

UNIVERSITÉ DE LIÈGE  
—  
INSTITUT DU GÉNIE CIVIL  
—

N° 43

# LE CONTROLE RADIOGRAPHIQUE DES CONSTRUCTIONS SOUDÉES

PAR

**F. CAMPUS**

ET

**H. LOUIS**

Professeur à l'Université  
Directeur du Laboratoire d'Essais des Constructions  
du Génie Civil

Ingénieur des Ponts et Chaussées  
Assistant à l'Université

=====  
Extrait de la *Revue Universelle des Mines*, n° de Juillet 1939  
(8<sup>e</sup> série, tome XV, n° 7)  
=====



LIÈGE  
H. VAILLANT-CARMANNE, S. A., IMP. DE L'ACADÉMIE, 4, PLACE ST-MICHEL, 4

1939

12408

# LE CONTRÔLE RADIOGRAPHIQUE DES CONSTRUCTIONS SOUDÉES (\*)

par F. CAMPUS

Professeur à l'Université  
Directeur du Laboratoire d'Essais des Constructions  
du Génie Civil

et

H. LOUIS

Ingénieur des Ponts et Chaussées  
Assistant à l'Université

**Résumé.** — Dans l'introduction, l'un des auteurs résume la question du contrôle des constructions soudées et rappelle sa conclusion antérieure, que le contrôle radiographique à lui seul n'est pas toujours suffisant et doit être complété dans les cas difficiles.

Il expose ensuite les principes et les circonstances de l'étude et de la réalisation d'un camion laboratoire radiographique.

Dans une seconde partie sont rappelés les principes du contrôle par les rayons X : source de rayons X, discussion du choix des variables intervenant dans la prise d'une radiographie, films utilisés, protection contre le rayonnement secondaire. Viennent ensuite le commentaire des principaux défauts rencontrés dans les soudures et la description complète du camion laboratoire radiographique.

## I. — INTRODUCTION

par F. CAMPUS

Dans la communication intitulée « Le Contrôle des Constructions soudées » faite aux journées de la Soudure de l'A. I. Lg en février 1938 (*R. U. M.*, n° de juin 1938), j'ai mentionné que j'avais établi, en collaboration avec M. H. Louis, ingénieur des Ponts et Chaussées, assistant à l'Université, le projet d'un camion-laboratoire radiographique, destiné au service de contrôle des ponts et constructions métalliques de l'Administration des Ponts et Chaussées. Il s'agissait alors d'un projet entièrement arrêté et prêt à être commandé, mais non encore réalisé. Pour cette raison, j'ai jugé opportun à cette époque de me borner à quelques indications très brèves, réservant une communication détaillée jusqu'après sanction suffisante de l'expérience.

Un laps de temps de huit mois a suffi pour me permettre de compléter, avec la collaboration de M. Louis, la communication précitée. Il me paraît

utile de faire précéder l'exposé technique relatif à la pratique du contrôle radiographique des constructions, à la description de l'installation et aux travaux déjà effectués, d'indications générales relatives au programme et à la genèse de l'installation et du service de contrôle. Elles procèdent directement des opinions exprimées dans ma communication précitée et la complètent sur ce point.

A propos de la comparaison des moyens de contrôle destructifs et non destructifs, j'avais fait observer que si l'on peut reprocher aux premiers d'être aveugles, on peut objecter aux seconds d'être paralytiques. Ce qui est plus défavorable encore, ils peuvent être conjectureux parce que leur interprétation comporte une part de subjectivité. J'avais conclu à la perfection et à l'utilité de la combinaison des deux moyens de contrôle. La radiographie établit la présomption de défauts. Dans le cas d'interprétation difficile ou apparemment grave, les moyens d'investigation destructifs seront appliqués aux endroits suspects, avec une efficacité assurée. Cette méthode est seule susceptible de résoudre scientifiquement les difficultés d'interprétation et de permettre des décisions entièrement fondées dans les cas graves. L'interprétation des radiographies est la partie la plus délicate du contrôle. Elle ne peut être littéralement objective que si celui qui en est chargé a pu, par des séances d'entraînement, apprécier sur des pièces d'essai découpées, les rapports entre les indices observés sur le film et les constatations faites sur pièces. Un tel entraînement est suffisant pour l'appréciation des imperfections médiocres et banales, au sujet desquelles il existe d'ailleurs déjà une documentation qui est très rapidement complétée par les collections des radiographies effectuées. Pour apprécier l'importance des indices radiographiques en ce qui concerne la sécurité, il faut encore procéder à des essais mécaniques systématiques, notamment à des essais d'endurance sur des soudures de qualités diverses. Il faut cependant se méfier de critères

(\*) Communication présentée le 6 novembre 1938 à la Section de Liège de l'A. I. Lg. Suivie de démonstration.

trop schématiques. Il peut d'ailleurs se présenter des indices exceptionnels, généralement les plus graves. Le contrôle destructif peut seul donner la certitude au contrôleur, il est utile aussi pour l'édification des ingénieurs dirigeants, du personnel de maîtrise et même des soudeurs, ainsi que j'en ai fait la remarque dans la communication précitée. Les cas où le contrôle destructif serait interdit pour des raisons de sécurité ne peuvent guère être imaginés. Au contraire, il peut être envisagé souvent comme une mesure de sécurité d'urgence. Par exemple, si une fissure caractérisée importante et dangereuse est révélée par la radiographie d'un ouvrage en service, la solution la plus recommandable consiste à effectuer des forages aux deux extrémités de la fissure. Ceci a le double avantage de permettre d'examiner si la fissure ne s'étend pas, sous une forme ténue, plus loin que ne l'indique la radiographie et d'empêcher sa propagation ultérieure dans la construction. Cette propagation peut être progressive pendant un certain temps, sous l'effet des charges mobiles, mais les accidents survenus aux ouvrages ont montré que, soudainement, leur propagation peut être instantanée et provoquer des ruptures importantes. L'interception d'une fissure par le contrôle destructif assure le statu-quo, stabilise un état de sécurité encore suffisante corroboré par l'expérience, supprime le danger virtuel et procure le temps nécessaire pour l'application de mesures définitives. Dans certains cas, des éprouvettes ont été prélevées dans des ouvrages soumis au contrôle lorsque les radiographies semblaient déceler des défauts graves. Ces éprouvettes ont été ensuite soumises à des essais mécaniques afin d'apprécier la gravité des défauts constatés et les mesures à prendre. On ne peut concevoir de contrôle plus efficace. Pour ces raisons, le programme de l'installation a prévu dès l'origine que l'équipement radiographique serait accompagné d'un matériel complémentaire de contrôle destructif, consistant en foreuses portatives et en une foreuse amovible du genre Schmuckler. Ces instruments, en possession du Laboratoire d'Essais des Constructions du Génie Civil, ont servi au contrôle antérieur de diverses constructions soudées. Le matériel peut d'ailleurs facilement être complété selon les besoins. La disposition d'un poste de soudure à arc a été jugée indispensable dans ces conditions, notamment en vue de la fixation provisoire de pièces d'attache pour les appareils de contrôle destructif. Mais il permet aussi, le cas échéant, de procéder à des réparations provisoires ou définitives ou de réaliser des dispositifs d'urgence. L'outillage du camion laboratoire comporte aussi une meule, destinée au meulage des cordons de soudure, favorable au pouvoir de résolution de la radiographie. Le meulage constitue une opération de parachèvement recommandable pour la plupart des cordons importants de soudure, surtout pour les soudures bout-à-bout. Il est désormais imposé par certaines prescriptions de qualité. Le matériel de meulage sera augmenté au fur et à mesure des

besoins. Le programme était donc établi selon une conception complète et scientifique de l'exercice du contrôle, c'est-à-dire fondée sur la préoccupation de pousser la détermination aussi loin que possible, par les moyens dont il s'agit. J'ai indiqué les raisons pour lesquelles l'on s'est borné à prévoir d'abord l'emploi des rayons X. Il n'exclut pas l'éventualité d'emploi des rayons gamma. D'autre part, le contrôle magnétique et électromagnétique est prévu et possible mais pas encore appliqué.

Les limites des moyens de contrôle envisagés ci-dessus ont été définies dans la communication précitée. Ils sont impuissants à l'égard des défauts de micro-structure et à l'égard des tensions préalables de retrait ou de montage. En outre, et pas plus que tout l'arsenal imaginable du contrôle, ils ne peuvent mettre à l'abri des conséquences possibles du vice accidentel caché de matière, éventuellement fatal, dont la recherche revient à celle de l'aiguille dans une meule de foin (1).

J'ai exprimé suffisamment mon opinion sur la nécessité du caractère pratique du contrôle, ce qui n'exclut pas son exercice scientifique. Le caractère complet de l'installation de contrôle en elle-même et surtout la préoccupation de lui permettre de servir en tout lieu et en toute circonstance ont donné lieu à un second point important du programme, contribuant à lui donner un caractère de nouveauté originale. C'est celui de l'association au matériel de contrôle, d'un groupe électrogène assez puissant pour alimenter le générateur de rayons X, les machines portatives et le poste de soudure. Eu égard à la mission générale assignée à un service de contrôle, il doit pouvoir être pleinement efficace n'importe où et n'importe quand et son fonctionnement ne doit dépendre d'aucune condition préalable, que ce soit en rase campagne ou sur les chantiers les plus divers, à l'atelier ou au laboratoire. Le groupe électrogène assure partout à l'équipement de contrôle, l'énergie nécessaire *dans des conditions toujours identiques*. Ceci est essentiel pour la longévité des tubes à rayons X qui doivent être alimentés de courant à une tension régulière et invariable, car ils sont très sensibles aux variations brusques de tension. Cela assure aussi un usage généralement certain de tout le matériel de contrôle et procure des gains de temps considérables, attendu que l'installation pourvue d'un groupe électrogène est toujours en état immédiat de fonctionnement, sans exiger d'installations provisoires ou de fortune. Basant ma conviction sur une expérience professionnelle générale, je n'ai pas douté que, en dépit de la dépense d'installation du groupe électrogène, l'économie d'ensemble en serait augmentée. L'Administration des Ponts et Chaussées a d'ailleurs admis l'idée d'emblée.

(1) Un accident très important s'est produit en janvier 1938 au viaduc de Rüdersdorf près de Berlin, sous une auto-route. Les soudures de cet ouvrage avaient été inspectées plusieurs fois par radiographie et améliorées jusqu'à paraître parfaites d'après ce moyen d'examen.

