HAL
open science

Un exemple de substitutions entre matériaux

Bernard Roche

To cite this version:

Bernard Roche. Un exemple de substitutions entre matériaux. Sciences de l'ingénieur [physics]. 1973. hal-01909991

HAL Id: hal-01909991

https://minesparis-psl.hal.science/hal-01909991

Submitted on 31 Oct 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Un exemple de substitution

entre matériaux:

le cuivre et ses concurrents

B. ROCHE JUIN 1973

Consultation sur place

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES
Bibliothèque
N° IE 1

Dossier long
Ing² El. Pr. X 67

[34]

Consultation
sur place

DOSSIER LONG DES INGENIEURS ELEVES

DU CORPS DES MINES

Sujet proposé par M. Bernard ISAUTIER

Ingénieur des Mines - G 3 M

UN EXEMPLE DE SUBSTITUTIONS

entre MATERIAUX :

LE CUIVRE ET SES CONCURRENTS

[34]

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES
Bibliothèque
N° IE 1

Bernard ROCHE

Juin 1973

Je tiens à remercier tout particulièrement les personnes qui m'ont apporté une aide précieuse pour la rédaction de ce rapport :

- Mes directeurs de dossier : M. LAFFITTE directeur de l'Ecole des Mines
  M. ISAUTIER chef de service à G 3M.

- Des membres de l'Administration : MM. GREIF et LAMBERT de la DIMELEC
  MM. GERBIER Ingénieur en chef des Télécommunications, M. CROS du CNET.

- Des membres des syndicats professionnels ou Centres techniques :

  MM. COTTIN, REVERCHON, BOURDIN du centre d'information du cuivre.

  M.M. GUERONIK, DA du CIPEC.

  M.M. DESCHALIN, LE BESNERAIS du syndicat des câbles.

  M.M. LEMOIGNE, PICCINI du syndicat de la robinetterie.

  M.M. MICHAUDET, DEVAUX du syndicat de la construction électrique.

  M. COLLIARD du Centre technique du Décolletage à CLUSES

  M. BOUILLE du CETIM (Senlis)

  M. LÈBRE du Centre technique du zinc.

  M.M. JACOB et ARNAULT du Centre technique de la fonderie.

  M. BERLEMONT du Centre du cuivre.

  M. ANDRÉ du groupement des lamineries d'aluminium.

  Mme GALLEY du syndicat du décolletage

  M. BOUVIER du Centre technique de l'aluminium.

  M. CHATAIN du Centre technique des matières plastiques.

- Des industriels; producteurs ou transformateurs de métaux.

  M. André JACOMET directeur de PUK.

  M. ANTONI président de cuivre et alliages (PUK).

  M. ASSELIN directeur général adjoint d'Ugine-Acier.

  M. JACQUELIN Directeur à PUK.

  M. TREY, directeur à TREFIMETAUX (PUK).

  M. de BAYNAST, directeur de l'usine du Havre (Tréfimétaux).

  MM. ERGAS, Pierre JACOMET, ROLS, PLANTE, CHATEAU, MIRABELLE, GERARD du département Marketing de l'Aluminium français.

  M. LOUICHON, DECLETY d'Ugine Acier.

/....

- Des industriels utilisateurs de métaux (2ème transformation)

M. KOHN, directeur technique de Jeumont_Schneider.

M.M. BURNIER, GAILLEY, d'Alstom.

M.M. PETIT, LEMAIRE, LARONZE, FAURE, de CEM division électricité (Le Havre, Lyon, Le Bourget).

M.M. GILARDONI, SCHMITZ, de CEM division condensation

M. CHARTEY, de CHAUSSON.

M. RATIER des câbles de Lyon.

M.M. BOILEAU,COSSIE, DUFLOT, BEUGLET, LAURENCIER de la S.N.C.F.

M.M. SCHMELTZ, CROITORU, COJEAN d'E.D.F.

M.M. HUET, MORLET de G.D.F.

M.M. GRAVICHE, JULLIEN de Peugeot.

M. GOULOT de Ferrodo

M. LIMET de la Société générale de Fonderie.

M. BIGIA dePongot et Colomb (robinetterie)

M. X. de la société ARMOSIG (canalisation d'eau)

M. BOUNIOL, Décolleteur.

M. BOIS MARIN entrepreneur de plomberie.

M. ARTALLE installateur électricien.

Le métal rouge est, sans doute, l'un des tout premiers métaux découverts et mis en oeuvre par l'homme. Il est à l'heure actuelle le chef de file des métaux non-ferreux : la consommation mondiale annuelle est de l'ordre de 7 millions de tonnes. Il est vrai que le cuivre mérite son succès ; il possède un certain nombre de propriétés remarquables : très bonnes conductibilités électrique et thermique, résistance à la corrosion, bonnes caractéristiques mécaniques, facilité de mise en oeuvre, etc. ...

Certains prophètes de malheur, nous ont annoncé une pénurie de métal rouge d'ici à quelques années (40 ans pour les moins pessimistes), la croissance étant la grande fautive. C'est méconnaître que les compagnies minières ne peuvent, pour des raisons financières, s'assurer des réserves au delà de 15 ans et qu'il y a peu de rapport entre les réserves prouvées et les réserves globales de l'écorce terrestre : les premières dépendent d'ailleurs du prix que l'on est prêt à consentir pour extraire le métal et corrélativement du prix que le consommateur est décidé à l'acheter.

Le développement des techniques de recyclage devrait permettre la mise à la disposition de l'économie de quantités importantes de cuivre, insuffisantes, il est vrai, pour répondre à des besoins croissants.

En fait, le cuivre gardera-t-il sa place et son rôle ? Ne risque-t-il pas de perdre une partie de son marché au profit d'autres matériaux, ce qui permettrait ainsi d'éloigner le spectre de la pénurie : c'est le phénomène de substitution dont sont menacés tous les matériaux ; en même temps qu'un métal gagne de nouveaux emplois, il en perd d'autres : ainsi le cuivre a remplacé le plomb dans les installations domestiques, pendant que l'aluminium le concurrençait dans le domaine des cables électriques.

La substitution peut se faire pour des raisons techniques (découvertes de matériaux nouveaux mieux adaptés à l'usage final - modification de procédé rendant caduc l'emploi du matériau traditionnel) ou pour des questions économiques (l'emploi d'un autre matériau entraînant des économies non négligeables) et le plus souvent en raison d'une évolution simultanée de ces deux facteurs.

On peut avoir une idée de l'importance des phénomènes de substitution en comparant la croissance de la consommation de cuivre et de la production industrielle : on constate, que, depuis un certain temps (variable suivant les pays), la consommation de métal rouge croit de 4 % environ par an, alors que la production industrielle des pays développés croit de 6 % par an environ : la différence résulte d'une part de la substitution, d'autre part du progrès technique qui permet de réduire la consommation spécifique de métal (la réduction de l'épaisseur des tubes de distribution d'eau chaude domestique en est un exemple). On peut aussi comparer, dans des secteurs étroits et bien délimités, les taux de croissance de matériaux concurrents. Ainsi aux Etats-Unis, de 1947 à 1954, on a enregistré les taux de croissance suivants :

./...

Secteurs		Cuivre	Aluminium
	Transmission d'énergie	92 %	310 %
	Radio	74 %	261 %
	Moteurs	32 %	556 %
	Téléphone	11 %	170 %

Le phénomène des substitutions est bien réel : si les cours du cuivre s'élèvent, du fait de l'abaissement des teneurs d'exploitation, provoqué par une demande accrue, des matériaux concurrents, plus abondants dans l'écorce terrestre et permettant de répondre plus économiquement à un besoin donné, pourront prendre le relai du cuivre ; il y aura autorégulation de la demande par les prix, avec transfert vers une autre forme de demande.

L'approche méthodologique tentée dans ce dossier consiste tout d'abord à offrir au lecteur une comparaison des propriétés des cuivreux et des matériaux concurrents, de façon à lui permettre de trouver lui-même par déduction les substitutions techniquement possibles, qu'elles soient passées, actuelles ou futures. La seconde partie à caractère plus économique cherche à définir à partir de quels niveaux respectifs de cours, la substitution sera possible d'un point de vue technico- économique et ceci pour chacunes des utilisations actuelles ou facilement prévisibles du cuivre. La troisième partie s'efforce de montrer les limites de la rationalité économique et indique comment des facteurs non quantifiables peuvent retarder ou accélérer les phénomènes de substitution.

/lère PARTIE /

- Présentation générale des cuivreux et de leurs concurrents

- Leurs propriétés comparées.

/1. RAPPEL DE METALLURGIE EXTRACTIVE DU CUIVRE /

On trouve dans la nature 165 composés du cuivre, dont 12 seulement ont une certaine importance économique. On distingue : le cuivre natif (très rare), les minerais sulfurés (chalcopyrite, bornite, enargite, chalcocite, etc. ...) et les minerais oxydés (oxydes : Cuprite-Carbonates : Azurite, Malachite-Silicates : Chry-socolle - etc. ...). Ces derniers, fréquents dans les parties superficielles des gisements, résultent du lessivage des minerais sulfurés par les eaux météoritiques.

La teneur des minerais exploités à l'heure actuelle est comprise entre 0,7 et 3,5 % : aux U.S.A., on exploite des minerais à moins de 1 %, au Chili et au Pérou, la teneur moyenne est voisine de 1,2 % ; en Zambie et au Zaïre, elle dépasse respectivement les seuils de 2 % et 3 %.

N.B. : La teneur moyenne de l'écorce terrestre en cuivre est de 70 ppm.

1-1 : Les minerais sulfurés : Ils représentent le plus gros tonnage (91 % de la production aux U.S.A.) ; ils sont concentrés par flottation.

Le concentré est alors grillé, ce qui permet d'oxyder une partie du fer, d'éliminer une partie du soufre et les constituants volatils tels qu'arsenic bismuth et antimoine. Cette opération de grillage n'est d'ailleurs pas indispensable.

On traite ensuite le concentré au four à réverbère : l'atmosphère réductrice qui y règne, favorise la formation de sulfure de cuivre Cu_2S et de sulfure de fer FeS : on obtient la matte, qui contient 35 à 55 % de cuivre.

La matte est ensuite chargée dans un convertisseur : sous l'action de l'oxygène de l'air, le soufre est éliminé sous forme de SO_2 et l'on obtient un cuivre impur, le blister, l'oxyde de fer FeO étant entraîné dans les scories sous forme de silicate de fer (on ajoute un fondant à base de silice lors de l'opération de conversion).

1-1-1 : Affinage au feu :

Le blister, qui contient 98,5 à 99,5% de cuivre, est refondu dans un four : un soufflage d'oxygène permet d'oxyder puis de scorifier les impuretés. On trempe alors dans le métal en fusion des troncs d'arbres verts (perchage) ce qui permet de réduire le peu d'oxyde Cu_2O qui s'est formé (les impuretés sont plus avides d'oxygène que le cuivre), le cuivre Cu/a2 apte aux applications électriques. On peut aussi éliminer, par adjonction de phosphore, l'oxygène dissous dans le cuivre et l'on obtient le cuivre Cu/b, propice aux applications mécaniques.

1-1-2 : Raffinage électrolytique : C'est le procédé le plus employé.

Le cuivre blister est coulé en anodes ; l'électrolyse qui utilise l'action sélective du courant permet d'obtenir un cuivre plus pur (99,95 %) que lors de l'affinage au feu.

Le métal constituant les cathodes ne présente pas des caractéristiques mécaniques suffisantes et doit être refondu. On peut effectuer la refusion sous atmosphère réductrice et l'on obtient du cuivre Cu/C1 ou Cu/C2 apte aux usages électroniques ou effectuer l'opération à l'air libre, ce qui conduit à la dissolution d'une certaine quantité d'oxygène que l'on peut conserver, on obtient alors du cuivre Cu/al apte aux usages électriques, ou éliminer au moyen de phosphore et l'on obtient alors du cuivre Cu/b (cf § 1-1-1). Les cathodes non refondues constituent le cuivre Cu/d.

Rmq1 : l'oxygène dissous rend le métal impropre aux opérations nécessitant un chauffage en atmosphère réductrice (recuit au four à gaz et soudage oxyacéthylénique) : la réduction de l'oxygène par l'hydrogène, qui diffuse de façon appréciable dans le cuivre vers 300° se traduit par la formation de pores et de vapeur d'eau sous très forte pression entraînant la fragilisation du métal.

Rmq2 : Par contre la présence d'oxygène, qui insolubilise certaines impuretés, permet d'obtenir d'excellentes conductibilités électriques et thermiques.

Rmq3 : L'excès de phosphore, qui subsiste après désoxydation, est sans action nocive sur les caractéristiques mécaniques, mais abaisse de 20 à 30 % les conductibilités électriques et thermiques. Il n'est donc pas étonnant que l'on réserve le cuivre désoxydé au phosphore aux usages mécaniques et le cuivre non désoxydé aux usages électriques.

1-2 : Les minerais oxydés :

Ils sont traités par hydrométallurgie, la flottation n'étant pas envisageable de façon économique. Les minerais sont donc lixiviés au moyen de liqueurs acides ou basiques. On récupère alors le cuivre par électrolyse ou cémentation (la liqueur de lixiviation est envoyée sur des ferrailles et l'on obtient du cuivre métal, le fer remplaçant le cuivre dans ses sels).

/2 - LES ALLIAGES DE CUIVRE /

L'addition au cuivre d'un certain nombre d'éléments permet d'obtenir une gamme de matériaux présentant des propriétés très intéressantes et souvent des caractéristiques supérieures à celles du cuivre.

Les alliages à base de cuivre en contiennent, par définition, au moins 40 % et il en est le principal élément.

2-1 : Cuivres faiblement alliés

Les alliages cuivreux groupés sous cette désignation présentent les caractéristiques communes suivantes :

- leur teneur en élément d'addition est inférieure à 2 %.

- chaque type d'alliage ne comprend généralement qu'une seule nuance.

Malgré leurs faibles teneurs, les éléments ainsi ajoutés au cuivre améliorent - ou permettent d'améliorer par ou traitement thermique - les caractéristiques mécaniques ou d'usinage de ce métal sans altérer trop fortement ses propriétés fondamentales de conduction électrique et thermique et de résistance à la corrosion.

./...

2-1-1 : Cuivre à l'argent (moins de 0,2 % d'argent)

L'action principale des faibles additions d'argent est d'augmenter d'environ 150° la température d'adoucissement et de recristallisation du cuivre écroui et d'améliorer la résistance au fluage.

2-1-2 : Cuivre au cadmium :

Ajouté au cuivre dans la proportion de 0,7 à 1 %, le cadnium améliore les caractéristiques mécaniques, la limite de fatigue, la limite de fluage et la résistance à l'usure (les caténaires sont souvent en cuivre au cadmium).

Rmq : les "bronzes téléphoniques" sont des alliages à 1 % maxi de cadmium et 0,4 % maxi d'étain.

2-1-3 : Cuivre au tellure :

L'adjonction de 0,3 à 0,7 % de tellure augmente l'aptitude du cuivre à l'usinage et relève la température d'adoucissement du cuivre écroui. Toutefois le cuivre au tellure est difficile à souder.

2-1-4 : Cuivre au chrome :

La présence de 0,3 à 0,7 % de chrome permet d'obtenir un matériau à durcissement structural : une trempe à l'eau (depuis 975 à 1 000°) suivie d'un revenu vers 450 à 475°, augmente les caractéristiques mécaniques.

2-1-5 : Cuivre au béryllium :

L'adjonction de 2 % environ de Béryllium donne un alliage à durcissement structural à caractéristiques mécaniques considérablement plus élevées, avec, toutefois, une conductibilité électrique plus faible.

2-2 : Les Laitons :

Ce sont des alliages à base de cuivre et de zinc, ils renferment de 5 à 45 % de ce dernier, et éventuellement, divers autres éléments en faibles proportions destinés à améliorer certaines propriétés. Leur couleur varie du rose au jaune suivant la teneur en zinc.

A température ordinaire, les laitons sont constitués d'une seule phase (α) jusqu'à 36 % de zinc et d'un mélange de deux phases ($\alpha+\beta'$) au delà de 36 % de zinc. La phase α est malléable à chaud et à froid, elle permet des déformations importantes par laminage, emboutissage, repoussage, etc. ... La phase β' est dure et fragile : il en résulte une moins bonne aptitude aux déformations à froid, mais une meilleure usinabilité. Au dessus de 455°C, la phase β' se transforme en phase β, beaucoup plus malléable : les laitons à plus de 36 % de zinc peuvent donc être travaillés à chaud par filage, matriçage, etc. ...

Pour faciliter l'usinage du laiton, on ajoute 1 à 2 % de plomb qui favorise la fragmentation des copeaux.

L'adjonction d'étain, d'aluminium et de silicium augmente la proportion de phase β' et, portant l'aptitude au travail à chaud. Au contraire, la présence de nickel, manganèse et fer augmente la proportion de phase α et donc la malléabilité à froid.

2-3 : Les bronzes :

Ce sont essentiellement des alliages de cuivre et d'étain (dont la teneur est comprise entre 3 et 20 %). Aux teneurs plus élevées, les bronzes deviennent fragiles et sont réservés à des emplois particuliers (cloches à 25 % d'étain). Les bronzes, en raison de leur aptitude au moulage, sont surtout des alliages de fonderie. Néanmoins, certaines nuances à moins de 10 % d'étain peuvent être utilisés à l'état corroyé sous forme de barres, tôles, bandes, etc. ...

Jusqu'à 16 % d'étain, les bronzes sont constitués par une phase α, qui les rend malléables à froid et à chaud.

Au dessus de 16 % d'étain, on obtient un mélange de phase α et de phase δ. Cette dernière est dure et fragile.

L'adjonction de 0,1 à 0,2 % de phosphore augmente la dureté et les qualités de frottement du bronze.

La présence de zinc diminue la proportion de phase et augmente la malléabilité.

Le plomb (moins de 7 %) améliore l'aptitude à l'usinage.

2-4 : Les Cuproaluminiums :

Ils contiennent 4 à 14 % d'aluminium et sont caractérisés par une résistance élevée aux diverses formes de corrosion.

Les nuances à moins de 8 % d'aluminium sont mieux adaptées au travail à froid (laminage, emboutissage). Ils sont constitués d'une phase , malléable à froid mais fragile à température élevée.

Les nuances à plus de 8 % d'aluminium ont d'excellentes aptitudes au moulage, au soudage et au travail à chaud (matriçage, laminage).

On effectue parfois des additions de fer, nickel ou manganèse.

2-5 : Les cupronickels :

Le cuivre et le nickel sont mutuellement solubles en toutes proportions. Ils ne forment qu'une seule solution solide de première espèce dont les propriétés varient régulièrement avec la composition.

./...

Les propriétés mécaniques ou chimiques sont d'autant meilleures que la teneur en nickel est plus élevée.

Les propriétés dominantes de ces alliages résident dans leur excellente résistance à la corrosion par l'eau de mer circulant à grande vitesse et par les agents chimiques, dans leur résistance à la corrosion sous tension, dans leur caractéristiques mécaniques élevées qui se maintiennent jusqu'à des températures de l'ordre de 400° C.

Rmq : Les alliages à 40-45 % de nickel ont un coefficient de température de la résistivité pratiquement nul : constantan , invariant.

2-6 : Maillechorts :

Ce sont des alliages de cuivre, nickel et zinc. De couleur agréable, ils ont une facilité de travail comparable à celle des laitons, des caractéristiques mécaniques généralement supérieures et une résistance satisfaisante à la corrosion. Ils sont très utilisés en orfévrerie.

2-7 : Cuprosiliciums :

Ces alliages renferment de 2 à 4 % de silicium et divers autres éléments (Mn, Al, Fe) en faible teneur.

Ils présentent des caractéristiques mécaniques élevées d'excellentes qualités de frottement, et une résistance à la corrosion supérieure à celle du cuivre pur.

2-8 : Cuproplombs :

Ces alliages contenant de 6 à 35 % de plomb sont caractérisés par d'excellentes propriétés antifriction et ils sont utilisés pour la fabrication de coussinets.

3 - LES PROPRIETES COMPAREES DES CUIVREUX ET DES MATERIAUX CONCURRENTS

Le cuivre réunit un certain nombre de propriétés remarquables et recherchées: bonne conductibilité électrique et thermique, bonnes caractéristiques mécaniques, résistance à la corrosion, facilité de mise en oeuvre et de mise en forme. Aucune substance connue à ce jour ne réunit une telle conjonction de propriétés : les aciers inoxydables ont une bonne résistance à certains types de corrosion, mais une faible conductibilité électrique ou thermique ; l'aluminium a une conductibilité électrique voisine de celle du cuivre, mais ses caractéristiques mécaniques sont médiocres.

Essayons néanmoins de mieux cerner la concurrence. N'oublions pas que, si les métaux purs ont leur mot à dire dans la bagarre , leurs alliages, qui présentent parfois des propriétés notablement différentes des leurs, peuvent être des rivaux beaucoup plus dangereux pour les cuivreux que les métaux purs dont ils sont issus. Ne méconnaissons pas non plus les matières plastiques qui ne cessent de nous causer des surprises de taille.

3-1 : Les matériaux concurrents des cuivreux :

3-1-1 : L'aluminium et ses alliages :

L'aluminium, isolé par DORSTED en 1824 est un métal jeune, qui est néanmoins, à l'heure actuelle, le chef de file des métaux non ferreux

Le minerai principal est la bauxite ; un traitement chimique permet de séparer l'alumina des autres constituants(silice et oxyde de fer). L'aluminium est extrait de l'alumine par électrolyse, dans de la cryolithe fondue. Pour fabriquer 1 kg d'aluminium, il faut environ 2 Kg d'alumine (soit 4 à 5 Kg de bauxite) et 15 Kwh.

En incorporant à l'aluminium de faibles quantités d'autres éléments (Si, Mg, Cu, Zn, etc. ...), on prépare de nombreux alliages qui présentent des qualités que ne possède pas le métal pur.

On distingue quatre types principaux d'alliages suivant qu'ils sont ou non à durcissement structural (la présence de Cu,ou de Zn, ou la présence simultanée de Mg et de Si conduit à des alliages à durcissement structural) et suivant qu'ils sont mis en oeuvre par moulage ou par corroyage (les alliages de fonderie contiennent beaucoup plus de Si, de Cu ou de Mg que les alliages de corroyage).

3-1-2 : Le titane et ses alliages :

Les principaux minerais de titane sont l'ilménite et le rutile (oxydes de titane : $Ti\ O_2$). L'oxyde de titane est chloruré et la chlorure réduit par le magnésium en éponge de titane métal (procédé Kroll). L'éponge doit être refondue sous vide deux ou trois fois de suite afin d'obtenir un lingot transformable.

Le titane possède à l'ambiante une structure hexagonale compacte appelée phase (α). Au cours du chauffage, celle-ci se transforme vers 882° C en une structure cubique centrée appelée phase (β) laquelle subsiste jusqu'au point de fusion. Divers éléments d'alliage ont une tendance soit à élargir le domaine d'existence de la phase α (Al, O_2, N_2, B, C), soit celui de la phase β (Mo, Nb, H_2, Mn, Fe, Cr, Ni, Co, Cu, Au, Ag). La présence de phase α permet une bonne résistance au fluage, mais rend difficile la transformation à froid. La phase β facilite, elle, la transformation à froid,par contre, elle diminue la résistance à chaud et à basse température.

3-1-3 : Les aciers inoxydables :

On désigne sous ce vocable toute une famille d'aciers dont le seul lien est d'avoir une teneur relativement élevée en chrome. En fait on distingue trois groupes principaux d'aciers inoxydables :

- les aciers inoxydables martensitiques qui contiennent de 11,5 à 16 de chrome et de 0,1 à 1,2 % de carbone (ex. inox à 13 % de Cr),

- les aciers inoxydables ferritiques qui contiennent de 16 % à 25 % de chrome et 0,08 à 0,2 % de carbone (ex. inox à 17 % Cr).

./...

- les aciers inoxydables austéritiques qui contiennent de 3,5 à 22 % de nickel, de 16 à 26 % de chrome et de 0,03 % à 0,25 % de carbone (ex. inox 18/8). On peut ajouter aussi de 2 à 3 % de molybdène (ce qui accroît la résistance à la corrosion) et "stabiliser" l'acier par l'adjonction de titane très avide de carbone.

L'adjonction de divers éléments (Cu, S, Nb, W, etc. ...) permet d'améliorer les propriétés : ainsi l'adjonction de soufre améliore les propriétés de décolletage, l'adjonction de cuivre facilite la frappe à froid.

3-1-4 : Le zinc et ses alliages

Le zinc existe dans la nature principalement à l'état de complexes sulfurés (blendes) ou carbonatés et silicatés(calamine). Les minerais sulfurés, - les plus fréquents, sont grillés et l'on obtient de l'oxyde de zinc réduit par le carbone à l'état de zinc liquide. On peut aussi procéder par traitement hydrométallurgique. Le zinc est utilisé principalement dans la galvanisation et la protection des métaux moins électropositifs que lui (le zinc subit une attaque préférentielle ; de plus l'oxydation se trouve freinée par suite de la formation d'un couche de sels ou d'oxyde de zinc peu perméable), dans le batiment (toitures, gouttières) et dans les alliages (laiton, zamak).

L'alliage de zinc le plus connu est le zamak, particulièrement apte au moulage sous pression. Le zamak 3 contient 3,9 à 4,3 % d'aluminium, 0,03 à 0,06 % de magnésium et moins de 0,1 % de cuivre (le zamak 5 contient 0,75 % à 1,25 % de cuivre, il a des caractéristiques mécaniques supérieures à celles du zamak 3, mais une résistance à la corrosion inférieure).

3-1-5 : Matières plastiques ou polymères artificiels :

Il s'agit de matériaux récents et dont le développement a suivi les découvertes de la chimie organique. On peut dire qu'il s'agit d'un domaine en évolution continue et qui nous réservera des découvertes prometteuses.

On distingue :

. Les matières thermoplastiques qui se ramolissent si la température augmente et durcissent si la température diminue et ceci de façon réversible : on peut citer les polyamides, les matières cellulosiques, les polyéthylènes, les polystyrènes, les polyvyniliques, etc. ...

./...

. les matières thermodurcissables qui se polymérisent et durcissent de façon irréversible sous l'action de la chaleur : silicones, polyuréthanes, polyesters, polyépoxydes, phénoplastes, etc. ... Remarquons que les plastiques thermodurcissables ont souvent des caractéristiques mécaniques renforcées par l'addition d'une charge minérale à base de fibres de verres, d'amiante, etc. ...

Les polymères bien qu'ils soient issus pour la plupart d'une matière première commune (pétrole, gaz naturel ou charbon) présentent une gamme très ouverte de propriétés.

3-2 : Propriétés physiques comparées (TABLEAU 1).

Le cuivre est le seul métal, avec l'or, a être coloré, les alliages cuivreux ont une couleur allant du rouge au jaune clair suivant la teneur en éléments d'addition. Le tableau 1 donne les valeurs des constantes physiques des cuivreux et d'autres matériaux.

Rmq 1 : pour les alliages possèdant un nom générique unique malgré des compositions différentes (comme les laitons), le tableau 1 donne une fourchette à l'intérieur de laquelle sont compris les intervalles de solidification des diverses compositions. Pour les inox, la valeur indiquée est la moyenne de l'intervalle de solidification. Pour les matières plastiques, la fourchette indiquée encadre les températures limites de résistance à la chaleur continue (cette dernière varie énormément avec le type de plastique considéré).

Rmq 2 : Le coefficient de dilatation des polymères est en moyenne beaucoup plus élevé que celui des métaux, il faudra donc prévoir, dans les installations comportant des tuyaux de plastique soumis à d'importantes variations de température, des joints de dilatation.

3-3 : Propriétés mécaniques comparées

Nous nous contenterons d'étudier ici le module d'élasticité, les résistance à la traction, l'allongement, la limite de fatigue.

3-3-1 : Module d'élasticité :

La valeur du module d'élasticité en traction est un paramètre important car elle intervient au dénominateur de la formule qui donne la flèche d'une poutre droite reposant sur deux appuis : plus le module d'élasticité est élevé, moins la flèche sera importante. Nous pouvons donner un classement des matériaux suivant leur module d'élasticité exprimé en Kg/mm2 :

Nickel	21 000
Acier doux	20 400
Aciers inoxydables	19 - 21 000
Alliages cuivreux	11 000 - 12 000
Titane et ses alliages	10 500 - 12 000
Zamak	8 500 - 9 600
Aluminium et ses alliages	6 700 - 7 200
Plomb	1 600
Matières plastiques :	
- thermodurcissables	350 - 3 500
- thermoplastiques	30 - 300

METAL PUR ou ALLIAGE	Densité à 20° C.	Température de fusion (corps purs) Intervalle de solidification (alliages)	Coefficient de dilatation linéaire entre 20° et 100° C. (x 10^6)
Aluminium (99,99)	2,699	660,24	23,8
Aluminium (99,5)	2,705	658,4	23
Alliages d'alum.	2,6 - 2,95	500 - 700	20 - 24
Titane	4,50	1 660	8,5
Alliages de titane	4,50	1 590 - 1 670	8,4 - 11,1
Acier doux	7,85	1 450	12
Zinc	7,14	419	39,7
Zamak	6,6 - 6,7	380 - 386	25,8
Cuivre	8,96	1 083	16,4
Cuivre, faiblement allié	8,7 - 8,94	1 040 - 1 082	17 - 18
Cuivre au Béryllium	8,25	865 - 990	17
Laitons	8,33 - 8,86	900 - 1 045	18,1 - 20,8
Bronzes	8,87 - 8,94	800 - 1 085	17,4 - 18,8
Cupro-aluminiums	7,6 - 8,2	1 035 - 1 070	17,5 - 18
Cupro-nickel	8,86 - 8,94	1 090 - 1 320	16,2 - 17,5
Polymères	0,9 - 2,2	50 - 260	25 - 150
Inox 13 % Cr	7,7	1 500	10,5
Inox 17 % Cr	7,7	1 450	10,2
Inox 18-8	7,9	1 420	16,5
Inox 18-8 - Mo	7,95	1 380	16 - 16,5
Plomb	11,34	327	29,3
Nickel	8,8	1 455	13,3

TABLEAU 1

Rmq : Le module d'élasticité des cupronickel et des cuproaluminium croît avec la teneur en nickel. Un cupronickel à 40 % de nickel peut avoir un module d'élasticité de 17 000 Kg/mm2.

3-3-2 : Résistance à la traction, allongement et résistance à la fatigue :

Ces caractéristiques mécaniques dépendent essentiellement du taux d'écrouissage et des traitements thermiques subis par le matériau. Elles varient aussi beaucoup suivant que l'on considère le métal pur ou ses alliages et suivant la forme sous laquelle se présente le matériau : tôle, tube, fil, produit moulé.

N.B. : La limite de fatigue traduit le processus de détérioration qui peut conduire à la rupture d'une pièce lorsqu'elle est soumise à des contraintes périodiques inférieures à la charge de rupture.

Les opérations d'écrouissage ou de traitement thermique ont pour effet d'augmenter la résistance à la rupture et la limite de fatigue ; parallèlement, elles s'accompagnent d'une diminution de l'allongement à la rupture.

Les alliages ont des caractéristiques meilleures que les métaux purs.

Dans le cas du laiton, on peut constater qu'au fur et à mesure que croît la teneur en zinc, la résistance à la traction et l'allongement croissent régulièrement jusqu'à ce que la teneur en zinc atteigne 35 %.

Lorsqu'on compare des matériaux entre eux, il faut raisonner à mode de mise en oeuvre identique : ainsi, on comparera les résistances du duralumin laminé et du laiton laminé mais non celles du duralumin laminé et du laiton moulé.

Etablissons une classification des matériaux quant à leur résistance à la rupture : les aciers inoxydables, le titane, les cuivreux viennent en tête de liste, puis le zamak les alliages d'aluminium et les polymères. En fait si l'on rapporte les caractéristiques mécaniques à l'unité de poids, le titane prend un avantage décisif, les alliages d'aluminium et même les plastiques reprennent du terrain. En ce qui concerne la résistance à la fatigue, notons le très beau score réalisé par le titane.

3-3-3 : Les caractéristiques mécaniques aux hautes températures :

Les caractéristiques mécaniques qui viennent d'être définies sont valables à la température ambiante (20°) ; que se passe-t'il lorsque la température s'élève ?

N.B. Aux températures élevées, le phénomène de fluage prend une importance non négligeable, il s'agit d'une déformation plastique permanente qui apparaît par suite des contraintes qui sont appliquées aux matériaux.

./...

Matériaux	limite de fatigue (kg/mm2 à 10^8 cycles)	limite de rupture à la traction (kg/mm2)	Allongement à la rupture %
Cuivre recuit	7,1	23	45
écroui (50%)	12,2	35	6
écroui (300%)		44	3
Cuivre au cadmium : recuit	10,4	24,6	45
écroui	21	52	7
Cuivre au Béryllium :			
. corroyé (trempé		50 - 60	30 - 50
) trempé, écroui	25	65 - 85	2 - 6
(trempé, écroui,) revenu	27	127 - 150	2
. moulé trempé		40 - 45	10 - 20
Laiton à 15 % Zinc (laminés) (recuit		27	45
) écroui		45	10
Laiton à 40 % Zinc (laminés) (recuit		32	42
) écroui		56	6
(moulé		34	8
Bronzes (laminés) (recuit		30 - 33	40 - 50
) écroui		62 - 73	5 - 6
(fils) recuit		38 - 45	60 - 40
(moulés)		20 - 25	7 - 13
Cupro-aluminium corroyés (5% aluminium) (recuit		40	65
)écroui		55	25
Cupro-aluminium moulés recuits		55 - 70	10 - 15
Cupro-nickel corroyés recuit		27 - 41	40 - 43
écroui		45 - 57	5 - 6
Cupro-nickel moulés		31 - 45	
Cupro-nickel traité trempé		25	40
trempé, écroui, revenu		74	8

./...

CARACTERISTIQUES MECANIQUES A 20° C

Tableau 2

Matériaux		Limite de fatigue (Kg/mm2 à 10^8 cycles)	Limite de rupture à la traction (Kg/mm2)	Allongement à la rupture %
Aluminium (99,9)	recuit		5	48
	écroui		10	12
Aluminium (99,5)	recuit		7	34
	écroui		15	4
Almalec			33	4
Alliages d'aluminium pour corroyage				
* Al - Mg	recuit		10 - 28	22 - 17
	écroui		24 - 34	5 - 7
* Al - Cu (=Duralumin)	recuit		22 - 25	22 - 13
	trempé, mûri		40 - 47	16 - 8
* Al - Si - Mg (suivant traitement)		9	25 - 30	18 - 12
* Al - Zn - Mg - Cu		14,5	34 - 58	7 - 12
* Alliages forgés au Cu		10 - 12,5	36 - 42	4 - 10
Alliages d'aluminium de fonderie		5 - 8,5	14 - 25	1 - 5
Zamak		4,8 - 5,7	26 - 34	3 - 8
Titane (recuit)		22 - 32	30 - 70	15 - 22
Alliages de titane traités		40 - 60	90 - 130	20 - 5
Inox 18-8	recuit		44 - 70	40 - 50
	écroui		140 - 200	
Inox 17 % de chrome	recuit		44 - 60	10 - 20
	écroui		100 - 120	
Polymères thermoplastiques			2 - 9	3 - 10 (acryliques, styrènes) 5 - 700 (autres)
Polymères thermodurcissables			1,8 - 10	0,3 - 2

CARACTERISTIQUES MECANIQUES A 20°

Tableau 2 (suite)

De façon générale, une élévation de température s'accompagne d'une diminution de la résistance à la traction et d'une augmentation de l'allongement à la rupture.

Dans le cas du zamak, on constate cette évolution qui est d'ailleurs réversible ; mais dès que l'on atteint 90° C, le fluage commence à prendre de l'ampleur et il y a lieu de limiter les contraintes mécaniques appliquées au métal, à cette température.

Les polymères se déforment de façon notable sous l'effet d'une contraintes, au dessus d'une température qui varie entre 40 et 300° suivant leur composition. Toutefois, on sait réaliser des polymères qui peuvent supporter des pressions de 7 Kg/cm2 à 110° (canalisations de distribution d'eau chaude).

Les alliages d'aluminium perdent assez rapidement leurs caractéristiques mécaniques au dessus de 250 - 300°. La limite de rupture en traction passe de la gamme 20 - 30 Kg/mm2 à 20°, à la gamme 6 - 15 Kg/mm2 à 250°, à 5 - 10 Kg/mm2 à 300°. Les allongements s'accroissent de façon notable avec la température : ils peuvent atteindre 50 à 70 % à 300 % pour les alliages de laminage et de forge. Dans tous les cas, la limite de fluage à 200° est faible : de l'ordre de 5 - 7 Kg/mm2.

Quant aux alliages cuivreux, leur charge de rupture, leur limite élastique, et leur module d'élasticité sont plus ou moins altérés lorsque la température augmente. A 300°, le cuivre Cu/b a une limite de rupture en traction de 15 Kg/mm2 ; les laitons, cupro nickel, cupro-aluminium atteignent 28 Kg/mm2 ; seuls les maillechorts dépassent 38 Kg/mm2.

Les inox ferritiques et martensiques résistent assez bien aux contraintes et aux chocs jusqu'à 630° ; les austénitiques offrent une excellente résistance au fluage jusqu'à 700° (des additions de molybdène, wolfram, niobium et titane, permettent de l'améliorer).

Les alliages de titane présentent en général une excellente résistance au fluage, on peut les employer jusqu'à des températures de 500 - 550° (réacteurs d'avion) : leur résistance à la traction dépasse 50 Kg/mm2 (cas des alliages à 5 % d'Al - 2,5 % Sn ou 8 % d'Al - 1 % Mo - 1 % Vn ou encore à 6 % d'Al - 5 % Zr - 0,5 % Mo).

Nous remarquons ici la place de choix qu'occupent le titane et les aciers inoxydables.

3-3-4 : Les caractéristiques mécaniques à basse température :

La progression constante des applications cryogéniques nécessite des matériaux possèdant de bonnes propriétés mécaniques à basse température.

./...

Les métaux de structure cubique à faces centrées tels le cuivre et l'aluminium ne présentent pas de fragilisation à basse température et conservent ou améliorent leurs caractéristiques mécaniques. Ainsi la charge de rupture du cuivre recuit passe de 22,1 à 40,8 Kg/mm2 lorsque la température s'abaisse de 20° C à - 180° C., l'allongement passe de 48 % à 58 %, la limite de fatigue et la résistance au fluage est augmentée, de même que la ductilité. Dans le cas de l'aluminium, on peut faire des constatations semblables : il garde une bonne ductilité lorsque la température s'abaisse.

Les alliages de titane possèdent une bonne stabilité structurale (alliage à 5 % d'Al - 2,5 % Sn; alliage à 6 % d'Al - 4 % de Vanadium) peuvent être employés jusqu'à la température de l'hydrogène liquide (- 253° C) : la limite de rupture en traction peut atteindre 130 Kg/mm2 à - 200° C et l'allongement 14 %.

Les inox martensitiques et ferritiques sont fragiles à basse température ; au contraire, les austénitiques ne sont pas fragiles au dessus de - 200° C.. La résilience n'est pas modifiée, la résistance mécanique croît, et ils restent ductiles.

Certaines nuances austénitiques durcissent même par traitement à basse température.

Les polymères deviennent, en général, cassants à basse température.

Le zamak voit sa charge de rupture augmenter, son allongement diminuer; la résilience fait une chute vertigineuse (elle passe de 14 daJ/cm2 à 20° à 0,7 daJ/cm2 à - 40°) : le zomak est donc très fragile à basse température.

Les premières places reviennent ici aux cuivreux, aux alliages d'aluminium, au titane et aux inox austénitiques.

3-4 - Propriétés électriques

Le cuivre est, après l'argent, le meilleur conducteur de l'électricité : sa résistivité est de $1,72 \times 10^{-6} \Omega$ - cm pour le cuivre recuit (Cu/a ou Cu/c) ; celle de l'aluminium (99,5 %) recuit est de $2,8 \times 10^{-6} \Omega$-cm (l'aluminium à 99,99 % n'est pas employé à cause de ses caractéristiques trop faibles).

Donnons à titre de comparaison, les résistivités de quelques métaux et alliages et remarquons que les alliages présentent toujours des résistivités supérieures à celles des métaux purs dont ils sont issus ; la résistivité est aussi fonction de l'écrouissage et des traitements thermiques subis par le métal. Les valeurs sont exprimées en $\mu\Omega$ - cm :

./...

Argent	1,6	Maillechorts	20 - 40
Cuivre (Cu/a ou Cu/c) recuit	1,72	Tungstène	5,6
écroui	1,76	Fer	9,6
Cuivre Cu/b	2,03	Aciers doux	11
Cuivre faiblement allié	1,76 - 1,96	Inox ferritique ou martensitique	55-60
Cuivre au chrome	2,15	Inox austénitique	72-74
Cuivre au béryllium	4,9 - 7,2	Zinc	5,9
Laitons	3,1 - 7,5	Zomak	64
Laiton à usages électriques	6,2	Titane	50
Bronzes à usages électriq.	2,3 -6,1	Polymères	10^{15} - 10^{21}
Cuproaluminiums	9,5 - 22	Aluminium (99,99%) recuit	2,64
Cupronickels (la résistivité augmente avec la teneur en nickel).	8,5 - 57	Aluminium (99,50%) recuit	2,80
		écroui	2,84
		Almelec	3,28
		Autres alliages alumin.	3-7

L'aluminium est donc le métal qui se rapproche le plus du cuivre au point de vue de la résistivité.

A chute de tension identique, c'est-à-dire à résistance identique, on voit que le rapport de la section d'un conducteur en aluminium et d'un conducteur en cuivre est égal au rapport inverse des résistivités, c'est à dire $\frac{2,85}{1,76}$ soit 1,62. Le diamètre du conducteur aluminium est donc $\sqrt{1,62} = 1,27$ fois supérieur au diamètre du conducteur cuivre équivalent. Avec l'almelec, ces chiffres deviendraient respectivement 1,85 et 1,36. Compte-tenu des différences de densité entre le cuivre et l'aluminium, on peut voir que le poids d'aluminium nécessaire est la moitié du poids de cuivre.

On peut maintenant raisonner sur l'échauffement du conducteur. En effet, le conducteur en aluminium, de section plus importante a donc une surface d'échange avec l'extérieur plus importante qu'un conducteur en cuivre.

Soit I, l'intensité du courant, p la résistivité, l la longueur du conducteur, s sa section, et d son diamètre. La puissance perdue par effet Joule est donc égale à : $\frac{4\,plI^2}{\pi d^2}$; la puissance calorifique évacuée par convection est égale à $K\pi dl$ (K étant le coefficient de convection).

A l'équilibre, on doit avoir $\frac{4\,plI^2}{\pi d^2} = K\pi dl$

soit $d = \sqrt[3]{\frac{4\,pI^2}{K\pi^2}}$

./...

Avec un conducteur de résistivité p', de diamètre d' et de section s', pour un même échauffement, une même densité et une même longueur l, on aurait : d' : $\sqrt{\frac{4p'I^2}{Kn^2}}$ (K étant indépendant du métal voisin).

On aura donc $\frac{s}{s'} = \sqrt[3]{\left(\frac{p}{p'}\right)^2}$

On voit immédiatement qu'à même échauffement, pour une même intensité, la section du conducteur aluminium sera 1,4 fois supérieure à la section du conducteur cuivre.

Il faut aussi signaler qu'à l'air libre, l'aluminium se recouvre spontanément d'une mince couche d'alumine qui est un très bon isolant ; le cuivre, lui, se recouvre d'un oxyde de cuivre n'entravant pas la conduction du courant. Les raccordements de conducteurs en aluminium nécessiteront donc un soin tout particulier.

N.B. : aux températures cugogéniques, le cuivre et l'aluminium très purs ont d'excellentes conductivités.

Le coefficient d'augmentation de résistance avec la température est de + 0,00407 avec l'aluminium et de 0,00393 dans le cas du cuivre (entre 20 et 100° C).

3-5 : Propriétés thermiques

Nous nous intéressons à la conductibilité thermique, à la chaleur spécifique et dans certains cas à la chaleur latente de fusion. Le cuivre pur est un des meilleurs conducteurs de la chaleur. Donnons à titre de comparaison les caractéristiques des cuivreux et d'autres matériaux. Nous remarquerons que la conductibilité thermique diminue au fur et à mesure que la teneur en éléments d'addition croît dans les alliages (ex. laiton, cuproaluminium, cupronickel) ; ils sont d'ailleurs moins conducteurs de la chaleur que les métaux purs.

Matériaux	Conductibilité thermique à 20° (kcal/m.h °C)	Chaleur spécifique à 20° (kcal/kg °C)	Chaleur latente de fusion (Kcal/kg)
Cuivre Cu/a	335	0,09	42-50
Cuivre Cu/b	280	0,09	
Cuivre faiblement allié	306 - 335	0,09	
Cuivre au Béryllium	72-90	0,10	
Laitons	100 - 200	0,09	
Bronzes	35 - 70	0,09	
Cuproaluminiums	36 - 68	0,09 - 0,10	
Cupronickels	18 - 56	0,09	
Aciers	40 - 45	0,10	

./...

Matériaux	Conductibilité thermique à 20° (Kcal/m.h °C)	Chaleur Spécifique à 20° (kcal/kg °C)	Chaleur latente de fusion (Kcal/kg)
./... suite			
Inox martensitique ou ferritique	17-22	0,12	
Inox austénitique	14	0,12	
Zinc	97	0,09	
Zomak	93	0,1	25
Titane	16	0,13	
Polymères	0,07 - 0,35	0,20 - 0,50	
Aluminium	180 - 187	0,20 - 0,23	92
Alliages d'aluminium	110 - 180	0,20	

Là encore nous constatons l'avantage présenté par le cuivre, en ce qui concerne la conductibilité thermique, mais l'aluminium et ses alliages le suivent de très près.

En fait, si la conductibilité thermique intervient pour la propagation de la chaleur dans un matériau, elle est beaucoup moins importante en ce qui concerne la transmission de chaleur entre deux fluides séparés par une paroi de conductibilité λ ; en effet, dans la plupart des cas, le phénomène de convection entre fluide et paroi l'emporte sur le phénomène de conduction dans la paroi, pourvu que son épaisseur soit faible.

Prenons l'exemple d'une paroi en acier ($\lambda = 40$), d'épaisseur e = 0,002 m, séparant deux fluides identiques, ayant un coefficient d'échange E avec la paroi de 3 000 unités pratiques (ce coefficient ne dépend pas du métal constituant la paroi). La résistance thermique R de la paroi vaut donc :

$$R = \frac{1}{E} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{E} = \frac{1}{3\,000} + \frac{1}{3\,000} + \frac{0,002}{40} = 0,00066 + 0,00005$$

Le terme dû à la conductivité est donc faible devant le terme dû à la convection.

3-6 : Résistance à la corrosion :

Il s'agit de phénomènes très complexes. L'attaque d'un métal par un réactif chimique peut être :

- une attaque généralisée par dissolution, qui résulte de l'affinité chimique du matériau considéré pour la substance corrodante.

- une attaque par effet de pile qui n'a lieu qu'en présence d'un électrolyte. Rappelons, à ce propos, l'échelle des potentiels de Nernst où les métaux sont classés par électropositivité croissante :

./...

Magnésium
Zinc
Cadmium
Aluminium (99,5 %)
Acier ou fonte
Plomb
Laiton (50 % Zinc)
Nickel
Laiton (30 % de Zinc)
Cuivre
Inoxydable 18/8
Argent
Platine

On distingue 3 sortes d'attaques par effet de pile :

. attaque par contact : elle intervient si on met en contact deux métaux d'électropositivité très différente : ainsi le contact de l'aluminium et du cuivre aboutit à la corrosion de l'aluminium.

. attaque par points : elle résulte de la formation de piles locales par inclusion locale de méal lourd.

. attaque par corrosion intercristalline : s'il y a différence de potentiel entre les cristaux et joints de grains ; il en résulte que des alliages comprenant des métaux d'électropositivités très différentes sont particulièrement sujets à des corrosions de ce type.

3-6-1 : Cuivre et alliages cuivreux

Le cuivre, métal relativement noble, présente une résistance remarquable à la corrosion dans de nombreux milieux. On remarquera toutefois que certains milieux ont sur lui une action corrosive : acétylène, acides chlorhydrique, fluorhydrique, bromhydrique, cyanhydrique, sulfurique, phosphorique, nitrique, ammoniaque et sels d'ammonium, chlore humide, hydrogène sulfuré humide, sels d'argent, de mercure, sulfure de soldium, de baryum, chlorure de zinc, chlorure ferrique, sulfate ferrique, nitrate et chlorure de cuivre, cyanure de potassium et de sodium, acétylène.

