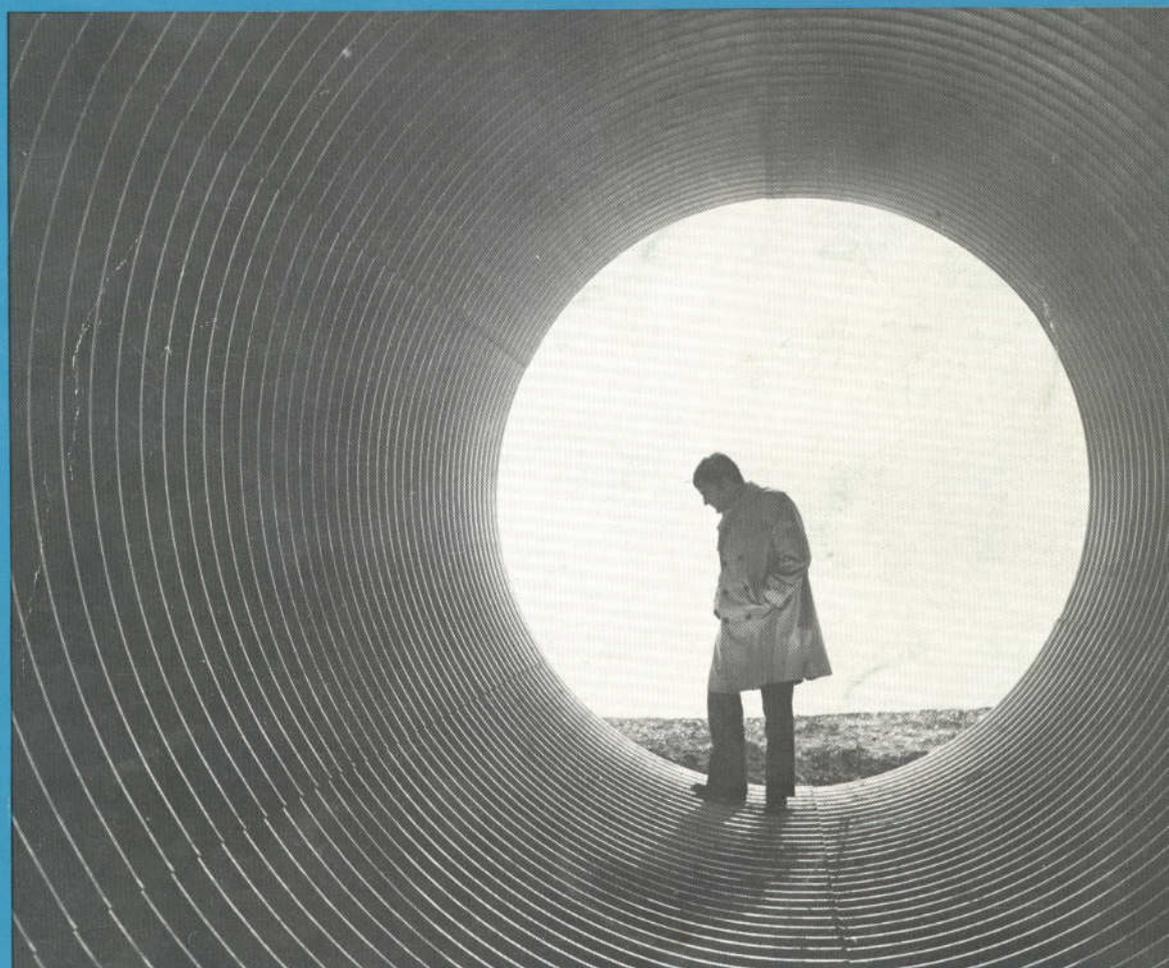


MINISTERE DES TRANSPORTS
DIRECTION GENERALE DES TRANSPORTS INTERIEURS

Buses métalliques

Recommandations
et règles de l'art



DIRECTION DES ROUTES ET
DE LA CIRCULATION ROUTIERE

MINISTERE DES TRANSPORTS
DIRECTION GENERALE DES TRANSPORTS INTERIEURS



DIRECTION DES ROUTES ET
DE LA CIRCULATION ROUTIERE

MINISTÈRE DES TRANSPORTS
DIRECTION GÉNÉRALE DES TRANSPORTS INTÉRIEURS

Direction des Routes et de la Circulation Routière - 244, Bd Saint-Germain - 75775 PARIS CEDEX 16

Buses métalliques

Recommandations et règles de l'art

Septembre 1981

Document réalisé et diffusé par

le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
58 bd Lefebvre - 75732 PARIS CEDEX 15

le Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes
46 avenue Aristide Briand - 92223 BAGNEUX

LCPC

SETRA

Ont assuré la rédaction de ce document :

MM.	ANDRE	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
	FERREIRA	S.E.T.R.A. Division des Ouvrages d'Art
	HAIUN	S.E.T.R.A. Division des Ouvrages d'Art
	LONG	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
	MILLAN	S.E.T.R.A. Division des Ouvrages d'Art
	RAHARINAIVO	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
	SCHAEFFNER	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
	SOUCHE	S.E.T.R.A. Division des Ouvrages d'Art

Ont participé à son élaboration :

MM.	BAUDE	Société ARVAL
	CHILOT	Société ARMCO
	DAMIANICH	Société des BITUMES SPECIAUX
	HABIB	Ecole Polytechnique
	MARCHAL	Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Lyon
	NOURISSON	D.D.E. du Tarn et Garonne
	PILOT	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
Mme	PLOUZEAU	S.E.T.R.A. Division des Ouvrages d'Art
Mme	RENAULT	SCETAUROUTE

MINISTÈRE DES TRANSPORTS

**DIRECTION GENERALE
DES TRANSPORTS INTERIEURS**

**DIRECTION DES ROUTES
ET DE LA CIRCULATION ROUTIÈRE**

SERVICE D'ETUDES TECHNIQUES
DES ROUTES ET AUTOROUTES
S.E.T.R.A.

J. BERTHIER

Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées

DIRECTEUR

46, Avenue Aristide Briand - B.P. 100
92223 BAGNEUX - Tél. 664.14.77
TELEX 260763 SETRA BAGNX

BAGNEUX, LE 22 Juillet 1981

Le Directeur du Service d'Etudes
Techniques des Routes et Autoroutes

à

- Messieurs les Directeurs Départementaux
de l'Equipement
 - Messieurs les Directeurs des Centres
d'Etudes Techniques de l'Equipement
-

Référence à rappeler :

OBJET: Buses métalliques -
Recommandations et règles de l'art.

Les avantages économiques et fonctionnels que peuvent présenter les buses métalliques justifient l'intérêt qui a pu leur être porté dans le cadre d'utilisations de plus en plus ambitieuses, allant jusqu'au rétablissement de voies secondaires sous remblais de routes ou d'autoroutes.

Cette technique, initialement empirique et limitée à des ouvrages de drainage de faibles dimensions, s'est considérablement affinée et développée au cours des trente dernières années, les plus grands ouvrages réalisés en France à l'heure actuelle atteignant une portée de 10,50 m.

Malgré leur apparence simple et robuste, confirmée par plusieurs milliers d'ouvrages en service, les buses métalliques posent des problèmes délicats de conception, de calcul et d'exécution lorsque leurs dimensions atteignent certaines limites. Le recours de plus en plus fréquent à cette technique pour la réalisation d'ouvrages importants rendait donc à lui seul nécessaire la parution de recommandations précises et complètes. Le contexte commercial du marché de ce type de matériel, régi par un très faible nombre de fournisseurs, justifiait par ailleurs l'existence d'un document permettant aux Maîtres d'Oeuvre d'apprécier et de comparer en connaissance de cause la validité des offres qui leur sont faites.

Un groupe d'ingénieurs du S.E.T.R.A. et du L.C.P.C., assisté par des représentants de divers organismes de l'Administration et de la Profession a été chargé de rédiger le présent document, qui s'applique aux ouvrages relevant de la Direction des Routes et de la Circulation Routière.

L'un des principaux éléments nouveaux qui y ont été introduits concerne l'importance qu'il y a lieu d'attacher au choix et à la mise en oeuvre du matériau de remblai entourant les buses, celui-ci devant être considéré comme l'un des constituants essentiels de l'ouvrage, au même titre que les éléments métalliques eux-mêmes. Les recommandations correspondantes résultent directement des recherches effectuées, notamment par les Laboratoires des Ponts et Chaussées, sur la durabilité des métaux enterrés et sur le compactage des matériaux de remblai, ces dernières recherches ayant donné lieu par ailleurs à la publication des Recommandations pour les Terrassements Routiers, qui vous ont été antérieurement adressées.

Les directives et recommandations contenues dans ce document ont été élaborées en tenant compte de l'état actuel de la technologie, elles présentent de ce fait un caractère évolutif et pourront être ultérieurement modifiées en fonction des transformations technologiques et de l'expérience acquise lors de leur application. En particulier, pour les ouvrages de grandes dimensions, l'étude de la stabilité des extrémités reste encore en grande partie empirique et requiert une intervention particulière du sens critique des ingénieurs.

L'Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées
Directeur du Service d'Etudes Techniques
des Routes et Autoroutes



J. BERTHIER

Sommaire

AVANT-PROPOS		7
CHAPITRE 1	PRESENTATION DE LA TECHNIQUE	9
1.1	Généralités	9
1.2	Divers cas d'emploi	11
CHAPITRE 2	DISPOSITIONS TECHNOLOGIQUES GENERALES	15
2.1	Formes et dimensions des sections droites	15
2.2	Types d'ondulations	20
2.3	Types de joints	21
CHAPITRE 3	CONCEPTION DES OUVRAGES	25
3.1	Caractères généraux	25
3.2	Dispositions constructives générales	29
3.3	Conception des ouvrages hydrauliques	46
3.4	Conception des ouvrages non hydrauliques	54
3.5	Classification des ouvrages	58
3.6	Ouvrages de conception non courante	59
CHAPITRE 4	JUSTIFICATION TECHNIQUE DES BUSES METALLIQUES	61
4.1	Comportement	61
4.2	Principe des justifications	66
4.3	Justifications en phase définitive	66
4.4	Justifications en phase de construction	71
4.5	Choix de l'épaisseur	73
CHAPITRE 5	CHOIX DES MATERIAUX - DURABILITE	75
5.1	Phénomènes de corrosion et d'abrasion	75
5.2	Qualités du matériau de remblai	77
5.3	Qualités des fournitures métalliques	85
5.4	Nature et qualités des protections vis-à-vis de la corrosion	86
5.5	Réserve d'épaisseur d'acier	90
5.6	Protections supplémentaires	91
CHAPITRE 6	MISE EN OEUVRE	93
6.1	Avant le début des travaux	94
6.2	Durant les travaux	97
CHAPITRE 7	PATHOLOGIE - REPARATION	115
7.1	Nature et origine des principaux désordres	116
7.2	Réparation	126
ANNEXES		
1	Fiches techniques des matériels	129
2	Calcul du débouché hydraulique	143
3	Modes opératoires	175

Il s'ensuit que certaines réalisations faisant appel à la technologie des buses métalliques mais ayant par ailleurs un mode de fonctionnement par trop particulier se trouvent totalement exclues du domaine d'application du présent document. On peut citer notamment:

- les reprises en sous-oeuvre de voûtes en maçonnerie, de tunnels ou d'autres buses métalliques;
- les ouvrages soumis à des efforts particuliers, tels que les ouvrages chargés par un remblai notablement incliné dans le sens transversal (plus de 10%) et ceux présentant une forte pente longitudinale (plus de 10% également).

Ces types d'ouvrages ne pourront être envisagés qu'à l'issue d'une étude spécifique prenant en compte les conditions particulières de leur fonctionnement et permettant de définir leur dimensionnement, leur mode d'exécution ainsi que les adaptations technologiques éventuelles à apporter.

Par ailleurs, bien que la plupart des dispositions générales leur restent applicables dans l'esprit, certains ouvrages devront faire l'objet d'une étude particulière plus ou moins importante en ce qui concerne leur dimensionnement ou leurs conditions d'exécution, soit parce que leur mode de fonctionnement s'éloigne des conditions habituellement rencontrées, soit pour des raisons extérieures à l'ouvrage lui-même. On retiendra principalement:

- les ouvrages sur sols très compressibles;
- les ouvrages supportant des hauteurs de remblai supérieures à 20m;
- les buses de forme peu courante telles que les arches constituées de tôles cintrées suivant plusieurs rayons de courbure différents ou les ouvrages très surbaissés (rapport flèche sur portée inférieur à 0,6);

Bien qu'étant plus particulièrement orienté vers le cas des ouvrages de grandes dimensions, le domaine d'application de ce document recouvre l'ensemble des buses dont les formes sont décrites en 2.1 et faisant appel à la technologie des joints à recouvrement boulonné (cf § 2.3.1). Il constitue un ensemble indissociable dans le sens que les prescriptions relatives à la justification des ouvrages ne peuvent pas être considérées comme suffisantes si les règles de conception ou les précautions de mise en oeuvre énoncées sont transgressées. On peut citer notamment:

- le respect de la hauteur de couverture minimale (cf § 3.2.1.5);
- le respect des angles de coupe limites et des conditions de raidissement des extrémités des ouvrages (cf § 3.2.3.2).

En ce qui concerne l'utilisation pratique du document, les parties particulièrement importantes, dont la lecture est indispensable, ont été soulignées en marge. Certains paragraphes, quant à eux, sont présentés sous trame grise; ils constituent des clauses-types destinées à faciliter la rédaction des Cahiers des Clauses Techniques Particulières (CCTP).

INTERVENTION DES SERVICES SPECIALISES

De façon à permettre de profiter de l'expérience acquise, et à tirer le plus d'enseignements possibles des réalisations à venir, il est souhaitable que le SETRA et le LCPC soient informés des projets importants (buses de grande portée, sous forte hauteur de remblai,...) et cela le plus en amont possible de leur élaboration. Il est d'ailleurs fortement recommandé aux Maîtres d'Oeuvre de ne pas hésiter à solliciter l'avis des services spécialisés (CETE, SETRA, LCPC) lorsque se présentent des problèmes particuliers de conception, de choix des matériaux ou de mise en oeuvre.

Présentation de la technique

1.1 - GENERALITES

Les buses métalliques sont des ouvrages préfabriqués en acier, leur principale application en génie civil étant de ménager sous la surface du sol une réservation cylindrique. Leur section droite est un contour géométrique fermé dans la plupart des cas, sauf en ce qui concerne les "arches" métalliques, qui sont fondées à leur partie inférieure sur des piédroits ou sur un radier en béton armé. Ces ouvrages sont généralement constitués d'éléments préfabriqués nécessitant presque toujours un assemblage sur le chantier. Cet assemblage peut être fait suivant les cas par boulonnage, agrafage ou rivetage, ces deux derniers modes de fixation étant à l'heure actuelle en voie de disparition. Dans tous les cas, les tôles constitutives sont ondulées et cintrées de façon plus ou moins marquée afin de donner à la paroi de l'ouvrage la rigidité et la forme requises.

Les dimensions intérieures nettes horizontales qui peuvent être obtenues avec ce type de matériel vont de la cinquantaine de centimètres à la quinzaine de mètres: c'est-à-dire que la gamme d'application s'étend depuis le simple tuyau de drainage jusqu'au passage inférieur de dimensions relativement importantes.

Le mode de fonctionnement en service résulte de l'association de deux milieux:

- les terres environnantes: fondation, remblais latéraux, couverture;
- le coffrage métallique que constitue la buse une fois ses divers éléments assemblés.

Ce coffrage étant souple, bien qu'une certaine rigidité lui soit conférée par les ondulations, sa déformabilité permet une évolution de l'orientation du champ des contraintes dans les terres environnantes. A la différence des ouvrages rigides, les buses flexibles vont solliciter les remblais contigus en butée. Leur principe de fonctionnement est donc fondé sur une utilisation judicieuse de l'action favorable potentielle des remblais latéraux. Il en résulte d'une part que des déformations modérées de la buse sont naturelles et d'autre part que le matériau constituant les terres environnantes doit satisfaire à certaines caractéristiques du point de vue de la résistance mécanique pour que ces déformations restent dans des limites tolérables.

Cette recherche de la mobilisation optimale des performances mécaniques des différents matériaux en présence (sol, acier) fait que ces ouvrages méritent un soin particulier tant du point de vue de leur conception (choix de l'emplacement, de la forme, vérification quant à la résistance mécanique, à la durabilité...) que de celui de leur exécution. Cependant, la possibilité d'adaptation qui leur est conférée par leur souplesse rend ces ouvrages robustes et fiables lorsqu'ils ont été correctement conçus et réalisés.



Figure 1.1

- Ouvrage hydraulique double

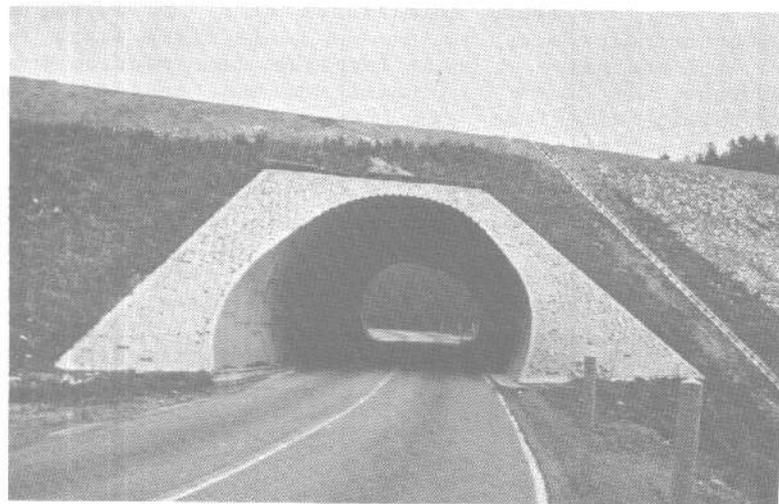


Figure 1.2

- Rétablissement de route secondaire

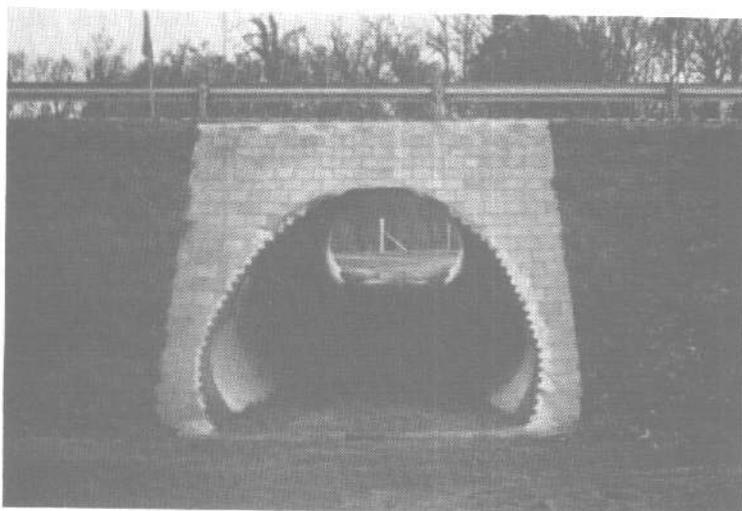


Figure 1.3

- Rétablissement de circulation agricole

1.2 - DIVERS CAS D'EMPLOI

Les principaux avantages que peuvent présenter les buses métalliques sont essentiellement:

- une flexibilité longitudinale plus grande que celle des ouvrages traditionnels, qui leur permet de supporter certaines déformations;
- une bonne aptitude à porter des charges de remblai élevées;
- une certaine rapidité de construction, directement liée à la pré-fabrication;
- une grande facilité de transport et d'assemblage;
- une gamme de dimensions et de formes très étendue;
- une possibilité de démontage et de réemploi.

Sous réserve que les critères de conception abordés dans le présent document soient satisfaits, l'emploi de buses métalliques pourra donc s'avérer bien adapté dans les cas suivants:

- cas où il est souhaitable que l'ouvrage puisse supporter certaines déformations (ces déformations doivent en tout état de cause être limitées et avoir été prévues);
- forte hauteur de remblai (pour les formes peu surbaissées);
- ouvrage devant être construit très rapidement (notamment pour assurer le transport des matériaux de remblai du chantier);
- ouvrage en site d'accès difficile;
- ouvrage provisoire éventuellement réemployé;
- et, de façon générale, lorsqu'une telle solution permet de réaliser une économie suffisante et que l'aspect esthétique est secondaire.

1.2.1 - Ouvrages définitifs

1.2.1.1 - Ouvrages hydrauliques

C'est dans cette catégorie d'ouvrages que les dimensions présentent la gamme la plus étendue. Les buses métalliques sont en effet employées aussi bien pour la collecte d'eaux de drainage que pour assurer l'écoulement d'un cours d'eau à part entière.

Elles peuvent constituer un recours intéressant dans les cas suivants:

- rétablissement de cours d'eau et thalwegs sous remblais;
- élargissement ou confortation d'ouvrages existants;
- ouvrages évacuateurs de crues situés sur le lit majeur d'un cours d'eau.

Rappelons que dans ce domaine d'emploi on rencontre aussi les buses béton, les arches, les cadres et les dalots.

1.2.1.2 - Ouvrages non hydrauliques

Le recours à une solution en buse métallique pour des ouvrages non hydrauliques peut concerner notamment les cas suivants:

- rétablissement de chemins et routes secondaires, pour lesquels sont généralement utilisées des buses métalliques de dimensions moyennes à grandes;
- rétablissements de circulation agricole (désenclavement de propriétés, passages à bestiaux);



Figure 1.4

- Passage à bestiaux

Figure 1.5

- Passage souterrain
pour piétons

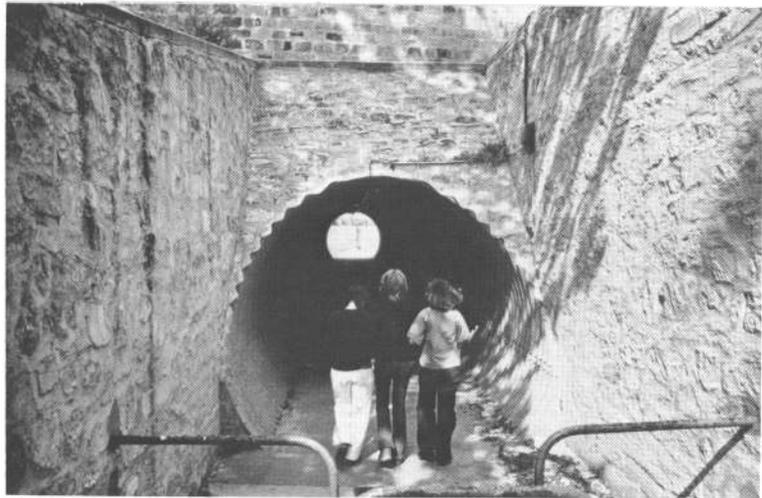


Figure 1.6

- Elargissement d'un
ouvrage existant

- passages à gibier: il s'agit d'ouvrages écologiques destinés à empêcher que les différentes voiries aient un impact néfaste sur la faune (cet usage peut être combiné au précédent);
- passages souterrains pour piétons;
- prolongation ou renforcement d'ouvrages existants dans le cadre d'élargissements de plateforme ou de réparation d'ouvrages (ponts en maçonnerie surtout mais aussi buses etc...);
- remblai alvéolaire: elles peuvent servir à alléger un remblai.

1.2.1.3 - Ouvrages mixtes

Pour certains ouvrages à destination non spécifiquement hydraulique, il est possible d'envisager un fonctionnement hydraulique par intermittence, ce qui peut être le cas pour des ouvrages évacuateurs de crue par exemple. Pour que cette double utilisation soit effectivement possible, il faut cependant prévoir un entretien particulier, les matériaux déposés pendant les crues risquant de rendre l'ouvrage impraticable à la longue.

1.2.2 - Ouvrages provisoires

A certaines phases de réalisation d'infrastructures routières, des ouvrages provisoires doivent quelquefois être prévus pour assurer le détournement ou le maintien d'un écoulement, qu'il s'agisse d'un trafic roulant ou d'un écoulement liquide.

Les buses métalliques sont assez bien adaptées à ce type d'utilisation car leur mise en oeuvre peut être rapide et leurs éléments facilement démontés et stockés. Lorsque la hauteur de remblai devient importante, cette solution perd toutefois une partie de son intérêt en raison du volume élevé de matériaux mis en jeu.

Cette utilisation peut être particulièrement intéressante lorsque le réemploi de la buse ne nécessite pas son démontage complet, mais un simple transport en une seule pièce ou par éléments complets, ce qui ne peut être obtenu que lorsque les dimensions de l'ouvrage restent modestes et permettent une manutention facile et sans risque des éléments.

Il faut noter que ces ouvrages, du fait de leur durée d'utilisation réduite, font l'objet de règles de dimensionnement particulières (cf § 5.5) et qu'il est en conséquence impératif de les démonter en fin de travaux. Si cette récupération s'avère trop coûteuse en raison, par exemple, d'une trop forte hauteur de remblai, l'ouvrage devra être ou bien conçu comme un ouvrage définitif, ou bien soigneusement comblé par un matériau bien compacté.

Dispositions technologiques générales

Du point de vue technologique, les buses métalliques peuvent essentiellement se caractériser, en section courante, par la forme et les dimensions de leur section droite, par les caractéristiques géométriques de leur paroi (épaisseur de l'acier, géométrie et dimensions des ondulations) et par le mode d'assemblage entre eux des éléments préfabriqués (types de joints).

Les caractéristiques technologiques des buses métalliques peuvent parfois varier sensiblement d'un fabricant à l'autre, ou au contraire être pratiquement identiques, ce qui peut s'expliquer par le fait que certaines dispositions technologiques initialement couvertes par des brevets ne le sont plus actuellement. On trouvera en annexe n°1 des fiches techniques relatives aux principaux produits commercialisés en France.

2.1 - FORMES ET DIMENSIONS DES SECTIONS DROITES

2.1.1 - Les buses circulaires

La forme circulaire, qui a été la première forme utilisée pour les conduites métalliques flexibles, reste encore de nos jours une des formes le plus couramment employées. Mécaniquement elle est la mieux adaptée, ce qui justifie que l'on cherche à y recourir lorsque les données fonctionnelles du projet le permettent, et notamment lorsque la hauteur de remblai est importante.

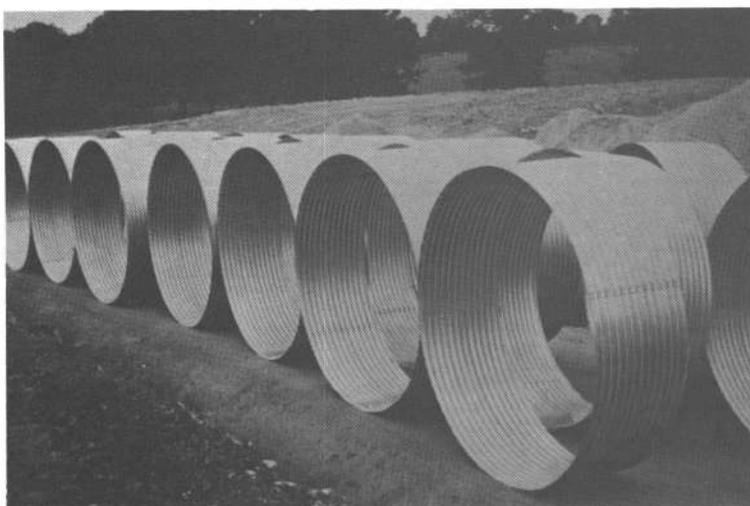


Figure 2.1

- Eléments de buses
circulaires

Les différents éléments (ou plaques) constituant une même buse dans une section donnée n'ont pas nécessairement même longueur d'arc mais ont même rayon de courbure, ce qui confère à cette forme de buse une certaine facilité de montage (fig. 2.1).

En ce qui concerne le diamètre des buses circulaires il existe une grande variété de dimensions pouvant atteindre jusqu'à 8 m environ à l'heure actuelle.

