

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: 1

Artikel: Propriétés et essais comparatifs de contacts de relais

Autor: Gerber, T.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-874504>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 14.03.2025

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

TECHNISCHE MITTEILUNGEN
BULLETIN TECHNIQUE

PTT

BOLLETTINO TECNICO

Herausgegeben von der Schweizerischen Post-, Telegraphen- und Telephonverwaltung. Publié par l'administration des postes, télégraphes et téléphones suisses. Pubblicato dall'amministrazione delle poste, dei telegrafi e dei telefoni svizzeri

Propriétés et essais comparatifs de contacts de relais

Par Th. Gerber, Berne

537.311.4; 621.318.5; 620.193.7

Résumé. Dans l'introduction de son article, l'auteur traite succinctement quelques problèmes qui se posent pour les métaux servant à fabriquer les contacts et les contacts de relais. Dans les trois parties suivantes, il s'efforce avant tout de décèler les rapports qui existent entre les résistances de contacts obtenues expérimentalement et les modifications que subissent les surfaces des contacts. Les essais entrepris s'étendent aussi bien aux contacts chargés électriquement qu'à ceux qui sont connectés sans courant, ainsi qu'aux contacts actionnés par des étincelles à haute tension.

Zusammenfassung. Im einleitenden Teil der vorliegenden Arbeit werden einige Probleme, die sich bei Kontaktmetallen und Relaiskontakten stellen, kurz beleuchtet. In drei weiteren Teilen wird hauptsächlich versucht, Zusammenhänge zwischen experimentell ermittelten Kontaktwiderständen und den an den Kontakten auftretenden Oberflächenveränderungen aufzudecken. Die durchgeführten Versuche erstrecken sich sowohl auf elektrisch belastete als auch auf stromlos geschaltete Kontakte sowie auf solche, die der Beanspruchung durch Hochspannungsfunken ausgesetzt wurden.

1. Introduction

1.1. Exposé du problème

Actuellement, on est arrivé, à la suite de nombreux essais entrepris systématiquement, à obtenir des renseignements assez précis sur les divers phénomènes qui caractérisent les contacts électriques. Les résultats de ces recherches sont consignés soit dans des publications isolées, soit dans des ouvrages récapitulatifs [1, 2]*. C'est pourquoi on pourrait admettre que les résultats de ces recherches devraient permettre de résoudre facilement les problèmes qui se posent dans la pratique au sujet des contacts. Cependant, les nombreux travaux publiés ont plutôt tendance à fournir la preuve du contraire; ils traitent des essais se rapportant, d'une part, à l'analyse des principes et, d'autre part, à l'examen des matériaux servant à fabriquer les contacts. A cet effet, on s'efforce de remplacer les métaux rares et par conséquent d'un prix élevé par des métaux à bon marché, mais possédant néanmoins les qualités nécessaires. Ces points de vue sont constamment étudiés en détail tant en Europe [3] qu'aux Etats-Unis d'Amérique [4].

Nous avons pris l'initiative d'écrire cet article en nous fondant sur le fait que la littérature appropriée contient souvent des indications contradictoires sur les propriétés et le comportement en service de con-

tacts fabriqués avec la même matière. Un autre motif pour lequel nous avons fait ce travail réside dans le fait que, au cours de ces dernières années, on en est venu de plus en plus à l'idée que des essais déterminés sur des contacts n'ont qu'une valeur limitée. Ils donnent généralement des résultats qui ne concordent que pour des conditions d'essai choisies et ne peuvent, par conséquent, pas s'appliquer de façon illimitée à d'autres conditions [5, 6]. En l'occurrence, il est également intéressant de constater que les opinions peuvent même diverger de continent à continent [7, 8]. Citons comme exemple les contacts en or-nickel encore à examiner qui, d'après des expériences pratiques, sont estimés de façon totalement différente [9, 10, 11]. Enfin, il existe encore des domaines où les théories se contredisent les unes les autres, par exemple en ce qui concerne le problème des couches étrangères, en particulier des couches d'oxyde [12, 13, 14].

Ces motifs permettent de constater qu'il arrive encore que nos fournisseurs reçoivent des offres pour des contacts de relais dont le comportement est nettement inférieur à celui des contacts qui étaient utilisés jusqu'ici.

Le but des essais entrepris ici était de réunir des expériences sur un grand nombre de contacts différents. L'accent principal a été porté sur la résistance

* Voir la bibliographie à la fin de l'article.

des contacts et le comportement à l'usure. En outre, des essais furent aussi entrepris avec des contacts connectés sans courant ainsi qu'avec ceux qui sont actionnés électriquement par des décharges d'étincelles. Ce sont deux domaines qui n'ont pour ainsi dire pas été étudiés systématiquement jusqu'à présent.

Pour terminer, ajoutons que la diversité des résultats figurant dans la littérature est bien compréhensible, si l'on songe au nombre important de facteurs qui influencent le comportement des contacts. Indépendamment de la nature du circuit et des influences que le relais exerce sur les contacts selon sa construction et son réglage (pression de contact, vitesses d'ouverture et de fermeture, fréquence des connexions, vibrations), de nombreuses influences atmosphériques extérieures viennent encore s'y ajouter: ce sont avant tout la pression de l'air, la température et l'humidité, qui peuvent jouer un certain rôle, ainsi que les impuretés contenues dans l'atmosphère, en particulier le soufre, l'hydrogène sulfuré, les vapeurs organiques et les poussières de provenance diverses.

1.2. Aperçu sur les métaux les plus importants servant à fabriquer les contacts utilisés dans la technique des télécommunications

La littérature spéciale [15] fait ressortir que la bonne moitié des éléments chimiques sont proposés soit purs, soit comme parties d'alliage, soit comme supplément aux matériaux de contact agglomérés. Mais seul un petit nombre de ces éléments se sont révélés réellement utilisables pour la pratique; ce nombre se réduit encore pour le domaine particulier qui nous intéresse ici, du fait que les matériaux ne convenant pas pour les contacts de la technique des courants faibles et des télécommunications sont simplement éliminés. Les métaux qui restent finalement peuvent, d'après leurs propriétés chimiques, se répartir dans les quatre groupes suivants:

- Groupe argent:* cuivre, argent, or
Groupe platine: ruthénium, rhodium, palladium, osmium, iridium, platine
Groupe chrome: (chrome), tungstène, molybdène, (uranium)
Groupe fer: (manganèse, fer, cobalt), nickel

Les métaux indiqués entre parenthèses et cités uniquement pour que le tableau soit complet n'entrent pas en considération pour les contacts de relais. Tous les autres métaux sont utilisés soit purs, même s'il ne s'agit que de couches superficielles appliquées par galvanisation ou par placage, soit comme parties d'alliage ou d'aggloméré.

Le tableau I donne le résumé des propriétés les plus importantes des métaux servant à fabriquer les contacts, en tant qu'elles influencent le comportement des contacts. Les caractéristiques sont tirées de divers tableaux de la littérature spécialisée [16, 17,

18, 19, 20]. Les prix mentionnés dans le tableau se rapportent à la valeur actuelle des métaux non travaillés.

Pour compléter ce tableau, nous donnons ci-dessous sous une forme condensée quelques autres propriétés et indications sur les applications de ces métaux servant à fabriquer les contacts.

Groupe argent

Argent (Ag): C'est, de tous les métaux, celui qui possède la plus faible résistance électrique et la plus grande conductivité calorifique. L'oxyde d'argent a, contrairement à une opinion très répandue, une résistance électrique très élevée de $5 \cdot 10^7 \Omega \text{ cm}$, mais se décompose au-dessus de 170 degrés centésimaux. Le soufre et l'hydrogène sulfuré attaquent très facilement l'argent, produisant un sulfite d'argent noir qui est également un mauvais conducteur électrique ($5 \cdot 10^3 \Omega \text{ cm}$). L'argent pur est tendre et n'offre qu'une résistance modérée à la soudure et à l'attaque de l'arc électrique. C'est pourquoi on utilise très fréquemment des contacts en argent allié à un autre métal. L'alliage avec le cuivre produit une dureté plus grande; les contacts en aggloméré argent-nickel ont moins tendance à se souder. En Europe, les contacts en argent-or sont très répandus; ils se distinguent par un transport réduit de la matière.

Or (Au): Métal très tendre qui ne s'oxyde pas à l'air, mais est attaqué par des halogènes libres. Il est généralement utilisé dans des alliages dans lesquels il doit y avoir autant d'or qu'il est nécessaire pour que l'alliage résiste à l'oxydation. Des contacts en or pur ne sont recommandables que pour des tensions inférieures à 0,5 V et des courants de l'ordre du μA .

Groupe platine

Palladium (Pd): Il possède les mêmes propriétés mécaniques et électriques que le platine (voir ci-dessous); il résiste à l'oxydation et à la sulfuration. Il s'oxyde lentement à 350 degrés centésimaux, mais l'oxyde disparaît à nouveau à 800 degrés centésimaux. Le palladium est utilisé sous sa forme pure pour des contacts qui connectent des courants de quelques mA à plus de 1 A. En outre, il s'allie à presque tous les métaux nobles, ainsi qu'au cuivre et au nickel.

Iridium (Ir): Métal très dur et résistant à la corrosion. Il n'est pas employé pur, mais comme partie d'alliage pour sa dureté. 5 à 30% d'iridium élèvent le courant d'arc minimum du platine.

Platine (Pt): Le caractère distinctif du platine est sa résistance à la corrosion. C'est pourquoi, du fait aussi de son point de fusion élevé, il constitue un métal idéal pour fabriquer les contacts. Mais, contrairement à l'argent, il possède une résistance électrique très élevée et, par voie de conséquence, une conductivité calorifique très faible, ce qui, indépendamment de son prix élevé, fait que le platine et les contacts très riches en platine ne sont pas employés pour des courants élevés. En revanche, le platine et le platine-iridium sont spécialement indiqués pour des contacts qui ont des pressions de quelques grammes, voire de milligrammes.

Groupe chrome

Tungstène (W): Il possède le point de fusion le plus élevé et la pression de vapeur la plus faible de tous les métaux servant à fabriquer les contacts. C'est pourquoi il offre une très grande résistance aux décharges d'arc et d'étincelles (emploi pour des contacts d'interrupteurs particuliers!), mais il s'oxyde; l'oxyde étant constant, il faut veiller à ce qu'il soit enlevé mécaniquement. Le tungstène est fréquemment aggloméré avec le nickel et l'argent.

Groupe fer

Nickel (Ni): Il ne s'emploie pas comme métal non allié pour des contacts de relais, mais sert dans une mesure accrue comme partie d'alliage dans les contacts en or et en argent.

1.3. Relations entre les propriétés physico-chimiques des métaux et le comportement des contacts

Les relations entre les caractéristiques chimiques et physiques que donne le tableau I et le comportement

Tableau I. Quelques caractéristiques de métaux purs utilisés pour des contacts

Propriétés chimiques et mécaniques: A poids atomique
 δ densité
 D_V dureté d'après Vickers

Propriétés thermiques: t_r température de ramollissement
 t_f température de fusion
 λ conductivité thermique

Propriétés électriques: ϱ_{20} résistance électrique spécifique à 20 degrés centésimaux
 α coefficient de température de ϱ entre 0 et 100 degrés centésimaux

Propriétés thermo-électriques: U_r tension de ramollissement
 U_f tension de fusion
 U_a tension d'arc minimum
 I_a courant d'arc minimum

Prix: prix industriel (1954) pour les métaux techniquement purs, se rapportant à 1 cm³

Métal	Symbole chim.	A	δ g/cm ³	D_V kg*/mm ²	t_r °C	t_f °C	λ W/cm·degré	ϱ_{20} 10 ⁻⁶ Ωcm	α 10 ⁻³ degré	U_r V	U_f V	U_a V	I_a A	Prix par cm ³ Fr.	Observations
Argent	Ag	107,9	10,5	30...70	150...180	960	4,18	1,59	-4,1	0,09	0,35	12	0,4	1,45	} D_V dépendant fortement du travail
Or	Au	197,2	19,3	20...65	100	1063	3,1	2,19	-4,0	0,08	0,45	12...15	0,4...0,5	95,—	
Rhodium	Rh	102,9	12,4	100...140	—	1966	0,85	4,6	-4,4	—	—	13	0,8	220,—	} D_V jusqu'à 600 } lorsqu'ils sont appliqués par électrolyse } D_V 200...400 } D_V 500...600 } ϱ_{20} pour Pt pur: 13,5·10 ⁻⁶ Ωcm
Palladium	Pd	106,7	12	35...50	—	1550	0,7	10,8	-3,7	—	—	14	0,8...1,0	45,—	
Iridium	Ir	193,1	22,5	170	—	2450	0,57	5,3	-3,9	—	—	—	—	550,—	
Platine	Pt	195,2	21,4	40...90	540	1774	0,70	9,8	-3,8	0,25	0,70	15...17	0,7...1,0	290,—	
Tungstène	W	184,0	19,2	250...350	1000	3380	1,6	5,6	-4,9	0,4	1,0	15	1,0...1,4	2,50	ϱ_{20} pour Ni pur: 9·10 ⁻⁶ Ωcm
Nickel	Ni	58,7	8,8	70...150	520	1455	0,8	6,8	-6,9	0,22	0,65	14	0,4...0,5	—,05	

des métaux comme transmetteurs de contact sont en bonne partie évidentes. Mais il existe quelques propriétés sur les répercussions desquelles les spécialistes sont d'un avis partagé, en raison surtout des diverses influences extérieures mentionnées au paragraphe 1.1. qui peuvent jouer un rôle dans le comportement des contacts.

Le *poids atomique* (A) et, par conséquent, la position dans le système périodique déterminent dans une large mesure les propriétés chimiques, parmi lesquelles le comportement par rapport à l'oxygène, au chlore et au soufre est particulièrement important. Les opinions tendant à déterminer si les contacts faiblement chargés électriquement et mécaniquement doivent être autant que possible libérés de toute couche d'oxyde [21, 22], ou si cette dernière comporte peut-être certains avantages en ce qui concerne la diminution de la capacité d'adhésion et du frottement [23], sont encore très partagées. Mais on a la preuve que de minces couches moléculaires n'offrent qu'une très petite résistance de couche par rapport à la résistance d'étranglement, les électrons ne rencontrant pas d'obstacle important au point de contact qui en résulte par suite de l'effet de tunnel. Il semble que de minces couches étrangères sont plutôt avantageuses pour les pressions de contact ordinaires; elles diminuent le danger de la soudure et de la formation redoutée de pointes [24, 25]. De nombreux oxydes se décomposent à des températures modérément élevées [26], de sorte qu'une certaine formation d'étincelles peut même être désirée. Les vapeurs qui se produisent possèdent peut-être une tension d'ionisation plus élevée que l'air, ce qui ne peut être qu'un avantage. Des essais théoriques et pratiques semblent du reste confirmer que, outre l'effet Thomson [27], d'autres effets liés à la présence de couches étrangères exercent une influence déterminante sur le transport de fines particules. Ainsi l'effet de Peltier n'apparaît pas seulement aux limites de phases du métal solide et du métal liquide aux ponts de fusion, mais évidemment aussi aux surfaces limites entre le métal et l'oxyde métallique [28, 29]. Il en va de même pour la formation de tensions thermo-électriques aux contacts constitués par un seul métal avec des couches étrangères [30] et pour les phénomènes qui sont connus sous le nom d'effets Benedicks [31, 32].

Indépendamment des influences des couches minces, seules les couches étrangères épaisses demeurent réellement perturbatrices. Lorsque le choix du matériel est approprié, elles peuvent très bien être évitées pour les contacts qui nous intéressent ici.

La *densité* (δ) des métaux servant à fabriquer les contacts est d'autant plus importante qu'elle permet de calculer la perte de volume, importante pour la pratique, provenant de la diminution du poids.

La *dureté* (D_v) influence le nombre et la grandeur des surfaces de contact réelles et, de ce fait, les den-

sités de courant qui y apparaissent. L'augmentation de température des contacts en dépend de nouveau; elle influence de son côté l'oxydation.

Il n'est pas souhaitable d'avoir une grande dureté pour les contacts à forte charge de courant fermés presque en permanence, le nombre des surfaces de contact restant petit [33]. En revanche, les métaux tendres servant à fabriquer les contacts sont sensibles à la présence de la poussière; les particules de poussière sont ramassées par le travail du contact dans la couche supérieure transmettant le contact, où elles jouent en tant que corps étrangers perturbateurs le rôle d'isolateurs. Des essais entrepris par des maisons anglaises ont fourni la preuve que ce processus n'apparaît pas pour les métaux durs (par exemple contacts plaqués au rhodium) [34].