Le cuivre transmet sa résistance à la corrosion à ses alliages : en général, les alliages à haute teneur en cuivre ont une tenue analogue à celle du cuivre non allié ; dans les alliages plus chargés en éléments d'addition, certains de ceux-ci, comme le nickel, l'aluminium, l'étain, améliorent considérablement la résistance du cuivre à différents modes de corrosion, tandis que d'autres comme le zinc peuvent l'altérer plus ou moins dans certaines conditions (si la teneur en zinc dépasse 36 %, il peut y avoir dézincification : appauvrissement de l'alliage en zinc qui passe en solution)

N.B. : La résistance à l'eau douce, l'eau déminéralisée (particulièrement agressive) et à l'eau de mer est très accentuée avec les cuproaluminiums.

./...

3-6-2 : Le titane et ses alliages :

Le titane résiste particulièrement bien à tous les composés du chlore, notamment aux chlorures (eau de mer) ; ils résiste bien aux acides, aux bases, aux sels, aux produits alimentaires ; on évitera toutefois d'employer le titane avec la soude, la potass les acides fluorhydrique, chlorhydrique, sulfurique, phosphorique, formiques lorsque ces produits sont concentrés ou bouillants.

3-6-3 : Aciers inoxydables :

La résistance à la corrosion des aciers au chrome martensiques croît avec la teneur en chrome ; la résistance à la corrosion atmosphérique, à l'eau et à la vapeur est moyenne.

Les aciers ou chrome ferritiques ont une résistance à la corrosion supérieure à celle des martensitiques : la résistance à la corrosion atmosphérique (sauf bord de mer) et aux eaux naturelles est bonne, mais dépend de l'environnement et des conditions d'entretien. Les inox ferritiques résistent bien à certains produits chimiques et alimentaires, on peut les employer avec l'acide nitrique et autres milieux oxydants. La résistance à la corrosion atmosphérique, à l'eau, à la vapeur des aciers austénitiques ou chrome-nickel surpasse celle des ferritiques surtout dans les milieux de l'industrie chimique. L'addition de molybdène étend le domaine d'application de ces aciers. On évitera toutefois d'employer les aciers inoxydables (même les austénitiques) dans les milieux suivants : acide chlorhydrique, acide nitrique fumant à l'ébullition, acide phosphorique concentré bouillant, acide sulfurique, chlore humide, chlorures ferrique et stanneux (avec les chlorures, il y a risque de formation de piqûres), brome, fluorures, aluminium et zinc fondu.

3-6-4 : L'aluminium et ses alliages :

L'attaque par dissolution n'a pas lieu dans des solutions de Ph compris entre 4,8 et 9,5 ; en dehors de ces limites, la couche superficielle d'alumine, puis le métal sont attaqués sauf s'il se forme une couche passivante (HNO_3 concentré et NH_4OH). Certains inhibiteurs (silicate de soude, chromates alcalins, amines) permettent de limiter l'attaque.

La corrosion par effet de pile dépend des constituants des alliages : le magnésium accroît la résistance aux alcalins et aux atmosphères marines, le manganèse accroît la résistance aux ions chlore, le cuivre a une influence néfaste. Certains traitements de protection en renforçent la couche d'oxyde (oxydation anodique, chimique, passivation) permettent de limiter la corrosion galvanique.

L'aluminium et ses alliages résitent bien (en général)

. aux hydrocarbures, produits alimentaires, métalloïdes secs, eau distillée, air, bases faibles et amines, acides organiques faibles.

./...

Ils résistent moins bien (en général) :

. à l'eau de conduite, à l'eau de mer (sauf Al-Mg), aux chlorures

Ils sont attaqués par (en général) :

. les bases fortes, les acides halogénés, l'acide sulfurique.

3-6-5 : Le Zomak :

Il résiste assez bien aux hydrocarbures sans traces d'acide, au gaz ; par contre il est attaqué par les acides, la glycérine, l'alcool, les produits alimentaires (à qui il confère un goût particulier), l' eau de mer, l'eau douce (sauf addition d'inhybiteurs), le platre humide. Les solutions salines de Ph compris entre 6,5 et 12 n'ont que peu d'action. Il se ternit à l'air atmosphérique, mais on peut chromer, nickeler ou laitonner les produits en zamak, ce qui lui confère une bonne résistance superficielle à la corrosion.

3-6-6 : Polymères :

Les polymères résistent en général bien aux acides et bases faibles. Par contre, la plupart d'entre eux sont attaqués par les acides et bases fortes. Les thermoplastiques sont, en général, dissouts par les solvants organiques, les thermodurcissables résistent bien en général.

3-6-7 : Résistance à la fatigue sous corrosion et résistance à la cavitation :

Les alliages cuivreux présentent une limite de fatigue sans corrosion peu différente de leur limite de fatigue dans l'air, ce qui n'est pas le cas pour les aciers alliés ou même le nickel : nous pourrons nous en assurer sur le tableau ci-dessous.

Nous remarquons aussi (figure 4) que le cuproaluminium surclasse tous les autres matériaux en ce qui concerne la résistance à l'érosion et à la cavitation.

MATERIAUX	Limite de fatigue (Kg/mm2)		
	Air	Eau douce	Eau de mer
Cuivre recuit	7	7	
Laiton (35% Zn) recuit	12	8,4	8,4
Bronze (5%Sn) recuit	14	14	14
Cupro-aluminium filé 12,6% Al-3,4%Fe-4,3%Mn	28,1	21	21
Acier à 13% chrome	38,6	26,8	20,5
Acier (1,5%Ni-0,73%Cr)	47,7	11,3	9,8
Acier au cuivre (0,98% Cu)	22,5	14,2	3,5
Acier au carbone	25	14,2	6,3

3-6-8 : Conclusion :

Nous trouvons donc dans le peloton de tête les cuivreux, le titane, les aciers inoxydables et, à une certaine distance, les alliages d'aluminium. Les trois derniers matériaux résistent à la corrosion par l'effet de phénomènes de passivation, le métal se recouvrant d'un film protecteur ; les cuivreux doivent leur résistance à la corrosion, à leur électropositivité élevée. On notera une certaine complémentarité entre titane et inox, le premier résistant bien aux ions chlores contrairement aux inox.

3-7 : Facilité de mise en oeuvre :

Lorsque l'on veut réaliser une pièce donnée, on dispose, en général de plusieurs procédés concurrents (matriçage, moulage, usinage , déformation à froid, etc. ...) que l'on peut d'ailleurs associer.

3-7-1 : Matriçage :

Cette opération consiste à forcer une ébauche métallique (ou lopin), rendue suffisamment plastique par chauffage, à remplir une cavité représentant la pièce que l'on désire réaliser ; on peut ainsi obtenir des caractéristiques élevées.

La température de matriçage dépend du matériau : elle est comprise entre 850 et 1 000° pour le titane, 900° et 1150° pour les inox martensitiques, 1100 et 1200° pour les austénitiques, 600 et 800° pour les alliages cuivreux, 350 et 450° pour les alliages d'aluminium.

Trois paramètres principaux sont à prendre en considération :

- l'aptitude d'un matériau à subir la déformation,
- la puissance des presses à mettre en oeuvre,
- l'usure des outillages, qui augmente avec la température de déformation (N.B. : le prix d'un outillage est élevé et peut atteindre 5 000 F. pour des pièces moyennement complexes).

Les laitons de matriçage (39 à 43 % de zinc) permettent de réaliser en une seule passe des pièces très compliquées, à une cadence rapide (400 pièces à l'heure) et avec une usure faible des outillages.

Les alliages d'aluminium sont difficiles à matricer : à leur température de déformation (350 - 400°) l'effort de déformation est important et les presses doivent être beaucoup plus puissantes que dans le cas des laitons (puissance 1,5 à 2 fois supérieure).

./...

Les zamak ont une aptitude au matriçage comparable à celle des alliages d'aluminium ; on les met en oeuvre par d'autres procédés (moulage sous pression).

En fait, le zamak prend peu d'écrouissage lors du matriçage et le procédé n'apporte pas des caractéristiques beaucoup plus intéressantes que le moulage sous pression.

Les aciers (inoxydables ou non) sont matriçables mais l'usure des outils est beaucoup plus considérable que dans le cas des laitons : si un outil permet de réaliser 300 000 pièces en laiton, il permettra de matricer que 6 000 pièces en acier. De plus, il est impossible de réaliser, par matriçage, des pièces aux formes complexes ; ou alors faut-il multiplier le nombre de passes.

Le cas du titane est voisin de celui de l'acier, encore faut-il prendre des précautions supplémentaires pour éviter, en particulier, le collage.

3-7-2 : Moulage :

La comparaison entre matériaux peut se faire à deux niveaux celui des propriétés de fonderie (coulabilité : aptitude d'un métal à remplir son moule, aptitude à la retassure, etc. ...) et celui des procédés de fonderie.

Les cuivreux ont, en général, d'excellentes propriétés de fonderie et dominent les autres métaux ou alliages. Il faut toutefois noter que le choix d'un métal ne dépend qu'assez peu de ses propriétés de fonderie, l'utilisateur est plus sensible à ses propriétés mécaniques, électriques ou autres : c'est ainsi qu'au lieu d'employer tel alliage d'aluminium à bonnes propriétés de fonderie, on lui préfère un autre alliage d'aluminium plus difficile à mouler mais possèdant de meilleures caractéristiques mécaniques.

Par ailleurs, on distingue trois types de procédés de moulage :

- coulée en sable : on l'utilise avec la fonte, les aciers, les cuivreux, il s'agit d'un procédé onéreux envisageable pour les petites séries.

- coulée en moule métallique ou coquille : ce procédé permet d'obtenir de bonnes tolérances dimensionnelles. Compte-tenu du prix du moule, on ne l'emploie que pour de grandes séries et lorsque la température de coulée est basse : on l'utilise donc un peu avec les cuivreux et surtout avec les alliages d'aluminium. Le procédé est moins onéreux pour les grandes séries que le moulage en sable,

./...

- coulée sous pression : il s'agit d'une coulée en moule métallique sous une pression de l'ordre de 200 - 300 kg/cm2. On ne peut donc l'employer que pour des pièces de petites dimensions (poids inférieur à 15 kilos) et pour des séries de plus de 10 000 pièces La tolérance dimensionnelle peut atteindre 0,1 mm. Les cadences sont beaucoup plus importantes que dans le cas de la coulée en coquille. Le procédé de coulée sous pression est très employé avec le zamak, l'aluminium (50 % des produits moulés en aluminium sont moulés sous pression).

On peut aussi l'employer avec les cuivreux.

Le zamak, moins agressif que les cuivreux et l'aluminium vis-à-vis des organes mécaniques des machines à mouler est justiciable du procédé "à chambre chaude" qui permet des cadences très rapides.

Au niveau des procédés de fonderie, l'avantage des cuivreux n'est plus évident, le zamak et les alliages d'aluminium pourront être, suivant les dimensions des pièces à réaliser et suivant l'importance des séries, beaucoup plus compétitifs.

3-7-3 : Usinage et décolletage :

Il est difficile de comparer les propriétés d'usinage de divers matériaux ; il faut examiner de nombreuses opérations : tournage, taraudage, perçage, etc. ... Bornons-nous à examiner le cas du tournage.

Une première approche consiste à comparer les vitesses de coupe et les avances applicables aux divers matériaux. Voici quelques ordres de grandeur :

Matériaux	Vitesse de coupe (m/mm)	Avance (mm/tour)	Profondeur de passe (mm)
Alliages d'aluminium	200-1000		
Duralumin de décolletage (4%Cu - 0,5 à 2% Pb)	180- 200	0,05-0,15	
Laiton	150- 200	0,05-0,2	10-30
Acier au S, Pb et tellure	130- 140		
Acier au plomb	80- 90		
Acier de décolletage au soufre	60- 80	0,05-0,2	
Bronze	70		
Titane recuit	50- 55	0,2 -0,4	0,6-3,8
Inox de décolletage (17%Cr)	44	0,1	
Inox de décolletage (13%Cr)	36	0,11	
Inox de décolletage (18%Cr-8%Ni)	34	0,10	
Acier au carbone	30	0,1 -0,3	
Titane allié (6%Al-4%Vanadium)	16 - 20	0,2 -0,4	0,6 - 3,8

./...

En fait, les valeurs des vitesses dépendent beaucoup de la nature de l'outil : les outils carbure, plus chers et plus fragiles au choc que les outils en acier rapide, permettent des vitesses plus importantes et présentent une usure moindre.

Rmq : L'emploi d'outils carbure au lieu d'outils en acier rapide permet de faire passer la vitesse de coupe, avec le titane recuit, de 55 à 110 m/mm.

L'usure des outils est un paramètre important de comparaison (le démontage et l'affûtage des outils augmentant le temps et donc le coût des opérations) ; elle est faible avec les laitons : 80 % de l'usure constatée avec les aciers de décolletage et 25 % de celle constatée avec les aciers inoxydables de décolletage.

Une deuxième approche consiste à affecter les matériaux d'indice d'usinabilité, qui traduisent l'aptitude plus ou moins grande au décolletage : il s'agit d'un classement relatif.

(Duralumin) - Laiton de décolletage	100
Acier de décolletage	50
Inoxydable (17 % de chrome) de décolletage	38
Inoxydable (18 % de chrome de décolletage 8% de nickel)	25

Pourles cuivreux, en prenant pour base 100 le laiton de décolletage (UZ 39 Pb 2), on a le classement suivant :

Cuivre	20
Laiton au plomb (> 36 % Zn)	20 - 30
Bronze sans plomb :	20
Bronze avec plomb :	80
Cupronickel	20
Maillechort sans plomb	30
Maillechort avec plomb	75 - 80

Pour les aciers, en prenant pour base 100, l'acier de décolletage au soufre, on a :

Inoxydable	40 - 60
Aciers de construction ou alliés	45 - 65

./...

En prenant pour base 100, le duralumin de décolletage (AU 4 Pb), on a :

Aluminium	70
Alliages d'aluminium au magnésium	50 - 70
Duralumin	75 - 90
Alliages d'aluminium au silicium .	50 - 70

En fait, ces indices traduisent les difficultés rencontrées lors du décolletage : l'aluminium et ses alliages exigent des grandes vitesses de coupe, il faudra donc l'usiner sur des machines puissantes, en effet l'effort de coupe, bien qu'inférieur à celui nécessaire pour l'acier doit être fourni à grande vitesse ; les inoxydables austénitiques, par suite de l'apparition de l'écrouissage au fur et à mesure de l'usinage, nécessitent beaucoup d'expérience et des machines robustes. Avec le titane, il faut refroidir soigneusement la pièce et éviter le collage du métal sur l'outil. Ces considérations montrent qu'en cas de substitution d'un métal par un autre, il faudra prévoir un changement de machines (en réservant les machines puissantes et rapides à l'aluminium et les machines robustes à l'acier) et des coûts de formation du personnel à des taches nouvelles (usinage du titane).

Le laiton se prête donc remarquablement bien aux opérations de décolletage, concurrencé en cela par le duralumin de décolletage Dans le cas où le laiton n'est pas à choisir de façon impérative pour sa conductibilité électrique ou thermique, ses bonnes qualités de frottements ou sa résistance à la corrosion, il faudra faire un bilan économique prenant en compte :

- le coût de décolletage,
- le prix d'achat du métal,
- le prix de revente des tournures.

Ce dernier point est loin d'être négligeable si l'on pense que dans une pièce décolletée, la part de métal enlevé peut être très importante par rapport au métal de départ. Cette circonstance est particulièrement favorable au laiton dont les tournures se revendent à un prix très voisin de celui du métal neuf ; ceci n'est pas le cas des aciers inoxydables ou ordinaires et du duralumin de décolletage.

Cette observation concernant le duralumin de décolletage n'est valable qu'en France, où par tradition, on continue d'adopter un alliage difficilement recyclable. En Allemagne, par exemple, la situation est différente.

Pour des pièces complexes, où le coût du métal utilisé est négligeable devant le coût d'usinage, le laiton sera avantageux. Un certain nombre d'exemples fournis par les décolleteurs montre l'avantage apporté par le laiton dans des petites pièces aux formes complexes (voir figures 5 et 6). Il s'agit de pièces réalisées au tour automatique en 10 000 exemplaires par série de 100.

./...

PIECE n° 1	solution : laiton		solution : inoxydable 17 % Cr	
Valeur matière à usiner	12 Kg x 5,20 F =	62,40 F	12 Kg x 8,00 F =	96,00 F
Revente déchets	8 Kg x 3,45 F =	27,60 F	8 Kg x 0,5 F =	4,00 F
Valeur matière exploitable		34,80 F		92,00 F
Décollage		12,00 F		80,00 F
Alésage		5,00 F		15,00 F
Rectification				35,00 F
Valeur pour /100 pièces/		/51,80 F/		222,00 F

PIECE n° 2	solution : laiton		solution inoxydable (17% Cr)	
Valeur matière à usiner	0,800 Kg x 5,50 F =	4,40 F	0,800 Kg x 9,00 F =	7,20 F
Revente déchets	0,500 Kg x 3,45 F =	1,72 F	0,500 Kg x 0,500F =	0,25 F
Valeur matière exploitable		2,68 F		6,95 F
Décolletage		6,00 F		30,00 F
Alesage		3,00 F		6,00 F
Valeur pour /100 pièces/		/11,68 F/		42,95 F

PIECE n° 3	solution : laiton		solution duralumin de décolletage	
Valeur matière à usiner	1,200 Kg x 5,30 F =	6,36	0,400 Kg x 9,00 F =	3,60
Revente déchets	0,800 Kg x 3,50 F =	2,80	0,270 Kg x 1,00 F =	0,27
Valeur matière exploitable		3,56		3,30
Décolletage		5,00		6,00
Valeur pour /100 pièces/		/8,56/		9,30

PIECE n° 4	solution : laiton		Solution duralumin de décolletage	
Valeur matière à usiner	1,300 Kg x 5,30 F =	6,89 F	0,450 Kg x 9,00 F =	4,05 F
Revente déchets	0,900 Kg x 3,50 F =	3,15 F	0,310 Kg x 1,00 F =	0,30 F
Valeur matière exploitable		3,74 F		3,75 F
Décolletage		5,00 F		6,00 F
Valeur pour /100 pièces/		/8,74 F/		/9,75 F/

./...

PIECE n° 5	Solution laiton		Solution Acier ou soufre	
Valeur matière à usiner	4,400 Kg x 6,60 F =	29,04 F	4,00 Kg x 1,85 F =	7,40 F
Revente déchets	3,00 Kg x 4,15 F =	12,45 F	2,700Kg x 0,08 F =	0,21 F
Valeur matière exploitable		16,59 F		7,19 F
Décolletage	150 pièces/heure	7,00 F	60 pièces/heure	18,00 F
Ebavurage		1,00 F		2,00 F
Valeur pour /100 pièces/		/24,59 F/		27,19 F

PIECE n° 6	Solution laiton		Solution inoxydable 17 % Chrome	
Valeur matière à usiner	19 Kg x 5,20 =	98,80 F	19 Kg x 8,00 F =	152,00 F
Revente déchets	13 Kg x 3,45 =	44,85	13 Kg x 0,50 F =	6,50 F
Valeur matière exploitable		53,95 F		146,50 F
Décolletage		20,00 F		250,00 F
Ebavurage		5,00 F		50,00 F
Outillage		3,00 F		3,00 F
Valeur pour /100 pièces/		/ 81,95 F/		448,50 F

Ces résultats dépendent évidemment des cours relatifs des divers matériaux.

Dans le cas de la pièce n° 7, je n'ai pu trouver que les temps d'usinage comparés (source : centre technique de l'aluminium)

OPERATIONS	temps d'opération en secondes		
	acier doux de décolletage	laiton de décolletage	duralumin de décolletage
Moletage	1,4	0,7	0,6
Centrage	1,2	0,6	0,6
Perçage	21	7,9	8,0
Taraudage	2,4	1,2	1,0
Tronçonnage	5,1	2,3	2,3
Temps improductif	5	5	5
Total	36,1	17,7	17,5

Tous les calculs effectués dans les pages précédentes supposaient des pièces identiques, mais l'emploi de l'acier inoxydable qui possède des caractéristiques mécaniques meilleures que le laiton, ne permettrait-il pas d'obtenir des pièces moins volumineuse et donc moins chères?

En fait, les statistiques françaises de la profession traduisent la prépondérance des aciers (de décolletage notamment), témoins en sont les chiffres suivants : Acier : 100 000 T - Laitons : 26 400 T - alliages légers : 1 800 T (chiffres 1971). ./...

N.B. Les exemples ci-dessus montrent la suprématie du laiton ; si l'on avait pris le cas simple d'un axe, les solutions duralumin et acier au soufre auraient été moins onéreuses que la solution laiton : le coût d'usinage est négligeable devant le coût de la matière et, de plus, il y a très peu de déchets si l'on part d'une barre de décolletage de diamètre à peine supérieur au diamètre de l'axe à réaliser.

Rmq : le titane, l'aluminium et leurs alliages sont susceptibles d'être usinés par voie chimique.

N.B. La plupart des polymères (téflons par exemple) ont de bonnes qualités d'usinage.

3-7-4 : Concurrence entre procédés de mise en oeuvre :

La concurrence entre matériaux se conjugue avec une lutte entre procédés de mise en oeuvre. Ainsi la fonderie française de cuivreux est passée en France de 50 000 tonnes en 1956 à 38 000 tonnes en 1971, par suite notamment de la concurrence du matriçage. Pour réaliser une pièce complexe, on a en effet le choix entre le laiton matricé, le laiton moulé, l'acier matricé puis usiné (pour réaliser les formes complexes). De même, certaines pièces traditionnellement réalisées en laiton décolleté (valves de bicyclette) peuvent être réalisées en zamak coulé sous pression.

La valeur relative du coût de la matière et du coût de mise en oeuvre sera la clef du choix des matériaux et procédés de mise en oeuvre.

N.B. Les polymères sont généralement mis en oeuvre par moulage ou extrusion (cas des produits longs). Avec certains types de polymères, on peut même obtenir avec certains procédés de moulage une tolérance de 5/100 mm, sans usinage.

3-7-5 : Transformation à froid :

3-7-5-1 : Emboutissage - Repoussage : les cuivreux (laitons et cuivre notamment) se prêtent particulièrement bien à l'emboutissage ou au repoussage ; on peut faire une observation identique en ce qui concerne les alliages d'aluminium, si ce n'est que, compte-tenu de leur faible dureté superficielle, il faut prendre des précautions particulières lors du polissage des outils d'emboutissage.

Les inoxydables austénitiques se prêtent bien à l'emboutissage ou au repoussage, mais les quantités de déformation que peut subir un acier inoxydable sont plus faibles que pour les deux métaux précédents. Les inoxydables martensiques à bas carbone peuvent être emboutis dans les mêmes conditions. Le titane peut aussi être embouti, mais il faudra veiller à assurer une parfaite lubrification, sous peine de grippage.

./...

3-7-4-2 : Tréfilage : La propriété considérée dans ce paragraphe est la ductilité.

Le cuivre est facile à tréfiler à des vitesses dépassant 20 m/s ; on peut obtenir des fils très fins (0,03 mm). L'aluminium se tréfile à des vitesses comparables et sur des machines identiques à celles du cuivre ; toutefois les caractéristiques mécaniques et électriques du fil d'aluminium et de ses alliages s'obtiennent par traitements thermiques complexes effectués sur fils écrouis ; dans le cas du cuivre, l'écrouissage est le seul paramètre régissant les caractéristiques. Compte-tenu des limites de rupture assez faibles des alliages d'aluminium, on aura plus de difficulté à réaliser des fils très fins : on sait réaliser, de façon économique (sans trop de casses), des fils de 0,2 mm et même de 0,06 à 0,08 mm en aluminium (99,5 %); avec l'almelec ou l'aluflex (0,6 % Mg), on n'est guère descendu au dessous de 0,25 mm. Par suite du collage de l'aluminium sur les filières, on peut dire que l'usure des filières est plus importante avec l'aluminium qu'avec le cuivre.

Rmq. on met actuellement au point des alliages aluminium-fer nickel qui devraient permettre de réaliser des fils très fins.

Les aciers inoxydables doivent se tréfiler à des vitesses plus faibles (6-12 m/s) ; compte-tenu de l'écrouissage, il faut effectuer un certain nombre de recuits intermédiaires onéreux ; de plus l'usure des filières est importante. Les alliages de titane ont une aptitude au tréfilage voisine de celle des inox, toutefois compte-tenu de leur faible chaleur spécifique volumique et de l'écrouissage, les échauffements seront plus importants, ce qui conduit à limiter les vitesses de tréfilage ($\leqslant$ 5m/s) et le nombre de passes ; de plus, le titane a tendance à coller aux filières, provoquant ainsi leur usure prématurée.

3-7-4-3 : Laminage à froid :

On peut classer par malléabilité croissante : le titane, les inox, le cuivre et l'aluminium.

3-7-6 : Les alliages superplastiques et leur avenir :

Ces matériaux permettent de réaliser des pièces complexes en un nombre très réduit de passes. Les allongements que peuvent subir ces matériaux à une certaine température sont très importants toutefois les vitesses de déformation (des matériaux connus à ce jour) sont très faibles, de l'ordre de quelques millimètres à la minute. On peut citer à titre d'exemples :

./...

Alliages	Allongement %	Température de superplasticité
67 % Al - 33 % Cu	500	445 - 530° C
85 % Cu - 15 % Mg	250	700° C
Inox (26% Cr - 6,5% Ni)	500 - 1 000	980° C
Alliage titane (6% Al - 4% Vn)	1 000	900 - 980° C
78 % Zn - 22 % Al	500 - 1 500	250° C

Rappelons que l'allongement des matériaux traditionnels ne dépasse guère 60 à 80 %.

3-8 : Soudabilité :

Donnons tout d'abord quelques définitions : on distingue le soudage dans lequel les métaux sont portés à leur point de fusion et le brasage dans lequel les métaux ne sont pas portés à leur point de fusion : suivant la température de fusion du métal d'apport, on distingue par ordre croissant de température : le brasage tendre, le brasage dur et le soudo-brasage.

Tous les cuivreux peuvent être réunis par brasage tendre à l'étain (le brasage dur à l'argent peut être aussi employé dans la majorité des cas) qui est procédé commode à mettre en oeuvre. Les procédés de soudage (oxyacetylénique - arc - résistance) peuvent aussi être employés avec certains cuivreux.

Ainsi on ne pourra souder les cuivres non désoxydés à l'argon ou au chalumeau (flamme trop réductrice). De même, afin d'éviter la volatilisation du zinc, on ne soudera pas les laitons à forte teneur en zinc.

Les inox martensitiques ou ferritiques se soudent au chalumeau, à l'arc par résistance, mais il faut effectuer un préchauffage, puis un revenu pour éviter la fragilisation de la soudure (notons que les alliages de décolletage se soudent très mal). Les inox austénitiques à bas carbone se soudent très bien : la soudure ayant, sans traitement, des propriétés analogues au métal de base ; les nuances chargées en carbone doivent subir un traitement thermique. En ce qui concerne les alliages d'aluminium, la formation d'alumine nécessite des précautions particulières : soudage sous argon à l'arc, ou flux de décapage (chalumeau à flamme réductrice ; soudo-brasage à l'A-S 10) ou une préparation soignée (soudage par résistance).

La situation est identique avec le titane que l'on soude à l'arc sous argon ou que l'on brase sous vide à l'argent après décapage consciencieux. Notons que le soudage par résistance ne nécessite pas de protection : compte-tenu de la faible conductibilité du titane, l'énergie de chauffage est concentrée et le temps de chauffage très bref (la contamination n'a pas le temps de se produire).

Le titane et les alliages d'aluminium peuvent se souder par bombardement électronique. De plus, les techniques de collage sont employées avec succès pour les polymères, l'aluminium et même le cuivre (emploi de résines epoxy).

3-9 - Propriétés diverses :

3-9-1 : Propriétés nucléaires : L'aluminium a une perméabilité très faible aux neutrons, ce qui n'est pas le cas du cuivre. De plus, sa radioactivité après un séjour en pile n'est pas très élevée. On évitera donc d'employer des cuivreux dans les constructions nucléaires, on préfèrera l'aluminium et les aciers inoxydables.

3-9-2 : Aptitude aux traitements de surface :

Les matériaux sont souvent recouverts de nickel ou de chrome dans un but de protection contre la corrosion ou d'esthétique ; les cuivreux se prêtent particulièrement bien à cette opération. Les autres matériaux : inox, aluminium, zamak doivent souvent recevoir une sous couche d'accrochage de cuivre avant nickelage, chromage ou étamage. Notons que certains polymères peuvent être chromés directement (ABS par exemple).

3-9-3 : Propriétés de frottement :

Les cuivreux, et plus particulièrement les cuproplombs ont d'excellentes propriétés de frottement, d'où leur utilisation dans les coussinets ; à l'opposé, on trouve l'aluminium, le zamak et le titane qui ont de facheuses aptitudes au grippage. Notons toutefois qu'un alliage d'aluminium à 6 % d'étain a de bonnes aptitudes au frottement, on l'utilise dans les paliers de vilbrequin des 2 CV, Ami 6, etc. ... ; il existe aussi des traitements de surface de l'aluminium qui améliorent notablement ses caractéristiques de frottement. Certains polymères (téflon) ont de bonnes qualités de frottement : on les emploie pour des coussinets assez peu chargés.

3-10 : Conclusion :

En ce qui concerne les propriétés physiques ou technologiques, nous venons de constater que les cuivreux appartenaient au peloton de tête dans la majorité des cas, et qu'ils occupaient souvent la première place. Il est tout à fait exceptionnel qu'un matériau présente une telle gamme de propriétés intéressantes. Nous avons vu apparaître à propos de la mise en oeuvre des matériaux un paramètre fondamental qui est le prix des matières premières : sous la contrainte économique, on peut être conduit à choisir des matériaux concurrents des cuivreux, car, malheureusement, toute propriété physique se paie. De plus, le domaine des matériaux n'estpas immuable ; de nouvelles espèces (superplastiques, polymères) peuvent apparaître et bouleverser ainsi la hiérarchie établie.

/4 - LES RESSOURCES DISPONIBLES EN MATERIAUX DE SUBSTITUTION /

L'Aluminium , le titane, les aciers, le zamak, les polymères peuvent être des concurrents sérieux des cuivreux. Constituent-ils pour autant des positions de rempli convenables : dans le cas où les réserves mondiales de cuivre s'amenuiseraient de façonsdangereuses, ou, - ce qui revient au même - , dans le cas où les prix de cuivre augmenteraient de façon considérable, les matériaux de substitution pourront-ils faire face à la demande et ainsi constituer les piliers de la croissance économique et de la satisfaction des besoins de l'homme ?

./...

La considération des indices de Clarke (qui donne la teneur moyenne de l'écorce terrestre pour l'élément considéré) ou de simples études bibliographiques suffisent à nous rassurer quant aux réserves mondiales d'aluminium, de fer, de titane, de chrome et de nickel. L'aluminium constitue environ 8 % de la croûte terrestre, c'est le constituant principal des argiles très répandues à la surface du globe. Le fer est l'un des principaux constituants de la croûte terrestre et on peut admettre qu'il y a du fer pour des siècles. On peut faire une remarque semblable en ce qui concerne le titane qui est le 9ème élement le plus abondant de l'écorce terrestre et le 4ème métal structural. Les réserves connues de chrome, dont l'indice de Clarke est de 200 ppm, s'élèvent à 776 millions de tonnes, - d'après les auteurs du rapport Meadows bien connus pour leur pessimisme -, ce qui permettrait d'assurer 420 ans de consommation au niveau actuel. Dans les mêmes conditions, les réserves connues de nickel s'élèveraient à 66 millions de tonnes, ce qui représente 150 années de consommation au rythme actuel. En fait, les réserves connues ne donnent qu'une pâle idée des réserves globales, car, pour des raisons financières évidentes, les sociétés minières ou même les organismes étatiques ne se préoccupent pas d'assurer la couverture des besoins en matières premières à plus de 20 ans.

Pour ce qui est des polymères, issus principalement du pétrole, du gaz naturel ou de la houille (on admet que dès 1985, les dérivés du pétrole constueront 95 % des produits chimiques organiques), on peut se rassurer en constatant qu'ils représentent qu'une faible part des hydrocarbures consommés actuellement dans le monde. Certaines études futuristes indiquent que malgré la croissance importante du secteur des matières plastiques, les besoins en hydrocarbures pour leur fabrication ne représenteront que 15 % de la demande totale en hydrocarbures, en l'an 2 000.

Reste le problème du zinc, dont les réserves prouvées sont assez faibles et ne représentent que 15 à 30 ans de consommation au rythme actuel : en fait, le zinc peut, tout comme le plomb, être la victime de phénomènes de substitution, dans le batiment notamment (rappelons que 1/3 environ du zinc consommé est utilisé dans les toitures ou les canalisations d'évacuation des eaux de pluie), et dégager ainsi des réserves utilisables pour d'autres usages.

En fait ces perspectives rassurantes que nous venons d'évoquer ne doivent en aucune façon nous faire oublier que, pour un matériau donné, toutes les parties du "trésor" n'ont pas la même valeur. Ainsi un minerai à 30 %, n'aura pas la même valeur qu'un minerai à 0,2 %. Les considérations fondées sur les indices de Clarke aggrègent les minerais à 0,2 % et les minerais à 30 % : si les perspectives concernant les quantités totales de matériau à extraire, sont encourageantes, cela ne préjuge en rien du coût des matériaux ; on peut dire que, malgré les progrès techniques, il faudra s'attendre à un renchérissement des cours des matières premières consécutif à l'abaissement constant des teneurs d'exploitation. Est-il utile de rappeler que les réserves connues ne prennent en compte que les tonnages exploitables à un coût voisin du coût actuel et qu'elles en donnent qu'un pâle reflet des réserves globales ?

N.B. : Le recyclage des cuivreux :

Plus un métal est ancien et plus sa consommation cumulée depuis la nuit des temps est élevée, plus la quantité potentielle de métal à recycler est importante. Certains utilisateurs (les fondeurs notamment) ne sont pas très exigeants quant à la pureté des matières qu'ils utilisent et peuvent donc pratiquement travailler uniquement à partir de déchets. Par ordre d'exigence croissante quant à la pureté des laitons, on peut citer :

- les fondeurs, robinettiers qui peuvent admettre des pourcentages d'impureté nonnégligeables : toutefois la proportion d'étain ne doit pas dépasser 0,80% celle du fer 0,6 % ; le total des impuretés doit être inférieur à 1,5 % : Remarquons que le nickel n'est pas considéré comme une impureté s'il est présent à moins de 1 %.

- les décolleteurs qui admettent les laitons ayant une teneur en fer inférieure à 0,35 %, le total des autres impuretés devant être inférieur à 0,7 %.

- les matriceurs qui admettent une teneur en fer inférieure à 0,35 %, le total des autres impuretés étant inférieur à 0,5 %.

- les industriels du travail à froid (frappe à froid) qui acceptent des laitons ayant une teneur en fer inférieure à 0,20 %, le total des autres impuretés étant inférieur à 0,3 %.

- enfin les lamineurs à froid qui ne peuvent recycler que des déchets (bien triés) de laminage et qui font l'appoint avec des matières neuves (cuivre et zinc pur).

Les cuivreux de récupération constituent donc des matières très intéressantes, dont le prix, d'ailleurs, est parallèle à celui du cuivre neuf.

/5 - EVOLUTION COMPAREE DES COURS DES MATIERES PREMIERES /

Nous venons d'affirmer que les prix des matières premières risquaient de présenter un trend ascendant à long terme et nous avons remarqué que l'évolution comparée du cours des matières premières conditionnera les substitutions ; transformons-nous quelques instants en futurologue et étudions l'évolution prévisible des cours.

Une première approche consiste à étudier l'évolution passée : nous constatons sur la figure 7 qui représente l'évolution des cours du cuivre (LME comptant et prix producteur USA), de l'aluminium et du zamak 3, la stabilité relative des cours de l'aluminium et le trend croissant des cours du cuivre. Ces faits sont confirmés si l'on raisonne sur les courbes 1 et 2 donnant respectivement les moyennes exponentielles des cours du cuivre (LME) et des cours de l'aluminium. Pour la courbe 1, à l'intérieur d'une zone de dispersion de ± 10 %, on ne trouve que 30 % des prix mensuels du cuivre et à l'intérieur d'une zone de dispersion de ± 30 %, on n'en trouve que 77 % ; la prévision par extrapolation de tendance des prix du cuivre est donc entachée d'une lourde incertitude. La courbe 2 montre une très faible montée des prix de l'aluminium et des écarts faibles entre cette courbe et les prix réels : à l'intérieur d'une zone de dispersion de ± 10 %, on trouve déjà 96 % des prix mensuels de l'aluminium. L'écart entre le cuivre et l'aluminium semble donc se creuser. Ce fait est exprimé par les figures 8 et 9 qui indiquent de façon très simplifiée l'écart croissant entre les valeurs réelles du cuivre et d'autres métaux : Al, Zn, Ni, Pb.

Cette différence entre les cours du cuivre et les cours des autres métaux est-elle structurelle ou conjoncturelle ? Nous allons nous efforcer de donner des éléments de réponse à cette question.

./...

5-1 : Evolution des prix de revient:

Pour ce faire, étudions tout d'abord la structure des prix de revient des divers matériaux :

5-1-1 : Le cas du cuivre :

Suivant les exploitations, le prix de revient varie entre 1,5 et 5 F/Kg. En moyenne, il est voisin de 3 F/Kg : dans les pays du CIPEC (Pérou, Chili, Zambie, Zaïre) il est compris entre 2,7 et 3,3 F/Kg. On peut citer les chiffres suivants (francs/kilo) :

U.S.A. Mine souterraine (Minerais sulfurés)		U.S.A. Mine à ciel ouvert (Minerais oxydés)	
- extraction	0,88	- Lixiviation	0,45
- concentration	0,77	- cémentation	0,66
- fonderie	0,66	- conversion	0,22
- raffinage	0,33	- raffinage	0,33
- transport	0,22	- transport	0,22
Total partiel	2,86	Total partiel	1,75
Divers	1,3	Divers	1,35
Total	/4,16/	Total	/3,10/

NB. : Les "divers" comprennent frais administratifs, commerciaux, de recherches, taxes et amortissements.

Selon d'autres sources, l'extraction-concentration représenterait 3 F, la fonderie 0,3 F et le raffinage 0,3 F (mais les amortissements et frais financiers sont inclus dans chaque rubrique). Quoiqu'il en soit, nous remarquons la place prépondérante des coûts d'extraction et de concentration dans le prix de revient. La mécanisation croissante, si elle permet de diminuer le coût de la tonne de minerai abattue, ne compense pas la diminution croissante des teneurs : le prix à la tonne de cuivre contenu augmentera. Les progrès techniques envisageables sur le traitement des minerais oxydés (procédé Torco) ne modifieront guère la situation car les minerais oxydés ne représentent pas un tonnage très important. De source autorisée, l'extraction des nodules marins, si elle risque de modifier les perspectives concernant le nickel et le manganèse, ne changera pas non plus la situation du cuivre : la teneur en cuivre des nodules est assez faible et les projets actuels d'envergure prévoient la mise sur le marché de 200 000 T de cuivre seulement.

De plus, les règlements antipollutions risquent de renchérir le coût de fonderie de 0,2 à 0,5 F/Kg.

Du fait de sa rareté relative, le cuivre aura donc des prix de revient orientés à la hausse.

N.B. : le coût de la transformation est voisin de 1,5 - 2 F au kilo.

./...

5-1-2 : Le cas de l'aluminium

Le prix de revient de l'aluminium se décompose de la façon suivante :

Extraction	10 %	
Fabrication de l'alumine ..	20 %	
Réduction	60 %	(dont 1/3 d'énergie électrique)
Transport - Taxes	10 %	

Nous remarquons donc l'importance du coût de l'énergie qui représente 20 % du prix de revient : il faut de 15 à 17 kwh par kilo d'aluminium pour la réduction proprement dite. Le prix de l'énergie électrique croît faiblement avec le temps.

Nous noterons aussi la part assez faible occupée par le coût d'extraction (10 %) dans le cas où l'on exploite des bauxites à 50 - 55 % d'alumine ; en fait, aux U.S.A., on exploite des minerais à 35 % d'alumine sans augmentation notable du coût de production de l'alumine : la mécanisation et le progrès technique venant compenser un tel abaissement, d'ailleurs modeste, des teneurs d'exploitation. N'oublions pas qu'une bonne partie des réserves potentielles globales d'aluminium se trouvent sous forme d'argiles qui contiennent 30 % d'Al_2O_3.

Le prix de revient de l'aluminium devrait donc croître mais de façon modérée, d'autant que le progrès technique devrait faire diminuer le coût d'électrolyse.

5-1-3 : Le cas des aciers inoxydables :

Citons à titre d'exemple les prix de revient de l'acier inoxydable AISI 316 (11,5 % Nickel - 16,5 % de chrome - 2,2 % Molybdène) (en francs par kilo).

Matières premières enfournées		2,91
Valeur ajoutée (y compris frais généraux usine)		0,44
dont . électricité (0,5 kwh/Kg pour la fusion seule)	0,04	
. oxygène	0,01	
. rebut	0,03	
. frais de four (main d'oeuvre, entretien, réfractaires, amortissements)	0,35	
* TOTAL ACIERIE		/3,35/
* TRANSFORMATION en fil machine (blooming, train à fil, recuit, etc. ..) ..		/1,65/

Dans le cas de l'inox AISI 304 (9 % nickel - 18 % chrome), on aurait :

Matières premières enfournées	2,48
Valeur ajoutée	0,44
* TOTAL ACIERIE	/2,92/
* TRANSFORMATION	/1,65/

Rmq 1 : pour des nuances particulièrement difficiles à transformer, le coût de transformation peut atteindre 0,40 F/Kg de plus.

Rmq 2 : les chiffres ci-dessus comprennent la mise au mille qui est assez forte pour les inox, à cause de la difficulté d'élaboration : la perte à l'aciérie peut atteindre 5 à 7 % (fumée, laitier, etc. ...).

Rmq 3 : le prix du nickel étant voisin de 15 F/Kg, le prix du ferro-chrome suraffiné de 3,5 F/Kg, et le prix du molybdène de 20 F/Kg, on constate qu'à la mise au mille près, le prix des matières premières enfournées représente la somme des valeurs des éléments nobles (Ni-Cr-Mo) contenu.

Le prix des aciers inoxydables en lingots dépend donc essentiellement (la valeur ajoutée est faible) des cours du nickel, du chrome et du molybdène. Compte-tenu de la diminution, assez lente il est vrai, des teneurs d'exploitations du nickel, de l'importance des investissements qui viennent d'être réalisés, on peut s'attendre, à moyen terme, en dehors des fluctuations d'origines spéculatives ou conjoncturelles, à une hausse sensible des cours du nickel. Des remarques semblables peuvent être faites en ce qui concerne le molybdène. L'influence du chrome risque de jouer en sens inverse : de nouveaux procédés d'élaboration de l'acier permettront de remplacer le ferro-chrome suraffiné par du ferro-chrome carburé beaucoup moins onéreux (2,5 F/Kg au lieu de 3 F/Kg.).

A l'élaboration, il faut donc s'attendre à une hausse modérée des prix de revient des inoxydables austénitiques et à une baisse légère des inoxydables au chrome.

5-1-4 : Le cas du titane :

Nous avons vu que le minerai de titane était abondant. Le procédé Kroll de fabrication de l'éponge de titane (cf. § 3-1-2) est onéreux (10 F/Kg) et peut être suceptible de perfectionnements technologiques. L'élaboration d'un lingot transformable qui nécessite des refusions multiples peut bénéficier aussi d'améliorations : actuellement la valeur ajoutée lors de cette opération est voisine de 7 F/Kg. Une augmentation de la demande de titane entraînerait une diminution des coûts par effet d'échelle, notamment au stade de la transformation. Les progrès technologique et l'accroissement de la demande devraient donc se traduire par une lente baisse des prix de revient, qui induira elle-même un accroissement de la demande.

5-2 : Relations prix de vente - prix de revient :

Nous venons de prévoir une évolution défavorable des prix de revient du cuivre ; les aciers inoxydables austénitiques risquent de subir une hausse sensible de leur prix de revient ; par contre, l'évolution risque d'être plus favorable en ce qui concerne l'aluminium, les aciers inoxydables au chrome et le titane, ces deux derniers risquent même d'enregistrer une légère baisse des prix de revient.

./...

Il faut bien être conscient du fait que l'évolution des prix de revient n'apporte qu'un élément de réponse à notre interrogation sur l'évolution des prix de vente : tout ce que l'on peut dire c'est que sur une longue période, le prix de vente est supérieur au prix de revient.

Les ennuis viennent de ce que le rapport entre prix de revient et prix de vente dépend du matériau considéré et de la variable "temps" : dans le cas du cuivre, on a pu constater que le prix de vente moyen est égal à 1,7 fois le prix de revient moyen des producteurs (la différence entre prix de vente et prix de revient consistant en taxes et rente minière) ; dans le cas de l'aluminium, actuellement du moins, le prix de vente n'est que légèrement supérieur au prix de revient.

En fait, les prix d'un matériau, répondent assez bien aux lois de l'offre et de la demande, l'offre ex ante pouvant s'apparenter à la notion de capacité de production. Dans le cas de l'aluminium, où pour l'instant, la capacité de production est supérieure à la demande, les producteurs ne travaillent pas à pleine capacité et le prix de vente s'établit à un niveau compatible avec une "saine gestion financière" des entreprises, comprenez avec une marge faible ! Dans le cas du cuivre, certains observateurs attentifs ont pu rapprocher à quelques mois d'intervalle les flambées du cours et une reprise de la conjoncture mondiale, la réciproque étant vraie naturellement.

N.B. : les prix de vente ne sont pas des indicateurs de la rareté à plus ou moins long terme d'une substance : les matériaux en perte de vitesse ne sont pas côtés à un niveau très élevé, même si les "réserves connues" s'amenuisent dangereusement, je pense notamment au cas du plomb ou du zinc.

5-3 : Le cas des matériaux nouveaux (polymères) :

Un produit nouveau pour s'imposer doit avoir un prix particulièrement bas ; on constate d'ailleurs une évolution spécifique à la plupart des matières plastiques : l'observation des vingt dernières années montre un processus de baisse des prix des matières plastiques qui se déroule en trois phases (voir figure 10) :

- brusque affaissement des prix dans une période allant de 5 à 7 ans et qui correspond au passage de la production à l'échelle pilote (point A) à l'entrée normale du produit dans les applications commerciales (le polypropylène est ainsi passé de 6 à 2 F/Kg).

- chute lente des prix qui peut durer 10 à 15 ans.

- baisse très lente, voire stabilité relative ou oscillations (dues à la conjoncture), le matériau vient de terminer (en C) "sa crise de croissance

En fait, des matériaux déjà anciens (polystyrènes, polyvynile) peuvent encore baisser par suite de l'effet d'échelle (augmentation des capacités de production) et du progrès technologique.

./...

5-4 : Conclusion :

On peut raisonnablement penser que l'écart entre le cuivre et ses concurrents s'amplifera si on néglige des a-coups conjoncturels. L'avantage dépendra d'ailleurs beaucoup de la substance considérée et ne restera important que si les déplacements de marché consécutifs à la substitution sont faibles devant les marchés préexistants des matériaux de remplacement.

/ 2ème PARTIE /

Les usages du cuivre

Leur évolution historique et perspectives des substitutions

N.B. : A la suite de chacun des paragraphes et sous paragraphes figure parfois une indication donnant le tonnage de cuivre consommé en France en 1965 ou 1970 : il s'agit du cuivre contenu dans les alliages et des demi-produits en cuivre.

/ GENERALITES /

Dans cette partie, nous serons amenés à passer en revue les différents emplois des cuivreux. Il nous faudra tout d'abord prévoir l'évolution probable des différents usage du cuivre, imaginer de nouvelles utilisations en conjonction avec l'apparition de technologies nouvelles (supraconductivité, énergie nucléaire, turbo-train et moteur linéaire). Ensuite, il conviendra de déterminer la conjonction de propriétés spécifiques qui ont justifié l'emploi de cuivreux pour l'usage concerné, puis il faudra s'efforcer de déterminer la substance qui présente la ou les propriétés les plus proches de celle du cuivre pour l'application considérée et d'indiquer à partir de quels niveaux de prix relatifs, il "reviendra moins cher" d'employer un substitut de cuivre.

Un matériau est en effet le support matériel d'un ensemble de propriétés à un prix de revient donné : dans chaque utilisation, on choisit un matériau non pour une seule, mais pour plusieurs propriétés conjuguées : ainsi les radiateurs d'automobile sont-ils en cuivreux parce que ces métaux résistent bien à la corrosion et parce qu'ils sont d'excellents conducteurs de la chaleur.