2.1.2 - Les buses «elliptiques» à grand axe vertical

Il s'agit ici de buses de forme dite elliptique, à grand axe disposé verticalement, qui sont constituées en réalité par l'assemblage de plaques préfabriquées cintrées suivant deux rayons de courbure différents (fig 2.2).

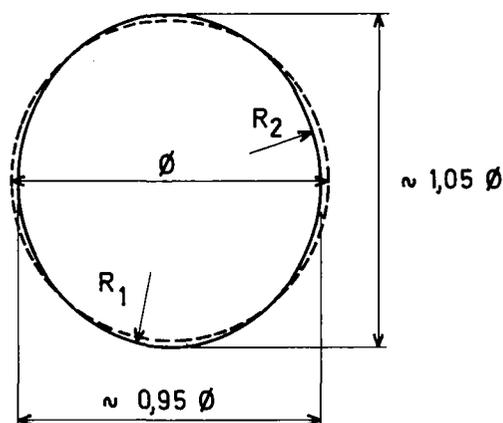


Figure 2.2 - Buse elliptique à grand axe vertical ($R_2 > R_1$)

Cette forme a été initialement conçue dans le but d'obtenir une forme proche du cercle une fois l'ouvrage chargé, notamment lorsque, pour diverses raisons, il est difficile ou même impossible de compacter correctement les remblais latéraux. Cependant, l'axe vertical présentant usuellement une dimension supérieure de 10% à celle de l'axe horizontal, l'obtention d'une forme quasi circulaire après chargement entraînerait dans la paroi de la buse des sollicitations inacceptables.

Les seuls avantages qu'elle présente par rapport à la forme circulaire, à diamètre nominal égal, sont un meilleur dégagement du gabarit vertical et, dans une moindre mesure, un comportement mécanique légèrement plus favorable en raison du rayon de courbure plus faible des plaques de sommet (cf chapitre 4).

2.1.3 - Les buses-arches (ou passages)

Les buses-arches et les passages sont des formes dites surbaissées qui se caractérisent par une dimension horizontale (ou portée), notée D, supérieure à leur plus grande dimension verticale (ou flèche), notée V. Elles sont obtenues par assemblage de plaques cintrées avec trois ou quatre rayons de courbure différents (fig 2.3).

On distingue habituellement pour ces buses trois rayons de courbure notés respectivement:

- R_S pour le rayon de courbure du sommet de la buse,
- R_r pour le rayon de courbure du radier,

- R_C pour le rayon de courbure des plaques dites de coin, qui assurent la continuité de la forme entre le sommet et le radier.

En pratique R_r est le plus grand des trois rayons de courbure, R_C étant le plus petit.



Figure 2.3 - Buse-arche

Les dimensions proposées par les fabricants pour ces types de buses sont également très variées et peuvent atteindre jusqu'à 12 m pour la portée.

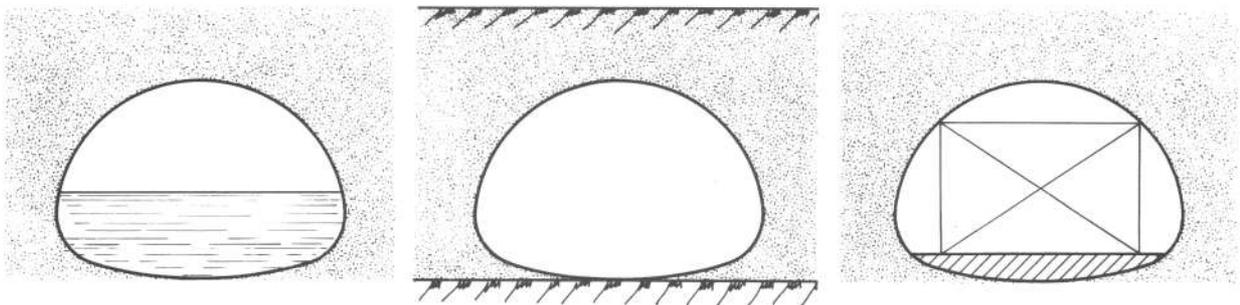
L'intérêt des formes surbaissées est multiple; il peut être hydraulique, dimensionnel ou fonctionnel (fig. 2.4).

Il est hydraulique lorsque la hauteur de la veine d'eau est faible, ce qui, pour des caractéristiques d'écoulement données, permet l'évacuation d'un débit plus élevé que ne le permettrait une forme circulaire.

Il est dimensionnel lorsque la hauteur du remblai est faible, afin de conserver au-dessus de la buse une épaisseur de remblai suffisante pour permettre une bonne répartition des charges mobiles.

Il est fonctionnel lorsqu'il s'agit d'inscrire dans l'ouvrage un gabarit de largeur plus grande que la hauteur, ce qui est presque toujours le cas pour les passages inférieurs routiers.

* Il faut toutefois noter que le comportement des ouvrages très surbaissés est mal connu. Pour cette raison, il est déconseillé à l'heure actuelle de projeter des ouvrages dont le rapport V/D soit inférieur à 0,6.



Débit élevé pour faible hauteur d'eau

Ouverture importante pour faible hauteur de remblai

Possibilité d'inscrire un gabarit plus large que haut

Figure 2.4 - Avantages des buses surbaissées

2.1.4 - Les buses «elliptiques» à grand axe horizontal

Il s'agit de buses de forme approximativement elliptique, à grand axe disposé horizontalement, qui sont en pratique constituées par l'assemblage de plaques cintrées suivant deux rayons de courbure différents (fig 2.5).

Elles se caractérisent par un surbaissement généralement plus accentué que celui des buses-arches et des passages, et par un comportement quelque peu différent, tant à la mise en oeuvre qu'une fois l'ouvrage en service.

Ce sont des formes assez peu courantes, surtout réservées aux ouvrages de grandes dimensions placés sous faible hauteur de remblai, les portées disponibles étant approximativement comprises entre 6 et 13 m à l'heure actuelle.

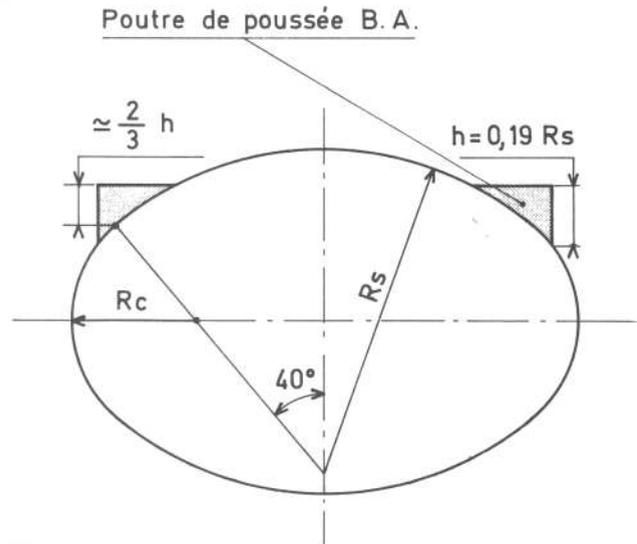
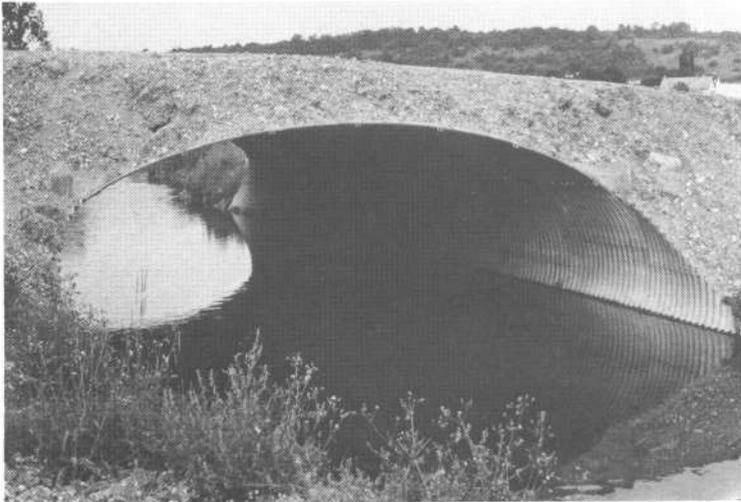


Figure 2.5 - Buse elliptique à grand axe horizontal avec poutre de poussée en béton armé

Le rayon de courbure des plaques de sommet d'une telle buse est en général plus grand que celui d'une buse-arche ou d'un passage de même portée. Cette particularité, associée au fait que ces ouvrages soient surtout utilisés pour de grandes portées, fait que leur sommet est sensible aux charges concentrées susceptibles d'être appliquées pendant la mise en oeuvre et le compactage de la partie supérieure des remblais latéraux de butée. Pour cette raison, et pour permettre le compactage intense indispensable des remblais latéraux, des dispositions constructives particulières doivent être adoptées. La plus connue en France est la "poutre de poussée", qui est un procédé breveté par la Société ARMCO.

Ce procédé consiste à réaliser une poutre longitudinale en béton faiblement armé solidaire de la structure et située à l'extérieur de la buse et de chaque côté de celle-ci, à la jonction entre l'arc du sommet et les parois latérales. Il existe d'autres procédés utilisés par certains fabricants, mais ils n'ont pas encore eu d'application en France à notre connaissance.

2.1.5 - Les arches

Les arches sont des contours ouverts obtenus par assemblage de plaques identiques à celles constituant les buses, et dont les extrémités sont fixées soit dans des piédroits en maçonnerie ou plus généralement en béton armé, soit directement dans un radier (fig 2.6). Le dispositif de fixation doit être conçu pour empêcher tout déplacement transversal de la paroi et assurer une répartition suffisante de l'effort normal pour éviter le poinçonnement du support. Il est généralement réalisé par boulonnage sur une platine ou des cornières, elles-mêmes fixées par des boulons scellés dans les piédroits.

Les ouvrages ainsi réalisés sont des ouvrages mixtes dont le comportement est sensiblement différent de celui des buses circulaires et des buses surbaissées du fait que leurs extrémités sont bloquées et ne peuvent donc se déplacer vers les remblais latéraux.

Suivant leur forme plus ou moins ouverte, qui peut être caractérisée par leur degré de surbaissement, la constitution de ces arches et leur dénomination varie d'un fournisseur à l'autre, de telle sorte qu'il n'est pas possible de les présenter sans décrire chacune des formes disponibles. Signalons simplement qu'on peut en pratique distinguer trois types d'arches qui sont obtenus par assemblage de plaques cintrées suivant un deux ou trois rayons de courbure.

Les avantages que présentent les arches sont les mêmes que ceux que présentent, d'une manière générale, les formes surbaissées (cf § 2.1.3), étant entendu par ailleurs que l'on peut atteindre avec une arche un degré de surbaissement plus élevé qu'avec une buse-arche. Par rapport à ces dernières, elles sont d'un emploi intéressant lorsqu'il existe une fondation naturelle rocheuse à faible profondeur.

Ces structures sont surtout utilisées pour des ouvrages de grandes dimensions, et notamment de grande portée. Pour les mêmes raisons que celles développées pour les buses elliptiques à grand axe horizontal, certains fabricants ont prévu des dispositions constructives de nature à faciliter la mise en oeuvre et le compactage des remblais et à assurer un meilleur comportement des ouvrages sous sollicitations de service. Ces dispositions constructives sont en principe les mêmes que celles prévues pour les buses elliptiques: comme pour ces dernières, seule la "poutre de poussée" (cf § 2.1.4) a connu quelques applications en France.

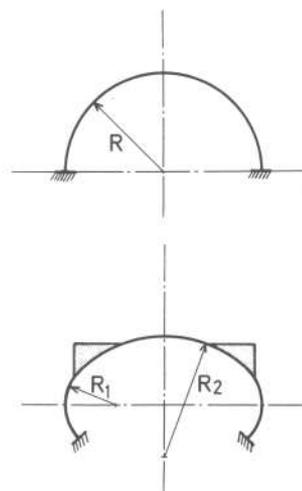
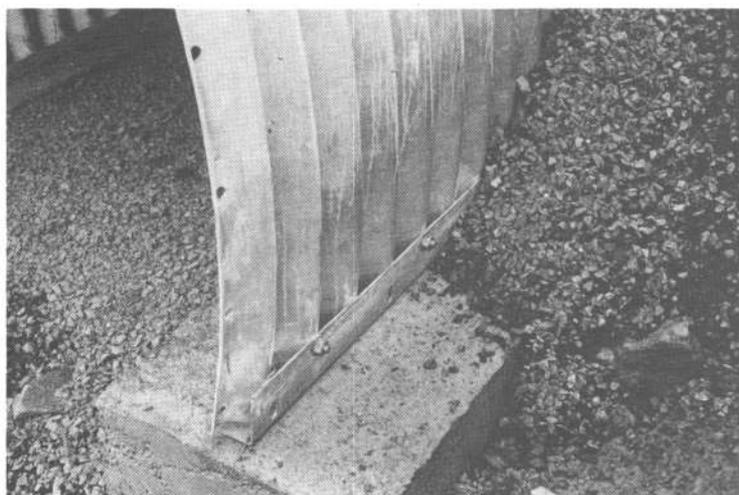


Figure 2.6 - Exemples d'arches

2.2 - TYPES D'ONDULATIONS

Les caractéristiques mécaniques des parois métalliques dépendent directement des caractéristiques géométriques des ondulations et de l'épaisseur de l'acier.

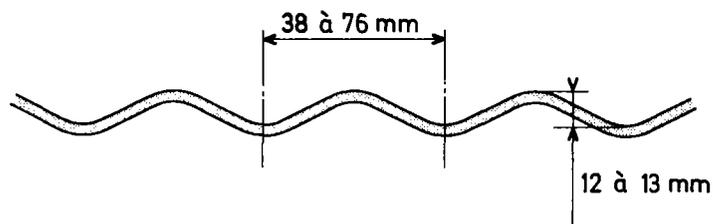
En pratique, on peut distinguer trois types d'ondulations qui se caractérisent par leurs dimensions, et en particulier par la profondeur de l'onde, et qui correspondent chacune à une certaine gamme de caractéristiques de la paroi.

Les petites ondulations, dont la profondeur d'onde est de l'ordre de 12 à 13 mm, sont surtout utilisées pour les buses dont la portée n'excède pas 2,00 m environ, essentiellement employées pour la réalisation d'ouvrages de drainage (fig. 2.7.a).

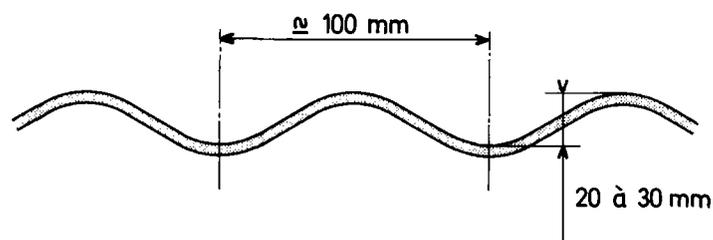
Les ondulations intermédiaires (ou moyennes), dont la profondeur d'onde est comprise entre 20 et 30 mm, confèrent à la paroi de la buse une inertie plus importante, et sont pratiquement utilisées pour la réalisation de la plupart des formes courantes décrites dans le paragraphe 2.1, les portées pouvant atteindre jusqu'à 4,5 m environ (fig. 2.7.b).

Les grandes ondulations, dont le domaine d'emploi peut s'étendre depuis les petites buses de 1,5 m de diamètre jusqu'aux plus grands ouvrages actuellement réalisables selon cette technique, présentent en pratique une profondeur d'onde comprise entre 50 et 60 mm. Elles recouvrent pratiquement toutes les formes décrites au paragraphe 2.1 ci-dessus et sont à ce jour les seules utilisées pour les buses elliptiques à grand axe horizontal et, dans la majorité des cas, pour la réalisation des ouvrages dont la portée dépasse environ 4,00 m (fig. 2.7.c).

a) Petites ondulations



b) Ondulations intermédiaires



c) Grandes ondulations

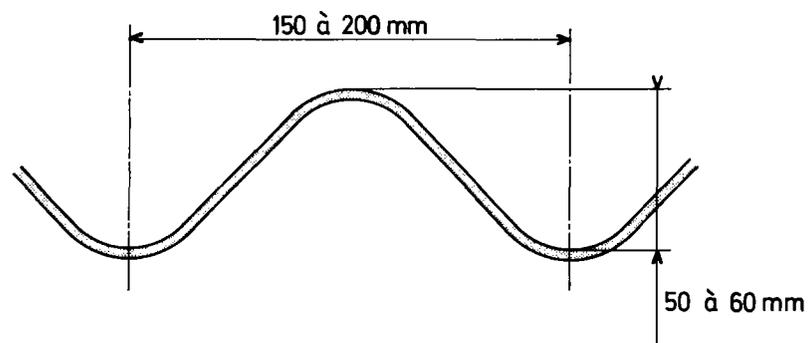


Figure 2.7 - Types d'ondulations

Il existe également des buses de forme circulaire à ondulations en hélice, et dont le diamètre peut atteindre jusqu'à 2.5 m environ; elles sont cependant surtout utilisées pour des ouvrages de drainage de faible dimension (cf § 2.3.2.c).

2.3 - TYPES DE JOINTS

L'assemblage des éléments préfabriqués de buses métalliques conduit à distinguer les joints longitudinaux et les joints circonférentiels (ou transversaux) qui, pour une même buse, pourraient en principe avoir des modes d'assemblage différents. En pratique toutefois, à un type de joint longitudinal est associé un type de joint circonférentiel, le premier permettant généralement à lui seul de désigner le type de buse dont il s'agit.

* Différents types de joints actuellement utilisés sont présentés
 * ci-après, mais il est important de signaler que seuls les ouvrages comportant
 * des joints à recouvrement boulonné (§ 2.3.1) entrent directement dans le
 * cadre d'application du présent document.

2.3.1 - Joints longitudinaux à recouvrement boulonné

Ces joints longitudinaux sont réalisés par recouvrement partiel des bords ondulés des éléments préfabriqués et assemblage par boulonnage.

Il existe à l'heure actuelle deux principaux types de joints longitudinaux à recouvrement boulonné qui se différencient par la position des boulons sur les ondulations. Selon l'origine de la buse, ces derniers sont disposés soit en sommet et en creux d'onde (ARMCO, TUBOSIDER) soit en flanc d'onde (ARVAL).

a) Boulons en sommet et en creux d'onde (fig. 2.8)

Dans ce type de joint longitudinal, les boulons sont disposés soit en sommet d'onde seulement (exemple: ARMCO Miniplaque), soit en sommet et en creux d'onde (ARMCO Multiplaque, TUBOSIDER). Ils sont alignés sur deux génératrices de la buse pour permettre la transmission des moments de flexion d'un élément préfabriqué à l'autre.

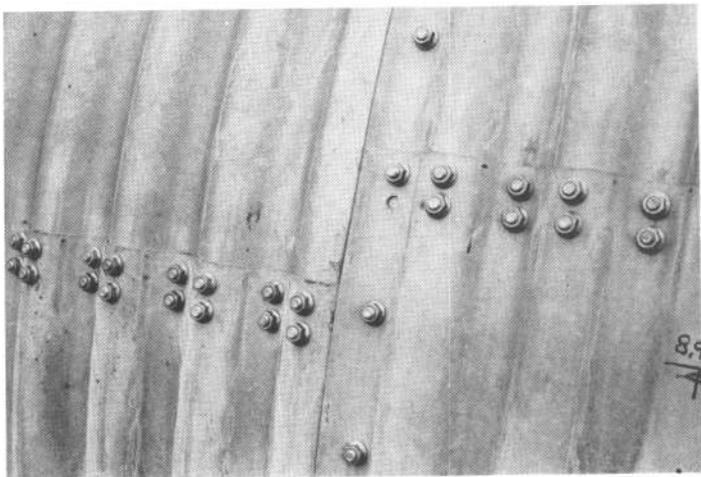
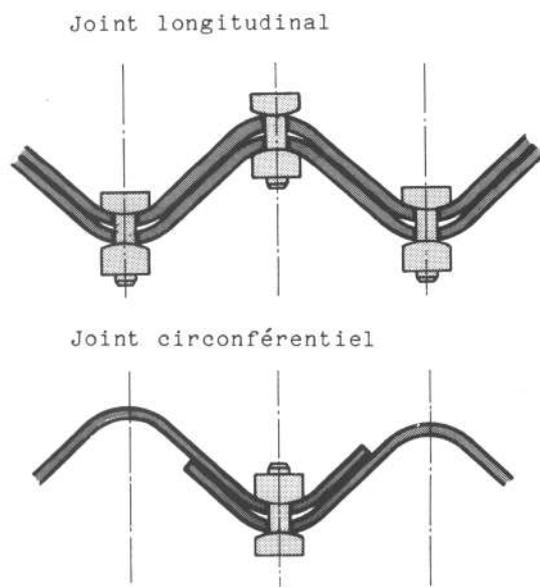


Figure 2.8 - Joint à recouvrement boulonné en sommet d'onde



Les joints circonférentiels associés à ce type de joint longitudinal sont obtenus par recouvrement de la dernière ondulation et assemblage par des boulons généralement disposés au creux de cette ondulation.

Pour éviter l'empilage de plus de trois tôles au droit des croisements entre joints circonférentiels et joints longitudinaux, ces derniers présentent des décrochements circonférentiels d'un anneau à l'autre. Toutefois, les joints correspondant à la jonction de deux tôles de rayons de courbure trop différents sont alignés, mais font alors l'objet d'un décrochement longitudinal.

b) Boulons en flanc d'onde (fig. 2.9)

Dans ce type de joint longitudinal, les boulons sont disposés en flanc d'onde au voisinage de l'axe neutre des ondulations, et sont alignés sur deux ou trois génératrices de la buse. A l'heure actuelle ces dispositions sont propres aux buses minijoint et multijoint ARVAL.

Les joints circonférentiels associés sont obtenus par juxtaposition des flancs des ondulations et assemblage par boulons. Cette disposition permet de constituer une buse d'anneaux complets identiques (ou viroles) pré-assemblés (fig. 2.1). Aucun trou des joints circonférentiels ne servant dans les joints longitudinaux, ces derniers sont situés sur une même génératrice de la buse pour toutes les viroles.

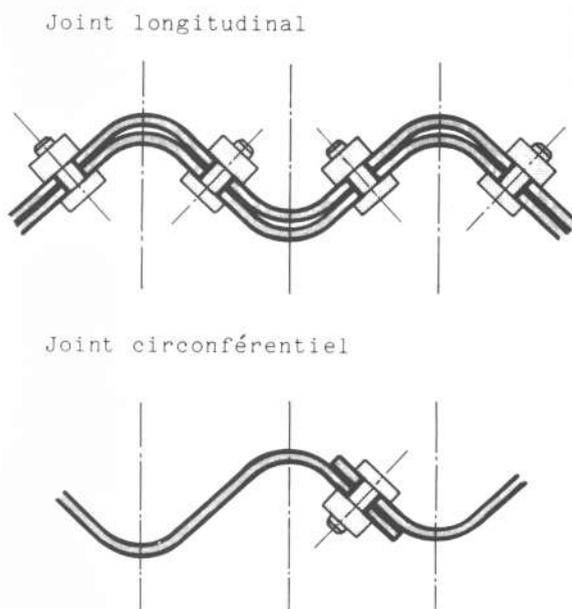
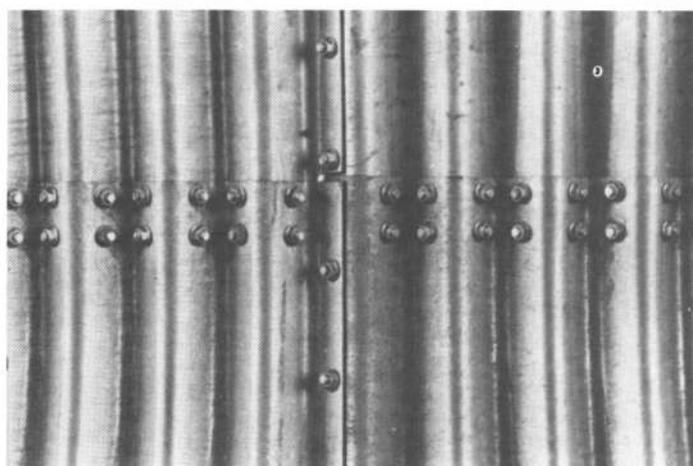


Figure 2.9 - Joint à recouvrement boulonné en flanc d'onde

2.3.2 - Autres types de joints longitudinaux

a) - Joints à encoches

Ces joints longitudinaux sont obtenus en pratiquant en sommets d'ondes, sur l'un des bords ondulés d'un élément préfabriqué de buse et perpendiculairement à celui-ci, des encoches de quelques centimètres de longueur permettant l'emboîtement du bord ondulé d'un autre élément de buse. Les deux éléments ainsi assemblés sont maintenus par des agrafes pliées ou vissées (fig. 2.10).

Ce type de joint longitudinal est propre à certaines buses dites emboîtables (ARMCO, TUBOSIDER) dont le diamètre ou la portée n'excède pas deux mètres environ. En section courante ces buses sont constituées de deux éléments, un élément haut et un élément bas, disposés en chicane de façon à accroître la résistance de la conduite.

Les joints circonférentiels associés à ce type de joint longitudinal sont simplement obtenus par recouvrement de la dernière ondulation de l'élément mis en place.

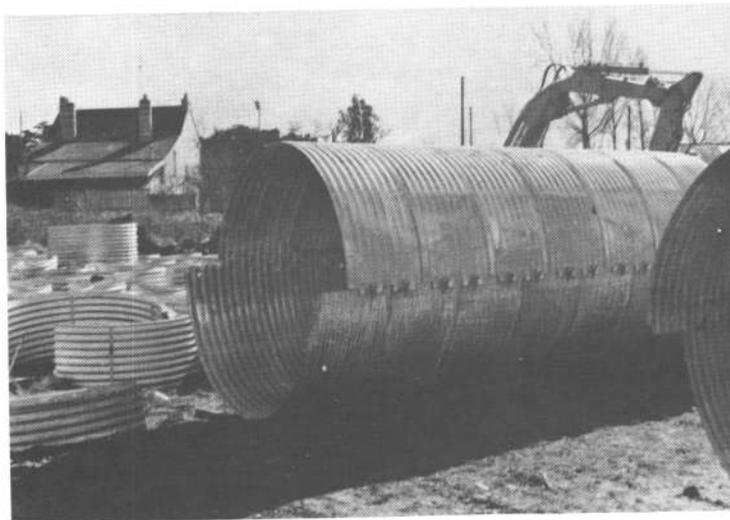


Figure 2.10 - Joints longitudinaux à encoches

b) - Joints à bords tombés (oreilles)

Ces joints longitudinaux sont obtenus en repliant à l'extérieur, à angle droit, les bords ondulés d'un élément de buse. Ces bords, souvent appelés "oreilles", sont percés de trous d'assemblage et utilisés pour boulonner les éléments les uns aux autres en plaçant les sommets d'onde d'une oreille dans les creux d'onde de l'autre (fig. 2.11).

Ce type de joint longitudinal est propre à certaines buses emboîtables (ARVAL notamment) dont le diamètre ou la portée n'excède pas deux mètres environ. Comme les buses avec joints à encoches, elles sont constituées en section courante de deux éléments disposés en chicane.

Les joints circonférentiels associés sont obtenus par recouvrement et boulonnage de la dernière ondulation de l'élément mis en place.

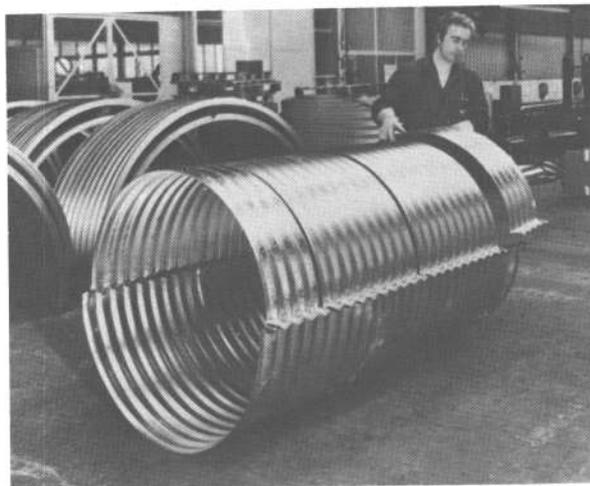


Figure 2.11 - Joints longitudinaux à bords tombés

c) - Joints en hélice agrafés par pliage

Ce type de joint particulier concerne des buses constituées d'éléments complets de 6 à 12 m de longueur, entièrement préfabriqués en usine à partir d'un seul feuillard ondulé, enroulé en hélice et agrafé par pliage et sertissage en continu sur des machines spécialement conçues à cet effet (fig. 2.12).

