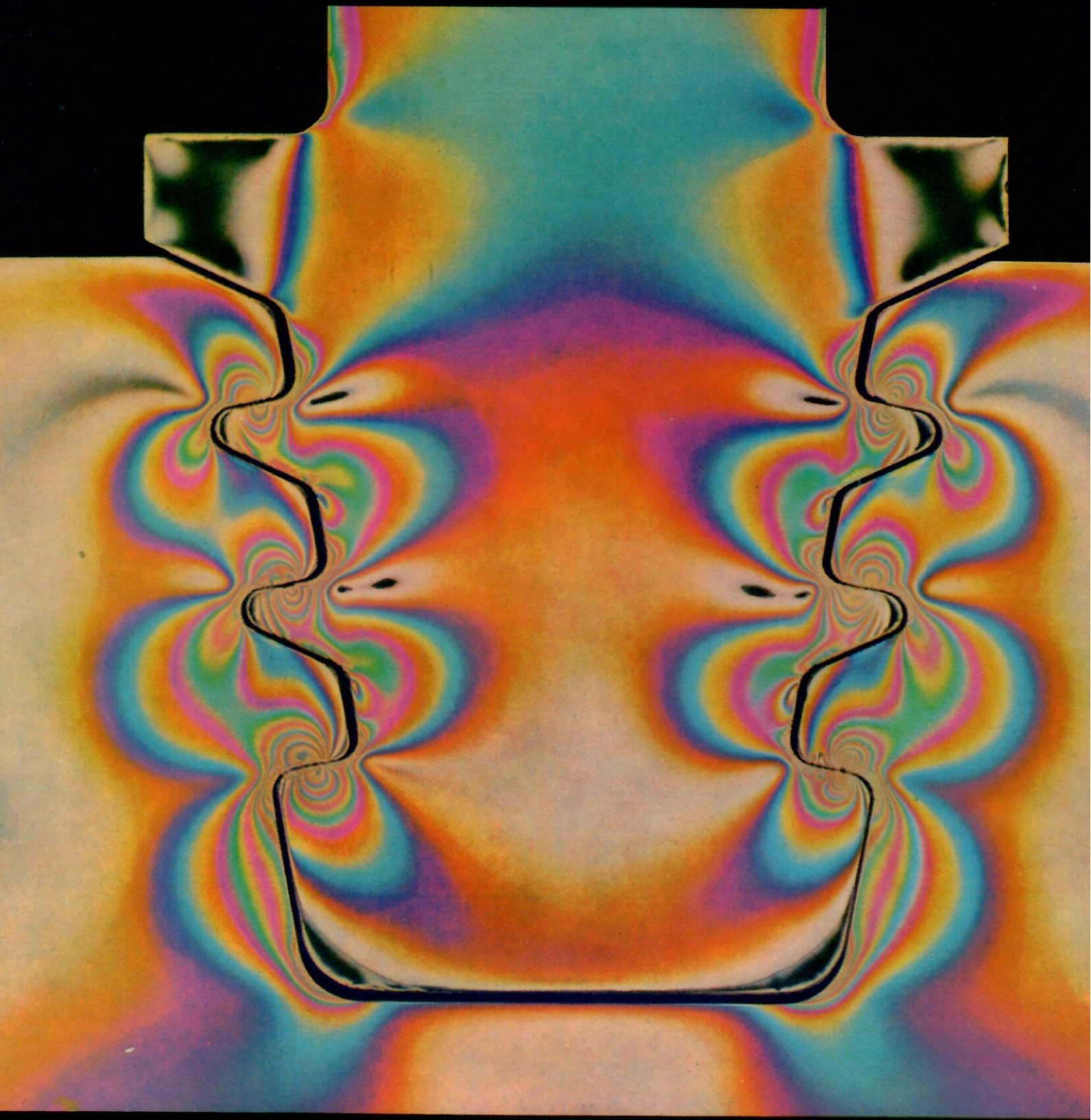


BULLETIN TECHNIQUE DES CHANTIERS DE L'ATLANTIQUE

N° 4
Mars-Avril
1963

La couverture de ce numéro est un cliché type de « photoélasticimétrie » - procédé d'analyse des contraintes locales de la matière dont nous parlons en pages 8 et 9.

L'utilisation du microscope électronique donne des images directes de la matière jusqu'à des grossissements d'environ 150 000.
La photographie de cette page montre la zone intercristalline d'un alliage nickel-chrome après rupture fragile.

LE NOUVEAU LABORATOIRE DE SAINT-NAZAIRE

CE numéro est exclusivement consacré au laboratoire de Saint-Nazaire. Au moment où les nouveaux bâtiments qui abriteront le laboratoire à la fin de cette année commencent à prendre forme, il nous a paru nécessaire de faire mieux connaître son activité et ses moyens — et d'expliquer les raisons de son développement.

*
**

Il y a 20 ans, on utilisait pour la construction des navires un bon acier Martin ordinaire.

Le développement des structures soudées, d'une part, l'augmentation de la taille des navires et la recherche des économies de poids, d'autre part, ont conduit à des spécifications plus complexes et à des exigences de réception plus sévères. On a vu apparaître, au cours des dix dernières années, dans la construction des navires de commerce, les aciers à teneur en manganèse contrôlée, les aciers à haute et très haute résilience à froid (pour éviter les ruptures catastrophiques enregistrées à la fin de la guerre sur les Liberty Ships), les aciers à haute résistance...

Mais c'est dans le secteur de la mécanique et de la chaudronnerie — secteur en cours de développement rapide dans notre Société, au titre de la reconversion — que l'évolution a été la plus importante.

Aux aciers simples d'avant-guerre ont succédé des aciers alliés : au manganèse molybdène, au chrome molybdène, au bore, etc., des aciers à très haute limite élastique, des aciers austénitiques, etc. On utilise également des aciers plaqués, au nickel, à l'inconel, au zirconium... Les alliages d'aluminium (AG_3 - AG_4) sont devenus d'emploi courant. L'aluminium à 99,5 % de pureté (A_5), l'inconel ont fait leur apparition.

(Suite page 2)

(Suite de la page 1)

Ces aciers, ces métaux, de caractéristiques physico-chimiques beaucoup plus évoluées, doivent de surcroît, être mis en œuvre — et notamment soudés — de manière beaucoup plus précise qu'auparavant.

Les ouvrages métalliques travaillent en effet aujourd'hui beaucoup plus près de leurs limites. Les coefficients de sécurité, qui sont pour une bonne part des coefficients d'ignorance couvrant les erreurs ou imprécisions des calculs et les imperfections ou les dispersions de réalisation, ont dû être réduits — ce qui impose une connaissance beaucoup plus approfondie des caractéristiques réelles des métaux mis en œuvre et une aggravation des contrôles.

Les exigences du contrôle sont elles-mêmes devenues beaucoup plus sévères à mesure que les moyens d'analyse non destructifs de la matière sont devenus plus puissants. Il y a dix ans, on disposait, pour l'analyse gammagraphique des soudures de sources de quelques curies. Aujourd'hui on a le choix entre les bétatrons, les accélérateurs Van de Graaf et les sources de 500 à 1 000 curies, qui découvrent, bien entendu, infiniment plus de défauts que la modeste source de quelques curies d'autrefois. Viennent s'y ajouter d'ailleurs de nombreux autres moyens de contrôle : les ultra-sons, maintenant bien au point, le ressuage, la magnétoscopie, etc...

Enfin, les fabrications pour l'énergie nucléaire nécessitent un soin, une « propreté », qui se traduisent par l'interdiction de presque toute micro-soufflure.

*
**

En vingt ans la mise en œuvre des métaux est passé du stade de la « cuisine » au stade du « laboratoire » : aux recettes héritées du passé a succédé l'expérimentation de caractère systématique et scientifique.

Telles sont les raisons qui nous ont conduits depuis 1955, à développer le Laboratoire de Saint-Nazaire et, cette année, à lui donner les moyens nécessaires à l'accomplissement des tâches chaque jour plus importantes, plus diverses et plus complexes qui lui sont confiées.

Dans les pages qui suivent nous donnons :

— d'une part, une analyse assez complète des moyens dont dispose le laboratoire et les principales techniques d'études, de recherche et de contrôle qu'il met en œuvre,

— d'autre part, un certain nombre d'exemples récents précisant le rôle qu'il joue aussi bien dans la mise au point de techniques ou de procédés nouveaux que dans l'application de ces techniques et procédés aux fabrications industrielles.

Le Laboratoire comprend essentiellement :

— **le Service de Contrôle, qui assure le contrôle de la qualité de toutes les fabrications de Saint-Nazaire ;**

— **le Laboratoire et l'Atelier expérimental, où sont effectuées, d'une part, les études et recherches de technologies et de procédés nouveaux, d'autre part, la mise au point des fabrications industrielles mettant en jeu ces technologies ou procédés nouveaux.**

Nous passons en revue ci-après, nécessairement très brièvement, les principales méthodes mises en œuvre par le Laboratoire et les principaux moyens dont il dispose à cet effet.

Il s'agit d'un simple inventaire rapide et qui, bien entendu, ne saurait constituer une analyse proprement technique des questions évoquées ci-après.

ESSAIS MECANIQUES

La mesure des caractéristiques mécaniques (indispensables à la réception des matériaux aussi bien qu'au contrôle des fabrications courantes et à la recherche dans le domaine des technologies nouvelles) est une des tâches fondamentales du laboratoire.

Ce dernier possède déjà l'essentiel des machines nécessaires :

— Machines de traction de 50 t. et de 20 t.

— Moutons pour mesure des résiliences,

— Machines de mesure de duretés,

— Pulsateurs de fatigue,

— Machine Pellini pour mesure de la fragilité globale,

— Machines de pliage.

Ces moyens vont être augmentés d'une machine d'essais de traction et de pliage de 6 t. très précise, à commande électronique, permettant de mesurer les caractéristiques des matériaux dans une gamme étendue de température, et dotée d'un dispositif de programmation assurant le déroulement automatique de l'expérience suivant les conditions choisies à l'avance.

PYROMETRIE ET TRAITEMENTS THERMIQUES

La connaissance exacte de la répartition des températures dans l'espace et dans le temps, au cours d'un traitement thermique ou d'un soudage est l'élément fondamental de prévision des structures, et, par conséquent, des propriétés mécaniques.

La mesure de ces températures, ou pyrométrie, est faite à l'aide de thermocouples et d'enregistreurs, dont l'entretien et l'exploitation sont à la charge du laboratoire. Les moyens actuels, déjà importants, vont être augmentés d'une installation d'étalonnage et de réparation des thermocouples.

Le laboratoire doit être également à même de reproduire sur échantillons les traitements thermiques qui interviendront au cours des fabrications en vraie grandeur ; il possède déjà à cet effet un ensemble important de fours, d'appareils de chauffage au propane ou électriques (par résistance et par induction) et de trempe superficielle au chalumeau. Cet équipement va être complété par l'acquisition :

— d'un four électrique de plus grandes dimensions qui évitera l'emploi des grands fours industriels pour des éprouvettes de taille moyenne,

— d'équipements de trempe par immersion et par pulvérisation,

— d'une installation de trempe Jomini.

MACROGRAPHIE ET MICROGRAPHIE

CES deux techniques ont un but commun, matérialiser la structure d'un métal. Elles font appel aux mêmes préparations (polissage de la surface et, éventuellement, attaque par des réactifs sélectifs accentuant la différence d'aspect des constituants). Seule l'échelle diffère :

— la macrographie, utilisant des grossissements faibles, conserve aux images un aspect analogue à celui de la vision humaine directe,

— la micrographie, travaillant à des grossissements élevés (jusqu'à 2 500) met en évidence des hétérogénéités que l'œil ne peut soupçonner.

Les deux opérations sont d'ailleurs souvent complémentaires, des micrographies permettant d'étudier à grande échelle les structures en différents points des zones révélées intéressantes par la macrographie.

Le grossissement sera adapté à la taille des hétérogénéités à étudier : par exemple, la structure hétérogène des aciers surchauffés (dite de Widmanstatten) est manifeste à des grossissements de l'ordre de 150 et n'apparaîtrait plus dans le champ couvert par le microscope pour des grossissements de l'ordre de 500 (on verrait alors des images différentes suivant le point visé, mais d'aspect sensiblement homogène pour chacune des positions du microscope).

Cette étude des structures est depuis longtemps de pratique courante à Saint-Nazaire. L'augmentation de moyens prévue pour le nouveau laboratoire se limite à :

— la création d'un local de macrographie pouvant recevoir des pièces d'assez grande dimension, où les opérations seront plus aisées que dans les ateliers de fabrication,

— l'acquisition de dispositifs permettant l'observation des images à haute température, et en lumière polarisée (contraste de phase).

PHOTOGRAPHIE

Le laboratoire utilise dès maintenant largement la photographie comme moyen de description et d'illustration.

Mais photographie et cinéma peuvent être aussi des moyens d'expérimentation et de mesure permettant par exemple d'enregistrer de façon très simple les indications simultanées de cadrans d'appareils de mesure, ou l'aspect d'un oscillogramme, de suivre dans le temps l'évolution des structures, des déformations ou des déplacements, avec possibilité de régler à volonté, à la projection, la vitesse d'évolution.

C'est ainsi que le laboratoire a mesuré récemment les déformations de retrait de soudage sur des pièces de dimensions importantes avec le concours et l'équipement du laboratoire des Ponts et Chaussées, en interprétant les interférences obtenues par superposition à la photo, après déformation, d'un réseau quadrillé gravé sur la pièce, du réseau ligné témoin (18 o 20 traits au mm).

Les moyens complémentaires prévus pour le nouveau laboratoire permettront d'améliorer considérablement la qualité et la précision des images en vue de ces emplois spéciaux de la photographie.

ESSAIS A CHAUD DE LONGUE DUREE

L'augmentation considérable au cours de ces dernières années des températures d'utilisation des métaux (notamment dans le domaine des turbines et des chaudières) conduit à des zones où le phénomène du « fluage » des aciers n'est plus négligeable.

Il est donc nécessaire de pouvoir :

— contrôler les caractéristiques à chaud des matériaux à la réception,

— vérifier la conservation de ces caractéristiques après mise en œuvre : déformation plastique, traitements thermiques, soudage, etc...

L'équipement prévu pour le laboratoire, dans un premier stade, comporte 6 machines de fluage (pour les essais statiques) et 3 machines d'essais de fatigue par flexion rotative (pour les essais dynamiques).

Pour limiter les variations de la température ambiante, la salle d'essais à chaud est installée au sous-sol : sa taille a été prévue pour permettre de tripler, au besoin, ultérieurement, l'équipement du premier stade, si le nombre des problèmes posés le justifie.

Jusqu'à un grossissement G = 150 000, on peut obtenir ces photographies directes de la matière (éclairée en lumière ordinaire jusqu'à G = 2 500 environ et au-delà, par des faisceaux d'électrons).

Certains procédés permettent d'aller plus loin et d'obtenir des grossissements très supérieurs. Il ne s'agit plus, toutefois, de véritables photographies, mais d'images de l'impact sur un écran fluorescent d'électrons émis par la matière elle-même.

Tel est le résultat obtenu dans le « microscope à champ émissif » dont le principe est le suivant : si l'on applique à une aiguille à pointe sphérique très fine (rayon de 1/10e de micron) — sous vide — une différence de potentiel de l'ordre de 15 000 volts, le champ électrostatique produit peut arracher des électrons des atomes superficiels de la pointe. Ces électrons vont frapper un écran fluorescent où leur impact est photographié.

On peut, notamment, partir d'une aiguille sur laquelle on a provoqué le dépôt superficiel d'atomes étrangers. La « photographie » obtenue est alors celle de la trace sur l'écran fluorescent des électrons émis par ces atomes.

La photographie ci-dessus a été obtenue avec une aiguille sur la pointe (ronde) de laquelle on a effectué un dépôt fin d'un métal lourd, le rhénium.

