A PROPOS DE LA PROTECTION CONTRE LA CORROSION DES CONDUITES FORCÉES

ON PROTECTION AGAINST THE CORROSION OF PENSTOCKS

Robert BOUCHAYER,

Ingénieur I.E.G.

English synopsis p. 225

Les Américains, amateurs de statistiques, déclaraient en 1946 que les pertes annuelles par corrosion des conduites enterrées s'élevaient à cinquante millions de dollars, somme évidemment considérable.

Lorsqu'une canalisation souterraine de pétrole ou d'essence est perforée par la corrosion, il faut en effet considérer la perte du produit, le prix de la réparation, l'arrêt d'exploitation, la pollution du terrain traversé, notamment par les eaux, ou encore la destruction des cultures avoisinantes. Pour retarder ces incidences coûteuses, les constructeurs devaient prévoir pour toute conduite destinée à véhiculer des combustibles liquides ou gazeux, une surépaisseur importante. Sur un réseau de plusieurs centaines de milliers de kilomètres, la dépense supplémentaire de métal était, à elle seule, énorme, tout en n'offrant qu'une sécurité temporaire.

La protection contre la corrosion a donc été étudiée en Amérique avec des moyens proportionnés aux économies escomptées ; l'expérience a montré que les frais d'étude et de réalisation étaient largement compensés.

En France, le problème ne se pose pas de la même façon. Ne possédant pas un réseau de canalisations comparable au réseau américain, nous ne voyons pas encore très nettement ce que coûte la corrosion d'une conduite forcée et nous ignorons souvent les économies que peut permettre une protection exactement appropriée.

Quoi qu'il en soit, les dépenses d'entretien atteignent des millions chaque année, pour chaque région hydraulique.

Dans la plupart des cas, la perte de poids annuelle par corrosion est faible. Elle existe cependant, puisque ça et là, on est obligé de remplacer des tronçons plus ou moins importants dont l'épaisseur ne satisfait plus aux conditions de sécurité.

A notre connaissance, on possède peu de renseignements sur l'usure des conduites forcées par corrosion. Si l'on excepte les quelques cas de corrosion extrêmement rapide par électrolyse (courants vagabonds), les perforations de conduites se font dans les parties à faible pression, donc de faible épaisseur. Ces accidents prouvent évidemment que dans les parties à forte pression, si la perforation ne se produit pas, c'est que la tôle est plus épaisse, mais son taux de travail a augmenté.

On remarque que l'attaque est plus importante lorsque la conduite est alternativement vide et remplie. A l'usine du Verney, par exemple, où les tuyaux ont quarante ans d'âge, aucune perforation n'est constatée, sauf sur les siphons automatiques d'arrêt de débit, restés vides très longtemps, qui sont percés en maints endroits.

Lorsqu'une simple obturation par cheville ne suffit pas et qu'il est nécessaire d'opérer une soudure, celle-ci est délicate et l'opération très aléatoire. Généralement la corrosion se localise en un point et l'ensemble du tuyau n'est pas aminci uniformément, aussi l'arc électrique perce souvent la tôle au moindre contact.

Il est difficile de porter un jugement d'ensemble sur l'état de conservation des conduites forcées en service depuis une vingtaine d'années : on peut dire cependant que leur état de conservation est souvent fonction de la façon dont a été exécutée la protection et même le montage.

On a observé des attaques profondes dans les cas suivants :

— Les tuyaux sont mal joints de sorte qu'un suintement continu se produit en des points singuliers.

— Les clous de souliers des monteurs ont laissé des traces et ont même enlevé la peinture.

— La peinture a été appliquée sur des tuyaux humides ou mouillés.

— La peinture n'existe pas en certains endroits difficilement accessibles, notamment aux points d'appui.

— De façon générale, le travail a été mal exécuté, ou encore exécuté en une saison défavorable, ce qui revient au même.

Ces causes de déprédation ne sont pas les seules : il est évident que les peintures peuvent être détruites par des chutes de pierres, des suintements en galerie, l'attaque des terres ou des eaux agressives, et aussi par le décollement de la calamine formée à haute température, notamment en cours de laminage, si celle-ci n'a pas été enlevée au préalable.

Enfin, certains tronçons de conduites peuvent être détruits très rapidement par le passage de courants vagabonds.

Les ingénieurs qui étudient, installent ou entretiennent chaque jour ces conduites forcées, se doivent donc d'examiner le problème de la protection et de s'assurer que ces conduites résisteront aussi longtemps que les centrales elles-mêmes, à l'épreuve du temps.

Si ces lignes peuvent apporter aux uns et aux autres, quelque élément nouveau d'appréciation, elles n'auront pas été inutiles : elles voudraient surtout convaincre les « hésitants » du bien fondé d'une bonne protection.

★★

La protection des ouvrages a été, durant de très longues années, basée sur des données empiriques. On cherchait, en fait, à isoler le matériau du contact de l'air, de l'eau ou du sol, et depuis les temps les plus reculés on a eu recours, pour cela, à l'emploi d'enduits bitumineux. Dans la composition de ces enduits entraient en majeure partie des hydrocarbures lourds très adhésifs, imperméables et inertes. Ils n'ont pas toujours eu la plasticité ni la belle apparence de nos peintures bitumineuses actuelles, et mettaient sans doute des mois à sécher. Ces produits du bois ou de la houille permettaient de « bituminer » ce qui voulait dire « imperméabiliser » les matériaux les plus divers.

On a tendance à confondre les brais de houille et les asphaltes ; ceci d'autant plus facilement que des peintures dites « bitumineuses » par leurs fabricants sont bien souvent des peintures au brai. On reproche à ces dernières de ne pas se craqueler lorsque la corrosion prend naissance sous la couche, alors que les bitumes cra-

Protection dont la dernière couche est une peinture aluminium.
(Cliché Société Dauphinoise d'Etudes et de Montages).

quent comme une peinture à l'huile. On ne peut donc pas toujours se rendre compte de l'état de conservation d'un ouvrage lorsque sa protection est faite au brai.