Ce type de joint, qui n'est à proprement parler ni circonférentiel ni longitudinal, ne concerne à l'heure actuelle que des buses circulaires dont le diamètre peut toutefois atteindre 2,5 m.

La longueur des éléments préfabriqués en usine n'est limitée que par les sujétions de transport et de manutention. Ces éléments sont assemblés sur place par des bandes d'accouplement, ondulées ou non.



Figure 2.12 - Joint en hélice agrafé par pliage (SPIWELL)

Conception des ouvrages

3.1 - CARACTERES GENERAUX

3.1.1 - Déformabilité des buses métalliques

3.1.1.1 - Comportement longitudinal

Les buses métalliques sont des structures présentant une grande souplesse longitudinale en raison des ondulations que comporte leur paroi. Cette propriété leur permet de se déformer et de s'adapter aux tassements différentiels* pouvant se produire suivant l'axe de l'ouvrage avec une facilité beaucoup plus grande que dans le cas d'un ouvrage rigide, où il est souvent impératif de prévoir un découpage en plusieurs tronçons séparés par des joints.

Ces tassements différentiels, lorsqu'ils existent, proviennent principalement de deux causes :

- Charge différente sur le sol de fondation au long de l'ouvrage. C'est le cas général pour un terrain homogène et régulier de caractéristiques médiocres ou moyennes, où l'on observe un tassement pratiquement nul aux extrémités de l'ouvrage (pieds de talus) (fig. 3.1).

- Discontinuités de portance du sol de fondation dues à son hétérogénéité ou à la présence de points singuliers.

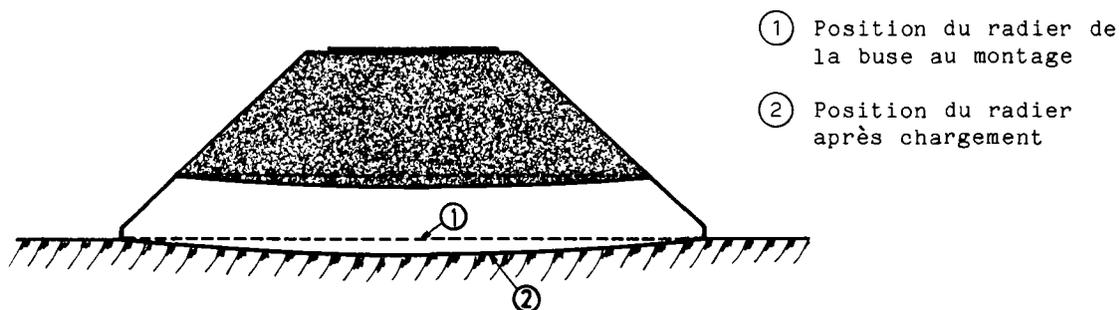


Figure 3.1 - Schématisation du comportement longitudinal

* Le tassement différentiel est ici défini comme le rapport de la différence des tassements de deux points par la distance qui les sépare, exprimé en pourcentage.

Le tassement différentiel maximum que peut admettre une buse métallique avant que des désordres n'apparaissent dans l'ouvrage est difficile à estimer, car il dépend de nombreux facteurs dont on ne peut chiffrer quantitativement l'influence; il faut de plus tenir compte de ce que, quelle que soit la méthode de prévision utilisée, les tassements sont généralement évalués avec une incertitude de l'ordre de 50% de la valeur calculée.

* Dans le cas simple d'un remblai sur sol homogène, on tiendra compte de ces incertitudes en limitant le tassement différentiel entre le centre et les extrémités de l'ouvrage à 2 ou 3% au plus. Lorsque les valeurs calculées sont supérieures à cette limite il sera dans la plupart des cas nécessaire de prévoir des dispositions constructives particulières (on peut recourir par exemple à un préchargement du terrain avant exécution de l'ouvrage ou à une substitution locale de bons matériaux aux couches superficielles molles ou peu consistantes).

Dans l'hypothèse où le tassement différentiel reste mécaniquement admissible, l'utilisation normale des ouvrages peut être néanmoins affectée par une déformation longitudinale excessive. Celle-ci peut en effet introduire des variations dans la pente du profil en long du radier suffisantes pour entraîner une perte de section hydraulique ou l'apparition d'eaux stagnantes nuisibles vis-à-vis de l'exploitation d'une chaussée et de la corrosion du métal, ou pour amener une diminution du gabarit lorsqu'un reprofilage de la chaussée est nécessaire.

Pour limiter le creux qui apparaît ainsi au centre de l'ouvrage à une valeur acceptable, qui dépend notamment de la destination de l'ouvrage, l'assise de fondation peut être profilée longitudinalement avec une certaine contreflèche, mais il faut noter qu'en raison des possibilités de montage de la buse cette méthode ne permet pas toujours de compenser la totalité du tassement différentiel prévu (cf § 3.2.1.2).

Par ailleurs, des variations rapides des caractéristiques géotechniques des terrains de fondation ou de la puissance d'une couche de sol compressible peu profonde (au droit d'une faille par exemple), ou encore des hétérogénéités locales marquées peuvent également provoquer des déformations importantes de la paroi, conduisant dans certains cas à la mise hors service de l'ouvrage. Les risques d'apparition de tels désordres peuvent et doivent être considérablement limités en effectuant une campagne de reconnaissance préalable des sols adaptée à l'importance de l'ouvrage et à l'hétérogénéité présumée du site et, si nécessaire, en prenant des dispositions particulières au stade de la conception ou, à défaut, en cours d'exécution des travaux lorsque de telles hétérogénéités n'ont pu être préalablement décelées (remplacement de couches médiocres par un bon sol, traitement éventuel de certaines zones, purge des poches de sol mou, extraction ou démolition des blocs rocheux,...).

3.1.1.2 - Comportement transversal

Du point de vue mécanique, le principal intérêt des buses métalliques réside dans leur flexibilité transversale qui fait que, sous l'action des charges qui sollicitent l'ouvrage, et notamment sous l'action du poids du remblai qui le surmonte, il peut se déformer et changer l'orientation des contraintes dans le massif de sol sans que des sollicitations de flexion excessives n'apparaissent dans sa paroi.

Ce mode de fonctionnement impose toutefois que le sol environnant ait une rigidité suffisante, de telle sorte que les déformations nécessaires pour atteindre un état d'équilibre restent faibles, et aussi que cette rigidité soit homogène sur le contour de l'ouvrage pour éviter l'apparition de fortes déformations locales.

On peut distinguer deux parties dans le massif de sol entourant les buses: d'une part le remblai rapporté, qui peut être choisi et mis en oeuvre de manière à obtenir les qualités requises, et d'autre part le terrain en place qui règne sous l'ouvrage (terrain de fondation) et éventuellement sur les côtés (ouvrage partiellement ou totalement en déblai). Il sera essentiel, pour obtenir une répartition satisfaisante des contraintes, d'harmoniser entre elles les rigidités de ces différents matériaux.

En particulier, il faut strictement éviter que la buse ne s'appuie directement sur un terrain de fondation dur ou rocheux car les déformations de sa paroi seraient pratiquement nulles là où elle est en contact direct avec ce terrain tout en restant possibles sur le reste du contour (sol rapporté), ce qui peut provoquer un aplatissement du radier ou des déformations locales importantes. Il est recommandé dans ces cas d'interposer systématiquement entre la paroi de la buse et le terrain de fondation en place un matelas de matériau granuleux correctement compacté (fondation artificielle). En tout état de cause, il ne faut jamais prévoir une fondation rigide (béton, enrochements) sous une buse flexible.

Il faut éviter, à l'inverse, qu'une buse ne s'appuie directement sur un terrain de fondation de qualités médiocres, car les déformations risqueraient de se trouver très accentuées dans la partie inférieure de l'ouvrage. En particulier, dans le cas des buses de forme surbaissée, telles que les buses-arches et les passages, la pression exercée par la paroi sur le sol est nettement plus élevée sous les plaques de coin que sous le radier, ce qui a pour effet de provoquer un enfoncement de celles-ci (fig. 3.2). Cet effet est en général accentué par le tassement propre du terrain sous l'action du poids des remblais latéraux et peut mener, dans les cas extrêmes, à une inversion de courbure du radier.

Il est essentiel dans ce cas d'améliorer les caractéristiques mécaniques du sol de fondation, soit en effectuant une substitution de terrain lorsque la couche compressible est peu épaisse, soit en préchargeant celui-ci. La solution la plus courante consiste à effectuer une substitution partielle en interposant entre la buse et le terrain en place un matériau de bonne qualité, énergiquement compacté (fondation artificielle); les dimensions transversales de cette fondation doivent être telles qu'elles limitent à la fois les déformations propres de la buse et celles induites par le tassement du sol sous le poids des remblais latéraux (cf § 3.2.2.1). Dans certains cas, il pourra être également nécessaire, pour limiter les déformations, de prévoir la mise en place d'une banquette de matériaux de très bonnes performances mécaniques sous les plaques de coin (cf § 3.2.2.2).

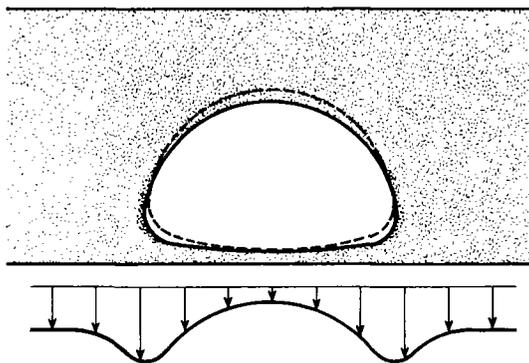


Figure 3.2 - Schématisation du comportement transversal

3.1.2 - Portance du sol

Les remarques développées dans le paragraphe 3.1.1 montrent qu'en règle générale les problèmes de portance du sol de fondation sous l'ouvrage se posent davantage en termes de tassements différentiels et de déformations locales qu'en termes de capacité portante proprement dite.

Les dispositions préconisées pour limiter les tassements différentiels sous la buse et les déformations propres de celle-ci seront donc dans la plupart des cas suffisantes pour assurer un comportement satisfaisant de la fondation.

Lorsque le sol de fondation est de qualité médiocre, il est par contre indispensable d'effectuer une étude de stabilité des remblais latéraux, une instabilité de ceux-ci pouvant entraîner de grandes déformations au sein du massif de sol entourant la buse.

Compte tenu de l'incertitude qui peut affecter la valeur du coefficient de sécurité calculé par les méthodes usuelles d'étude de la stabilité des remblais, et pour limiter les déformations du sol de fondation (notamment celles dues au fluage), il est recommandé d'attacher une importance particulière au choix de la valeur minimale requise pour ce coefficient. A titre indicatif, cette valeur ne devrait pas être inférieure à 1,5 en cas d'application de la méthode des tranches de Fellenius-Bishop, qui est généralement bien adaptée pour l'étude de la stabilité des remblais sur sols compressibles.

Lorsque les extrémités des ouvrages comportent des murs de soutènement, leur stabilité doit être étudiée par ailleurs suivant les errements habituels.

3.1.3 - Reconnaissance géotechnique

La consistance de la campagne de reconnaissance à effectuer sur le site de l'ouvrage à construire (buse et massifs de butée en place ou rapportés) dépend dans une large mesure de données relatives à l'ouvrage lui-même (dimensions de la buse, hauteur des remblais, destination,...), et des informations déjà existantes ou recueillies lors des premiers sondages sur l'homogénéité du site ainsi que sur la nature et les qualités des terrains concernés. Pour cette raison, les recommandations qui suivent n'ont qu'un caractère général et mettent davantage l'accent sur la nature des renseignements nécessaires que sur l'importance des moyens à employer.

Il convient toutefois de distinguer le cas courant de l'ouvrage implanté dans le remblai d'une voie nouvelle de celui de l'ouvrage isolé.

Dans le premier cas la reconnaissance géotechnique à effectuer spécialement pour l'ouvrage à construire peut être très limitée car on dispose déjà, au moment de la conception de l'ouvrage, de certaines informations issues de la reconnaissance générale du tracé. Par ailleurs la reconnaissance effectuée sur le site débord largement l'emprise de l'ouvrage et reste principalement définie en fonction des problèmes liés à la stabilité et au tassement des remblais en section courante, et éventuellement à la stabilité générale du site (cas des versants instables notamment).

Dans le second cas on ne dispose par contre le plus souvent d'aucune information sur les terrains concernés et la reconnaissance géotechnique, essentiellement limitée à l'emprise de l'ouvrage et de ses massifs de butée, est généralement plus directement définie en fonction des problèmes particuliers que peut poser un tel type d'ouvrage.

C'est naturellement le deuxième cas qui est le plus particulièrement visé dans ce paragraphe, la reconnaissance géotechnique effectuée dans le cadre de l'étude de la stabilité de remblais sur sols compressibles ou sur versants instables n'ayant rien de spécifique aux buses métalliques. On pourra à ce sujet utilement se reporter aux documents existants, et notamment aux recommandations du L.C.P.C. pour l'étude des remblais sur sols compressibles et au dossier FOND 72 (LCPC - SETRA).

En tout état de cause, et comme pour n'importe quel type d'ouvrage, la reconnaissance doit être progressive et la nature des moyens à employer doit être adaptée à la nature des renseignements nécessaires à l'étude de l'ouvrage.

3.1.3.1 - La reconnaissance normale

Dans le cas où l'on ne dispose d'aucune information exploitable sur la nature et les qualités des terrains, il convient d'effectuer au préalable des sondages et des essais en place simples et rapides (sondages destructifs avec prélèvement d'échantillons remaniés, essais pénétrométri-

ques,...) destinés à renseigner sur la nature et l'épaisseur des couches de sol rencontrées, sur leur compacité et sur l'homogénéité du site. Il y a lieu de prévoir la réalisation d'un sondage ou d'un essai pénétrométrique tous les 40 à 60 m environ avec un minimum de deux sondages. Ils devront être si possible répartis de manière à reconnaître les terrains sous toute l'emprise de l'ouvrage, y compris ses massifs de butée, même si ceux-ci sont constitués par le terrain en place (ouvrage en déblai).

Lorsque les informations recueillies à l'issue de cette reconnaissance des sols ont permis de conclure à la présence d'un terrain rocheux, ou meuble mais de qualités équivalentes à celles exigées pour les massifs de butée de l'ouvrage et homogène ou ne présentant que des hétérogénéités locales peu marquées (faible différence de compacité par exemple), on peut généralement se dispenser de toute reconnaissance complémentaire.

En cas de doute sur les qualités des terrains, et notamment lorsque l'ouvrage est à réaliser en déblai et que le sol en place peut être de nature à en constituer les massifs de butée, il est nécessaire d'obtenir des informations plus précises sur les caractéristiques géotechniques des terrains. Lorsque la stabilité des remblais de l'ouvrage paraît assurée (éventuellement sols granulaires même peu à moyennement compacts, argiles moyennement consistantes, roche altérée,...) les résultats d'essais pressiométriques (modules pressiométriques et pressions limites) seront généralement suffisants et bien adaptés.

Dans le cas où les premières informations recueillies permettent de conclure à la présence de sols très compressibles (notamment limons lâches, argiles molles, vase, tourbe,...), l'étude de la stabilité et des tassements des remblais, et éventuellement l'étude de la stabilité des fouilles réalisées pour l'exécution d'ouvrages en déblai, conditionnent la nature des essais à effectuer. La réalisation de ces essais entre alors généralement dans le cadre d'une reconnaissance spécifique.

3.1.3.2 - La reconnaissance spécifique

Cette étape éventuelle supplémentaire de la reconnaissance a pour objet l'étude de problèmes bien déterminés dans le cadre de la conception des ouvrages ou de la mise au point de certaines dispositions constructives ou de méthodes d'exécution, qui ne sont généralement pas relatives aux buses métalliques elles-mêmes (remblais sur sols très compressibles, fouilles dans des sols peu consistants, versants instables, problèmes de rabattement de nappe liés à la présence d'eau, problèmes d'affouillements pour les ouvrages hydrauliques,...). La consistance de la campagne de reconnaissance spécifique des sols est à déterminer dans chaque cas, en fonction des problèmes qui se posent, en étroite collaboration avec un géotechnicien. Signalons simplement que les résultats de certains essais pourront être directement exploités pour l'étude de l'ouvrage; la consistance de la campagne de reconnaissance et l'implantation des sondages doivent donc être étudiées en conséquence.

3.2 - DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES GENERALES

3.2.1 - Implantation des ouvrages

3.2.1.1 - Tracé en plan

En principe, le tracé en plan des buses métalliques peut être pratiquement quelconque (rectiligne, courbé, en ligne brisée,...) pour s'adapter au mieux à celui de la voie à franchir. Toutefois, hormis pour les ouvrages de drainage de petit diamètre, il sera préférable de prévoir un tracé rectiligne ou très légèrement courbe. Lorsqu'une telle solution simple ne peut convenir, un tracé plus complexe pourra être envisagé, mais il sera indispensable de prévoir une surveillance et des contrôles intensifs pendant le montage et le remblaiement en raison de la multiplication des causes possibles d'erreurs ou de malfaçons qu'engendre ce genre d'ouvrages.

3.2.1.2 - Profil en long

Le profil en long du radier de la buse est généralement imposé par celui de la voie ou du cours d'eau sur lequel il est calé. Il peut être, comme le tracé en plan, pratiquement quelconque mais, pour les mêmes raisons, il est recommandé de le prévoir rectiligne ou légèrement courbe dans les cas courants.

On peut considérer que le comportement et les conditions d'exécution d'une buse métallique ne sont pas sensiblement modifiés lorsque la pente moyenne du profil en long reste inférieure à 8%, ce qui est le cas pour la très grande majorité des ouvrages. Pour des valeurs supérieures, comme cela peut notamment se produire pour des ouvrages de drainage sur versants, il sera généralement nécessaire d'envisager des dispositions particulières (non développées dans le présent document) au niveau de l'exécution et parfois de la conception.

Lorsque le profil en long du projet est courbe, le rayon de courbure minimal qu'il est possible d'admettre dépend des dimensions de la buse, de ses conditions de montage, et des tassements différentiels attendus.

Dans la configuration la plus fréquente où les tassements ultérieurs ont tendance à augmenter la valeur du rayon de courbure initial (assise convexe, profilée ou non avec une contreflèche), il est souhaitable de limiter inférieurement ce dernier, pour des raisons de montage, à environ cent cinquante fois la flèche de la buse (150 V).

Dans le cas contraire (assise rectiligne ou concave), assez rare dans la mesure où il faut éviter la création de points bas dans le profil en long, on s'efforcera de limiter inférieurement la valeur du rayon de courbure définitif acquis par la buse à huit fois sa longueur au radier (8 L), ce qui correspond à une flèche différentielle de 3% entre le centre et les extrémités de l'ouvrage.

3.2.1.3 - Biais

Un ouvrage est dit droit lorsque l'axe de la voie portée par les remblais (voie nouvelle généralement) est perpendiculaire à l'axe longitudinal de la buse. Il est biais dans le cas contraire, l'angle de biais étant alors celui que fait l'axe de la voie portée avec l'axe longitudinal de la buse, compté dans le sens trigonométrique direct (fig. 3.3). Il est important de noter que l'angle de biais est souvent défini de façon inverse par les fournisseurs (sens des aiguilles d'une montre), il est donc impératif de le définir sans ambiguïté dans tous les cas.

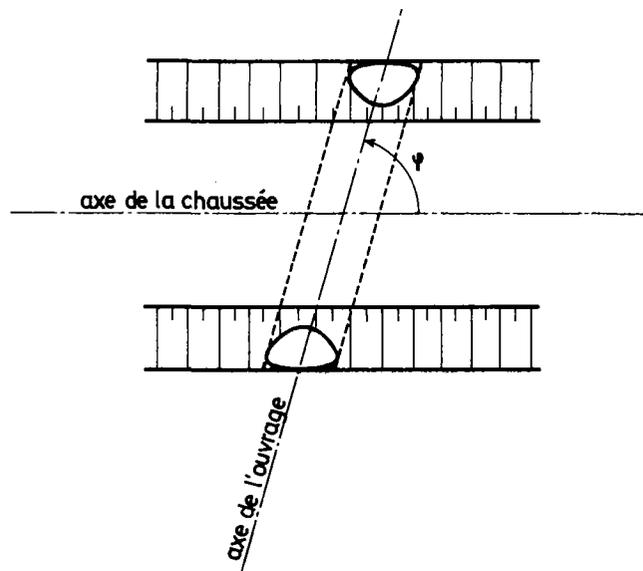


Figure 3.3 - Définition de l'angle de biais

Le biais permet d'éviter ou de limiter les inconvénients et les suppléments de coût que peuvent entraîner des rectifications des voies à franchir, mais il faut noter qu'un biais trop prononcé conduira à adopter des dispositions particulières au niveau des extrémités des ouvrages (cf § 3.2.3).

Une solution peut consister, dans certains cas, à remodeler localement les remblais aux abords des têtes afin de limiter l'angle de coupe des tôles d'extrémité tout en conservant un biais important à l'ouvrage lui-même.

3.2.1.4 - Ouverture

11m

Le problème du choix de la forme et des dimensions des ouvrages est abordé, en fonction de leur destination, aux chapitres 3.3 et 3.4. Au niveau des dispositions générales, il faut cependant noter qu'il peut être intéressant de prévoir une ouverture légèrement surabondante (environ 15 cm dans toutes les directions) permettant une réparation éventuelle de l'ouvrage, soit par chemisage à l'aide d'une nouvelle buse et remplissage de l'espace annulaire, soit par la technique du béton projeté.

Cette disposition pourra permettre d'orienter le choix sur la classification à donner à l'ouvrage (cf § 3.5) et aboutira dans certains cas à une diminution de son coût; elle ne doit cependant être envisagée dans ce but que lorsque l'accessibilité et la configuration du site permettent une réparation aisée et sans gêne aux usagers.

3.2.1.5 - Hauteur de couverture

La hauteur de couverture d'une buse est l'épaisseur de remblai au-dessus de la clé de l'ouvrage, chaussée portée comprise.

Pour assurer à l'ouvrage un comportement sensiblement conforme aux hypothèses de calcul (théorie de l'anneau comprimé) et pour permettre la diffusion des charges d'exploitation de la chaussée portée, il est impératif que la buse soit recouverte d'une hauteur de remblai suffisante.

Dans le cadre de la conception courante, la hauteur de couverture minimale à adopter est de $D/10 + 0,5$ m, D étant la portée de l'ouvrage. On prendra soin, lorsque la chaussée portée présente un dévers ou lorsque la buse présente une pente longitudinale, de prendre en compte le point le plus défavorable.

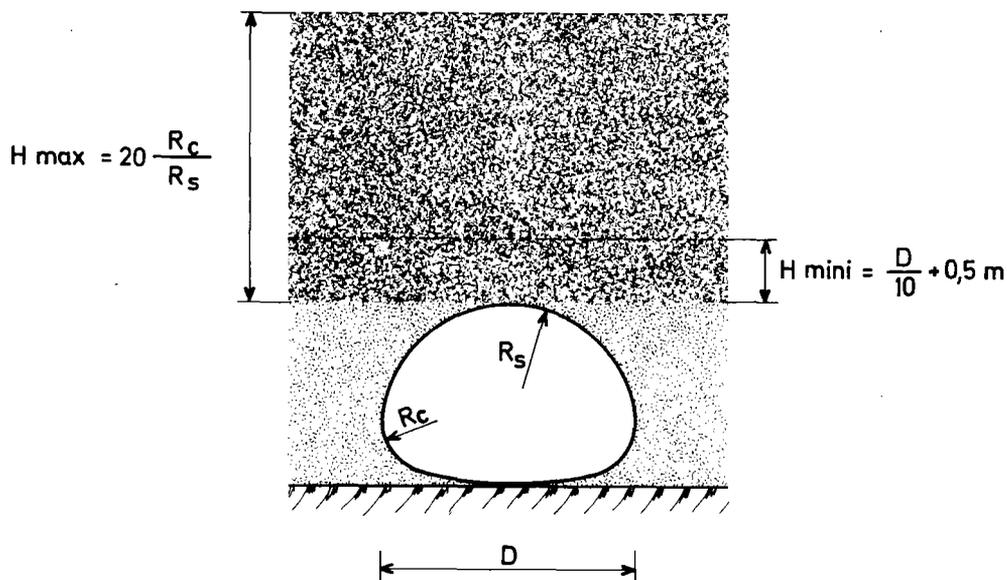


Figure 3.4 - Hauteur de couverture

* Dans le cas des buses-arches et des passages comportant des plaques
* de coin à faible rayon de courbure, la pression exercée sur le sol au niveau
* de celles-ci peut devenir importante (cf § 3.1.1.2 et 4.1.2). Il est
* recommandé de ne pas dépasser 400 kPa sous charges permanentes, ce qui
* conduit à limiter la hauteur de couverture à $20 R_c/R_s$.
*
*
*
*
*
*

* Des hauteurs plus importantes ne peuvent être envisagées qu'à l'is-
* sue d'une étude spécifique de la fondation, une autre solution pouvant
* toutefois consister à augmenter le rayon de courbure des plaques de coin.
*

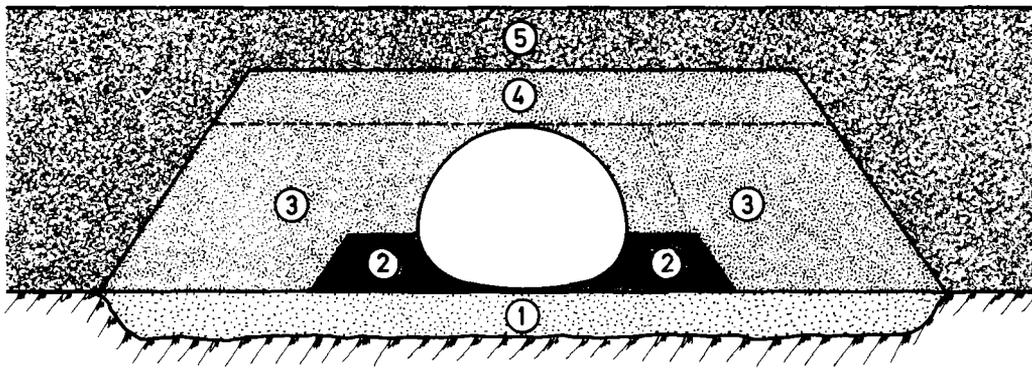
3.2.2 - Les remblais techniques

L'étude du comportement des buses métalliques (cf § 3.1.1.1 et 3.1.1.2) montre que l'ouvrage et les massifs de sol appelés remblais techniques qui l'entourent sont mécaniquement indissociables; de ce fait, la géométrie et les dimensions des différentes parties de ces massifs, ainsi que les qualités des matériaux qui les constituent sont à définir au stade même de la conception.

Les remblais techniques comprennent couramment trois parties distinctes (fig. 3.5):

- la fondation artificielle éventuelle,
- les remblais latéraux de butée,
- le dôme de couverture.

Le présent paragraphe ne traite essentiellement que de la géométrie et des dimensions minimales requises, dans les cas courants, pour ces différentes parties. La définition des qualités que doivent présenter les matériaux qui les constituent, et notamment les critères géotechniques et électrochimiques auxquels ils doivent répondre, est abordée au chapitre 5.