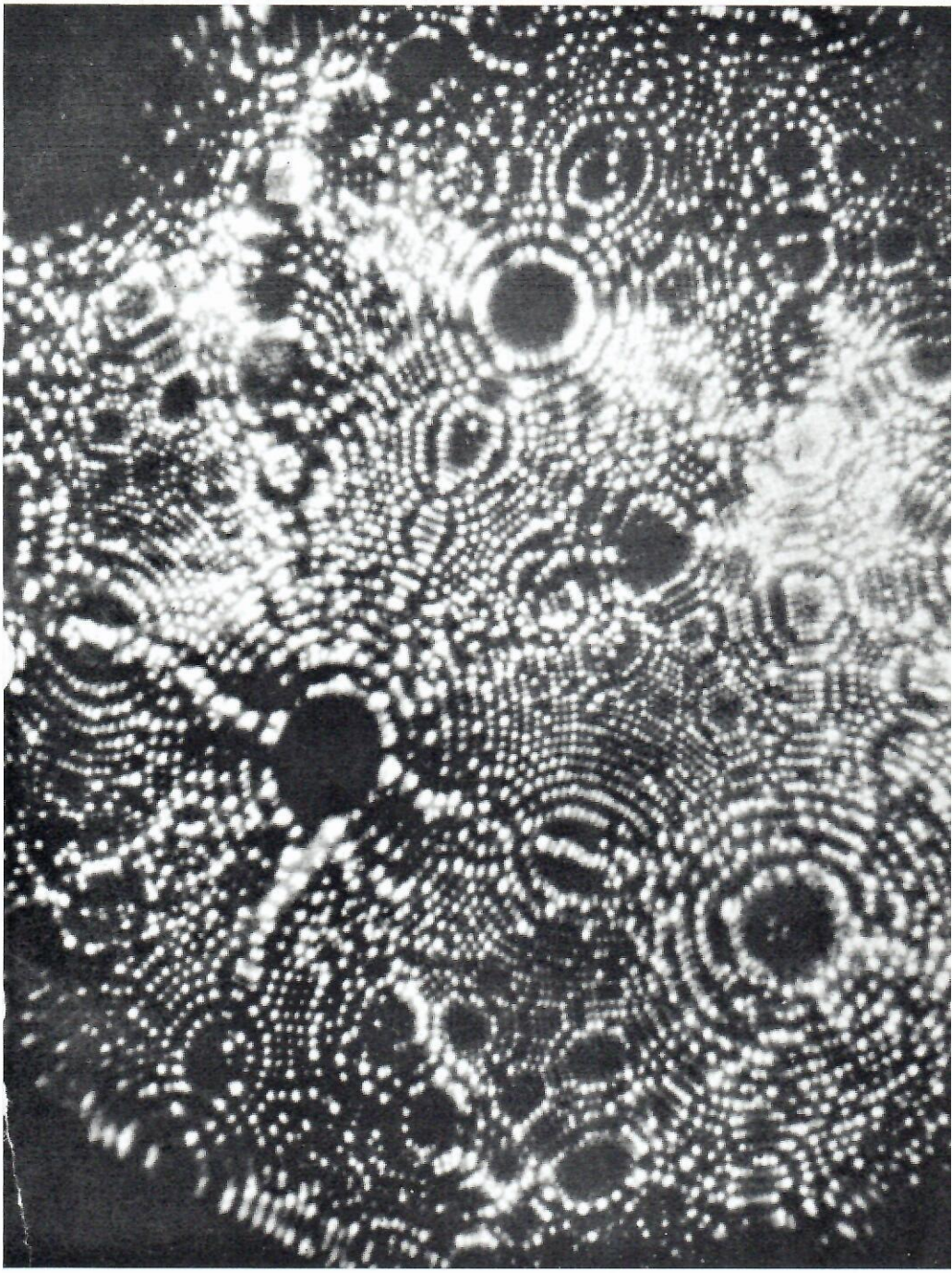
Les points blancs sont les traces, sur l'écran fluorescent, des électrons émis par chacun des atomes superficiels de rhénium déposé sur la pointe.

Le système utilisé conservant les dispositions géométriques, on a donc, sinon une vue des atomes de rhénium eux-mêmes, du moins une « photographie » de leur disposition sur la pointe.

Bien entendu, il n'y a pas de rapport direct entre la dimension des points blancs et celle des atomes correspondants — par contre, les centres de ces points blancs matérialisent effectivement la position des atomes de rhénium.

On voit nettement, sur la photographie, le contour circulaire de la pointe dont le diamètre est d'environ 20 cm. Le grossissement total est donc — si la pointe a bien un rayon de 1/10e de micron — d'un million.

Les atomes de rhénium (manifestés par la trace de leurs électrons émetteurs) sont disposés en arrangements circulaires traduisant un début de cristallisation dans le système hexagonal.



Est-ce bien une photographie d'atomes ?

La maquette ci-contre est une vue d'architecte du nouveau Laboratoire actuellement en construction dans le nord du chantier, en face de la cale Jean-Bart.

La photo ci-dessous donne l'état d'avancement des travaux au début de mars.

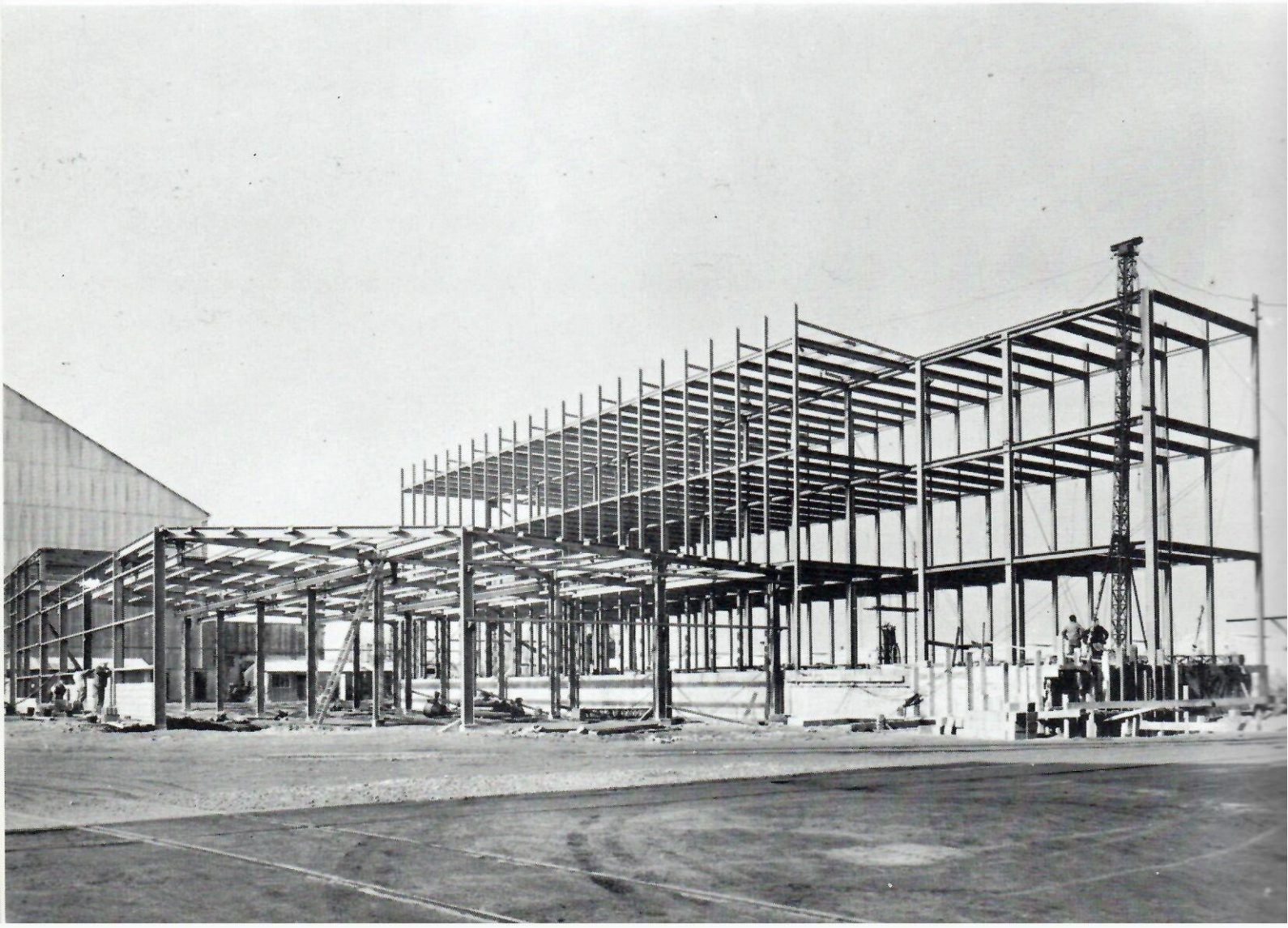
L'achèvement de l'installation intérieure est prévu pour la fin de l'année.

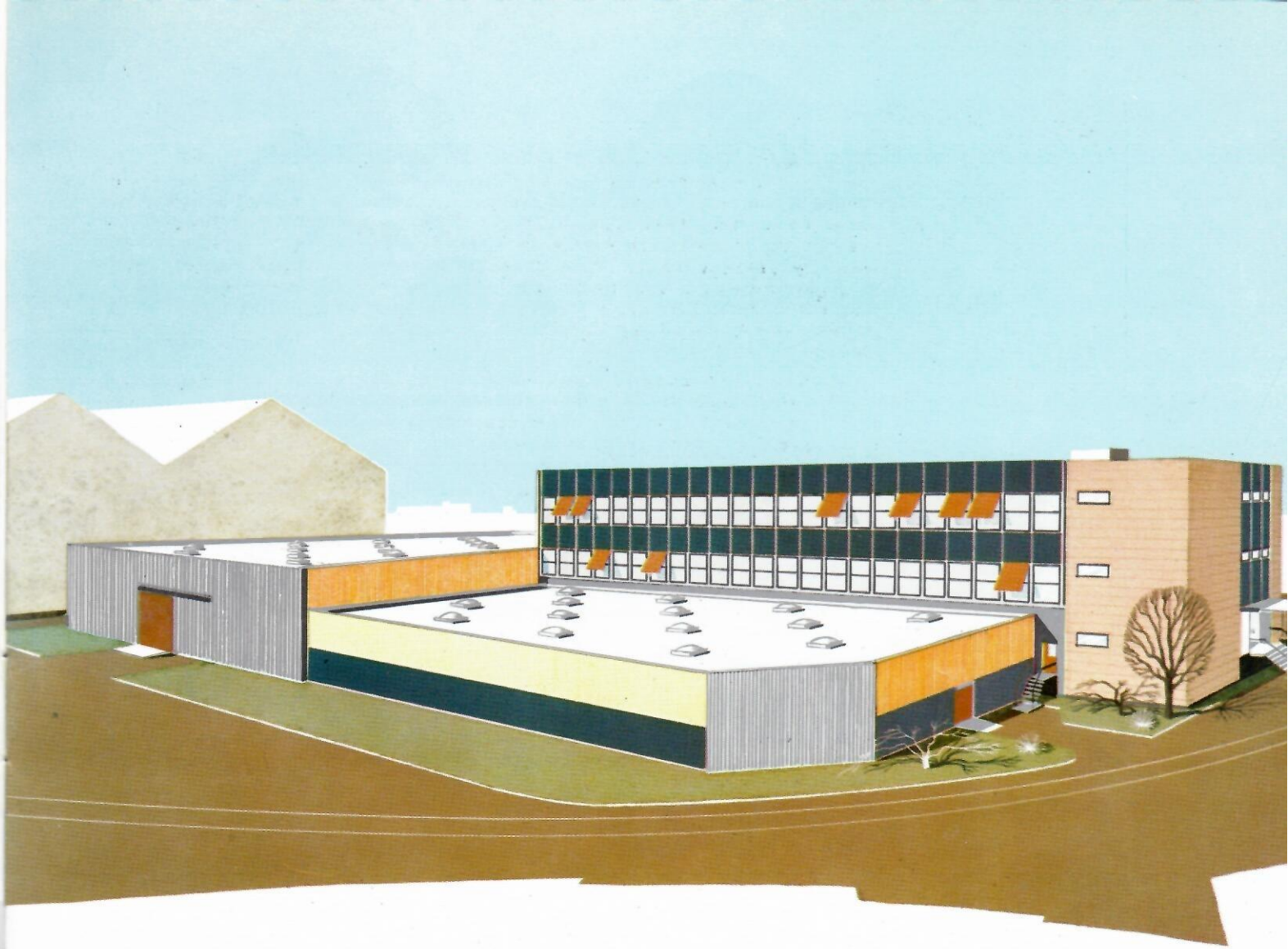
L'ensemble comprend en réalité deux éléments distincts :

— d'une part, le Laboratoire proprement dit, regroupant l'ensemble du personnel du service, sur une surface d'environ 2 000 m² ;

— d'autre part, un atelier expérimental d'environ 1 500 m².

Ces nouveaux bâtiments permettront le regroupement et l'extension de l'ensemble des moyens d'études de recherche et de contrôle du Chantier.





L'effectif actuel du Laboratoire est de 145 personnes dont 10 ingénieurs.

On aura une idée de son activité en donnant les quelques chiffres suivants relatifs à l'année 1962. Au cours de cet exercice, le laboratoire a :

— mené à bien 170 programmes d'essais,
— rédigé 50 instructions techniques définissant des modes opératoires,
— pris et analysé 37 000 films de contrôle radio, auxquels on peut ajouter 450 rapports de contrôles ultra-sons et 150 rapports de contrôles par magnétoscopie,
— rédigé 200 rapports d'incidents de fabrication,
— fait passer 950 épreuves de qualification de soudeurs et assuré 350 stages de formation ou de perfectionnement.
— recetté 18 500 000 électrodes, 160 tonnes de flux et 140 tonnes de fils, etc.

— Les programmes expérimentaux, qui constituent l'un des aspects essentiels de l'activité du Laboratoire, sont établis en fonction des besoins exprimés par les différents services des Chantiers de l'Atlantique et sont arrêtés par un Comité Technique auquel participe le Chef du Département Technique du Siège Social.

DILATOMETRIE

Au cours du refroidissement depuis une température élevée (> 900 °C par exemple) l'acier se contracte ; mais cette contraction est loin d'être régulière. Chaque changement de pente de la courbe enregistrant la longueur d'un barreau d'acier en fonction de la température est l'indice d'une transformation structurale. La dilatométrie permet ainsi d'obtenir très facilement et rapidement des renseignements sur les structures produites au cours du refroidissement (structures qui sont en relation directe avec les propriétés pratiques du matériau). On peut donc suivre l'évolution structurale d'un acier en fonction de la loi de refroidissement, ce qui est d'un intérêt pratique évident (soudage, traitements thermiques, etc.).

Le laboratoire possède déjà 2 dilatomètres couvrant une gamme de vitesse étendue (entre une trentaine de degrés/seconde, pour reproduire les conditions de refroidissement les plus brutales rencontrées dans la soudure, et une trentaine de degrés/heure, ordre de grandeur des vitesses de refroidissement lent des pièces massives au voisinage des points de transformation).

Cet équipement sera complété par des enregistreurs adaptés à ces vitesses.

EXTENSOMETRIE

Il est très rare qu'on puisse à priori déterminer rigoureusement par le calcul la répartition des contraintes : dès que la forme est un peu compliquée, on doit se contenter, pour le dimensionnement, de schémas accessibles au calcul, mais souvent assez éloignés de la réalité ; il est en général impossible, notamment, de prévoir correctement les concentrations d'effort au voisinage des discontinuités de forme constituées par les renforts, les tubulures, les accessoires, etc...

Aussi, depuis longtemps, a-t-on recours à la vérification expérimentale à posteriori par extensométrie.

De très nombreuses méthodes existent, dont les principales sont :

1. Les méthodes d'analogie

Si la théorie de l'élasticité permet, pour un problème particulier, d'aboutir à une équation aux dérivées partielles des déformations identiques à celle d'un autre phénomène physique (propagation de l'électricité dans une cuve à liquide conducteur, par exemple), les mesures relatives au phénomène électrique renseigneront complètement sur les déformations dans le problème élastique, sous réserve que l'image des conditions aux limites imposées par ce dernier ait été réalisée dans le système électrique.