[Ces deux points essentiels et caractéristiques du programme étaient complétés par les suivants :

- 1° tout le matériel sera transporté par un camion automobile susceptible de tirer ultérieurement une remorque ;
- 2° il sera complété par un échafaudage léger mobile et des échelles ;
- 3° le camion contiendra une chambre noire équipée pour le développement des films et le chargement des cassettes ;
- 4° il aura une capacité de transport confortable de quatre ou cinq personnes.

En ce qui concerne plus particulièrement l'installation des rayons X, toutes les garanties de sécurité les plus perfectionnées étaient requises (selon les D. I. N.). Un paravent en tôle de plomb a été ajouté dans la suite pour la protection de l'opérateur. C'est selon ce programme que les demandes de prix ont été faites aux firmes susceptibles de participer à la réalisation. Comme elle était la première du genre, il n'était pas possible de s'adresser à un fournisseur général, d'autant plus que la nature particulière du programme et la responsabilité assumée par ses auteurs ne leur permettaient pas de se désintéresser de sa réalisation. Les offres reçues ayant été examinées avec soin, il fallait les combiner avantageusement en vue d'une réalisation unitaire et harmonieuse. Heureusement, la réunion des offres les plus avantageuses de cinq firmes permettait de combiner une installation pratique et de haute qualité, tout en étant d'une réelle économie. Ces firmes étaient précisément toutes établies dans l'agglomération liégeoise. Cette circonstance permit de réunir facilement leurs délégués et d'obtenir la promesse d'une réalisation concertée. Leur bonne volonté de collaboration fut telle qu'un meilleur résultat n'aurait pu être obtenu. Grâce à leurs prestations consciencieuses, les risques inhérents à la réalisation d'une première installation, de nature aussi particulière et déjà complexe, par la collaboration de cinq fournisseurs indépendants n'eurent aucune conséquence. L'Administration des Ponts et Chaussées, au nom de qui j'avais accepté d'établir le projet du camion-laboratoire en collaboration avec M. Louis, nous accorda une confiance totale, sans laquelle la réussite aurait pu être compromise. Or, elle fut complète.

M. Louis donnera plus loin une description détaillée du camion-laboratoire et rendra compte de ses premiers mois de campagne. Ils sont sans histoire. Avec un personnel improvisé, le camion livré le 4 août 1938 fut mis en service aussitôt, presque sans hésitation de début. Les résultats donnèrent d'emblée toute satisfaction. Tous les avantages que l'on pouvait attendre du programme furent réalisés sans aucun accroc ni défaillance. Le groupe électrogène a donné toutes les preuves de son utilité. Le camion a pu être chargé des missions les plus diverses et les plus urgentes, il les a toujours toutes remplies sans coup férir. L'aménage-

ment du détail, conforme aux offres retenues, est de toute première qualité, aussi soigneusement étudié et adapté que l'ensemble. Je citerai notamment le support de l'ampoule en ordre de route et le statif de fixation en ordre d'opération. Le camion-laboratoire-radiographique de l'Administration des Ponts et Chaussées, réalisé par les soins de l'Université de Liège, paraît certes l'installation du genre la plus perfectionnée et la plus efficace, non seulement en Belgique mais même à l'étranger.

Il a été construit et équipé conformément à la commande qui était entièrement établie lors de ma communication de février 1938, aux Journées de la Soudure de l'A. I. Lg. La proposition de commande a été transmise à l'Administration des Ponts et Chaussées le 5 mars 1938, avant l'accident du Pont de Hasselt, qui date du 15 mars. Ceci rectifie une information inexacte parue dans un quotidien bruxellois, affirmant que le camion-laboratoire a été décidé postérieurement à l'accident. La décision, ainsi qu'il sera montré plus loin, remontait à plusieurs mois avant l'accident. Ce qui précède met également au point l'opinion rapportée par le même quotidien, au sujet de l'origine de l'inspiration du camion-laboratoire. Je crois utile de compléter cet exposé par celui des raisons qui expliquent, à mon sens, la réussite. Cela me paraît utile surtout parce que, en matière de contrôle de constructions soudées, il n'existe pas encore de doctrine ou de routine suffisamment établie, ni d'organisation assez stable ou assez éprouvée. Il en résulte inévitablement des tendances diverses, dont l'action provisoirement désordonnée peut engendrer la confusion ou le doute. Dans ces circonstances, l'analyse des conditions qui ont conduit au succès est utile pour l'orientation générale.

Comme il s'agit essentiellement d'applications, même si leur caractère est nouveau, les conditions les plus favorables ne sont pas nécessairement celles de la meilleure connaissance des moyens d'investigation à mettre en œuvre, mais bien celles de l'appréciation la plus judicieuse de la destination, des objets et du théâtre particulier d'opération. Projeter, organiser et construire, c'est prévoir et pour prévoir, il faut connaître. L'adaptation pratique du camion-laboratoire aux circonstances de son emploi dans les ateliers de construction, sur les chantiers de montage et sur les ouvrages dans leur site propre, peut être considérée comme l'effet de l'expérience professionnelle.

Pour ce qui est plus particulièrement du contrôle des soudures, une assez longue préparation a précédé la dernière réalisation. Le laboratoire d'essais des constructions du Génie Civil s'est occupé, dès les premières années de sa fondation, à partir de 1931, des assemblages de la construction soudée, en vue de l'élaboration du projet de la charpente métallique de l'Institut du Génie Civil au Val-Benoît. C'est ce qui permit l'adoption des propositions de la S. A. d'Ougrée-Marihaye relative à l'emploi d'acier spécial 58/65 kg/mm<sup>2</sup>. L'Administration des Ponts et Chaussées y fit effectuer, dans la suite, des essais

préparatoires à la rédaction de ses conditions de réceptions d'électrodes. En été 1936, le laboratoire fut chargé d'une étude sur des phénomènes spéciaux de la construction soudée (retrait et tensions internes) pour le compte commun de l'Etat et d'un consortium de constructeurs. Ce travail débuta par une enquête sur les accidents qui s'étaient produits à des ouvrages soudés, au sujet de laquelle un rapport fut déposé en octobre 1936. La première série d'essais fit l'objet d'un autre rapport au début de 1938. M. Louis en a rendu compte sommairement lors des Journées de la Soudure de l'A. I. Lg. Le travail est en cours de continuation.

Au cours de l'été de 1937, l'Administration des Ponts et Chaussées voulut bien me pressentir au sujet de la possibilité d'entreprendre le contrôle radiographique de certains ponts soudés. Ce fut le point de départ d'une collaboration plus active entre l'Université de Liège et l'Administration. Des conversations engagées avec l'Administration résulta la constitution d'un service spécial de contrôle des ponts et constructions métalliques, principalement soudés, confié à M. H. Louis qui venait d'être nommé ingénieur des Ponts et Chaussées et qui avait collaboré aux essais précités. Ce service devait travailler en liaison étroite avec mon laboratoire, auquel M. Louis était attaché. Il y fut d'ailleurs dans la suite nommé assistant. Le service entra en activité en octobre 1937. Il eut d'emblée tant à faire que M. Louis fut plus ou moins empêché de prendre la part prévue aux travaux du laboratoire. Une des premières activités du service fut l'étude du camion-laboratoire radiographique. Elle fut entreprise au début de 1938 et les propositions transmises à l'Administration par mes soins au début de mars. La commande officielle fut faite au début d'avril et l'installation livrée le 4 août.

Rien n'a donc été improvisé ni précipité. M. Louis et moi avions une connaissance et une information du problème qui nous a permis d'emblée un plan pratique. Les offres ont été demandées au début selon ce plan et l'on ne s'en est pas écarté pour la réalisation. La collaboration entre le service de contrôle des Ponts et Chaussées, entièrement autonome de l'Université, et le laboratoire a donné de bons résultats. Elle est basée sur le principe de la réciprocité. Elle a été également utile aux deux parties en les dotant d'un moyen d'investigation puissant et efficace, utile au progrès de la construction et à la sauvegarde de la réputation des constructeurs belges.

Certes, l'introduction pratique de la radiographie dans un service universitaire de recherche et d'essai et dans un service de construction est encore une nouveauté. Elle vient cependant à son heure et elle est devenue nécessaire parce que possible.

Elle est un développement de l'évolution constatée en 1937 par le Congrès international d'essais des matériaux. Déjà, l'emploi pratique du microscope, selon ses diverses techniques, s'étend de plus en plus. M. Louis et moi avons proposé et appliqué l'usage du microscope sur les ponts soudés, en rase

campagne. Nous comptons encore consacrer des efforts à cette méthode d'investigation. L'ingénieur des constructions est, en fait, un physicien appliqué, comme il est un mathématicien et un mécanicien appliqués. Il est conforme à sa mission qu'il cherche à tirer parti de l'utilisation des découvertes de la physique. Ce faisant, il n'empiète nullement sur le domaine du physicien; il contribue au contraire à la diffusion de sa science. Et il n'y a pas lieu de craindre aucun inconvénient de son zèle, s'il se cantonne dans le domaine de sa profession et s'y applique avec exactitude, en raison uniquement de sa compétence propre.

## II. — LE MATERIEL ET LES OPERATIONS DE CONTROLE RADIOGRAPHIQUE

par H. LOUIS,

Le contrôle des constructions soudées revêt des formes multiples qui se classent d'après le moment où on effectue le contrôle : avant, pendant ou après l'exécution des soudures, d'après les défauts que l'on veut déceler et les moyens mis en œuvre pour les déceler.

Les méthodes de contrôle à postériori sont de deux types : les méthodes destructives et les méthodes non destructives. Les premières consistent à prélever des éprouvettes servant à la détermination des caractéristiques métallurgiques et mécaniques du joint soudé ou à sonder le cordon par des forages et des fraisages pénétrant jusqu'à la zone de liaison entre le métal de base et le métal déposé.