En fait, il y a souvent compétition entre matériaux ; on peut concevoir plusieurs système de matériaux répondant aux mêmes exigences globales, tandis que la liste des propriétés de chaque matériau varie en longueur en et répartition : les solutions obtenues peuvent différer notablement et ce sont des impératifs économiques qui donnent un classement. On peut ainsi avoir le choix entre un matériau résistant à la corrosion et un matériau ne résistant pas à la corrosion, mais recouvert de peinture protectrice.

Entre deux assemblages répondant aux mêms objectifs techniques, le moins cher sera utilisé et l'on assiste alors au phénomène de substitution. Nous aurons donc deux causses principales de substitution :

- le progrès technique qui permet la mise au point de matériaux nouveaux qui remplaceront les matériaux traditionnels en améliorant le service rendu à prix égal, ou en diminuant le coût pour un même service rendu.

- l'évolution économique : du fait de l'évolution respective des cours des matériaux, un matériau jugé jusque là non compétitif, peut le devenir. Le progrès technique peut d'ailleurs combiner son influence à celle des facteurs économiques.

Nous venons donc d'insister sur la notion de prix d'un service rendu, et sur son caractère primordial en ce qui concerne la dynamique des substitutions ; un appareil sera réalisé en tel matériau, si cela "revient moins cher" ; il est tout de même nécessaire de préciser la notion de coût à retenir. Il nous vient tout d'abord à l'esprit la nécessité de prendre en compte des aspects relatifs aux coûts "directs" : prix de la matière, coût de fabrication de l'appareil considéré, frais d'installation et de pose, coût de fonctionnement de l'appareil. Puis, on est conduit à introduire des coûts "généralisés" : coût de formation du personnel à des techniques nouvelles (c'est le cas d'E.D.F. qui a dû former ses monteurs à l'emploi de techniques particulières pour raccorder les cables an aluminium), présence de double stock (lorsque certaines fabrications gardent le matériau traditionnel, alors que d'autres s'accomodent de substitut), nécessité pour le constructeur d'appareillage de modifier ses machines ou de réaliser des investissements nouveaux.

En outre, il est nécessaire de faire intervenir la durée de vie de la pièce ou de l'objet réalisé en matériau de substitution. D'où la notion ultime de "coût de la pièce usée".

Pour chacune des utilisations des cuivreux, nous nous efforcerons de faire une étude comparative du "coût de la pièce usée" réalisée en cuivreux et en matériaux de substitution. Nous serons alors à même de définir pour chaque usage, un palier de prix à partir duquel la substitution est envisageable.

Il reste maintenant à définir une nomenclature de classement des diverses utilisations des cuivreux. A ce propos, il faut veiller à éviter que l'emploi d'une nomenclature pour analyser les perspectives d'évolution et de substitution ne conduise pas à préditerminer d'une certaine façon, les résultats de cette analyse.

Une première approche consiste à classer les cuivreux suivant la façon dont ils se présentent physiquement : fils, barres, tubes, laminés, produits de fonderie, sels de cuivre, en séparant d'ailleurs parfois le cuivre pur et ses alliages. Le tableau 11 nous donne l'évolution de cette répartition de 1966 à 1971 pour la France ; le tableau 12 montre des résultats analogues pour tous pays de l'O.C.D.E. : nous constatons une croissance forte des besoins en demi-produits cuivreux (fils, tubes, barres, laminés), une croissance plus modérée des produits de fonderie et des divers et une décroissance de l'utilisation de cuivre sous forme de sels. Le tableau 13 retrace l'évolution pour les pays de l'O.C.D.E. suivant une nomenclature très semblable à celle du tableau 11. Enfin le diagramme 14 permet de visualer cette répartition pour la France en 1972.

Une deuxième approche consiste à donner une répartition par grands secteurs d'utilisation.

Des statistiques portant sur 6,3 millions de tonnes de cuivre (ce qui est proche de la consommation mondiale qui est de 7,4 millions de tonnes, pays socialistes compris) donnent la répartition entre 6 grands secteurs d'utilisation :

- construction électrique	3 M de t.	soit	48 %
- construction mécanique	1,2 M de t.	soit	19 %
- bâtiment	1 M de t.	soit	16 %
- transport	0,5 M de t.	soit	8 %
- biens de consommation	0,4 M de t.	soit	6,3 %
- défense	0,17 M de t.	soit	2,7 %

En fait, cette répartition est variable suivant les pays, comme le montrent les chiffres ci-dessous :

	Europe occidentale	U.S.A.
Electricité - électronique	47 %	33,4 %
Batiment	16 %	22,9 %
Transport	7 %	11,9 %
Equipement industriel	19 %	16,0 %
Produits de consommation	7 %	15,8 %
divers	2 %	0 %

Le développement de la Société de consommation et des transports (aviation - automobile) aux U.S.A., explique la différence constatée dans les pourcentages.

Cette nomenclature colle assez bien avec la notion de besoins (besoin de transport, de chauffage, d'éclairage, etc. ...). Il est particulièrement satisfaisant pour l'esprit de considérer les finalités de la société ou les besoins de l'homme : outre la préocuupation sociale qui est ainsi intégrée, le problème semble traité de façon exhaustive. Les finalités de la société peuvent se traduire en termes de demandes de matériaux. Une première difficulté vient de ce qu'il n'y a pas nécessairement de relation biunivoque entre un type de matériaux et la finalité sociale : chaque besoin primordial de l'homme peut être satifisfait par l'utilisation d'une technique particulière gouvernant l'emploi de tel ou tel matériau. Si l'emploi d'un matériau devient prohibitif, on peut changer de matériaux à technique inchangée, ou changer de technique. Dans la conjoncture économique actuelle, sur les lignes à fort trafic de la S.N.C.F., la traction électrique est hautement rentable et elle met en oeuvre des caténaires en cuivre au cadmium ; si le prix du cuivre croît de façon exorbitante, on peut envisager une substitution de la caténaire en cuivre par une caténaire en bimétal (partie frottante en acier et partie conductrice en aluminium), ce qui poserait d'ailleurs de gros problèmes ou changer de technique et passer à la traction thermique qui ne nécessite aucune caténaire.

La seconde difficulté vient de ce que la finalité sociale n'est pas constante dans le temps, ce qui peut biaiser la prévision. De nouveaux besoins peuvent apparaître et il peut être difficile de les intégrer dans la nomenclature présentée ci-dessus.

Cette classification est commode à bien des égards : elle permet de prévoir l'évolution des consommations par secteurs à partir de la dynamique propre de secteurs relativement homogènes : ainsi le secteur de la construction électrique est gouvernée par une croissance annuelle de 6-7 %, celui du batiment de 3-4 %, celui des biens de consommation de 6-7 %, celui des machines de 3-4%, celui des transports de 5 %. En outre chacun de ces secteurs est soumis à des sujétions bien particulières. Ainsi dans l'industrie des transports, on est très sensible à la notion de sécurité, à la notion d'encombrement : le cablage d'un avion demande plus de soins que le cablage d'une machine-outil et pourtant il s'agit bien de la même fonction du cuivre qui est en jeu : la conduction d'énergie électrique.

Toute nomenclature a le revers de sa médaille : des esprits chagrins pourront regretter que les écrous de bicyclette (classés dans les "transports" soient éloignés des écrous d'assemblage d'aspirateurs, alors qu'il s'agit, de pièces assumant des fonctions identiques. On peut leur répondre que la partie précédente, en abordant les problèmes de décolletage, regroupait ces deux utilisations.

Malgré les quelques inconvénients ci-dessus décrits, nous adopterons le plan suivant :

./...

Electricité :

- Lignes aériennes, cables, barres
- Moteurs
- Transformateurs
- Appareillage
- Culots de lampes

Bâtiments :

- Tubes : eau, gaz
- Chauffe eau et chaudières
- Robinetterie
- Toiture
- Quincaillerie.

Transports :

- Routes : organes électriques, carburateurs, freins, radiateurs
- Chemin de fer : moteurs, cablage, lignes, radiateurs.
- Eau : hélices, tuyaux, acastillages, etc. ...
- Air : équipement électrique

Matériels et produits industriels :

- Armes - munitions
- Centrales électriques : échangeurs
- Construction frigorifique
- Boulonnerie etpièces d'assemblage
- Traitement de surface
- Robinets industriels
- Roulements
- Moulages divers
- Divers

Biens de consommation :

- Appareils ménagers
- Objets de fantaisie
- Horlogerie
- Eclairage
- Fermeture àglissière, mercerie, habillement
- Agriculture.

Eléments d' alliages ou d'additions

Divers.

Pour chacune des rubriques ci-dessous, nous nous efforcerons de donner un ordre de grandeur des consommations de cuivre (contenu dans les demi-produits en cuivre et dans les alliages) : nous donnerons des chiffres français pour l'année 1965 ou 1970 (source : centre d'information du cuivre). La consommation française en 1965 et 1970 était respectivement de 354 000 et 438 000 tonnes de cuivre contenu.

1. Electricité

(220 000 tonnes en 1970) cf. 1ère partie § 3-4

Nous avons groupé dans cette rubrique tous les emplois des cuivreux où ces métaux sont parcourus par le courant électrique. Nous avons vu que du fait de leurs propriétés électriques, l'aluminium (et ses alliages) se présentaient comme un rival dangereux : l'aluminium A 5/L (99,5 %) possède en plus d'une bonne conductibilité (61 % de celle du cuivre) des caractéristiques mécaniques convenables, bien qu'inférieures à celle du cuivre ; l'almelec qui possède une conductibilité plus faible que celle de l'A 5/L, a de bonnes caractéristiques mécaniques (charge de rupture : 33 kg/mm2).

En fait, l'aluminium avait été employé pendant la dernière guerre dans la construction électrique, mais l'improvisation qui avait accompagné cet emploi (isolants avec qualités discutables, main d'oeuvre non formée, raccordements inadaptés, nuance non convenable) avait entaché l'aluminium d'une réputation déplorable. Depuis, des producteurs d'aluminium ont développé un certain nombre de techniques rendant l'aluminium parfaitement utilisable dans un grand nombre d'applications.

L'écart croissant entre les prix du cuivre et de ceux de l'aluminium en faveur de ce dernier, a provoqué le développement de l'emploi de métal blanc.

1.1. Les problèmes de raccordement des conducteurs en aluminium (voir annexe)

Ces raccordements sont parfois plus délicats à réaliser que dans le cas de conducteurs en cuivre (couche d'alumine - tendance de l'aliminium pur au fluage). Toutefois, dans certains cas, des améliorations technologiques (étamage - alliages peu sensibles au fluage) ont permis de limiter les difficultés rencontrées avec l'aluminium.

Pour chaque type de conducteur, il existe maintenant des procédés de raccordement adéquats (cf. annexe) qui donnent toute satisfaction quant à la qualité et à la pérennité des contacts, sous réserve que le monteur exécute rigoureusement les consignes (brossage vigoureux du conducteur pour éliminer l'alumine, etc...).

Il n'en demeure pas moins que les techniques de raccordement de conducteurs aluminium exigent du personnel qualifié (la durée de la formation n'excède pas 15 jours) et un matériel parfois spécialisé (petit outillage amortissable en un an : une presse à poinçonnage profond coûte 1 500 F). Notons qu'avec le cuivre, on utilisait parfois un outillage identique parfaitement réutilisable avec l'aluminium : toutefois, on raccordait la plupart du temps les conducteurs cuivre par serrage mécanique à la clef ou même par épissure (ce qui est proscrit avec l'aluminium).

Bien que certains raccords utilisables avec le cuivre soient réutilisables

.../...

avec l'aluminium, les raccords pour conducteur en aluminium sont généralement plus chers (fourniture + temps de raccordement) que les raccords pour cuivre : on conçoit dans ces conditions que l'emploi de conducteurs aluminium se justifie d'autant mieux que les câbles sont plus longs.

Exemple : cas d'un câble de liaison entre transformateur et tableau de distribution : le câble cuivre de 300 mm2 coûte 28 F le mètre, le câble en alu de 500 mm2 coûte 19 F le mètre. Le coût du raccordement sur câble alu est de 64 F, sur câble cuivre de 17 F (ces prix s'entendent fourniture + main d'oeuvre). On voit que si le câble a moins de 5,2 m de longueur, l'emploi du cuivre est plus avantageux que l'emploi de l'aluminium.
Mais, dans le cas d'une boîte de dérivation basse tension le raccord vaut 150 F (fourniture + main d'oeuvre) que l'on utilise un câble cuivre ou un câble aluminium.

1.2. Lignes aériennes

Cette utilisation nécessite à la fois une bonne résistance mécanique et une bonne conductibilité électrique.

Les solutions envisagées pour remplacer le cuivre sont le câble aluminium-acier (l'acier augmentant la résistance mécanique de l'aluminium), le câble almelec ou almelec-acier.

Une telle substitution permet de réduire l'effet couronne (inversement proportionnel à la section du conducteur). Par contre, les câbles à base d'aluminium présentent, du fait de leur section accrue, une prise au vent non négligeable ; du fait de la faible dureté superficielle de l'aluminium, il faut prendre un certain nombre de précautions lors de la pose si l'on veut éviter les éraflures (toutefois l'almelec, avec une dureté superficielle double de celle de l'aluminium égale le cuivre) génératrices de perturbations électromagnétiques. Il faudra aussi graisser les câbles à base d'aluminium, pour qu'ils résistent bien aux atmosphères marines et éviter de les laisser traîner à terre lors de la pose, car, certains terrains, le fumier, sont particulièrement agressifs. Enfin, les abords de lignes devront être bien élagués pour éviter les arcs électriques auxquels les conducteurs en aluminium résistent assez mal (bas point de fusion).

Le bilan économique doit faire intervenir :
- le coût des raccordements : il est négligeable, car les lignes sont longues,
- le prix d'achat du câble : qui dépend des cours du cuivre et de l'aluminium,
- le coût de la pose des conducteurs, à peu près proportionnel à leur poids au mètre (qui conditionne les frais de mise à pied d'oeuvre du matériel et les opérations de déroulage),
- le nombre de pylones qui dépend des portées admissibles ; là encore, les câbles à base d'aluminium ont l'avantage ; ils permettent de réaliser, à flèche égale, des portées supérieures à celles envisageables avec des câbles en cuivre électriquement équivalent : cet avantage découle naturellement de leurs caractéristiques mécaniques supérieures, alliées à un poids plus faible (malgré la présence d'acier),
- le coût unitaire des pylones : qui dépend de leur hauteur et des efforts qu'ils supportent. L'augmentation des portées accroît les efforts supportés par les pylones d'angles (cas des tracés sinueux) qui devront être plus robustes et plus chers. Les conducteurs à base d'aluminium présentent des flèches plus importantes que les conducteurs en cuivre (dilatation et fluage plus importants) : ils nécessitent donc des pylones plus hauts et donc plus chers.
La longévité des lignes en aluminium serait identique à celle des lignes en cuivre.

1.2.1. Lignes de transport (E.D.F.)

Il s'agit de lignes à haute et très haute tension (plus de 60 kV). Le bilan économique fait apparaître un avantage pour les conducteurs à base d'aluminium dès que le rapport prix au kg du fil de cuivre de 3 mm sur Prix au kg du fil d'aluminium de 4 mm (Pc/Pa) dépasse 0,6 : ceci implique que le cuivre ait été abandonné depuis très longtemps. (NB : le rapport Pc/Pa est égal à 1,3 en octobre 1972).

En plaine, on emploie de plus en plus l'almelec qui est de 4 à 7 % moins onéreux que la solution aluminium-acier.

En montagne, à cause des surcharges de givre, on emploie des câbles en almelec-acier.

Les raccords, largement dimensionnés pour des raisons mécaniques, ne posent aucun problème, sur le plan électrique.
La plupart des lignes à haute tension existant dans le monde ont éliminé le cuivre.

1.2.2. Lignes de distribution (moins de 45 kV, moyenne et basse tension)

Le bilan économique est ici favorable aux câbles à base d'aluminium si le rapport Pc/Pa dépasse 0,8. C'est dire que le cuivre est réduit à la portion congrue et que les incitations ministérielles, reprises par la direction de l'E.D.F. s'efforcent de le faire disparaître complètement.

1.2.2.1. Basse tension : autrefois, il y avait beaucoup de lignes nues mais maintenant 80 % des lignes nouvelles sont réalisées en câbles préassemblés qui sont esthétiques, nécessitent peu d'élagages, exigent des poteaux moins hauts, permettent d'effectuer des travaux sous tension et présentent une self-inductance réduite. Ils sont réalisés en aluminium. Les 20 % restants sont occupés par des lignes à conducteur nu en alliage d'aluminium ou en cuivre. Le coût de ces diverses lignes est le suivant (fournitures et pose) :

- ligne en alliage d'aluminium (nue) - coefficient 1
- ligne en câble préassemblé - coefficient 1,2
- ligne en cuivre (nue) - coefficient 1,3

On peut s'étonner que le cuivre subsiste : en fait, un certain nombre de lignes sont posées par le génie rural ou des installateurs en régie : ils ne sont pas formés à l'aluminium et perçoivent mal les économies à réaliser. En outre, en cas de renforcement d'une ligne préexistance en cuivre, on réutilise des conducteurs en cuivre (la coexistence sur le même isolateur de cuivre et d'aluminium étant impossible à cause de la corrosion galvanique).

Rang : E.D.F. va généraliser dès 1974 l'emploi de câbles aluminium pour les branchements aériens d'abonnés (gain de 2 Milliards d'A.F.). Cette mesure va entraîner l'abandon quasi total du cuivre.
NB : à l'étranger, bien que les circonstances technico-économiques soient identiques, la substitution est beaucoup moins prononcée.

1.2.3. Autres utilisateurs

Malgré les économies réalisables par l'emploi de l'aluminium, les utilisateurs tels que la S.N.C.F., R.A.T.P. adoptent assez lentement l'aluminium.

1.3. Barres - tubes

Le cuivre est concurrencé sérieusement par l'aluminium. L'emploi de barres aluminium électriquement équivalent à des barres cuivre se traduit par un gain de poids de 50 % environ et un encombrement de 50 % supérieur.
L'usinage, perçage, cintrage des barres en aluminium n'est pas plus difficile que pour les barres en cuivre.
Les barres aluminium peuvent être assemblées par soudage sous argon, ou par serrage mécanique ; dans ce dernier cas, il faut maintenir une pression de contact suffisante, en mettant un nombre adéquant de boulons : le raccordement coûte plus cher que dans le cas du cuivre. Remarquons à ce propos qu'au prix d'un surcoût de 10 à 20 %, il est possible d'étamer les barres d'aluminium : la couche d'étain, épaisse de 10 à 15 µ, demeure adhérente même après cintrage, elle facilite les raccordements qui n'exigent alors plus de personnel spécialement qualifié et l'on peut alors employer une technique identique à celle du cuivre.

Mais, compte tenu de la valeur du coefficient de dilatation de l'aluminium, il y aura lieu de prévoir des joints de dilatation qui augmentent le prix de l'installation.

Lorsque le prix du fil cuivre est de 6,7 F/kg et celui en aluminium de 4,65 F/kg, l'économie sur le prix d'achat des barres peut atteindre 60 % pour des barres nues et 40 % pour des barres étamées.
Cette économie peut être d'ailleurs réduite par le surcoût d'installation (plus de boulons, joints de dilatation). Il n'en demeure pas moins que l'emploi des barres en aluminium est un facteur d'économie appréciable.
Ainsi, l'aluminium a remplacé le cuivre dans un certain nombre d'applications :
- liaisons alternateurs - transformateurs,
- très haute tension où l'on emploie des tubes en aluminium,
- matériel industriel préfabriqué :
  . dans les canalisations industrielles électriques, le coût du métal représente 50 % du coût total : les barres en aluminium étamé recueillent l'approbation de tous les installateurs; des services d'entretien, non spécialisés, peuvent même effectuer des modifications comme sur une installation en cuivre ;
  . dans les armoires et tableaux, l'utilisation de l'aluminium est envisageable, si les exigences d'encombrement ne sont pas draconniennes. La différence de prix est beaucoup moins motivante, car le coût des barres conductrices ne représente que quelques % du coût total.
  - colonnes montantes d'immeuble où l'aluminium est admis,
  - installation d'électrolyse de chlore, de fluor, d'aluminium : les barres en aluminium sont protégées du contact des gaz agressifs ou de la soude par plusieurs couches de vernis épikote ; le coût du traitement de protection étant voisin de 5 % du prix d'achat des barres, l'emploi de l'aluminium reste hautement rentable.

NB : compte tenu de l'agressivité de certaines terres vis-à-vis de l'aluminium et de ses alliages, il est rigoureusement interdit d'utiliser des conducteurs d'aluminium en guise de "terre".

1.4. Câbles isolés (170 000 tonnes de cuivre en France en 1970).

1.4.1. Généralités

L'aluminium et ses alliages font une percée dans le domaine des câbles isolés. Rappelons qu'un câble aluminium électriquement équivalent à un conducteur cuivre doit avoir une section conductrice 1,6 fois plus forte dans le cas des câbles isolés, le problème se complique par suite de la présence de l'isolant : en effet, lorsque la section conductrice croît, l'épaisseur de l'isolant doit croître (pour des raisons de tenue mécanique en particulier) : voir figure 17. On conçoit donc que l'économie effectuée sur le métal se trouve diminuée par le surcoût lié à l'isolation. En fait, le bilan économique relatif au prix des câbles doit

prendre en compte plusieurs aspects :
- le coût du métal (30 à 85 % du prix du câble),
- le coût de l'isolant : ce paramètre joue en défaveur de l'aluminium,
- le coût de câblage : la vitesse de toronage des brins (qui peut atteindre 80 m/minute) est identique avec des conducteurs en cuivre ou en aluminium électriquement équivalents. De plus, les toronneuses utilisables pour des câbles en cuivre conviennent parfaitement aux câbles en aluminium,
- le coût des opérations d'isolation : après quelques difficultés de mise au point, les vitesses de boudinage (mise en place de la gaine de plastique) sont comparables pour les deux types de câbles, sauf peut-être pour les petits diamètres, où, compte tenu de la faible résistance de l'aluminium à la traction, on peut être amené à diminuer les cadences de production : ainsi, la vitesse de boudinage du fil de 0,5 mm est de 1800 m/minute avec le cuivre et de 1200 m/minute avec l'aluminium. Il faut aussi souligner que certaines boudineuses travaillent à débit de polyéthylène constant et pénalisent donc les câbles aluminium exigeant une section d'isolant plus importante que le câble cuivre électriquement équivalent. Les boudineuses ne dépendent pas du métal utilisé; tout au plus, si toute la fabrication passe à l'aluminium faudra-t-il élargir vers le haut la gamme des machines (à cause de l'augmentation des sections). En fait, en France, l'emploi de câbles en aluminium s'est accompagné du relèvement des tensions d'exploitation, évitant ainsi un accroissement important des sections,
- le coût d'assemblage : les assembleuses utilisent indifféremment cuivre ou aluminium.

On conçoit donc que le résultat du bilan économique précédent dépend essentiellement du type de câble utilisé (le bilan sera moins favorable pour l'aluminium en câbles haute tension, où la part de l'isolation est importante que dans le cas de câbles basse tension), du diamètre du conducteur et du rapport Pc/Pa défini précédemment.

Le calcul montre que dans la majorité des cas, la substitution est avantageuse dès que le rapport Pc/Pa dépasse 1,1 : voir figures 18 et 19. Ces chiffres tirés de barêmes établis par le syndicat des câbles isolés donne une valeur par excès de l'économie : en effet, on passe du prix du conducteur cuivre au prix du conducteur aluminium de section géométriquement identique en modifiant uniquement le prix du métal, ce qui revient à admettre que le coût des opérations d'isolation est identique dans le cas du cuivre et de l'aluminium.

NB : l'emploi d'aluminium au lieu de cuivre se traduit par une diminution des frais proportionnels de fabrication (main d'oeuvre + matières premières), mais les frais fixes demeurent inchangés. Le kilomètre de câble aluminium supporte donc une part relativement plus importante de frais fixes que le câble cuivre électriquement équivalent : si la substitution entraîne une baisse de 50 % sur le prix de revient atelier (frais proportionnels), l'économie sur le prix de revient total peut se trouver réduite à 20 ou 30 %.

Préoccupons-nous maintenant du prix du câble posé. Le bilan économique doit faire intervenir :
- le prix du câble : qui joue en faveur des câbles en aluminium,
- le coût du transport : il est plus faible dans le cas de câbles en aluminium : le gain de poids par rapport à la solution cuivre est de 14 à 45 % suivant les câbles. A titre d'exemple, mentionnons que les transports constituent 4 à 5 % des dépenses d'exploitation des câbleurs,

- les pertes et vols : ces facteurs jouent en défaveur du cuivre qui est souvent volé sur les chantiers,
- le coût de la pose : la légèreté du câble aluminium est un facteur positif, mais les raccordements sont plus délicats à réaliser et, dans certains cas, les raccords sont plus chers que pour les conducteurs en cuivre. Toutefois, la technique du poinçonnage profond n'exige pas de personnel hautement qualifié (quelques jours de formation sont suffisants). Les câbles en aluminium seront donc d'autant plus avantageux qu'ils seront plus longs (voir 1.1). Pour les grosses sections ($\geqslant$ 240 mm2), le prix des raccords est négligeable devant le prix du câble (1 câble en aluminium en 3 conducteurs de 240 mm2 coûte 59 600 F/km ; le câble électriquement équivalent en cuivre coûte 72 200 F/km) ; pour les sections plus faibles, le prix du raccord a un effet plus sensible sur le prix du câble posé, d'autant que les longueurs utilisées sont parfois plus faibles que dans le cas des câbles de grosses sections.

On en conclut que les câbles en aluminium sont d'autant plus avantageux que leur longueur et leur section sont importantes.

A l'heure actuelle, on peut considérer que, dans le domaine des câbles d'énergie, l'aluminium se justifie économiquement au-dessus de 10 mm2.

Abordons maintenant quelques points d'ordre technique. Pour les câbles de très grosses sections, l'emploi de l'aluminium est préférable à celui du cuivre ; en effet, chaque brin s'entoure spontanément d'une couche isolante d'alumine et le conducteur se présente comme une multitude de conducteurs en parallèle, l'effet de peau se trouve donc réduit. De plus, du fait du câblage, chaque brin passe successivement du centre à la périphérie et vice-versa (si on a un découpage du câble en secteurs) cela a pour effet de réduire l'effet de proximité (câbles multiphasés).

Le câble aluminium, par son encombrement, peut être délicat à utiliser dans les armoires électriques et exige des boîtes à bornes de moteur suffisamment dimensionnées à moins d'avoir la sortie du moteur par câbles (comme cela se pratique couramment aux U.S.A., mais il faudrait changer les habitudes des constructeurs de moteurs.) De plus, cet accroissement de section risque de limiter les possibilités de donner au câble de faibles rayons de courbure dans les parcours sinueux ; en fait, l'aluminium a bénéficié des progrès réalisés dans l'isolation ; en basse tension, les isolants secs (polymères) permettent de donner de faibles rayons de courbures ; en moyenne et haute tension, les plastomères (butyle, polyéthylène réticulé)remplaceront à terme le papier imprégné permettant ainsi de donner les mêmes avantages.

La résistance au pliage de l'aluminium étant inférieure à celle du cuivre recuit, la durée de vie d'un câble en aluminium soumis à de fréquents démontages-remontages peut être inférieure à celle d'un câble en cuivre. Une solution consiste à utiliser des alliages d'aluminium qui présentent de bonnes caractéristiques mécaniques, mais qui ont une conductibilité plus faible que l'aluminium pur, avec les conséquences que l'on peut imaginer sur la section du conducteur.

En cas de surcharge, l'aluminium tiendra aussi bien que le cuivre, en effet sa chaleur massique est le double de celle du cuivre et nous avons vu que la masse d'aluminium était égale à la moitié de la masse du conducteur cuivre équivalent : s'il y a libération sur une longueur l d'une quantité de chaleur Q, l'échauffement $\Delta\theta$ sera identique dans les deux cas.

Etudions maintenant la substitution dans les divers types de câbles :

1.4.2. Câbles rigides

1.4.2.1. Le cas de l'E.D.F.

a) Câbles à haute ou très haute tension (≥ 60 kV) : 500 T de cuivre en 1970, en France.
Le marché est très faible, carle coût d'une ligne souterraine est 20 fois supérieur au prix d'une ligne aérienne. On n'utilisera des câbles haute tension que pour des questions d'esthétique (à l'intérieur des agglomérations, par exemple, mais il est rare de rencontrer de la haute tension au coeur des villes).
L'aluminium, qui procure une certaine économie (quoique plus faible que pour les autres types de câbles), fait son apparition dans ce domaine.

b) Câbles à moyenne tension :
Il s'agit de câbles amenant l'énergie électrique au coeur des cités. Ils comportent de ce fait, peu de raccordements ou dérivations.A l'heure actuelle, les câbles en aluminium isolé au papier imprégné occupent 100 % du marché permettant une économie de 20 % par rapport à la solution cuivre. l'E.D.F. pose 2200 kilomètres par an de câbles de 150,95 et 240 mm2. Les raccordements s'effectuent par poinçonnage profond ; l'outillage utilisé avec le cuivre (presse à sertissage hexagonal) est réutilisable avec les câbles en aluminium.

c) câbles basse tension :
ces câbles amènent l'énergie auprès de tous les abonnés, ils possèdent donc de nombreux raccordements ou dérivations Les réseaux de distribution basse tension construits par E.D.F. utilisent l'aluminium à 100 % ; toutefois, les branchements d'abonnés sont effectués en cuivre pour le moment, les coupe-circuits des abonnés n'étant pas encore adaptés à l'emploi de l'aluminium. E.D.F. pose ainsi chaque année 1500 km de câbles aluminium basse tension de section comprise entre 50 et 150 mm2 (ces câbles sont raccordés par poinçonnage profond ou serrage mécanique à travers l'isolant, ce dernier procédé permettant de travailler sous-tension) et 900 km de câbles en cuivre de section comprise entre 10 et 25 mm2 pour les branchements d'abonnés.

NB : les réseaux de distribution intérieurs aux lotissements sont à la charge des promoteurs, E.D.F. n'étant pas le payeur ne pousse pas à l'emploi de l'aluminium.

d) Conclusion :
E.D.F. représentant un interlocuteur très centralisé s'est facilement laissé convaincre des bénéfices à attendre de l'emploi de l'aluminium : du reste, n'a-t-elle pas économisé 25 milliards d'anciens francs depuis qu'elle utilise l'aluminium à la place du cuivre ? Est-il besoin de préciser que les câbles et leurs jonctions ont donné satisfaction tant en ce qui concerne leur mise en oeuvre que leur durée de vie. Les raccordements par poinçonnage profond nécessitent une formation réduite (dispensée seulement au niveau agent de maîtrise) : les raccordements sous tension ont nécessité un effort de formation autrement plus important.

.../...

1.4.2.2. Utilisateurs industriels (50 000 t de cuivre en 1970 en France
Ce secteur se caractérise par une quantité innombrable de catégories de câbles et d'interlocuteurs (clients, installateurs, etc...).
Les grands utilisateurs (sidérurgie, chimie, etc...) se sont laissés convaincre assez facilement, par contre, la progression de l'aluminium marque le pas dans les petites et moyennes entreprises et même parfois dans de plus grosses (la S.N.C.F., la R.A.T.P. et les Charbonnages, par exemple, se retranchent derrière les impératifs de sécurité pour rester au cuivre).
En général, l'aluminium est bien admis pour les sections supérieures à 35 mm2 ; en dessous de ce seuil, l'aluminium a des difficultés à percer ; il faut dire que les câbles de faible section (moins de 35 mm2) sont souvent assez courts, le coût du raccordement devient donc moins négligeable. De plus, les problèmes d'encombrement dans les armoires et sur les moteurs peuvent faire reculer l'utilisateur. Remarquons aussi que pour une installation industrielle de moyenne importance, le coût du câblage est faible non seulement en valeur relative, mais aussi en valeur absolue. Pour de grosses installations, le coût du câblage représente une somme considérable en valeur absolue (même si elle est faible en valeur relative) : ainsi, à Fos, le prix du câblage est de l'ordre de 2 milliards d'anciens francs, le directeur général s'est préoccupé de cette dépense et ... a choisi l'aluminium.

En fait, si l'information concernant l'économie apportée par l'emploi de l'aluminium était plus largement répandue, malgré les quelques obstacles techniques (liés à l'encombrement et à la formation du personnel) évoqués ci-dessus, la progression de la substitution serait plus notable.

1.4.2.3. Câbles pour installations domestiques (10 000 t de cuivre consommé en France en 1970)
Une des caractéristiques de ce secteur est que le fil électrique est mis en oeuvre par une multitude de petits installateurs ne connaissant que le cuivre : l'utilisation d'un vulgaire fil en aluminium pur ne peut être envisageable ; il faut un produit de remplacement du cuivre qui en présente toutes les caractéristiques de mise en oeuvre.

C'est ainsi qu'un alliage d'aluminium (à faible teneur en fer et en nickel), présentant pratiquement les mêmes propriétés mécanique que le cuivre (même dureté superficielle et même résistance au pliage) a été mis au point. Ce fil est recouvert de bronze,de cuivre, puis étamé. De ce fait, les qualités de contact électrique de ce fil sont supérieures à celles du fil de cuivre, et le demeurent dans le temps. L'étamage subsiste après pliage du fil ou lorsque l'on y enfonce une pointe. Pour un prix du cuivre (wirebar) à 6 F/kg, l'économie à l'achat du fil est de 25 à 35 %.

Il faut toutefois effecter le dénudage du fil à la pince à dénuder et non avec un couteau : (ce dernier ustensile, employé fréquemment par les "mauvais électriciens" provoquerait sur ce fil une entaille, plus profonde, à effort égal, que dans le cas d'un fil en cuivre, d'où risque accru de casses lors de la pose).

La résistance à la corrosion par condensation ou air marin de ce fil semble convenable ; le fluage n'est pas gênant.

Un tel fil peut être utilisé tel quel (et c'est un point positif) avec les appareillages existants (prises, interrupteurs, douilles). En effet, les "tunnels" de ces appareils permettent de recevoir du fil de 4 mm de diamètre (ce qui correspond au diamètre du fil électriquement équivalent au fil de cuivre de 2,5 mm couramment utilisé).

N.B. : Toutefois, le repiquage utilisé avec le fil cuivre n'est pas possible avec ce fil : les "tunnels" qui peuvent recevoir 2 fils de 2,5 mm ne peuvent recevoir 2 fils de 4 mm. Il faudrait pour cela modifier l'appareillage existant, ce qui induirait chez les fabriquants de coûteuses modifications de leurs machines transferts adaptées pour réaliser des tunnels de 5 mm de diamètre.

Sur une dépense totale d'installation de 1600 F par logement, l'économie réalisée par emploi de fil en aluminium serait de 100 F, le temps de pose étant inchangé.

Quelle sera la réaction des installateurs et des circuits de distribution; personne n'ignore qu'ils prélèvent une marge confortable sur le fil, ainsi le fil cuivre de 1,5 mm2 coûte 0,19 F/m à la sortie d'usine et 0,36F/m pour le client (hors taxes)? Que deviendra l'économie de 25 à 35 % sur le prix départ usine ? La main d'oeuvre représente 80 % du prix total de l'installation; une économie, même substantielle, sur les fournitures sera-t-elle motivante pour le client, l'installateur ?

NB : dans les pays de l'Est, les installations domestiques sont effectuées en alliage d'aluminium.

1.4.3. Les câbles souples :

L'aluminium pur traité ("souplalu") ou des alliages spéciaux d'aluminium ("Aluflex" Péchiney) permettent de réaliser des câbles souples à des prix largement compétitifs par rapport aux câbles en cuivre. Ils sont constitués d'un assemblage de brins très fins (0,16 à 0,6 mm de diamètre). L'augmentation de section (1,6 fois) à chute de tension égale entre deux câbles, l'un en cuivre, l'autre en aluminium, diminue légèrement le degré de souplesse comparé des deux câbles, mais la légèreté du câble aluminium est particulièrement appréciée pour les câbles de soudage (la fatigue de l'ouvrier est considérablement diminuée) La durée de vie de tels câbles en aluminium pour les sections supérieures à 50-60 mm2 est comparable à celle des câbles cuivre électriquement équivalents : on utilise de tels câbles sur les "caravelles", les locomotives diesel électriques, sur des postes de soudage à l'arc, des dragues magnétiques, ...

Par contre, sous réserve de mise au point d'alliages nouveaux, il ne semble pas envisageable de réaliser des câbles souples de faible section ayant une durée de vie suffisante : leur résistance à des pliages répétés serait trop faible. Les câbles alimentant les appareils électroménagers (fers à repasser, lampadaires, etc...) resteront en cuivre.

N.B. : dans le cas de câbles de soudeuses utilisés dans l'automobile, il semble difficile de remplacer le cuivre par un alliage d'aluminium. En effet, les câbles cuivre tiennent 1 à 2 milliards de points ; ils sont d'autre part, soumis à des efforts électrodynamiques très

importants à chaque soudure et seul le cuivre a des caractéristiques mécaniques suffisantes. Du reste, le prix au mètre d'un tel câble sophistiqué (voir figure 20) est de l'ordre de 200 F au mètre, pour un prix du cuivre de 35 F au mètre.

1.4.4. Conclusion (figure 21)

Mis à part quelques cas particuliers, compte tenu des progrès réalisés pour les raccordements et des cours respectifs du cuivre et de l'aluminium, les câbles en aluminium se justifient à la fois sur le plan technique et sur le plan économique. Pourtant, en France, l'aluminium ne représente que 20 à 25 % du marché (le tonnage utilisé est de 20 000 t d'aluminium contre 180 000 t de cuivre, en 1970. Mais n'oublions pas qu'une tonne d'aluminium équivant à deux tonnes de cuivre); nous essayerons, dans la troisième partie, de donner une explication à cette anomalie.

1.5. Les télécommunications : (48 000 tonnes de cuivre utilisé en France en 1972, dont 10 000 tonnes dans les câbles à grande distance et 38 000 tonnes dans les câbles de réseau abonnés).

Il s'agit d'un cas particulier de câbles isolés, à ceci près, que les sections de conducteur sont faibles (0,4 à 1 mm), que nous sommes dans le domaine des courants faibles : le paramètre déterminant est l'atténuation des signaux transportés (l'atténuation varie comme $\sqrt{R \cdot C}$, R étant la résistance du câble et C sa capacité).

Signalons que ce secteur d'activité est soumis à une croissance particulièrement forte : les espérances qu'avait fait naître les transmissions par faisceau herzien ne remettront pas en cause le besoin en câbles de télécommunication : compte tenu de la saturation de l'éther, les faisceaux herziens ne donneront qu'une bouffée d'oxygène dans les liaisons à grandes distances et seront des moyens plus complémentaires que concurrents ; on les utilisera pour doubler les câbles en cas d'incidents, ou dans des régions difficiles d'accès.

On distingue plusieurs types de câbles qui utilisent traditionnellement le cuivre :

- les câbles du réseau abonnés :
  - la paire d'abonné : elle est constituée d'un conducteur bifilaire autoporté réalisé en "bronze téléphonique" à haute résistance mécanique. On envisage son remplacement par un conducteur en acier recouvert de bronze, permettant un allongement des portées.
  - câbles groupés en quartes : ils peuvent être autoporteurs (moins de 112 paires) ou souterrains (ils consomment le plus gros tonnage de cuivre). La section des conducteurs est de 0,4 ou 0,8 mm. Leur capacité est de 50 nF/km.
- les câbles à longue distance :
  les plus récents, d'une capacité de 28 nF/km, ont une section conductrice de 0,5 ou 0,8 mm par conducteur. Notons l'existance d'un câble en aluminium de 1,15 mm de section par conducteur ; il est utilisé pour des réseaux régionaux autoporteurs.
- les câbles coaxiaux : ils permettent d'acheminer un plus grand nombre de communication par paire.
- les guides d'onde : ils sont constitués par un fil de cuivre très fin enroulé en spirale à l'intérieur d'un tube en isolant, ils représentent le dernier cri du progrès et attaquent le domaine des câbles coaxiaux.

La substitution de l'aluminium au cuivre est techniquement envisageable : on n'utiliserait non pas l'aluminium pur mais un alliage présentant de meilleures caractéristiques mécaniques (allongement plus important limitant l'effet d'éventuelles entailles lors du pliage). Il existe un certain nombre de procédés de raccordement fiables (il faut toutefois prévoir quelques jours de formation à ces techniques pour les monteurs). Le câble aluminium, plus léger, est particulièrement intéressant pour les câbles autoportés et à la pose ; toutefois il est aussi plus encombrant ce qui est gênant pour les câbles souterrains : ceux-ci, en effet, sont enfilés dans des conduites, dont la plupart sont déjà posées (par raison d'économie : ce qui coûte cher c'est la réalisation des tranchées), les câbles supplémentaires y étant enfilés au fur et à mesure des besoins. L'emploi de l'aluminium au lieu du cuivre fait perdre un calibre : au lieu de pouvoir mettre dans les conduits un câble de 224 paires cuivre, on ne peut mettre qu'un câble de 112 paires aluminium, par suite de l'augmentation du diamètre des conducteurs ; mais l'emploi de polyéthylène aéré pour remplir les interstices entre conducteurs (ce qui permet d'empêcher l'infiltration des eaux et donc les corrosions et donne donc un câble de meilleure qualité) a permis de limiter de façon importante l'augmentation de section totale des câbles, en agissant sur le paramètre capacité C (cf. plus haut).

On peut même espérer que l'emploi de cet isolant à la place du polyéthylène rigide, en isolation même, permettra des gains d'encombrement plus considérables.

En fait, dans l'état de la technique, l'aluminium allié est avantageux pour les câbles autoportés et les câbles souterrains de moins de 110 paires (la perte d'un calibre est compensée par l'amélioration de la qualité du câble.

Dans le domaine des câbles coaxiaux, on peut remplacer le tube extérieur en cuivre par un tube en aluminium, le conducteur intérieur restant en cuivre pour le moment (on envisage, en effet, d'utiliser, à l'avenir, un conducteur aluminium ou en aluminium plaqué de cuivre).

Sur le plan économique, il faut s'assurer que le câble aluminium ne coûte pas plus cher que le câble cuivre lors de la fabrication. Les câbles cuivre sont, en effet, fabriqués à la cadence de 2000 m/minute sur des machines tandem fort onéreuses. Les cadences seront-elles les mêmes avec le fil aluminium ? C'est pour répondre à cette interrogation, que les responsables du C.N.E.T., excédés par les fluctuations du cours du cuivre qui gênent l'établissement des budgets annuels des Télécommunications, se sont décidés à financer l'étude de la fabrication de câbles en aluminium en liaison avec les câbleurs et l'Aluminium Français.

Ces études permettront de décider si les câbles en aluminium représentent un "mirage économique" et s'ils permettront d'apporter l'économie ... de 10 % escomptée sur le coût d'achat des câbles.

Après une période de rôdage, les coûts de mise en place devraient être sensiblement équivalents à la solution cuivre.

En Angleterre, tous les câbles de moins de 100 paires sont en aluminium ; les problèmes de jonction sont bien résolus; remarquons toutefois que les sorties d'armoires restent en cuivre.

Aux U.S.A., l'aluminium est aussi largement employé dans les télécommunications.

1.6. Les transformateurs (16 000 tonnes de cuivre en 1966) voir figure 22.

1.6.1. Généralités

La croissance de la demande de transformateurs suit la croissance de la

.../...

consommation d'électricité : en France, ce taux de croissance est 7 % par an.

Ces appareils doivent respecter un cahier des charges rigoureux prescrivant à la fois un niveau de pertes (pertes joules et pertes supplémentaires par courant de Foucault) déterminé à vide et en charge, et satisfaire à un certain nombre de garanties concernant la tenue en température des isolants, du conducteur, du diélectrique. Ils doivent aussi résister à des surtensions accidentelles.

Il faut noter qu'en cas de foudre ou de court circuit sur les réseaux alimentés par les transformateurs, des efforts électrodynamiques très importants peuvent se produire, aboutissant à un véritable martelage des conducteurs.

Voyons maintenant les conséquences induites par la substitution de l'aluminium au cuivre : si l'on veut maintenir un niveau identique de pertes joules, il est indispensable d'augmenter la section des conducteurs, et, partant, le volume des enroulements. Il faut alors une fenêtre plus importante, d'où un circuit magnétique plus encombrant, et donc plus lourd et plus cher (le kilo de tôles magnétiques découpées coûte 3 F environ), si on veut conserver la section du circuit magnétique : une réduction de cette section se traduit, en effet, par une augmentation des pertes dans le fer. L'encombrement total s'en trouve donc augmenté, il faut donc plus d'huile et une cuve plus grosse (dans le cas des transformateurs à diélectrique liquide).

Notons que l'aluminium peut bénéficier de la technique des conducteurs en bandes (l'emploi de bandes de cuivre est plus délicat, par suite de l'effet de ressort qu'elles présentent) ; leur utilisation permet d'améliorer le coefficient de remplissage et, partant, de limiter le volume des enroulements.

De plus, la compacité du bobinage en bandes améliore la résistance aux courts circuits, aux vibrations ; l'apparition de points chauds est plus rare que pour des conducteurs ronds ou méplats. Les techniques de raccordement de bandes aluminium sont bien au point : soudage à l'arc sous argon (bandes de fortes épaisseurs) ou par pression à froid (bandes minces).

Les sorties généralement réalisées en cuivre sont elles aussi raccordables sur bande aluminium.

N.B. Ces raccordements s'effectuent sans flux décapant, donc sans risque de réactions avec l'huile ou le pyralène utilisés comme diélectrique.

.../...

Citons à l'actif de l'aluminium un excellent vieillissement des huiles (le métal ne réagit pas avec l'huile, ce qui n'est pas le cas du cuivre). La faible résistance mécanique de l'aluminium, etson bas point de fusion peuvent être compensés sans difficulté par des mesures constructives : le bas point de fusion n'entre pas en ligne de compte, car de toute façon les températures que peuvent supporter les isolants sont limitées ; de plus, nous avons vu (1ère partie § 3-4) que l'aluminium s'échauffe moins rapidement qu'un conducteur cuivre électriquement équivalent.

Malgré les avantages apportés par la bande aluminium, la réalisation d'un transformateur en aluminium qui présente le même niveau de pertes qu'un transformateur en cuivre de mêmes caractéristiques (tension - intensité - rapport de transformation etc ...), se traduira par une augmentation du poids du circuit magnétique, du poids d'huile, de l'encombrement et du prix de la cuve ; toutefois, on aura un gain de poids sur le conducteur. Le tableau ci-dessous nous donne quelques exemples montrant l'accroissement du poids de fer consécutifs à la substitution du cuivre par l'aluminium.

Puissance 1 000 KVA

Poids de fer (kg)	1 300	1 450	830	925
Poids de cuivre (kg)	400	0	430	0
Poids d'aluminium (kg)	0	140	0	259
	1ère technique (1958)		2ème technique (1966)	

Puissance 20 MVA

Poids de fer (kg)	14 000	16 000	9 000	9 975
Poids de cuivre (kg)	5 100	0	3 000	0
Poids d'aluminium (kg)	0	1 970	0	2 350
	1ère technique (1958)		2ème technique (1966)	

Puissance 40 MVA

Poids de fer (kg)	14 000	17 000
Poids de cuivre (kg)	7 000	0
Poids d'aluminium (kg)	0	3 600
		technique 1972

NB 1 : On remarquera l'influence du progrès technique

NB 2 : Le poids de fer concerne uniquement le circuit magnétique.

Une autre approche économique consiste à réaliser un transformateur en aluminium, moins onéreux que dans le cas précédent, mais qui présente un niveau de pertes supérieur ; le calcul économique fera intervenir le prix d'achat de l'appareil et le supplément capitalisé de pertes (ce qui fait intervenir le coût du kwh). Il existe donc un niveau de pertes optimum qui dépend du type de transformateur considéré , des cours des métaux, du prix de kwh).

La décomposition du prix de revient d'un transformateur montre bien l'influence prééminente du coût des matériaux :

- main d'oeuvre 20 %
- matériaux 80 % dont { 40 % cuivre et fer / 40 % huile et cuve chaudronnée

La part de la main d'oeuvre est faible, elle dépend peu du dimensionnement de l'appareil : la substitution de l'aluminium au cuivre ne modifiera donc pas sensiblement le prix du montage. Le temps de bobinage risque par contre d'être légèrement augmenté : actuellement, le temps de bobinage de 5 000 spires de 0,4 mm en cuivre est de l'ordre de 10 minutes, pourra-t-on tenir les mêmes cadences avec les conducteurs aluminium, plus fragiles et plus longs à raccorder ?

