Aspects métallurgiques de tenue en service des pompes *

Metallurgical aspects of the service life of pumps

PAR B. DE BORDE

INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES, INGÉNIEUR AU CENTRE D'INFORMATION DU NICKEL

La tenue en service d'un organe en mouvement dans un liquide jouissant de propriétés érosives dépend d'un nombre important de facteurs et notamment des diverses actions susceptibles de s'exercer sur la matière.

Dans une pompe, l'allure de l'érosion est intimement liée au maintien du métal dans son bon état de surface initial. Or, le métal peut être soumis à l'abrasion avec un mode d'action soit statique, lorsque l'angle d'attaque est nul, soit dynamique, lorsque cet angle prend une certaine valeur, soit même sous les deux modalités réunies.

La corrosion peut intervenir soit en même temps que l'abrasion, soit seule. Elle peut en particulier résulter du caractère électrolytique du liquide, qui le porte à s'attaquer inégalement aux divers constituants du métal.

Un cas fréquent de corrosion chimique est celui qui est causé par les eaux polluées, les eaux portuaires et l'eau de mer.

Certaines servitudes imposées au matériel (température ou pression de fonctionnement plus ou moins élevées, frottement...) viennent également compliquer la question.

Différentes solutions sont proposées pour les divers cas qui se présentent; les conditions d'emploi de métaux de composition spéciale semblent être aujourd'hui bien connues.

A large number of factors influence the service life of a component moving in a liquid possessing erosive qualities. Apart from the shape and material from which the component is made, its service life is dependent on the agencies working on it.

The rate of erosion in a pump is closely connected with maintaining the initial good condition of the material's surface. Metal can be subjected to abrasion in several ways. The effect of abrasion is said to be "static" when the angle of attack is zero, or "dynamic" when the angle has a certain value, or it can be a combination of both types.

Corrosion can occur independently of, or in conjunction with abrasion. It is most often due to the electrolytic properties of the liquid causing galvanic action which attacks some components of the metal, sparing others.

Constantly occurring examples of chemical corrosion are those produced by polluted water, harbour water or by sea water.

Severe conditions imposed upon the material (temperature, pressure, friction...) are other complicating factors.

Various remedies are suggested for the cases that arise. Ways of using special metals seem well known at the present day.

L'industrie des pompes est une technique au service de toutes les techniques. Alimentation en eau des grandes cités, évacuation des eaux de mines, opérations de dragage, mise à sec rapide des formes de radoub, transport de produits corrosifs, de produits à très basse ou à très haute température (-100° ou $+700^{\circ}$ C), problèmes particuliers tels que le transport d'eau lourde pour l'énergie atomique, etc..., une telle énumération permet d'imaginer la variété, les difficultés des problèmes industriels sous le double aspect hydraulique et mécanique.

Mais à propos de tels problèmes, si les possibilités de la métallurgie sont généralement connues et présentes à l'esprit du technicien ou de l'utilisateur, en est-il de même quant à l'im-

portance de l'aspect métallurgique (choix du métal dans la solution de ces problèmes).

D'une part la *qualité des pièces moulées* — notamment d'une roue de pompe centrifuge — dépend du talent du fondeur comme du tracé; les difficultés de fonderie sont liées aux formes du modèle et aux propriétés de fonderie du métal choisi ou spécifié. Nous ne sommes pas spécialement qualifiés pour parler de ce point.

D'autre part le *choix du métal* peut avoir la plus grande importance sur la tenue en service : à cet égard, les données du problème ne sont jamais trop bien examinées : nature abrasive et corrosive du liquide, conditions de service physiques ou mécaniques, aptitudes des métaux à s'associer du point de vue frottement ou action galvanique, etc...

ACTION MÉCANIQUE OU CHIMIQUE DU LIQUIDE ET CHOIX DU MÉTAL

L'ALLURE DE L'ÉROSION dépend essentielle-

(*) Des points de cet exposé sont certainement valables pour tout autre matériel hydraulique tel que vannes, conduites, turbines, hélices Kaplan, etc.

ment du maintien du métal dans son bon état de surface initial.

Nous avons vu sur des pompes à pistons véhiculant les boues de forages dans l'industrie pétrolière, les chemises de cylindres mises hors

d'usage en quelques heures après apparition de rayures sur la surface polie d'origine... phénomène dépendant des terrains traversés et des pressions, croissantes avec la profondeur du puits de forage.

durée, et le maintien des caractéristiques hydrauliques de service.

I. — Abrasion

Lorsqu'il semble bien démontré que le métal

FIG. 1. — Roue de pompe et roue Francis de turbine, en bronze au manganèse à 3 % de nickel... dénommé « Turbine metal » : $R = 56 \text{ kg/mm}^2$, $E = 28 \text{ kg/mm}^2$, $A = 20 \%$, dureté Brinell $H_B 160$. (American Manganese Bronze Co., Philadelphie.)

Dans une pompe centrifuge, l'érosion rapide et irrégulière du métal engendre ou accélère des effets de cavitation; une usure lente et uniforme de la surface du métal conservant l'aspect le plus proche de l'état poli donnera au contraire une érosion normale qui favorisera la

est essentiellement soumis à une « action abrasive » des particules solides contenues dans le liquide, doit-on rechercher une dureté du métal élevée dans la masse, cette caractéristique est-elle spécifique de la résistance à l'usure, et, à la lumière de l'expérience, la structure de

l'acier ou de la matrice d'une fonte grise ou blanche apparaît-elle ou non indifférente?