Les méthodes non destructives les plus efficaces et d'ailleurs les plus utilisées sont : le contrôle magnétique qui permet de déceler les fissures ou certains défauts analogues voisins de la surface et le contrôle radiographique par les rayons gamma du radium ou par les rayons X. Avant d'aborder l'application de la radiographie par les rayons X à des problèmes pratiques, le rappel des principes sur lesquels repose le procédé permet de se rendre compte des possibilités ou des impossibilités de la méthode comme aussi de saisir les relations qui interviennent entre les nombreux facteurs variables qui lui sont propres. Le but du contrôle radiographique est de déceler la présence et l'importance de défauts existants à l'intérieur de l'objet soumis à l'examen ou d'une façon plus générale de qualifier l'homogénéité macroscopique de l'objet. La pièce à examiner est soumise à un rayonnement X qui par son pouvoir pénétrant très élevé passe à travers le matériau sans être complètement absorbé. L'affaiblissement des rayons varie suivant l'épaisseur de l'objet traversé et suivant sa nature. Un corps hétérogène comme c'est le cas d'une soudure défectueuse contenant des bulles gazeuses et des inclusions de laitier laissera passer des rayons affaiblis d'une manière inégale; le rayonnement à la sortie sera ainsi une image par transparence de l'objet.

Les rayons X ayant la propriété d'impressionner la plaque photographique, si on place un film photographique sous l'objet soumis au rayonnement, ce film sera inégalement impressionné : les matériaux de moindre absorption comme les inclusions de laitier ou les bulles gazeuses se caractérisant par un noircissement plus prononcé du film. L'image ainsi obtenue ne représente évidemment qu'une vue en plan des hétérogénéités rencontrées dans la pièce.

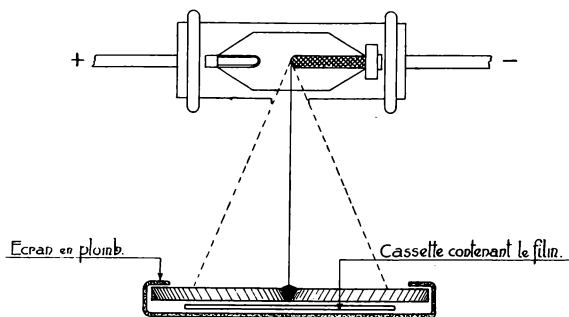


Fig. 1. — Vue schématique de la radiographie d'un cordon de soudure.

La source de rayons X universellement employée est l'ampoule de Coolidge. Dans sa forme élémentaire cette ampoule en verre dans laquelle on fait le vide comporte deux électrodes : l'une d'elle est un filament incandescent qui agit comme source d'électrons, l'autre l'anti-cathode est un bloc de tungstène qui reçoit les électrons émis par le filament. Les rayons X résultent du choc sur l'anti-cathode des électrons émis par le filament et qui se déplacent à des vitesses d'autant plus grandes que la tension appliquée entre les électrodes est élevée.

Le rayonnement ainsi produit est défini par l'intensité ou la quantité de rayons X et par la longueur d'onde ou la qualité de la radiation. Ces deux caractéristiques revêtent la plus grande importance pour la qualité de l'image radiographique et sont indépendamment contrôlables par l'opérateur. L'intensité de la radiation contrôlée par la température du filament, peut être mesurée par le courant passant dans le tube et auquel d'ailleurs elle est proportionnelle. Bien qu'actuellement il n'y ait pas de méthode simple permettant la mesure directe de l'intensité des rayons X, le courant du tube est un facteur suffisant pour comparer les intensités utilisées dans différentes conditions.

La longueur d'onde ou la qualité du rayonnement X détermine le pouvoir de pénétration et est contrôlable par le voltage appliqué aux bornes de l'ampoule. Pratiquement la tension des appareils utilisés pour le contrôle radiographique des constructions varie entre 150 et 250 kilovolts et leur intensité entre 4 et 8 milliampères.

L'intensité de l'image se trouvant sur le film impressionné par le rayonnement X ayant traversé l'objet, dépend de plusieurs variables dont la

première est l'intensité même de la source. Les autres conditions ne changeant pas, un tube dont l'intensité est de six milliampères donnera une image dont l'intensité de l'impression est double de celle due à un tube de trois milliampères.

L'image obtenue est aussi fonction de la distance entre le film et l'ampoule, son intensité variant d'une façon inversement proportionnelle au carré de cette distance.

L'affaiblissement du rayonnement X, donc l'impression du film, varie ensuite avec l'épaisseur de l'objet : le rapport de la quantité de rayons absorbés et de l'épaisseur traversée suit une loi exponentielle. De plus, la nature du matériau intervient, l'absorption d'un corps simple étant d'autant plus élevée que la densité du corps et son poids atomique sont élevés.

En résumé, abstraction faite de l'objet à examiner, l'intensité d'impression du film se détermine par l'intensité de la source et par la distance de celui-ci au film, mais si un objet se trouve dans le rayonnement, l'intensité de l'image est réduite dans une proportion définie qui résulte de l'absorption des rayons ; cette proportion dépendant de l'épaisseur et de la nature du matériau.

Il reste évident que les caractéristiques de la source ont de l'importance, car l'absorption est fonction de la longueur d'onde des rayons X émis ou du voltage appliqué aux bornes de l'ampoule ; des voltages élevés donnant lieu à une absorption relativement moins importante du rayonnement émis. L'obtention d'une image convenable sur le film résulte du dosage judicieux des différents facteurs qui viennent d'être rappelés : l'influence d'un voltage peu élevé étant compensée par une source plus intense ou, si l'intensité est limitée comme c'est presque toujours le cas, on utilisera un voltage plus élevé qui diminuera l'absorption.

En radiographie pratique, on possède des abaques qui servent de guide à l'opérateur dans le choix des différentes variables. Ces abaques consistent en une série de courbes à tension constante, l'épaisseur du matériau à examiner étant portée en abscisse et la durée d'exposition aux rayons X étant portée sur l'axe des ordonnées.

Les abaques sont établis pour une source de rayonnement et un matériau donnés et pour une distance définie de l'ampoule au film.

Avec de telles courbes, pour une épaisseur donnée à traverser, on choisit le voltage, d'où on déduit le temps de pose, ou inversement, s'étant fixé celui-ci, on en déduit la tension.

La relation théorique entre l'épaisseur et la durée d'exposition est telle que la variation du voltage en fonction de ces deux variables est presque linéaire si on emploie des échelles semi-logarithmiques.

Il en résulterait que l'obtention d'une radiographie avec un noircissement correct serait donc simple si l'on se servait des courbes fournies avec

l'appareil. Ce n'est pas le vrai but à atteindre, celui-ci étant de déceler les défauts possibles de l'objet examiné ou davantage encore d'utiliser au mieux les capacités du procédé afin de déterminer l'importance du plus petit défaut décelable, importance qui caractérise d'ailleurs la sensibilité de la méthode.

La grandeur réelle du plus petit défaut observable sur l'image radiographique est conditionnée par deux facteurs différents mais non indépendants l'un de l'autre.

L'un d'eux est la finesse du détail perçu sur l'image et l'autre est le contraste ou la différence d'impression comparée avec le noircissement général du film. Ce contraste, indépendamment de la nature du film utilisé est fonction des caractéristiques électriques et de l'objet soumis au rayonnement.

L'emploi de voltages peu élevés est intéressant car de faibles variations d'épaisseur des pièces à examiner donnent lieu à des variations d'intensité d'impression plus grandes qu'avec des voltages élevés. Les premiers sont donc utilisés parce que donnant un meilleur noircissement du film, mais à condition que le temps de pose soit raisonnable.

Théoriquement, à voltage égal le contraste est indépendant de l'épaisseur traversée par les rayons X c'est-à-dire qu'un défaut quelle que soit sa grandeur devrait être aussi visible dans une pièce épaisse que dans une pièce mince. Mais il en est tout autrement dans la réalité, la différence étant due à la diffusion du rayonnement X à l'intérieur de l'objet traversé.

On constate, en effet, qu'un corps quelconque placé dans un faisceau de rayons X émet lui-même des rayons X dans toutes les directions et ce rayonnement secondaire appelé aussi rayonnement diffusé impressionne lui-même le film placé sous l'objet, son influence étant un pourcentage important de l'influence du rayonnement direct principalement pour des pièces de forte épaisseur.

Cette diffusion interne du rayonnement X est d'ailleurs l'explication du fait qu'un défaut situé près de la surface de l'objet est moins visible que le même défaut situé près de la face inférieure, c'est-à-dire celle qui est la plus proche du film.

Les éléments qui favorisent l'apparition de détails ou la finesse du film radiographique sont d'ordre géométrique. Le premier est la forme du foyer émetteur de rayons X. Plus celui-ci sera localisé, plus le faisceau de rayons X sera direct et moins il donnera de flou à l'image. La puissance croissante des appareils ayant nécessité l'augmentation des dimensions du foyer émetteur, on a donné à celui-ci la forme linéaire ou, lorsque cette forme n'existe pas, on place dans l'ouverture de la cupule entourant l'ampoule, une cache en plomb dans laquelle, au moyen de glissières on peut réaliser une fenêtre de dimensions réglables.

La distance entre l'ampoule et le film influe également sur la finesse de l'image. Cette distance sera aussi grande que possible tout en n'exigeant

pas une durée d'exposition exagérée; de cette façon la direction des rayons X sera moins inclinée par rapport à l'objet à traverser et les contours des défauts se marqueront avec plus de netteté. L'image sera d'autant meilleure que la distance entre l'objet et le film sera plus faible.

Pour un foyer de dimensions données, la finesse de l'image peut se définir par le rapport des distances du tube au film et de l'objet au film. Ce rapport sera aussi grand que possible et d'après les normes américaines ne doit jamais descendre en dessous de 30.

Ayant passé en revue tout ce qui pouvait avoir une influence sur la qualité de l'image radiographique, il s'agit de déterminer la valeur des différentes variables et d'étudier les précautions à prendre quand on se trouve devant le problème pratique de radiographier une pièce d'acier d'épaisseur et de longueur déterminées.

Les films dont on dispose sont de formats standardisés : 10 × 24 cm, 10 × 48 cm, 10 × 72 cm, 6 × 48 cm, 6 × 72 cm. Il y a utilité pour la rapidité du travail à utiliser les films les plus longs mais cela n'est pas toujours possible et dépend de la forme de l'objet; de plus avec le film de 72 cm les rayons X atteignent les extrémités sous une inclinaison trop forte qui nuit à la netteté de l'image.

Les films utilisés le plus fréquemment dans la radiographie des ponts soudés ont 48 cm de longueur et 6 ou 10 cm de largeur suivant la largeur de la zone à radiographier.

Sur la pièce à examiner on repère soigneusement l'emplacement de chaque film en réalisant de film à film un recouvrement de 3 à 4 cm de façon à obtenir une image radiographique d'ensemble et complète.