Au niveau des investissements, le passage à l'aluminium n'est pas neutre :

- en amont du constructeur de transformateur, le laminage de l'aluminium ne s'effectue pas de la même façon et sur les mêmes outils que le laminage de méplats en cuivre (à fortiori que le tréfilage de fil cuivre) ;
- chez le constructeur, il faut prévoir, en plus de frais de formation du personnel aux techniques de raccordements de l'aluminium la refonte totale des programmes de calculs (la conception des transformateurs est à repenser quand on passe à la bande aluminium), l'achat de bobineuses adaptées à la bande aluminium (la tension de la bande et la vitesse de déroulement devront, compte tenu des faibles caractéristiques mécaniques de l'aluminium, rester constantes), et l'achat d'appareils de raccordement appropriés.

Notons à ce propos que l'investissement exigé par la substitution est d'autant moins ressenti que la production est plus importante : c'est le cas aux U.S.A. où les constructeurs disposent d'un marché très vaste.

1-6-2 Etat actuel et évolution de la substitution :

Les problèmes sont différents pour les enroulements en basse tension et les enroulements en haute tension.

En basse tension, l'intensité est forte, le nombre de spires faible. La bande aluminium est intéressante : on tombe sur des dimensions courantes pour la largeur (10 cm à 1 m) et pour l'épaisseur (0,3 et 1 mm). L'isolation au papier (épaisseur 0,15 mm) qui s'effectue en même temps que l'enroulage, est suffisante.

En haute tension, l'emploi de l'aluminium est moins justifié : il faut en effet une bande très mince (l'intensité est faible, le nombre de spires élevé), d'où risques de déchirure. L'isolation au papier n'est plus envisageable (risque de claquage), il faut vernir la bande, ce qui est difficile (aux U.S.A., toutefois il existe de tels procédés de vernissage).

1-6-2-1 Le cas des transformateurs à l'air (3 000 T de cuivre en France en 1965) (pas d'huile - pas de cuve).

Il s'agit le plus souvent d'appareils travaillant dans les gammes de tension assez faibles, les intensités y sont fortes ; ces appareils sont donc justiciables de conducteurs en bande d'aluminium isolée au papier. L'augmentation de volume du circuit magnétique est faible et l'imprégnation à coeur par des résines synthétiques donne une bonne tenue mécanique à l'ensemble. L'emploi de l'aluminium se justifie dès que le rapport Pc/Pa dépasse 1,2 à 1,4 suivant les cas. La substitution se développe très bien ; soudeuses, petits transformateurs etc ... .

1-6-2-2 Les transformateurs à huile :

* de moins de 250 KVA : la réalisation de bobinage en bande pour la basse tension ne pose aucun problème. Faute d'un vernis satisfaisant pour la haute tension, la réalisation de bobinage en bande d'aluminium y est difficile ou alors l'épaisseur d'isolant est non négligeable devant l'épaisseur du conducteur et l'encombrement du bobinage est trop important. Les cours actuels du cuivre et la position d'EDF intransigeante quant aux pertes n'encouragent pas la substitution en France. Aux Etats-Unis, toutefois, où, compte-tenu du prix modéré du kwh, on est moins exigeant quant au niveau des pertes et, où le vernissage des bobinages haute tension donne satisfaction, on voit apparaître de nombreux transformateurs de 25 KVA en aluminium.
  La substitution en France ne pourrait intervenir que si Pc/Pa devenait supérieur à 2.

* de puissance comprise entre 250 KVA et 40 MVA :

  Dans cette gamme de puissance, les intensités rencontrées en haute tension justifient des conducteurs de section plus importante, l'épaisseur de l'isolant devient négligeable par rapport aux dimensions des conducteurs. On peut alors utiliser des méplats d'aluminium de 10 x 1 mm (NB : en France, les tensions d'alimentation sont identiques pour 25 et 250 KVA)

  D'après les calculs réalisés, à ma demande, par un constructeur français qui a étudié la substitution, à pertes identiques, de l'aluminium au cuivre sur un transformateur de 40 MVA - 60 KV (classique en distribution EDF) :

.../..

le coût total du transformateur aluminium est équivalent au coût total du transformateur analogue réalisé en cuivre, pour un rapport Pc/Pa = 1,7 (Pa = 4,2 F/kg).

- le prix de la main d'oeuvre est plus élevé : il y a plus de conducteurs à isoler, plus de fer à mettre en oeuvre, les soudures sur aluminium sont plus longues à effectuer que les soudures sur cuivre.

- le prix de la matière est moins élevé : le gain réalisé sur le conducteur (on passe de 7 tonnes de cuivre à 3,6tonnes d'aluminium) compense largement l'augmentation de prix du circuit magnétique (qui passe de 14 à 17 tonnes), l'augmentation du prix d'huile et de la cuve chaudronnée.

N.B. Le conducteur aluminium est du méplat.
N.B. Il faut prévoir une modification du poste de bobinage-soudure.

L'encombrement du transformateur sera plus grand, le bobinage plus compliqué à réaliser et le poids total équivalent.

D'après un autre constructeur (Jeumon-Schneider), la gamme de puissance comprise entre 250 KVA et 5 MVA serait justiciable dès maintenant (Pc/Pa = 1,5) de la substitution au profit de l'aluminium.

Aux U.S.A., En Allemagne, Suisse, Belgique, Angleterre, la substitution est largement amorcée (mais le niveau de pertes toléré y est plus haut). En France, E.D.F. marque une certaine hésitation à franchir le pas.

* Puissance supérieure à 40 MVA (1600 t de cuivre en France en 1970). Dans le domaine des 700-1000 MVA, on arrive avec le cuivre à des appareils de dimension et de poids très importants (420 T au total dont 220 tonnes de fer et 60 tonnes de cuivre). Les dimensions très importantes sont à la limite du gabarit ferroviaire ; le poids très élevé interdit les transports routiers. Ces transformateurs présentent de très nombreuses sorties et connexions (délicates à réaliser avec l'aluminium) et les niveaux de pertes qui leur sont imposés sont très faibles. Il semble exclu que la substitution puisse avoir lieu, à moins que le rapport Pc/Pa dépasse 4 ou 5.L'emploi de l'aluminium augmenterait de façon inacceptable (pour le transport)les dimensions de l'appareil.
N.B. L'aluminium se justifie techniquement et économiquement dans la plupart des transformateurs sans fer ou les bobinages : il est de plus en plus employé pour les électro-aimants,séparateurs magnétiques, bobinages pour automobile.
La température du service de transformation en aluminium peut dépasser 180° (avec le cuivre, elle pouvait dépasser 250°).

1.6.2.3. Conclusion

La substitution, largement réalisée à l'étranger pour des puissances inférieures à 40 MVA, marque le pas en France du fait notamment du principal client, E.D.F., qui adopte, pour l'instant, une attitude réservée à l'égard de l'aluminium.

.../...

1-7 : Moteurs (18 000 t de cuivre en 1966)(cf figures 23-24)

Les moteurs, tout particulièrement ceux utilisés dans l'industrie doivent répondre à des garanties concernant la tenue des conducteurs et des isolants à l'échauffement, la résistance aux courts-circuits (qui se produisent lorsque le moteur est bloqué pour une raison quelconque), le niveau des pertes (joules et pertes fer), le facteur de puissance (en courant alternatif) la durée de fonctionnement (40 000 heures, à comparer avec la durée de fonctionnement d'une automobile : 2 000 heures).

L'emploi de l'aluminium à la place du cuivre se traduit par une augmentation de la section des conducteurs d'un facteur supérieur à 1,7 (et non 1,6 car il y a augmentation de la longueur de spire moyenne, corrélativement à l'augmentation de section du conducteur), si du moins, on veut avoir un niveau équivalent de pertes joules. L'augmentation de la section des conducteurs entraîne, à nombre de spire par encoches équivalent, une augmentation de la section des encoches, d'où rétrécissement des dents et, partant, diminution de la section de fer offerte à l'induction. Ce phénomène est aggravé en haute tension (4 kv), car le volume de l'isolant occupe alors une place non négligeable.
Si on veut maintenir des caractéristiques (pertes, facteur de puissance, etc.. identiques à celles présentées par la solution cuivre et limiter l'influence des phénomènes de saturation, il faut augmenter la section offerte à l'induction et pour cela augmenter le diamètre (et donc le poids et le prix) ou la longueur du circuit magnétique. Le moteur devient plus volumineux et la carcasse plus chère. Un tel raisonnement s'applique aux moteurs asynchrones, à l'induit des moteurs à courant continu et des machines synchrones. On peut aussi, dans le cas des machines à courant continu ou de machines synchrones, augmenter les ampères-tours d'excitation, ce qui n'est pas une amélioration gratuite (car elle augmente la consommation d'énergie). Une telle modification est parfois difficile à réaliser notamment pour des machines multipolaires où la place disponible est limitée.

Ainsi une dynamo de 640 kv à 80 tours-minute, sous 440 volts, possédant 16 pôles a des encoches d'induit de 8,8 x 43 mm contenant des conducteurs cuivre de 1,5 x 15 mm. Avec l'aluminium il faudrait porter les conducteurs à 2 x 18 mm et les encoches à 10,3 x 49 mm. Les dents passeront alors de 12,3 x 11,6 mm à 10,8 x 10 MM ce qui augmenterait l'induction de 13 % en moyenne. On peut compenser cette augmentation d'induction dans les dents et le noyau, par une augmentation des ampères-tours de 5 % environ ou par une augmentation de longueur ou de diamètre de l'induit.

On voit donc que le passage à l'aluminium nécessite de reconcevoir totalement le moteur de façon à définir un nouvel optimum qui intègre le prix de métal, l'accroissement éventuel des pertes capitalisées, le coût de la main d'oeuvre, etc.... il n'y a aucune raison pour que cet optimum coïncide avec l'optimum relatif à un moteur cuivre du même type.

Notons que dans le prix de revient d'un moteur, le coût des matières actives (conducteurs et fer) représente en moyenne 40 %, et les opérations de bobinage 10 %.

Le passage à l'aluminium soulèverait un certain nombre de difficultés technologiques, susceptibles d'influencer défavorablement le prix de revient du bobinage :

.../...

- les caractéristiques mécaniques assez médiocres de l'aluminium pur nécessitent des précautions particulières d'autant que les conducteurs sont particulièrement maltraités lors de l'assemblage. Ainsi les "machines à tricoter" qui permettent, dans le cas de petits moteurs (moins de 3 cv) d'enfiler les conduteurs dans les encoches en moins de 10 minutes devront réduire leurs cadences de fabrication. Les machines à bobiner, qui assemblent en faisceaux les conducteurs, devront maintenir la tension et la vitesse du fil bien constantes.

- il n'existe pas de vernis qui donne satisfaction avec l'aluminium ; il est nécessaire d'effectuer avant vernissage une couche d'accrochage ou un traitement de surface. Le coût de l'isolation est 3 à 3,5 fois plus élevé à diamètre égal que pour une conducteur cuivre (cf fig. 25), cela tient-il, en partie, aux faibles quantités commandées ?
La substitution s'accompagnera donc d'investissements nombreux (frais de formation du personnel à des techniques nouvelles, refonte des programmes de calcul, machines adaptées à l'emploi de l'aluminium).

Etat et perspectives de substitutions :

a) petits moteurs électroménagers : dans ce domaine, on n'est pas très exigeant quant au niveau des pertes et des caractéristiques. L'aluminium fait son apparition : moteurs de machines à laver Hoover ou General Electric par exemple.

b) moteurs industriels :
Dans le cas des rotors de moteurs asynchrones, les constructeurs utilisent des rotors à cages d'écureuil en aluminium moulé (sous pression ou par centrifugation pour le moteur de petite taille), ou en barres d'aluminium soudées (pour les plus gros moteurs).

N.B. : aux U.S.A., on rencontre des moteurs de 500 kw à rotor en aluminium coulé sous pression.

Pour les autres types de bobinage, il semble que l'aluminium ne puisse devenir compétitif que lorsque le rapport PC/PA sera supérieur à 5 (cuivre à 18 F/Kg et aluminium à 3,5 F/kg), si on veut des moteurs de mêmes caractéristiques et supérieur à 4, si on accepte des moteurs à caractéristiques inférieures. Une diminution de frais de vernissage des conducteurs en aluminium permettrait toutefois un gain appréciable; mais on entre dans un cercle vicieux, car si la substitution ne semble pas avantageuse, jamais on ne fera de recherches sur le vernissage du fil aluminium.

Un constructeur français a effectué des études sur la substitution : en fait, les calculs ont consisté à remplacer le cuivre par l'aluminium émaillé sans changer, ni le circuit magnétique, ni la carcasse, ni les parties mécaniques de moteurs actuels normalisés pour le cuivre. On constate alors :

- une baisse sensible de la puissance utile (25 % en moyenne)
- une réduction des couples de démarrage d'autant plus importante que le moteur est petit
- une réduction des caractéristiques électriques (rendement et facteur de puissance)
- et surtout une réduction de 50 % environ du temps de tenue en court-circuit.

.../...

Si l'on prend maintenant des moteurs en cuivre et en aluminium de puissance équivalente (les deux étant constitués par des moteurs normalisés de série cuivre), on peut tracer une série de courbe (voir figure 26) qui montrent qu'en moyenne (courbe en trait gras) les moteurs aluminium ne seront compétitifs que pour une prix de base du kilo de cuivre dépassant 10 à 15 Il faut remarquer que, de toutes façons, le moteur aluminium a, en général, des caractéristiques électriques ou de tenue au court-circuit inférieures à celle du moteur en cuivre de puissance équivalente, ce qui fait que, pour motiver les clients, il faudra consentir une réduction de 5 à 10 %, sur le moteur aluminium.

Remarque : l'emploi de moteurs adaptés à l'usage de l'aluminium permettraient sans doute de meilleurs résultats.
N.B. : Notons, toutefois, que dans les pays de l'Europe de l'Est où le cuivre est rationné, seul les moteurs de moins de 10 kw utilisent de l'aluminium.

c) grosses machines tournantes (600 t de cuivre en 1965 en France)

Le cuivre pur, lui-même, cède sa place au cuivre à l'argent qui a une meilleure résistance mécanique : les conducteurs sont soumis à des efforts électrodynamiques et des efforts dus aux dilatations très importants (l'aluminium se dilatant 2 fois plus que le cuivre poserait des problèmes). De plus, au stator, on utilise souvent des conducteurs creux dans lesquels circule l'eau de refroidissement : on peut craindre des fissurations avec l'aluminium. En outre, les conducteurs présentent de nombreux raccordements (boîtes à eau, autres conducteurs) faciles à réaliser par brasage dans le cas du cuivre. Compte tenu du refroidissement, les densités de courant sont 3 à 4 fois plus élevées que dans des appareils classiques, il a donc relativement peu de cuivre : ainsi, dans une machine poussée de 500 MVA, il y a 10 tonnes de cuivre, 107 tonnes de fer actif pour un poids total de 323 tonnes. Le prix du cuivre (80 000 F environ) représente 1 % seulement du prix total qui est de 8 millions de francs actuels (dont 4 millions pour les matières : cuivre, fer, isolants et 4 millions pour la main d'oeuvre) sans compter les équipements annexes.
Substituer l'aluminium au cuivre et augmenter le poids de fer et de la carcasse corrélativement, serait une aberration dans ces conditions (on gagnerait quelques % sur la conducteur et on perdrait 20 à 30 % sur le prix du fer et de l'assemblage).
N.B. : en 1935, pour des raisons d'allègement, on avait utilisé de l'aluminium dans le rotor d'un turboalternateur, mais la tentative n'a pas été poursuivie.

d) nouveaux types de moteur :

- moteurs linéaires : il s'agit d'un moteur asynchrone développé. L'induit qui se présente sous la forme d'un rail peut être en aluminium sans problèmes majeurs. Le bobinage de l'inducteur peut être en aluminium, mais la vitesse du moteur dépend du pas polaire et donc de la largeur des encoches. De plus si l'inducteur est à bord d'un véhicule, cela peut poser des problèmes d'encombrement.

- moteurs plats : très utilisés, pour leur faible inertie et leur stabilité en vitesse, dans les asservissements, ils sont promis à un certain avenir. L'aluminium devrait pouvoir être employé.

e) Accessoires de moteurs :

- collecteurs de moteurs à courant continu : l'emploi du cuivre est absolument nécessaire pour sa conductibilité électrique, sa résistance à l'arc et ses qualités de frottement : l'aluminium est proscrit ; en cas de pénurie absolue, on pourrait utiliser des collecteurs en fer (cf : guerre).

.../...

- bagues : les contacts à bagues sont employés dans les moteurs asynchrones à résistances de démarrage et sur certains gros turboalternateurs. Certains constructeurs utilisent des bagues en acier, d'autres restent fidèles au cuivre.

- porte-balais : traditionnellement réalisés en bronze moulés ; l'emploi d'aluminium moulé s'est parfois révélé intéressant .

1-8 : Appareillage électrique (35 000 tonnes de cuivre consommé en 1965)

On classe sous cette rubrique tous les matériels autres que ceux cité précédemment et où le cuivre a un rôle électrique : disjoncteurs, armoires électriques, interrupteurs, prises de courant, engin de coupure de courant. Le cuivre est utilisé pour des raisons d'encombrement, de résistance mécanique et de tenue à l'arc de coupure.
Dans les tableaux de distribution où les questions d'encombrement ne sont pas déterminantes, les barres en cuivre peuvent être remplacées avantageusement par des barres en aluminium étamé (cf : § 1-3).
Les liaisons par câbles isolés de faible longueur à l'intérieur d'armoires électriques ne risquent guère la substitution (cf & 1-1 ou 1-4). Pour le gros appareillage réalisé en bronze moulé, il y a risque de substitution par des pièces en aluminium moulé lorsque les contraintes mécaniques le permettent, ou par des profilés soudés en cuivre qui permettent de limiter la quantité de métal rouge nécessaire. Si nous abordons maintenant le domaine des pièces permettant effectivement la fermeture ou l'ouverture du courant, toute substitution semble exclue à priori : en effet, on emploie parfois des métaux plus nobles que le cuivre (argent - tungstène). L'aluminium résisterait très mal à l'arc électrique et de plus l'aluminium serait défavorable aux contacts. Rappelons que la résistance de contact est proportionnelle à $\frac{P}{\sqrt{F}}$, P étant la résistivité et F la force de serrage ; si on utilise un métal 10 fois plus résistant que le cuivre, il faudra appliquer une force de serrage 100 fois plus importante, ce qui exigerait un dispositif mécanique complexe et donc coûteux. Ainsi, dans les interrupteurs domestiques, l'effort de serrage F est exercé uniquement par l'effet de ressort de la lame de laiton, ce qui est particulièrement peu coûteux comme dispositif de serrage. Il n'y a d'autant moins danger de substitution dans ce domaine, que le prix des pièces en cuivre est souvent négligeable devant le prix de l'appareillage : ainsi un disjoncteur moyenne tension coûte 10 000 F actuels et il peut contenir de 6 à 30 F de cuivre (dont une partie n'assurant pas des contacts électriques pourrait d'ailleurs être remplacée par de l'aluminium étamé) ; pour un disjoncteur d'abonné qui coûte 60 F, il y a 100 grammes de cuivre soit 0,8 F environ.

Dans le domaine de l'appareillage électrique, la substitution sera variable suivant les domaines : nulles pour les pièces de contact, elle pourrait progresser dans le domaine où le cuivre ne joue que le rôle de conducteur (barres de tableaux de distribution, par exemple). Il est possible aussi que l'aluminium gainé de cuivre par coétirage puisse constituer la panacée universelle notamment lorsque les conducteurs ont des sections importantes : c'est le domaine du "copperclad" si cher à nos amis anglais.

1-9 : Culots de lampe (700 à 1 000 tonnes de cuivre consommé en France en 1970)

Les culots de lampes sont façonnés par repoussage à partir de disques en laitons. L'aluminium étamé ou non fait son apparition aux U S A,

pour des culots à vis (et non à baïonnette comme en France) : il faudrait donc, pour passer à l'aluminium modifier les habitudes des fabriquants de lampes. L'alumine ne semble pas gênante : la friction du culot contre la douille suffisent sans doute à l'éliminer.

N.B. : Les douilles primitivement en laiton sont maintenant en acier laitonné ; on réalise aussi des douilles en aluminium "colorées psycologiquement en jaune laiton". Est-il besoin de rappeller que les douilles n'ont aucun rôle de conduction d'électricité !

1-10 : Applications cryogéniques

Il faut soigneusement distinguer la supraconductivité et l'hyperconductivité.

Le deuxième phénomène repose sur la diminution de la résistivité avec la température. L'aluminium, au delà de 2 tesla et à 4,2°K a une magnétorésistance bien plus faible que celle du cuivre : ainsi sous un champ de 4 tesla à 4,2 °K, la résistivité totale de l'aluminium est de $0,6 \times 10^{-10}$ Ωm et celle du cuivre de 1×10^{-10} Ωm. A 20°K, le cuivre remonte une partie de son handicap.

N.B. la magnétorésistance qui prend une certaine importance aux basses températures traduit la variation de résistivité en fonction du champ magnétique appliqué au conducteur.

La supraconductivité (voir figure 27) fait appel à un phénomène original : à l'intérieur d'un domaine de température et de champ la résistivité du matériau supraconducteur est nulle. Par contre, si le courant varie légèrement, il peut y avoir, par suite de phénomènes complexes, un dégagement local de calories (qui traduit un "saut de flux") qui peut amener une perte réversible de supraconductivité : pour éviter que tout le supraconducteur ne soit perturbé, on le divise en filaments très fins noyés dans un matériau hyperconducteur (et bon conducteur de la chaleur) le cuivre ou l'aluminium : un des avantages de l'aluminium est, nous l'avons vu, sa faible magnétorésistance à 4,2°K sous champs forts, ses caractéristiques mécaniques médiocres peuvent être compensées par l'adjonction de fils d'acier inoxydable qui renforce le conducteur. Notons qu'à l'heure actuelle, la supraconductivité en courant alternatif s'accompagne de pertes énormes : on préfèrera donc utiliser l'hyperconductivité dans ce cas. Compte-tenu du prix de la réfrigération, on ne peut envisager des applications cryogéniques que dans le cas où des énergies très fortes sont mises en jeu : liaisons par câbles (pour des puissances supérieures à 1 000 MW), turboalternateurs à inducteur supraconducteur, transformateur hyperconducteur, etc.... Là, encore, rien ne s'oppose à l'emploi de l'aluminium à la place du cuivre.

1-11 : Conclusion

La substitution de l'aluminium au cuivre est d'autant plus facile que l'environnement du conducteur est moins complexe : ainsi les cables aériens nus et les barres sont passées à l'aluminium, les câbles isolés y viennent progressivement ; dans le cas des machines électriques, où sont mis en oeuvre des phénomènes d'origine magnétique, on rencontre un noyau dur de résistance : aux cours actuels du cuivre, seuls les transformateurs de distribution semblent prêts à tomber dans les rêts de l'aluminium, les clients peu exigents sur les niveaux de pertes ayant déjà franchi le pas pour les petites machines électriques. En fait, mis à part quelques cas particuliers (pièces de contact, collecteurs, etc....) qui représentent des tonnages assez faibles, il semble que le cuivre ne soit pas irremplaçable ; du fait de l'achèvement de la mise

au point d'une technologie aluminium, l'industrie électrique mondiale ne serait pas désorganisée de façon durable par une pénurie de cuivre.

L'aluminium qui combat le cuivre ne sera-t-il pas la victime du sodium, métal très abondant, qui, mis sous gaine de plastique (afin d'éviter l'oxydation), pourrait constituer un conducteur bon marché. Verra-t-on en l'an 2030, un jeune camarade, palir sur le sujet "les substitutions de l'aluminium par le sodium dans la construction électrique" ?

Remarquons aussi qu'en matière électrique, la substitution est toujours irréversible.

N.B. : Nous n'avons pas parlé du cuivre utilisé en électronique car les tonnages sont négligeables. Le cuivre semble difficilement substituable.

Par suite d'une erreur de numérotation, il n'y a pas de paragraphe /2/

/ 3 - BATIMENT /

(64 000 tonnes de cuivre en 1970)

Une des particularités du bâtiment est que les matériaux y sont mis en oeuvre le plus souventpar des artisans relativement réfractaires aux bouleversements technologiques : notons aussi que du fait de la multitude des opérateurs tout effort de formation à des techniques nouvelles serait d'un coût prohibitif.

De plus dans ce secteur, la part de la main d'oeuvre dans les prix de revient est prépondérante.

Le cuivre entre aussi bien dans l'édification du gros oeuvre (toiture) que dans les travaux d'aménagements intérieurs (tuyauterie d'eau, sanitaires, gaz, chauffage) et les équipements fixes : chauffe-eau, robinetterie, quincaillerie, etc. ...

N.B. : La rubrique "batiment" exclut le matériel électrique.

3-1 : Installations : (29 000 tonnes de cuivre en 1965)

Dans les travaux d'installation, le cuivre qui a remplacé le plomb, plus cher à l'achat et plus délicat à mettre en oeuvre est principalement utilisé sous forme de tubes en cuivre (Cu/b). Sa facilité de mise en oeuvre permet de réduire les coûts de main d'oeuvre.

3-1-1 : Distribution d'eau (chaude ou froide) et chauffage central :

(25 500 tonnes de cuivre en 1965) (cf. tableau 28 bis).

L'acier galvanisé (raccordé par vissage) et le cuivre (raccordé par brasage capillaire) se partagent le marché. En France, en Angleterre et aux Etats-Unis, on emploie beaucoup de cuivre et l'on réserve l'acier aux colonnes montantes (qui sont droites et ne nécessitent pas un cintrage long et coûteux). En Allemagne, on emploie moins de cuivre. En plus de sa commodité de mise en oeuvre (cintrage et brasure facile à réaliser avec formation réduite) le tube en cuivre possède une très bonne résistance à la corrosion (eaux, matériaux de construction), une résistance à des pressions intérieures considérable permettant l'emploi de tubes de faible épaisseur (ainsi un tube de diamètre extérieur de 12 mm et d'épaisseur 1 mm résiste à une pression de 440 Kg/cm2) de plus en cas de gel, le cuivre par son élasticité se dilate et n'éclate pas.

Le bilan économique doit faire intervenir, en effet, le coût des tubes et la main d'oeuvre de pose ; qui est un facteur prépondérant : pour poser 15 mètres de conduite en cuivre de 10 x 12 mm le temps de pose est de 7 à 9 heures ("si ça fait 7 heures, on compte neuf heures car la journée est perdue" m'a dit un entrepreneur de plomberie) ; avec un taux horaire de 23 F., le coût de main d'oeuvre se monte à 210 F alors que le coût des tubes se monte à 90 francs environ.

L'utilisation de l'acier galvanisé, qui peut sembler attractive en raison du coût plus faible des tubes (50 % d'économie par rapport au cuivre), se justifie moins si l'on prend en compte les frais de main d'oeuvre : le cintrage est plus difficile qu'avec le cuivre ; le filetage des extrémités et les vérifications d'étanchéité des raccordements sont des opérations plus longues que la soudure capillaire du cuivre. Si le prix du cuivre dépassait 10 F/Kg, il est probable que l'acier protégé se substituerait au cuivre.

N.B. : Actuellement, on réserve l'acier aux conduites toutes droites (voir ci-dessus).

Les tubes en plomb sont plus chers à l'achat que les tubes en cuivre (ils ont une épaisseur plus forte, compte-tenu des faibles caractéristiques mécaniques du métal) ; ils sont assez délicats à mettre en oeuvre : les brasures exigent un certain tour de main et il faut éviter l'écrasement du tuyau lors des cintrages Cela explique que le plomb ait cédé sa place au cuivre. Il pourrait toutefois redevenir compétitif si les cours du cuivre doublaient ; encore faudrait-il trouver des plombiers capables de travailler le plomb.

En fait le danger vient surtout de produits nouveaux ou de métaux "anciens" conditionnés sous une forme attractive .

Compte-tenu des caractéristiques de la profession d'installateur, tout produit nouveau doit pouvoir être mis en oeuvre par des procédés simples ou identiques aux procédés traditionnels. Les produits nouveaux ne pourront d'ailleurs avoir un impact important que dans la construction neuve, qui représente un tonnage assez faible (8 000 tonnes sur 22 500 tonnes) ; lors des modifications ou réparations sur installation ancienne, on garde, en effet, le même métal pour des questions de commodité ; de plus, c'est le plombier et non le client qui choisi le matériau à utiliser, il y a gros à parier qu'il utilisera le cuivre, même s'il est peu sensible aux théories concernant la corrosion galvanique.

Les nouveaux rivaux du cuivre sont au nombre de trois :

a/ Tout d'abord les aciers inoxydables : UGINE pense utiliser un acier à 17 % de chrome et 1 % de molybdène ; la résistance à la corrosion serait de ce fait comparable à celle du cuivre. La meilleure résistance mécanique de l'inox permettrait d'utiliser des tubes d'épaisseur plus faible (0,6 mm au lieu de 0,8 - 1 mm pour le cuivre) ; le cintrage des tubes peut s'effectuer dans les mêmes conditions qu'avec le cuivre. Compte-tenu de la bonne déformabilité à froid des inox, on peut effectuer des raccords, par "collets battus" (comme avec le cuivre). Reste le problème des "soudures" : les brasures inox sur inox sont difficiles à réaliser ; on emploiera donc des manchons en cuivre, la brasure capillaire inox-cuivre s'effectue alors de la même manière que la brasure capillaire cuivre - cuivre.

./...

Toutefois les flux décapants chlorhydriques sont interdits avec l'inox, il faut employer un flux phosphorique qui doit travailler dans un intervalle de température plus étroit.

N.B. : La différence du potentiel entre cuivre et inox est faible : elle n'est pas dangereuse quant à la corrosion galvanique.

Le gain sur le prix des tubes serait de l'ordre de 30 % : le prix de l'inox 17 % de chrome et 1 % de molybdène ne dépasse pas 5 F/Kg, de plus les tubes d'épaisseur plus faibles que dans le cas du cuivre permettent une réduction du volume de métal employé au mètre. Si le temps des raccordements est doublé, les conséquences sur le temps de pose sont faibles, car les temps consacrés aux brasures sont faibles devant le temps total de mise en oeuvre (cintrage, pose des colliers, etc. ...) Ce type de produit sera d'ailleurs lancé en liaison avec les plombiers et leur syndicat professionnel.

N.B. : en Angleterre, on utilise de l'inox 18-8 cuivré.

b/ Viennent ensuite les alliages d'aluminium :

On pense employer du duralumin assemblé par collage à la résine. Les tubes seront protégés intérieurement contre la corrosion par un revêtement en résine époxy (qui résiste jusqu'à une température de 90° C). Le prix au mètre serait 2,2 fois plus important que dans le cas de l'acier noir,et donc pratiquement équivalent au prix au mètre du tuyau cuivre. Le coût de la main d'oeuvre serait légèrement réduit par rapport à la solution cuivre, mais il faudrait former les ouvriers à la technique du collage.

c/ Les matières plastiques :

Le P.V.C. chloré peut résister à 100° et 7 bars ce qui convient même aux distributions d'eau chaude sous pression ou à 110° et 2 bars, ce qui convient pour les installations de chauffage sanitaire. Une difficulté vient de ce que les polymères se dilatent beaucoup plus que les métaux : il est donc nécessaire de prévoir des joints de dilatation, à moins de consentir à des trajets d'installation assez astreignants.

On note une bonne tenue dans le temps des installations (essais réalisés au C.E.B.T.P.), meilleure même que pour les métaux. Les caractéristiques et prix hors taxe de ces conducteurs sont donnés dans le tableau ci-après :

./...

Diamètre extérieur (en mm)	Epaisseur (en mm)	Prix au mètre en francs départ usine
16	1,6	1
20	1,6	2,2
25	2	1,75

Cette solution apporte une économie appréciable sur le matériau et légère sur la main d'oeuvre : car le raccordement se fait par collage (cf. aluminium). Les polymères, une fois vaincu le préjudice d'une image de marque peu reluisante dans le public, seront des rivaux très dangereux pour le cuivre.

3-1-2 : Evacuation des eaux usées

Ces évacuations ne subissent pas de pression élevées : les matières plastiques sont convenables ; toutefois jusqu'à une date récente, l'emploi de polymères dans les évacuations d'eau chaude était impossible. A l'heure actuelle, il existe des polymères qui résistent à la chaleur. C'est le cas de l'avalène 1 (Pont à Mousson). Vu son coefficient de dilatation élevé (1 x 10), il est nécessaire deprévoir des joints de dilatation. La résistance aux chocs, à la corrosion et à la température de l'avalène 1 est importante. Le prix d'une telle substance est très inférieur au prix du tube cuivre de section équivalente ; comme le montre le tableau ci-dessous.

Matériaux	Diamètre extérieur (mm)	Masse métrique (Kg)	Prix métrique départ usine hors taxe (Fr.)
Avalène 1	32	0,177	2,85
= polypropylène	40	0,224	3,68
	50	0,284	4,39
Cuivre	40	1,1	10

Les raccordements sont simples à exécuter : ils se font par simple pression, un joint spécial "m" assurant l'étanchéité ; le sciage du tube doit toutefois être réalisé à 90° et l'ébavurage du tuyau doit être soigné. Le coût de la pose sera réduit. Pour faire un bilan économique complet, il faut toutefois tenir compte du prix des manchons (3 F pièce), des joints spéciaux "m" (0,4 F pièce) et des joints de dilatation (4,75 F pièce).

Le cuivre, qui avait déjà perdu une part importante du marché des évacuations d'eau froide, risque encore de perdre des points.

/...

3-1-3 : Distribution du gaz (3 000 tonnes de cuivre consommé en France en 1965).

Le cuivre, qui résiste bien à lapression (les pressions de service sont de 3 à 4 Kgf/cm2), qui est facile à raccorder par brasure capillaire (quelques heures d'apprentissage suffisent) donne des conduites résistantes et esthétiques. Il se corrode peu grâce à son potentiel galvanique.

Les rivaux sont nombreux :

a/ l'acier traditionnel :

Pour des questions d'étanchéité, les tubes soivent être soudés bout à bout ce qui est très délicat à réaliser (l'apprentissage est long) et qui donne un résultat peu esthétique : en outre, si le gaz est humide, les bosselages et les creux au droit de raccordement peuvent être le siège de corrosions.

L'acier est certes moins cher que le cuivre, mais son mode de raccordement est très coûteux. Le bilan économique n'est pas en sa faveur, d'autant qu'il ne donne pas des installations très esthétiques (on ne l'emploie que dans les installations industrielles.

b/ l'acier de la série extralégère galvanisé :

On peut assembler les tuyaux par brasure capillaire à 750°, à condition que le calibrage des tuyaux soit très précis. Mais, la brasure nécessite le décapage préalable du zinc.

c/ le plomb (voir § 3-1-1)

d/ l'aluminium :

Les conduites en aluminium sont faciles à raccorder par collage, le cintrage est facile. On peut utiliser des conduites à peine plus épaisses que dans le cas du cuivre ; compte-tenu des cours respectifs des deux métaux, on peut s'attendre à un développement de l'usage de l'aluminium. G.D.F. envisage de l'utiliser dans les réseaux en façade ou les artériolles aériennes en rase campagne : la légèreté et la résistance à la corrosion atmosphérique de l'aluminium étant des facteurs favorables. Il doit être possible de l'utiliser dans les installations domestiques et les colonnes montantes d'immeuble, mais dans ces deux cas, ce sont aux promoteurs de choisir (et non à G.D.F.).

e/ Les matières plastiques :

Malgré leurs avantages (cf. § 3-1-1), on évite de les employer par raison de sécurité dans les installations domestiques où elles peuvent subir des chocs thermiques ou mécaniques dangereux pour leur tenue.

N.B. : Aux U.S.A., on les emploie couramment. En France, on ne les emploie qu'entre les canalisations urbaines et le bas des colonnes montantes des immeubles. L'aluminium semble le rival le plus dangereux du cuivre.

/...

3-2 : Appareils de production d'eau chaude : Ils ont consommé 5 500 tonnes de cuivre en 1965 en France.

Trois types d'appareils se partagent le marché : chauffe-eau électriques, chauffe-eau instantanés au gaz et chaudières de chauffage-central.

3-2-1 : Chauffe-eau électrique :

Le cuivre est utilisé dans ce type de chauffe-eau pour sa résistance à la corrosion. En fait dans certains cas, pour limiter la consommation de cuivre, on peut utiliser une virole en acier avec plaquage de cuivre, les fonds restant en cuivre. Une autre solution consite à utiliser des cuves émaillées (ou vitrifiées) ou des cuves en acier galvanisé. La durée de vie des cuves en acier galvanisé est inférieure à la durée de vie des cuve en cuivre, si j'en juge par le fait que la durée de garantie d'un chauffe-eau à cuve en cuivre est double de celle d'un chauffe eau à cuve en acier galvanisé. Une autre solution consiste à utiliser des cuves en acier inoxydable (18-8 avec molybdène et bas carbone) mais elles nécessitent des précautions de conception pour éviter la corrosion par les ions Cl.

3-2-2 : Chauffe-eau instantané au gaz :

On peut citer aussi dans cette rubrique les chaudières murales mixtes au gaz qui risquent d'être appelées à un bon développement et qui fonctionnent suivant le même principe que les chauffe-eau instantanés: lorsque l'on ouvre le robinet d'eau chaude de l'installation, le brûleur s'allume : les gaz de combustion(cf figure 28) traversent le corps de chauffe, puis un échangeur à ailettes ; ils cèdent 15 % des calories utiles au corps de chauffe qui les rétrocède au tuyau d'eau froide enroulé autour de lui, les calories restantes (85 %) sont cédées à l'échangeur qui les transmet au tube d'eau qui le traverse. On conçoit dans ces conditions que le corps de chauffe, l'échangeur et le tube d'eau doivent avoir une conductibilité thermique très élevée. De plus l'atmosphère des fumées est très corrosive, compte-tenu de la température élevée qui règne dans le corps de chauffe (300° C environ). Il n'est donc pas étonnant que tous ces composants soient en cuivre, qui présente en outre une grande facilité de mise en oeuvre : ainsi le corps de chauffe est embouti et l'ensemble (constitué par les ailettes, le corps de chauffe et le tube est brasé en une seule opération à 800° après étamage. On a intérêt à réaliser d'autre part des ensembles homogènes en un seul métal : tous les éléments ont alors une durée de vie comparable et les corrosions galvaniques dues aux éventuelles condensations sont nulles. Le cuivre est donc difficilement substituable : chaque chauffe-eau contient de ce fait 3 Kg de cuivre.

Certains constructeurs réalisent un corps de chauffe en acier inoxydable, mais les calories absorbées par l'inox se perdent par rayonnement et ne se transmettent pas à l'eau, on est donc conduit à augmenter la taille de l'échangeur pour avoir des performances convenables : globalement, cette solution nécessite moins de cuivre, mais est plus onéreuse au montage.

./...

L'aluminium qui a une conductivité proche de celle du cuivre n'est pas envisageable pour le tuyau (risque de corrosion par certains types d'eau).

L'acier normal ne peut non plus être envisagé pour les ailettes car les fumées sont très corrosives. Si l'on utilise de l'acier inoxydable, les ailettes rougissent et ne transmettent pas de calories à l'eau (l'inox est, rappelons-le un très mauvais conducteur de la chaleur).

Si les cours du cuivre, augmentent de façon importante, cela se traduira sur le prix global de l'appaleil, entraînant éventuellement une baisse de la demande de tels appareils.

En dehors du corps de chauffe, un tel appareil nécessite aussi du laiton pour les pièces du circuit d'eau et de gaz. Pour le circuit gaz, on peut remplacer le laiton par des pièces en zamak coulé sous pression (nous avons vu à la première partie que ce métal résistait bien au contact du gaz), moins onéreuses à cause d'un prix-matière plus faible et d'un procédé peu coûteux de mise en oeuvre.

En ce qui concerne le circuit d'eau, le laiton est employé pour sa résistance à la corrosion, toutefois certains constructeurs utilisent des pièces moulées en polymères pour leurs circuits d'eau : ces matières synthétiques peuvent en effet résister à 90° et 3,5 KG /cm2 en service continu et des améliorations technologiques permettront de porter ces valeurs à 100° et 7 KG /cm2. Les pièces ainsi réalisées sont très résistantes (leur mécanique intérieure travaille 30 à 40 fois chaque jour) et peuvent être assemblées avec des écrous en laitons. Ainsi donc, le laiton se trouve pratiquement totalement éliminés de l'intérieur de l'appareil. Seuls demeurent en laiton les raccordements à l'installation pour ne pas déconcerter les plombiers.

3-3-3 : Chaudières :

L'emploi de serpentins en cuivre dans les chaudières de chauffage central se développe depuis quelques années. Si le prix du cuivre dépassait 8 à 9 F. au lilo, on utiliserait l'ancienne solution : tuyaux de fonte dans les parois de la chaudière.

Certains ballons d'eau chaude sont aussi en cuivre, ils pourraient être remplacés par de l'acier inoxydable (18-8 avec molybdène et bas carbone) sous réserves de précautions dans le dessin (éviter les replis susceptibles de favoriser la corrosion par l'ionchlore). On peut aussi utiliser de l'acier protégé.

./...

3-3 : Robinetterie (40 000 tonnes de laiton consommées en France en 1970, soit 25 000 tonnes de cuivre contenu)

La majorité des robinets est réalisée en laiton à 40 % de zinc, le corps (partie où circule l'eau) est réalisé par moulage en coquille ou, suivant une évolution récente, par matriçage; la tête (partie solidaire du bouton de manoeuvre et qui se visse dans le corps) est obtenue par décolletage. En France, on utilise le laiton 60-40 qui est facile à matricer, et à usiner. Aux U.S.A., où les eaux sont plus agressives, on emploie le bronze, bien qu'il ne puisse se mouler qu'en sable (procédé onéreux).

Il est possible de limiter l'emploi des cuivreux : certaines pièces tels que les croisillons (bouton de manoeuvre) qui ne sont pas en contact permanent avec l'eau peuvent être en céramique, en zamak chromé ou même en polymère ABS chromé, mais dans ce dernier cas, le chromage ne tient pas de façon durable ; les sièges de pastilles peuvent être aussi en plastiques.

Une conception astucieuse des robinets visant à remplacer l'enveloppe par un tube en inox et à limiter le laiton à la seule tête permet aussi de limiter l'utilisation de laiton.

Les robinets tout en zamak (utilisés pendant la guerre) ne peuvent pas être des "ersatz" valables car le zamak se corrode en présence de la plupart des eaux avec formation de produits gonflants qui provoquent des grippages

Certains alliages d'aluminium (AU 5 GT) utilisés pour les raccords d'incendie auraient des filetages suffisamment solides; malheureusement, ils résitent assez mal à certaines eaux agressives (et il semble difficile d'employer un alliage d'aluminium adapté à chacune des régions de France et de Navarre). Une solution satisfaisante à priori, consisterait à faire appel à des aciers inoxydables appropriés : s'ils donnent satisfaction quant à leur résistance à la corrosion, ils sont, par contre difficile à mouler et les coûts de décolletage sont assez élevés (voir 1ère partie § 3-7-3). Ils ne deviendront compétitifs avec le laiton que si le prix du laiton dépassait 20 F au kilo (rappelons qu'il vaut 5,5 F/Kg actuellement).

On pourrait aussi songer à utiliser la fonte malléable, très employée dans les raccords de plomberie. Mais il faudrait prévoir pour lui donner un bon aspect de surface, un polissage, un flash cuivre, une sous-couche de nickel et une couche de chrome, ce qui risque d'être coûteux.

En fait le risque de substitution vient plutôt des matériaux nouveaux tels que les polymères :

- Les Anglais (I.C.I) ont réalisé des robinets en résine acétale, par simple transposition des robinets actuels,

- des fabricants français étudient une autre solution qui consiste à modifier totalement la conception des robinets de façon à les adapter à un matériau nouveau qui résisterait d'ailleurs à des pressions de l'ordre de 7 bars et à des températures de l'ordre de 100° sans modification notable des cotes. On pense mettre au point des plastiques injectables permettant de se passer de tout usinage, d'où gain sur les coûts de fabrication.

Il semble donc que d'ici quelques années les robinets en laitons auront des concurrents sérieux. Il faut toutefois noter que, la robinetterie française étant aux mains des fondeurs, ces derniers ne sontpas pressés d'abandonner le laiton

3-4 : Toiture (1 200 tonnes de cuivre consommé en 1970 en France)

Il s'agit d'un marché particulier limité en principe aux monuments historiques, le cuivre prenant au contact de l'air et de la pluie, une belle patine vert-de-gris.

Notons toutefois qu'en ITALIE, on recouvre quelques maisons particulières de cuivre et on installe des descentes d'eau de pluie en métal rouge (ou plutôt vert !). Peut être faut-il y voir une influence de la mode ou alors le sens de l'intérêt bien compris : en effet une couverture ou une canalisation en cuivre sont pratiquement inusables, alors qu'une couverture en tôles galvanisées ne dure que trente ans, et que les couvertures en tuiles ou ardoises se détériorent elles aussi à la longue.

3-5 : Quincaillerie : (4 600 tonnes de cuivre en 1970) :

La quincaillerie du bâtiment fait traditionnellement appel au laiton (ou plus généralement au cuivreux) pour sa belle couleur jaune, sa résistance mécanique, sa facilité de mise en oeuvre (matriçage - usinage), sa durée de vie.

Ce marché est difficile à cerner, car il se caractérise par une très grande variété de pièces et d'objets fabriqués par des industries très diverses : paumelles, charnières, éléments de serrures, crochets, supports, accessoires de salles de bains, etc. ... Si l'on désire avoir des pièces ayant à la fois une bonne résistance mécanique et une couleur jaune laiton, on peut remplacer le laiton par le l'acier laitonné : paumelles, charnières, gaches de verrou par exemple, sont susceptibles d'une telle substitution, l'augmentation du coût de mise en oeuvre pouvant être réduit par une conception astucieuse des pièces ou étant compensé par une économie sur le coût de la matière première.

Dans le cas, où la résistance mécanique n'est pas essentielle, le zamak coulé sous pression et laitonné convient très bien : l'économie sur la matière première et la mise en oeuvre compensent largement le coût du laitonnage : ainsi les accessoires de salle de bain (porte-serviette, supports de tablettes), poignées et pieds de meubles, éléments de serrures, quincaillerie d'ornement peuvent être commodément réalisés en zamak coulé sous pression puis chromé ou laitonné.

N.B. : Il faut remarquer que le laitonnage superficiel n'a pas une durée de vie extrêmement longue.

Si toutefois les reflets roux du laiton ne sont pas des objectifs majeurs, l'aluminium ou l'acier inoxydable ont de belles places à prendre : ne constate-t'on pas à l'heure actuelle un intérêt croissant pour les métaux blancs.

./...

3-6 : Conclusion :

Dans le secteur du bâtiment, les rivaux du cuivre sont extrêmement variés ; la substitution n'agit pas à visage découvert comme dans le cas des applications électriques, les concurrents les plus dangereux des cuivreux sont en effet, des polymères encore inconnus du grand public. O ironie du sort, c'est dans un secteur où les opérateurs sont traditionnalistes que l'on risque de voir apparaître des matériaux assez inédits ; ceci risque d'ailleurs d'avoir des conséquences importantes sur la réalisation effective des substitutions : nous en reparlerons.

/ 4 - LES TRANSPORTS /

(34 000 tonnes de cuivre en 1965)

Une des caractéristiques de ce secteur est la nécessité d'avoir un matériel fiable, soit que des vies humaines en dépendent, soit que les coûts d'immobilisation entraînés par des pannes soient prohibitifs. Un autre impératif est la légèreté des appareils employés.

4-1 : La route (21 000 t de cuivre en France en 1970)

Compte-tenu des prix du cuivre, les constructeurs se sont efforcés de réduire le plus possible l'emploi de cuivre : en effet la construction automobile se caractérise la plupart du temps par de grandes séries : une économie même mineure sur une pièce particulière se traduit en fin de compte par un gain total assez important : encore faut-il que le calcul économique soit bien fait et prenne en compte le paramètre fiabilité. Un exemple vient à l'esprit : la substitution de l'aluminium au cuivre dans une rondelle d'étanchéitée du circuit de freinage apportait une économie de quelques centimes par véhicule; en fait, la corrosion a obligé le constructeur à réparer tous les véhicules encore sous garantie, d'où une perte de plusieurs millions.

En fait, les constructeurs d'automobiles risquent d'être obligés de limiter leur consommation de cuivre par suite de l'intervention des sidérurgistes qui s'inquiètent de la teneur en cuivre des ferrailles (automobiles comprimées) : le cuivre est génant lors du laminage à chaud. Une automobile comporte en effet 11 à 15 kilos de cuivre dont 60 % environ provient d'organes à rôle électrique.

