

Notes sur les alliages de cuivre et de fer.

(Communication de M. J.-E. STEAD)

La plupart des auteurs de traités de métallurgie n'étant pas d'accord sur la question des alliages du cuivre et du fer, l'auteur a cru devoir effectuer des recherches en vue d'être fixé à ce sujet. Ces recherches ont été exécutées récemment dans son laboratoire à Middlesbrough.

HISTORIQUE.

La relation des expériences faites dans le laboratoire du D^r Percy (*Metallurgy of Iron and Steel*, 1864, p. 147) conduirait le lecteur à conclure que le fer et le cuivre peuvent s'allier en toutes proportions.

S. Rinman, en 1782, fit un alliage de cinq parties de fer et d'une partie de cuivre. L'alliage était dur et résistant.

G. Rose trouva que les anciennes bagues romaines en fer contenaient généralement du cuivre.

Faraday et Stodart fondirent l'acier avec 2 % de cuivre sans améliorer sa qualité. (*Phil. Trans.*, 1882, p. 266.)

Eggertz (*Wagner's Jahresbericht*, 1862, p. 9) trouva que le fer forgé avec 0.5 % de cuivre n'était que peu cassant à chaud, tandis que l'acier contenant 0.5 % de cuivre était sans valeur.

Longmaid prit en 1863 un brevet pour un alliage de 2.5 à 10 livres de cuivre pour 1 tonne de fer. L'inventeur soutenait que le fer ainsi obtenu présentait une dureté extraordinaire.

En 1835, Mushet trouva que le fer malléable s'unit à du cuivre en toutes proportions, jusqu'à ce qu'il égale ou même excède le poids du cuivre. Il constata que la couleur rouge de l'alliage devenait plus pâle quand le fer dépassait 50 %. L'alliage à 50 % possédait une grande résistance. L'alliage devenait plus dur quand le fer augmentait en teneur. Mushet ne fit pas seulement des expériences en alliant le fer malléable avec le cuivre, mais il fit aussi des alliages avec l'acier et la fonte. Il affirme que l'acier fondu avec 5 % de son

poids de cuivre était considérablement durci, impropre aux usages de la forge et incapable de prendre un tranchant. Le lingot était cristallisé comme l'acier fondu et ne montrait aucune trace de cuivre ni sur la surface externe ni dans la cassure. L'acier fondu avec 10 % de son poids de cuivre donnait un lingot extérieurement semblable en apparence au dernier, mais avec la cristallisation linéaire radiée moins distincte. Il était dur et fragile et de petits points de cuivre étaient visibles dans la cassure.

Un lingot obtenu en fondant l'acier avec 20 % de son poids de cuivre, paraissait rouge de cuivre sur la surface inférieure et brillant d'acier sur la surface supérieure; la cassure avait un grain régulier. L'acier fondu avec un tiers de son poids de cuivre (c'est-à-dire 25 % de la masse totale) donnait un lingot consistant en du cuivre au fond; ce métal apparaissait en nœuds et raies dans la cassure.

La fonte blanche donnait à peu près les mêmes résultats, mais il y avait une plus grande tendance à la séparation quand le cuivre dépassait 5 %. Quand la fonte grise n° 1 était fondue avec 5 % de cuivre, on trouvait des taches de cuivre rouge sur la surface inférieure du lingot et dans la cassure; avec 10 % de cuivre, ce métal s'attachait à l'extérieur de la fonte, et avec 20 % on trouvait sous la fonte un bouton solide de cuivre au fond du creuset.

Il concluait que le cuivre s'unit au fer en proportion de la diminution de la teneur en carbone.

Karsten (*Percy's Metallurgy of Iron and Steel*) dit que le fer (sans désigner si c'est de la fonte ou du fer pur) ne peut prendre qu'un certain, probablement un très petit, pourcentage de cuivre, de même que le cuivre ne peut se combiner qu'avec une petite quantité de fer.

Howe (*Metallurgy of steel*, p. 368) écrit que M. Brustlein l'informa que trois lots d'acier-cuivre exposés à Paris par Holtzer contenaient de 3 à 4 % de cuivre; qu'avec plus de 1 % ils étaient cassants à chaud; qu'ils n'avaient été fabriqués qu'à titre d'expérience; qu'il croit que l'acier-cuivre n'a pas d'avenir; que le cuivre ne paraît pas uniformément distribué dans le métal et qu'il paraît favoriser la formation de soufflures.

M. Bauerman (*Treatise of the Metallurgy of Iron*, p. 49, 5^e édition) affirme que les deux métaux peuvent être mélangés en presque toutes proportions, mais il doute absolument si un alliage homogène peut être préparé.

Edwin J. Ball et Arthur Wingham (*Journal of the Iron and Steel Institute*, n° 1, 1889, p. 123) paraissent n'avoir eu aucune difficulté en alliant 4.4 % de cuivre avec du fer doux et 7.14 % dans de l'acier contenant 0.71 % de carbone, et ils ne paraissent pas avoir remarqué du cuivre dans la cassure de l'alliage.

