

BUSES METALLIQUES

GUIDE POUR LA SURVEILLANCE SPECIALISEE,
L'ENTRETIEN ET LA REPARATION



BUSES METALLIQUES

GUIDE POUR LA SURVEILLANCE SPECIALISEE, L'ENTRETIEN ET LA REPARATION

Décembre 1992

Document réalisé et diffusé par le



SERVICE D'ETUDES TECHNIQUES DES ROUTES ET AUTOROUTES
Centre des Techniques d'Ouvrages d'Art
46, avenue Aristide Briand - B.P. 100 - 92223 Bagneux Cedex - FRANCE
Tél : (1) 46 11 31 31 - FAX : (1) 46 11 31 69 - Télex 632 263

La rédaction de ce document a été assurée par :

N. BERTOLINI - S.E.T.R.A. - CTOA
G. HAIUN - S.E.T.R.A. - CTOA

Ont collaboré à son élaboration :

A. MILLAN - S.E.T.R.A. - CTOA
D. ANDRE - L.C.P.C.
JP. PERSY - L.C.P.C.
S. BARBAUX - COFIROUTE

SOMMAIRE

	Page
AVANT-PROPOS	5
CHAPITRE 1 - GENERALITES SUR LA PATHOLOGIE DES OUVRAGES	7
1.1. Déformations du profil en long	7
1.2. Déformations transversales d'ensemble	9
1.3. Déformations des extrémités	13
1.4. Enfoncements, poinçonnements et dégradations locales des tôles	16
1.5. Corrosion - Dégradation des matériaux	17
1.6. Autres désordres et autres causes	18
CHAPITRE 2 - AUSCULTATION DES OUVRAGES - DIAGNOSTIC	21
2.1. Auscultation des ouvrages - Appréciation de l'état de corrosion des buses	21
2.1.1. Mesure des déformations	21
2.1.2. Appréciation de l'état de corrosion de la buse	23
2.2. Diagnostic	31
2.2.1. Déformations du corps de la buse	32
2.2.2. Extrémités des ouvrages	33
2.2.3. Corrosion	33
CHAPITRE 3 - ENTRETIEN SPECIALISE - RENFORCEMENT OU REMPLACEMENT D'OUVRAGES - EXEMPLES	35
3.1. Entretien spécialisé	35
3.1.1. Mise en place ou réfection d'un revêtement de protection	36
3.1.2. Mise en place d'un radier de protection	39
3.1.3. Installation d'une protection cathodique	41
3.2. Réparation ou renforcement local	42
3.2.1. Renforcement des extrémités d'une buse	43
3.2.2. Renforcement d'un radier	43
3.2.3. Remplacement local de plaques de tôles	47
3.2.4. Traitement local des remblais par injection	48
3.3. Renforcement général ou remplacement de la buse	49
3.3.1. Renforcement par tubage ou chemisage intérieur de la buse	49
3.3.2. Renforcement par un ouvrage en béton armé coulé en place à l'intérieur de la buse	54
3.3.3. Remplacement d'une buse par un ou plusieurs tubes foncés	61
3.3.4. Autres solutions de remplacement	62

Page laissée blanche intentionnellement

AVANT-PROPOS

Un grand nombre d'ouvrages constitués de buses métalliques ont fait l'objet de visites et d'inspections détaillées, en application des dispositions de l'Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art (I.T.S.E.O.A.) de Septembre 1979.

Ces actions de surveillance, qui ont mis en évidence certains cas types de pathologie, et qui ont conduit parfois à procéder à des opérations d'entretien spécialisé ou de réparation des ouvrages, ont permis de mieux connaître et de préciser les conditions de mise en oeuvre de certains moyens d'investigation - en particulier pour apprécier l'état de corrosion des buses - et celles des solutions de réparation projetées.

Elles ont fait apparaître par ailleurs la nécessité, pour les gestionnaires des ouvrages, de disposer d'un guide spécialisé pour les aider à définir les moyens à mettre en oeuvre dans le cadre d'actions particulières de surveillance, (inspections détaillées périodiques ou exceptionnelles) à établir un diagnostic sur l'état des ouvrages et, s'il y a lieu, à définir les solutions d'entretien spécialisé ou de réparation. C'est l'objet du présent document, qui a été établi à partir de l'expérience acquise ces dernières années par les cas de pathologie rencontrés et par les solutions de réparation mises en oeuvre.

Certes, ce guide ne saurait être exhaustif compte tenu notamment de la grande variété des situations rencontrées, mais aussi de l'insuffisance de nos connaissances actuelles, par exemple sur les possibilités d'emploi de certaines techniques d'investigation ou de certains procédés de réparation, dans des situations particulières. Il a paru utile toutefois de porter dès à présent à la connaissance des gestionnaires d'ouvrages et des services concernés les renseignements dont nous disposons. Nous demandons aux utilisateurs du présent document ainsi qu'à ceux qui possèdent une expérience dans le domaine traité de bien vouloir nous faire part de leurs observations éventuelles et de toute information susceptible de le compléter utilement.

Page laissée blanche intentionnellement

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR LA PATHOLOGIE DES OUVRAGES

Ce chapitre présente les notions essentielles sur la nature et l'origine des principaux désordres qui peuvent affecter les ouvrages constitués d'une ou de plusieurs buses métalliques. Il reprend à ce sujet l'essentiel des informations fournies dans le chapitre 7 des Recommandations (LCPC-SETRA - Sept. 1981) et dans le chapitre 3 du Fascicule 50 de l'I.T.S.E.O.A.

Il convient toutefois de rappeler, là également, que si certains désordres peuvent être parfois rattachés à des causes bien précises, il n'en reste pas moins que les désordres constatés résultent plus souvent de la concomitance de certaines de ces causes et qu'il serait donc hasardeux d'en attribuer trop hâtivement l'origine à l'une d'elles sans qu'une investigation complète ne soit effectuée.

1.1. Déformations du profil en long

Un affaissement général du profil en long d'une buse est caractéristique d'un tassement du remblai dans lequel est implanté l'ouvrage, dû à la compressibilité du sol de fondation. De ce fait, ce type de déformation est en général nettement plus accentué au centre de la buse qu'à ses extrémités.

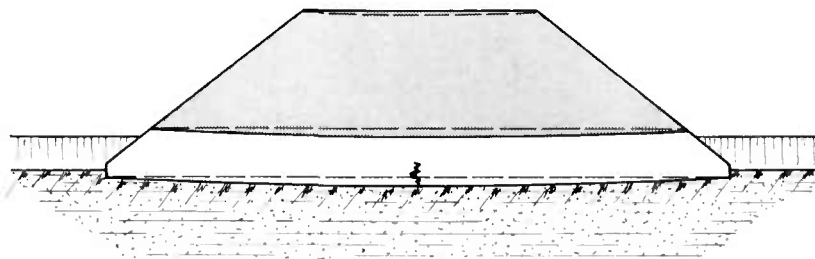


Figure 1.1.: Remblai sur sol très compressible pouvant entraîner des tassements différentiels importants

Dans la plupart des cas, ces désordres ne présentent pas de gravité particulière en ce qui concerne la stabilité de l'ouvrage, mais ils peuvent être préjudiciables à son exploitation (déformation d'une chaussée, stagnation d'eau, perte de gabarit, ...) et, de ce fait, être à l'origine d'une accentuation d'autres désordres.

Lorsque le tassement différentiel entre le centre et les extrémités de la buse est trop accentué, il peut par contre entraîner des désordres importants dans la paroi, et notamment au niveau des joints circonférentiels de la partie centrale de l'ouvrage (déformation et déchirure des tôles, fissuration des tôles au droit des trous de passage des boulons, poinçonnement de la tôle par les boulons, ...).

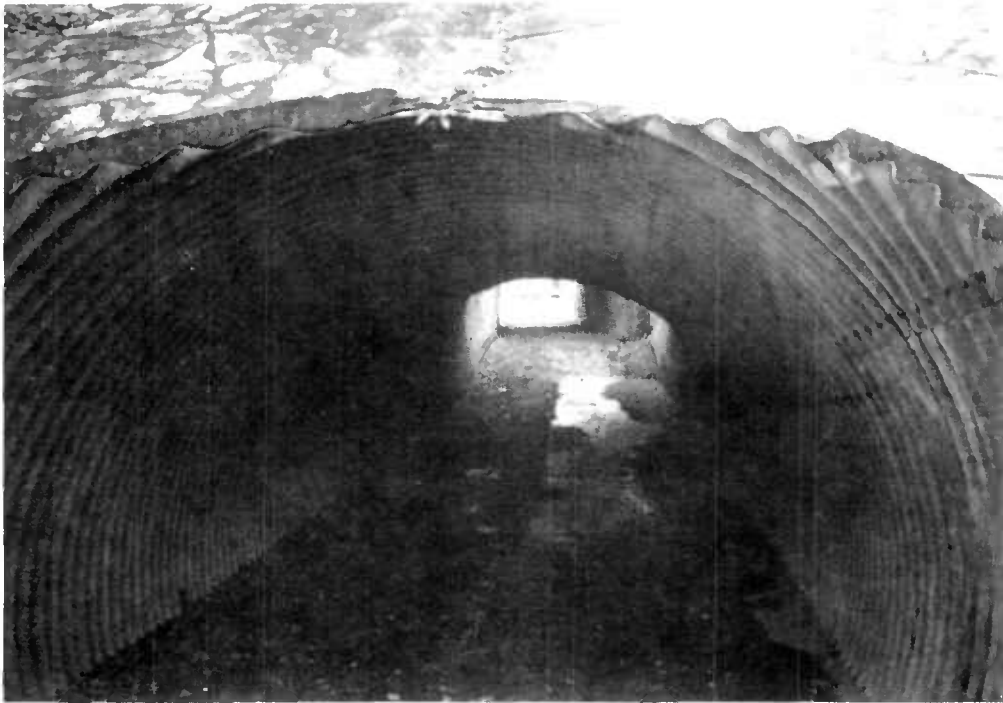


Figure 1.2. : Tassement différentiel entre le centre et les extrémités

Par ailleurs, des ruptures très accentuées du profil en long ont pu être constatées. Elles s'accompagnent d'un cisaillement net de l'ouvrage au droit d'un joint circonférentiel, et sont généralement dues à une hétérogénéité très marquée des caractéristiques géotechniques du sol de fondation ou à une rupture au sein du massif de remblai dans lequel est implanté l'ouvrage.

Il faut souligner que, dans la quasi-totalité des cas, des désordres tels que ceux décrits ci-dessus sont directement imputables à une insuffisance, voire à une absence totale d'étude géotechnique et, dans une certaine mesure, à une surestimation des possibilités de déformation et d'adaptation des buses métalliques.

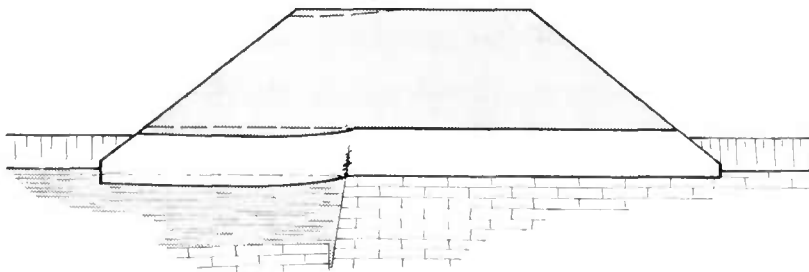


Figure 1.3. : Hétérogénéités très marquées du sol de fondation pouvant entraîner le cisaillement de la buse

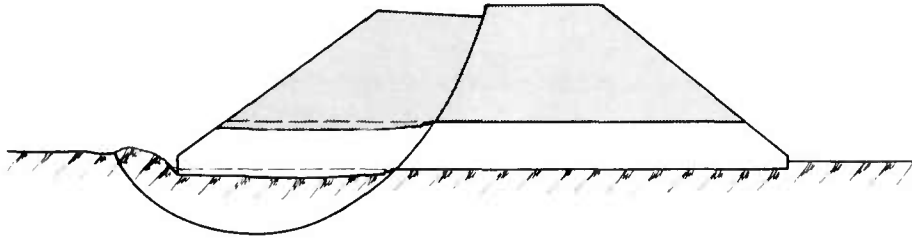


Figure 1.4. : Entraînement partiel d'une buse par un remblai instable



Figure 1.5. : Déchirure des joints circumférentiels par entraînement d'un remblai instable

1.2. Déformations transversales d'ensemble

Les déformations transversales d'ensemble du corps d'une buse sont celles qui se manifestent sur une partie importante de celle-ci, voire même sur toute sa longueur.

Elles sont dues dans la plupart des cas à la nature même des matériaux en place ou rapportés autour de la buse, qui fait qu'ils ne présentent pas les qualités mécaniques requises, ou à une mise en œuvre des remblais mal conduite. Elles peuvent être dues également à d'autres causes, dont les principales sont citées ci-après, et parfois même, à un sous-dimensionnement de la paroi de la buse, notamment vis-à-vis des efforts qui l'ont sollicitée durant la construction des remblais latéraux de butée (cas des buses de grande portée principalement).

Ces déformations présentent rarement un caractère grave lorsqu'elles sont peu accentuées et totalement stabilisées, bien que des défauts de continuité de la forme de la buse, dus à de légers pivotements de certaines plaques les unes par rapport aux autres autour de leur joint longitudinal commun, facilement décelables à l'oeil nu, puissent engendrer un sentiment d'insécurité.

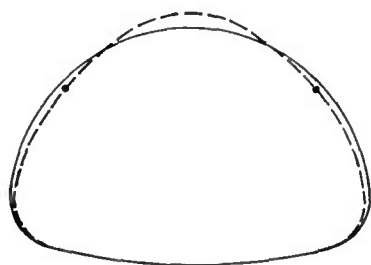
Elles peuvent avoir un caractère nettement plus grave lorsqu'elles sont accentuées ou qu'elles se poursuivent durant l'exploitation de l'ouvrage. Dans ces cas, elles peuvent s'accompagner de désordres dans certains joints longitudinaux (glissements, fissurations au niveau des trous de passage des boulons, amorces de rupture des joints ou de pliage des tôles à leur proximité immédiate, ...) et dans d'autres parties de l'ouvrage (déformations de la chaussée, décollement ou larges fissures dans un radier en béton, ...).

Il n'est pas rare non plus que certaines déformations d'ensemble du corps de la buse, lorsque la hauteur de couverture à la clé n'est pas très importante, puissent se manifester par une rupture du profil en long de la chaussée portée, ou par des désordres sur les trottoirs et les équipements éventuels, souvent aisément décelables à l'oeil nu.

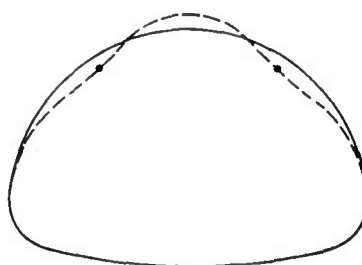
Les déformations d'ensemble du corps d'une buse les plus caractéristiques sont les suivantes :

a) - Déformation en ogive ou en forme de poire de la voûte

Une déformation en ogive se caractérise par une diminution du rayon de courbure à la clé. Une déformation en forme de poire est un état plus accentué et plus grave d'une déformation en ogive, des inversions de courbure se développant symétriquement de part et d'autre de la buse (Cf. figure 1.6.). Ces déformations traduisent le plus souvent une insuffisance de rigidité de la paroi vis-à-vis des efforts de poussée qui l'ont sollicitée durant la construction des remblais latéraux, ou une intensité anormale de ces efforts.



a - Déformation en ogive



b - Déformation en forme de poire

Figure 1.6. : Déformations en ogive et en forme de poire du corps d'une buse



Figure 1.7. : Défaut de continuité de la forme d'une buse (légère rotation visible des plaques autour de leur joint longitudinal)

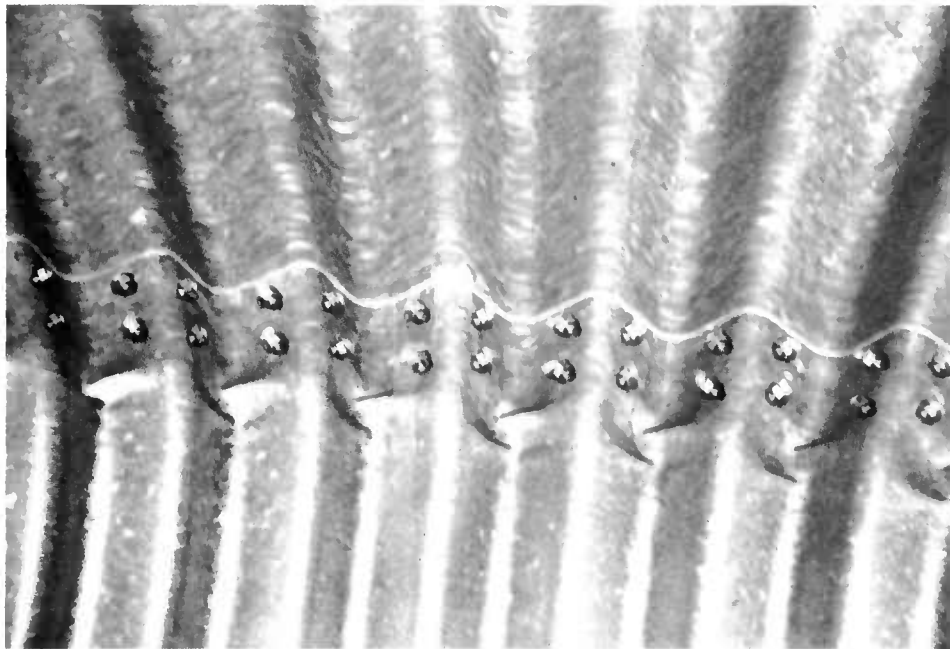


Figure 1.8. : Désordres au droit de joints longitudinaux pouvant accompagner des déformations importantes du corps d'une buse

b) - Aplatissement transversal de la buse

Dans la recherche de sa position d'équilibre sous l'action du poids des remblais qui la surmontent, une buse métallique a toujours tendance à s'aplatir. Toutefois, une déformation trop importante est généralement caractéristique d'une insuffisance de raideur des massifs de butée, dont les causes peuvent être diverses (défaut de compactage des remblais, entraînement de fines par des circulations d'eau et, plus généralement, matériau de remblai mal adapté, trop argileux ou évolutif).

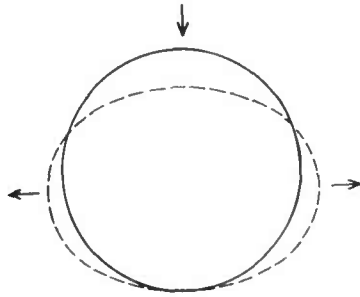


Figure 1.9. : Aplatissement transversal

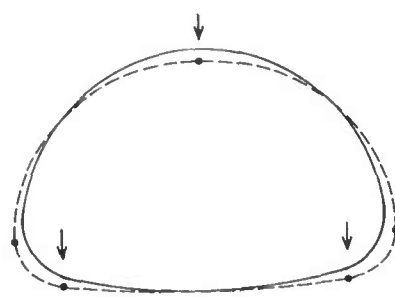


Figure 1.10. : Aplatissement transversal avec enfoncement des plaques de coin

c) - Enfoncement des plaques de coin - Perte de courbure du radier

Pour les buses-arches notamment, l'aplatissement du corps de la buse peut provenir ou s'accompagner d'un enfoncement des plaques de coin dû à une insuffisance de raideur ou de portance du sol sous celles-ci (ouvrage directement fondé sur un terrain de qualités médiocres, matériaux des remblais de calage de qualités très médiocres ou évolutifs, ...). Ce mouvement des plaques de coin s'accompagne d'une perte de courbure du radier pouvant aller, dans les cas extrêmes, jusqu'à l'inversion de courbure (ruine de l'ouvrage).

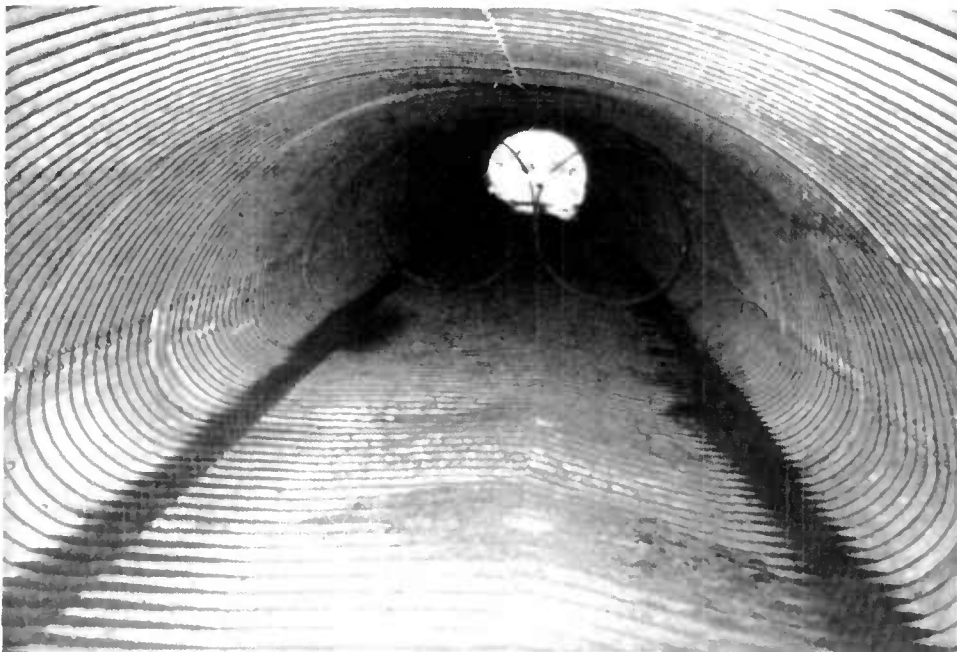


Figure 1.11. : Aplatissement transversal d'une buse avec enfoncement des plaques de coin et inversion de courbure du radier

d) - Déversement latéral

Un déversement latéral est généralement caractéristique d'efforts de poussées s'étant exercés, ou s'exerçant de manière dissymétrique de part et d'autre de la buse. Il peut être dû notamment à une mise en oeuvre dissymétrique des remblais latéraux ou à un remblai de couverture en forte pente. Il peut être dû aussi, plus rarement il est vrai, à l'emploi local, d'un matériau de remblai différent, de moindre raideur.

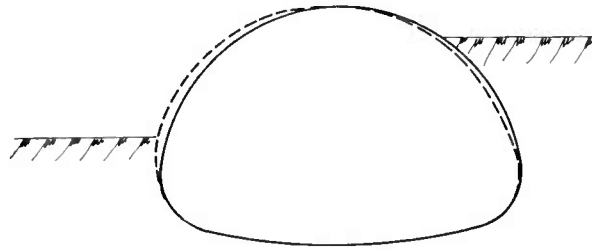


Figure 1.12. : Déversement latéral de buses



Figure 1.13 : Ecrasement latéral d'une buse dû à des poussées dissymétriques

1.3. Déformations des extrémités

a) - Déformation de la voûte

Une déformation de la voûte aux extrémités des ouvrages est généralement caractéristique d'une insuffisance de rigidité de celle-ci, due à l'absence de dispositifs de raidissement, ou à leur insuffisance lorsqu'ils existent.