1. — LE COMPORTEMENT D'UN MÉTAL soumis à l'abrasion est souvent déroutant, en particulier *parce qu'on se trouve dans la pratique entre deux formes extrêmes d'action destructive* par matériaux solides ou par liquides chargés : ces deux modes d'action que l'on peut appeler commodément « usure statique » et « usure dynamique » peuvent ainsi se définir :

L'usure statique résulte en quelque sorte d'un arrachement plus ou moins microscopique par frottement tangentiel des particules abrasives; on suppose pour simplifier qu'elles n'ont qu'une faible énergie cinétique propre ou relative. Le degré d'usure du métal est donc lié à un coefficient de frottement, c'est-à-dire en fait à l'aspect minéralogique du produit abrasif (dureté - densité - formes vives - granulométrie...) ainsi qu'au bon état de surface du métal et à son maintien.

On peut encore dire dans l'usure statique que l'angle entre la surface métallique (ou toute autre surface) et le sens de déplacement des particules est très faible.

Un exemple de ce type d'usure est celui d'un produit se déplaçant sur la tôle d'un couloir peu incliné, sur la tôle perforée d'un crible; du coke métallurgique détruit rapidement l'acier au carbone, l'acier à 13 % de Mn, l'acier inoxydable 18/8; mais l'acier 18/8 résiste remarquablement au charbon, beaucoup mieux que l'acier au manganèse; il a été adopté dans les houillères pour les toiles et tôles perforées de crible. La dureté du 18/8 n'est que de 180 à 220 Brinell, analogue à celle de l'acier à 13 % de Mn et il n'y a pas possibilité d'écrouissage en service. La nature du produit et l'aptitude du métal — acier 18/8 — à conserver ou non un bon état de surface ont donc réciprocity d'influence.

A l'opposé, *l'usure dynamique* est celle rencontrée par exemple dans un broyeur à marteaux, sur une roue Pelton ou une pompe centrifuge : elle peut se caractériser par l'énergie cinétique des particules qui creusent, entaillent ou cisailent le métal suivant un certain angle d'attaque au point d'impact.

Bien entendu, notamment en hydraulique, l'étude d'un problème d'abrasion est généralement difficile et méticuleuse parce que le mode d'usure peut procéder des deux cas extrêmes cités, ou même en tel ou tel point du matériel, de l'un ou de l'autre. L'hydraulicien peut conjurer dans une mesure remarquable les effets d'usure dynamique par le tracé. On a constaté aussi que certains métaux permettaient, par leur nature et leur état de surface en service, de limiter ou d'éviter les effets de la cavitation, ce qui est de grand intérêt pour les turbines hydrauliques;

Fig. 2. — Élément ($G = 1$) de roue de pompes à eaux schlammeuses après 1200 heures en acier martensitique à 13 % de chrome : la surface pailletée a en fait très peu de relief; le grain apparaît très fin sur la cassure, mais la tranche noire est une tapure provoquée par la trempe à l'huile ayant donné $H_R > 600$ Brinell.

ces métaux, notamment des aciers diphasés austéno-ferritiques au nickel-chrome et des cupro-aluminums (structure plus fine et dureté plus élevée avec nickel), ont des duretés moyennes de 180 à 330 Brinell.

2. — DURETÉ. - STRUCTURE. - ACIERS ET FONTES MARTENSITIQUES :

De toute manière, s'il apparaît dans l'industrie qu'une dureté élevée du métal n'est pas toujours spécifique de résistance à l'abrasion, il semble avantageux, pour les pompes à eaux chargées, d'avoir une *dureté élevée* du métal en surface et dans la masse et une *structure cristalline très fine* : cette deuxième caractéristique est d'autant plus favorable à l'état de surface qu'une pompe cavite souvent, par suite de conditions de service plus ou moins défectueuses. De plus en plus nombreux et cohérents, des résultats industriels en France et à l'étranger confirment l'intérêt de ces deux facteurs qui, à des degrés variables, caractérisent des aciers alliés, des fontes grises et des fontes blanches alliées à structure martensitique.

Un acier ou une fonte contenant en quantité suffisante des éléments d'alliages — en pratique notamment : « chrome » ou « nickel-chrome » — garde, après refroidissement à l'air, la structure martensitique caractérisée par une dureté élevée (en moyenne 400 à 600 Brinell) et un grain très fin. Le métal est alors dit « auto-trempant »; sa dureté est sensiblement aussi élevée dans la masse qu'en surface. On peut utiliser exceptionnellement la trempe à l'huile, mais la trempe à l'air évite le danger de déformations inacceptables ou de tapures du métal dues à une trempe trop brutale.

On usine les fontes grises après recuit; puis on trempe à l'air.

Il convient pour tous ces produits de s'adresser seulement aux fondeurs qualifiés ou licenciés. Un revenu convenable des pièces est indispensable.

3. — POMPES A EAUX CHARGÉES :

Nous sommes amenés à suivre des essais depuis plusieurs années, notamment dans les Houillères : le lavage du charbon produit des eaux schlammeuses tenant 120 à 300 g/l de par-

FIG. 3. — Pompes à boues en fonte blanche type Ni-Hard. Sa conception ne nécessite qu'une rectification à la meule (Fonderies Verstraeten à Wetteren, Belgique).