2. La photo-élasticité

La photo-élasticité met à profit la biréfrigence créée par la mise en tension ou en compression dans certaines matières transparentes isotropes à l'état neutre : l'observation en lumière polarisée soit par transparence (maquette entièrement en plexiglas par exemple), soit par réflexion (pellicule transparente déposée sur une pièce métallique) met en évidence des franges colorées qui matérialisent les zones d'égal cisaillement maximum donc d'égale contrainte globale de la matière.

3. Les vernis craquelants

Si l'on dépose à la surface des pièces à étudier des vernis craquelants, de sensibilité variable, les craquelures matérialisent les directions principales des efforts.

4. Jauges de contrainte

On peut mesurer directement les déformations, soit par amplification mécanique, soit plus fréquemment aujourd'hui par jauges de contraintes à fil résistant collées sur la pièce, dont on mesure la variation de résistance, proportionnelle à la variation de la contrainte (ou, très récemment, par des jauges à piezo résistance).

Ces essais peuvent être soit statiques (mesures directes au milliampèremètre) soit dynamiques (envoi de courant dans un oscillographe).

5. Réseaux

On reporte sur la surface de la pièce à étudier un réseau quadrillé et l'on étudie les interférences d'une photo de ce réseau, après déformation, avec un réseau linéaire témoin (méthode Dantu).

LA photoélasticimétrie est utilisée maintenant couramment pour analyser les contraintes dans les éléments les plus divers.

La couverture de ce numéro montre une application de ce procédé à une vis serrée dans un trou borgne.

La photographie ci-contre (1) montre l'application du même procédé... aux contraintes développées dans le crâne humain par une compression des tempes !

Si l'on introduit sur un faisceau de lumière blanche, entre un polariseur et un analyseur, une lame à faces parallèles de plexiglass ou d'araldite, en l'absence de contrainte sur cette lame, celle-ci apparaît avec une teinte uniforme (blanche si les plans de polarisation du polariseur et de l'analyseur sont parallèles : situation P ; noire si ces plans sont rectangulaires : situation R).

Si maintenant on applique des efforts à la lame transparente, des contraintes prennent naissance en ses différents points entraînant une biréfrigence liée de façon simple au système de contraintes. Des plages colorées apparaissent sur la lame : les courbes d'égale coloration ou isochromes matérialisent les zones d'égal cisaillement maximum (c'est-à-dire, d'après le critère de Coulomb, les zones d'égale contrainte globale de la matière).

Les isochromes varient d'intensité, mais non de position ni de couleurs, quand on fait tourner l'ensemble polariseur analyseur par rapport à la lame sans modifier les positions relatives de l'analyseur et du polariseur.

Des tables donnent la variation du cisaillement maximum en fonction de la succession des couleurs ; on peut ainsi connaître une valeur approchée de ce cisaillement (ou de la contrainte globale) qunad on connaît a priori une zone de cisaillement nul.

---

(1) Extraite de la Revue américaine « Science and Technology ».

Les lieux des points où la contrainte principale est dirigée suivant le plan de polarisation de l'analyseur (ou isoclines) sont matérialisées dans la situation R par des lignes noires qui, elles, se déplacent quand on fait tourner l'ensemble polariseur-analyseur.

Cette méthode d'analyse des tensions (photoélasticimétrie) peut être appliquée :

- soit par transparence, avec deux variantes :

- maquette sous charge pendant les mesures ;

- maquette mise sous charge à chaud, puis trempée jusqu'à la température ambiante, avec certains plastiques dont le refroidissement fige la déformation ; on peut alors scier à froid une lame plane, qui conserve la répartition de déformations obtenues à chaud, et étudier ainsi une région quelconque intérieure à une pièce à trois dimensions ;

- soit par réflexion, en déposant une pellicule de matière transparente sur la pièce même à étudier (on n'obtient ainsi, bien entendu, que la répartition des contraintes de surface).

La photo de la couverture est une application de la première méthode.

La photo ci-contre est une application de la deuxième méthode.

Nous avons écarté l'application à Saint-Nazaire du procédé **1** qui nécessite des installations assez importantes, et des spécialistes pour la programmation et l'interprétation. Les problèmes pour l'étude desquels cette méthode est utile sont confiés aux laboratoires extérieurs qui possèdent ces installations et ces spécialistes (laboratoire de résistance des matériaux de la Marine, par exemple).

Nous avons retenu, par contre :

● le procédé **2** employé principalement dans la variante pellicule transparente déposée sur une pièce métallique, pour déterminer les zones de concentration d'efforts et l'ordre de grandeur du cisaillement maximum en chaque point, caractéristique de la sollicitation globale de la matière d'après le critère de Coulomb,

● le procédé **3**, malgré son imprécision quantitative, comme procédé rapide de dégrossissage,

● le procédé **4**, comme procédé fondamental, en raison de sa précision et de sa simplicité d'emploi, malgré ses deux inconvénients :

— finesse de l'analyse limitée à la dimension des jauges (valeur minimum courante, actuellement 8 mm), ce qui exclut l'étude des régions à tensions très rapidement variables,
— limitation de la température d'emploi à celle de tenue des jauges et colles : jauges courantes 100° ; jauges sur bakélite 200° ; jauges spéciales jusqu'à 900° et plus, mais ces dernières sont d'un prix très élevé.

● le procédé **5** (bien qu'il soit encore à ses débuts), parce qu'il permet, en reportant par gravure le réseau quadrillé sur le métal, de s'affranchir de toute sujétion de température et d'étudier les déformations sans rien préjuger des zones où elles seront intéressantes. Il est donc particulièrement adapté à l'étude, fondamentale pour nous, de la répartition des déformations et tensions dans toute la zone non fondue d'une soudure.

SPECTROGRAPHIE

Un spectrographe à rayons X est en cours d'acquisition, qui permettra à la fois des travaux d'analyse et des travaux de cristallographie.

1. Travaux d'analyse

Par l'observation du spectre de fluorescence caractéristique de chaque élément, on peut doser qualitativement et quantitativement les éléments dont le numéro atomique est supérieur à 12 (parmi ces 12 éléments exclus figurent essentiellement le carbone), avec une précision variable suivant le numéro atomique, mais suffisante pour les problèmes courants posés au laboratoire - sauf pour le soufre et le phosphore. Ces dosages remplacent les dosages correspondants par voie chimique avec l'avantage d'une beaucoup plus grande rapidité.

Cette méthode permet de plus — ce que ne permet pas l'analyse chimique classique — d'opérer des analyses ponctuelles sur des surfaces inférieures au mm2, par une succession de telles analyses ponctuelles, on peut connaître, millimètre par millimètre, les hétérogénéités de constitution du métal — par exemple, identifier la nature chimique d'une petite inclusion, ou suivre dans une soudure la dilution progressive de tel ou tel métal d'addition.

2. Cristallographie

Les méthodes de diffraction X utilisant des longueurs d'onde de quelques angströms — donc de l'ordre des distances inter-réticulaires — permettent d'étudier la structure normale ou déformée des cristaux :

— en rayonnement monochromatique, l'enregistrement photographique ou radiométrique du spectre (méthode de Debye Scherrer) renseigne sur la structure des cristaux étudiés et sur le pas du réseau cristallin. Sa comparaison avec les paramètres des tables, définira, en particulier, en valeur absolue, le degré de déformation.

— en rayonnement polychromatique, on pourra appliquer la méthode de Laüe qui renseigne plus spécialement sur l'orientation relative des cristaux.

On peut ainsi aborder un grand nombre de problèmes tels que :

— mesure des contraintes locales à une échelle extrêmement fine,
— dosage cristallographique (austénité résiduelle ou ferrite),
— détermination des textures après forgeage ou laminage,
— mesure des épaisseurs très faibles (placages, gainages des combustibles nucléaires, etc...).

CHIMIE ET CORROSION

L'équipement prévu pour la salle de chimie est limité au matériel nécessaire au dosage des quelques éléments (carbone, soufre et phosphore notamment) que le spectographe X ne permet pas de doser.

En matière de corrosion, on prévoit seulement pour l'instant l'étude de la corrosion sous tension (dont l'importance est capitale, notamment pour les applications des aciers inoxydables).

Les développements ultérieurs éventuels à d'autres types de corrosion seront fonction des problèmes pratiques que poseraient les fabrications nouvelles.

CONTROLES DE COMPACITE

1. Contrôles radio

Indépendamment d'un gammatron de 1 000 curies qui sera affecté au bloc de contrôle radio pour les fortes épaisseurs (voir article ci-après), le service Contrôle dispose dès maintenant :

— de 11 gammatrons à source d'iridium de puissances échelonnées entre 7 et 35 curies, et d'un gammatron au cobalt de 20 curies,

— de 12 appareils à rayons X de puissances variables entre 150 et 300 kW.

Les moyens de développement de séchage et la lecture des films radioscopiques prévus dans le nouveau laboratoire sont adaptés à la quantité des films à traiter (actuellement près de 2 000 par semaine). Ce nombre, qui dépend du genre de fabrication en cours, est en augmentation continuelle depuis le développement des fabrications de reconversion.

On a donc réservé la place nécessaire pour recevoir ensuite éventuellement, quand les conditions de rentabilité seront atteintes, des dispositifs supplémentaires de développement automatique et de traitement de films en bandes continues.

2. Contrôles par ultra-sons

Le laboratoire dispose de 6 appareils ultra-sons de type normal, d'un appareil miniature et d'un appareil spécial reproducteur d'images-coupes. Ce contrôle est appliqué aussi bien aux contrôles de compacité des matériaux (tôles, pièces moulées) qu'à ceux des soudures.

3. Contrôles magnétoscopiques

9 appareils de magnétoscopie, de puissances échelonnées entre 1 500 et 2 500 ampères, sont actuellement en service.

4. Contrôles par ressuage

Le matériel se réduit à de simples trousses, employées pour détecter les défauts de surface sur les métaux amagnétiques (pour les métaux magnétiques, le contrôle magnétoscopique est préféré en principe au ressuage, parce qu'il est plus précis et parce qu'il détecte non seulement les défauts débouchant en surface, mais encore les défauts internes voisins de la surface).

5 Contrôles de haute étanchéité

Les contrôles de haute étanchéité pour réservoirs sous pression, qui s'apparentent aux contrôles de compacité, sont effectués à l'aide de 2 types d'appareils, appareils à ammoniaque (3 en service) et 2 détecteurs de fuites à hélium (2 en service avec 3 groupes de protection).

Le nouveau bloc de contrôle radio

Il y a vingt ans, on radiographiait des soudures dépassant rarement 60 mm d'épaisseur. On se contentait d'images obtenues avec des sources relativement peu pénétrantes de quelques curies. On acceptait d'ailleurs des temps de pose relativement longs.

Aujourd'hui le nombre des appareils soudés à contrôler a considérablement augmenté et les épaisseurs moyennes ont été multipliées par 3 ou 4. On est devenu beaucoup plus exigeant sur la qualité des images radios. Enfin, le raccourcissement des délais de livraison conduit à réduire autant que possible la durée des contrôles radios inter-opérations.

L'augmentation des épaisseurs conduit à elle seule à l'utilisation de moyens beaucoup plus puissants qu'autrefois.

Le rayonnement issu d'une source de cobalt 60 est réduit à la moitié de sa valeur par la traversée d'une épaisseur d'acier de 22 mm. Une augmentation d'épaisseur de 88 mm réduit donc le rayonnement utilisable pour la radiographie dans le rapport de 1 à $2^4 = 16$.

Pour conserver, par exemple, le même temps d'exposition de 5 h., il faut passer d'une source de cobalt de 50 curies à une source de près de 1 000 curies lorsque l'épaisseur passe de 150 mm à 240 mm.

La tendance au raccourcissement des temps de pose et à l'amélioration de la qualité de l'image a confirmé cette évolution.

Du Cobalt 60 au Bétatron

Différentes solutions étaient possibles.

— Les sources radioactives (en fait, seulement le Cobalt 60) qui présentent l'énorme avantage d'être évidemment très simples et très peu volumineuses puisque l'émission des rayons est naturelle et n'exige aucun appareillage d'excitation.

— Les appareils électroniques générateurs de rayons , évidemment considérablement plus lourds et plus encombrants, mais qui présentent l'avantage de réaliser des sources tout à fait ponctuelles et d'avoir des caractéristiques invariables avec le temps. Parmi ces appareils, on retient plus particulièrement les 3 suivants :

Bétatron (Siemens et Brown Boveri)
Van de Graaf
Résotron (General Electric)

Le laboratoire a procédé à une très longue étude de ces appareils.

Des essais nombreux (plus de 200) ont été notamment réalisés à Saint-Nazaire avec le Bétatron Siemens de 17 Mev du Laboratoire Central des Industries Electriques (LCIE), avec la coopération de l'E.D.F.

Ces essais, qui ont constitué la première utilisation étendue de cet appareil, ont permis d'en déterminer les possibilités sur des épaisseurs d'acier de 50 à 240 mm, et de fixer la protection nécessaire.

Les études ont été poursuivies avec le concours de la Société allemande : Phœnix Rheinrohr, qui dispose de deux Bétatrons (le Bétatron de 31 Mev BBC et le Bétatron de 17 Mev Siemens) et la Société italienne Terni, qui dispose d'un Résotron.

Ces essais ont finalement montré que dans la zone d'épaisseur inférieure à 200 mm, où nous nous plaçons actuellement en France, c'était la source radioactive qui constituait la meilleur solution, en acceptant des temps de pose un peu plus longs qu'avec les appareils générateurs de rayons.

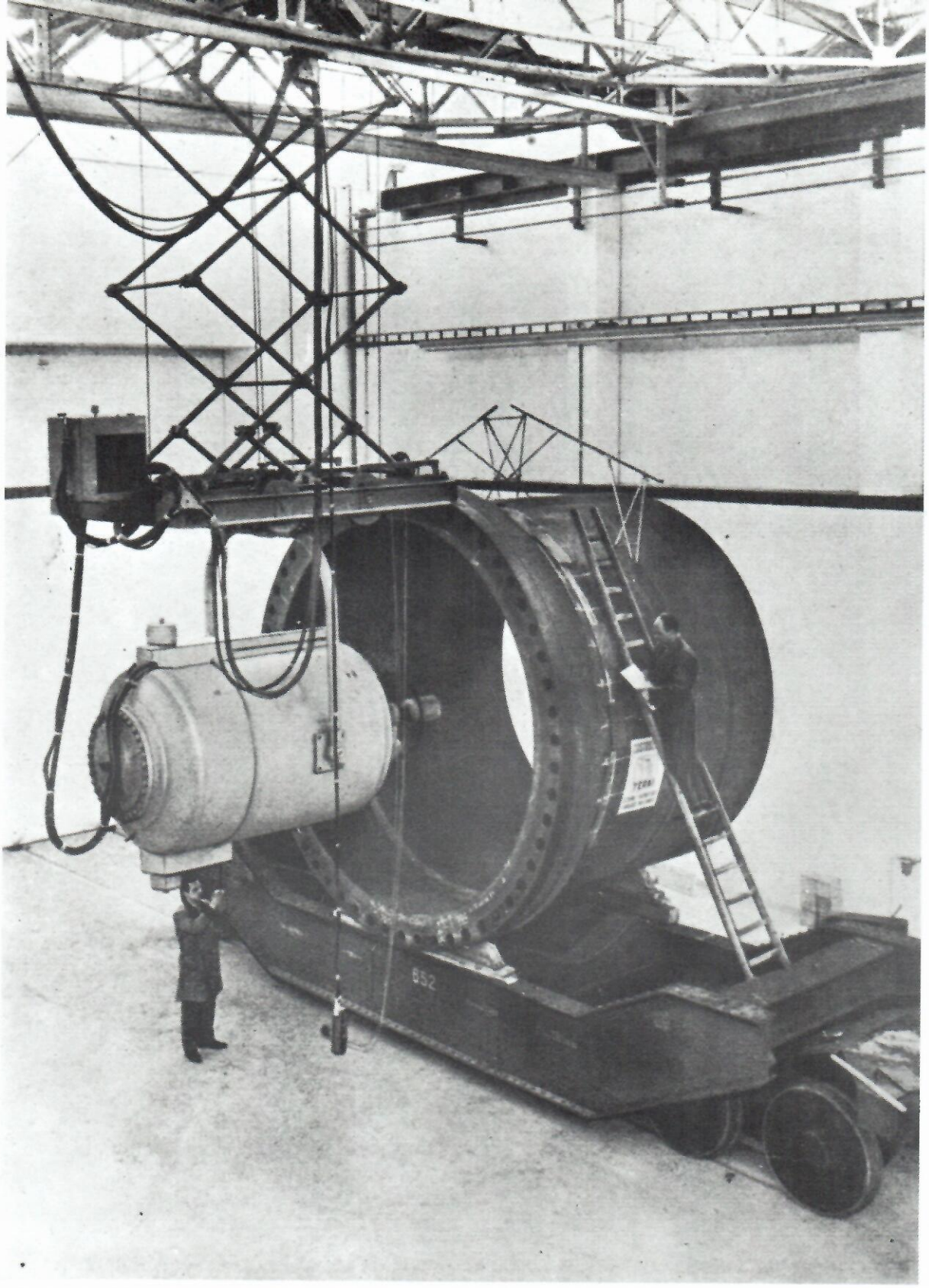
La décision a donc été prise d'équiper le nouveau bloc contrôle radio d'un gammatron au Cobalt 60 pouvant recevoir des sources jusqu'à 2 000 curies — et qui sera équipé d'une source de 1 000 curies.