Une déformation en ogive ou en forme de poire, sensiblement symétrique, est la plus couramment observée pour les ouvrages droits ou peu biais. Pour les ouvrages très biais, cette déformation n'est plus symétrique, et ne concerne souvent que la seule partie biseautée de l'extrémité de la buse.



Figure 1.14. : Extrémité déformée en poire

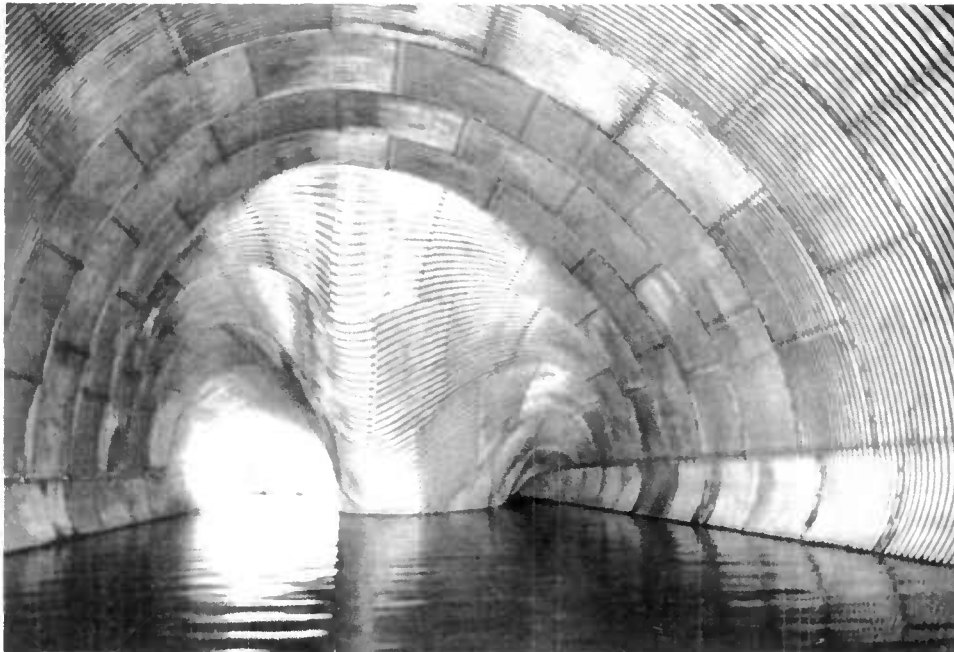


Figure 1.15. : Effondrement d'une extrémité de buse

De telles déformations, qui affectent surtout les extrémités de buses simplement coupées en sifflet ou en biseau sifflet, peuvent survenir soit durant la construction des remblais, soit parfois pendant l'exploitation de l'ouvrage. Leur degré de gravité dépend notamment de leur amplitude et de l'importance des désordres qui peuvent accompagner ces déformations (désordres au niveau des joints longitudinaux notamment, tels que fissurations, déchirures des tôles, ...). Elles ont dans tous les cas un effet néfaste sur l'esthétique de l'ouvrage et confèrent aux usagers éventuels un sentiment marqué d'insécurité.

b) - Soulèvements

Dans le cas des ouvrages hydrauliques, le soulèvement d'ensemble de l'extrémité amont de la buse, lorsqu'elle est en saillie par rapport au talus, est caractéristique d'une insuffisance de résistance et de rigidité de celle-ci vis-à-vis des sous-pressions qui la sollicitent ("lestage" ou ancrage insuffisant ou inexistant). En effet, les extrémités des ouvrages hydrauliques sont généralement soumises à des sous-pressions dont la différence avec la pression hydraulique s'exerçant sur la partie intérieure de la paroi est d'autant plus grande que la vitesse de l'eau circulant dans l'ouvrage est importante et que la perte de charge à l'entrée est élevée.

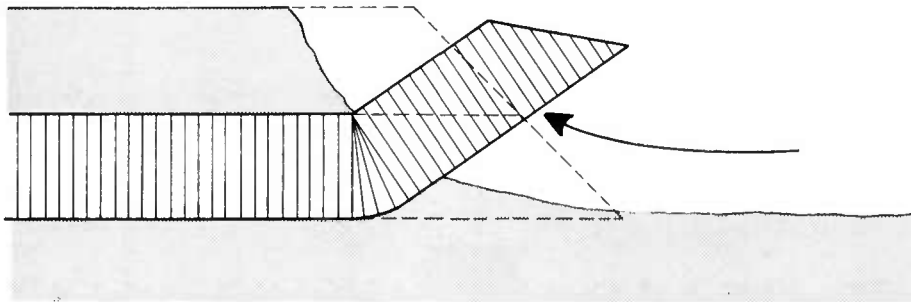


Figure 1.16. : Soulèvement important d'une extrémité en saillie d'un ouvrage hydraulique en charge



Figure 1.17. : Affouillement des remblais latéraux à la suite d'un soulèvement de l'extrémité au cours d'une crue

Sitôt qu'elles sont amorcées, ces déformations ont tendance à s'accroître rapidement par l'effet hydrodynamique du courant. Les désordres qui ont pu être observés dans de tels cas, et qui ont conduit à la mise hors service de l'ouvrage, sont parfois spectaculaires.

Si les extrémités des buses circulaires coupées en sifflet ou en biseau-sifflet suivant le plan contenant le talus sont semble-t-il moins sensibles à ces sous-pressions, pour les formes surbaissées par contre, le phénomène décrit ci-dessus peut s'amorcer sous la partie centrale du radier lorsque celui-ci présente une rigidité insuffisante et qu'il n'est pas ancré sur un mur ou sur un radier parafoille. Il est important de s'en rendre compte rapidement car, là également, le phénomène de soulèvement du radier peut s'accroître au cours d'une crue importante et conduire brutalement à la ruine de l'ouvrage (Cf. figure 1.17.).

1.4. Enfoncements, poinçonnements et dégradations locales des tôles

Les parois des buses métalliques peuvent présenter localement divers désordres, tels notamment des enfoncements, des poinçonnements de la tôle, des déchirures ou d'autres dégradations, dont les causes, très variées, relèvent principalement de l'exécution ou de l'exploitation de l'ouvrage. Il peut s'agir par exemple :

- de la circulation d'engins lourds de chantier sur la buse sans que celle-ci soit recouverte d'une hauteur de remblai suffisante (affaissement plus ou moins localisé de la voûte) ;
- d'un apport massif de terre contre la paroi de la buse durant la construction des remblais latéraux (aplatissements ou enfoncements locaux, ...) ;
- de chocs d'engins de chantier contre la paroi de la buse (enfoncements locaux, poinçonnements, boulons arrachés ou poinçonnant la tôle, ...) ;
- de la présence contre la paroi de la buse, à l'extérieur de celle-ci, de corps durs naturels ou rapportés (blocs rocheux, cales ou madriers oubliés, ...) ;
- de chocs de véhicules (dégradation des tôles ou de leur revêtement de protection, arrachage de boulons en saillie, ...), de blocs rocheux, ou de corps flottants (déformation ou déchirure locale de la tôle aux extrémités de l'ouvrage).



Figure 1.18. : Dégradation de la tôle et cisaillement des boulons par un véhicule circulant dans la buse



Figure 1.19. : Déformation de la tôle due à un engin de chantier (après déblaiement)

1.5. Corrosion - Dégradation des matériaux

La corrosion est la forme naturelle de vieillissement de l'acier. Pour les buses métalliques, elle se manifeste notamment lorsque la galvanisation et les revêtements de protection supplémentaire éventuels n'assurent plus efficacement leur rôle du fait de leur dégradation naturelle ou accidentelle.

Cette corrosion est généralement plus accentuée dans certaines parties d'ouvrage plus exposées aux agents agressifs ou à une abrasion (extrémités et partie inférieure des buses), et se trouve parfois anormalement aggravée par certaines causes dont les plus courantes sont notamment :

- la présence autour de la buse d'un matériau agressif vis-à-vis de l'acier,
- l'infiltration des eaux chargées de sels de déverglaçage vers la paroi de la buse,
- la circulation d'eaux agressives dans la buse (ouvrages hydrauliques), ou la présence de matières agressives liées à l'exploitation de l'ouvrage,
- l'insuffisance d'entretien de certains dispositifs ou revêtements de protection,
- très exceptionnellement, la présence de courants vagabonds.

Il est à noter par ailleurs que la corrosion concerne aussi bien la face interne de la buse que sa face externe, en contact avec les remblais. Une corrosion de cette dernière n'est toutefois généralement décelable depuis l'intérieur de la buse que lorsqu'elle a atteint une certaine importance (perçage des tôles, coulures de rouille aux joints, ...).

La dégradation des matériaux constitutifs affecte également les parties non métalliques des ouvrages, et notamment le béton ou les maçonneries des perrés, des ouvrages d'extrémité, des radiers éventuels ou des piédroits des arches. Elle peut affecter également les massifs de terre qui entourent la buse (matériaux évolutifs, entraînement des particules fines par des circulations d'eau, affouillements, ...).

D'une manière générale, la dégradation des matériaux est accélérée par l'action de l'eau et notamment, par l'abrasion due aux particules de sol qu'elle transporte (ouvrages hydrauliques).

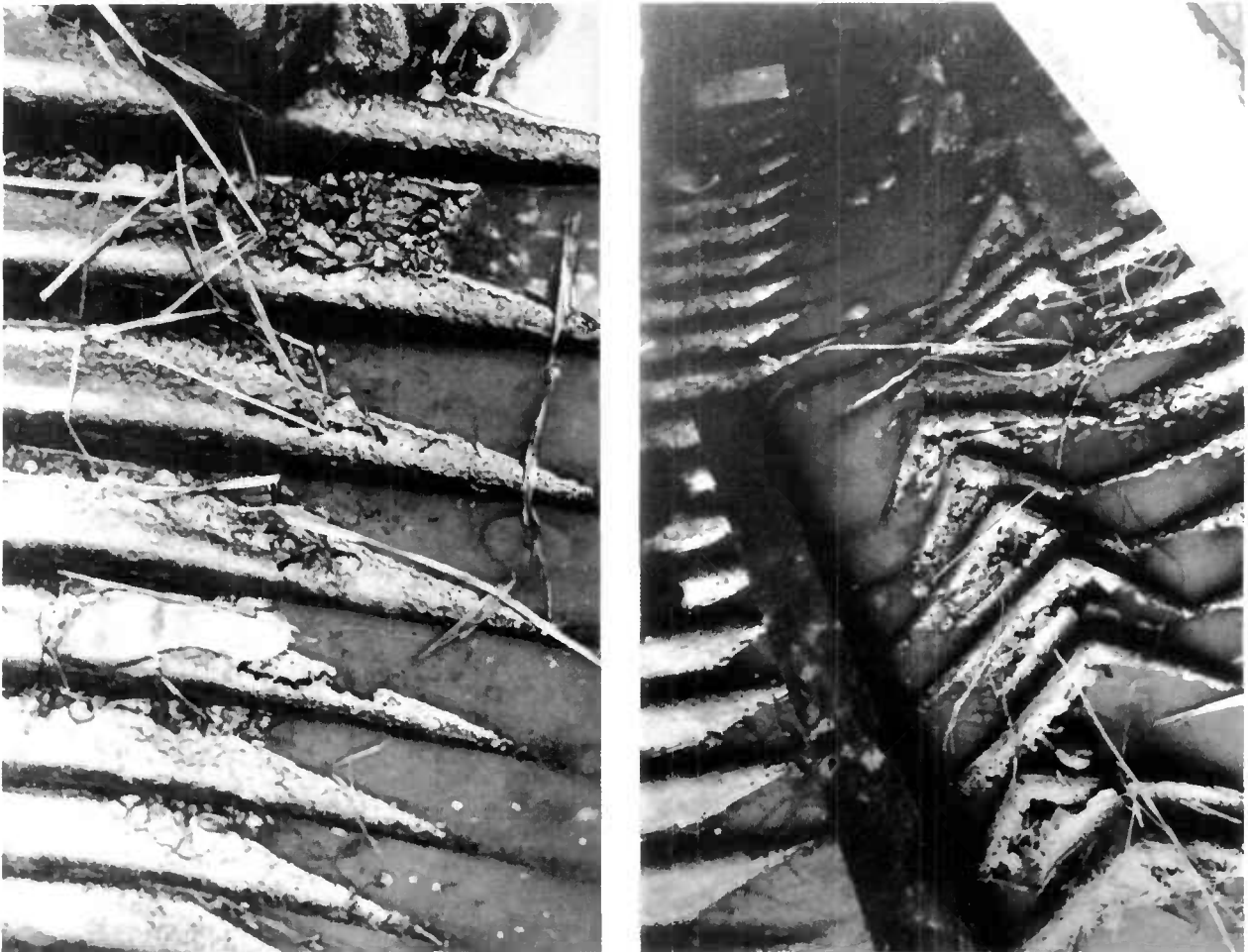


Figure 1.20. : Dégradations du radier d'une buse par corrosion

1.6. Autres désordres et autres causes

La liste des désordres et des principales causes susceptibles de les provoquer, présentée ci-dessus, n'est certes pas exhaustive. Ainsi par exemple, des mouvements de terrain dus à une instabilité naturelle du site d'implantation de l'ouvrage, ou l'accumulation de corps flottants ou d'une abondante végétation aux extrémités d'ouvrages hydrauliques peuvent être à l'origine de certains désordres.

D'autres causes sont plus directement dues à des interventions humaines inopportunes sur l'ouvrage lui-même, ou sur son site d'implantation (réparations mal conçues ou mal exécutées, ouverture d'une fouille ou d'une tranchée à proximité de la buse, mouvements de terrain importants mettant en cause la stabilité du site d'implantation de l'ouvrage, ...).

Il est à noter par ailleurs, que les désordres présentés ci-dessus ne concernent principalement que la paroi de la buse. Mais certains désordres, qui ne sont pas toujours spécifiques aux ouvrages constitués de buses métalliques, peuvent affecter également leurs ouvrages d'extrémité (détérioration de perrés, déformation ou fissuration de murs de soutènement, érosion de parafoilles, dégradation des matériaux constitutifs, ...) ou leur environnement immédiat (érosion des talus, affouillement du sol sous le radier d'ouvrages hydrauliques, ...) ; ils peuvent être aussi à l'origine d'une détérioration de la paroi de la buse.

Page laissée blanche intentionnellement

CHAPITRE 2

AUSCULTATION DES OUVRAGES - DIAGNOSTIC

Les investigations effectuées dans le cadre d'actions particulières de surveillance (essentiellement inspections détaillées périodiques ou exceptionnelles) ont pour objet de déceler les éventuels désordres qui peuvent affecter les ouvrages, ou les éventuelles anomalies de fonctionnement de ceux-ci, et d'essayer d'en déterminer les causes pour définir, s'il y a lieu, les opérations d'entretien ou de réparation à mettre en oeuvre, et les délais dans lesquels celles-ci devront être réalisées.

Comme l'illustre le chapitre précédent, les déformations des ouvrages (qui peuvent être accompagnées par d'autres désordres), et la corrosion des buses elles-mêmes, constituent les principaux désordres qui peuvent affecter ces ouvrages. Or si les moyens à mettre en oeuvre pour mesurer les déformations sont assez bien connus, il n'en est pas de même pour ceux que l'on peut employer pour apprécier l'état de corrosion de la buse. C'est la raison pour laquelle ces derniers sont plus largement présentés ci-après.

L'établissement d'un diagnostic à l'issue des investigations effectuées sur l'ouvrage peut, dans certains cas, ne pas présenter de difficultés particulières. Il s'agit généralement de situations extrêmes, soit lorsque, de toute évidence, l'ouvrage ne présente pas de désordres importants, soit, dans le cas contraire, lorsque les désordres constatés sont tels qu'ils ne laissent aucun doute sur la nécessité de réparer ou de remplacer l'ouvrage (inversion de courbure du radier d'une buse-arche par exemple, ou perforation très importante des tôles par corrosion). Dans les situations intermédiaires, il est souvent difficile d'apprécier la gravité des désordres constatés, si de simples travaux d'entretien peuvent s'avérer suffisants ou s'il est nécessaire de procéder à la réparation ou au remplacement de l'ouvrage et, dans ces derniers cas, les délais dans lesquels de telles opérations doivent être effectuées. Le but du paragraphe ci-après sur le diagnostic est de donner aux gestionnaires des ouvrages, dans ces cas particuliers, des éléments pour leur permettre de répondre à ces questions.

2.1. Auscultation des ouvrages - Appréciation de l'état de corrosion des buses

2.1.1. Mesure des déformations

Les mesures des déformations de la buse portent essentiellement sur les déformations du profil en long du radier, sur celles de certaines sections droites de celle-ci, et sur les sections d'extrémité lorsque ces extrémités ne sont pas liaisonnées à des dispositifs de raidissement efficaces.

D'une manière générale, et quel que soit le type d'ouvrage concerné, il est souhaitable de suivre régulièrement ces déformations, de manière fréquente pendant les premières années de service de l'ouvrage, et du moins tant que les déformations et tassements ne sont pas stabilisés, puis simplement dans le cadre des inspections détaillées périodiques ou d'une inspection détaillée exceptionnelle. Il est à noter à cet égard que si les déformations transversales de la buse (sections droites et sections d'extrémité) se poursuivent bien après l'achèvement des travaux, ou reprennent après quelques années de stabilisation, cela constituera bien souvent un signe précurseur de désordres graves. Par contre, la déformation du profil en long d'une buse est généralement directement liée au tassement général du remblai qui l'entoure, et qui peut se poursuivre sur plusieurs années lorsque celui-ci est construit sur un sol fin compressible.

Les moyens à mettre en œuvre pour mesurer ces déformations sont en principe simples et rustiques du fait que la précision recherchée est de l'ordre du centimètre pour les déformations longitudinales, et en général (buse de diamètre supérieur à 2 ou 3 m) de quelques millimètres pour les déformations transversales (utilisation d'un mètre ruban métallique, d'une perche graduée télescopique, d'un distancemètre à fil invar).



Figure 2.1. : Mesure de la portée à l'aide d'une perche graduée

Dans le cas général le nombre de sections de mesure, pour les déformations transversales, est d'environ une tous les vingt mètres, avec un minimum de trois, plus les sections d'extrémité (lorsqu'elles ne sont pas pourvues de dispositifs de raidissement efficaces). Le nombre de repères à prévoir, dans chaque section, et les grandeurs à mesurer, dépendent des caractéristiques de la buse (forme, dimensions transversales, ...). Il est nécessaire dans tous les cas de mesurer au moins la portée et la flèche. Pour les extrémités, et d'une manière générale pour les buses-arches de grandes dimensions, ces mesures peuvent être utilement complétées par celle de la portée à mi-hauteur de la voûte et, s'il y a lieu, par des mesures permettant de détecter un éventuel enfoncement des plaques de coin.

Les repères (généralement des têtes de boulons) doivent être correctement marqués.

Pour les buses de petites dimensions, dont l'accès peut être difficile, on se limitera à une simple appréciation visuelle des déformations transversales à partir des extrémités.

2.1.2. Appréciation de l'état de corrosion de la buse

La corrosion est une action chimique et électrique qui se produit en présence d'humidité. Il se forme plusieurs piles électrochimiques entre le métal et son environnement, qui provoquent une oxydation des parties métalliques. La vitesse d'oxydation est directement liée au débit du courant ainsi créé. La corrosion a toujours lieu dans les zones anodiques (sorties de courant) alors que les zones cathodiques sont protégées.

On distingue plusieurs formes de corrosion :

. **Corrosion par piqûres** : Elle se produit lorsqu'il se crée de petites surfaces anodiques proches de grandes surfaces cathodiques. Cette situation survient par exemple s'il y a un défaut ponctuel dans le revêtement ou dans la couche d'oxyde qui s'est éventuellement formée. Ce type de corrosion peut évoluer jusqu'à la perforation de la pièce.

. **Corrosion galvanique** : Elle survient lorsqu'on assemble deux métaux de potentiel électrochimique différent. Le métal caractérisé par le potentiel le plus négatif se consomme au profit de l'autre en le protégeant.

. **Corrosion atmosphérique** : L'élévation de la température, du degré d'humidité de l'air et les différentes formes de pollutions (présence d'anhydride sulfureux, de chlorures, de poussières, de bactéries, ...) contribuent à l'accélération du processus de corrosion.

. **Corrosion par aération différentielle** : Ce type de corrosion concerne les zones de marnage des ouvrages hydrauliques.

. **Corrosion par érosion ou abrasion** : L'érosion et l'abrasion sont des actions mécaniques de l'eau qui ne concernent que les ouvrages hydrauliques. Les eaux transportées peuvent être chargées en sable, graviers ou pierres qui usent par abrasion les revêtements protecteurs (galvanisation, système de peinture, film d'oxyde récemment créé par corrosion, ...), principalement au niveau du radier, et accélèrent ainsi le processus de corrosion.

La corrosion de buses métalliques est la forme naturelle de vieillissement de l'acier, essentiellement liée au milieu environnant (remblai, eaux, atmosphère ...). Le processus de corrosion ne peut être systématiquement évité. Il concerne aussi bien la face interne de l'ouvrage que la face externe en contact avec le remblai. Tout au plus peut-il être ralenti par les dispositifs de protection habituels (galvanisation des tôles et revêtements par peinture) et par un entretien régulier.

En règle générale, la corrosion des buses métalliques est une corrosion de type généralisé, même si elle peut être localement plus accentuée, que l'on peut donc traduire par une perte d'épaisseur moyenne d'acier. Toutefois, lorsque certaines zones peuvent être plus exposées que d'autres, comme cela est souvent le cas pour les ouvrages hydrauliques (radier, bandes le long de génératrices correspondant au fil d'eau ou aux zones de marnage par exemple), une perte d'épaisseur moyenne n'a de sens que si elle se rapporte à chacune de ces zones. En effet, on a déjà rencontré le cas d'un radier pratiquement déchiré le long d'une génératrice, c'est-à-dire d'un ouvrage en état de ruine, alors que le reste de la buse était pratiquement sain.

L'auscultation des buses doit permettre de localiser les zones corrodées, d'apprécier quantitativement pour chacune d'elles l'épaisseur d'acier résiduelle et d'évaluer l'état des revêtements de protection éventuels (adhérence au support, cohésion).

Les méthodes d'investigation qui peuvent être utilisées pour apprécier l'état de corrosion des buses sont les suivantes :

- . l'examen visuel,
- . la mesure d'épaisseur d'acier par ultra-sons,
- . le prélèvement d'échantillons de tôles,
- . la méthode électrique.

Le cas des buses de petites dimensions, qui bien souvent ne permettent ni l'accès à l'intérieur de la buse, ni la mise en oeuvre dans des conditions correctes de la plupart de ces méthodes, est traité en fin de paragraphe.

a) - Examen visuel

L'examen visuel ne peut généralement s'avérer suffisant que si l'ouvrage présente une corrosion si importante qu'elle ne laisse aucun doute sur le diagnostic (par exemple perçage généralisé des tôles le long d'un radier). Dans le cas contraire, il est le plus souvent insuffisant car il ne permet pas de se prononcer sur l'état de la face externe, ni de quantifier la perte d'épaisseur d'acier. Il est possible cependant d'examiner localement la face externe des buses, soit près des extrémités si l'on peut les dégarnir localement (avec prudence), soit en pratiquant de petites excavations à proximité des têtes de talus, si la hauteur du remblai de couverture est faible. L'examen de ces dernières zones est d'autant plus utile qu'il s'agit le plus souvent de zones privilégiées d'infiltration des eaux de ruissellement.