Nous citerons les aciers ou les fontes alliés ayant donné des résultats intéressants avec liquides chargés ou produits minéraux secs ou humides :

- acier à 13 % Cr, essayé trempé à l'huile, dureté environ 600 Brinell;
- acier au Ni-Cr-Mo : après trempe à l'air, 400 à 500 Brinell;
- fonte grise à graphite lamellaire au Ni-Cr : 350 à 450 Brinell;
- fonte grise à graphique sphéroïdal au Ni-Mo : 450 à 550 Brinell;
- fonte blanche au Ni-Cr, type Ni-Hard américaine; usinage difficile, à éviter; 500-550 Brinell moulée en sable; 600-700 Brinell moulée en coquille; moulée en coquille, cette fonte a une charge de rupture et une tenue au choc meilleures que moulée en sable, ce qui résulte de la microstructure et de la plus grande finesse de grains; sa résistance à l'abrasion est évidemment meilleure.

ticules solides, dont 30 à 40 % de schistes et, en Lorraine, d'argile siliceux; en Lorraine, les roues, les flasques d'usure ou les couronnes d'étanchéité de pompes durent, de ce fait et du fait de la nature acide de l'eau, 2 à 4 fois moins que dans le Nord et le Pas-de-Calais. En fait, il faut distinguer par ordre de densité et d'abrasivité décroissantes trois types d'eaux chargées : les liqueurs de flottation (dites « liqueurs denses ») de schistes ou de magnétite, les eaux schlammeuses définies ci-dessus, les eaux de circulation recyclées pour le lavage et obtenues après filtration, décantation —, parfois désargilage —, des eaux schlammeuses :

— Avec les aciers et fontes grises usuelles ou faiblement alliées à structure perlitique (dureté 150-250 Brinell), les durées de service étaient de 400 à 600 heures en eaux schlammeuses en Lorraine, et inférieures à 300 heures en liqueur de magnétite.

— Toutes choses égales par ailleurs, un progrès sensible : 1 000 à 1 500 heures en eaux schlammeuses, fut constaté avec des aciers type

13 % de chrome et 0,4 à 0,5 % de C, donnant la structure martensitique et 600-650 Brinell après trempe à l'huile; cependant on continue d'enregistrer de nombreuses mises hors de service prématurées après 300-600-900 heures, par suite de tapures de trempe non décelées après traitement, ou de fissures apparaissant après un

Toutes choses égales par ailleurs, la durée de ce type de fonte est 3 à 5 fois celle de la fonte blanche perlitique : c'est le rapport systématiquement mentionné pour eaux chargées et pour broyage aux Etats-Unis, d'où la fonte Ni-Hard est originaire.

L'emploi de la fonte Ni-Hard en France reste

Fig. 4. -- Pompe à sable et gravier pour dragage avec roue, coquille, couronne d'étanchéité en fonte blanche martensitique Ni-Hard, réalisée par Thomas Foundries Inc., Birmingham, Ala., U.S.A. La durée est 4 à 7 fois celle obtenue avec des aciers alliés traités. Débit 600 m³/h d'eau et 150 tonnes de gravier jusqu'à 15 cm de diamètre.

temps de service sous l'effet des tensions internes; nous avons vu des fissures presque diamétrales passant par le moyeu ou à son voisinage sur des roues à peine usées. La trempe martensitique de cet acier reste délicate sur moulage mince.

— Depuis un peu plus de deux ans, les Houillères ont essayé, sur deux ou trois types de pompes à liquide chargé, la *fonte blanche nickel-chrome type Ni-Hard*, fonte martensitique autotrempeante (dureté 550-650 Brinell) : on obtint en eaux schlammeuses 2 000 heures en Lorraine et 3 000 à 4 000 heures dans le Nord et le Pas-de-Calais.

encore limité parce, d'une part, le nombre de fonderies susceptibles de bien régler la composition suivant le moulage et de réaliser des moulages de qualité, est restreint, parce que, d'autre part, on en est empêché par les usinages nécessités par les organes et roues de pompes existantes. Aux Etats-Unis l'usinage de cette fonte moulée en sable ou contre-coquille est réalisé avec des machines et outils à coupe négative. Cependant on évite l'usinage par des formes simples appropriées, par l'emploi de segments de revêtement intérieur du corps et du diffuseur, pour les pompes de dragage par exemple. La fixation de l'arbre sur la roue est

facilitée par l'emploi d'un moyeu en acier inséré dans le moule avant coulée.

La fonte blanche martensitique Ni-Cr type Ni-Hard est donc largement adoptée aux Etats-Unis pour les boues industrielles abrasives, les installations de dragage et de travaux publics, les eaux de rivière, les eaux de mines. Ainsi les Thomas Foundries à Birmingham - U.S. - réalisent des pompes de dragage de 2 500 m³/h refoulant à 40 mètres avec rotor en fonte Ni-Hard, et de même des segments d'usure chemisant le corps, flasque et disque d'étanchéité, raccord d'aspiration : ce matériel admet des blocs minéraux jusqu'à 15 cm.

Au barrage de Fort Peck sur le Mississipi, des segments d'usure donnèrent un service de 3 600 000 m³ avec une fonte blanche à 26 % de chrome et de 4 200 000 m³ avec la fonte blanche Ni-Hard.