- ① fondation artificielle (éventuellement)
- ② banquette latérale éventuelle
- ③ remblais latéraux de butée
- ④ dôme (ou matelas) de couverture
- ⑤ terrassements généraux

Figure 3.5 - Les remblais techniques

3.2.2.1 - La fondation artificielle

Une buse métallique peut s'appuyer directement sur le terrain en place en fond de fouille lorsque celui-ci est homogène, peu sensible à l'eau, et qu'il présente des qualités suffisantes (cf § 3.1.2). Il faut toutefois prévoir systématiquement le décapage des terres végétales et l'élimination des points durs (blocs rocheux, affleurements,...) et des éventuelles poches de sol inconsistant mises en évidence par la reconnaissance ou décelées en cours d'exécution. Les vides ainsi créés seront comblés par un bon sol compacté, éventuellement pris à proximité.

Lorsque ces hétérogénéités sont trop nombreuses, ou que le terrain en place est très sensible à l'eau, peu consistant ou rocheux, il est indispensable de prévoir la mise en oeuvre d'un matelas de sol granulaire de bonne qualité, constituant une fondation artificielle, entre le fond de fouille et la partie inférieure de la buse. Pour certains sols lâches ou peu consistants il est possible de prévoir le traitement du sol en place en vue d'améliorer ses qualités géotechniques (compactage dynamique, préchargement, mise en oeuvre de colonnes ballastées,...), mais le recours à de telles techniques, qui n'est pas à exclure, reste toutefois très limité, notamment pour des raisons économiques.

La fondation artificielle, qui n'est qu'une substitution de terrain sur une épaisseur limitée, s'étend normalement sous toute l'emprise de l'ouvrage. Toutefois, dans le sens longitudinal, elle peut ne s'étendre qu'à une zone particulière bien délimitée où les terrains en place ne présentent pas les qualités requises. Elle est en général profilée avec une contreflèche dont la valeur est fixée par l'étude des tassements différentiels longitudinaux (fig. 3.6). Dans certains cas, il pourra s'avérer nécessaire de prévoir en outre la mise en oeuvre d'un géotextile anticontaminant entre la fondation artificielle et le terrain en place.

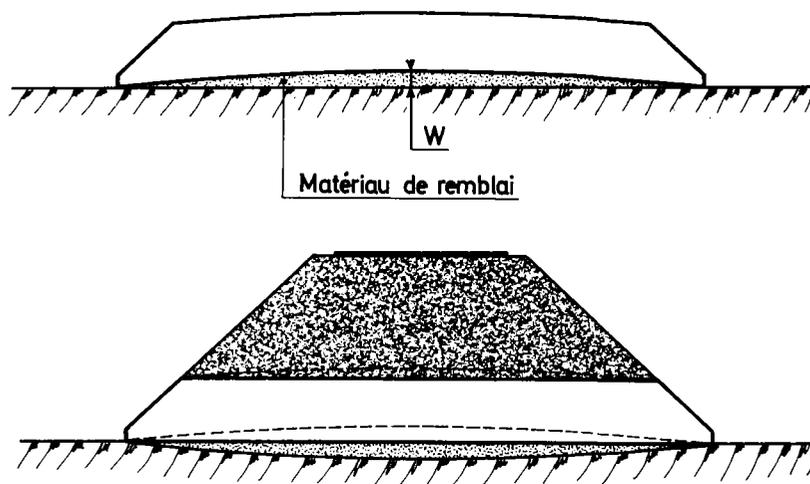


Figure 3.6 - limitation des déformations longitudinales finales par profilage de l'assise de la buse

La géométrie et les dimensions minimales (largeur, épaisseur) d'une fondation artificielle dans le sens transversal à l'ouvrage sont fixées le plus souvent par des règles empiriques simples qui résultent de l'expérience de réalisations antérieures. Il est important de souligner que ces règles, reproduites ci-après, ne sont données qu'à titre indicatif et ne fixent que des valeurs minimales au-dessous desquelles il est recommandé de ne pas descendre. Lorsque les sols en place sont de qualités médiocres, la géométrie et les dimensions de la fondation artificielle doivent résulter d'une étude des tassements et des déformations sous la buse, effectuée en s'appuyant sur les renseignements géotechniques fournis par la reconnaissance des sols.

a) Fondation sur bon sol

La réalisation d'une fondation artificielle sur un terrain en place homogène et de bonne portance peut s'avérer nécessaire, notamment lorsque le terrain est sensible à l'eau, qu'il ne répond pas aux critères électrochimiques définis pour les matériaux de remblai (cf § 5.2.2), ou encore qu'il comprend de nombreux éléments de dimension supérieure à 100 mm.

* L'épaisseur minimale de la fondation artificielle, qui doit s'étendre à toute la largeur de la buse, doit être fixée à au moins 0,40 m dans les deux premiers cas, et à 0,20 m lorsque seule la dimension des éléments est en cause (fig. 3.7). Dans ce dernier cas, l'épaisseur de la fondation peut être augmentée lorsque l'on craint la présence de gros blocs susceptibles de constituer des points durs.

Il est à noter par ailleurs que ces différents cas peuvent également se rencontrer lorsque le point le plus bas de l'ouvrage est situé au-dessus du terrain naturel, et que le matériau de remblai mis en oeuvre sous la buse ne répond pas aux critères géotechniques ou électrochimiques définis pour les matériaux constituant les remblais techniques.

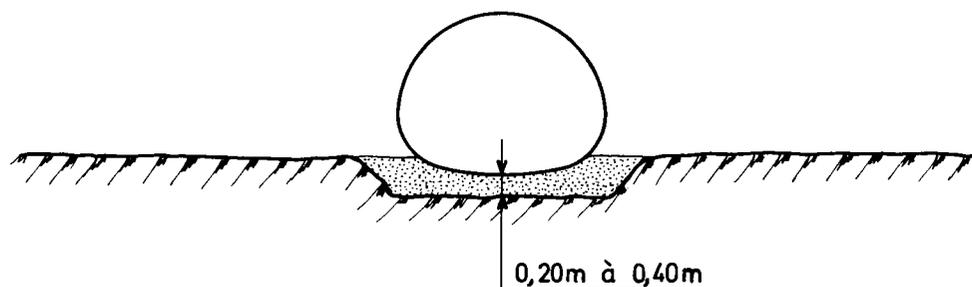


Figure 3.7 - Fondation sur bon sol

b) Fondation sur sol irrégulier ou de qualités médiocres

Par terrain de qualités médiocres, et par opposition au bon sol, il faut entendre les sols en place, généralement meubles, lâches ou peu consistants, qui sont susceptibles de tassements importants (cf § 3.1.2) ou pour lesquels, par exemple, la stabilité des remblais adjacents à la buse est à peine assurée. La géométrie et les dimensions de la fondation artificielle, qui relève davantage dans ce cas d'une substitution de terrain, sont en principe fixées par l'étude de la portance et des tassements, tant sous les remblais que sous la buse elle-même.

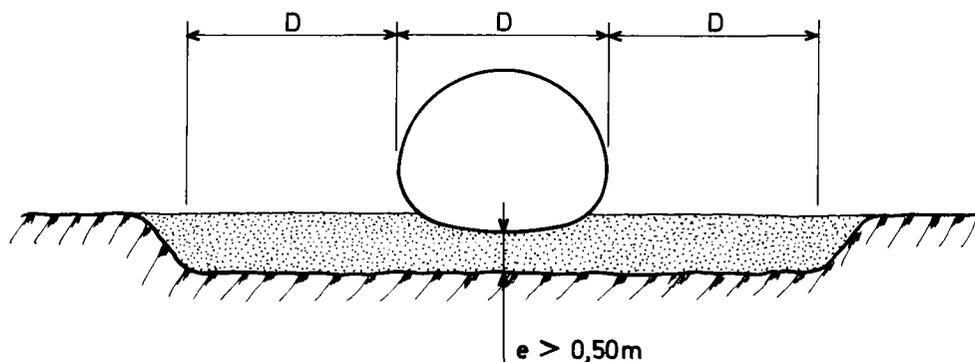


Figure 3.8 - Fondation sur sol irrégulier ou de qualités médiocres

* En tout état de cause la fondation artificielle doit au moins
 * s'étendre sous la buse et ses remblais de butée, c'est-à-dire sur une lon-
 * gueur de trois fois l'emprise horizontale de la buse. Son épaisseur ne doit
 * pas être inférieure à 0,50 m (fig. 3.8).

c) Fondation sur terrain dur ou rocheux

* Sur un terrain dur ou rocheux, il est indispensable d'interposer
 * sous la buse un matelas de sol granulaire, plus ou moins compacté, d'une
 * épaisseur minimale de 0,20 m au-dessus de la cote théorique (tolérance com-
 * prise) du fond de fouille (fig. 3.9). La largeur de cette fondation artifi-
 * cielle peut être limitée à l'emprise (portée) de l'ouvrage dans le cas des
 * formes surbaissées, ou au demi-diamètre dans le cas des buses circulaires.

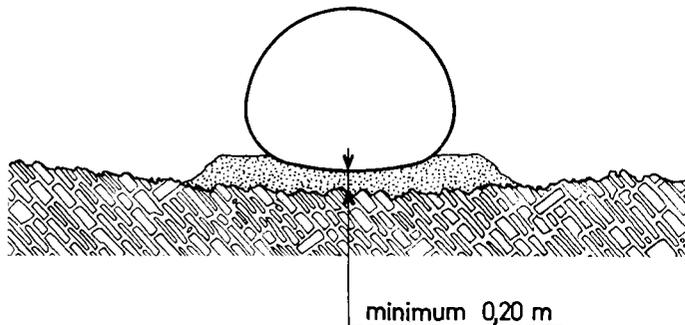


Figure 3.9

- Fondation sur terrain dur ou rocheux

3.2.2.2 - Les remblais latéraux de butée

Les remblais latéraux de butée sont les deux volumes de remblai situés de part et d'autre de la buse, sur lesquels elle s'appuie lorsqu'elle tend à se déformer latéralement.

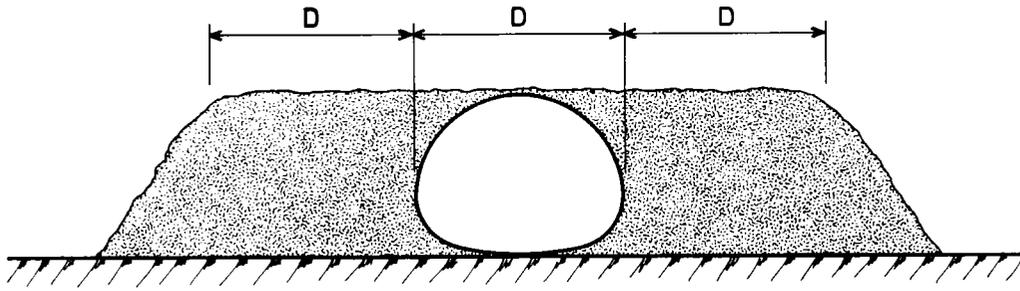
Ces remblais ont un rôle fondamental dans le comportement mécanique de l'ouvrage. Il est indispensable qu'ils aient des dimensions suffisantes pour que leur comportement, dans leur partie en contact avec la paroi de la buse, ne soit pas influencé par les terres environnantes de moindre raideur (remblais généraux ou terrains en place).

Dans le cas des ouvrages réalisés en tranchée dans des terrains dont les qualités mécaniques ont été reconnues satisfaisantes (cf chapitre 4) ce sont principalement les conditions de mise en oeuvre des remblais entre la paroi de la buse et les parois de la tranchée qui fixent les dimensions minimales à donner à ces derniers.

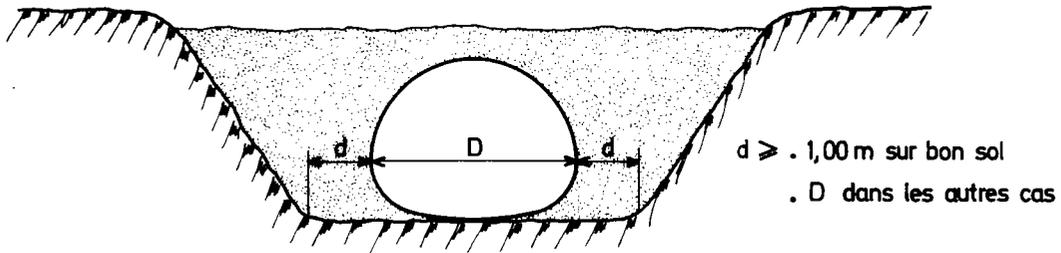
Dans toute la mesure du possible, les remblais latéraux de butée doivent être conçus symétriquement de part et d'autre de la buse pour que les déformations de celle-ci restent également symétriques.

Les massifs de butée s'étendent depuis le radier de la buse jusqu'à la clé de celle-ci, et comprennent les remblais de calage mis en oeuvre sous les reins (ou plaques de coin). Leur largeur minimale est donnée ci-après pour les principales configurations rencontrées.

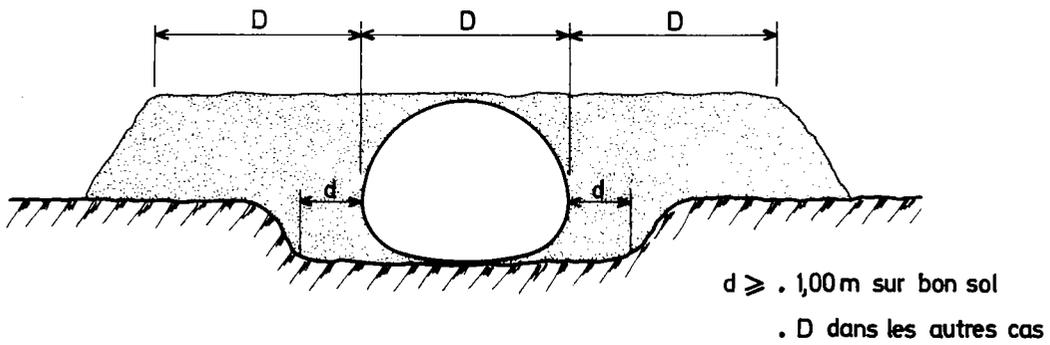
* Dans le cas des buses-arches et des passages, les justifications
 * de l'ouvrage peuvent conduire à prévoir la mise en oeuvre contre les plaques
 * de coin de banquettes constituées d'un matériau de performances mécaniques
 * supérieures à celui constituant la partie courante des massifs de butée (cf §
 * 4.3.3). Ces banquettes doivent atteindre l'extrémité supérieure des plaques
 * de coin et avoir une largeur minimale, comptée à partir du plan vertical
 * tangent à la buse, au moins égale à $2 R_c$ (fig. 3.5). Lorsqu'une fondation
 * artificielle est envisagée, elle doit être constituée du même matériau que
 * les banquettes, et ce au moins sous toute l'emprise de celles-ci.



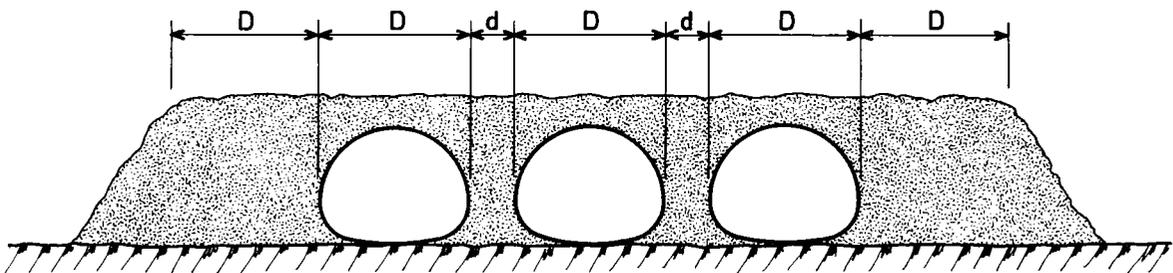
a) ouvrage en remblai



b) ouvrage totalement en tranchée



c) ouvrage partiellement en tranchée



d) ouvrages multiples

$d \geq . D/3$ pour les buses-arches
 $. D/2$ pour les buses circulaires
 $. 1,00$ m

Figure 3.10 - Remblais latéraux de butée

a) Ouvrages en remblai (fig. 3.10.a)

* Chaque massif de butée doit avoir une largeur au moins égale à la
* portée de la buse, comptée à partir du plan vertical tangent à celle-ci.

b) Ouvrages totalement en tranchée (fig. 3.10.b)

* Lorsque le terrain en place ne présente pas des qualités mécani-
* ques suffisantes (notamment valeur du module d'élasticité du sol inférieure à
* la valeur minimale définie par les calculs justificatifs de l'ouvrage), les
* massifs de butée doivent avoir une largeur minimale identique à celle requise
* dans le cas des ouvrages en remblai.

* Dans le cas contraire cette largeur minimale est fixée par les con-
* ditions de mise en oeuvre et de compactage des matériaux de remblai qui sont
* destinés à établir la jonction entre la paroi de la buse et les parois de la
* tranchée. Elle doit être, sauf dispositions spéciales, au moins de 1,00 m.

c) Ouvrages partiellement en tranchée (fig. 3.10.c)

* Ce cas particulier n'est qu'une combinaison des deux cas précé-
* dents. Dans la partie d'ouvrage en tranchée on distingue, comme ci-dessus, le
* cas où le terrain en place présente les qualités mécaniques requises de celui
* où il ne les présente pas.

d) Ouvrages multiples (fig. 3.10.d)

En règle générale, un ouvrage constitué de deux ou plusieurs bu-
ses est dit multiple lorsque les buses sont identiques et qu'elles sont si-
tuées à une même cote ou à des cotes voisines.

* Il est recommandé que la distance minimale entre nus extérieurs
* de deux buses voisines soit au moins égale à la plus grande des deux valeurs
* suivantes:

- * - pour les buses circulaires, le demi-diamètre et un mètre;
- * - pour les buses de forme surbaissée, le tiers de la portée
* et un mètre.

Une distance inférieure ne peut être acceptée qu'à l'issue d'une
étude particulière justifiant le fonctionnement mécanique de l'ouvrage et la
possibilité de mettre en oeuvre les matériaux de remblai avec la qualité
requisse.

Ces règles sont à compléter, pour les buses d'extrémité, par
celles définies précédemment pour les ouvrages constitués d'une seule buse.

3.2.2.3 - Le dôme de couverture

Le paragraphe 3.2.1.5 définit la hauteur de couverture minimale à
la clé d'une buse métallique, qui comprend, s'il y a lieu, la couche de forme
de la chaussée portée (cas général). Elle comprend également les remblais
techniques de couverture qui surmontent directement les remblais de butée à
la clé de la buse, et dont les caractéristiques géotechniques et électrochi-
miques sont les mêmes que celles requises pour ces derniers.

* La hauteur minimale du dôme de couverture doit être de $D/10$; sa
* largeur étant égale à celle des remblais techniques de butée. Toutefois, la
* circulation d'engins de chantier sur la buse durant les travaux impose que
* celle-ci soit recouverte, du moins provisoirement, d'une hauteur minimale de
* remblai (dôme de protection) supérieure à celle du dôme de couverture (cf §
* 4.4.2).



Figure 3.11

- Coupe d'extrémité droite

Figure 3.12

- Extrémité en sifflet

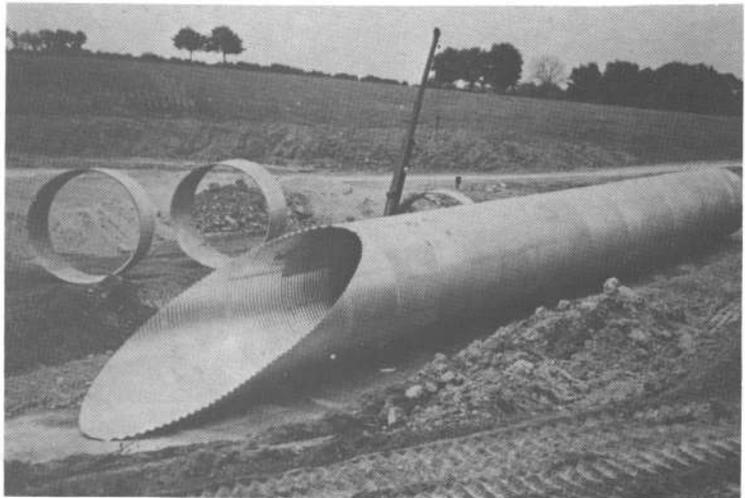
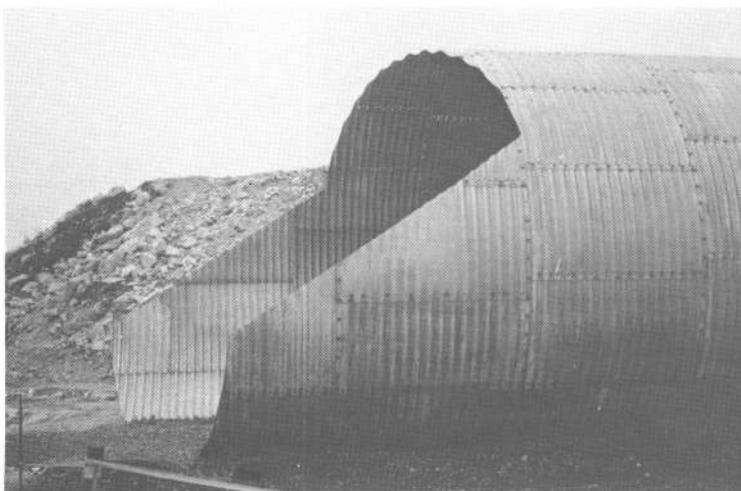


Figure 3.13

- Coupe d'extrémité en biseau-sifflet tronqué avec "casquette"



Une extrémité en biseau simple, sans offrir l'avantage d'une rigidité comparable à celle d'une extrémité droite, présente pratiquement le même inconvénient d'ordre esthétique que celle-ci. C'est la raison pour laquelle la coupe en biseau simple n'est pratiquée que dans le cas où elle est associée à un mur de tête vertical.

Dans la pratique, les extrémités des buses biaises sont généralement coupées suivant le plan du talus, définissant une coupe dite en biseau-sifflet.

Comme dans le cas des coupes en sifflet, il est de bonne construction en général, et parfois même plus économique, de tronquer la partie inférieure de l'extrémité de la buse. Il est également possible d'améliorer la rigidité de ce type de coupe par une découpe en casquette des plaques de sommet (fig 3.13).

3.2.3.2 - Les limites nécessaires à la stabilité des extrémités.

Les extrémités des buses métalliques, lorsqu'elles sont simplement découpées suivant le plan des talus, comme c'est généralement le cas, sont des parties particulièrement déformables. Leur rigidité dépend de la forme de la buse, de ses dimensions transversales, de l'inertie des ondulations et de la forme de la coupe. L'influence de ces différents facteurs n'est connue que de manière qualitative, les règles pratiques de conception s'appuyant principalement sur l'expérience de réalisations antérieures.

D'une façon générale, les extrémités des ouvrages sont d'autant plus susceptibles de se déformer que la pente du talus est faible et que le biseau est prononcé.

* Pour ces raisons, il est recommandé de limiter les coupes en biseau-sifflet à des pentes de talus supérieures ou égales à deux pour un (1 vertical, 2 horizontal) et à des angles de biseau compris entre 75 et 125 grades. Au-delà de ces limites, il convient de ramener les valeurs de la coupe à celles définies ci-dessus au moyen d'un remodelage des talus ou d'un ouvrage d'extrémité. Souvent, il sera de plus nécessaire de prévoir des dispositions complémentaires pour donner aux extrémités une rigidité suffisante. Ces dispositions consistent soit à pourvoir les extrémités des buses de raidisseurs spéciaux noyés dans le remblai (cf § 3.2.3.3), soit à les solidariser à des ouvrages rigides, appelés ouvrages d'extrémité, conçus en général pour assurer simultanément d'autres fonctions (cf § 3.2.3.4). Dans ce dernier cas la tenue des extrémités doit être assurée par un dispositif provisoire (casquette, etc.) jusqu'à l'exécution du raidissement définitif.

* La nécessité de prévoir un raidissement est à examiner dans tous les cas. On pourra trouver une indication à l'aide des règles semi-empiriques suivantes, basées sur la longueur libre de la coupe:

On calcule:

$$L = \frac{D}{(|\varphi|/100) \sin \gamma + 0,11}$$

où

- D est la portée de l'ouvrage;
- $|\varphi|$ l'angle aigu définissant le biseau, exprimé en grades ($75 \text{ gr} \leq |\varphi| \leq 100 \text{ gr}$);
- γ un angle de calcul égal à $(\pi/2) \cdot \sin \alpha$ (radians), α étant l'angle du talus avec l'horizontale ($\text{tg } \alpha \geq 0,5$).

Ce calcul est traduit sous forme graphique à la figure 3.14.

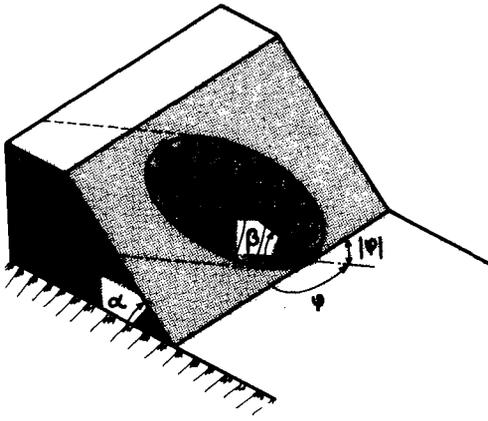
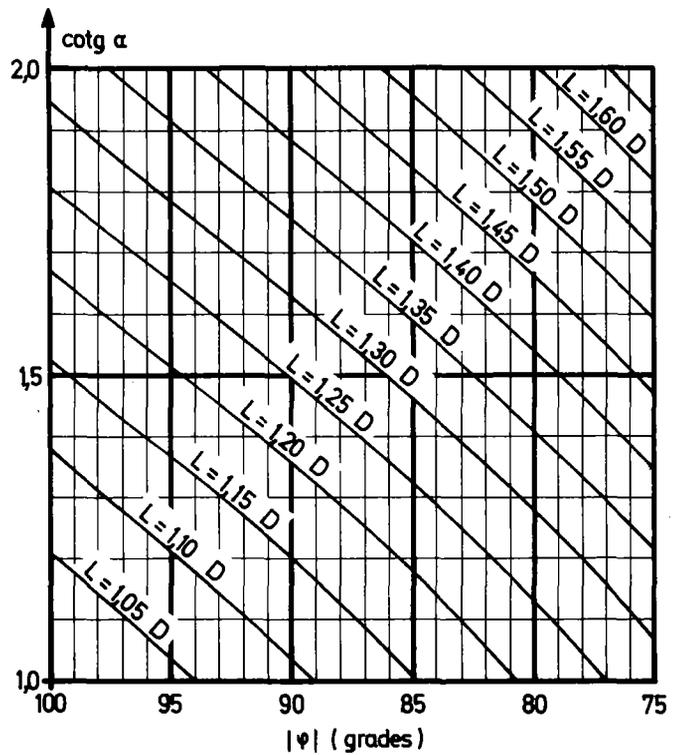


Figure 3.14

- Calcul de la longueur de coupe



On pourra considérer au stade de la conception qu'un raidissement n'est pas nécessaire si l'épaisseur des tôles d'extrémité est dimensionnée suivant les indications du paragraphe 4.4.1 et que:

- $L \sqrt{\frac{V}{D}} \leq 3.5 \text{ m}$ pour les buses à ondulations intermédiaires
- $L \sqrt{\frac{V}{D}} \leq 5 \text{ m}$ pour les buses à grandes ondulations

V désignant la flèche de l'ouvrage.

Si cette condition n'est pas vérifiée, le recours à un dispositif de raidissement sera en principe impératif. Dans le cas des buses à ondulations intermédiaires, on pourra toutefois envisager de changer de type d'ondulation. Lorsque l'épaisseur de la tôle utilisée est largement supérieure à celle qui résulte des indications données en 4.4.1, les limites ci-dessus peuvent être augmentées, mais il convient de rester particulièrement prudent car il est difficile à l'heure actuelle de donner une appréciation quantitative de cette augmentation.