En tout état de cause, il apparaît que l'examen visuel des tôles n'est suffisant que lorsque le diagnostic est sûr et ne laisse aucun doute sur l'état de corrosion de la buse. S'il est nécessaire d'apprécier la perte moyenne d'épaisseur d'acier, il convient de recourir à d'autres moyens d'investigation (mesure par ultra-sons ou par prélèvement d'échantillons de tôles).

b) - Mesure par ultra-sons

*** Principe de la méthode et mise en oeuvre**

Cette méthode, basée sur la mesure des temps de propagation des ultra-sons dans l'épaisseur de la tôle testée, permet de mesurer directement celle-ci.

Le matériel nécessaire pour ce type d'investigation est relativement pratique et simple d'utilisation. Il se compose d'un boîtier portable (sur lequel s'affichent directement les mesures d'épaisseur) relié électriquement à un palpeur (Cf. Figure 2.2.). La surface (quelques centimètres carrés) sur laquelle est appliqué le palpeur est préalablement débarrassée des éventuels produits de corrosion, nettoyée puis enduite d'un produit destiné à assurer une bonne transmission entre la sonde et la surface (produit dit couplant). Le palpeur est ensuite déplacé sur cette surface, les épaisseurs étant directement lues sur l'écran du boîtier. Il est conseillé de retenir (memoriser dans l'appareil) la plus faible des valeurs mesurées qui est généralement la plus représentative.

Les différentes surfaces inspectées doivent être choisies judicieusement de manière à pouvoir détecter les zones susceptibles d'être les plus corrodées (en particulier, centre du radier, fil d'eau et zone de marnage pour les ouvrages hydrauliques, sommet des buses ...). En pratique, et compte tenu de la rapidité des mesures, il peut être effectué environ 1 mesure tous les mètres (ou au plus tous les deux mètres) le long de génératrices préalablement choisies.

Il est recommandé de synthétiser les mesures relevées dans un tableau du type de celui présenté figure 2.3., en l'accompagnant de schémas permettant le repérage des génératrices le long desquelles les mesures ont été effectuées, et de tous les commentaires utiles (localisation des zones de forte corrosion, particularités ou anomalies).

*** Avantages de la méthode**

C'est une méthode non destructive, ne nécessitant qu'un matériel léger et simple d'utilisation, qui permet en pratique l'auscultation d'un ouvrage en une journée au plus.

Elle permet la mesure de l'épaisseur d'acier résiduelle même si la face externe des tôles présente une corrosion feuilletante, l'écho renvoyé correspondant au premier feuillet.

Des contrôles effectués par comparaison des épaisseurs d'acier mesurées par cette méthode avec celles mesurées en laboratoire, sur des échantillons de tôles prélevés au droit des zones auscultées par ultra-sons, ont montré que cette méthode et le mode opératoire préconisé ci-dessus, paraissent assez fiables (Cf. figure 2.4.).



Figure 2.2. : Appareil de mesures aux ultra-sons

Lignes de mesures	1		2		3		4		5		6		ENSEMBLE	
Nombre de mesures (Tous les mètres environ)	64		60		57		57		59		63		360	
		%		%		%		%		%		%		%
$2,00 \leq e < 2,25$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1,6	1	0,3
$2,25 \leq e < 2,50$	2	3,1	0	0	0	0	0	0	0	0	8	12,7	10	2,8
$2,50 \leq e < 2,75$	15	23,4	2	3,3	8	14,0	10	17,5	13	22,0	14	22,2	62	17,2
$2,75 \leq e < 3,00$	26	40,6	46	76,7	20	35,1	28	49,1	45	76,3	33	52,4	198	55,0
$3,00 \leq e$	21	32,8	12	20,0	29	50,9	19	33,3	1	1,7	7	11,1	89	24,7
e mini	2,4		2,7		2,6		2,7		2,5		2,1		2,1	
e maxi	3,4		3,2		3,2		3,2		3,0		3,3		3,4	

e est donné en mm

Figure 2.3. : Exemple de présentation des résultats de mesures aux ultra-sons

Il est néanmoins souhaitable de procéder systématiquement à quelques contrôles par prélèvement d'échantillons de tôles (Cf. §. 2.4. ci-après) lorsque la méthode par ultra-sons est employée, surtout lorsqu'une forte corrosion est détectée.

A l'heure actuelle, seuls quelques Laboratoires des Ponts et Chaussées sont équipés du matériel et du personnel nécessaires à la mise en oeuvre de cette méthode, dont l'emploi devrait rapidement se généraliser.

Il est possible par ailleurs d'effectuer les mesures sous l'eau, sans qu'il soit nécessaire de mettre l'ouvrage à sec.

N° Prélèvement	Epaisseur Ultra-sons (mm)	Epaisseur réelle mesurée (mm)	Observation sur prélèvement
1	2,1	1,8 à 2,7	Oxydation interne Oxydation externe importante avec diminution d'épaisseur
2	2,4	1,8 à 2,4	d*
3	2,6	2,6	Pas d'Oxydation
4	2,6	2,2 à 2,5	Oxydation interne Oxydation externe avec légère diminution d'épaisseur
5	2,3	2,0 à 2,5	Oxydation interne Oxydation externe avec diminution d'épaisseur
6	2,9	3,0	R.A.S

Figure 2.4. : Comparaison des épaisseurs d'acier mesurées par ultra-sons avec celles mesurées en laboratoire sur des échantillons de tôle

*** Limites de la méthode**

Le caractère ponctuel des mesures nécessite, pour obtenir des résultats représentatifs de l'état de corrosion d'une buse, d'effectuer un très grand nombre de mesures (un point de mesure pour 1 à 2 m² environ). Par ailleurs, la mise en oeuvre de la méthode nécessite l'accès à l'intérieur de la buse (diamètre minimal 1,20 m environ).

c) - Prélèvements d'échantillons

*** Principe et mise en oeuvre**

Le principe est des plus simples puisqu'il consiste à déterminer directement l'épaisseur moyenne d'acier sur des échantillons de tôle prélevés sur la buse.

Les échantillons sont généralement constitués de rondelles de tôles, de 3 cm de diamètre environ, prélevés par exemple au moyen d'une perceuse équipée d'une scie "cloche" (Cf. figure 2.5.). Les trous ainsi créés doivent être rebouchés, par exemple au moyen de bouchons en plastique (Cf. figure 2.7.) ou par un mortier de ciment à prise rapide.



Figure 2.5. : Perceuse équipée d'une scie "cloche"



Figure 2.6. : Echantillon de tôles découpées

Les pastilles extraites sont lavées puis brossées de manière à enlever les produits de corrosion. S'il existe une peinture de protection, il est nécessaire également de la dissoudre. L'épaisseur moyenne d'acier d'un échantillon peut être obtenue soit en faisant la moyenne des valeurs mesurées, par exemple au palmer à pointes, en un certain nombre de points de celui-ci, soit par pesée si l'on peut mesurer avec une précision suffisante la surface de l'échantillon (environ 2 à 4 % près). Le nombre d'échantillons à prélever au cours d'une intervention peut varier de 2 à 3 au plus si l'ouvrage ne présente pas une corrosion anormale ou trop accentuée, à 5 ou 6 dans le cas contraire. Il peut dépendre aussi de l'importance de l'ouvrage.

*** Avantages de la méthode**

Les échantillons permettent l'examen visuel de l'état de la tôle (localement du moins) sur la face externe de la buse, la mise en évidence, s'il y a lieu, d'une protection particulière (revêtement bitumineux par exemple), et une appréciation fiable de l'épaisseur résiduelle moyenne d'acier. Il est possible également de procéder à des prélèvements du remblai au contact des pastilles (s'il ne comporte pas trop de gros granulats) pour en déterminer l'agressivité. En règle générale, on ne pourra toutefois extraire que d'assez faibles quantités de matériau.

Le prélèvement d'échantillons paraît surtout utile dans certains cas particuliers (corrosion accentuée des tôles, présomption d'une corrosion plus ou moins importante de la face externe de la buse, ...) pour valider les résultats de mesures obtenues par des méthodes non destructives (ultra-sons notamment), qui donnent une vision plus globale de l'état de corrosion de l'ouvrage.

*** Limites de la méthode**

Il s'agit d'une méthode destructive, assez onéreuse, et nécessairement limitée en nombre de points. Par ailleurs comme la méthode précédente, sa mise en oeuvre nécessite l'accès aux zones concernées, ce qui rend pratiquement impossible le prélèvement d'échantillons au coeur même des buses de petit diamètre (inférieur de 1,20 m à 1,40 m environ, suivant la longueur de la buse).

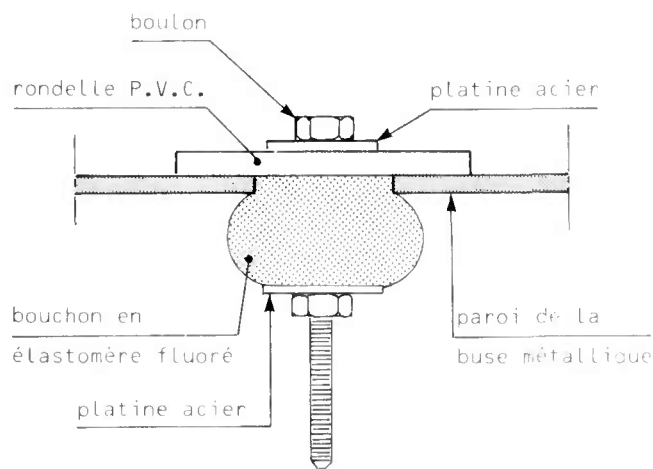


Figure 2.7. : Bouchon d'obturation des carottages sur buse métallique

d) - Méthode électrique

* Principe et mise en oeuvre de la méthode

Cette méthode est-elle largement employée pour détecter les zones corrodées dans certaines canalisations métalliques enterrées. Son emploi n'a été étendu à quelques buses métalliques que très récemment par la Société A.T.I. L'objectif recherché est de localiser les zones de corrosion (zones en contact avec le remblai uniquement), et d'apprécier la vitesse de corrosion dans chacune de ces zones (exprimée par un coefficient de corrosion). Dans ce but, on relie électriquement la buse à un système d'électrodes que l'on va déplacer, sur la voie portée, le long de plusieurs génératrices parallèles à l'axe de l'ouvrage (2, 3 ou plus, selon le diamètre de l'ouvrage) (Cf. figure 2.7.).

Dans son principe, la méthode consiste à mesurer la différence de potentiel entre la buse métallique et son environnement, en différents points de celui-ci, pour y détecter les zones en situation anodique (sortie de courant) qui traduisent une situation de corrosion. Par ailleurs, la détermination de l'intensité des courants peut permettre, à partir d'abaques établis expérimentalement, d'apprécier une vitesse de corrosion.

* Avantages de la méthode

Il s'agit d'une méthode non destructive, destinée à apprécier l'état de corrosion de la face externe des buses métalliques, en principe quelle que soit la hauteur des remblais de couverture. La méthode est perturbée lorsqu'il y a un revêtement de protection non conducteur, dans la mesure où des défauts de ce revêtement peuvent apparaître comme zones de corrosion.

Les parties non accessibles de la face interne de la buse (radier sous chaussée ou noyé) peuvent être également auscultées, s'il est possible de déplacer les capteurs à l'intérieur des buses.



Figure 2.8. : Electrode déplacée en surface dans le plan d'une génératrice de la buse

*** Limites de la méthode**

Si dans son principe cette méthode semble offrir des perspectives intéressantes, le peu de résultats comparatifs dont nous disposons actuellement avec des mesures fiables obtenues par la méthode ultra-sons et par prélèvement d'échantillons de tôles, sont peu probants et laissent planer une forte incertitude sur la fiabilité des résultats, surtout pour ce qui concerne les vitesses de corrosion.

Cela tient probablement, en partie du moins, au fait que, localement, le gradient de résistivité du sol peut varier largement. Par ailleurs il est à craindre que ces mesures correspondent à des vitesses instantanées, ce qui rend difficile toute extrapolation.

Les résultats qualitatifs sur la localisation des zones corrodées nécessitent eux aussi d'être complétés par d'autres investigations, d'autant qu'il ne paraît pas possible de situer les zones corrodées sur l'une ou l'autre des deux génératrices situées dans un même plan vertical, ou de distinguer un simple défaut de revêtement de protection d'une situation de corrosion effective.

Certes, les tests comparatifs méritent d'être poursuivis, mais en tout état de cause, il apparaît que pour l'heure cette méthode d'auscultation ne peut se suffire à elle seule. C'est la raison pour laquelle, la Société ATI complète aujourd'hui ces mesures par une auscultation par ultra-sons dans les zones de corrosion détectées. toutefois cette méthode employée seule peut présenter un intérêt certain pour des petits ouvrages, à l'intérieur desquels l'accès est impossible.

e) - Appréciation de l'agressivité des remblais

S'il est constaté une corrosion importante ou anormale de la buse, il peut être utile de procéder à des prélèvements du matériau de remblai au contact de celle-ci, si cela est possible (et de l'eau, s'il s'agit d'un ouvrage hydraulique) pour apprécier son degré d'agressivité vis-à-vis de l'acier. En effet, une bonne connaissance de celui-ci peut être aussi utile pour l'établissement du diagnostic que pour le choix d'une solution de renforcement.

Toutefois, l'expérience montre que les caractéristiques physico-chimiques des sols, notamment la teneur en chlorure des remblais, peuvent largement évoluer dans le temps : augmenter temporairement mais de manière importante lors du salage de la chaussée, par exemple, et revenir ensuite à des valeurs à peu près normales par lavage.

Ce phénomène d'absorption/désorption des chlorures permet d'expliquer, dans certains cas, l'absence de corrélation entre les résultats des analyses du matériau de remblai et la corrosion anormale affectant les ouvrages.

Certains paramètres simples permettent de caractériser le degré d'agressivité d'un sol envers les métaux qui se trouvent à son contact (Cf. § 5.2.2. des Recommandations et Norme NFA 05-252 - Corrosion par les sols - Aciers galvanisés ou non mis en contact de matériaux naturels de remblai). Ce sont essentiellement :

- sa résistivité,
- son pH,
- sa teneur en sels solubles.

. La résistivité :

Le matériau de remblai est considéré comme peu agressif selon ce critère si la valeur de sa résistivité est supérieure à :

- . 1000 ohm - centimètre pour les ouvrages hors d'eau ;
- . 3000 ohm - centimètre pour les ouvrages immergés.

La résistivité est déterminée à 20°C sur un échantillon de sol saturé (Cf. le mode opératoire en annexe A de la norme A 05-252) ou, à défaut, sur l'eau du site extraite du remblai.

. L'activité en ions hydrogène ou "pH" :

Le matériau de remblai est considéré comme peu agressif si la valeur du pH (potentiel Hydrogène) est comprise entre 5 et 10. Cette valeur est mesurée conformément à la norme NFT 01 013 dans l'eau extraite du mélange sol-eau dans les conditions de mode opératoire décrit dans l'annexe B de la norme A 05-252.

. La teneur en sels solubles :

Elle n'est déterminée en principe que pour les matériaux de remblai naturel dont la résistivité est inférieure à 5000 ohm-cm et pour les matériaux de remblai d'origine industrielle.

La concentration en chlorure (Cl⁻) est mesurée selon la norme NFT 90 110 et la concentration en sulfate (SO₄²⁻) selon la norme NFT 90 009 dans l'eau extraite selon le mode opératoire présenté en annexe B de la norme A 05-252.

Le matériau de remblai est considéré comme peu agressif si :

- Pour un ouvrage hors d'eau (Cl⁻) < 200 mg/kg
- (SO₄²⁻) < 1000 mg/kg
- Pour un ouvrage en eau douce (Cl⁻) < 100 mg/kg
- (SO₄²⁻) < 500 mg/kg

f) - Cas des petits ouvrages

D'une manière générale, les méthodes qui permettent d'apprécier quantitativement l'importance de la corrosion des buses (méthode des ultra-sons et prélèvement d'échantillons de tôle) ne peuvent être employées à l'intérieur de buses dont l'accès est difficile ou impossible, comme cela est le cas en particulier lorsque leur diamètre est trop faible (inférieur à 1,20 m environ). Il s'agit le plus souvent d'ouvrages de drainage de plate-formes routières ou autoroutières.

Toutefois, ces méthodes peuvent être mises en oeuvre aux extrémités de ces ouvrages, le plus souvent accessibles, et dont l'état de corrosion est généralement assez représentatif (légèrement par excès parfois) de celui de l'intérieur même des buses. Si celles-ci sont faiblement enterrées, d'autres parties peuvent être examinées de l'extérieur, à partir de petites fouilles.

Ces résultats peuvent être utilement complétés, par exemple pour les ouvrages de grande longueur, par ceux obtenus par la méthode électrique et/ou par l'analyse de l'agressivité des remblais et des eaux.

Par ailleurs, lorsque plusieurs ouvrages ont été réalisés simultanément, dans les mêmes conditions, et qu'ils sont soumis aux mêmes conditions d'exploitation, il est possible de tenter de recouper les informations obtenues sur quelques buses qui ont pu être correctement auscultées avec celles, généralement moins nombreuses et plus limitées, obtenues par une auscultation plus légère des buses les moins accessibles.

2.2. Diagnostic

Le diagnostic établi à l'issue des investigations effectuées sur l'ouvrage doit permettre de définir, s'il y a lieu, les opérations particulières d'entretien ou de réparation à mettre en oeuvre, les délais dans lesquels les travaux doivent être réalisés et voire même, dans certains cas, si l'état de l'ouvrage est précaire, les mesures conservatoires qu'il y aurait lieu de prendre (mise sous haute surveillance de l'ouvrage, renforcement local ou étaieement de la buse, restriction de la circulation ...).

Les investigations doivent renseigner sur la nature des désordres, leur localisation, leur intensité s'il y a lieu, et si possible sur les causes qui en sont à l'origine. L'appréciation de la gravité des désordres constatés, eu égard à la stabilité de la structure, ou d'une partie de celle-ci, dépend certes de ces différents facteurs, mais également de l'évolution récente de ces désordres.

D'une manière générale, il sera donc nécessaire aussi de bien connaître l'ouvrage (constitution, conception, dispositions de construction, conditions de justification, conditions de construction et problèmes rencontrés, ...), les modifications éventuelles survenues depuis sa construction, ses conditions d'exploitation ou son fonctionnement s'il s'agit d'un ouvrage hydraulique, et les résultats des investigations antérieures qui permettent notamment de renseigner sur l'évolution des désordres.

Dans de nombreux cas, pour des ouvrages anciens, l'absence de dossier d'ouvrage, ou l'insuffisance de celui-ci, nécessitera de chercher à reconstituer certains de ces éléments. En particulier, il sera souvent nécessaire de procéder à un recalcul de l'ouvrage et à l'examen de certaines dispositions de construction adoptées, en regard de celles préconisées actuellement (par exemple pour ce qui concerne la stabilité des extrémités). On pourra utilement se reporter pour cela au document de Recommandations sur les buses métalliques.

Il n'est pas possible d'établir une liste des situations qui peuvent être rencontrées, compte tenu de leur très grande variété. Aussi, les informations données ci-après pour aider à établir un diagnostic ne concernent que les principaux types de désordres qu'il est possible de constater sur une buse métallique. Il y aura lieu toutefois de tenir compte aussi de l'importance des désordres qui peuvent les accompagner, ou de la concomitance de certains désordres, qui ne peuvent généralement qu'accentuer le caractère de gravité vis-à-vis de la stabilité de la structure ou d'une partie de celle-ci.

Il est à noter enfin que la gravité des désordres est à apprécier également en fonction de leurs conséquences sur le fonctionnement de l'ouvrage (cas des ouvrages hydrauliques) ou sur son exploitation (perte de profil en long, stagnations d'eau, formation de verglas, perte de gabarit, ...), et des conséquences d'une défaillance éventuelle de l'ouvrage ou d'une partie de celui-ci. Ainsi par exemple, les conséquences d'une défaillance de la structure peuvent être beaucoup plus graves pour un ouvrage hydraulique, surtout si cette défaillance survient au cours d'une crue importante, que pour un passage à gibier. Par ailleurs, elles sont généralement d'autant plus graves pour la voie portée, que les dimensions transversales de la buse sont importantes et que la hauteur de remblai à la clé est faible. Pour des désordres reconnus graves ou assez graves, ces facteurs permettent également d'apprécier le caractère plus ou moins urgent des travaux de confortement auxquels il sera nécessaire de procéder et, s'il y a lieu, les mesures conservatoires qu'il conviendrait de prendre.

2.2.1. Déformations du corps de la buse

Les buses métalliques sont des structures souples dont le fonctionnement même impose généralement une certaine **déformation transversale** (le plus souvent un aplatissement). Celle-ci se traduit par une variation de la flèche et/ou de la portée dont l'amplitude peut atteindre jusqu'à 3 % environ, dans des conditions normales de fonctionnement. Toutefois, ces déformations doivent rapidement se stabiliser après mise en oeuvre du remblai.

Des déformations de plus grande amplitude, bien qu'elles aient un caractère anormal, ne sont pas nécessairement graves vis-à-vis de la stabilité de la buse si elles sont tout-à-fait stabilisées et qu'elles ne s'accompagnent pas de désordres importants tels qu'une perte de courbure (et à fortiori, une inversion de courbure des tôles) ou une fissuration importante des tôles au droit des trous de passage des boulons.

Il est à noter à cet égard que l'on peut tenter de limiter l'extension de telles fissures, généralement liées à la qualité de l'acier employé et/ou à une forte raideur des tôles, en procédant au perçage de la tôle à l'extrémité de ces fissures (ce qui toutefois ne saurait être considéré comme une réparation !). Dans tous les cas, il y aura lieu cependant de renforcer la surveillance de l'ouvrage, par exemple en procédant régulièrement à la mesure des déformations transversales, dans les sections les plus significatives.

Lorsque les déformations atteignent des valeurs très élevées, de l'ordre de 15 % et plus, il y aura lieu généralement de considérer que l'ouvrage est en état précaire. En effet, bien que l'expérience puisse montrer que les buses sont parfois capables de tolérer des déformations très importantes, voire spectaculaires, leur équilibre n'est

alors assuré que par un transfert des charges sur le sol environnant, transfert de charges dont la pérennité est tout-à-fait aléatoire. Il est assez fréquent d'ailleurs que ces déformations soient évolutives et qu'elles s'accompagnent d'autres désordres, comme l'inversion de courbure du radier pour des buses-arches.

Dans de telles situations, il y aura lieu de procéder au "remplacement" de l'ouvrage dans les plus brefs délais et, si une défaillance de celui-ci est jugée grave, de prendre certaines mesures conservatoires telles que sa mise sous haute surveillance, son renforcement provisoire - par exemple par étaieage, remplissage ou chemisage - ou une restriction de la circulation.