Outre son emploi dans les lavoirs à charbon, citons en France celui pour des tuyaux de remblayage hydraulique en Lorraine (à Merlebach à titre d'essai), pour des pompes à pâte liquide crue de cimenteries; enfin à la Centrale thermique de Harnes, près de Douai, on obtint 8 000 heures de services avec pompe à eaux cendreuse Allen-Sherman d'origine en fonte blanche type Ni-Hard, la roue étant en fonte à 5 % Ni et 1,4 % Cr et le corps en fonte à 4,4 % Ni et 1 % Cr.

L'intérêt des fontes grises martensitiques autotrepantes pour les pompes à liquide chargé abrasif est la possibilité d'abaisser la dureté par recuit pour l'usinage, et de restaurer la dureté désirée par trempe à l'air suivie d'un revenu convenable : l'hydraulicien, et le constructeur surtout, ont donc toute latitude du point de vue tracé et réalisation :

— La fonte grise martensitique à graphite sphéroïdal (1) alliée au Ni-Mo (dureté 400-550 Brinell suivant composition et traitement de revenu) semble avoir de remarquables propriétés de tenue à l'abrasion, malgré une expérience encore très récente. Cette fonte ne peut d'ailleurs être réalisée actuellement en France que par deux ou trois fondeurs. Deux roues avec flasques d'usure de pompes à liqueurs denses de schistes ont été coulées à titre d'essai par les Etablissements Chavy en cette fonte pour les Houillères (Lavoir Rousseau à Valenciennes). La première fut examinée après 2 000 heures de service, là où l'on n'avait pu dépasser 600 à 700 heures avec d'autres métaux. La figure 5 montre une fissure radiale partie de l'arbre sans

FIG. 5. — Roue et flasques d'étanchéité de pompes à liqueurs denses de schistes mises hors service lors d'une première visite après 2 000 heures : en fonte sphéroïdale martensitique autotrepante dureté environ 500 Brinell, charge de rupture 120 kg/mm². La roue sans doute fissurée en début de service après vissage de l'arbre, comportait des usinages importants (Ets Chavy).

doute accidentellement lors de la fixation de celui-ci : très probablement cette roue a tourné de façon prolongée avec ce grave défaut en écoulement turbulent. La deuxième roue qui l'a remplacée a déjà accompli un temps de service supérieur.

— Actuellement un essai est en cours avec la même fonte pour roues de pompes à eaux sableuses du Rhône; après un an de service l'usure est faible (en fonte ordinaire : un mois de service).

— Nous citerons aussi cet exemple de l'industrie céramique : un essai de filière-mouleuse de galettes à tuiles (pâte d'argile et scorie de laitier) n'a donné que 15 000 galettes avec l'acier à 13 % de manganèse, mais 120 000 avec la fonte sphéroïdale martensitique autotrepante.

Nous ne parlerons pas d'aciers inoxydables austénitiques nickel-chrome, type 18/8 ou 25/12 de dureté inférieure à 200 Brinell. Leur emploi ne paraît judicieux, comme l'expérience l'a montré du point de vue prix et performances, qu'avec des eaux chargées nettement corrosives.

II. — Action à la fois abrasive et corrosive

Un problème toujours difficile est de délimiter, dans l'attaque des métaux, l'influence prépondérante de *liquides chargés ayant un caractère à la fois abrasif et corrosif*; la dureté du métal pourra souvent ne plus rien signifier.

Un tel problème s'est posé dans l'évacuation d'eaux de suies de Centrales Thermiques :

(1) La fonte sphéroïdale est réalisée en France par plus de vingt fondeurs licenciés; sa ductilité est fonction du recuit opéré. Quelques-uns seulement élaborent des fontes alliées à graphite sphéroïdal.

récemment, dans une centrale française, les constatations et observations suivantes furent faites par le client et le fournisseur sur une roue double de pompe centrifuge à grande puissance : cette pompe, conçue initialement pour élever seulement une mixture à faible concentration d'un produit excessivement fin, fut réalisée

cependant avec roue en acier spécial traité pour une dureté assez élevée, choisi plus spécialement pour résister à l'abrasion; la roue ne dépassa pas 300 à 400 heures de service, le métal, fortement gravé, accusant une perte de poids rapide. Ce résultat inattendu mit en évidence l'aspect nettement corrosif des eaux de

FIG. 6 et 7. — Roue en acier faiblement allié Cr-Mo traité (échelle environ 1/5); aspect après 2 à 300 heures de service en eaux de suies de Centrale pH 5; perte de poids rapide par corrosion, et érosion consécutive.

FIG. 8. — Même roue que fig. 6 et 7 de pompes à eaux de suies pH 5 : remarquer l'aspect (échelle 3/4 environ) régulier de l'érosion résultant de la corrosion et de l'abrasion; faible perte de poids après 1 000 heures; roue en fonte grise austénitique type Ni-Resist n° 1 coulée pour la Maison Bergeron par Durenne et Val d'Osnes.

suies (pH moyen 5) avec des variations de pH assez fortes entre deux chaufferies, détail qui n'est pas indifférent au processus de l'attaque chimique (fig. 6 et 7).

