notamment de résistance à l'usure, au choc, à la fatigue ; de tenue à la corrosion, de maintien des caractéristiques aux températures basses ou élevées, d'usinabilité, etc. Quelques exemples illustrent ces propos.

Le développement des fontes à graphite sphéroïdal, maintenant bien connues de la Construction mécanique, a pour point de départ leurs facultés d'allongement, conjuguées à des résistances à la traction supérieures à celles des fontes grises à graphite lamellaire. En même temps que l'emploi croissant des fours électriques à induction en facilitait la fabrication, les règles d'alimentation en alliages liquides des moules en sable, et les règles de masselottage des pièces se perfectionnaient, tous ces efforts convergeant vers la régularité des propriétés obtenues. Parallèlement, les études de laboratoire sur la limite d'élasticité, la résilience, la résistance à la fatigue..., fournissaient des éléments documentaires, voire de normalisation, indispensables aux utilisateurs. Et si l'on ajoute que les méthodes de contrôle de

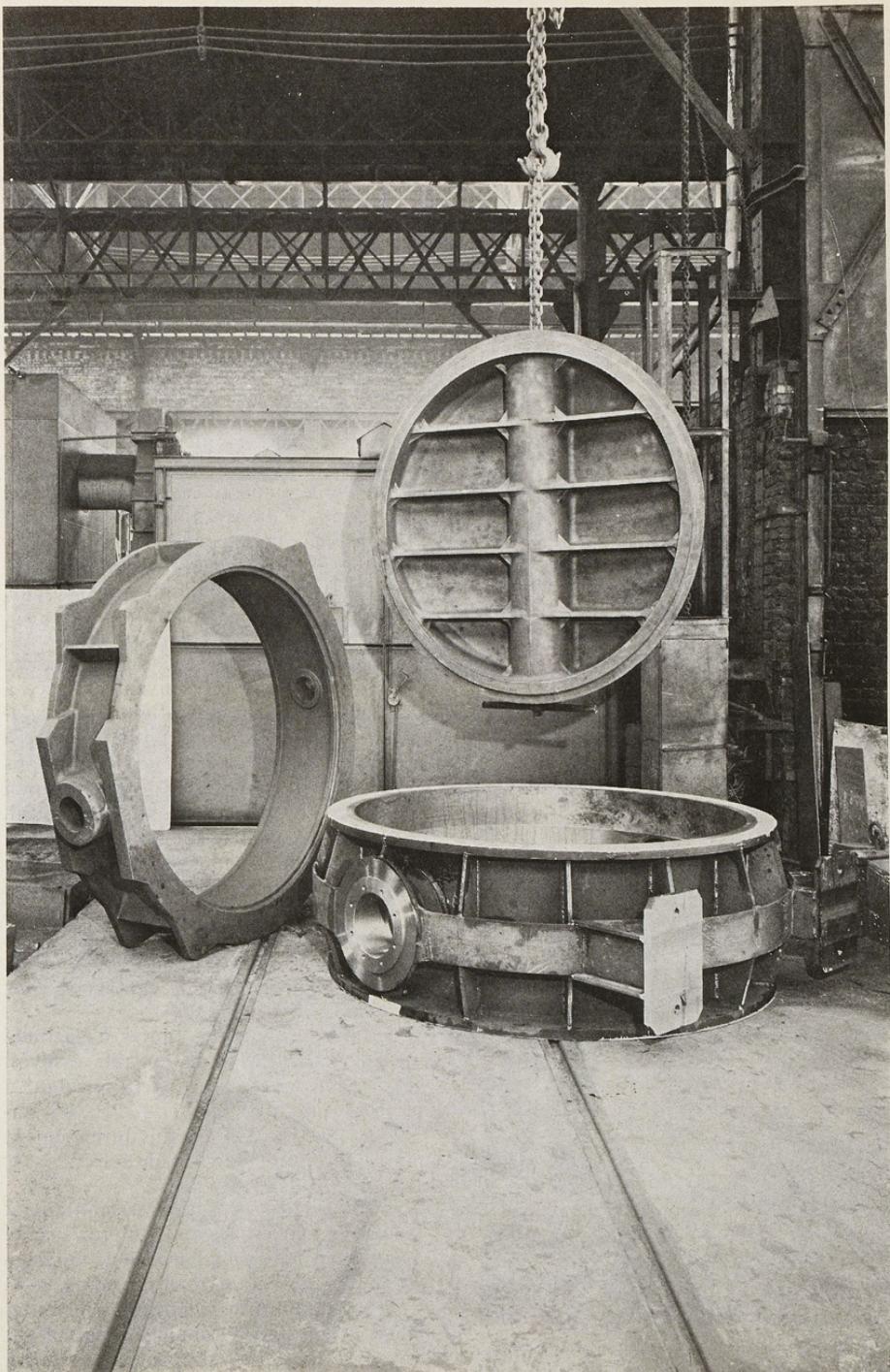


FIG. 1. — Corps de vanne et lentille en fonte à graphite sphéroïdal photographiés près d'un corps de vanne exécuté, antérieurement, en mécano-soudé (Doc. Etablissements Bracq-Laurent, cliché studio Drancourt).

sphéroïdisation du graphite, soit rapides à l'usage de l'atelier, soit par des méthodes physiques sur pièces, en fin de fabrication, font l'objet d'efforts importants des fondeurs et des chercheurs, on peut affirmer que la fiabilité de ces fontes est en voie d'amélioration constante.

Il ne faudrait toutefois pas que les témoignages de développement des fontes à graphite sphéroïdal masquent la part importante du marché qui revient aux fontes grises pour la construction mécanique. Par exemple, dans le marché de la machine-outil, les pièces en fonte entrent pour environ 20 % du prix de revient. On attend d'elles, en particulier pour les bancs de tours avec glissières incorporées, nombre de qualités simultanées : bonne capacité d'amortissement, hautes caractéristiques mécaniques, excellente tenue au frottement, usinage rapide et peu coûteux, bonne aptitude à la trempe superficielle. D'où il est résulté une étude d'un groupe de fondeurs avec le C.T.I.F., portant sur une pièce d'essai en forme de glissière (fig. 2) et s'attachant notamment à la composition chimique des fontes, en limitant le taux

d'azote et en fixant éventuellement cet élément par additions de titane ou de zirconium.

Le domaine des aciers connaît aussi depuis des années un effort considérable de développements, avec des réalisations qui montrent en particulier une grande faculté d'adaptation aux techniques nouvelles (fig. 3 et 4). La normalisation évolue, qu'il s'agisse de la révision de normes ou de la création de nouveaux documents : aciers au carbone, aciers pour basses températures, aciers à caractéristiques magnétiques, aciers pour appareils à pression et aciers inoxydables. Il y a en ce moment à l'enquête publique une série de quinze nuances intéressant la construction mécanique. Pour faciliter le choix du constructeur, une classification fera ressortir les limites d'élasticité, la ductilité et la trempabilité.

La recherche de hauts niveaux de limite d'élasticité est souvent associée à l'obtention de caractéristique de soudabilité, de bonne ductilité, de résistance à la corrosion. La solution se trouve, dans un certain nombre de cas, dans l'emploi d'aciers à durcissement structural. L'aciérie de moulage n'est pas restée à l'écart de cette tendance, en mettant au point des aciers à dispersoïdes à bas carbone, soudables, permettant d'atteindre selon les traitements thermiques, des limites d'élasticité de 400 à 600 N/mm², avec un risque réduit de rupture fragile.

De même pour des limites d'élasticité de 600 à 1 100 N/mm², ont été essayés, en version moulée, les aciers résistant à la corrosion du type 17-4 PH, notamment sous les aspects du durcissement après revenu et du taux de ferrite.

Enfin, dans un passé remontant à quelques années, devant l'intérêt suscité par l'acier maraging, l'aciérie de moulage et le C.T.I.F. étaient entrés dans cette voie en étudiant les conditions de traitement thermique (homogénéisation et revenu). Avec une simple élaboration à l'air, il est possible d'atteindre 1 600 à 1 700 N/mm² pour la limite d'élasticité.

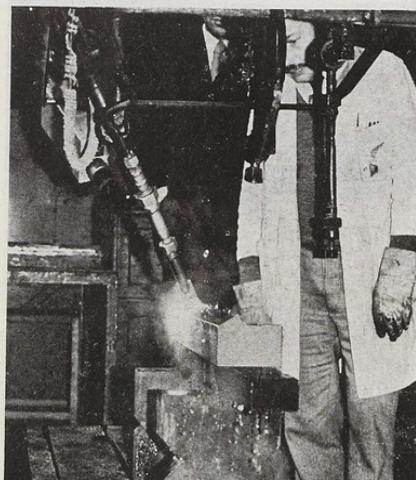


FIG. 2. — *Etude de fontes pour machines-outils : trempe au chalumeau sur éprouvette massive, en forme de glissière (cliché C.T.I.F.-R.N.U.R.).*

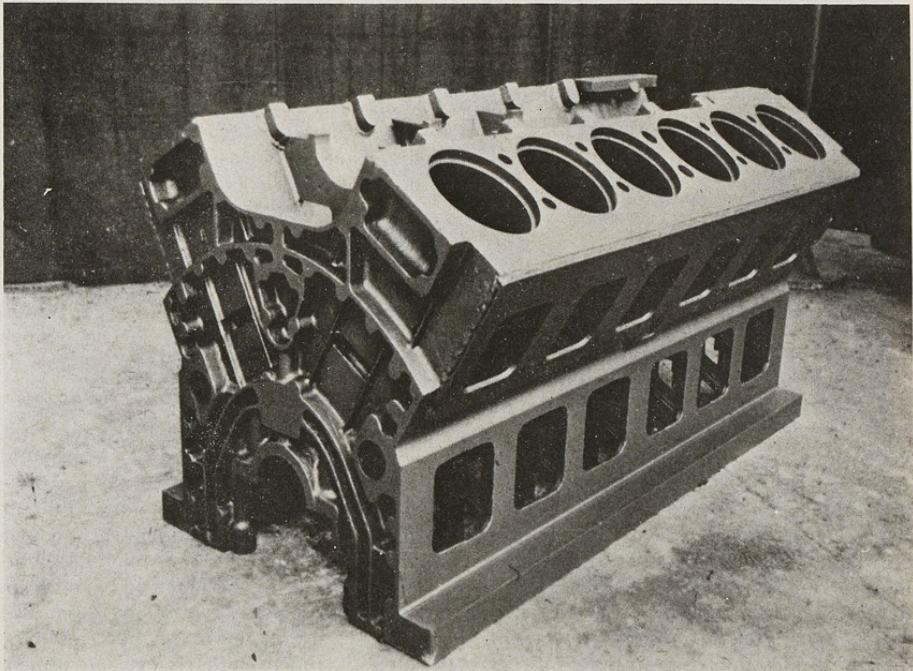
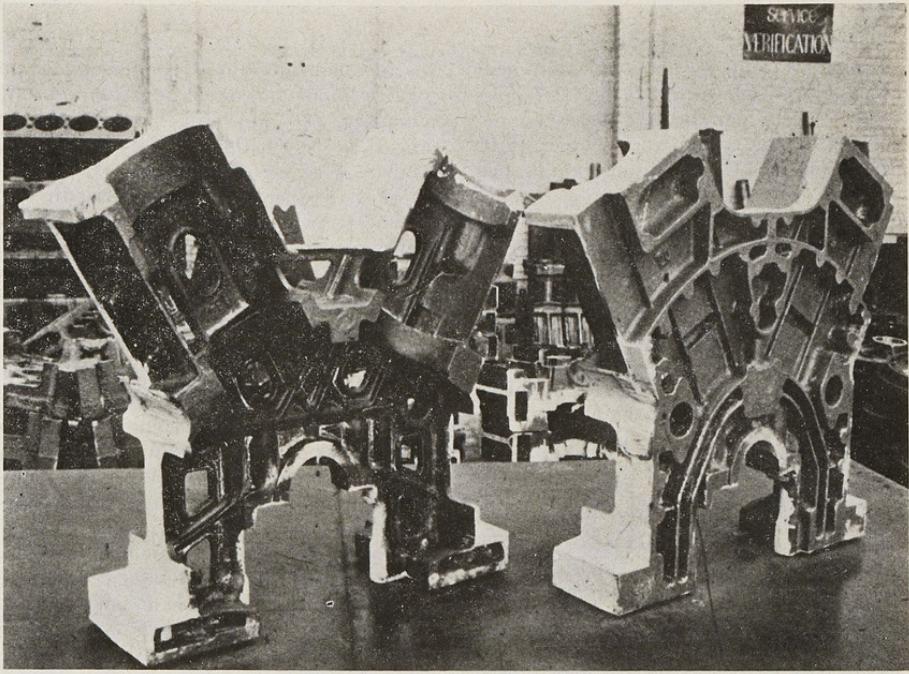


FIG. 3-4. — Exemple de réalisation d'un bâti de moteur par éléments moulés, réunis par soudage : photographies extraites du « guide de tracé des pièces en acier moulé ».