Mais on peut éviter aisément ces inconvénients soit en employant des couches superposées de bitume et de brai, ce qui n'est pas toujours recommandable, soit en incorporant dans les brais des quantités d'adjonctions bien dosées.

Quoi qu'il en soit, et nous ne voulons entamer ici aucune polémique, les « bitumes », pour employer un terme général, après avoir été les seuls enduits connus pendant des siècles, ont subi la concurrence victorieuse des peintures industrielles à l'huile de lin qui firent leur apparition sur le marché au moment même de l'essor de la construction métallique. Ces nouveaux produits, les « peintures », sont bien différents des bitumes, puisque, une fois appliqués, ils s'oxydent, se durcissent, s'imperméabilisent, en un mot « sèchent ». Ce séchage est accompagné d'une transformation chimique, si bien que le

produit sec n'est plus soluble dans les solvants du produit liquide.

Jusqu'à la dernière guerre, les bitumes et les peintures furent donc employés pour la protection des ouvrages métalliques avec plus ou moins de succès, les premiers étant réservés plutôt aux « barbouillages » à bon marché et à l'industrie chimique, la marine, le jutage des canalisations enterrées, la protection des câbles de ponts suspendus, etc...

En 1940 la France s'est trouvée dépourvue d'huiles siccatives et les peintures bitumineuses, qui depuis 1925 avaient déjà connu un renouveau de faveur, furent de plus en plus utilisées.

Elles sont aujourd'hui de qualité supérieure et allient la souplesse aux propriétés anti-rouille.

Pendant que l'Industrie et les Laboratoires amélioraient ainsi la qualité des produits protecteurs, la Science ne restait pas inactive : la lutte contre la corrosion tendait à perdre son aspect empirique pour devenir scientifique.

Les Savants distinguent la corrosion sèche (oxydation à haute température), de la corrosion humide. Leurs laboratoires sont maintenant en mesure de définir le mécanisme de la corrosion de façon quantitative, c'est-à-dire qu'ils peuvent prévoir la perte de poids d'une éprouvette de métal en fonction de la quantité de courant débité par des piles locales superficielles, de très faible force électromotrice, dans le cas de la corrosion humide ; le mécanisme de la corrosion sèche peut, lui aussi, être traduit en formules mathématiques.

La corrosion humide est celle qui nous intéresse ici et puisque nous avons prononcé les mots « courant » et « piles », faisons un peu de théorie.

C'est aux environs de 1825 que le physicien anglais Faraday énonça les principes sur lesquels s'appuyèrent les recherches modernes sur la corrosion : lorsqu'un courant continu traverse certains liquides conducteurs — les électrolytes — ceux-ci se décomposent en ions ; ce phénomène s'appelle l'électrolyse. Le métal ou l'hydrogène (cation) se dépose toujours sur l'électrode négative — cathode — par où sort le courant, et l'anion qui peut être un « radical » se dépose sur l'anode. Faraday a énoncé les lois de l'électrolyse et mesuré la quantité d'électricité ($F =$

96.600 coulombs) qui libère toujours un poids de métal proportionnel à son équivalent chimique.

Or, cette loi est valable pour la corrosion des métaux en milieu humide, de même aussi que les lois de Kirschhoff sur les courants dérivés.

Deux points voisins d'un même métal peuvent être à des potentiels différents suivant leur état de surface, l'hétérogénéité de leur composition chimique ou l'influence des traitements mécaniques qu'il a subis. L'écrouissage ou la présence de parties rouillées sont les causes les plus fréquentes de ces différences.

Il existe donc sur la surface humide des métaux des points cathodiques et des points anodiques qui sont, pour une pile, des pôles analogues à ceux que l'on considère dans l'électrolyse, mais en sens inverse. La corrosion se fait sur les points anodiques (piqûres) car c'est en ces points qu'est absorbé l'oxygène. Des expériences délicates ont même montré que sur un métal à gros grains, le contour des grains était généralement anodique et leur face cathodique, mais ceci touche à la corrosion intergranulaire dont nous ne parlerons pas.

L'électrolyte est généralement l'eau, même à l'état de traces, mais peut être aussi bien fourni par les sécrétions de micro-organismes et, de façon générale, par tout liquide conducteur.

La corrosion étant ainsi caractérisée par la présence de couples de surface, la lutte contre la corrosion a aujourd'hui un objectif précis. Des équations mathématiques expriment les conditions électriques requises pour qu'un métal soumis à la corrosion électrochimique soit « passivé » ou protégé.

Ces équations sont complexes, elles font intervenir notamment des fonctions de polarisation et ne peuvent être d'un grand secours au praticien. Elles ont cependant permis aux chercheurs de trouver des solutions aux problèmes de la corrosion, dans l'air, l'eau ou le sol.

Nous avons vu plus haut que la solution la plus souvent retenue consiste à revêtir d'une peinture ou d'un enduit bitumineux la surface à protéger. Nous ne pensons pas cependant que la peinture constitue le mode de protection idéal, nous en proposerons d'autres dans le cas des conduites enterrées. Ceux-là non plus ne sont pas parfaits et de nouvelles solutions seront

peut-être mises au point au cours des années à venir ; on parle beaucoup des silicones qui ne peuvent encore être employés industriellement en France, on parle aussi de matières plastiques et de revêtements de nylon. Nous en avons eu sous les yeux un séduisant échantillon, concernant la protection d'un câble métallique. Il est possible que l'on arrive à des résultats analogues par l'emploi de peintures au caoutchouc chloré. Pour la protection des conduites forcées ce matériau, actuellement d'un prix élevé, est plein de promesses : il résiste en effet à l'air salin, aux acides, aux chlorures, à l'ozone, au gaz sulfureux, etc., et possède en outre une résistance à l'abrasion remarquable.