Le bloc de protection

L'utilisation de rayonnements aussi puissants conduit naturellement à les manipuler à l'abri de protections fixes et totales. On ne peut plus se contenter d'effectuer ces contrôles de nuit en interdisant à toute circulation des zones qui devraient avoir 1 ou 2 km d'étendue !

Les dimensions intérieures du bloc contrôle radio ont été fixées à 34 m × 13 m pour permettre le contrôle, avec une marge suffisante, des plus gros ballons de chaudières pouvant être construits par l'atelier de chaudronnerie lourde.

Les murs de béton ont 7,50 m de haut et 1,20 m d'épaisseur ; deux portes blindées roulantes pesant chacune environ 200 t. permettent de rétablir la protection après l'introduction des lorries amenant à l'intérieur du bloc les pièces à contrôler.

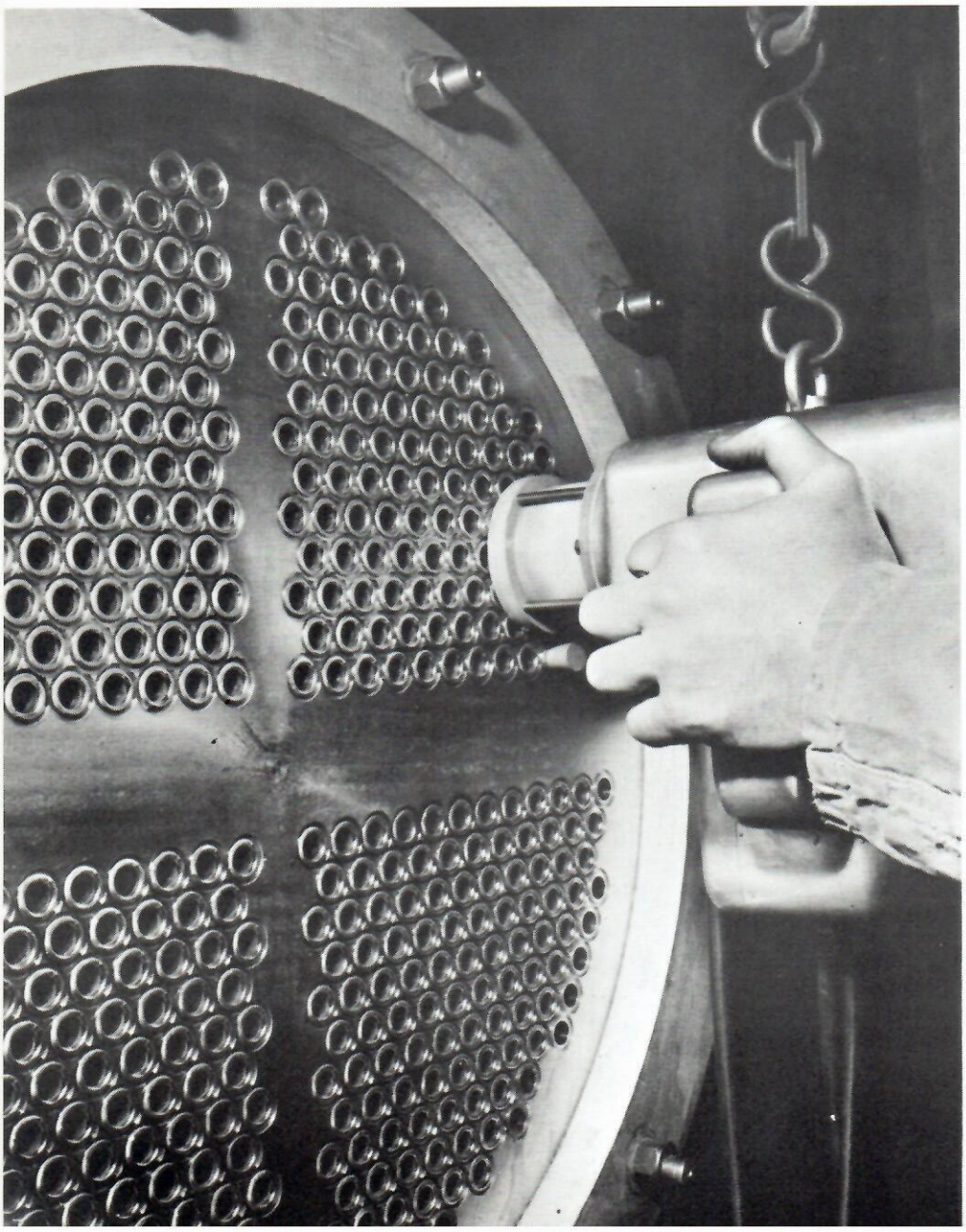


La photographie ci-dessus montre le bloc contrôle radio de la société italienne Terni, équipé d'un « résotron », appareil analogue au bétatron.
Ces appareils sont beaucoup plus encombrants que les sources radioactives, mais les problèmes de protection sont identiques.

Un métal nouveau en Europe : l'inconel

La soudure des tubes en inconel sur la plaque, elle-même rechargée à l'inconel, est effectuée à l'aide d'un pistolet spécial dont le fonctionnement est entièrement automatique, l'appui sur le commutateur déclenchant successivement et automatiquement : l'admission de l'argon dans la buse pour chasser l'air ; l'amorçage de la haute fréquence ; l'amorçage de l'arc ; le soudage circulaire ; l'évanouissement de l'arc une fois la soudure fermée et l'arrêt de la machine.

La durée de l'ensemble des opérations est inférieure à 1 minute.



Nous avons eu il y a 2 ans à utiliser, pour des échangeurs spéciaux, un métal encore très peu employé en Europe : l'inconel.

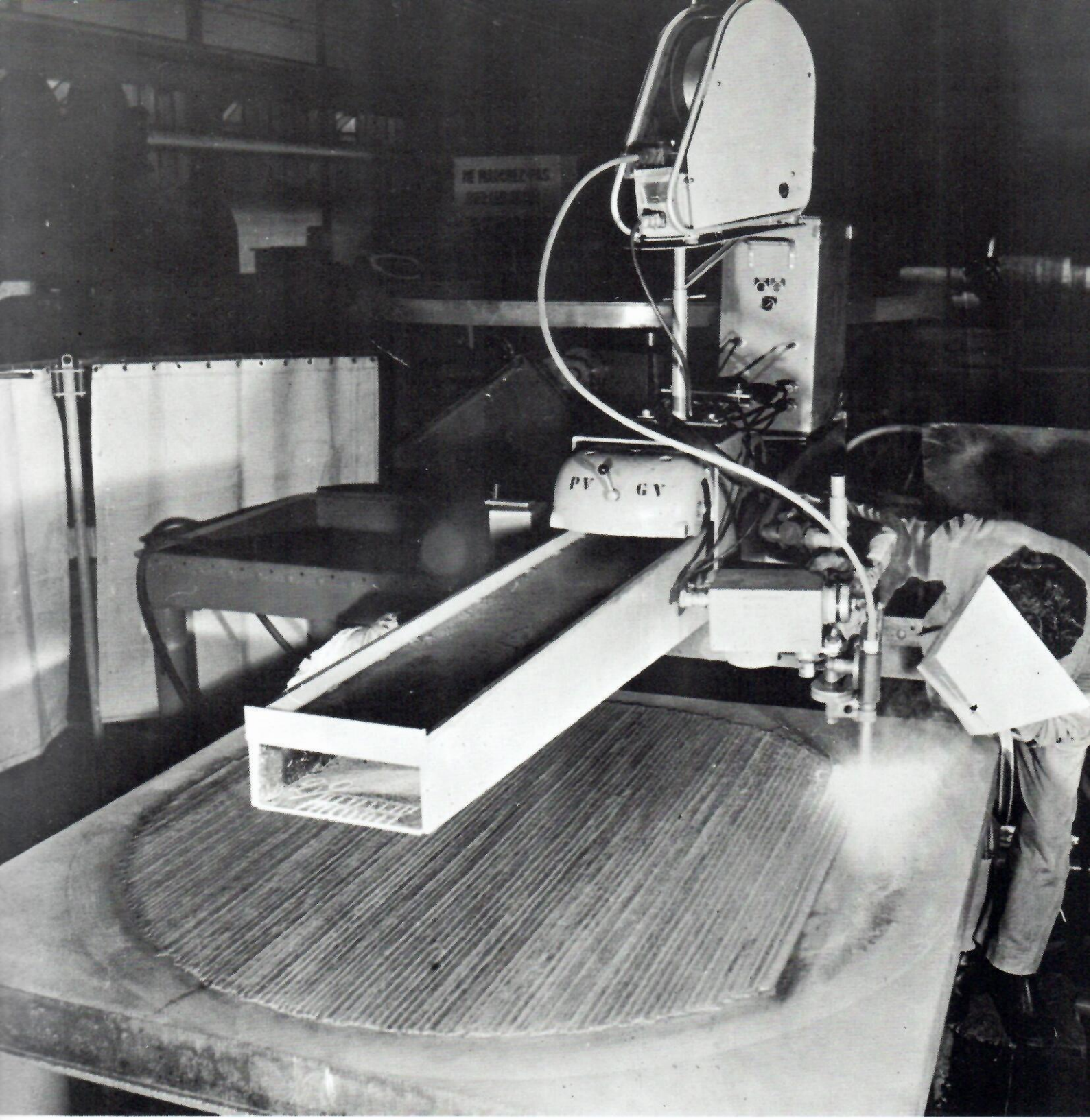
Cet alliage (contenant approximativement 76 % de nickel, 15 % de chrome et le reste de fer) possède une très haute résistance à certains types de corrosion, qui le fait parfois préférer aux inoxydables les plus nobles, malgré son prix plus élevé.

Pour nous limiter au soudage, les problèmes les plus délicats étaient :

— le dépôt par rechargement à l'arc avec électrode fusible sous gaz inerte, d'une couche continue d'inconel (de l'ordre du centimètre d'épaisseur) sur une plaque épaisse en acier A.42,

— la soudure de tubes d'inconel sur le rechargement précédent.

Nous avions pensé pouvoir obtenir directement de Foster Wheeler (U.S.A.) une aide technique complète. En fait, si Foster Wheeler avait bien étudié antérieurement ces problèmes en laboratoire, il n'était pas allé jusqu'à la réalisation industrielle et nous avons dû reprendre minutieusement, avec nos propres moyens, l'ensemble des mises au point (choix des électrodes et des machines, optimisation des réglages). Ces essais ont été conduits par le laboratoire, d'abord sur éprouvettes, puis sur maquettes grandeur, grâce à quoi les opérations de construction ont pu être menées à bien sans incidents.



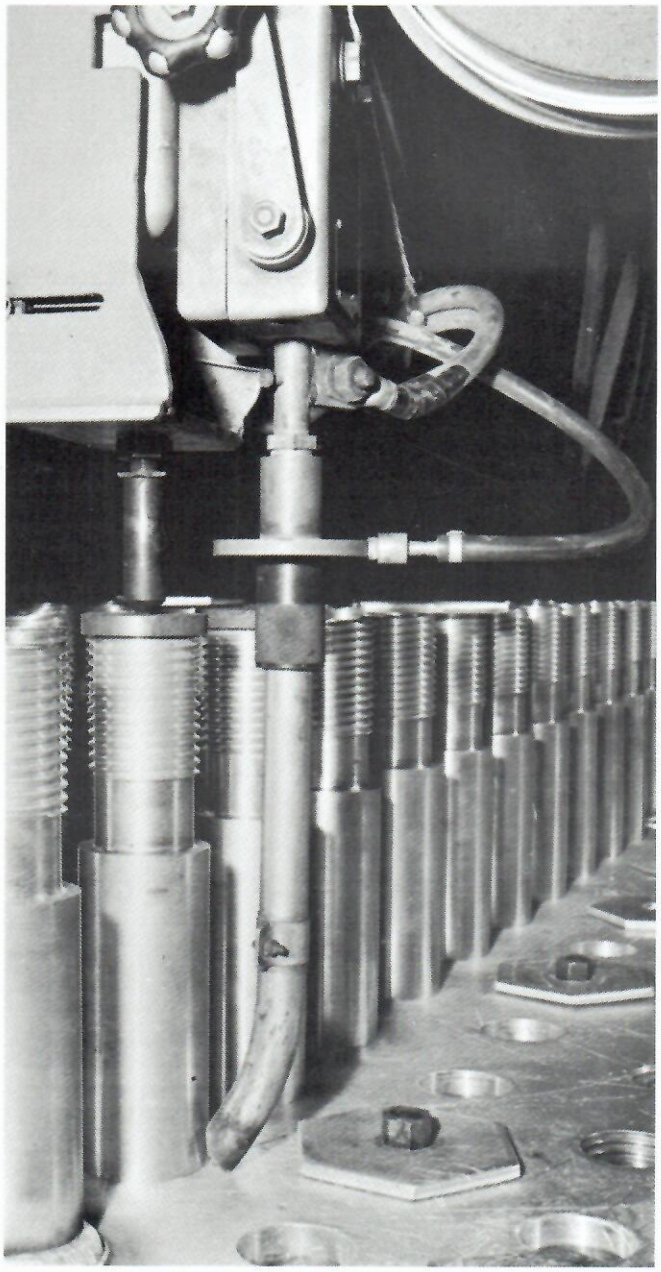
Vue d'ensemble de l'installation de rechargement, en action sur la plaque vraie grandeur (1 500 × 1 500 × 105 mm).

L'opérateur termine le dépôt de la première couche d'inconel ; au total 150 *kg d'inconel ont été ainsi déposés en trois couches croisées.*

Un métal difficile : l'aluminium à 99,5 %

NOUS avons eu à construire des appareils spéciaux mettant en œuvre, sous diverses formes — et notamment en forte épaisseur (jusqu'à 150 mm) — l'aluminium A 5.

Ce métal est très difficile à souder en forte épaisseur et nous devons être à peu près les premiers en Europe à avoir réussi des soudures de cette importance, répondant à de très sévères critères de qualité en même temps qu'à des tolérances très étroites de forme.



Les difficultés de mise en œuvre de l'A 5 (aluminium ne contenant que 0,5 % d'autres éléments) proviennent des trois caractéristiques suivantes :

● L'aluminium de qualité A 5 a une conductibilité thermique très élevée de 0,52 uth cm/cm². s. °C. En comparaison, celle de l'acier n'est que de 0,15 soit 3,5 fois moindre et celle de l'alliage d'aluminium à 4 % de magnésium AG 4, est de 0,32. Il en résulte que pour souder l'A 5, il est nécessaire d'apporter aux pièces à joindre des quantités de chaleur très importantes avec des sources très puissantes, de manière à équilibrer l'énergie dissipée dans les pièces et l'atmosphère, pendant le maintien à l'état liquide d'un volume de métal ou « bain de fusion » convenable. Une autre conséquence de la très grande conductibilité thermique de l'A 5 est la grande difficulté de souder entr'elles des pièces de masses différentes.