L'essai de roues en bronze, logique dans ces conditions, donna une usure plus régulière, un meilleur aspect de surface; la durée atteignait ou dépassait 1 000 heures, fait d'autant plus intéressant qu'initialement la pompe et la roue n'étaient pas spécialement conçues pour un liquide chargé, à la fois corrosif et abrasif.

Nous avons recommandé alors, dans le but de rechercher une nette amélioration, un essai avec une fonte grise Ni-Cu-Cr à structure austénitique (dureté de l'ordre de 160 Brinell), ce matériau se comportant bien dans l'industrie chimique, pétrolière, etc., vis-à-vis de boues acides, basiques, chlorurées; après 1 000 heures, un examen systématique révéla une usure très régulière et superficielle, une perte de poids faible de l'ordre de 17 % (fig. 8).

Malgré le bon aspect général du moulage en cette fonte, à moulage unitaire difficile d'ailleurs, deux légers défauts de fonderie limitèrent une poursuite instructive de l'essai. On procéda à un essai de rechargement avec métal d'apport convenable : électrodes en ferro-nickel à structure austénitique; la forme de la roue et les épaisseurs réduites (8 mm) des aubes et des voiles ont rendu difficile le rechargement; cependant, on devrait obtenir des dépôts sains et adhérents sur cette fonte austénitique.

En résumé, un tel essai en cette fonte mérite d'être repris. D'autres métaux d'ailleurs, bronzes d'aluminium et d'aluminium-nickel doivent aussi retenir l'attention.

III. — Action corrosive

Lorsqu'une ACTION CORROSIVE du liquide est reconnue, on ne doit pas perdre de vue que l'allure de l'érosion sera plus sensible à l'aspect de l'attaque sur le métal qu'au taux de l'attaque. On doit toujours admettre un taux d'attaque en rapport avec le service et le prix du matériel.

Une corrosion régulière et uniforme de la surface doit contribuer à une érosion lente et minima.

Sur une roue de pompe, la corrosion prend assez souvent l'aspect d'une surface régulièrement « grainée » : les alvéoles plus ou moins ovales ont plus ou moins de relief et se touchent les uns les autres; la tenue à l'érosion sera d'autant meilleure que la dimension et la profondeur des alvéoles seront très réduites; dans un liquide ayant un caractère d'électrolyte, un phénomène de corrosion galvanique peut en effet se déclencher si cette profondeur s'aggrave (fig. 9).

Fig. 9. — Élément de roue ($G = 1$) en acier au chrome-molybdène trempé à l'huile; les eaux acides et salines de lavoirs des Houillères de Lorraine peuvent expliquer le processus de cette attaque profonde : abrasion par les schlamms schisteux et siliceux et corrosion par les eaux; corrosion galvanique probable, le relief s'accusant.

Les problèmes de tenue, en particulier dans l'industrie chimique ne sont jamais trop bien examinés... comme un cas d'espèce. Or si l'on connaît pour un grand nombre de corps leur action sur les métaux les plus usuels, il est difficile en pratique de prévoir en cours de réaction ou après réaction les effets corrosifs d'une combinaison de corps. Par ailleurs, l'équilibre d'un agent chimique peut se trouver modifié suivant sa concentration, sa température, sa pression.

Des métaux, sous l'action de certaines corrosions, laissent apparaître des piqûres : piqûres du cristal ou piqûres intercrystallines; la tenue mécanique de certaines pièces, l'étanchéité d'un cylindre ou carter, peuvent être compromises; l'état de surface apparaît rongé, creusé et une mise hors de service survient par érosion accélérée.

Certains métaux résistent en fait à l'action chimique grâce à un film protecteur : film d'oxyde de chrome pour le 18/8, dont la tenue est excellente à un grand nombre de produits oxydants, acides minéraux et organiques, sulfurés. Si ce film est détruit ou endommagé, le taux d'attaque peut devenir important; dans certains cas on constate des piqûres : des aciers austénitiques nickel-chrome plus chargés y sont moins sensibles en général que l'acier 18/8.

D'autres métaux aussi résistent bien dans toute leur masse et ne sont pas en général sensibles à la piqûre : par exemple, le Monel et autres alliages binaires nickel-cuivre résistent aux agents chlorurés, à l'eau de mer; le Monel a une bonne tenue en milieu réducteur, mais le taux de corrosion croît en milieu aéré.

IV. — Corrosion galvanique

LA CORROSION GALVANIQUE peut prendre les aspects les plus variés; nous en rappellerons seulement quelques-uns. Un métal piqué par attaque chimique peut voir le taux d'attaque aggravé par un liquide à caractère d'électrolyte.

Une fonte grise peut « graphitiser », terme barbare qui exprime un phénomène d'attaque et de dissolution de la matrice d'acier enrobant le graphite : la matrice disparaissant, il reste en relief le graphite; l'érosion émousse ce relief, tandis que progresse l'attaque. La graphitisation peut être purement chimique. Le plus souvent, elle est causée par la nature électrolytique du liquide qui déclenche, entre le graphite constituant cathode et la matrice métallique constituant anode, une « corrosion galvanique » s'aggravant lorsque le relief s'accuse : on observe une tendance à ce phénomène entre pièces voisines en bronze et en fonte dans l'eau de mer par exemple. En présence donc d'un liquide ayant ou pouvant prendre le caractère d'un électrolyte, le constructeur devra bien considérer l'emplacement des métaux choisis, dans la série galvanique. Bien entendu, l'importance de l'action des couples dépend des surfaces respectives des parties anodiques et cathodiques.