Les essais entrepris au cours de ces dernières années par Holm et ses collaborateurs ont en particulier montré l'importance que possèdent la *température de ramollissement* (t_r) et la *température de fusion* (t_f) pour la résistance des contacts et le transport de fines particules et les rapports quantitatifs qui existent entre les *tensions de ramollissement* (U_r) et les *tensions de fusion* (U_f). Les notions qui en découlent sont d'une importance fondamentale pour la compréhension des mécanismes collaborant à la fermeture et à l'ouverture des contacts.

La *résistance électrique spécifique* (ρ) et son *coefficient de température* (α) déterminent l'échauffement provoqué par le courant, la *conductivité de la chaleur* (λ) l'émission de la chaleur. Ce qui a été dit à l'alinéa se rapportant à la dureté au sujet de l'influence de la température sur l'oxydation s'applique également ici dans une mesure accrue. Une petite résistance électrique et une grande conductivité de la chaleur exercent ainsi une action favorable.

Au-dessous d'une certaine tension désignée comme *tension d'arc minimum* (U_a), des courants d'une intensité théorique quelconque peuvent être interrompus sans qu'il en résulte des arcs électriques et qu'un transport de particules grossières fasse son apparition. Il en va de même pour le *courant d'arc minimum* (I_a): abstraction faite de la limite, donnée par la tension d'amorçage du courant de luminescence, toute tension peut en deçà de cette limite être connectée sans arc électrique. Mais cela ne signifie pas que, entre ces valeurs limites, l'interruption se produise sans étincelle aucune, même si des mesures particulières évitent toute self-induction dans le circuit. Au-dessus de la tension de fusion, il ne faut pas s'attendre à une interruption sans étincelles.

A part ces propriétés du matériel brièvement décrites ici et les valeurs limites trouvées empiriquement, de nombreux autres facteurs, dont nous ne nous occuperons pas dans cet article, jouent encore un rôle déterminant.

2. Essais entrepris sur des contacts chargés électriquement

2.1. Renseignements sur les contacts examinés

Le tableau II donne le résumé des contacts utilisés pour les essais d'après les groupes chimiques, les alliages et les agglomérés. Il s'y trouve quelques contacts qui sont beaucoup employés. En outre, ce tableau cite également des contacts qui présentent un intérêt particulier pour des essais comparatifs, mais sont rarement utilisés.

L'exactitude des *compositions chimiques* indiquées a été semi-quantitativement examinée par la méthode spectrographique. Par la même occasion, la pureté des métaux et des alliages a été vérifiée. Des impuretés importantes n'ont été trouvées que dans les contacts en argent n° 5 (titane) et n° 6 (nickel); pour ce dernier, diverses caractéristiques qu'il faut attribuer à cette teneur en nickel se sont révélées au cours des essais.

Les *chiffres de dureté* (D_v) calculés d'après Vickers ont été obtenus à l'aide d'un microscélromètre (charge appliquée: 250...500 g*).

2.2. Conditions des essais

Les conditions des essais ont été intentionnellement choisies un peu plus sévères que les conditions auxquelles sont généralement soumis les contacts dans le service pratique. Mais elles se trouvent encore entièrement dans les limites permettant aux contacts de relais d'installations de commande à courant faible de fonctionner normalement. C'est pourquoi les résultats ne peuvent pas s'appliquer aux contacts qui conduisent des courants téléphoniques ou d'une manière générale de faibles courants à basses tensions.

Pour les essais, on a utilisé un petit dispositif à relais représenté à la figure 1: les relais ont été équipés des contacts à examiner. Le résumé ci-après donne toutes les caractéristiques et conditions des essais nécessaires aux renseignements.

Relais utilisés:

Relais Ericsson,
Ressorts de contact horizontaux,
Relais fermés par cache-poussière.

Nature et nombre des contacts:

Contacts dits de repos ou de relèvement,
1 contact pour chaque ressort,
contact positif en haut, contact négatif en bas.

Réglages mécaniques:

Pression du ressort supérieur: 15 g*,
Pression du ressort inférieur: 5 g*,
Contacts entraînés (action de nettoyage),
Liberté de vibration non garantie,
Pas de réglage pendant les essais,
Pas de nettoyage pendant les essais.

Caractéristiques des circuits:

Tension continue 48 V,
Intensité du courant 80 mA,
Circuit inductif,
Limitation du courant et inductance par bobines de relais Ericsson à noyaux encastrés,
Caractéristiques des enroulements: 600 Ω , 13 700 spires,
Fil de cuivre 0,15 mm, laqué,
Pas d'extinction des étincelles.

Connexions:

environ 1 connexion par seconde,
au total environ 10^7 connexions.

Tableau II. Composition des contacts examinés

Groupe chimique	N°	Composition	D_v kg*/mm ²	Forme	Diamètre en mm
Groupe argent	1	Ag 100 %	78	bombée	1,8
	2	Ag 100 %	72	bombée	1,8
	3	Ag 100 %	68	bombée	1,3
	4	Ag 100 %, plaqué (sur base Cu)	—	bombée	1,9
	5	Ag \approx 100 % + Ti \approx 0,15 %	—	bombée	1,6
	6	Ag \approx 100 % + Ni	65	bombée	1,8
Alliages en argent	7	Ag/Au 90/10	95	{ contact positif: plate contact négatif: cône tronqué	2,3 1,5/1,0
	8	Ag/Au 90/10	88	bombée	1,6
	9	Ag/W 70/30 aggloméré	110	bombée	1,6
Alliages en or	10	Au/Ni 95/5	190	bombée	1,3
	11	Au/Ni 95/5	190	bombée	1,9
Groupe platine	12	Pd 100 %	135	bombée	1,6
	13	Pt 100 % (plaqué)	80	bombée	1,9
	14	Pt 100 % (plaqué)	115	bombée	2,0
Alliages en platine	15	Pt/Ir 90/10	215	cône tronqué légèrement bombé	1,7/1,0
	16	Pt/Cu 95/5 («Cupleg»)	270	bombée	1,8
Groupe chrome	17	W 100 % (sur base Ag)	500	plate	2,0
	18	W 100 % (sur base Ag)	525	plate	2,0

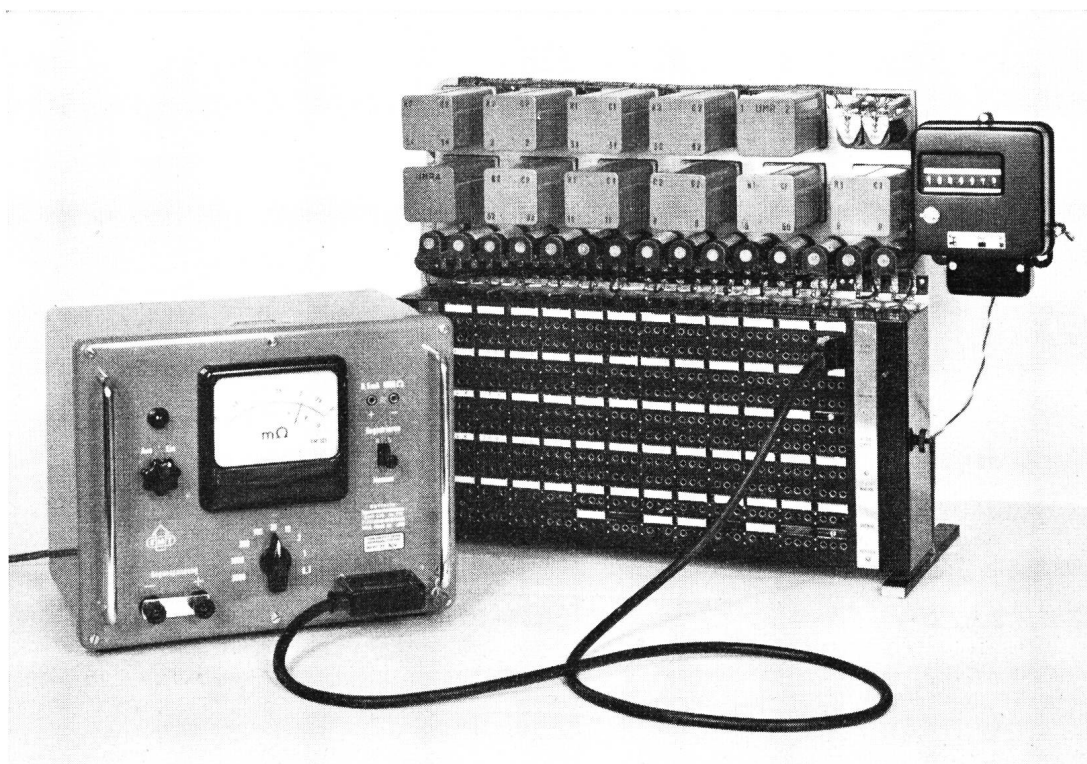


Fig. 1. Dispositif d'essai utilisé

Climat:

Conditions climatiques normales dans un local peu utilisé.

Nombre d'essais:

Deux essais pour chaque contact mentionné au tableau II.

2.3. Mesures de la résistance de contact sur les contacts chargés électriquement

La résistance de contact étant un critère décisif pour la qualité de la production des contacts, l'accent principal a été porté sur sa spécification par rapport au nombre de connexions. Le milliohmètre utilisé (voir fig. 1.) repose sur le principe de la mesure du courant et de la tension, les lignes d'amenée au potentiel étant séparées. La tension de mesure n'est que de quelques millivolts, de sorte que la tension de cohérence n'est en aucun cas atteinte. Toutes les valeurs de résistance indiquées ici donnent les résistances effectives de contact restant après déduction des résistances des ressorts.

Les figures 2a à 2l reproduisent un choix des résultats des essais obtenus. Pour que la compréhension de ces figures soit facilitée, un nombre assez grand de points de mesure ont été reportés; ils indiquent généralement les valeurs moyennes obtenues sur la base des essais faits à double (autrement, les courbes sont reproduites séparément). Ce n'est que lorsque le nombre des connexions est élevé qu'il représente en même temps les valeurs moyennes de diverses mesures faites les unes à la suite des autres.

La représentation dans le système logarithmique double a permis d'appliquer la régression et la corré-

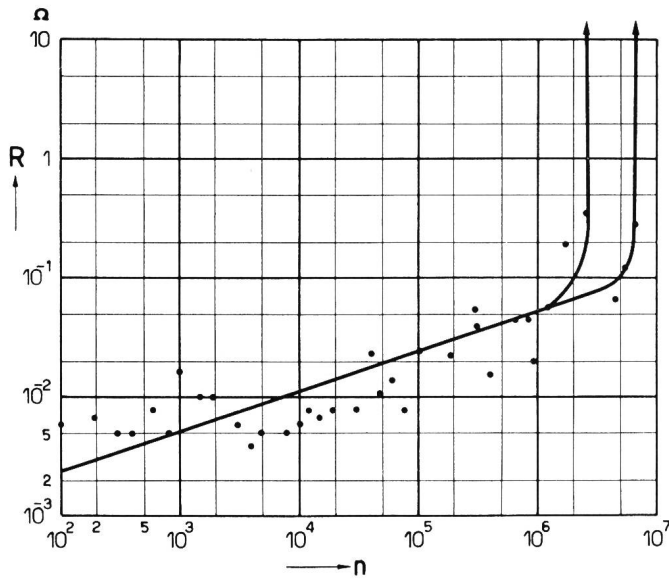
lation linéaires. Ainsi, pour obtenir des graphiques objectifs simples, on a calculé des droites régressives et on les a dessinées (ne concerne que les longs tronçons rectilignes de courbes).

Le tableau III donne le résumé de quelques résultats partiels numériques de mesures de résistance de contact. Par mesure de simplification, la valeur a été admise comme « infinie » dans tous les cas où la résistance de contact est supérieure à quelques ohms, c'est-à-dire où le contact est très mauvais. Les calculs statistiques faits pour les zones indiquées servent à juger les valeurs isolées très divergentes des résistances de contact et à trouver de façon objective le rapport entre ces valeurs et le nombre de connexions. Ainsi, le coefficient de détermination B indique la part que le changement du nombre de connexions n exerce sur le changement des résistances de contact; le coefficient de corrélation r a servi à étudier la dépendance existant entre ces grandeurs. Les appréciations figurant dans la dernière colonne du tableau III reposent sur la sécurité statistique $S = 99\%$, de sorte que les prévisions faites selon les règles conventionnelles ne doivent pas être considérées comme accidentelles.

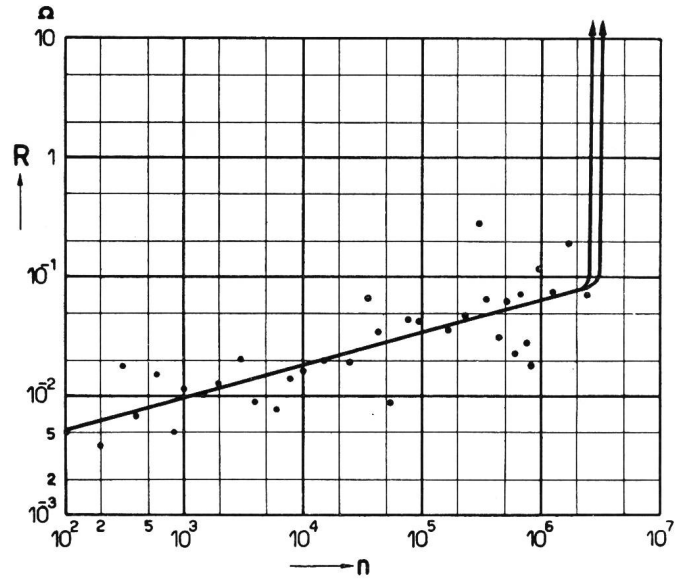
Le tableau IV a été dressé parce qu'on désirait avoir une récapitulation simple donnant de rapides renseignements. Les contacts y sont rangés d'après la courbe de leurs résistances de contact. Les valeurs indiquées n_{∞} donnent le nombre de connexions pour lesquelles les résistances de contact ont pratiquement atteint la valeur « infinie ». Les causes de l'accroissement à cette valeur sont traitées dans le paragraphe suivant.