Henri Schneider (*Engineering and Mining Journal*, vol. L, p. 40, oct. 1890) prit un brevet pour un procédé permettant de produire, en fondant des couches alternées de coke, de fonte et de cuivre, des alliages qui étaient remarquables par leur grande résistance, leur élasticité et leur malléabilité. Ils contenaient entre 5 et 20 % de cuivre.

W.-H. Greenwood (*Metallurgy of Iron*, vol. I, p. 77) signale que l'union directe du fer et du cuivre est obtenue avec difficulté, mais on peut obtenir un alliage homogène apparent par la réduction simultanée des oxydes de fer et de cuivre.

J.-A. Philipps et H. Bauerman (*Elements of Metallurgy*, 3^e édition, 1891, p. 142) estiment que le cuivre ne forme pas de véritable alliage, sauf en présence d'un troisième métal.

James Riley (*Journal of the Iron and Steel Institute*, n° I, 1890, p. 123) qui a effectué des expériences en alliant de l'acier avec du cuivre, affirme ce qui suit : « Si un alliage de cuivre et d'acier était » fabriqué et si le métal résultant était examiné sous le microscope, » on trouverait qu'il n'y a pas alliage proprement dit ; le cuivre est » disséminé dans toute la pièce. Si en faisant cet alliage, on employait » de l'aluminium, on trouverait un résultat complètement différent : » l'alliage serait parfait. »

F. Lynwood Garrison (*Journal Franklin Institute*, août 1891) affirme que 5 % de cuivre s'allient rapidement avec de l'acier, mais il doute qu'avec 10 % on obtienne un alliage parfait.

W. Lipin (*Journal of the Iron and Steel Institute*, 1900, n° II) a trouvé que l'addition de cuivre à la fonte au bois de Suède augmentait la fluidité relative et que les cassures devenaient de plus en plus cristallines et plus brillantes à mesure que le pourcentage en cuivre s'élevait. Le cuivre à la teneur de 4.9 % augmentait la résistance à l'extension de 29*9 à 34*65 par millimètre carré et il ne tendait pas à retenir le carbone à l'état combiné. Le taux maximum de cuivre que prendrait la fonte de fer a été trouvé de 5 %, tant pour la fonte blanche que pour la fonte grise. Il conclut que la présence du cuivre dans les pièces de fonderie ne présente, semble-t-il, aucun avantage, mais qu'elle ne doit non plus inspirer aucune inquiétude.

Le même auteur a allié de l'acier avec différentes teneurs de cuivre jusque 10 %, mais il ne rapporte pas si les cassures des alliages refroidis montraient des taches de cuivre quand on les examinait au microscope. Il a constaté qu'à mesure que la teneur en carbone augmente dans l'acier, la proportion de cuivre, 3 %, doit être réduite, sans quoi le produit se fend pendant le travail à chaud.

En étudiant les observations rapportées par les auteurs qui ont effectué des essais récents en alliant du fer, de l'acier et de la fonte avec du cuivre, il n'est pas surprenant que ceux qui ont étudié leurs travaux et rapports aient eu beaucoup de difficultés à formuler des conclusions précises. Toutes, ou au moins la plupart des observations des divers chercheurs sont probablement correctes, mais la différence d'interprétation ou la confusion provient de ce qu'il n'a été tenu aucun compte de l'influence du carbone.

NOTES SUR LES ALLIAGES MÉTALLIQUES.

La plupart des métallurgistes ont leurs idées personnelles quant au point de savoir ce qu'est réellement un alliage métallique, et, de temps à autre, on rencontre des qualificatifs tels qu'un *vrai*, un *parfait* et un *imparfait* alliage ; ce qui nous amène à conclure que la définition du mot n'est pas si simple qu'elle paraît au premier abord. Les recherches modernes paraissent montrer qu'un alliage métallique est un mélange de substances métalliques, qui se dissolvent mutuellement et s'incorporent parfaitement sous l'influence de la chaleur, de la pression, etc., et qui ne se séparent pas, à l'état fluide, en deux couches superposées, comme l'huile et l'eau, préalablement à la solidification.

Des substances métalliques peuvent renfermer des métaux, des composés chimiques définis de métaux avec des métaux (on en connaît un grand nombre), des composés chimiques définis de métaux et de non-métaux, tels que les carbures, les phosphures et les siliciures de fer et de manganèse. D'après la définition ci-dessus donnée, les spiegeleisen, les fontes grises et blanches peuvent être regardés comme de vrais alliages.

Des parfaits alliages peuvent être définis comme étant ceux qui sont absolument homogènes quand ils sont à l'état solide. Ils consistent : 1° en composés chimiques définis d'un des métaux constituants avec l'autre ; 2° en mélanges isomorphes homogènes des substances métalliques constituantes formant les alliages.

Les eutectiques se trouvent dans une situation intermédiaire; ils ne sont pas absolument homogènes puisqu'ils sont composés de constituants séparés en juxtaposition dans un état très fin de division.

