

Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

Band: 34 (1956)

Heft: 2

Artikel: Essais pratiqués sur de fines soudures

Autor: Künzler, H. / Bohren, H.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-874509>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 24.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Essais pratiqués sur de fines soudures

Par H. Künzler et H. Bohren, Berne

621.791.353: 621.39

Résumé. Le présent article examine les problèmes d'ordre chimique et physico-chimique que pose la soudure à l'étain. Dans la première partie, les auteurs décrivent des essais de corrosion étendus ayant pour but la recherche de fils de soudure contenant des produits de décapage actifs mais inoffensifs au point de vue corrosion. Dans la deuxième partie ils montrent l'influence de la température sur la structure des métaux soudés et sur la qualité des soudures. Ils attirent ensuite l'attention sur une possibilité d'abaisser les pertes en cuivre des tiges de fers à souder. Ils donnent enfin un résumé des résultats obtenus.

Zusammenfassung. In der vorliegenden Arbeit wird über chemische und chemisch-physikalische Probleme des Weichlötens berichtet. In einem ersten Teil werden ausgedehnte Korrosionsversuche beschrieben, die zum Zwecke hatten, Lötdrähte mit aktiven, jedoch korrosionsungefährlichen Beizmitteladern zu finden. Im zweiten Teil wird gezeigt, welchen Einfluss die Temperatur auf das Gefüge der gelöteten Metalle und auf die Qualität der Lötstellen hat. Sodann wird auf eine Möglichkeit hingewiesen, die Kupferverluste der LötKolbenstifte herabzusetzen. Im letzten Abschnitt werden die Gesamtergebnisse zusammengefasst.

Die deutsche Originalfassung des vorliegenden Beitrages erschien in den «Technischen Mitteilungen PTT» 1954, Nr. 9, S. 329...351.

I. Introduction

Les soudures jouent un grand rôle dans la technique des télécommunications. Il est facile de comprendre que l'administration des PTT doive accorder une attention particulière à la soudure, la qualité des conversations téléphoniques dépendant dans une large mesure de l'exécution parfaite des soudures dans les centraux et les câbles. Après des expériences défavorables, l'administration des PTT a interdit, il y a déjà bien des années, d'utiliser dans ses services des fils de soudure contenant de la colophane active. Il s'est avéré, en effet, que les activants corrodent les soudures et leur entourage. Seule la colophane pure, qui est inoffensive, était admise comme décapant. Mais les praticiens n'ont pas le fil de soudure à la colophane pure en particulière estime, la colophane étant un faible décapant. On ne soude que difficilement avec ce fil à la colophane pure et les durées de soudure sont en conséquence assez élevées. Le désir de posséder un fil à souder se laissant mieux travailler était, pour ces motifs, toujours en éveil chez les praticiens. En outre, il serait souhaitable de pouvoir réduire sensiblement la consommation des tiges pour le soudage. Il était donc indiqué d'examiner sur une large base le problème du soudage sous son aspect scientifique, d'autant plus que sont apparus, entre temps, sur le marché, des fils à souder contenant des décapants actifs et inoffensifs et possédant de plus les qualités de soudure désirées.

Du point de vue purement technique, il faut distinguer, lors des travaux de soudure, les opérations suivantes:

1. les parties à souder doivent être chauffées à la température de la soudure;
2. l'étain à souder doit être fondu;
3. le métal à souder doit être débarrassé des couches d'oxyde nuisibles, ce qu'on obtient avec des décapants appropriés, pour que
4. la soudure liquide puisse s'allier au métal nettoyé;
5. le produit de décapage doit être complètement éliminé de la soudure liquide, sinon la soudure contient des résidus de colophane indésirables;

6. la soudure doit, enfin, adhérer solidement au joint de soudure terminé.

Pour la pratique, il est important que ces opérations se fassent le plus rapidement possible. On peut abaisser la durée de soudure en travaillant à une température élevée et en utilisant des décapants agissant rapidement. En outre, cette durée de soudure est dépendante de la nature du métal à souder et de la composition de la soudure. Mais on ne peut pas choisir à volonté une courte durée de soudage, la dissolution de la couche d'oxyde recouvrant le métal au moyen de décapants et les phénomènes de diffusion qui se déroulent lors de l'application de la soudure liquide sur le métal devant durer un certain temps lorsqu'on veut obtenir une bonne soudure. De plus, il ne faut pas choisir une température de soudage trop élevée, sinon on risque d'oxyder la soudure, ce qui nuit à sa qualité. C'est pourquoi les soudures brûlées sont très redoutées dans le service.

Ces considérations soulèvent les problèmes suivants, très importants pour la pratique:

1. La durée de soudure peut-elle être réduite par l'adjonction à la colophane de produits complémentaires actifs sans que l'on risque par la suite de voir la soudure ou les parties métalliques voisines attaquées par la corrosion?
2. Quelle est la température de soudage la plus favorable?
3. Quelle composition de soudure convient le mieux à l'établissement de soudures fines? Actuellement, on discute vivement pour savoir si l'on doit donner la préférence à la soudure 60 Sn/40 Pb ou 50 Sn/50 Pb.
4. Comment peut-on abaisser les pertes en cuivre, respectivement l'usure des tiges des fers à souder?

Ces questions nous ont indiqué clairement la voie dans laquelle nous devons diriger nos recherches. Nous avons commencé par étudier le problème de la corrosion, puis, dans une seconde partie, nous avons fait toute une série d'essais physico-chimiques pour pouvoir répondre aux autres questions.

II. Etude de la corrosion

1. Essais avec divers décapants et soudures

1.1. Essais exécutés

Afin de reconnaître l'effet corrosif de divers décapants ainsi que la tendance à la corrosion de quelques soudures et métaux, nous avons fait trois soudures sur des bandes de tôle de 0,1 mm d'épaisseur et de 80 × 25 mm de grandeur. Ces plaquettes ainsi préparées ont été ensuite exposées à diverses atmosphères corrosives et, après des intervalles de temps déterminés, examinées au microscope. La première épreuve d'essai a eu lieu après trois semaines, la deuxième après six semaines et la troisième après neuf semaines, ce qui nous a permis d'obtenir quelques données sur la rapidité de la corrosion. Mais nous avons élargi et rendu plus précise cette méthode préconisée par G. Laubmeyer¹, Kassel. Nous n'avons pas seulement exposé les tôles soudées à l'air libre; nous avons choisi pour les essais trois atmosphères corrosives différentes, soit: air des centraux (environ 20 degrés centésimaux et 50 à 60 % d'humidité relative), air libre sous un toit à l'ombre et air saturé de vapeur d'eau (100 % d'humidité relative et 18 à 20 degrés centésimaux) dans une chambre d'essai de corrosion. Cette dernière atmosphère est naturellement la plus dangereuse, alors que la première, dont les conditions sont à peu près régulières, est la plus douce.

En outre, nous n'avons pas simplement soudé sur des feuilles de cuivre pur, mais aussi sur du laiton (63 Cu/37 Zn) et sur de la tôle de fer. Nous avons

¹ Dans le cadre de nos essais, nous avons également examiné quelques indications que G. Laubmeyer a données dans une conférence sur la soudure à l'étain. A cette occasion, nous sommes arrivés, même en nous fondant sur d'autres points de vue et méthodes, à des conceptions identiques sur les problèmes soulevés.

englobé le fer dans ces essais parce qu'il est généralement le plus sensible à la corrosion. Pour activer la corrosion, nous avons pratiqué des sillons sur la surface du métal avec du fin papier d'émeri. Selon Evans², les arêtes sont particulièrement exposées à la corrosion. De cette manière, nous avons réussi à ramener la durée des essais à neuf semaines.

Afin d'appliquer la même quantité de soudure sur tous les points à souder, nous avons coupé des fils d'un millimètre d'épaisseur à l'aide d'une machine en petits bouts d'égale grandeur, d'un poids variant entre 120 et 140 milligrammes.

Nous avons utilisé, comme décapant, de la colophane pure ou un mélange composé de colophane pure et d'un activant. Pour chaque soudure, nous avons utilisé 8 à 10 milligrammes de décapant dont le tableau I donne le résumé. Quelques fils à souder que l'on trouve ordinairement sur le marché et dans lesquels le décapant est contenu sous la forme d'un fil central, ont été inclus dans les essais. Mais leurs activateurs n'ont pas, pour des raisons diverses, été caractérisés analytiquement.

Mentionnons pour terminer que nous avons fait toute une série d'essais avec des soudures composées. Le tableau II fournit des renseignements plus détaillés. La dernière colonne de ce tableau indique les points de fusion des soudures. Il s'agit, en l'occurrence, des températures que l'on peut lire sur le liquidus du diagramme de solidification du système étain-plomb (fig. 1) pour les alliages correspondants. Les chiffres indiquent la température à laquelle la soudure est complètement liquide. La figure 2 est la reproduction des soudures d'essai après polissage. Les taches

² U. R. Evans. Korrosion, Passivität und Oberflächenschutz von Metallen. Berlin, 1939.

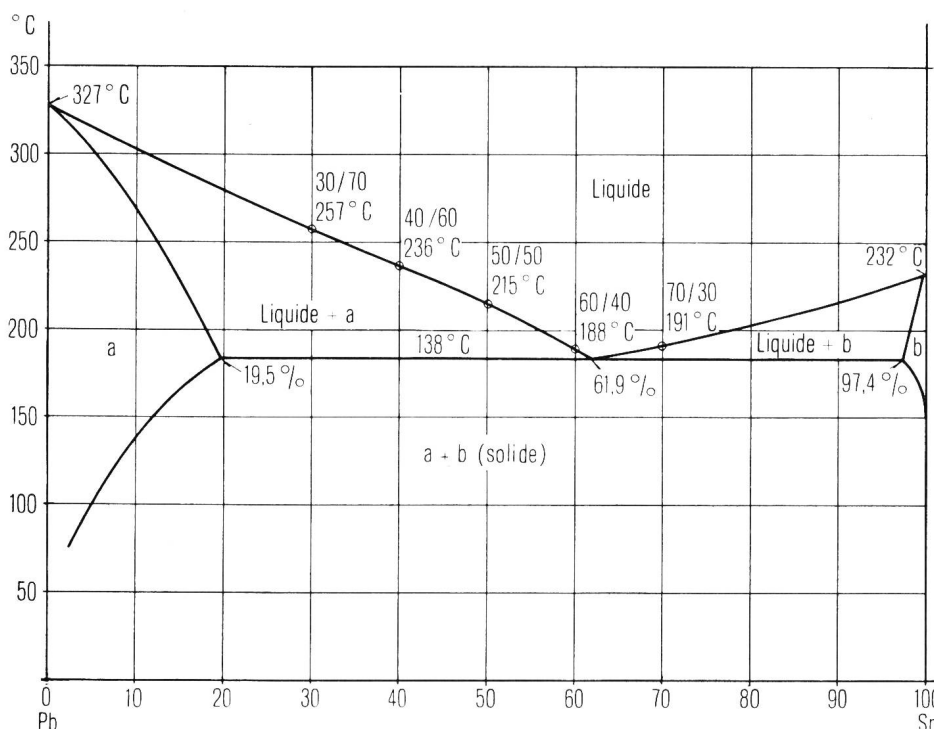


Fig. 1.
Diagramme de solidification du système étain-plomb Schmelze = liquide

sombres correspondent sur les images à la partie riche en plomb.

Les soudures d'essai ont été faites de la manière suivante: un fer à souder, marque Zeva, d'une puissance de 240 watts et ayant une pointe en cuivre de grande capacité calorifique, a été maintenu à une température moyenne de 320 degrés centésimaux à l'aide d'un régulateur. Pendant l'opération, les variations de température étaient au maximum de ± 5 degrés centésimaux. Le fer à souder prêt à être utilisé était fixé en son centre de gravité à un support autour duquel il pouvait être tourné perpendiculairement à son axe longitudinal, ceci permettant une soudure rapide dans des conditions toujours identiques. La pointe en cuivre appliquée sur la plaquette de métal préparée la touchait pendant l'opération sur une surface d'environ $\frac{1}{2}$ cm². La durée de soudage a été fixée pour tous les essais à deux secondes. Une soudure terminée est reproduite sur la figure 3. La soudure est entourée d'une couche mince, dure et cassante de colophane, entourée sur son bord extérieur d'un bourrelet de colophane de forme annulaire.

Trois soudures semblables ont été faites sur chaque plaquette de métal, de sorte que 36 soudures au total ont été préparées avec la même soudure et le même décapant sur les 12 plaquettes d'essai de chaque métal. Les tôles ainsi préparées ont été placées par groupe de quatre dans les trois atmosphères mentionnées ci-dessus et examinées au microscope après trois, six et neuf semaines. Nous avons ainsi déterminé si et dans quelle mesure des produits de corrosion se sont formés sur la plaquette métallique *en dessous* de la colophane.

Il ne nous a malheureusement pas été possible, dans le cadre de ce travail, de rechercher en détail les causes de la corrosion et de caractériser analytiquement les différents produits de corrosion. Mais les travaux de W. Feitknecht³, sur lesquels nous nous sommes appuyés pour examiner les échantillons, donnent des renseignements détaillés sur ces questions. Cependant, il s'agissait pour nous en premier lieu de savoir si les décapants actifs favorisent ou non la corrosion. C'est pourquoi nous avons surtout dû évaluer les conditions quantitatives.

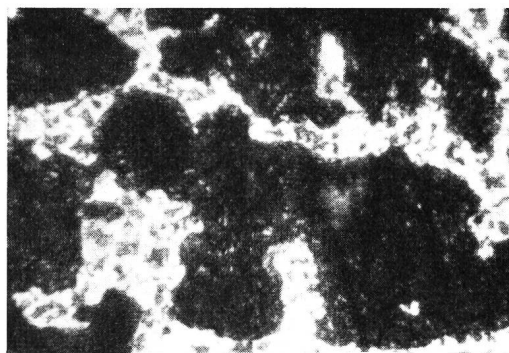
1.2. Résultats

Pour donner un meilleur aperçu de ce problème, nous nous bornons à décrire quelques phénomènes typiques, à étayer les résultats les plus importants à l'aide de microphotographies et à donner graphiquement l'interprétation des essais de corrosion. Dans les données qui suivent, il s'agit toujours de la corrosion des tôles de métal soudées (cuivre, laiton ou fer). La soudure elle-même n'a généralement pas subi de modifications profondes, de sorte qu'il n'est pas nécessaire de s'y attarder dans le présent article.

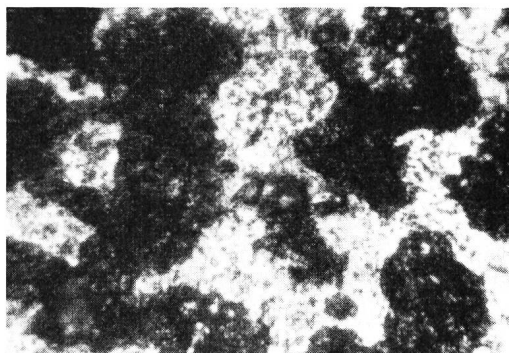
En règle générale, nous avons pu observer trois genres de corrosion différents que nous avons désignés

³ W. Feitknecht, Schweizer Archiv 18 (1952), 368, et Chimia 6 (1952), 3.