Tableau III. Résultats partiels de mesures de résistance de contact sur des contacts chargés électriquement

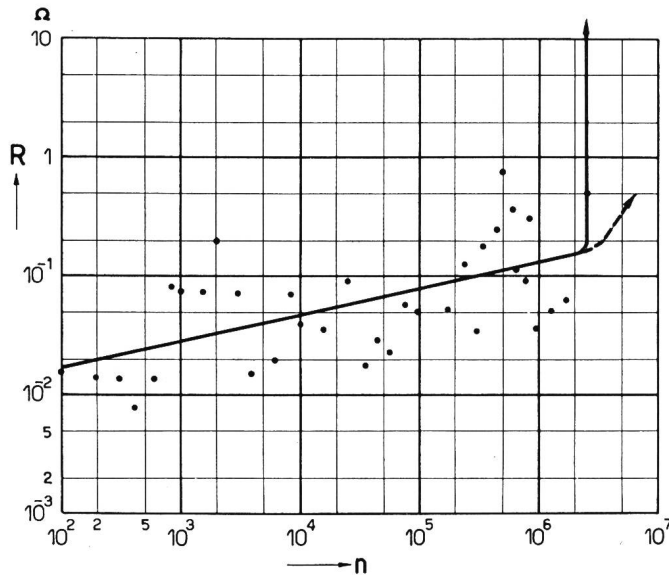
Contact		Résistances de contact en $m\Omega$ après n connexions							Evaluations statistiques			
N°	Métal	n \approx 0	n = 10^2	n = 10^3	n = 10^4	n = 10^5	n = 10^6	n = 10^7	Zone examinée	B	γ	Influence du nombre de connexions sur la résistance de contact
1	Ag	9	8	13	15	10	78	∞	n = $10^2 \dots 2 \cdot 10^6$	0,36	0,60	assurée
2	Ag	20	42	37	44	44	80	∞	n = $10^2 \dots 2 \cdot 10^6$	0,25	0,50	assurée
3	Ag	1	6	11	6	18	59	∞	n = $10^2 \dots 2 \cdot 10^6$	0,72	0,85	assurée
4	Ag plaqué	9	13	29	37	73	100	∞	n = $10^2 \dots 2 \cdot 10^6$	0,69	0,83	assurée
5	Ag (+ Ti)	16	13	20	20	31	140	∞	n = $10^2 \dots 2 \cdot 10^6$	0,70	0,84	assurée
6	Ag (+ Ni)	8	16	77	48	75	51	∞	n = $10^2 \dots 2 \cdot 10^6$	0,36	0,60	assurée
7	Ag/Au	14	25	120	130	170	120	∞	n = $2 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^6$	0,02	-0,14	non assurée
8	Ag/Au	4	5	9	20	41	75	∞	n = $10^2 \dots 2 \cdot 10^6$	0,63	0,80	assurée
9	Ag/W	21	46	580	2100	7200	∞	∞	n = $10^3 \dots 10^6$	0,76	0,87	assurée
10	Au/Ni	4	2	1	1	1	1	1	n = 0 ... 10^7	\approx 0	\approx 0	pratiquement pas d'influence
11	Au/Ni	5	3	2	2	2	2	2	n = 0 ... 10^7	\approx 0	\approx 0	pratiquement pas d'influence
12	Pd	5	4	4	5	6	10	37	n = $10^3 \dots 10^7$	0,74	0,86	assurée
13	Pt	10	13	6	8	22	11	100	n = $10^3 \dots 10^7$	0,63	0,79	assurée
14	Pt	5	4	4	6	8	10	100	n = $10^2 \dots 10^6$ (... 10^7)	0,14	0,37	jusqu'à n = 10^7 non assurée
15	Pt/Ir	11	14	7	11	8	13	32	n = $10^2 \dots 10^6$	0,03	0,18	jusqu'à n = 10^7 non assurée
16	Pt/Cu	20	18	15	14	14	35	75	n = $10^2 \dots 10^7$	0,45	0,67	assurée
17	W	77	300	1300	∞	∞	∞	∞	—	—	—	résultat des essais: influence très grande
18	W	140	80	33	200	1200	∞	∞	n = $10^2 \dots 10^6$	0,62	0,79	assurée



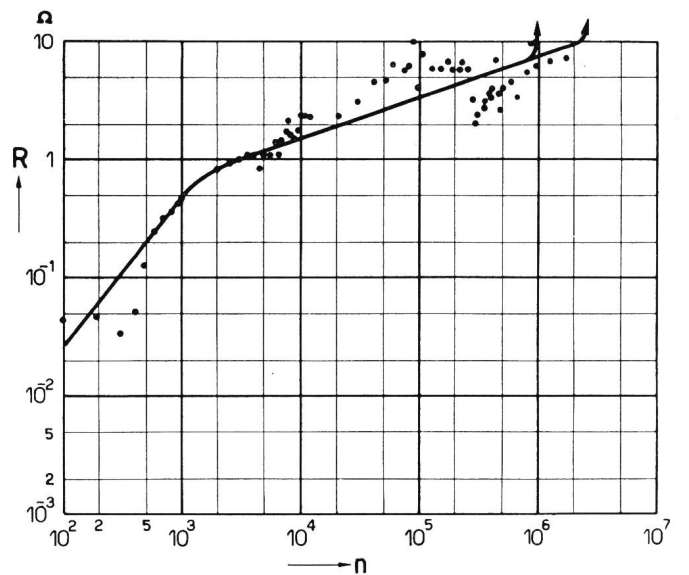
a) Contacts en argent n° 3



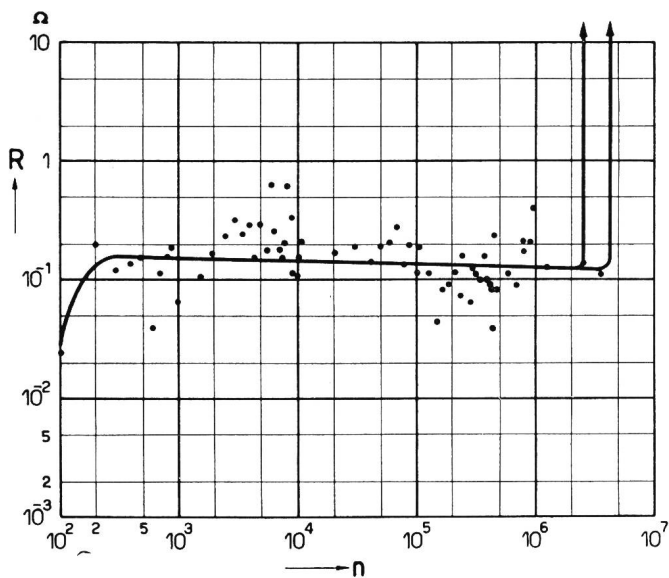
d) Contacts en argent-or n° 8



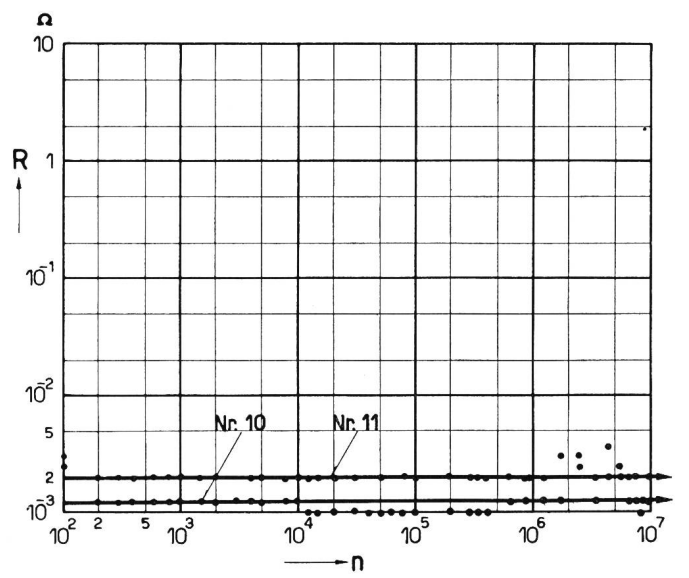
b) Contacts en argent n° 6



e) Contacts en argent-tungstène n° 9

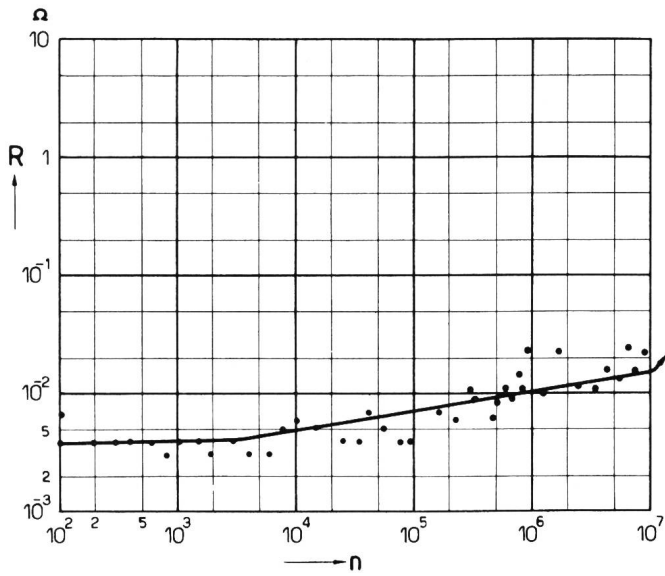


c) Contacts en argent-or n° 7

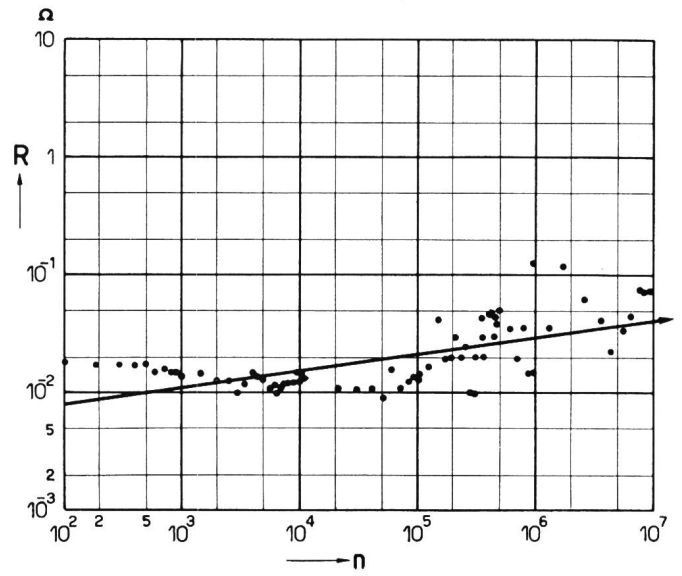


f) Contacts en or-nickel nos 10 et 11

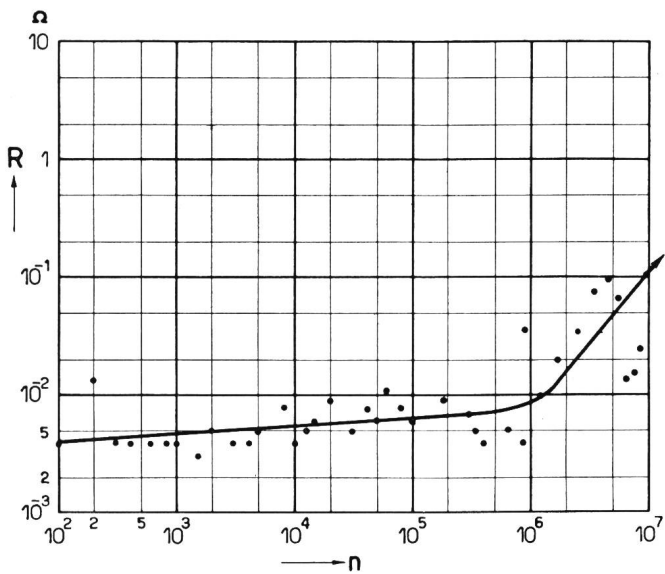
Fig. 2. Résistances de contacts chargés électriquement



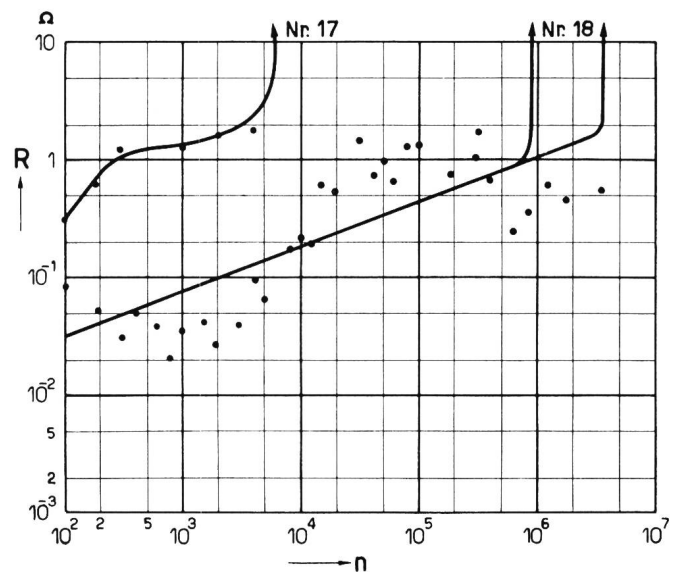
g) Contacts en palladium n° 12



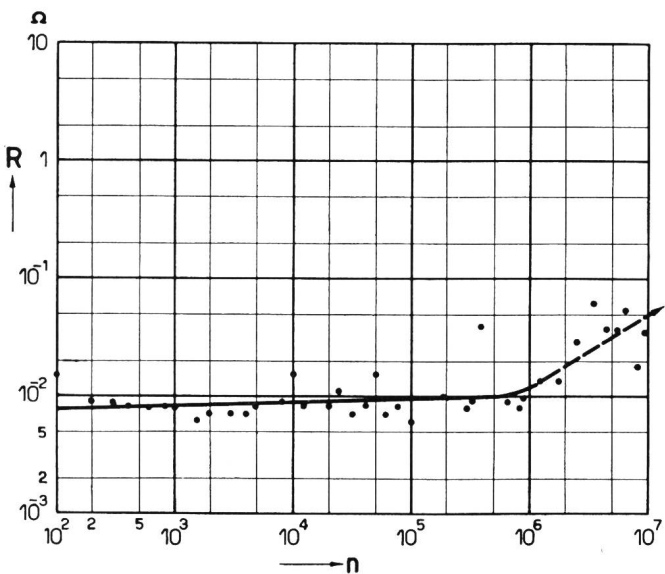
k) Contacts en platine-cuivre («Cupleg») n° 16



h) Contacts en platine n° 14



l) Contacts en tungstène n° 17 et 18



i) Contacts en platine-iridium n° 15

Tableau IV. Répartition des contacts chargés électriquement d'après la courbe de leur résistance de contact

N°	Métaux servant à fabriquer les contacts	n_{∞}	Courbe de la résistance de contact au-dessous de n_{∞}
10, 11	Au/Ni	$>10^7$	constante
12...16	Pd, Pt, Pt/Ir, Pt/Cu	$>10^7$	légèrement à modérément ascendante
1...6; 7, 8	Ag; Ag/Au	$\approx 10^6$	modérément ascendante; n° 7 (Ag/Au): $R \approx \text{const.} \approx 120 \text{ m}\Omega$
9	Ag/W	$\approx 10^6$	fortement ascendante
17, 18	W	$10^4...10^6$	fortement ascendante

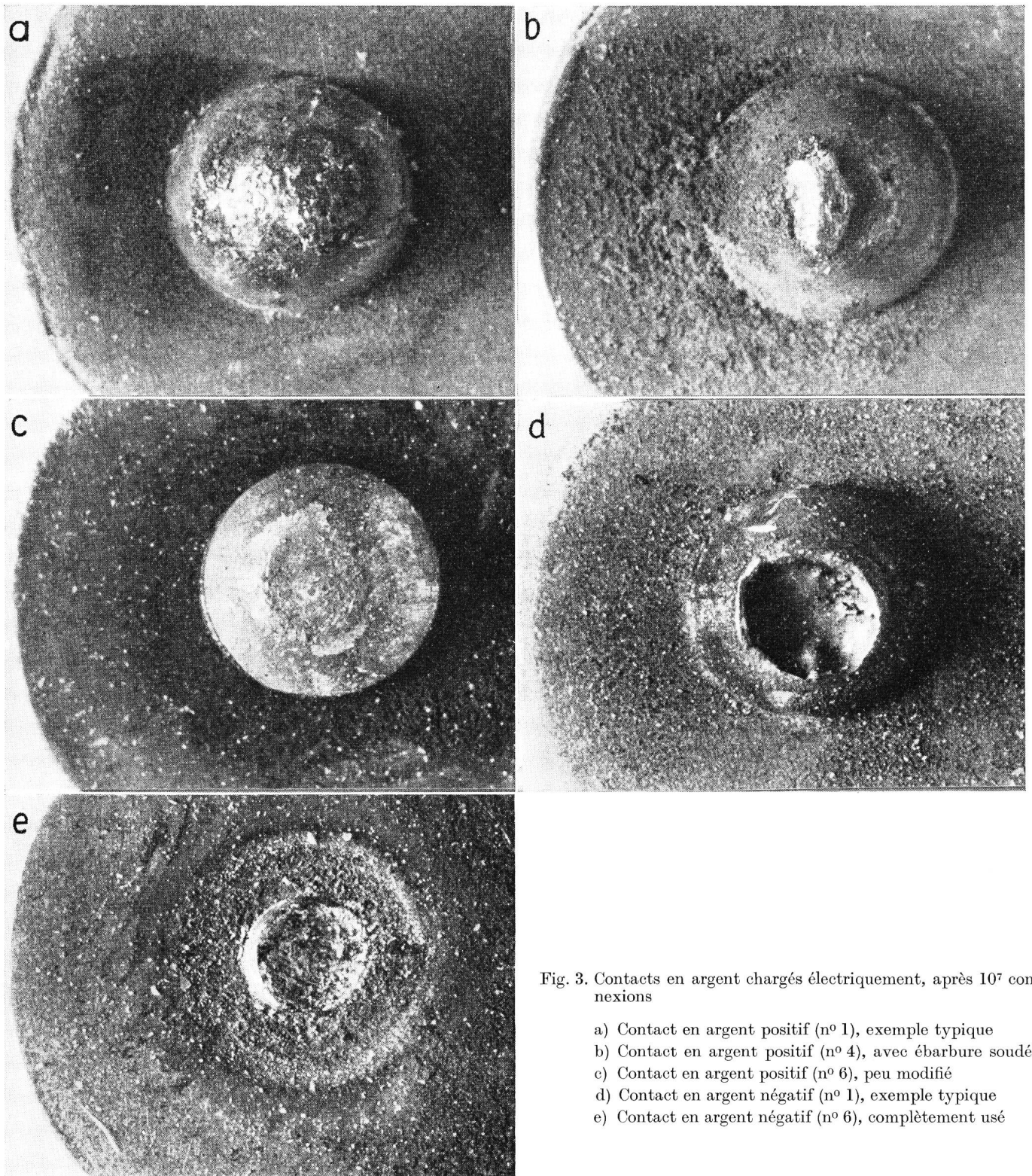


Fig. 3. Contacts en argent chargés électriquement, après 10^7 connexions

- a) Contact en argent positif (n° 1), exemple typique
- b) Contact en argent positif (n° 4), avec ébarbure soudée
- c) Contact en argent positif (n° 6), peu modifié
- d) Contact en argent négatif (n° 1), exemple typique
- e) Contact en argent négatif (n° 6), complètement usé

2.4. Essais microscopiques sur des contacts chargés électriquement

A la fin des essais traités au paragraphe précédent (10^7 connexions), les contacts ont été examinés au stéréomicroscope dans le dessein d'obtenir des renseignements qualitatifs sur la direction du transport des fines particules, l'aspect des surfaces de contact et la quantité de matériel réduite en poussière. Les

résultats sont reportés sur le tableau V. Les photographies choisies (fig. 3 à 8) ne donnent, contrairement à l'observation stéréomicroscopique, qu'une faible image de l'aspect de ces surfaces de contact souvent bizarres.