Les alliages les moins parfaits peuvent être définis comme étant ceux dans lesquels, pendant la solidification, un ou plusieurs des constituants cristallisent avant les autres, qui éventuellement se solidifient, laissant un mélange plus ou moins imparfait mais régulier dans le métal froid.

Si les constituants sont de différentes couleurs, ils peuvent être facilement découverts dans la cassure. Les constituants pourpres et blancs de l'alliage du cuivre et de l'antimoine, contenant 35 % de cuivre et 65 % d'antimoine, se voient très aisément dans la cassure.

Si dans un alliage les constituants sont de même couleur, la cassure paraît homogène, mais ce n'est qu'une homogénéité de teinte. Une cassure de fonte blanche Cleveland montre du carbure et du phosphure de fer et de la perlite, mais ils ont tous approximativement la même couleur, c'est pourquoi le caractère hétérogène n'est pas apparent. S'ils étaient de couleur différente, chaque constituant pourrait être décelé à l'œil nu.

Les constituants des alliages ne sont pas les éléments composants présents, mais les parties séparées, visibles sous le microscope. Un eutectique peut être regardé comme un constituant composé.

PREMIÈRE PARTIE.

Alliages de cuivre et de fer.

Composition de la matière employée. — Pour le cuivre on prit une quantité suffisante de lingots du meilleur cuivre; ces lingots furent fondus et granulés en coulant dans l'eau.

L'analyse des lingots a donné ce qui suit :

Cuivre	99.7300
Oxygène	0.0600
Plomb	0.0440
Zinc	0.0130
Antimoine	0.0070
Or	0.0004
Argent. . . .	0.0200
Arsenic	0.0500
Bismuth	0.0040
Nickel. . . .	0.0470
Fer	0.0140

En ce qui concerne la matière fer, on fit choix, dans toutes les expériences où il était nécessaire que le carbone fit pratiquement défaut, de tournures brutes de l'acier n° 5 de l'Association britannique. La teneur en carbone a été trouvée aussi basse ou même plus basse qu'elle n'avait été préalablement rencontrée dans des aciers doux du commerce.

L'analyse a donné :

• Fer	par différence	99.542
Carbone . . .	—	0.035
Manganèse . .	—	0.317
Silicium . . .	—	0.008
Soufre	—	0.036
Phosphore . .	—	0.042
Cuivre	—	0.020

Mode de fabrication des alliages. — Des mélanges de cuivre granulé et de rognures de fer ont été simplement fondus ensemble dans des creusets d'argile sans carbone. Le fourneau employé était un creuset de fusion du type ordinaire, chauffé au coke de gaz. Il était capable de donner une chaleur suffisante pour fondre le fer pur. Les mélanges pouvaient se solidifier et se refroidir dans les creusets.

Quand on faisait des essais pour s'assurer si oui ou non les métaux étaient séparés l'un de l'autre préalablement à la solidification, on adoptait le système suivant : Une série de tubes de porcelaine de 1 1/2 centimètre de diamètre intérieur et de 5 centimètres de longueur, fermés à une extrémité, étaient placés côte à côte dans un creuset de pompage. Les vides entre les creusets étaient remplis de sable blanc. Les différents mélanges étaient placés dans les tubes, le métal plus léger étant invariablement placé au fond. Après remplissage, les tubes étaient fermés avec des tampons de ganister plastique et un couvercle de même matière était appliqué sur les tubes et le sommet du creuset.

Après un séchage soigné, le creuset avec son contenu était chauffé pendant une heure à une température suffisante pour fondre le fer pur. Le couvercle du fourneau était alors enlevé et le feu était abandonné à lui-même sans déranger le creuset, lequel en douze heures était suffisamment refroidi pour le manier. Les petits lingots cylindriques étaient alors, retirés de leurs tubes de porcelaine et sciés verticalement au centre, ou, s'ils étaient trop durs à scier, ils étaient usés sur une roue à l'émeri, de manière à montrer des sections

verticales de métaux solides. Ceux-ci, dans tous les cas, étaient polis et examinés systématiquement à travers toute leur longueur.

Le résultat de ces examens montrait à la fois s'il y avait eu séparation en deux couches liquides ou s'il y avait eu une tendance à une semblable séparation.

Le système adopté de maintenir les métaux à l'état fluide au-dessus de leurs points de fusion et de leur permettre ensuite de se refroidir et de se solidifier très lentement, offrait les meilleures conditions possibles à la séparation, et s'il existait une tendance quelconque pour un métal à se séparer de l'autre, elle serait décelée.

Dans le but d'être absolument certain que l'analyse et la structure étaient exactement en corrélation, après examen, on sciait en deux parties les micro-sections; une partie était conservée comme un micro-objet et l'autre était analysée.