Les déformations longitudinales d'une buse, même si elles sont très importantes, mettent rarement en cause la stabilité de celle-ci, sauf si elles sont brutales (instabilité du talus par exemple) et provoquent le cisaillement de la buse. Dans tous les cas cependant, elles constituent une gêne plus ou moins importante au fonctionnement hydraulique de l'ouvrage (s'il s'agit d'un ouvrage hydraulique) ou à son exploitation.

2.2.2. Extrémités des ouvrages

Les principaux désordres qui peuvent affecter les extrémités des ouvrages, comme cela est illustré dans le chapitre 1, sont des déformations en ogive ou en forme de poire de celles-ci, et le soulèvement du radier. Ces désordres, qui concernent souvent des buses-arches d'assez grandes dimensions ne comportant pas d'ouvrages d'extrémités (perrés de raidissement, parafouilles assurant le lestage du radier, ...), sont toujours inquiétants, vis-à-vis de la stabilité de l'extrémité concernée, lorsqu'ils sont accentués (perte totale de courbure ou déformation en forme de poire, battement du radier durant les crues, ...) ou qu'ils continuent d'évoluer.

Il est conseillé dans ces cas de faire procéder assez rapidement à des travaux de renforcement (exécution d'un perré de raidissement, lestage du radier, ...). Généralement il ne sera pas justifié de procéder à un renforcement provisoire, dans la mesure où le coût et les délais de réalisation de celui-ci sont souvent du même ordre de grandeur que pour le renforcement définitif. Par contre il sera nécessaire de renforcer la surveillance (au moins la surveillance continue) dans l'attente de la réalisation des travaux.

Il est à noter que la nécessité de procéder au renforcement des extrémités d'une buse ne se pose pas uniquement lorsque celles-ci sont affectées par des désordres graves. Il est conseillé en effet d'envisager un tel renforcement (Cf. §. 3.2.1.) dès lors que les dispositions de construction préconisées dans les Recommandations (Cf. §. 3.2.3. et 3.3.4. du document) n'auraient pas été respectées au moment de la construction de l'ouvrage.

2.2.3. Corrosion

La corrosion est une forme de dégradation naturelle d'une buse métallique, qui peut être plus ou moins rapide suivant l'état des revêtements de protection de l'acier et l'agressivité du milieu environnant. Contrairement à la corrosion par piqûre constatée sur les métaux passivables, la corrosion des buses est une corrosion de "surface" dite de type généralisé.

L'importance du phénomène de corrosion sur un ouvrage peut être appréciée essentiellement en fonction :

- . de la répartition de celle-ci sur la buse ;
- . de la perte d'épaisseur moyenne d'acier ;
- . de l'évolution du phénomène.

Bien qu'il s'agisse d'une corrosion de type généralisé, celle-ci peut être plus accentuée localement, et se traduire ponctuellement par une perte d'épaisseur importante, voire même par un perçage de la tôle au milieu d'une zone pratiquement saine ou très peu corrodée. La résistance mécanique de la buse en est généralement peu affectée lorsque cette corrosion est répartie à la surface de celle-ci. Cette résistance mécanique peut être bien plus sensiblement affectée lorsque la corrosion est concentrée dans certaines zones particulières, et notamment sur une bande de part et d'autre d'une génératrice de la buse. Cela est généralement le cas des ouvrages hydrauliques, pour lesquels la corrosion est souvent beaucoup plus accentuée sur le radier, au centre de celui-ci, ou le long de bandes correspondant à la zone de marnage ou au fil d'eau. Dans ces cas, l'appréciation d'une perte d'épaisseur moyenne d'acier par corrosion n'a donc de sens, rappelons-le, que si elle se rapporte à une zone bien définie.

Cette perte d'épaisseur moyenne traduit l'importance du phénomène de corrosion. Toutefois, s'il existe une relation entre perte d'épaisseur moyenne (par exemple le long d'une génératrice ou d'une partie de celle-ci) et perte de résistance de la tôle, celle-ci n'est pas linéaire (et dépend probablement de l'épaisseur initiale de la tôle). En effet, l'expérience montre qu'une buse peut présenter des désordres très importants (déchirure presque continue de la tôle le long de la génératrice ou d'une partie de celle-ci) alors que la perte d'épaisseur moyenne dans la zone concernée n'atteint que 30 à 40 % au plus de l'épaisseur initiale de la tôle. Aucune donnée ne permet actuellement de quantifier cette relation entre perte moyenne d'épaisseur et perte de résistance, de telle sorte que l'appréciation de la gravité d'un état de corrosion reste assez subjective. Ainsi, on pourra considérer que la résistance mécanique de la buse n'est pas sensiblement affectée si la perte moyenne d'épaisseur n'excède pas environ 10 à 15 % de l'épaisseur initiale de la tôle, que cette résistance mécanique est sérieusement affectée dès lors que cette valeur atteint 25 à 30%, et qu'au-delà l'ouvrage peut être pratiquement en état de ruine, si l'examen visuel le confirme.

Il sera généralement impossible d'apprécier l'évolution récente du phénomène de corrosion, c'est-à-dire la vitesse moyenne de corrosion actuelle, dans la mesure où le plus souvent ce phénomène, ou du moins son aspect quantitatif, n'aura pas fait l'objet d'un suivi. Aussi devra-t-on se contenter d'une estimation d'une vitesse moyenne de corrosion (exprimée en perte moyenne d'épaisseur par an) calculée depuis la construction de l'ouvrage.

A titre indicatif, on peut admettre que dans un environnement peu agressif, la perte moyenne d'épaisseur par corrosion, sur une assez longue période, peut être estimée à quelques centièmes (2 à 4 au plus) de millimètre par an (pour les deux faces). Une valeur plus élevée de cette perte moyenne d'épaisseur peut donc traduire une plus grande agressivité du milieu, ou une évolution récente de celui-ci (qui pourra être confirmée par les analyses effectuées sur les prélèvements d'eau et de sol), ou encore une action mécanique de l'eau (érosion ou abrasion), s'il s'agit d'un ouvrage hydraulique.

Le diagnostic établi sur l'état de corrosion de l'ouvrage pourra consister à le classer, **dans sa totalité ou par parties**, dans l'une des trois catégories ci-après.

. Ouvrage sain ou pratiquement sain, ce qui n'exclut pas naturellement qu'il soit nécessaire de procéder à certains travaux d'entretien (réfection des dispositifs de collecte et d'évacuation d'eaux agressives en provenance des voies portées ou franchies, réfection d'un revêtement de protection, ...).

. Ouvrage (ou partie d'ouvrage) en état de ruine (en principe confirmé par l'examen visuel), pour lequel il sera généralement nécessaire de procéder rapidement à des travaux de renforcement ou à son remplacement et, dans l'attente de la réalisation de ces travaux, de prendre certaines mesures conservatoires (dont la nature dépendra de la gravité de la situation). Ces travaux peuvent concerner tout ou partie (radier seul par exemple) de l'ouvrage. Les solutions à préconiser dépendront notamment de l'agressivité de l'environnement.

. Ouvrage (ou partie d'ouvrage) en situation intermédiaire pour lequel on pourra envisager par exemple, si les dégradations sont jugées tolérables, soit de tenter de le "récupérer", en procédant rapidement aux travaux qui s'imposent (par exemple réfection des revêtements de protection ou réalisation d'un radier de protection si la corrosion est interne, protection cathodique de l'ouvrage si la corrosion est externe,...), si ces derniers peuvent être réalisés dans des conditions économiques acceptables, soit dans le cas contraire, de le laisser en l'état, en renforçant sa surveillance pour procéder ultérieurement à son renforcement général ou à son remplacement.

CHAPITRE 3

ENTRETIEN SPECIALISE

RENFORCEMENT OU REMPLACEMENT D'OUVRAGES

EXEMPLES

Ce chapitre, illustré par quelques exemples de réalisations, présente les principaux travaux d'entretien spécialisé ou de renforcement qu'il est possible de réaliser sur des ouvrages constitués de buses métalliques, ainsi que quelques solutions de remplacement parmi les plus courantes. Il ne concerne pas les ouvrages particuliers qui peuvent leur être associés (murs de tête ou piédroits en béton armé par exemple), et dont l'entretien et la réparation relèvent de techniques ou de procédés qui leur sont propres.

Dans tous les cas, et plus particulièrement lorsqu'il s'agit de renforcer une buse, il est indispensable de bien s'assurer que les dispositions prévues sont réellement efficaces et adaptées au problème posé, et qu'il ne s'agit pas de faux remèdes qui peuvent même parfois davantage porter préjudice à l'ouvrage que le conforter. En particulier, il convient de s'attacher en priorité à bien déterminer les causes qui sont à l'origine des désordres constatés et, si nécessaire, à les supprimer. S'il s'avère impossible d'agir sur celles-ci, le projet de confortement devra être adapté à ces conditions d'environnement et, s'il y a lieu, à leur évolution prévisible.

D'une manière générale, une opération de réparation ou de renforcement, ou même d'entretien spécialisé, est toujours assez délicate à réaliser. Elle doit être parfaitement définie avant travaux et ne pas souffrir d'improvisations tardives qui se traduisent, le plus souvent, par des défauts de qualité ou un allongement des délais de réalisation. Il convient donc de porter le plus grand soin à sa préparation, à son exécution, à la surveillance, et au contrôle des travaux. Il faut souligner par ailleurs que, sauf cas de force majeure, il faut éviter de recourir à l'étaillage provisoire trop prolongé ou définitif d'une buse, surtout lorsque les déformations ne sont pas stabilisées. En effet, un étaillage est une construction rigide dont la présence perturbe complètement le fonctionnement d'un ouvrage flexible et qui ne peut qu'accroître, à terme, les désordres sur la paroi de la buse. En tout état de cause, il doit être conçu et calculé pour supporter seul les sollicitations auxquelles il serait soumis si la buse n'existait pas.

3.1. Entretien spécialisé

Les travaux d'entretien spécialisé concernent principalement la réfection ou la mise en place d'une protection pour la buse elle-même ou pour ses abords immédiats (protection contre l'érosion ou l'affouillement des remblais ou du sol de fondation par mise en place ou réfection d'enrochements, de gabions, de perrés, ...).

Ceux présentés ci-après ne concernent que la buse elle-même. Il s'agit essentiellement de la réfection ou de la mise en place d'un revêtement ou d'un radier de protection sur la paroi interne de la buse, ou d'une protection cathodique s'il s'agit de protéger contre la corrosion la paroi externe de celle-ci.

Rappelons que les buses métalliques sont en tôle en acier au carbone, généralement de nuance E. 24.2. suivant nouvelles normes. A quelques très rares exceptions près (quelques buses ARMCO mises en place en 1985 et protégées par un revêtement époxy poudre mis en place par pulvérisation et cuisson, reconnaissables par leur couleur rouge), les tôles sont protégées par un revêtement de galvanisation obtenu au trempé ou en continu. Cette protection est parfois renforcée sur une ou deux faces par un revêtement non métallique qui peut être soit une peinture, soit un produit à base de brai de houille ou de bitume de pétrole (brai traditionnel, brai-époxy, brai vinylique, brai-époxy-polyuréthane, ...).

3.1.1. Mise en place ou réfection d'un revêtement de protection

Si la corrosion affecte seulement la partie interne des tôles, il est possible d'envisager une réfection de la protection anti-corrosion. Dans ce cas, les protections passives du type barrière (peintures ...) ou sacrificielles (revêtement métallique, peintures avec pigments anti-corrosion sacrificiels ...) sont bien adaptées.

La qualité et par suite, l'efficacité du revêtement de protection dépendent du soin apporté à la préparation de surface, du choix du type de revêtement, de son épaisseur, de sa mise en oeuvre, et du niveau de contrôle exercé.

L'entretien de la protection anti-corrosion concerne en majorité des ouvrages en acier simplement galvanisé ou en acier galvanisé peint. Par conséquent, le revêtement d'une buse dégradée est constitué dans le cas général :

- d'anciennes peintures en bon état ;
- d'anciennes peintures décollées ou en train de se décoller et laissant apparaître la galvanisation en bon état ;
- de la galvanisation détruite avec apparition de la corrosion.

La réfection de la protection anti-corrosion consiste à :

- préparer la surface ;
- reprendre les dégradations de la galvanisation ;
- appliquer les nouvelles peintures ;
- contrôler les travaux.

Dans tous les cas, s'il s'agit d'un ouvrage hydraulique, il sera indispensable au préalable de procéder à sa mise à sec et à son nettoyage (enlèvement des vases, boues, etc ...).

a) - La préparation de surface

Une bonne préparation de surface est conditionnée d'une part par la qualité du décapage et d'autre part, par le soin apporté au nettoyage du support.

L'ouvrage doit être au préalable lessivé et brossé de façon à éliminer les sels de zinc et toutes sortes de dépôts. Les anciennes peintures mal adhérentes sont ensuite supprimées, les surfaces saines avivées par dérochage à l'abrasif fin et la rouille éliminée par décapage mécanique à l'abrasif. Le décapage par abrasif est la seule technique envisageable pour une mise à nu complète de l'acier ou pour un décapage partiel qui consiste à enlever les vieilles peintures mal adhérentes, à aviver les surfaces saines en créant une micro rugosité dans les anciens films et à mettre à nu localement les zones oxydées. Les modalités de projection (vitesse, pression, angle, ...) et le type d'abrasif (forme, granulométrie, dureté ...) sont les paramètres essentiels de la réussite d'un décapage. A l'issue du décapage, il est alors indispensable d'éliminer tous les résidus de l'opération pour obtenir une surface dépourvue de toute poussière et trace d'humidité qui gêneraient la bonne adhérence du système de peinture.

. La propreté de la surface est évaluée visuellement par rapport à l'échelle de degrés de soin (DS) disponible à l'Office National d'Homologation des garanties de Peintures Industrielles (28, Avenue du Maréchal Foch - 92260 FONTENAY-AUX-ROSES), ou par rapport aux clichés (SA) de la norme 150 8501.1 - ces deux échelles ont des clichés identiques.

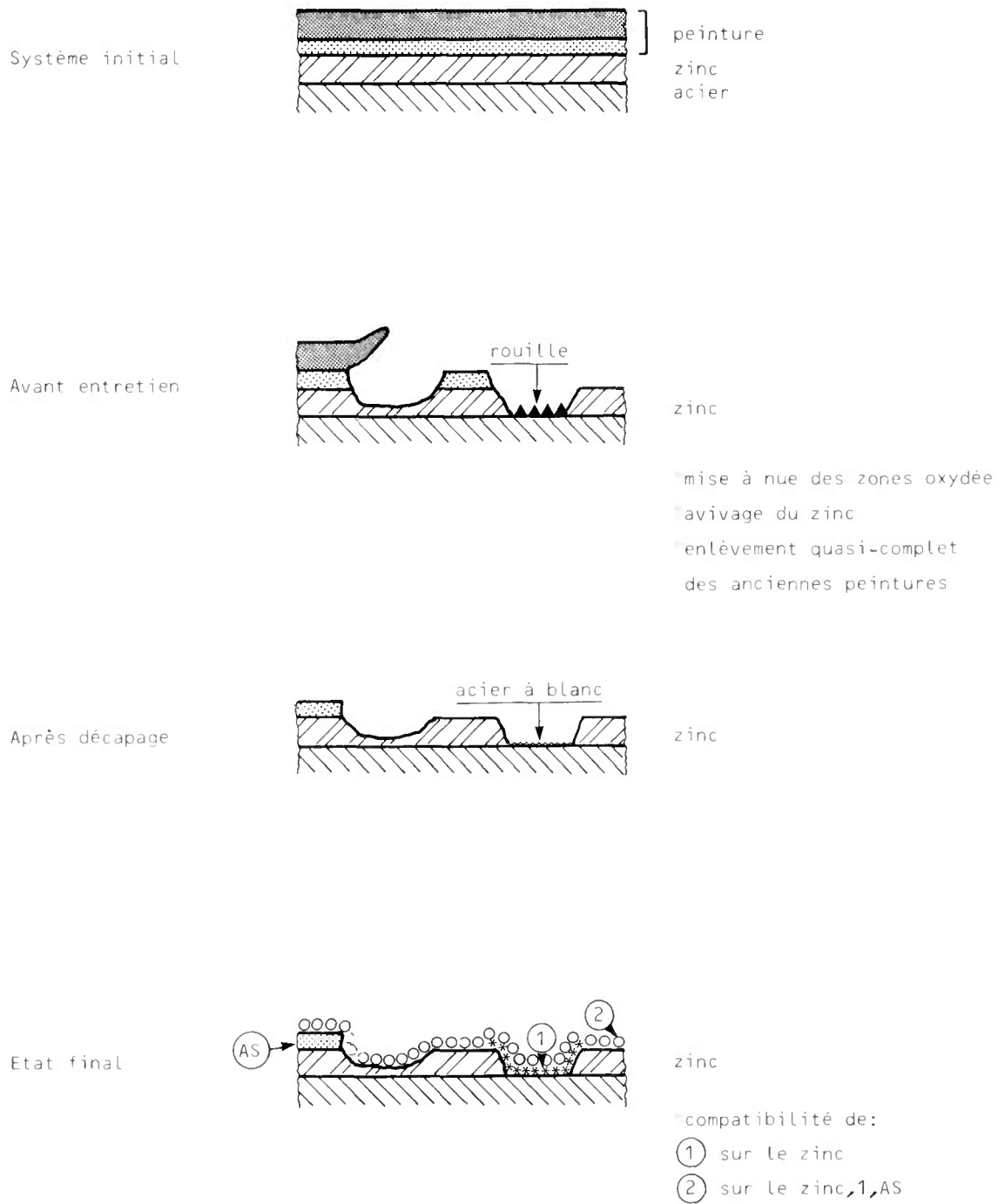


Figure 3.1. : Différentes étapes de la réfection de l'acier galvanisé peint

. La rugosité est soit évaluée de façon visuelle et tactile par rapport au rugotest n° 3LCA/CEA (échelle N 108b), soit mesurée au moyen de rugosimètre (mesure de Ra ou Re).

Par ailleurs, si l'on choisit de décapé seulement certaines zones, il est alors essentiel de protéger les parties non traitées lors du décapage.

b) - Le revêtement

Après avoir décapé les tôles, on obtient des zones où l'acier est "à blanc", des zones recouvertes de zinc et des zones où subsistent encore des couches de l'ancien système de peinture.

Un revêtement anti-corrosion est une superposition de plusieurs couches de peinture identiques ou non, mais présentant des compatibilités chimiques entre elles et avec l'ancien fond. Chaque couche a une fonction spécifique :

- la couche primaire, de par sa composition (riche en zinc ou en pigments inhibiteurs de corrosion), protège le métal de la corrosion ;
- la couche intermédiaire, assez épaisse, assure l'étanchéité du système ;
- la couche de finition renforce l'étanchéité du système et peut avoir une fonction esthétique.

Si l'ouvrage n'est pas entièrement décapé à blanc, il restera localement de la galvanisation ; par conséquent, il sera nécessaire de prévoir soit un traitement de surface (dérochage) de celle-ci soit une couche de liaison (primaire). Le primaire à utiliser est alors choisi en fonction de sa compatibilité avec le zinc et les éventuelles couches de peintures restantes. Ce primaire peut par ailleurs être disposé seulement au droit des zones mises à nu. Le choix de la couche intermédiaire et de la couche de finition se fera d'une part en fonction de leur compatibilité avec le primaire déjà mis en place, le zinc et les résidus de l'ancien système et, d'autre part, en fonction de l'agressivité de l'ambiance.

Pour être efficace, le revêtement anti-corrosion doit présenter les caractéristiques suivantes :

- une bonne adhérence ;
- une excellente résistance à l'abrasion ;
- de bonnes performances en traction et en flexion ;
- une tenue aux cycles thermiques convenable ;
- une épaisseur suffisante ;
- une absence de sensibilité aux micro-organismes.

Les produits noirs de qualité (brai-époxy, brai-vinylique, ...) semblent bien adaptés pour protéger de la corrosion les buses métalliques. Ils constituent grâce à leur épaisseur une véritable barrière étanche. En général, ils sont appliqués en deux (ou trois) couches de 100 micromètres chacune directement sur l'acier décapé ou sur un primaire riche en zinc qui permet ainsi, en cas de blessure du film de brai-époxy, de disposer d'une bonne protection anti-corrosion. D'autres produits peuvent être utilisés comme les "époxy modifiés" qui tolèrent une préparation de surface moins rigoureuse. Dans tous les cas, on recherchera des produits applicables en couches épaisses de 150 micromètres environ.

c) - Le contrôle

Le contrôle concerne la préparation de surface et l'application des produits.

Les essais préalables de décapage permettent de déterminer les capacités du matériel et de l'abrasif choisis pour obtenir un degré de soin donné, une rugosité et une efficacité suffisantes pour enlever les éventuelles couches mal adhérentes de l'ancien système de peintures.

Les essais de convenance se pratiquent au début des travaux avec le matériel et le personnel retenus pour le chantier. Pour le décapage, le contrôle est axé sur la conformité de l'abrasif, sur la propreté escomptée, le degré de rugosité des surfaces et le délai entre la préparation et l'application de la première couche. Pour l'application, le contrôle porte essentiellement sur la conformité des produits, les conditions de température et d'hygrométrie, les délais entre couches, les aspects du revêtement (adhérence, cloquage, bullage, coulure, etc ...) et les mesures d'épaisseur. Les méthodes utilisées pour le contrôle des épaisseurs sont décrites dans la norme NFT 30-124.

Il est recommandé que ces contrôles soient réalisés par l'entreprise dans le cadre du contrôle interne et par le Maître d'Ouvrage ou son représentant pour le contrôle extérieur.

NOTA :

Il existe d'autres produits ou d'autres procédés que ceux décrits ci-dessus, qui restent pratiquement pour l'heure les seuls employés ; il importe dans tous les cas, lorsque de tels produits ou procédés sont proposés, de s'assurer de leur bonne adaptation au cas à traiter et des conditions de mise en oeuvre requises, en s'appuyant notamment sur les références présentées et en s'assurant, si nécessaire, l'assistance de personnes compétentes au sein du réseau des laboratoires.

Ainsi par exemple, le procédé décrit au paragraphe 3.3.1.6., qui consiste à "plaquer" contre la paroi de la buse une gaine en matériau synthétique, s'il peut être envisagé pour assurer la protection de la paroi interne de la buse contre des phénomènes d'abrasion, ne peut en aucun cas constituer une protection efficace contre la corrosion, en raison d'une absence totale d'adhérence de la gaine à cette paroi.