La forte augmentation de certaines résistances de contact peut être attribuée généralement à l'usure intense liée à la formation d'oxyde. Ceci est particu-

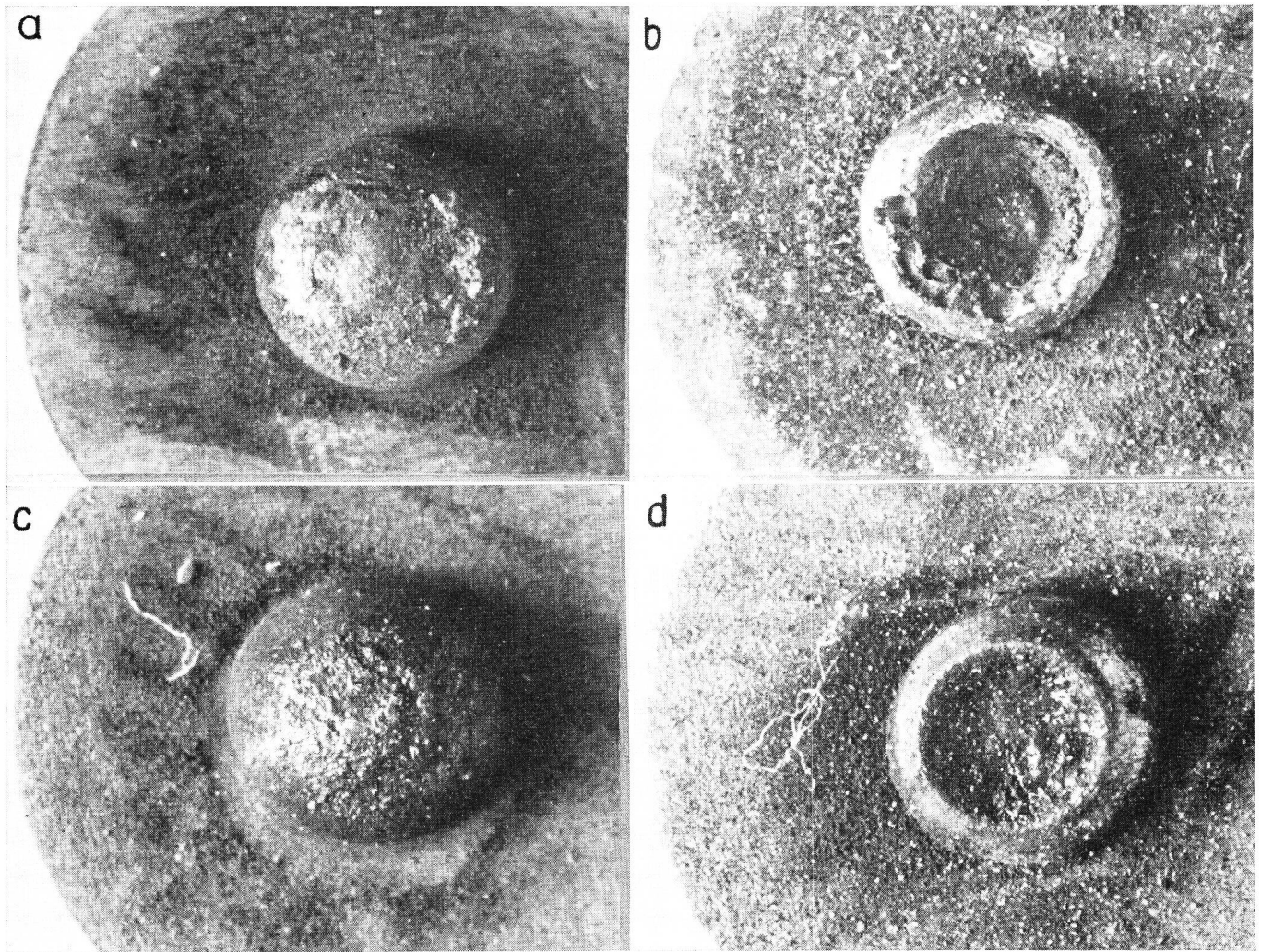


Fig. 4. Contacts à forte teneur en argent chargés électriquement, après 10^7 connexions

- a) Contact en argent-or positif (n° 8), exemple typique
 c) Contact en argent-tungstène positif (n° 9), exemple typique

- b) Contact en argent-or négatif (n° 8), exemple typique
 d) Contact en argent-tungstène négatif (n° 9), exemple typique

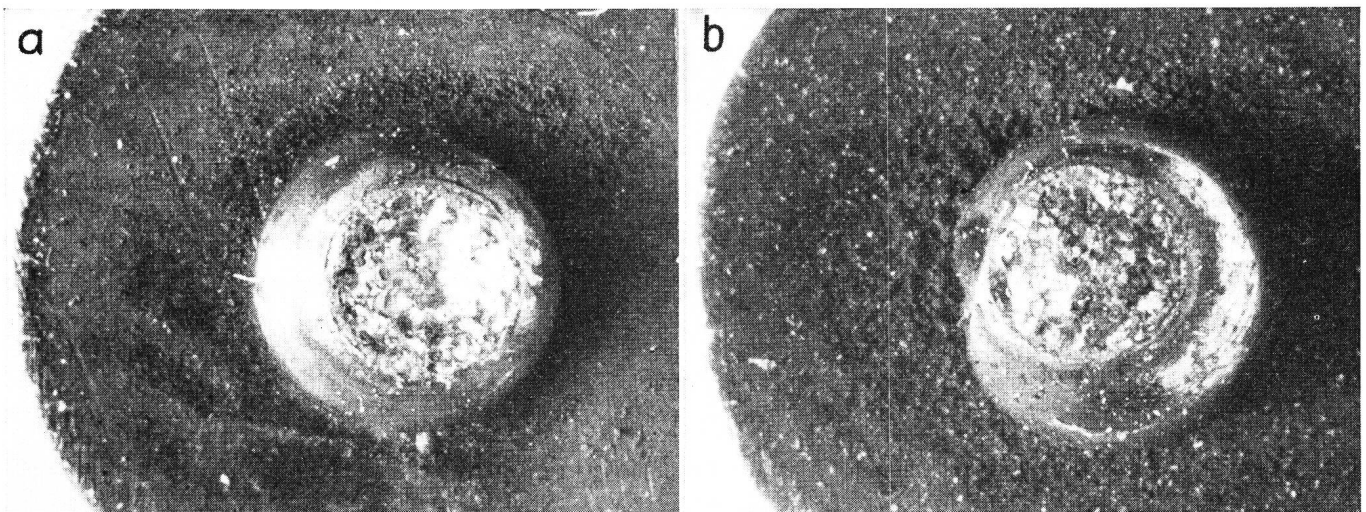


Fig. 5. Contacts à forte teneur en or chargés électriquement, après 10^7 connexions

- a) Contact en or-nickel positif (n° 11), exemple typique

- b) Contact en or-nickel négatif (n° 11), exemple typique

Tableau V. Etat des contacts chargés électriquement après 10⁷ connexions

Métal servant à fabriquer les contacts	N°	Direction de transport du matériel	Contact positif		Contact négatif		Poussière de métal déposée sur les ressorts
			Forme	Etat	Forme	Etat	
Ag	1	— → +	téton	métal soudé assez régulièrement d'aspect propre	cratère profond	régulier, sursaturé d'oxyde brun noir granuleux; bord du cratère bien marqué, brillant	poussière d'oxyde brun noir, légèrement granuleuse de même état que dans les cratères
	2	— → +	téton	le même que celui du contact en argent n° 1	—	contact entièrement usé	
	3	— → +	téton	métal irrégulièrement soudé, en forme de têtes séparées	—	contact entièrement usé	
	4	— → +	crête	traverse entièrement le contact, bords aigus: ligne de crête propre	cratère	le même que celui du contact n° 1	
	5	— → +	téton	le même que celui du contact n° 1	cratère	le même que celui du contact n° 1	
	6	— → +	peu modifiée	aussi bien les endroits à métal propre soudé que ceux où l'usure a eu lieu	—	presque entièrement usé. Contrairement aux n° 1 à 5, il existe encore du métal propre, poreux dans le reste du cratère	
Ag/Au (90/10)	7	↖ — → +	légère cuvette	dans l'usure légèrement en forme de cuvette, il existe encore quelques élévations locales de métal propre soudé	cratère plat	paroi du cratère régulière; le fond du cratère se compose d'environ 50 petits cratères. Intérieur du cratère saturé d'oxyde brun noir granuleux. Endroits brillants le long du bord du cratère	poussière d'oxyde brun noir de même état que dans le cratère
	8	↖ — → +	peu modifiée	en général, plus de métal transporté qu'usé. Métal déposé d'aspect propre	cratère profond	paroi et fond du cratère réguliers, sans cratères distincts	
Ag/W (70/30)	9	— → +	téton	régulier, pas de pointes, ni ébarbures ou autres formes.	cratère	régulier, recouvert d'oxyde brun noir granuleux, peu d'endroits d'aspect propre	quelque peu de poudre brune déposée de façon clairsemée
	10 et 11	+ → —	cratère	irrégulier, avec nervures, ponts et trous. Matériel brillant dans le cratère, de même que le bord du cratère	gros téton	en général, demi-sphérique régulier, endroits surélevés ou enfoncés tout à fait séparés. Métal transporté absolument propre et compact, pas de traces d'oxydation	

Tableau V. Etat des contacts chargés électriquement après 10⁷ connexions (suite)

Métal servant à fabriquer les contacts	N°	Direction de transport du matériel	Contact positif		Contact négatif		Poussière de métal déposée sur les ressorts
			Forme	Etat	Forme	Etat	
Pd	12	+ → —	cratère	intérieur du cratère généralement régulier, très légèrement strié ou troué par endroits, comprenant du métal propre, légèrement granuleux. Fond du cratère recouvert d'un dépôt noir	petit téton	en général demi-sphérique régulier, quelques bosses éparses. Métal propre soudé	beaucoup de poudre noir
Pt	13	+ → —	cratère	bord du cratère à arrête vive, aspect métallique argenté mat comme l'intérieur du cratère. Nombreux petits trous pénétrant profondément dans le fond du cratère	téton	surface assez bosselée, provenant du fait que le métal s'est soudé. Surface propre	ressort + : peu, sous forme de couche jaune verte ressort — : peu, sous forme de grains noirs
	14	+ → —	cratère	Intérieur du cratère parsemé de trous plus ou moins grands. Bord du cratère et aspérités dans le cratère d'aspect mat, cavités recouvertes de grains noirs	téton	surface bosselée, métal soudé en partie sous forme de dents assez grandes; surface propre	beaucoup de poudre noir
Pt/Ir (90/10)	15	+ → —	cratère profond et étroit	s'adapte exactement à la dent du contact négatif. Intérieur du cratère d'aspect argenté mat, quelques points granuleux et noirs séparés	dent puissante	hauteur de la dent soudée environ 0,5 mm, se composant de métal compact et brillant. Reste de la surface de contact primitive non modifié.	poudre de couleur brun noir en quantité modérée
Pt/Cu (95/5)	16	+ → —	cratère étroit	s'adapte exactement à la tige du contact négatif. Il n'est pas exclu que les deux contacts pourraient s'unir étroitement. Intérieur du cratère d'aspect argenté mat	courte pointe émoussée	pointe de métal noir granuleux, s'élargissant vers la base. Surface de contact primitive non modifiée	ressort + : très peu ressort — : quantité assez grande de poudre noir déposée autour du contact en forme de zone circulaire étroite
W	17	↑ + ; —	plate	presque entièrement usé. Quelques aspérités plates, surface striée de colorations gris bleu et brun rouge	cavité en forme de cuvette	très fortement usé; surface grossière, striée de colorations en bleu et brun rouge	beaucoup de poudre brun noir
	18	↑ + → —	sillons et légères cavités	il est frappant de découvrir ces sillons parallèles sur le côté et dans la direction du ressort. Légères cavités provenant de la destruction du matériel. Surface striée de colorations en gris bleu et brun rouge	sillons, faible apport de matériel	sillons parallèles sur le côté et en direction du ressort. Reste du contact recouvert de matériel en forme de bûchilles	beaucoup de poudre brun noir

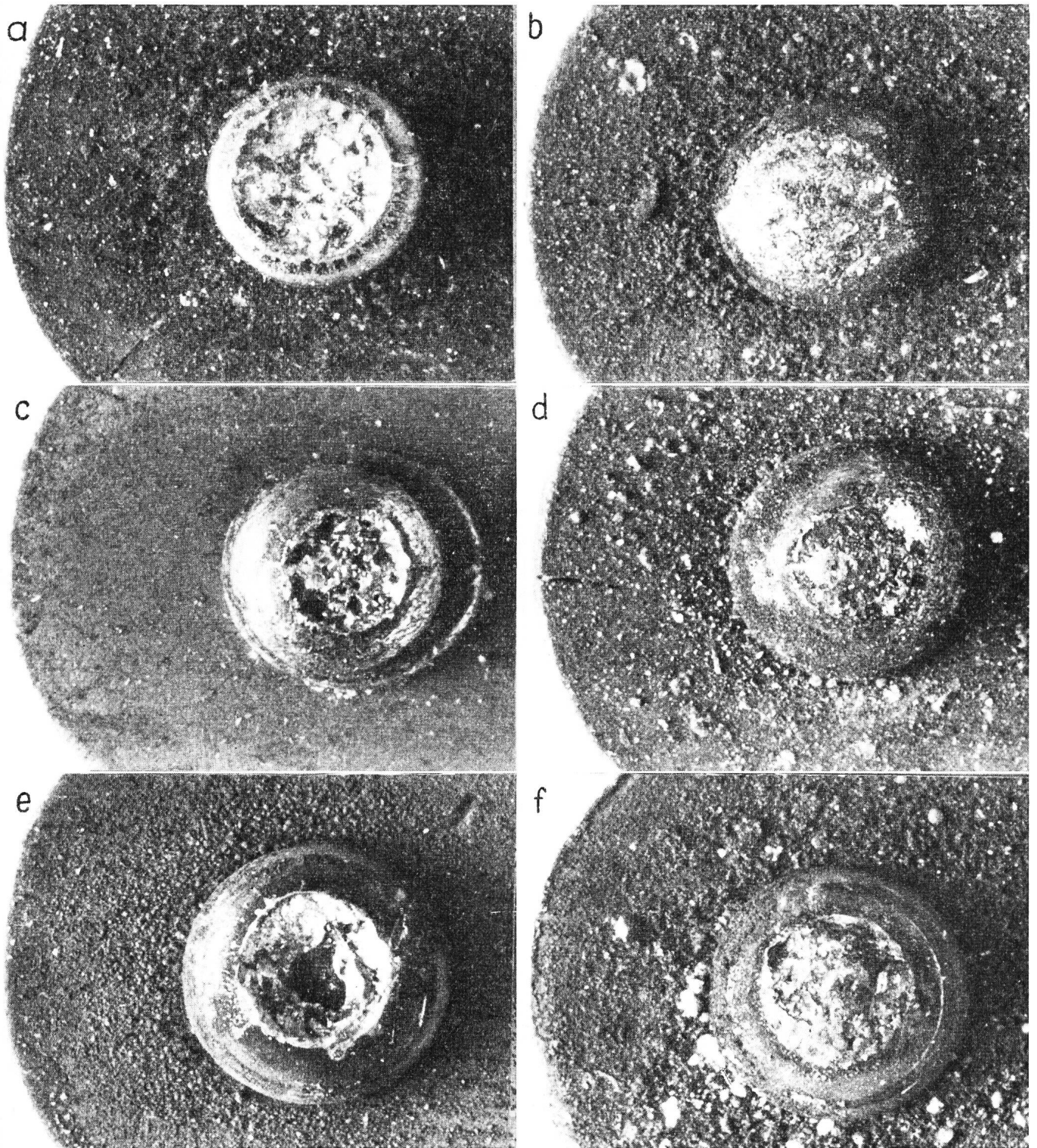


Fig. 6. Contacts en palladium et en platine chargés électriquement, après 10^7 connexions