La méthode d'analyse employée était la suivante :

On dissolvait environ 0.5 gramme de l'alliage dans la plus petite quantité possible d'eau régale, et, quand la dissolution était complète, on expulsait les acides en excès en chauffant avec de l'acide sulfurique concentré. Le cuivre était séparé par l'acide sulfhydrique et le fer, déterminé dans la partie filtrée par une solution titrée de bichromate. Les sulfures de cuivre précipités étaient redissous dans l'acide nitrique et le cuivre était déterminé volumétriquement par la méthode de l'iode, méthode trouvée, par une longue expérience, comme donnant des résultats aussi exacts que les méthodes électrolytiques les plus perfectionnées. Quand le carbone était présent, on le déterminait en brûlant le résidu non dissous de l'alliage dans la chlorure acide de cuivre et de potassium, ou par la combustion directe dans l'oxygène. Le silicium et les autres métalloïdes étaient déterminés par les méthodes usuelles exactes employées dans l'essai des aciers.

Résultats micro-chimiques obtenus.

En réexaminant les résultats de très nombreuses expériences, on trouve que :

1° Le cuivre et le fer s'allient en toutes proportions par fusion directe, et, dans aucun des alliages, il n'y a de tendance, pour les métaux, de se séparer en deux couches liquides distinctes ;

2° La série complète des alliages peut donner lieu à un classement en trois sections distinctes :

A. Alliages avec des traces de fer, jusque 2.73 %, et 97.20 % de cuivre ;

B. Alliages avec 2.73 % à 92 % de fer et 97.20 % à 8 % de cuivre ;

C. Alliages contenant du cuivre en faible proportion jusque 8 %.

Tous ces mélanges peuvent être appelés de véritables alliages, par suite de l'absence de globules et de nœuds de cuivre ou de fer (1).

Les alliages de la *classe A*, contenant entre des traces et 2.73 % de fer sont d'apparence homogène et ne contiennent pas plus d'un constituant micrographique. Ils ont tous l'aspect du cuivre pur. Quand le fer augmente en quantité, les alliages deviennent un peu plus durs. Ils peuvent être coupés et sciés, et sont faiblement attirés par l'aimant. Ils peuvent être classés comme de parfaits alliages, consistant en grains cristallins isomorphes de fer et de cuivre.

Les alliages de la *classe B* contiennent entre 2.73 % et 92 % de fer et 97.20 % et 8 % de cuivre. Aussitôt que la proportion de 2.73 de fer est dépassée, on trouve que les alliages refroidis contiennent un constituant séparé, consistant d'abord en *cristallites* à six rayons (2), d'un constituant riche en fer. Quand on approche de 10 %, ces cristallites changent de forme et prennent le caractère dendritique ou cruciforme de réseaux octaédriques. Quand le fer augmente encore en proportion, ces cristallites se développent également et peuvent s'entrecroiser dans leur accroissement indépendant et prennent la forme de grains cristallins arrondis séparés par des enveloppes de cuivre contenant 2.73 % de fer en solution. Ces enveloppes deviennent d'autant plus minces que l'on approche de l'alliage à 90 % de fer et 10 % de cuivre, et à ce point elles ne recouvrent plus que partiellement les grains cristallins.

Dans tous les alliages de cette classe, la cassure suit généralement les enveloppes de cuivre et sous ce rapport il n'y a aucune différence

(1) Il était très difficile d'obtenir du fer allié avec une petite quantité de cuivre sans introduire dans l'alliage du silicium ou de l'oxyde de fer dissous. Quand le silicium faisait défaut, de l'oxyde de fer existait. Un alliage avec un peu de silicium et 9 % de cuivre paraît ne pas contenir du cuivre en liberté. Quand l'oxyde de fer est présent, du cuivre pur apparaît dans l'alliage avec 8.4 % de cuivre.

La détermination du point critique exact manque encore et la proportion de 8 % ne doit être regardée que comme approximative.

(2) En métallographie, le *cristallite* peut être défini comme un cristal imparfait, dans lequel les faces planes et les angles ne sont pas développés.

dans la couleur de la cassure des alliages contenant respectivement 90 et 20 % de cuivre. Dans l'alliage à 10 % de cuivre, comme ce dernier n'enveloppe que partiellement les grains, la cassure suit le cuivre, puis le clivage des grains de fer, laissant, sur la cassure, une « macrostructure » (c'est-à-dire, une structure visible sans le microscope), de larges surfaces de cuivre et de fer distribuées irrégulièrement, apparence qui peut aisément conduire à la conclusion que le cuivre et le fer ne sont réellement pas alliés. C'est sans doute à cause de cela que des observateurs ont autrefois été trompés en examinant seulement les cassures.

Quand les alliages sont polis, l'apparence est complètement différente: la couleur change graduellement de celle du cuivre pur à celle du fer à mesure que le fer augmente en proportion et l'alliage contenant 10 % de cuivre et 90 % de fer, tout en paraissant, d'après la cassure, contenir beaucoup de cuivre, présente, sur la surface polie, un aspect tel que si le cuivre faisait défaut.

Les propriétés magnétiques des alliages de cette classe augmentent avec la teneur en fer.

Les cristallites de fer se rouillent facilement et les surfaces des alliages polis se ternissent rapidement.