Pour les alliages de cuivre, on peut citer en exemple ce qui a été fait pour favoriser leur emploi aux basses températures, allant jusqu'aux températures cryogéniques. Les alliages classiques, tels que les bronzes, bénéficient également des progrès de la fonderie (fig. 5).

Les alliages d'aluminium et de silicium du type A-S7 G sont désormais utilisés, parallèlement à l'A-U5 GT, pour la réalisation de pièces à haute résistance, particulièrement dans le domaine aérospatial. Ces alliages donnent d'une manière générale satisfaction, et bien que leurs performances n'égalent pas celles de l'A-U5 GT, ils permettent d'obtenir plus facilement des pièces de qualité grâce à leurs meilleures propriétés de fonderie. Dans cette voie, il a fallu éclaircir l'influence des éléments dits modificateurs (sodium, strontium, antimoine) qui assurent la finesse de la structure. Il convenait en effet d'évaluer leur action sur la compacité des pièces, leur aspect radiographique, les caractéristiques mécaniques (résistance à la traction) et la structure micrographique. En élaborant l'A-S7 G 06 dans les conditions ainsi dégagées, et en concevant rationnellement le masselottage, le fondeur peut désormais assurer le constructeur de la constance de structure des pièces, à condition que leur épaisseur soit adaptée aux caractéristiques visées.

L'ENRICHISSEMENT DES TECHNIQUES

De ces exemples, on peut retenir l'idée d'un perfectionnement progressif, qui vise à gagner petit à petit quelques pour cent en charge de rupture, en allongement, en résistance à la fatigue... L'origine de ces gains se trouve dans de meilleurs ajustements des compositions chimiques, des traitements thermiques, dans le meilleur respect des teneurs et des températures, dans le perfectionnement des méthodes d'alimentation en alliages liquides des empreintes de pièces, des méthodes de masselottage, de l'emploi des refroidisseurs, etc.

Ces considérations conduisent à un autre important aspect de la fonderie : le moulage et le noyautage, avec la diversification des méthodes correspondantes, même si celle-ci, en raison de son caractère très spécialisé, n'est pas directement perceptible par les constructeurs-mécaniciens et les utilisateurs de pièces. Le moulage classique, dit « au sable », a connu des changements progressifs au fil des années, avec l'intervention des sables synthétiques, puis de nombreux procédés utilisant des résines spéciales, telles que formophénoliques, furanniques, etc..., faisant prise à froid sous l'effet d'un catalyseur. D'autres formules encore sont fondées sur le recours à des liants minéraux, tels que le silicate de soude réagissant avec le gaz carbonique, ou le laitier de haut fourneau. Au moule classique, formant une motte contenant l'empreinte et généralement enserrée dans un châssis métallique, s'est ajouté le procédé de moulage en carapace, utilisant une résine thermodurcissable. Cette richesse en procédés de moulage et de noyautage répond à l'extrême variété de pièces à fabriquer, chacun d'eux ayant ses domaines d'application préférentielle, selon les dimensions et les masses des pièces, la complexité de leurs formes, les exigences de fini, l'ampleur des séries, etc... Il en est de même pour les modèles et les boîtes à noyaux, qu'une brochure intitulée « Moulage sable — outillages — modèles — boîtes à noyaux » classe en fonction des caractéristiques des fabrications : tolérances dimensionnelles des pièces ; nombre de pièces à réaliser dans le temps ; natures des sables employés ; modes de moulage et de noyautage.

On conçoit aisément, en effet, que, pour une grande série, une mise au point poussée de la forme de pièce permette de tirer le maximum des possibilités de la fonderie, cependant qu'en série courte ou en pièce unitaire, le fondeur recherchera avec le constructeur une mise en fabrication moins coûteuse, avec des techniques plus éprouvées, des surépaisseurs d'usinages plus fortes, un dimensionnement de masselottes assurant confortablement la santé. Même dans ce do-

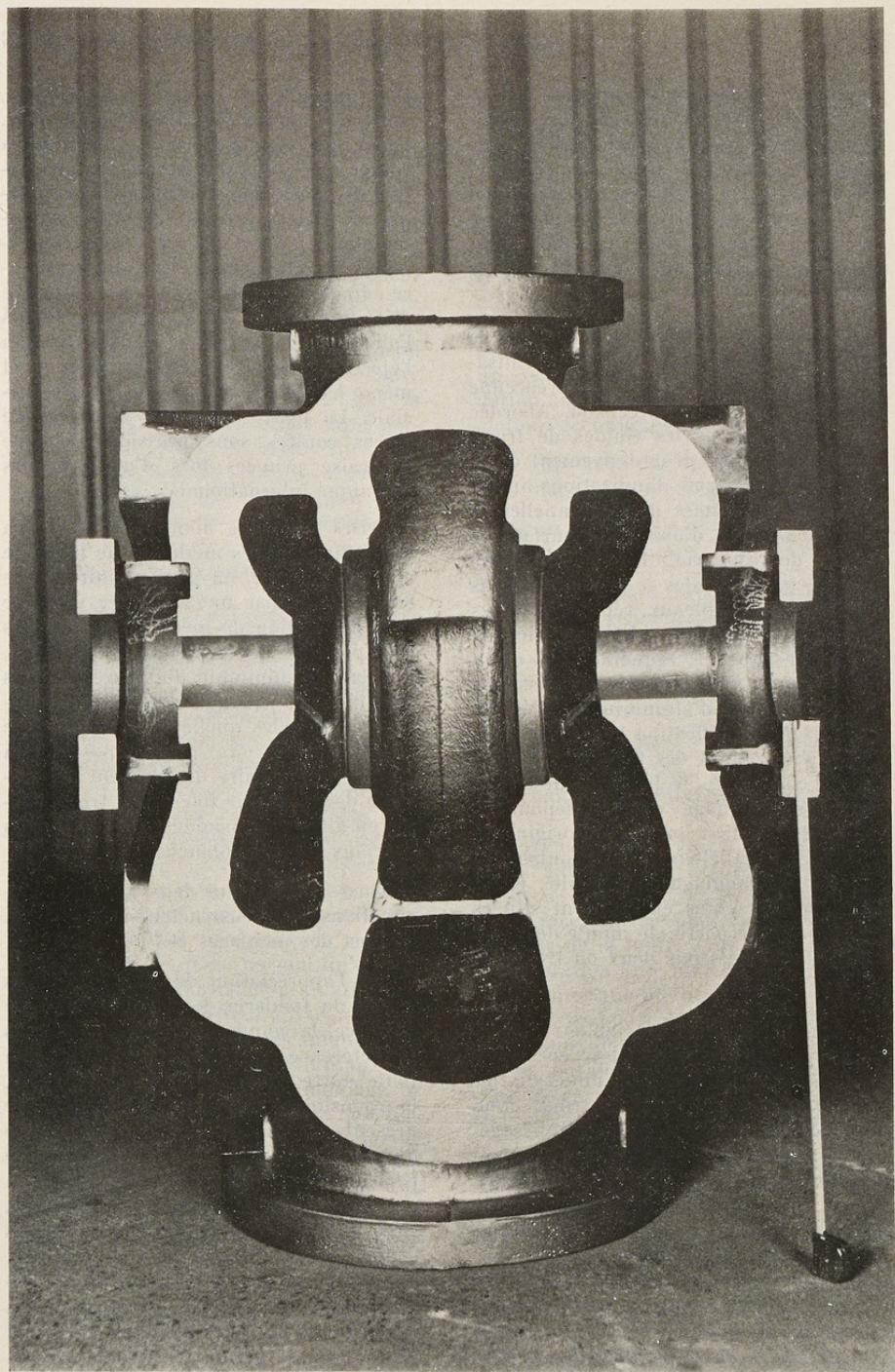


FIG. 5. — *Elément d'un corps de pompe en bronze U-E10 destiné à l'Industrie pétrolière : vue intérieure mettant en évidence la complexité des formes (Doc. Fonderie Musil).*

maine plus classique, l'innovation a trouvé sa place, avec l'emploi de polystyrène expansé : le modèle ainsi réalisé reste emprisonné dans le moule en sable, et est détruit par la coulée de fonte ou d'acier, solution particulièrement économique et élégante pour une pièce unitaire, et respectant au surplus les détails de forme.

Coopérant avec le constructeur dès le départ de l'étude pour la bonne réalisation des formes, le fondeur se préoccupe aussi de celui de la précision. Abordée dès l'origine dans les Guides de tracé, cette notion a été progressivement développée sous la forme d'indications numériques de tolérances dimensionnelles et de surépaisseurs d'usinages pour pièces brutes de fonderie. En acier moulé comme en fonte, elles se présentent sous forme de trois tableaux, répondant à des exigences progressives du constructeur, et, en conséquence, requérant des outillages conçus avec des soins croissants. Pour les alliages d'aluminium coulés par gravité, une spécification technique a été établie distinguant des tolérances linéaires, de coaxialité, de planéité, des surépaisseurs d'usinage et des dépouilles. Cette spécification présente l'originalité de traiter parallèlement du moulage en sable et du moulage en coquille, et de distinguer les cotes entièrement situées dans une seule partie de moule de celles qui sont affectées par deux ou trois éléments.

Il faut, à cet égard, signaler que le développement des moules en sable agglomérés avec des liants, minéraux ou organiques, faisant prise à froid, donc sans secousse ni pression au remplissage, est un facteur d'amélioration de précision dimensionnelle. Dans le même ordre d'idées, la coulée en moules métalliques, soit par gravité (alliages d'aluminium, cupro-aluminums, laitons et fontes), soit sous pression (alliages d'aluminium et alliages de zinc), soit encore par centrifugation (tuyaux en fonte et certains alliages légers ou cuivreux) ajoute à la précision des possibilités de séries, comportant, pour certains types de fabrica-

tion, jusqu'à des centaines de milliers, voire des millions de pièces par moules. Outre que la puissance des machines à couler sous pression permet la production de pièces importantes (carter cylindres et carters de boîtes de vitesses d'automobiles), de nombreux perfectionnements ont été apportés, élevant la cadence de production : c'est un domaine d'élection de l'automatisation, depuis l'alimentation en alliage liquide, jusqu'à l'éjection des pièces de la machine, et même leur ébarbage sur une presse spéciale. La figure 6 montre deux cas de pièces coulées sous pression d'origine française primées lors d'un concours technique international.

Des exemples donnés relatifs à la diversification des méthodes de moulage et de noyautage, on peut retenir qu'elle est marquée par une tendance générale à la production de pièces aussi proches que possible de leur état d'utilisation, appelant le minimum d'usinage et, dans certains cas, pouvant être utilisées pratiquement telles quelles. A l'extrême, le moulage à la cire perdue possède la faculté de produire directement de fonderie des pièces de tolérances très précises en alliages inusinables, tels qu'acières spéciaux et fontes blanches.

Ainsi apparaissent deux autres préoccupations du constructeur-mécanicien : l'aspect des moulages et l'usinabilité.

Sur l'appréciation de la rugosité des pièces de fonderie, lorsqu'elle doit être spécifiée, la comparaison à des surfaces de référence est, de loin, préférable à toute autre par sa simplicité. En effet, la rugosité d'une pièce de fonderie ne présente pas le caractère périodique d'une surface usinée par enlèvement de copeaux, et elle est, de ce fait, difficile à caractériser par un critère numérique, sauf dans les cas favorables de pièces coulées en cire perdue, ou sous pression. Les fondeurs et le C.T.I.F. ont donc préféré s'orienter vers le recours à des échantillons viso-tactiles, dans les cas où la question se posait (corrosion, écoulements de fluides) et des travaux ont été entrepris à ce sujet sur les aciers, les

fontes et les alliages d'aluminium. Si pour des pièces petites et moyennes en acier, les rugosimètres étalons peuvent s'avérer satisfaisants, il est apparu nécessaire, en ce qui concerne les pièces importantes, de doter le fondeur et son client d'un ensemble de photographies et de plaquettes étalons qui reproduisent des états de surface fréquemment rencontrés : surfaces brutes de moulage ou de grenaillage, meulées, bouchardées, coupées thermiquement. Mais il demeure nécessaire de garder à l'esprit que la rugosité n'est qu'une caractéristique particulière des pièces, au même titre, par exemple, que la résistance à un agent corrosif, ou l'étanchéité. Elle ne doit donc être spécifiée que lorsque la fonction de la pièce l'impose, par exemple pour les corps de pompes, impulsseurs et roues.