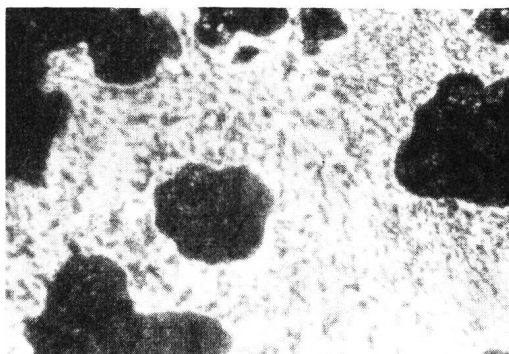
30/70



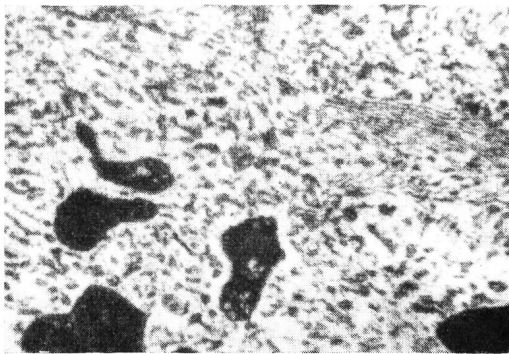
40/60



50/50



60/40



70/30

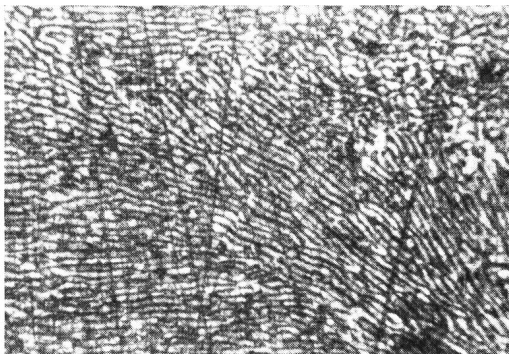


Fig. 2. Structure des soudures d'essai (grossissement: 540 fois). La composition de la soudure est mentionnée à côté de chaque figure. Le premier chiffre indique le pourcentage d'étain, le second celui du plomb

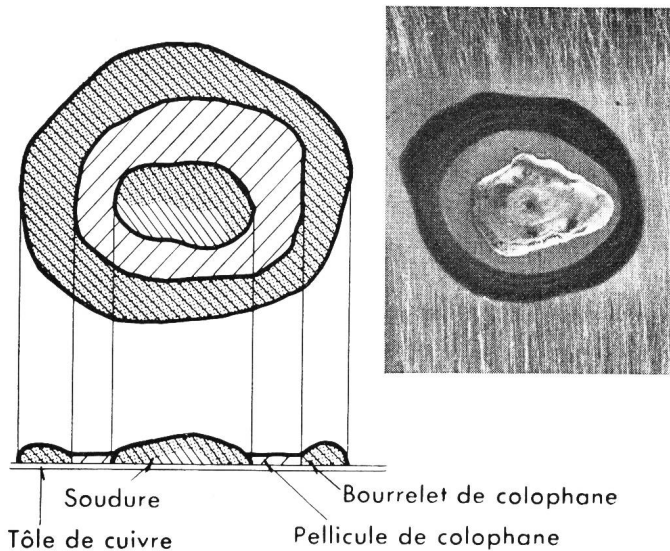


Fig. 3. Photographie et représentation schématique des soudures d'essai

par corrosion de surface, corrosion punctiforme et corrosion «pénétrante» (voir fig. 4a-c). Dans la corrosion de surface (fig. 4a), des couches sombres de produits de décomposition se forment sur le métal en dessous de la colophane. Le microscope ne révèle pas de structure cristalline. La corrosion prend des formes totalement différentes dans le deuxième cas (fig. 4b). Il se forme en certains endroits, de préférence sur les arêtes des rainures tracées, des produits de corrosion punctiformes ou d'excroissances pouvant grossir dans de telles proportions que la couche de colophane appliquée sur certaines rainures se brise. Puis la corrosion croît dans les fissures du décapant et le traverse. C'est pourquoi nous avons appelé cette attaque très puissante «corrosion pénétrante». Un exemple typique est reproduit sur la figure 4c. Les taches claires correspondent à la colophane, les taches foncées à la progression de la corrosion.

Lorsque les produits de corrosion croissent sous la colophane, ils exercent une pression sur la couche de colophane sus-jacente. Etant donné que, du fait de sa rigidité, la colophane n'a pas l'élasticité voulue pour résister à la pression, elle se brise relativement tôt et il se crée tout un réseau de fissures dans lequel l'humidité de l'air pénètre facilement. De ce fait, l'attaque nocive du métal est accélérée. Il en résulte une forte augmentation des produits de corrosion et des particules de colophane se détachent. C'est alors qu'apparaît la corrosion dite pénétrante dont nous avons déjà parlé. Sur les figures 5a et 5b, on reconnaît aisément un réseau de fissures à mailles fines et lâches. Les photographies sont mises au point sur la couche de colophane, c'est pourquoi on ne distingue pas les produits de corrosion sous-jacents. Des produits de décomposition gazeux exercent également une pression sur la couche de colophane et une action dans les fissures (fig. 5c).

La colophane pure peut, d'après les expériences faites, être utilisée sans inconvénient comme décapant pour les soudures fines. Elle ne produit, même dans les conditions les plus rigoureuses, pas ou que de faibles phénomènes de corrosion. En revanche, les activants les plus courants sont déjà dangereux à faible dose. La figure 6 montre les points attaqués de quatre plaques de cuivre exposées pendant neuf semaines à l'air libre. Pour souder la plaque a, nous avons utilisé de la colophane pure, pour les plaques b à d de la colophane pure avec 0,1 %, 3 % et 5 % de chlorhydrate d'aniline comme décapant. Seule la soude a n'a pas subi d'altération; dans les autres cas, l'extension de la corrosion punctiforme est proportionnelle au pourcentage de chlorhydrate d'aniline dans le mélange, bien que tous les échantillons aient été soumis à des conditions élémentaires identiques. De plus,

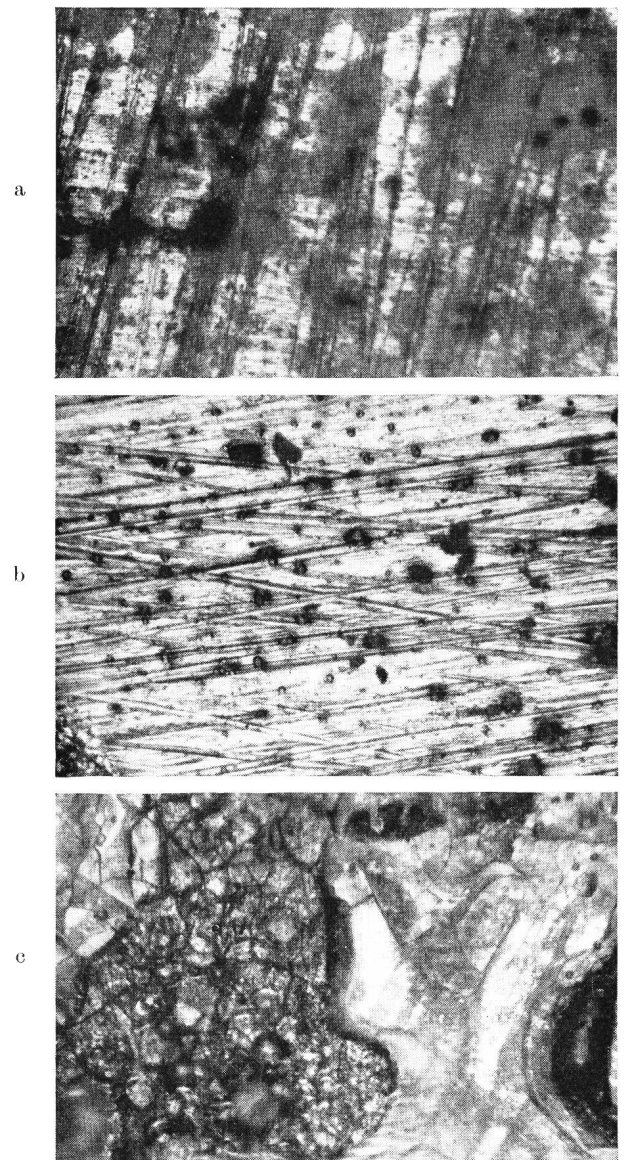


Fig. 4. Genres de corrosion: a) corrosion de surface
b) corrosion punctiforme
c) corrosion pénétrante (grossissement: 75 fois)

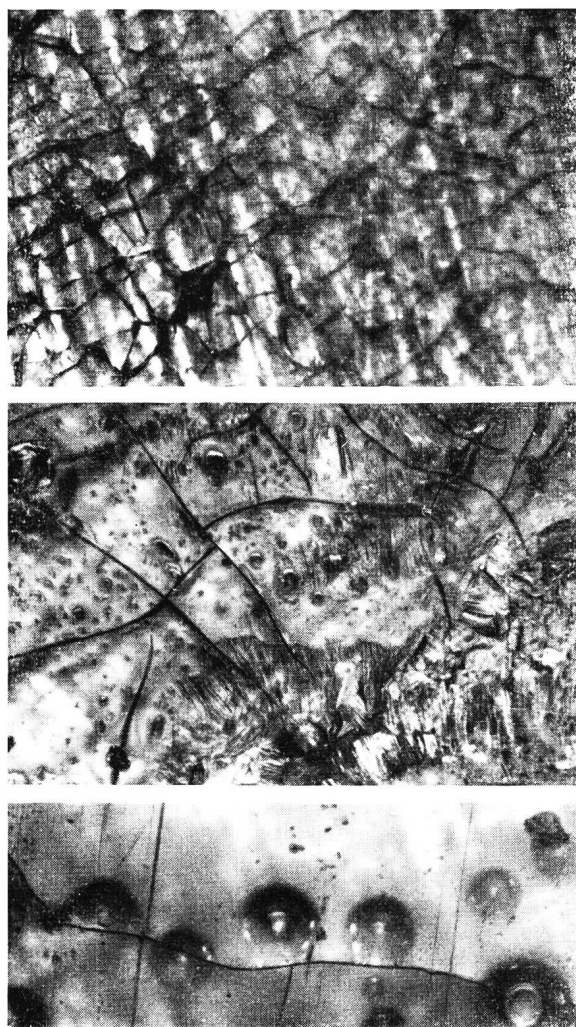


Fig. 5. Formation de fissures dans la couche de colophane de la soudure (grossissement: 75 fois). Conditions d'essai:

- a) colophane + 3% de chlorhydrate d'aniline (D), tôle de laiton, six semaines dans la chambre d'essai de corrosion (100% d'humidité relative)
- b) colophane + 10% d'acide glutamique (F), tôle de cuivre, trois semaines dans la chambre d'essai de corrosion (100% d'humidité relative)
- c) colophane + 20% d'urée (H), tôle de cuivre, trois semaines dans l'atmosphère d'un central

sur la figure 6d, on peut reconnaître le début d'une corrosion de surface sous forme de colorations foncées.

L'urée est aussi très dangereuse comme activant. La figure 7 montre l'extension de la corrosion. Il s'agit de photographies de soudures ayant été faites sur du fer avec le décapant H (voir *tableau I*). Les échantillons ont été exposés à l'air des centraux.

L'image supérieure montre l'état des soudures après trois semaines. Les bulles déjà produites lors du soudage ont agi comme centres de corrosion. On reconnaît déjà le début de la corrosion. Après neuf semaines, ces bulles faisaient place à d'importantes excroissances de produits de corrosion (corrosion pénétrante). Ces constatations sont particulièrement lourdes de conséquences du fait que les tôles d'essai dont les photographies sont reproduites ici se trouvaient dans l'atmosphère la plus douce.

a

b

c

d



Fig. 6. Corrosion dépendant de la quantité de chlorhydrate d'aniline contenue dans la colophane (grossissement: 75 fois)

- | | | |
|----------|---|---|
| Décapant | { | a = colophane pure (A) |
| | | b = colophane pure + 0,1% de chlorhydrate d'aniline (B) |
| | | c = colophane pure + 3% de chlorhydrate d'aniline (D) |
| | | d = colophane pure + 5% de chlorhydrate d'aniline (E) |

Les soudures ont été faites sur de la tôle de cuivre, soudure: 60/40. Les épreuves sont restées neuf semaines à l'air libre

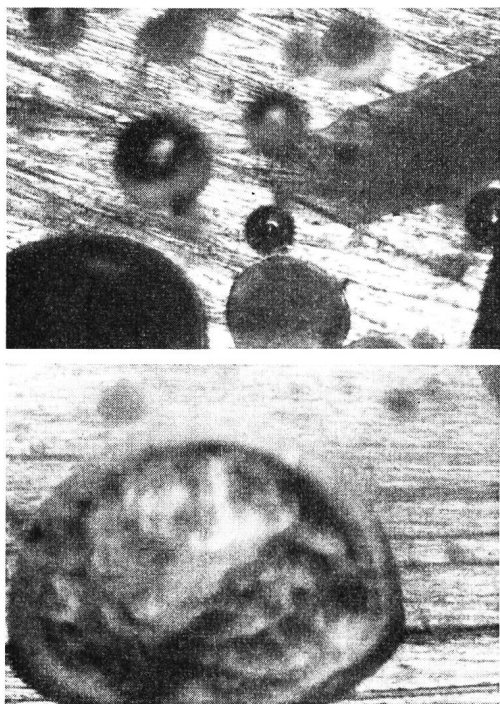


Fig. 7. Corrosion provoquée par le décapant H (colophane + 20 % d'urée). Soudure sur tôle de fer. En haut après trois semaines, en bas après neuf semaines de séjour dans l'atmosphère d'un central (grossissement: 75 fois)

Il faut particulièrement attirer l'attention sur le danger que représente le chlorure d'ammonium comme décapant pour les soudures fines. Ses effets corrodants sont illustrés sur les images de la figure 8; les plaques de cuivre ainsi que celles de fer sont déjà fortement attaquées après un court laps de temps. Ces échantillons se trouvaient à l'air libre. Les conditions sont encore plus désastreuses à l'air saturé de vapeur d'eau.

Tableau I
Décapants employés

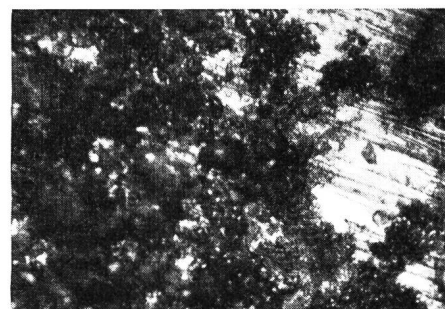
Désignation du décapant	Composition
A	Colophane pure (env. 80 % d'acide abiétique)
B	A + 0,1 % de chlorhydrate d'aniline
C	A + 1 % de chlorhydrate d'aniline
D	A + 3 % de chlorhydrate d'aniline
E	A + 5 % de chlorhydrate d'aniline
F	A + 10 % d'acide glutamique
G	A + 20 % d'acide glycolique
H	A + 20 % d'urée
I	A + 5 % de chlorure d'ammonium
K	A + acide lactique (1:1) (pâte)
L	A + lactate d'ammonium (1:1) (pâte)

Mais les acides organiques, comme l'acide glutamique, l'acide lactique et son sel ammoniacal (décapants F, K et L du tableau I) ne doivent pas être pris comme activants. La figure 9 donne des reproductions de l'attaque chimique provoquée par ces acides. A cet effet, nous avons intentionnellement choisi les exemples de différentes atmosphères de corrosion. Ni le fer ni le laiton ni le cuivre ne résistent à l'attaque.

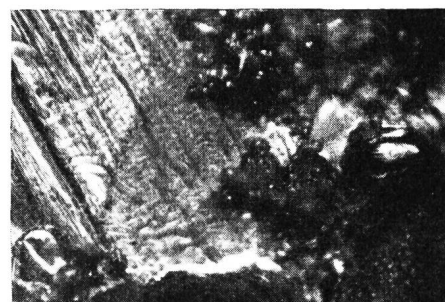
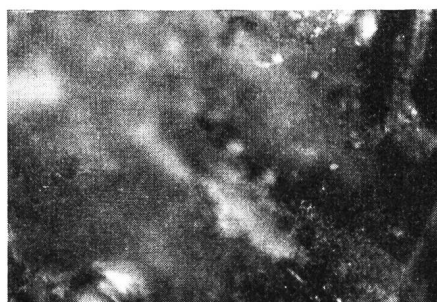
Au tableau II, nous mentionnons également les essais de corrosion pratiqués avec des fils à souder en usage dans le commerce et contenant de la colophane pure ou active sous forme de fils. Les images de la figure 10 montrent que les activants des fils à souder Elsold A, Multicore et Superspeed attaquent le cuivre à l'air saturé de vapeur d'eau. La colophane pure ne provoque aucune corrosion. Les fils à souder Elsold C et Actol se comportent comme la colophane pure, bien que leurs décapants soient actifs: ils sont donc inoffensifs.

Cu

Fe



3W



6W

Fig. 8.