* Par ailleurs, il est important de noter que les poussées des terres
 * s'exerçant sur les extrémités sont pour une grande part transmises aux an-
 * neaux complets les plus voisins et contribuent ainsi à accroître la compres-
 * sion dans la paroi de la buse au voisinage de la clé. Pour éviter une trop
 * forte concentration de ces efforts, il est souhaitable que la longueur d'an-
 * neaux complets soit au moins égale à la moitié de la longueur totale de la
 * buse, mesurée parallèlement à son axe (fig. 3.15).
 *

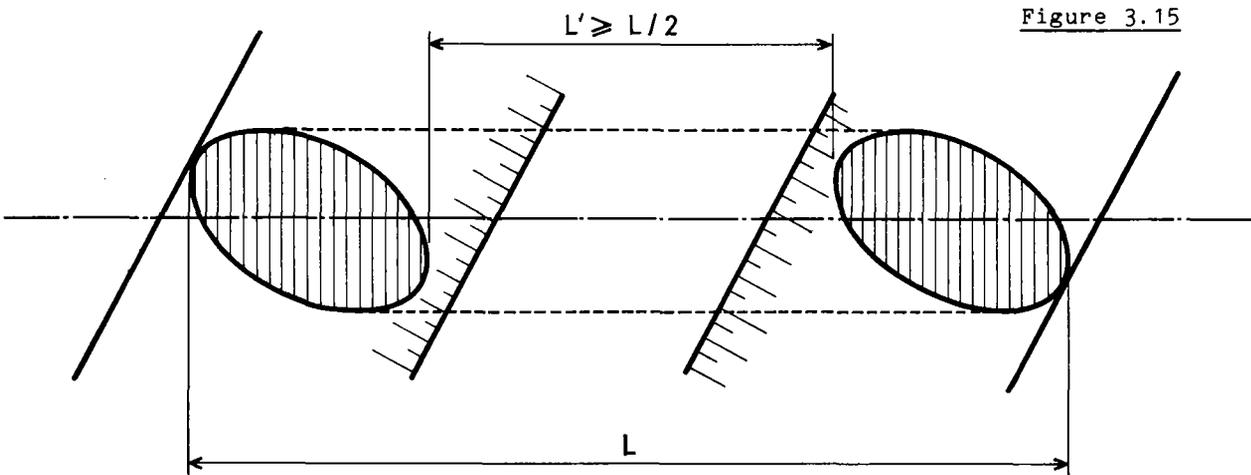


Figure 3.15

3.2.3.3 - Les raidisseurs spéciaux

Les raidisseurs spéciaux sont des dispositifs mis au point par les fabricants pour rigidifier les extrémités de buses coupées en sifflet ou en biseau-sifflet susceptibles de se déformer. Ils peuvent être utilisés à titre provisoire lorsqu'il est prévu d'ancrer ultérieurement la buse dans un ouvrage d'extrémité (ils sont alors ou bien démontés, ou bien intégrés à l'ouvrage, suivant leur conception), ou bien à titre définitif dans le cas contraire.

Figure 3.16

- Raidisseur provisoire

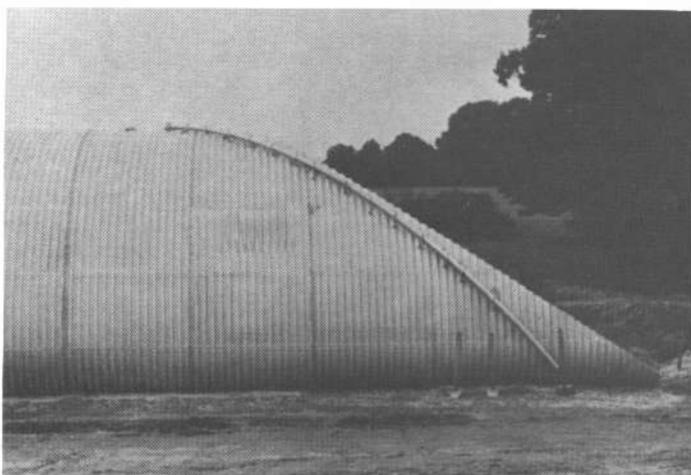
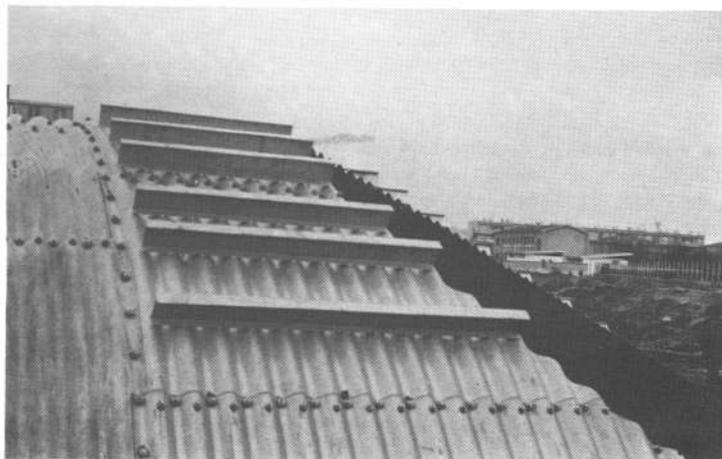


Figure 3.17

- Raidisseurs intégrés

a) armature tubulaire (ARVAL)

b) IPN fixés aux parois (ARMCO)



* Dans leur principe, ces dispositifs consistent soit à rigidifier
* directement et localement la paroi (augmentation de l'épaisseur, casquette,
* adjonction d'éléments), soit à transférer une partie des efforts qui sollici-
* tent l'extrémité de la buse aux anneaux complets les plus voisins (leur uti-
* lisation à titre définitif est dans ce cas déconseillée), soit encore à faire
* reprendre ces efforts lorsque l'extrémité se déforme par une structure plus
* rigide disposée autour de celle-ci (fig. 3.16 et 3.17).
*
*
*
*
*
*
*
*
*
*
*

* Ces dispositifs, généralement couverts par des brevets déposés par
* leurs concepteurs, doivent faire l'objet de propositions techniques de la
* part des entreprises soumissionnaires, ces propositions devant être approu-
* vées par les fournisseurs. Lorsque leur utilisation est envisagée, il con-
* vient donc de rédiger le RPAO en conséquence et d'obtenir des garanties de la
* part du fabricant sur la tenue des extrémités de l'ouvrage pendant le rem-
* blaiement et à long terme, car il n'existe à l'heure actuelle aucune méthode
* de calcul de ce genre de dispositifs.
*
*
*
*
*
*
*
*
*
*
*

3.2.3.4 - Les ouvrages d'extrémité

Diverses raisons peuvent conduire à prévoir la réalisation d'ouvra-
ges d'extrémité. Il peut s'agir notamment de chercher à insérer au mieux
l'ouvrage dans son environnement (esthétique); de rigidifier les extrémités
des buses lorsqu'elles sont susceptibles de se déformer de manière excessive,
d'éviter la coupe de ces extrémités au delà des limites qu'il est recommandé
de respecter; de protéger les talus contre l'action de l'eau (érosion, af-
fouillement); de diminuer les pertes de charge à l'entrée des ouvrages hy-
drauliques; éventuellement de limiter l'emprise de l'ouvrage ou des remblais.

Certains de ces ouvrages ont un rôle bien particulier, comme par
exemple les murs ou rideaux parafouilles. Ils ne sont pas présentés dans le
présent paragraphe, qui traite uniquement des ouvrages d'extrémité ayant un
caractère suffisamment général pour pouvoir être associés à tous les types
d'ouvrages rencontrés.

* De façon générale il faut noter que, quel que soit son rôle ou
* son principe, un ouvrage d'extrémité rigide ne peut être solidarisé à une
* buse métallique qu'à condition que les déformations ultérieures de celle-ci
* restent faibles, ce qui peut conduire, notamment dans le cas de terrains com-
* pressibles, à différer leur réalisation.
*
*
*
*
*
*
*
*
*
*
*

a) Les couronnements (fig. 3.18)

Généralement, les poutres de couronnement sont réalisées en béton
armé et solidarisées à l'ouvrage au moyen de crochets d'ancrage spécialement
prévus à cet effet par les fournisseurs de buses métalliques.

L'exécution d'un tel couronnement est relativement difficile, de
plus la détermination des efforts qui le sollicitent lorsqu'il sert de rai-
disseur est très empirique et peut être entachée d'une forte incertitude. De
ce fait, on lui préfère généralement un perré, notamment dans le cas des ou-
vrages hydrauliques, car il permet d'assurer en outre la protection du talus
contre l'action érosive de l'eau.

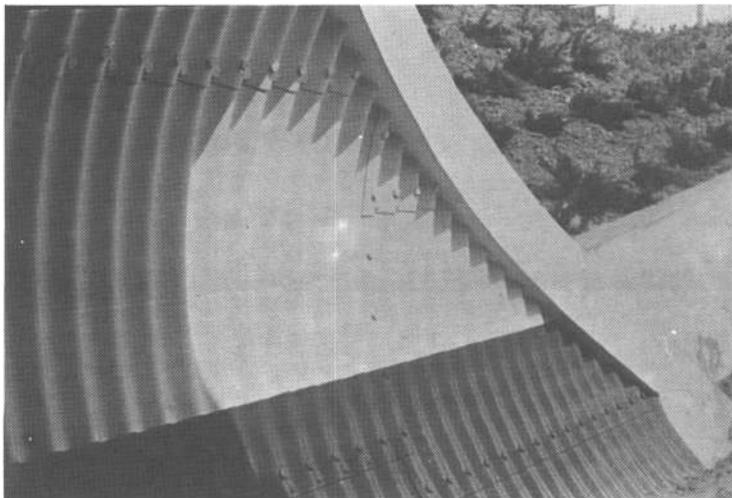


Figure 3.18

- Poutre de couronne-
ment

b) Les perrés (fig. 3.19)

Les perrés sont les ouvrages d'extrémité le plus couramment rencontrés. Lorsqu'ils sont destinés à protéger les talus contre l'action de l'eau, il est recommandé que leur surface, ainsi que leurs contacts avec les bords de la buse, soient étanches. Le respect de cette disposition est indispensable dans le cas des ouvrages hydrauliques, où l'action érosive de l'eau peut être très importante. Dans ce cas il est recommandé également que leur étendue soit suffisante pour éviter qu'ils ne se dégradent par progression de l'érosion du talus à partir de leurs extrémités.

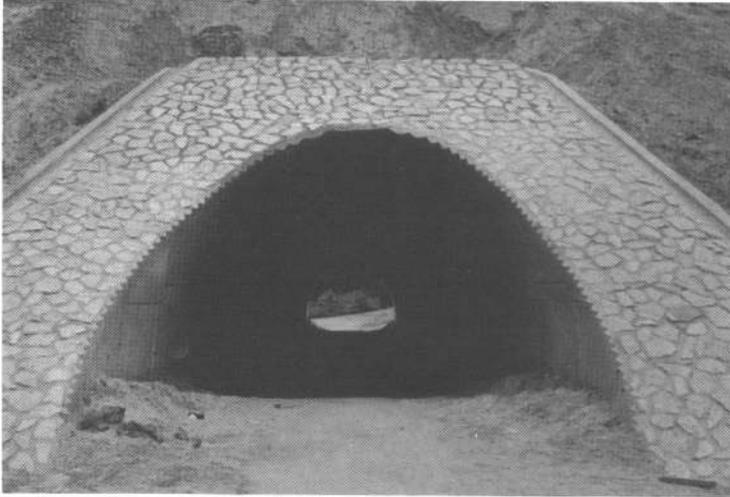


Figure 3.19

- Perré

Lorsqu'ils ont un rôle de raidissement, les perrés sont, comme les couronnements, le plus souvent réalisés en béton armé et solidarisés aux bords coupés des buses par des crochets d'ancrage. La détermination des efforts qui les sollicitent étant pratiquement impossible, ils sont en général dimensionnés forfaitairement de manière assez large. Il est conseillé de leur donner une largeur supérieure en tout point à $D/5$ (D , portée de la buse), leur épaisseur pouvant varier en fonction de la taille de l'ouvrage entre 0,20 m pour les buses de petite portée et 0,40 m pour les ouvrages les plus importants. On pourra les armer par une ou deux nappes de treillis soudé, à un taux voisin de 40 kg d'acier par mètre cube.

c) Les murs de tête

Les murs de tête sont des ouvrages de soutènement, éventuellement associés à un radier ou à un mur parafouille dans le cas des ouvrages hydrauliques. En plus des rôles de protection, de raidissement ou d'amélioration de l'esthétique communs à tous les ouvrages d'extrémité, ils peuvent permettre la réalisation d'ouvrages très biaisés ou placés dans des remblais à faible pente de talus.

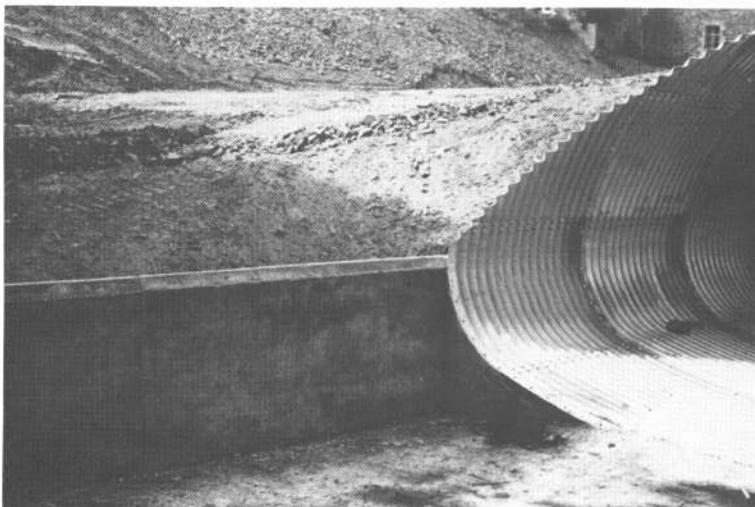


Figure 3.20

- Murs de tête

Les plus petits des murs de tête sont ceux qui ne concernent que la partie inférieure de l'extrémité des buses coupées en sifflet ou en biseau-sifflet. Ils sont souvent exécutés après remblaiement de la buse (fig. 3.20).

Les murs de tête plus importants concernent généralement une hauteur supérieure à celle de la buse elle-même. Ils peuvent être constitués d'un simple mur vertical, ou présentant un léger fruit, dont les extrémités sont noyées dans le remblai. Ils sont plus souvent constitués d'un mur vertical central complété à ses extrémités de deux murs en aile dont la crête suit le talus (fig. 3.26). Pour des raisons évidentes, ces murs de tête sont exécutés après montage de la buse mais avant mise en oeuvre des remblais, les extrémités de la buse étant souvent utilisées comme partie de coffrage et solidarisées aux murs par des crochets d'ancrage.

Dans ce cas, il est tout particulièrement nécessaire de limiter les déformations au voisinage de l'extrémité de la buse, le bord de celle-ci se trouvant bloqué sur un contour rigide. Pour cette raison, les murs de tête doivent avoir la plus faible hauteur possible.

En tout état de cause, la stabilité de ces murs doit être totalement assurée, indépendamment de la présence de la buse.

3.2.4 - Protection contre les eaux

3.2.4.1 - Protection contre les eaux d'infiltration

Les eaux de ruissellement en provenance de la plateforme supérieure sont souvent chargées d'agents agressifs, (notamment les sels de déverglaçage), et peuvent avoir une action néfaste sur la paroi de la buse (accélération de la corrosion) lorsqu'elles s'infiltrent dans les remblais de l'ouvrage. Pour éviter ou limiter ces infiltrations, il est nécessaire de réaliser une chaussée et des caniveaux étanches capables de collecter ces eaux et de les évacuer au-delà de l'emprise de l'ouvrage.

Dans certains cas, et notamment lorsque la hauteur des remblais à la clé est faible, il peut être souhaitable, à titre de complément, de disposer un géotextile étanche sur les remblais techniques de l'ouvrage.

3.2.4.2 - Etanchéité

Les buses métalliques ne sont pas des ouvrages étanches et, lorsque des écoulements d'eau s'établissent à travers leur paroi, ils peuvent provoquer à terme une modification des caractéristiques physiques et géotechniques des remblais par entraînement des particules fines.

Dans le cas d'ouvrages non hydrauliques, l'absence d'infiltrations à travers la paroi de la buse est de plus particulièrement importante pour des raisons d'esthétique et de sécurité, mais il est à noter également qu'elle sera généralement acquise de façon naturelle pour les ouvrages construits en remblai (cas quasi général), surtout lorsque des dispositions particulières sont prises pour limiter les infiltrations d'eaux dans les remblais autour de l'ouvrage (cf § 3.2.4.1 ci-dessus).

Ces infiltrations ne sont véritablement à craindre que pour des ouvrages directement soumis à l'action d'une nappe, qu'il s'agisse d'ouvrages construits en déblai dans des terrains noyés ou d'ouvrages hydrauliques susceptibles d'être fréquemment soumis à une baisse rapide des eaux qui les empruntent (décrues brutales, marnage important,...). Dans de tels cas, lorsque le choix du type d'ouvrage n'est pas remis en cause, une disposition peut consister à entourer la buse d'un géotextile étanche. Une telle disposition, qui peut se justifier pour des ouvrages de faible section, peut cependant être à l'origine de difficultés d'exécution considérables pour de grandes buses et entraîner des sous-pressions excessives sous le radier (risque de soulèvement). Pour ces raisons, il paraît souhaitable, pour des ouvrages hydrauliques, plutôt que de chercher à étancher la paroi de la buse, de chercher à limiter les risques d'entraînement des fines en prévoyant un géotextile non étanche ou en portant son choix sur un matériau de remblai de granulométrie appropriée.

protection béton : couche bitumeuse
+ moquette pour protection du bitumeuse
ou sable

* En tout état de cause, les techniques consistant à intercaler des
* bandes de matériau souple entre les tôles au droit des joints sont à proscri-
* re.
*

3.2.4.3 - Protection contre les eaux de ruissellement

Il est souhaitable dans certains cas, et notamment pour les ouvrages non hydrauliques sous assez forte hauteur de remblai, (talus importants) de protéger les extrémités des ouvrages contre les venues d'eau en provenance des talus car elles peuvent apporter une gêne aux usagers des voies franchies. Une bonne disposition consiste à réaliser un parapet en partie haute des ouvrages d'extrémités, assurant en outre un rôle de piège à cailloux.

3.3 - CONCEPTION DES OUVRAGES HYDRAULIQUES

3.3.1 - Généralités

L'utilisation la plus courante des buses métalliques concerne les ouvrages hydrauliques. Dans ce domaine d'emploi, et bien que des ouvrages de portées voisines de 10 m aient déjà été réalisés, l'application la plus fréquente se situe dans un domaine de portées compris entre 2 et 6 m.

Le choix d'une buse métallique est en général beaucoup moins influencé par des critères d'ordre spécifiquement hydraulique que par des critères économiques ou structuraux car, à portée égale et donc à encombrement horizontal égal, un cadre, un portique en béton armé ou même un ponceau voûté offrent un débouché supérieur et une résistance à l'écoulement plus faible.

Néanmoins, le recours fréquent aux buses métalliques dans ce domaine d'emploi peut s'expliquer par la moindre importance que revêtent les problèmes d'esthétique pour ce type d'ouvrages, et par la bonne adaptation de la gamme de dimensions et de formes proposée à des rétablissements d'écoulements modestes.

* Pour les ouvrages d'art en béton armé, la nécessité de mettre hors
* d'eau une certaine zone autour des appuis pendant la construction est quasi
* générale. On retiendra qu'il doit en être de même dans le domaine des buses
* métalliques et que les mesures correspondantes doivent être envisagées dès le
* stade de la conception. L'adoption de dispositions telles que le montage de
* la buse à proximité de son emplacement définitif, suivi d'une mise en place
* par levage ou tirage doit rester exceptionnelle et doit être accompagnée
* d'une étude détaillée d'exécution.
*

En effet, dans de telles conditions de mise en oeuvre (cf chapitre 6), le contrôle des qualités de l'assise de la buse peut être très difficile lorsque le fond de fouille est noyé. De plus, dès que les dimensions des ouvrages dépassent certaines limites (portée, flèche, ou longueur), leur maniabilité devient réduite et leurs extrémités, en particulier, peuvent être amenées à souffrir de déformations excessives.

Il conviendra donc de prévoir, comme pour des ouvrages classiques en béton, en fonction du site, un détournement du cours d'eau et l'épuisement de la fouille, protégée sur tous ses côtés par des moyens appropriés (levées de terre, etc.).

En ce qui concerne l'étude hydraulique des ouvrages, il faut noter que sa complexité est fonction de la taille du bassin versant alimentant l'écoulement à rétablir. Il est d'usage de distinguer deux cas:

- superficie du bassin versant inférieure à 100 km²;
- superficie du bassin versant supérieure à 100 km².

Les recommandations qui suivent ne concernent que le premier cas, dans le second, les vérifications à mener sont d'une toute autre importance et sortent des possibilités d'un projeteur non spécialisé dans ce domaine.

3.3.1.1 - Etude hydrologique

En amont de l'étude hydraulique se situe l'étude hydrologique qui, une fois le bassin versant défini, fixe à l'aide de méthodes empiriques le débit maximal de projet. Pour ce faire il faut choisir une fréquence d'occurrence du débit de projet (il est recommandé de prendre 100 ans). Comme il est rare de disposer d'une station de mesures fonctionnant depuis une période suffisamment longue à proximité d'un franchissement de petit cours d'eau, on se référera le plus souvent à des abaques donnant des débits selon des méthodes plus ou moins forfaitaires. On obtient en général de la sorte un débit décenal Q_{10} à partir duquel on obtient le débit centenal (débit de projet) par la formule $Q_{100} = 2 Q_{10}$, à défaut de coefficient régional. Dans tous les cas il convient de confronter l'ordre de grandeur des résultats obtenus avec la taille du lit existant et les témoignages éventuels des riverains.

Le deuxième paramètre susceptible d'être fixé dès le début de l'étude est la hauteur d'eau admissible en amont de l'ouvrage; ce sont des contraintes dues à l'environnement qui fixeront cette valeur:

- le remblai dans lequel se trouve la buse n'est pas conçu pour constituer un endiguement et les ouvrages d'art situés à proximité pourraient subir un préjudice du fait d'une trop forte montée des eaux;

- l'urbanisation ou la nature des activités (agricole, industrielle) exercées dans le site sont telles que le niveau des eaux doit être maintenu en-dessous d'une certaine cote.

On notera enfin que cette phase de l'étude doit être menée suffisamment tôt car elle est susceptible d'agir sur le tracé et le profil en long de la voie portée alors qu'il est improbable qu'une modification de ces derniers remette en cause les principales conclusions de l'étude hydrologique. C'est pourquoi on essaiera de se donner le délai et les moyens nécessaires pour la mener à bien en ayant recours au besoin à un bureau d'études spécialisé.

3.3.1.2 - Mise en charge éventuelle

Les buses n'étant pas des ouvrages étanches (cf § 3.2.4.2), il est particulièrement déconseillé de les faire fonctionner en charge car il y a risque de voir apparaître des circulations d'eau dans le remblai le long de la buse.

Dans certains cas, il peut cependant arriver que les contraintes du projet soient telles qu'un fonctionnement intermittent de la buse en charge (en période de précipitations exceptionnelles par exemple) soit inévitable. Il est nécessaire dans de tels cas de faire en sorte que la période de retour de cet événement soit importante (20 ans par exemple) et que, par ailleurs, la différence de niveau de l'eau entre l'amont et l'aval reste modérée.

3.3.2 - Implantation des ouvrages

3.3.2.1 - Tracé en plan

La buse est toujours une singularité dans le lit du cours d'eau (en général un rétrécissement, plus rarement un élargissement), mais elle est surtout un segment du cours d'eau que l'on fige. Il y a donc lieu de prendre des précautions lorsque le cours d'eau à rétablir est connu pour ses divagations. On aura soin d'implanter les ouvrages en priorité dans des zones où il est réputé stable. Dans le même ordre d'idée, on retiendra qu'il vaut mieux implanter la buse en un lieu où le cours d'eau présente une partie rectiligne que dans une courbe (dans une courbe la rive concave s'érode alors que la rive convexe s'enlisse). On aura également à l'esprit qu'une modification du lit, même intéressant une zone très limitée, nécessite parfois des reprofiliages du cours d'eau à l'amont et à l'aval.

Souvent, le maintien du tracé de l'écoulement existant peut conduire à une implantation biaisée par rapport à l'axe de la voie. Cette solution, bonne d'un point de vue hydraulique, présente l'inconvénient de conduire à des longueurs d'ouvrage importantes et de nécessiter dans certains cas un aménagement des extrémités (remodelage des talus). De ce fait, on sera parfois amené à adopter un tracé moins biaisé par rapport à l'axe de la voie franchissante, mais il faudra alors éviter dans la mesure du possible que l'écoulement incident à l'amont longe le pied du talus (fig. 3.21).

Enfin, pour ce qui est du tracé de la buse elle-même, on adoptera le tracé le plus direct, les coudes étant déconseillés.

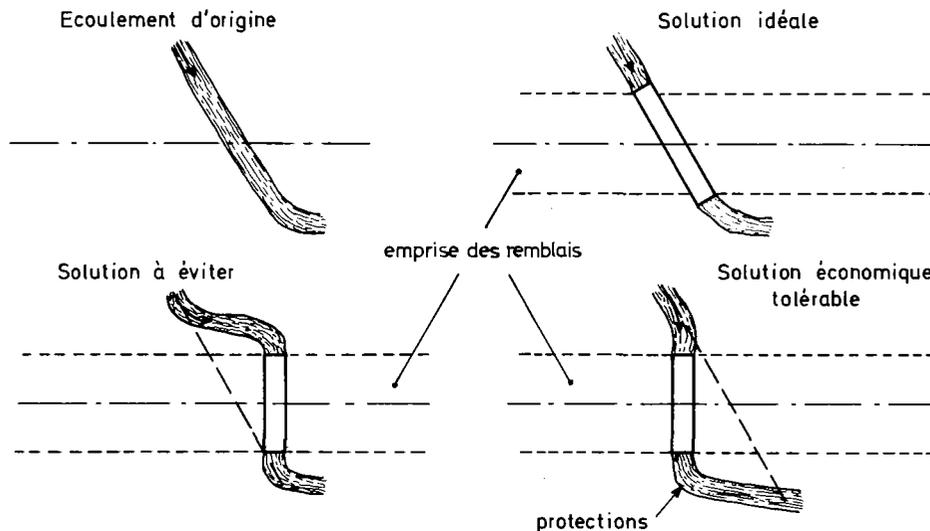


Figure 3.21

3.3.2.2 - Profil en long (calage)

Le profil en long de la voie nécessitant le rétablissement est parfois tel que, compte tenu des prescriptions de hauteur de remblai minimum et de l'importance du débit à évacuer, on est conduit à adopter soit des formes surbaissées, soit un ouvrage multiple, soit une combinaison de ces deux solutions de manière à conserver le fond du lit originel. Il convient dans ce cas de s'assurer que celui-ci n'est pas susceptible de s'approfondir, car la buse ne saurait s'y adapter à moins d'avoir été enterrée en conséquence.

Dans tous les cas, il est recommandé de ne pas fonder le radier de l'ouvrage au-dessus du niveau du fond du lit originel mais plutôt d'approfondir légèrement celui-ci pour se mettre à l'abri du phénomène d'abrasion (cf § 3.3.5), la section utile à l'écoulement n'étant par contre que celle débutant au-dessus de la cote du fond du lit originel.