Il est fréquent que les Guides de tracés contiennent des recommandations destinées à faciliter l'usinage telles que : positionnement favorable, dans le moule, des parties destinées à être usinées ; mise à l'abri des points de départ de l'usinage de déformations en cours de moulage, ou du retrait de l'alliage ; économie tirée du rassemblement sur un même plan géométrique de diverses surfaces devant être usinées, etc. Parmi les pièces de fonderie livrées à la Construction mécanique, celles qui subiront des usinages se comptent par centaines de milliers de tonnes. Il est donc normal qu'en ensemble, fondeurs et constructeurs s'attachent à prévenir toute difficulté d'usinage apparaissant à l'atelier de mécanique. Sans vouloir revenir aux propos initiaux sur les méthodes de fusion et de moulage, on peut indiquer au passage que les fondeurs appliquent leurs soins à éviter les « points durs » des alliages légers et les inclusions des alliages ferreux, en veillant à la propreté des bains d'alliages liquides en cours d'élaboration et aussi de coulée dans les moules. Ceci afin d'éviter des perturbations préjudiciables à l'organisation du travail, notamment sur machines automatiques.

Dans certains cas, le fondeur se trouve en présence d'observations touchant à

des variations d'usinabilité de ses produits dans l'atelier de son client, que ce dernier assimile à des variations de dureté. S'il est vrai qu'il existe une certaine corrélation entre dureté, mesurée à la bille Brinell, et usinabilité, il est toutefois apparu souhaitable, dans le cas des fontes, de disposer d'un essai véritable d'usinabilité, c'est-à-dire mettant en rapport réel les matériaux à usiner et les outils. Dans un but pratique, on a choisi un essai de courte durée. Une recommandation du Comité international des Associations techniques de fonderie définit :

- une méthode d'usinage : le tournage plan à vitesse croissante ;
- un disque d'essai en fonte, de diamètre 240 mm ;
- une matière (acier à coupe rapide) et une géométrie pour l'outil ;
- des conditions de coupe (nombre de tours de la broche, avance et profondeur de coupe) ;
- et finalement un critère de durée de l'outil : la destruction de la pointe ou du tranchant par surcharge thermique.

Moyennant quoi, l'outil de tour avance, jusqu'à destruction, du centre vers la périphérie du disque, et le diamètre final de la face tournée plan caractérise l'usinabilité de la fonte. Plus récemment, en collaboration avec un fondeur, le C.T.I.F. a appliqué une méthode avec éprouvette réduite (diamètre 12 à 40 mm) à des vilebrequins de pompe en malléable perlite, parallèlement à des mesures de dureté et de perméabilité magnétique. La validité de l'essai est confirmée.

Revenant une nouvelle fois aux guides de tracé, ils font mention à des degrés divers, de la soudabilité, ou des possibilités de brasage et soudo-brasage. Ceci répond à deux aspects de l'utilisation des alliages moulés en construction mécanique : d'abord la possibilité de réparer des pièces détériorées, et il faut souligner ici la commodité de telles formes d'interventions de services d'entretien ; ensuite la possibilité d'assembler

deux moulages entre eux, ou des mouillages avec des pièces corroyées, pour produire un ensemble présentant les qualités désirées, avec davantage de facilités techniques ou économiques. Dans le premier cas, et nous pensons beaucoup ici aux aciers moulés, on peut par exemple décomposer une pièce complexe en éléments simples pour supprimer des noyaux, et mouler plus facilement sur machine avec de bonnes cadences de fabrication (fig. 5 et 6). Le deuxième cas est celui de l'incorporation d'un élément moulé, raccordé par soudage à l'ensemble de la construction, tel qu'un tube guide pour arbre d'hélice de navire. Cette orientation de fabrication justifie, dans les fonderies et les organismes techniques professionnels, l'étude de la soudabilité des aciers moulés, notamment par la méthode des implants, mise au point par l'Institut de soudure, qui permet de déceler les charges thermiques et les contraintes mécaniques au plus près des cordons de soudure.

Pour les fontes, on sait traditionnellement que des précautions s'imposent au soudage, en raison de la présence de carbone à un taux élevé, et des contraintes thermiques que fait apparaître une telle opération. Néanmoins, il existe une abondante documentation sur le soudage au chalumeau oxyacétylénique avec métal d'apport, sur l'aluminothermie, sur le soudage à l'arc avec métal d'apport, notamment fer nickel. L'étude bibliographique « Soudage des fontes » publiée aux Editions techniques des industries de la fonderie, en donne des exemples, français et étrangers.

Au perfectionnement de ses élabouations métallurgiques et de ses procédés de moulage et de noyaufage, le fondeur ajoute le développement de ses moyens de contrôle, non seulement au niveau de l'expédition des pièces aux ateliers de mécaniques, mais aussi aux différents stades de fabrication. C'est pourquoi, à côté par exemple des contrôles de composition des alliages par voie classique, ou par voie spectrométrique, on voit se développer des méthodes de contrôle

rapide en atelier, telles que l'analyse thermique des fontes en cours de solidification, le dosage thermoélectrique du silicium des fontes, la mesure du gazage des alliages d'aluminium en cours de solidification, etc. Mais surtout, au-delà des contrôles classiques de dimensions, d'aspect, d'étanchéité et devant les exigences croissantes de qualité des constructeurs, allant jusqu'à la qualité nucléaire, les fondeurs ont accompli un effort tout particulier en direction des procédés de contrôle non destructifs tels que : ressuage, magnétoscopie, mesure de résistance ou d'induction, ultra-sons, radiographie. C'est ainsi que le C.T.I.F. a, avec les fondeurs d'acier, codifié les examens radiographiques, les essais magnétoscopiques, de ressuage, par ultrasons, ainsi que leurs interprétations, les documents correspondants ayant pour objet de faciliter, à cet égard, la tâche commune des fondeurs et des constructeurs.

Le même effort se développe actuellement pour la radiographie dans le domaine des alliages d'aluminium, avec un souci particulier de ceux qui trouvent une application dans le domaine aéronautique et spatial. De même, pour les grosses pièces en cupro-aluminium, des essais sont en cours, en liaison avec les fondeurs et les fabricants d'appareils de contrôle pour définir les conditions et les limites des contrôles par ultra-sons, rayons X et gammagraphie, avec le concours de l'Institut de recherches de la construction navale. L'établissement d'un cahier des charges repose sur une concertation aussi large que possible entre le donneur d'ordres et le fondeur, et sur l'existence de documents de base : normes, spécifications et recommandations techniques. A ce sujet, il convient de bien mettre en évidence l'action du Bureau de normalisation de la fonderie, rattaché au C.T.I.F., et agissant en liaison avec l'Association française de normalisation (AFNOR) et les milieux professionnels. Plus de 50 normes homologuées ou enregistrées existent dans l'ensemble du domaine de la fonderie, intéressant tant les nuances d'alliages, les caractéristiques des pièces moulées en

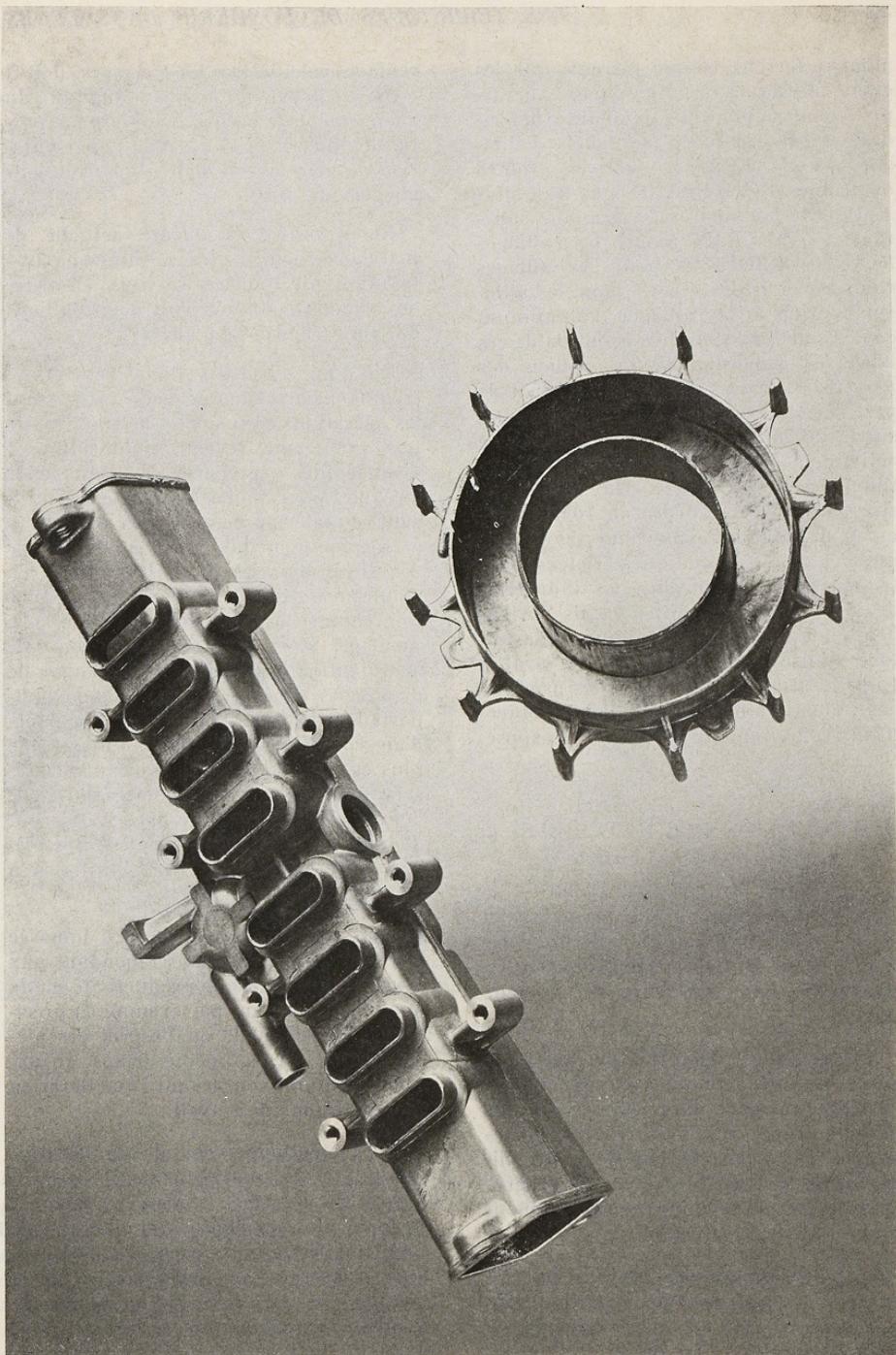


FIG. 6. — Pièces coulées sous pression : à gauche, corps de brûleur à gaz pour chauffe-eau en A-S9 U3 ; à droite, support de bobine d'excitation pour alternateur d'automobile en A-S5 U3
(Doc. Société Thécla-Delle et S.E.V.-Marchal).

alliages ferreux et non ferreux, que les essais physiques ou mécaniques. Au surplus, dans sa politique de qualité, la fonderie a mis en place des labels d'alliages : FOMAFRAN pour les fontes malléables, FONTFRANC pour les fontes à graphite lamellaire et à graphite sphéroïdal, ALUFRAN pour les alliages légers, CUPROFRAN pour les alliages cuivreux et PRESSFRAN pour les alliages de zinc et les alliages d'aluminium coulés sous pression. L'attribution de ces labels est subordonnée à l'examen des moyens de travail des usines, assorti de prélèvements de pièces ou éprouvettes, suivis de contrôles en laboratoire. Cette activité incombe au C.T.I.F., les échantillons prélevés à cette fin entraînant chaque année de l'ordre de 10 000 examens micrographiques, analyses chimiques et essais mécaniques. Dotées d'un tel ensemble de moyens, les industries de la Fonderie souhaitent qu'ils deviennent chaque jour mieux connus et davantage utilisés, afin de servir en aval à l'amélioration et au progrès des produits des industries mécaniques, selon l'objectif fixé à la première partie de cet exposé.