Cependant le caractère de la liqueur peut néanmoins déclencher une corrosion entre deux métaux de potentiels de dissolution voisins, par exemple avec des sels d'acides forts ou d'alcalis (sels halogénés notamment), de l'eau de mer ...

L'électrolyte peut également altérer le film protecteur de certains métaux; dans le cas de l'acier 18/8, ce film peut être d'ailleurs créé artificiellement par l'opération de passivation; le 18/8 passivé est beaucoup plus cathodique que le 18/8 ordinaire : il sera donc moins sujet à l'attaque que ce dernier.

Rappelons aussi que la polarisation cathodique, c'est-à-dire l'accumulation d'hydrogène à la cathode peut abaisser jusqu'à zéro la corrosion galvanique. Mais la présence d'oxygène dissous peut supprimer cet effet. Le Monel est ainsi beaucoup moins résistant en milieu agité, aéré.

V. — Eaux polluées. — Eaux portuaires Eau de mer

Dans les *eaux polluées*, notamment dans les eaux portuaires, se développent des micro-organismes qui produisent de l'hydrogène sulfuré, des sulfures, de l'oxygène naissant. Il en résulte une attaque chimique ou un phénomène de corrosion galvanique sur des métaux convenant habituellement, tels la fonte grise et le bronze marine. Ces effets peuvent être gravement accentués et décuplés par des dragages en eau portuaire

calme — port très abrité. On l'a constaté en raffinerie de pétrole et après la remise en état du port de Dunkerque, plus récemment avec les eaux saumâtres de l'étang de Berre. Dans un port français de la côte atlantique, un constructeur observait une tenue convenable de pompes multicellulaires en fonte et bronze pour bassin de radoub; l'attaque des métaux survenant, on essaya un bronze d'aluminium qui se révéla insuffisant; l'exploitant spécifia l'acier 18/8... nous ne savons s'il conviendra, mais nous aurions essayé plus volontiers et plus économiquement la fonte grise austénitique type Ni-Resist n° 1 à environ 14 % de nickel, 6 % de cuivre, 2 % de chrome, dont la tenue à l'eau de mer, ou à des eaux portuaires, est généralement bonne.

A la centrale d'Astoria à Long Island, des pompes de 14 000 m³/h de la Wheeler Manufacturing Co., pour eaux de condenseurs, puisant les eaux très polluées du port de New-York, ont leur roue de 2 mètres de diamètre en acier austénitique à 25 % Cr et 12 % Ni, l'arbre en Monel K (cupro-nickel avec Al, dureté 270 Brinell), et diffuseur et pièces d'aspiration en fonte austénitique type Ni-Resist.

Il nous paraît intéressant de parler ici de certains métaux nobles faisant l'objet d'emploi pour des *eaux portuaires*, ou *l'eau de mer* franche, et de résumer les constatations généralement faites du point de vue corrosion, notamment sur des pompes centrifuges, sur des hélices de navires ou autres matériels :

1. — ACIERS AUSTÉNITIQUES TYPE 18/8 - TYPE 25/12 - TYPE 25/20 :

L'acier 18/8 à environ 3 % de molybdène peut donner un très bon service, mais n'est pas à l'abri de piqûres dans certaines eaux portuaires ou même dans certaines conditions de service avec l'eau de mer

Nous avons déjà cité l'acier 25/12 pour roue de pompe à eaux polluées du port de New-York; le 25/12 n'est pas à l'abri des piqûres.

Par contre l'acier 25/20 contenant 3 à 5 % de molybdène semble davantage à l'abri de la corrosion par piqûre; pour cette raison, l'U.S. Navy l'a spécifié, par exemple, pour pompes d'eaux alimentaires.

Nous ajouterons une autre référence pour l'acier 25/20 : la Worthington Pump and Machinery Corporation construit pour les champs pétrolifères des pompes centrifuges avec corps, roue, couronne d'étanchéité en alliage Worthite à 24 % Ni - 20 % Cr - 3 % Mo - 2 % Cu - 3,5 % Si, coulé par la Lebanon Steel Foundry : on observe un service de 10 ans avec un pétrole brut chargé en eau salée.

2. — ALLIAGES BINAIRES TYPE CUPRO-NICKELS (*) :

Un très grand nombre de bateaux dans le monde, l'*United States*, l'*America*, la plupart des marines militaires, américaine, anglaise, française, utilisent pour les condenseurs des cupro-nickels type 70/30. Les quatre conden-

sulfureux, ni pour eaux portuaires, celles-ci étant susceptibles de déposer des micro-organismes dégageant O_2 ou SH_2 ; cependant on recourt au Monel K pour des caractéristiques mécaniques beaucoup plus élevées que celles des autres cupro-nickels, pour des arbres de pompes par exemple.

FIG. 10. — Roue Francis double en bronze Al-Ni à haute résistance « Inoxyda 53 » coulée par les Forges et Fonderies d'Alliages de Haute Résistance, Petit-Quevilly.

seurs auxiliaires et principaux de l'*America* comportent plus de 60 tonnes de 70/30; ce métal résiste bien dans l'eau de mer et dans les eaux portuaires; il n'est pas sensible à la piquûre; on l'utilise laminé, étiré ou en moulage, pour des organes de pompes. On a constaté que le 80/20 donnait aussi de bons résultats tout en étant moins coûteux. Le Monel, qui résiste très bien aux milieux réducteurs, aux chlorures, n'est pas à recommander en milieu aéré ou

(*) Cupro-nickel 70/30 (70 % Cu — 30 % Ni),
Cupro-nickel 80/20 (80 % Cu — 20 % Ni).