En ce qui concerne le choix de la pente, plusieurs cas de figure sont à envisager (la pente du lit désigne dans ce qui suit celle du lit originel ou du terrain naturel) :

a) La pente du lit est faible ou nulle:

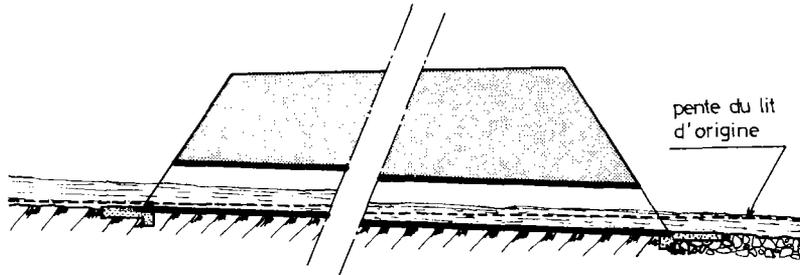
L'ouvrage sera implanté avec la pente maximale que peut permettre l'approfondissement du lit par curage (fig. 3.22 a).

b) La pente du lit est normale (de 0,5 à 6%):

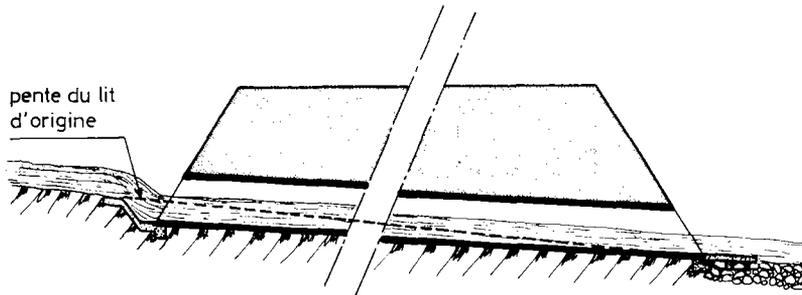
Il faudra que celle du futur ouvrage se cale au plus près de cette pente, qui deviendra une donnée de l'étude.

c) La pente du lit est trop forte:

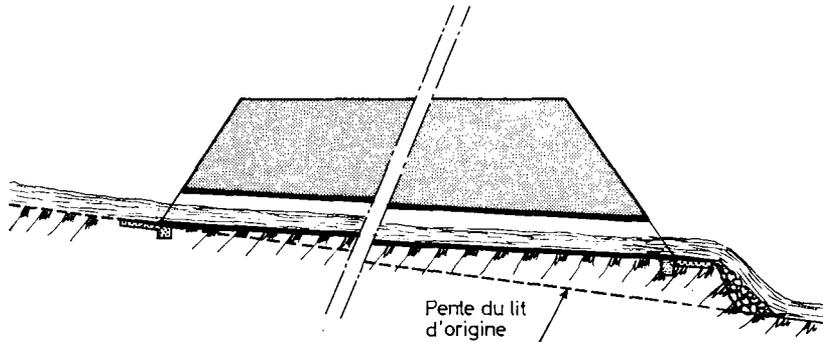
On ne prévoira la conservation d'une telle pente que lorsqu'elle n'est pas incompatible avec la faisabilité de l'ouvrage et qu'on aura pris les dispositions nécessaires pour limiter l'abrasion. Dans tous les autres cas on diminuera la pente soit en approfondissant l'entrée, soit en surélevant la sortie par rapport au terrain naturel. Le choix de l'une ou l'autre solution dépendant de l'importance du débit (fig. 3.22 b et c).



a) pente faible



b) pente forte: approfondissement de l'entrée



c) pente forte: surélévation de la sortie

Figure 3.22 - Aménagements envisageables du fond du lit

3.3.2.3 - Ouvrages multiples

D'une manière générale, le recours à un ouvrage multiple se justifie hydrauliquement dans le cas d'un cours d'eau relativement large, le rétrécissement de l'écoulement devant être évité autant que faire se peut. On est également conduit à recourir à un tel type d'ouvrage lorsque la chaussée est peu élevée par rapport au fond du lit et ne permet qu'une ouverture réduite compte tenu de la hauteur de couverture minimale à conserver.

On retiendra que les ouvrages multiples présentent notamment l'inconvénient de favoriser la rétention de corps flottants ainsi que le dépôt de sédiments, susceptibles d'obstruer à la longue une partie du débouché (dans certains cas, on pourra prévoir des pièges à sédiments à l'amont). Bien que ce phénomène soit de nature à diminuer l'efficacité hydraulique des ouvrages, on considère généralement que la capacité d'un ouvrage multiple est la somme des capacités de ses divers ouvrages constitutifs lorsqu'il existe un bon profilage des entonnements.

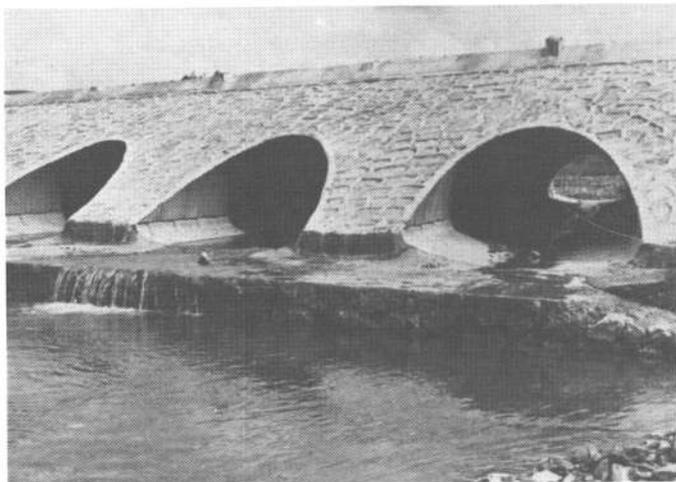


Figure 3.23

- ouvrage multiple
avec seuil (buses
emboîtées)

3.3.3 - Problèmes posés par le calcul du débouché hydraulique

Un des intérêts des buses métalliques est de proposer une gamme de profils assez étendue. Leur calcul hydraulique pose donc un problème spécifique rarement traité dans la littérature, les formes de conduites habituellement envisagées n'étant guère plus complexes que le trapèze ou le cercle. On se bornera ici à exposer les avantages respectifs des différentes formes et à passer en revue les données nécessaires au dimensionnement du débouché afin d'en dégager le caractère indispensable ou au contraire facultatif. On trouvera par ailleurs en annexe n° 2 une méthode simplifiée de calcul hydraulique.

3.3.3.1 - Niveau de résultats souhaitable de l'étude hydrologique

Dans la plupart des cas on aura sans doute pu fixer la pente de l'ouvrage (cf § 3.3.2) et éventuellement un gabarit maximum à lui donner, compte tenu de la hauteur de remblai disponible et de la double nécessité de ménager une hauteur de couverture minimale et de placer le radier de la buse le plus près possible du fond du lit originel.

A ce stade de la conception, l'étude hydrologique doit permettre de connaître au moins une valeur du débit à évacuer (selon la période de retour envisagée) et éventuellement la ou les valeurs de la profondeur d'écoulement associée dans le canal d'amenée amont. La même étude devra également avoir fixé la cote maximale admissible de montée des eaux en amont de la buse.

Cette étude doit permettre également de fixer un niveau d'eau à l'aval, car celui-ci peut avoir une influence non négligeable sur les dimensions du débouché: dans les zones relativement peu en pente, une forte hauteur d'eau à l'aval diminue l'efficacité de l'orifice choisi. Indépendamment de cette considération, ce niveau peut être imposé par les conditions d'écoulement à l'aval, par un autre cours d'eau, par la marée, etc.

Par ailleurs, l'examen de la nature et de la granulométrie des éléments de sol constitutifs du fond du lit donnera une idée de la vitesse d'entraînement de ceux-ci et, par là-même, permettra d'évaluer le risque éventuel de débit solide et une vitesse maximale admissible à la sortie de l'ouvrage lorsque celle-ci n'est pas protégée.

3.3.3.2 - Critères pour un prédimensionnement du débouché

Un prédimensionnement est d'autant plus aisé qu'il repose sur l'observation d'ouvrages existants en amont ou en aval de l'ouvrage à dimensionner. D'autre part, des considérations tant d'ordre général qu'hydraulique peuvent imposer une hauteur intérieure maximale à l'ouvrage.

La confrontation des diverses contraintes permettra en général de fixer sinon une valeur, du moins une fourchette de valeurs possible pour la hauteur intérieure de l'ouvrage.

La dimension horizontale peut en être déduite par comparaison des efficacités hydrauliques respectives des différentes formes. Il faut noter à ce propos que les formes surbaissées sont généralement plus efficaces que la forme circulaire sur le plan hydraulique. L'énergie minimale nécessaire pour évacuer un débit donné à flèche et à hauteur d'eau égales est en effet plus élevée dans le cas d'une forme circulaire que dans le cas d'une forme surbaissée.

Dans les cas où la forme semblant convenir est une forme ayant un surbaissement élevé, il est possible, si les conditions de fondation le permettent, d'envisager l'emploi d'une arche, ce qui présente l'avantage de ne pas interrompre la continuité du fond du lit.

Le choix d'un débouché est fait en général sur la base du débit maximal et du niveau des P.H.E correspondantes; cependant, il y a quelquefois intérêt à vérifier le même débouché sous un débit plus faible mais plus fréquent, de manière à s'assurer que cet orifice ne provoque pas une surélévation trop forte à l'amont par rapport à la situation existante, ou bien, qu'au contraire, la hauteur d'écoulement ne s'abaisse pas à l'excès, ce qui pourrait poser des problèmes écologiques (abaissement de la nappe phréatique, tirant d'eau insuffisant pour certaines espèces de poissons,...).

3.3.4 - Extrémités des ouvrages hydrauliques

La configuration des extrémités peut avoir des conséquences non négligeables sur l'efficacité hydraulique de la buse ainsi que sur son comportement, tant au moment de la mise en oeuvre qu'en service.

En général on adopte les mêmes dispositions à l'entrée des buses qu'à la sortie, bien que, hormis les cas particuliers où le sens du courant dans la buse est susceptible de s'inverser (cas par exemple des ouvrages soumis au phénomène des marées), on devrait en toute rigueur différencier le traitement des deux extrémités, les problèmes y étant de nature différente.

* Dans tous les cas il convient de prévoir au minimum une protection
* du talus à la périphérie de la buse constituée d'un perré étanche et de murs
* parafouilles, complétée si nécessaire par d'autres dispositifs (éperons,
* etc.). La recherche d'une étanchéité à proximité des extrémités par un "mas-
* que d'argile" est à proscrire.
*

On distinguera ci-après les problèmes liés à l'action de l'eau sur la paroi de la buse elle-même, de ceux liés à cette même action sur le sol ou les protections situées à proximité des extrémités.

Il y a lieu de noter que les protections auxquelles il est fait allusion sont destinées à lutter contre le seul affouillement local susceptible de survenir au voisinage des extrémités, et ce dans des limites relativement étroites.

3.3.4.1 - Action de l'écoulement sur la paroi des têtes - Remèdes.

Cette action concerne surtout les extrémités amont. L'emploi de tôle ondulée confère aux parois de la buse une flexibilité importante, favorable au bon fonctionnement de l'ouvrage en partie courante mais rendant ses extrémités fragiles et très sensibles aux diverses actions qui peuvent s'exercer sur elles (poussée des terres, action de l'eau).

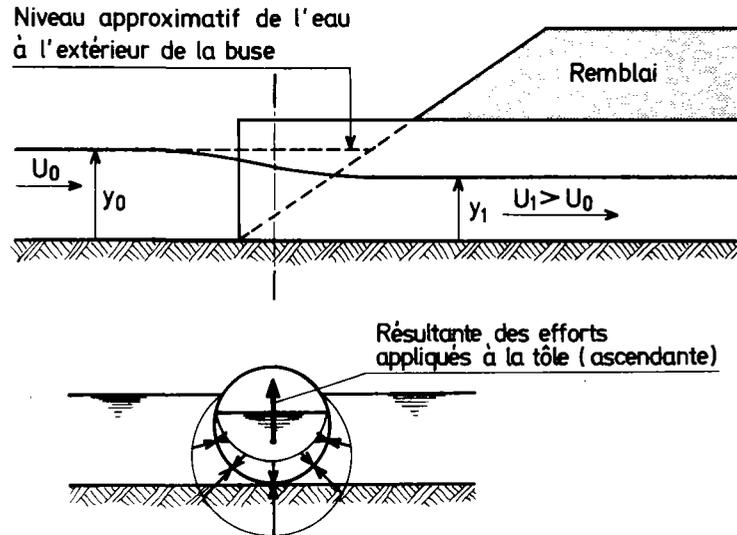


Figure 3.24

Diagrammes des pressions hydrostatiques intérieures et extérieures subies par la paroi

D'une façon générale les extrémités droites en saillie sont à éviter car, en plus des inconvénients d'ordre esthétique et fonctionnel qu'elles peuvent présenter (cf § 3.2.3.1), elles sont exposées à un phénomène de mise en flottaison et de soulèvement dû à la différence de pression qui se manifeste en général de part et d'autre de la paroi de la buse. Celle-ci peut en effet être suffisamment accentuée pour compenser le poids propre de la tôle (fig. 3.24).

* Ce danger existe également pour les extrémités coupées suivant le plan du talus, bien qu'il puisse se manifester différemment en provoquant une déformation de l'extrémité du radier. Dans ces cas, que l'extrémité soit tronquée ou non (cf § 3.2.3.1), il est recommandé de lester systématiquement celle-ci en l'ancrant solidement dans un ouvrage, par exemple en béton ou en béton armé, qui pourra être également prévu pour assurer d'autres fonctions (radier béton, mur parafouille,...). L'ancrage pourra être réalisé par exemple au moyen de crosses filetées boulonnées à la tôle et noyées dans le béton.

Enfin, dans le cas particulier des ouvrages multiples, pour éviter les chocs et l'accumulation de corps flottants à l'extrémité amont, et pour limiter l'action néfaste de phénomènes de turbulence, on pourra prévoir des avancées entre les buses (éperons) constituées par exemple de béton armé, de béton cyclopéen, ou d'encrochements.

3.3.4.2 - Action de l'écoulement sur les abords des têtes - Remèdes.

Comme il a été précédemment mentionné, il ne s'agit ici que de remédier à l'érosion occasionnée par les modifications imposées à l'écoulement normal par la buse. Ces modifications sont en effet inévitables et se traduisent souvent par une augmentation de la vitesse, entraînant un risque accru d'érosion progressive (à l'amont) ou régressive (à l'aval).

Parmi celles-ci, on peut citer notamment l'étranglement apporté par l'ouvrage, une pente parfois plus forte que celle du lit naturel et, dans tous les cas, une rugosité plus faible.

Les moyens préconisés dans ces cas sont les mêmes que ceux adoptés couramment pour les cadres ou d'autres ouvrages hydrauliques et ne sont donc pas des solutions spécifiques aux buses métalliques. C'est ainsi qu'on essaiera de lutter contre la formation de fosses dues à l'érosion en prévoyant un radier sur la longueur du rétrécissement. Ce radier, ainsi que les fondations des autres protections (perrés ou murs de tête, murs en aile, éperons, etc.) devront être s'il y a lieu mis à l'abri de l'affouillement par l'emploi de murs ou rideaux parafouilles.



Figure 3.25

- Protection en palplanches

Figure 3.26

- Mur de tête avec radier et murs en aile



3.3.5 - Protection contre l'abrasion

L'abrasion est l'usure mécanique du métal due au frottement du débit solide. Elle est fonction de l'importance et du caractère de ce débit ainsi que de la fréquence, de la durée et de la vitesse de l'écoulement des eaux. On admet généralement qu'il peut y avoir risque d'abrasion si la vitesse des eaux dans la buse dépasse 2,5 m/s et si le lit naturel en amont comporte des éléments tels que sables, graviers ou roches, susceptibles de se mettre en mouvement à une telle vitesse. On trouvera en 5.1.5 une description plus détaillée des principaux cas de figure où il convient d'envisager une protection contre l'abrasion.

Contre ce risque, il est possible de prévoir soit un revêtement intérieur, soit un dispositif tendant à diminuer la vitesse du courant, soit les deux solutions lorsque l'abrasion risque d'être très importante.

3.3.5.1 - Les revêtements intérieurs

Ils peuvent être constitués de béton bitumineux ou de béton de ciment. Le revêtement de béton bitumineux ou asphaltique serait le plus satisfaisant du point de vue mécanique, l'utilisation d'un revêtement en béton de ciment privant une partie de l'ouvrage de sa flexibilité et étant par ailleurs susceptible de se dégrader plus rapidement s'il est fortement fissuré. Des constatations faites sur ouvrages aux USA ont montré que la durée de vie des revêtements en béton bitumineux était au maximum de 25 ans dans des sites sujets à l'abrasion.

Dans tous les cas (bétons bitumineux ou de ciment) il est recommandé de prévoir une armature de liaison raccordée à la boulonnerie du radier et un revêtement couvrant au moins le quart inférieur de la buse et constituant une couverture convenable au-dessus des crêtes des ondulations. Cette couverture doit être surveillée périodiquement, l'apparition des armatures étant le signal de sa reconstitution. Son épaisseur doit être proportionnée à l'importance présumée de l'abrasion.

3.3.5.2 - Dispositifs tendant à diminuer la vitesse dans l'ouvrage.

La conception de tels dispositifs doit être conduite en étroite relation avec celle de dispositifs tendant à réduire la vitesse en amont ou en aval de l'ouvrage car il est rare, en effet, qu'un problème d'abrasion se pose dans une buse sans qu'un problème d'affouillement se pose également à ses abords. On peut envisager les solutions suivantes:

- diviser le cours d'eau en plusieurs ramifications grâce à de petites buses multiples (on bénéficie du fait que de tels ouvrages occasionnent des pertes de charge élevées à leur entrée);
- casser la vitesse des eaux par des plots en béton, des enrochements, ou des cascades successives, disposés dans le lit du cours d'eau en amont de la buse;
- donner à la buse une pente longitudinale inférieure à celle du terrain naturel.

3.4 - CONCEPTION DES OUVRAGES NON HYDRAULIQUES

3.4.1 - Généralités

Les utilisations des buses métalliques dans le cadre d'ouvrages non hydrauliques sont multiples. C'est ainsi que l'on peut envisager le rétablissement de voies secondaires, le désenclavement de certaines propriétés en milieu rural, ou, vis-à-vis de la faune, de certains secteurs boisés, ou encore des passages pour piétons en milieu urbain (cf § 1.2.1.2).

Pour que ces ouvrages soient bien adaptés à leur destination, leur conception requiert une étude précise des contraintes attachées à leur fonction. On peut citer notamment:

- une étude du gabarit suivant la catégorie de la route ou l'affluence dans le passage;
- une étude esthétique portant à la fois sur les extrémités de l'ouvrage et sur sa partie courante;
- un drainage suffisant;
- la nécessité d'une chaussée adaptée à chaque type de circulation.

3.4.2 - Rétablissement de voiries secondaires

Ce type d'utilisation correspond à des ouvrages de grandes dimensions et a donné lieu aux plus grands ouvrages réalisés à l'heure actuelle. Leurs dimensions et leur destination font qu'une attention particulière doit

être portée à leur étude et à leur réalisation; ils devront notamment être systématiquement classés dans la catégorie des ouvrages de "grande importance" (cf § 3.5).

3.4.2.1 - Gabarit

Par référence au document-type CAT 75 (p. 53), les rétablissements de voiries secondaires doivent être effectués sous un gabarit minimum de 4,30 m quelque soit le type de la voie (voie départementale, communale ou rurale)*. Ce même document indique en outre qu'une revanche de 0,10 m doit être réservée à la construction.

La dimension de l'ouvrage devra donc être fixée de telle sorte que, compte tenu des déformations prévisibles, une hauteur d'au-moins 4,40 m reste disponible (fig. 3.27). En ce qui concerne le choix du profil en travers et l'emprise sur laquelle ce gabarit doit être dégagé, on se référera au document-type CAT 75 précité.

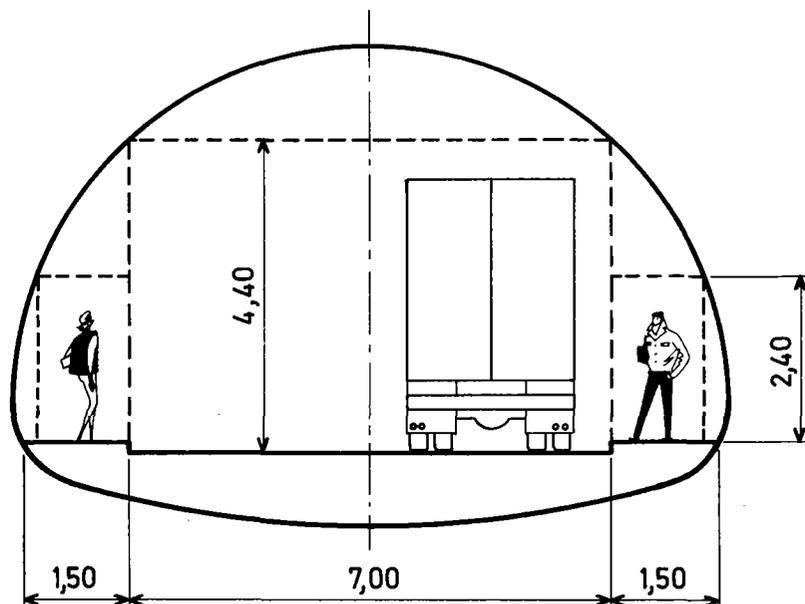


Figure 3.27

3.4.2.2 - Chaussée

La réalisation de la chaussée ne pose pas de problèmes spécifiques. Elle doit être réalisée de manière identique à une chaussée normale, après remblaiement du radier métallique à la cote adéquate. Il est par contre indispensable qu'elle soit construite une fois l'ouvrage chargé et stabilisé, faute de quoi des déformations accompagnées de fissures longitudinales risquent d'apparaître après chargement de la buse.

3.4.2.3 - Drainage

Le drainage doit être particulièrement efficace (avaloirs, drains) pour permettre l'élimination des eaux qui pourraient s'accumuler entre le radier métallique et la chaussée et entraîner à terme une dégradation de cette dernière et un risque élevé de corrosion du radier.

Les dispositions adoptées doivent être complétées par une étude du profil en long de la buse tenant compte de ses déformations et évitant la formation de points bas pouvant favoriser l'apparition d'eaux stagnantes (cf § 3.1.1.1.).

* arrêté du 30 mars 1967, décret n° 64.262 du 14 mars 1964 et décret 69.897 du 18 septembre 1969.

Dans les cas où les eaux de ruissellement risquent d'être chargées de sels de déverglaçage, il est souhaitable de prévoir en outre une étanchéité sous chaussée par interposition d'un géotextile imperméable (fig. 3.28), remonté latéralement jusqu'au niveau des trottoirs.

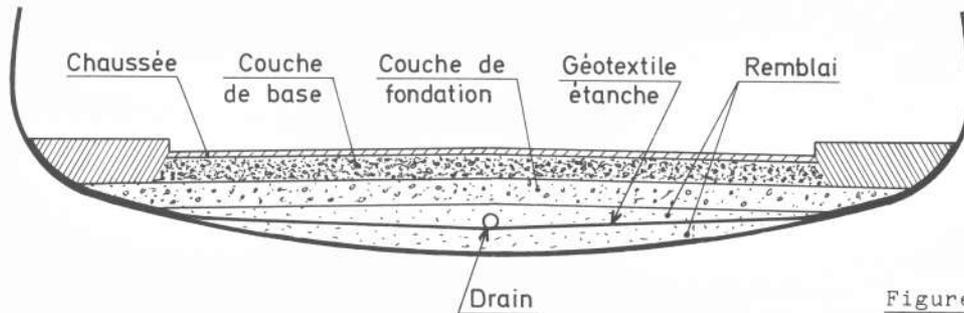


Figure 3.28

3.4.2.4 - Trottoirs

L'implantation de trottoirs est à envisager chaque fois que faire se peut, même si leur usage n'est qu'occasionnel. Ils doivent avoir une largeur minimale de 0,70 m, un gabarit suffisant devant être dégagé sur l'ensemble de cette largeur.



Figure 3.29

- Rétablissement de voirie secondaire

3.4.2.5 - Visibilité

L'éclairage de ces ouvrages doit être traité s'il y a lieu de façon semblable à celui des passages inférieurs ou souterrains.

3.4.2.6 - Aménagement des têtes

La dimension de ces ouvrages, ainsi que la nécessité de leur donner une esthétique convenable rendent quasi obligatoire l'adoption d'une poutre de couronnement ou d'un perré (cf § 3.2.3.4).

3.4.3 - Passages pour piétons

3.4.3.1 - Gabarit

Ces ouvrages doivent être dimensionnés en fonction de leur importance, de leur situation et de l'affluence qui y est prévue. Un gabarit minimum doit cependant être respecté pour lutter contre l'impression d'écrasement que ressentent les usagers, surtout dans le cas d'un ouvrage relativement long. En particulier, l'ouverture au niveau des épaules doit être suffisante, les formes circulaires ou elliptiques à grand axe vertical étant mieux adaptées à cet égard que les formes surbaissées.

3.4.3.2 - Chaussée

Pour ces ouvrages de petites dimensions, un radier en béton coulé en place peut être acceptable si l'on prend soin de le construire après chargement et stabilisation de la buse.

Si cette solution ne convient pas, on pourra envisager une chaussée souple, du type de celles utilisées pour les rétablissements de voiries (cf § 3.4.2.2).

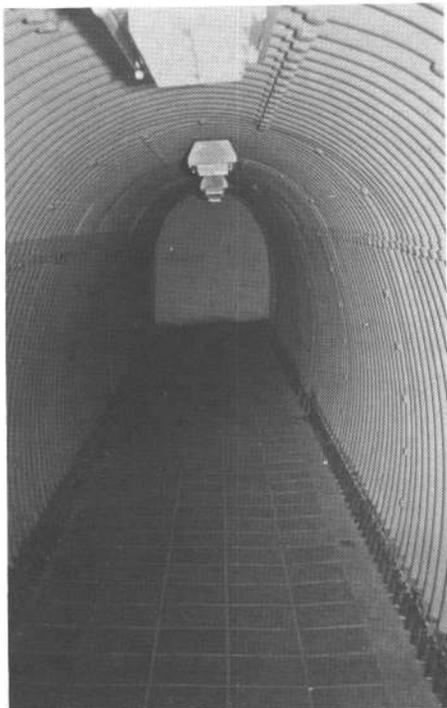


Figure 3.30

- Passage pour piétons

3.4.3.3 - Esthétique

L'aspect intérieur est particulièrement important pour ces ouvrages, surtout en milieu urbain. On devra donc recourir dans la plupart des cas à une mise en peinture de l'ouvrage (cf § 5.4.2.6), les couleurs adoptées ainsi que l'éclairage éventuel jouant un rôle important sur l'impression d'écrasement ou de bien-être des usagers. Ces peintures présenteront en outre l'avantage supplémentaire de jouer un rôle anti-corrosion.

3.4.4 - Désenclavement des propriétés rurales , passages écologiques

Ces ouvrages sont destinés à rétablir la libre circulation de part et d'autre d'un remblai, que ce soit dans le cadre de l'exploitation agricole ou dans le cadre de la préservation de la faune. Les problèmes esthétiques s'y posent en général avec moins d'acuité que pour les autres types d'ouvrages.

3.4.4.1 - Gabarit

Le gabarit doit être étudié cas par cas en fonction du type de circulation envisagé.

Dans le cas des ouvrages desservant une exploitation agricole, on sera souvent amené à concevoir des ouvrages hauts et relativement étroits, pour lesquels des buses circulaires ou elliptiques à grand axe vertical pourront s'avérer bien adaptées. Une délimitation du gabarit horizontal par des trottoirs ou des chasse-roues est alors souhaitable afin d'éviter les chocs sur la paroi de la buse.

Dans le cas des ouvrages à vocation écologique, le gabarit doit être suffisamment important pour que les espèces susceptibles de l'emprunter n'éprouvent aucune réticence, certaines d'entre elles (cerfs en particulier) étant particulièrement exigeantes de ce point de vue.

3.4.4.2 - Chaussée

Dans la plupart des cas, une simple couche de remblai compacté au-dessus du radier sera suffisante et constituera, dans le cas des passages à gibier, un atout supplémentaire pour que l'ouvrage soit réellement emprunté. Lorsque l'utilisation de l'ouvrage est mixte, incluant une part d'exploitation en tant qu'ouvrage hydraulique, on pourra cependant envisager un radier en béton coulé en place. D'une façon générale, on se méfiera de l'agressivité assez marquée des déchets animaux.