L'ampoule à rayons X est placée au dessus de l'emplacement du premier film de façon à ce que sa distance au film soit de 70 cm, distance généralement adoptée dans les conditions normales d'utilisation.

L'axe du cône des rayons X est amené perpendiculairement au centre du film au moyen d'un centreur télescopique que l'on enlève sitôt le réglage terminé. Connaissant l'épaisseur à radiographier, on consulte l'abaque des courbes de tension en fonction de l'épaisseur et de la durée d'exposition. Ayant choisi la courbe de tension, son intersection avec la verticale tracée à partir de l'épaisseur de la pièce détermine le temps de pose. Cet abaque est établi pour une distance foyer-film de 70 cm et pour l'intensité donnée, des courbes de correction étant prévues pour différentes intensités. Si par suite de la position de l'objet sa distance à l'ampoule est différente de 70 cm il suffit de tenir compte que le temps de pose varie proportionnellement au carré de la distance.

Ces abaques fournis par le constructeur servent surtout de guide; en tenant compte de l'expérience journalière, l'opérateur peut, au bout d'un certain

temps tracer des courbes plus exactes et qui répondent vraiment aux conditions pratiques d'utilisation des appareils.

L'ampoule étant en station, voyons les propriétés du film radiographique et les précautions que nécessite sa mise en place sous l'objet à radiographier.

À l'inverse des films photographiques émulsionnés sur une face, les films utilisés en radiographie sont émulsionnés sur les deux faces. Le contraste est ainsi augmenté car les rayons X à courte longueur d'onde par leur grand pouvoir de pénétration peuvent influencer les deux couches sensibles constituées par les grains de bromure d'argent. On a vu précédemment l'intérêt de l'emploi des voltages peu élevés donnant un meilleur contraste mais à condition que le temps d'exposition soit raisonnable.

Pratiquement cette durée est rendue environ dix fois moins élevée par l'utilisation d'écrans renforçateurs. Ces écrans sont constitués par un carton mince recouvert sur une face de cristaux de tungstate de calcium ayant la propriété de devenir fluorescents sous l'action des rayons X. Leur rayonnement lumineux riche en rayons ultra violets agit très activement sur les couches sensibles du film. Ce dernier appliqué étroitement entre deux écrans renforçateurs se place dans une cassette métallique ou dans une cassette en caoutchouc. La première est généralement utilisée dans la radiographie des pièces planes tandis que la seconde se justifie lorsque la configuration de l'ensemble exige une déformation du film : pièces cylindriques, soudures d'angle, etc... Le placement du film dans sa cassette ne peut évidemment se faire que dans une chambre noire et la cassette doit être absolument hermétique à la lumière.

La préparation du film est cependant encore incomplète s'il s'agit d'une pièce de forte épaisseur pour laquelle le rayonnement diffusé peut nuire d'une façon importante à la qualité de l'image par la diminution du contraste.

Il est heureusement possible, sinon de supprimer les rayons secondaires, d'en diminuer tout au moins l'action sur le film. Leur longueur d'onde étant, en effet, beaucoup plus grande que celle des rayons directs ils sont beaucoup plus facilement absorbés que ceux-ci. Si on interpose entre la pièce et le film une mince feuille de métal à poids atomique élevé, les rayons secondaires seront fortement affaiblis tandis que les rayons directs à courte longueur d'onde continueront à passer.

Pratiquement, on interpose une feuille de plomb de 0,25 à 0,5 mm d'épaisseur ou une feuille d'étain de 0,5 à 1 mm d'épaisseur. On peut aussi employer les deux filtres simultanément car le plomb soumis à un rayonnement X de grande longueur d'onde émet lui-même des rayons X de longueur d'onde 2,5 fois plus grande mais qui ont sur le film le même effet que le rayonnement diffusé. Ce deuxième rayonnement secondaire dû au plomb

peut alors être absorbé par une mince feuille d'étain.

L'introduction de ces filtres en plomb ou en étain conduit naturellement à une augmentation de la durée d'exposition ou du voltage à appliquer aux bornes de l'ampoule. Leur emploi se justifie pour l'acier à partir d'une épaisseur de 50 mm.

La cassette contenant le film, les écrans et les filtres étant placée sous la pièce à contrôler, il reste à prendre un ensemble de précautions indispensables à l'obtention d'une radiographie correcte. En plus du rayonnement secondaire dû à la diffusion du rayonnement direct à l'intérieur de l'objet à radiographier, il existe en effet, un rayonnement secondaire extérieur. Tous les objets qui environnent le film : la cassette, le support de l'ampoule, le sol, etc..., et qui se trouvent dans le rayonnement direct de l'ampoule émettent à leur tour des radiations secondaires à plus grande longueur d'onde, mais suffisamment intenses pour provoquer un voilement du film.

Il faut donc soustraire le film à ce rayonnement en l'entourant d'écrans constitués par des feuilles de plomb de 3 à 4 mm d'épaisseur et en protégeant la face arrière de la cassette par un écran analogue. De plus il convient de délimiter par du plomb la partie à radiographier car le film ne peut en aucune façon être directement exposé au rayonnement primaire dont l'effet serait un noircissement trop prononcé nuisant à l'interprétation des parties utiles de l'image.

Si la pièce à contrôler comporte des trous forés suivant l'épaisseur il convient de les délimiter par du plomb placé à la surface pour empêcher l'exposition du film aux rayons directs.

La protection contre le rayonnement secondaire constitue un problème spécial à résoudre dans chaque cas particulier et de sa réalisation dépend presque toujours la qualité des radiographies.

Il reste encore à déterminer le sensibilité du contrôle c'est-à-dire l'importance du plus petit défaut décelable.

À cet effet on place sur la pièce à radiographier (donc sur la face située du côté de l'ampoule) un test de sensibilité. Nous avons adopté celui défini par les normes allemandes. Il est constitué pour les pièces d'acier allant jusqu'à 50 mm d'épaisseur par une pochette de caoutchouc contenant sept fils d'acier calibrés dont les diamètres varient de 0,1 à 0,7 mm. La présence de ces fils permet de calculer l'importance des défauts marqués sur le film.

En supposant l'épaisseur de la pièce égale à 15 mm et le diamètre du fil d'acier le plus fin vu sur le film égal à 0,3 mm, on peut conclure que l'importance du plus petit défaut visible est de 2% par rapport à l'épaisseur de l'objet.

Pour des épaisseurs de 50 à 100 mm. le pénétromètre est constitué par sept fils d'acier calibrés dont les diamètres s'échelonnent entre 0,8 et 2 mm.



Ce test de sensibilité doit être placé sur la pièce à radiographier et non entre le film et la pièce. De cette dernière façon, il apparaîtrait cependant plus nettement sur le film parce que la diffusion du rayonnement X rend une hétérogénéité d'autant plus visible qu'elle est plus éloignée de la surface initialement frappée par le rayonnement, mais la sensibilité de la méthode serait inexacte et supérieure à la réalité. Il est nécessaire de pouvoir localiser exactement sur l'objet les défauts internes montrés par le film soit en vue d'une réparation ou d'un sondage éventuels. A cet effet on place le long de la zone à radiographier un mètre « de Wulf » dont la graduation tous les 25 cm est constituée par des chiffres en plomb. Avant la radiographie, on repère soigneusement la position du mètre par rapport aux extrémités de la pièce à contrôler. Les chiffres en plomb ayant empê-

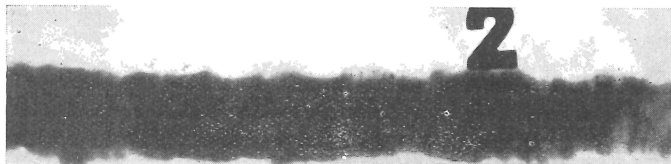


Fig. 2a. — Radiographie d'une soudure en X (tôle de 18 mm) : soudure sans défaut, présentant une surépaisseur assez importante par rapport au métal voisin.

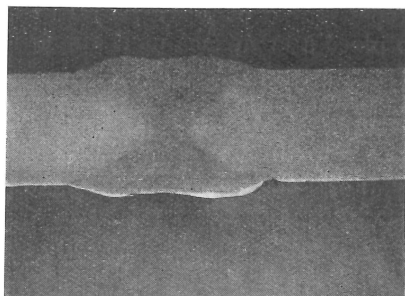


Fig. 2b. — Coupe transversale dans la soudure représentée figure 2a.

ché le passage des rayons X sont marqués sur le film, celui-ci peut se superposer à la pièce et les défauts montrés par le film sont directement repérés sur la pièce.

Connaissant les précautions principales permettant d'obtenir une bonne image radiographique, voyons maintenant l'application des rayons X au contrôle des constructions soudées.

Ainsi qu'il a été rappelé précédemment, ce contrôle est exercé à posteriori et son but est de définir l'état macroscopique interne des cordons de soudure. Un cordon de soudure soumis en même temps que le métal voisin à un rayonnement X se marque sur le film radiographique par une zone claire

de la largeur d'un cordon. Celui-ci présente, en effet, la plupart du temps une surépaisseur par rapport au métal de base et de ce fait est moins perméable que ce dernier au rayonnement direct.

Le contraire peut d'ailleurs se produire soit pour un chanfrein insuffisamment rempli ou pour une soudure en V dont la reprise au dos n'a pas été exécutée, dans ces cas la soudure apparaît sous la

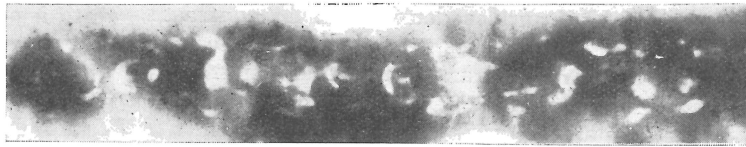


Fig. 3. — Radiographie d'une soudure en X (tôle de 20 mm) : très nombreuses inclusions de laitier.

forme d'une bande noire de largeur égale ou inférieure à la largeur du cordon.

Cependant, le noircissement de l'image radiographique d'une soudure normale n'est jamais uniforme par suite des irrégularités de surface dues à l'exécution du cordon. La figuration de ces irrégularités sur le film peut même prêter à confusion lors de l'interprétation, c'est pourquoi il serait préférable, tout au moins pour les soudures bout à bout, de faire disparaître par meulage ces rugosités superficielles et même de supprimer toute discontinuité d'épaisseur entre la soudure et le métal.