EVOLUTION DES MATERIELS ET INSTALLATIONS

Abordons maintenant le second volet de cet exposé, qui traitera de la Fonderie non plus en tant que fournisseur de la Mécanique, mais au titre de branche cliente.

La profonde transformation des techniques de fabrication des pièces moulées s'est accompagnée d'un recours de plus en plus ample aux industries d'équipement, à celles ressortissant de la Mécanique en particulier. Le rythme du progrès conduit en outre à un renouvellement plus rapide des matériels.

Ce renforcement des moyens mis en œuvre se traduit, dans les statistiques de la Fonderie, par un accroissement de productivité de l'ordre de 30 % dans les quinze dernières années. Encore, ce pour-

centage, calculé sur les tonnages, doit-il être notablement majoré, du fait du changement de nature d'une grande partie des pièces produites, de l'augmentation de leur niveau de qualité et de leur allègement.

En définitive, à l'heure actuelle, le marché des outillages, machines ou installations de fonderie se situe, en ordre de grandeur, autour d'un demi-milliard de francs lourds par an.

De quoi s'agit-il ? Pour l'essentiel : d'équipements thermiques, intéressant les opérations de fusion et de traitements tels que recuit, revenu, stabilisation... ; de machines à préparer et à compacter le sable, pour toutes les fonderies utilisant ce matériau de moulage ; de presses à injecter le métal et de carrousels de coquilles, pour les usines travaillant en moules métalliques ; de matériels de finition comme les appareils de grenaillage, meulage, tronçonnage ; de moyens de manutention, transport et de stockage ; de dispositifs complémentaires, mais d'importance capitale, tels les équipements d'air comprimé et les appareillages, de plus en plus nombreux, assurant la préservation des ambiances de travail et de l'environnement. A cette liste, il convient d'ajouter les outillages, moules ou modèles, ainsi que les machines utilisées à leur entretien.

Dans tous les domaines, s'est imposée la recherche de solutions répondant aux exigences nouvelles de productivité ou de qualité — touchant par exemple la précision dimensionnelle ou l'aspect des pièces brutes —, en même temps qu'aux préoccupations concernant l'amélioration des conditions de travail.

Est à mentionner comme significative l'évolution des équipements de noyautage et de moulage. Leurs performances se doublent d'une sûreté d'emploi accrue. La diversification des procédés, déjà évoquée, a entraîné un élargissement de la gamme des machines pour le noyautage à prise à chaud ou à température ambiante, pour le moulage en carapaces, en mottes, ou en châssis (fig. 7).

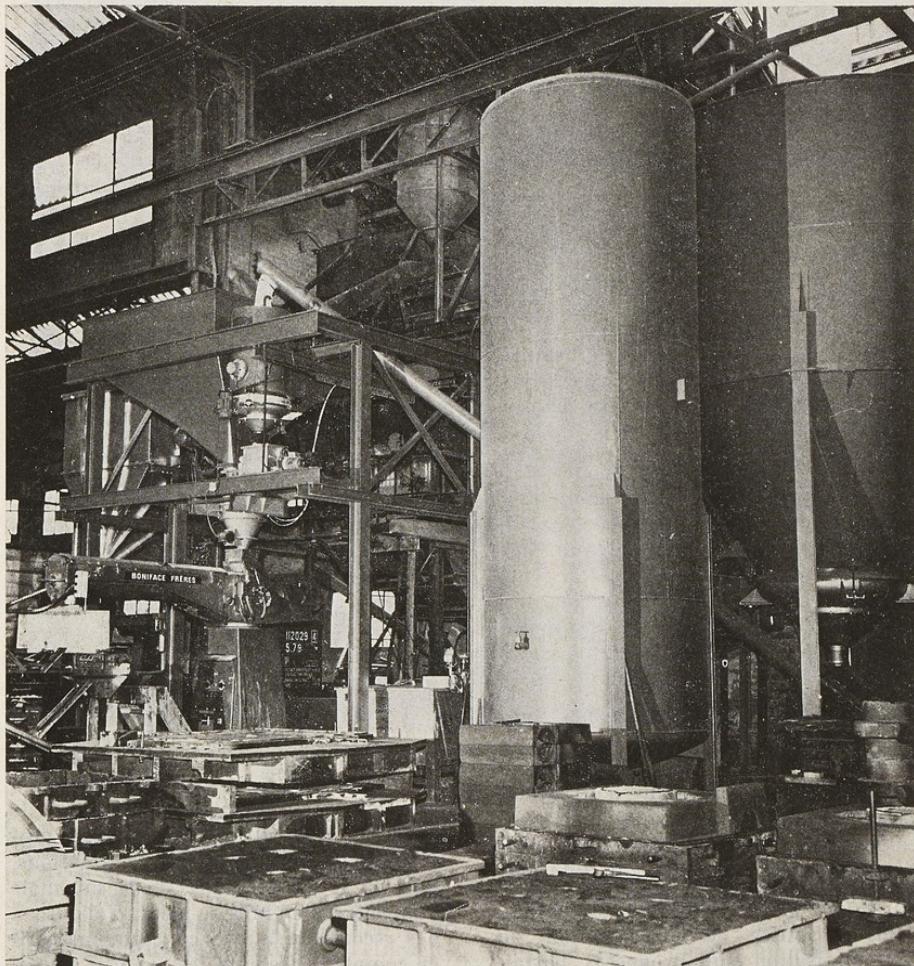


FIG. 7. — Vue d'un chantier industriel récemment installé, utilisant un nouveau procédé de moulage en sable compact lié au silicate de soude-laitier de hauts fourneaux, procédé mis au point par le Centre technique de Fonderie (Doc. Fonderies de Saint-Omer - C.T.I.F.).

Au-delà de la mécanisation, l'emploi d'automatismes perfectionnés est à signaler pour certains chantiers de moulage en sable, où seule la pose des noyaux dans les moules reste manuelle, toutes les autres opérations ayant été rendues automatiques, y compris même la coulée. *A fortiori*, la fonderie sous pression s'est orientée dans la même voie, avec des réalisations entièrement automatiques,

depuis le contrôle des températures du métal et du moule, jusqu'à l'évacuation des pièces, en passant par le poteyage et la coulée.

Pour bien d'autres secteurs des ateliers de fonderie, les recherches se sont développées dans le même sens, et conduisent déjà à des applications concernant par exemple : la préparation

des charges pour les appareils de fusion ; les tâches d'ébarbage, spécialement le nettoyage des pièces par grenailage et le meulage. La mise au point de lignes d'ébarbage automatique soulève en revanche des difficultés technologiques qui ne semblent pas encore pleinement résolues.

Dans l'optique du modernisme de pointe, il est possible de faire état de diverses applications en fonderie de robots industriels, entre autres pour le déplacement ou la manipulation de pièces chaudes, les manutentions à distance, s'agissant d'opérations très répétitives, à accomplir dans des ambiances bruyantes ou empoussiérées.

Certaines installations de fonderies se situent au premier plan en matière d'automatisation, le domaine privilégié de cette évolution étant bien entendu celui des productions de masse et des activités de grande série. Ceci, à la fois pour des raisons techniques et pour des motifs économiques, puisqu'il s'agit d'assurer la rentabilité de matériels complexes.

Ce qui se passe dans des firmes généralement importantes, n'est à retenir qu'en tant qu'illustration du mouvement général de progrès enregistré dans la profession. Des solutions plus simples existent, que les constructeurs de matériels se sont attachés à adapter aux différents cas d'entreprises de fonderie.

Des formules de mécanisation ou d'automatisation sont proposées, parfaitement susceptibles d'application dans des usines petites ou moyennes. Un exemple typique est celui des machines à mouler classiques, que l'on trouve aujourd'hui même dans de petites unités de production ; ces machines sont dotées d'une programmation rendant le cycle de fabrication automatique, libérant ainsi l'ouvrier de la commande des phases successives de travail.

En résumé, les matériels de fonderie, tels qu'ils se présentent sur le marché, offrent une palette de solutions répondant à la majorité des besoins ; la difficulté tient à la pertinence des choix à

opérer, qui mettent en cause des facteurs bien plus complexes que naguère. En outre, il est dans la nature des choses que de nouvelles demandes se manifestent, suivant la marche même du progrès. Par exemple, s'est récemment exprimé le souhait de voir plus souvent des constructeurs s'associer pour la fourniture d'ensembles faisant appel à des compétences complémentaires. Nous pensons, dans ce sens, à des équipements de production auxquels doivent venir s'ajouter des éléments de sécurité ou de dépoussiérage.

Au passage, il convient de rappeler l'accroissement des dépenses relatives au domaine de l'hygiène et de la sécurité et de l'environnement. C'est un effort qui se développe en particulier pour ce qui touche au dépoussiérage, aussi bien dans le secteur des appareils de fusion (fig. 8) qu'au niveau des sableries, des chantiers de coulée, et, d'une manière générale, de tous les postes de finition.

Il faut encore ajouter, à propos de la liaison entre les questions de matériels et les préoccupations de sécurité, qu'une réflexion en commun a été engagée, au sein d'un groupe de travail réunissant des représentants des professions de la Mécanique et de la Fonderie, avec le concours des centres techniques. Le problème a toujours été l'objet d'attentions, de part et d'autre, cela va de soi, mais l'objectif est de faire le point, d'aboutir à des recommandations concrètes prenant en compte l'ensemble des données actuelles, notamment de l'expérience acquise.

Le progrès est une création continue. Les changements intervenus dans les installations de fonderie rendent bien compte de cette permanence d'évolution. Encore convient-il de souligner que l'adaptation des équipements obéit, non seulement aux exigences des techniques de production, mais aussi à la transformation des idées qui régissent l'organisation et les conditions physiques et psychologiques du travail industriel.

Il est clair que la compétitivité de nos industries est liée à nos capacités techno-

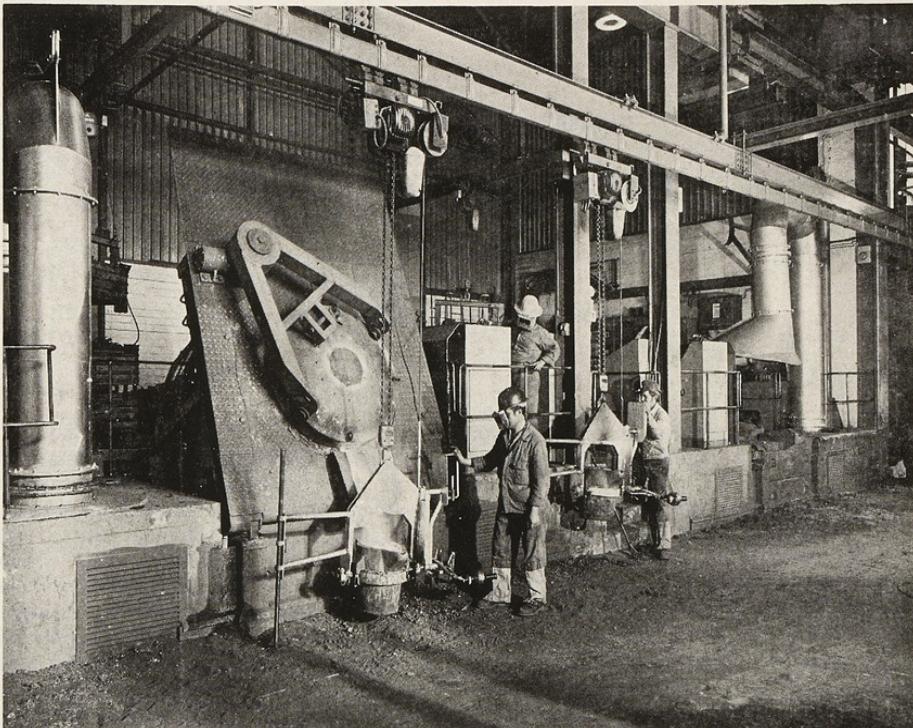


FIG. 8. — Poste de fusion équipé de fours électriques moyenne fréquence, avec dispositifs d'aspiration des fumées (Doc. Brown-Boveri).

logiques conjuguées. Elle dépend aussi, face à la concurrence internationale, de la vigilance dont nous saurons faire preuve afin d'assurer la mise à jour de notre information mutuelle. L'efficacité se fonde en une telle matière sur la qualité des relations humaines et le sens du travail en équipe. C'est un esprit à développer au-delà des frontières de l'entreprise, dans le cadre des rapports interprofessionnels, techniques et commerciaux.