Corrosions provoquées par des décapants contenant du chlorure d'ammonium (I). Série du haut: état après trois semaines, série du bas: état après six semaines. Exposition à l'air libre. A gauche tôle de cuivre, à droite tôle de fer (grossissement: 75 fois)

Pour obtenir un bon aperçu général de la question, nous avons évalué chaque essai séparément selon une échelle établie arbitrairement, ceci permettant de répartir le matériel d'essai en cinq classes de corrosion telles qu'elles sont mentionnées à la figure 11. Les résultats obtenus de cette manière sont récapitulés sur la représentation graphique de la figure 12, divisée en trois secteurs superposés. Le secteur *a* donne les caractéristiques de la corrosion des plaques de cuivre, les secteurs *b* et *c* celles des plaques de laiton et de fer. Les trois colonnes verticales désignent les différentes atmosphères corrosives, chacune d'entre elles étant

Tableau II
Fils à souder utilisés

Soudure	%Sn	%Pb	%Cu	Point de fusion*)
Fil massif	30	70		257°C
Fil massif	40	60		236°C
Fil massif	50	50		215°C
Fil massif	60	40		188°C
Fil massif	70	30		191°C
<i>Fils à souder en usage dans le commerce:</i>				
Fil à souder de colophane pure	60	40		188°C
Fil à souder de colophane pure	50	50		215°C
Elsold avec âme de colophane pure	59	39	2	185°C
Elsold avec âme de colophane pure	49,5	49	1,5	212°C
Elsold A (activé)	59	39	2	185°C
Elsold A (activé)	49,5	49	1,5	212°C
Multicore (activé)	60	40		188°C
Multicore (activé)	50	50		215°C
Superspeed(activé)	60	40		188°C
Superspeed(activé)	50	50		215°C
Elsold C (activé) résiste à la corrosion	59	39	2	185°C
Actol (activé) résiste à la corrosion	60	40		188°C

* D'après la branche liquidus du diagramme de solidification étain/plomb.

de nouveau subdivisée en trois selon le relevé des essais après trois, six et neuf semaines. Les décapants A à L (voir *tableau I*) et les fils à souder en usage dans le commerce que nous avons utilisés sont mentionnés en ordonnées. Les résultats que nous avons obtenus avec le fil à souder Actol ne sont pas reportés sur la figure 12, ces essais n'ayant pu être exécutés qu'après coup. Mais ils correspondent à ceux de la soudure Elsold C.

En examinant la figure 12, on voit immédiatement que la colophane pure (A) est inoffensive; elle n'attaque ni le cuivre ni le laiton, même dans les conditions les plus défavorables. Seules les tôles de fer présentaient sous la colophane des traces de corrosion de la classe 3: «faible corrosion». Ce fait est d'une grande valeur pour l'appréciation de la limite de sécurité de la colo-

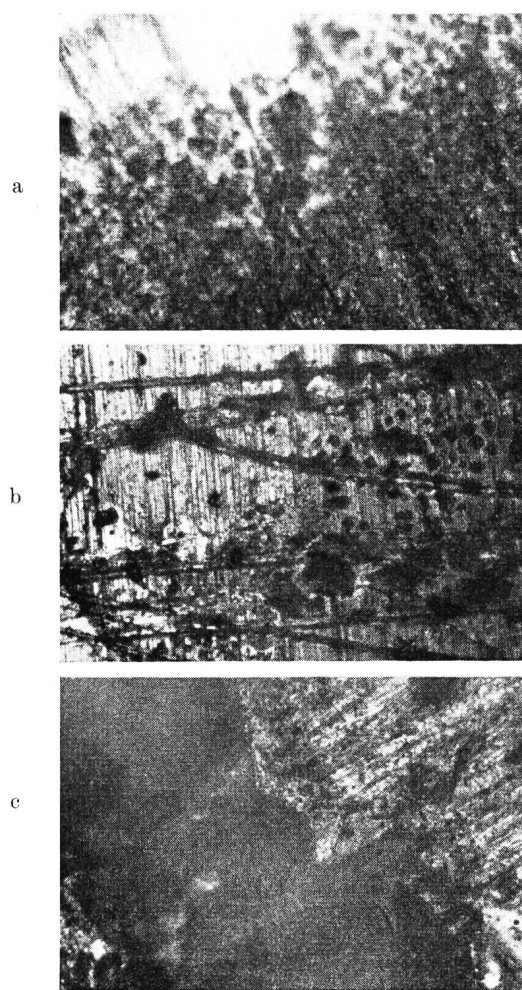


Fig. 9. Corrosions provoquées par des acides organiques ou leurs sels (grossissement: 75 fois)

- a) Décapant: colophane + acide lactique 1:1 (K), tôle de fer, trois semaines dans l'atmosphère d'un central;
- b) Décapant: colophane + lactate d'ammonium 1:1 (L), tôle de laiton, trois semaines à l'air libre;
- c) Décapant: colophane + 10 % d'acide glutamique (F), tôle de cuivre, trois semaines dans la chambre d'essai de corrosion (100 % d'humidité relative)

phane. Pratiquement, la colophane pure s'est révélée inoffensive. On peut ainsi escompter le même résultat avec les fils à souder qui se sont comportés de manière identique lors de nos essais. La figure 12 montre que seul le fil à souder Elsold C et le fil Actol, examiné après coup, correspondent à la colophane pure et qu'ils peuvent être déclarés pratiquement inoffensifs. Tous les autres décapants attaquent déjà le cuivre, le laiton et le fer dans des atmosphères assez clémentes, s'il existe des traces d'humidité; c'est pourquoi ils ne peuvent pas être admis pour les soudures fines.

On sera peut-être surpris de ce que la figure 12 ne tienne pas compte de la composition de l'alliage des soudures. Dans nos essais, elle n'a exercé aucune influence sur les phénomènes de corrosion, car, malgré la composition différente de l'alliage, les résultats étaient identiques pour le même décapant.

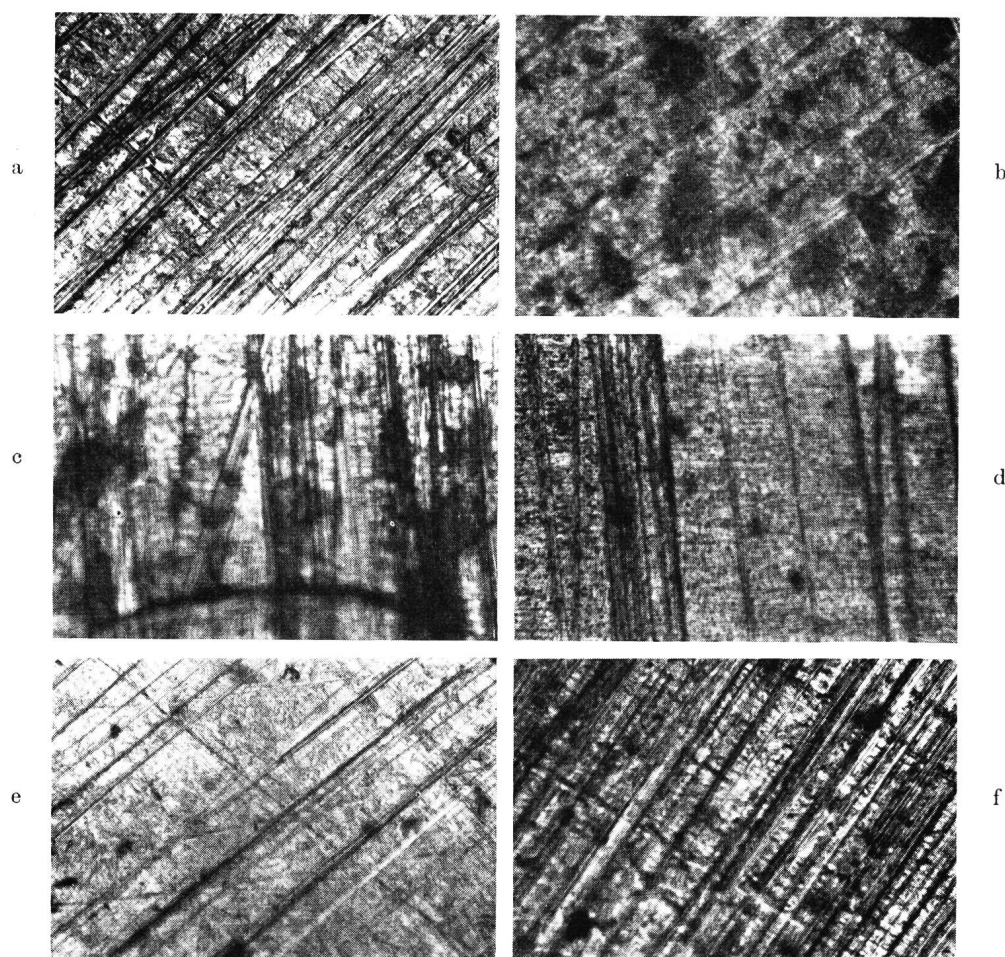


Fig. 10.

Essais de corrosion avec des fils à souder du commerce

- a) fil de colophane pure
- b) Elsold A
- c) Multicore
- d) Superspeed
- e) Elsold C
- f) Actol

Conditions d'essai: Soudure: 60/40, tôle de cuivre, neuf semaines dans la chambre d'essai de corrosion à 100% d'humidité relative (grossissement: 75 fois)

2. La corrosion en fonction de la durée de soudage

2.1. Essais effectués

Etant donné que, dans l'exploitation, les soudures ne sont pas toutes faites dans le même laps de temps – cela dépend de l'habileté du soudeur – nous avons étudié si le danger de corrosion augmentait lorsque le décapant était maintenu assez longtemps à la température de soudage. Nous avons effectué ces essais avec le fil massif 50 Sn/50 Pb, en utilisant les décapants A, C, E, H et I (voir *tableau I*). Les soudures ont été faites dans les mêmes conditions que celles que nous avons décrites sous 1.1., à l'exception de la durée de soudage que nous avons fait varier. Pour nous conformer le plus possible à la pratique, nous avons fixé les durées de soudage à deux, quatre et six secondes. Nous n'avons soudé que sur du cuivre (température de soudure: 320 degrés centésimaux, ± 5 degrés centésimaux), puis nous avons exposé les épreuves pendant quatre semaines à une atmosphère de 100% d'humidité relative et de 18 à 20 degrés centésimaux. A la suite de ce laps de temps, nous avons examiné ces épreuves au microscope pour évaluer la quantité des produits de corrosion engendrés sous la colophane.

2.2. Résultats

Après un séjour de quatre semaines dans la chambre d'essai de corrosion (100% d'humidité relative), les différentes épreuves de chaque série d'essais présen-

taient le même aspect. Aucune différence n'a pu être décelée entre les plaques de cuivre soudées en deux, quatre ou six secondes. Les données quantitatives de l'ensemble des phénomènes de corrosion sur les différentes soudures étaient toujours les mêmes. La durée de soudage n'exerce, par conséquent, aucune influence sur l'intensité de la corrosion dans les normes déterminées.

3. La corrosion en fonction de la température de soudage

3.1. Essais effectués

La température de soudage joue un rôle important dans la pratique: généralement, plus elle est élevée, plus il est facile de souder. Mais si la température est trop élevée, on sait qu'il se produit de très fâcheux effets, l'oxydation par exemple, qui amoindrisent la qualité de la soudure. Cependant, on ne savait pas encore si et dans quelle mesure l'action corrosive du décapant sur le métal soudé dépendait de la température de soudage. Pour élucider cette question, nous avons fait des soudures avec les décapants A, C, E, H et I du *tableau I* et le fil massif 50 Sn/50 Pb sur des tôles de cuivre et de fer de la manière décrite plus haut (voir 1.1.). La durée de soudure était dans chaque cas de deux secondes. En revanche, nous avons varié la température de soudage; nous avons travaillé avec chaque décapant à 260, 300, 340, 380, 420 et 460 degrés centésimaux. Les tôles d'essai terminées

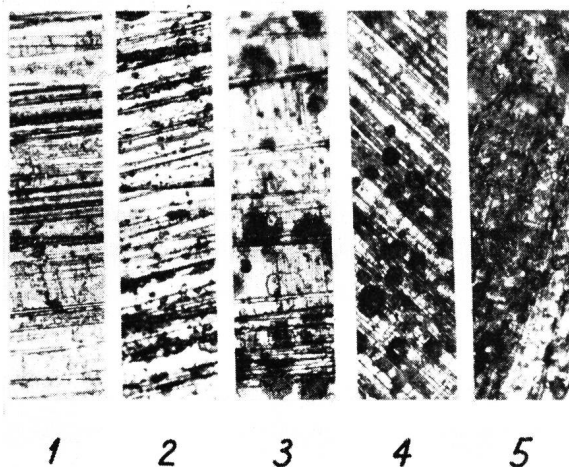


Fig. 11. Comparaisons servant à déterminer l'intensité de la corrosion (grossissement: 75 fois). Division en cinq classes de corrosion:

- 1 pas de corrosion
- 2 traces de corrosion
- 3 corrosion faible
- 4 corrosion moyenne
- 5 corrosion forte

ont été entreposées pendant quatre semaines dans la chambre d'essai de corrosion (100 % d'humidité relative) puis examinées.

3.2. Résultats

Sur les tôles de cuivre, les soudures étaient déjà parfaites à 260 et 300 degrés centésimaux. A ces températures, le fer ne se laissa souder qu'assez difficilement. A 420 et 460 degrés centésimaux, le décapant s'évapora rapidement, empêchant la soudure de se répandre. La soudure était donc plus petite, mais adhérait toujours bien à la tôle.

Les essais de corrosion ont donné des résultats surprenants. Avec les décapants A, C, E et H, l'attaque a été la plus violente tant sur le cuivre que sur le fer à 380 degrés centésimaux. Aux autres températures, les tôles furent moins fortement corrodées sous la colophane. Mais il n'y eut pas de différences quantitatives de grande importance. Les résultats sont représentés graphiquement sur la figure 13. On y reconnaît facilement le maximum de corrosion à 380 degrés centésimaux sur les deux métaux. Ce phénomène manque seulement pour les essais effectués avec le décapant I (colophane + 5 % NH_4Cl); mais la corrosion était si forte qu'il ne fut pas possible d'observer de différences entre les diverses épreuves de la série d'essai.

A l'aide des microphotographies de la figure 14, on peut étudier ce phénomène pour trois séries d'essai. Le manque de place nous oblige à ne reproduire que trois photographies. Les lignes sombres de l'image supérieure gauche ne constituent pas des produits de corrosion, mais des fissures dans la colophane sus-jacente. Pour les corrosions de la colonne A, il s'agit de traces de formations punctiformes sur le fer. Le maximum à 380 degrés centésimaux attire toutefois immédiatement l'attention. Les bulles que l'on voit

sur les images de la colonne H correspondent à des produits de décomposition gazeux. On reconnaît cependant les produits de corrosion déterminants aux teintes grises (corrosions de surface) qui atteignent de nouveau leur maximum à 380 degrés centésimaux. Les fissures dans la colophane ont un effet quelque peu gênant sur l'image supérieure et inférieure.