- a) Contact en palladium positif (n° 12), exemple typique
 c) Contact en platine positif (n° 13), exemple typique
 e) Contact en platine positif (n° 14), montrant un grand cratère faisant pendant au contact négatif

- b) Contact en palladium négatif (n° 12), exemple typique
 d) Contact en platine négatif (n° 13), exemple typique
 f) Contact en platine négatif (n° 14), montrant une grande dent (légèrement visible au milieu)

lièrement le cas pour les contacts en argent, en argent-or et en argent-tungstène. Pour les contacts en tungstène, la cause en est également attribuée soit à l'usure (contact n° 17, voir figures 8a et 8b), soit à la couche

d'oxyde qui s'y forme (contact n° 18, voir figures 8c et 8d). Relevons spécialement que, pour tous les contacts qui, malgré l'usure, possèdent des résistances inférieures à un ohm, tant les cratères que les renflements

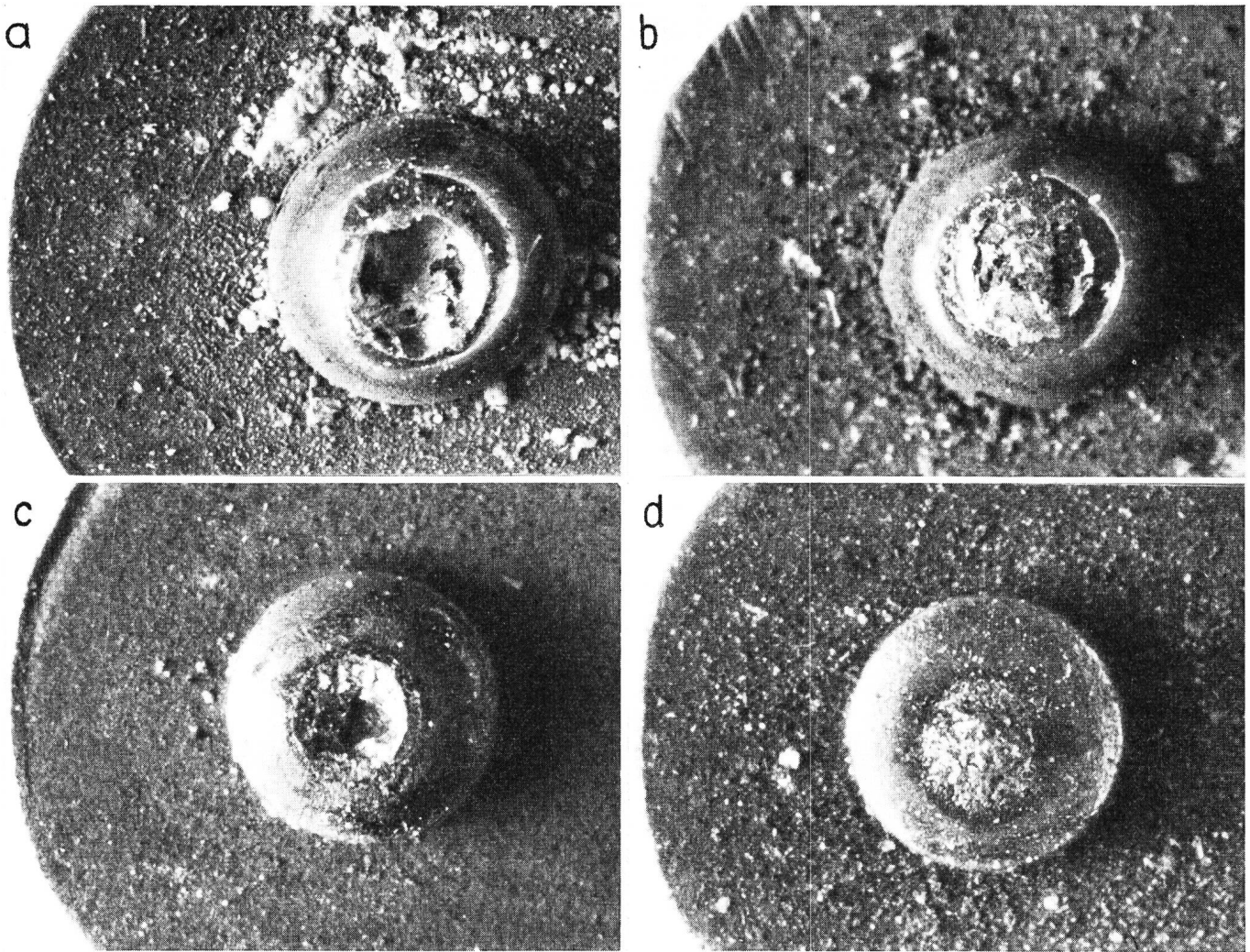


Fig. 7. Contacts à forte teneur en platine chargés électriquement, après 10^7 connexions

- a) Contact en platine-iridium positif (n° 15), exemple typique
 c) Contact en platine-cuivre positif (n° 16), exemple typique

- b) Contact en platine-iridium négatif (n° 15), exemple typique
 d) Contact en platine-cuivre négatif (n° 16), exemple typique

se composent de métal propre, c'est-à-dire qu'ils sont libres de produits d'oxydation. Cela concerne aussi bien les contacts en or-nickel, en palladium et en platine que les contacts constitués par les alliages de ces métaux. La grande résistance initiale du tungstène est due à sa dureté.

Mentionnons encore quelques cas particuliers.

Le contact en argent n° 6, comparé aux autres contacts en argent, montre un transport anormal de matériel: le contact positif n'a subi que peu de changement (voir figure 3c), en revanche le contact négatif est complètement usé (voir figure 3e). En outre, du métal propre, troué comme une éponge, se trouve dans le résidu du cratère. L'aspect de ce contact en argent si différent des autres contacts ne peut s'expliquer que par la faible teneur en nickel constatée. Il n'existe malheureusement plus aucun exemplaire de ces contacts provenant d'un solde.

Pour les contacts en argent-or nos 7 et 8, les contacts négatifs et positifs sont détruits (voir figures 4a et 4b).

La surface du contact positif se trouve dans le même état que celle du contact positif n° 6 (voir fig. 3c): légère cuvette comportant des endroits soudés. Les deux contacts étant détruits, une dérive \uparrow et \downarrow doit encore apparaître en plus du transport $- \rightarrow +$; mais il n'a pas été possible de déterminer si les opérations doivent être illustrées par le schéma $\uparrow \rightarrow \downarrow$ ou par $- \rightarrow \downarrow$.

Les contacts en platine et en alliages formés avec du platine ont tendance à former des dents et des pointes sur les contacts négatifs et des cavités correspondantes sur les contacts positifs (voir figures 6f et 6e), ce qui provoque le danger que les contacts restent accrochés.

En ce qui concerne le contact au tungstène n° 18, on voit des sillons parallèles bizarres en direction du ressort (voir figures 8c et 8d). Ce phénomène peut provenir du déplacement des endroits de passage du courant dans la direction du ressort pendant l'opération de relèvement, ce qui peut éventuellement

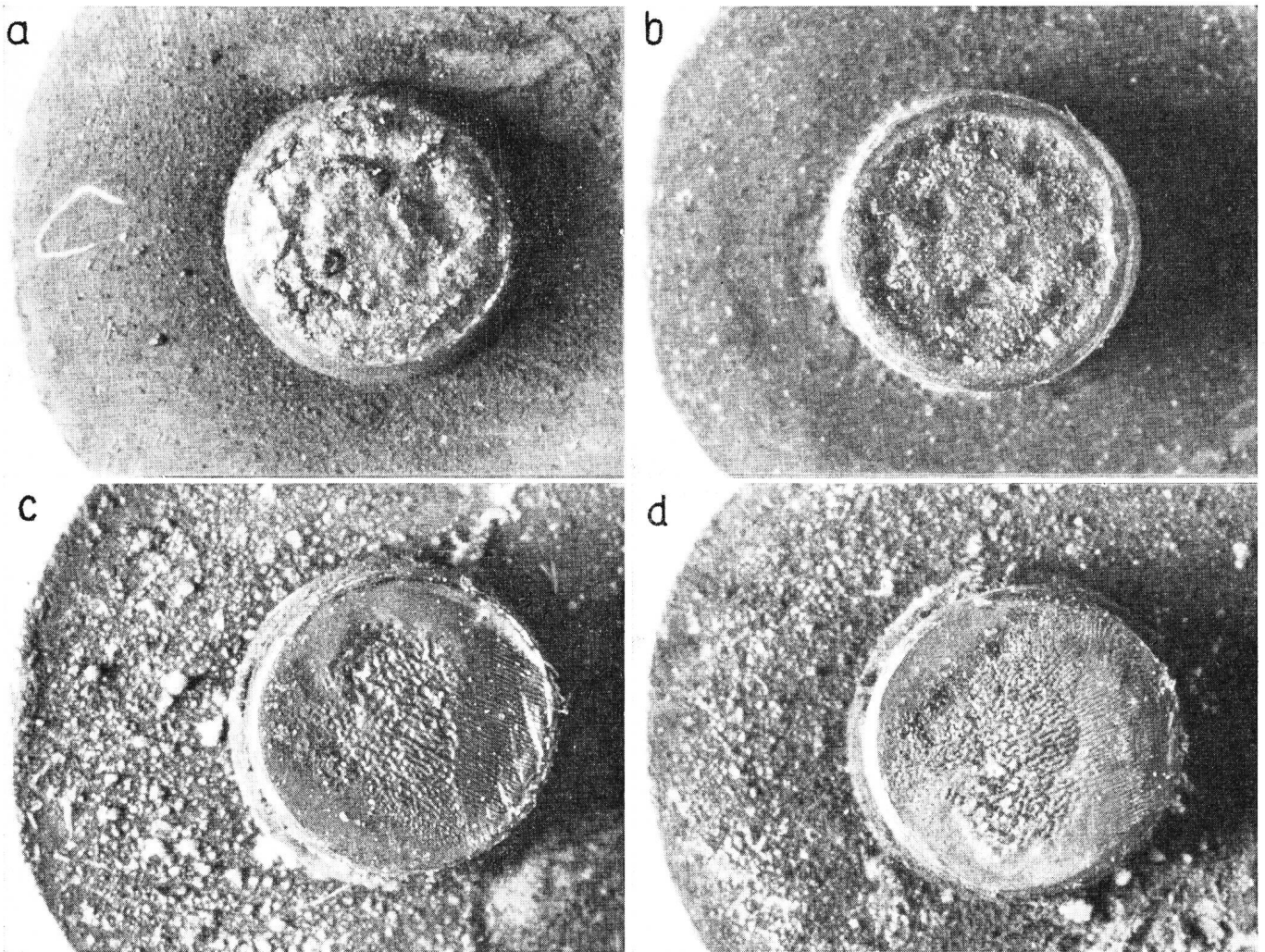


Fig. 8. Contacts en tungstène chargés électriquement après 10^7 connexions

- a) Contact en tungstène positif (n° 17), usure normale
 c) Contact en tungstène positif (n° 18), formation de sillons
 b) Contact en tungstène négatif (n° 17), usure normale
 d) Contact en tungstène négatif (n° 18), formation de sillons

s'expliquer par le fait que le tungstène, qui est très dur, ne possède que peu d'endroits par où le courant peut passer.

Pour terminer, retenons le fait connu que le transport de fines particules des contacts en argent et des contacts à forte teneur en argent (dans ce cas, alliages à l'or et au tungstène) se fait dans la direction $- \rightarrow +$, tandis que le sens du transport pour les métaux du groupe platine et les alliages au platine (contenant de l'iridium et du cuivre) est inverse, soit $+ \rightarrow -$. Pour le tungstène, le transport de matériel est faible par rapport à l'usure provoquée par l'oxydation.

3. Essais sur des contacts connectés sans courant

3.1. Exposé du problème et conditions des essais

Les publications concernant le bruit de fond dû aux contacts montrent que des résistances allant jusqu'à 100 k Ω peuvent apparaître sur des contacts connectés sans courant et faiblement chargés mécaniquement [35, 36]. Elles ont leur origine dans les couches étrangères. On est arrivé aux mêmes résultats

en faisant des essais à travers des tensions thermo-électriques sur des contacts chargés de couches étrangères [37]. En l'occurrence, les observations faites sur des contacts en fer connectés sans courant présentent un grand intérêt. On a, par exemple, constaté sur ces contacts qui sont actionnés 50 fois par seconde des colorations de recuit après une certaine période d'exploitation; elles doivent être attribuées au très fort dégagement de chaleur au même endroit du fait de ce martèlement continu [38].

Dans un tout autre ordre d'idées, c'est-à-dire lors des essais sur la physique du frottement, on a également constaté que des «pointes de température» locales allant jusqu'à 1000 degrés centésimaux, dont la durée est inférieure à 10^{-4} secondes, se produisent sur les corps en friction [39, 40]. C'est pourquoi il est tout à fait possible que des phénomènes analogues apparaissent sur des contacts fonctionnant simultanément.

Un autre fait important implique que chaque contact est recouvert au moins d'une couche étrangère

unimoléculaire qui peut se désagréger lorsque la pression de contact est assez grande, de sorte qu'il en résulte des endroits propres [41] qui se couvrent à nouveau lorsque les contacts relâchent. Il est du domaine du possible que ces opérations de désagrégation et de reconstitution se répètent tant que les contacts sont actionnés à un rythme continu, les couches comprimées s'entassant progressivement. Arrivent-elles à la suite de déplacements entre les points de contact se touchant, leur grande résistance de couche provoque un accroissement de la résistance.

Enfin, il faut encore considérer que le martèlement continu engendre un peu de poussière dans le métal servant à fabriquer les contacts. Ainsi que nous l'avons déjà mentionné au paragraphe 1.3., les métaux tendres servant à fabriquer les contacts devraient être particulièrement sujets à des dérangements.

Les phénomènes possibles sont, en tout cas, assez intéressants pour qu'il soit justifié d'entreprendre des essais avec des contacts connectés sans courant et sans tension. Des essais systématiques à ce sujet n'ont guère été entrepris jusqu'ici. L'usure mécanique de ces contacts ayant, par exemple, entièrement cédé le pas devant les très importantes modifications électriques et thermiques qui affectent les contacts chargés électriquement. Malgré tout, il faut escompter que ces essais peuvent amener des conclusions sur le comportement des contacts qui ne sont que très faiblement soumis à la charge électrique. Les mesures faites sur des contacts, expliquées par Holm [42] qui a évité tout choc et tout frottement, ne donnent aucune indication utile sur le comportement des contacts de relais travaillant dans des conditions telles qu'elles se présentent dans l'exploitation.

Les conditions d'essai pour ces contacts connectés sans courant sont les mêmes que celles qui régissent les contacts chargés électriquement (voir paragraphe 2.2.), la charge électrique en moins. Les résultats obtenus ont été analysés de manière identique et se présentent sous forme de courbes de résistances et d'examen microscopiques.