Car il s'agit bien d'une tâche de développement, puisque l'état d'esprit est déjà créé, comme l'attestent les relations mixtes Mécanique-Fonderie, à l'échelon des professions, déployées sous l'égide : de la Commission « Qualité des approvisionnements », animée par M. Auguste Pommier, à la Fédération des Industries mécaniques et transformatri-

ces des métaux ; et par la Commission « Expansion Fonderie » que préside M. Roger Hubert, au sein du Syndicat général des fondeurs de France. Si l'on ajoute que ce dernier appuie son action de développement d'emploi des pièces moulées sur les travaux des organismes spécialisés que sont le Centre d'information des fontes moulées (C.I.F.O.M.), l'U.D.A.C. (utilisation et développement des alliages cuivreux), l'A.D.E.F.A.L. (action et développement de la fonderie d'aluminium), le Bureau de renseignements techniques de l'acier moulé, on peut conclure que, du côté des fondeurs, un dispositif efficace est en place pour approfondir, en pleine concertation avec les Constructeurs mécaniciens, les nombreux aspects d'une coopération dont le présent exposé a rapidement esquissé certains traits principaux.

Charpentes en bois et technologies nouvelles ()*

par Philippe CRUBILÉ,

Professeur à l'Institut National du Bois

Une bonne utilisation du bois dans les ouvrages travaillant n'est possible que si l'on tient compte, à tous les niveaux, de la plus fondamentale de ses caractéristiques : une anisotropie extrêmement accusée. Cela conduit pratiquement à considérer, dans de très nombreux cas, le bois comme étant constitué de deux matériaux différents dont les comportements doivent être examinés successivement. Ces écarts existent, bien qu'à des degrés divers, pour chacune des constantes physiques ou mécaniques que le concepteur peut être amené à utiliser.

Il est cependant indispensable, dans la conception d'un ouvrage travaillant, de tenir compte de certaines propriétés physiques ou physico-chimiques susceptibles d'influer sur les conditions d'exploitation de l'ouvrage, sa sécurité et sa pérennité.

RESISTANCE AU FEU

En raison de sa faible conductivité, du caractère isolant du charbon produit par sa combustion, de l'insensibilité relative de ses caractéristiques mécaniques à la température et de l'absence pratique de dilatation thermique, le bois est sans doute le matériau dont le comportement

dans un incendie est le plus sain et surtout le mieux *prévisible*.

En effet, exposée au feu, une pièce de bois se décompose progressivement en produisant des gaz combustibles et le résidu solide qu'est le charbon. Il participe donc à l'apport de chaleur et ce en fonction de la surface exposée, donc de son *taux de division* (surface exposée/volume) qui correspond à la section de ladite pièce.

Cependant l'évolution de cette carbonisation est extrêmement régulière, elle se produit à une vitesse constante pour chaque essence : 0,35 mm/mn pour du Chêne, 0,6 à 0,7 mm/mn pour les résineux courants de construction (Sapin, Épicéa, Pin sylvestre), de sorte que l'on peut mettre en évidence un *front de carbonisation*, qui reste parallèle à la surface initiale de combustion de la pièce, et au-delà duquel les caractéristiques physiques et mécaniques sont pratiquement intactes. Il en résulte que la stabilité au feu d'une structure en bois peut être calculée aisément et avec une bonne précision en utilisant des équations de réduction linéaire des sections résiduelles efficaces des pièces, en fonction du temps. Il est à noter qu'il existe un document intitulé *Cahier de spécification*

(*) Conférence prononcée dans l'Hôtel de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale, le 3 mars 1977.

n° 1 qui définit les caractéristiques permettant de classer un bâtiment à structure porteuse en bois en catégorie *premier risque* (donc avec réduction de prime) de la classification des sociétés d'assurance contre l'incendie.

PROTECTION CONTRE LES ATTAQUES BIOLOGIQUES

Matériaux d'origine biologique, le bois et ses dérivés sont susceptibles d'être attaqués par des insectes xylophages et par certains champignons (pourritures). Il convient, à ce sujet, de garder présents à l'esprit les principes fondamentaux suivants :

- a) la meilleure protection préventive contre les attaques biologiques consiste à respecter les *conditions d'hygiène* du bois, à savoir : assurer une ventilation suffisante des pièces et toujours éviter, dans la mesure du possible, les atmosphères confinées et les dispositions risquant de provoquer des condensations fréquentes au niveau des bois ;
- b) la résistance naturelle des bois à ces attaques est extrêmement variable en fonction de l'essence et constitue un critère fondamental de choix dans les cas difficiles ;
- c) la protection des pièces principales à l'aide de produits insecticides et fongicides adéquats est rendue obligatoire par la réglementation française dans la quasi-totalité des cas et pour la plupart des composants en bois utilisés dans le bâtiment.

RESISTANCE AUX AGRESSIONS CHIMIQUES

La plupart des essences ont une grande inertie chimique et présentent en général une insensibilité très largement suffisante aux atmosphères corrosives susceptibles d'être rencontrées (dans les installations industrielles, par exemple). Dans

certains cas extrêmes (tanneries, par exemple), il pourra être intéressant d'optimiser ce choix (cf. articles *Le Bois* dans le traité Généralités et *Bois* dans le traité Génie chimique). On consultera les documents correspondants du Centre Technique du Bois.

PROPRIETES MECANIQUES

En raison de son anisotropie, le bois ne peut être correctement défini que par la connaissance des caractéristiques mécaniques dans chacune des trois directions principales de sa structure : direction axiale (parallèle aux fibres), direction tangentielle (perpendiculaire aux fibres et parallèle aux cernes d'accroissement), direction radiale (perpendiculaire aux fibres et perpendiculaire aux cernes d'accroissement).

Dans la pratique courante, les caractéristiques mécaniques tangentielles et radiales (en général assez voisines) sont confondues et considérées globalement comme caractéristiques *transversales*.

La plupart des valeurs desdites caractéristiques sont établies à l'aide d'essais normalisés. Elles sont extrêmement variables en fonction de l'essence considérée et, dans une large mesure, également en fonction de leur provenance (lieu et conditions de croissance de l'arbre).

• Qualité technologique : on distingue ainsi la qualité réelle, *pratique*, des bois faisant partie d'un lot bien défini destiné à un ouvrage.

Cette qualité ou ce *classement* sera fonction des inévitables défauts et altérations présents sur les pièces concernées, et permettra de leur attribuer, faute d'essais, des valeurs de résistances forfaitaires, nécessairement plus basses, bien entendu, que celles que l'on peut mesurer sur de petits échantillons sans défaut.

Le classement des bois peut être effectué par un examen visuel, la présence de défauts sur une pièce conduisant, en

fonction de leur importance et de leur groupement, à un déclassement plus ou moins important de celle-ci.

Les critères de classement des bois de construction, actuellement en vigueur en France, sont donnés par la norme NF B 52-001 qui définit trois catégories. Cette norme est actuellement en révision.

Des définitions plus conformes aux nécessités actuelles sont intégrées aux prescriptions techniques de certaines *marques de qualité* contrôlées par le Centre Technique du Bois (marques *CTB-Charpente Industrialisée* et *CTB-Scies*). Une norme européenne existe également au stade expérimental.

Il faut noter, enfin, que l'on assiste au développement d'une technique de classement automatique, fondée sur la bonne corrélation statistique existant entre la contrainte de rupture en flexion des pièces de bois et leur module d'élasticité en flexion ; ce fait permet de procéder à une mesure industrielle dudit module (assimilable à un essai non destructif), et conduit à une utilisation plus économique et plus fiable du matériau.

- Contraintes admissibles : les *Règles de conception et de calcul des charpentes en bois* (Règles CB 71) établissent les contraintes admissibles sur la base d'un coefficient de sécurité de 2,75 (ou de 3 pour les règles simplifiées).

- Comportement rhéologique : la rhéologie du bois est assez complexe dans sa théorie. On peut résumer sommairement les faits comme suit.

Le domaine d'élasticité du bois, pour les sollicitations axiales (traction, compression et flexion) de courte durée s'étend pratiquement jusqu'aux contraintes de rupture.

Lorsque les contraintes sont maintenues dans le temps, le phénomène de *fluage* intervient. Celui-ci est d'autant plus marqué que les contraintes sont élevées et que l'humidité du bois est forte. Bien que ce phénomène ait tendance à

s'atténuer considérablement avec le temps et à se stabiliser dans la pratique, il est extrêmement difficile de lui assigner expérimentalement une limite asymptotique. On est donc en face d'un comportement visco-élastique ou de *plasticité différée*.

L'effet de fluage est considéré comme nul pour des valeurs de contraintes inférieures au vingtième environ des contraintes de rupture.

Ces faits ont permis d'établir des règles assez simples qui se traduisent, au niveau du calcul des structures, de la façon suivante :

- définition de *modules d'élasticité* utilisables dans les cas les plus courants et pour les charges temporaires (moins de trois mois consécutifs et moins de la moitié du temps) ;

- définition d'un ensemble de *coefficients de fluage* dépendant des niveaux de contraintes, de l'humidité moyenne des pièces et de la variation de celle-ci. Ces coefficients sont applicables pour les niveaux de contrainte supérieurs au cinquième de la contrainte admissible $\bar{\sigma}$ et pour les charges de longue durée (plus de trois mois consécutifs ou plus de la moitié du temps). Ils sont utilisés dans les calculs comme multiplicateurs des déplacements ou diviseurs des modules d'élasticité.

- Modules d'élasticité : des modules d'élasticité sont définis pour chacun des types de sollicitations énumérés précédemment, au moyen d'une formule qui les lie à la contrainte admissible correspondante et qui, dans la réglementation actuelle, est de la forme :

$$E = K \sqrt{-\sigma}$$

- Limites élastiques conventionnelles : en raison de ce comportement rhéologique, il est impossible de définir expérimentalement la limite de la phase élastique du bois (sauf dans le cas de la compression transversale). Une limite

élastique conventionnelle a donc été établie afin de permettre une certaine normalisation des méthodes de justification. Cette limite doit surtout être considérée comme une contrainte admissible extrême, utilisable, par exemple, dans les méthodes de calcul aux états limites.

BOIS LAMELLÉS-COLLÉS

On appelle ainsi des pièces reconstituées à partir d'éléments (*lamelles*) d'assez faibles sections, aboutés et recollés entre eux à *fil parallèle* de façon à obtenir des sections plus importantes, multiples des premières.

Cette technique présente de nombreux avantages qui viennent s'ajouter à ceux du bois lui-même :

— la section et la longueur des éléments finals ne sont plus limitées par les dimensions des pièces initiales, ce qui permet en outre de revaloriser certains sciages de faibles sections ;

— on peut, au moment du collage effectué sur gabarit, obtenir des formes courbes à peu près quelconques, ce qui permet de recourir à des solutions constructives particulièrement intéressantes tant sur le plan mécanique (arcs par exemple) qu'esthétique ;

— en outre, le processus de fabrication incorpore nécessairement une phase de tronçonnage des sciages initiaux, qui permet l'élimination des défauts naturels et une phase de reconstitution, qui conduit à une distribution aléatoire des défauts résiduels à l'intérieur du produit fini ; il en résulte une amélioration des contraintes moyennes de rupture sous sollicitations axiales et une réduction encore plus nette des écarts statistiques. Cela a permis, du point de vue réglementaire, d'attribuer aux éléments de structures en bois lamellé-collé des contraintes admissibles légèrement supérieures à celles des bois massifs de qualité équivalente à celle des lamelles constitutives.

CHARPENTES EN BOIS ET

PANNEAUX CONTRE-PLAQÜÉS

Les panneaux contre-plaqués sont des éléments de faible épaisseur (5 à 25 mm en pratique), constitués de *plis* minces (0,3 mm à 4 ou 5 mm) obtenus par tranchage ou par déroulage et recollés entre eux à *fil croisé* (généralement à 90°). A de très rares exceptions près, ils sont constitués d'un nombre impair de plis, le pli central étant dénommé *âme*.

On définit un sens longitudinal, parallèle au fil des plis externes, et un sens transversal, perpendiculaire à celui-ci.