3. — FONTES GRISES AUSTÉNITIQUES A GRAPHITE LAMELLAIRE OU SPHÉROÏDAL :

Il existe différents types de fontes austénitiques; une longue expérience déjà a démontré la bonne tenue de la fonte lamellaire type Ni-Resist n° 1, citée plus haut à propos des eaux portuaires de New-York.

L'industrie pétrolière l'utilise aussi pour sa bonne tenue aux produits chauds corrosifs, acides, chlorurés, alcalins (sauf ammoniacaux ou carbonatés).

L'intérêt de la fonte austénitique sphéroïdale du même type provient de ses caractéristiques mécaniques, élevées, inconnues avec les fontes lamellaires. Des raffineries de pétrole françaises ont en service des pompes centrifuges et à mouvement alternatif avec organes en cette fonte donnant $R = 55 \text{ kg/mm}^2$, $E = 30 \text{ kg/mm}^2$, $A = 24 \%$, $H_B = 165$, $K_M = \text{environ } 3 \text{ kgm/cm}^2$. Une autre raffinerie l'utilise pour vannes à produits chauds. Des pétroliers français sont équipés de tuyaux en cette fonte, coulés centrifugés par Pont-à-Mousson.

Il semble bien que la fonte austénitique sphéroïdale résiste à l'eau de mer comme la fonte lamellaire type Ni-Resist.

4. --- BRONZES D'ALUMINIUM ET D'ALUMINIUM-NICKEL :

Ils constituent un progrès remarquable dans

la métallurgie des bronzes du point de vue des caractéristiques mécaniques, de la tenue à la corrosion, à l'érosion, à la cavitation, notamment les bronzes d'aluminium-nickel contenant 10 % d'Al et 5 à 10 % de nickel (dureté plus élevée, grande finesse de grain). Ceux-ci offrent une excellente tenue à l'eau de mer.

Leur limite de fatigue sous corrosion dans l'eau salée est beaucoup plus élevée que celle des autres bronzes; on peut les usiner et les souder.

Les bronzes d'aluminium-nickel commencent à se développer en France; mais depuis des années ils sont utilisés pour des pompes centrifuges, turbines, hélices, dans la marine et l'aéronautique, l'industrie chimique, les centrales thermiques... aux Etats-Unis.

L'American Manganese Bronze Co. réalise pour la Marine U.S. des hélices ou pales d'hélices à 10 % Al - 5 % Ni - 4 % Fe avec ou sans manganèse.

EXIGENCES DE SERVICE ET INCIDENCE SUR LE CHOIX DU MÉTAL

Ces exigences retiennent souvent davantage l'attention du constructeur, parfois de l'utilisateur, que la nature même des liquides et leur action sur le métal. Nous ferons seulement certaines remarques en donnant des exemples à propos de l'influence de la température, des pressions de service, des propriétés de frottement, d'amagnétisme...

1. --- ELÉVATION DE TEMPÉRATURE :

En milieu corrosif elle accroît, comme chacun sait, le taux d'attaque. On trouve pourtant une solution à bien des cas ardues grâce à certains métaux, coûteux sans doute, mais permettant l'exploitation : ainsi un alliage type Hastelloy B à 32 % de molybdène et 60 % de nickel offre généralement une bonne résistance à l'acide chlorhydrique jusqu'à l'ébullition, à toutes les concentrations.

L'élévation de température avec les liquides ayant un caractère d'électrolyte peut abaisser leur pH notablement, d'où aggravation de la corrosion : une liqueur alcaline, de pH 12, sera au pH 10 à 150° C par exemple; une liqueur pratiquement neutre deviendra nettement acide à 100° ou 200° C. Des « Standard Pump Fittings » américaines ont fixé des spécifications pour certaines applications, suivant l'intervalle des pH de service.

Des variations de température peuvent gêner le constructeur du point de vue des *coefficients de dilatation des métaux* : par rapport à l'acier,

le bronze a un coefficient de 40 % plus élevé, l'acier austénitique 18/8 de 30 %, la fonte austénitique Ni-Resist de 30 à 40 %. Une fonte au nickel, type Minvar, à structure austénitique, a un coefficient très faible de 5.10^{-6} , inférieur de plus de moitié à celui de l'acier moulé (12.10^{-6}), entre 20 et 200° C.

Les hautes ou les basses températures, par exemple + 200° à 600° C, ou - 20° à - 200° C, préoccupent souvent le constructeur.

Les fontes non alliées, de résilience déjà médiocre à la température ordinaire, deviennent très fragiles en dessous de 0° C. Cependant, avec des fontes austénitiques lamellaires ou sphéroïdales de composition convenable, on peut atteindre des températures de - 20° à - 40° C.

Les aciers nickel-chrome austénitiques voient leurs propriétés mécaniques à peu près inchangées entre 0 et - 190° C; à cette température de - 190° C, la résilience du 18/8 est encore 15 à 20 kgm/cm². Monel et nickel présentent encore d'excellentes caractéristiques aux très basses températures. On conçoit l'intérêt de cette aptitude, en matière de liquéfaction des gaz, en aviation, ...