● L'aluminium A 5 se caractérise en second lieu par sa fusion franche à 650 °C et par la grande différence de solubilité de l'hydrogène qu'il présente dans les deux états solide et liquide. A l'état liquide, l'A 5 peut dissoudre 15 fois plus d'hydrogène qu'à l'état solide. Il en résulte qu'il est nécessaire d'éviter au métal liquide tout contact avec la moindre quantité de matière contenant cet élément, sous peine de le voir rejeté à la solidification et emprisonné sous forme de porosités ou soufflures. Les sources de contamination sont nombreuses : atmosphère, surface des tôles, surface des fils, gaz de protection, souillures, graisses, matériel, etc... et les quantités agissantes extrêmement faibles, ce qui nécessite des soins et précautions rigoureux et longs.

● L'aluminium A 5 se caractérise encore par sa grande affinité pour l'oxygène et par les propriétés de son oxyde, l'alumine, dont la température de fusion est beaucoup plus élevée (3 000 °C) que celle du métal et le poids spécifique, plus grand. Il en résulte que, pendant le soudage, il existe un risque important d'emprisonner de l'alumine dans le métal fondu, sous forme d'inclusions ou de collages.

Le rôle du laboratoire dans la mise au point des procédés à appliquer par les ateliers a été fondamental. Il a eu notamment à :

— définir les modes d'exécution des soudures dans les moindres détails et en vérifier les effets par des essais représentatifs ;

— situer leur rang dans la gamme des très nombreuses opérations de fabrication comprenant des travaux de chaudronnerie, d'usinage et de contrôle extrêmement imbriqués ;

— définir les modes d'exécution des contrôles de qualité et leurs critères de jugement ;

— former et qualifier des opérateurs ;

— surveiller et faire respecter des prescriptions tellement fastidieuses dans leurs détails qu'il a été parfois difficile de convaincre les exécutants de leur nécessité absolue.

Le laboratoire a eu également à adapter et construire le matériel de préchauffage et de soudage, notamment une machine automatique pour souder à l'intérieur des tubes, et une machine automatique pour réaliser les jonctions circulaires de tubes sur plaques.

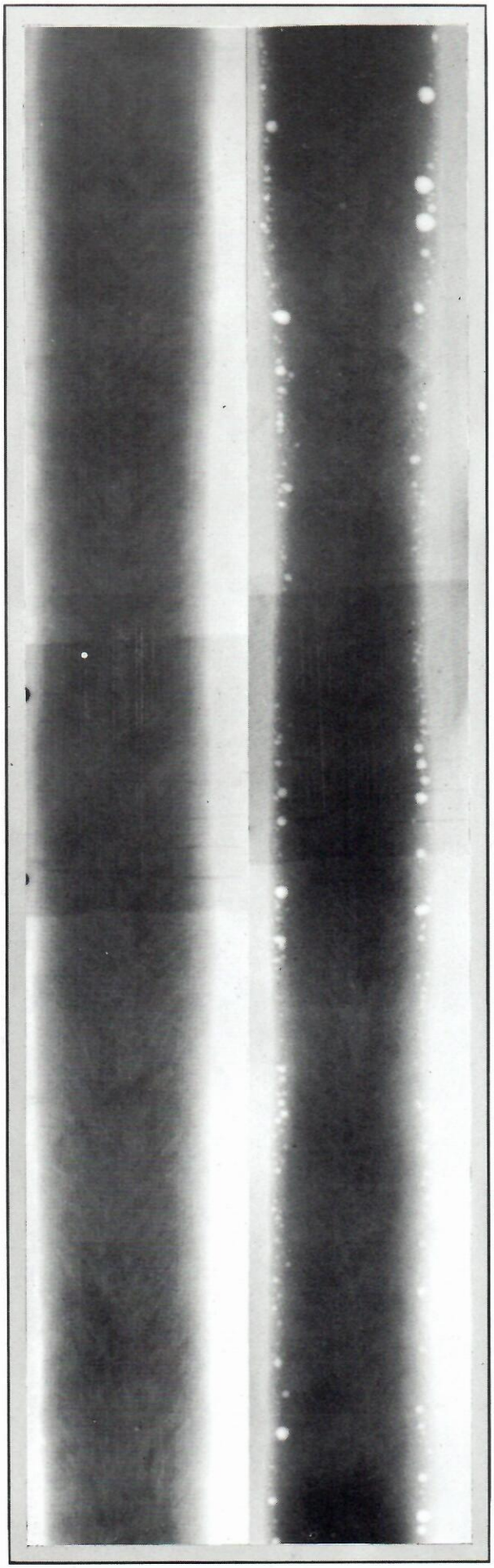
La soudure de l'A5 impose dans un certain nombre de cas un préchauffage à une température supérieure à 500°

Ce préchauffage a été obtenu par chauffage par induction au moyen d'un inducteur enroulé autour d'un tube d'acier entourant les barres d'aluminium.

Une protection isolante à l'extérieur du tube a été nécessaire pour limiter les pertes par rayonnement et protéger les opérateurs.

Le courant continu ne convenant pas pour alimenter l'arc, il faut utiliser du courant alternatif fourni par un transformateur de soudage classique et un courant à haute fréquence, indispensable pour éviter l'extinction de l'arc pendant la partie du cycle où l'électrode est positive.

Pour diminuer le risque de produire des inclusions de tungstène provenant de l'électrode, on a adjoint, en série, aux sources de courant, une importante batterie de condensateurs de manière à réduire l'intensité maximale instantanée du courant.



La soudure, relativement simple, de tôles de 38 mm d'épaisseur, en automatique à plat, par exemple, a demandé des études très attentives. Il a fallu construire une torche de soudage capable de supporter la vitesse du fil et l'intensité du courant très élevées. On a choisi, après enregistrement du courant de soudage, le générateur de courant dont les caractéristiques dynamiques permettaient d'obtenir la meilleure stabilité. Pour augmenter la pénétration de la fusion et en améliorer la forme, on a utilisé un mélange d'hélium et d'argon qui, en augmentant le potentiel d'ionisation de l'arc, améliore son rendement.

Les deux photographies ci-contre donnent une idée des soins et précautions extraordinaires nécessaires, du degré de propreté indispensable à l'exécution des travaux de préparation et de soudage de l'A 5, et de la puissance de l'effet pernicieux de la contamination par l'eau sur la qualité des soudures.

Ces deux photographies sont les reproductions inversées, sur papier, des films de contrôle radiographique de deux soudures exécutées suivant le procédé à fil électrode fusible pour la réception des bouteilles de mélange hélium-argon.

La première soudure (à gauche) est parfaitement saine, tandis que la deuxième contient de nombreuses porosités alignées sur les deux bords du cordon (taches blanches).

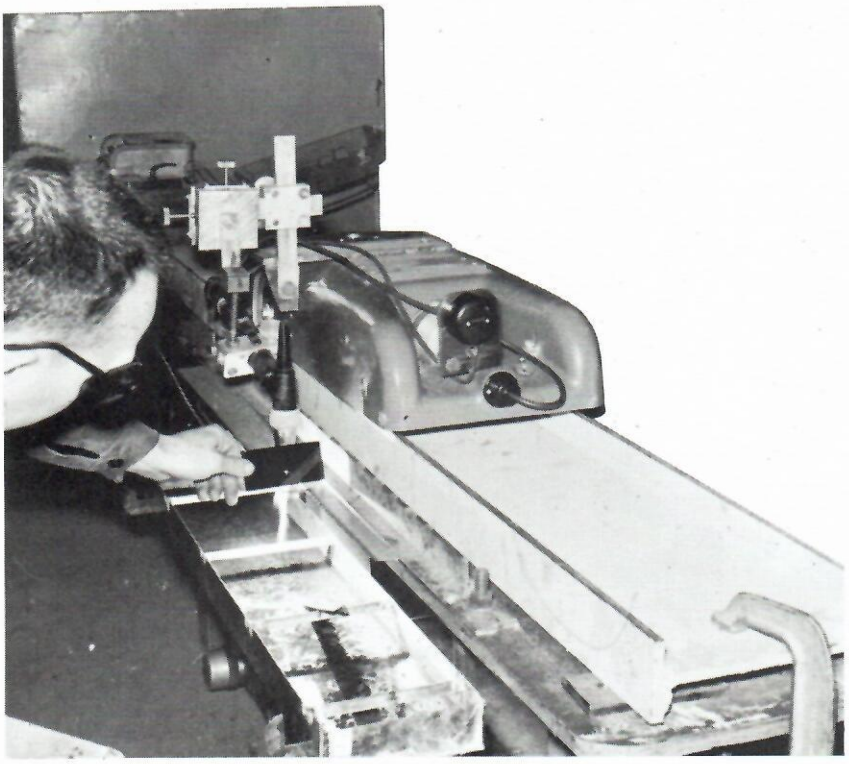
La seule différence dans l'exécution de ces deux soudures a été un changement de bouteille du mélange He-Ar. La première était à peu près exempte d'humidité (5 p. p.m. de 0^2), tandis que la seconde en contenait 9,6 mg/m^3, c'est-à-dire 0,007 % en poids d'eau dans le gaz !

Découpage par plasma d'arc

LE laboratoire a étudié, en vue de ses applications industrielles, une torche de découpage à plasma d'arc (représentée schématiquement sur la figure jointe).

Ce procédé permet de sectionner les métaux qui ne peuvent l'être par l'oxycoupage classique (aciers austénitiques à haute teneur en Cr et Ni, métaux non ferreux tels que cuivre, aluminium, etc.), ainsi que les isolants, les verres et les réfractaires.

Le gaz (mélange hélium-argon ou hydrogène-argon) contenu dans l'espace entre la buse et l'électrode centrale de tungstène est ionisé à l'aide d'un circuit d'amorçage à haute fréquence ; lorsque l'ionisation est suffisante, l'arc éclate entre la buse et l'électrode centrale de tunsgtène et porte le gaz à très haute température, ce qui suffit à entretenir l'ionisation ; le circuit d'amorçage peut alors être coupé.



Le gaz à haute température, sous l'effet combiné de la détente (dans une tuyère terminant la buse) et du champ électrique, sort sous forme d'un pinceau, à température très élevée (10 000 à 15 000 °C), de particules animées de très grandes vitesses. Le découpage de la pièce à traiter est obtenu par fusion locale de la matière, et non par oxydation comme dans le chalumeau classique ; la matière fondue est rejetée à l'extérieur de la saignée par l'énergie cinétique du jet.

L'étude expérimentale a porté sur la recherche de l'influence des divers paramètres, suivant la vitesse de coupe :

— Nature du gaz (étude limitée pour l'instant aux mélanges hélium-argon et hydrogène-argon),
— débit de gaz,
— Intensité et tension aux bornes du convertisseur,
— Diamètre de l'électrode,
— Diamètre de la buse,
— Forme de la buse,
— Nature et épaisseur du matériau à couper.

Nous avons dès maintenant, obtenu quelques résultats industriellement intéressants :

— Découpage de tôles minces bimétal en acier réfractaire (3 mm d'acier à 18 % de chrome + 3 mm d'acier à 16 % de chrome et 13 % de nickel), utilisées dans les chambres de combustion des turbines à gaz.

— Découpage de tôles jusqu'à 20 mm d'épaisseur en cuivre, en alliages légers d'aluminium et en acier inoxydable.

L'extension des applications du jet de plasma aux revêtements superficiels et à la soudure est activement étudiée de divers côtés, à l'extérieur de la Société, sans que le stade industriel ait été atteint pour l'instant.

Un exemple de mesures extenso métriques

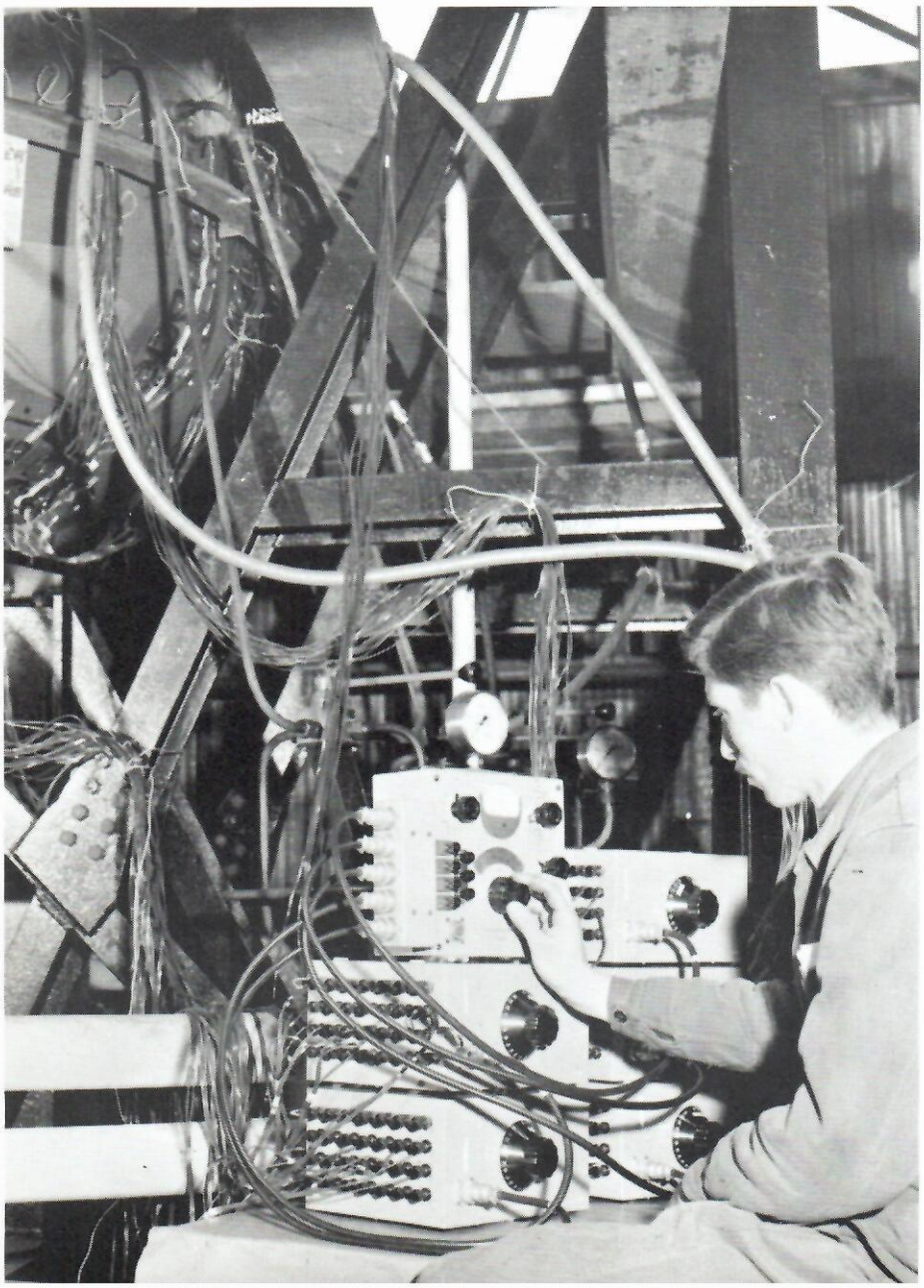
NOUS avons été chargés par la C.E.A. de la vérification sur maquette de l'exactitude des hypothèses retenues pour le calcul de l'enceinte étanche de la pile « Rapsodie » (calcul qui avait été confié à la Société Fives-Penhoët).