Mais arrêtons là les anticipations pour examiner successivement la protection contre la corrosion dans l'eau, dans le sol et dans l'air.

CORROSION DANS L'EAU

Les conduites forcées sont parcourues par de l'eau « aérée » et « courante », chargée parfois en boues végétales, donc en bactéries. Leur protection intérieure devra tenir compte de cet état de chose et sera donc bien différente de celle qu'on appliquera par exemple, à l'intérieur des réservoirs ou des chaudières.

Certaines matières ralentissent ou arrêtent la corrosion, ce sont les « inhibiteurs ». Les unes empêchent l'accès de l'oxygène aux cathodes locales, les autres gênent l'émission des ions. On les appelle respectivement inhibiteurs cathodiques et anodiques.

Le bicarbonate de calcium se classe dans la première catégorie. Aussi, les eaux « dures » ne sont-elles pas à craindre. Le dépôt calcaire forme avec la rouille un produit adhérent, d'observation courante dans nos régions des Alpes. Il faut noter cependant que le dépôt de CO_3Ca ne se produit pas en présence d'un excès de gaz carbonique, aussi ne faut-il pas se hâter de conclure qu'en eau calcaire, la corrosion sera pratiquement négligeable. Un mode de protection efficace en eaux très pures, mais irréalisable la plupart du temps, est l'introduction à la prise d'eau, en quantité convenable, des carbonates de calcium jusqu'à ce que se produise le dépôt dont il s'agit qui, une fois formé, jouera son rôle de protecteur sans qu'il soit besoin de l'entretenir.

Une autre conséquence des propriétés des inhibiteurs est que, si l'on procède au nettoyage d'une tôle rouillée avant peinture avec un produit inhibiteur formant un dépôt sur la surface, on constatera une meilleure tenue de la protection.

Les inhibiteurs anodiques ne peuvent jamais arrêter totalement la corrosion car ils laissent subsister des points actifs qui se corrodent par piqûres. Il faudrait en effet que leur proportion dans l'eau soit constante aussi bien dans le temps que dans l'espace.

Les plus efficaces sont le minium (oxyde de plomb) et le chromate de zinc. Le chromate basique de magnésium arrête totalement la corrosion dans l'eau en mouvement. Le minium a des propriétés analogues à condition que l'eau soit très aérée.

On se rend compte, à la lumière de ces considérations, que les peintures au minium ou au plomb et aux chromates sont supérieures à toute peinture ordinaire ne possédant pas ces qualités inhibitrices.

Cependant, la solution qui consiste à enduire de peinture une surface destinée à être mouillée, est loin de répondre parfaitement aux exigences de la théorie : il faudrait en effet réaliser une dissolution continue dans l'eau, du produit inhibiteur. Plus le support d'huile sera imperméable, moins l'action du minium ou du chromate sera efficace. La pratique confirme la théorie puisque le minium donne de meilleurs résultats dans l'huile de lin que dans les huiles plus imperméables comme l'huile de castor déshydratée.

Des laboratoires ont mis au point des peintures plombifères à base de plomb métallique en poudre. Ces peintures sont maintenant fabriquées en quantités industrielles et il semble qu'elles doivent être préférées à celles au minium. Elles doivent être obligatoirement revêtues d'une ou deux couches protectrices de peinture dure, capable de résister à l'érosion des sables, aux fonctions chimiques des eaux et aux efforts créés par le gonflement des tuyaux sous l'effet de la pression.

Dans les conduites forcées, la vitesse de l'eau est généralement grande, la peinture au minium n'est pas celle qui résiste le mieux à l'érosion, aussi lui préfère-t-on souvent d'autres peintures « dures », qui ont une excellente résistance à l'usure. On utilise fréquemment des peintures en couches épaisses de 1 à 3 mm. du type « Email ». Ces revêtements, qui ont fait leurs preuves, de-

viennent très glissants après une durée plus ou moins grande de passage de l'eau et permettent une « stabilisation » des pertes de charge linéaires, alors que dans une conduite non revêtue, les pertes de charge tendent à augmenter au fur et à mesure que la corrosion s'accroît.

L'émail étant fragile et cassant, les raccords doivent être particulièrement soignés et l'ensemble doit être examiné de façon à ce qu'il n'existe aucun point faible, le moindre écaillage risquant de s'étendre rapidement. Le contrôle de la qualité peut se faire au moyen d'appareils électriques composés d'un générateur haute tension, relié d'un côté à la masse du tuyau et de l'autre à une brosse métallique qui est promenée sur le revêtement. En présence d'un manque ou d'une fissure invisibles à l'œil, une étincelle jaillit entre la tôle et la brosse.

Pour terminer ce chapitre, disons que pratiquement c'est le pH (degré d'acidité ou d'alcalinité) de l'eau, qui renseignera l'utilisateur sur les dangers de la corrosion intérieure des conduites forcées. On peut noter que le pH des saumures pour réfrigérants est réglé à 8,5. L'adjonction de chromates permet de réduire la perte de poids des tubes de 90 %. S'il y a toujours, en théorie du moins, un moyen chimique pour limiter la corrosion dans l'eau des conduites forcées, la pratique, en ce qui concerne le minium, ne suit que de loin la théorie : il faudrait en effet qu'il y ait dissolution continue de la protection, alors qu'on cherche à imperméabiliser celle-ci le plus possible.