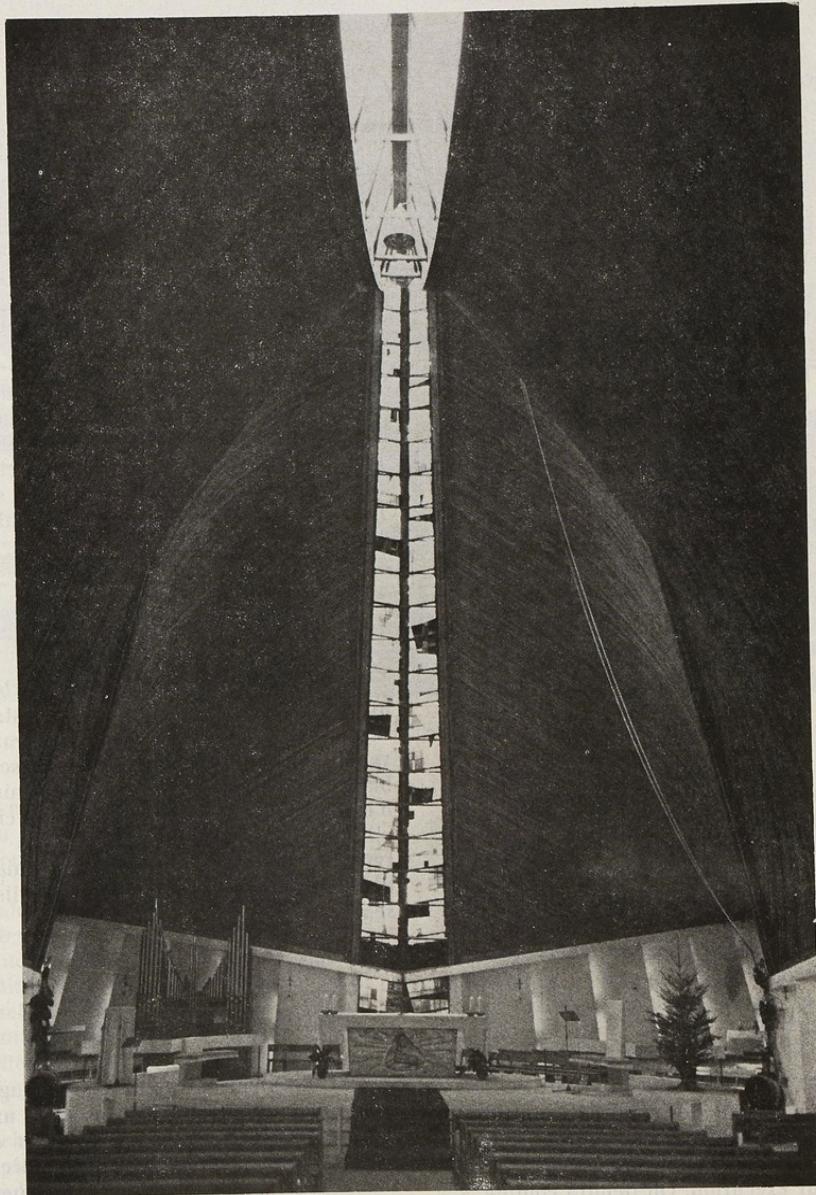
Les panneaux peuvent être constitués d'essences différentes pour les plis externes et internes. La nature et l'épaisseur des différents plis définissent la *composition* du panneau.

Les essences les plus utilisées pour le contre-plaqué à fonctions mécaniques sont l'Okoumé, le Pin d'Orégon (Canada), le Pin maritime (France), le Bouleau, le Hêtre. Les dimensions disponibles sont, en largeur, de l'ordre de 120 à 150 cm (122 et 150 cm notamment) ; en longueur, de 240 à 310 cm environ (244, 250 et 305 cm essentiellement) ; des longueurs plus grandes peuvent être obtenues exceptionnellement par la technique du *scarfage* (joint collé en sifflet).

La présentation dimensionnelle et les performances mécaniques de ce matériau rendent son utilisation intéressante dans de nombreux types de structures (goussets de fermes, âmes de poutres et de portiques).

D'une façon générale, les caractéristiques mécaniques des panneaux contre-plaqués sont déduites directement de celles des essences ayant servi à leur fabrication.

• Contraintes admissibles : la méthode la plus généralement admise consiste à affecter au panneau une contrainte admissible, fonction de l'essence utilisée et proportionnelle à l'épaisseur totale des plis à fil parallèle à la sollicitation. Dans le cas de la flexion, on peut prendre la somme des moments quadratiques des



Eglise de Marly-le-Roi.

plis de fil parallèle à la direction de flexion et leur affecter la contrainte admissible de l'essence utilisée.

● Modules d'élasticité : en l'occurrence, il est admis d'utiliser directement le module de l'essence ayant servi à la fabrication.

PANNEAUX DE PARTICULES

Les panneaux de particules, obtenus par découpage du bois en particules de quelques millimètres, et réagglomérés sous presses à l'aide de résines synthétiques en très faibles quantités, se présentent en panneaux d'assez grandes dimensions (360×170 cm et 410×183 cm, par exemple). Les caractéristiques mécaniques, nettement plus faibles que celles des panneaux contre-plaqués, donnent à ce matériau une vocation principalement de remplissage ; mais, en raison de son coût de production assez bas et des épaisseurs assez importantes qu'il présente (jusqu'à 45 mm), il est économiquement intéressant de l'exploiter dans les utilisations en flexion, en tant que support de couverture ou support de plancher.

Du fait des taux de fluage relativement élevés et des modules d'élasticité variant en fonction inverse des épaisseurs de fabrication, le calcul en flexion des éléments en panneaux de particules est très délicat, et il est préférable d'indiquer des tables d'épaisseurs nécessaires en fonction des charges et des portées.

LES ASSEMBLAGES

Ils constituent toujours les points faibles de la construction. Il faut donc donner un soin particulier à leur conception et à leur exécution. On tiendra compte, à cet effet, des prescriptions générales ci-après :

— ajuster les pièces de façon précise et sans jeu ;

— vérifier soigneusement toutes les fatigues locales : efforts longitudinaux dans les barres ; efforts transversaux ; accorder une attention toute particulière à la possibilité de rupture des pièces par cisaillement (distance entre boulons, longueur libre à l'avant ou à l'arrière de l'assemblage, où sont susceptibles de se développer des contraintes de cisaillement) ;

— la résistance du bois à la traction transversale étant très faible, éviter ce genre de sollicitation, ou prévoir des agencements s'opposant aux ruptures possibles du bois ;

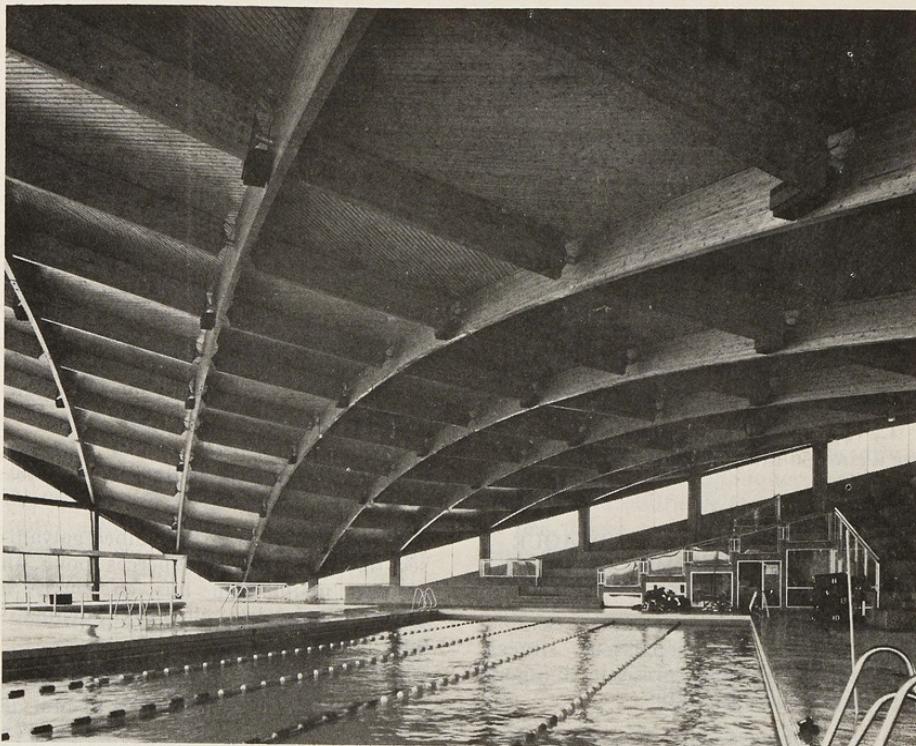
— d'une manière générale, éviter dans les pièces principales les modes d'assemblage qui obligent à pratiquer des entailles ou mortaises réduisant leur section totale de plus de $1/3$, ou amenant à sectionner des fibres dans les zones soumises à des contraintes de traction.

ASSEMBLAGES TRADITIONNELS

Ce sont des assemblages *bois sur bois* qui font surtout intervenir les résistances à la compression (axiale ou transversale). Les plus connus sont les assemblages dits à tenons et mortaises d'embrèvement, à entailles, à clés, à chevilles. On les rencontre dans tous les types anciens de charpente, qui étaient d'ailleurs conçus de manière à les utiliser seuls.

ASSEMBLAGES MECANIQUES DES SYSTEMES MOISÉS

Contrairement au cas des assemblages traditionnels dans lesquels on crée une liaison *bois sur bois* par exécution de profils complémentaires sur des pièces situées dans un même plan, le moisement des pièces (doublage de certaines barres) permet d'assembler latéralement des pièces juxtaposées, mais fait nécessairement appel à des pièces intermédiaires généralement métalliques (pointes, aiguilles,



Piscine à Aulnay-sous-Bois.

broches, boulons et organes complémentaires du boulonnage) qui seront sollicitées en cisaillement par l'effort d'assemblage. Le principe de fonctionnement et de calcul est le même, qu'il s'agisse de pointes, de broches ou de boulons. Dans chaque cas, le diamètre desdits organes constitue le paramètre essentiel à partir duquel sont évalués les écarts minimaux à respecter entre chaque organe, parallèlement et perpendiculairement au fil du bois, l'éloignement minimal des bords chargés (sollicités en traction) ou non chargés, ainsi que la charge admissible par organe. L'épaisseur des pièces assemblées est un paramètre important. Différents cas de cisaillement sont envisagés : cisaillement simple, double, symétrique ou multiple, selon que le nombre de pièces assemblées est de deux, trois, quatre ou plus.

● Organes complémentaires du boulonnage : goujons, anneaux, crampons : le point faible d'un assemblage par boulonnage étant toujours la contrainte de compression localisée dans le bois ou la contrainte de cisaillement consécutive, on peut en augmenter considérablement la résistance en accroissant la surface de contact bois-boulon au moyen, par exemple, d'un goujon, sorte de manchon métallique entourant la tige du boulon au niveau de chaque plan de cisaillement. Une autre solution consiste à disposer des anneaux ou des crampons qui ne sont pas nécessairement au contact du boulon, mais transfèrent directement les efforts d'une pièce de bois à l'autre.

Dans tous les cas, ces organes nécessitent la présence de boulons afin d'assurer le serrage et le maintien de l'assem-

blage. Le boulon est donc en fait un organe complémentaire puisque c'est l'anneau, le goujon ou le crampon qui assurent le transfert de la majorité des efforts de cisaillement.

● Assemblages mixtes : on désigne sous ce terme l'utilisation, dans un même assemblage, de boulons et de pointes. Cette solution permet parfois d'obtenir une meilleure *densité* de résistance (résistance par unité de surface) pour un prix de revient assez réduit.

Le calcul théorique consistera à additionner simplement la résistance procurée pour chaque type d'organe.

Le rapport optimal semble être de quatre à cinq pointes pour un boulon.

GOUSSETS EN CONTRE-PLAQUÉ ET CONNECTEURS MÉTALLIQUES

Le principe du gousset, qui assemble des pièces de même épaisseur, situées dans un même plan, présente d'importants avantages. En effet :

— les usinages dans les barres sont inexistant ou se réduisent, en bout, à de simples coupes droites ;

— le dimensionnement des éléments d'assemblage ne se répercute pas sur les sections des barres, ce qui est toujours le cas pour les assemblages traditionnels et souvent pour les assemblages par moitement.