3.1.2. Mise en place d'un radier de protection

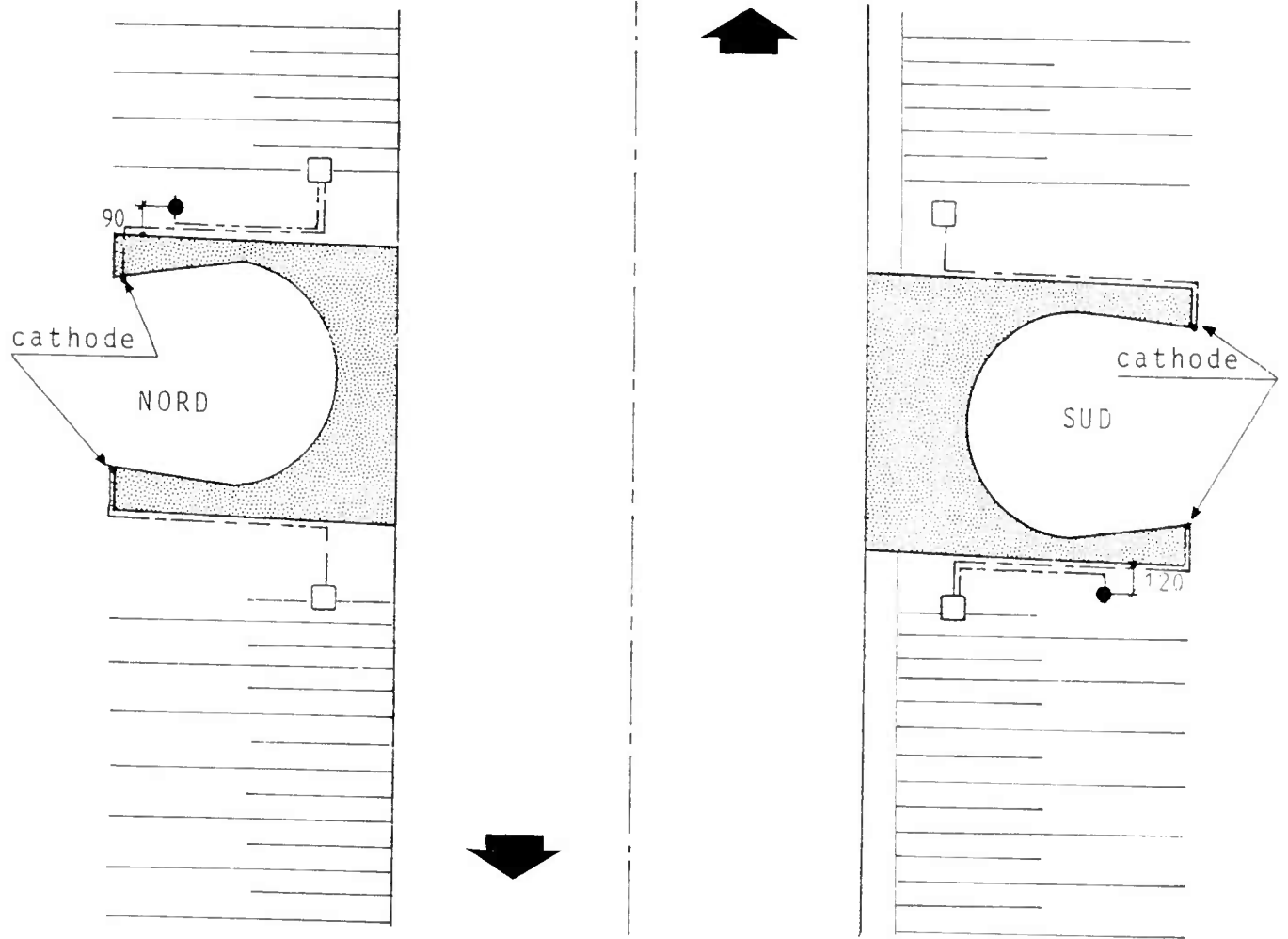
Si l'ouvrage ne présente que des dégradations localisées au radier qui n'affectent pas sensiblement sa résistance mécanique, il est possible de le protéger par un radier en béton (ou en béton bitumineux). Ce type de protection peut concerner essentiellement les ouvrages hydrauliques dont le radier peut être plus particulièrement affecté par les effets de l'abrasion et de la corrosion.

Le radier de protection doit s'étendre au moins à la périphérie mouillée dans les conditions normales d'exploitation, plus 20 cm environ de chaque côté. Il est recommandé de lui donner une épaisseur minimale de 12 à 15 cm, de l'armer légèrement, à l'aide d'un treillis soudé, et de le solidariser au radier de la buse, par exemple à l'aide de connecteurs en acier fixés ou soudés à celui-ci.

Au préalable, l'ouvrage doit être mis hors d'eau, décapé à l'abrasif, nettoyé et revêtu d'une couche de primaire riche en zinc.



Figure 3.2. : Mise en place d'un radier en béton bitumineux



- E.R. : Electrode de référence
- : Puits d'anodes équipés d'un boîtier de mesure
- : Câbles

Figure 3.3. : Exemple d'une installation de protection cathodique par anodes sacrificielles (vue en plan)

3.1.3. Installation d'une protection cathodique

Lorsque la corrosion affecte la partie externe des tôles, la protection cathodique se révèle l'unique protection efficace.

Le principe de la protection cathodique consiste à abaisser le potentiel de l'acier dans le milieu considéré en le rendant cathodique, de telle sorte que le processus de corrosion ne puisse se développer.

Deux techniques sont utilisées pour pratiquer ce type de protection :

- la protection cathodique par courant imposé,
- la protection cathodique par anodes sacrificielles.

Le choix entre l'une ou l'autre de ces deux techniques dépend de critères techniques et financiers qu'il faut examiner au cas par cas (coût de l'anode unitaire, coût de son remplacement, durée de vie escomptée de l'ouvrage, coût de l'amenée du courant électrique et de son exploitation ...). Par ailleurs, il est tout-à-fait possible de coupler une protection par revêtement existante et une protection cathodique ; si on a choisi une protection par courant imposé on pourra réguler la demande en courant en fonction de l'état du revêtement. Plus le revêtement sera poreux et dégradé plus la consommation de courant sera importante.

a) - Protection cathodique par anodes sacrificielles

Le principe est de créer une pile électrique en couplant le métal à protéger (cathode) à un métal dont le potentiel électrique par rapport à une électrode de référence est plus électro-négatif. L'objectif est d'abaisser suffisamment le potentiel du système pour que le processus de corrosion ne puisse avoir lieu.



Figure 3.4. : Mise en place d'une anode

L'installation comprend :

- des anodes en zinc, magnésium ou aluminium,
- divers câbles reliant la structure aux anodes,
- un système permettant le contrôle du bon fonctionnement.

Ce type de protection ne peut fonctionner que dans les conditions suivantes :

- l'anode et le métal sont plongés dans un même électrolyte (remblai, eau ...);
- la jonction électrique entre le métal et l'anode est en bon état ;
- les anodes ne sont pas usées et sont disposées autour de l'ouvrage de façon à être le plus efficaces possible ;
- aucun écran ne bloque la circulation du courant.

Cette technique ne permet pas de réguler le potentiel de la structure à protéger et impose une surveillance régulière des ouvrages avec l'obligation de remplacer les anodes dont la durée de vie est limitée. Ainsi dès la conception du projet, il est impératif de penser aux facilités d'accès à tous les points sensibles de l'ouvrage.

b) - Protection cathodique par courant imposé

Cette technique de protection consiste à créer une pile électrique entre le métal à protéger et une anode inerte en injectant un courant électrique continu dont l'intensité est suffisante pour porter le métal à un potentiel tel que la réaction de corrosion n'ait pas lieu.

La source de courant continu doit avoir un débit de courant suffisant et réglable dans de larges proportions de façon à mobiliser le potentiel nécessité par l'évolution de la polarisation du système.

L'installation du système comprend :

- un redresseur,
- des anodes en graphite, ferro-silicium ou magnétique,
- divers câbles reliant la structure au système électrique,
- des instruments de contrôle du bon fonctionnement de la protection (contrôle du débit des anodes).

Cette technique ne peut fonctionner que dans les conditions suivantes :

- l'anode et le métal sont plongés dans un même électrolyte (remblai, eau ...). Par conséquent, seules les parties immergées ou enterrées des buses métalliques sont protégées (la face interne des parties hautes pour les ouvrages hydrauliques ne bénéficie pas d'une telle protection) ;
- le câble de connexion anode-structure est bien isolé. Dans le cas contraire son potentiel étant celui de l'anode, il s'userait très rapidement ;
- la connexion ne se rompt pas pendant la durée de vie de l'anode. A cet effet, il est conseillé de colmater cette zone de façon étanche par un isolant (résine époxydique ou polyester).

Un tel système permet de réguler l'intensité du courant mais présente l'inconvénient de nécessiter l'amenée d'une ligne électrique.

3.2. Réparation ou renforcement local

La réparation ou le renforcement local d'une buse métallique peut concerner principalement les extrémités de celle-ci, par exemple si elles sont déformées ou soumises à un phénomène hydraulique de soulèvement, son radier lorsqu'il n'offre plus une résistance mécanique suffisante, ou des tôles qui auraient subi des désordres, notamment à la mise en oeuvre ou accidentellement.

Le traitement par injection des remblais de butée de la buse ne constitue pas une opération effectuée directement sur celle-ci. Il est toutefois évoqué ci-après dans la mesure où il s'agit d'un moyen fréquemment envisagé pour tenter de stopper une déformation de la buse consécutive à une insuffisance de raideur de ces remblais.

3.2.1. Renforcement des extrémités d'une buse

Les problèmes relatifs aux extrémités des ouvrages et les dispositions préconisées au stade de la conception sont largement développés dans les paragraphes 3.2.3. et 3.3.4. du document de Recommandations. Il sera dans tous les cas utile de s'y reporter s'il s'avère nécessaire de procéder au renforcement des extrémités d'une buse en service. Par ailleurs, il sera indispensable de s'assurer de la protection des remblais contigus contre les phénomènes hydrauliques (affouillements, érosion régressive, renards ...). A cet égard, on pourra également se reporter à la note d'information n° 41 (S.E.T.R.A.-C.S.T.R. de Mai 1988), relative à la protection des remblais contigus aux ouvrages hydrauliques.

a) - Raidissement de l'extrémité

Le moyen le plus simple et le plus efficace pour procéder au raidissement de l'extrémité d'une buse en service est la construction d'un perré de raidissement en béton armé (ou d'une poutre de couronnement en béton armé, mais celle-ci est généralement bien plus délicate à réaliser).

La liaison entre la buse et le perré doit être correctement assurée, par exemple au moyen de crochets d'ancrage en acier galvanisé qu'il est possible d'obtenir auprès des fournisseurs de matériels pour les buses métalliques.

b) - Lestage du radier - Parafouille

Le lestage d'un radier à l'extrémité d'une buse métallique consiste généralement à "ancrer" celui-ci dans un massif de béton destiné à empêcher son soulèvement. Il peut être conçu pour servir également de parafouille.

Il est recommandé de tronquer l'extrémité de la buse (radier), pratiquement jusqu'aux plaques de coin, avant exécution du massif. Une telle disposition, qui peut permettre à elle seule de réduire sensiblement le risque de soulèvement, facilite en effet l'exécution du massif de béton. Le radier doit être correctement ancré dans celui-ci, par exemple à l'aide de crochets d'ancrage en acier galvanisé.

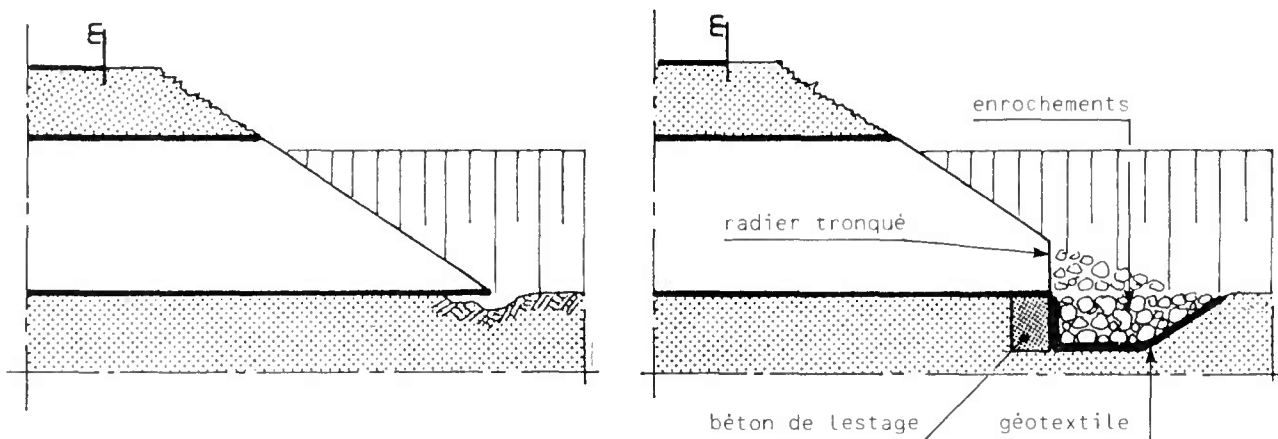


Figure 3.5. : Principe de réalisation d'un parafouille

3.2.2. Renforcement d'un radier

Lorsque les désordres n'affectent sérieusement que le radier d'une buse, en diminuant localement et de manière sensible la résistance mécanique de celle-ci (ce qui est davantage le cas pour certains ouvrages hydrauliques), il est possible d'envisager de renforcer le radier uniquement.

La solution généralement la plus simple et la plus pratique consiste à réaliser un radier de renforcement en béton armé, directement coulé sur le radier métallique existant, et correctement liaisonné aux parties saines de la buse. Cette liaison peut être assurée au moyen de connecteurs en acier soudés aux tôles, régulièrement répartis et en nombre suffisant pour reprendre par cisaillement l'effort de compression de la buse (il y a lieu de considérer que le radier existant n'aura à terme aucune résistance mécanique).

Le radier en béton armé doit avoir une épaisseur minimale de 15 cm environ, et recouvrir de chaque côté les parties saines de la buse sur une longueur d'au moins 30 cm. Le radier existant doit être préalablement nettoyé, décapé à l'abrasif, et peint à l'aide de peinture riche en zinc (Cf. §. 3.1.1.).

Une bonne disposition consistera à tronquer les extrémités de la buse, ce qui facilitera l'exécution du radier et permettra la réalisation de parafouilles, s'il s'agit d'un ouvrage hydraulique (Cf. §. 3.2.1. b). Dans ce cas, il conviendra par ailleurs, de rétablir la continuité du profil en long à l'amont et à l'aval de l'ouvrage, par exemple à l'aide d'un tapis d'enrochements.

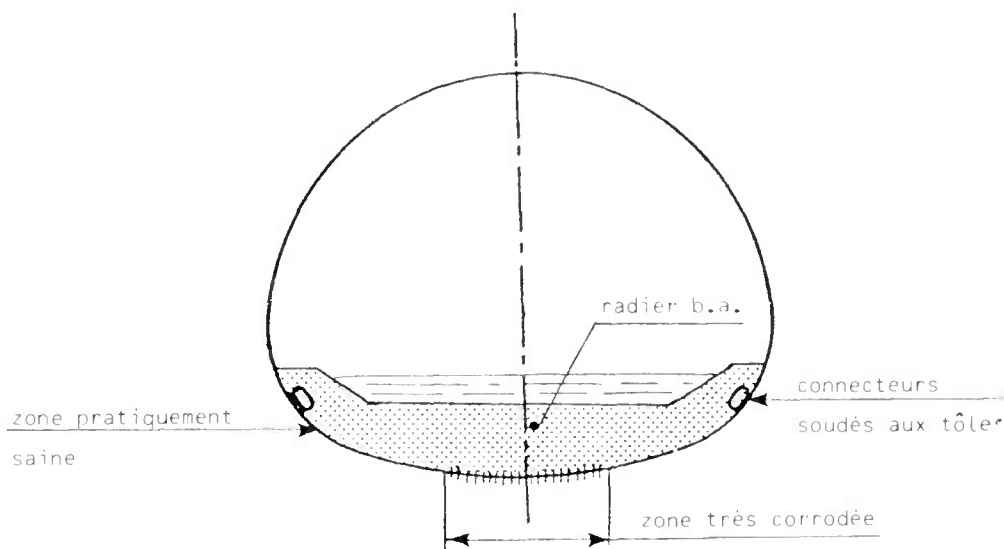


Figure 3.6. : Principe de réalisation d'un radier

S'il est impératif de conserver le profil en long existant, la seule solution possible, hormis, naturellement, le remplacement de l'ouvrage, consistera à enlever le radier existant pour le remplacer par un nouveau radier soit métallique, réalisé avec le même matériel que celui de la buse, soit en béton armé.

Il s'agit là toutefois de travaux extrêmement délicats à réaliser, qui imposent de procéder par plots de largeur réduite (une largeur de tôle par exemple), à l'abri d'un étalement bien conçu s'étendant au moins sur une largeur de plot de part et d'autre de celui traité, et sous surveillance continue. L'une des principales craintes est la formation de renards solides (notamment si les matériaux de remblai ne présentent pas une cohésion suffisante), phénomène contre lequel on peut tenter de se prémunir en injectant préalablement les terrains sous les reins de la buse, si cela est possible (Cf. §. 3.2.4.).

D'une manière générale, compte tenu de ces difficultés, des aléas d'exécution et du coût des travaux qui, dans certains cas peut s'avérer du même ordre de grandeur que celui du remplacement de l'ouvrage, une telle solution de renforcement ne devrait être envisagée que si l'on ne peut procéder autrement. Le seul cas que nous connaissons où cette solution de renforcement a été mise en oeuvre est celui tout-à-fait exceptionnel illustré par les figures 3.7. à 3.11. Il s'agit d'un ouvrage hydraulique multiple constitué de 3 buses arches métalliques identiques de 5,67 m de portée, de 3,80 m de flèche, d'une longueur au radier de 49 m et situées sous 9 m de remblai. La figure 3.7. présente l'allure générale des déformations transversales (amplifiées) des buses. Le radier de la buse centrale

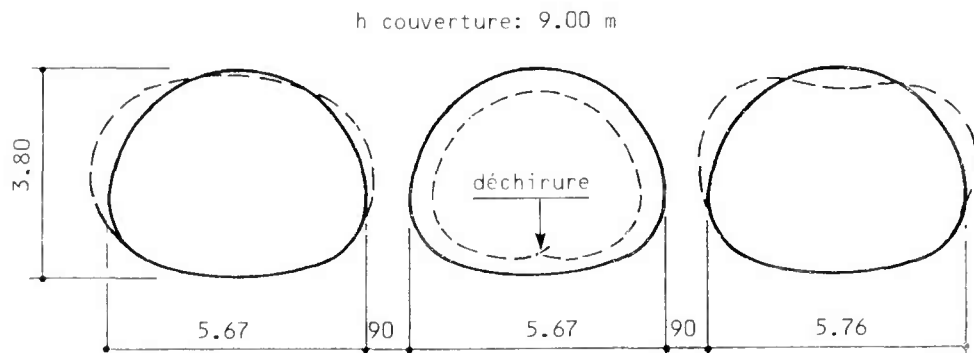


Figure 3.7. : Allure générale des déformations amplifiées



Figure 3.8. : Déformations du radier et inversion de courbure

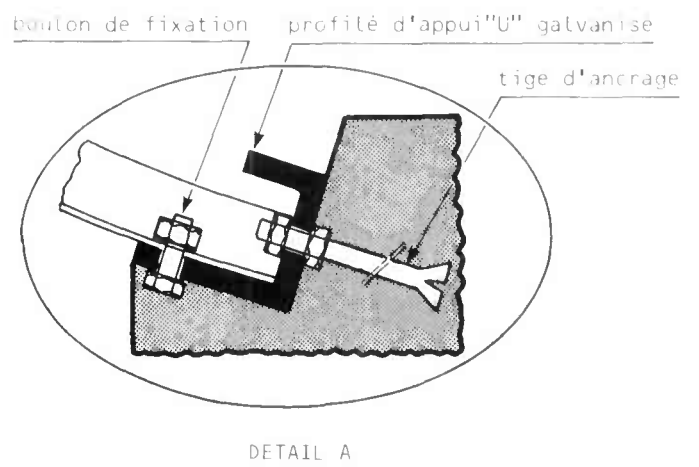
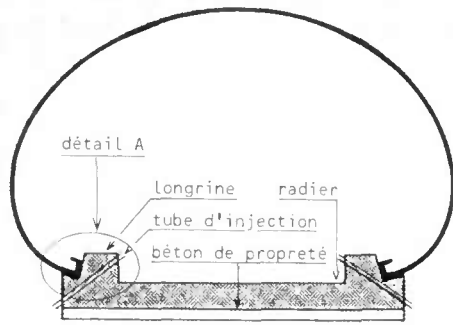


Figure 3.9. : Coupe transversale type du radier

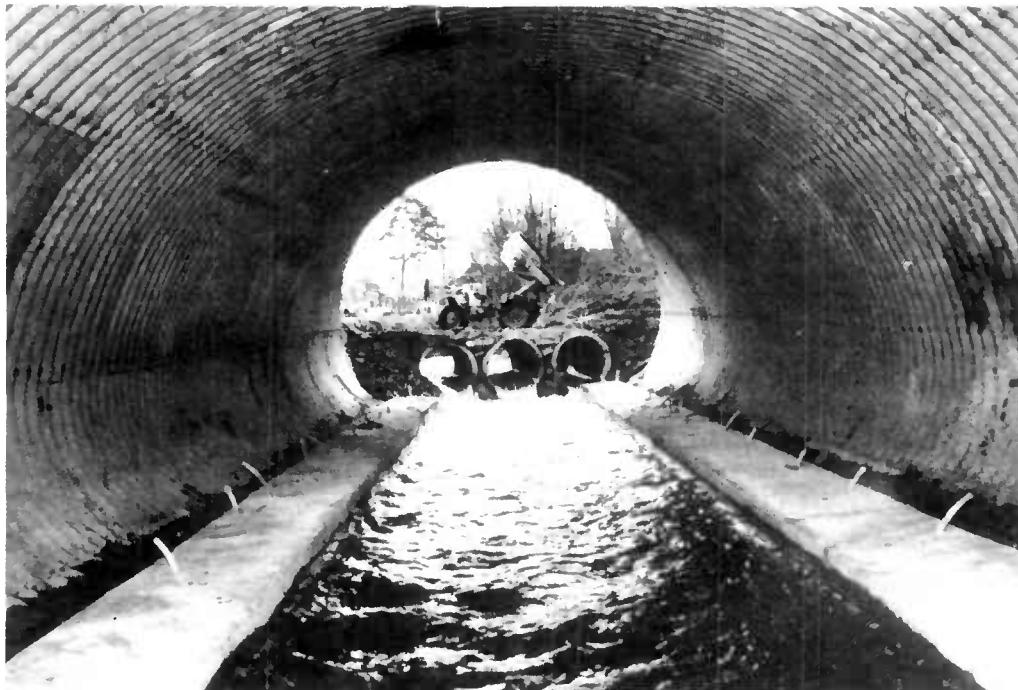


Figure 3.10. : Ouvrage terminé

présentait une inversion de courbure sur presque toute sa longueur, et d'importantes déchirures. Des désordres analogues commençaient à affecter localement la buse rive gauche. Ces désordres paraissaient imputables, en partie du moins, à une insuffisance de raideur des remblais techniques.



Figure 3.11. : Etaisement en section courante

Compte tenu de l'importance des travaux de remplacement des ouvrages et de leur coût élevé, mais aussi des contraintes d'exploitation qui rendaient difficilement possible une longue interruption de la circulation, il a été décidé de remplacer uniquement les radiers, par des radiers en béton armé.