En plus de l'avantage d'une meilleure radiographie, la continuité d'épaisseur est favorable à la résistance à la fatigue de l'assemblage : certains pays imposent d'ailleurs dans leurs règlements le meulage des soudures de résistance. Une soudure ainsi meulée et qui serait intérieurement saine ne présenterait sur le film aucune différence de noircissement avec le métal de base.

Les défauts principaux que l'on rencontre dans les cordons de soudure et qui se marquent sur la radiographie peuvent se classer de la façon suivante:

1) Les bulles gazeuses qui apparaissent sur le film sous la forme de petites taches noires de forme arrondie et bien délimitée. Elles sont tantôt disséminées et tantôt forment un alignement continu.

2) Les morsures dues à la pénétration trop forte des cordons superficiels dans le métal de base se marquent sur le bord de la soudure par une bande plus noire qui s'explique par la diminution d'épaisseur de la tôle à cet endroit. La confusion dans l'interprétation de ce défaut n'est jamais possible, sa présence pouvant être constatée de visu sur la soudure.

3) Les inclusions de laitier se présentent sous la forme de taches noires à contour irrégulier. Leur noircissement moins prononcé que pour les bulles gazeuses est dû à une différence plus grande d'absorption entre le métal et le laitier. Ces inclusions sont parfois localisées mais se présentent aussi sous la forme de longues traînées noires parallèles

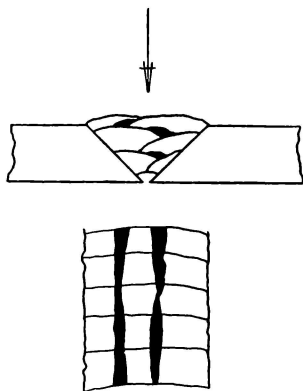


Fig. 4. — Inclusion de laitier entre les différentes passes constituant le cordon.

à l'axe de la soudure. Dans ce dernier cas, elles sont dues à un nettoyage systématiquement insuffisant des différentes passes constituant le cordon de soudure.

4) Les manques de liaison entre la soudure et le métal voisin ont aussi la forme de bandes noires

Le manque de liaison apparaît sous la forme d'une ligne noire très voisine du bord de la soudure. Le noircissement indiquant ce défaut est plus ou moins prononcé suivant que le manque de liaison entre la soudure et le métal de base résulte d'un manque de métal d'apport ou de la présence de laitier en cet endroit, le noircissement étant moins accentué dans ce dernier cas.

5) Les fissures se distinguent par des lignes foncées très fines, presque toujours d'allure irrégulière et qui serpentent à travers la soudure, leur largeur diminuant graduellement vers les extrémités.

6) Le manque de pénétration est le défaut le plus fréquemment rencontré; il se situe à la partie centrale des soudures en X et à la racine du chanfrein dans les soudures en V. Il se marque sur le film par des lignes très régulières se distinguant des fissures par une largeur plus grande. Il se trouve, de par la forme géométrique du chanfrein, dans l'axe du cordon, s'étendant sur plusieurs centimètres et parfois même sur la longueur entière de la soudure.

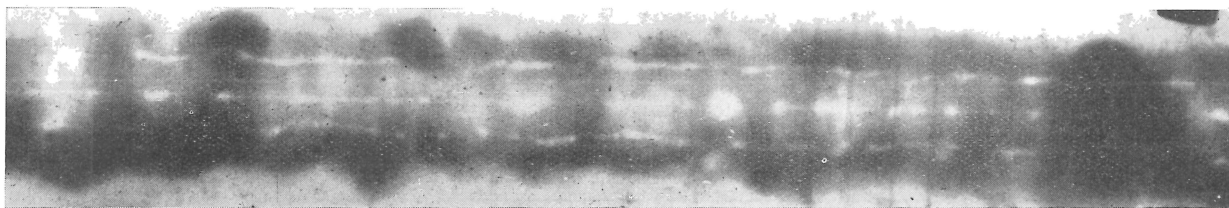


Fig. 6a. — Radiographie d'une soudure en X (épaisseur 15 mm) : manque de pénétration et manque de liaison.

parallèles à l'axe du cordon. Elles apparaissent généralement sous cette forme dans les soudures en V et en X lorsque le faisceau de rayons X est perpendiculaire à la surface du métal et dans ce cas on pourrait les confondre avec les inclusions continues de laitier bien que celles-ci aient souvent une largeur moins grande. Pour déceler plus correctement le manque de liaison, on prend généralement une seconde radiographie pour laquelle l'axe du faisceau de rayons X est dirigé suivant la surface du chanfrein de la tôle.

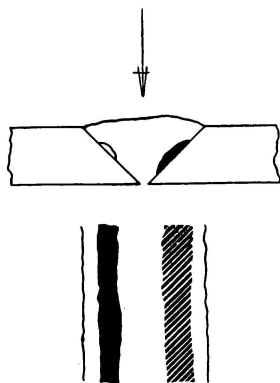


Fig. 5. — Manque de liaison entre la soudure et le métal de base résultant d'un vide et d'une inclusion de laitier.

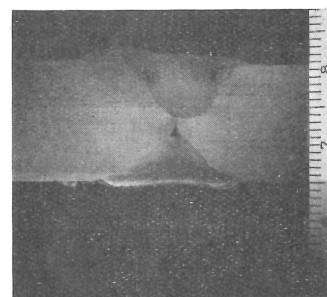


Fig. 6b. — Coupe transversale dans la soudure [représentée figure 6a.

La figuration sur le film résulte de la forme du cordon et de l'exécution de la soudure. Dans la soudure en V, surtout pour les fortes épaisseurs, le manque de pénétration est souvent décelé par la présence de deux lignes noires parallèles dues au fait que le dernier cordon constituant la reprise au dos de la soudure et exécuté au plafond, a une liaison insuffisante avec le premier cordon déposé au fond du chanfrein.

Ce défaut dans la soudure en X, se marque par une ligne noire très régulière et dont la présence s'explique comme suit. Le chanfrein en X s'emploie

dans la construction des ponts pour des tôles de 15 à 20 mm. d'épaisseur et dont l'écartement avant soudure est toujours faible, de l'ordre de 2 à 3 mm et quelquefois moins encore. Après exécution totale ou partielle de la soudure dans la première moitié de l'X, le retrait a presque supprimé l'écartement existant entre les deux tôles. Il est dès lors très difficile lors de la soudure de la deuxième moitié de l'X d'assurer une liaison parfaite avec la première. Il en résulte un manque de pénétration se confondant avec les arêtes souvent non fondues du chanfrein.

Ce défaut apparaîtra presque certainement dans la soudure en X dont le chanfrein contient un méplat central de 2 à 3 mm. Il peut toutefois être évité si, préalablement à l'exécution de la deuxième moitié de la soudure, on dégage soigneusement le fond du chanfrein au moyen d'un outil en forme de gouge de façon à atteindre le premier cordon déposé dans la première moitié de l'X. Cela ne peut se faire que par un travail long, onéreux et qui doit être très soigneusement exécuté, ce qui revient à rejeter la disposition d'un méplat central dans le joint chanfreiné en X. Pour la soudure en K une seule des tôles à assembler est chanfreinée et le manque de pénétration se confond avec un manque de liaison.

Il résulte donc que le film radiographique d'une soudure peut montrer la nature des défauts, leur nombre, leur situation et leur répartition suivant la largeur du cordon, leurs dimensions, leur importance par rapport à l'assemblage. Cependant cette importance n'est ainsi connue que qualitativement et définie par des termes encore assez vagues : on dit que la soudure présente de rares défauts, peu de défauts ou de très nombreux défauts. Les dimensions des hétérogénéités constatées ne sont d'ailleurs déterminées que d'une façon approchée d'après la richesse en contraste de l'image et seulement dans le plan parallèle au film. La détermination quantitative des défauts est faite au moyen du pénétromètre dont l'emploi a été rappelé précédemment. La position d'un défaut par rapport à l'épaisseur de la pièce peut être connue par la combinaison de deux radiographies prises sous deux angles différents. La position relative du même défaut sur les deux images et la connaissance des dimensions du chanfrein permet en effet, par des relations géométriques simples, de situer le défaut suivant l'épaisseur. La répartition des défauts dans l'espace se détermine encore par l'examen dans un dispositif stéréoscopique con-

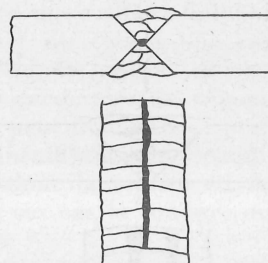


Fig. 7. — Manque de pénétration (défaut d'angle) dans une soudure en X.

venable de deux radiographies prises sous des angles différents.

Bien que l'expérience de la lecture des films radiographiques permette leur interprétation avec une suffisante exactitude, il reste néanmoins des cas douteux, pour lesquels une investigation complémentaire est nécessaire. Un contrôle macrographique ou microscopique n'est possible que dans de très rares circonstances. Pratiquement les cordons dont l'interprétation radiographique est douteuse sont fraisés : l'examen optique du trou

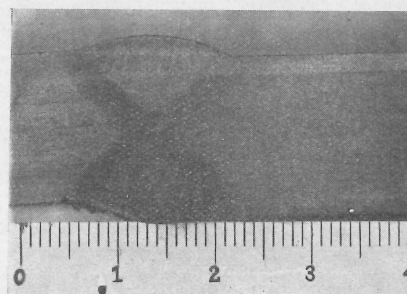


Fig. 8b. — Coupe transversale dans la soudure représentée figure 8a.

et une attaque par des réactifs appropriés permettent de se rendre compte de la nature exacte du défaut.

Voyons rapidement les formes des joints soudés rencontrés le plus fréquemment et la façon de déceler les défauts éventuels avec le maximum de netteté.

Pour les joints en V, en X et en K on procède presque toujours à une irradiation normale, quelquefois à des irradiations obliques suivant les plans d'assemblage pour déterminer les manques de liaison ou situer les défauts en profondeur.