CORROSION DANS LE SOL

Les méfaits du sol sur les conduites enterrées sont bien connus. Remarquons cependant que les terrains où se trouvent enterrées les conduites forcées sont généralement moins agressifs que ceux qui sont traversés par les canalisations d'adduction d'eau.

Pour trouver une solution satisfaisante, il faut, là encore, avoir recours à la théorie en observant toutefois que certaines bactéries peuvent réduire les sels qui existent dans la terre et libérer ainsi l'oxygène nécessaire à la dépolarisation cathodique.

Les tuyaux auto-frettés devront être spécialement protégés, non pas parce que le contact de deux métaux différents (acier doux ou mi-doux du chemisage et l'acier traité du fretage) laisse supposer la présence de couples plus

nombreux, mais parce que l'épaisseur du chemisage étant moindre, toute perte de métal, égale en valeur absolue, est plus grande en valeur relative. Le cas des tuyaux à fretage souple, où les câbles ou élingues sont galvanisés, ne diffère pas sensiblement du cas des tuyaux à frettes laminées. En effet le zinc étant, dans l'échelle des potentiels, plus électro-négatif que le fer, il se forme, aux dépens du zinc, de l'hydroxyde blanchâtre. Ce produit étant insoluble, la polarisation se produit et le zinc devient auto-protecteur. Cependant, suivant le pH du milieu ambiant, le potentiel relatif des éléments en présence peut varier et même, dit-on, s'inverser. D'autre part, les phénomènes de polarisation sont très complexes : la présence d'ions solubles de chlorures peut empêcher la formation de la gaine protectrice d'hydroxyde de zinc. Il est donc prudent de ne pas considérer la protection du zinc comme définitive et de s'attacher à soigner la protection des tuyaux à fretage souple comme celle des tuyaux ordinaires.

fig. 1

Diagramme expérimental permettant, d'après Guzzoni, d'exprimer l'agressivité d'un sol en fonction du complexe rH/pH .

Il s'agira pratiquement de connaître en premier lieu le pH des sols traversés, c'est-à-dire leur force d'acidité ou d'alcalinité et même le rH , indice « d'activité oxydante ou réductrice ».

La figure (1) reproduit le diagramme de Guzzoni établi expérimentalement. La figure (2) délimite, d'après MM. Maurin et Pourbaix, les zones de corrosion faible ou forte en fonction du pH du milieu et du potentiel du métal par

rapport au sol. Ce graphique a été fait à l'occasion d'une étude pratique à Pontcharra-sur-Bréda.

Suivant les cas, on devra choisir telle ou telle protection plus ou moins onéreuse, mais plus ou moins efficace, selon que la corrosion sera présumée faible ou forte.

fig. 2
Surface en m² de canalisations protégée d'après pH et U par une anode Standard (U 125 ; h 375 ; P 8,5 ; Protection de 10 ans ; débit par anode : 100 mA).
(Document Société Générale du Magnésium)

Pratiquement, on a constaté jusqu'à présent, à notre connaissance, que mis à part les cas de corrosion électrolytique par courants vagabonds, l'usure d'une canalisation enterrée non protégée était de l'ordre de 1 mm. par 10 ans. Ce chiffre n'est évidemment qu'une indication vague destinée à fixer les idées. On a par contre, des exemples de conduites minces enterrées depuis 50 ans, qui donnent entière satisfaction. Encore faut-il ajouter que l'usure n'est pas régulière, mais très localisée. La tôle arrive à se percer, mais les trous sont réparables la plupart du temps car le métal adjacent demeure en épaisseur suffisante pour supporter une plaque soudée.

Certains constructeurs augmentent systématiquement l'épaisseur des conduites enterrées pour que partout où la tôle se trouve nue au contact du sol, la corrosion se produise sans que le coefficient de sécurité de l'installation s'abaisse au-dessous de la limite imposée, pendant un temps plus ou moins bien déterminé. La rareté des matières et leur prix font qu'aujourd'hui cette précaution ne subsiste que

si elle est justifiée en outre, par d'autres considérations importantes comme par exemple la résistance du tube au poids de l'eau, au vide intérieur ou aux pressions extérieures.

On cherche donc à donner aux conduites enterrées les mêmes épaisseurs de tôle qu'aux conduites aériennes, mais en les protégeant efficacement contre la corrosion.

Le jutage des canalisations d'adduction d'eau a été adopté pour les conduites forcées de petit diamètre. La fibre qui sert de support au bitume est pour lui une garantie de longévité plus grande.

Un autre procédé qui vient à l'esprit est le bétonnage des conduites enterrées et même des conduites aériennes. Le béton à réaction basique, est un milieu où la corrosion ne se produit que très faiblement. Des armatures restent intactes dans des constructions faites depuis plusieurs décades.

Il ne faut pas cependant que le béton se « décalcifie ». C'est un fait d'observation courante que des poteaux en béton armé se fissurant, l'eau y pénètre, dissout les sels basiques jusqu'à proximité du fer qui rouille alors très rapidement. On voit apparaître à la surface des taches de rouille et peu après le poteau « éclate », la rouille se produisant avec augmentation de volume.

Pour retarder cette décalcification, on emploie souvent une couche épaisse de béton, mais cette solution onéreuse n'est pas satisfaisante, les seules solutions sont celles qui cherchent à éviter la fissuration même du matériau.

PROTECTION PAR BÉTON

Le béton placé annulairement autour d'une conduite forcée se fissure sous l'effet des tensions dues au retrait du béton et de celles qui prennent naissance lorsque la pression intérieure de la canalisation provoque sa dilatation. Celle-ci n'est pas négligeable : notons pour fixer les idées que l'allongement de la paroi d'acier sous la pression de marche est de l'ordre de 0,2 % sur les conduites auto-frettées à fretage souple.