La réparation a consisté à enlever le radier et à décaisser le sol de fondation sur 70 cm environ, par plots de 2,50 m environ pour permettre la réalisation du radier en béton armé, la stabilité de la buse étant assurée en permanence par un dispositif d'étaisement mobile. Après réalisation du radier, il a été procédé à des injections du sol sous les plaques de coin des buses, à partir de réservations subhorizontales qui avaient été disposées dans les longrines.

Cette injection, essentiellement destinée à remplir les vides éventuels et à resserrer légèrement le sol en place, avait pour but de reconstituer une certaine raideur des remblais sous les plaques de coins.

Dans tous les cas, l'injection du sol sous les plaques de coins est indispensable si des déformations sont à craindre, celles-ci pouvant engendrer d'importants efforts parasites dans les tôles de la buse, à proximité de leur jonction avec le radier en béton.

3.2.3. Remplacement local de plaques de tôles

D'une manière générale, il est difficile de procéder à la réparation ou au remplacement, même local, de plaques de tôle qui auraient subi d'importantes dégradations, accidentellement à la mise en œuvre des remblais ou durant l'exploitation de l'ouvrage. De ce fait, une telle opération n'est à envisager que si elle se justifie réellement, dans la mesure où, si les désordres sont très localisés, ils peuvent ne pas affecter sensiblement la sécurité de l'ouvrage (suivre leur évolution éventuelle).

S'il s'agit de plaques de radier, on pourra utilement se reporter au paragraphe précédent. S'il s'agit de plaques de voûte, le seul cas où le remplacement d'une ou plusieurs plaques est envisageable est celui où il est possible de dégager les remblais pour éviter leur effondrement et accéder par l'extérieur aux tôles concernées. Il peut s'agir notamment de plaques d'extrémités, ou de plaques situées en clé de voûte lorsque la hauteur des remblais de couverture est faible. Il s'agit dans tous les cas de travaux assez délicats à réaliser, dans la mesure où la buse aura déjà subi des déformations, et où il y aura lieu de procéder aux terrassements (de manière symétrique de part et d'autre de la buse si nécessaire), sans endommager celle-ci. Pour le remplacement de plaques de sommet, il y aura lieu par ailleurs de renforcer localement la voûte, dans la zone concernée, et de procéder par plots (plaque par plaque), si plusieurs plaques sont à remplacer.

3.2.4. Traitement local des remblais par injection

Lorsque les causes des désordres qui affectent l'ouvrage sont des déformations (en particulier aplatissement du corps de la buse, accompagné éventuellement d'un enfoncement des plaques de coin), directement imputables à une insuffisance de raideur ou de portance des remblais autour de la buse, il est assez fréquemment envisagé d'arrêter l'évolution de ces déformations en procédant au traitement des terrains par injection.

D'une manière générale, cette solution de renforcement de l'ouvrage qui consiste à améliorer les qualités des remblais contigus à la buse par injection, ne paraît pas bien adaptée, les chances de succès demeurant faibles, bien qu'elles puissent varier sensiblement suivant la nature des terrains concernés, les causes pour lesquelles leurs qualités sont médiocres (défaut de compactage, entraînement de fines par des circulations d'eau, terrains argileux, sensibles à l'eau ou évolutifs, ...), la nature des produits d'injection utilisés et leurs conditions de mise en œuvre.

La principale raison est que bien souvent, les terrains concernés sont trop argileux, c'est-à-dire pratiquement imperméables aux coulis, alors que par ailleurs il ne peut être envisagé de procéder à une injection sous pression. Toutefois, les progrès réalisés ces dernières années dans le domaine des coulis d'injection, et notamment dans celui des suspensions (beaucoup moins coûteuses que les coulis à base de "produits chimiques"), dont le pouvoir de pénétration dans les sols a pu être sensiblement amélioré, fait qu'une solution d'amélioration des qualités des remblais en place par injection paraît plus envisageable, du moins dans certains cas particuliers. Cela peut être le cas par exemple lorsqu'il s'agit de traiter localement un remblai non argileux sous les reins (ou les plaques de coin) d'une buse dont l'état général est par ailleurs satisfaisant. En tout état de cause, la solution de traitement des remblais par injection reste généralement coûteuse et, inadaptée ou mal conduite, elle peut davantage porter préjudice à l'ouvrage que le conforter. Pour ces raisons il est nécessaire de bien reconnaître les terrains concernés (et notamment leur nature, leur granulométrie et leur perméabilité), de s'assurer l'assistance technique d'un laboratoire compétent, et de confier les travaux à une entreprise spécialisée.

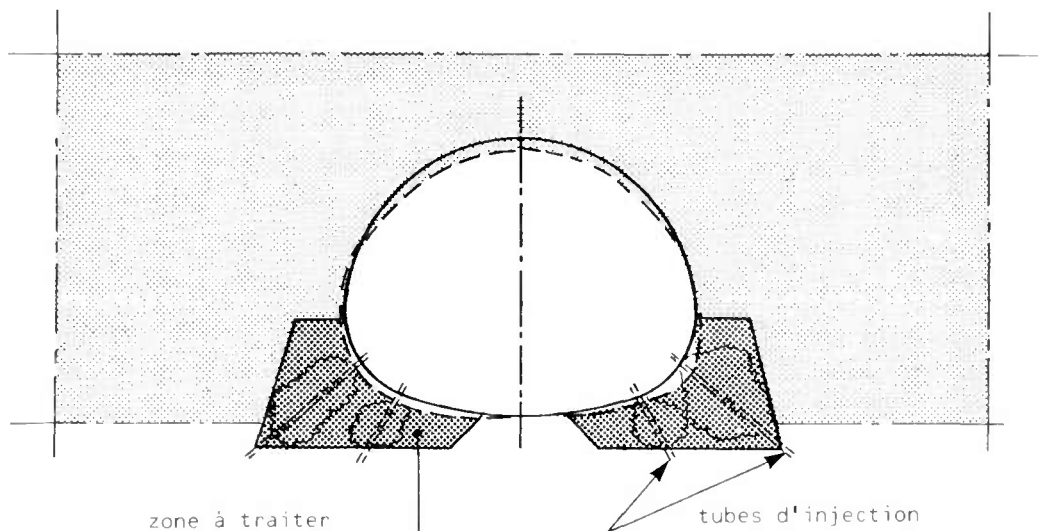


Figure 3.12. : Principe d'injection des remblais contigus

En règle générale, l'injection est effectuée à partir de perforations réalisées dans les tôles et régulièrement réparties sur la buse le long de la zone de terrain à traiter. Il est possible d'envisager un traitement de consolidation soit par imprégnation du sol (coulis ayant un pouvoir de pénétration bien adapté), soit par resserrage de celui-ci à l'aide d'un coulis épais ou d'un mortier, par exemple s'il s'agit d'un sable fin lâche (solution dont le résultat paraît cependant a priori plus aléatoire). Il est important de souligner que l'objectif recherché n'est pas de "bétonner" le volume de terrain traité, mais de lui donner une raideur suffisante pour freiner ou stopper l'évolution des déformations de la buse. Il est recommandé dans tous les cas, de limiter les pressions d'injection à des valeurs assez faibles (en principe 0,3 à 0,4 MPa au plus) et de procéder à des essais de convenance préalables, à proximité des extrémités par exemple.

3.3. Renforcement général ou remplacement de la buse

Lorsque la stabilité d'un ouvrage n'est plus assurée dans des conditions de sécurité satisfaisantes et qu'il ne peut être procédé à un renforcement local pour y remédier (Cf. §. 3.2.), il est nécessaire de prévoir le renforcement général de l'ouvrage ou son remplacement.

La distinction essentielle qui est faite ici entre renforcement général et remplacement de l'ouvrage tient uniquement au fait que dans le premier cas la buse existante est laissée en place et, généralement, assure un rôle durant l'exécution de la structure de renforcement (coffrage perdu par exemple), alors que dans le second cas elle est enlevée, avant ou après réalisation de l'ouvrage de remplacement. Par ailleurs, il est plus facile de procéder au renforcement d'une buse qu'à son remplacement lorsque les travaux ne concernent qu'une partie de l'ouvrage. **En aucun cas toutefois la résistance de la buse existante ne doit être prise en compte, fût-ce partiellement, dans la justification d'une structure de renforcement.**

Les solutions de renforcement général d'une buse métallique consistent toutes à réaliser, à l'intérieur et au contact de celle-ci, une structure résistante capable de reprendre les charges qui sollicitent la buse existante. Si ces solutions présentent généralement l'avantage de pouvoir être mises en oeuvre sans qu'il soit nécessaire de procéder à une restriction de la circulation sur les voies portées (sauf si une telle disposition est prise à titre conservatoire en raison du risque d'effondrement de l'ouvrage), elles présentent aussi toutes l'inconvénient de réduire de manière plus ou moins importante le gabarit ou le débouché hydraulique de l'ouvrage et de remonter légèrement le profil en long de son radier. Lorsque de telles contraintes ne peuvent être acceptées, il y aura lieu d'envisager le remplacement de l'ouvrage.

Dans ce cas, et d'un point de vue technique, le choix de la solution de remplacement sera principalement dicté par les contraintes liées à la situation de l'ouvrage (notamment son importance et la hauteur des remblais de couverture), à son environnement, aux conditions d'accès au site, et à l'exploitation de l'ouvrage et des voies de circulation portées par celui-ci (possibilité de procéder à des restrictions de la circulation ou à une interruption totale de celle-ci). Parmi les différentes solutions de remplacement qui peuvent être mises en oeuvre, seul le fonçage d'un tube ou d'une autre structure permet en principe de s'affranchir de toute contrainte liée à l'exploitation des voies de circulation portées par les remblais.

3.3.1. Renforcement par tubage ou chemisage intérieur de la buse

Le tubage ou le chemisage d'une buse consiste à introduire dans celle-ci une structure résistante capable de reprendre seule les efforts induits par les remblais qui la surmontent. Les solutions les plus couramment employées sont le chemisage par une autre buse métallique, ou le tubage par des conduits préfabriqués rigides en béton armé. Il y a lieu dans ces cas de réserver un espace annulaire suffisant entre la buse existante et la nouvelle structure pour permettre la mise en oeuvre de celle-ci et un comblement correct de cet espace qui permettra le transfert des charges.

Il existe d'autres solutions, notamment à base d'autres matériaux (synthétiques), qui sont assez peu employées actuellement, mais dont les possibilités d'évolution dans les années à venir pourraient leur donner un regain d'intérêt, du moins pour les petits ouvrages.

a) - Chemisage par une buse métallique

Le chemisage d'une buse métallique par une autre buse métallique est une solution qui, bien que pratique en raison notamment des gammes importantes de formes et de dimensions existantes, ne peut convenir que si les causes qui sont à l'origine des désordres qui affectent l'ouvrage existant peuvent être supprimées, ou si des dispositions bien adaptées permettent de s'en prémunir efficacement. Ainsi, une telle solution n'est pas adaptée lorsque ces désordres sont directement imputables aux qualités mécaniques médiocres des remblais techniques (faible raideur notamment), ou à leurs caractéristiques électro-chimiques qui leur confèrent une forte agressivité, et sur lesquelles il est pratiquement impossible d'agir.

Le chemisage intérieur d'une buse est toujours une opération difficile à réaliser et exige les plus grands soins. La mise en place de la nouvelle buse (généralement par tronçons ou par viroles pré-assemblées) après nettoyage de l'ouvrage existant, le remplissage de l'espace annulaire entre les deux parois et, éventuellement, les dispositions particulières aux extrémités, par exemple lorsqu'il s'agit d'assurer la solidarisation d'une nouvelle buse à des ouvrages d'extrémités existants sont des opérations délicates qu'il convient de préparer et d'exécuter soigneusement, en évitant les improvisations durant les travaux. Il est souhaitable que le matériau de remplissage soit meuble et ne fasse pas prise tout en présentant une raideur en place suffisante ; toutefois, les difficultés de mise en oeuvre du matériau (par exemple par remblayage hydraulique) et la nécessité qu'il remplisse correctement tout l'espace annulaire, ont plus souvent conduit à adopter un mortier ou un coulis faiblement dosé en ciment introduit à partir de perforations pratiquées sur la paroi de la nouvelle buse, ou de cheminées exécutées dans le remblai de couverture lorsque la hauteur de celui-ci le permet. Après durcissement le coulis ou le mortier doit présenter une raideur supérieure ou égale à celle exigée par les justifications de la nouvelle buse, sans être excessive toutefois (100 à 200 MPa au plus).

Dans tous les cas, la nouvelle buse est justifiée dans les conditions définies dans le document de Recommandations.



Figure 3.13. : Chemisage par une buse métallique

b) - Tubage à l'aide d'un conduit en éléments préfabriqués en béton armé

Il peut être envisagé d'introduire dans la buse existante un conduit constitué d'éléments préfabriqués en béton armé (conduits à section circulaire, mais également conduits Matière à deux éléments ou élément de voûte préfabriqués sur un radier coulé en place par exemple, si la forme et les dimensions de l'ouvrage existant le permettent). Une telle solution est en fait rarement employée, car elle présente l'inconvénient de réduire de manière importante le débouché hydraulique ou le gabarit de l'ouvrage.

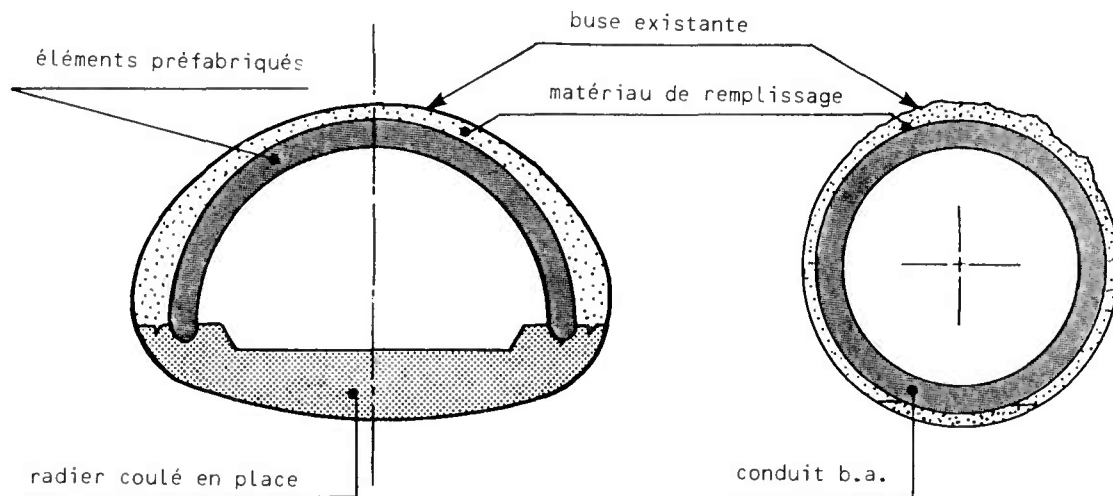


Figure 3.14. : Principe de tubage

c) - Renforcement à l'aide d'une gaine en matériau synthétique

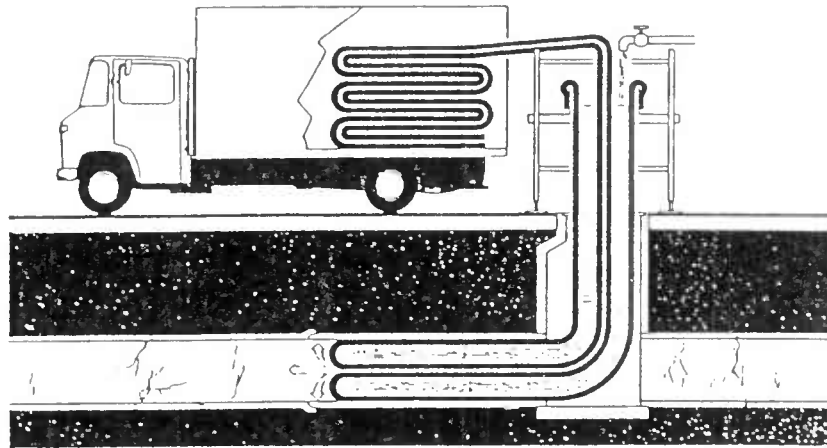
D'autres solutions que celles évoquées précédemment peuvent être envisagées, dont certaines sont basées sur l'emploi de matériaux synthétiques.

Cela est le cas en particulier de la solution qui consiste à "plaquer" contre la paroi de la buse une gaine souple en fibre imprégnée de résine, celle-ci étant ensuite rigidifiée, une fois en place, par polymérisation de la résine par élévation de la température.

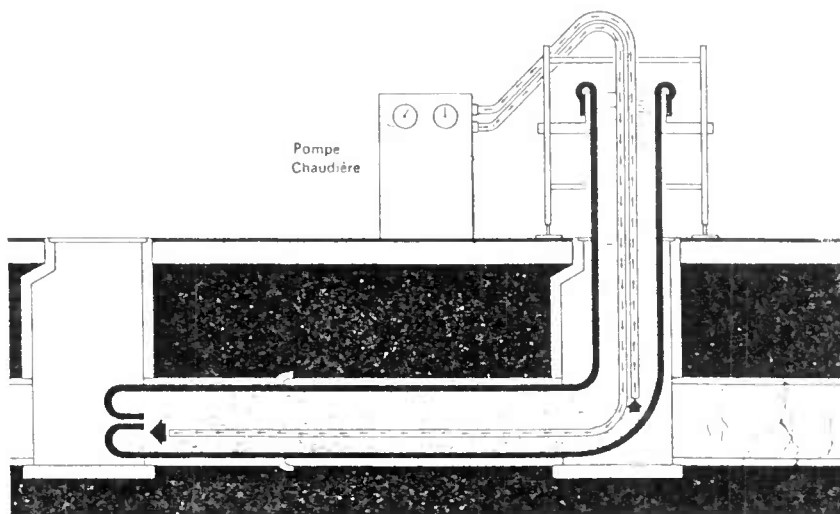
Il existe de nombreux procédés, généralement couverts par des brevets, qui peuvent se différencier notamment par la constitution de la gaine, sa mise en place, ou les moyens employés pour polymériser la résine. Dans celui illustré par les figures 3.15. et 3.16., la gaine est mise en place par pression hydrostatique de l'eau puis rigidifiée par polymérisation à chaud par élévation de la température de l'eau (80°C). Le matériau utilisé est un composite qui peut être une résine polyester ou un époxyde armé de fibres de polyester ou de verre.

Ces procédés ont été développés initialement pour la réhabilitation de canalisations d'assainissement à écoulement libre destinées à l'évacuation des eaux pluviales et des eaux usées domestiques et industrielles. Ils n'ont été que très récemment utilisés, à titre expérimental, pour le renforcement de certaines buses métalliques de faible diamètre qu'il était impossible de remplacer en raison des contraintes d'exploitation des voies portées. Cette utilisation qui paraît avoir donné satisfaction concernait des ouvrages d'assainissement dont le diamètre n'excédait pas 1,20 m environ.

L'emploi de ces procédés, qui peut paraître assez prometteur, reste essentiellement limité pour l'heure à ce type d'ouvrage, en raison principalement de la limite de résistance des gaines qui doivent pouvoir reprendre intégralement les efforts s'exerçant sur la buse existante. Il y aura lieu d'ailleurs dans tous les cas de s'assurer de la capacité de la gaine à reprendre ces efforts, et de son comportement à long terme (vieillessement) dans les conditions d'utilisation prévues.



Mise en place par retournement sur elle-même de la gaine (schéma de principe)



Durcissement par polymérisation de l'enveloppe (schéma de principe)

Figure 3.15. :Exemple de renforcement à l'aide d'une gaine en matériau synthétique
(Extrait d'une documentation Insituform)

Il est à noter que l'on peut envisager l'emploi de tels procédés pour la mise en place d'une gaine de protection de la paroi interne d'une buse existante pour protéger celle-ci contre les effets de l'abrasion ou de l'érosion. Une telle gaine ne saurait toutefois constituer une protection efficace contre la corrosion des tôles en raison de l'absence d'adhérence (voire même de contact) entre celle-ci et la paroi de la buse.

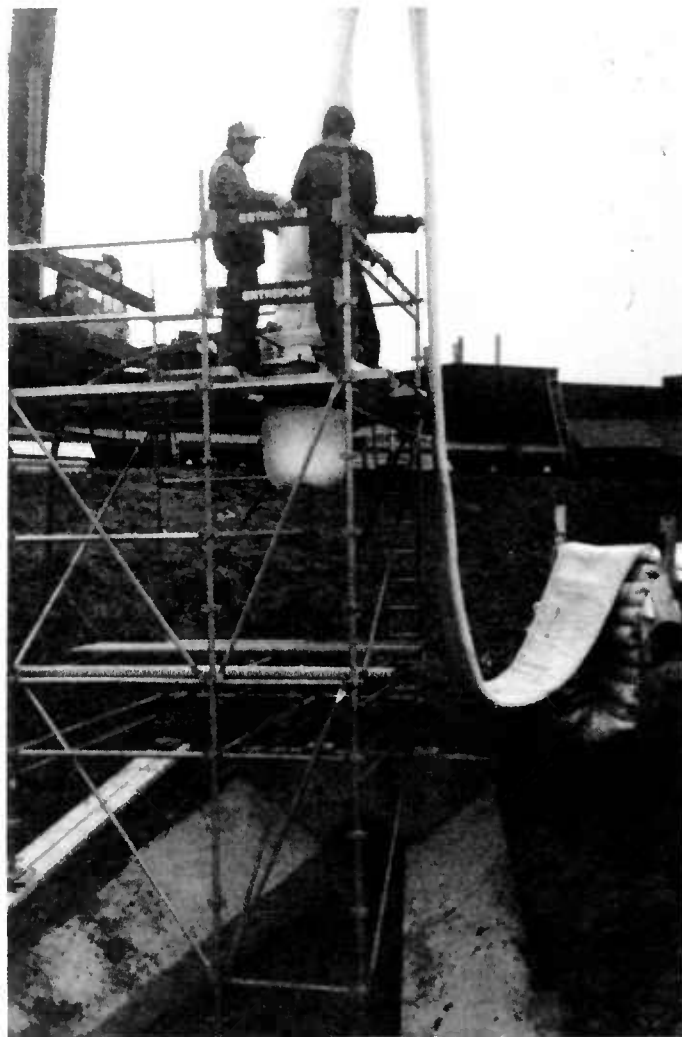
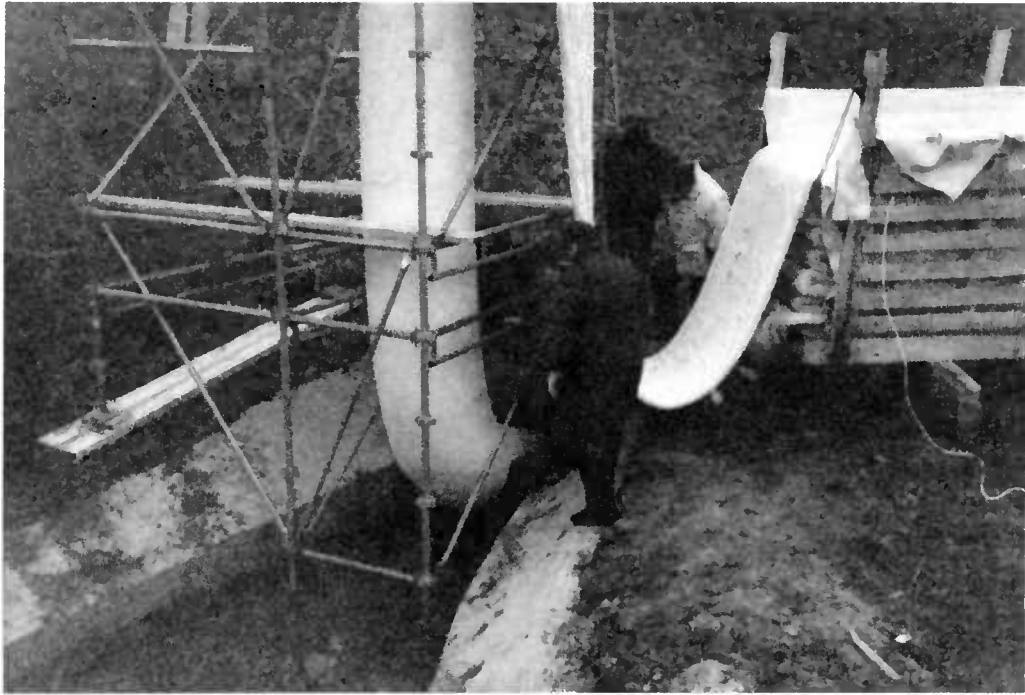


Figure 3.16. : Deux étapes de mise en place de la gaine dans la buse

3.3.2. Renforcement par un ouvrage en béton armé coulé en place à l'intérieur de la buse

La réalisation d'un ouvrage en béton armé coulé en place à l'intérieur de la buse existante, celle-ci servant de coffrage extérieur perdu, est une solution qui peut s'avérer particulièrement bien adaptée lorsque les dimensions de la buse le permettent (diamètre minimal de l'ordre de 2 m environ), dans la mesure où elle permet de réduire le moins possible le gabarit ou le débouché hydraulique de l'ouvrage existant en épousant au mieux le contour de celui-ci.