3.2. Mesures de résistances sur des contacts connectés sans courant

Les figures 9a à 9n représentent la courbe des résistances de contact mesurées par rapport au nombre des connexions. De même, le tableau VI contient quelques résultats partiels indiqués en chiffres et les évaluations statistiques. Le tableau VII donne une répartition des contacts analogue à celle du tableau IV selon la courbe qualitative de leurs résistances de contact.

La comparaison entre les courbes de résistance des contacts chargés électriquement et des contacts connectés sans courant met en évidence quelques particularités intéressantes. Il faut avant tout constater que les positions réciproques des contacts en argent et argent-or, d'une part, et les contacts du groupe platine, d'autre part, ont permuté (voir tableaux IV

et VII). Tandis que les contacts en argent et en or-argent chargés électriquement sont usés après 10^6 connexions environ, ils sont encore au-dessous de la valeur de 100 mΩ après 10^7 connexions lorsque le service se fait sans courant. Pour les contacts en palladium, en platine et à très forte teneur en platine, les conditions sont tout à fait inversées: ces contacts se comportant très bien lorsqu'ils sont chargés électriquement, sont généralement usés sans cette charge après 10^6 connexions ou montrent tout au moins un fort accroissement de leur résistance, ce qui signifie qu'il ne faut pas attendre que ces contacts travaillent absolument sans dérangement dès qu'ils ont une petite charge électrique.

Il est aussi surprenant qu'il soit nécessaire de «roder» certains contacts. Cela s'explique par le fait que la résistance de contact diminue au fur et à mesure que le nombre de connexions augmente. C'est en particulier le cas pour les contacts en or-nickel n°s 10 et 11, mais il est aussi intéressant de faire remarquer que ce phénomène se produit également pour le contact en argent n° 6 qui se distingue par une légère teneur en nickel et avait déjà surpris par un transport anormal de matériel lors des examens microscopiques dont il est question au paragraphe 2.4.

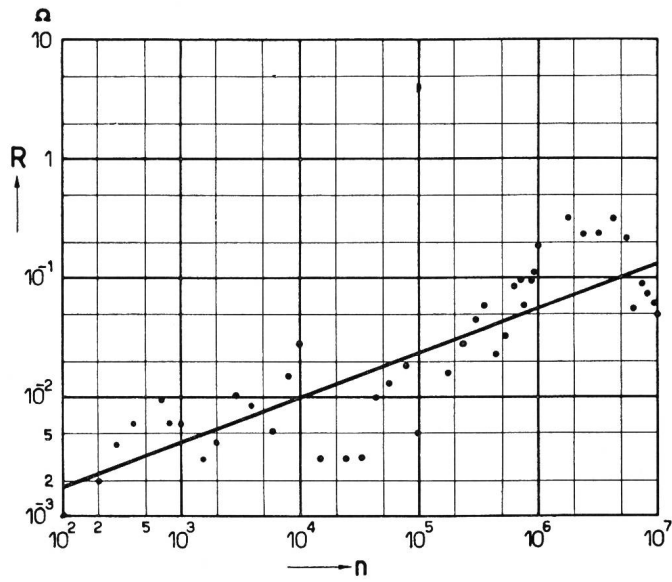
Très important est le fait que la résistance de contact est nettement plus élevée pour beaucoup de contacts non chargés électriquement que pour ceux qui sont chargés électriquement. Cela concerne spécialement les contacts en or-nickel (n°s 10 et 11), en palladium (n° 12) et en tungstène (n° 18); cela se remarque un peu moins nettement, mais en partie aussi dans les contacts en platine et en platine-palladium (n°s 14 et 15). L'hypothèse déjà émise antérieurement (voir paragraphe 1.3), que les étincelles provoquent un nettoyage, est ainsi confirmée. En l'occurrence, il ne faut non seulement penser à la décomposition de l'oxyde (il ne se forme pas d'oxyde

Tableau VII. Répartition des contacts connectés sans courant d'après la courbe de leur résistance de contact

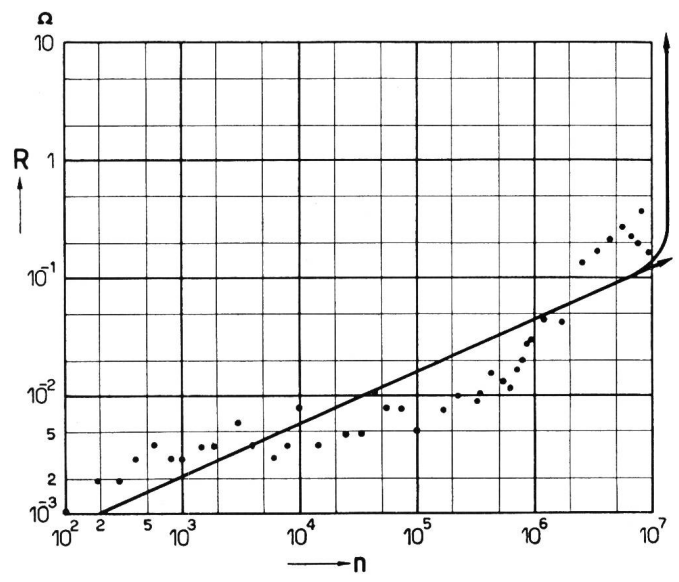
N°	Métaux servant à fabriquer les contacts	n_{∞}	Courbe de la résistance de contact au-dessous de n_{∞}
10, 11	Au/Ni	$>10^7$	légèrement descendante (n° 11 après $n = 10^6$ modérément ascendante)
13	Pt	$>10^7$	légèrement ascendante
1...4, 6; 7...9	Ag Ag/Au, Ag/W	$>10^7$	en général légèrement à modérément ascendante; particularités pour les contacts Ag n°s 3 et 6
12, 14 15, 16	Pd; Pt, Pt/Ir, Pt/Cu	$10^6...10^7$	pratiquement constante (n° 14, Pt: légèrement ascendante)
18	W	$10^4...10^6$	modérément ascendante

Tableau VI. Résultats partiels des mesures de résistance sur des contacts connectés électriquement

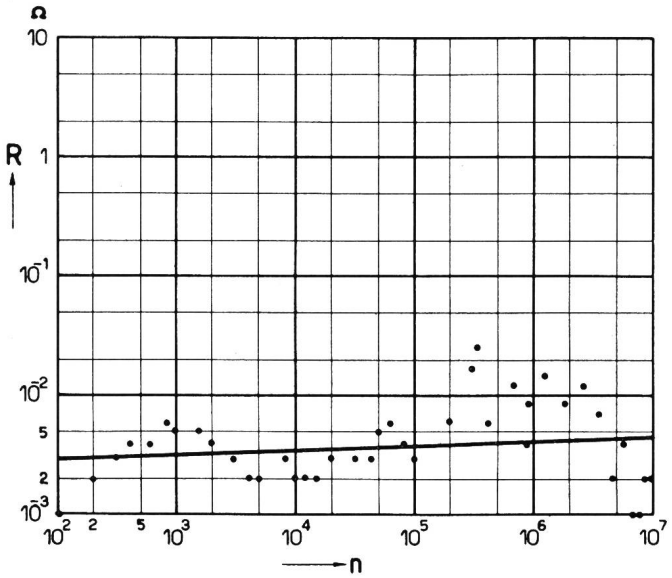
Contact		Résistances de contact en mΩ après n connexions							Evaluations statistiques				
N°	Métal	n ≈ 0	n = 10 ²	n = 10 ³	n = 10 ⁴	n = 10 ⁵	n = 10 ⁶	n = 10 ⁷	zone examinée	B	r	Influence du nombre de connexions sur la résistance de contact	
1	Ag	1	1	5	16	14	190	48	n = 10 ² ...10 ⁷	0,75	0,87	assurée	
2	Ag	1	1	2	3	19	48	150	n = 10 ² ...10 ⁷	0,89	0,94	assurée	
3	Ag	1	1	5	2	4	15	3	n = 10 ² ...10 ⁷	0,04	0,18	non assurée	
4	Ag plaqué	1	1	3	4	9	9	22	n = 10 ² ...10 ⁷	0,66	0,81	assurée	
6	Ag (+Ni)	4	5	11	9	0	1	1	n = 10 ² ...10 ⁴	0,45	0,67	jusqu'à n = 10 ⁴ ; juste assurée; au-dessus de n = 3·10 ⁴ pas d'influence	
7	Ag/Au	3	3	5	34	12	8	55	n = 10 ² ...10 ⁷	0,43	0,66	assurée	
8	Ag/Au	1	1	3	5	7	46	180	n = 10 ² ...10 ⁷	0,84	0,92	assurée	
9	Ag/W	2	3	5	4	8	19	20	n = 10 ² ...10 ⁷	0,56	0,75	assurée	
10	Au/Ni	5	3	7	3	3	3	2	n = 10 ² ...10 ⁷	0,28	-0,53	assurée	
11	Au/Ni	5	6	5	4	3	37	4	n = 10 ² ...2·10 ⁵	0,94	-0,97	assurée	
12	Pd	9	8	8	7	7	320	57/∞	n = 10 ² ...3·10 ⁵	≈ 0	-0,02	non assurée	
13	Pt	7	4	7	12	18	21	12	n = 10 ² ...10 ⁷	0,37	0,61	assurée	
14	Pt	6	6	10	13	12	∞	∞	n = 10 ² ...3·10 ⁵	0,40	0,63	assurée	
15	Pt/Ir	10	10	6	15	15	15/1700	15/2000	n = 10 ² ...10 ⁶	0,03	0,16	non assurée	
16	Pt/Cu	36	25	30	27	38	28	29	n = 10 ² ...7·10 ⁶	0,01	-0,10	non assurée	
18	W	620	240	530	690	∞	∞	∞	n = 10 ² ...10 ⁶	0,55	0,74	assurée	



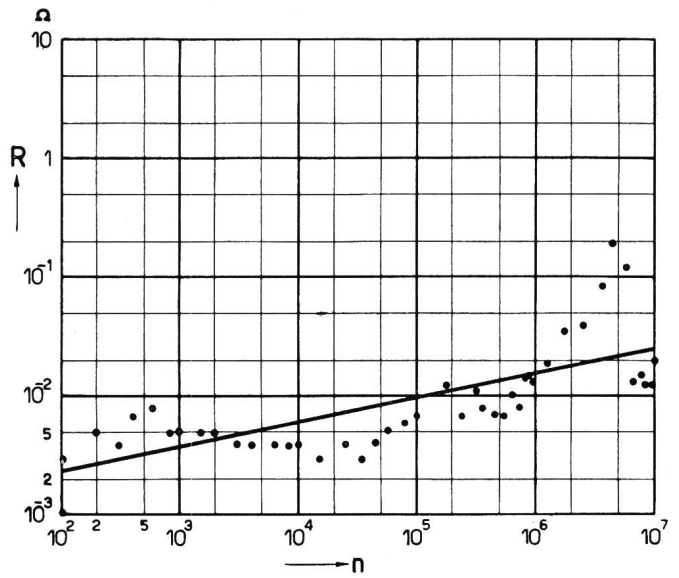
a) Contacts en argent n° 1



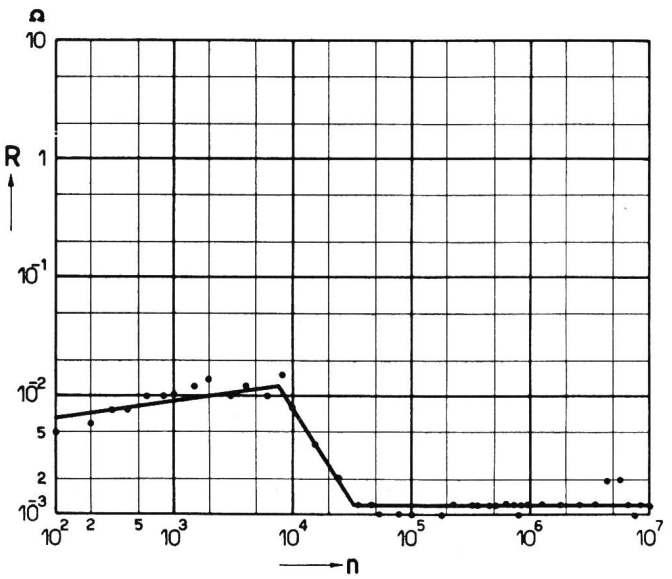
d) Contacts en argent-or n° 8



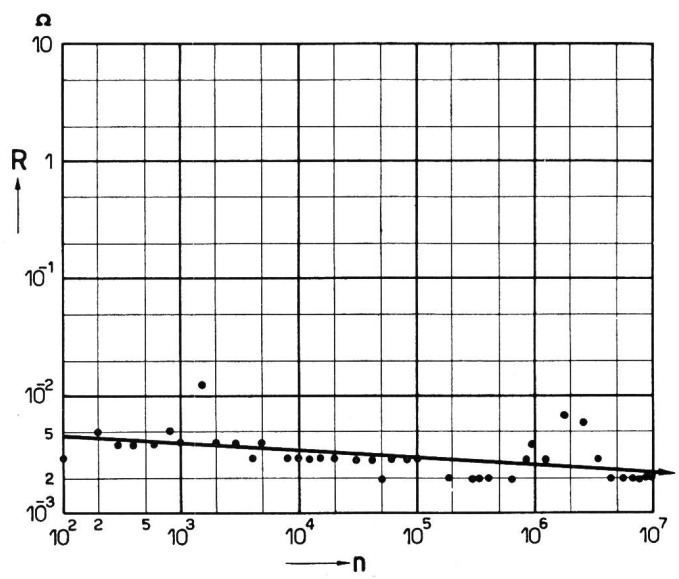
b) Contacts en argent n° 3



e) Contacts en argent-tungstène n° 9

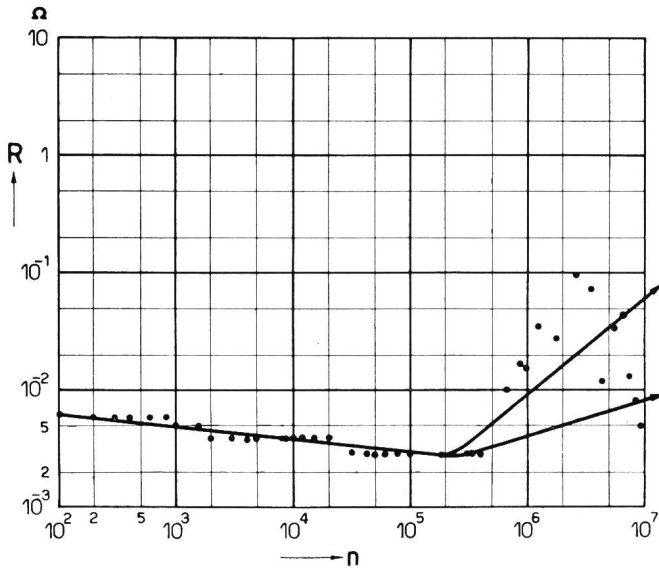


c) Contacts en argent n° 6

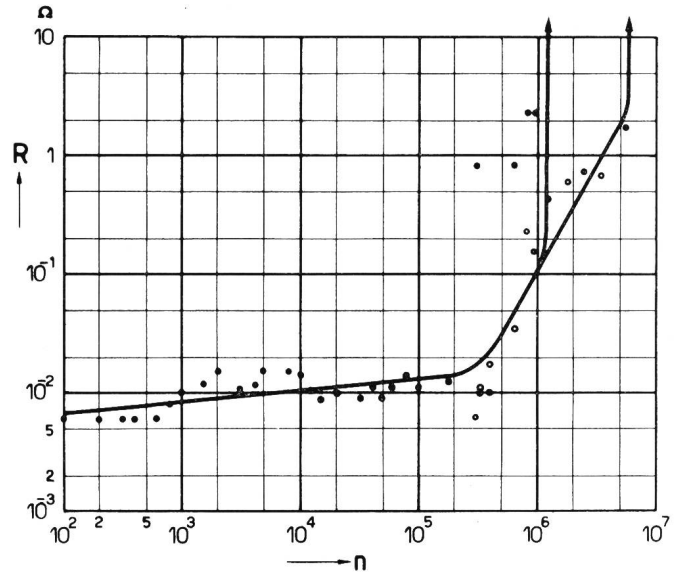


f) Contacts en or-nickel n° 10

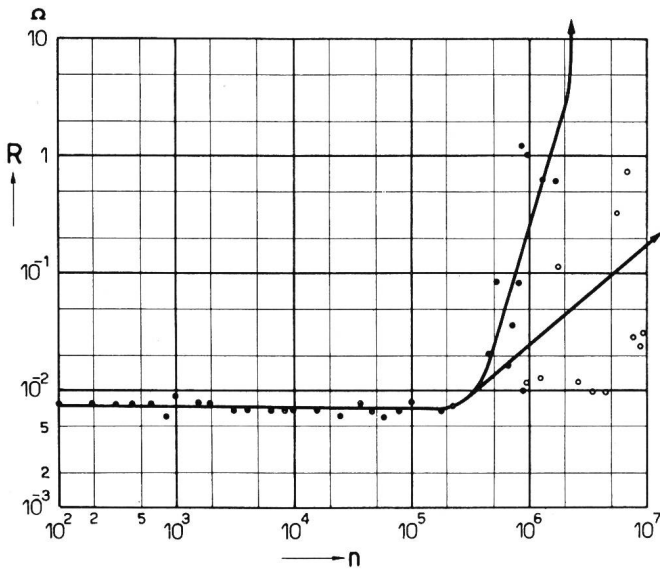
Fig. 9. Résistances de contacts connectés sans courant