2. --- PRESSION DE SERVICE :

L'épreuve hydraulique est de pratique courante pour les moulages à pression, et le fondeur doit redoubler de précautions pour la santé du moulage et son étanchéité.

L'emploi des fontes usuelles à graphite lamel-

laire est limité par les pressions élevées, les à-coups de pression. Cet interdit est levé grâce aux fontes sphéroïdales ordinaires ou alliées qui ont une limite élastique élevée, des allongements, une résilience qu'on peut accroître.

Des essais sur pots de pression de 8 à 10 mm d'épaisseur, en fonte sphéroïdale à structure ferritique, ont permis de dépasser sans fissuration des pressions bien supérieures à 500 kg/cm². Les Américains utilisent pour les pièces soumises à des pressions élevées la fonte sphéroïdale ferritique ($A = 15$ à 20 %).

Appliquées au métal, des pressions de service élevées ou leurs équivalents : coups de bélier, grande puissance de jet sur auget de roues

de presse-étoupe; deux pièces, l'une en Monel, l'autre en acier à 13 % de chrome, ou toutes deux soit en 18/8, soit en acier à 13 % de chrome, ont tendance à gripper. La fonte Ni-Resist lamellaire, par exemple, avec son graphite très apparent et divisé, donne un excellent frottement pour chemises de cylindres de pompes, pistons et segments, paliers et presses-étoupes, conjointement avec arbre ou fourreau en acier inoxydable, Monel ou nickel.

En matière d'étanchéité et de garnitures de presses-étoupes, citons le progrès récent consistant à remplacer la tresse par une garniture rotative en métal (acier 18/8 stellité par exemple) et un liquide graphité convenable à

FIG. 11. — Roue en acier 18/8 au molybdène pour industrie chimique; coulé par Schneider.

Pelton, etc... peuvent provoquer une fatigue du métal; les conséquences de celle-ci seront graves en conditions corrosives (corrosion sous tension); en cheminant dans l'épaisseur du métal (corrosion fissurante), elle provoquera des ruptures graves imprévisibles.

3. — FROTTEMENT :

Un grand compte tenu des propriétés de frottement évitera des déboires pour certaines pièces associées et susceptibles de s'user ou de gripper; ainsi un fourreau d'arbre doit donner un excellent poli en contact avec une garniture

pression plus élevée que celle du liquide en transfert.

4. — Pour certaines applications, le choix doit porter sur des MÉTAUX AMAGNÉTIQUES : on dispose notamment d'alliages de cuivre, d'aluminium, d'aciers austénitiques au Ni-Cr, de fontes grises austénitiques à graphite lamellaire ou sphéroïdal.

5. — Enfin, lorsque l'exploitant désire remettre en état des pièces coûteuses, il pourra opérer des RECHARGEMENTS PAR SOUDAGE si le métal de base s'y prête : alliages spéciaux pour les rechargements durs; ou, dans un but de

réparation mécanique, électrodes en aciers austénitiques au Ni-Cr, en nickel, en ferro-nickel, avec enrobage convenable, permettant d'éviter une zone de transition martensitique fragile et susceptible de craquer.

Pour remise à la cote de certaines pièces

FIG. 12. — Petite roue de turbine; épaisseur des aubes 3 mm en fonte à graphite sphéroïdal perlitique normalisé; dureté $H_B = 290$, $A = 5\%$. Fonderie Gailly à Charleville.

(portées d'arbre) le *chromage dur* épais (dureté 400 à 900 Vickers) apportera une bonne tenue à l'usure, parfois à la corrosion; un *nickelage*

épais (dureté 125 à 400 Vickers) recouvert d'un chromage de quelques dizaines de microns sera résistant à la corrosion et à l'abrasion, et mécaniquement plus tenace.

6. — Dans ce court rappel de l'incidence de certaines exigences de service sur le choix du métal, nous n'avons pas parlé de certaines caractéristiques mécaniques nécessitées par des chocs mécaniques ou thermiques, par des vitesses périphériques élevées qui limitent par exemple pour certaines pièces l'emploi des fontes à graphite lamellaire ou du bronze; nous n'avons pas parlé non plus de l'endurance à la fatigue sous l'eau ou en milieu corrosif, autres aspects métallurgiques de tenue.

Sur un autre plan, depuis des années, des essais de protection contre l'érosion, contre la cavitation, se poursuivent avec revêtements spéciaux ou de matières plastiques: des résultats excellents ou décevants sont enregistrés. Mais l'expérience manque quant au maintien des caractéristiques physiques et mécaniques de ces revêtements; comment évolue avec le vieillissement, le coefficient de frottement, l'adhérence au métal? Leur emploi restera limité sans doute aux basses températures, et à une fonction non mécanique.

Les pompes...? chapitre difficile et éminemment varié de l'hydraulique, où le choix du métal est une inconnue à trois paramètres liés ou non — tracé hydraulique, action du liquide, exigences physiques et mécaniques de service — qu'il convient de bien étudier pour la résoudre de manière acceptable dans une technique.

Dans ce texte, l'auteur a utilisé certaines données exposées au cours d'une conférence le 17 novembre 1954, 10, avenue Hoche, devant les constructeurs de la Chambre Syndicale des Constructeurs de pompes.