Le développement de cette méthode d'assemblage est donc actuellement très fort pour les charpentes en bois et se manifeste sous trois formes principales.

● Goussets en contre-plaqué : ils peuvent être cloués, collés, collés-cloués ou collés-agrafés. Le recours au collage, plus délicat à contrôler en production et légèrement plus coûteux que le clouage, présente l'avantage de conférer à la structure une rigidité sensiblement supérieure (glissement réputé nul pour les calculs de déformation globale).

Ils sont utilisés pour la réalisation de fermes de portée faible à moyenne (6 à

15 m), de petits portiques (arches à volailles, etc...) et comme assemblage complémentaire sur chantier.

● Goussets en tôle d'acier pour charpentes lourdes : ces goussets en tôle épaisse (3 mm et plus), fixés par boulonnage, sont utilisés fréquemment pour les charpentes triangulées de portées intermédiaires (15 m et plus) et constituent la méthode d'assemblage la plus répandue dans les ouvrages en bois lamellé-collé : assemblages d'angles, de clef d'arc, de pied, de joints de transport, etc... Ils sont parfois réalisés, lorsque les formes sont complexes, en fonte d'acier ou d'aluminium.

● Connecteurs métalliques : on désigne par ce terme :

a) des goussets en tôle mince galvanisée (0,8 à 1 mm) pré-percés pour un clouage manuel ou mis en œuvre à l'aide de pistolets cloueurs pneumatiques ;

b) des plaques en tôle d'acier galvanisé, munies de dents (de 6 à 15 mm de longueur) par emboutissage et mises en œuvre à l'aide de dispositifs de pressage très divers que l'on peut rattacher à deux familles :

— les presses à rouleaux fonctionnant en laminoir,

— les presses alternatives hydrauliques.

Ce type d'assemblage extrêmement économique et performant connaît actuellement en Europe continentale (après l'Amérique du Nord et l'Angleterre) un essor très rapide sur le marché des fermes à faible écartement pour maisons individuelles, et devrait se développer progressivement sur le marché des bâtiments industriels et agricoles.

COLLAGE

L'utilisation d'une liaison chimique à haute résistance dans les charpentes en

bois a été permise, au début du siècle, par l'apparition des colles à base de caséine qui ont fait, depuis, place aux colles urée-formol et résorcine ou assimilées.

Le niveau de résistance (en traction et cisaillement) de ces colles, constituées d'une résine polymérisable et d'un durcisseur catalyseur, leur permet de reconstituer la cohésion naturelle transversale existant entre les fibres de bois.

Le collage des pièces de bois doit respecter certaines règles fondamentales :

- un collage n'est durable et résistant que si le plan de collage est parallèle ou sensiblement parallèle (jusqu'à 10 % de pente) aux fibres du bois. Au-delà de cette valeur angulaire, la résistance décroît très rapidement et devient insuffisante ;

- un bon collage ne peut être obtenu que sur du bois sec, le taux d'humidité limite dépendant des techniques et des colles utilisées, mais ne dépassant jamais 16 à 18 % ;

- les surfaces à coller doivent être les plus lisses et les plus propres possible ; elles doivent être correctement dressées et rabotées, mais non poncées en principe ;

- une pression doit être assurée pendant la polymérisation : très variable selon la technologie, elle peut atteindre une quinzaine de bars mais n'est jamais inférieure à 2,5 bars ;

- la nature de la colle et son pH doivent être définis en fonction des caractéristiques chimiques du bois : pH, résines, tannins ;

- les colles de charpente doivent supporter l'existence exceptionnelle de joints épais (jusqu'à 0,3 mm environ) en raison des tolérances d'usinage des pièces de bois, ce qui, dans le cas des colles urée-formol, suppose une *plastification* qui leur confère la qualification de *joints épais* ;

— d'une façon générale, un strict respect des recommandations du fabricant est indispensable.

Les applications du collage en charpente sont multiples :

- bois lamellé-collé ;
- aboutage par profils à entures multiples ;
- fabrication des panneaux contre-plaqués ;
- fabrication de poutres composites par collage de bois et contre-plaqué.

• Assemblage de treillis : cette utilisation, qui consiste à appliquer le principe des entures multiples (ou *doigt de gant*) à des pièces non coaxiales n'est utilisé que dans certains procédés de préfabrication industrielle de poutres droites en treillis.

ABOUTAGE

L'aboutage consiste à assembler par collage bout à bout, coaxialement, deux ou plusieurs pièces de bois de même section de façon à obtenir un élément de plus grande longueur.

Cela est réalisé grâce à l'exécution (à chaque extrémité des pièces à assembler) d'un profil de dents trapézoïdales dont les flancs ont une pente inférieure à 10 % par rapport à l'axe géométrique de la pièce.

L'usinage, l'encollage et le pressage sont confiés à des chaînes automatisées qui représentent un investissement très lourd. Un contrôle strict de la fabrication est indispensable.

Les applications de cette technologie en charpente sont les suivantes :

- amélioration de la qualité technologique et augmentation des longueurs des bois bruts par purge préalable des défauts et aboutage ;

— préparation des lamelles constitutives des pièces lamellées-collées de grande longueur ;

— préparation des membrures dans certaines fabrications de poutres composites.

● Résistance utile : sur le plan des principes, la résistance d'un aboulage doit être telle que celui-ci ne constitue pas un point faible dans la pièce obtenue. Cette performance, relativement aisée à atteindre industriellement dans le cas des essences résineuses légères, l'est d'autant moins que la résistance naturelle de l'essence employée est plus élevée.

SYSTEMES CONSTRUCTIFS

Le recours aux trois formes principales du bois : bois massifs, bois lamellé-collé, panneaux de contre-plaqué, combiné au choix des différentes méthodes possibles d'assemblage, permet une extrême variété dans la conception des structures portantes en bois dont nous allons examiner les principaux types.

CHARPENTE TRADITIONNELLE

Les assemblages traditionnels de charpente, malgré les exemples de belles charpentes anciennes qu'ils ont permis de construire, présentent des inconvénients majeurs qui ne permettent plus de les considérer comme satisfaisants. Ils constituent des systèmes *déformables*, sensibles aux efforts dissymétriques ou latéraux (action du vent, tassement des appuis, etc...) :

— ils font appel à des *assemblages bois sur bois*, entaillant profondément les pièces ;

— ils ne sont pas *facilement calculables*. Il en résulte des *équarrissages élevés* des pièces constitutives, conduisant à une consommation de bois nettement supérieure à celle qui serait strictement nécessaire.

On ne fera appel aux systèmes traditionnels que dans des cas particuliers (combles d'habitations, recherche d'effets décoratifs, restauration d'anciens bâtiments, etc...). Chaque fois qu'il s'agira de bâtiments agricoles ou industriels dont les charpentes ont plus de 6 à 8 m de portée, on aura recours aux systèmes décrits ci-après, qui permettent de réaliser, en même temps qu'une économie de matière, des constructions offrant toutes garanties de stabilité.

TREILLIS MOISÉ

Le principe de la composition de *structures triangulées*, à l'aide de pièces alternativement simples et moisées, et permettant de recourir aux méthodes d'assemblage par juxtaposition, remonte à la fin du siècle dernier et a connu un très important développement au cours de la première moitié de celui-ci. Il est encore très souvent utilisé, en dépit de la vive concurrence des assemblages par goussets, et plus particulièrement pour les constructions de portée intermédiaire (12 à 25 m).

On cherchera toujours à constituer les fermes de charpente par des systèmes triangulés classiques analogues à ceux utilisés dans la charpente métallique.

TREILLIS ET FERMES A GOUSSETS OU CONNECTEURS

La technique des goussets en contre-plaqué et des *connecteurs* métalliques pour l'assemblage des charpentes en bois permet une rationalisation considérable de la conception, de la fabrication en série et du levage des fermes ou poutres, ainsi qu'une optimisation des sections de bois.

Très largement utilisée actuellement pour la réalisation des charpentes préfabriquées pour combles perdus et pour combles habitables de maisons individuelles ou d'édifices de faible portée, cette technologie présente également un très grand intérêt pour les constructions de

portées supérieures (jusqu'à 30 m et parfois plus). Dans ces derniers cas, si la recherche de l'économie est primordiale, on adopte, le plus souvent, la formule de fermes à écartement moyen (1,00 à 2,00 m suivant les types de couverture), préfabriquées en deux éléments jumelés et reposant sur une sablière en acier ou en béton qui assure la descente de charge, plutôt que la formule de l'arc ou portique complet en treillis dont le transport et le levage sont plus complexes.

FERMES, POUTRES ET PORTIQUES COMPOSITES

On qualifie de *composite* un élément ou un ensemble constitué de pièces multi-

ples, éventuellement de matériaux différents : bois et contre-plaquée, par exemple.

N'entrent dans cette définition ni les éléments lamellés-collés ni les poutres, dites *agglomérées, à crémaillère* ou à clavettes, qui correspondent à une technologie maintenant périmée et que nous n'illustrons ici que pour mémoire.

Il faut cependant indiquer que des pièces lamellées-collées peuvent remplacer des pièces massives dans la constitution des éléments composites modernes. Le principe le plus fréquemment mis en œuvre consiste à dissocier, dans le cas des utilisations en flexion, les fonctions de résistance aux moments d'une part, aux efforts tranchants d'autre part, en



Laboratoire du C.S.T.B. et du C.T.B. à Champs-sur-Marne.

reportant le maximum de matière au niveau des fibres extrêmes de la pièce, comme on le fait dans le cas des profilés métalliques en I ou en H, et en ne conservant, pour résister aux efforts de cisaillement, au niveau de la fibre neutre qu'une *âme* de faible épaisseur.

Ainsi furent constitués jadis des éléments dits *IPN bois*, à l'aide de trois pièces massives, deux constituant les membrures, une l'âme, assemblées longitudinalement par entures multiples collées.

La solution traditionnelle la plus répandue consistait néanmoins, pour la réalisation de poutres importantes, à constituer des âmes *en treillis jointifs* ou *en parquet* à l'aide de planchettes jointives en deux lits croisés et inclinés à 45° par rapport à l'axe de la pièce.

Des membrures hautes et basses étaient ensuite rapportées en rives de l'âme et assemblées par clouage, ou collage et clouage.

La forme moderne pour la réalisation de ce type de poutre consiste en une âme constituée d'une simple feuille en panneau contre-plaquée, assemblée également par clouage ou, pour un meilleur rendement, par collage et clouage. Ces deux techniques permettent la réalisation de poutres à hauteur variable (donc à inertie variable), de fermes ou de portiques fonctionnant en arcs. Quelques essais ont été fait en remplaçant le panneau contre-plaquée par un panneau de particules. Toutefois, le taux de fluage de ce type de panneau conduit à épaisser l'âme et ne permet guère de dégager pour l'instant un intérêt économique quelconque.

Afin d'améliorer l'esthétique des structures réalisées ainsi que leur résistance à l'effet de déversement, la configuration en I peut être remplacée par une configuration *en caisson*, les pièces en contre-plaquée étant rejetées à l'extérieur des membrures.

Dans tous les cas, des raidisseurs transversaux doivent être disposés entre les membrures afin de réduire les risques de déversement.

ARCS ET POUTRES EN BOIS LAMELLÉ-COLLÉ

La lamellation et le collage de bois permettent, comme nous l'avons vu, la réalisation de pièces de très fortes sections, à inertie variable, éventuellement courbes et de grande longueur. Cette possibilité, jointe aux caractéristiques de résistance au feu, d'inertie chimique, de légèreté, de rapidité, de mise en œuvre et de fabrication, ouvre au bois lamellé-collé un nombre croissant de marchés dans des domaines aussi divers que les bâtiments industriels et agricoles, les bâtiments sportifs (stades couverts, salles de sports, patinoires, piscines, etc...), culturels, commerciaux, cultuels.

Le plus grand nombre de ces réalisations se rattache, du point de vue du fonctionnement mécanique, à deux familles que nous distinguons arbitrairement : les poutres et les arcs.

- Les poutres, droites ou courbes, isostatiques ou hyperstatiques, sont souvent associées à des infrastructures (mur, voiles, portiques ou poteaux) en béton et à des éléments secondaires en bois (pannes, contreventements) ou en acier (tirants, contreventements, pièces d'assemblage).

En raison de la souplesse géométrique intrinsèque de ce matériau et du fait de sa préfabrication *sur mesure*, des audaces architecturales sont possibles sans crainte d'augmentation importante des sujétions de fabrication ou du prix de revient.