Les alliages de la *classe C* contiennent entre 8 % et des traces de cuivre. Quand le fer est allié avec environ 8.0 % de cuivre, l'alliage refroidi ne montre aucune trace de cuivre dans la cassure et le métal poli apparaît également dépourvu de tout constituant couleur de cuivre quand il est examiné sous le microscope, et tous les alliages contenant moins que cette proportion de cuivre en paraissent également dépourvus.

En oxydant par le chauffage ou en chauffant doucement les surfaces polies jusqu'à ce qu'elles prennent une teinte jaune pâle, les grains cristallins ne sont pas également colorés. L'oxydation commence aux limites extérieures et s'avance vers le centre.

On a de plus remarqué qu'en chauffant de cette façon, les alliages contenant le plus de cuivre étaient le plus rapidement colorés. Cela étant, il paraît raisonnable de conclure que, dans cette classe, quand les métaux se solidifient, la première partie qui abandonne la solution contient le plus de fer et, quand l'accroissement se produit, la phase liquide devient plus concentrée en cuivre; de même que, quand les cristaux continuent à grandir, une quantité de plus en plus grande de cuivre tombe hors de la solution avec le fer jusqu'à ce que la dernière partie se solidifie avec une proportion

maxima du premier élément. Quand la teneur en cuivre excède environ 8 %, les cristaux de fer-cuivre, en complétant leur accroissement, rejettent entièrement à l'extérieur l'excédent de l'alliage cuivre-fer qu'ils ne peuvent retenir en solution.

La photographie (fig. 4) de l'alliage à 10 % de cuivre illustre pleinement les remarques précédentes. Les taches noires représentent le cuivre-fer rejeté de la solution; les parties ombrées, un changement graduel dans la composition des grains cristallins depuis les parties extérieures riches en cuivre jusqu'aux parties internes riches en fer (1).

DEUXIÈME PARTIE.

L'influence du carbone sur les alliages du cuivre et du fer

Les résultats de la fusion du cuivre et du fer contenant des proportions variables de carbone confirment pleinement les observations de Mushet, que le cuivre s'unit avec le fer en proportion de la diminution de la teneur en carbone. En répétant l'expérience de ce chercheur et en fondant 5 % et 10 % de cuivre avec de l'acier contenant 1 % de carbone, on a trouvé que le premier s'alliait parfaitement et qu'il ne se décelait pas de cuivre libre sur les surfaces polies ou fracturées de l'acier refroidi, tandis que le second, avec 10 % de cuivre, montrait des nœuds d'un constituant couleur de cuivre sur les lingots brisés et les sections polies. On a de plus constaté que l'acier avec 1 % de carbone dissolvait et retenait en solution environ 7 % de cuivre, et que, quand ce taux est dépassé, l'excès est rejeté de la solution et apparaît comme les globules ou les nœuds de Mushet. Ces gouttes ou globules se rencontrent pour la plus grande partie, près de la base des lingots, contenant 10 % de cuivre, mais ils ne sont pas séparés de l'acier lui-même. Leur forme et leur position conduisent à la conclusion qu'ils étaient libérés quand l'acier était dans un état semi-fluide, et qu'en vertu de leur plus grande pesanteur, ils ont traversé la masse pour se rendre à la partie inférieure, où ils ont été mécaniquement

(1) Ces grains cristallins en gradation sont ce que le professeur Roozeboom décrivait comme des « cristaux mêlés ». Ce dernier terme est employé en métallographie pour désigner deux ou plusieurs substances qui cristallisent ensemble dans un tout homogène.

tenus en suspension et n'ont pu s'échapper entièrement quand l'acier s'est solidifié.

Quand la proportion de cuivre augmente au dessus de 10 %, le nombre de globules suspendus augmente également, et, quand on fond 25 % de cuivre avec 75 % d'acier, une partie du cuivre se sépare de l'acier avant qu'il ne se solidifie et on le trouve au fond du lingot en couche séparée. Il n'est néanmoins pas pur, mais il est associé avec environ 10 % de fer, dont une partie est en solution et une autre, sous forme de cristallites dendritiques.

La couche supérieure d'acier contient des globules de cuivre qui augmentent en quantité de la surface vers le centre.

Tous ces alliages d'acier sont trop durs pour être coupés, sciés ou limés. Le cuivre, en passant dans la solution, ne cause pas de séparation de la cémentite libre.

Lors de l'« oxydation par le chauffage » d'un alliage de 7 % de cuivre et 0.93 de carbone, les teintes indiquent que les grains cristallins primaires contiennent le plus de cuivre vers les limites externes. Les grains de perlite secondaires sont différemment teintés, conduisant à la conclusion que les différents grains peuvent contenir différentes teneurs de cuivre.

Par l'attaque avec la teinture d'iode ou l'acide nitrique dilué, les mêmes différences ont été établies.

Bien que cet alliage eût été très lentement refroidi, la structure de la perlite était réellement très fine, les lamelles de cémentite étant très minces et très serrées.