Il est possible de donner diverses explications à ce phénomène. Les données chimiques et physiques de chaque décapant sont toutefois si différentes et si

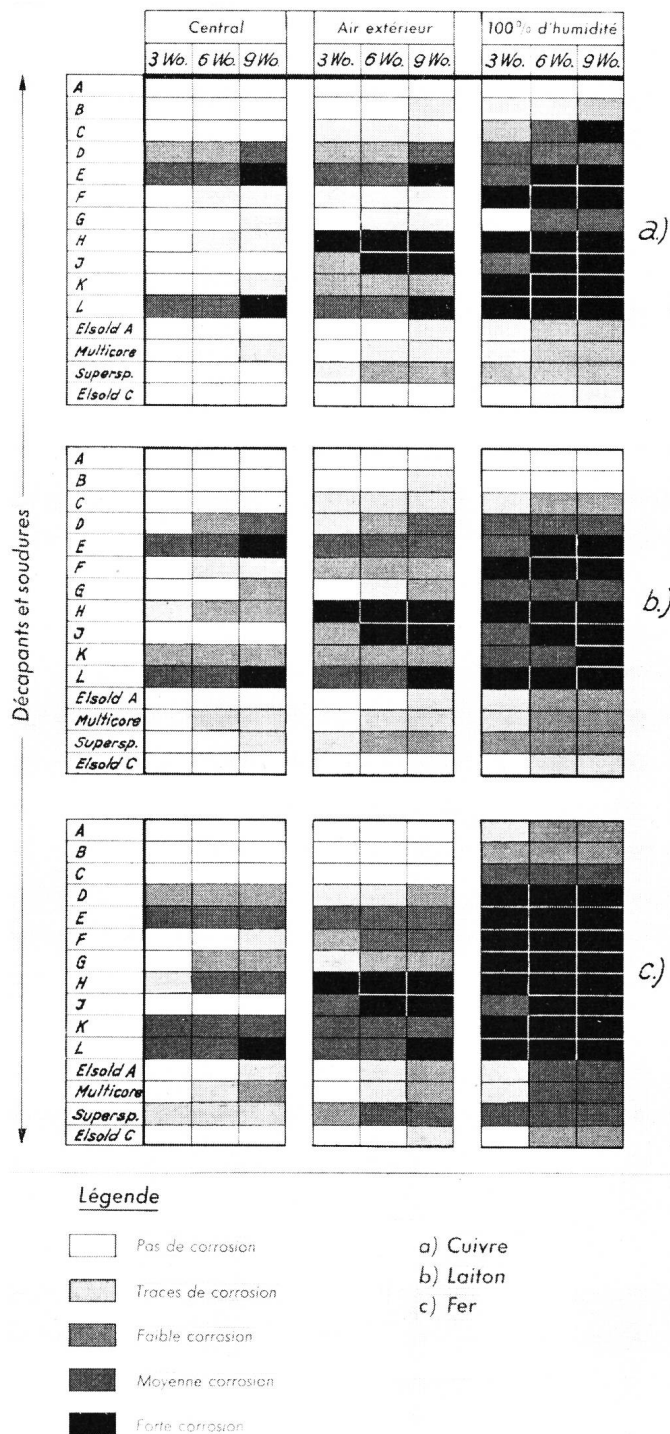


Fig. 12. Récapitulation et représentation graphique des résultats de tous les essais de corrosion. A-L indiquent les différents décapants (voir tableau I)

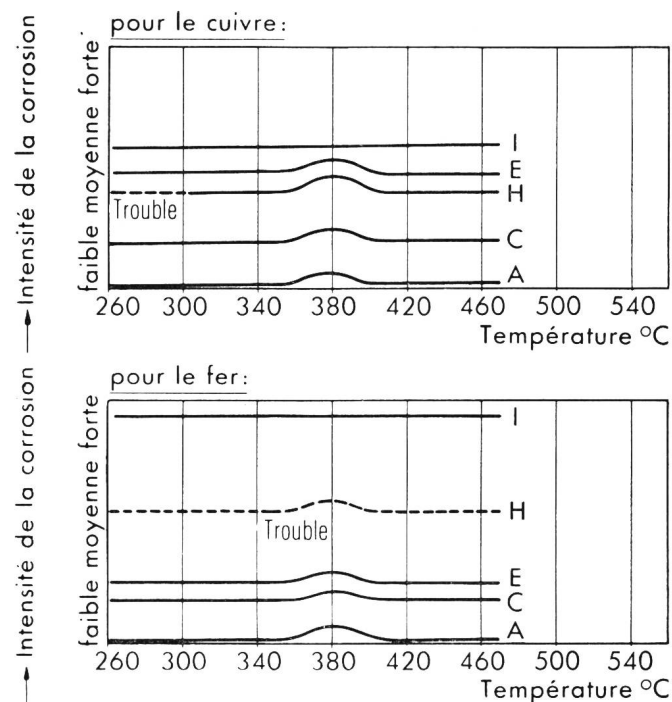


Fig. 13. Corrosion en fonction de la température de soudage. A, C, E, H et I indiquent divers décapants (voir tableau I)

compliquées qu'il est difficile d'en donner clairement les causes. C'est pourquoi nous nous sommes bornés à ne décrire que les phénomènes observés.

Pratiquement, il en résulte une remarque importante: il est absolument indispensable de maintenir la température de soudage aussi basse que possible. Le mieux est de travailler à une température inférieure à 340 degrés centésimaux.

4. L'effet corrosif des sublimés de décapant

4.1. Essais exécutés

De très fines particules provenant de la colophane en fusion et des activateurs agressifs adjoints se volatilisent pendant le soudage. Celles-ci augmentant d'importance avec la température du fer à souder se subliment sur les parties métalliques voisines. Ces dépôts sont très redoutés, car ils donnent généralement lieu à des actions corrosives aux endroits où l'on s'y attend le moins, provoquant ainsi des dommages imprévisibles. Il arrive par exemple que le bobinage de relais soit corrodé par du décapant sublimé. Comme il s'agit en général de fils très fins, ils se cassent au bout d'un temps assez court, causant des perturbations désagréables dans le service.

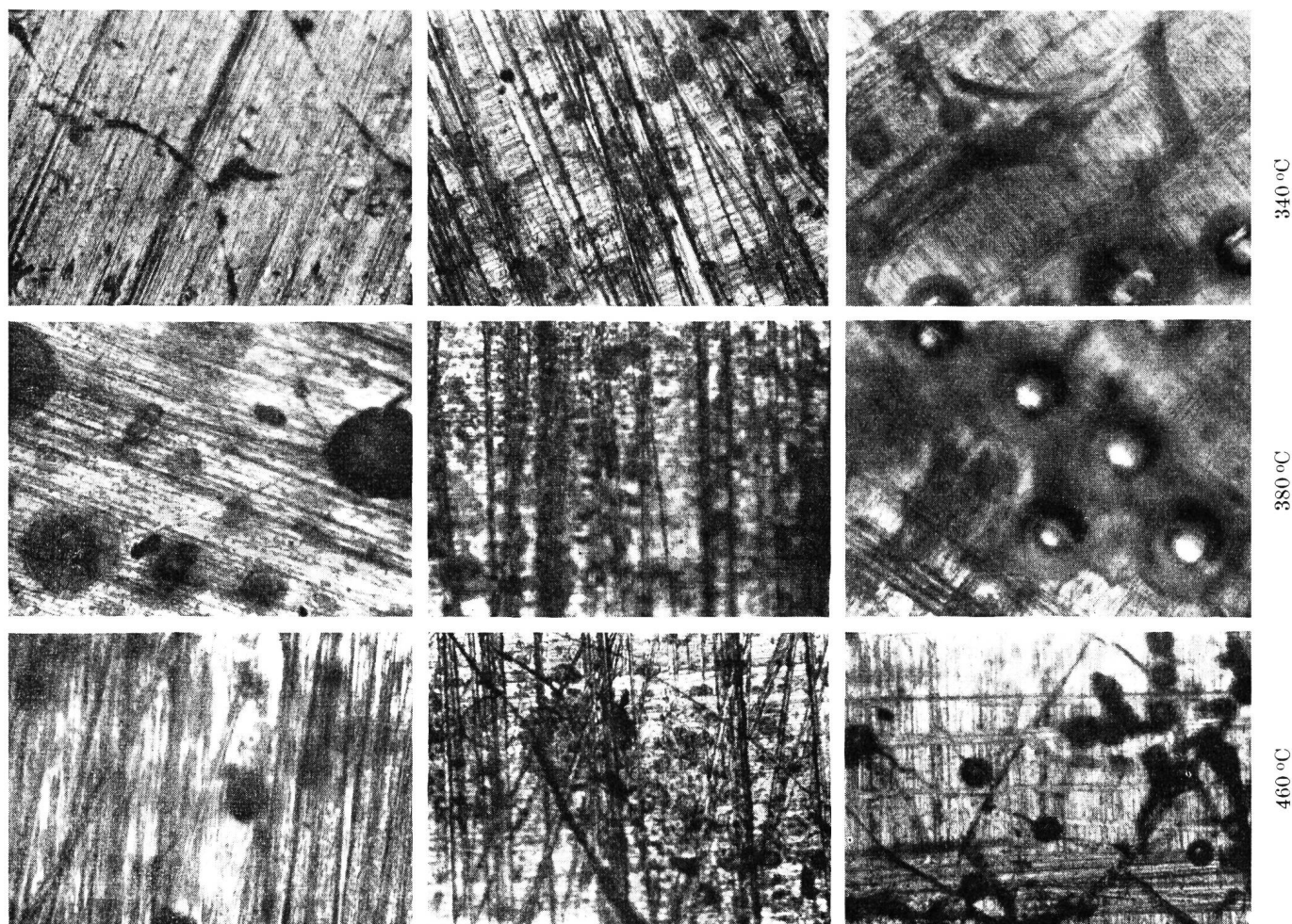


Fig. 14. Corrosions en fonction de la température de soudure. Colonne A: décapant: colophane pure, tôle de fer. Colonne C: décapant: colophane pure + 1% de chlorhydrate d'aniline, tôle de cuivre.

Colonne H: décapant: colophane, 20% d'urée, tôle de cuivre. Toutes les éprouves sont restées quatre semaines dans la chambre d'essai de corrosion (100% d'humidité relative)

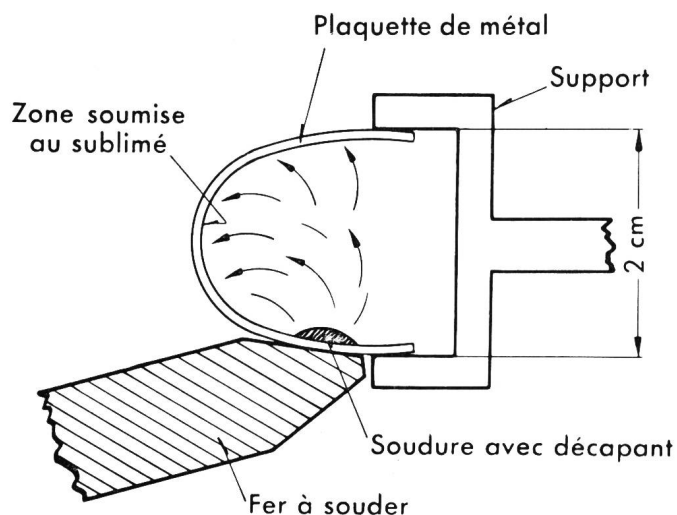


Fig. 15. Dispositif d'essai servant à déterminer la corrosion provoquée par les sublimes des décapants

C'est pourquoi il était indiqué d'examiner avec une attention toute particulière l'effet corrosif des sublimes de décapant. Pour tenir compte dans une certaine mesure des conditions rencontrées en pratique, nous avons placé les plaquettes d'essai sur un dispositif dont la figure 15 donne le schéma en coupe. La tôle de cuivre ou de fer recourbée était serrée dans un support. La soudure et le décapant étaient toujours appliqués sur la partie inférieure horizontale de la tôle. Le fer à souder, chauffé à 400 degrés centésimaux, faisait fondre la soudure et le décapant par conductibilité. La durée de soudage était de vingt secondes. Une partie des vapeurs du décapant se condensait sur la tôle d'essai selon les flèches de la figure 15. Pour ces essais, nous avons utilisé le fil massif 60 Sn/40 Pb et les décapants C, E, G, H, I et K (voir *tableau I*). En outre, nous avons également exécuté ces essais de sublimation avec les fils à souder en usage dans le commerce: fil de colophane pure 60/40, Elsold A (59/39/2), Multicore 60/40, Superspeed 60/40, Elsold C (59/39/2) et Actol (60/40) (voir *tableau II*).

Les tôles de cuivre et de fer soumises aux sublimes furent déposées pendant six semaines dans la chambre d'essai de corrosion à la température de 18 à 20 degrés centésimaux. Pour éviter, toutefois, que l'eau de condensation éventuelle emporte peu à peu ces dépôts, nous avons réglé l'humidité relative de l'air à 90 % seulement.

4.2. Résultats

Les résultats obtenus confirment qu'il est absolument justifié de vouer une attention particulière aux sublimes des décapants lors du soudage. Les exemples donnés sont suffisamment convaincants. La figure 16 montre les microphotographies de trois tôles de cuivre. Les vapeurs de la colophane pure sont inoffensives (fig. 16A). En revanche, les activants puissants, par exemple le chlorhydrate d'aniline (fig. 16C) et l'urée (fig. 16H), attaquent fortement le cuivre. De même,

les autres décapants du *tableau I* dégagent des vapeurs très corrosives.

La figure 17 montre quatre attaques de corrosion sur des tôles de fer. Les images se passent de commentaires.

Les essais effectués avec les fils à souder généralement en usage dans le commerce sont d'une importance particulière. La figure 18 reproduit les observations faites sur les tôles de fer. Les sublimes de la colophane pure ne corrodent pratiquement pas le fer (fig. 18a), alors que les sublimes des décapants provenant de la colophane active des fils Elsold A, Multicore et Superspeed, attaquent la tôle de fer (fig. 18b à d). L'Elsold C, rendu actif selon de nouveaux procédés, s'est à nouveau révélé inoffensif comme la colophane pure (fig. 18e). Des essais complémentaires ont montré que l'Actol peut aussi être considéré comme inoffensif. Sur les tôles de cuivre, les résultats furent analogues, mais avec des différences quantitatives plus faibles.

Ces essais ont également démontré qu'il était pratiquement indiqué de souder à la température la plus

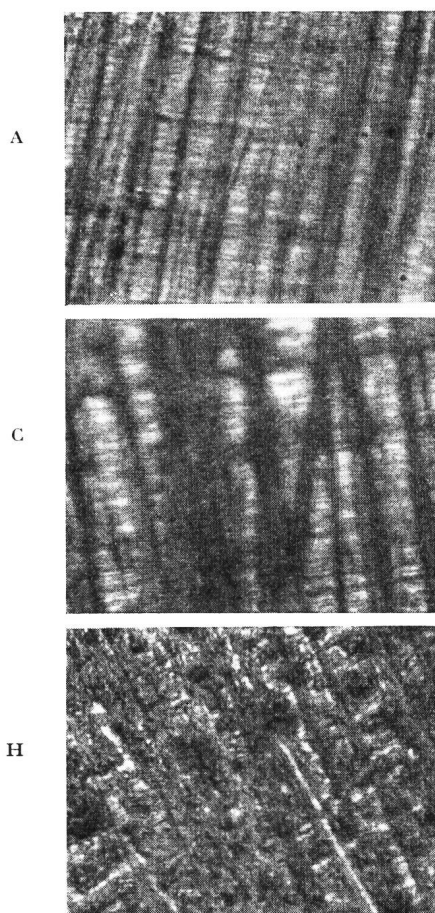


Fig. 16. Corrosion provoquée sur des tôles de cuivre par des sublimes de décapants (grossissement: 75 fois)

Décapant { A: Colophane pure
C: Colophane pure + 1% de chlorhydrate d'aniline
H: Colophane pure + 20% d'urée

Exposition des essais pendant six semaines dans la chambre d'essai de corrosion à 90 % d'humidité relative

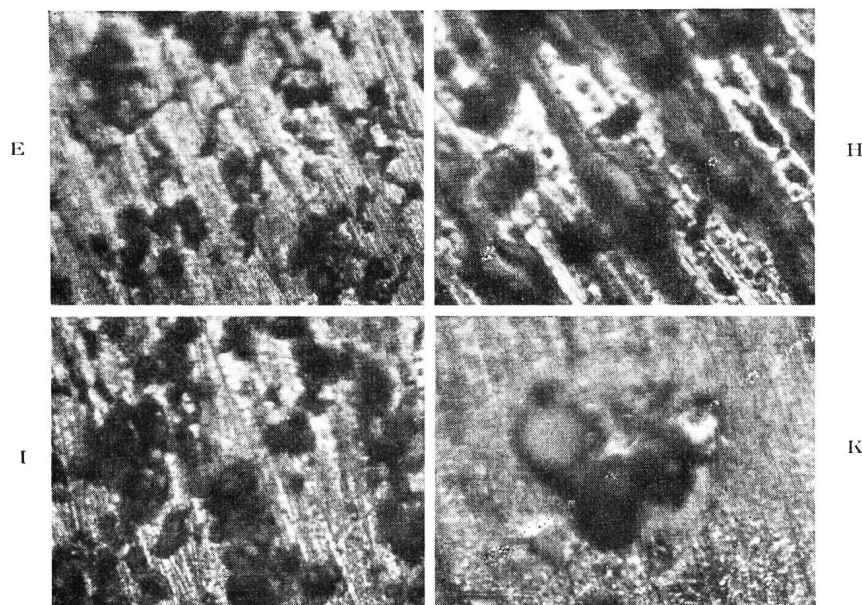


Fig. 17.