L'ouvrage peut être réalisé en béton coffré ou en béton projeté. Il est dimensionné pour reprendre seul les sollicitations induites par le remblai et les charges routières. Il est possible de concevoir soit un ouvrage rigide, soit un ouvrage semi-rigide capable de bénéficier d'une réaction latérale de butée partielle de la part des remblais, selon la schématisation de calcul adoptée (Cf. § c - ci-après). Cette réaction latérale de butée reste largement tributaire de la nature et des qualités des terrains qui entourent la buse, qu'il sera donc nécessaire, au préalable, de bien reconnaître.

a) - Ouvrage en béton coffré

Les travaux sont exécutés à sec après nettoyage de la buse. Ils sont généralement réalisés en deux phases au moins, la première consistant à réaliser d'abord le radier sur toute la longueur de la buse (en une fois ou par parties) et la seconde consistant à réaliser la voûte, par anneaux successifs, et par parties si nécessaire (parties latérales puis clé de voûte).

Le coffrage intérieur étant le même sur toute la longueur de la buse, il y aura lieu de procéder au préalable à un relevé précis de celle-ci, de manière à le définir correctement pour disposer en toute section de la résistance requise.

On cherchera, dans la mesure du possible, si les conditions hydrauliques le permettent, à réaliser un radier horizontal, beaucoup plus simple à exécuter. Les armatures de voûte, pré-assemblées éventuellement, peuvent être fixées sur des barres longitudinales réglées sur des aciers soudés à la paroi de la buse. Les coffrages de voûte doivent être correctement étayés. Il conviendra par ailleurs, d'assurer un bétonnage correct en clé de voûte, par exemple en maintenant une légère pression du béton (et en prévoyant si nécessaire des petits tubes servant d'évents et permettant de procéder à une injection complémentaire de coulis).

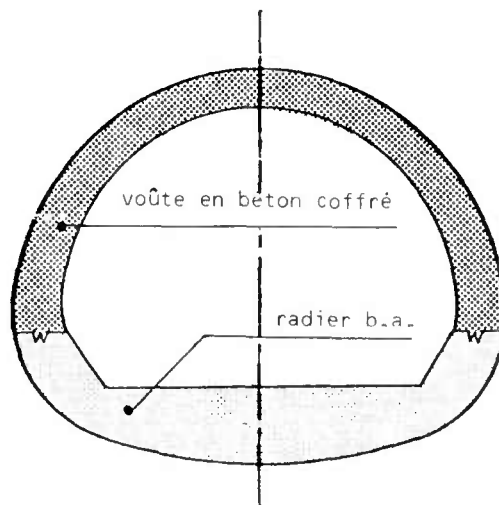


Figure 3.17. : Schéma de principe d'un renforcement par béton coffré

Les figures 3.18. et 3.19. illustrent le cas d'un ouvrage hydraulique constitué de deux buses-arches de 3,80 m de portée, 2,40 m de flèche et situées sous 2 m de remblai, dont la résistance mécanique était sensiblement affectée du fait d'une forte corrosion des tôles. La solution retenue a consisté à réaliser un ouvrage de renforcement en béton armé, du type rigide (épaisseur de béton de 25 cm) compte tenu des qualités assez médiocres des remblais.

Après avoir procédé à la mise hors d'eau et à un dévasage de l'ouvrage, il a été réalisé dans l'ordre chronologique un radier horizontal, les deux piédroits et la voûte. La mise en oeuvre du béton des piédroits et de la voûte s'est faite en deux étapes, soit par demi-buse.

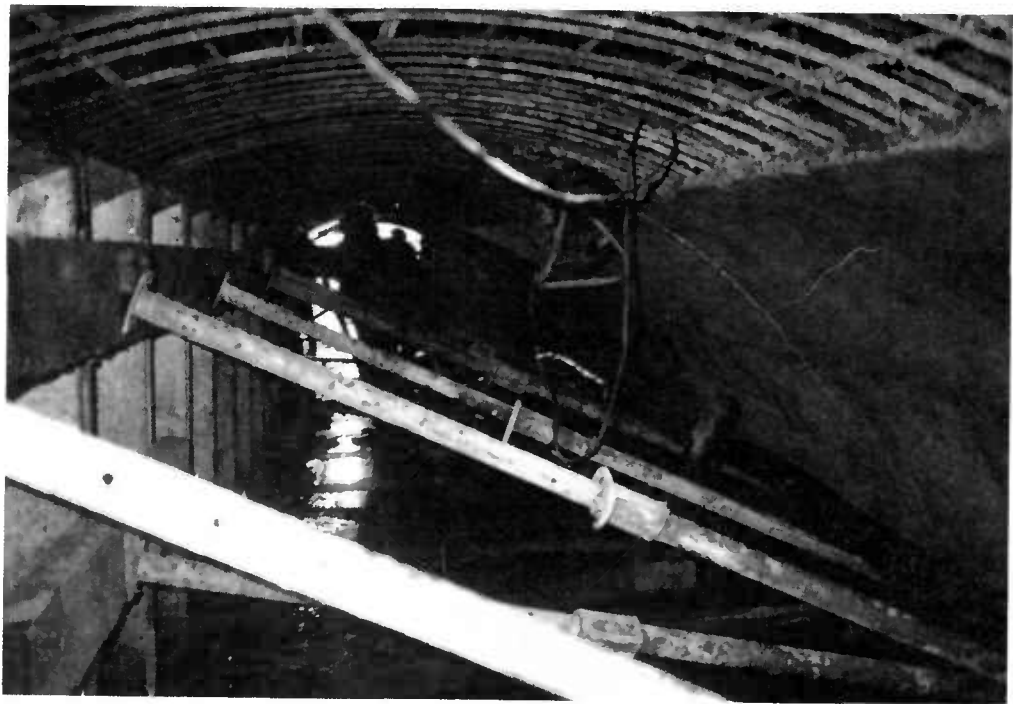


Figure 3.18. : Bétonnage des piédroits



Figure 3.19. : Ouvrage terminé

b) - Ouvrage en béton projeté

La réalisation d'une structure résistante en béton armé par projection du béton est une solution qui peut s'avérer bien adaptée, techniquement et économiquement, notamment lorsque l'épaisseur de béton à mettre en oeuvre n'est pas trop importante (comme cela est généralement le cas lorsque l'ouvrage conçu est du type semi-rigide).

Dans tous les cas cependant le radier, réalisé en première phase, doit être coulé en place ; on cherchera par ailleurs, dans la mesure du possible (si les conditions hydrauliques le permettent) à le prévoir horizontal avec, si nécessaire, les amorces de piédroits pour éviter la projection sur des surfaces peu inclinées sur l'horizontale (un minimum de 60° environ paraît, à cet égard, souhaitable).

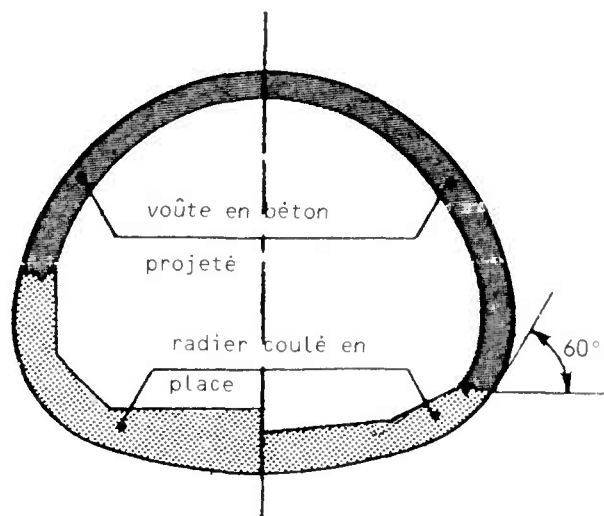


Figure 3.20. : Schéma de principe

La qualité de l'exécution dépend principalement de la préparation des supports, des dispositions adoptées pour ce qui concerne les armatures et des conditions de mise en oeuvre du béton projeté. A cet égard, on pourra utilement se reporter aux Recommandations de l'AFTES (publiées dans le numéro spécial d'Avril 1981 de la revue de l'AFTES "Tunnels et ouvrages souterrains") et aux Recommandations STRRES et AFB (Septembre 1985). Seules, quelques règles essentielles sont présentées ci-après, en y apportant, lorsqu'il y a lieu quelques précisions plus particulières aux ouvrages concernés.

Pour ce qui concerne les supports (paroi de la buse existante), il est conseillé de décaper à l'abrasif les surfaces pour obtenir une certaine rugosité et favoriser l'adhérence du béton à la mise en oeuvre, même si celle-ci est inutile d'un point de vue mécanique (la résistance de la buse n'étant pas prise en compte dans la justification de l'ouvrage de renforcement en béton armé). D'une manière générale, la présence des têtes de boulons et des armatures, et les recouvrements entre plaques de tôles sont des éléments qui favorisent la tenue du béton frais durant la projection, mais en cas de difficultés (dans certaines parties délicates comme en sommet de voûte notamment), des dispositions particulières peuvent être envisagées pour améliorer celle-ci. Par ailleurs, la paroi de la buse doit être propre et sèche. Il y aura donc lieu de colmater les éventuelles infiltrations à travers celle-ci.

Les armatures sont constituées de ronds à béton ou de treillis soudés disposés de manière à éviter la création d'effets d'ombre pouvant favoriser la formation de vides lors de la projection. Ainsi, la distance entre deux barres parallèles doit être égale ou supérieure à 10 cm. S'il est prévu deux nappes d'armatures, il est conseillé que celles-ci soient mises en place l'une après l'autre, la nappe intérieure n'étant placée qu'après que la nappe extérieure soit entièrement recouverte de béton.

Les armatures doivent être correctement assemblées entre elles (par des ligatures ou par soudage en croix, en principe à tous les points de croisement), et solidement fixées à la paroi de la buse (par exemple par l'intermédiaire de ronds à béton soudés à la paroi de la buse, disposés en nombre suffisant), pour qu'elles puissent participer au maintien du béton durant la projection, sans subir des déplacements ou déformations excessifs.



Figure 3.21. : Mise en place de la cage d'armatures

L'enrobage minimal des armatures doit être de 3 cm.

Les recommandations générales pour la mise en oeuvre du béton par projection sont définies dans les documents visés précédemment.

En règle générale il convient de procéder, avant travaux, aux contrôles de l'épreuve de convenance pour s'assurer que les conditions d'exécution prévues permettent d'obtenir les qualités requises (composition du béton, technique de projection, matériels, mode de projection, ...).

La lance de projection doit être maintenue pratiquement perpendiculaire à la paroi de la buse, et à près d'un mètre de celle-ci, ce qui explique notamment qu'en l'état actuel de la technique, un tel procédé ne puisse être utilisé pour des buses dont le diamètre ou la flèche est inférieur à 2 mètres environ.

En principe, l'épaisseur requise est obtenue en plusieurs couches. Il est souhaitable toutefois que la projection d'une nouvelle couche intervienne avant la fin de prise de la couche précédente, de sorte qu'il ne soit pas nécessaire de procéder à une préparation de reprise. Une telle disposition nécessitera généralement de réaliser la voûte par plots. A chaque couche, la projection de béton se fait de bas en haut, pour limiter les risques d'affaissement de celui-ci ; il est par ailleurs interdit de procéder au réemploi des retombées. Enfin, s'il est prévu de lisser la surface, une couche de finition doit être mise en oeuvre à cet effet.

Le rappel de ces quelques règles essentielles est justifié en raison de l'intérêt que présente cette solution. Il est important toutefois de souligner que l'une des conditions essentielles de bonne exécution des travaux reste l'emploi d'un personnel qualifié et expérimenté.

Les figures 3.21. et 3.22. illustrent le cas d'un ouvrage constitué de deux buses circulaires de 2,50 m de diamètre, de 54 m de longueur au radier, situées sous 6 m de remblai, qui présentaient une corrosion importante des tôles au radier, au niveau du fil d'eau notamment. Il a été opté pour une solution de renforcement en béton projeté. Un radier horizontal et des piédroits ont d'abord été coulés en place. La voûte a ensuite été réalisée en béton projeté en 4 passes de projection. Une première passe de projection a servi à combler le creux des ondes pour diminuer l'effet de rebond, les deuxième et troisième passes de projection ont couvert respectivement la première nappe d'armatures puis la deuxième. La quatrième passe a permis de créer l'enrobage requis (soit 4 cm). Pour améliorer l'aspect fini de l'ouvrage, les surfaces ont été enduites d'un mortier adjuvanté.

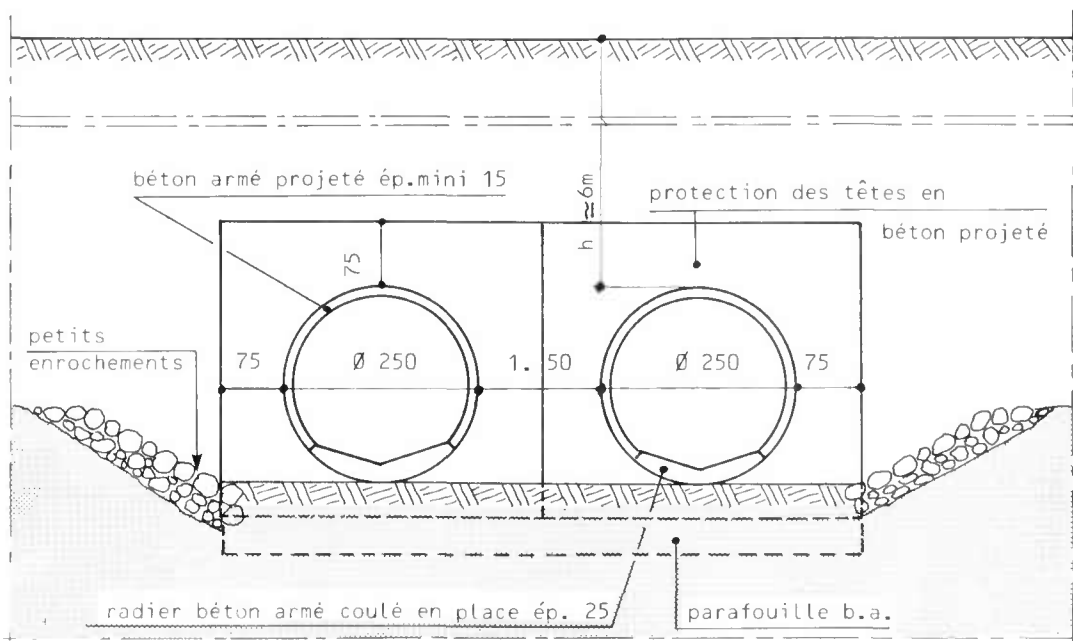
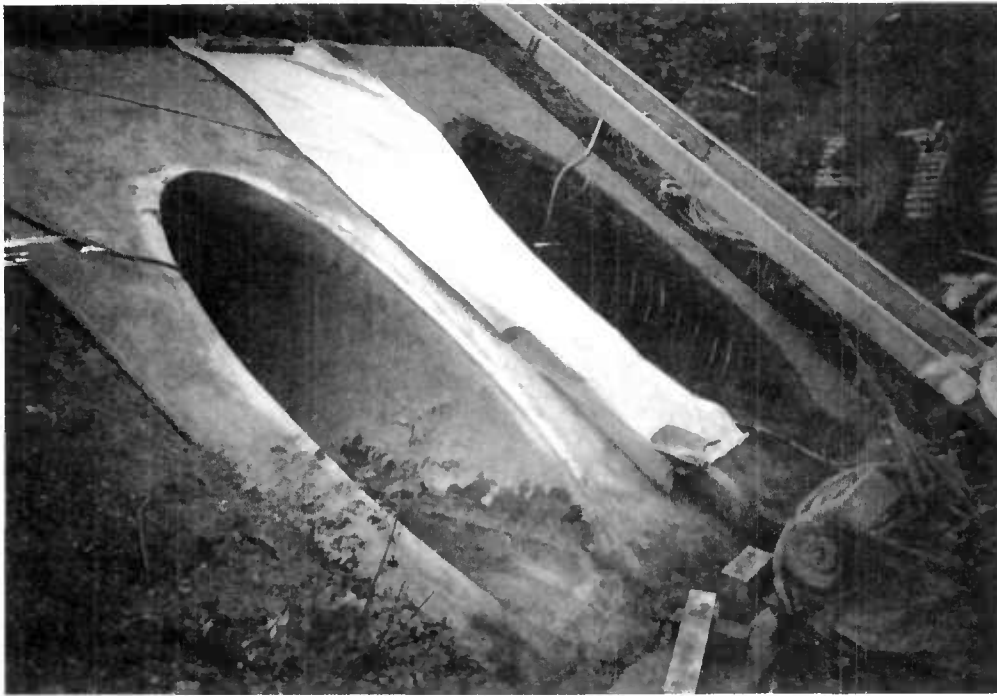


Figure 3.22. :Renforcement d'un ouvrage par béton projeté

c) - Hypothèses et schématisations de calcul

Il n'existe pas de règles établies qui fixent les hypothèses et les schématisations de calcul des structures de renforcement. Celles-ci sont à définir dans chaque cas, en fonction notamment de l'état de déformation de la buse et des qualités reconnues des terrains qui l'entourent. En pratique, on pourra s'aider des éléments donnés ci-après, étant entendu qu'en règle générale les tassements des remblais adjacents étant tout-à-fait stabilisés, il n'y aura pas lieu d'introduire de coefficient pondérateur des charges dues aux remblais (coefficient dit de Marston).

. Si les déformations transversales de la buse sont importantes (variations de la portée et/ou de la flèche de l'ordre de 5 % environ ou plus) ou qu'elles ne sont pas stabilisées, il ne doit être tenu compte en aucun cas d'une quelconque capacité de la structure de renforcement à mobiliser des réactions de butée de la part des remblais latéraux. Cela est également le cas lorsque les matériaux constitutifs de ces remblais sont trop argileux, évolutifs, de qualités médiocres ou insuffisantes (modules pressiométriques inférieurs à 10 à 12 MPa environ) ou très hétérogènes et présentant, localement, des qualités médiocres. Dans ces cas, la schématisation de calcul à adopter pour justifier la structure de renforcement peut être celle habituellement employée pour les cadres fermés. Celle-ci consiste à considérer la structure reposant sur un sol modélisé par des ressorts élastiques verticaux de raideur K_v , et soumise à l'action pondérale des remblais (généralement décomposée en forces verticales de pesanteur sur la buse et forces horizontales de poussée des remblais latéraux) et à l'action des charges d'exploitation (Cf. figure 3.23.). Les calculs sont généralement effectués "en fourchette", en considérant deux valeurs du coefficient de poussée des terres, 0,25 et 0,50. Ces valeurs peuvent être réduites si les qualités des terrains le justifient. De même, si il y a enfoncement anormal des plaques de coin, il y aura lieu de ne pas introduire d'appuis (ressorts verticaux) sous celles-ci.

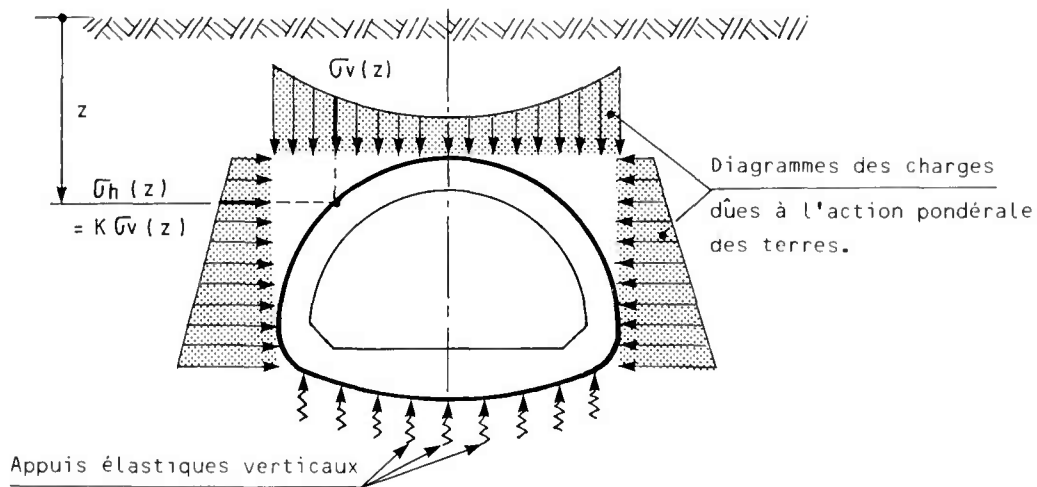


Figure 3.23. :Schématisation de calcul de type "cadres"

. Si les déformations transversales de la buse sont plus faibles (variations de la portée et/ou de la flèche inférieures à 4 à 5% au plus des valeurs initiales) et tout-à-fait stabilisées, que la nature des matériaux de remblais est conforme aux exigences habituelles (Cf. document de Recommandations) et que leurs qualités géotechniques sont satisfaisantes (ce que traduisent généralement des valeurs faibles des déformations) la structure de renforcement peut être justifiée en tenant compte de la possibilité pour celle-ci de mobiliser des réactions de butée partielle de la part des remblais latéraux. Dans ce cas deux schématisations de calcul peuvent être envisagées :

La première consiste à admettre le même état initial de chargement que précédemment (sous charges permanentes), en modélisant toutefois les remblais latéraux par exemple par des ressorts indépendants de raideur K_h , de manière à ce qu'ils puissent opposer une réaction de butée lorsqu'ils sont comprimés, c'est-à-dire lorsque la structure de renforcement, dans la recherche de son état d'équilibre, se déplace vers ces remblais (Cf. Figure 3.24.). Dans cette modélisation, la raideur K_h des ressorts horizontaux peut être calculée à partir d'une valeur représentative du module pressiométrique des remblais, que l'on affectera d'un coefficient de réduction au moins égal à 2.