Quand la fonte contenant 3.4 % de carbone et environ 5 % de silicium est fondue avec un excès de cuivre, deux couches liquides se séparent, l'une, celle du fond, consistant en une couche de cuivre contenant environ 8 % de fer, et l'autre, celle du dessus, consistant en une couche de fonte grise sombre, contenant 7.4 % de cuivre et où des globules de cuivre sont mêlées. La quantité de cuivre retenue sous forme de globules varie suivant la rapidité avec laquelle le métal est refroidi ; le maximum est atteint quand il est rapidement refroidi et le minimum quand le refroidissement est prolongé.

Quand un alliage contenant des parties égales de cuivre et de fer est fondu dans un creuset sur un fond de charbon de bois et qu'on le laisse s'y refroidir, il se sépare en deux couches distinctes composées comme suit :

	Couche du dessus.	Couche du fond.
Fer . . .	87.00	9.60
Cuivre . .	10.34	90.02
Carbone . .	2.07	0.08
Silicium . .	0.45	»
Divers. . .	0.14	0.30
	100.00	100.00

Ces résultats montrent de la façon la plus claire que le carbone, en se combinant avec le fer ou avec une partie de celui-ci, rejette une grande partie de cuivre de la solution, qui alors se précipite au fond du creuset. Ils montrent aussi que le cuivre séparé a emporté avec lui du fer contenant environ 0.84 % de carbone. Le microscope a prouvé que la couche supérieure contenait de la cémentite libre en quantité considérable, puis des globules de cuivre, et des portions, entre les bandes de cémentite, d'une substance dans laquelle la perlite ou cémentite eutectique faisait, en apparence, défaut.

La couche de cuivre a été trouvée contenir des réseaux de cristallites octaédriques de fer distribués également dans la masse, mais la partie joignant immédiatement la couche de fer en était dépourvue; ce fait tendrait à conduire à la conclusion qu'en se solidifiant, la force cristallisante de la masse contiguë de fer réduisait ou attirait du cuivre le plus rapproché des cristallites de fer qui, au lieu de tomber hors de la solution et de rester suspendus dans le cuivre, étaient attirés par le fer, avec lequel il s'unissait. (Voir photog. n° 6.)

Une partie de la couche supérieure a été fondue, avec du charbon de bois, à la chaleur blanche, pendant une heure, puis refroidie lentement.

L'examen a montré qu'un petit globule de cuivre s'était séparé et s'était attaché à la partie inférieure. Ce globule fut détaché et analysé en même temps que la portion fer, et on obtint les résultats ci-après :

	Couche supérieure.	Globule du fond.
Fer	89.00	2.73
Cuivre	7.64	97.10
Carbone combiné .	2.30	»
Graphite.	»	»
Silicium	0.84	»
	99.78	99.83

Il est ici évident que quand le cuivre est en solution dans le fer, il limite la quantité de carbone que le fer peut absorber, car il n'en a été pris que 2.3 %, dans des conditions telles que, si le cuivre avait fait défaut, la teneur en carbone aurait approché de 4 %, ou même plus.

Le petit globule contenant 2.73 % de fer apparaît, au microscope, complètement homogène et est dépourvu de cristallites de fer.

La couche ferreuse contenait de la cémentite libre, sous forme de filets renfermant des cellules qui, polie avec une peau humidifiée à l'aide d'une solution de sulfate ammonique, présentait une structure identique aux plus beaux exemplaires d'austénite et de martensite produits par Osmond. La photographie fig. 5 en est une illustration. La structure en zig-zag correspond à la martensite; le fond, en demi-ton, à l'austénite; les parties blanches, à la cémentite. En grattant avec une aiguille, il ne paraît pas y avoir de différence sensible en dureté entre les parties sombres et celles en demi-ton. Elles sont, en apparence, également rayées par l'acier dur. Le spécimen était loin d'être homogène. Au voisinage du point où le globule de cuivre avait été attaché, la cémentite disparaissait et les cellules ou grains consistaient à peu près en structure de cémentite pure. Il n'a pas encore été déterminé avec certitude si ces structures indiquent de la martensite ou de l'austénite. Un supplément d'investigations est encore nécessaire sous ce rapport.

Quand une petite portion, pesant environ 2 grammes, a été chauffée et trempée à 900° C., les surfaces d'inter-cémentite ont présenté une structure analogue à celle des mêmes surfaces de la matière lentement refroidie, avec cette différence que la structure en zig-zag de la martensite sur le fond légèrement coloré était beaucoup plus belle et plus également distribuée; cette observation conduirait à conclure que, quelle que soit la substance obtenue, elle doit s'être dispersée et séparée par un refroidissement rapide. S'il était démontré que la masse du fond blanc est de l'austénite, ce fait serait d'un haut intérêt, car jusqu'à présent ce constituant n'a été obtenu que dans les aciers à haute teneur en carbone, après la trempe à une température élevée, tandis que dans cet exemple les structures les plus prononcées ont été obtenues avec l'alliage lentement refroidi.