3.5 - CLASSIFICATION DES OUVRAGES

Les critères de base de la classification sont fondés sur les considérations suivantes:

- durée de service souhaitée;
- conditions d'agressivité du site;
- conséquences économiques ou logistiques de la ruine éventuelle de l'ouvrage.

3.5.1 - Classification en fonction de la durée de service

Les buses métalliques faisant intervenir un contact direct entre des milieux à caractère corrosif plus ou moins marqué, tels que le sol ou l'eau d'écoulement, et la tôle galvanisée, la notion de durée de vie des ouvrages doit être considérée avec une attention particulière.

La "durée de service minimale prévue" peut être définie comme le laps de temps minimum au bout duquel l'ouvrage doit encore présenter une sécurité en accord avec les règles de justification en vigueur au moment de sa réalisation.

Cette durée de service doit être considérée comme une donnée du projet qui résulte d'un choix du maître d'ouvrage. Les valeurs considérées dans le présent document en fonction du type d'ouvrage envisagé sont les suivantes:

- Ouvrages provisoires: de l'ordre de 5 ans.
- Ouvrages permanents: de l'ordre de 70 ans.

Dans la pratique, comme pour presque tous les types d'ouvrages, elle dépendra du soin apporté à la conception (murs parafouilles, radiers, collecte et évacuation des eaux de déverglage, etc.) et de l'entretien ultérieur de l'ouvrage.

3.5.2 - Classification en fonction de l'agressivité du site

On distingue trois classes d'ouvrages:

- Les ouvrages "terrestres hors d'eau": ce sont les ouvrages qui ne sont jamais immergés.

- Les ouvrages "exposés aux eaux douces": ce sont les ouvrages qui seront en contact avec l'eau pendant un laps de temps non négligeable vis-à-vis de leur durée de service prévue (par exemple supérieur à 10%). Les eaux douces sont les eaux dont la salinité permet de les considérer comme potentiellement potables ($[Cl^-] \leq 250 \text{ mg/l}$, $[SO_4^{--}] \leq 250 \text{ mg/l}$).

- Les ouvrages "particuliers", soumis à des conditions d'agressivité ne répondant pas aux caractéristiques précédentes (eaux saumâtres, etc.).

3.5.3 - Classification en fonction de l'importance de l'ouvrage

On distingue deux catégories:

- les ouvrages "ordinaires";
- les ouvrages "de grande importance".

Le classement de l'ouvrage dans l'une ou l'autre de ces catégories devra être fait pour chaque cas particulier, en fonction de l'implantation, de l'importance de l'ouvrage et des conséquences d'une défaillance possible de celui-ci.

On pourra classer dans la première catégorie les ouvrages de dimensions courantes (petits ouvrages hydrauliques), ou les ouvrages de dimensions plus importantes pour lesquels une réparation éventuelle peut être entreprise dans des conditions économiques et de gêne à l'utilisateur acceptables. Ce peut être le cas, par exemple, des passages agricoles ou hydrauliques sous remblai de route ou d'autoroute pour lesquels un surgarbit permettant une réparation ultérieure facile à été prévu dès l'origine (cf § 3.2.1.4).

On devra considérer les ouvrages ne présentant pas l'une ou plusieurs des caractéristiques ci-dessus comme des ouvrages "de grande importance". Ce sera le cas en particulier des ouvrages soumis à une circulation routière intérieure ainsi que de ceux qui s'écartent de par leurs caractéristiques du domaine de la conception courante (cf § 3.6 ci-après).

3.6 - OUVRAGES DE CONCEPTION NON COURANTE

Hormis les ouvrages particuliers rappelés dans l'avant-propos, qui nécessitent des études spécifiques et pour lesquels les présentes recommandations ne sont pas applicables, en totalité ou en partie, certains ouvrages sortent du cadre de la conception courante et sont redevables à ce titre d'un certain nombre de précautions supplémentaires.

On considèrera essentiellement comme tels:

- les ouvrages circulaires ou elliptiques de portée supérieure à 5,50 m;
- les buses-arches ou passages, les arches et les buses elliptiques à grand axe horizontal de portée supérieure à 8 m;
- les ouvrages pour lesquels le module E_s des remblais techniques généraux calculé suivant les indications des paragraphes 4.3.2.2 ou 4.3.3 excède 40 MPa;

Quelle que soit leur destination, compte tenu de leurs caractéristiques, ces ouvrages seront classés dans la catégorie "ouvrages de grande importance" (cf § 3.5). En tout état de cause, ils devront être exécutés avec un soin tout particulier, par une entreprise possédant des références précises dans ce domaine.

Il est particulièrement recommandé:

- pour les ouvrages se distinguant par leurs dimensions, de prévoir un programme de suivi des déformations pendant la phase de remblaiement;
- pour les ouvrages se distinguant par des caractéristiques requises élevées du matériau de remblai, de définir le choix de ce matériau et ses modalités de mise en oeuvre avec un délai suffisant par rapport à l'exécution (cf § 4.3.2.2 et 5.2.1).

CHAPITRE 4

Justification technique des buses métalliques

4.1 - COMPORTEMENT

Du point de vue mécanique, le principal intérêt des buses métalliques réside dans leur flexibilité, qui amène à les considérer plutôt comme un coffrage destiné à réorienter les contraintes dans le massif de sol environnant et non comme un ouvrage possédant une capacité portante intrinsèque.

Cette interaction entre l'ouvrage et le sol rend cependant l'analyse des phénomènes mis en jeu très complexe, et ce, en particulier, au voisinage des extrémités de l'ouvrage. Ceci explique que la justification et la prévision du comportement des buses métalliques restent encore pour partie empiriques et pour partie redevables d'assez larges approximations.

Par ailleurs, il faut distinguer dans le comportement de l'ouvrage les deux phases extrêmement différentes que sont la construction et l'exploitation, l'une ou l'autre pouvant, suivant le cas, être déterminante dans le dimensionnement.

4.1.1 - Différence de comportement avec un ouvrage rigide

Comme on peut le voir sur la figure 4.1, la charge due au poids des terres réellement transmise à un ouvrage sous remblai dépend en partie de la flexibilité relative de celui-ci vis-à-vis de celle des remblais environnants:

- Pour un ouvrage rigide, le remblai tasse davantage en partie courante qu'au-dessus de la clé, où il rencontre un "point dur". Ceci a pour effet de développer des contraintes de cisaillement sur les plans verticaux passant de part et d'autre de l'ouvrage, ces cisaillements se traduisant par un accroissement de la pression exercée par les terres au-dessus de la clé. Par ailleurs, l'ouvrage, incapable de se déformer, doit avoir une capacité portante intrinsèque suffisante pour pouvoir résister seul à cet ensemble de pressions dues à l'action pondérale des terres qui le surmontent.

- Dans le cas d'un ouvrage flexible tel qu'une buse métallique, le tassement du remblai au-dessus de la clé sera supérieur ou au moins égal à celui du remblai environnant. Les contraintes de cisaillement évoquées précédemment s'annulent ou s'inversent, ce qui permet de considérer que la pression que peuvent exercer les terres au-dessus de la clé est au maximum égale au poids de celles-ci. Par ailleurs, la flexibilité des parois étant importante, ce tassement de la clé va s'accompagner d'une déformation de la buse avec augmentation de son diamètre horizontal, les remblais latéraux pourront alors jouer leur rôle de massifs de butée et reprendre une grande partie des efforts appliqués.

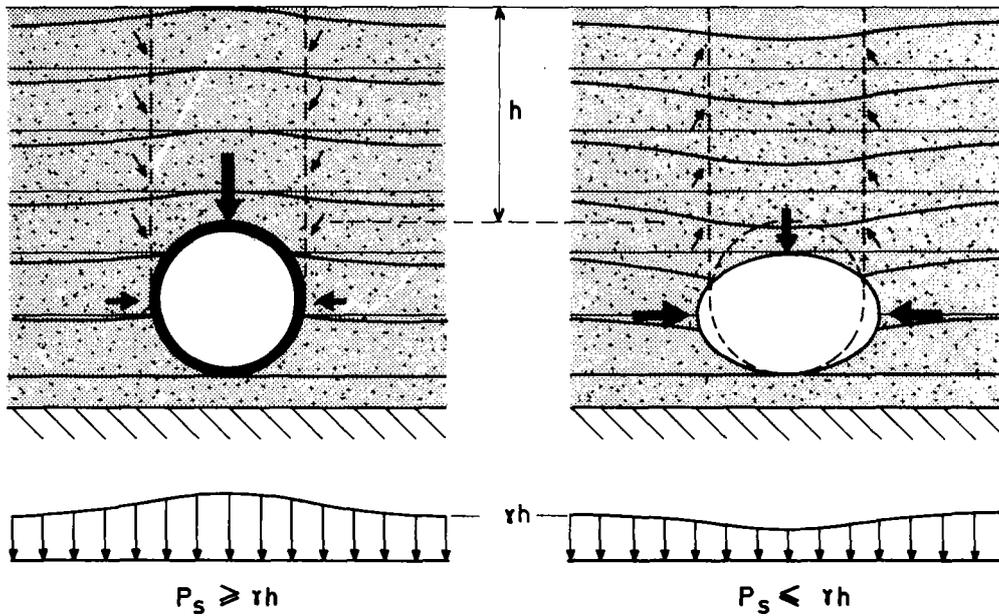


Figure 4.1 - Différence de comportement entre un ouvrage rigide et un ouvrage souple

Ce mécanisme de fonctionnement met en évidence l'importance primordiale que présentent les remblais latéraux vis-à-vis de la capacité portante de l'ouvrage.

4.1.2 - Théorie de l'anneau comprimé

Cette théorie est basée sur la grande flexibilité relative des parois de la buse vis-à-vis du remblai et consiste à supposer que la position finale d'équilibre de la paroi est telle que celle-ci soit soumise à une compression simple en tous ses points. Si l'on admet par ailleurs que l'effet du frottement tangentiel entre la buse et le terrain est négligeable, on aboutit à une schématisation très simple du fonctionnement, où la paroi est soumise à une compression uniforme N sur tout son pourtour, et où la pression exercée sur le terrain en chaque point est inversement proportionnelle au rayon de courbure de la paroi (fig. 4.2).

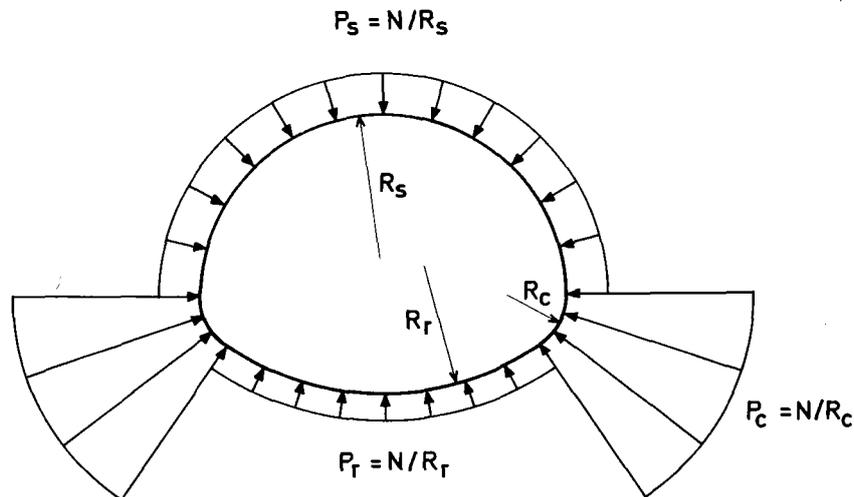


Figure 4.2 - Répartition théorique des pressions sur la paroi

La pression P_s au sommet étant supposée connue, on peut en déduire la compression N dans la paroi de la buse et la pression P appliquée au terrain en tous les points. Ce calcul permet un dimensionnement simple de la paroi, puisqu'il suffit en théorie de faire en sorte qu'elle puisse supporter l'effort de compression N .

4.1.3 - Influence des efforts de flexion

Dans la pratique, une certaine inertie de flexion est donnée intentionnellement à la paroi par le biais des ondulations et ce pour plusieurs raisons:

- elle est absolument nécessaire en phase de construction;
- elle assure la stabilité vis-à-vis du flambement sous les charges de service;
- pour les buses sous faible hauteur de remblai, l'effet des charges d'exploitation ne pouvant pas être repris intégralement par le sol, une certaine résistance à la flexion est nécessaire, au moins dans la partie supérieure de la buse.

Il s'ensuit que les déformations acquises par la buse dans la recherche de sa position d'équilibre introduisent des contraintes de flexion non négligeables dans la paroi.

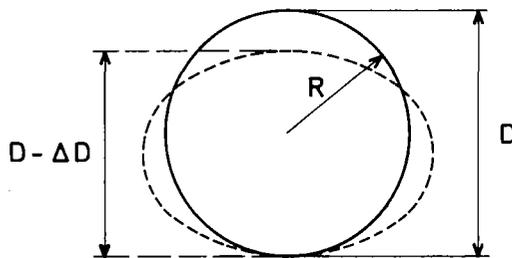


Figure 4.3

Ainsi, par exemple pour une buse circulaire, se déformant pour acquérir une forme elliptique, on peut considérer que, pour de faibles taux de déformation, le moment de flexion extrême vaut:

$$M = \frac{3 E_a I}{R} \epsilon \quad \text{avec: } \epsilon = \frac{\Delta D}{D} \quad (\text{fig. 4.3})$$

E_a : module d'Young de l'acier

I : inertie de flexion de la paroi

Pour une déformation relativement faible de 1% et avec, par exemple, $R = 1$ m, on obtient une contrainte due à la flexion seule de l'ordre de 160 MPa, ce qui représente environ les deux tiers de la limite élastique de l'acier.

Cet exemple illustre un cas extrême (petite buse très rigide ne pouvant supporter que de très petites déformations), mais il souligne l'importance que peut prendre dans certains cas la contrainte de flexion et la nécessité de la réduire en employant un matériau de remblai de bonne qualité, apte à limiter les déformations.

4.1.4 - Flambement de la paroi

Si les rigidités de la buse et du sol sont insuffisantes, un flambement de la paroi est possible. Le risque le plus important semble être celui dû à l'inversion de courbure de la clé de l'ouvrage, schématisée sur la figure 4.4, ce phénomène étant à distinguer de l'effondrement de la partie supérieure de l'ouvrage sous l'effet d'une ovalisation excessive de la buse par manque de raideur des remblais techniques.

Cette possibilité de flambement a été étudiée par différents auteurs, dont M. LUONG MINH PHONG du Laboratoire de Mécanique des Solides de l'Ecole Polytechnique pour les buses de forme circulaire et MM. KLOPPEL et GLOCK à l'Université de Darmstadt pour les formes de buses les plus courantes.

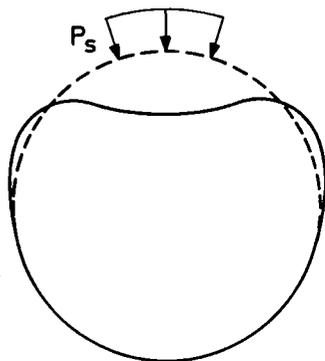


Figure 4.4

En particulier, l'étude effectuée par MM. KLOPPEL et GLOCK donne, pour différentes formes de buses, la pression critique de flambement à la clé en fonction des caractéristiques du remblai et de la paroi.

Les résultats sont présentés graphiquement sous la forme:

$$\frac{P_s}{c R_s} = f\left(\frac{E_a I}{c R_s^4}\right)$$

Avec une assez bonne approximation, cette relation peut être représentée par la fonction:

$$\frac{P_s}{c R_s} = a \left(\frac{E_a I}{c R_s^4}\right)^{1/3}$$

où :

- a = 0,23 pour les buses circulaires
- a = 0,18 pour les buses-arches (V/D = 0,75)

R_s est le rayon de courbure de la paroi au sommet de la buse et "c" un paramètre dépendant du sol et de R_s , que l'on peut relier au module d'Young pseudo-élastique du sol E_s par la relation:

$$c = \frac{E_s}{(1+\nu) R_s} \quad \nu: \text{coefficient de Poisson, généralement pris égal à } 0,33$$

4.1.5 - Prédiction des déformations

La mise en charge d'un ouvrage flexible s'accompagne d'une certaine déformation des parois, nécessaire pour mobiliser la réaction latérale du remblai. L'amplitude de ces déformations dépend essentiellement de la rigidité des remblais techniques et, dans une moindre mesure, de la rigidité propre des parois.

Plusieurs auteurs se sont attachés à donner des méthodes de prévision de ces déformations, on peut citer notamment:

- la formule de Spangler (1938) pour les buses circulaires;
- la méthode Arval, supposant que la déformation verticale de la buse est égale au tassement des remblais environnants sur la hauteur de l'ouvrage;
- des abaques dus à MM. Klöppel et Glock.

En dehors des difficultés liées à la prévision des caractéristiques du remblai, toutes ces méthodes sont relativement divergentes entre elles. Il s'ensuit qu'une prévision simple et satisfaisante des déformations des ouvrages est à l'heure actuelle illusoire.

Lorsque l'importance de l'ouvrage le justifie techniquement et économiquement, il est possible d'effectuer un calcul à l'aide d'une modélisation par éléments finis. Cette méthode est d'ailleurs la seule à être suffisamment générale pour permettre un dimensionnement dans certains cas de configurations complexes (ouvrages doubles très rapprochés, sol en pente dans le sens transversal à l'ouvrage, etc.).

4.1.6 - Contraintes subies en cours de construction

Lors de la mise en place des remblais latéraux, l'ouvrage est soumis à des sollicitations multiples dues à son poids propre, au poids et à la poussée des terres, et à l'action des engins de réglage et de compactage.

La flexibilité des parois rend cette opération difficile et exige, outre le strict respect des règles de bonne mise en oeuvre, une vérification de l'ouvrage vis-à-vis de la phase de construction, qui est souvent déterminante pour le dimensionnement.

Parmi ces sollicitations, seul l'effet du poids et de la poussée des terres ne peut être évité. Il se traduit par un aplatissement horizontal de la buse, accompagné d'une remontée de la clé (fig. 4.5).

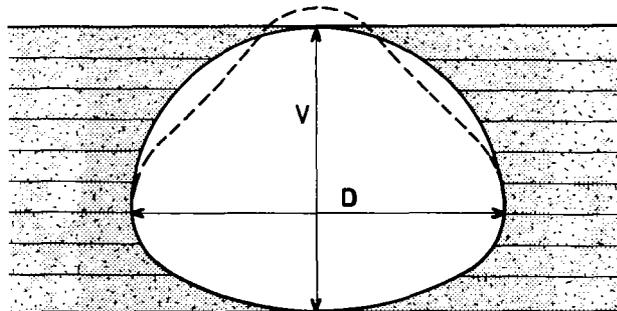


Figure 4.5 - Schématisation des déformations pendant le remblaiement

Plusieurs auteurs ont étudié les moments fléchissants introduits dans les parois par ces déformations. Dans l'ensemble les résultats sont assez concordants et peuvent être traduits par la formule synthétique suivante:

$$M_{\max/m} = 0,075 \gamma K D^3 \left[\left(\frac{V}{D} - 0,6 \right)^2 + 0,07 \right]$$

- D et V désignent respectivement les plus grandes dimensions horizontale et verticale de l'ouvrage.

- γ représente le poids volumique du remblai.

- K est le coefficient de poussée des terres. Sa valeur dépend d'une part de la qualité du matériau de remblai et de sa mise en oeuvre et d'autre part de la flexibilité de l'ouvrage. En effet, pour un ouvrage de petites dimensions, les déplacements obtenus pourront être insuffisants pour que K descende jusqu'à la valeur minimum correspondant à la poussée active.

4.2 - PRINCIPE DES JUSTIFICATIONS

Le principe général retenu est conforme à la circulaire 79-25 du 13 Mars 1979 dite "D.C 79", recommandant l'utilisation de méthodes semi-probabilistes pour la justification des ouvrages. On pourra y trouver, entre autres, les définitions relatives à la terminologie employée.

Les justifications sont conduites en comparant les sollicitations résistantes à des sollicitations de calcul. Ces dernières sont obtenues à partir de combinaisons d'actions tenant compte à la fois du dépassement possible de la valeur représentative prise en compte pour les actions et de la probabilité réduite pour que plusieurs d'entre elles atteignent simultanément un certain niveau d'intensité.

Les buses métalliques étant des ouvrages assez rustiques, pour lesquels une grande précision dans les calculs est illusoire, les combinaisons d'actions seront réduites à leur plus simple expression et ne comporteront pas, entre autres, d'actions d'accompagnement.

Dans ces conditions, les sollicitations de calcul seront obtenues à l'aide de la formule simplifiée suivante:

$$S_c = \gamma_{F3} S(\gamma_{F1G} \cdot G + \gamma_{F1Q} \cdot Q)$$

où G désigne l'ensemble des actions permanentes et Q l'action variable de base considérée, à savoir les charges d'exploitation.

4.3 - JUSTIFICATIONS EN PHASE DEFINITIVE

** Pour tenir compte de la corrosion du métal au cours de la durée de
** vie de l'ouvrage, certaines justifications seront conduites en attribuant à
** la tôle une épaisseur fictive de calcul e_c . Cette dernière est obtenue en
** retranchant de l'épaisseur nominale de la tôle e_o l'épaisseur e_s sacrifiée à
** la corrosion, déterminée suivant les indications du paragraphe 5.5.

** Dans ce qui suit, toutes les caractéristiques des tôles relatives à
** cette épaisseur fictive de calcul seront affectées de l'indice "c", alors que
** celles relatives à l'épaisseur nominale seront affectées de l'indice "o".

** L'annexe n° 1 donne les caractéristiques des principaux matériels
** existants en fonction de l'épaisseur de la tôle.

4.3.1 - Pression appliquée à la clé

La pression agissant sur une buse est due à deux types principaux d'actions:

- les charges permanentes, notées G, dues aux remblais et aux charges stationnaires uniformément réparties ou concentrées;
- les charges d'exploitation mobiles, notées Q, accompagnées de leurs effets dynamiques éventuels.

La valeur de calcul de la pression au sommet de la buse, considérée en tant qu'action, est évaluée à l'aide de la combinaison générale suivante:

$$P_s = P_s(\gamma_{F1G} \cdot G + \gamma_{F1Q} \cdot Q)$$

On adopte, conformément au commentaire de l'article 7.2.1.1 des DC 79, les valeurs:

$$\gamma_{F1G} = 1,2$$

$$\gamma_{F1Q} = 1,42 \quad \text{pour les charges routières sans caractère particulier}$$

$$\gamma_{F1Q} = 1,2 \quad \text{dans le cas des convois militaires et des convois exceptionnels}$$

4.3.1.1 - Pression due aux charges permanentes

Dans les cas courants, les seules charges permanentes sollicitant l'ouvrage sont dues au poids des terres. La pression correspondante au sommet de l'ouvrage sera calculée, suivant la remarque faite en 4.1.1 par:

$$P_{SG} = \gamma F_1 G \gamma h$$

On prendra, sauf circonstances particulières, $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$. Compte tenu de la valeur adoptée pour $\gamma F_1 G$, on aura:

$$P_{SG} = 24 h \quad h \text{ en mètres}$$

$P_{SG} \text{ en kPa}$

4.3.1.2 - Pression due aux charges d'exploitation

Pour le calcul de la pression au sommet de la buse, diverses méthodes sont utilisables, par exemple: méthode de Boussinesq, méthode de Westergaard, diffusion suivant un certain angle. Ces diverses méthodes peuvent conduire à des variations importantes allant du simple au double, l'effet dynamique des surcharges étant par ailleurs très mal connu. Pour ces raisons, il ne sera pas utile, pour le calcul des ouvrages routiers, de spécifier le type de circulation auquel ils seront réellement soumis, ni la classe de l'ouvrage.

Un calcul conventionnel des pressions engendrées au sommet de la buse par les charges définies aux articles 4, 5, 8 et 10 du fascicule 61, titre II a été effectué, avec les hypothèses suivantes:

- diffusion des charges calculée suivant la méthode de Boussinesq;
- coefficient de majoration dynamique affectant les charges du système B pris égal à 1,2;
- $\gamma F_1 Q = 1,42$ pour les systèmes A et B et la charge de 1 t/m^2 ;
- $\gamma F_1 Q = 1,2$ pour les convois militaires et les convois du type D et F.

Les résultats obtenus sont les suivants:

h (m)	$P_s = S (\gamma F_1 Q \cdot Q)$ (kPa)	Type de charge	Observations
0,5	238,2	B _r	Compte tenu des valeurs adoptées pour les coefficients $\gamma F_1 Q$, les charges de caractère exceptionnel prises en compte ici ne sont jamais prépondérantes.
1,0	87,2	B _c	
1,5	61,7	B _t	
2,0	48,6	"	
2,5	38,3	"	
3,0	31,0	"	
3,5	25,6	"	
4,0	23,6	A(1)	
5,0	21,7	"	
6,0	20,2	"	
7,0	18,9	"	
8,0	17,8	"	
9,0	16,8	"	
10,0	15,9	"	
11,0	15,2	"	
12,0	14,2	1 t/m ²	

4.3.1.3 - Pression totale

Les résultats obtenus en 4.3.1.1 et 4.3.1.2 ci-dessus peuvent être exprimés à l'aide de formules synthétiques simples.

On prendra pour valeur de la pression de calcul P_s au sommet de la buse celle donnée par les formules suivantes, où h désigne la distance verticale la plus défavorable (la pression minimale est obtenue pour $h = 1,80$ m) entre le sommet de la buse et le dessus de la chaussée:

$$P_s = \frac{85}{h - 0,1} + 24 h \quad 0,50 \leq h \leq 1,80$$

$$P_s = \frac{115}{h + 0,5} + 24 h \quad 1,80 < h \leq 4,65$$

$$P_s = 27 + 23 h \quad 4,65 \leq h \leq 12,80$$

$$P_s = 14,2 + 24 h \quad 12,80 \leq h$$

P_s en kPa

h en m (fig. 4.6)

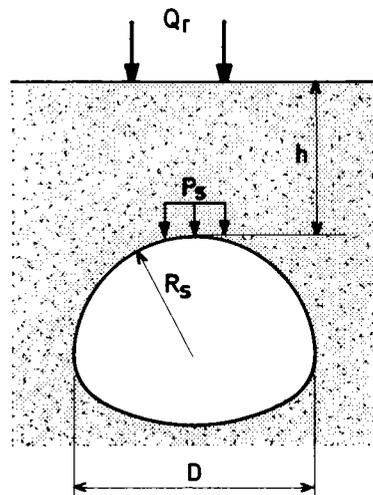


Figure 4.6

4.3.2 - Justification vis-à-vis des états-limites ultimes

On distingue:

- un état-limite de résistance à la compression des parois qui fixe, en fonction des caractéristiques de l'ouvrage, l'épaisseur théorique minimale de la tôle à employer;

- un état-limite d'instabilité de forme (inversion de courbure à la clé), qui fixe, dans les mêmes conditions, pour une paroi de caractéristiques données, les qualités requises pour les remblais entourant la buse.

4.3.2.1 - Etat-limite de compression des parois

La compression N dans la paroi de la buse considérée en tant que sollicitation, sera prise égale à la plus grande des deux valeurs suivantes:

$$N = P_s R_s \quad R_s : \text{Rayon de courbure des plaques de sommet}$$

$$N = P_s \frac{D}{2} \quad D : \text{Portée horizontale (fig. 4.6)}$$

Suivant la formule générale indiquée en 4.2, la compression de calcul dans la paroi de la buse est de la forme:

$$N_u = \gamma_{F3} N$$

Pour tenir compte de l'approximation assez grossière qui consiste à négliger les moments fléchissants dans la paroi (cf § 4.1.3), on est amené à donner à γ_{F3} une valeur élevée. On retiendra $\gamma_{F3} = 2$.