On conçoit que le béton ordinaire ne puisse supporter l'effort correspondant, d'autant moins qu'il est déjà tendu par les efforts consécutifs au retrait. Ces tensions sont plus ou moins importantes suivant que le béton est déjà fissuré ou non.

Revêtement de béton vibré en atelier sur tuyau auto-fretté.
Câbles : ϕ 17,5 mm. ; épaisseur du béton : 50 mm.
(Cliché Etab^{ss} Bouchayer & Viallet).

Cependant on peut concevoir une telle protection par béton, en utilisant des bétons spéciaux pouvant supporter des allongements importants. Pour admettre ce principe il suffit de penser aux canalisations et même aux conduites forcées en béton, dont les armatures supportent des fatigues élevées et qui résistent à des pressions intérieures importantes.

La résistance du matériau varie beaucoup — à

dosage égal — avec le % d'eau d'addition. On a donc envisagé de revêtir les tuyaux câblés d'une couche mince de béton vibré, s'accrochant sur le frettage d'une part et sur un grillage à maille hexagonale posé par dessus. L'adhérence est bonne de même que l'allongement.

On pourrait améliorer encore cet allongement par l'adjonction de produits agissant de façon diverse : fibre d'amiante, oxyde de fer pulvérulent, etc.

On pourrait aussi employer du ciment sans retrait et même du ciment expansif.

Les protections précédentes n'ont pu cependant être mises en œuvre car leur prix de revient est trop élevé.

Par contre, il est possible, dans certains cas, de recouvrir les conduites de béton projeté au ciment-gun comme le montre la photographie ci-dessous, prise en atelier au cours d'un essai.

La capacité d'allongement de la gunite sous l'effet de la pression hydraulique que supporte le tuyau est excellente ; les fissures qui se produisent demeurent capillaires et se referment lorsque la pression diminue. Le but poursuivi est donc atteint.

Mais sur place, on ne peut pas toujours employer le ciment-gun. Les raisons principales en sont le peu de place subsistant entre le terrain et la paroi du tuyau et aussi la difficulté d'appro-

Gunitage en atelier.
Le tuyau à frettage souple est recouvert d'un grillage destiné à améliorer l'adhérence du béton.
(Cliché E. B. V.).

Revêtement de béton ordinaire sur le chantier d'Aussois, vers la cote 1.640. Epaisseur du béton : 120 à 150 mm.

(Cliché S. D. E. M.).

visionnement des matériaux convenables au lieu d'emploi, du sable, en particulier, qui doit être sec et mélangé de gravier roulé, passant à la maille de 10 mm., et donc le prix de revient élevé de ces matériaux.

Comme il s'agit en fait d'élaborer le béton avec le strict minimum d'eau, une solution possible est l'emploi du « béton sous vide » : l'excès d'eau étant aspiré à travers les perforations du coffrage spécial, au moyen d'une pompe à vide. Le béton est tassé au cours de l'opération, car la pression atmosphérique qui s'exerce en dehors du coffrage sur les côtés, est loin d'être négligeable.

Dans le cas d'une conduite forcée, le procédé n'est pas forcément rédhibitoire comme prix car il permet, en outre, un décoffrage extrêmement rapide donc une économie de surface des coffrages. Les moules étant plus petits sont plus faciles à remplir et il est possible que ces avantages, joints à une amélioration des propriétés mécaniques, équilibrent le supplément de dépenses à envisager. Il ne faut pas perdre de vue que l'économie la plus importante est réalisée du fait qu'il suffit d'une faible épaisseur de béton.

Jusqu'à présent on a été conduit à recouvrir les conduites forcées pour lesquelles la protection par béton a été adoptée, d'une couche épaisse de béton (10 à 15 cm).

La fissuration extérieure est importante mais moins dangereuse du fait de la grande épaisseur du béton.

Pour diminuer la fissuration, on a imaginé de ménager dans la section et suivant les génératrices médianes, deux joints plastiques. L'application de la protection se fait en deux fois, et, lors de la mise en eau, les joints longitudinaux en matière plastique qui ont permis un déplacement de la 1/2 coquille supérieure, sont rechargés.

Dans ce sens, un résultat supérieur serait atteint si le bétonnage était effectué après la mise en eau de la conduite, mais cette formule séduisante à priori, n'est réalisable qu'exceptionnellement puisqu'à ce moment là l'ensemble des travaux est généralement terminé, les installations de transport des matériaux le long du profil de la conduite forcée sont démontées, et les équipes de bétonnage ont quitté les lieux définitivement.

On peut dire en terminant que la solution qui semble la plus satisfaisante soit celle qui consiste à bétonner la partie inférieure de la conduite entre banches, à poser un joint

Conduite forcée de la chute d'Aussois vue entre les cotes 1.600 et 1.665 m. après bétonnage selon le procédé détaillé précédemment.

(Cliché S. D. E. M.).

plastique le long des génératrices médianes et à guniter la demi-portion supérieure, lorsque les matériaux aptes au gunitage peuvent être apportés. Le prix de revient d'une telle protection demeure élevé. Néanmoins, elle peut être envisagée avantageusement, notamment dans les cas où l'on désire avoir, outre une bonne protection contre la corrosion, une protection mécanique contre les éléments extérieurs.

ÉMAILLAGE A CHAUD

La protection par béton étant onéreuse, on lui préfère la plupart du temps une protection par peinture. Cependant dans le sol, on ne peut examiner l'état du revêtement, et l'on doit porter un soin particulier au choix des peintures destinées à protéger des ouvrages métalliques enterrés comme à leur application.

Pour augmenter la sécurité, l'application de couches épaisses de produits bitumineux (1 à 3 mm.) a été envisagée.