Le bloc pile de « Rapsodie » doit être complètement entouré d'une enceinte métallique étanche assurant la protection de l'extérieur en cas de feu de sodium ; cette enceinte doit pouvoir supporter :

— la surpression résultant d'un feu de sodium (2,5 kg/cm² environ) et la dépression susceptible de s'établir au refroidissement ultérieur,

— les contraintes dues à son poids, au supportage du bloc pile, au pont roulant, etc.,

— les efforts dus au vent, à la neige, à un séisme éventuel.



Cette enceinte était prévue à l'origine sous forme d'un cylindre (diamètre 25 m, hauteur 30 m, épaisseur 32 mm), fermé à la partie supérieure par une calotte sphérique et supporté à la partie basse par une jupe servant également de support au bloc pile et raccordé au cylindre par une surface torisphérique.

Cette solution a été, en définitive, abandonnée par le C.E.A. pour la construction de l'enceinte réelle, au bénéfice d'une solution beaucoup plus légère, d'un principe différent.

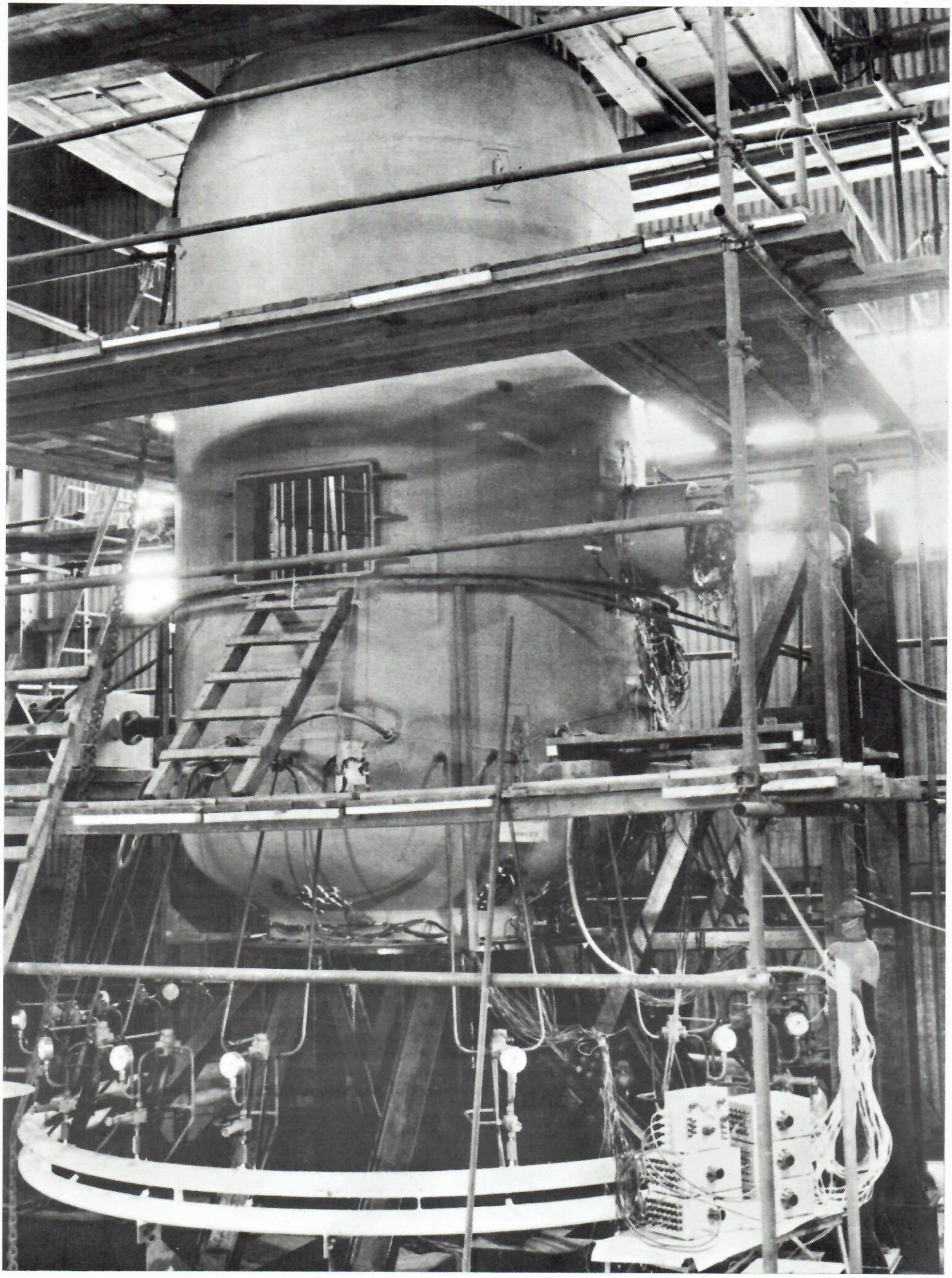
L'étude confiée au laboratoire par le C.E.A. n'en a pas moins présenté un très grand intérêt.

Une maquette de l'ouvrage, à l'échelle 1/10ème pour les dimensions et 1/4 pour les épaisseurs, a été exécutée à Saint-Nazaire.

Des essais préalables par photoélasticimétrie (application d'une couche transparente observée en lumière polarisée) ont permis, en de nombreux endroits, de préciser, par l'examen des lignes isochromes, les zones de concentration de contraintes et de choisir position et orientation des jauges.

Les mesures quantitatives proprement dites ont duré environ deux mois ; elles ont été exécutées à l'aide de jauges à fil résistant, au nombre de 150, représentant 400 directions de mesure (voir photo jointe). Pour hâter l'exécution de l'essai, 6 coffrets de répartition ont été utilisés, permettant chacun la commutation des 24 directions de mesures branchées sur le coffret, par simple manœuvre d'un bouton, avec l'indicateur de mesure, qui donnait directement l'allongement relatif des jauges par rapport à la mesure initiale faite sans charge. La longueur totale des circuits dépassait 2 km.

Une remarquable concordance a été constatée entre les contraintes réelles ainsi mesurées et les contraintes déterminées a priori par le calcul par Fives-Penhoët.



Mise au point du procédé de soudure " Electroslag "

C'EST en octobre 1958, à l'Exposition Internationale de Bruxelles, que nous avons découvert le procédé de soudage sous laitier, réalisé par l'Institut Paton de Kiew, qui permet de souder en une seule passe les pièces les plus épaisses.

Ce procédé était alors totalement inconnu en Europe.

Le soudage est réalisé dans ce procédé en utilisant l'énergie dégagée par effet Joule d'un courant électrique passant de l'électrode dans la pièce par l'intermédiaire d'un laitier électro-conducteur. Le niveau du bain du métal liquide, constamment alimenté par l'électrode, s'élève progressivement au fur et à mesure de la soudure. On utilise 1, 2 ou 3 fils suivant l'épaisseur des pièces à souder.

*
**

Ce procédé présente les particularités essentielles suivantes :

1) L'exécution des soudures se fait en une seule passe sans interruption, de bas en haut. Il en résulte, par rapport aux autres procédés de soudage, un avantage économique d'autant plus grand que l'épaisseur est plus grande ; des opérations accessoires sont supprimées ou simplifiées (retournement des pièces, nettoyage entre passes, réglages, vérifications à chaque passe ou électrode).

2) La déformation angulaire des soudures bout à bout est très faible.

3) Du fait de l'absence d'arc électrique, la température du bain de fusion est bien inférieure à celles qu'atteignent les bains de fusion des procédés de soudage avec un arc électrique, et par suite, les échanges chimiques entre le métal, le laitier et les gaz en présence, sont de faible intensité ; pour le soudage des aciers de construction non alliés ou faiblement alliés, le laitier peut être considéré comme ne modifiant pas la composition du métal fondu : celle-ci ne résulte que du mélange du métal d'apport et du métal de base.

4) Le cycle thermique de soudage est très lent comparativement à ceux résultant de l'application d'autres procédés. La soudure et ses environs sont maintenus pendant longtemps aux températures élevées du domaine austénitique et le refroidissement se produit lentement.

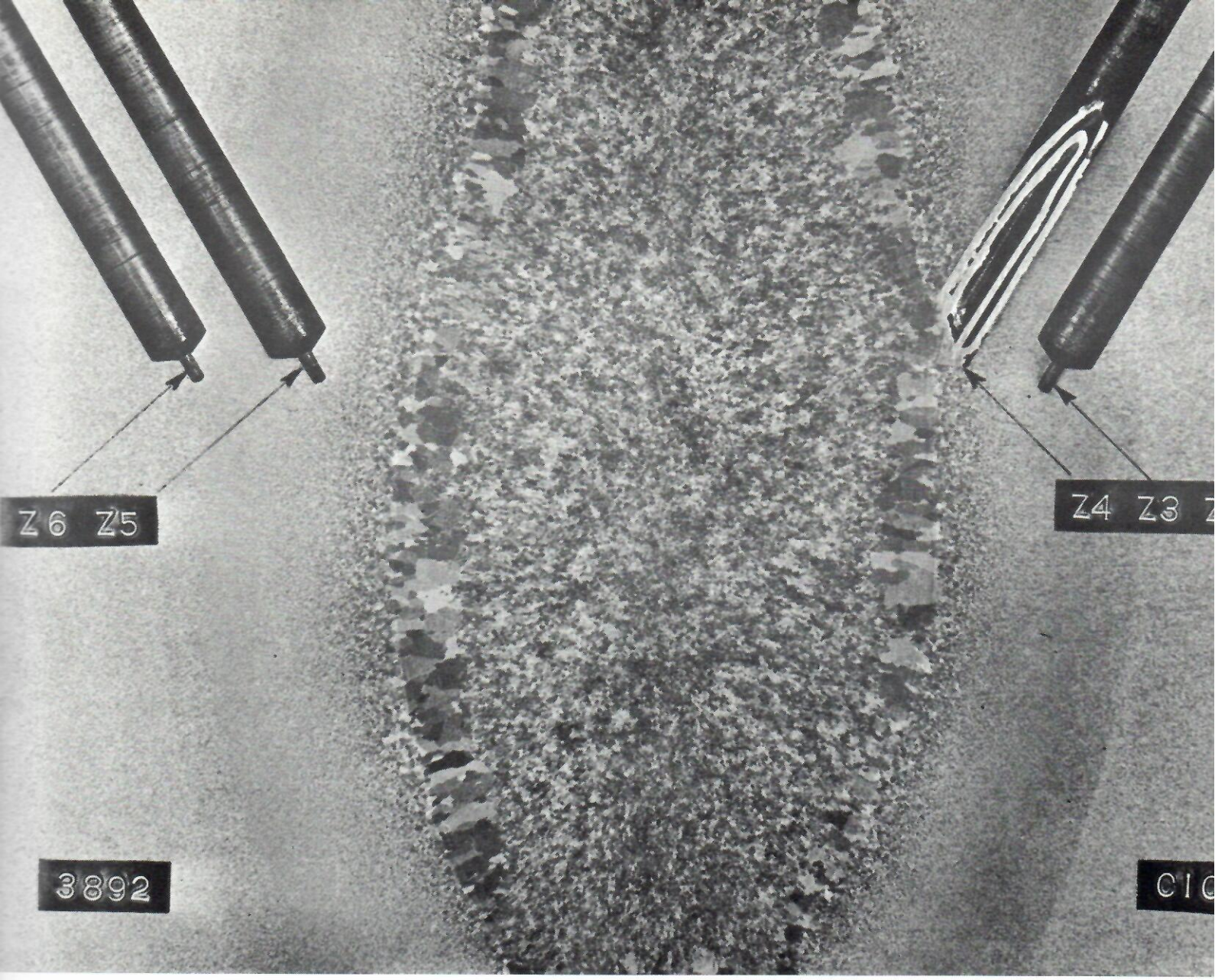
Cette lenteur du cycle thermique de soudage, et par conséquent de la solidification et de la cristallisation, a d'importantes conséquences :

La première, défavorable, est une surchauffe de la soudure et de ses environs qui peut parfois entraîner, en l'absence de traitement de recristallisation, une certaine diminution des caractéristiques de résilience.

Les suivantes sont, par contre, très favorables :

— faible teneur en gaz occlus, notamment en hydrogène ;

(Suite page 24)



La macrographie ci-dessus est une coupe perpendiculaire au joint soudé de deux tôles de 200 millimètres d'épaisseur — avant traitement thermique. On voit très bien, dans la partie centrale de la photo, la soudure, très caractéristiques de la méthode électroslag, avec ses zones de cristallisation.

Le montage photographique de la page 25 précise les différentes structures d'acier rencontrées lorsqu'on passe de la tôle d'origine au cœur de la soudure.

Le traitement thermique fera disparaître cet aspect, en homogénéisant complètement les structures.

La photographie montre également des couples thermo-électriques, au nombre de 5, qui avaient été placés pour mesurer les températures en différents points du métal au moment de la soudure. L'un des couples, placé trop près de la soudure, a fondu.

(Suite de la page 22)

— excellente résistance des soudures à la formation de porosités et de fissures de solidification ;

— enfin, possibilité de souder sans préchauffage des aciers trempants sans risque de fissure de trempe. De même, le soudage à froid de la fonte est possible, sans obtenir de fonte blanche dans la partie fondue ni dans les zones avoisinantes.

*
**

Les avantages de ce procédé nous frappèrent à tel point que plusieurs machines à souder de ce type furent immédiatement commandées (fin 1958). Dès leur réception, le laboratoire a entrepris des essais d'optimisation des paramètres du soudage bout à bout (tension, nombre de fils, vitesse de dévidage, hauteur du bain du laitier, etc...) sur différentes épaisseurs et différentes natures d'acier : acier de construction au carbone A.42 et A.48, acier faiblement allié au chrome et au molybdène résistant aux hautes températures, acier à haute résistance au manganèse molybdène, acier inoxydable.

Ces essais ont permis de définir les conditions pratiques d'application du procédé, en fonction du métal à souder, pour des épaisseurs variant de 15 à 150 mm.

Un peu plus tard (fin 1959), l'EURATOM nous a confié, dans le cadre du programme EURATOM/USA, une importante étude systématique de la soudure sous laitier fondu en très forte épaisseur (200 mm) sur des tôles de grandes dimensions.

Au cours de cette étude, qui se poursuit, nous avons en particulier étudié la répartition des températures au cours de l'exécution d'une soudure.

Les cartes de température dépendent des paramètres de soudage (puissance mise en œuvre, vitesse de la soudure, etc...) et des dimensions de la tôle, mais ne dépendent pas, du moins en première approximation, de la nature de l'acier.

La connaissance des cycles thermiques de soudage subis par le métal en chaque point au cours du soudage, fournie par ces cartes de température, permet de prévoir les caractéristiques finales d'un acier nouveau quelconque en reproduisant ces cycles sur des éprouvettes de petites dimensions prélevées dans ce nouvel acier à étudier.