4-1-1 : Radiateurs (4 000 tonnes de cuivre en 1965)

Les calories du fluide à refroidir passent par conductibilité (voir figure 29) dans les ailettes qui les cèdent par convection au milieu extérieur. Les ailettes étaient traditionnellement en cuivre, très bon conducteur de la chaleur, les boites et tubes à eau en laiton (contenant entre 20 et 40 % de zinc) qui a de bonnes caractéristiques mécaniques, résiste bien à la corrosion, et est facile à emboutir.

Sans modifier le dessin au radiateur (pour éviter des investissements nouveaux), les établissements Chausson ont remplacé depuis longue date les ailettes-cuivre par des ailettes-acier brasées à l'étain sur les tubes en laiton.

L'acier conduit la chaleur 7 fois moins bien que le cuivre, mais une augmentation de l'épaisseur des ailettes a permis de limiter la perte d'efficacité thermique à 15-20 %. Il serait possible d'avoir une efficacité identique en augmentant le nombre de tubes, mais cela nécessiterait une adaptation coûteuse, voire inutile (si on veut un radiateur plus efficace, on peut prendre des ailettes en cuivre) des outils de fabrication. L'acier est recouvert de peinture anti-corrosion ; il a donné toute satisfaction : depuis 1930, la plupart des véhicules français ont des radiateurs à ailettes acier.

N.B. : Un radiateur de R 12 pèse 5 kilos, soit 2,5 KG de cuivre contenu dans le laiton.

Deux autres solutions sont possibles :

a/ La réalisation d'un radiateur tout en aluminium (deux fois moins bon conducteur de la chaleur que le cuivre) : il faut doubler l'épaisseur des ailettes (les ailettes d'aluminium auront une épaisseur de 1,4 mm). La corrosion par l'air ambiant a été jugulée par l'emploi d'une peinture spéciale. La brasure des ailettes sur les tubes et des tubes sur les boites à eau (elle utilise un alliage Aluminium-siliciul à 8 % de silicium) est beaucoup plus résistante que la brasure employée avec les tubes en laiton; elle équivaut à une soudure autogène. L'aluminium a été employé avec succès dans les radiateurs à huile (2 CV, 3 CV, GS). Par contre, dans le cas des radiateurs à eau, la corrosion interne du circuit d'eau ne peut être évitée que par l'adjonction d'inhibiteurs de corrosion, d'où l'intérêt des cricuits de refroidissement scellés.

Aux cours actuels du cuivre et de l'aluminium, l'économie serait de l'ordre de 15 %, toutefois le passage à l'aluminium nécessite une chaîne de fabrication nouvelle. Il semble que Chausson ait choisit la solution aluminium, aboutissement de longues études que les concurrents (U.S.A. notamment) n'ont pas encore achevées.

b/ La réalisation d'un radiateur où les parties en contact avec l'eau de refroidissement sont en acier inoxydable, les ailettes étant en acier étamé. Les jonctions se feraient par brasure à l'étain, comme dans la solution traditionnelle (avec les risques de fissurations que comportent ce type de brasure). L'avantage de cette solution réside dans le fait que les chaînes de fabrication traditionnelles sont réutilisables sans grosses modifications : toutefois, l'inox moins facile à emboutir que le laiton (boite à eau) nécessite une modification légère du dessin des boites à eau. Le prix de revient d'un tel radiateur se situe entre celui de la solution classique en laiton et celui de la solution aluminium. L'emploi de polymères dans la réalisation des boites à eau permet d'améliorer un peu le score.

N.B. : La substitution est envisageable si le rapport du prix du cuivre et du prix de l'aluminium dépasse 1,30.

./...

4-1-2 : Carburateurs (450 T de cuivre en 1965 en France)

Le laiton est utilisé pour les pièces décolletées : gicleurs, visserie, volets d'admission d'air. En plus de sa facilité de décolletage, le laiton "ne grippe pas" avec des carburateurs en zamak : certaines pièces pourraient être réalisées en acier protégé: la décision dépend du bilan économique incluant le prix matière et le prix du décolletage. (cf. 1ère partie § 3-7-3). Toutefois le coefficient de dilatation de l'acier est assez différent de celui du zamak, alors que les coefficients de dilatation du laiton et du zamak sont voisins (la température d'un carburateur peut varier entre 0 et 250° : les problèmes de dilatation ont leur importance).

Le laiton, utilisé dans les flotteurs a été remplacé par les matières plastiques qui donnent de meilleurs résultats : la substitution devient irréversible.

La réalisation future de carburateurs en plastique pourrait permettre à l'avenir de supprimer le laiton.

4-1-3 : Joints de culasse : (750 t de cuivre en 1965 en France)

Les culasses et les différents orifices du bloc moteur (emplacement de bougies, collecteurs de fumées d'échappement, etc. ...) étaient garnis de joints d'étanchéité en cuivre dont la malléabilité et la résistance mécanique étaient appréciées. L'augmentation du taux de compression et les cours élevé du cuivre ont incité les constructeurs à se tourner vers l'acier galvanisé (qui s'est révélé trop dur à l'usage), vers les complexes à base d'amiante et les matières plastiques qui ont donné satisfaction. Les joints en cuivre ne sont donc plus utilisés que pour les réparations de vieux véhicules.

4-1-4 : Freins et embrayages (900 tonnes de cuivre utilisé en France en 1965)

Le cuivre, utilisé principalement dans les circuits de freinage pour sa résistance à la corrosion est de plus en plus souvent remplacé par de l'acier protégé (par galvanisation, peinture, ou cuivrage), dans les rondelles d'étanchéité où il est difficilement remplaçable (cf. début du § 4), dans les garnitures de frein.

Dans ce dernier domaine, où l'empirisme est roi (faute de théories scientifiques satisfaisantes), le cuivre intervient, en association avec des produits organiques divers, sous forme de poudres ou de fils (dans les garnitures importantes) : son rôle, mal élucidé, procède de ses propriétés mécaniques (bonnes caractéristiques de frottement) et thermiques (il favorise l'évacuation des calories). Dans certaines "formules" de garnitures, on peut le remplacer par de l'aluminium ou d'autres substances, mais le paramètre "qualités de frottement" reste incertain.

./...

4-1-5 : Utilisations électriques (10 000 T de cuivre en 1965)

Dans un véhicule automobile, les vibrations et les exigences de fiabilité sont des contraintes importantes.

4-1-5-1 : Faisceau électrique : (2 700 tonnes de cuivre en 1965 en France) :

Il s'agit de cables souples, de faible section et de longueur réduite (4 à 5 mètres au maximum). Compte-tenu du grand nombre de raccordements à effectuer sur chaque véhicule (une centaine), on effectue avec le cuivre un sertissage (par cosse) sur machines automatiques. Trouvera-t'on un alliage d'aluminium permettant de réaliser des cables souples résistant à la corrosion (sel de déneigement sur les routes), au vibrations et susceptibles de raccordements fiables réalisables sur machine automatique ? Les producteurs d'aluminium se penchent sur le problème.

4-1-5-2 : Câbles de batterie :

Les câbles de batterie sont courts en général (moins de 50 cm), l'économie apportée par un câble en aluminium, compte-tenu du prix des raccordements serait faible, sinon nulle, aux prix actuels du cuivre La durée de vie d'un câble en aluminium soumis à des vibrations est sujette à caution.

4-1-5-3 : Générateurs et moteurs électriques (5 600 T de cuivre en 1965 en France) :

On tend à substituer des aimants permanents aux inducteurs bobinés ce qui réduit le poids de cuivre. Les induits de démarreur dont le fonctionnement est intermittent pourraient être réalisés en aluminium. Pour les autres types de bobinage de moteurs, l'aluminium pourrait être employé, si on n'était pas trop exigeant sur le niveau des pertes ou si les cours du cuivre augmentaient de façon importante.

4-1-5-4 : Equipements électriques divers (1 700 t de cuivre en 1965).

Il s'agit des dispositifs d'allumage, bobines, lampes, etc. ...

Certains constructeurs ont mis au point des bobines d'allumage en conducteur aluminium, métal qui peut être aussi utilisé dans les culots de lampes (cf. 1-9).

./...

4-1-6 : Pièces diverses

Ces pièces sont, soit usinées (valves de pneus, écrous de bicyclette, etc.), soit moulées (fourchettes de boites de vitesse, accessoires, etc.). Si l'on n'est pas trop exigeant sur les caractéristiques mécaniques (valves de bicyclette), le zamak moulé sous pression et chromé peut être utilisé; pour les autres pièces décolletées, les alliages d'aluminium ou l'acier peuvent être utilisés si le bilan économique (prix matière + décolletage) est positif. Les alliages d'aluminium de fonderie peuvent remplacer des pièces moulées en cuivreux (fourchettes de boites de vitesses). Les coussinets en bronze ou cuproplomb peuvent être remplacé par des roulements à bille ; de plus en plus d'ailleurs les cuivreux se limitent à une couche superficielle très mince (voir figure 30). Dans certains cas, des alliages aluminium - étain (à 6 % d'étain) sontutilisés pour des paliers de vilbrequin (Ami 6 - 2 CV - 3 CV) ;; certains traitements de surface de l'aluminium permettent même de lui conférer d'excellentes propriétés de frottement.

Les accessoires décoratifs primitivement en laiton chromé sont maintenant en zamak chromé.

4-1-7 : Conclusion : dans la plupart des pièces à usage non électrique, le rôle du cuivre devrait s'estomper si le prix des wirebars dépasse 6 à 8 F/Kg. Dans les usages électriques, la substitution ne pourrait avoir lieu que pour des cours plus élevés (15 - 20 F/Kg par exemple pour les induits de dynamo) ; la pression des sidérurgistes sera un puissant aiguillon à la substitution.

4-2 : Chemins de fer : (7 700 tonnes de cuivre en France en 1965)

Les caractéristiques de ce secteurs sont l'existence de séries assez faibles, le coût prohibitif des pannes ou des immobilisations de matériel, certains impératifs de légèreté (pour avoir une puissance massique élevée et un poids à l'essieu limité dans les convois à grande vitesse).

4-2-1 : Matériel roulant :

4-2-1-1 : Radiateurs de locomotives Diésel (300 tonnes en 1965)

On distingue les radiateurs de refroidissement du moteur (à eau) et de refroidissement d'air de suralimentation (à huile). Le deuxième type de radiateur est justiciable de l'emploi d'aluminium; pour le 1er type l'emploi de l'aluminium est difficilement envisageable, car dans les diésels de chemin de fer, le taux de compression est si élevé, que les gaz d'échappement peuvent polluer l'eau de refroidissement et provoquer ainsi une corrosion très rapide. Chaque locomotive Diésel utilise 1 500 kilos de cuivre pour les radiateurs (dont 1 250 kg pour le radiateur de refroidissement du moteur). La solution acier-inoxydable n'a pas encore été étudiée par la S.N.C.F., très prudente et réservée à l'égard des nouveaux matériaux : on parle même d'utiliser les cupronickels au lieu du cuivre.

4-2-1-2 : Moteurs de traction (1 500 tonnes de cuivre en France en 1965) :

Les locomotives électriques et diésels à transmission électrique utilisent de tels moteurs. L'emploi de l'aluminium à la place du cuivre augmenterait le poids des moteurs (circuit magnétique et carcasse plus lourds), ce qui va à l'encontre de l'objectif de légèreté. Seul le remplacement des diésels à transmission électrique par des diésels à transmission hydraulique (d'ailleurs moins coûteux) permettrait de limiter le besoin de cuivre : toutefois, contrairement au cas de l'Allemagne, la France "moins douée pour la mécanique" reste fidèle à la transmission électrique.

4-2-1-3 : Cablage électrique : (500 T de cuivre en 1965)

Chaque locomotive comporte actuellement 800 à 1 000 kilos de câbles en cuivre. Dans un souci d'allègements, les câbles de puissance, les barres sont réalisées en aluminium (cf. BB 67 300), malgré les impératifs d'encombrement ; mais compte-tenu de la faible longueur des câbles (cf. § 1-4-1), l'économie réalisée est nulle.

Certains selfs de lissage et transformateurs peuvent aussi être réalisés en aluminium.

Toutefois les câbles reliant l'appareillage (fixe) aux moteurs de traction solidaires de boogies (mobiles) doivent être très souples et ont de bonnes chances de rester en cuivre.

En ce qui concerne les cables du faisceau, on se raportera au §.4-1-5-1, en gardant à l'esprit que la S.N.C.F. à horreur des pannes.

4-2-1-4 : Tuyauteries :

Dans les circuits d'huile, d'air et d'eau, le cuivre peut présenter des fissurations consécutives aux vibrations, il a été remplacé généralement par l'acier : les tubes en acier sont protégés de la corrosion externe par une peinture spéciale : les produits de traitement de l'eau de refroidissement des moteurs diésels (benzoate et nitrite de sodium) assurent une bonne protection contre la corrosion interne.

./...

4-2-1-5 : Conclusion :

Dans le matériel roulant, le cuivre ne perdra sa place que pour des impératifs d'allègement. Du reste, le prix du cuivre employé (2 à 3 tonnes par locomotive) ne représente qu'une part infime du prix de la locomotive (une locomotive électrique de 6 000 kwatts coûte, en effet, 3 millions de francs).

4-2-2 : Lignes : (2 500 tonnes de cuivre en 1970 en France)

4-2-2-1 : Caténaires (voir figure 31) : les fils porteurs traditionnellement réalisés en bronze (bonne résistance mécanique) pourraient être éventuellement réalisés en conducteur aluminium-acier ou almelec-acier. Pour le fil de travail, réalisé actuellement en cuivre au cadmium qui présente une bonne résistance au frottement, on a songé à utiliser un conducteur composite : la partie frottante étant réalisée en acier (inoxydable ou non) qui présente une bonne résistance à l'arc et à l'abrasion, la partie conductrice étant en aluminium. Quelle sera le durée de vie d'un tel conducteur rappelons que le fil de travail en cuivre dure 25 ans et doit assurer le captage du courant à des vitesses de plus en plus élevées ? Le conducteur mixte aluminium-acier déjà utilisé dans les usines pour l'alimentation des ponts roulants, pourrait plus facilement être utilisable pour les lignes de trolleybus urbain où les vitesses et le "coût" des pannes sont plus réduits.

Une autre solution consisterait à prévoir une alimentation par 3ème rail en acier (cf. Chambéry - Modane), mais c'est une solution ancienne que la SNCF cherche à éviter ou à remplacer par une alimentation par caténaires aériennes.

Le marché des caténaires est toutefois étroit, en France, notamment car toutes les lignes électrifiables sont déjà électrifiées.

./...

4-2-2-2-: Câbles de puissance :

L'emploi de l'aluminium se justifierait sur le plan technique et économique. La S.N.C.F. étudie cette solution pour l'avenir !

4-2-2-3 : Câbles de signalisation :

Il s'agit de câbles de faible diamètre (1,2 mm) dont les raccords doivent être fiables. On étudie une solution aluminium étamé. Le problème est un peu comparable à celui des fils domestiques (§ 1-4-2-3).

4-2-3 : Divers

Les coussinets en bronze des essieus de wagon ont été remplacés en totalité par des roulements à bille.

Certaines pièces de fonderie rentrent dans l'équipement ferroviaire; leur rôle est mal défini : des alliages d'aluminium pour les pièces à fonction électrique et les aciers pour les autres pièces seraient parfois envisageables.

4-2-4 : Conclusion : La S.N.C.F. est toujours réservée quant à l'emploi de matériaux nouveaux. Seules des considérations d'allègement pourraient la pousser à utiliser les métaux légers : cette tendance sera accélérée par la course aux grandes vitesses. Notons que les procédés de transport de l'avenir : trains à moteur linéaire prévoient l'utilisation d'induits en aluminium et de systèmes de captation en rail composite aluminium-acier.

4-3 : Transports maritimes (4 700 tonnes de cuivre en 1965)

Le coût d'immobilisation d'un navire peut atteindre plusieurs millions de francs anciens par jour : les avaries sont donc à éviter. Le progrès technique permet de limiter les tonnages de cuivre : ainsi la frégate "Constitution" lancée en 1803 avait nécessité 64 tonnes de cuivre, le porte avion "Kennedy" qui jauge 61 000 tonnes n'en a utilisé que 88 tonnes.

4-3-1 : Hélices : (900 tonnes de cuivre en France en 1965)

Les cuivreux sont utilisés pour leur excellente coulabilité, leur résistance à la corrosion sous tension et sous cavitation. Le cupro-aluminium donne d'excellents résultats. Certains constructeurs proposent toutefois des hélices en acier inoxydable qui donnent toute satisfaction quant au prix d'achat et à la tenue en service :toutefois l'inox est moins facile à couler que les cuivreux (il faut"recharger"les vides après démoulage) et il est plus difficile à polir (les pales doivent en effet posséder un équilibrage et un état de surface impeccables, ce qui nécessite un polissage manuel soigné); le prix matière ne représente que 40% du prix de l'hélice qui peut atteindre 50 millions A.F.

Les très grosses hélices sont réalisées en cuivreux.

/...

4-3-2 : Tuyauteries : (1 100 tonnes de cuivre en 1965)

Les cuivreux étaient très utilisés dans de nombreuses tuyauteries : d'eau douce, d'huile, d'eau de mer. Pour réduire les coûts et tout en acceptant une tenue dans le temps plus réduite, les constructeurs ont été conduits à adopter l'acier dans de nombreuses tuyauteries : eau froide sanitaire, refroidissement des moteurs. Les matières plastiques se généralisent pour les évacuations (cf § 3-1-2).

Des tuyauteries en aciers inoxydables spéciaux ou en alliage d'aluminium (à base de magnésium et de titane) pourraient être employées si les cours du cuivre dépassaient 9 à 10 francs au kilo.

4-3-3 : Acastillages, hublots (600 tonnes de cuivre en 1965)

Les cuivreux étaient utilisés en grande partie à cause de leur résistance à l'eau de mer et aux atmosphères marines. Toutefois les matières plastiques ont fait leur apparition dans la construction des bateaux de plaisance. Certains alliages d'aluminium (à base de magnésium et de titane) ou des aciers inoxydables remplacent progressivement les cuivreux, sauf pour la marine de guerre, très fidèle, par tradition, aux cuivreux.

4-3-4 : Robinetterie (400 t. de cuivre en 1965)

Pour les vannes et les robinets de forte dimension, les cuivreux ont été remplacés par l'acier (inoxydable ou non) : compte tenu de la dimension des pièces, le prix matière est prépondérant devant le coût d'usinage (cf § 3-7-3 1ère partie).

Pour la robinetterie de petites dimensions, le laiton devrait conserver provisoirement son marché, en attendant l'arrivée des robinets en plastique (cf 3-3).

4-3-5 : Pièces diverses : (700 tonnes de cuivre en 1965)

Compte tenu des charges imposées, le chemisage des arbres de navire restera en bronze, à moins de progrès techniques notables dans le domaine des roulements.

Les corps de pompe à eau de mer réalisés en cuivreux pourront néanmoins subir la concurrence d'aciers inoxydables spécialement mis au point (contenant du nickel, du chrome, du molybdène et du titane : ils sont toutefois assez chers), qui sont du reste plus difficiles à mettre en oeuvre et qui présentent des résistances à la fatigue sous corrosion inférieure (cf figure 4). La substitution ne pourrait avoir lieu que pour un prix du cuivre au kilo dépassant 10 francs.

/...

4-3-6 : Matériels électriques (1 000 tonnes de cuivre en 1965)

La contrainte d'encombrement n'est pas essentielle sur un navire. Toutefois, les matériels devront avoir une bonne résistance aux vibrations. On pourra se reporter au § 2 de la deuxième partie. L'aluminium a été homologué dans les conducteurs du navire : ainsi le "Sainte Claire Deville" ou le "Paul Héroult" ont des circuits de puissance entièrement réalisés en aluminium. Remarquons que sur un navire, les longueurs de câbles sont importantes, ce qui fait que le coût des raccordements prend une importance assez faible devant le coût du câble.

4-3-7 : Conclusions :

Les sujetions particulières aux transports maritimes (corrosion par l'eau de mer notamment) font que les niveaux des cours du cuivre à partir desquels pourront apparaître de nouvelles substitutions sont relativement élevés : 8 à 10 francs au kilo.

4-4 : Aviation : (450 tonnes en 1965)

Il s'agit d'un secteur en plein développement où les problèmes de fiabilité ont une résonance particulière. On admet que le cuivre représente 3% du poids d'un avion : compte tenu du prix élevé des avions, le coût de la matière première cuivreuse apparait comme négligeable. En aéronautique, les qualités d'un matériau sont beaucoup plus importantes que son prix : la substitution sera difficile

Le cuivre entre dans la composition d'alliage (duralumin) où il semble difficile à remplacer, dans la constitution des pièces mécaniques (paliers, etc...) dans la constitution de canalisations hydrauliques, dans des appareils électriques : dans ce dernier cas, l'aluminium fait son apparition dans les câbles de puissance où il permet un allègement important (Les câbles du circuit de puissance des "Caravelles" sont en alliages d'aluminium).

4-5 : Conclusions :

Dans le domaine des transports où le coût du cuivre représente une faible part du coût des matériels, la substitution n'est pas très motivante d'autant que les appareils travaillent dans des conditions particulièrement éprouvantes (vibrations, corrosion etc.... et que des paramètres "encombrement" et fiabilité ont un retentissement économique non négligeable. La substitution progressera plus pour des raisons techniques qu'économiques : élimination du cuivre des ferrailles, produits nouveaux donnant plus satisfaction que les cuivreux.

/...

/ 5. Matériels et produits industriels /

(69 000 tonnes de cuivre utilisé en 1965)

Ce chapitre groupe tous les emplois des cuivreux dans l'industrie, à l'exception de ceux qui intéressent l'électricité, le bâtiment et les transports. Les utilisations sont extrêmement variées.

5-1 : Armes - munitions (3 500 tonnes en 1965)

En temps de paix, la consommation de laiton utilisé dans les étuis de cartouches est faible; les étuis étant souvent récupérés après tirs; les munitions d'exercices sont principalement à base de matières plastiques.

5-2 : Centrales électriques (1 100 tonnes de cuivre en 1965)

Les matériaux cuivreux sont parfois utilisés dans des turbines hydrauliques à cause de leurs bonnes caractéristiques mécaniques et de leur résistance à la corrosion : les aciers inoxydables (cf 4-3-1) sont des concurrents sérieux (ainsi l'usine de la Rance comporte à la fois des turbines en inox et des turbines en matériaux cuivreux).

Les centrales thermiques comportent de nombreux appareils utilisateurs de cuivre : (cf figure 32).

5-2-1 : les condenseurs : ils jouent le rôle de source froide et permettent la condensation de la vapeur issue de la turbine; il y a échange de calories entre la vapeur qui va se condenser et l'eau de refroidissement qui parcourt des tubes en laiton (30% de zinc) dans le cas de refroidissement à l'eau douce et des tubes en cupro-nickels ou en laiton à l'aluminium dans le cas de refroidissement à l'eau de mer. La vitesse de circulation de l'eau ne doit pas être trop importante (érosion des tubes) ni trop lente (formation de dépôts générateurs de corrosion); avec les tubes en laiton, elle est comprise entre 1,8 et 2 m/s.

Le prix des tubes représente 50% du prix total d'un condenseur : ainsi le condenseur d'une centrale de 350 M Watts pèse 300 tonnes (dont 110 tonnes pour les tubes en laiton), il coûte 3 millions de francs : soit 1 million pour la fourniture des tubes et 0,5 million pour leur pose.

On peut penser à substituer aux cuivreux le titane et l'inox qui ont une bonne résistance à la corrosion (tube titane pour eau de mer et tube inox pour eau douce), mais une conductibilité thermique médiocre que l'on peut d'ailleurs compenser en diminuant l'épaisseur des tubes (les bonnes caractéristiques mécaniques des 2 matériaux autorisent cette modification) et en augmentant jusqu'à 2,5 m/s la vitesse de circulation de l'eau (ce qui améliore le coefficient d'échange et donc diminue la résistance thermique de la paroi : cf 1ère partie § 3-5).

/...

L'utilisation de titane ou d'inox se traduit en fait par une modification de la conception du condenseur et par une économie sur le coût de réalisation (on peut limiter le nombre de tubes et donc le nombre de trous à percer dans les plaques tubulaires). L'inox peut donc être envisageable économiquement pour des cours du laiton à peine supérieur aux cours actuels; la solution titane est encore 20 à 25% fois plus onéreuse que la solution laiton, mais la durée de vie des condenseurs est augmentée (NB : le tube de titane coûte au mètre 1,5 fois plus cher que le tube en laiton à l'aluminium).

Rmq 1 : Le titane et l'inox résistent mieux que les cuivreux à l'ammoniaque produit par décomposition de l'hydrazine utilisée dans les circuits d'eau. Le titane résiste bien aux eaux de mer polluées.

Rmq 2 : Les tubes sont assemblés par "dudgeonnage ", plus facile à réaliser avec des tubes en laiton qu'avec des tubes en titane ou en inox même si ces derniers ont une épaisseur inférieure.

5-2-2 : Réchauffeurs :

Alimentés par des soutirages de la turbine, ils récupèrent la chaleur de condensation d'une vapeur ayant déjà travaillé et réchauffent l'eau condensée, ce qui améliore le rendement du cycle.

5-2-2-1 : Réchauffeur basse pression : l'eau qui les parcourt contient en principe très peu d'oxygène, toutefois lors d'un appoint brusque d'eau au condenseur la teneur en oxygène peut augmenter : pour éviter l'oxydation, on emploie donc des cuivreux : cuivre pur, laiton, ou cupronickel (si la température de vapeur dépasse 300° C.) Toutefois, si on assure une bonne ventilation du compartiment vapeur et si l'on adopte sur le condenseur un dispositif permettant de limiter l'apport d'oxygène lors des rajouts d'eau, on peut utiliser des tubes en acier qui permettent d'atteindre des vitesses de l'ordre de 2 à 2,1 m/s. Le bilan économique doit prendre en compte le coût des tubes et des dispositifs de ventilation et de limitation de l'arrivée d'oxygène.

5-2-2-2 : Réchauffeurs haute pression : situés après le dégazeur, l'eau qui les parcours contient très peu d'oxygène; si on assure une bonne ventilation de l'enceinte vapeur, on peut utiliser des tubes en acier

NB 2. Lors des arrêts ou avant la mise en route des installations, il se pose un problème de conservation des tubes acier à l'abri de l'air.

5-2-3 : Conclusion : dans les échangeurs, ce sont plus les problèmes de corrosion que les problèmes de conductivité thermique qui sont primordiaux, d'où le succès prévisible des inox et du titane. En outre, compte tenu de leur forte section de capture, les

/....

les cuivreux cèderont la place aux inox dans les échangeurs de centrales nucléaires.

5-3 : Echangeurs industriels (1 200 tonnes de cuivre en 1965)

Dans l'industrie chimique ou alimentaire, les cuivreux utilisés dans les échangeurs font souvent place à l'acier inoxydable (17% de chrome ou 18-8, le 17% de chrome étant le plus employé à cause de son prix peu élevé), à l'aluminium ou au titane qui permettent des vitesses plus élevées et ont une bonne résistance à divers types de corrosion (cf 1ère partie § 3-6)

NB : on assiste au même phénomène de substitution dans les réservoirs de l'industrie chimique ou alimentaire : HNO_3 , bière, papeterie, laiteries. Seules les fromageries gardent le cuivre, car il donne un goût agréable au fromage.

5-4 : Monnaie : (350 tonnes de cuivre en 1965)

Certaines pièces de monnaie sont en alliages de cuivre à cause de leur facilité de mise en oeuvre (matriçage - gravure) et de leur inaltérabilité. L'aluminium (pièces de 1 centime), voire le papier sont des "ersatz" valables.

5-5 : Pièces d'assemblage : (30 000 tonnes de cuivre en 1965)

Cette rubrique groupe les emplois de métaux cuivreux dans les pièces décolletées ou matricées telles que vis, boulons, écrous, rivets et dans des pièces embouties telles que agrafes, crochets, oeillets etc....

Les assemblages par boulons et écrous sont concurrencés sérieusement par des assemblages soudés. Dans les assemblages, on cherche l'homogénéité des structures pour des raisons esthétiques ou pour éviter les corrosions par effet de pile . La demande de boulons en laiton est parallèle à la demande des pièces en cuivreux. L'acier inoxydable ou protégé pourrait être employé si le bilan (coût de la matière utilisée + temps d'usinage) est positif (voir 1ère partie § 3-7-3). Il semble toutefois que la boulonnerie et la visserie de petit calibre restent au laiton (le coût matière est faible devant le coût d'usinage, dans ce cas). Les alliages d'aluminium (alliages au magnésium qui ont une très bonne résistance à la corrosion, ou duralumin qui ont une résistance mécanique comparable à celle des laitons) peuvent être des concurrents sérieux : la boulonnerie aluminium accompagne le développement des conducteurs électriques (barres) en aluminium.

L'aluminium (alliage au magnésium) peut aussi remplacer le laiton dans la fabrication des agrafes; l'acier cuivré a d'ailleurs une part importante du marché.

Dans le domaine des pièces embouties, l'inox à 17% de chrome (qui ne coûte que 4,7 F au kg) se développe face au laiton qui est un peu plus cher, mais un peu plus facile à mettre en oeuvre.

/...

Toutefois l'emploi de l'acier inoxydable nécessite des modifications importantes des outillages des presses à emboutir et la mise au point des "tours de main"adaptés.

NB : Les pièces qui nécessitent un emboutissage profond sont nécessairement en cuivreux.

5-6 : Traitement des métaux (1 700 tonnes de cuivre en 1965)

Le cuivre est utilisé comme sous couche d'accrochage des dépôts de nickel et de chrome : sera-t-il possible de se dispenser de cette couche d'accrochage ? Il semble que oui. Mais la substitution des pièces massives en cuivreux par des pièces laitonnées ou cuivrées augmentera les débouchés de ce secteur. Le cuivre est utilisé comme revêtement des aciers inoxydables pour en faciliter la frappe à froid : les revêtements synthétiques concurrents sont encore trop chers.

5-7 : Coussinets et roulements :

Il y a quelques dizaines d'années, les cages des roulements à billes étaient en laiton, actuellement, elles sont en acier.

Un certain nombre de paliers munis de coussinets ont cédé la place à des paliers à roulements (wagons SNCF), toutefois, dans certains cas, on reste fidèle au coussinet : les cuivreux rencontrent là une concurrence vive des matières plastiques (polyamides, polyoxyméthylène, téflon etc...); de toute façon les progrès techniques (cf fig. 30) ont permis de réduire le poids de cuivre utilisé. On peut noter aussi que le bois bakélisé peut supporter des charges importantes (paliers de cylindres de laminoir).

NB . Certains paliers (bielles de voiture) sont réalisés en régule (alliage d'étain, bismuth et antimoine) et l'alliage aluminium -étain pourrait être un rival sérieux des cuivreux.

5-8 : Constructions frigorifiques (2 000 tonnes de cuivre en 1965)

Le cuivre est utilisé principalement sous forme de tubes faciles à mettre en oeuvre, dont la substitution n'est pas envisagée; l'utilisation future d'appareils à effet Peltier pourrait remettre en cause l'emploi du cuivre.

5-9 : Robinetterie industrielle : (8 900 tonnes de cuivre en 1965)

Le laiton et le bronze sont les cuivreux les plus employés, notamment dans les pièces les moins volumineuses décolletées ou matricées. Suivant les fluides en contact avec ces robinets, on peut envisager le zamak (petits robinets d'hydrocarbures), les matières plastiques si la température n'est pas trop élevée, l'aluminium (aussi rapide à usiner que le laiton); les inoxydables ne pourraient être utilisés que si les cours du cuivre étaient très élevés (cf § 3-3).

/...

NB : La fonte GS a remplacé le bronze avec succès dans les vannes d'adduction d'eau.

5-10 : Industries diverses : (12 400 tonnes de cuivre en 1965).

Cette rubrique groupe des emplois des métaux cuivreux dans un grand nombre de secteurs industriels : travail des métaux (emboutissage, découpage, chaudronnerie : 4 500 tonnes - industrie agricole 1 400 tonnes - industrie mécanique : 2 400 tonnes de cuivre principalement sous forme de tubes - industrie minière : fils de mise à feu des explosifs - industrie sidérurgique : 800 tonnes - industrie textile : 250 tonnes).

La multiplicité des emplois ne permet pas d'entreprendre une étude détaillée de ces secteurs : toutefois, signalons l'abandon du cuivre au profit des matières plastiques dans la fabrication des pulvérisateurs agricoles, au profit de l'acier protégé ou des matières plastiques (polyamide 11) dans les circuits de commande hydraulique, au profit de l'acier inoxydable dans la chaudronnerie (équipement de papeterie).

5-11 : Appareils de mesure : (3 000 tonnes de cuivre en 1965)

Le laiton moulé est employé pour réaliser des bâches de compteur d'eau car il résiste bien à la corrosion : peut-être peut-on craindre une concurrence des matières plastiques (notamment celles résistant à la pression cf : 3-2-2). Le laiton est utilisé aussi sous formule de plaques laminées qui servent à réaliser des boitiers, sous forme de pièces décolletées ou matricées : suivant les conditions de température et de corrosion, on peut craindre la concurrence des matières plastiques, de l'aluminium et des aciers inoxydables.

5-12 : Pièces frittées et pigment pour peinture (900 tonnes de cuivre en 1965, principalement sous forme de poudre).

Il s'agit d'emplois très spécifiques difficiles à analyser dans le détail.

5-13 : Tuyaux flexibles : (180 tonnes de cuivre en 1965)

On remplace le laiton par l'acier inoxydable (à 17% de chrome) lorsque le prix du cuivre dépasse 6,5 à 7 F au kg; on revient au laiton fréquemment si les cours du cuivre baissent.

5-14 : Moulages divers : (4 000 tonnes de cuivre en 1965)

On assiste à une régression des cuivreux de fonderie; cela tient à la concurrence d'autres procédés de fabrication (matriçage etc...) et d'autres matériaux (aluminium ou inox). La situation est variable suivant les pays : en Allemagne, elle est beaucoup plus favorable.

/....

5-15 : Conclusion :

Dans les produits industriels, la durée de vie des matériels et les problèmes de corrosion sont des paramètres qui guident le choix des matériaux : l'acier inoxydable, l'aluminium et les matières plastiques sont des concurrents sérieux des cuivreux, bien que les deux derniers matériaux n'aient pas une image de marque très favorable dans l'industrie.

6. Biens de consommations

(25 000 tonnes de cuivre en 1965)

Dans ce domaine, la durée de vie des produits n'est pas un paramètre déterminant, du moins, à l'heure actuelle : il semble, en effet, que les consommateurs, sous l'influence de la mode et de la publicité, souhaitent le renouvellement fréquent des produits de consommation courante, ce qui favorisera l'apparition de biens peu durables : ce phénomène aura une influence non négligeable sur les substitutions. De plus, signalons que la croissance du secteur des biens de consommation est très forte et que les très grosses séries sont monnaie courante.

6-1) Batterie de cuisine :

Le cuivre, qui nécessitait des précautions particulières avant usage, à cause de sa prétendue toxicité, a été supplanté par l'aluminium, certes un peu moins conducteur de la chaleur, mais plus résistant à l'attaque des produits alimentaires. Le cuivre réapparait d'ailleurs dans les casseroles en inox où il permet d'améliorer la répartition de la chaleur.

6-2 : Appareils ménagers et électrodomestiques (7 600 tonnes de cuivre en 1965).

Nous inclurons dans ces secteurs les postes radio, TV etc....

Le cuivre est utilisé principalement sous forme de bobinages dans les moteurs et les transformateurs.

Lorsque le diamètre des conducteurs est faible (moins de quelques dixièmes de mm) la substitution est difficilement envisageable pour le moment (cf 1ère partie § 3-7-4-2). Dans les autres cas, comme l'on n'est pas très exigeant sur le niveau des pertes, on peut utiliser des conducteurs aluminium dès que le prix du cuivre dépasse 6 à 8 Francs du kilo (wirebar). Toutefois, compte tenu de ce que les appareils sont produits en très grosses séries, le passage à l'aluminium exigerait de coûteuses modifications d'installations, à moins d'utiliser des fils d'aluminium plaqués de cuivre ("copperclad") qui ne semblent pas encore donner toute satisfaction. Certains constructeurs utilisent de nombreux bobinages en aluminium. Les cuivreux sont aussi utilisés sous formes de tubes dans divers appareils (réfrigérateurs, machines à laver) où ils risquent la concurrence des matières plastiques très

utilisées aussi pour la fabrication de pièces diverses (coussinets ou pièces moulées qui étaient autrefois réalisées en laiton décolleté ou matricé).

6-3) Articles de fantaisie : (4 000 tonnes de cuivre en 1965)

Il s'agit de la bimbeloterie et de la bijouterie de fantaisie (broches, boucles de ceintures, boutons de manchettes etc....), des pièces d'orfèvrerie courante réalisées en maillechorts, des instruments de musique à vent.

Les qualités des cuivreux : couleur chaude, résistance à la corrosion, facilité de mise en oeuvre leur permettent de résister à la concurrence, notamment pour les fabrications de qualité. Toutefois en bimbeloterie, on voit apparaître des articles en matières plastiques dorées, en acier laitonné ou en acier inoxydable; ces articles sont soumis aux caprices de la mode et le prix de la matière première n'a qu'une importance secondaire. En orfèvrerie courante, les couverts d'acier inoxydable concurrencent les couverts en maillechorts. Les instruments de musique à vent sont facilement réalisables en laiton par repoussage, et il semble difficile d'envisager une substitution, si élevé que soit le prix du cuivre. De même l'orfèvrerie de luxe (couverts argentés) pourrait difficilement se passer des cuivreux, qui représentent d'ailleurs une part infime du prix des objets.

6-4 : Horlogerie (1 350 tonnes de cuivre en 1965)

Le laiton est utilisé dans la fabrication des engrenages et des échappements à cause de sa facilité de mise en oeuvre, de sa résistance à la corrosion et de sa résistance mécanique. Certaines pièces d'horlogerie (engrenages) peuvent être réalisées en matières plastiques très résistantes (polyacétale ou polyoxyde de phénylène). Le maillechort est aussi utilisé dans les boitiers de montres où l'on peut dans certains cas utiliser de l'acier inoxydable.

De toutes façons, pour les fabrications de qualité, les cuivreux seront toujours employés : le prix de la matière première est négligeable devant le prix d'une montre ou d'une horloge, dans lequel la part de la main d'oeuvre joue un rôle prépondérant; les cuivreux, par leur facilité de mise en oeuvre permettent justement de limiter la part de la main-d'oeuvre.

6-5 : Appareils d'éclairage (2 500 tonnes de cuivre en 1965)

Les cuivreux sont utilisés dans la lustrerie pour leur couleur chaude : le laiton peut être avantageusement remplacé par de l'acier laitonné ou de l'aluminium anodisé et coloré en jaune laiton (de loin la ressemblance est frappante !).

/...

Le laiton sert aussi comme pièce de contact électrique dans les lampes de poche et les piles : il semble difficile de le remplacer par un autre métal pour des raisons déjà exposées (§ 1-8).

Le fil de cuivre entre dans les bobinages des ballasts pour appareils fluorescents : peut-être pourrait-on utiliser ici du fil d'aluminium.

6-6 : fermetures à glissières (1 000 tonnes de cuivre en 1965)

Le laiton se prête bien à ces fabrications par sa facilité de mise en oeuvre, ses bonnes qualités de frottement et sa résistance mécanique. Il est concurrencé par l'aluminium et les matières plastiques qui permettent une réduction notable des prix avec toutefois une durée de vie moins longue, à en croire les chiffres suivants :

- Une fermeture en laiton tient à 2.000 passages
- " " plastique " 1.500 "
- " " aluminium " 200 " ! (l'emploi d'alliage doit permettre d'améliorer le score).

6-7 : Industrie du vêtement (200 tonnes de cuivre en 1965)

Le laiton est utilisé dans les têtes d'épingles de layette qui ont une forme compliquée et exigent donc un matériau malléable : la substitution semble difficile, si on ne change pas la conception de l'épingle.

On utilise aussi les cuivreux dans des petits articles métalliques emboutis (oeillets, cuvettes à vis etc...) et souvent nickelés l'emploi d'inox (à 17% de chrome) embouti est moins onéreux, sous réserve de modification des outillages du fabricant.

Les boutons, les insignes traditionnellement réalisés en cuivreux peuvent l'être en matières plastiques.

6-8 : Agriculture : (8 000 tonnes de cuivre en 1965)

L'agriculture utilise des sels de cuivre comme fongicide (sulfate ou oxychlorure de cuivre). Ce marché est en régression continue comme le montre le tableau 12, avec toutefois une stabilisation de la demande depuis 1966. Les pesticides de synthèses devraient permettre de remplacer le cuivre, si ses cours augmentaient de façon importante et dépassaient 10 f/ kg.

6-9 : Conclusion :

Si l'on met à part les articles de qualité, ou de luxe, l'avenir du cuivre dans le domaine des biens de consommation est menacé par les matériaux de synthèse et, dans une moindre mesure par les inox et l'aluminium, ceci pour des niveaux de cours du cuivre à peine supérieurs aux niveaux actuels.

/....

7. Le Cuivre élément d'addition

4.600 tonnes de cuivre en 1965.

Le cuivre entre dans la composition de nombreux alliages à des pourcentages rarement supérieurs à 8% (sauf évidemment dans les alliages "dits de cuivre" qui contiennent plus de 50% de ce métal).

Le rôle du cuivre dans ces alliages est de modifier la structure métallurgique des matériaux dans lesquels il rentre et d'apporter des propriétés souvent très différentes de celles de chacun des éléments de l'alliage. On peut prévoir un développement très important des alliages de toute sorte. Compte-tenu du faible pourcentage de cuivre utilisé dans ces alliages, le prix du cuivre est relativement indifférent. Le bilan économique devra tenir compte des propriétés nouvelles apportées par la présence du cuivre, relativement aux matériaux traditionnels et aux alliages utilisant éventuellement d'autres éléments d'addition susceptibles d'apporter des propriétés comparables.

7-1 : Fonte au cuivre : L'adjonction de 0,4 à 1,5% de cuivre à la fonte améliore ses caractéristiques mécaniques. Le cuivre est concurrencé par le vanadium, le chrome etc....

7-2 : Aciers au cuivre : L'adjonction de 0,4 à 1% de cuivre améliore la résistance à la corrosion, pour un prix de revient beaucoup plus bas que celui des aciers inoxydables.

7-3 : Aciers inoxydables au cuivre :

L'adjonction du cuivre à des aciers inoxydables 18-8 facilite leur frappe à froid. On pourrait obtenir le même résultat en augmentant la teneur en nickel, mais ce métal est, pour l'instant, plus cher que le cuivre.

L'inox à 15% de chrome 4,5% de nickel peut devenir par adjonction d'une faible quantité de cuivre, un alliage à durcissement structural.

7-4 : Alliages d'aluminium : (3 800 tonnes de cuivre en 1965)

Ces alliages sont appelés à une forte croissance : l'adjonction à l'aluminium de 2 à 8% de cuivre permet d'obtenir des alliages présentant de hautes caractéristiques mécaniques après traitements thermiques et une bonne aptitude au moulage. Le cuivre est difficilement remplaçable.

7-5 : Conclusion :

Si les sidérurgistes ne craignent pas une pollution de leurs alliages, le cuivre devrait se développer de façon importante; l'industrie a en effet une faim aigüe de matériaux à propriétés nouvelles. La substitution ne pourrait intervenir que pour des niveaux de cours du cuivre très élevés.

/ 8. Nouveaux usages du cuivre. /

A chaque instant, un matériau donné perd des marchés et en regagne d'autres. Les cuivreux n'échappent pas à la règle. La prévision des axes de développement des cuivreux est délicate et je ne dirai pas comme Monsieur Claro, expert chilien qu'en l'an 2000 les trois principaux secteurs d'utilisation du cuivre seront : les conducteurs destinés à récupérer l'électricité statique des nuages, les engins spatiaux et .... l'alimentation des pores ! Essayons, nous aussi de donner quelques indications sur les possibilités de développement des cuivreux :

- Dessalement de l'eau de mer : les cupronickels ou les cuproaluminium y seront en concurrence avec le titane, certains aciers inoxydables (très chargés en nickel et molybdène et donc très chers).

- Automobile électrique : les moteurs de traction devront être légers et performants, ce qui laisse une chance assez faible à l'aluminium. (Un tel véhicule nécessiterait 30 kilos de cuivre contre 10 à 15 kilos pour les véhicules classiques à essence).

- La télévision par câbles coaxiaux : conducteur central en cuivre et conducteur extérieur en aluminium.

- Domaine des alliages à propriétés particulières : alliages superplastiques à base de cuivre - cf 1ère partie § 3-7-6).

- Conditionnement de l'air où le cuivre serait en concurrence avec les matières plastiques et l'aluminium.

- Applications cyogéniques : le cuivre a d'excellentes propriétés mécaniques et électriques à basse température (cf 1ère partie § 3-3-4 et 2ème partie § 1 - 10). Il sera concurrencé dans le domaine électrique par l'aluminium et dans le domaine mécanique par les inox

- Applications en eau de mer : coques de bateau, têtes de puits sous marins etc... Les cuproaluminiums et les cupronickels sont promis à un bel avenir.

- Electronique : Le cuivre se prête particulièrement bien à la fabrication des composants électroniques par sa facilité de raccordement (soudure à la vague). L'aluminium serait plus délicat à souder à la vague qui est un procédé peu onéreux, car l'emploi de flux décapant polluerait le bain de soudure (cf figure 33).

- Engins spatiaux : grands utilisateurs de métaux nobles et d'électronique.

- Moteurs diesel poussés : la chambre de combustion doit avoir la forme indiquée sur la figure 34. Seul un alliage à base de cuivre (90%) de cobalt et de béryllium peut résister à la fissuration et posséder une dilatation compatible avec le piston réalisé en aluminium. Dans une locomotive Diésel, le poids de ces têtes de piston rapportées représente 100 kilos de cuivre.

- Alimentation du bétail : l'adjonction de sels de cuivre à la ration alimentaire des animaux accélère leur engraissement.

/....

3ème Partie

FREINS ET ACCELERATEURS NON QUANTIFIABLES DES SUBSTITUTIONS

Nous venons de réaliser une approche technico-économique des phénomènes de substitution , il nous reste maintenant à prendre en compte les phénomène non quantifiables qui peuvent modifier le cours des substitutions : celles-ci impliquent, en effet, des changements de mode de travail, de comportement, bref, elles nécessitent une adaptation des individus et des groupes d'individus ; elles s'accompagnent nécessairement de la prise de décisions importantes, dont les motivations ne sont pas toujours d'origine économique ou technique.

1 -/MOTIVATIONS AUX SUBSTITUTIONS ET INFLUENCE DES MENTALITES/

La situation d'une matière première de substitution est toujours délicate : il suffit d'ennuis légers pour que l'on crie "haro sur le baudet", et que des déboires, mineurs, accidentels, effacent d'un coup de baguette magique tous les avantages apportés par les matériaux nouveaux. Cette attitude de rejet signifie, d'ailleurs, que l'utilisateur n'était pas parfaitement convaincu du bien-fondé de la substitution. Les difficultés que l'on rencontre lors du lancement de produits neufs sont inévitables dans la mesure où un produit s'améliore autant au fil d'années d'expérience en vraie grandeur que lors d'études de laboratoire. Ainsi pour un seul raccord défaillant (par suite d'une erreur humaine), l'utilisation des câbles aluminium sur locomotive Diesel a failli être remise en question. Chez Peugeot, le même incident a rendu les utilisateurs réticents à l'emploi de câbles aluminium de faibles sections.

En outre, une série de cercles vicieux donnent une prime de situation aux matériaux implantés de longue date. Pour se développer de façon convenable sur une aire géographique suffisamment large, les matériaux nouveaux devront offrir, en de nombreux points de vente, une gamme complète de produits et d'accessoires nécessaires à leur mise en oeuvre : si l'aluminium et les polymères veulent se développer dans les canalisations d'eau ou de gaz, les raccords adaptés devront être disponibles dans tous les coins de France et de Navarre ; si on veut employer l'aluminium dans les transformateurs, les lamineurs devront être capables de mettre sur le marché une gamme complète de profilés de toutes dimensions. Or, il est bien évident que rien ne motive les agents économiques à posséder en stock des accessoires ou à mettre au point des fabrications qui ne sont pas assurées d'un débouché immédiat. De même, l'utilisation d'aluminium dans les bobinages de moteurs n'est pas compétitive, en partie faute d'une bonne technique de vernissage ; or, personne n'effectue de recherche en ce domaine, du fait, justement, de la non-compétitivité de l'aluminium. De plus, les appareils réalisés en cuivre sont arrivés, par suite d'efforts incessants, à un très haut niveau de qualité, pourquoi tout remettre en question en changeant de matériaux ? Cela explique, en partie, les réticences d'E.D.F. à l'emploi de transformateurs de distribution en aluminium.