Depuis de nombreuses années déjà les constructeurs procèdent au « goudronnage » à chaud des canalisations, même de grand diamètre. Des installations existent comportant un bac à tremper chauffant et un dispositif faisant tourner les tuyaux dans le bac, qui permettent de procéder industriellement à une application « au trempé ». Le poids de matière déposée est important et souvent irrégulier. Après « bitumage » on procède au « chaulage » de la surface.

L'inconvénient majeur de ce système réside dans le fait que les goudrons et les peintures au brai ont un point de ramollissement assez bas du fait que l'évaporation du diluant est lente.

L'industrie a réussi à plastifier convenablement les produits bitumineux et à fabriquer l'« Email » solide à la température ordinaire et se posant à des températures voisines de 200° dont il a été question à propos du revêtement intérieur des conduites forcées.

L'application de cet email se fait à la brosse, au jet ou au pistolet.

Pour les tuyaux à fretage souple, ce dernier procédé est préférable car il permet de remplir des vides qu'atteindrait mal le pinceau. A l'intérieur des tuyaux, il est encore possible d'employer le pistolet avec des produits spéciaux.

Il est remarquable de constater qu'apparemment le transport et le montage des tuyaux émaillés à chaud en atelier, s'effectuent sans que la protection en souffre particulièrement. Des

retouches sont nécessaires aux endroits ayant frotté contre les calages du wagon ou du camion. Elles ne paraissent pas plus importantes que celles qu'on doit effectuer sur tout tuyau peint à l'huile ou à une solution bitumineuse. Il paraît donc intéressant d'effectuer la protection de chaque élément en atelier où les aléas sont moindres que sur un chantier et où les facilités sont plus grandes. Il suffit ensuite de procéder au fur et à mesure du montage, aux finitions au droit des soudures et aux retouches localisées.

Un avantage très important du travail en atelier réside dans le fait que l'application d'email à chaud peut y être faite en toutes saisons alors que sur les chantiers d'altitude élevée, elle ne peut guère être envisagée qu'entre Mai et Septembre. En effet, dès que la température ambiante baisse, le gel de l'email se produit avant qu'on ait le temps matériel de l'appliquer sur la paroi à protéger, en une couche d'épaisseur régulière.

Emaillage au pistolet à chaud. On distingue derrière l'opérateur la cuve chauffante où la température est maintenue au voisinage de 200°. Au pistolet arrivent 2 tuyaux chauffants véhiculant l'air et l'email. Le tuyau est posé sur un dispositif permettant sa rotation.

(Cliché E. B. V.).

En atelier, cette difficulté n'existe pratiquement pas et ni le programme de montage, ni le programme des travaux de remblaiement ne sont affectés par le programme de l'émaillage.

En Amérique, on complète parfois la protection bitumineuse par une couche de gunité de 3/4 de pouce, ou encore par un mélange d'asphalte et d'agréats. Cette protection est adoptée notamment dans les terrains très agressifs où l'enveloppement au papier bitumé par dessus l'enduit s'était avéré insuffisamment efficace.

Il faut signaler enfin que si l'émail de bonne qualité résiste bien à l'eau d'infiltration et aux sols, il s'abîme rapidement à l'air sous l'action des rayons ultra-violet. Si la conduite doit posséder des surfaces affleurant le sol ou même hors sol, toutes ces parties devront être couvertes d'une peinture aluminium qui a pour effet de renvoyer les rayons solaires, et d'éviter un échauffement trop grand, donc des coulures. La peinture aluminium est remarquable par cette propriété, et permet de réduire de 20 à 30 degrés la température des tuyaux vides.

PROTECTION GALVANIQUE

Nous avons dit plus haut que la protection d'une canalisation enterrée devrait être choisie en fonction de l'agressivité du sol. L'idéal serait donc de proportionner le remède à la force de l'attaque : ce remède existe-t-il ?

— Oui, car si l'on se reporte au diagramme figure 2, il suffit que, pour un pH ambiant donné, le potentiel de la conduite par rapport au sol ait une valeur suffisante pour que la corrosion soit réduite sensiblement à zéro. La valeur de ce potentiel a été donnée au Congrès des Etats de surface (Paris, octobre 1947) : « Si on abaisse le potentiel du fer ou de l'acier enfoui dans le sol en dessous du potentiel de $-0,85$ V, la corrosion est stoppée ».

Pour abaisser ce potentiel, deux moyens existent : soit appliquer à la conduite, par un générateur à courant continu, un potentiel tel que la condition soit atteinte ; soit créer un couple entre l'acier et un métal plus électro-négatif que lui, comme l'aluminium, le zinc, le cadmium, le magnésium, etc.

Dans le premier cas, la source d'énergie est un redresseur ou une génératrice qui peut être actionnée, parfois, par le fluide transporté par la conduite (cas des pipes-lines américains qui sont protégés grâce aux génératrices entraînées par des moulinets). Dans le second,

c'est un morceau de métal enfoui dans le sol à proximité de la canalisation et qui, lié à elle par un fil conducteur, se détruit progressivement.

On peut proportionner exactement la cause à l'effet présumé, au moins en théorie, par l'adjonction de résistances, et pour fixer les idées voici quelques chiffres.

Deux techniciens mesurent le potentiel d'une conduite forcée par rapport au sol, en vue de sa protection par anodes réactives (protection galvanique).

(Cliché S. D. E. M.).

Les pH les plus courants sont voisins de 7. Le potentiel du fer a dans ce cas une valeur de l'ordre de $-0,30$ volts par rapport à l'électrode de NERTZ (H) et le potentiel de passivation (corrosion nulle) est inférieur à $-0,60$ volts. Pour abaisser le potentiel d'une canalisation jusqu'à cette valeur, il faut lui appliquer une intensité de courant de l'ordre de 10 milliampères par mètre carré de surface à protéger. A ce débit correspond une consommation approximative de 1 kg. de magnésium pour 20 ans, ce métal étant choisi parce que, dans l'échelle des potentiels, il se trouve avoir en moyenne les caractéristiques les plus favorables.