Corrosion provoquée sur des tôles de fer par des sublimés de décapants (grossissement: 75 fois)

Décapants:

E = colophane + 5 % de chlorhydr. d'aniline

H = colophane + 20 % d'urée

I = colophane + 5 % de chlorure d'ammonium

K = colophane + acide lactique (1:1)

Exposition: six semaines dans la chambre d'essai de corrosion à 90 % d'humidité relative

basse possible. Au-dessous de 320 degrés centésimaux, la volatilisation du décapant est beaucoup moins importante qu'aux températures plus élevées. Pour l'éviter, il y a lieu, en général, même pour les soudures inoffensives comme le fil de colophane pure, l'Elsold C et l'Actol, de réduire au strict minimum la sublimation du décapant. De plus, il est nécessaire d'appliquer la colophane sur l'endroit à souder. S'en sublimer trop, la surface du métal n'est alors pas suffisam-

ment libérée de l'oxyde métallique, d'où une soudure imparfaite. La température de soudage doit, pour cette raison, être également maintenue le plus bas possible.

III. Etudes physico-chimiques

1. Généralités

A part le comportement de la corrosion que détermine avant tout des réactions topo-chimiques et

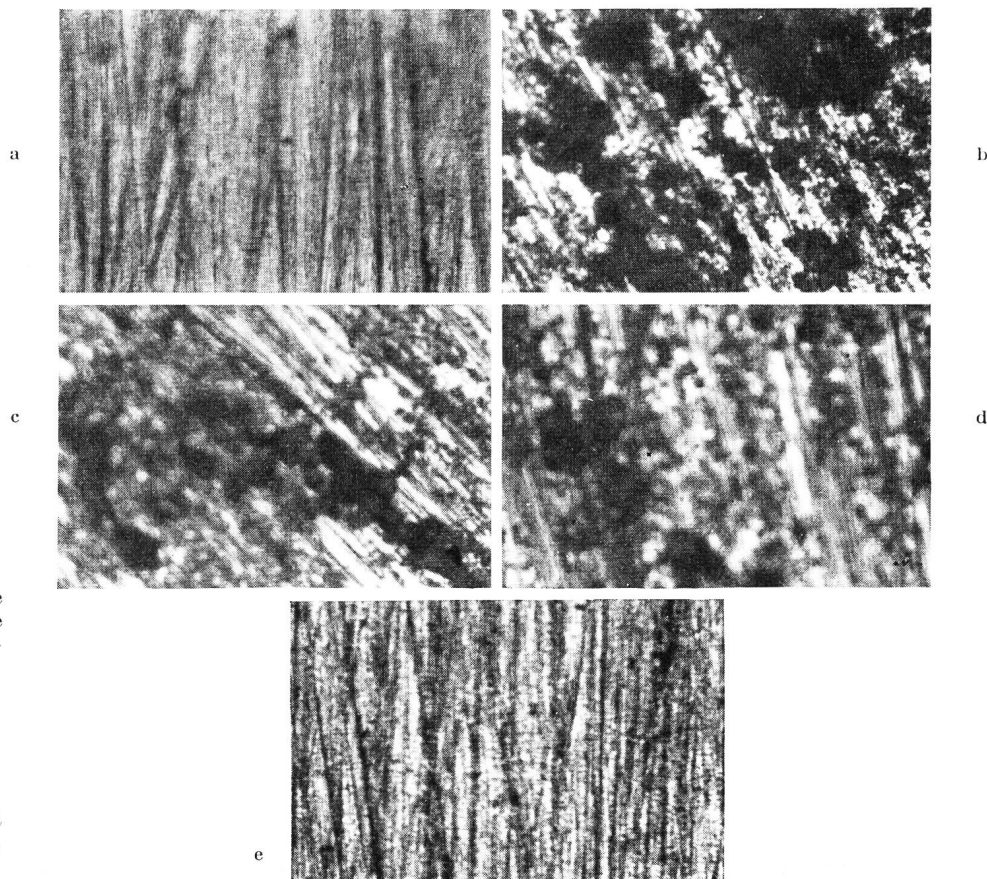


Fig. 18.

Corrosion provoquée sur des tôles de fer par les sublimés des décapants de fils à souder du commerce (grossissement: 75 fois)

a) fil de colophane pure

b) Elsold A

c) Multicore

d) Superspeed

e) Elsold C et Actol

Exposition: six semaines dans la chambre d'essai de corrosion à 90 % d'humidité relative

électro-chimiques à la surface du métal et de la soudure, le praticien s'intéresse aussi aux propriétés mécaniques des soudures qui dépendent, en premier lieu, de la structure et de la composition des soudures et des métaux soudés. L'influence de la chaleur au moment du soudage peut néanmoins modifier la structure des métaux à souder et transformer sensiblement les propriétés de la soudure. En outre, aux températures élevées, des réactions d'oxydation apparaissent au premier plan et exercent une influence néfaste sur la solidité des soudures. Les phénomènes de diffusion du métal de base dans la soudure et vice versa ont également une très grande importance, des couches intermédiaires pouvant se former aux surfaces de séparation.

Le praticien doit nécessairement connaître l'influence de tous ces facteurs pour pouvoir exécuter les travaux de soudage dans des conditions optimums. C'est pourquoi nous avons entrepris des essais étendus dans ce domaine. Les résultats sont rassemblés dans les chapitres suivants.

2. L'influence de la température sur la structure du cuivre

2.1. Essais exécutés

La structure cristalline des métaux étirés ou laminés se modifie lors de ce traitement. On voit alors apparaître les structures dites d'étirage ou de laminage qui se traduisent par une modification des propriétés mécaniques. Il s'agit en l'occurrence d'états métastables pouvant être ramenés à l'état initial par un traitement calorifique, le métal se recristallisant. Lorsqu'on soude, des températures assez élevées apparaissent en certains points, de telle sorte qu'il se produit localement des zones de recristallisation s'avérant dangereusement affaiblies mécaniquement. Nos essais ont eu pour but d'observer les phénomènes de recristallisation sur des fils et de minces plaques de cuivre lors d'un effet calorifique de courte durée. Mais nous n'avons travaillé qu'aux températures se rencontrant dans la pratique.

a) Dans une première série d'essais, nous avons porté le traitement calorifique du cuivre à dix minutes, voulant d'abord constater les conditions d'équilibre pour différentes températures. C'est pourquoi des fils de cuivre (\varnothing 0,5 mm) étirés fortement ont été maintenus dans un bloc d'aluminium pendant le temps sus-indiqué aux températures suivantes: 200, 240, 270, 300, 400, 500 degrés centésimaux. Les fils ainsi traités ont été polis perpendiculairement à l'axe longitudinal et découpés selon les méthodes habituelles. En outre, nous avons examiné ces mêmes fils aux rayons X selon la méthode de Debye-Scherrer.

b) La deuxième série d'essais a consisté à étamer pendant cinq secondes, à l'aide du fer à souder, sur une longueur d'un centimètre, l'extrémité d'un fil de cuivre (\varnothing 0,5 mm) étiré fortement. La température de soudage était située vers 400 degrés centésimaux. La soudure encore liquide fut ensuite séparée d'un

mouvement brusque et le reste dissous avec HCl dans la proportion de 1:1. En partant de la limite de la soudure, nous avons effectué des diagrammes de rayons X d'après la méthode de Debye-Scherrer tous les millimètres. Les conditions des essais sont représentées schématiquement sur la figure 19a.

c) Dans une autre série d'essais, nous avons soudé pendant cinq secondes les fils de cuivre fortement étirés à 300, 350 et 400 degrés centésimaux. Nous les avons ensuite traités de la manière décrite ci-dessus. Mais, cette fois, les examens aux rayons X portaient du milieu de la zone soudée (voir fig. 19b).

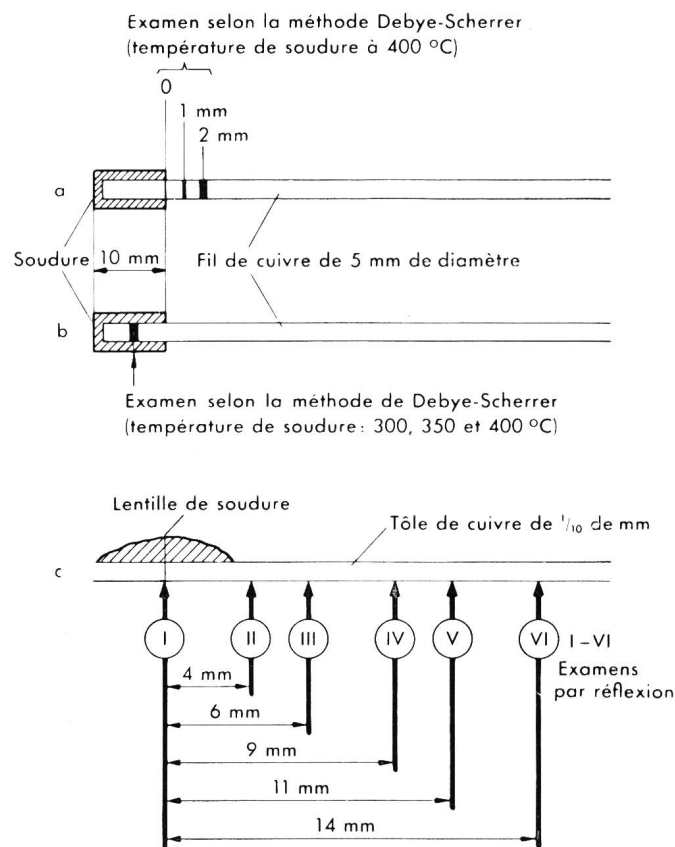


Fig. 19. Programme pour les examens aux rayons X ayant dû être faits sur des fils et des tôles soudés

d) Enfin, il fallait examiner les faits sur une tôle de cuivre de 0,1 mm. Nous avons effectué une soudure sur la partie supérieure de la tôle (durée de soudage: cinq secondes; température: 400 degrés centésimaux). Nous avons fait, selon la figure 19c, des diagrammes de rayons X par réflexion, de la partie inférieure, afin d'établir les conditions de recristallisation.

2.2. Résultats

a) La figure 20 reproduit la structure de fils de cuivre après un traitement calorifique d'une durée de dix minutes. Les images représentent des surfaces perpendiculaires à l'axe longitudinal du fil. A 20 degrés centésimaux, il s'agit d'une structure dite d'étirage. Les cristaux allongés sont orientés selon l'axe du fil et polis transversalement. C'est pourquoi ils apparaissent comme de petites surfaces fortement déformées.

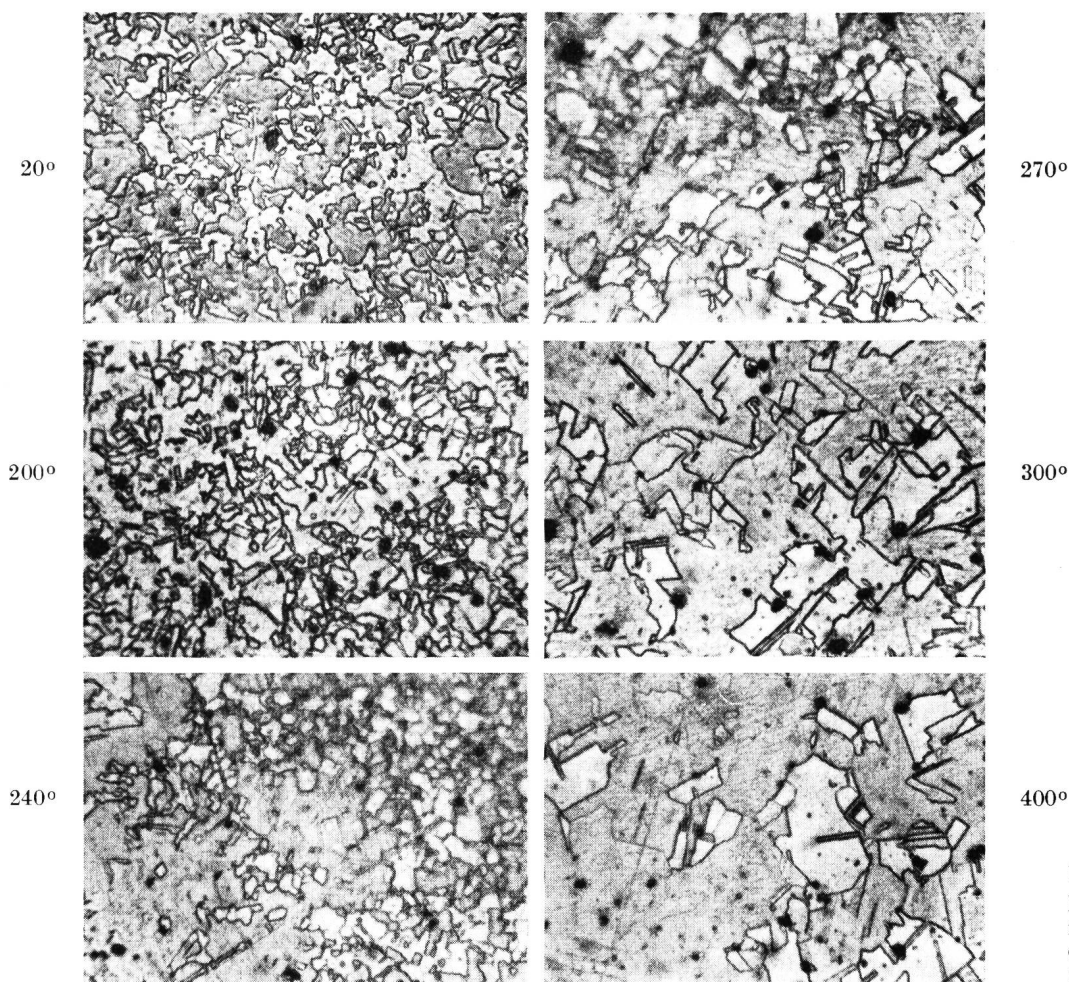


Fig. 20.
Modification de la structure de
fils de cuivre fortement étirés
en fonction de la température
(grossissement: 540 fois)

mées. Les limites des grains se reconnaissent aux lignes noires. Des inclusions isolées de Cu_2O sont reconnaissables aux points sombres parsemés sur la figure. La figure 20 permet de constater que, lorsque l'échauffement dure si longtemps, la recristallisation commence à 240 degrés centésimaux, devenant de plus en plus intense à mesure que la température augmente. A 300 degrés centésimaux, le fil a complètement changé, la structure d'étirage ayant entièrement disparu, ce que l'on reconnaît facilement aux grands cristaux de la photographie de la structure.

Les diagrammes de rayons X de la figure 21 sont également faits avec les mêmes fils. Lorsque les lignes d'interférence d'un diagramme sont continues, la structure du matériel est fine; sont-elles discontinues, l'épreuve examinée est alors d'une structure grossière. Selon *E. Brandenberger*⁴, la grandeur linéaire moyenne des cristaux est dans le premier cas inférieure, dans le second cas supérieure à 10^{-4} cm. Dans notre cas, nous avons pu fixer sur la base des diagrammes de rayons X si et dans quelle mesure le fil de cuivre était recristallisé. Le traitement calorifique à 200 degrés centésimaux n'a pas encore modifié la structure du fil de cuivre étiré (fig. 21a). On reconnaît en parti-

culier à l'intensité inégale des lignes que la structure d'étirage n'a pas été modifiée. Les segments sombres apparaissant selon un ordre déterminé sur le diagramme correspondent à une orientation préférentielle des plans du réseau d'interférence et, par conséquent, des cristaux. Pour les fils étirés, la direction préférée est parallèle à l'axe du fil. Sur l'image b de la figure 21, on peut déjà reconnaître des points isolés sur les lignes d'interférence, ceci signifiant que la recristallisation commence précisément à 240 degrés centésimaux. A 270 degrés centésimaux, la structure d'étirage a presque disparu, à 300 degrés centésimaux elle n'existe plus. Les lignes d'interférence des deux images inférieures de la figure 21 se sont presque complètement réduites à des points isolés. Les diagrammes de rayons X confirment donc entièrement les conclusions qui ont été tirées des examens micrographiques de polissage (fig. 20).

Les fils examinés sont devenus complètement mous par le traitement calorifique aux températures supérieures à 240 degrés centésimaux et possèdent des propriétés mécaniques absolument différentes de celles qu'ils avaient à l'état antérieur.

b) Lorsqu'un fil est chauffé à une de ses extrémités, une gradation de température apparaît. Si l'on choisit la température de soudage assez élevée, le fil se

⁴ *E. Brandenberger*. Röntgengraphisch-analytische Chemie. Bâle, 1945. Pages 93 et suivantes.

recristallise non seulement sous la soudure, mais aussi à quelque distance de celle-ci. Il fallait encore élucider ces faits pour les conditions indiquées à la figure 19a. Au bord immédiat de la soudure, le fil était encore très bien recristallisé (fig. 22a), à une distance de 1 mm, la chaleur dégagée par la soudure ne provoquait qu'une recristallisation partielle. La figure correspondante (fig. 22a) montre que les lignes d'interférence sont constituées de points isolés. A partir de 2 mm du point de soudure, la structure d'étirage n'a pas subi de modification, bien que nous ayons soudé avec un fer à souder chauffé à 400 degrés centésimaux (fig. 22c).