Dans le but de s'assurer si oui ou non le cuivre, quand il est additionné à de la fonte en fusion, a une influence pour retarder ou accélérer la séparation du graphite quand il se solidifie dans la lingotière, on a fait l'expérience suivante :

De la fonte hématite, à faible teneur en silicium, contenant, au centre, de la fonte blanche et, à l'enveloppe, de la grise, choisie spécialement comme représentant la transition entre la fonte grise et la fonte blanche et par conséquent très susceptible aux influences tendant à produire la séparation ou le maintien du carbone à l'état de combinaison, a été fondue avec environ 5 % de cuivre dans un creuset. Le métal a été ensuite versé dans un moule et, après refroidissement, on l'a brisé et on a examiné la cassure. Il avait une belle apparence grise et était complètement privé de toute tache de fonte blanche. Le carbone combiné était de 1.20 %.

Ce résultat paraît confirmer l'opinion de Lipin, que le cuivre ne tend pas à transformer la fonte grise, en fonte blanche, et que sous ce rapport sa présence dans la fonte de moulage ne doit inspirer aucune crainte.

D'après ce que nous connaissons de l'effet du cuivre sur le fer et l'acier, il est aussi certain, comme l'observe Lipin, qu'il augmente la ténacité de la fonte quand il y est allié.

RÉSUMÉ.

Si l'on résume les résultats rapportés précédemment, les faits suivants peuvent être notés :

1° Le carbone, quand il est présent, limite la proportion de cuivre qui peut être alliée au fer, la proportion de 7.5 % étant le maximum dans la fonte hématite grise contenant 3 % de silicium, et celle d'environ 15 %, dans l'acier avec 1 % de carbone. Mais dans la plupart des alliages carbone-fer-cuivre, du cuivre existe sous forme de globules et est mécaniquement suspendu dans le métal solide. La quantité de ce cuivre mécaniquement suspendu varie avec les modes de solidification des métaux ; elle est la plus élevée quand le refroidissement est rapide et la plus basse quand il est très lent. La quantité retenue en solution après solidification n'a pas été complètement déterminée. Dans l'acier, la proportion n'excède probablement pas 7 % ;

2° Les alliages formés d'environ parties égales de cuivre et de fer, qui ne se séparent pas en deux couches distinctes avant solidification, quand ils sont refondus à une chaleur blanche sur du charbon de bois, absorbent du carbone et se séparent ensuite en deux couches liquides distinctes : l'une contenant environ 2 % de carbone et 10 % de cuivre, et l'autre, la plus lourde, environ 10 % de fer et 0.08 % de carbone ;

3° Le cuivre dans la fonte ne paraît pas avoir l'influence de retenir le carbone à l'état combiné, ou de causer une séparation de graphite;

4° L'étude micrographique des aciers contenant du cuivre, conduit à la conclusion que le cuivre retarde la formation de la perlite.

Les mêmes aciers ne différant que par le cuivre, contiennent, à froid, après un même refroidissement comparativement rapide, plus de carbure dispersé quand le cuivre est présent que quand il fait défaut. Par un refroidissement très lent, les carbures paraissent se séparer également dans les aciers cuivreux et dans les aciers normaux.

Cette particularité explique pourquoi le recuit et le refroidissement lent ont le même effet doucissant marqué, rapporté par Lipin et d'autres sur les aciers cuivreux;

5° Le cuivre dans la fonte de fonderie ne doit pas être redouté; son seul effet paraît être celui d'augmenter la ténacité;

6° Les quelques remarques contradictoires des auteurs dans les traités, paraissent devoir être dues au fait que quelques-uns d'entre eux peuvent n'avoir pas pris en considération l'effet du carbone d'empêcher le cuivre de s'allier avec le fer. La fonte ne s'allie qu'avec de petites quantités de cuivre, tandis que le fer pur s'allie en toutes proportions.

L'auteur conclut qu'il reste encore beaucoup à apprendre et beaucoup de recherches à faire avant de connaître à fond le sujet des alliages cuivre-fer-carbone.

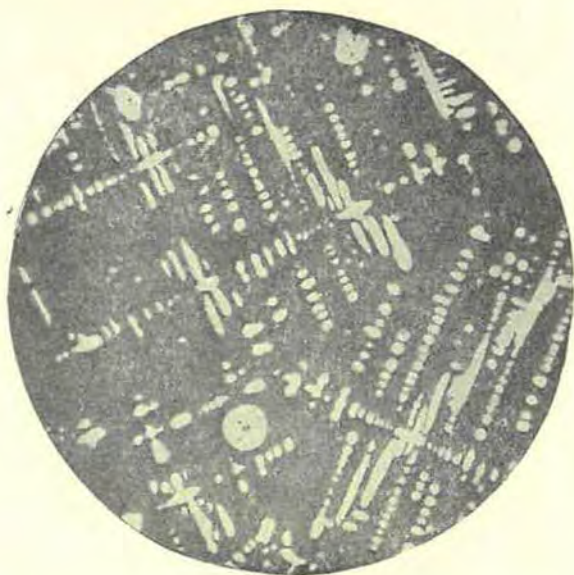


FIG. 1. — Cuivre, 74.5 %; fer, 25.2 %. — Structure développée par polissage. — Parties blanches : Constituant fer-cuivre. — Parties noires : Constituant cuivre-fer.