Etat de chargement initial identique au cas 1

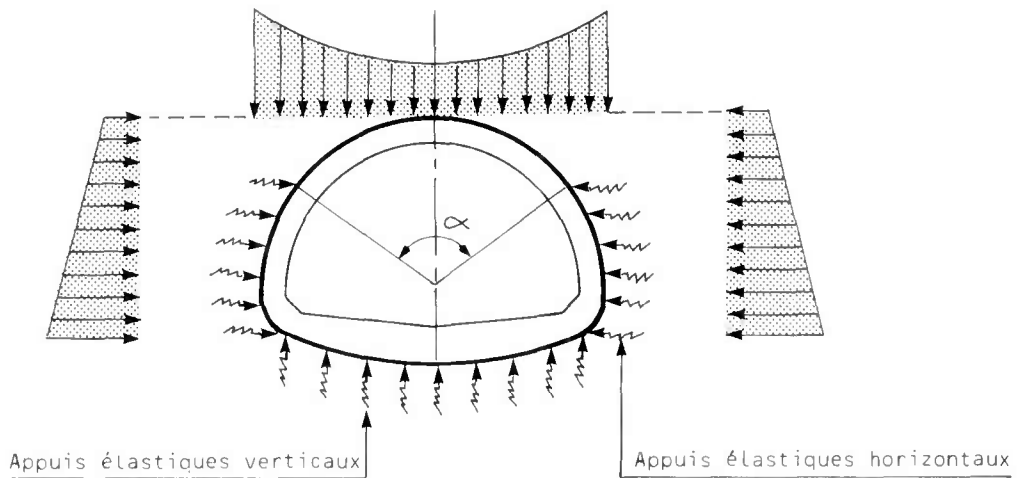


Figure 3.24.: Schématisation de calcul avec ressorts latéraux

La seconde schématisation est la même que la première, sauf en ce qui concerne l'état initial (sous l'action pondérale des remblais), que l'on pourra admettre être celui qui règne autour de la buse existante dans sa situation actuelle (Cf. Figure 3.25.). Cette seconde schématisation, qui permet en principe d'optimiser l'importance de la structure de renforcement, conduit à des calculs plus complexes puisqu'il y aura lieu de procéder à un premier calcul (du même type que pour la schématisation précédente) pour déterminer la distribution des efforts induits par les terres autour de la buse existante. Il est recommandé de ne l'employer que si les déformations de la buse sont faibles (inférieures à 2 % environ des valeurs initiales de la portée et/ou de la flèche) et totalement stabilisées, et que les matériaux de remblais sont reconnus homogènes et "performants" (modules pressiométriques mesurés supérieurs de 30 à 40 MPa environ).

Etat de chargement initial correspondant à celui existant autour de la buse sous l'action pondérale des terres .

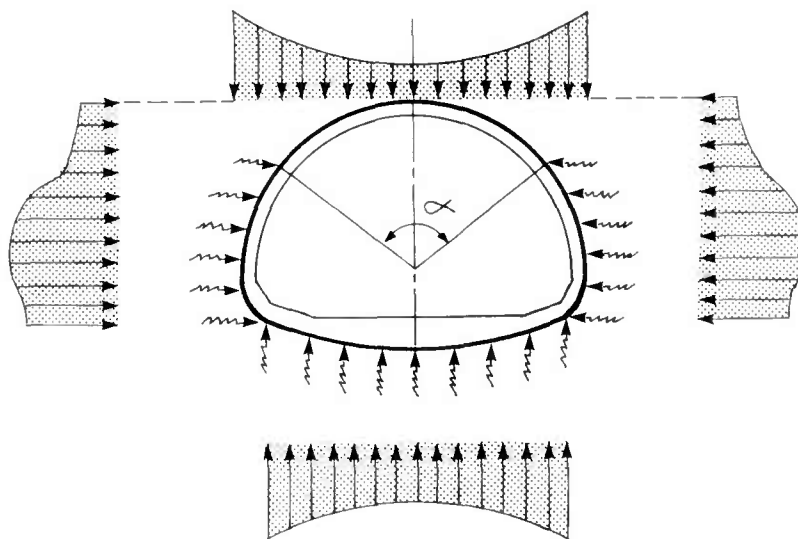


Figure 3.25. : Schématisation de calcul avec ressorts latéraux et réactions de butée

3.3.3. Remplacement d'une buse par un ou plusieurs tubes foncés

Dans certains cas il peut être envisagé de procéder au remplacement d'une buse métallique par un tube, ou par une batterie de tubes (deux ou plus), mis en place par fonçage. Une telle solution peut s'avérer bien adaptée (ou la seule possible) lorsque la hauteur de couverture est trop importante pour que le remplacement de l'ouvrage après terrassements puisse être réalisé dans des conditions économiques acceptables, qu'il est difficile ou impossible de procéder à une interruption ou à une restriction de la circulation sur les voies portées, ou encore qu'il est impossible de procéder à un renforcement de l'ouvrage existant qui conduirait à réduire de manière trop sensible le débit hydraulique ou le gabarit de celui-ci.

Les conduits sont généralement constitués d'éléments préfabriqués en béton armé de 2,00 m à 6,00 m de longueur environ. Ces éléments sont descendus dans la chambre de fonçage, positionnés puis foncés dans le sol à l'avancement, le fonçage s'effectuant à l'aide d'un vérin hydraulique dont la puissance est adaptée aux efforts à vaincre. Ces derniers sont estimés en fonction notamment du diamètre du conduit, de sa longueur totale, et de la nature et des qualités des terrains concernés. Le vérin s'appuie sur un massif de réaction ou de butée, le plus souvent constitué par le terrain en place ou par un massif de remblai soigneusement compacté.

Il est possible de concevoir de foncer le conduit au droit de l'ouvrage existant ou à proximité de celui-ci.

Dans le premier cas, le tube est foncé à l'emplacement de l'ouvrage existant, celui-ci étant démonté et extrait au fur-et-à-mesure de l'avancement du fonçage. Le démontage de la buse par tronçon ou par anneaux peut se faire en avance par rapport au fonçage, auquel cas il convient de bien s'assurer de la tenue du terrain sur la longueur concernée, ou en retard par rapport à celui-ci. Dans ce dernier cas, il est nécessaire naturellement que le diamètre intérieur du tube soit supérieur à celui de la buse existante. Dans tous les cas, le procédé ne peut généralement convenir que si celle-ci ne présente pas une déformation longitudinale excessive. Les figures 3.26. et 3.27. illustrent un cas de remplacement d'une buse de 1,00 m de diamètre et de 42 m de longueur, fortement corrodée, par un conduit béton, foncé au droit de celle-ci. Le premier tronçon muni d'une trousse coupante métallique a été mis en place à la grue puis foncé dans le sol au moyen d'une machine de fonçage s'appuyant sur un massif de réaction constitué d'un massif de remblai soigneusement compacté soutenu par un rideau de palplanches métalliques. Une fois un élément entièrement foncé, le suivant était descendu dans la chambre de fonçage, positionné puis assemblé au précédent avant d'être foncé à son tour. La buse en place a été découpée et extraite au fur-et-à-mesure de l'avancement, légèrement en avance par rapport au tube (de 1,00 à 1,20 m environ).

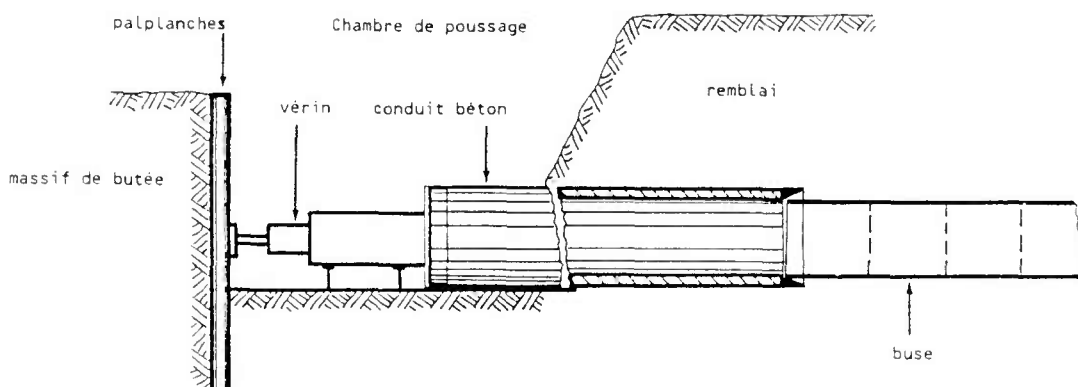


Figure 3.26. : Schéma de principe de la technique "fonçage horizontal concentrique"



Figure 3.27. : Phase de poussage - Extraction de remblai

Dans le second cas, plus classique, où le conduit est foncé à côté de l'ouvrage existant, il est nécessaire de procéder à une modification (ou à un aménagement) du tracé de la voie ou du cours d'eau franchi, et à la neutralisation de la buse en place (par exemple par remplissage par un remblai traité ou non, ou par un gros béton). Ce cas présente l'avantage d'offrir la possibilité de concevoir la réalisation d'une batterie de conduits de plus faible diamètre que l'ouvrage existant, si les conditions hydrauliques le permettent. Une telle disposition impose de placer les conduits à une certaine distance les uns des autres (en principe un demi-diamètre environ) pour tenir compte des déviations éventuelles et permettre un fonctionnement mécanique correct de ces derniers.

A notre connaissance, et probablement pour des raisons économiques, qui tiennent au coût généralement élevé du procédé par rapport à d'autres solutions, l'emploi de conduits mis en place par fonçage en remplacement de buses existantes reste essentiellement limité pour l'heure aux ouvrages de faible diamètre (ouvrages d'assainissement), dans des situations où il n'est pas possible de procéder à une restriction de la circulation sur les voies portées. Il convient de souligner toutefois que, d'un point de vue purement technique, le fonçage peut permettre la mise en place de conduits de fort diamètre (assez couramment jusqu'à 4 m environ), sur des longueurs importantes.

3.3.4. Autres solutions de remplacement

On dispose généralement d'un assez large éventail de solutions pour remplacer une buse dès lors qu'il est possible d'interrompre totalement la circulation sur les voies portées ou sur une partie de celles-ci (en principe une demi-chaussée) durant les travaux.

Le choix d'une solution ou d'un type de solution est alors dicté par les possibilités qui sont offertes à cet égard, par les contraintes liées à l'exploitation de l'ouvrage lui-même (possibilité de travailler à sec ou d'interrompre une circulation sur une voie franchie), les contraintes d'accès au site, et des considérations d'ordre technique liées principalement aux dimensions transversales de l'ouvrage existant et à la hauteur des remblais de couverture. Ainsi le maintien de la circulation sur une partie des voies portées impose généralement de réaliser l'ouvrage par demi-ouvrage, ce qui pourra s'avérer particulièrement difficile si la hauteur de couverture est importante (soutènement provisoire des remblais des voies maintenues en circulation).

Par ailleurs, la nécessité de réaliser les travaux dans un délai le plus court possible conduira généralement à opter pour des structures constituées d'éléments préfabriqués, si les conditions d'accès le permettent.

Les solutions présentées ci-après sont les plus couramment employées. Il est important toutefois de souligner que quelle que soit la solution envisagée, il sera nécessaire dans tous les cas de procéder à une reconnaissance géotechnique suffisante et bien adaptée à celle-ci.

a) - Remplacement par une autre buse métallique

Il peut être envisagé de remplacer l'ouvrage existant par une autre buse métallique. Il y aura lieu toutefois de bien s'assurer que les dispositions adoptées permettent de se prémunir **efficacement** des causes qui sont à l'origine des désordres constatés sur l'ouvrage existant. On pourra utilement se reporter au document de Recommandations.

b) - Ouvrage en béton armé

Cette solution consiste à remplacer l'ouvrage existant, après enlèvement de celui-ci, par un ouvrage en béton armé coulé en place (portique, cadre, ouvrage voûté, ...) ou constitué d'éléments préfabriqués en usine (tuyau, portique, cadre, conduit Matière, ...).

Le recours à une telle solution n'impose pas nécessairement une interruption totale de la circulation, sa réalisation pouvant également se concevoir par demi-chaussée. Dans ce cas il sera toutefois nécessaire en général de prévoir le blindage provisoire des terres portant la chaussée maintenue en circulation, ce qui constitue une opération délicate à réaliser et onéreuse dès que la hauteur des terres à soutenir dépasse quelques mètres. Ainsi, et sauf situations très particulières, il sera généralement indispensable de réaliser l'ouvrage en une seule phase avec interruption totale de la circulation dès que cette hauteur excèdera 5 ou 6 m.

Dans tous les cas, il est nécessaire de procéder à des terrassements pour dégager et enlever l'ouvrage existant (en une fois ou par parties), puis de préparer soigneusement l'assise qui recevra le nouvel ouvrage. Il y aura lieu de réceptionner la fouille, comme pour tout ouvrage neuf du même type, en faisant procéder si nécessaire à une reconnaissance complémentaire.



Figure 3.28. : Terrassements pour enlever l'ouvrage existant



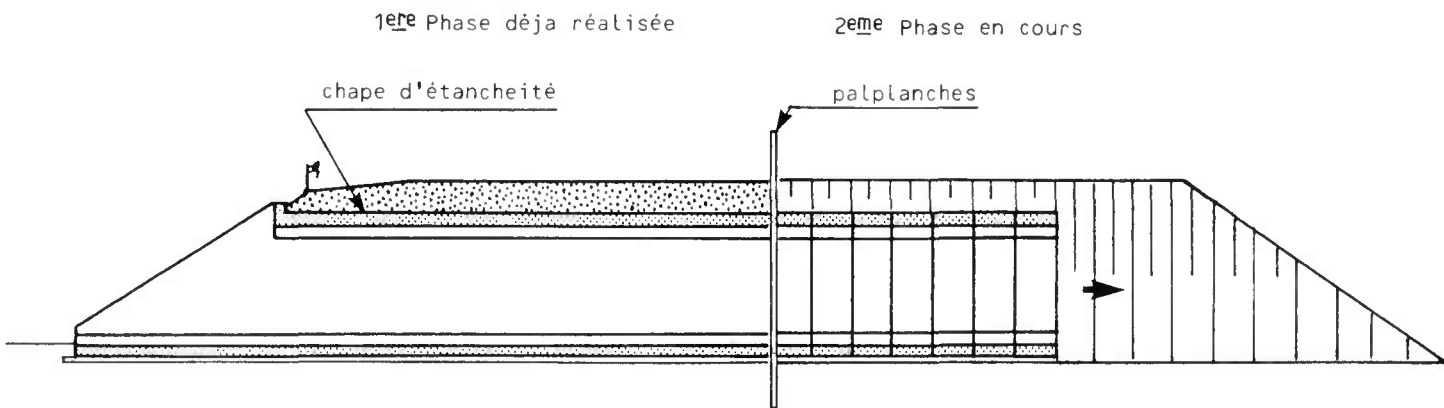
Figure 3.29. : Mise en place d'un élément longitudinal



Figure 3.30. : Détail du soutènement provisoire

D'une manière générale, l'emploi d'éléments préfabriqués présente l'avantage de permettre une réalisation rapide de l'ouvrage, et de ce fait est tout-à-fait bien adapté, compte tenu de l'importance des délais, dès lors que la circulation est interrompue sur une ou plusieurs voies de circulation. Les figures 3.29. à 3.31. illustrent le cas d'une buse elliptique à grand axe vertical (diamètre moyen 2,90 m, longueur au radier 37 m, hauteur de couverture 1,5 m) qui présentait des désordres graves (importantes déchirures longitudinales des tôles au droit des trous de passage des boulons et poinçonnement des tôles par des boulons, accompagnés de déformations de la chaussée), justifiant son remplacement. Il a été opté pour un cadre en béton armé préfabriqué de 3,60 m par 3,60 m de section, constitués d'éléments standards de 1,00 m de longueur unitaire. Compte tenu de la faible hauteur de couverture, l'ouvrage a pu être réalisé en deux phases (par demi-chaussée); le remblai de couverture portant la chaussée maintenue en circulation a été soutenu par un blindage constitué de palplanches métalliques.

COUPE LONGITUDINALE



COUPE TRANSVERSALE

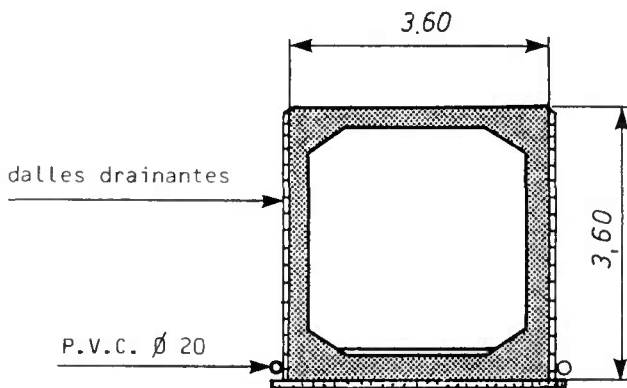


Figure 3.31. : Coupes longitudinale et transversale



Figure 3.32. : Effondrement d'une partie de la chaussée



Figure 3.33. : Enlèvement de la buse à la grue

c) - Portique en palplanches métalliques

L'ouvrage est un portique dont chaque piédroit, constitué d'un rideau de palplanches métalliques, est (généralement) encastré dans une dalle en béton armé coulée en place.

Ce type de structure est bien adapté pour des portées de 2,5 m à 10 m environ, et des hauteurs vues de piédroits n'excédant pas 5 à 6 m au plus. Il ne peut être envisagé toutefois que si le sol sous la buse n'est pas trop dur de façon à autoriser le battage des palplanches. En revanche, si les qualités du sol sont trop médiocres, il pourra s'avérer nécessaire dans certains cas d'intégrer aux piédroits des caissons de palplanches pour accroître leur capacité portante, leur rigidité ou leur résistance. Cette solution de portique en palplanches peut présenter deux variantes d'exécution.

La première, tout-à-fait classique par rapport aux solutions présentées précédemment, consiste à enlever l'ouvrage existant avant battage des rideaux de palplanches, et ce si nécessaire par demi-chaussée.

La seconde, qui illustre davantage l'intérêt de cette solution de portique en palplanches, consiste à battre celles-ci (d'une traite ou par demi-chaussée), à couler la dalle par demi-chaussée en s'appuyant à même le sol, puis à démonter en sous-œuvre l'ouvrage existant.

Les principaux avantages que présente ce mode d'exécution sont d'une part, un maintien aisé de la circulation sur une demi-chaussée durant les travaux et, d'autre part, le rétablissement de la circulation sur l'ensemble de la chaussée dans les délais les plus courts. Il permet par ailleurs de s'affranchir de toute sujétion de coffrage et d'étaie pour réaliser la dalle de couverture. En contre-partie, le démontage et l'enlèvement en sous-œuvre de la buse existante est plus difficile. En outre, il sera nécessaire dans tous les cas d'implanter les rideaux de palplanches à une distance (de nu à nu) de 0,60 à 1,0 m au moins de la paroi de la buse.

Il est à noter enfin qu'une solution de portique en palplanches métalliques peut s'avérer dans certains cas bien adaptée même si la corrosion des tôles est la principale cause de ruine de l'ouvrage existant, dans la mesure où il est généralement possible de choisir le profil des palplanches pour disposer d'une épaisseur d'acier sacrifiée à la corrosion suffisante.

Les figures 3.32. à 3.34. illustrent un cas de réalisation d'un portique en palplanches en remplacement d'une buse métallique de 15 ans d'âge environ. Celle-ci a péri au cours d'une crue à la suite d'un phénomène hydraulique de soulèvement de l'extrémité amont qui a entraîné l'affouillement des remblais latéraux en sable et l'effondrement de la chaussée. Compte tenu de la situation, il était naturellement nécessaire dans le cas présent de déblayer et d'enlever la buse avant de procéder à la réalisation du portique. Ces opérations ont pu être réalisées sans procéder à la mise à sec de la fouille.

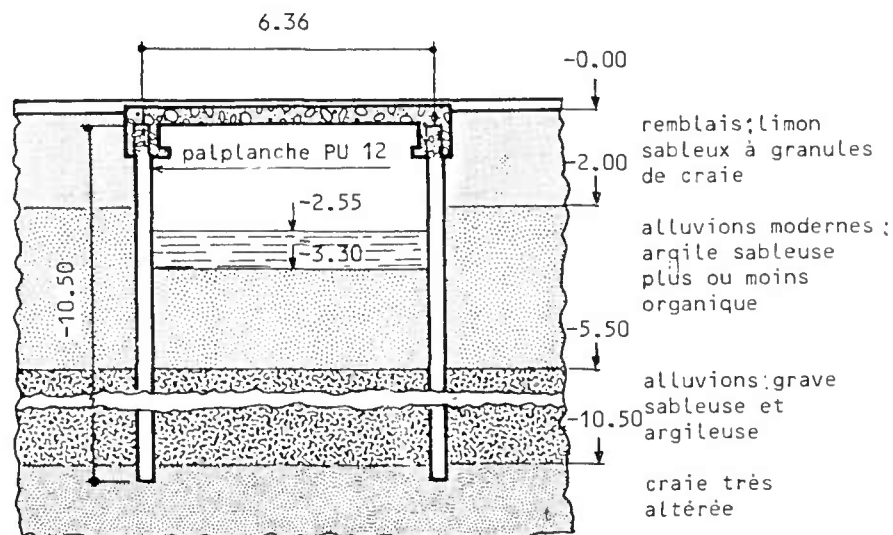


Figure 3.34. : Coupe transversale

Page laissée blanche intentionnellement

Ce document est un guide pour la surveillance spécialisée, l'entretien et la réparation des buses métalliques.

Il met plus particulièrement l'accent sur le problème de la corrosion, principale cause de dégradation des ouvrages et sur les solutions de renforcement qui peuvent être mises en œuvre aujourd'hui.

Il s'adresse aux gestionnaires de tels ouvrages et de manière plus générale à tous ceux qui auront la charge :

- de programmer des actions de surveillance ou de procéder à celles-ci,
- d'établir un diagnostic sur l'état d'un ouvrage,
- de concevoir ou de mettre en œuvre des solutions d'entretien spécialisé, de renforcement ou de remplacement des ouvrages.

This document is a guide for the relevant survey, maintenance and repair of steel culverts.

It especially emphasises the problem of corrosion, main damage cause of the structures, and the reinforcement solutions that may be implemented today.

It is meant for the operators of such structures and, more generally, for all those who are in charge of :

- *planning the survey programs, or carrying out the surveys,*
- *producing a diagnosis of the state of a structure,*
- *designing or implementing specialised maintenance, reinforcement or exchange solutions.*