Si au lieu d'être nue, la conduite enterrée est recouverte d'un revêtement, la consommation de magnésium peut diminuer de 75 %, c'est-à-dire être réduite à 250 gr. pour 20 ans (chiffre toujours approximatif) et par mètre carré. Ce qui représenterait une dépense de matière de 75 à 100 F. par m² pour 10 ans, en estimant à 600 F/kg. au moins, le prix des billettes en magnésium coulées avec âme d'acier (base novembre 1948).

CORROSION DANS L'AIR

La corrosion atmosphérique est fonction de nombreux facteurs et la protection à choisir devra dépendre du lieu, du climat et de la pollution de l'air par les fumées industrielles. Les essais faits en Amérique en plusieurs endroits différents sont extrêmement significatifs et démontrent bien l'influence prépondérante de certains agents.

Signalons que l'attaque n'est pas la même sur toute la périphérie d'une conduite forcée, ces différences proviennent des vitesses d'écoulement de l'eau sur les parois ⁽¹⁾ et des vitesses de séchage. La distance au sol exerce aussi une influence sur la rapidité de l'attaque, de même que l'orientation au Nord ou au Sud.

La protection contre la corrosion atmosphérique ne revêt pas l'importance des précédentes, sauf dans des cas particuliers, au voisinage de la mer par exemple. Rappelons que si s est la surface corrodée et S la surface primitivement

protégée (O.T.U.A. 1947) le rapport $\frac{s}{S}$ ne doit varier que de 0,00 à 0,03 pour une protection

dite « en bon état », cette évaluation étant faite en examinant la surface d'un cylindre complet pour avoir une estimation moyenne.

MÉTALLISATION

A propos de la protection des conduites forcées aériennes, on peut dire un mot du procédé qui consiste à recouvrir l'acier d'un métal moins électropositif que lui dans l'échelle des potentiels ⁽¹⁾.

Chacun connaît les avantages de la tôle galvanisée, étamée, etc... Les fils d'acier qui servent au fretage souple des conduites forcées sont galvanisés à chaud au cours du tréfilage et sont dits « anti-corrosifs ». ⁽²⁾ Cette protection est une « métallisation » qui n'est pas immuable et les quelques millièmes de mm. de zinc ne sont destinés qu'à protéger ces fils pendant les transports, les stockages, la fabrication, le montage...

La métallisation d'une conduite forcée est possible au pistolet, par application de métaux comme le zinc en poudre ou en fil, fondus dans la flamme d'un chalumeau. Le métal d'apport doit être déposé sur une surface absolument débarrassée de toute trace de rouille (sablée), ce qui est une coûteuse sujétion.

Pour admettre la méthode de métallisation, il faudrait être certain d'obtenir une épaisseur constante de métal d'apport sans aucun manque. Ce résultat est obtenu facilement au laboratoire, mais pratiquement non garanti dans une production industrielle. Et si durable que soit l'efficacité d'une telle protection on ne peut cependant affirmer qu'elle soit définitive.

Avant de mettre un point final à ces quelques pages qui ne font qu'effleurer un vaste sujet et ne peuvent prétendre apporter une vue complète de cette question de la protection des conduites forcées, revenons une dernière fois sur la préparation des surfaces à protéger avant toute application.

Tout d'abord, rappelons que la composition chimique de l'acier est en liaison étroite avec sa corrodabilité. Pour les tôles, l'emploi des aciers au cuivre est favorable à une meilleure conservation.

(1) Ne pas confondre avec le nickelage et le chromage où l'acier est recouvert par un métal plus noble ne se corrodant pas.

(2) Le fil « anticorrosif » est recouvert de zinc en cours de tréfilage, alors que le fil « galvanisé » l'est après tréfilage.

(1) Il s'agit de l'eau de pluie et de l'eau de condensation.

Quant à l'état de surface, il est très important que la première couche soit appliquée sur une surface « passivée » ou tout au moins une surface propre et débarrassée de calamine.

Un métal parfaitement poli ne rouille pratiquement pas. Sans aller jusqu'à cette perfection de l'état de surface, on peut classer son excellence dans l'ordre décroissant suivant : tôle parkérisée, tôle sablée ou grenillée, tôle décalaminée, tôle calaminée, et enfin tôle calaminée piquée et grasse.

Conduite forcée de Sabugueiro (Portugal).
(Cliché S. D. E. M.).

L'ennemi numéro 1 de la peinture est la calamine qui peut se détacher petit à petit, par plaques. Il est très important qu'au moment de l'application d'une peinture, elle soit éliminée.

Pour les tuyaux auto-frettés dont la paroi acquiert en cours de fabrication un allongement

permanent, la calamine, moins élastique, se craquèle et un coup de brosse métallique ou encore un léger martelage suffisent à l'éliminer. Pour les tuyaux ordinaires, le sablage et le grenailage donnent les meilleurs résultats.

Le brossage peut encore remplacer le sablage lorsque les tôles calaminées sont restées longtemps à la pluie. Elles ont pris une teinte rouille caractéristique. La calamine formée à haute température, attaquée par l'air à la température ordinaire s'est désagrégée jusqu'à être entraînée progressivement dans l'eau. Cela fait dire aux Vieux Compagnons d'Atelier que « la peinture tient mieux sur une tôle rouillée que sur une tôle propre ».

Préparer une surface avant peinture et la débarrasser de la rouille, de la calamine, des graisses ou des poussières est une précaution dont on néglige trop souvent l'importance. Elle n'est pas la seule et il n'est peut-être pas déplacé d'en rappeler quelques-unes ici :

Il est important que chaque couche soit plus élastique que la précédente, c'est-à-dire, pour une peinture à l'huile, d'augmenter la proportion d'huile pour les seconde, troisième couches, etc...