Pour les soudures d'angle, l'irradiation doit se

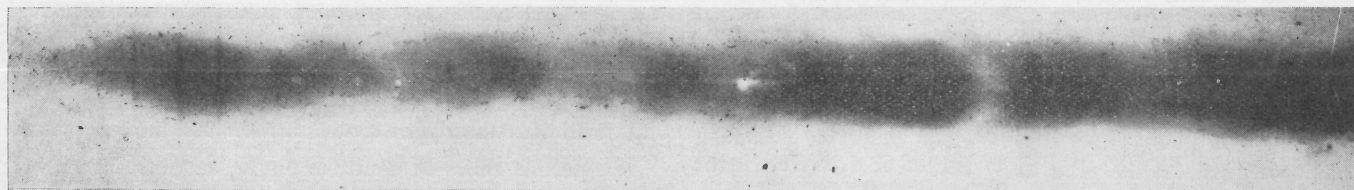


Fig. 8a. — Radiographie d'une soudure en X (épaisseur 20 mm) : manque de pénétration avec inclusion de laitier.

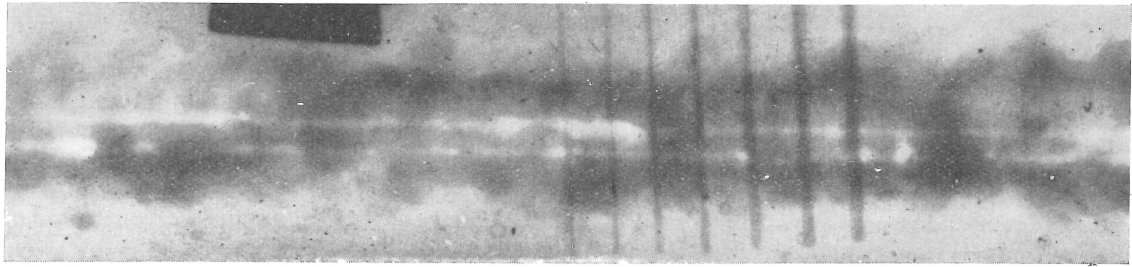


Fig. 9a. — Radiographie d'une soudure en X (épaisseur 20 mm) : manque de pénétration double.

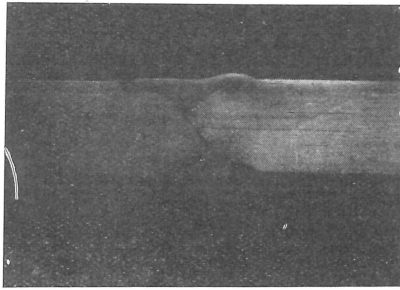


Fig. 9b. — Coupe transversale dans la soudure représentée figure 9a.

faire le long de la tôle verticale ou si cela est impossible par suite de l'encombrement de l'ampoule, on irradie suivant l'angle le plus faible. La variation d'épaisseur sous la soudure et au voisinage est compensée par l'introduction d'un coin en étain placé entre la pièce et le film : 1 mm d'étain compensant 8 mm d'acier.

Le même procédé est utilisé pour les soudures frontales, la direction d'irradiation étant perpendiculaire aux tôles.

Quelle est maintenant la valeur réelle à attribuer au film radiographique d'une soudure ?

Il est certain que dans le domaine actuel de la radiographie industrielle un film ne peut donner aucun chiffre sur la qualité du cordon ; s'il décelé les défauts macroscopiques, il ne montre en rien leur influence sur la résistance de l'assemblage.

Certaines recherches ont été entreprises en Allemagne au sujet d'une relation possible entre l'image radiographique et la résistance. La conclusion de ces recherches est d'ordre général : « Les fautes de liaison, les fissures, les scories et les fautes grossières à la racine réduisent dans une forte proportion la résistance à la fatigue des assemblages soudés. Par contre des inclusions petites et moyennes réparties sans règle n'ont pas ou ont peu d'influence sur la résistance à la fatigue à condition qu'elles ne soient pas disposées en forme de collier les unes à côté des autres. » (Berthold).

Il est certain en tout cas que certaines soudures doivent être réparées si leur radiographie fait constater la présence d'une fissure ou d'inclusions importantes de laitier, mais il est généralement admis qu'une soudure dont le film ne montre pas de défauts trop graves ne peut être rejetée par la seule considération du film.

Les règlements sont peu catégoriques à ce sujet, seules les normes américaines sont plus précises. Leurs prescriptions relatives à l'acceptation des soudures radiographiées se résument comme suit :

1) Lorsque la radiographie fait apparaître des scories, des inclusions ou des cavités dans les soudures, celles-ci sont inacceptables si les dimensions de ces imperfections dépassent  $1/3 e$  ( $e$  étant l'épaisseur de la soudure) ; si les défauts sont inférieurs à  $1/3 e$  et séparés entre eux d'au moins  $6 L$  ( $L$  étant la longueur de la plus grande imperfection), on pourra accepter la soudure pour autant que la somme des défauts soit inférieure ou égale à  $e$  sur la longueur égale à  $12 e$ .

2) Lorsque la radiographie décelé des criques ou des collages, les soudures sont rebutées.

3) Lorsque la radiographie montre de la porosité dans les soudures celles-ci seront acceptées ou refusées après comparaison avec les radiographies standard.

En général, la réparation des soudures rebutées se fait au burin pneumatique ; dans le cas de fortes épaisseurs, des radiographies intermédiaires sont prises pour constater la disparition progressive des défauts décelés. Lorsque le joint est réparé, une nouvelle radiographie permet de s'assurer de la perfection de la nouvelle soudure. Lors du contrôle par les rayons X d'une construction soudée la

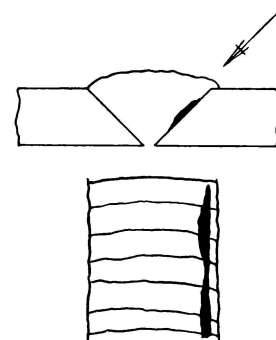


Fig. 10. — Manque de liaison entre la soudure et le métal de base (irradiation suivant une face du chanfrein).

première chose est de savoir quels sont les joints à radiographier. Les normes allemandes prescrivent pour les ponts le contrôle des soudures bout à bout de résistance et d'une partie des soudures d'angle et des soudures frontales.

En Belgique, il n'y a pas encore de prescriptions officielles ; d'une façon générale on vérifie les joints sollicités à la traction. Dans une conférence faite lors des Journées de la soudure au mois de février 1938, M. le Professeur Campus proposait dans les termes suivants une classification des soudures exigeant ou non le contrôle radiographique :

« Voici comment nous concevons finalement un contrôle coordonné en tous points.

A la base, nous plaçons toujours une étude adéquate de la construction soudée, réduisant les soudures au minimum et les plaçant aux endroits

pour lesquelles les tolérances peuvent être plus grandes.

C) Toutes les soudures dont la résistance a peu d'importance.

La répartition des soudures d'un ouvrage entre les trois classes serait faite à l'avance par l'auteur du projet ou l'ingénieur dirigeant, éventuellement après consultation du service de contrôle. Le constructeur en serait informé.

Les meilleurs soudeurs seraient affectés aux soudures A, les autres aux soudures B, les moins bons aux soudures C.

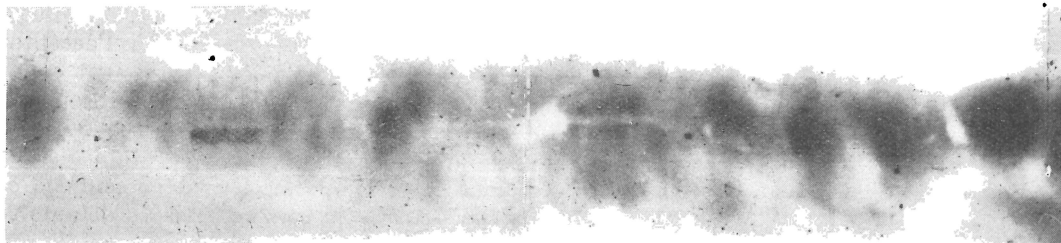


Fig. 12a. — Radiographie d'une soudure en X (épaisseur 20 mm) : manque de pénétration et inclusions localisées de laitier.

les plus sûrs. Ensuite, le contrôle préventif s'exercera sur l'acier de base et les électrodes. Le séprouvettes d'agrégation des soudeurs, la surveillance en cours d'exécution et le contrôle de la qualité des soudures seront combinés et coordonnés.

Les éprouvettes de pliage des examens d'agrégation des soudeurs seront radiographiées avant pliage et devront être parfaites. Cela n'est pas draconien mais très logique, car puisque l'on attend que la radiographie révèle des soudures d'œuvre parfaites, à fortiori doit-il en être ainsi des soudures d'examen. Cette pratique augmenterait beaucoup la connaissance des qualités des soudeurs, surtout si les éprouvettes étaient sectionnées ou fraisées pour mettre à nu les défauts internes décelés par la radiographie.

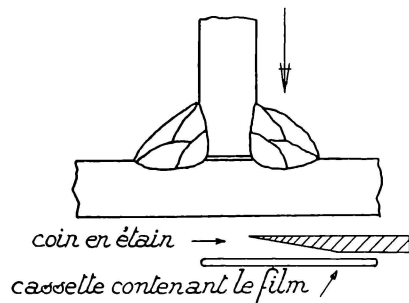


Fig. 11. — Radiographie d'une soudure d'angle.

Au point de vue du contrôle de la qualité des soudures, elles seraient divisées en trois classes :

A) Soudures dont la résistance est essentielle pour la sécurité et qui doivent être parfaites (pratiquement).

B) Soudures dont la résistance est importante, mais dépendant pas essentielle pour la sécurité,

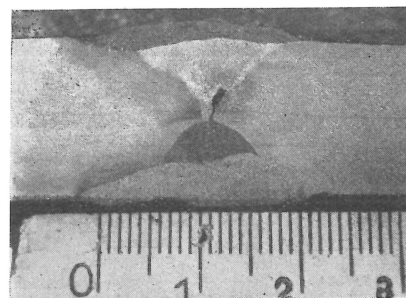


Fig. 12b. — Coupe transversale dans la soudure représentée figure 12a, au droit d'une inclusion de laitier.

Les soudures A et B seraient radiographiées partiellement et périodiquement au fur et à mesure de l'avancement des travaux. Ce contrôle serait orienté par les observations du registre de soudure et conduit de manière que chaque soudeur y soit soumis, davantage pour les soudures A que pour les soudures B. C'est d'après les résultats de ce contrôle systématique et enregistré que l'on déciderait des examens périodiques des soudeurs agréés, auxquels on renoncerait d'ailleurs pour les soudeurs dont le travail se révélerait constamment parfait à l'examen radiographique. Par contre, si ce même examen révélait fréquemment des défauts graves dans le travail d'un soudeur, celui-ci pourrait être exclu sans nouvel examen préalable.