Ces phénomènes sont très dangereux, car, en cas de vibrations régulières, la zone recristallisée risque de subir des ruptures dues à la fatigue.

c) A une température de soudure de 300 degrés centésimaux, la structure d'étirage n'a pas subi de modification sous la soudure; à 350 degrés, la recristallisation a commencé et à 400 degrés elle était pratiquement complète (voir fig. 23). Les conditions d'essai sont données sur la figure 19b.

Les fils qui sont soudés dans les centraux téléphoniques ou dans les appareils ne sont pas tirés aussi fortement que les fils utilisés pour les essais. Il faut cependant veiller, lors du soudage, à ne pas provoquer de recristallisation et, en conséquence, des affaiblisse-

ments mécaniques du fil. C'est pourquoi il est nécessaire de souder à basse température.

d) Lorsqu'on soude sur des tôles, le fer à souder entre en contact avec le métal sur une plus grande surface. L'échauffement intense augmente ainsi le champ de recristallisation. Les diagrammes de rayons X par réflexion établis selon la figure 19c sont rassemblés sur la figure 24. La tôle se recristallise totalement jusqu'à une distance de 6 mm du centre de la soudure (photographie III), partiellement jusqu'à 11 mm (photographies IV et V). L'image V permet encore de reconnaître des points isolés sur les lignes d'interférence. La photographie VI montre que la fine structure lamineuse de la tôle est encore complète (distance: 14 mm). Il en résulte que les tôles devraient aussi être soudées à des températures pas trop élevées.

3. Résistance à la rupture et résistance électrique des soudures

3.1. Essais exécutés

D'après ce qui précède, il faut s'attendre à ce que la température de soudage exerce également une influence sur les propriétés mécaniques de la soudure. Nous avons essayé de la calculer à l'aide de la résistance à la rupture. A cet effet, nous avons soudé ensemble deux fils de cuivre de 1,5 mm d'épaisseur et

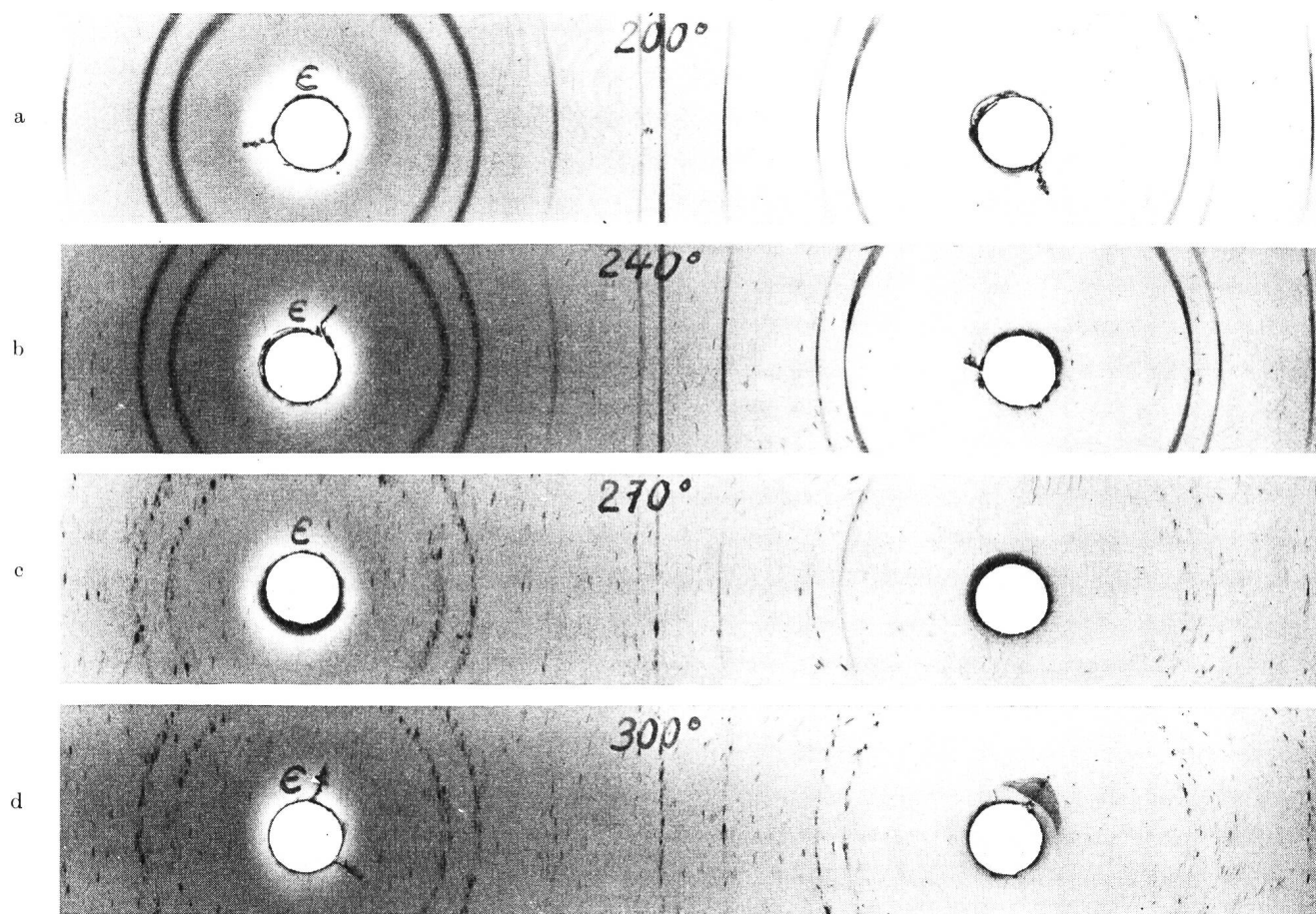


Fig. 21. Recristallisation de fils de cuivre fortement étirés en fonction de la température (diagramme de rayons X d'après la méthode de Debye-Scherrer)

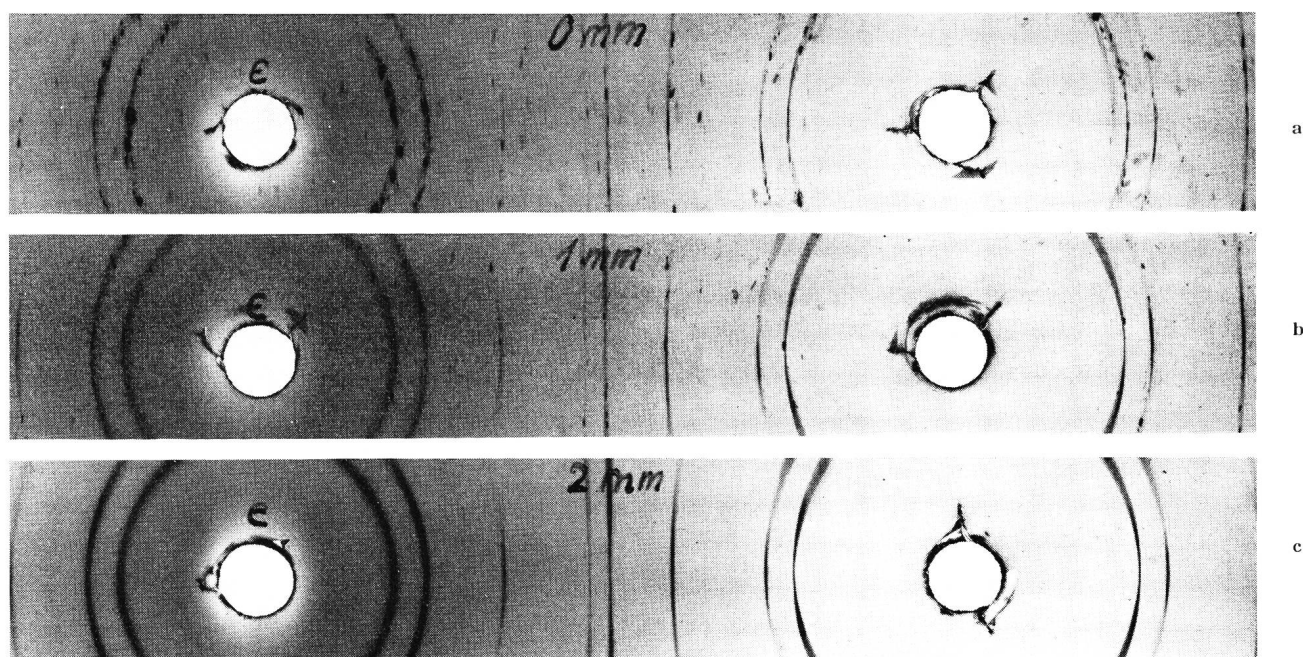


Fig. 22. Recristallisation à partir de la soudure, à diverses distances, d'un fil de cuivre fortement étiré. Les examens selon la méthode de Debye-Scherrer ont été faits conformément à la figure 19a

de 10 cm de longueur. Pour obtenir des valeurs de comparaison, nous avons travaillé avec un dispositif automatique sur lequel la durée de soudage a pu être fixée à deux secondes et réglée à un millièrme de seconde près. La température de soudage a été produite par une pointe de courant électrique à travers les fils à relier et a pu être réglée à l'aide d'un transformateur variable par réglage de l'intensité du courant. Elle a été mesurée avec un thermocouple et

contrôlée plusieurs fois. Un contre-poids tendait les fils pendant le soudage et, malgré la dilatation provoquée par la chaleur, les maintenait étroitement liés l'un à l'autre. La figure 25 reproduit le dispositif de soudage automatique (construit d'après les données de *F. Sandmeier*) et la figure 26 toute l'installation d'essai. Chaque fil à souder fut coupé en petits bouts de 2 mm de long avec une machine. L'échauffement était le plus grand au milieu des fils tendus. Le petit

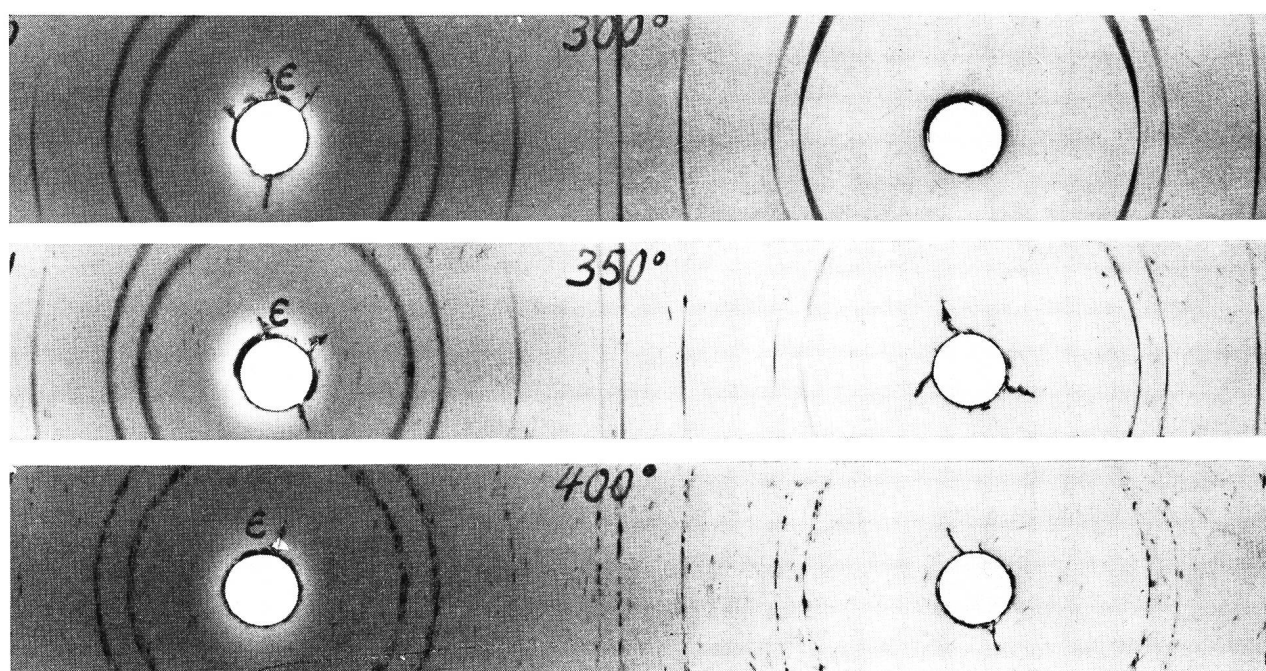


Fig. 23. Recristallisation à partir de la soudure, à diverses distances, d'un fil de cuivre fortement étiré. Examens selon la méthode de Debye-Scherrer conformément à la figure 19b

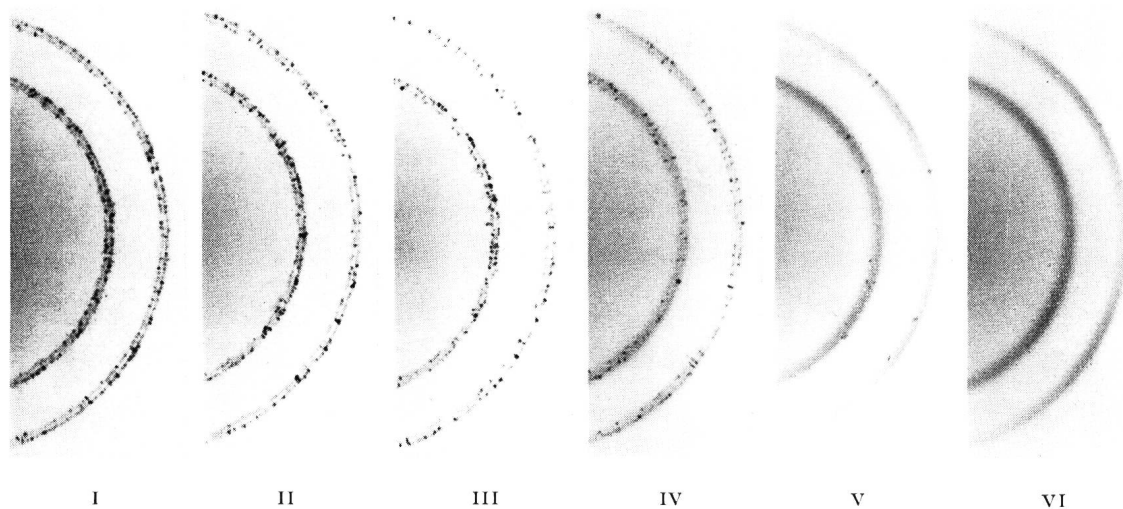


Fig. 24. Recristallisation d'un fil de cuivre sous une soudure et dans son voisinage. Examens aux rayons X par réflexion selon la figure 19c

bout de soudure à fondre fut appliqué en cet endroit. La figure 27 montre la partie supérieure et inférieure de la soudure terminée.

Nous avons tout d'abord mesuré la longueur de la soudure répandue afin d'obtenir des indications utiles sur la puissance des différents décapants. Ensuite, nous avons déterminé la résistance électrique de la soudure, celle-ci étant de la plus grande importance pour la technique des télécommunications. Nous avons utilisé à cet effet un milliohmètre construit selon le principe du pont de *Thomson*. Enfin, nous avons déterminé à l'aide de la machine à rompre «*Drage*» de l'entreprise Epprecht S.A. de Zurich la résistance à la rupture ou plus exactement au cisaillement des épreuves exécutées.

Les échantillons furent soudés à différentes températures, à savoir: 280, 340, 380, 450 et 550 degrés centésimaux. Pour obtenir de bonnes valeurs moyennes, nous avons établi chaque fois 15 soldures semblables, mais avons uniquement eu recours aux valeurs moyennes calculées pour faire cette estimation. A l'exception de l'Actol, nous avons utilisé pour les essais mentionnés les soldures en usage dans le commerce que donne le *tableau II*.

3.2. Résultats

Pour avoir une meilleure vue d'ensemble, nous avons reporté les résultats des essais sur un graphique que résumant les figures 28a à c.