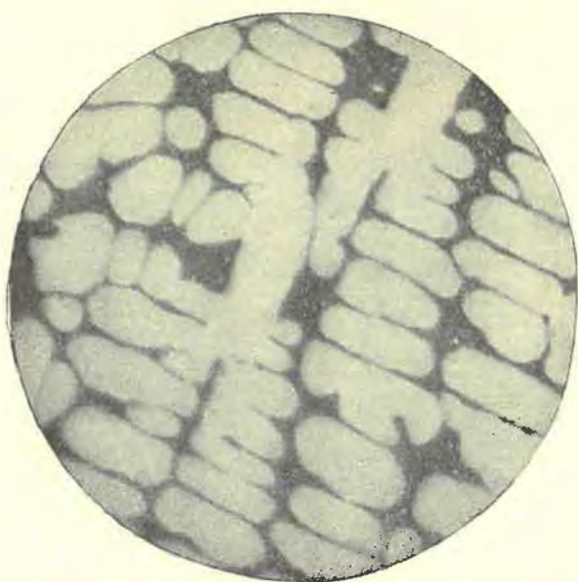


FIG. 2. — Cuivre 53.0 %; fer 46.3 %. — Structure développée par polissage. — Parties blanches : Constituant fer-cuivre. — Parties noires : Constituant cuivre-fer.



FIG. 3. — Cuivre 20.5 0/0; fer 79.1 0/0. — Structure développée par polissage. — Parties blanches : Constituant fer-cuivre. — Parties noires : Constituant cuivre-fer.

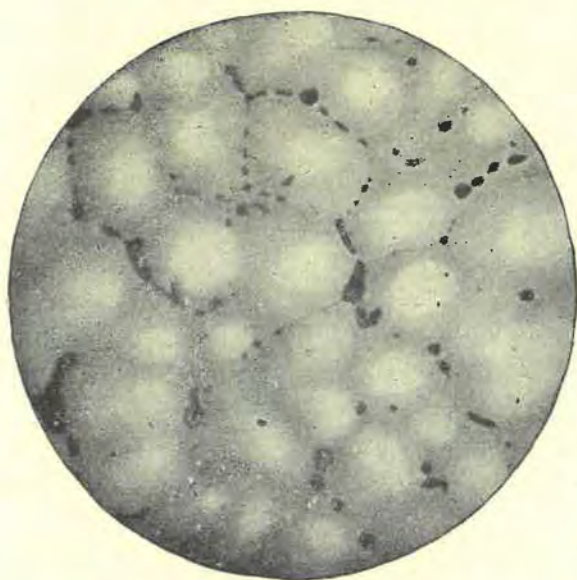


FIG. 4. — Cuivre 10 0/0; fer 89.6 0/0. — Structure développée par l'oxydation par chauffage. — Parties blanches : Constituant fer-cuivre. — Parties noires : Constituant cuivre-fer. — On remarque le caractère gradué des grains cristallins, plus riches en fer dans leurs parties centrales que dans les parties extérieures.



FIG. 5. — Cuivre 7.64 %; fer 89.0 %; carbone 2.30 %; silicium 0.84 %. — Attaque par l'iode. — Enveloppe en réseau : Cémentite. — Parties foncées en zig-zag : Structure de la martensite. — Fond blanc : apparement de l'austénite.

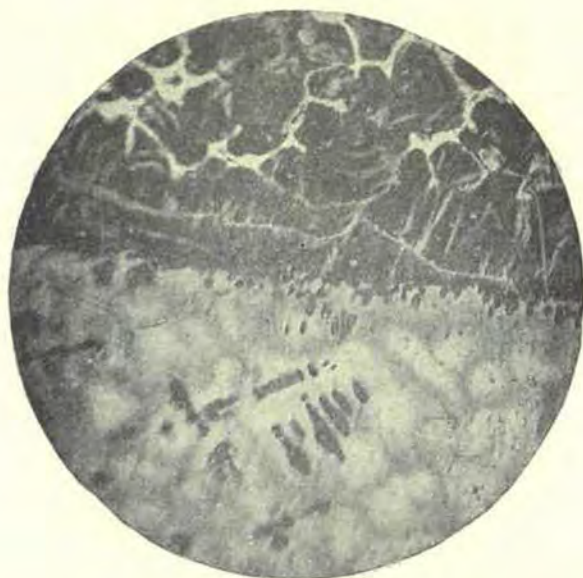


FIG. 6. — Jonction de deux couches d'alliages à 50 % de fer et 50 % de cuivre après fusion avec du charbon de bois, $V \times 80$.

Attaque par l'acide nitrique. La couche inférieure est l'alliage de cuivre-fer; la couche supérieure est l'alliage de fer-cuivre-carbone.