*
**

Au fur et à mesure de la mise au point des procédures, le procédé est entré dans la phase des applications industrielles, parmi lesquelles nous noterons :

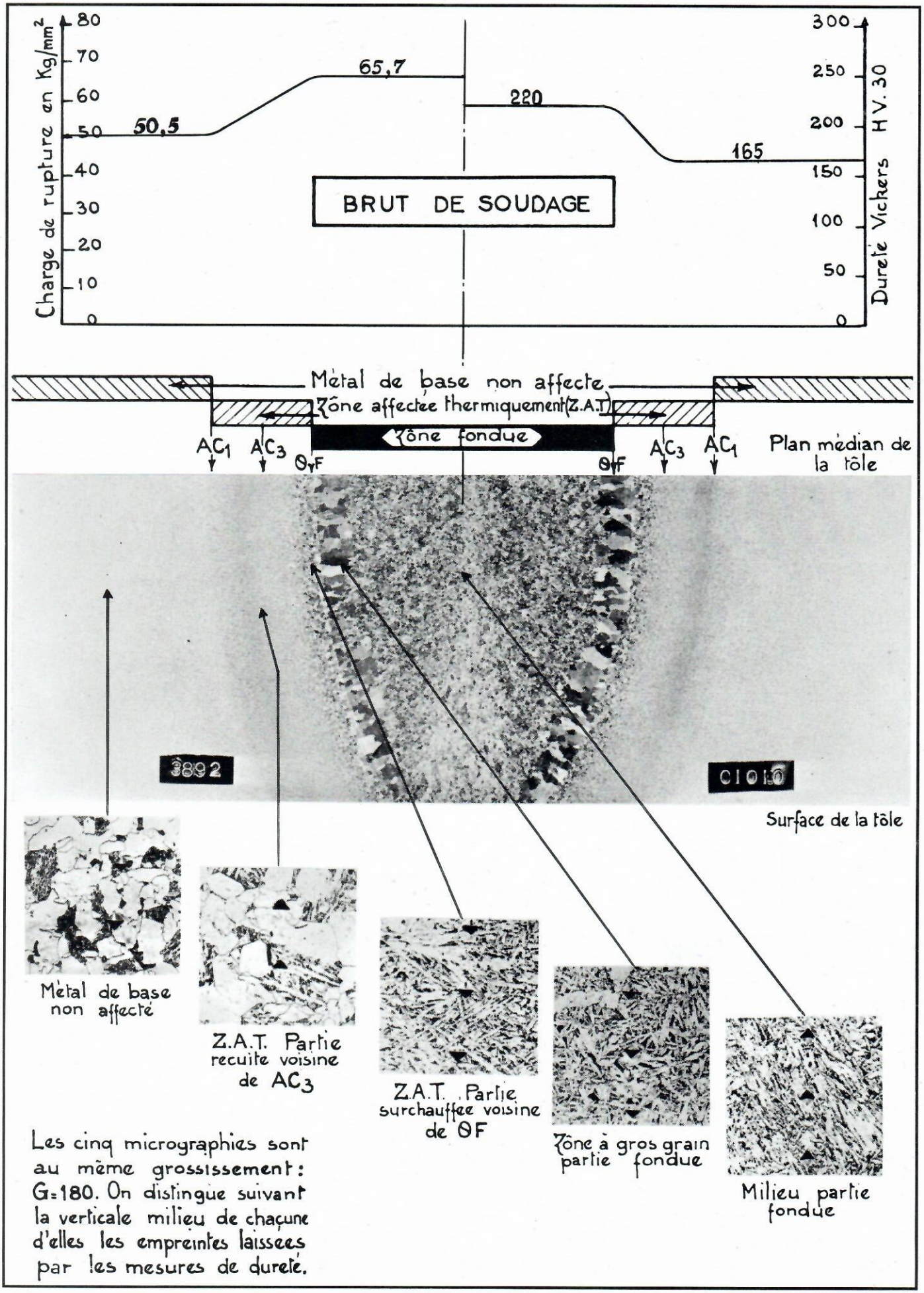
— le soudage des tubes d'étambot ;

— le raboutage de profils ou de tôles épaisses entrant dans la fabrication de bâtis ;

— la soudure longitudinale des ballons de chaudières.

Le seul insuccès rencontré au cours de ces nombreuses applications a été, en octobre 1960, une rupture fragile de 600 mm environ de longueur, transversale au joint, au cours de la fabrication d'un ballon de chaudière au chrome-molybdène de forte épaisseur. La cause en a été le blocage fortuit par suite d'un incident mécanique mineur, d'un des deux fils électrodes pendant 2 à 3 minutes, avec continuation de la soudure, contrairement aux instructions qui auraient dû être données.

Cet incident, aux conséquences financières très lourdes, souligne le soin qui doit être apporté à la préparation des fabrications en atelier, aussi bien qu'à la rédaction des consignes, et naturellement à leur respect absolu.



Les cinq micrographies sont au même grossissement : G=180. On distingue suivant la verticale milieu de chacune d'elles les empreintes laissées par les mesures de dureté.

Un ballon de chaudière 100 % sans retouche

FIN 1962, l'atelier de chaudronnerie lourde a achevé la construction du ballon d'une chaudière de 250 MW (770 t/h de vapeur, à 170 kg/cm² de pression et à 568° de surchauffe et de resurchauffe).

Cette fabrication a présenté ceci de remarquable qu'il s'agit, croyons-nous, du premier ballon de grande chaudière construit en France dont la soudure n'a demandé rigoureusement **aucune retouche** — aucun défaut n'ayant été décelé par aucun des contrôles effectués.

Ce ballon a 1,80 m de diamètre, 22,20 m de longueur, 130 mm d'épaisseur, et pèse plus de 120 t. Il comporte 62 m de soudure et 511 tubulures de 100 mm, ainsi que de nombreux accessoires soudés.

Ce type de construction présente deux caractéristiques principales :

— d'une part, la grande sensibilité de l'acier aux traitements thermiques : des variations de la température de recuit et la vitesse de refroidissement pouvant modifier notablement les caractéristiques mécaniques ; le soudage effectué sans précaution pouvant produire des fissures par trempe dans la zone affectée thermiquement ;

— d'autre part, la forte épaisseur de l'acier et sa haute limite d'élasticité accompagnée d'un très petit palier d'écoulement plastique qui lui permettent d'accumuler, sous l'effet des opérations de fabrication, une considérable énergie interne susceptible de se libérer par une rupture par clivage, brutale, fragile, contre laquelle le constructeur doit se prémunir par de nombreuses précautions.

Aussi l'intervention du laboratoire est-elle très étendue et porte-t-elle sur de très nombreux aspects du problème :

● mise au point préalable des procédés de soudage appliqués par l'atelier :

— automatique sous-laitier en une passe verticale pour le joints longitudinaux,
— automatique multipasses sous flux à plat pour les joints circulaires,
— manuel à l'arc pour les soudures de fixation des tubulures et des accessoires.

Ces modes opératoires de soudage et des traitements thermiques correspondants sont précisés par des spécifications et notices techniques.

● définition des conditions de recette des tôles et des fonds — et notamment, pour ces derniers, définition des structures cristallines après traitements thermiques ;

● qualification des soudeurs et machinistes ;

● contrôle des tôles, en liaison avec l'acierie, l'APAV et les services de contrôle de l'E.d.F. — notamment contrôles par ultra-sons et essais mécaniques ;

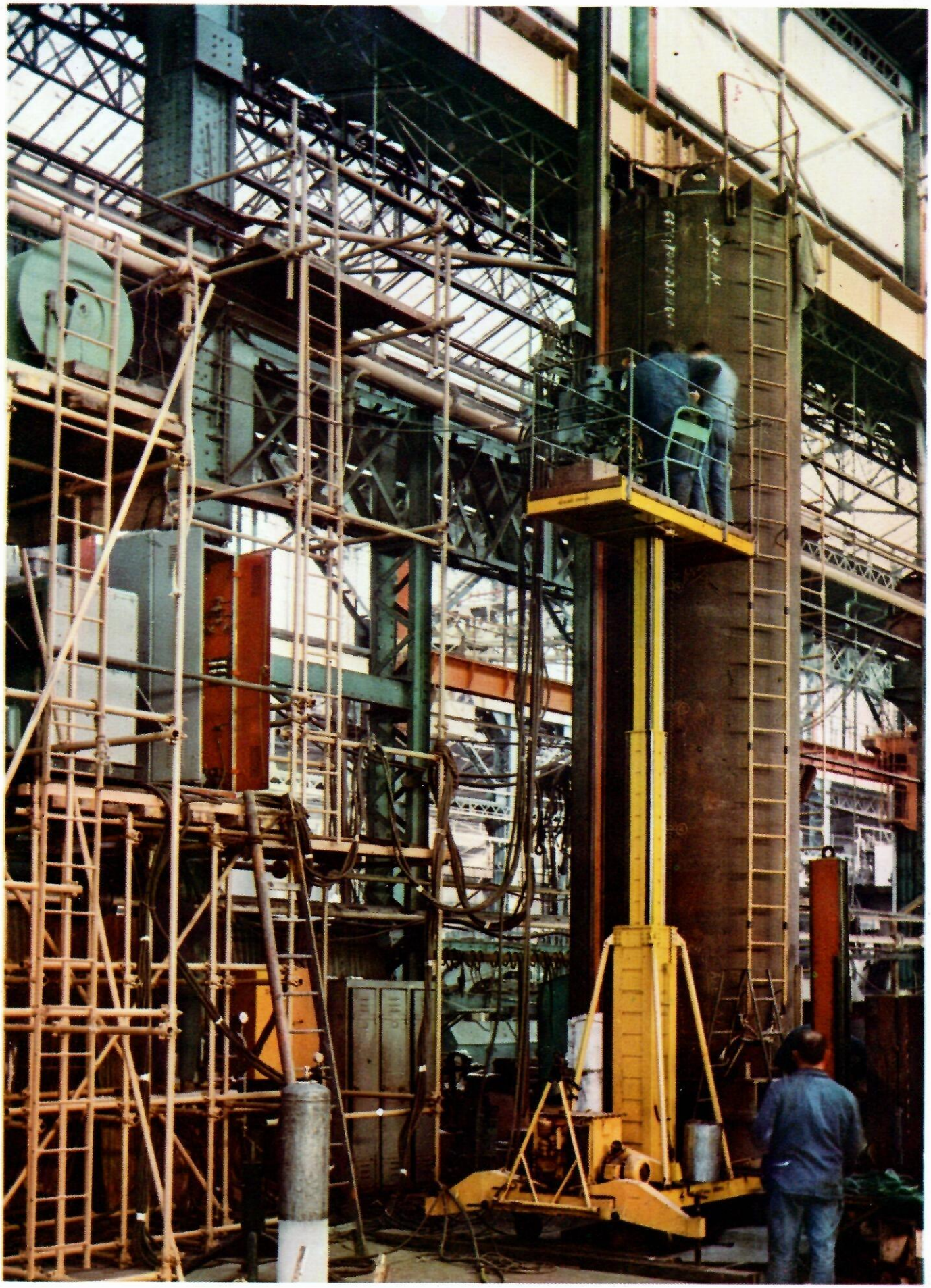
● contrôles de qualité des soudures :

— mesures des caractéristiques mécaniques sur des appendices témoins,
— radiographie de toutes les soudures bout à bout,
— contrôle par ultra-sons,
— contrôle par magnétoscopie pour détecter d'éventuels défauts de surface ;

● contrôle des traitements thermiques par enregistrement des variations des températures au moyen de couples thermo-électriques fixés sur les pièces même et par vérification de la structure au microscope ;

● contrôle des fonds emboutis, notamment vérification des épaisseurs par ultra-sons et surtout vérification des traitements thermiques par examens micrographiques ;

● réception des produits d'apport : électrodes, fils, poudres.



Photographie de la soudure longitudinale, par le procédé électroslag, de l'une des viroles d'un ballon de chaudière de 250 MW.

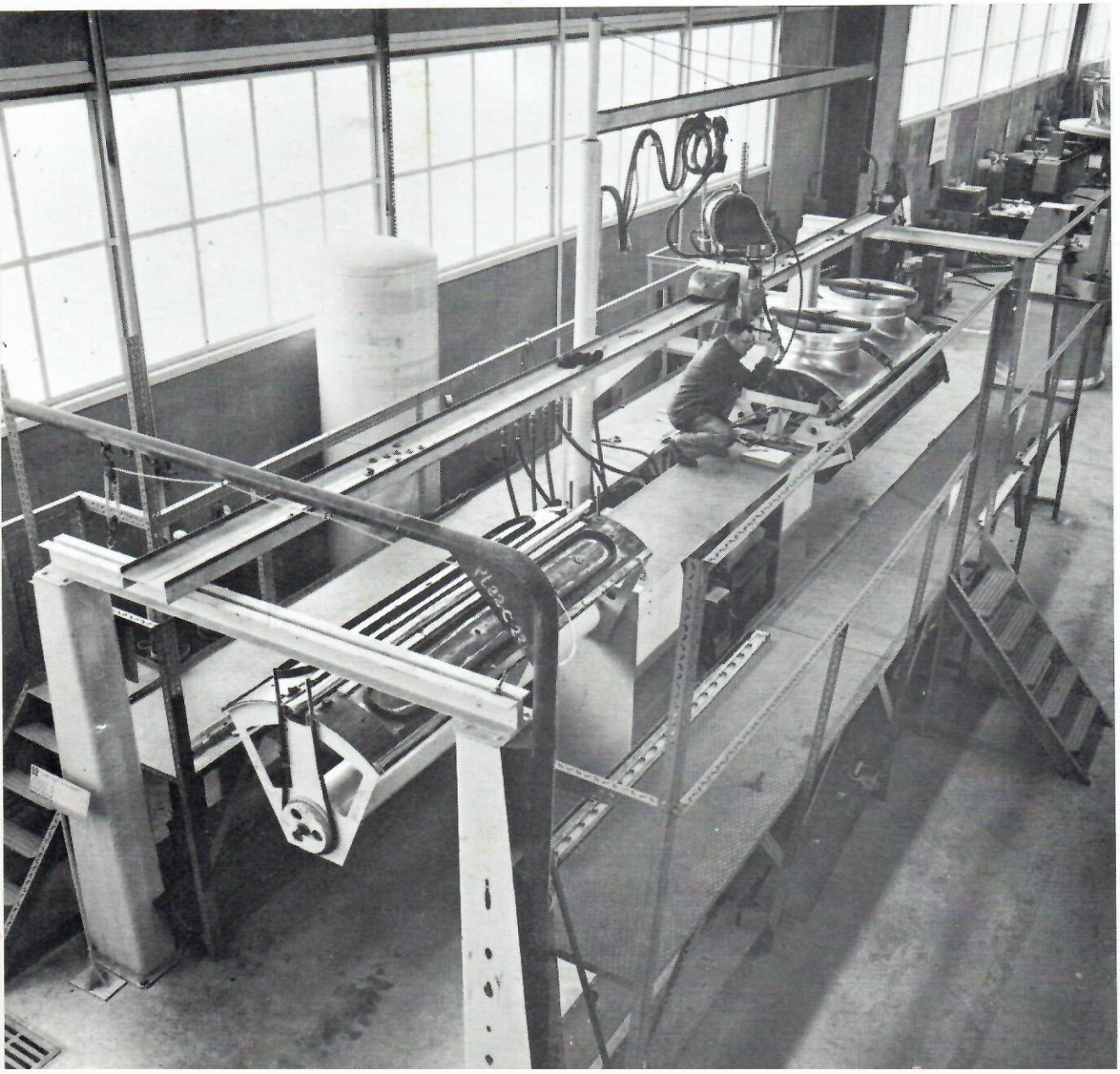
Préparation d'une fabrication de série en AG3

NOUS avons reçu la commande de deux séries importantes de fabrication d'appareils en alliage léger AG.3.