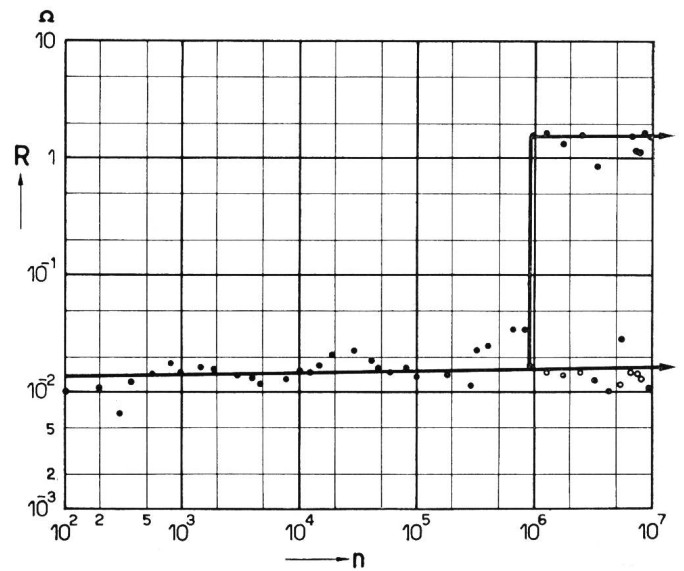
g) Contacts en or-nickel n° 11



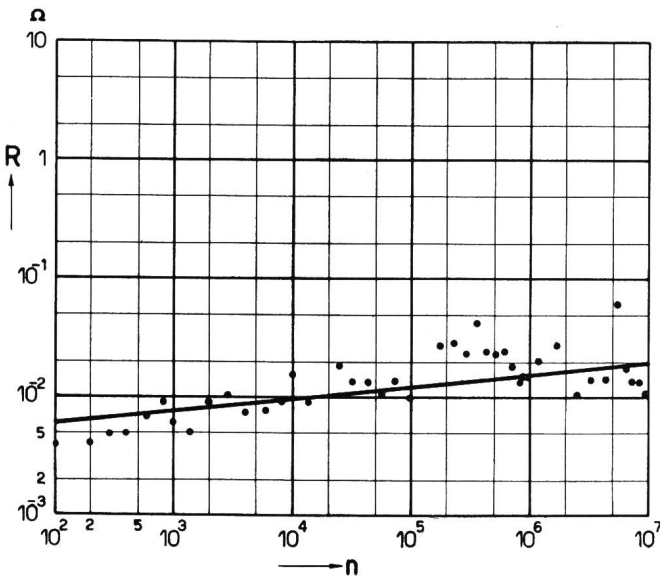
k) Contacts en platine n° 14



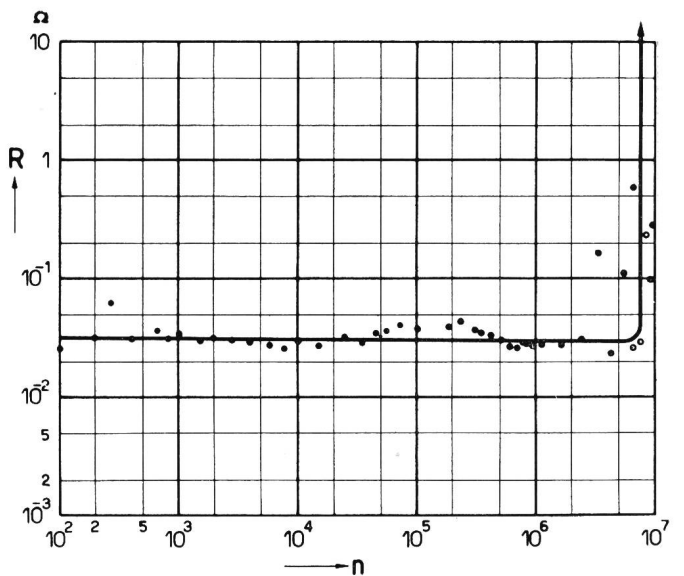
h) Contacts en palladium n° 12



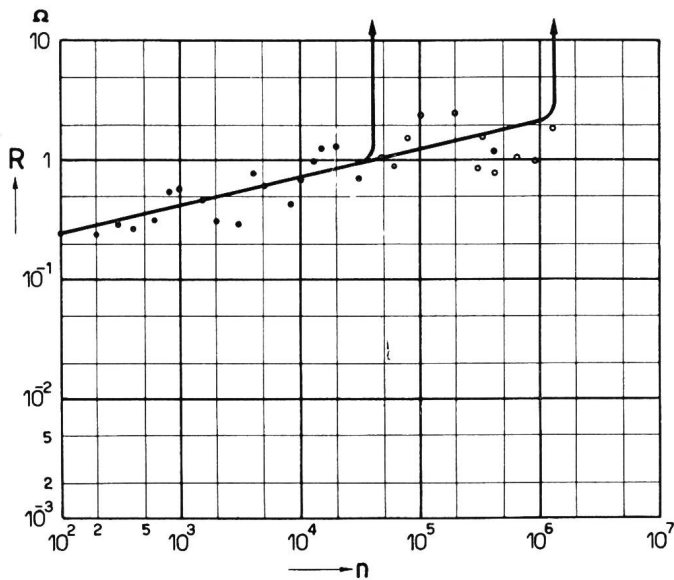
l) Contacts en platine-iridium n° 15



i) Contacts en platine n° 13



m) Contacts en platine-cuivre («Cupleg») n° 16



n) Contacts en tungstène n° 18

sur le platine), mais aussi à l'élimination de la poussière. Les essais montrent dans tous les cas qu'un renouvellement des surfaces est favorable aux métaux susmentionnés. Il faut entendre par ce renouvellement la formation de points métalliquement propres toujours nouveaux sur la surface des contacts, ces points n'étant naturellement pas souillés au début par la poussière. Pour les contacts connectés sans courant, il ne faut en principe pas s'attendre à un renouvellement efficace des surfaces. Cependant, les résultats communiqués au paragraphe 3.3. ci-après montrent que des modifications et des renouvellements de surfaces peuvent aussi se produire ici.

3.3. Examens microscopiques entrepris sur des contacts connectés sans courant

Les examens entrepris également après 10^7 connexions montrent que les surfaces de contact ne sont en gros que peu modifiées par les contraintes mécaniques. Mais en observant de façon plus précise, on constate des phénomènes intéressants et des différences appréciables entre les différents contacts. Le tableau VIII fixe pour chaque contact le résultat de l'examen microscopique. Les figures 10a à 10i donnent quelques photographies caractéristiques de surfaces de contact.

Il faut considérer comme un fait très important que des déplacements et, ce qui est particulièrement intéressant, des transports de matériel se sont également produits lors de ces essais. Par déplacement, il faut entendre aussi bien l'aplatissement de la surface d'abord convexe, produit par l'effet de martèlement, que le refoulement du métal de la surface de contact vers le bord du contact (exemples de refoulement: contact en argent n° 4, fig. 10a, contacts en platine nos 13 et 14, fig. 10g). Le transport de matériel qui a lieu d'un contact à l'autre est particulièrement remarquable pour les deux contacts en argent nos 3 et 6; à ce propos, il faut se rappeler

que le contact en argent à forte teneur en nickel n° 6 a déjà retenu l'attention antérieurement du fait de sa particularité. Le contact en or-nickel n° 10 (voir figure 10e) possède également des dispositions spéciales pour le transport du matériel. Enfin, rappelons la formation de sillons qui se produit sur les contacts en platine nos 13 et 14 (voir figure 10g) dont il a déjà été question. Le transport du matériel a lieu sans exception (pour tous les six contacts qui présentent cette particularité) du contact mobile au contact fixe.

Il est important qu'il existe un rapport parfaitement déterminé entre la courbe de la résistance de contact et le renouvellement de la surface effectué à la suite du transport du matériel. Ainsi des contacts où le transport du matériel s'est produit (nos 3, 6, 10) ou sur lesquels les points de contact métalliquement propres sont apparus à mesure que le nombre des connexions augmentait, ne montrent aucune augmentation de la résistance de contact. Pour les contacts en or-nickel (nos 10 et 11), la valeur de résistance initiale de 5 m Ω environ descend même à la valeur de 1...2 m Ω ; il s'agit de la valeur constante que les contacts recevaient lors de la charge électrique pendant plus de 10^7 connexions.

Les résultats trouvés par Bowden [39] et déjà mentionnés sur le frottement de corps fixes sont probablement les plus à même d'expliquer ces phénomènes. Même si les températures apparaissant dans les «pointes de température» n'atteignent pas les points de fusion des métaux servant à fabriquer les contacts, elles sont néanmoins supérieures aux températures de ramollissement, ce qui permet le transport du matériel. Il en va naturellement de même pour le déplacement du matériel. Pour le platine, dont la température de ramollissement t_r est assez basse (voir tableau I), il est clair que le matériel est chassé du milieu du contact vers le bord (fig. 10g) et qu'il se produit même des sillons de la même manière que sur les contacts en tungstène chargés électriquement.

Comme possibilité d'explication, il ne faut pas rejeter l'idée que des courants thermiques internes, circulant entre les contacts fermés, jouent un certain rôle. Il faut en effet admettre que, lorsque les contacts sont collés ensemble, les points de contact n'ont pas tous la même température. Des alliages communs (contacts en or-nickel nos 10 et 11) et des impuretés apparentes (contact en argent à teneur en nickel n° 6) paraissent également étayer ces effets.

On a constaté au paragraphe 3.2. que les contacts du groupe platine soumis aux essais ont un comportement nettement défavorable lorsqu'ils ne sont pas chargés de courant et qu'ils sont généralement usés après 10^6 connexions. Cette découverte s'appuie sur l'examen purement microscopique des surfaces des contacts. Il est en effet surprenant que des colorations très sombres ayant la forme de taches se présentent aux points de friction de tous ces contacts.

Pour les contacts en palladium, c'est la production d'oxyde qui entre en considération, ce métal s'oxy-

Tableau VIII. Etat des contacts connectés sans courant après 10^7 connexions

Métal servant à fabriquer les contacts	N°	Transport de matériel	Contact (supérieur) mobile	Contact (inférieur) fixe
Ag	1	non	léger aplatissement d'environ 0,1 mm de diamètre; taches brunâtres sur la surface du contact	taches brunâtres sur la surface du contact
	2	non	léger aplatissement	surface du contact un peu rugueuse
	3	oui	léger aplatissement et petite cavité bien visible provoquée par le transport du matériel	un peu de métal propre soudé
	4	non	léger aplatissement; le métal repoussé est amassé en rond autour de l'endroit aplati sous forme d'ébarbure	en partie de nombreuses taches sombres
	6	oui	petite cavité propre par suite du transport du matériel	petite surface circulaire dans le milieu de laquelle un peu de métal propre est soudé
Ag/Au (90/10)	7	non	non modifié	non modifié
	8	non	non modifié	légère tache sombre au point de frottement des contacts
Ag/W (70/30)	9	non	surface de contact en partie légèrement sombre	non modifié
Au/Ni (95/5)	10	oui	petite cavité ronde comportant plusieurs points propres	un peu de métal jaunâtre déposé
	11	non	léger aplatissement d'aspect jaunâtre	léger aplatissement d'aspect jaunâtre
Pd	12	non	léger aplatissement de couleur foncée	léger aplatissement de couleur foncée
Pt	13	surface modifiée	soit le contact mobile, soit le contact fixe est nettement aplati et le métal repoussé est comprimé sur le bord de l'aplatissement. La cavité en forme de cuvette qui en résulte est marquée de plusieurs sillons parallèles	
	14	surface modifiée	net aplatissement, début de formation de sillons, contact de couleur foncée	léger aplatissement, couleur foncée
Pt/Ir (90/10)	15	non	léger aplatissement, couleur foncée	léger aplatissement, couleur foncée
Pt/Cu (95/5)	16	non	léger aplatissement, couleur foncée	léger aplatissement, couleur foncée
W	18	non	non modifié	non modifié

dant déjà à 350 degrés centésimaux; on ne trouve pas d'explication satisfaisante pour les contacts en platine.

Sur les contacts en argent, on n'a pu trouver aucune coloration importante.

4. Essais sur des contacts soumis à l'étincelle à haute tension

4.1. Exposé du problème et conditions des essais

Les essais entrepris ici sont en quelque sorte l'opposé de ceux qui sont décrits au chapitre 3 de cet article. Tandis que les contacts n'étaient soumis, du moins extérieurement, qu'à une contrainte méca-

que, ils n'obéissent ici qu'à une contrainte purement électrique.

Dans un rapport antérieur du laboratoire de recherches et d'essais [43], on a déjà fait remarquer que les contacts en argent-palladium se comportent différemment, selon la teneur en palladium, lorsqu'ils sont soumis à des étincelles à haute tension de fréquences élevées. L'étincelle produit des fentes ramifiées sur la surface des contacts dont la composition est Ag/Pd 90/10, tandis que la surface des contacts dont la composition est Ag/Pd 80/20 prend l'aspect d'une croûte, composée de «cellules» (figure 11; voir également les figures 12f et 12g). La «forme ramifiée» n'est que le prélude de la «forme en cellules»; après une période de