1 - 1 - Le rôle de l'image de marque :

Les cuivreux ont, dans le public, une excellente image de marque. Il n'en va pas de même de l'aluminium, dans la construction électrique du moins : le métal blanc a, en effet, eu le détestable privilège de remplacer le cuivre, pendant la guerre, avec l'improvisa-

tion afférant à de telles circonstances : isolants de mauvaise qualité, et incompatibles avec l'aluminium, procédés de raccordement et main-d'oeuvre inadaptés. Avoir une réputation d'"ersatz" n'est jamais très enviable, même si elle est injustifiée. Il n'en demeure pas moins qu'une bonne part des difficultés rencontrées par les producteurs d'aluminium pour promouvoir leur métal ont pour origine cette mauvaise réputation.

De même, les polymères évoquent chez le grand public des matériaux cassants, peu résistants à la chaleur, bien qu'un certain nombre d'entre eux possèdent des propriétés tout à fait remarquables.

Le titane, lui-même, auréolé de je ne sais quel mystère, est considéré comme unmétal très cher, dont l'emploi est réservé aux engins spatiaux et autres véhicules lunaires ! Pourtant, nous avons vu à la 2ème partie que ses caractéristiques mécaniques élevées permettent de réaliser des condenseurs sans une augmentation notable de prix par rapport à la solution classique à base de laiton.

N'entrons pas non plus dans la querelle de spécialistes relative à l'inocuité comparée du cuivre, de l'aluminium et des aciers inoxydables dans la batterie de cuisine.

En fait, l'image de marque d'une substance est purement subjective : elle repose sur quelques détails réels, souvent déformés par transmission de bouche à oreille. Elle peut être modifiée : ainsi pour les monteurs d'E.D.F., l'aluminium est un conducteur digne de ce nom, au même titre que le cuivre.

Pour essayer de s'affranchir des images de marques circulant dans le public, les industriels utilisent un certain nombre de procédés plus ou moins astucieux : nous citerons, par exemple, la coloration "psychologique" des douilles en aluminium ; une couche de vernis spécial donne à s'y méprendre l'illusion du laiton. De même, dans certains bobinages de moteurs électroménagers, le vernis permet de donner une ressemblance saisissante avec le cuivre. A noter que les utilisateurs se rendent rarement compte de la supercherie, car le métal employé donne satisfaction.

1 - 2 - Traditionnalisme et dynamisme.

Pour des raisons variables, certains secteurs industriels ou artisanaux ne sont guère portés vers l'innovation.

Ainsi les électriciens ont eu la chance de disposer immédiatement avec le cuivre d'un métal parfaitement adapté à leurs besoins, ce qui est un fait rare dans l'industrie : ainsi, le principe du turbo-réacteur, connu depuis le début du siècle, n'a pu être appliqué industriellement que depuis 1945, faute de posséder un métal aux caractéristiques adéquates. On ne s'étonnera donc pas si, pour les électriciens,

les recherches sur les matériaux sont des préoccupations secondaires. L'ingénieur électricien est, du reste, de par sa formation, plus intéressé par les calculs d'appareillages complexes que par des calculs économiques sur les conducteurs, qui, de toute façon, sont des accessoires sans grand intérêt ("la ficelle"). On est donc tenté, en France du moins, de laisser aux producteurs d'aluminium le soin de faire des études technologiques relatives aux conducteurs (raccordements, etc...) Les mêmes remarques s'appliquent aux câbleurs : leur production est parallèle aux besoins de l'industrie électrique dont ils sont les intermédiaires obligés ; il leur suffit d'enregistrer les commandes.

D'autres industriels, tels les décolleteurs, certains fondeurs, répugnent à utiliser d'autres métaux que les cuivreux : leur personnel, leurs outils de production, leurs méthodes de fabrication, y sont tellement bien adaptés.

En fait, la réaction assez défavorable de certains industriels aux matériaux nouveaux est avant tout une question de personnes : il est un fait que la présence de vieux chefs d'atelier ayant passé toute leur vie à travailler des cuivreux n'est pas toujours un facteur favorable à l'emploi de matériaux concurrents. Ne dit-on pas que l'habitude est une seconde nature ! Cette remarque explique d'ailleurs pourquoi certains plombiers, certains électriciens répugnent à abandonner le cuivre : ils ne le feront que si la contrainte économique devient extrêmement forte ; qu'il suffise de se rappeler la nostalgie de certains plombiers lorsqu'ils parlent du plomb : le seul, l'unique, l'incomparable, qui permettait de faire du beau travail ! Une crainte irraisonnée de la nouveauté peut biaiser les études économiques faites sur la substitution : ainsi, pour se couvrir, l'ingénieur du bureau d'étude peut prendre avec le matériau nouveau des coefficients de sécurité économiques ou techniques disproportionnés avec le risque objectif. C'est la méthode du parapluie !

D'autres personnes, au contraire, seront très ouvertes, par tempérament, à l'emploi de nouveaux matériaux ; ainsi certains industriels ont pris des risques financiers assez importants pour lancer des études de substitution de grande envergure et de longue durée : constructeurs de chauffe-eau (pour remplacer le laiton des circuits d'eau par des polymères), de radiateurs d'automobiles (pour la substitution de l'aluminium aux cuivreux). L'accueil que réservent les industriels aux innovations en matière de matériaux dépend de la valeur qu'ils attachent au rapport risque encouru sur gain à attendre de l'innovation. La décision de substitution est donc suspendue à un petit nombre d'individus-clef. Il suffit parfois d'une modification au sein de l'équipe dirigeante pour que l'entreprise, farouchement opposée à l'abandon des cuivreux, change totalement d'avis.

1 - 3 - Valeur et limite de la motivation par le prix d'achat.

Le prix d'achat d'un objet est certes un paramètre important qui conditionne en grande partie son choix, mais il n'est pas unique : la

.../...

fiabilité d'un appareil, sa durée de vie, sont des critères de choix très importants ; ils sont difficilement quantifiables pour le consommateur lambda, même si des économistes parviennent par des techniques appropriées (actualisation, probabilité de ruine) à faire correspondre à ces notions des coûts mesurables. A ce propos, remarquons que le coût d'une même panne est ressenti différemment suivant les opérateurs : ainsi une panne de courant qui se traduit chez E.D.F. par une diminution des ventes de courant, peut conduire chez l'industriel à une perte plus importante (arrêt des chaînes de fabrication, par exemple).

Le contexte socio-culturel dans lequel évolue le consommateur conditionne ses choix : aux U.S.A. on attache moins d'importance qu'en France à la fiabilité d'un appareil. En ce qui concerne la durée de vie, il semble que, sous l'effet de la publicité notamment, les individus, dans leur frénésie de consommation, soient de plus en plus attirés par les biens non durables. Cette tendance au gaspillage est-elle une constante de l'homme : on peut en douter si l'on considère, par exemple, les thèses développées par M. Mansholt et les auteurs du rapport Meadows ("Halte à la croissance") ? Le cuivre par sa réputation justifiée de pérennité pourrait alors prendre une importance croissante.

On peut aussi se demander si les consommateurs continueront à suivre les modes qui peuvent favoriser la substitution ; les reflets roux du cuivre font maintenant place aux reflets blafards des métaux blancs (aluminium, chrome, aciers inoxydables) en décoration surtout ; mais on brûle souvent ce que l'on a adoré, alors toutes les hypothèses sont permises.

1 - 4 - Le poids des structures.

Certaines productions se sont indentifiées avec les procédés de mise en oeuvre qui permettent de les réaliser : ainsi la robinetterie, traditionnellement réalisée par moulage est entre les mains des fondeurs ; dans ces conditions, il est légitime que les robinettiers ne sécrètent pas eux-mêmes leur propre perte en recherchant des produits de remplacement au laiton : les matières plastiques, si elles étaient employées en robinetterie, rendraient obsolescents les équipements de bon nombre de fonderies.

Toutefois, la résistance à l'innovation a des limites : des concurrents extérieurs à la fonderie peuvent lancer sur le marché des robinets en plastique susceptibles de porter un coup mortel aux fabrications traditionnelles en laiton : la plupart des robinettiers cherchent donc à mettre au point des robinets en plastique, mais sans hâte excessive. Des remarques analogues pourraient être faites en ce qui concerne les enveloppes de compteurs d'eau traditionnellement réalisées en laiton moulé.

Les problèmes de structure ont une influence importante sur la substitution : ainsi, en Angleterre, où la 2ème transformation des métaux est entre les mains des 1er transformateurs, on conçoit que le degré de liberté laissé aux 2ème transformateurs, quant au choix du métal, est très faible.

1 - 5 - Les disponibilités en temps, en hommes.

Les problèmes de choix de matériaux ne sont qu'une seule des préoccupations des entreprises soucieuses d'améliorer les prix de revient ; des modifications de structure, une réorganisation des ateliers peuvent permettre d'abaisser davantage les prix de revient, et ceci d'autant plus que le prix des matières premières prend une place de plus en plus faible dans la plupart des produits manufacturés, par suite du développement de produits de plus en plus élaborés, et de l'accroissement des charges salariales. Quitte à mobiliser une équipe d'ingénieurs, ne vaut-il pas mieux l'employer à améliorer l'efficacité des outils de production, plutôt que de lancer des études coûteuses de substitutions, qui entraîneraient, de toute façon, une désorganisation des ateliers. C'est une des raisons donnée par la S.N.C.F. pour justifier sa fidélité aux câbles en cuivre.

De même, aux Etats-Unis, la lutte contre la pollution mobilise un grand nombre d'ingénieurs qui ne sont donc plus disponibles pour des études de substitutions.

Les décisions relatives aux choix de matières premières doivent être prises au niveau de la direction générale : mais a-t-on le temps, dans ces hautes sphères, d'étudier des rapports techniques pendant 48 heures, délai minimum pour acquérir l'information utile à une décision réfléchie ?

2 -/DYNAMIQUE DES VARIATIONS DES COURS/

Nous remarquons que la figure 7 qu'aux U.S.A. les producteurs de cuivre s'efforcent de maintenir une certaine stabilité des cours ; mais, partout ailleurs dans le monde, exceptés les pays socialistes, les cours du cuivre sont fixés directement ou indirectement au London Metal Exchange, où ils se caractérisent par des variations brutales et fréquentes en dents de scie. Les cours de l'aluminium, au contraire, se caractérisent par une remarquable stabilité. L'instabilité des cours du cuivre serait un facteur de substitution autrement plus important que leur niveau : ne dit-on pas que le cuivre aurait un marché meilleur avec un cours voisin de 7 F/Kg qu'avec un cours oscillant entre 4,6 et 7,6 F/Kg. Du reste, aux U.S.A., où les variations de cours sont beaucoup plus réduites, le tonnage perdu par substitution serait beaucoup moins important qu'en Europe.

Cette situation entraîne de multiples désagréments pour les entreprises utilisatrices ou consommatrices de cuivre, qui ne peuvent ainsi faire des prévisions financières sérieuses, et, plus particulièrement, pour les administrations, qui sont tributaires pour leurs dépenses d'enveloppes budgétaires très précises et préparées un an à l'avance : ainsi en cas d'augmentation importante des prix du cuivre, les Télécommunications devront réduire de façon importante leur programme de pose de câbles téléphoniques ; certains dirigeants des P. et T. iraient même jusqu'à préférer les câbles en aluminium aux câbles cui-

vre, même s'il fallait les payer légèrement plus cher. De même, dans certains gros programmes immobiliers (Parly II par exemple), les variations continuelles des prix des conducteurs en cuivre ont entraîné des écarts assez importants entre les devis et les dépenses réellement engagées.

Ces variations sont aussi extrêmement désagréables pour les industriels qui possèdent des stocks importants de cuivre ou de produits finis en cuivre ainsi les câbleurs ont plus de 30 % de leur chiffre d'affaires sous forme de métal rouge à divers étapes de transformation. La situation est encore plus gênante pour les fabricants de radiateurs d'automobiles, qui doivent posséder des stocks très importants de produits finis, car ils ne doivent à aucun pris tarir les approvisionnements de l'industrie automobile. Bien sûr, objectera-t-on, le Ministère des Finances permet des formules de révision de prix mais les correctifs arrivent toujours avec un certain retard qui entraîne, pour le moins, une perte sous forme de frais financiers. De plus, certains industriels, tels les robinettiers et fabricants de raccords, sont "au tarif" : ile ne peuvent, pour des raisons commerciales évidentes, faire parvenir des nouveaux tarifs à leurs clients à chaque modification des cours des cuivreux ; de plus, l'impression et la diffusion de chaque tarif sont onéreuses (1 à 2 millions d'anciens francs pour chaque nouvelle édition).

Les cuivreux sont donc fortement pénalisés par les variations brutales qui affectent leurs cours, ce qui peut favoriser la substitution par des produits aux cours plus stables : l'aluminium par exemple.

N.B. : On remarquera, toutefois (cf figure 35), que les cours du laiton sont beaucoup plus stables que les cours du cuivre.

A contrario, les variations en dents de scie des cours du cuivre peuvent rendre extrêmement délicate la décision d'abandonner ce métal : dans certains cas, les études nécessaires pour mettre au point l'emploi de matériaux de substitution sont souvent longues, - j'en veux pour exemple le temps mis par la Société Chausson pour mettre au point des radiateurs en aluminium qui donnent satisfaction - , la mise en place des investissements et des technologies adaptés à l'emploi de matériaux de substitution peut être aussi longue (de l'ordre de 3 à 4 ans). Ne risque-t-on pas de déclencher, lorsque la substitution est économiquement rentable, des investissements (ou des études) qui ne le seront plus au mòment où ils commencent à devenir productifs, dans le cas où les cours du cuivre seraient en baisse. En fait, compte tenu de l'écart croissant de prix à long terme entre le cuivre et ses concurrents, le malaise ne pourrait être que passager, mais quand on connaît la fragilité de la trésorerie de la plupart des entreprises, on voit que des ennuis momentanés peuvent être mortels.

On peut aussi se poser la question de savoir quelle sera la réaction des producteurs de cuivre face à la substitution : ne seront-ils pas tentés de limiter leur profit pour briser momentanément toute vélléité d'abandon du cuivre.

.../...

3 -/LA PROMOTION DES MATERIAUX DE SUBSTITUTION/

La vitesse de circulation de l'information économique n'est pas infinie, ce qui donne une prime de situation aux cuivreux. Dans un marché concurrencé, la promotion des ventes jouira un rôle fondamental, et l'ampleur de la substitution sera largement conditionnée par les rapports de force entre les organes de promotion des divers matériaux.

3 - 1 - Rapport de forces entre organismes de promotion.

En général, les organismes chargés des intérêts du cuivre dans le monde ont une attitude moins agressive que la concurrence : d'aucuns ne vont-ils pas jusqu'à dire que les "Centres du cuivre" se contentent de marquer les points, c'est-à-dire de tenir à jour les statistiques. Laissons la responsabilité de cette affirmation à son auteur ; elle me semble d'ailleurs mal refléter la situation française actuelle.

La concurrence est représentée par les polymères dont la croissance annuelle, de l'ordre de 20 à 25 % par an en moyenne, s'effectue en majeure partie dans des domaines étrangers au cuivre : l'attaque systématique des positions détenues par le métal rouge n'est pas un objectif primordial. Les aciers inoxydables, le titane, appellent à peu près les mêmes remarques que les polymères. En fait, la concurrence est surtout âpre du côté de l'aluminium, dont la croissance est tributaire, pour une part non négligeable, du marché qu'il prendra au cuivre dans la construction électrique (qui constitue, rappelons-le, 50 % des débouchés du cuivre).

En fait, l'agressivité de l'aluminium est variable suivant les pays : en Angleterre, où il n'existe pas de grand producteur national, le centre de développement de l'aluminium se contente de faire des statistiques, paraît-il. En France, du fait de la présence du Groupe Péchiney, l'aluminium est particulièrement redoutable pour le cuivre.

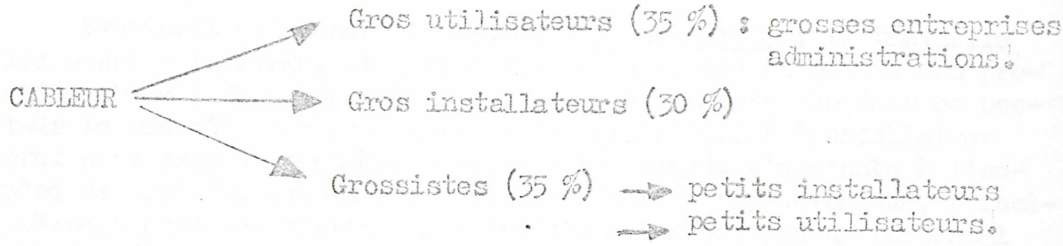
3 - 2 - Les difficultés rencontrées lors de la promotion de matériaux de substitution : structure de la distribution.

Les moyens de propagande au service des concurrents du cuivre sont limités pour d'évidentes raisons financières. Les objectifs des promoteurs de matériaux rivaux du cuivre seront donc en deçà des possibilités réelles de substitution, les préférences iront naturellement vers les marchés susceptibles de rapporter les plus gros tonnages au moindre coût (il s'agira bien souvent de marchés où le nombre d'interlocuteurs est réduit).

On peut se demander : qui convaincre ?

.../...

Dans le secteur des câbles isolés - que nous prendrons en exemple et qui donne des résultats de portée générale -, on peut distinguer quatre types d'opérateurs : câbleur, grossiste, installateur et client final comme le montre le schéma ci-dessous :



Pour le câbleur, la substitution du cuivre par l'aluminium se traduit par une baisse du chiffre d'affaires, qui n'est pas toujours appréciée par les actionnaires, même si la marge bénéficiaire reste inchangée (raison psychologique). De plus, lorsque coexistent deux fabrications (cuivre et aluminium), le câbleur doit constituer un double stock, ce qui n'est pas intéressant, ni sur le plan financier ni sur le plan pratique (organisation du stockage) ; par crainte de la concurrence, les câbleurs répugnent toujours à supprimer un article de leurs fabrications. En fait, il semble surtout qu'en période de hausse des cours, le cuivre ne soit pas si gênant qu'on veut généralement le dire : la Direction des Prix admet une certaine échelle mobile indexée sur les cours du cuivre, et, dans un stock, rien ne ressemble plus à du cuivre que du cuivre ! Il semble donc difficile de demander aux câbleurs de faire de la propagande en faveur de l'aluminium. Toutefois, certains câbleurs semblent assez favorables à l'aluminium, ce qui peut paraître a priori assez étrange : en fait, une fois la substitution complètement réalisée, le relèvement des prix des conducteurs en aluminium pourrait permettre un relèvement des marges bénéficiaires, si du moins la Direction des Prix donne son accord.

Si nous nous plaçons maintenant à l'échelon des grossistes, des remarques analogues s'imposent : les installateurs se refusent à stocker, c'est au grossiste de le faire ; l'apparition de l'aluminium se traduit pas l'augmentation du nombre d'articles en stock. En un sens, les grossistes auraient intérêt à ce que la substitution soit totale, mais c'est une vue de l'esprit. De plus, les grossistes travaillent au pourcentage dont la limite supérieure est fixée par la Direction des Prix (en France, du moins). On conçoit donc que, du fait du contrôle des prix, un conducteur aluminium moins cher qu'un conducteur cuivre équivalent est moins rémunérateur pour les grossistes : en fait, si la substitution était totale, les grossistes auraient une bonne position de négociation pour demander le relèvement de leur pourcentage de marge.

Ces remarques s'appliquent à tout membre d'un circuit de distribution qui travaille au pourcentage : VRP, revendeur, etc...

Pour maintenir constante la marge des VRP, les entreprises leur accordent un pourcentage de 5 % sur câble cuivre, et 7 % sur câble aluminium, ce qui ne va pas sans créer des complications comptables ou même des conflits entre VRP (si l'un est chargé de la vente de câbles en cuivre, l'autre de câbles en aluminium) : la nature a horreur de l'inégalité, même si elle n'est qu'apparente!

Examinons maintenant le cas de l'installateur : il travaille lui aussi à la marge, et a donc intérêt à mettre en oeuvre des produits chers (câbles en cuivre par exemple), encore que dans ce secteur le contrôle des prix soit moins pointilleux (l'installateur peut sans trop de problème maintenir sa marge). L'obstacle à l'emploi de produits nouveaux est surtout d'ordre psychologique, principalement pour les petits installateurs qui n'ont pas un personnel formé à l'aluminium.

L'action de promotion de produits nouveaux sera assez difficile les installateurs sont très nombreux, et constituent un groupe très mouvant, et, en général, peu sensibilisé, par formation, aux problèmes de prix de revient ; on assiste souvent au cycle suivant : après quelques années passées chez un patron, un ouvrier électricien fonde sa propre entreprise qui atteint un certain niveau de développement ; en général, au bout d'un certain temps, l'entreprise se disloque, le nouveau patron n'ayant pas les qualités de gestionnaire requises. L'assistance aux réunions d'information sur les bienfaits de l'aluminium est réduite (3 à 4 participants pour 40 invitations lancées) : les patrons des petites entreprises sont très occupés, tels "maître Jacques" de la pièce, ils doivent rechercher les marchés, régler les points techniques délicats, souvent même travailler avec leurs ouvriers.

Reste enfin le client qui peut seul être motivé par une économie, en admettant qu'il en subsiste une après la dîme (et encore le mot est mal choisi) prélevée par les circuits de distribution (un radiateur auto qui coûte 55 francs départ usine, coûte 150 à 200 F. pour l'utilisateur final ; le fil électrique voit son prix doubler de l'usine au client final !). A partir de quel pourcentage d'économie la substitution est-elle motivante ?

Il faut d'ailleurs distinguer 2 types de clients : le "1er client" qui met en oeuvre le matériau dans un "assemblage" dont il est propriétaire à un certain moment (constructeur d'automobiles, promoteur immobilier), et le client final qui achète l' "assemblage" à titre définitif (sidérurgiste qui achète des câbles électriques pour équiper son usine, particulier qui achète une voiture, une maison). L' "assemblage" peut être une usine, une maison, etc...

Le choix du type de matériaux dépend de plusieurs facteurs : la valeur R du rapport entre le prix des matériaux entrant dans l' "assemblage" et le prix de l' "assemblage" lui-même est un paramètre fondamental.

.../...

Si le rapport R et le nombre d'assemblages sont tous les deux faibles, le montant global de l'économie apportée par la substitution doit être important pour que le client soit motivé. Ainsi, l'emploi de l'aluminium dans les câbles pour installations domestiques n'apporte qu'une économie de 100 F. par logement : le client risque de ne pas être motivé.

Si, au contraire, le montant global d'économie consécutive à la substitution est important (cas de grandes séries, de grosses installations électriques), un pourcentage d'économie même minime peut être motivant : ainsi un promoteur d'une centaine de logements peut être très intéressé par l'emploi de l'aluminium pour l'installation électrique, car il gagne 10.000 F. en tout. Le cas des grandes séries de l'automobile est un cas particulièrement frappant : une économie de quelques % sur une pièce de grande série peut rapporter des millions de francs. Les promoteurs de matériaux de substitution doivent, dans ce cas, convaincre le "1er client" en lui faisant miroiter l'économie globale apportée par la substitution, économie que le "1er client" n'est pas obligé de reporter sur le client final, étranger à la bagarre, qui n'a pas son mot à dire quant au choix des matériaux : ainsi les fabricants d'armoires électriques peuvent augmenter leur marge en remplaçant les barres en cuivre par des barres en aluminium, sans changer le prix de vente ; les fabricants d'appareils électroménagers peuvent utiliser des bobinages en aluminium, avec les mêmes avantages, sans que le client ne puisse s'y opposer. La substitution sera favorisée dans ce cas, car les clients du 1er type sont peu nombreux, et donc matériellement plus faciles à convaincre.

N.B. : Dans certains cas, ce raisonnement n'est plus valable car c'est le client final qui choisi le métal : ainsi les décolleteurs n'ont aucune initiative dans le choix du métal, c'est le client final qui est souverain.

Si la valeur du rapport R est forte, - ce qui devient de plus en plus rare, car les produits manufacturés sont de plus en plus élaborés -, un pourcentage d'économie faible peut être motivant pour le client à condition qu'il soit informé de l'économie à réaliser ; c'est bien là que le bât blesse : lorsque les interlocuteurs sont nombreux, on butte sur des contraintes de moyens nécessaires pour transmettre l'information.

Les promoteurs de matériaux de substitution devront porter leurs efforts sur les clients, ou, à la rigueur, sur les installateurs dans le cas où le client ne peut imposer le choix du matériau (cas des installations d'eau où le plombier n'admet pas que le client choisisse le métal ; le client d'ailleurs en est souvent techniquement incapable).

.../...

Le succès de la substitution sera donc d'autant meilleur que les circuits de distribution seront plus courts ; les interlocuteurs seront moins nombreux et présenteront une structure centralisée : ainsi l'aluminium représente 20 % du marché des câbles isolés, et son implantation est forte à E.D.F., dans les grandes entreprises (sidérurgie, chimie, etc...) qui absorbent 35 % des câbles produits en France. On pourra d'ailleurs remarquer qu'en Allemagne, où une dizaine de sociétés se partagent le marché de la distribution du courant électrique, la substitution est moins avancée qu'en France. De même, le cuivre est encore employé, en France par les régies d'installation, alors qu'E.D.F., pour des lignes identiques, utilise l'aluminium.

Il y a lieu d'insister sur la structure des entreprises : un organisme décentralisé se comporte comme plusieurs organismes indépendants, et représente un grand nombre d'interlocuteurs à convaincre : ainsi, aux P.T.T., où les directions régionales sont responsables de leur gestion financière, on prévoit que la substitution de lignes téléphoniques en aluminium aux lignes en cuivre sera longue, car il faudra convaincre chacune des instances régionales des avantages technico-économiques apportés par l'aluminium.

Chaque adhésion à un matériau de substitution n'est pas immédiate, même dans des entreprises centralisées (l'exemple de la S.N.C.F. est là pour le prouver), il ne suffit pas de faire circuler l'information économique et technique ; compte tenu des idées préconçues ancrées dans les mentalités, il faut faire le siège des interlocuteurs, faire jouer des amitiés d'école, bref, il s'agit d'opérations assez longues. Au demeurant, la circulation de l'information économique ou technique coûte assez cher (la revue "Information électricité", distribuée à 40.000 exemplaires par l'Aluminium Français, revient à 4 Millions d'A.F.). Faute de moyens suffisants de propagande, certains ignoreront encore longtemps les possibilités de substitution.

Lorsque les circuits de distribution sont longs, malgré une économie réelle apportée par les produits de substitution, la progression de matériaux nouveaux sera très lente, à moins que les clients, poussés par la nécessité d'abaisser les prix de revient, ne fassent eux-mêmes une partie du chemin.

4 - LE ROLE DE L'ETAT

En fait, la puissance publique se trouve concernée à divers titres par le problème des substitutions : à propos des approvisionnements en matières premières, du commerce extérieur, et de la paix sociale conditionnée par une croissance harmonieuse de l'industrie. Rappelons aussi le rôle éventuel de la fiscalité et du contrôle des prix dans les phénomènes de substitution (cf § 3-2).

4 - 1 - Les approvisionnements en matières premières.

Ils constituent une préoccupation essentielle de nombreux gouvernements. La France, par exemple, dépend entièrement de l'étranger pour ses approvisionnements en cuivre, ce qui n'est d'ailleurs pas le cas pour l'aluminium et le nickel. Notre Pays n'a pas non plus de facilités particulières d'accès à des ressources en cuivre, contrairement à l'Angleterre et surtout la Belgique, dont les colonies étaient riches en cuivre, contrairement aux U.S.A. et à l'U.R.S.S., qui possèdent d'importants gisements sur leur territoire. La situation française se traduit par des pertes de devises : 1,5 à 2,5 milliards d'anciens francs par an pour les importations de cuivre (le pétrole représente, lui, 8 milliards d'anciens francs). Cette situation a, d'ailleurs de tout temps, incité les industriels à n'utiliser le cuivre que lorsqu'il s'avérait nécessaire, ce qui n'est pas le cas de la Suisse où la richesse du pays autorise, sans doute, des importations élevées de cuivre (la substitution est donc plus avancée en France qu'en Suisse).

En période de difficultés monétaires, l'Etat, conscient des possibilités de substitution, peut interdire à certains utilisateurs l'emploi du cuivre, donnant ainsi une impulsion nouvelle aux phénomènes de substitution.

C'est ainsi qu'en 1957-58, afin de participer à la défense du franc, le Ministère de l'Industrie a décidé d'interdire l'emploi du cuivre aux entreprises nationalisées : EDF, PTT, SNCF, GDF, pour un certain nombre d'usages. Vis-à-vis de l'industrie privée, le gouvernement s'est limité à demander aux câbleurs et aux installateurs de suggérer à leurs clients d'éviter l'emploi du cuivre. En fait, l'interdiction n'a pas toujours été suivie d'effet, même à EDF ; témoins en sont les diverses lettres de rappel adressées aux directions régionales de cette entreprise. Pour être vraiment efficace l'interdiction doit être relayée par les syndicats professionnels, les bureaux de contrôle (Veritas, etc...), les différents ministères intéressés, etc... .

Dans les pays de l'Est, l'interdiction d'emploi du cuivre est beaucoup plus contraignante : les installations domestiques, les bobinages de moteurs (de moins de 10 cv), de transformateurs, doivent être en aluminium.

En économie libérale, de telles interdictions ne peuvent avoir lieu qu'en cas d'évènement grave (déficit de la balance des paiements, baisse de la valeur du franc). Il faut reconnaître que les mesures d'interdiction de 57-58 ont fait progresser la substitution à pas de géant : le succès remporté à EDF par l'aluminium n'est pas étranger à ces mesures.

Rmq : La substitution n'a pas que des conséquences favorables pour l'Etat. Le déclin d'un matériau peut avoir des conséquences sociales importantes. Nous avons vu le lien très fort existant entre matériaux et procédés de mise en oeuvre : ceci est particulièrement vrai pour le matriçage qui ne peut guère employer d'autres métaux que le laiton. Le déclin des cuivreux au profit des matières plastiques pose un certain nombre de problèmes à cette industrie, qui aura à se restructurer, avec les conséquences sociales que l'on imagine.

4 - 2 - Le rôle de la normalisation.

Une partie importante de l'activité industrielle se trouve enserrée dans un système de normes, nécessaires, il est vrai, pour assurer la sécurité des individus, et pour standardiser la production. Cette normalisation dresse contre les productions nouvelles des obstacles difficiles à franchir pour des raisons diverses :

- Les procédures d'homologation sont extrêmement longues,
- Aucune faute n'est tolérée au cours des essais,
- Les produits nouveaux bénéficient fréquemment de préjugés défavorables : il peut être désagréable, pour les "normalisateurs", de devoir, au cours de réunions de routine, se pencher avec attention sur une nouvelle demande d'homologation.
- Avec l'européanisation des normes, il faut souvent concilier des intérêts divergents : ainsi les Anglais proposent le "copper-clad" pour les câbles domestiques, les Français l'aluminium étamé, les Allemands veulent rester fidèles au cuivre. Comment se faire entendre dans un tel maquis d'intérêts divergents
- Enfin, les normes peuvent constituer des obstacles non tarifaires aux échanges. Ainsi, si l'UTE normalisait les conducteurs en aluminium dans les installations domestiques, l'Europe de l'Ouest risquerait d'être submergée par les productions des pays de l'Est, qui ont une longue expérience des conducteurs en aluminium. Les normes sont donc un excellent moyen d'éviter une concurrence anormale, qui serait préjudiciable à notre industrie, mais cela ralentit la substitution.

C O N C L U S I O N

Si dans le domaine de l'industrie électrique, l'aluminium se présente comme le seul rival du cuivre, il n'en va pas de même dans les autres secteurs où la concurrence est plus diversifiée :

- inox, titane et même matières plastiques dans les assemblages exigeant une bonne résistance à la corrosion.

- zamak, polymères et aluminium pour les pièces de mise en oeuvre complexe (pièces moulées, matriçées, décolletées)

- polymères surtout pour les canalisations du bâtiment.

En fait, ce sont les matières plastiques les plus dangereuses pour le cuivre; ennemi multiforme, aux propriétés sans cesse améliorées, elles risquent d'apparaître dans des applications inattendues, bousculant les cuivreux comme d'ailleurs beaucoup d'autres substances

D'un point de vue technico-économique, dès que les cours du cuivre dépassent la zône des 6-8 francs au kilo (wirebar), la progression des matériaux concurrents devrait présenter une certaine ampleur principalement d'ailleurs dans la construction électrique, le bâtiment et les biens de consommation.

En fait, la 3ème partie nous a montré que des obstacles liés à la structure de l'industrie, à l'organisation des circuits de distribution, aux mentalités des opérateurs et à la circulation de l'information technique et économique, risquaient de ralentir considérablement la vitesse des phénomènes de substitution. C'est pour cela que je ne me hasarderai pas à écrire : "Si les cours du cuivre dépassent X francs/kg, la consommation de cuivre diminuera de Y %"

A l'inverse, toutefois, les variations brutales de cours, si elle ne sont pas jugulées comme c'est le cas aux U.S.A. peuvent favoriser l'abandon du cuivre. Mais à vrai dire, seule une pression gouvernementale soigneusement orchestrée pourrait accélérer le déclin du métal rouge, encore qu'il ne faille pas se leurrer : en U.R.S.S., où sévit la propagande anti-cuivre, la consommation annuelle atteint 800.000 tonnes.

Si les cours du cuivre dépassaient 8 à 10 F/kg de façon durable, ce métal devrait enregistrer, à moyen terme, une baisse de ses parts de marché, voire une chute légère de la consommation, mais il ne perdrait pas du jour au lendemain sa primauté au sein des métaux non-ferreux : n'oublions pas que son implantation est très diversifiée, qu'il est difficile de se passer de lui pour réaliser certains "appareils(pièces de contact électrique, très grosses machines électriques, collecteurs de moteurs, instruments de musique à vent etc... et que les réveils tardifs de vieux matériaux peuvent être surprenants.

/....

Rassurons tout de même les anxieux : en cas de pénurie durable et "planifiée" de métal rouge, des matériaux pourraient prendre son relai dans la plupart des applications, à la satisfaction générale.

Ne terminons pas sans livrer quelques réflexions d'ordre méthodologiques :

Lors de l'étude d'une substitution, il est indispensable d'effectuer une analyse aussi poussée que possible des propriétés des substances concurrentes.

Il faut ensuite dégager l'état actuel et l'évolution prévisible des besoins satisfaits par la substance concurrencée qui présente un éventail de propriétés spécifiques bien adaptées aux utilisations qu'impliquent ces besoins. Nous sommes alors en mesure de définir dans quels axes et à partir de quels prix peuvent se manifester les matériaux concurrents.

Il faut enfin s'efforcer de retirer une partie de leur magie aux chiffres en examinant les facteurs humains non quantifiables qui peuvent influer sur le cours des substitutions.

Une telle approche méthodologique devrait s'appliquer à toutes les études de substitutions entre matériaux.

A N N E X E

RACCORDEMENT DE CONDUCTEURS EN ALUMINIUM

1/ RACCORDEMENTS PAR SERRAGE MECANIQUE :

Ces raccords nécessitent une préparation soignée des surfaces en contact : il faut détruire par abrasion la couche d'alumine, puis éviter la formation d'une nouvelle pellicule en enduisant le conducteur d'une graisse neutre ; l'effort de serrage doit aussi être soigneusement vérifié à la clef dynamométrique (un serrage trop faible est synonyme de mauvais contact, un serrage trop fort peut aboutir au dépassement de limite élastique des boulons) ; de plus, la surface du contact doit être assez importante.

Remarquons que l'on peut remplacer la couche d'alumine par une couche d'étain, mais le prix du conducteur aluminium s'en trouve augmenté : cette solution est appliquée aux barres susceptibles de fréquents démontages.

2/ RACCORDEMENTS PAR DEFORMATION PLASTIQUE :

La pression de serrage est obtenue par déformation. Le brossage du conducteur n'est plus indispensable, car la couche d'alumine est détruite lors de la déformation. Le raccord doit être suffisamment dimensionné pour éviter les chutes de tension. On utilise des manchons comprimés ou étirés (conducteurs tendus) ou des raccords par poinçonnage profond (conducteurs non tendus)

Les raccordements par déformation plastique nécessitent l'emploi d'un outillage spécialisé (presse hydraulique, etc. ...), mais leur qualité est relativement indépendante de l'opérateur.

3/ RACCORDEMENTS PAR SOUDURE :

On peut effectuer un sondage oxyacétylénique ou à l'arc sous atmosphère d'argon. Les barres sont justiciables de ce traitement si leur démontage est très peu fréquent.

Citons aussi le soudage par pression à froid : il permet la fixation de sorties en cuivre sur des bobinages en bandes minces d'aluminium.

On peut aussi raccorder par soudure les cables isolés : une réaction aluminothermique fournit la chaleur nécessaire à fondre les deux extrémités à réunir.

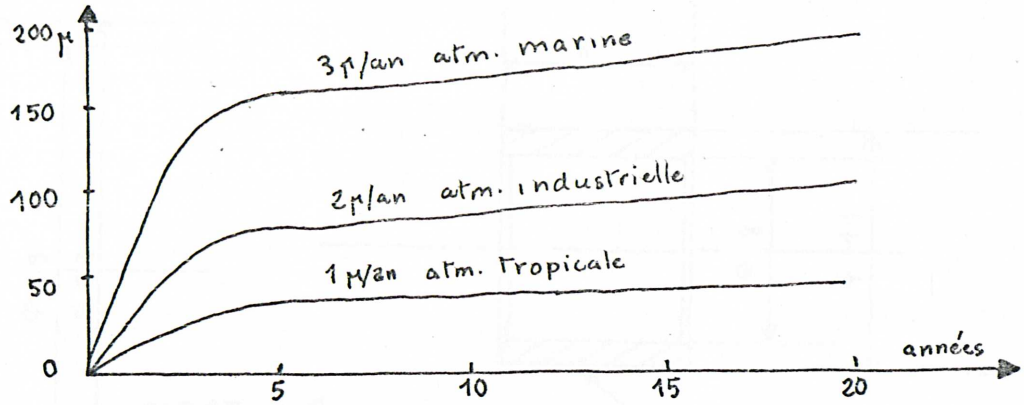
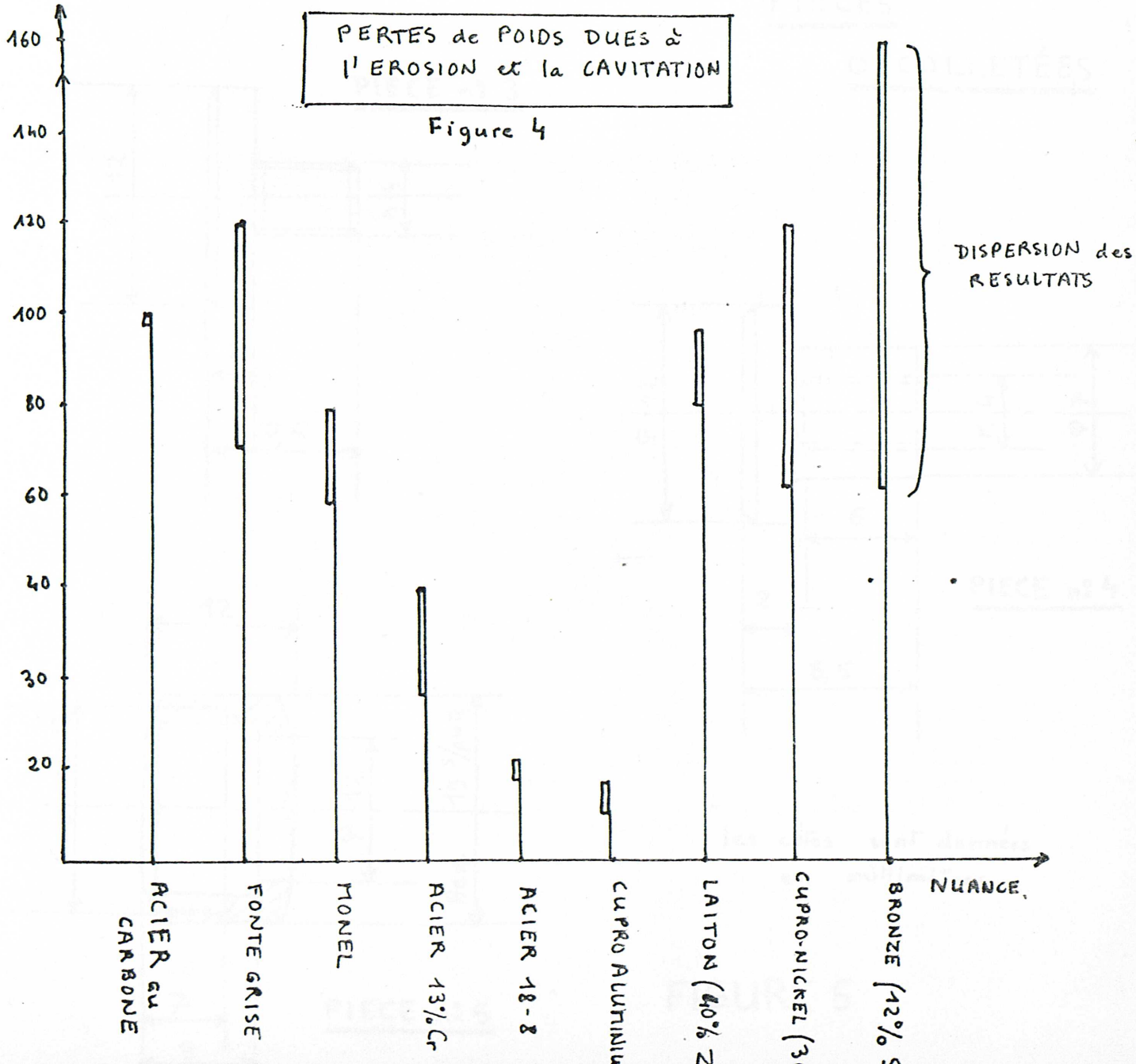
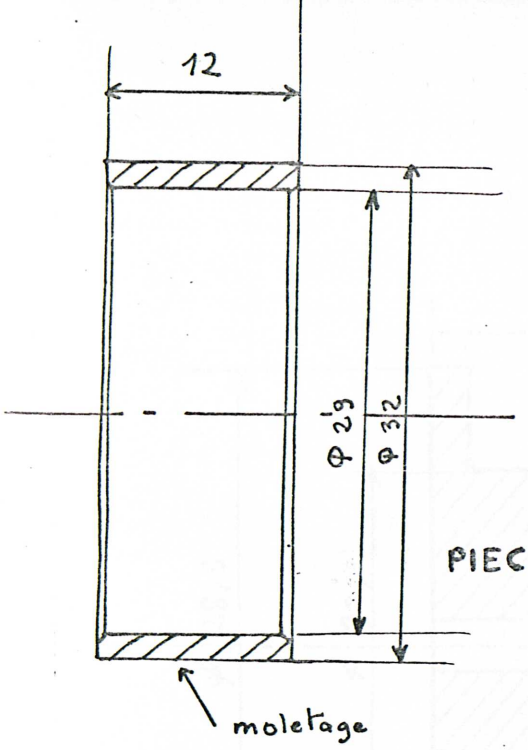
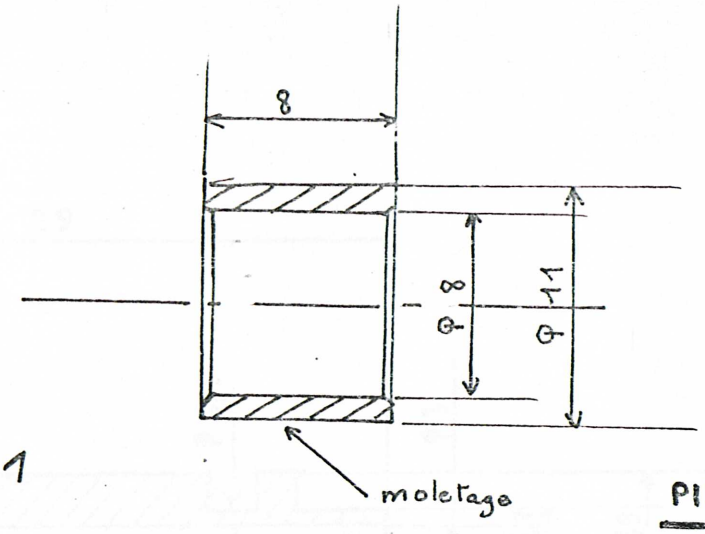


Figure 3 Profondeur maxima des piqûres en fonction du temps (tôle d'aluminium 99,5%)





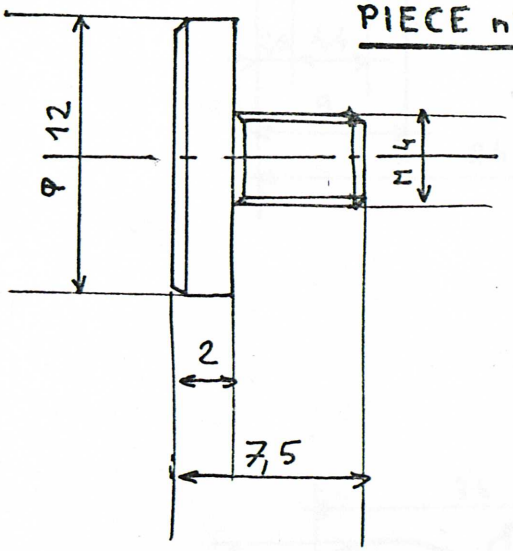
PIECE n° 1

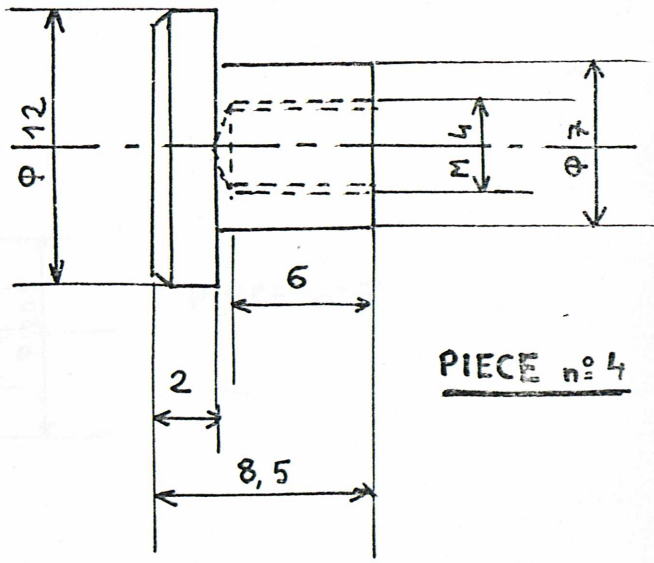


PIECE n° 2

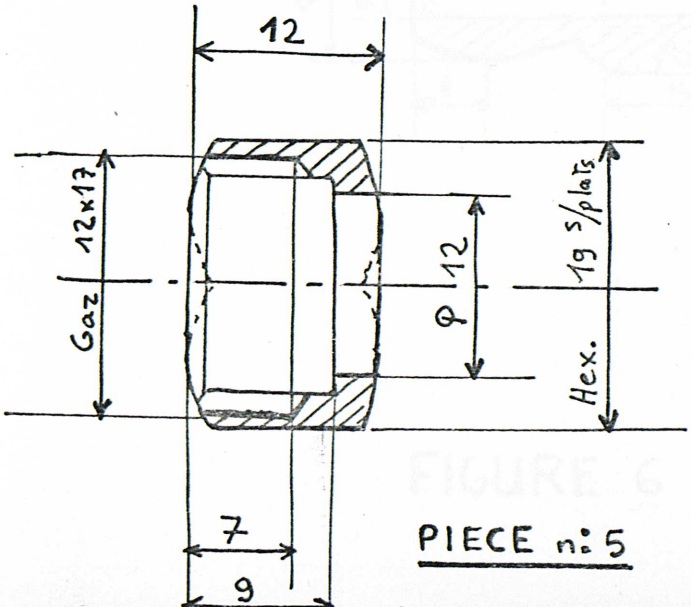
PIÈCES DECOLLETÉES

PIECE n° 3





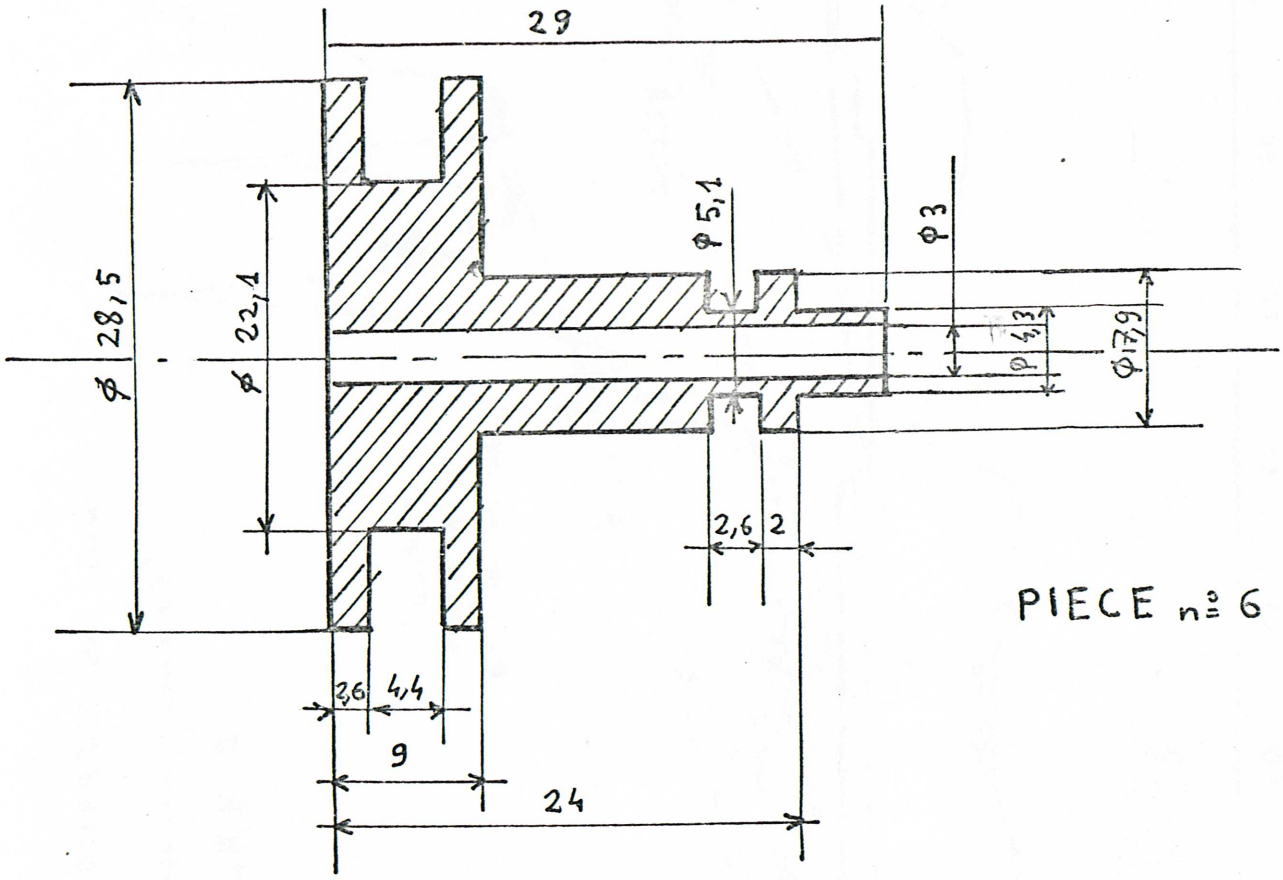
PIECE n° 4



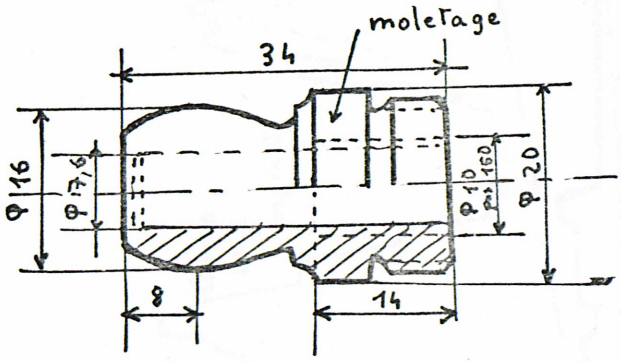
PIECE n° 5

les cotes sont données en millimètres

FIGURE 5



PIECE n° 6



PIECE n° 7

FIGURE 6

EVOLUTION COMPAREE des cours

(cuivre, aluminium, zamak 3)