Une nouvelle couche ne doit être passée qu'après un délai de séchage raisonnable. Il ne suffit pas, pour dire qu'une peinture est sèche, de pouvoir appliquer la main sur la surface sans se salir : 70 à 80 heures sont souvent nécessaires. Lorsque ce délai n'est pas respecté, on risque de voir la peinture se décoller par plaques ou encore se craqueler.

Enfin, il faut sécher une surface avant de la protéger. Ce travail est rarement bien réalisé en galeries, soit que les eaux d'infiltration mouillent la conduite forcée, soit que, la conduite étant pleine, une condensation se produise du fait des différences entre la température de la tôle et la température ambiante. Les parties en galerie devraient être peintes à un moment de l'année choisi de telle façon que la condensation soit minimum.

EN GUISE DE CONCLUSION

Dans le domaine de la Protection, comme dans beaucoup d'autres, des progrès ou des mises au point sont encore souhaitables.

Nous regrettons de ne pouvoir donner de conclusion définitive sur la protection galva-

nique qui n'a été employée en France, à notre connaissance, qu'à la Courneuve sur un pipe-line de $\psi = 0$ m. 200 et de longueur 4.200 m., et à St-Denis sur une conduite de $\psi = 1$ m. 200 et de longueur 1.600 m. Nous pensons que cette protection a le plus grand avenir dans le cas des conduites enterrées. Des essais que nous avons poursuivis dans ce sens, ont été jusqu'ici très satisfaisants.

La protection par béton sec, vibré ou projeté à l'air comprimé, offre des garanties sérieuses, plus sérieuses encore que celle d'une couche de 2 à 3 mm. d'émail bitumineux posé à chaud sur 1 ou 2 couches d'apprêt, bien sèches.

C'est cependant cette dernière protection que nous retiendrons et que nous conseillerons pour les conduites enterrées lorsque l'agressivité particulière du sol ou la disposition du terrain ne commandent pas un revêtement de béton.

Quant à la protection intérieure contre l'attaque de l'eau, l'expérience montre qu'elle est souvent plus nécessaire même que la protection contre l'agressivité du terrain. Dans ce cas, nous conseillons vivement le sablage ou grenailage préalable puis l'application de peinture au minium ou au plomb (1 ou 2 couches) et enfin de peinture dite « anti-rouille » (1 ou 2 couches) dont le rôle est de protéger le minium soit contre l'érosion, soit contre les effets des remplissages et vidanges successifs. Le minium se détruisant au fur et à mesure qu'il protège une conduite, il faut entretenir soigneusement cette protection intérieure.

Il faut noter cependant que les conduites soudées sont moins sujettes à l'érosion et même

à la corrosion que les conduites rivées dont toutes les aspérités constituent des points singuliers.

Lorsque les eaux ne sont pas agressives, nous pensons qu'un sérieux brossage est suffisant. Deux couches de peintures bitumineuses constituent un revêtement dur d'excellente tenue.

Si l'on envisage l'émaillage à chaud à l'intérieur, ce qui présente d'appréciables avantages du double point de vue du rendement hydraulique de l'installation et de la durée de la protection, il faut envisager un sablage pour que la couche d'apprêt soit parfaitement « accrochée » sur le métal propre.

Quant à la protection extérieure des conduites forcées aériennes, elle ne pose pas de problèmes, étant donné qu'elles peuvent être visitées et entretenues sans gêner l'exploitation et sans difficulté. Il n'y a guère que dans les galeries où certains cas particuliers peuvent se présenter du fait que les eaux qui mouillent la canalisation peuvent avoir des caractéristiques laissant craindre une attaque rapide.

Il faut dans tous les cas, et ce sera là notre conclusion finale, veiller à ce que l'exécution soit faite selon les règles de l'Art. Aujourd'hui où nous faisons appel aux Laboratoires et aux Savants pour décider des principes à adopter ou des matières à choisir, aujourd'hui où les Fabricants réalisent dans toutes les familles de peintures, des produits de qualité, quand il s'agit d'exécution sachons distinguer l'« ENTREPRENEUR » du « BARBOUILLEUR »... C'est une condition qu'il sera toujours primordial de bien satisfaire.

BIBLIOGRAPHIE

M. MAURIN.

Utilisation de la méthode potentiométrique à la recherche de l'agressivité du terrain.
Journal des Usines à Gaz. Novembre-décembre 1947.

A. MARTY.

Rétrospective et avenir des peintures au brai.
Journal des Usines à Gaz. Août 1948.

I. LEVIANT.

Le béton sous vide.
Le Génie Civil. 15 janvier 1948.

E. HERZOG.

Recherches sur la corrosion effectuées en Angleterre et aux Etats-Unis pendant la guerre (1940-1945).
Métaux et Corrosion. Juillet-décembre 1946.

M. MAURIN.

Auto corrosion et Electrolyse des canalisations enterrées.
Conférence du 18 novembre 1942 à l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics.

B. RACLOT.

La protection galvanique du fer par les anodes en magnésium.
Métaux et Corrosion. Février 1947.

P. LACOMBE.

Les tendances actuelles des recherches sur la corrosion.
Revue de la Métallurgie. Janvier-février 1948.

L. MARION.

Les peintures plombifères.
Marseille (1947).

M. PUPIL.

Les Accidents en peinture.
Circulaire 22 de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics.

OERTLI.

La protection contre la rouille des conduites forcées selon les expériences faites en Suisse.

Y. MAYOR.

La protection cathodique.
Electricité. Octobre 1948.

O.T.U.A.

Essai de définition de la bonne exécution et de la limite d'usure des peintures sur les ouvrages en acier.