L'ouvrage étant terminé, on compléterait l'examen radiographique de la totalité des soudures A, tandis que les soudures B ne seraient l'objet d'aucune autre vérification, si le résultat des contrôles en cours d'exécution avait été généralement satisfaisant. Les soudures C ne seraient contrôlées que si l'impression était produite que leur qualité laisserait par trop à désirer.

De la sorte, le système de contrôle serait réduit au minimum tant au point de vue technique qu'au point de vue de la dépense. Il donnerait cependant le maximum de garanties, parce qu'il serait continu et coordonné. Il exclurait toute surprise et serait ainsi le plus avantageux et le plus équitable pour tous. Toutes les personnes intéressées : dirigeants, contrôleurs, surveillants, exécutants et soudeurs, devraient être entièrement informées des résultats de toutes les opérations. Le contrôle serait ainsi également utile et édifiant pour tous. Pour les soudeurs notamment, à l'égard desquels le contrôle n'est pas dépourvu, par ses effets, de certains côtés délicats, la méthode devrait avoir comme conséquence heureuse la formation d'une véritable main-d'œuvre d'élite. »

Afin de ne pas en perdre le fruit, le contrôle radiographique d'un ouvrage doit être minutieusement préparé. Les joints à examiner sont très exactement repérés dans la construction. Sur chaque film radiographique figurent des repères, chiffres ou lettres, qui sont la reproduction de caractères en plomb placés sur la pièce à radiographier. Pour le contrôle d'un pont, ces repères présents sur chaque image sont au nombre de trois : le premier permet d'identifier le longeron, le deuxième situe le joint examiné dans ce longeron et le troisième indique le numéro d'ordre du film dans le contrôle du joint si les dimensions de celui-ci exigent plusieurs radiographies. Pour une soudure de longueur supérieure à la longueur du film utilisé, on place un mètre de Wulf avec chiffres en plomb qui, ainsi qu'il a déjà été dit, donne l'image complète du cordon en déterminant exactement les recouvrements de film à film et permet en outre de situer exactement les défauts en vue d'une réparation éventuelle.

Pour chaque joint contrôlé, un croquis est établi qui indique l'ordre d'exécution des radiographies et donne la position exacte du mètre de Wulf. De plus dans un journal de travail tenu régulièrement, sont consignées les valeurs des variables qui interviennent dans la prise des radiographies : voltage, intensité, durée d'exposition, situation de l'ampoule.

L'application du contrôle par les rayons X à des ponts ou à des charpentes se trouvant dans l'atelier du constructeur et plus souvent encore sur le chantier, exige un matériel et des installations fort différentes de celles prévues pour les expériences de laboratoire.

Ce matériel doit, en effet, être prévu pour fonctionner en toutes circonstances, quels que soient l'endroit où se fait le contrôle, la construction à radiographier, son importance et ses possibilités d'accès.

L'appareillage pratique pour la radiographie industrielle n'existe d'ailleurs que depuis peu d'années sur le marché.

L'Administration des Ponts et Chaussées se préoccupait depuis quelque temps déjà du contrôle radiographique de ses ponts soudés, et à la

fin de l'année 1937, elle chargea M. le Professeur Campus d'établir, en collaboration avec elle, le projet d'une installation pratique.

Il apparut très vite dès le début de l'étude que l'appareillage à rayons X seul, était insuffisant pour un contrôle efficace, son utilisation dépendant trop de circonstances extérieures : situation de l'ouvrage, moyen d'accès, force motrice.

La plupart des ponts soudés sont actuellement en rase campagne et très souvent éloignés de toute ligne électrique. Le raccordement de l'installation à une ligne industrielle n'est d'ailleurs pas sans danger pour la vie de l'ampoule, celle-ci étant très sensible à des variations brusques de tension. Le principe de l'alimentation par un groupe électrogène s'imposant, il restait à déterminer la puissance de ce groupe. La radiographie pouvant montrer

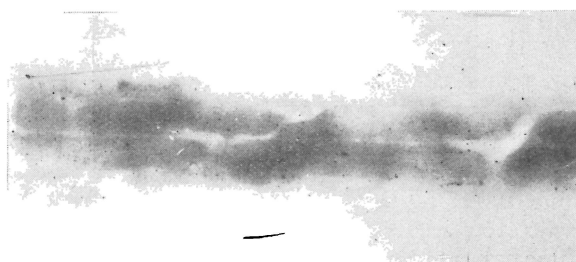


Fig. 13a. — Radiographie d'une soudure en V (épaisseur 15 mm) : manque de pénétration et manque de liaison.

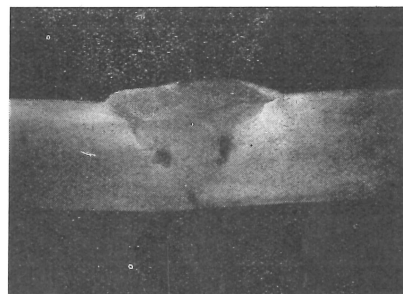


Fig. 13b. — Coupe transversale dans la soudure représentée figure 13a.

des défauts dans les soudures, il fallait envisager la possibilité de les réparer, d'où la nécessité d'un poste de soudure alimenté par le groupe. Cette solution est très économique car jusqu'à ce jour, pour effectuer un travail quelconque de soudure, l'Administration devait faire venir de lourdes remorques souvent prévues pour l'alimentation de nombreux postes de soudure ; actuellement il suffira de faire appel à un soudeur expérimenté.

Avant de procéder à la réparation d'une soudure, il est nécessaire de déterminer exactement la situation et l'importance des défauts décelés par la radiographie ; à cet effet l'installation est pourvue d'un appareil genre Schmückler permettant le sondage et le fraisage des soudures. L'étude des moyens d'accès aux soudures des ponts en service devait aussi retenir l'attention dès l'instant où

on voulait éviter toute dépendance extérieure. Pour le contrôle des joints des membrures inférieures des ponts comprenant deux maîtresses poutres, de petits échafaudages démontables sont prévus, ils peuvent être utilisés quelles que soient la largeur des semelles et la hauteur de l'âme des poutres.

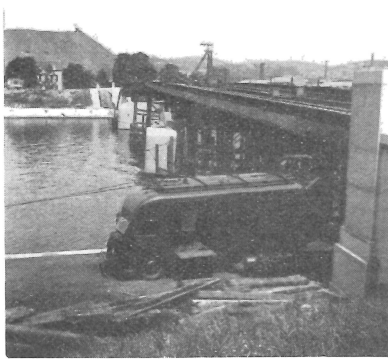


Fig. 14. — Vue générale du camion laboratoire.

Pour les soudures des membrures supérieures, il avait été prévu, dans un avant-projet, l'utilisation d'une camionnette munie d'une passerelle élévatrice analogue à celle employée pour la réparation des lignes de tramways. Cette idée fut écartée par l'impossibilité de prendre de bonnes radiographies : les vibrations dues au groupe électrogène auraient fait varier d'une façon inadmissible la distance de l'ampoule au film surtout pour de grandes hauteurs d'élévation. Ce dispositif fut remplacé par une tourelle démontable, indépendante du moyen de transport, d'une hauteur totale de 8,50 m et constituée par des éléments tubulaires. A l'intérieur de cette tourelle, un plancher mobile suspendu par des cables est mû par un treuil et peut être fixé à une hauteur quelconque. L'échafaudage monté sur galets est rendu fixe par quatre vérins prenant appui sur le sol.

Par suite de l'importance du matériel, la question du transport n'était pas la plus facile à résoudre. Après avoir éliminé pour la difficulté de circulation la solution d'une camionnette légère avec remorque, on en vint au moyen de transport unique contenant tous les appareils.

Voici brièvement résumées la description et les caractéristiques des différents éléments constituant la voiture-laboratoire.

Le camion provenant de la Fabrique Nationale est du type à direction avancée; le moteur à essence de 6 cylindres développe une puissance de 65 C. V. ; les dimensions utiles de la carrosserie sont :

longueur intérieure	5 mètres
hauteur intérieure	1,90 mètre
largeur intérieure	2,20 mètres.

Le groupe électrogène est alimenté par un moteur Diesel, fourni par les Ateliers de Construction de la Meuse, du type à deux cylindres verticaux développant 24 chevaux en marche continue.

La partie électrique provient des Constructions Electriques de Belgique : un alternateur à courant triphasé d'une puissance de 19 kVA sous  $\cos \varphi = 0,8$  fournit un courant d'une fréquence de 50 périodes. Il peut débiter en courant monophasé une puissance de 5 kVA sous  $\cos \varphi = 0,8$  à 220 volts, le débit en monophasé et en triphasé n'étant évidemment pas simultané. (Cette puissance de 5 kVA en monophasé est largement suffisante pour le fonctionnement de l'appareillage à rayons X).

Une excitatrice à courant continu débite le courant nécessaire à l'excitation de l'alternateur ; un régulateur de champ dans l'air, à commande par volant, est prévu pour le circuit d'excitation de l'excitatrice. Un tableau avec les appareils de contrôle porte aussi un interrupteur tripolaire permettant la raccordement des divers outillages à un réseau extérieur ; y figurent encore les fiches d'alimentation du poste de soudure, d'une foreuse, d'une meule électrique et de l'appareil genre Schmückler. Le groupe électrogène, d'un poids total de 1200 kg est fixé à un socle en poutrelles relié au châssis du camion ; il se trouve à l'avant, derrière la cabine du chauffeur, séparé du restant par une cloison. Un couloir aménagé autour du groupe en rend possible la visite, des volets mécaniques situés sur chaque paroi de la carrosserie assurent la ventilation.

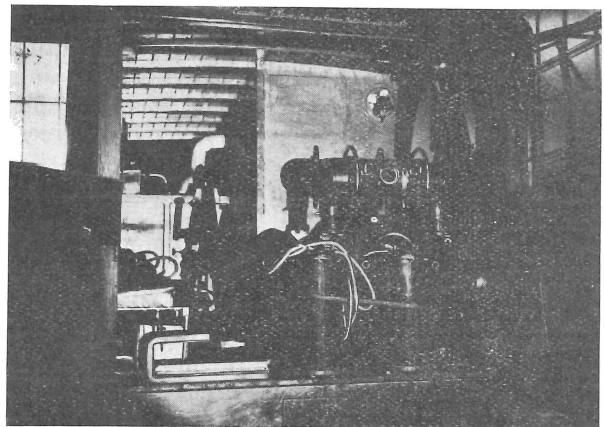


Fig. 15. — Intérieur du camion laboratoire : transport de l'installation à rayons X et chambre noire.