FIGURE 7

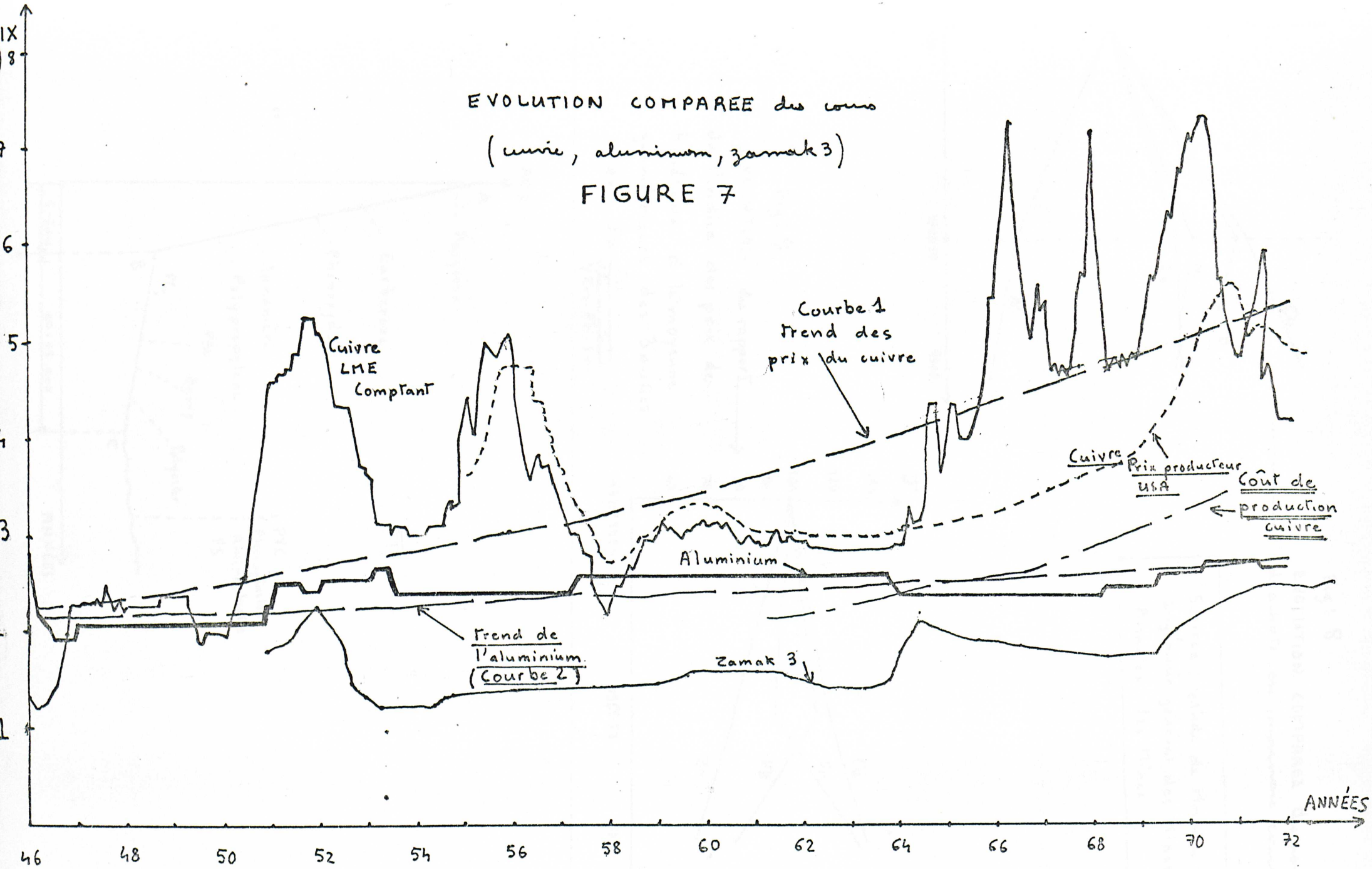
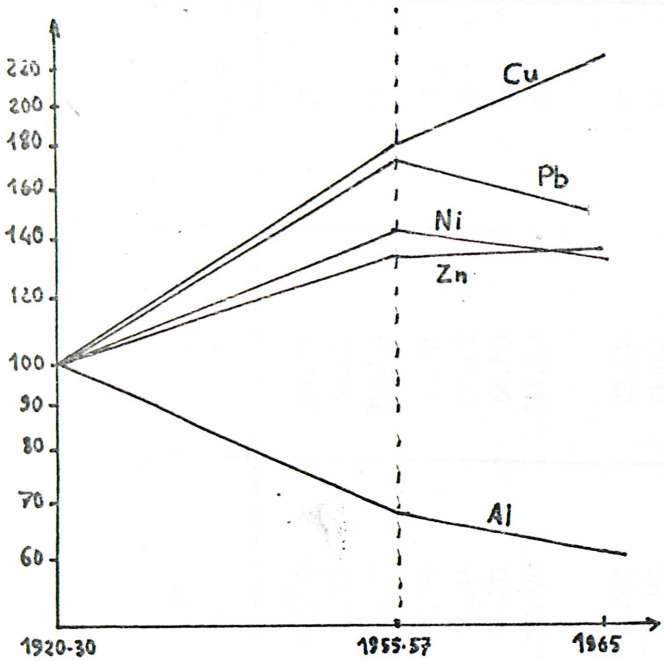


Fig : 8

EVOLUTION COMPAREE des pouvoirs d'achats en monnaie constante

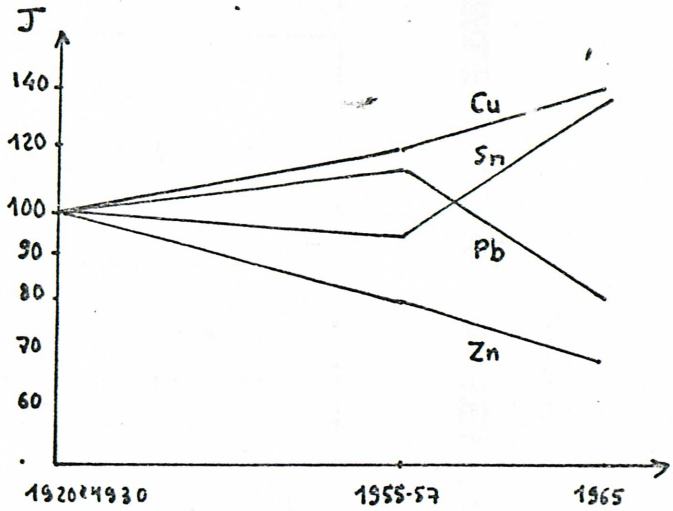


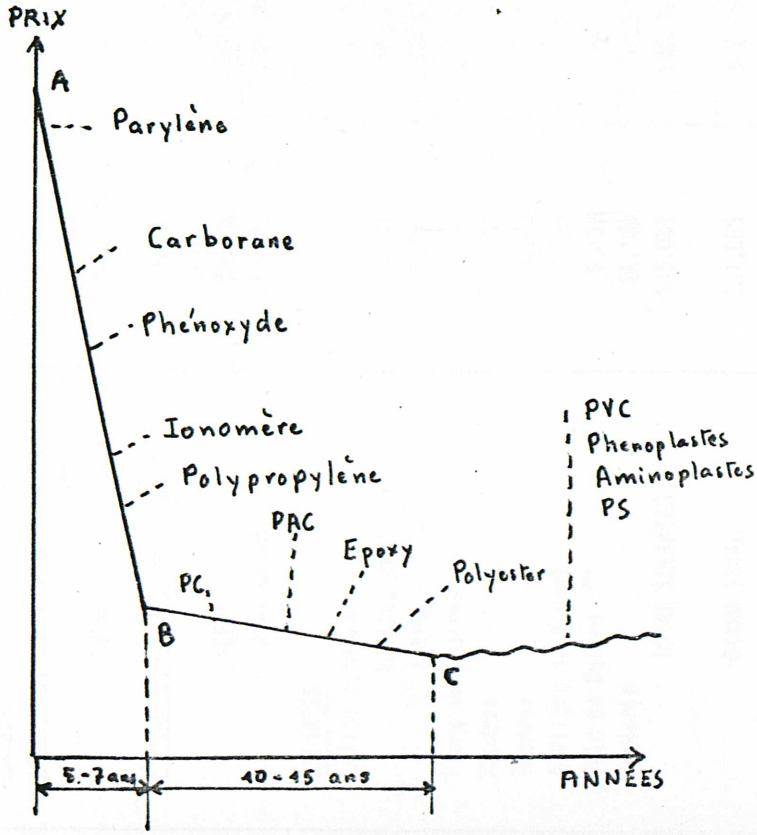
Source : étude de Monsieur LEGOUX
Ingénieur général des Mines
Annales des Mines

Fig : 9

EVOLUTION du rapport de l'indice des prix de 4 métaux à la moyenne géométriques des 3 autres

ex : $J = \frac{Cu}{\sqrt[3]{Zn \cdot Pb \cdot Sn}}$





	1966 Tonnes	1967 Tonnes	1968 Tonnes	1969 Tonnes	1970 Tonnes	1971 Tonnes	66 - 71 % Variation
CUIVRE							
Produits électriques : fils,câbles	163.180	163.660	168.630	196.440	198.842	203.731	25
barres	9.433	11.250	10.918	14.021	15.375	14.420	53
TOTAL	172.613	174.910	179.548	212.461	214.217	218.151	26
Produits mécaniques : Laminés	13.258	13.540	13.057	17.272	15.259	13.701	3
Tubes	40.764	41.304	46.030	52.682	50.544	53.052	30
TOTAL	54.022	54.844	59.087	69.954	65.803	66.753	24
TOTAL CUIVRE	226.635	229.754	238.635	282.415	280.020	284.904	26
ALLIAGES							
Laiton : laminés	25.300	21.324	21.671	27.290	23.983	22.506	- 11
barres, profilés	55.000	54.531	58.411	70.368	62.360	61.047	11
autres	8.300	10.209	9.855	12.616	11.790	9.790	18
Flans monétaires	350	610	630	959	782	489	-
Poudres	880	847	903	1.721	1.368	1.244	41
Bronzes	4.300	6.533	5.793	10.893	10.637	10.537	145
Alliages de Nickel	3.000	2.677	2.801	3.377	4.955	5.200	7
Sels de Cuivre **	9.800	8.900	7.336	9.276	11.024	11.508	17
Fonderie	28.100	30.370	29.000	30.800	31.947	29.772	6
TOTAL ALLIAGES	135.030	136.001	136.400	167.300	158.846	152.093	13
GRAND TOTAL	361.665	365.755	375.035	449.715	438.866	436.997	21

* Cuivre contenu dans les produits en cuivre et en alliages de cuivre.

** Sulfate et oxychlorure.

CONSOMMATION APPARENTE DE CUIVRE EN FRANCE

Tableau n° 11

en tonnage (en milliers de tonnes)

UTILISATIONS	ANNEES																	
	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971
emi-produits cuivreux	1265,3	1436,4	1413,9	1475,0	1556,7	1555	1802	1804	1792	1938	2096	2123	2011	1958	2112	2337	2331	2229
ont Cuivre contenu	799,2	926,6	948,7	1005,4	1088	1040	1190	1215	1220	1270	1420	1445	1367	1344	1409	1545	1590	1559
onderie	184,8	206,6	213,8	207,3	198	191	225	235	226	224	230	230,7	210	206	220	235	239	226,6
els de cuivre	41,5	57,1	57,7	54,1	50,4	46	56	56	45,5	40	37,5	35,5	35,8	33,4	32	33	31,2	30,7
ivers	22,8	2,8	3,1	4,4	4,1	5,7	4,4	5,9	7,1	8	8,9	8,9	9,4	11,6	11,5	14,9	16,5	14,4
otal	1514,4	1702,9	1688,5	1740,8	1809	1798	2088	2104	2071	2209	2373	2399	2266	2209	2376	2620	2618	2501
onsommation de uivre raffiné	1086,2	1207,2	1229,6	1310,3	1378	1312	1566	1618	1554	1595	1769	1741	1629	1590	1737	1852	1946	1836

en pourcentage (%)

UTILISATIONS	ANNEES																	
	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971
emi-produits cuivreux	83,6	84,3	83,6	84,7	86,0	86,5	86,3	85,9	86,6	87,7	88,3	88,5	88,7	88,7	88,9	89,2	89,1	89,1
ont cuivre contenu	52,8	54,4	55,9	57,7	60,1	57,8	57,0	57,8	58,9	57,5	59,9	60,3	60,3	60,8	59,3	59,0	60,7	62,3
onderie	12,2	12,1	12,8	11,9	11,0	10,6	10,8	11,2	10,9	10,1	9,7	9,6	9,3	9,3	9,3	9,0	9,1	9,1
els de cuivre	2,7	3,4	3,4	3,1	2,8	2,6	2,7	2,6	2,2	1,8	1,6	1,5	1,6	1,5	1,3	1,2	1,2	1,2
ivers	1,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

EVOLUTION DES UTILISATIONS DE CUIVREUX DANS LES PAYS DE L'O.C.D.E.

Tableau 12 -

Pays	ALLEMAGNE				ROYAUME-UNI				ITALIE			
Années	1955	1960	1965	1970	1955	1960	1965	1970	1955	1960	1965	1970
DEMI-PRODUITS	390,8	570,5	656,2	795,1	616,3	672,0	754,0	628,0	126,6	201,0	263,3	379,0
Cuivre	248,3	371,7	434,0	535,7	388,4	447,1	525,4	425,9	84,6	130,2	178,5	259,5
laminés	23,8	36,9	34,7	41,9	66,1	65,4	67,9	55,6	8,9	10,4	14,3	16,8
fils	187,0	270,1	331,5	410,8	249,8	283,9	342,1	286,1	65,8	98,0	136,0	199,9
profilés	37,5	29,8	24,6	27,8	20,1	22,3	24,7	13,4	5,5	13,6	11,9	22,2
tubes		34,9	43,2	55,2	52,4	75,5	90,7	70,8	4,4	8,2	16,3	20,6
Laiton	134,1	185,9	207,5	237,8	203,8	198,1	191,6	169,7	39,5	67,1	79,7	113,4
laminés	51,1	56,1	52,9	59,3	84,6	68,2	63,4	51,7	17,0	24,5	24,1	34,0
profilés	72,2	85,9	99,9	116,6	93,4	102,7	102,8	96,0	16,3	34,0	43,9	62,8
tubes	10,8	31,8	42,4	44,8	14,1	15,2	13,7	15,0	4,4	5,6	7,7	11,1
fils		12,1	12,9	17,1	11,1	12,0	11,3	6,9	1,8	3,0	4,0	5,5
Autres alliages	8,4	12,9	14,9	21,6	24,1	26,9	37,4	32,4	2,5	3,7	5,1	6,1
FONDERIE	66,1	73,8	74,7	76,9	69,4	85,5	76,1	63,1	22,4	17,5	28,4	51,8
SELS DE CUIVRE	3,6	4,5	10,4	11,5	10,4	7,3	6,1	?	25,5	28,5	6,7	6,3
DIVERS	0,5	1,2	2,0	3,5	?	?	8	?	1,0	1,0	1,6	5,9
TOTAL	461,0	650,0	743,3	887,0	696,0	764,9	836,2	691,1	175,5	248,0	300,0	443,0

(milliers de tonnes)

EVOLUTION DE LA CONSOMMATION DU CUIVRE DANS QUELQUES PAYS DE L'O.C.D.E.

Tableau n° 13

Pays	FRANCE				SUISSE				Belgique - Luxembourg				U.S.A.
Années	1955	1960	1965	1970	1955	1960	1965	1970	1955	1960	1965	1970	1965
DEMI-PRODUITS	235,8	279,7	348,2	407,5	45,8	50,6	69,2	80,4	?	118,1	156,9	179,1	2 181,
Cuivre	164,4	195,7	241,1	287,4	24,0	24,7	43,2	49,4	65,8	77,3	114,5	136,0	1 607,
laminés	12,8	13,1	15,4	16,9	2,6	3,3	3,6	2,9					127,
fils	121,0	147,2	174,4	208,4	18,9	17,9	34,9	41,9					1 017,
profilés	12,8	8,4	10,5	13,7	1,6	2,0	2,3	2,3					71,
tubes	17,8	27,0	40,8	48,4	0,9	1,5	2,4	2,3					391,
Laiton	66,9	79,9	97,5	105,5	21,6	25,7	25,9	31,0	36,6				574,
laminés	22,7	25,3	30,5	29,5	7,2	8,5	8,1	10,0					251,
profilés	37,8	48,2	59,6	67,5	13,6	15,4	14,1	15,5					271,
tubes	3,6	3,1	4,1	5,5	0,8	1,0	1,4	1,3					51,
fils	2,8	3,3	3,3	3,0	?	0,8	2,3	3,2					?
Autres alliages	3,1	4,0	9,2	14,0	?	0,2	?	1,0		40,8	42,4	43,0	?
FONDERIE	42,0	42,1	36,9	33,5	1,6	3,7	11,2	10,4	?				408,
SELS DE CUIVRE	16,0	15,1	12,1	13,0	1	1,0	?	?	4,2	6,5	3,7		43,
DIVERS	13,2	2,2	4,3	5,0	?	?	1,0	0,5					53,
TOTAL	294,2	339,1	401,5	459,0	48,4	55,3	81,4	91,3	106,6	124,6	160,6	220,1	2 686,

(milliers de tonnes)

EVOLUTION DE LA CONSOMMATION DE CUIVRE DANS QUELQUES PAYS DE L'O.C.D.E.

TABLEAU n° 13 (suite)

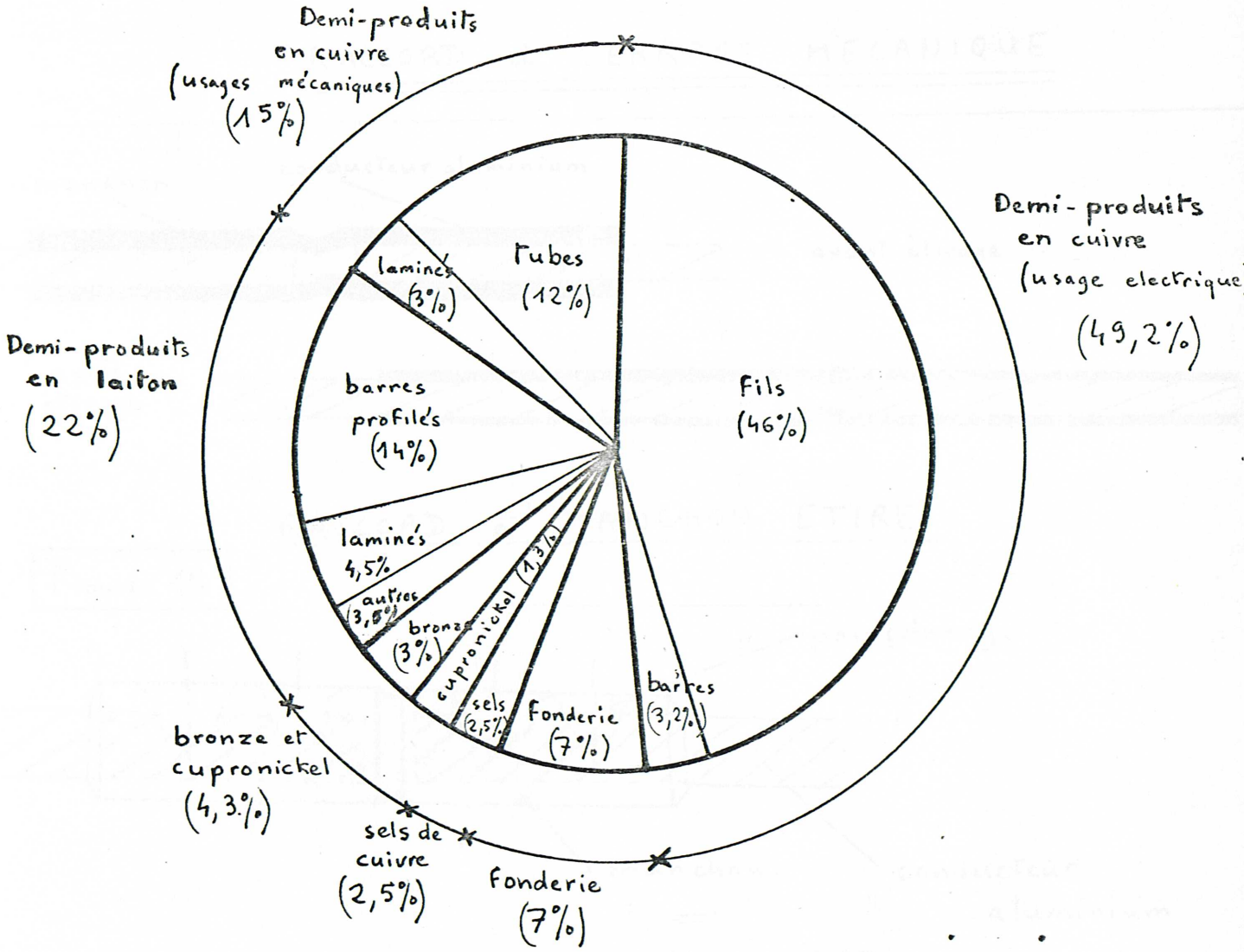
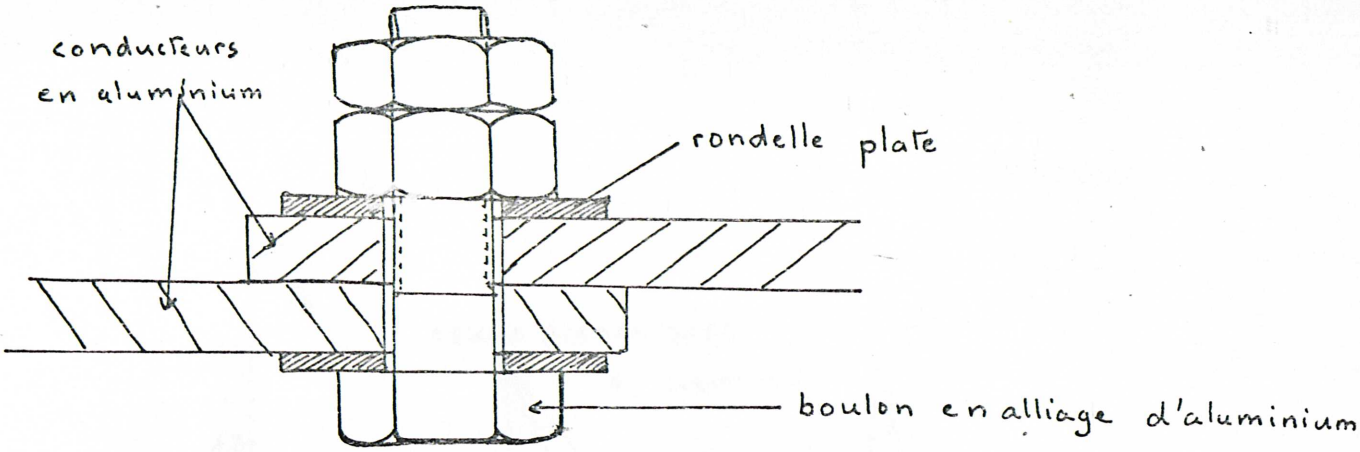
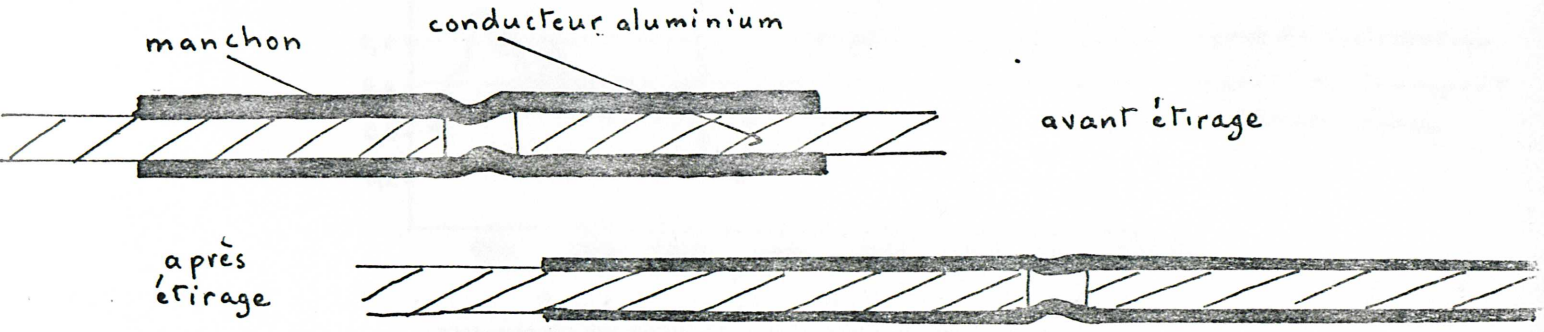


Figure 14 : REPARTITION des UTILISATIONS des cuivreux en FRANCE

(en cuivre contenu)

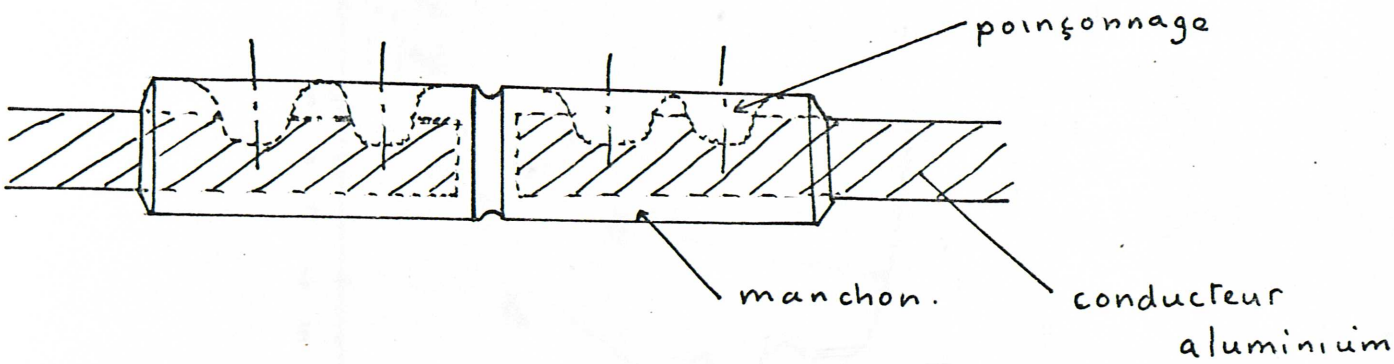


RACCORD à SERRAGE MECANIQUE

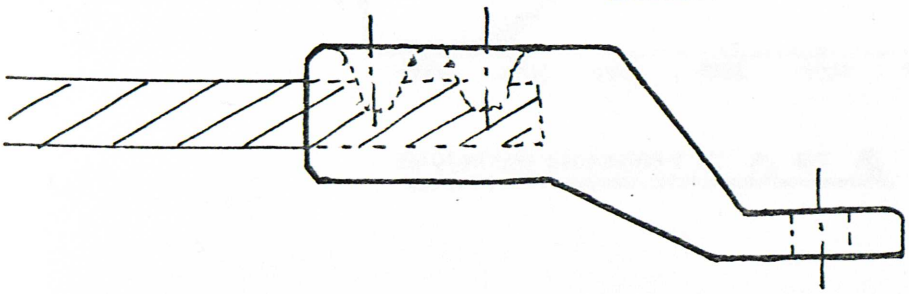


RACCORD à MANCHON ETIRÉ

Figures 15

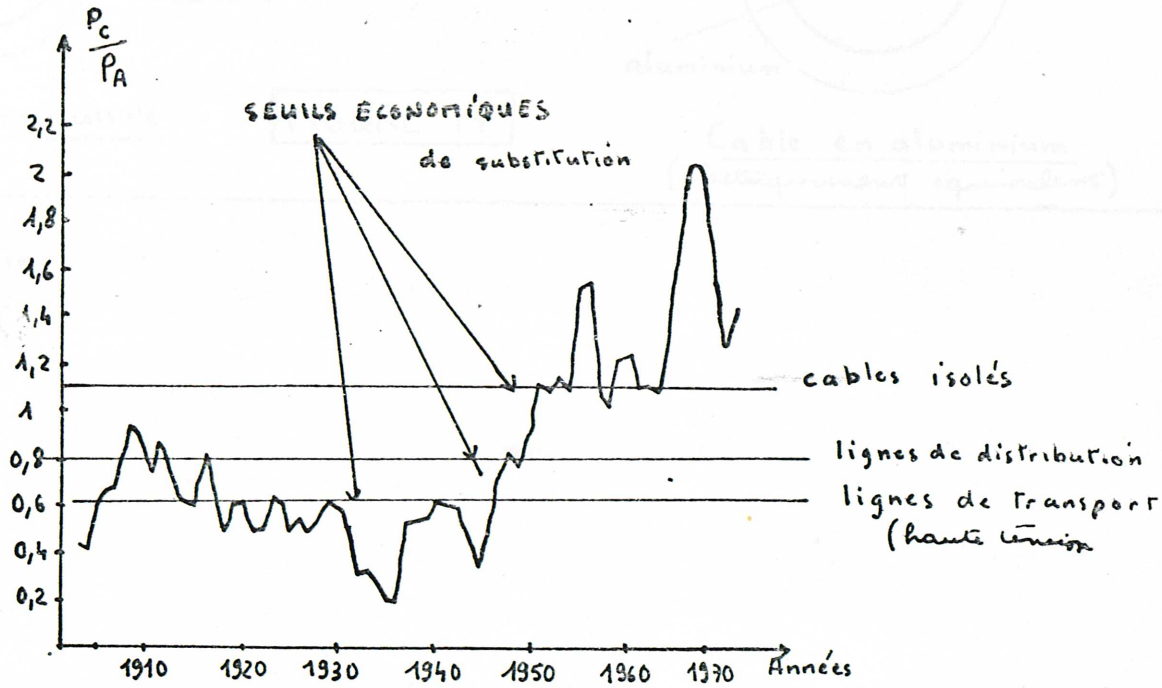


RACCORD par POINÇONNAGE PROFOND

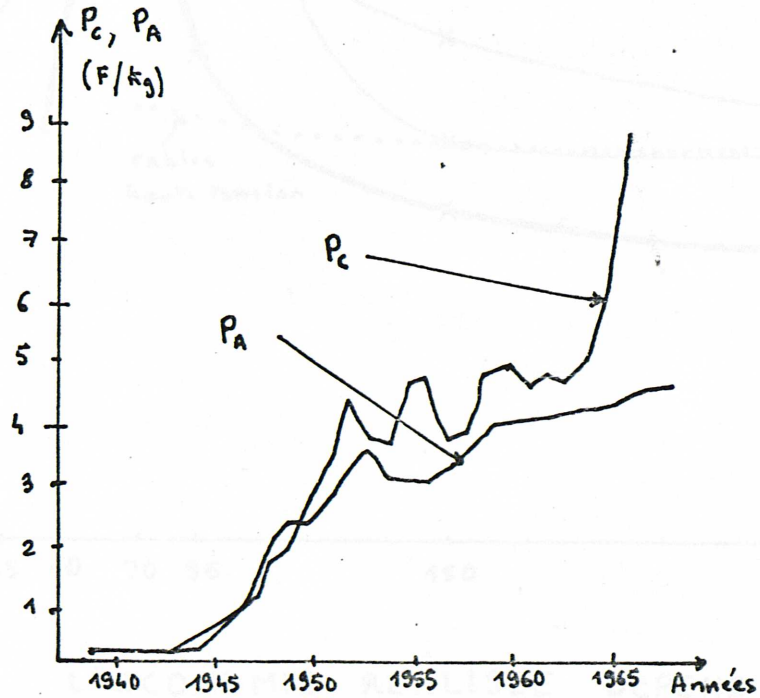


COSSE POINÇONNÉE

RACCORDEMENTS PAR DEFORMATION PLASTIQUE

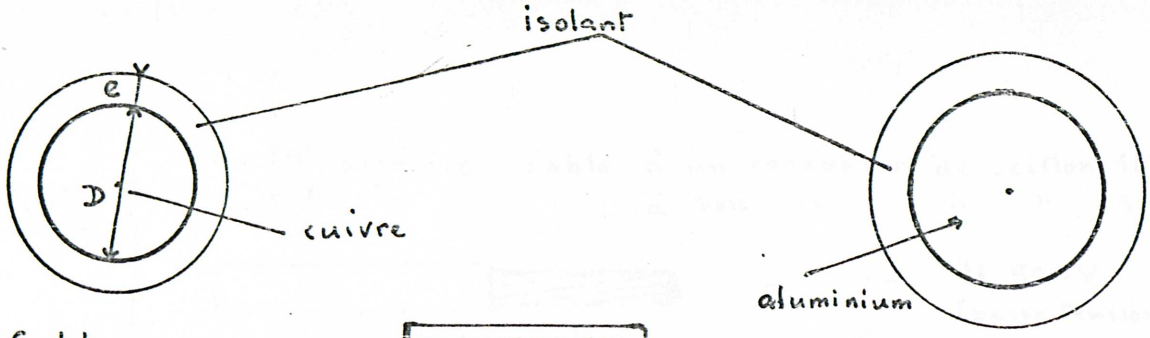


EVOLUTION EN FRANCE DU RAPPORT P_c / P_A.



EVOLUTION EN FRANCE DE P_c ET P_A.

FIGURES 16



Cable en cuivre

FIGURE 17

Cable en aluminium
(électriquement équivalent)

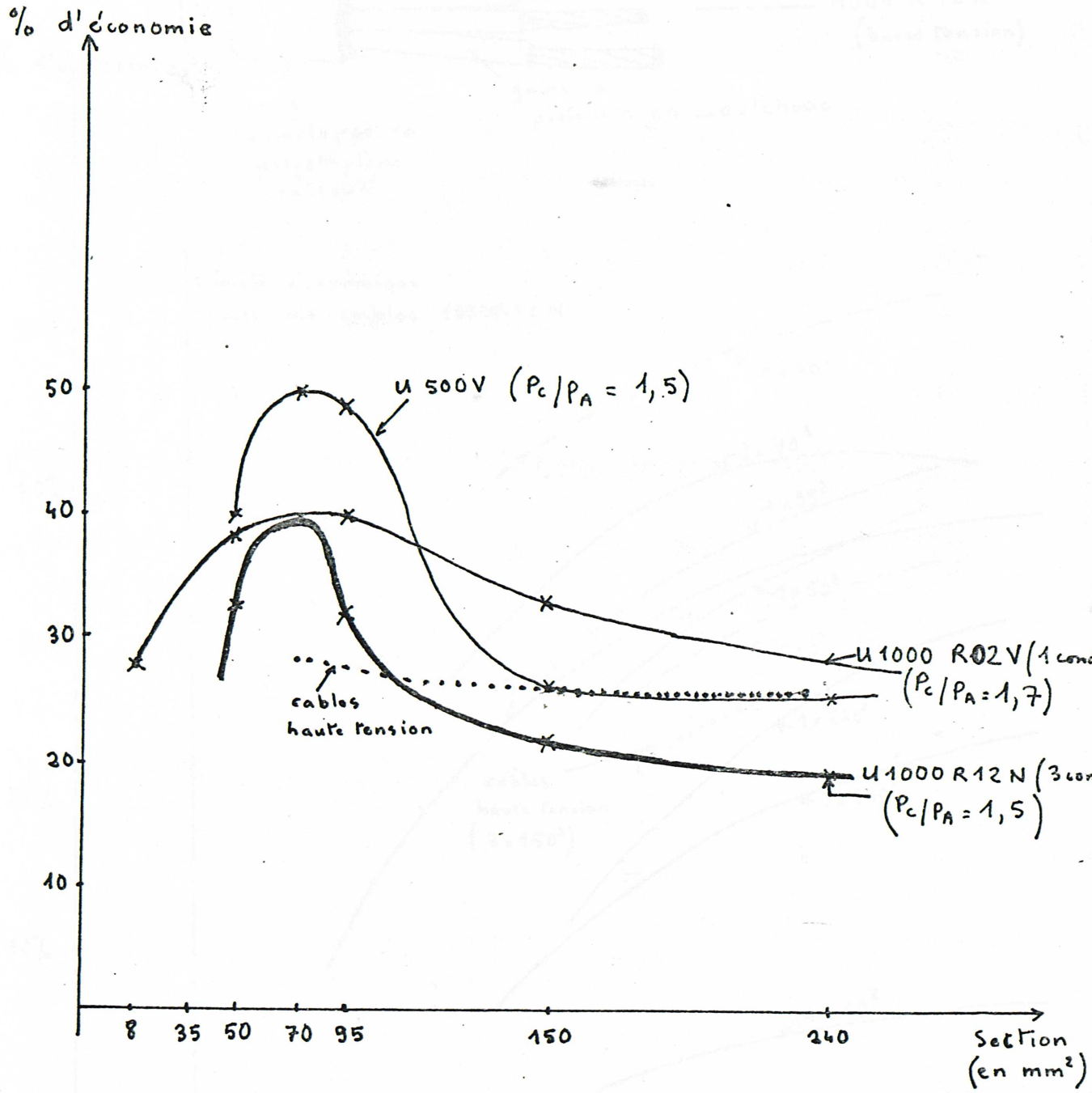


FIG. 19 L'ECONOMIE REALISEE DEPEND de la SECTION du CABLE

(d'après barèmes du syndicat des cables)

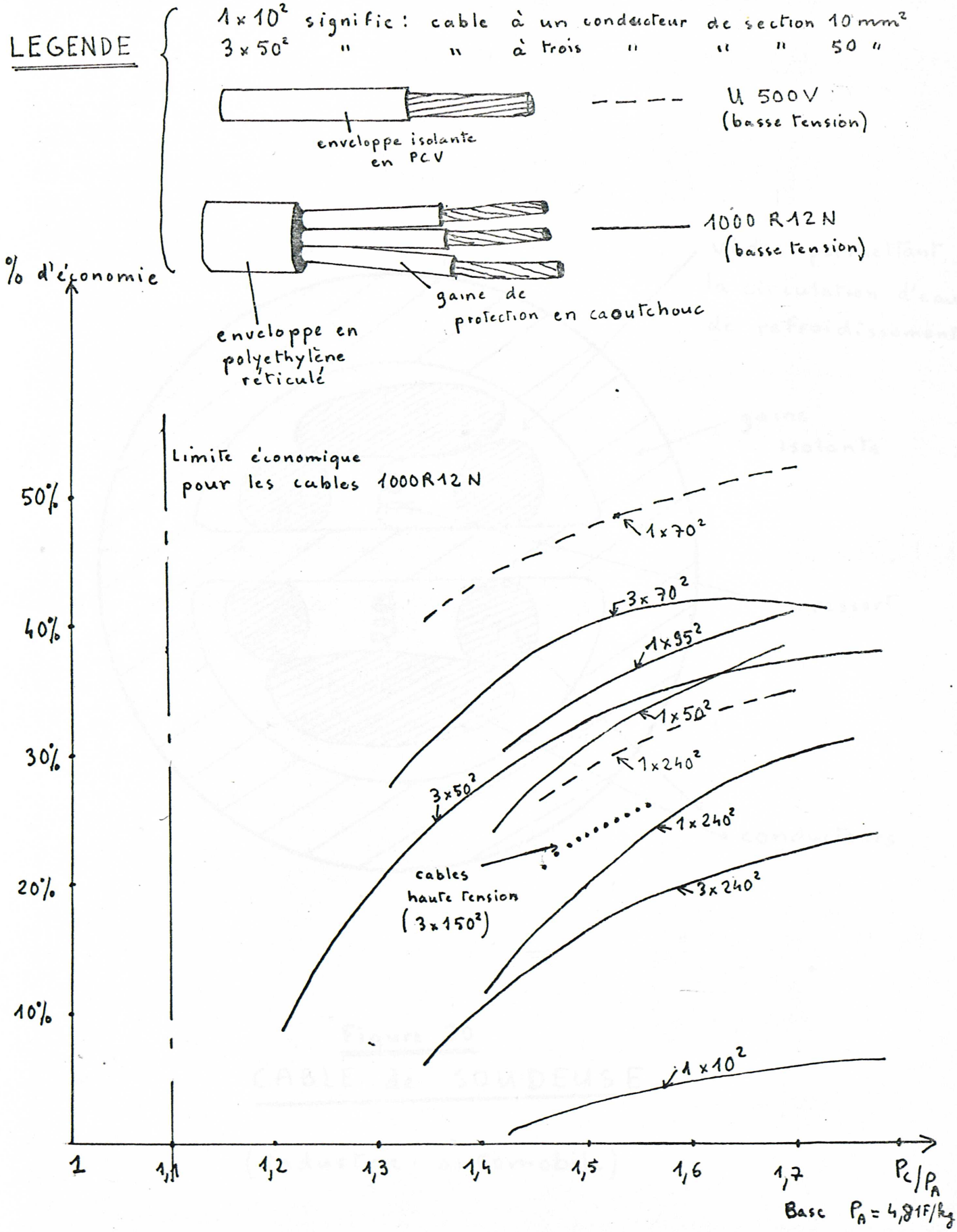


FIG. 18

POURCENTAGE d'ECONOMIE

réalisé en employant des cables en aluminium.