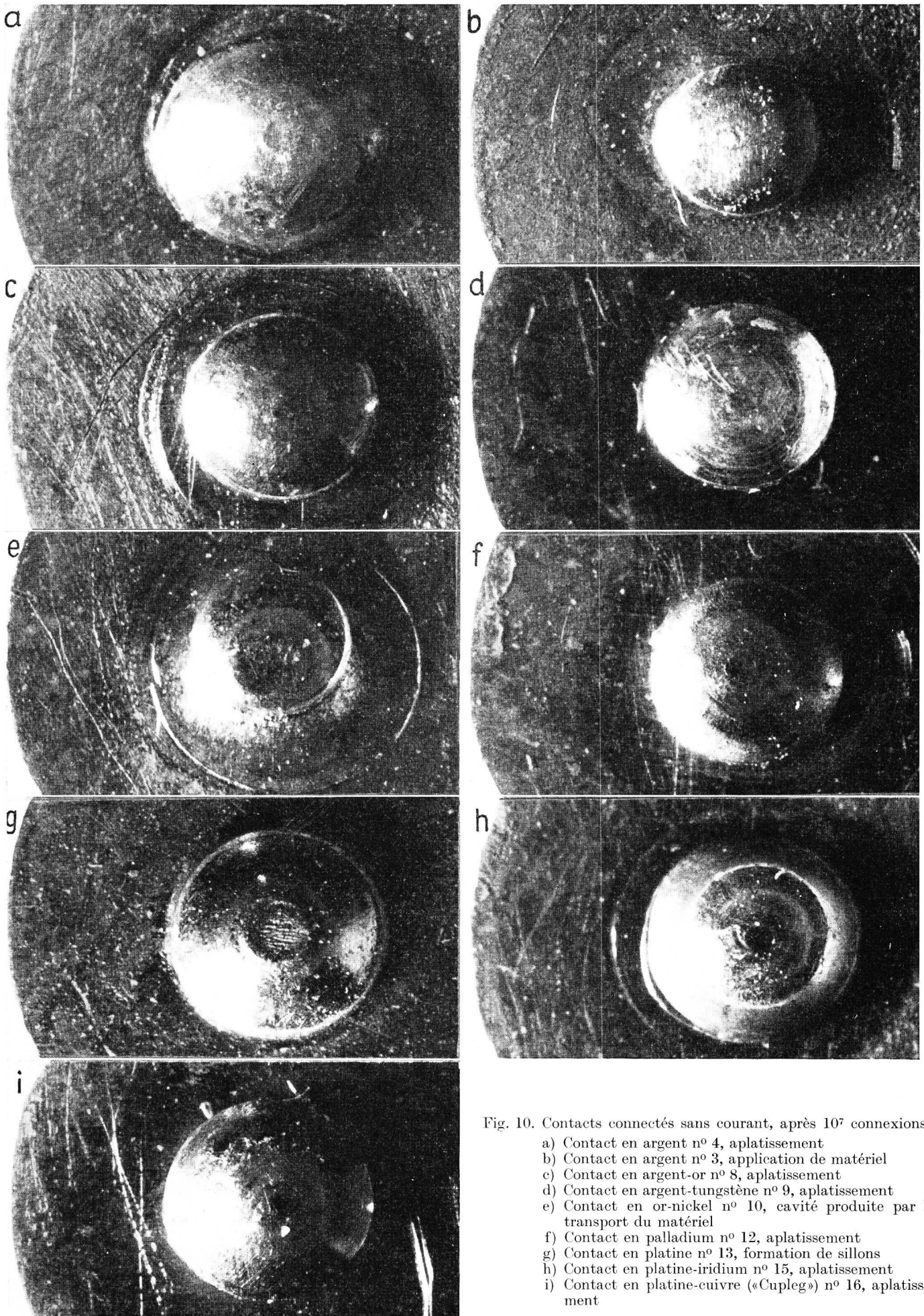


Fig. 10. Contacts connectés sans courant, après 10^7 connexions

- a) Contact en argent n° 4, aplatissement
- b) Contact en argent n° 3, application de matériel
- c) Contact en argent-or n° 8, aplatissement
- d) Contact en argent-tungstène n° 9, aplatissement
- e) Contact en or-nickel n° 10, cavité produite par le transport du matériel
- f) Contact en palladium n° 12, aplatissement
- g) Contact en platine n° 13, formation de sillons
- h) Contact en platine-iridium n° 15, aplatissement
- i) Contact en platine-cuivre («Cupleg») n° 16, aplatissement



Fig. 11. Structure de la surface des contacts en argent-palladium, soumis à l'étincelle à haute tension

- a) Ag/Pd 90/10
b) Ag/Pd 80/20

fonctionnement assez longue, la surface des contacts en argent-palladium ressemble à une croûte.

Il est tout naturel que, d'après les modifications de la surface des contacts, on tire des conclusions sur le comportement des contacts dans l'exploitation. Les contacts sont-ils peu attaqués par l'étincelle à haute tension, leur capacité de résistance à l'usure et à l'oxydation est grande. *Keil et Meyer* [44] ont également fait des observations à ce sujet et ont trouvé que l'on peut étudier la tendance à la formation de coulées et de couches d'oxydation. Ainsi, des renfle-

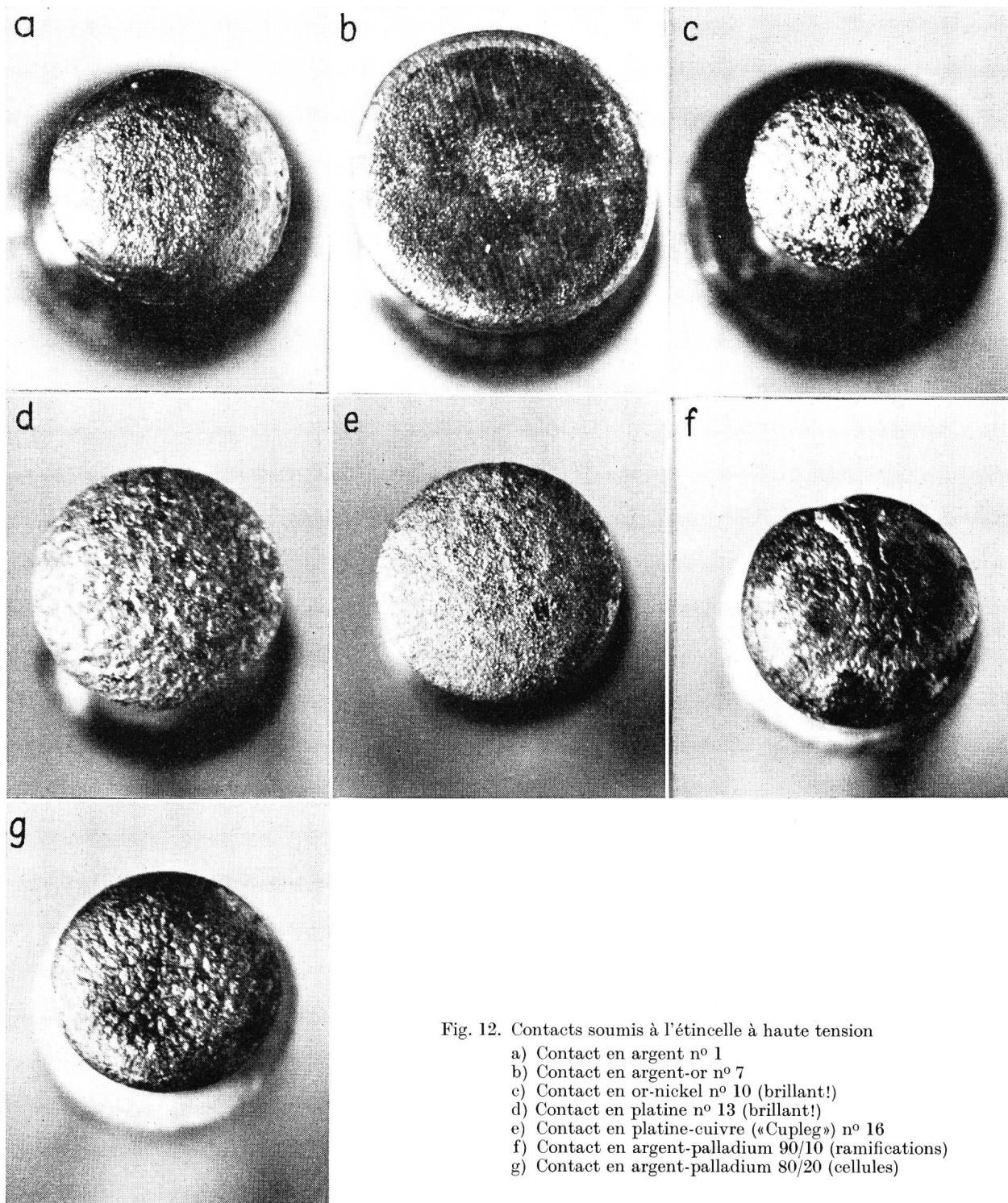


Fig. 12. Contacts soumis à l'étincelle à haute tension

- a) Contact en argent n° 1
b) Contact en argent-or n° 7
c) Contact en or-nickel n° 10 (brillant!)
d) Contact en platine n° 13 (brillant!)
e) Contact en platine-cuivre («Cupleg») n° 16
f) Contact en argent-palladium 90/10 (ramifications)
g) Contact en argent-palladium 80/20 (cellules)

ments en forme de gouttes de produits d'oxydation se forment sur certains métaux agglomérés à la suite de fusions d'oxyde à mauvais effet de mouillage, ce qui provoque un comportement défavorable des contacts. Ces gouttes d'oxyde sont de nature analogue à celles qui apparaissent sur les contacts en service.

C'est pourquoi il était indiqué de contrôler également, en rapport avec les essais spectrographiques entrepris, le comportement des contacts sous l'influence de l'étincelle à haute tension. On a utilisé pour ces essais le producteur d'étincelles dit de *Feussner*. Les réglages se sont faits de la manière suivante :

Tension primaire	165 V
Courant primaire	0,8 A
Tension secondaire	≈ 12 kV
Capacité parallèle	5000 pF
Self-induction	≈ 0 μH
Electrodes	2 mêmes contacts à relais
Ecartement des électrodes	2,5 mm
Durée de l'effet de l'étincelle	3 minutes

4.2. Examens microscopiques faits sur des contacts soumis à l'étincelle

Le tableau IX donne la description de l'état des contacts soumis à l'étincelle à haute tension. Les figures 12a à 12g montrent quelques photographies caractéristiques des surfaces.

L'examen des surfaces des contacts aux nombreuses formes, se différenciant tant dans la structure que dans les couleurs, fournit certains rapports avec le comportement des contacts chargés électriquement. En comparant la répartition faite au tableau IV avec les indications du tableau IX, on trouve les concordances suivantes :

Les contacts en or-nickel (nos 10 et 11), se comportant extraordinairement bien en ce qui concerne la résistance de contact, sont recouverts d'une masse fondue continue et égale de couleur argent mat (figure 12c), tout comme les contacts du groupe platine. Les contacts fabriqués avec ces métaux ne présentent en effet aucune tendance à constituer des couches épaisses d'oxydation ou même des renflements. Il s'agit des contacts dont les surfaces sont au

Tableau IX. Etat des contacts soumis à l'étincelle à haute tension

Métal servant à fabriquer les contacts	N°	Etat de la surface de contact
Ag	1	surface régulièrement croûtée, comprenant quelques points de fusion séparés, de couleur bleue et jaune; pas de points propres
	2	surface croûtée, irrégulière et très poreuse, fortes colorations bleues et jaunes; pas de points propres
	3	surface finement croûtée, de couleur bleue et jaune; pas de points propres
	4	surface régulièrement croûtée, de couleur bleue et jaune; pas de points propres
	6	surface régulièrement croûtée, de couleur bleue et jaune; pas de points propres
Ag/Au (90/10)	7	surface finement poreuse, composée de zones bigarrées brillantes et réparties au hasard; couleurs: jaune clair, jaune doré, bleu clair, bleu foncé, violet
	8	2 zones: partie intérieure circulaire (environ 1/2 diamètre de contact) croûtée et bigarrée comme le contact n° 7; partie enveloppante annulaire de métal propre, poli et brillant
Ag/W (70/30)	9	surface croûtée assez grossière, crête de métal brillant, le reste coloré en jaune, rouge, brun et bleu
Au/Ni (95/5)	10}	surface grossière, recouverte de métal mat aggloméré; pas de colorations de recuit, ni de produits d'oxydation
	11}	
Pd	12	surface assez fine, composée de métal mat; pas de colorations de recuit, ni de produits d'oxydation
Pt	13}	surface grossière composée de métal mat; pas de colorations de recuit, ni de produits d'oxydation
	14}	
Pt/Ir (90/10)	15	comme les contacts en platine nos 13 et 14
Pt/Cu (95/5)	16	comme les contacts en platine nos 13 et 14, mais surface moins grossière
W	17}	les parties marginales du contact (plat) sont d'un blanc mat (oxyde) et très finement poreuses; l'arrondissement du bord du contact montre que l'usure a lieu.
	18}	

moins partiellement encore propres (voir tableau V) après l'essai de connexions électriques (10^7 connexions).

En revanche, les contacts en argent et argent-or, estimés comme des contacts de moyenne valeur selon le tableau IV, ne possèdent plus aucun point métalliquement propre après la période de fonctionnement sous l'effet des étincelles; leurs surfaces ont généralement un aspect bigarré. En outre, pour les contacts en argent, il s'avère que ceux qui ont des surfaces égales et finement poreuses (nos 1 et 3) possèdent en service des résistances de contact plus petites que ceux qui ont des surfaces irrégulières et fortement crevassées (par exemple n° 2).

Dans cet ordre d'idées, les deux contacts en argent-or présentent aussi un intérêt particulier: le contact n° 7, qui est le plus mauvais en ce qui concerne la courbe de résistance, a une surface bigarrée sans points métalliquement propres après la période de fonctionnement sous l'effet des étincelles; en revanche, pour le contact le meilleur (n° 8), il s'est

formé un anneau de métal propre, régulièrement poli. On peut supposer que la différence existant entre ces deux contacts ne provient que de traces impures laissées par un métal étranger.

Enfin, les surfaces des contacts en argent-tungstène et en tungstène ont des structures nettement différentes, ce qui explique le comportement différent de la résistance de contact.

En résumé, on peut constater que ces quelques essais entrepris moyennant l'utilisation de l'étincelle à haute tension dévoilent des rapports assez identiques entre l'état des surfaces après la période de fonctionnement sous l'effet des étincelles et la courbe de la résistance des contacts chargés électriquement. Il est déterminant de savoir s'il reste au moins partiellement du métal propre ou si la surface entière se ternit et se recouvre de matières d'oxydation grossièrement crevassées. Dans ce dernier cas, il faut compter dans des conditions normales d'exploitation avec un accroissement assez rapide des résistances de contact.

Bibliographie

- [1] *W. Burstyn*. Elektrische Kontakte und Schaltvorgänge. Berlin, 1950.
- [2] *R. Holm*. Die technische Physik der elektrischen Kontakte. Berlin, 1941.
- [3] *H. E. Linckh*. ETZ **72** (1951), 79.
- [4] *E. M. Wise*. Electrical Contacts. The International Nickel Company, Inc. New York, 1945.
- [5] *E. M. Wise*, loc. cit., page 2.
- [6] *R. Palme*. Schweizer Archiv **19** (1953), 177.
- [7] *E. M. Wise*, loc. cit.
- [8] *J. C. Chaston*. Schweizer Archiv **19** (1953), 44.
- [9] *E. M. Wise*, loc. cit., page 52.
- [10] *H. Fischer*. Kontaktwerkstoffe für die Schwachstrom-Technik. Hanau, 1951.
- [11] *H. E. Linckh*, loc. cit.
- [12] *R. Palme*, loc. cit., page 179.
- [13] *E. M. Wise*, loc. cit., page 21.
- [14] *J. C. Chaston*, loc. cit., page 46.
- [15] *R. Palme*, loc. cit., page 184.
- [16] *E. M. Wise*, loc. cit., page 89.
- [17] *W. Burstyn*, loc. cit., page 4.
- [18] *R. Holm*, loc. cit., page 310.
- [19] *H. Mackh*, Arch. f. techn. Messen, J 04-1 (1949).
- [20] *H. Fischer*, loc. cit.
- [21] *A. Keil und C.-L. Meyer*, ETZ **73** (1952), 31.
- [22] *J. C. Chaston*, loc. cit., page 46.
- [23] *R. Holm*, loc. cit., page 84.
- [24] *E. M. Wise*, loc. cit., page 21.
- [25] *R. Holm*, loc. cit., page 291.
- [26] *A. Keil und C.-L. Meyer*, loc. cit.
- [27] *G. J. Ekkers, A. Farner und R. Kläui*. Albiwerk-Berichte I (1949), 20.
- [28] *I. Dietrich und E. Rüchardt*. Z. f. angew. Physik **1** (1948), 1.
- [29] *I. Dietrich*. Z. f. angew. Physik **2** (1950), 128.
- [30] *I. Dietrich*. Z. f. angew. Physik **1** (1949), 377.
- [31] *C. Benedicks*. Ergebn. der exakten Wissenschaften **8** (1929).
- [32] *E. Justi und H. Schulz*. Abhandlungen der Braunschweig. Wissenschaftl. Gesellschaft **1** (1949), 89.
- [33] *H. Gagel und H. Dittler*. ETZ **79** (1952), 292.
- [34] *J. C. Chaston*, loc. cit., page 46.
- [35] *W. Rump*. Metallforsch. **11** (1947), 138.
- [36] *J. Brandmüller und H. Heumann*. Z. f. angew. Physik **1** (1948), 139.
- [37] *I. Dietrich*. Z. f. angew. Physik **1** (1949), 377.
- [38] *K. Brehm*. AEG-Mitteilungen **41** (1951), 302.
- [39] *F. P. Bowden*. J. Roy. Soc. NSW **78** (1945), 187.
- [40] *P. Dinichert*. Microtecnica (1951), 225.
- [41] *R. Holm*, loc. cit., page 139.
- [42] *R. Holm*, loc. cit., page 142.
- [43] *Bericht der Forschungs- und Versuchsanstalt PTT*, Nr. V-11.95 (1950).
- [44] *A. Keil und C.-L. Meyer*, loc. cit.