On peut constater d'une manière tout à fait générale que la longueur de la soudure croît avec la température, la viscosité de la soudure décroissant avec celle-ci. L'alliage devient moins visqueux et se répand ainsi plus largement sur le soutien. Le décapant semble ici jouer également un certain rôle, subordonné cependant, car les soldures actives se liquéfient un peu mieux à basse température que les fils de colophane pure. L'El-sold C actif est une exception:

la longueur moyenne de la soudure est inférieure à 20 mm à 280 degrés centésimaux (voir fig. 28c).

La résistance électrique augmente avec la surface de contact, donc avec la longueur de la soudure. C'est pourquoi les courbes de la figure 28b sont de sens contraire à celles de la figure 28c. Les soldures actives ont de nouveau un comportement remarquable: la résistance de contact varie entre 0,8 et 0,9 milliohm et dépend moins de la température que les soldures à la colophane pure.

La résistance à la rupture diminue lorsque la température s'élève (voir fig. 28a). Il faut attribuer ce fait à l'oxydation croissante à haute température. Les inclusions d'oxyde diminuent d'une façon sensible la résistance lorsque la concentration augmente. Les valeurs pour les soldures actives dans la zone plus froide sont à nouveau supérieures à celles des fils de colophane pure. C'est en particulier le cas pour l'El-sold C, sauf à la valeur de 280 degrés centésimaux. La résistance est en général la plus élevée à la température de soudage de 280 degrés centésimaux. Le décapant n'exerce cependant pas encore tous ses effets dans le cas spécial des soldures normales (= fil de colophane pure) 60/40 et 50/50, ainsi que pour l'El-sold C.

Nous avons constaté que, lorsque les soldures se rompent, la séparation se produit toujours en un point déterminé. La figure 29 représente les circonstances dans lesquelles a lieu cette rupture. On peut aussi reconnaître les couches intermédiaires mentionnées sur les examens micrographiques faits sur cuivre et laiton (voir fig. 30). Dans nos essais, la soudure s'est toujours rompue entre cette couche intercalaire et la soudure proprement dite.

Les essais de rupture que nous avons décrits montrent qu'il est de nouveau indiqué de maintenir en pratique la température de soudage aussi basse que possible, donc au-dessous de 340 degrés centésimaux.

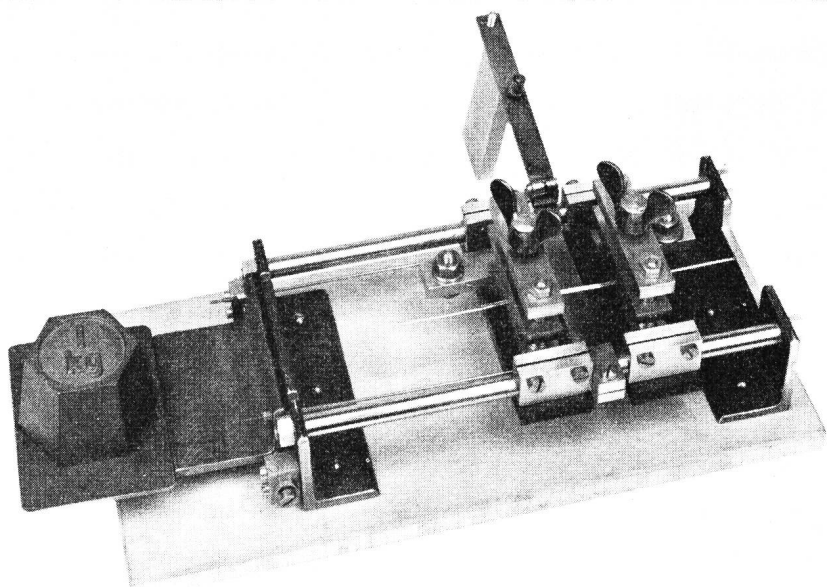


Fig. 25.

Appareil à souder construit d'après les données de *F. Sandmeier* (détail)

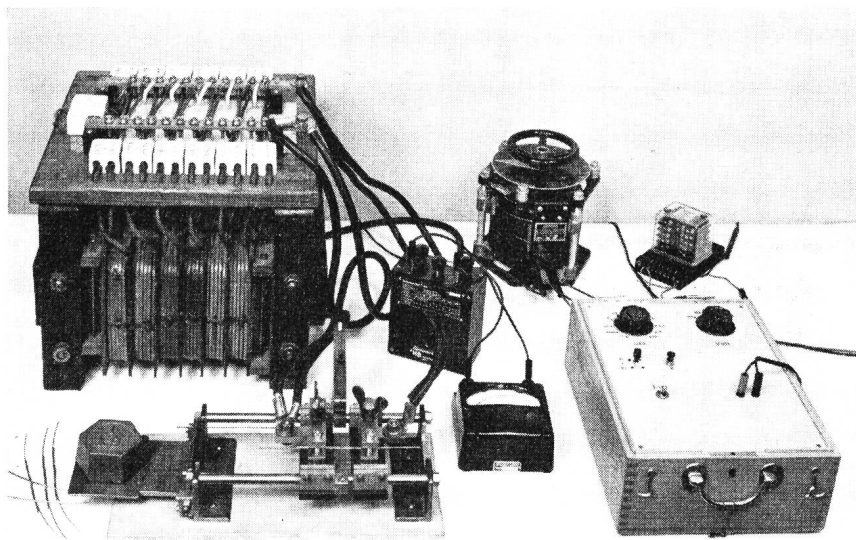


Fig. 26.

Dispositif d'essai complet servant à établir en séries des soudures identiques

4. La solubilité du cuivre dans la soudure cuivreuse et non cuivreuse

4.1. Essais exécutés

a) On sait que les tiges des fers à souder s'usent assez rapidement lors des soudages en séries. Tout alliage de soudure non cuivreux provoque rapidement, lorsqu'on soude des fils ou avec des tiges de cuivre, la formation d'un eutectique entre l'étain et le cuivre dans la proportion de 99 % d'étain et 1 % de cuivre. Dès que cet état est atteint, la rapidité de la dissolution du cuivre dans l'étain cesse. Les soudures qui contiennent déjà 1 à 2 % de cuivre dissoudront, par conséquent, les tiges des fers à souder moins rapidement que celles qui n'en contiennent pas. C'est le principe fondamental appliqué aux soudures Elsold. Pour étayer expérimentalement ces considérations

théoriques, nous avons dégraissé avec de l'acétone des petites plaques de cuivre de 0,1 mm d'épaisseur et d'une surface de 820 mm² environ, les avons séchées

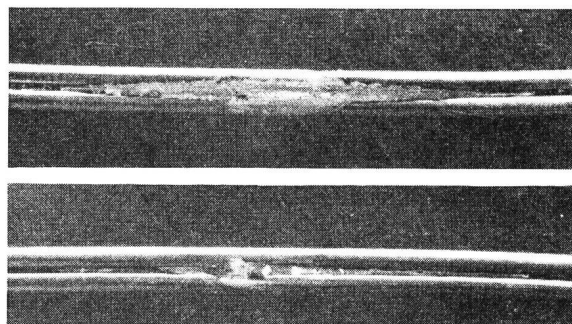


Fig. 27. Soudures d'essai terminées (grossissement: 2 fois)
haut: partie supérieure; bas: partie inférieure

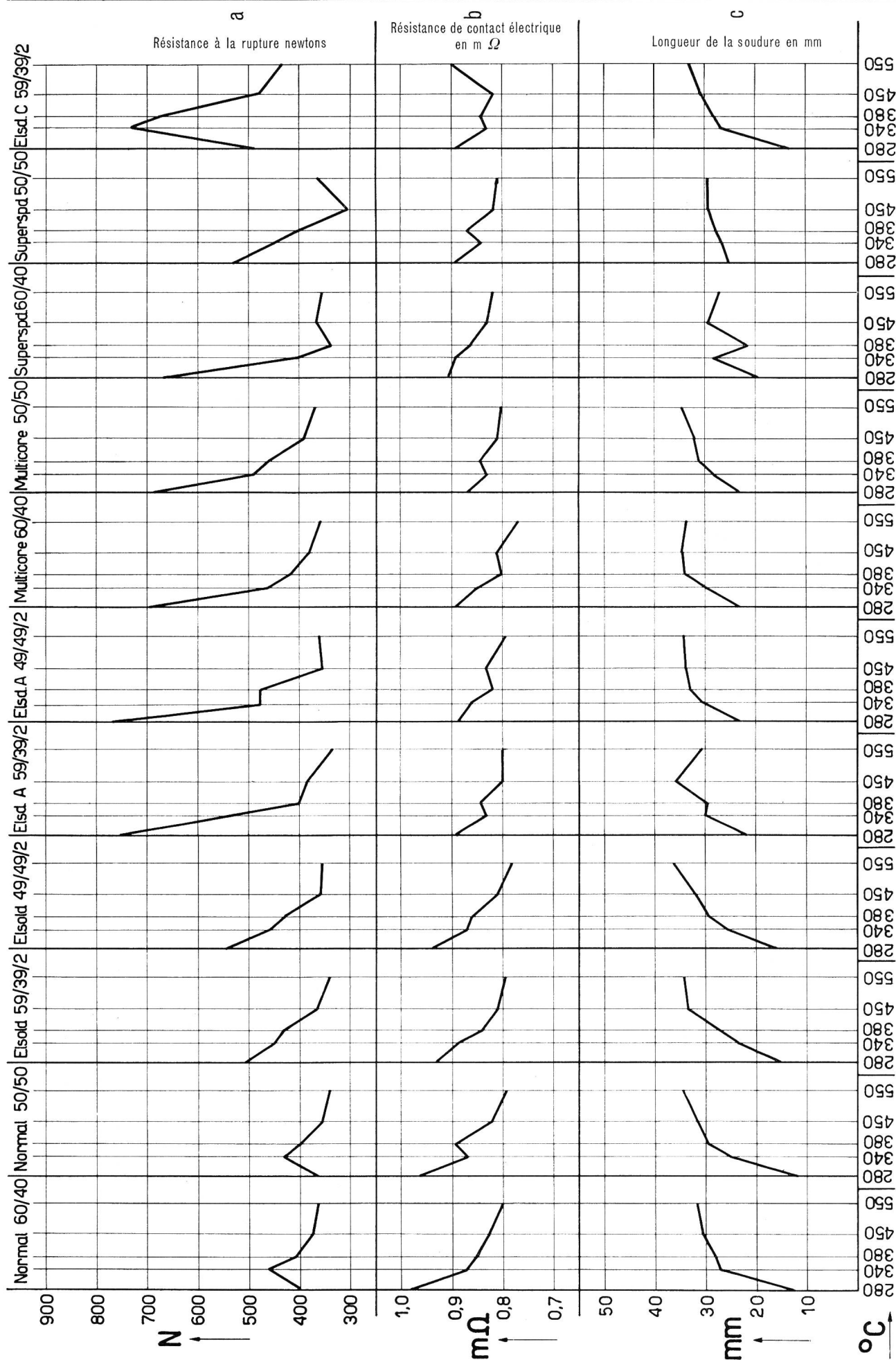


Fig. 28. Propriétés physiques de soudures en fonction de la température
 a) Résistance à la rupture en newtons (1 N = 0,102 kg*). b) Résistance de contact électrique en mΩ. c) Longueur de la soudure en mm.
 Les essais ont été faits avec les fils à souder du commerce et figurant au tableau II, à l'exception de l'Actol

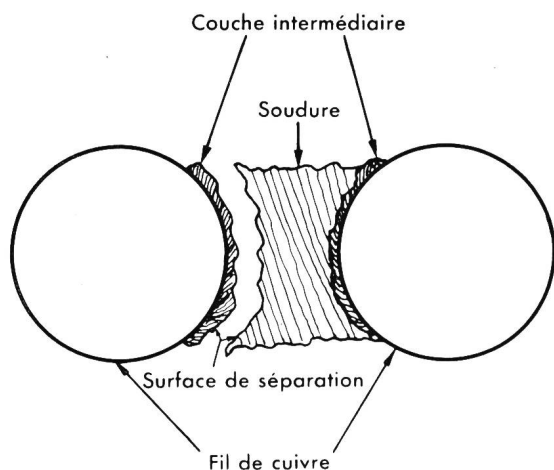


Fig. 29. Coupe transversale d'une soudure rompue (schéma)

en les agitant et recouvertes d'une fine couche de colophane; ensuite, nous les avons trempées dans 80 grammes de soudure liquide, maintenue à la température constante de 350 degrés centésimaux pendant un temps déterminé. Les durées d'immersion croissaient en progression géométrique de deux à trente secondes, une nouvelle soudure étant naturellement utilisée pour chaque essai d'immersion. Les plaquettes retirées de ce bain furent dissoutes. Nous avons alors déterminé iodométriquement la teneur en cuivre de la solution. Pour les essais, nous avons pris deux soudures, l'une non cuivreuse (60/40) et l'autre cuivreuse (59/39/2). Les diminutions de poids constatées ont permis d'obtenir des indications utiles sur la rapidité de dissolution du cuivre dans les deux soudures.

b) Nous avons procédé de la même manière pour calculer la vitesse de dissolution du cuivre dans l'étain liquide à différentes températures. La surface de la tôle de cuivre immergée était dans ce cas de 900 mm². Le temps d'immersion était constant (seize secondes). Nous avons exécuté ces essais à 250, 300, 350 et 400 degrés centésimaux.

c) Le cuivre dissous dans la soudure forme avec l'étain une combinaison Cu_6Sn_5 ⁵ qui se sépare en cristaux sous forme d'aiguilles, facilement reconnaissables sur l'examen micrographique. Le cuivre du fer à souder et celui des plaques peuvent pénétrer dans la soudure lors de l'opération. Pour élucider ces phénomènes, nous avons fait les travaux suivants avec de la soudure non cuivreuse:

Soudures sur tôle de cuivre avec fer à souder en cuivre,
 Soudures sur tôle de fer avec fer à souder en cuivre,
 Soudures sur tôle de cuivre avec fer à souder en fer,
 Soudures sur tôle de fer avec fer à souder en fer.

(Température de soudage: 400 degrés centésimaux, durée de soudure: huit secondes, soudure: 60/40.)

Nous avons fait, selon la méthode connue, des examens micrographiques des soudures obtenues. On y distingue très nettement la soudure et le support.

⁵ Equilibrium Data for Tin Alloys. Tin Research Institute, Greenford, 1949.

d) Pour avoir des précisions sur le temps nécessaire à la séparation de cristaux de Cu_6Sn_5 dans la soudure, nous avons établi quelques points de soudure avec de la soudure non cuivreuse sur une tôle de cuivre. La température du fer à souder en cuivre était de 400 degrés centésimaux. Les durées de soudure furent fixées à une demi, deux, quatre, huit et seize secondes. Les soudures solidifiées ont été à nouveau polies et décapées selon le procédé connu.