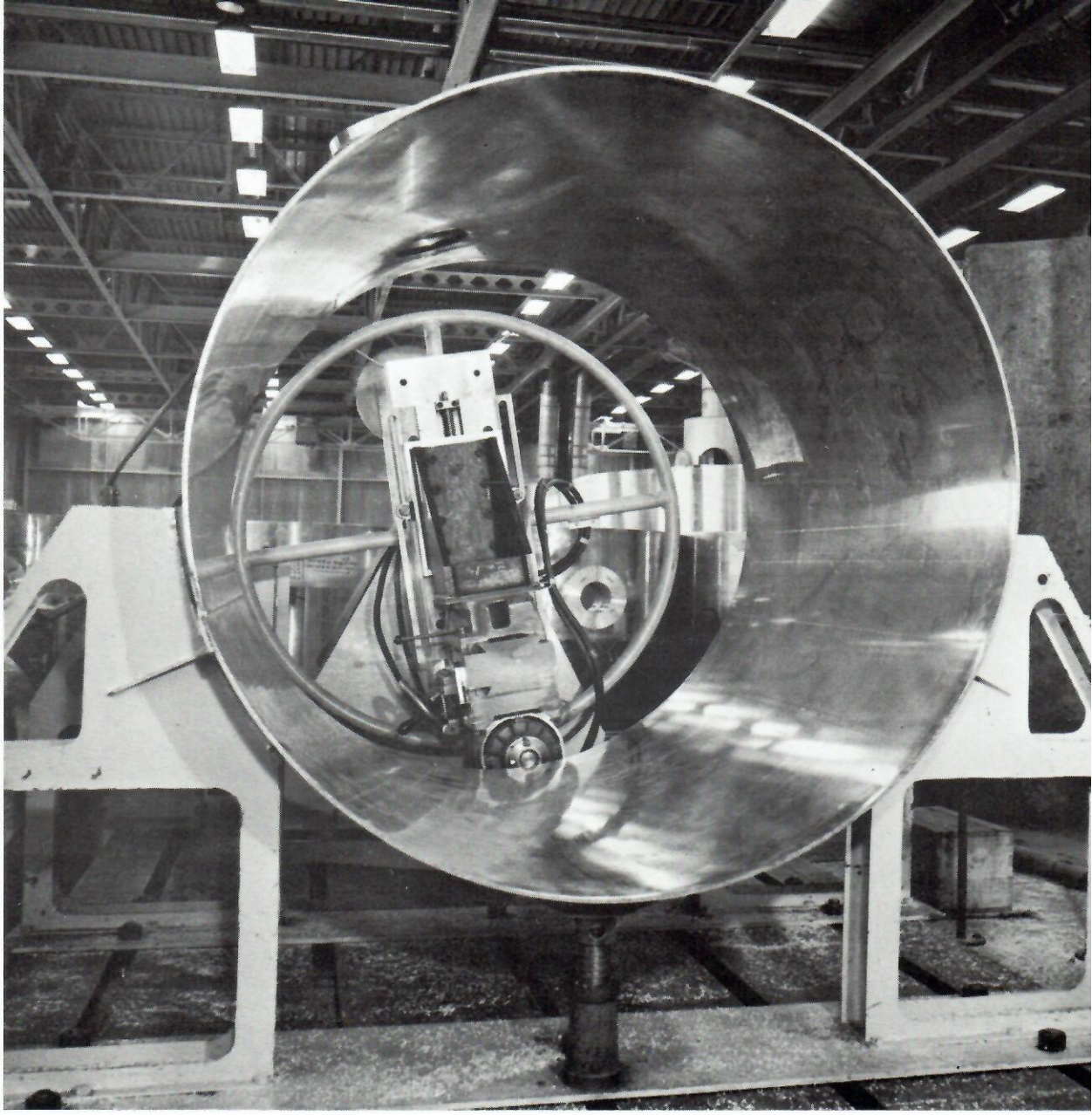
Les appareils se présentent sous la forme de réservoirs d'environ 1,30 m de diamètre, 6 m de long, et portant 6 tubulures de différents diamètres et dans différentes positions.

Ces fabrications se caractérisent par :

— des tolérances géométriques très serrées,
— des critères de qualité des soudures sévères,
— une étanchéité absolue testée par une épreuve à l'ammoniac, puis, après décapage sur le site, par une épreuve à l'hélium.



Vue générale du poste de soudure longitudinale.



Préparation des joints circulaires d'une virole avant montage.

Le laboratoire est intervenu dans cette affaire à deux stades :

— avant le démarrage de la fabrication en série, pour la mise au point technologique des procédures et des outillages, ainsi que pour la formation du personnel,

— après ce démarrage, pour le contrôle de la qualité de la production.

Le premier stade de l'intervention du laboratoire a comporté des essais assez longs, en raison des difficultés de soudage inhérentes à l'emploi de l'AG.3 :

— coefficient de dilatation élevé, entraînant au soudage d'importantes déformations de retrait,

— soudabilité médiocre, avec propension notable à la fissuration pendant la solidification,

— nécessité d'une extrême propreté pour éviter les porosités et notamment d'une préparation des joints précédant immédiatement la soudure pour éviter l'oxydation superficielle à l'air.

Il fallait, en effet, arriver à obtenir la haute qualité de soudure requise, avec la régularité nécessaire à une fabrication de série où toute reprise de défaut local perturbe le déroulement pré-déterminé de la chaîne.

Ces essais ont porté comparativement sur les deux principaux procédés de soudage automatique sous argon pouvant être appliqués (MIG à électrodes fusibles ; TIG à électrodes infusibles) ; ils ont conduits à adopter :

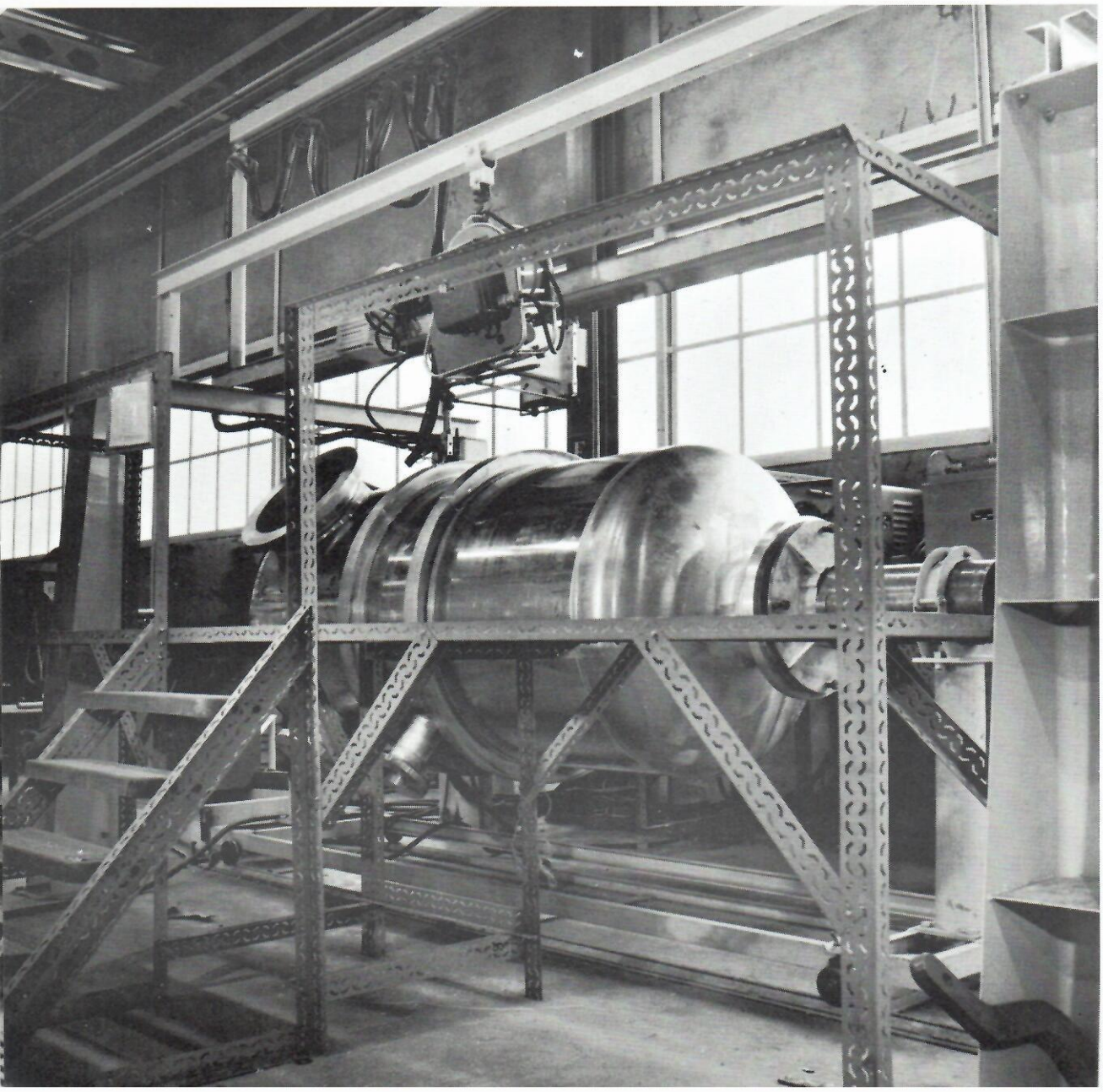
— pour les essais principaux à franc bord, le procédé TIG automatique, au prix d'une mise au point plus difficile des outillages, en raison de l'économie de temps qu'il apporte : possibilité de souder en une seule passe moyennant un supportage convenable à l'envers du métal fondu, alors que le procédé MIG nécessitait l'exécution successive de deux passes, une sur chaque face,

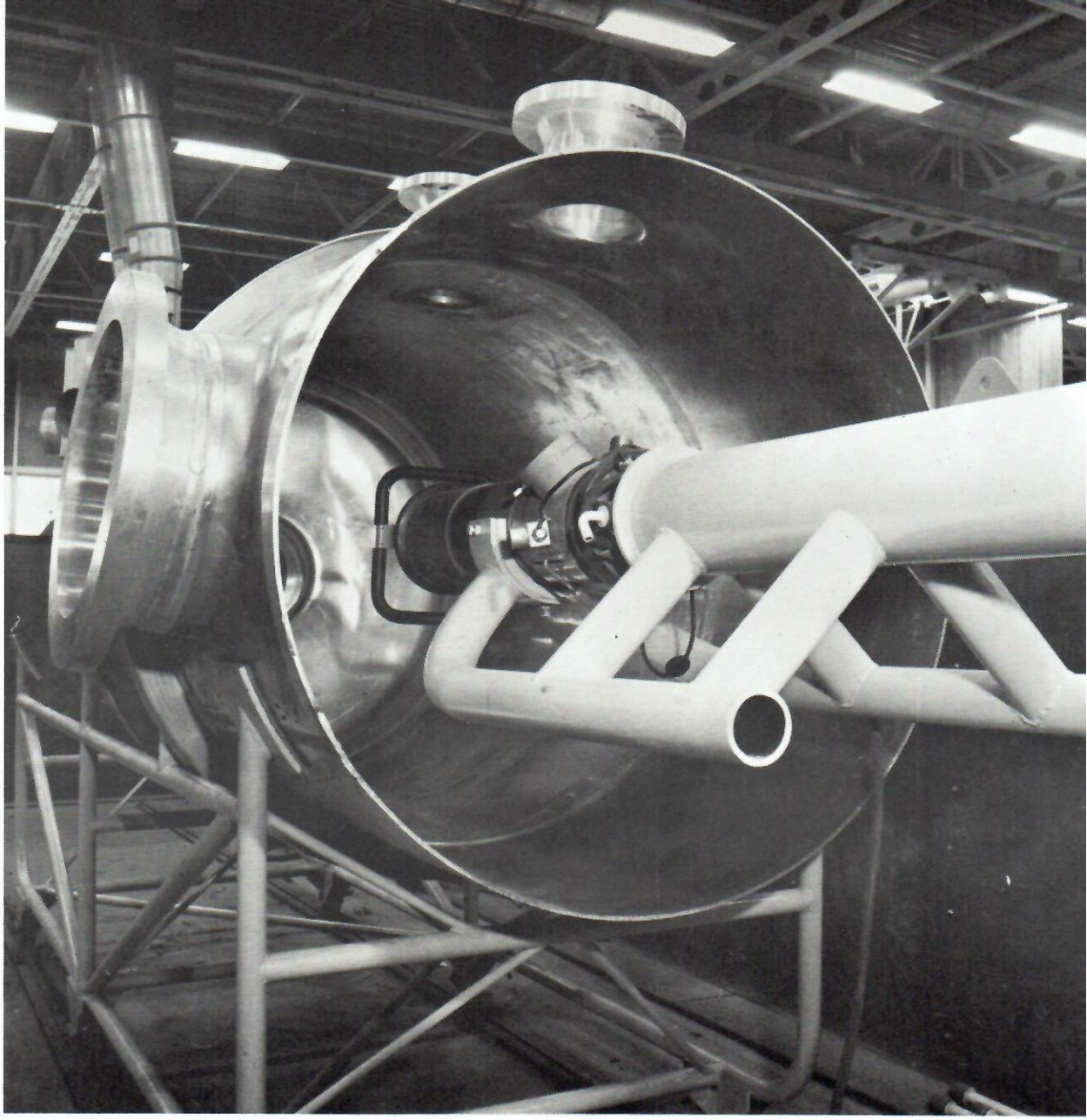
— pour quelques soudures bout à bout de tubulures de petit diamètre, procédé TIG manuel,

— pour les soudures d'angles, procédé MIG manuel.

Le laboratoire a, par ailleurs, dans ce dernier stade, mis au point la technologie délicate à utiliser pour le cas exceptionnel où un défaut local accidentel devrait être repris ; il a également assuré la formation et la qualification des soudeurs et des machinistes qui ont exécuté ensuite la fabrication industrielle.

Poste de soudure circulaire des demi-appareils.





Radiographie d'une soudure circulaire.

Depuis la mise en route de la production, le laboratoire a la charge des contrôles de qualité des réservoirs.

Le **contrôle radiographique** a été organisé pour tenir compte de l'importance du travail et de son caractère de série, notamment :

— montages spéciaux positionnant l'un par rapport à l'autre l'appareil de contrôle et le générateur de rayons X,

— repérage des soudures sans traçage, à l'aide de repères disposés sur des bandes ceinturant la pièce à tester,

— postes panoramiques permettant de radiographier une grande longueur en une seule exposition avec des films continus en ruban.

Les radios (en moyenne 210 par jour actuellement) sont prises sans écran compensateur, sur des films protégés par une simple enveloppe de papier; et la sensibilité obtenue est remarquable : perception du fil de 15/100 mm de l'indicateur de qualité d'image.

L'étanchéité des appareils est vérifiée en faisant le vide dans le récipient à éprouver, puis en y introduisant de l'ammoniac sous une pression de 2 kg/mm² après avoir recouvert d'une bande sensible tous les emplacements à éprouver. L'épreuve qui dure 4 heures a une sensibilité très grande, du même ordre que celle effectuée ultérieurement sur le site avec un détecteur à hélium.

Le soudage automatique des faisceaux tubulaires des échangeurs E.d.F. III

LA Société Fives-Penhoët (en collaboration avec la Société Babcook et Wilcox) a reçu la commande des échangeurs de la centrale nucléaire E.D.F. 2 (dont la construction est actuellement achevée) et de la centrale E.D.F. 3.

La technique utilisée pour E.D.F. 3 diffère sur des points importants de celle utilisée pour E.D.F. 2.

L'une de ces modifications concerne l'utilisation de tubes moletés, d'un type spécial, fabriqués pour la première fois en France.

Ces tubes, pour constituer des faisceaux, sont soudés bout à bout et l'ensemble des 192 tours comporte plus de 60 000 de ces soudures.

La sévérité des contrôles imposés : contrôle radiographique de toutes les soudures, épreuve de résistance à la pression de 90 bars, après cintrage, épreuve d'étanchéité à l'ammoniac ; le caractère sériel de la fabrication ; la complexité du tracé des échangeurs rendant les soudures difficilement accessibles à une éventuelle réparation, ont conduit le laboratoire à rechercher des conditions de soudage automatique par préférence au soudage manuel pour augmenter la constance et le niveau de la qualité des joints.

Le laboratoire a ainsi été amené à définir par des essais préalables, les conditions d'exécution du soudage automatique pouvant s'appliquer au plus grand nombre de joints à réaliser.

Le procédé finalement retenu comprend une seule passe sous argon au moyen d'un arc électrique jaillissant d'une électrode de tungstène. Le métal d'apport nécessaire est fourni par un anneau de fil de diamètre convenable disposé entre les tubes à souder. Ce fil contient des éléments calmants de manière à éviter la formation de porosités par l'effervescence du métal en fusion.

La machine entièrement automatique utilisée a été entièrement étudiée et définie par le laboratoire.

Elle se compose, d'une part, de la machine à souder proprement dite, qui comprend la torche, les mécanismes de serrage, de rotation et le pupitre des commandes, et, d'autre part, d'une armoire fournissant tous les courants de soudage, d'amorçage et de commande ou de réglage.

Elle permet l'exécution automatique des soudures en répétant des cycles d'opérations réglables entre de grandes limites, telles : l'amenée de gaz, l'amorçage de l'arc par des courants à haute fréquence, la temporisation de la rotation, l'évanouissement du courant, l'arrêt de la rotation, etc.

Imprimerie du C. E. P., 142, rue Montmartre
PARIS (2e)

CA