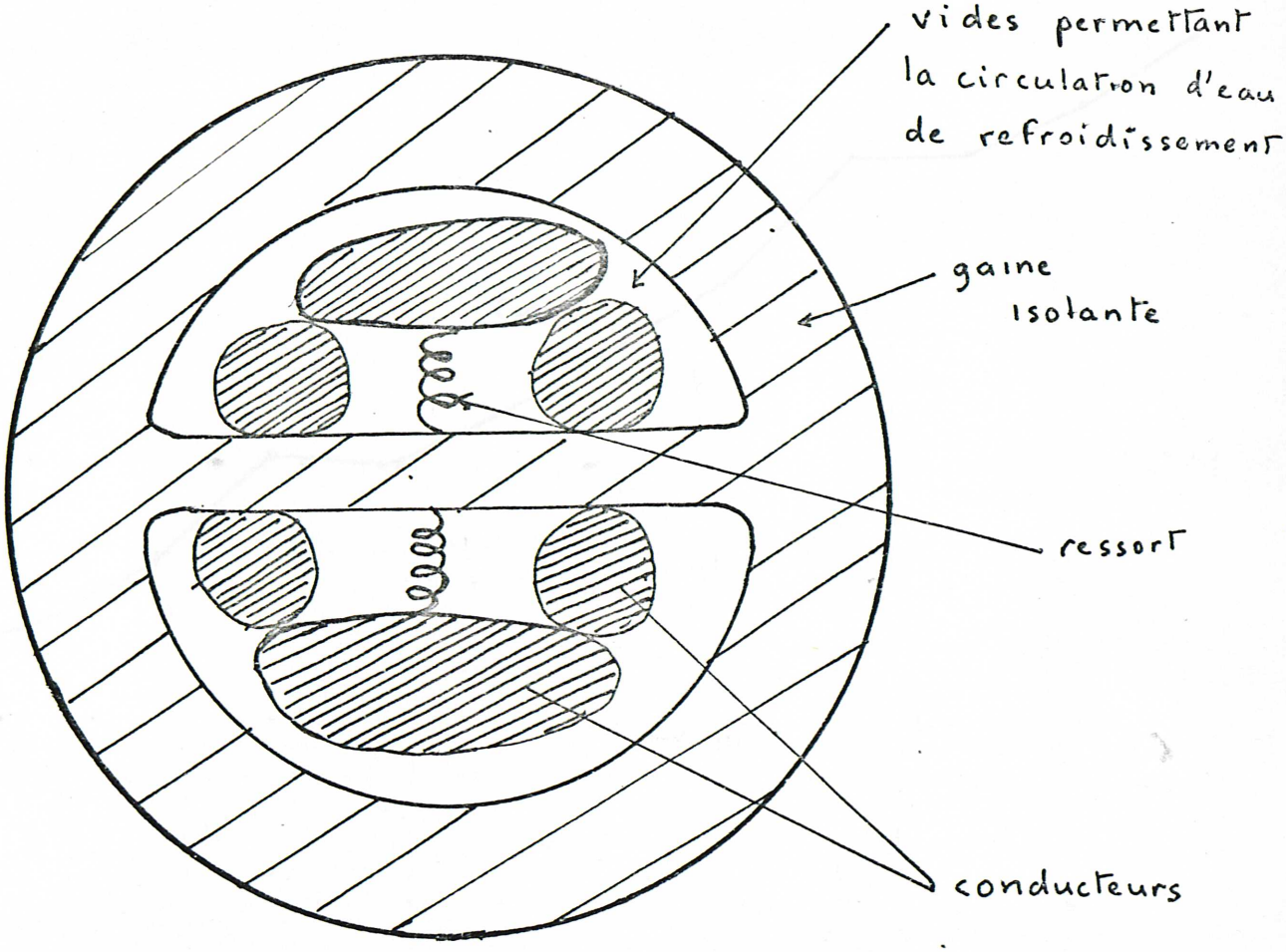


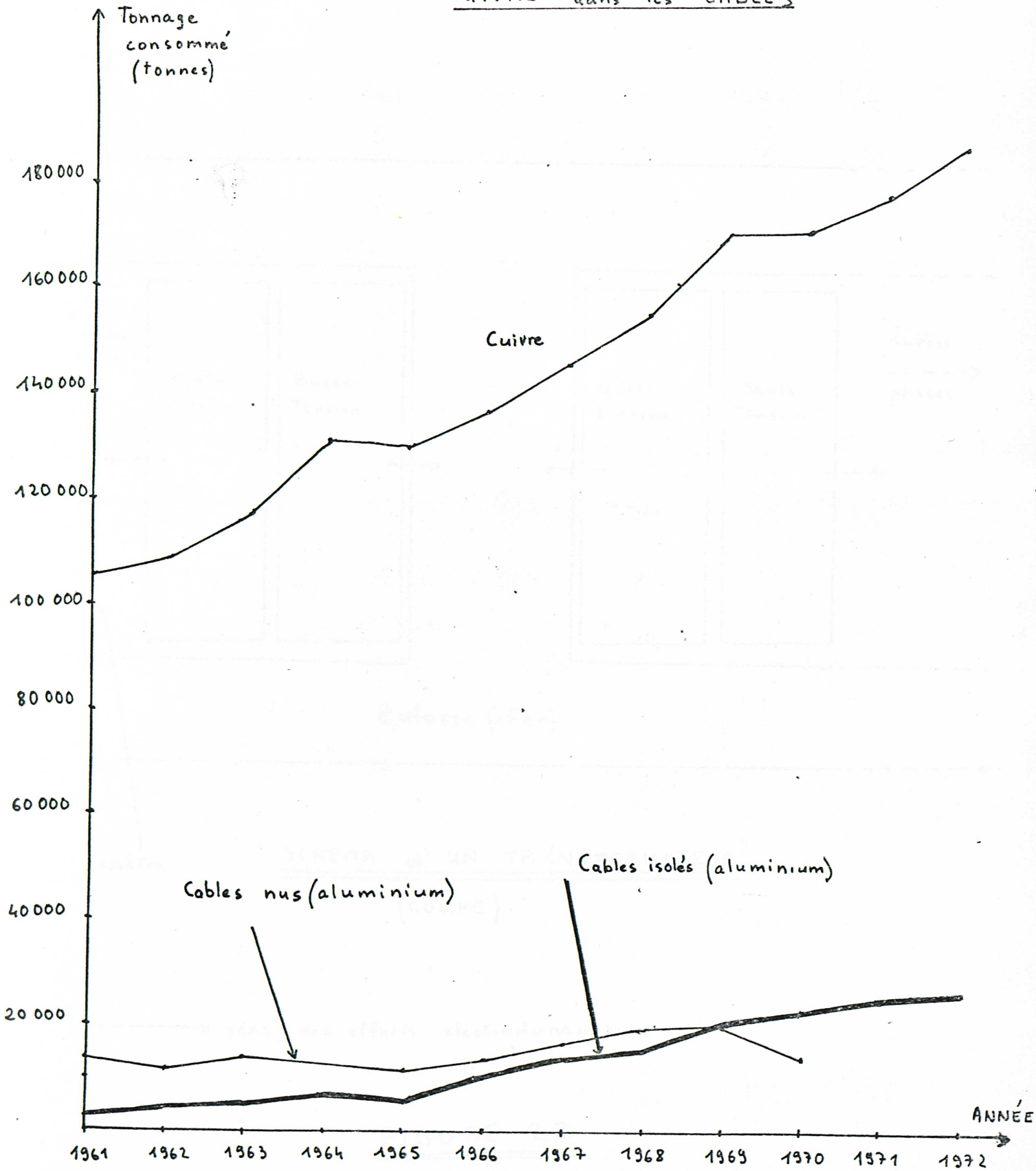
Figure 20

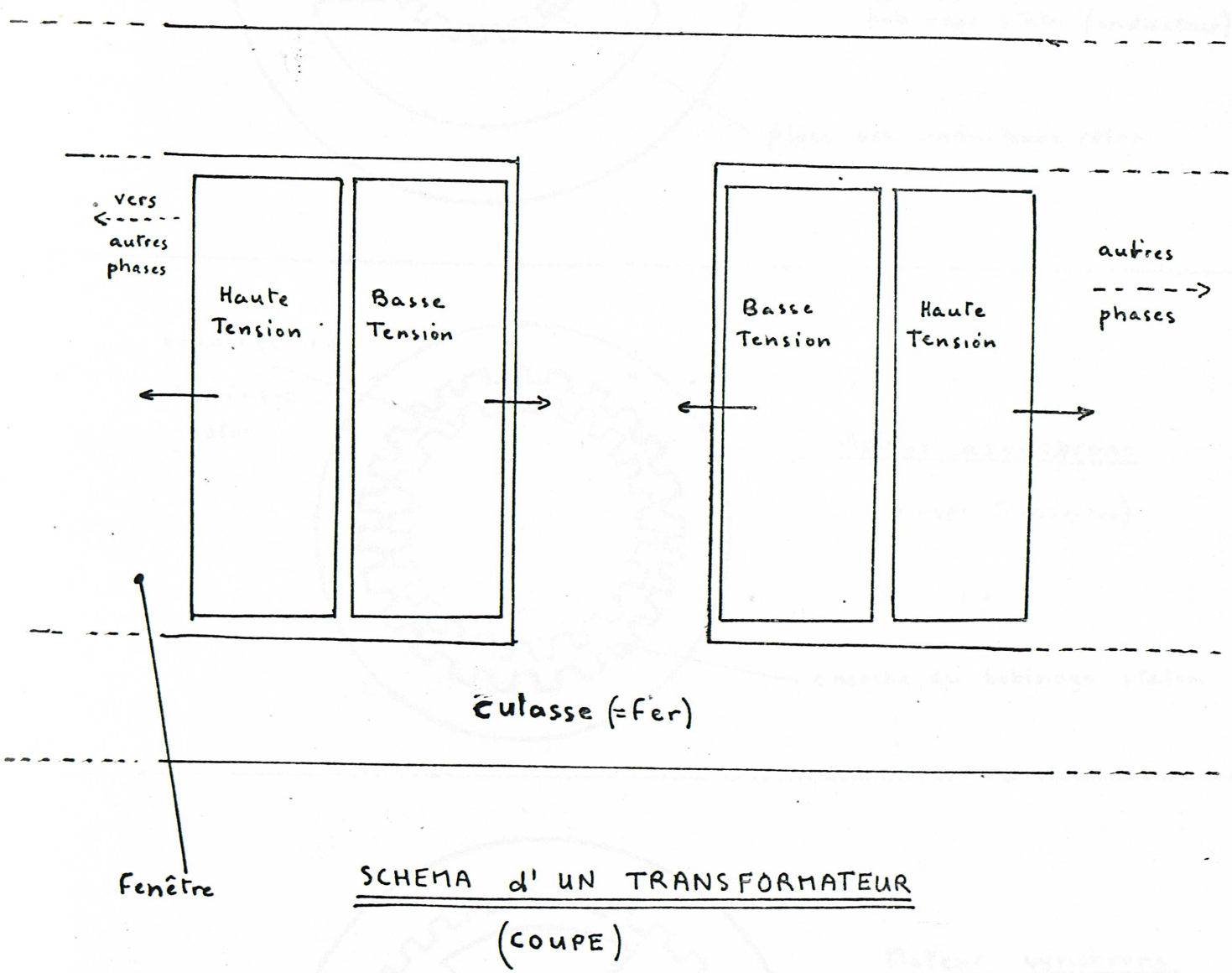
CABLE de SOUDEUSE

(industrie automobile)

Figure 21

CONSOMMATION d'ALUMINIUM et de CUIVRE dans les CABLES



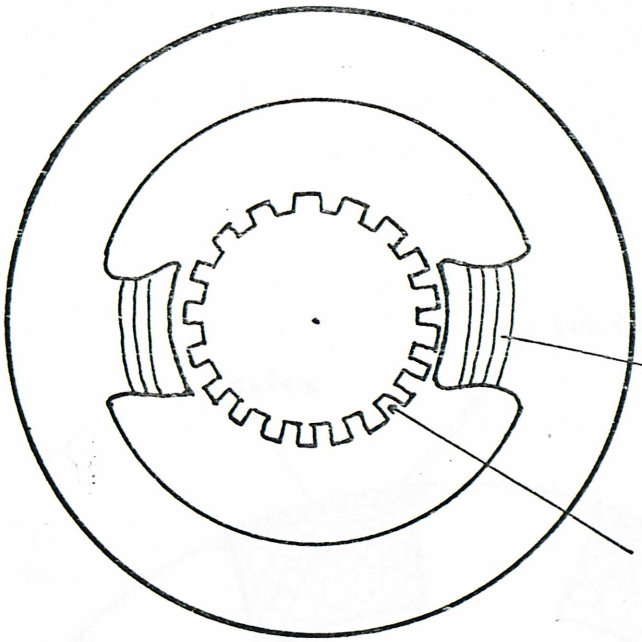


SCHEMA d' UN TRANSFORMATEUR

(COUPE)

→ sens des efforts electrodynamiques

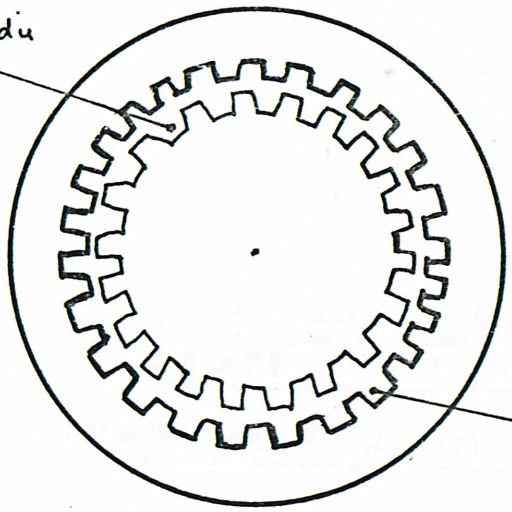
FIGURE 22



Moteur à courant continu (coupe transverse)

bobinage stator (inducteur)

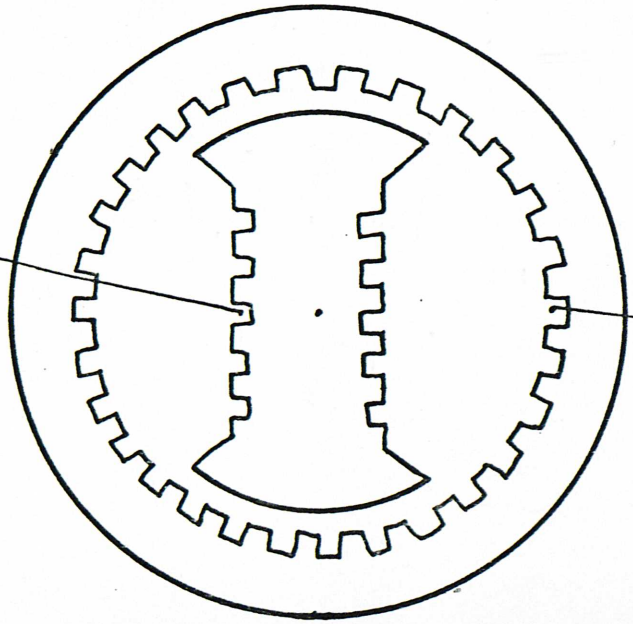
place des conducteurs rotor



encoches du bobinage rotor

Moteur asynchrone (coupe transverse)

encoche du bobinage stator.



encoche bobinage rotor

Moteur synchrone (coupe transversale)

encoche bobinage stator.

Fig.:23 DIFFERENTS TYPES de MOTEURS

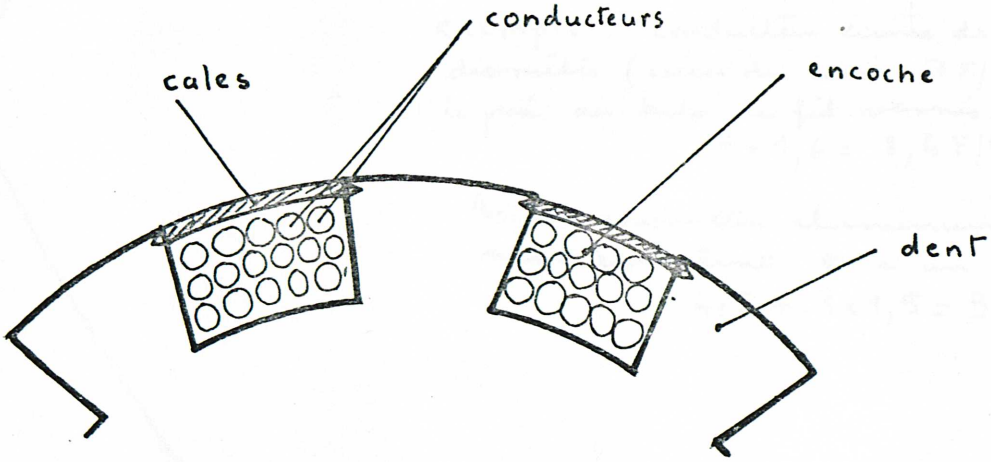
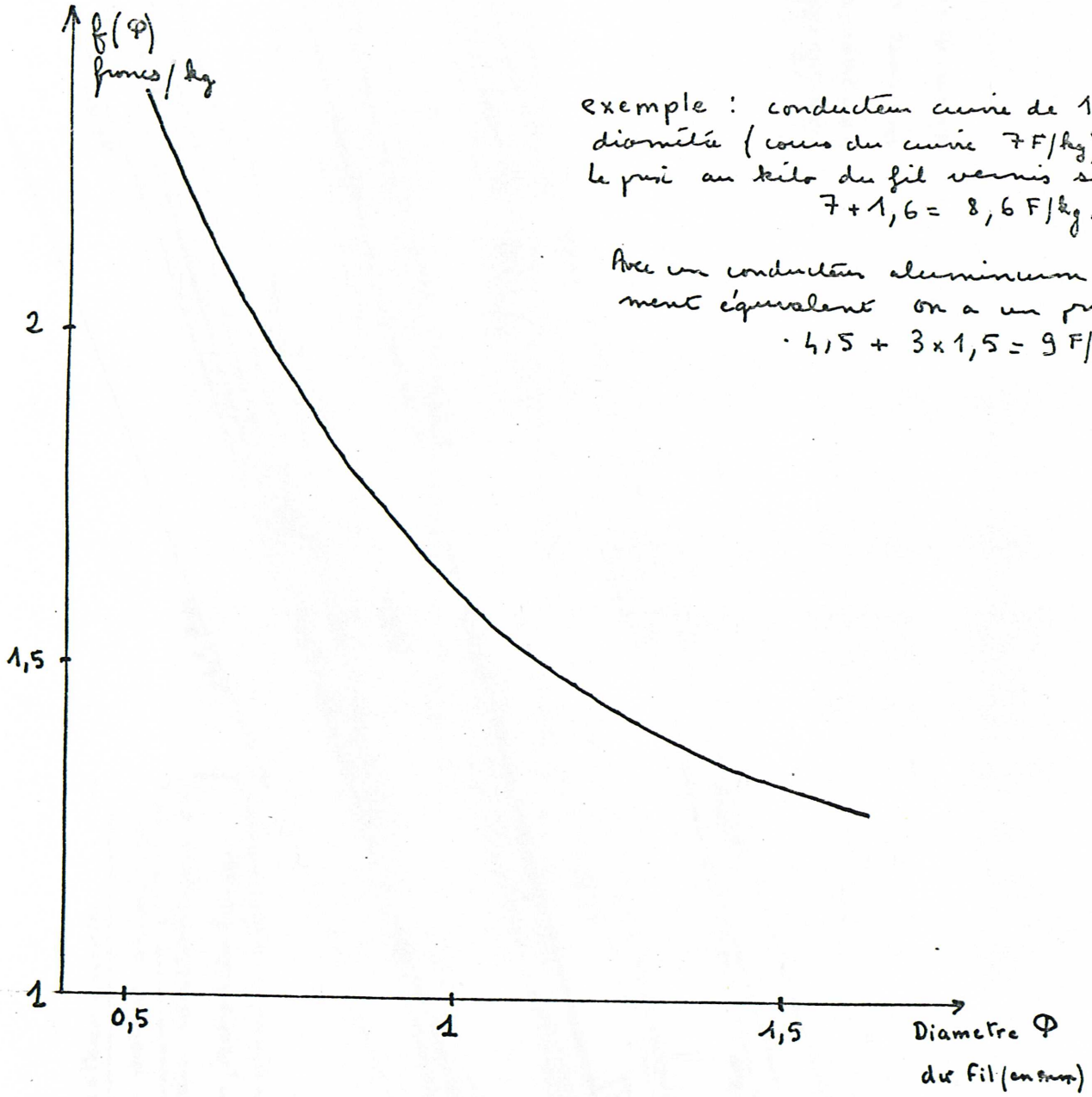


FIGURE 24

COUPE TRANSVERSALE

PARTIELLE d' UN ROTOR



exemple : conducteur cuivre de 1 mm de diamètre (cours du cuivre 7 F/kg)
le prix au kilo du fil vernis sera :
$7 + 1,6 = 8,6$ F/kg.

Avec un conducteur aluminium électriquement équivalent on a un prix de :
$4,5 + 3 \times 1,5 = 9$ F/kg.

FIGURE 25

COUT d' ISOLATION du Fil

Fil cuivre : $A + f(\Phi)$

Fil aluminium : $B + 3,5\, f(\Phi)$

A et B étant les prix de base au kg du cuivre et de l'aluminium

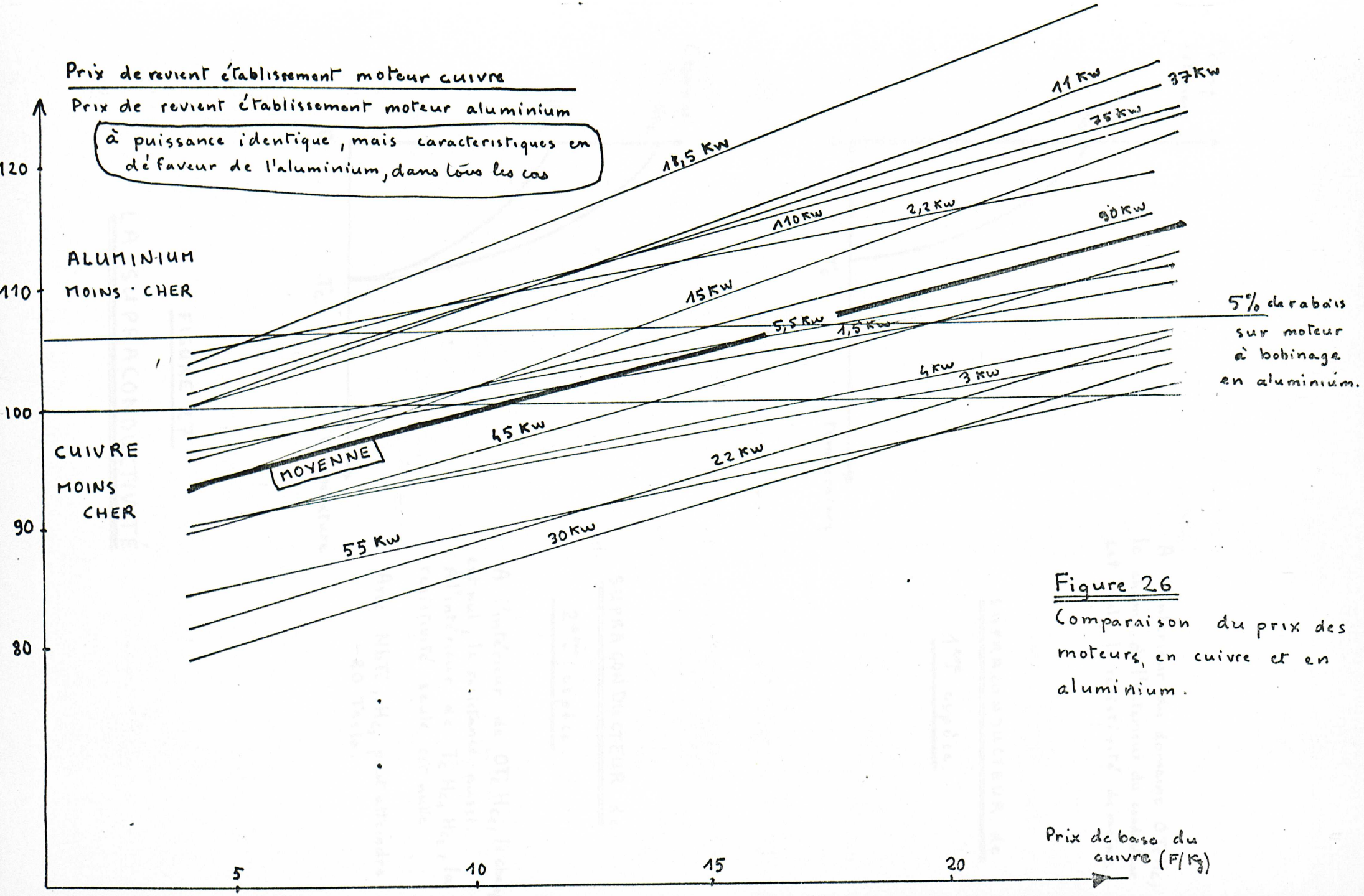
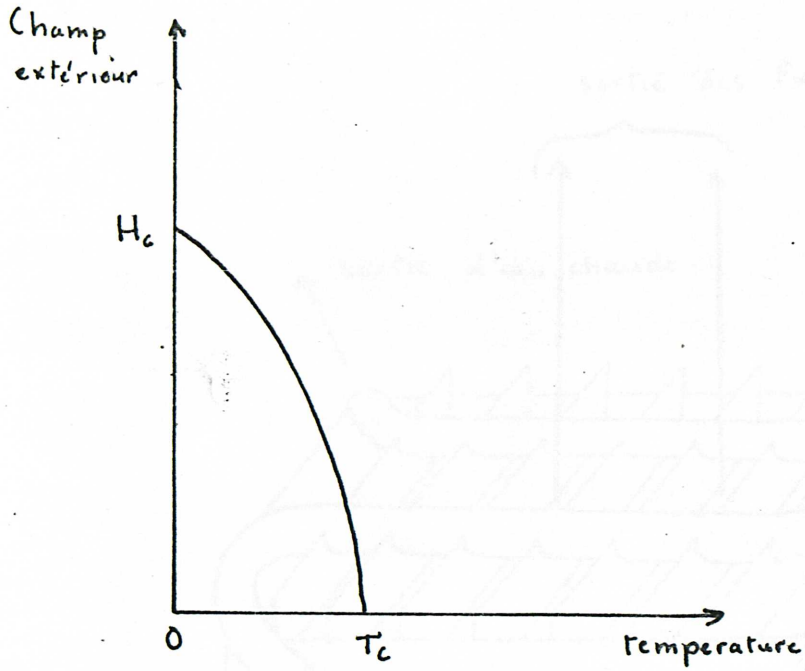


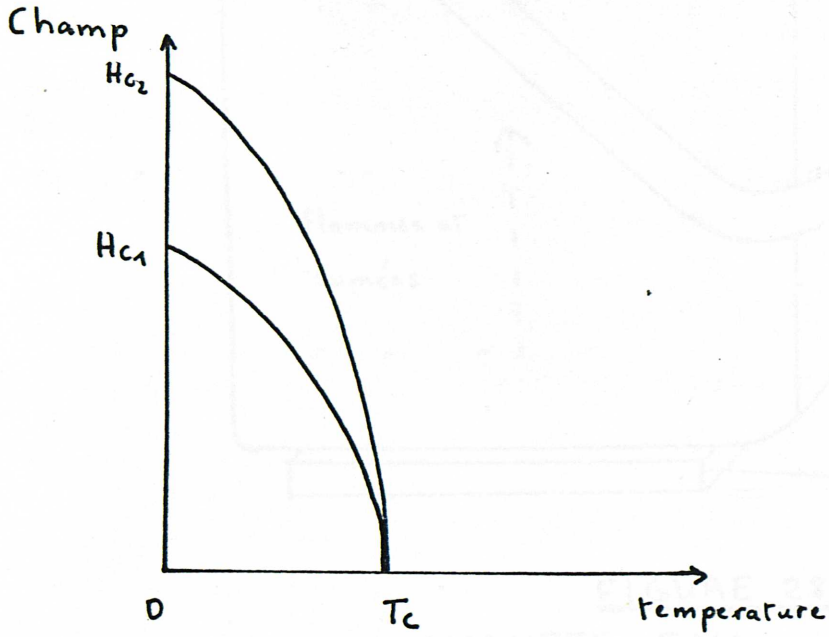
Figure 26

Comparaison du prix des moteurs, en cuivre et en aluminium.



A l'interieur du domaine OT_cH_c, le champ à l'interieur du conducteur est nul, la resistivité de même.

SUPRACONDUCTEUR de 1ère espèce



SUPRACONDUCTEUR de 2ème espèce.

A l'intérieur de $OT_cH_{c_1}$, le champ est nul, la resistance aussi.
A l'intérieur de $T_cH_{c_1}H_{c_2}$, la resistivité seule est nulle

Avec NbTi, H_{c_2} peut atteindre 20 Tesla.

FIGURE 27

LA SUPRACONDUCTIVITÉ

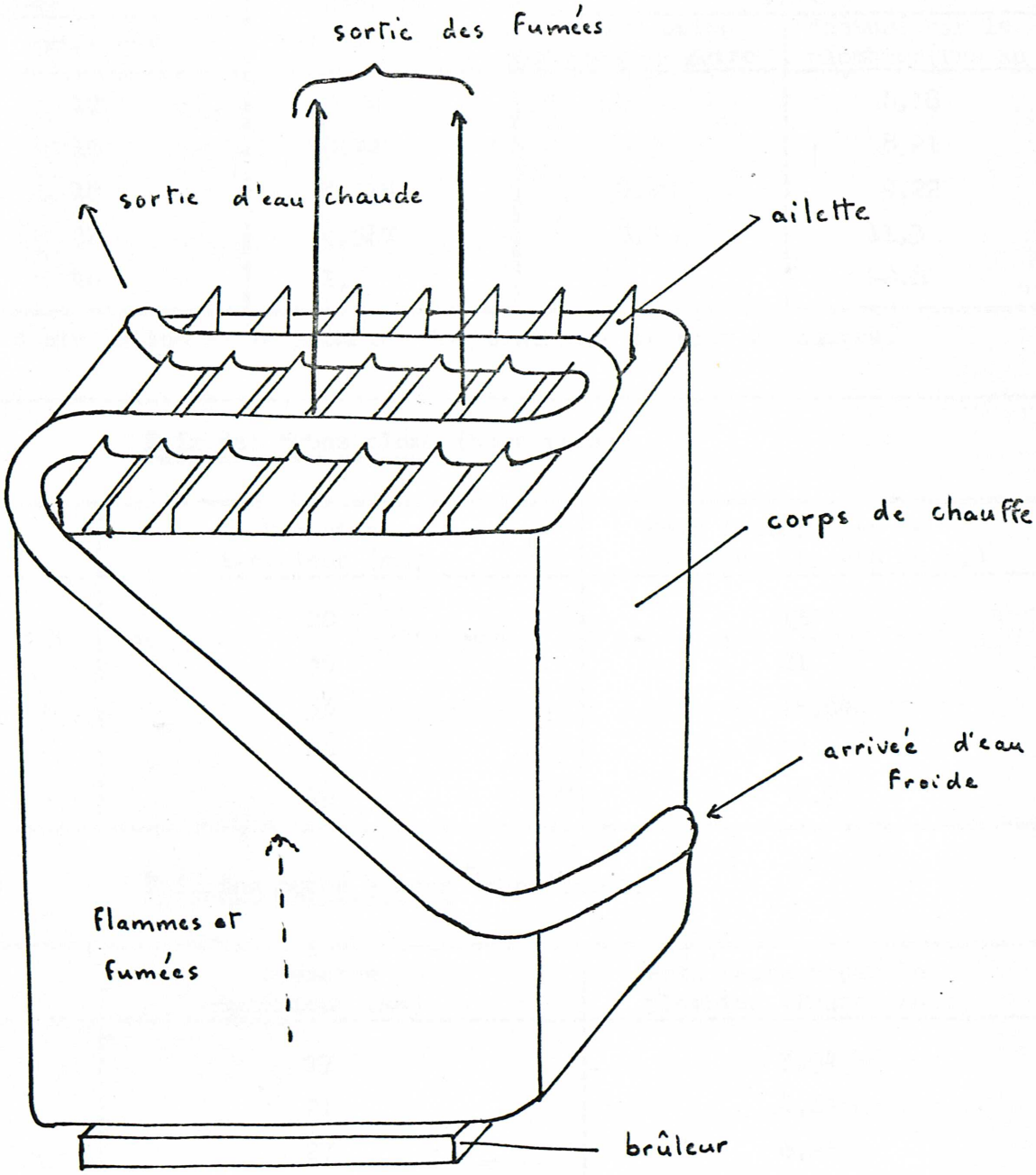


FIGURE 28

CHAUFFE-EAU instantané

au gaz

(schéma)

TABLEAU 28 BIS

Prix des tubes cuivre (hors taxes)

Diamètre (mm)		Poids au mètre (Kg)	Prix	
intérieur	extérieur		départ usine (francs au mètre)	facturé par le plombier (frs au m)
10	12	0,31	3	6,18
14	16	0,42	3,9	8,21
16	18	0,475	4,45	9,22
20	22	0,587	5,4	11,3
38	40	1,1	10	20,8

Rmq. : Les circuits de d stribution et le plombier doublent donc le prix du cuivre.

Prix des tubes plomb (hors taxes)

Diamètre intérieur (mm)	Diamètre extérieur (mm)	Prix facturé par le plombier (francs au m.)
10	20	13
20	30	21
27	33	15,64
33	40	22,3
40	49	34,9

Prix des tubes aciers (hors taxes)

Diamètre intérieur (mm)	Diamètre extérieur (mm)	Prix facturé par le plombier (francs au m)
12	17	3,94
15	21	4,84
20	27	6,23
26	34	8,15
33	42	10,84
40	49	12,74

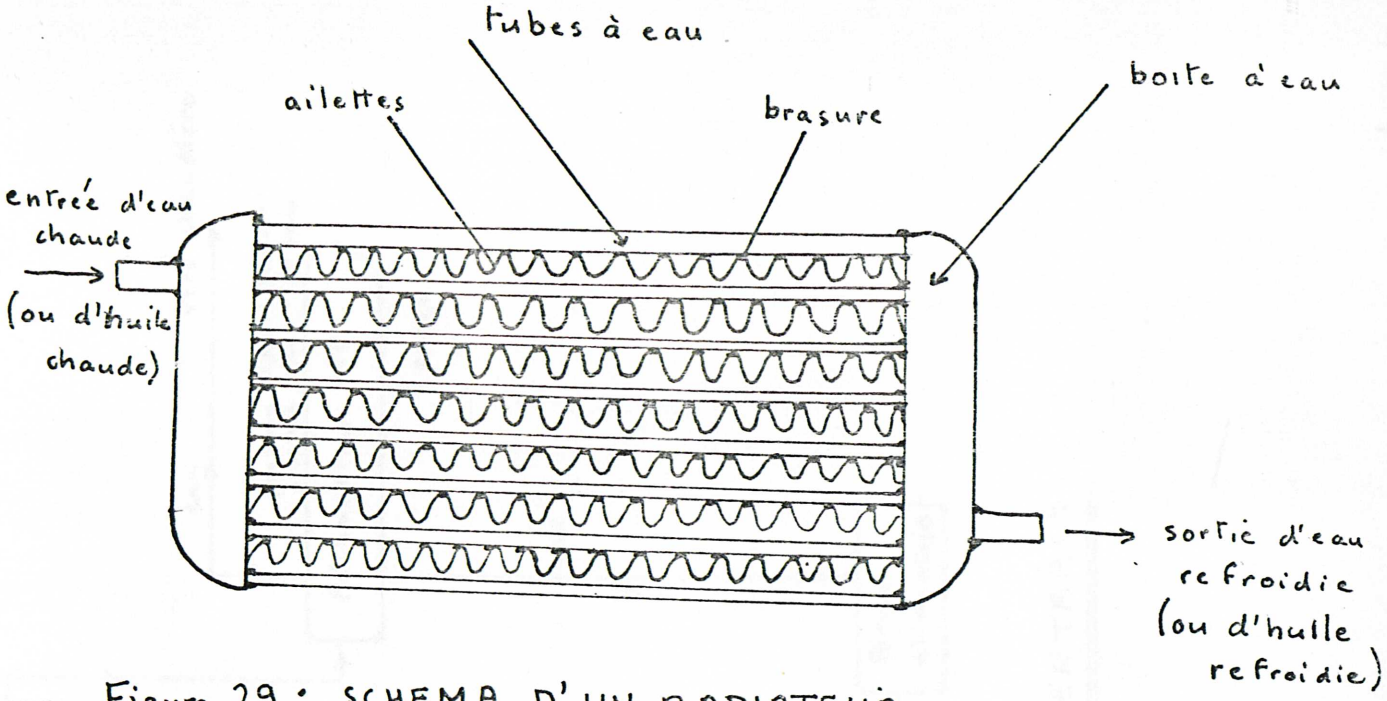


Figure 29 : SCHEMA D'UN RADIATEUR

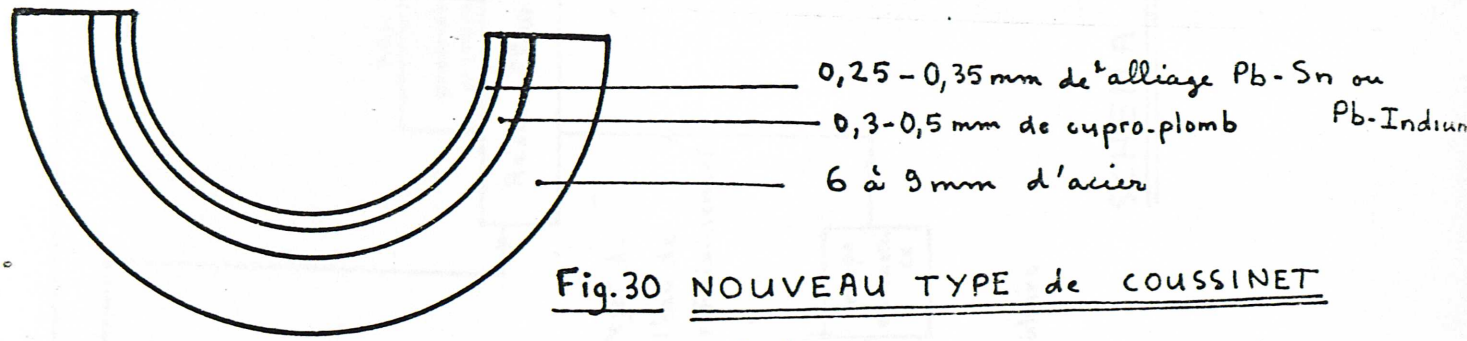
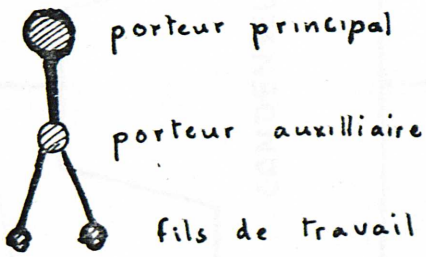


Fig.30 NOUVEAU TYPE de COUSSINET

(réduction du poids de cuivre)



Legende

● = conducteur

COUPE schématique d'une CATÉNAIRE

Figure 31

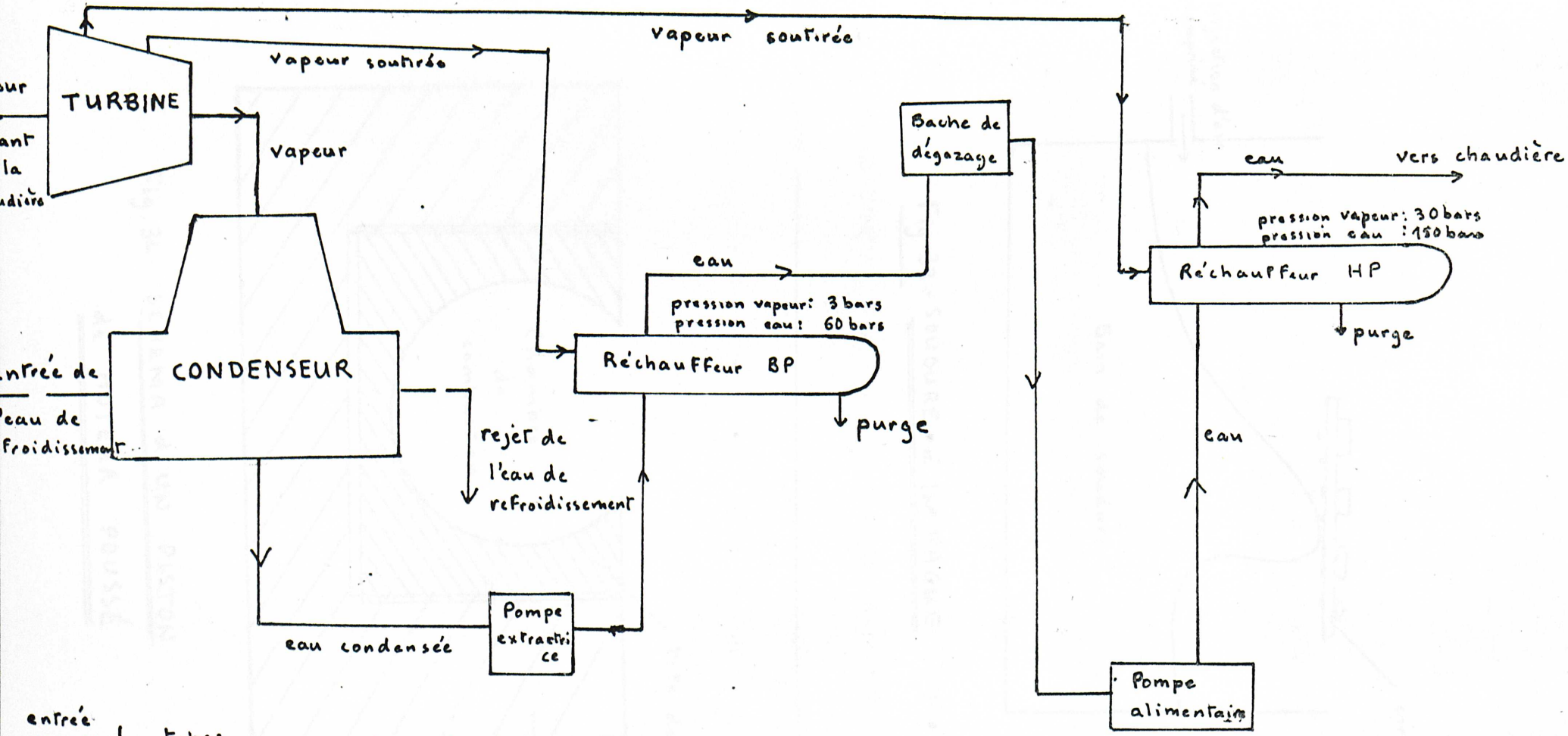
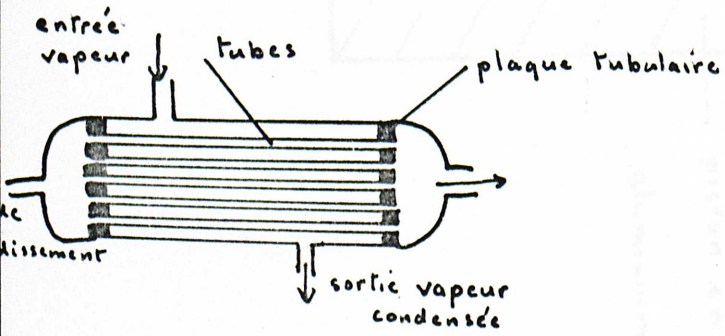


FIGURE 32

SCHEMA de PRINCIPE d'une CENTRALE THERMIQUE



SCHEMA d'UN CONDENSEUR

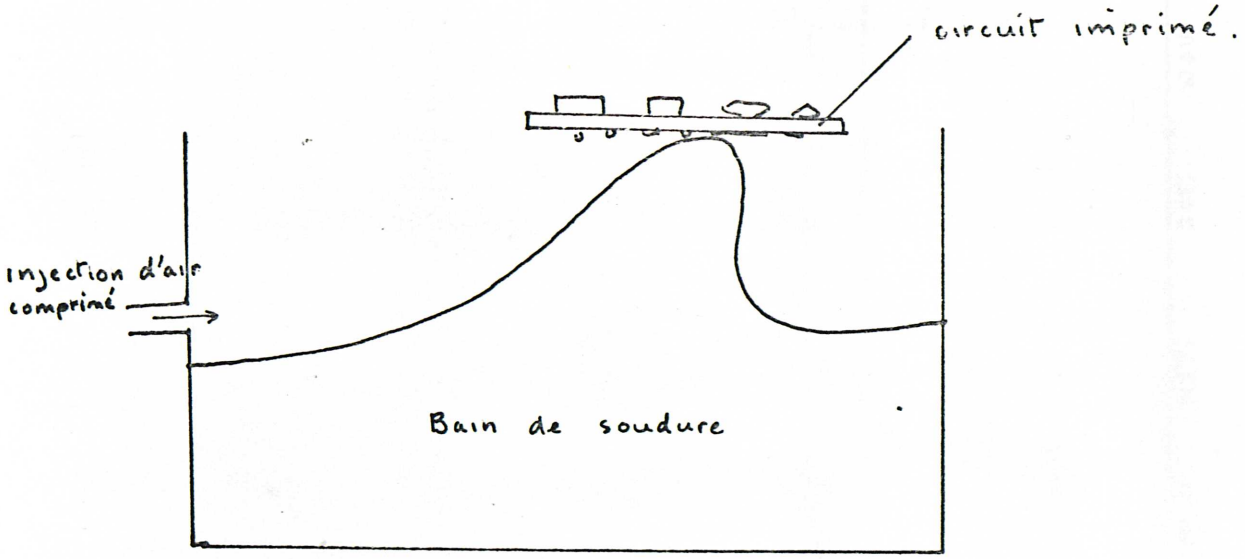


Fig 33 SOUDURE à la VAGUE

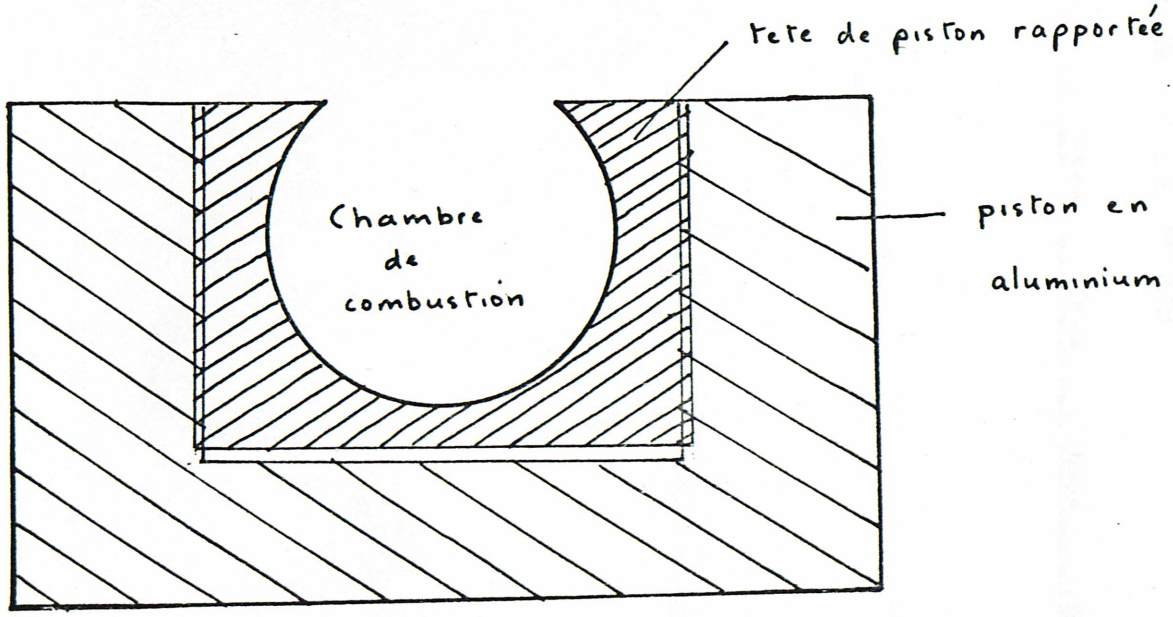


Fig. 34 SCHEMA d'UN PISTON de MOTEUR POUSSÉ

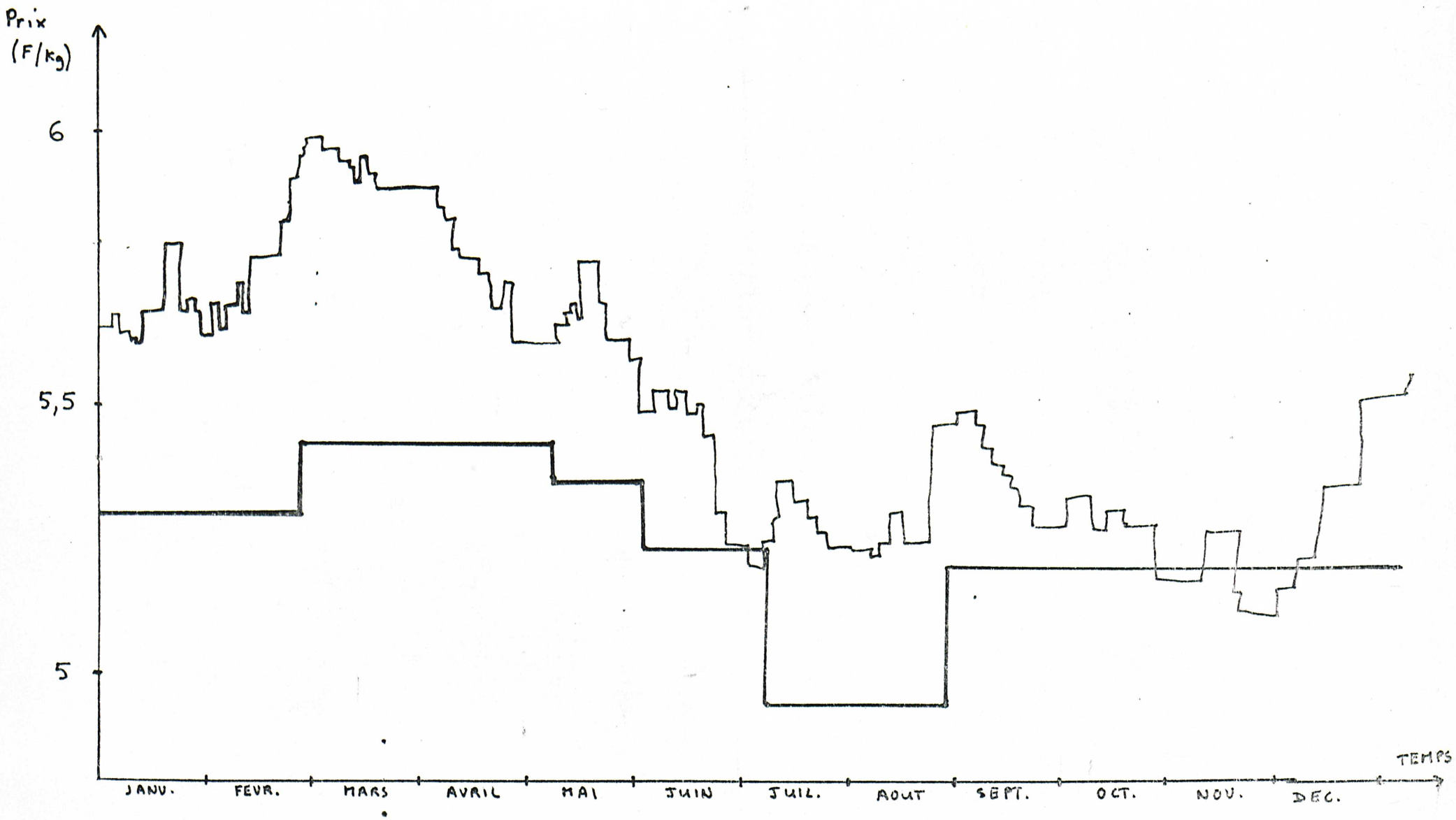


Figure 35 EVOLUTIONS RESPECTIVES des COURS du CUIVRE et du LAITON (1972)