4.2. Résultats

a) La figure 31 et le tableau III s'y rapportant montrent clairement que la perte en cuivre de la tôle dans la soudure non cuivreuse fut nettement plus grande que dans de la soudure cuivreuse. La pente des courbes du graphique décroît à mesure que la durée d'immersion croît, ceci correspondant au faible pouvoir de dissolution de la soudure liquide enrichie de cuivre. Les données de la figure 31 n'ont, toutefois, qu'une valeur relative, la quantité de soudure et la surface de la tôle de cuivre immergée ne correspondant pas exactement à la réalité du soudage. Mais l'essentiel, confirmé également par la pratique, y est claire-

Tableau III

Solubilité du cuivre dans la soudure non cuivreuse et cuivreuse en fonction de la durée d'immersion

Durée d'immersion en secondes	Pourcentage de Cu dissous	
	Soudure non cuivreuse 60/40	Soudure cuivreuse 59/39/2
2	4,5	
4	6,3	0,2
8	9,2	
16	14,8	3,7
32	21,2	5,8

Surface du cuivre immergée environ 820 mm²

Quantité de soudure environ 80 grammes

Température de soudage environ 350 degrés centésimaux

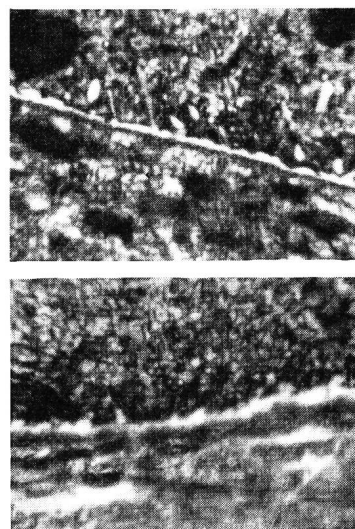


Fig. 30. Formation de la couche intercalaire entre la soudure et le métal au moment de la soudure (grossissement 1000 fois); haut: sur cuivre; bas: sur laiton

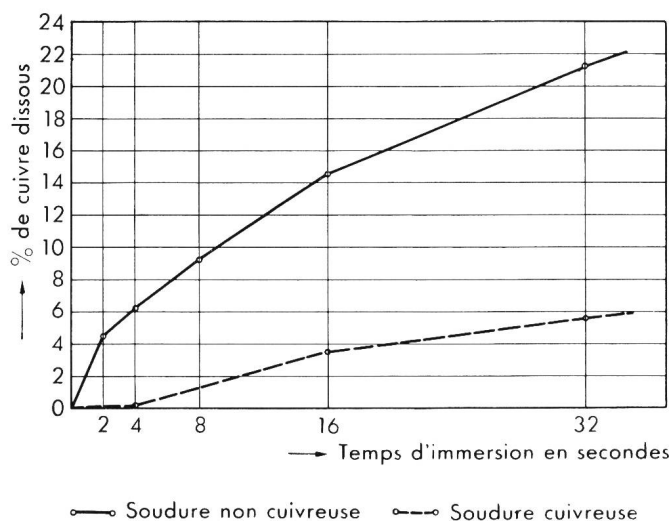


Fig. 31. Solubilité du cuivre dans de la soudure non cuivreuse et cuivreuse en fonction du temps d'immersion
 Surface du cuivre immergée 820 mm²
 Quantité de soudure 80 g
 Température de la soudure 350° C

ment défini. La figure 32 représente deux tiges de fer à souder. L'une fut mise en contact avec de la soudure non cuivreuse. Après 1400 soudures, sa pointe était fortement attaquée et inutilisable pour d'autres soudures. L'autre tige de fer à souder fut utilisée avec de la soudure cuivreuse. Après 25 620 soudures, la pointe pouvait encore très bien être utilisée.

Les tiges photographiées ont servi à souder dans l'exploitation des œillets de connexion de sélecteurs STR-7A2. Ces constatations ont une très grande importance pour le service pratique.

b) La vitesse de dissolution du cuivre dans la soudure dépend aussi de la température. Dans la soudure non cuivreuse, la perte en cuivre croît rapidement avec la température (voir fig. 33 et *tableau IV*), tandis que, dans les mêmes conditions, elle était pratiquement nulle dans la soudure cuivreuse. Lors de l'emploi de la soudure non cuivreuse, on peut donc ménager les tiges des fers à souder, sinon complètement du moins de façon notable, en opérant à des températures assez basses.

Tableau IV

Solubilité du cuivre dans la soudure non cuivreuse et cuivreuse en fonction de la température de soudage

Température en degrés centésimaux	Pourcentage de cuivre dissous	
	Soudure non cuivreuse 60/40	Soudure cuivreuse 59/39/2
250	1,6	0
300	5,5	0
350	12,6	0,1
400	32,9	0,3

Surface du cuivre immergée environ 900 mm²
 Quantité de soudure environ 80 grammes
 Durée d'immersion 16 secondes

c) Le cuivre qui pénètre dans la soudure liquide et se sépare en forme d'aiguilles de Cu₆Sn₅ lors de la solidification, provient, comme le montrent les examens micrographiques (fig. 34a à c), aussi bien de la pointe du fer à souder que de la tôle de cuivre soudée. Lorsqu'on soude avec une tige en fer sur une tôle de fer, les aiguilles blanches sont totalement absentes dans l'examen micrographique de la soudure (fig. 34d).

d) La vitesse de dissolution du cuivre dans l'étain est très grande. On peut déjà observer les aiguilles de Cu₆Sn₅ dans des soudures faites en une demi-seconde. La figure 35 donne les résultats concernant l'augmentation de la durée de soudage à l'aide des examens micrographiques correspondants.

Il en résulte que toute soudure, faite avec des tiges en cuivre ou sur support en cuivre, renferme du cuivre, la durée de soudage aussi courte soit-elle.

IV. Conclusions

Les résultats des essais résumés ci-dessus conduisent aux conclusions suivantes :

1. Les très nombreux essais de corrosion ont prouvé que les décapants actifs peuvent, dans les conditions normales d'exploitation, déclencher très souvent des attaques corrosives au point de soudure ou dans son entourage. Ils sont donc craints à juste titre. Il s'est également avéré que les sublimés des décapants se produisent au moment de la soudure et, se déposant sur des parties métalliques plus éloignées, peuvent y causer des dommages dus à la corrosion et, en conséquence, des perturbations. Seuls deux fils à souder actifs, l'Elsold C et l'Actol, se sont révélés sous ce rapport absolument inoffensifs. Ils se sont comportés à peu près de la même façon que le fil de colophane pure, mais possèdent en outre des propriétés de soudage plus favorables que ce dernier. On dispose ainsi de fils à souder

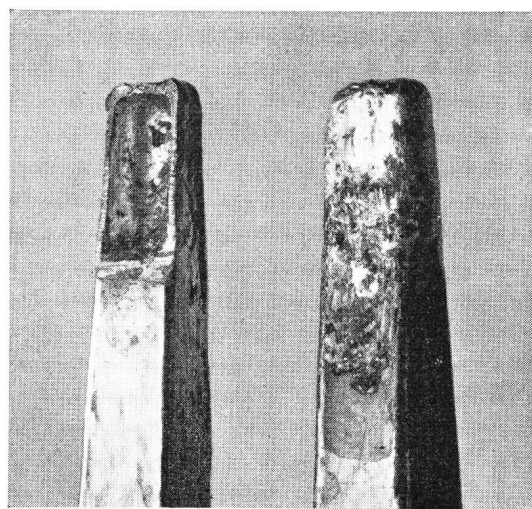


Fig. 32. Usure du fer à souder lors de l'emploi de soudure non cuivreuse (à gauche) et cuivreuse (à droite). Image de gauche: état après 1400 soudures. Image de droite: état après 25 620 soudures (grossissement: 3,5 fois)

actifs et inoffensifs pour l'établissement de fines soudures.

2. Lorsqu'on veut obtenir une soudure parfaite, il faut enlever à l'aide d'un décapant la couche d'oxyde de la surface métallique à souder. La soudure fondue peut ainsi s'allier sans inconvénient. Ces opérations chimiques et physiques exigent un certain temps. Il n'est, par conséquent, pas possible de raccourcir à volonté les durées de soudage. Mais on ne peut pas indiquer de valeurs précises, la

ceci nuisant à la résistance mécanique et à la conductivité électrique des soudures. Lorsqu'on travaille avec une pointe de fer à souder trop froide, la combinaison entre la soudure et le métal ne se fait pas correctement, ce qu'il faut éviter dans tous les cas. Les essais ont montré que la température la plus propice varie entre 300 et 320 degrés centésimaux. En observant ces limites de température, on est sûr d'éviter les soudures brûlées ou froides. Si l'on utilise des fils à souder inoffensifs, il n'y a pas lieu de s'attendre après coup à des

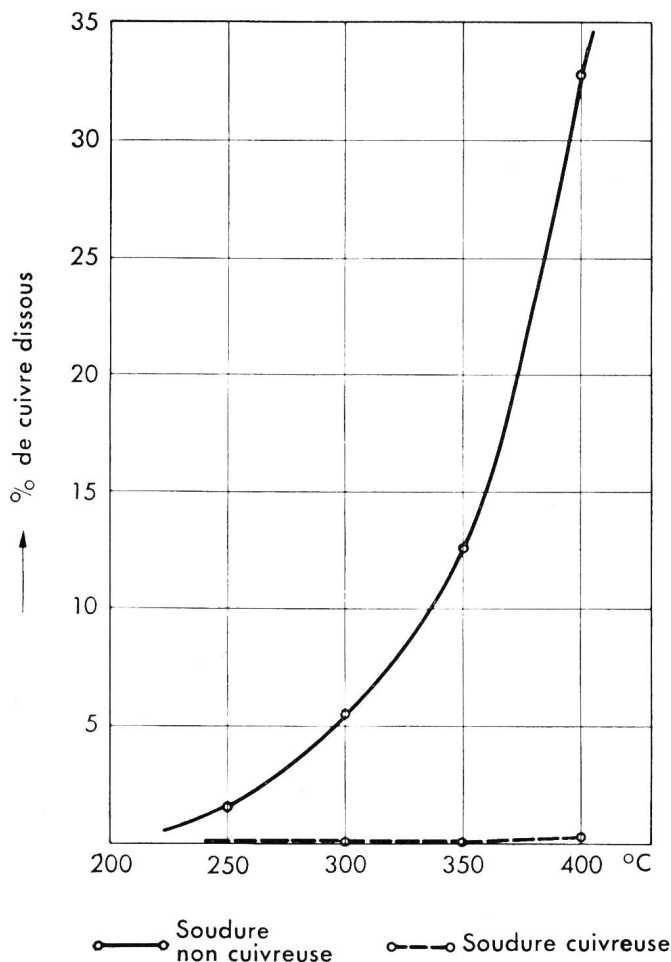


Fig. 33. Solubilité du cuivre dans de la soudure non cuivreuse et cuivreuse en fonction de la température
 Surface du cuivre immergée 900 mm²
 Quantité de soudure 80 g
 Temps d'immersion 16 secondes

durée de soudage la plus favorable étant différente dans chaque cas, selon les conditions dans lesquelles on doit souder. Pour établir de fines soudures, comme elles se présentent dans la technique des télécommunications, on ne devrait cependant pas descendre au-dessous de une à une seconde un cinquième.

3. La température des fers à souder joue un rôle important dans le soudage. Elle ne doit être ni trop élevée ni trop basse. Lorsqu'on soude à une température trop élevée, les oxydes se dissolvent dans la soudure ou cette dernière s'oxyde elle-même,

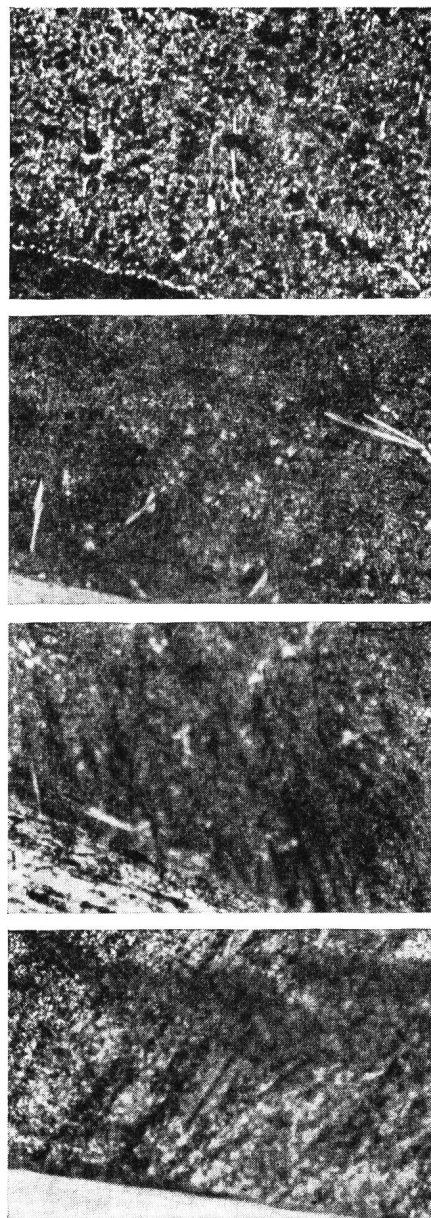


Fig. 34. Formation de cristaux de Cu_6Sn_5 dans de la soudure non cuivreuse (grossissement: 225 fois)

- a) Soudure sur de la tôle de cuivre avec un fer à souder en cuivre
- b) Soudure sur de la tôle de fer avec un fer à souder en cuivre
- c) Soudure sur de la tôle de cuivre avec un fer à souder en fer
- d) Soudure sur de la tôle de fer avec un fer à souder en fer (les aiguilles blanches font défaut sur l'image d)

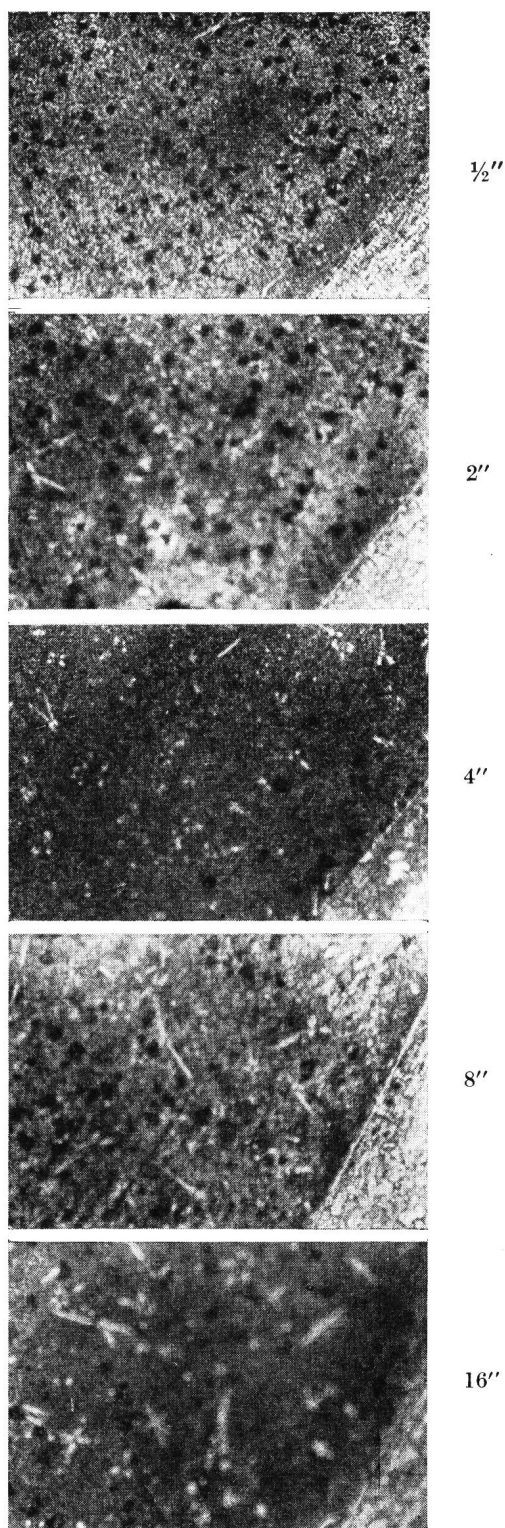


Fig. 35. Formation des cristaux de Cu_6Sn_5 (aiguilles blanches) à diverses températures de soudage (grossissement: 225 fois)

attaques corrosives directes sur la soudure, ou secondaires, provoquées par des sublimés de décapants.

A ces températures, aucune recristallisation ne se produit dans le fil à souder, même pendant un temps de soudure de deux secondes. Les ruptures de fils dues à la fatigue peuvent ainsi être évitées dans le voisinage de la soudure.

On a tendance en maints endroits à augmenter la puissance de soudage en accroissant fortement la température des fers à souder. Cette méthode est dangereuse et doit, par conséquent, être écartée. Le fer à souder ne doit être chauffé que très peu au-dessus de la température de soudage. Il est naturellement indispensable de disposer d'un fer à souder approprié.

4. Les essais effectués ne permettent pas de déterminer s'il faut donner la préférence à la composition de la soudure 60 Sn/40 Pb plutôt qu'à celle de la soudure 50 Sn/50 Pb. Les deux alliages se sont comportés de la même façon aux essais de rupture (voir fig. 28); de même, aucune différence n'a pu être notée en ce qui concerne la corrosion. L'alliage riche en étain coule un peu mieux, en revanche on reconnaît mieux les soudures défectueuses en utilisant le mélange 50 Sn/50 Pb. On ne pourra définitivement répondre à cette question qu'après des essais étendus dans l'exploitation.
5. Nous avons pu clairement démontrer que la soudure cuivreuse attaque beaucoup moins le cuivre que la soudure non cuivreuse, ceci permettant d'abaisser sensiblement l'usure des tiges des fers à souder (voir fig. 32). Cela se remarque spécialement lorsqu'on maintient la température dans les limites indiquées (300 à 320 degrés centésimaux). L'économie de tiges de fers à souder présente de nombreux avantages économiques dans une grande entreprise.