L'appareillage à rayons X est situé à l'arrière du camion dans des logements en bois fixés sur le plancher et assurant une parfaite stabilité des différents éléments pendant le transport.

La puissance de 250 kilovolts a été choisie en considération de l'épaisseur maximum à contrôler sur les ouvrages de l'Administration des Ponts et Chaussées. Actuellement cette épaisseur est de 75 mm et il apparaît que cette valeur, pour des raisons de fabrication et de construction ne sera pas dépassée avant longtemps.

L'installation radiographique d'un poids total de 600 kg comporte :

1) Un générateur haute tension comprenant deux éléments, chacun d'eux étant constitué

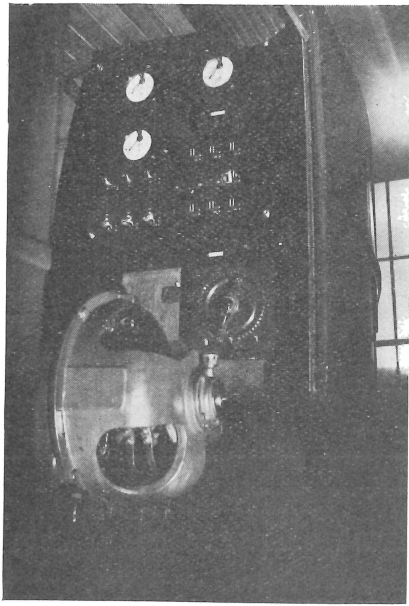


Fig. 16. — Camion laboratoire : alternateur et tableau de bord du groupe électrogène.

par un transformateur, un condensateur, un redresseur. Pour chaque élément la tension par rapport à la terre est de 125.000 volts.

2) Un meuble de commande comprenant les appareils de contrôle : un voltmètre pour le courant d'alimentation (celui-ci pouvant être maintenu rigoureusement constant au moyen d'un auto-transformateur) un voltmètre réglant la tension entre les électrodes de l'ampoule, un milliampère-mètre qui contrôle l'intensité dans le tube, une minuterie pour le contrôle de la durée d'exposition.

3) Une pompe à engrenage réalisant une circulation d'huile dans l'ampoule pour en assurer le refroidissement et l'isolement par rapport à l'enveloppe intérieure.

4) Deux câbles d'alimentation de dix mètres de longueur chacun isolés à 150.000 volts réunissant l'ampoule aux générateurs.

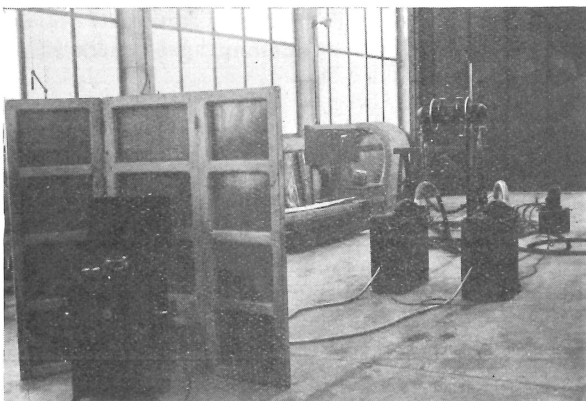


Fig. 17. — Installation radiographique en ordre de fonctionnement (remarquer le paravent de protection en plomb de 3 mm d'épaisseur).

5) L'ampoule se trouvant dans une gaine en aluminium garnie intérieurement de plomb.

6) Un statif-porte ampoule d'une hauteur de 2 mètres qui par la combinaison de divers mouvements permet une orientation quelconque de l'ampoule dans l'espace.

Tous ces éléments séparés, facilement transportables à bras d'homme sont raccordés électriquement au moyen de fiches ; le montage complet de l'appareillage ne demandant qu'une dizaine de minutes.

Une chambre noire est aménagée dans le camion derrière le groupe électrogène ; sa présence est indispensable au bon fonctionnement de l'installation radiographique, car non seulement il est nécessaire de procéder au rechargement des cassettes, mais il faut pouvoir s'assurer immédiatement sur place de la qualité des radiographies.

La chambre noire, de la hauteur du camion, a une section de 1 m × 1,5 m et deux opérateurs peuvent y travailler à l'aise.

Elle comprend tout le matériel nécessaire au développement des films : trois cuves verticales



Fig. 18. — Montage de l'installation sur un pont en construction.

de 0,80 m de hauteur contiennent le révélateur, le fixateur et l'eau nécessaire au lavage.

Un chauffe-bains électrique permet les opérations photographiques quelles que soient les intempéries et un séchoir chauffé électriquement assure un séchage rapide et régulier des films.

Le chargement des cassettes est permis grâce à la présence d'une lanterne inactinique, et un négatoscope permet l'examen et l'interprétation immédiats du film radiographique.

Des armoires suspendues aux parois contiennent tous les accessoires : cadres, porte-films, cassettes de rechange, écrans renforçateurs, etc...

Avant leur usage les films se trouvent dans la chambre noire à l'intérieur d'un coffret garni intérieurement de plomb de façon à empêcher l'action de tout rayonnement secondaire si le camion est au voisinage de l'ampoule lors de la prise des radiographies.



Par suite de la longueur des câbles, l'opérateur placé près du pupitre de commande se trouve environ à 7 ou 8 mètres de l'ampoule; néanmoins sa protection contre les rayonnements secondaires est assurée par la présence d'un paravent de 1,50 m de hauteur constitué par des feuilles de plomb de 3 mm d'épaisseur et qui entoure le meuble de commande.

L'appareillage radiographique a été fourni par les Usines Balteau de Liège à l'exclusion de l'ampoule à rayons X et de la pompe à l'huile.

Le poste de soudure de marque Philips qui fait partie de l'équipement de la voiture laboratoire est du type mixte permettant l'exécution des soudures en courant alternatif et en courant continu par l'intermédiaire des lampes redresseuses. Il se raccorde au tableau de bord du groupe électrogène; son ampérage maximum (secondaire) est de 300 ampères.

Sont également actionnés par le groupe: l'appareil genre Schmückler, une foreuse et une meule électrique destinée à l'enlèvement des surépaisseurs des cordons de soudure.

L'aménagement intérieur du camion peut encore permettre le transport confortable de trois ouvriers. A l'avant, il y a place pour une personne à côté du chauffeur.

L'échafaudage en tubes est placé sur le toit du camion: les tubes reposent dans des logements pratiqués dans un plancher à claire-voies et y sont reliés par des lanières en cuir.

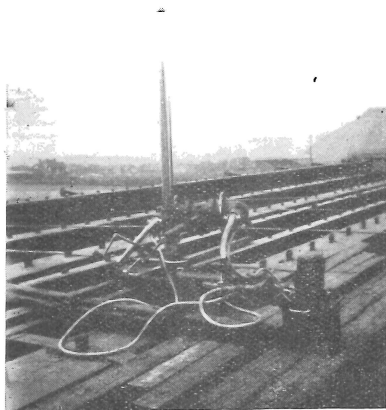


Fig. 19. — Ampoule à rayons X en station pour la radiographie d'une soudure horizontale.

L'installation qui vient d'être décrite, a été mise en service le 4 août dernier et a fonctionné depuis sans le moindre accroc.

En tenant compte des interruptions dans le travail dues au congé légal des ouvriers, aux événements de fin septembre 1938 et à la présence du camion-laboratoire à l'exposition radiologique à Mons du 4 au 8 octobre, le travail effectif a été de 56 jours jusqu'au 6 novembre 1938.

L'ampoule a pendant ce temps totalisé 70 heures de temps de pose, on a procédé à la radiographie de 160 mètres de soudure ayant de 15 à 20 mm d'épaisseur et à 70 mètres de soudure ayant de 40 à 75 mm d'épaisseur.

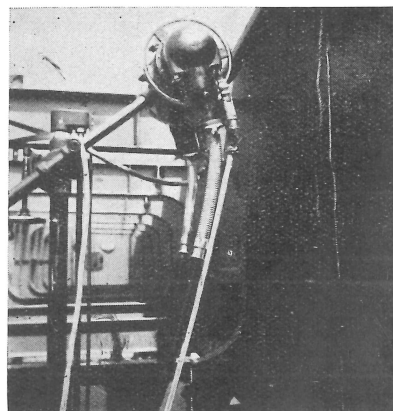


Fig. 20. — Ampoule à rayons X en station pour la radiographie d'une soudure verticale.

La plupart de ces radiographies ont été prises sur un pont en construction nécessitant de ce fait de multiples changements d'échafaudages, des transports très difficiles et de très nombreux montages et démontages de l'installation.

Le camion restait sur la rive, seul l'appareillage à rayons X était transporté, une ligne électrique de 100 mètres de longueur le reliant au groupe électrogène.

Le personnel chargé de l'exécution proprement dite des radiographies suivant des instructions très précises, est composé de quatre personnes. Un conducteur assisté d'un préparateur s'occupe de la mise en station des appareils et des cassettes, de la prise des radiographies et des manipulations photographiques.

Deux ouvriers, y compris un chauffeur-mécanicien pour la conduite et l'entretien du camion et du groupe électrogène, s'occupent du placement des échafaudages, du transport du matériel ainsi que des montages et démontages successifs de l'installation. (2)

(2) Dans l'intervalle entre la conférence et la publication, M. Homès, professeur à la Faculté polytechnique du Hainaut à Mons, a publié dans la *Revue Arcos* (n° 89 de novembre 1938) une étude intitulée: « Relations entre l'endurance et la compacité des soudures à l'arc de l'acier doux. Mesures radiographiques de la compacité ».

Nous y renvoyons le lecteur pour plus de détails. Une méthode d'appréciation objective des radiographies y est exposée et mise en rapport avec des résultats d'essais de fatigue pulsatoire. La caractéristique objective préconisée mesure la compacité ou la porosité de la soudure dans la section dangereuse; cette caractéristique se rapporte à des défauts assez uniformément répartis et de dimensions individuelles assez faibles. Nous ne pensons pas que les défauts de ce genre soient les plus fréquents et les plus redoutables pour la sécurité des ouvrages.