Le type de section le plus généralement utilisé est rectangulaire. Toutefois, lorsqu'une économie ou un allégement sont particulièrement souhaités, des sections en I ou, à l'inverse, en caisson peuvent être retenues. Dans le premier cas, on constituera en premier lieu l'âme, d'épaisseur plus faible et de hauteur variable en fonction des variations d'inertie nécessaires, puis on recollera en extrados et en intrados deux semelles plus larges, généralement de hauteur constante, constituées de trois ou quatre lamelles.

Dans le cas du caisson, on préfère généralement une technique se rapprochant de celle du *jumelage* et consistant à réassembler transversalement deux pièces possédant chacune une hauteur égale à la hauteur totale de la pièce définitive, en intercalant entre elles une fourrure haute et une fourrure basse affleurant l'extrados et l'intrados. Les pièces ainsi obtenues, peu sensibles au déversement, ont un comportement mécanique très voisin de celui d'une pièce pleine de même encombrement.

• Dans le cas des arcs qui peuvent d'ailleurs être considérés comme des cas particuliers de poutres, la technologie est identique, mais le mode de fonctionnement, particulièrement adapté au matériau, permet d'atteindre des portées considérables avec une importante économie de matière.

Des poutres libres de l'ordre de 100 à 110 m ont pu être réalisées sans difficultés majeures et les exemples de réalisation entre 25 et 80 m sont innombrables à l'heure actuelle.

Le calcul des arcs en bois lamellé-collé est particulièrement simple et fiable, puisque les formules générales de la résistance des matériaux pour le calcul des arcs sont applicables sans précautions particulières.

Les termes relatifs à la dilatation thermique sont supprimés dans les formules, et les termes relatifs aux déformations sous efforts normal et tranchant peuvent être négligés sans inconvénients, du moins au stade des calculs d'avant-projet.

Seuls deux types d'arcs sont pratiquement retenus :

- les arcs isostatiques à trois articulations ;
- les arcs hyperstatiques à deux articulations.

La technique des assemblages fait généralement appel au boulonnage et à l'emploi de goussets latéraux ou axiaux

en tôle d'acier ou de *boîtiers* à rotules pour les pieds et les clefs d'arcs.

Toutefois, la réalisation d'assemblages destinés à transférer des moments de flexion est toujours très délicate et coûteuse, et l'on évite toujours, dans la mesure du possible, de transférer de tels efforts dans un assemblage mécanique de pièces en bois.

Quand, pour des raisons de transport en particulier, le recours à des assemblages est inévitable, on s'efforce de les disposer en des zones de moments nuls ou très faibles sous l'action des charges permanentes, de façon à ce que leur déformabilité ne perturbe pas le fonctionnement d'ensemble.

Une autre solution consiste à réaliser, pour certains assemblages d'angle, des entures multiples collées de grandes dimensions.

La rigidité obtenue est supérieure à celle des assemblages mécaniques, mais les limites de résistance conduisent à un léger surdimensionnement des éléments à assembler et la réalisation d'un tel collage est difficile à envisager sur chantier.

SOLUTIONS DIVERSES

Nous citons maintenant certaines solutions qui s'apparentent à l'une des catégories précédentes, mais avec des particularités de fonctionnement importantes, ou qui s'en distinguent totalement.

TREILLIS TRIDIMENSIONNELS

Il s'agit en l'occurrence de systèmes dans lesquels chaque pièce, fonctionnant essentiellement en traction ou compression, comme dans un treillis plan isostatique, peut cependant être considérée comme appartenant simultanément à deux ou plusieurs treillis plans distincts. Une solution classique fréquemment utilisée en construction métallique (surtout alliage léger) consiste à former deux sys-

tèmes orthogonaux de poutres à triangulation du type *Warren* et inclinées alternativement en sens inverse.

Quelques ouvrages en bois ont été ainsi réalisés, mais la complexité et le nombre des assemblages sont des éléments assez dissuasifs dans ce cas, et une solution satisfaisante ne pourrait être obtenue que pour une étude approfondie permettant la mise au point d'un assemblage efficace, simple, standardisé et de mise en œuvre rapide.

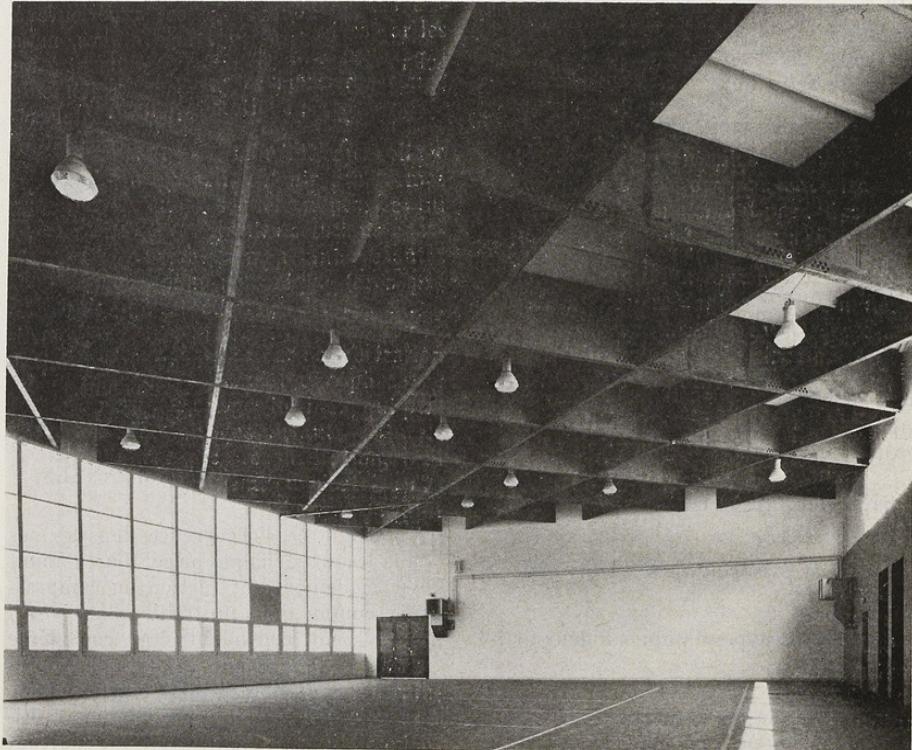
POUTRES CROISEES

Le principe des poutres croisées consiste à mettre en œuvre, sur des portées égales, deux familles de poutres

généralement orthogonales, liées entre elles à chaque intersection, de façon à obtenir un ensemble ayant globalement un comportement de dalle. Une réalisation intéressante (gymnase de Romainville) existe sous la forme d'éléments de poutres caissons (bois et contre-plaqué) de longueur unique, égale au côté de la maille carrée (entraxe de deux poutres) et assemblés à chaque *nœud* de la maille.

VOILES MINCES

Les voiles minces, dont le fonctionnement relève de la théorie des coques ou des membranes, peuvent être avantageusement constitués en bois pour la réalisation de portées libres de l'ordre de 15 à 40 m.



Gymnase de Romainville (caissons de contre-plaqué).

Une très grande variété de formes est possible.

Une forme répandue, l'*Hypar* (voile paraboloïde-hyperbolique à base carrée), peut être réalisée, pour une portée de 20×20 m et une couverture continue légère, à l'aide de trois *plis* de planchettes jointives de 15 mm d'épaisseur. Un premier pli est disposé en sous-face, parallèlement à la direction des paraboles. Les deux plis suivants, orthogonaux entre eux, sont disposés à 45° par rapport au premier pli.

L'assemblage entre les différents plis de planches est réalisé *in situ*, par collage à froid, à l'aide d'un agrafage très dense pour le maintien de la pression de collage et pour participation à la résistance d'ensemble.

Il est à noter que, compte tenu du type de distribution de contraintes dans une telle structure et des variations dimensionnelles du bois en fonction de l'humidité, la stabilité sera en grande partie conditionnée par le *respect des taux d'humidité limites du bois à la mise en œuvre*.

En pratique, la construction doit être établie, d'une part sur forme, d'autre part sous abri.

SYSTEME A PRECONTRAINTE OU A ARMATURE

L'utilisation de précontraintes dans les ouvrages en bois, très intéressante dans son principe, pose cependant des problèmes technologiques assez délicats à résoudre : en effet, l'association au bois d'éléments de précontrainte suppose l'existence de liaisons mécaniques discontinues ou chimiques continues (collage).

Dans le premier cas, on se heurte à quelques difficultés relatives au fluage du bois. De bons résultats ont cependant pu être obtenus au moyen de fils de précontrainte type béton.

Une autre possibilité consiste à *armer* (sans créer délibérément de précontrainte) une pièce de bois lamellée-collée en noyant des éléments métalliques (profilés, tubes, feuillards) dans les plans de collages les plus proches des fibres extrêmes.

Des résultats intéressants ont été obtenus au niveau du laboratoire.

STRUCTURES MIXTES

L'utilisation de matériaux complémentaires dans la réalisation de structures correspond à un légitime souci d'optimisation. Cependant, si l'on connaît un certain nombre de réalisations assez anciennes utilisant des associations de bois et d'acier ou d'alliages légers, l'utilisation systématique de cette ressource est encore assez réduite, bien qu'en développement sensible. Sans considérer toutes les configurations possibles, on peut dire que les pièces tendues d'une structure en bois peuvent souvent être avantageusement remplacées par une pièce de métal, au moins quand un haut niveau de stabilité au feu n'est pas particulièrement recherché.

Cela permet en effet, par la meilleure utilisation de chaque matériau, d'atteindre des rapports résistance/poids ou résistance/prix extrêmement élevés. L'industrie aéronautique a montré l'exemple en utilisant largement, jadis, les combinaisons bois/métal et en continuant à les employer dans quelques cas précis (planchers isolants de cabines, par exemple) ou pour la réalisation de certaines de ses infrastructures aéroportuaires.

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

I.T.Q.A.-CAHORS. — 70293. — Dépôt légal : III-1977
Commission paritaire n° 57.497

SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT POUR L'INDUSTRIE NATIONALE

Fondée en 1801

Reconnue d'Utilité Publique en 1824

4, place St-Germain-des-Prés, 75006 PARIS

Tél. : 548-55-61 - C.C.P. 618-48 Paris



HISTORIQUE

La « SOCIETE D'ENCOURAGEMENT POUR L'INDUSTRIE NATIONALE » fondée en l'AN X de LA REPUBLIQUE (1801) par NAPOLEON-BONAPARTE, Premier Consul et CHAPTAL, Ministre de l'Intérieur et premier Président de la Société, assistés de Berthollet - Brongniart - Delessert - Fourcroy - Grégoire - Laplace - Monge - Montgolfier - Parmentier... et de nombreux autres savants, ingénieurs, et hommes d'Etat,

RECONNUE D'UTILITE PUBLIQUE EN 1824,

a poursuivi son action pendant tout le XIX^e siècle, sous la présidence de Thénard - J.-B. Dumas - Becquerel et de leurs successeurs. On la voit encourager tour à tour Jacquard - Pasteur - Charles Tellier - Beau de Rochas.

Ferdinand de Lesseps - Sainte-Claire-Deville - Gramme - d'Arsonval furent titulaires de sa Grande Médaille.

BUT

LA SOCIETE S'EST PREOCCUPEE PARTICULIEREMENT, CES DERNIERES ANNEES, DE DONNER AUX MILIEUX INDUSTRIELS DES INFORMATIONS EXACTES LEUR PERMETTANT DE SUIVRE LES DERNIERS DEVELOPPEMENTS DE L'ACTIVITE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE.

ACTIVITÉS

ELLE DECERNE DES PRIX ET MEDAILLES aux auteurs des inventions les plus remarquables et des progrès les plus utiles ainsi qu'aux ouvriers et contremaîtres qui se sont distingués par leur conduite et leur travail. Elle organise des CONFERENCES d'actualité scientifique technique et économique.

Elle publie une REVUE TRIMESTRIELLE : « L'INDUSTRIE NATIONALE ».

RECRUTEMENT

La Société recrute, en fait, ses Membres (Sociétés ou Individus) parmi ses anciens Conférenciers ou Lauréats. Ils ne sont soumis à aucune obligation particulière en dehors du payement d'une cotisation annuelle de QUARANTE FRANCS pour les Personnes ou de CENT CINQUANTE FRANCS pour les Sociétés.