La valeur de la compression de calcul est à comparer à la résistance R_{pc} de la paroi divisée par le coefficient de sécurité relatif aux matériaux γ_m . On retient:

$$\gamma_m = 1,50 \quad \text{pour les ouvrages "ordinaires";}$$

$$\gamma_m = 1,65 \quad \text{pour les ouvrages "de grande importance"(cf § 3.5).}$$

La condition à satisfaire s'exprime alors par:

$$R_{pc} \geq 3 N \quad \text{pour les ouvrages ordinaires}$$

$$R_{pc} \geq 3,3 N \quad \text{pour les ouvrages de grande importance}$$

R_{pc} désigne la résistance à rupture en compression de la paroi sous son épaisseur de calcul e_c dans sa section la moins résistante (joint longitudinal ou pleine tôle). Elle doit être limitée supérieurement à la résistance théorique de la pleine tôle sous la contrainte de rupture garantie en traction de l'acier utilisé.

La valeur minimale de e_c nécessaire pour conférer la résistance R_{pc} à la paroi pourra être déterminée pour les types de matériel les plus courants à l'aide des fiches techniques données en annexe n°1, qui sont établies en tenant compte de ces critères. L'attention est cependant attirée sur les réserves d'emploi que présentent ces fiches, signalées sur chacune d'entre elles.

4.3.2.2 - Etat-limite d'instabilité de forme

Les formules du paragraphe 4.1.4 peuvent être exprimées en fonction du "module pseudo-élastique" du remblai E_s et de la compression dans la paroi de la buse N . Ces formules étant établies à partir d'une modélisation plus fine que celle de l'anneau en compression simple, on adopte un coefficient γ_{F3} appliqué à N plus faible, égal à 1,5. On applique par ailleurs un coefficient $\gamma_m = 2$ au module du sol.

La valeur minimale requise pour E_s s'exprime par:*

$$E_s = k \sqrt{\frac{N^3}{E_a I_c}} \quad \text{où} \quad k = 42 \sqrt{\left(\frac{V}{D}\right)^3} \quad (V/D \geq 0,6)$$

Pour les buses du type Super-Span, on vérifiera en outre que:

$$E_s \geq 5,6 k P_s$$

Avec les unités utilisées dans le présent document E_s sera obtenu en kPa. "k" est un coefficient sans dimension.

Le produit $E_a I_c$ désigne la rigidité de la paroi sous son épaisseur de calcul e_c . Sa valeur est donnée par les fiches techniques de l'annexe n°1.

E_s désigne le module d'élasticité des remblais techniques devant être obtenu à l'exécution. On peut considérer que le choix d'un matériau de remblai satisfaisant aux critères exposés au paragraphe 5.2.1,a et le res-

* Cette formule est uniquement applicable aux formes de buses décrites en 2.1. Pour les buses du type Super-Span, les poutres de poussée doivent avoir au minimum la géométrie décrite par la figure 2.5.

pect d'une mise en oeuvre conforme aux règles de l'art développées en 6.2.4 garantissent une valeur minimum de ce module de l'ordre de 40 MPa. Lorsque le module requis est supérieur à cette valeur, le matériau de remblai doit être choisi sur la base d'une étude appropriée et sa mise en oeuvre suivie avec une attention particulière. Il faut noter en outre que des valeurs supérieures à 80 MPa ne peuvent être obtenues qu'avec de très bons matériaux mis en oeuvre dans les meilleures conditions.

Si l'on juge que la valeur requise pour E_s est trop importante pour pouvoir être obtenue en place il est possible d'augmenter l'inertie de la paroi en choisissant pour e_0 une valeur supérieure à celle qui résulte du calcul du paragraphe 4.3.2.1. Il faut cependant noter que cette manière de procéder conduit rapidement à des suppléments de coût considérables.

4.3.3 - Justification vis-à-vis des états-limites de service

On considère un état-limite de déformation de l'ouvrage, destiné à limiter les contraintes dans l'acier. Cependant, la prévision des déformations acquises par une buse étant très complexe (cf § 4.1.5), on retiendra uniquement ici une justification simplifiée, portant sur le module du matériau du remblai technique et destinée à s'assurer que le sol sera suffisamment rigide vis-à-vis de la paroi de la buse pour que celle-ci reste assimilable à un coffrage travaillant essentiellement en compression.

Pour une buse circulaire, si l'on suppose que les déformations verticales de la buse sont égales à celles des remblais environnants, on a, sous charges permanentes :

$$\epsilon = \frac{\gamma (h+R)}{E_s}$$

Le moment de flexion dans la paroi vaut alors (cf 4.1.3) :

$$M = \frac{3 E_a I}{R} \frac{\gamma (h+R)}{E_s}$$

En imposant que la contrainte due à la flexion n'excede pas 50% de la limite d'élasticité garantie f_e de l'acier utilisé, on obtient :

$$E_s \geq \frac{6 E_a v}{f_e R} \gamma (h+R)$$

On retient également cette expression dans le cas général des buses non-circulaires, en considérant R_s au lieu de R .

Sauf circonstances particulières, on prend $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$, $f_e = 240 \text{ MPa}$, et un coefficient de sécurité de 1,5 sur le module du matériau de remblai.

Le critère de déformation s'exprime par :

$$E_s \text{ (MPa)} \geq 1,5 v_0 \left(1 + \frac{h}{R_s}\right) \quad (\text{fig. 4.7})$$

v_0 : distance en centimètres de la fibre extrême à l'axe neutre pour l'épaisseur nominale de la tôle (cf annexe n°1).

Dans le cas des buses-arches et des passages, on calculera le module du sol à mettre en place sous les plaques de coin par la formule :

$$E_s' = \frac{R}{V - R} E_s \quad R = \text{Sup} \left(R_s, \frac{D}{2} \right) \quad (\text{fig. 4.7})$$

Suivant la valeur obtenue, il pourra s'avérer nécessaire de prévoir des banquettes latérales et une fondation constituées d'un matériau de qualité supérieure à celui des remblais techniques généraux (cf § 3.2.2.2.).

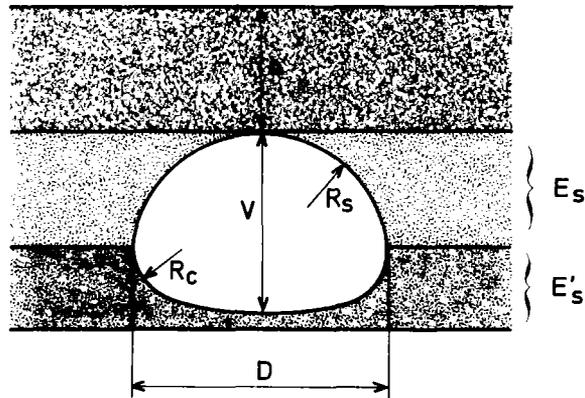


Figure 4.7

4.4 - JUSTIFICATIONS EN PHASE DE CONSTRUCTION

Les justifications demandées consistent à vérifier que :

- les contraintes dans le métal dues au remblaiement ne sortent pas du domaine élastique,
- le passage des engins de chantier au-dessus de la buse n'entraînera pas de conséquences nuisibles pour celle-ci.

4.4.1 - Contraintes subies en cours de remblaiement

La phase de mise en oeuvre des remblais de butée est particulièrement critique pour les buses métalliques et ce, notamment, lorsque le niveau atteint se situe entre le milieu de la flèche et la clé de l'ouvrage.

La formule donnée en 4.1.6 permet de définir un critère visant à limiter au domaine élastique les contraintes subies par la paroi de la buse pendant cette phase sous les efforts développés par les remblais.

L'épaisseur nominale e_0 de la tôle utilisée doit être, sur l'ensemble de l'ouvrage, telle que :

$$\frac{I_0(\text{cm}^3/\text{m})}{v_0} \geq 6 K D^3 \left[\left(\frac{V}{D} - 0,6 \right)^2 + 0,07 \right] \quad \left(\frac{V}{D} \geq 0,6 \right)$$

K désigne le coefficient de poussée des terres, qui peut prendre une valeur comprise entre 0,25 et 0,5 suivant la taille de l'ouvrage et la qualité du matériau mis en oeuvre.

Pour un remblai technique entièrement constitué d'un matériau de bonnes caractéristiques mécaniques (cf § 5.2.1,a), on prendra pour K la valeur suivante :

$$\begin{array}{ll} K = 0,6 - 0,05 V & \text{pour } 2 \text{ m} \leq V \leq 6 \text{ m.} \\ K = 0,3 & \text{pour } 6 \text{ m} \leq V \end{array}$$

La quantité I/v est donnée, pour chaque type de matériel, en annexe n°1.

Il est rappelé que seul l'effet inévitable du poids et de la poussée des terres est pris en compte dans cette justification. Il est donc impératif que les prescriptions de mise en oeuvre des remblais de butée décrites en 6.2.4.3 soient scrupuleusement suivies afin de se prémunir contre les efforts locaux pouvant être engendrés par des engins de régalinge ou de compactage inadaptés ou imprudemment manoeuvrés.

Dans la mesure où la gamme des ondulations et des épaisseurs existantes ne permet pas de satisfaire à cette règle, il est possible d'y déroger sous réserve que des précautions particulières (préchargement de la clé par

exemple) soient prises pendant l'exécution. L'attitude qu'il est conseillé d'adopter dans ces cas est la suivante:

- s'entourer systématiquement des conseils des services spécialisés (CETE, SETRA, LCPC);
- confier l'exécution des remblais techniques à une entreprise possédant des références précises dans le domaine des buses métalliques de grandes dimensions;
- définir, en liaison avec le fournisseur et un laboratoire compétent, un programme de mesures des déformations de l'ouvrage pendant la montée des remblais;
- demander au fournisseur d'établir, en annexe à la note de calculs de l'ouvrage, un mémoire définissant clairement les précautions particulières devant être prises durant l'exécution, les valeurs limites des déformations admissibles pendant la phase de remblaiement, ainsi que les dispositions complémentaires à adopter dans le cas où ces valeurs seraient atteintes.

Lorsqu'un tel ouvrage résulte d'une proposition variante présentée par un fournisseur de buses métalliques, son acceptation, si elle se justifie, doit être subordonnée, outre les conditions ci-dessus, à l'engagement de celui-ci d'assurer de façon directe et contractuelle la surveillance de l'exécution des remblais techniques.

Dans le cas des buses elliptiques à grand axe horizontal du type Super-Span, la formule ci-dessus est défavorable dans la mesure où elle ne prend pas en compte l'effet des poutres de poussée. Moyennant les mêmes réserves que celles exposées ci-dessus, une diminution limitée de l'épaisseur pourra être tolérée.

4.4.2 - Passage des engins de terrassement

On devra s'assurer que l'épaisseur du dôme de protection est suffisante pour permettre la circulation des engins de terrassement.

La justification est conduite par la méthode de l'anneau en compression, par un calcul semblable à celui exposé en 4.3.2.1. Pour atténuer l'effet des flexions locales dans la paroi, non prises en compte par ce type de calcul, on limitera dans tous les cas inférieurement la hauteur trouvée à $D/8$, avec un minimum absolu de 50 cm.

La pression totale appliquée au sommet de la buse peut être évaluée par la formule suivante:

$$P_s = \frac{2Q}{(h_d+a)^2}$$

où Q est la charge sur une roue, h_d la hauteur de remblai prise entre la clé de l'ouvrage et le fond des ornières prévisibles et "a" le côté d'un carré de même surface que l'impact d'une roue.

Le coefficient 2 permet de couvrir l'influence du coefficient dynamique et de l'effet d'impact et de négliger, dans la détermination de la pression totale appliquée, la pression permanente due à la charge de remblai de hauteur h_d .

On retient $\gamma_{F1Q} = 1,33$; $\gamma_{F3} = 2$; $\gamma_m = 1,5$.

Les conditions à vérifier s'expriment par:

$$h_d+a \geq \sqrt{\frac{8 Q R_s}{R_{po}}} \quad \text{et} \quad h_d \geq \sup\left(\frac{D}{8}; 0,50 \text{ m}\right)$$

R_{po} désigne la résistance à la compression de la paroi sous son épaisseur nominale e_o , R_s le rayon de courbure des plaques de sommet de la buse.

4.5 - CHOIX DE L'ÉPAISSEUR

Le choix de l'épaisseur nominale des tôles à retenir pour un ouvrage ou une partie d'ouvrage peut découler des justifications en phase définitive ou des justifications pendant la phase de construction.

4.5.1 - Phase définitive

Les justifications exposées au paragraphe 4.3.2.1 permettent de déterminer l'épaisseur minimale de calcul e_{cmin} nécessaire pour assurer la résistance en compression de la paroi. L'épaisseur nominale à utiliser devra être telle que:

$$e_o \geq e_{cmin} + e_s$$

où e_s désigne l'épaisseur sacrifiée à la corrosion, déterminée suivant les indications du paragraphe 5.5.

La gamme des épaisseurs commerciales étant limitée, on pourra tolérer l'utilisation d'une épaisseur nominale respectant la valeur de e_s à 10% près, c'est-à-dire telle que:

$$e_o \geq e_{cmin} + 0,9 e_s$$

Le calcul de la valeur du module d'élasticité des remblais techniques E_s envisagé en 4.3.2.2 doit ensuite être effectué avec l'épaisseur de calcul:

$$e_c = e_o - e_s$$

Pour les parties d'ouvrages sous talus, et lorsque la pente est inférieure ou égale à 3/2 (3 horizontal, 2 vertical), on pourra adopter des tôles d'épaisseur décroissante en effectuant les calculs dans chaque section avec la hauteur h de remblai située à la verticale de la clé.

Le recours à une telle disposition ne doit cependant pas être systématique, le gain obtenu sur le poids de l'ouvrage pouvant être fortement compromis par la complication accrue des opérations de stockage, de repérage et de montage des plaques, accompagnées de risques d'**interversi**on non négligeables.

Pour limiter ces différentes contraintes, il est conseillé de suivre les règles suivantes, à faire figurer dans le CCTP:

- le nombre d'épaisseurs différentes sera limité à trois sur un même ouvrage;
- à chaque interface, la diminution d'épaisseur devra être inférieure ou égale à 30%;
- aucun changement d'épaisseur ne sera admis sous l'emprise de la plateforme routière;
- dans chaque section, la pression de calcul sera prise égale à celle donnée par les formules du paragraphe 4.3.1.3 lorsque h est supérieure à 1,80 m et à 93,2 kPa dans le cas contraire;
- la note de calculs devra faire clairement apparaître la géométrie de référence des talus ayant permis de déterminer la longueur des différents tronçons, ainsi que le gain de poids obtenu par rapport au même ouvrage exécuté en épaisseur unique.

4.5.2 - Phase de construction

Le choix direct d'une épaisseur nominale e_o pourra résulter assez fréquemment des justifications en phase de remblaiement exposées en 4.4.1. Il est rappelé que, dans ce cas, l'épaisseur obtenue est l'épaisseur minimale à adopter sur l'ensemble de l'ouvrage.

Les justifications du paragraphe 4.3 devront alors être conduites avec l'épaisseur de calcul:

$$e_c = e_o - e_s$$

CHAPITRE 5

Choix des matériaux - durabilité

5.1 - PHENOMENES DE CORROSION ET D'ABRASION

Les caractéristiques géométriques, mécaniques ou autres de tous les matériaux évoluent en raison des interactions entre ces produits et le milieu environnant. Cette évolution peut avoir lieu avec des vitesses très variées, mais elle est en général inéluctable.

Dans le cas des buses métalliques, l'expérience montre que, lorsque les précautions nécessaires sont prises, ces ouvrages donnent satisfaction et présentent des durées de vie comparables avec celles des autres constructions.

Les altérations des buses métalliques sont dues à la corrosion ou à l'abrasion provoquées par les eaux, les remblais ou l'atmosphère.

5.1.1 - Processus de corrosion

Un matériau métallique placé dans un milieu aqueux et subissant une corrosion comporte à sa surface des zones de dissolution dites "anodiques" et des zones jouant le rôle de cathodes par rapport à ces premières. La localisation de ces zones dépend du matériau et du milieu. Un remblai est assimilable à un milieu aqueux dans le domaine de la corrosion.

Le métal dissous réagit souvent avec les éléments contenus dans le milieu pour former au moins un oxyde. Dans certains cas, l'oxyde formé recouvre parfaitement le métal et peut alors, s'il ne réagit pas avec le milieu agressif, assurer une protection efficace. C'est le cas des métaux dits "passivables".

Souvent les oxydes sont semi-perméables et assurent une protection lorsqu'ils sont assez épais.

Remarquons que la stabilité de ces oxydes protecteurs n'est assurée que dans des conditions bien définies. Ils peuvent être endommagés par des courants électriques très forts (courants vagabonds ou telluriques) ou par le mouvement de l'eau.

5.1.2 - Corrosion par les remblais

Les facteurs influant sur la corrosion des métaux par les remblais sont rassemblés dans le tableau I où on distingue:

- le stade "primaire" correspondant à la probabilité d'apparition du phénomène, telle que pourraient la donner les calculs de thermodynamique,
- le stade "secondaire" qui concerne l'évolution du phénomène.

TABLEAU I: facteurs influant sur la corrosivité des sols.

Stades	Facteurs dus		Paramètre influencé
	au métal	au sol	
primaire (amorçage)	nature et structure du métal, état de surface, couplage avec un autre métal	nature et composition chimique, hétérogénéité, pH, action biologique	force électromotrice de la pile de corrosion
	nature du métal, distance entre zones cathodiques et anodiques	conductivité du sol (avec humidité, porosité, salinité)	conductance du circuit électrique
secondaire (évolution)	surtension électrochimique sur le métal des agents réactifs	facteurs physiques, chimiques, biologiques	polarisation de la pile
	nature du métal état de surface	disponibilité en oxygène, présence d'espèces (Cl, etc.) donnant des produits solubles	adhérence et compacité des produits de corrosion

5.1.3 - Corrosion par les eaux

Dans tous les cas, c'est l'eau (massive ou de condensation) qui est la cause de la corrosion des métaux, mais la localisation et la vitesse de cette corrosion dépendent de différents facteurs tels que:

a) La nature et la quantité (concentration) des gaz et sels dissous.

L'efficacité de la protection qu'apporte la couche de passivation peut être augmentée ou diminuée par l'action de sels dissous dans l'eau.

Ainsi, comme dans la corrosion atmosphérique, la présence de chlorure augmente la corrosivité de l'eau: l'eau de mer est beaucoup plus agressive que les eaux douces.

b) La vitesse d'écoulement.

Lorsque l'eau est en mouvement dans les buses, celles-ci peuvent se détériorer par l'action mécanique d'érosion due aux sables et autres solides, mais aussi par variation (gradient) de la teneur en gaz dissous dans l'eau.

c) La température.

En général, la vitesse des réactions électrochimiques augmente avec la température. Ainsi, au voisinage des températures habituelles (au-delà de 10°C), la corrosion des aciers augmente d'environ 5% (en vitesse) par degré.

d) La présence de certains organismes vivant dans l'eau.

L'attaque microbienne se traduit par un ensemble de réactions électrochimiques; elle n'est donc qu'un cas particulier de la corrosion en milieu aqueux, à une température compatible avec la vie des êtres microscopiques. C'est pourquoi, dans le cas général, on peut négliger l'effet de ces organismes.

5.1.4 - Corrosion atmosphérique

Les principaux facteurs de la corrosion atmosphérique sont le climat, l'acidité de l'air et les poussières.

a) Les climats humides favorisent la corrosion atmosphérique des métaux. Cette accélération de la corrosion est encore plus grande dans le cas de brouillards fréquents qui déposent des gouttes contenant des poussières, et dans le cas des embruns marins.

b) En zones industrielles, la corrosion atmosphérique est due en majeure partie à la pollution sulfureuse par SO_2 provenant de la combustion de combustibles domestiques et industriels. La relation entre vitesse de corrosion et concentration en SO_2 atmosphérique est très nette dans le cas du fer et du zinc. Un autre agent de pollution particulièrement nocif à l'égard des métaux exposés à l'atmosphère est le chlorure qui domine dans les régions à climats marins (embruns).

c) La présence de poussières et d'autres dépôts solides étrangers à la surface d'un métal favorise l'apparition de corrosion.

5.1.5 - Abrasion

Les processus d'érosion et abrasion provoquent une usure plus ou moins régulière des métaux et des bétons. Ils se produisent lorsque l'eau est chargée de sable, graviers ou pierres.

L'érosion peut accélérer la corrosion des métaux non revêtus par enlèvement des produits de corrosion qui forment une couche protectrice de ces métaux.

Les eaux qui circulent à une vitesse assez élevée peuvent créer une turbulence appréciable pouvant provoquer une dégradation considérable des métaux par action combinée mécanique et de corrosion. Ainsi une première forme d'attaque est due aux particules solides en suspension et aux bulles frappant la surface métallique. Ce type de dégradation se produit à l'entrée de la buse, aux changements de courbures, aux saillies telles que les joints et les rivets, et aux endroits de changement brutal du régime d'écoulement de l'eau.

D'une façon générale, c'est le quart inférieur de la buse qui est soumis aux abrasions parce que les forces d'érosion y sont les plus actives et que les produits de corrosion, qui pourraient arrêter cette forme d'altération des métaux, sont entraînés.

5.2 - QUALITES DU MATERIAU DE REMBLAI

Les buses métalliques sont des ouvrages flexibles qui tirent leur résistance du soutien latéral des terres contiguës, qu'ils sollicitent après déformation sous l'action des charges et des surcharges. La qualité première du matériau de remblai est donc d'offrir pour le minimum de déformation de l'ouvrage, le maximum de résistance "latérale". Il faut de plus que le matériau choisi conserve ses caractéristiques ou les améliore pendant toute la durée de service de l'ouvrage.

Un deuxième aspect concerne la corrosion du métal constituant la buse qui exige, pour rester dans des limites acceptables, que le matériau de remblai choisi soit peu actif du point de vue chimique.

Des critères de choix se sont donc avérés indispensables. Ils concernent respectivement les points suivants:

- caractéristiques géotechniques, liées aux performances mécaniques du matériau;
- caractéristiques chimiques et électrochimiques, liées à la durabilité.

5.2.1 - Caractéristiques géotechniques

En principe, la nature du matériau de remblai doit être définie de telle manière que ses caractéristiques géotechniques soient conformes à celles prises en compte dans les calculs, et ce plus particulièrement en ce qui concerne le respect du "module d'élasticité". Bien que l'hypothèse d'un sol élastique ne soit pas très satisfaisante, il est possible de mesurer des paramètres qui s'apparentent à un module d'élasticité par différents essais, soit en laboratoire (triaxial, oedomètre), soit en place (essai de plaque, pressiomètre). On pourrait donc théoriquement prendre n'importe quel sol, pourvu qu'il respecte les caractéristiques imposées.

Il est cependant bien connu que les sols naturels comportant des éléments limoneux et argileux même en faible proportion (il suffit de 5% d'éléments inférieurs à 80 microns) ont des caractéristiques mécaniques qui varient considérablement avec leur teneur en eau et ceci d'autant plus que cette proportion d'éléments fins se situe aux environs de 10 à 15%.

Ainsi, par exemple, si l'on considère les graphiques de la figure 5.1, on constate que la résistance au poinçonnement d'un sol A₂ mesurée par l'essai CBR est de l'ordre de 20 lorsque ce sol est poinçonné immédiatement après avoir été compacté à l'énergie proctor normale à une teneur en eau inférieure de 4 points à la teneur en eau optimum proctor normal (W % OPN). Lorsque ce même échantillon est ensuite immergé durant 4 jours, son indice chute de 20 à 4. Dans le cas du sol B₅ cette chute est encore bien plus sensible puisque l'indice CBR passe de 40 à 2 pour seulement 2 points d'écart entre la teneur en eau optimum et la teneur en eau de compactage.

On remarque également sur ces graphiques que les indices CBR immédiat et après immersion de 4 jours sont assez peu différents lorsque les sols sont compactés suivant les conditions de l'optimum proctor normal, ce qui peut se traduire par la possibilité d'utiliser de tels sols en tant que matériaux de remblai de buses si leur teneur en eau est très voisine de la teneur en eau optimum, si on les compacte jusqu'à obtenir la densité maximum proctor et si, dans ces conditions, leurs caractéristiques mécaniques sont compatibles avec le dimensionnement de la buse.

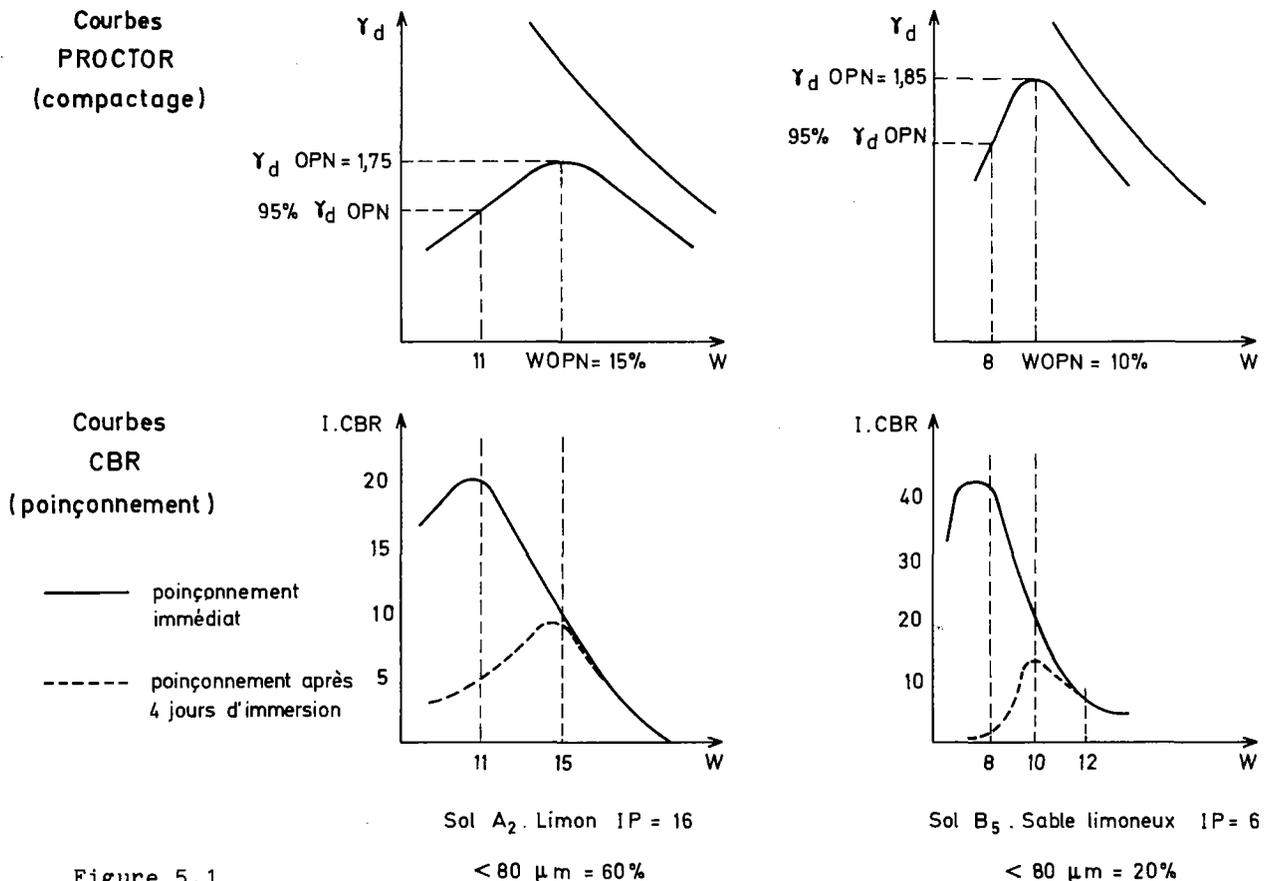


Figure 5.1

En conclusion, pour décider de la possibilité d'utiliser un sol sensible à l'eau dans les remblais de buses, il faut pouvoir :

- apprécier le module de ce sol dans l'état (teneur en eau et densité) dans lequel il se trouvera après l'exécution des travaux;
- être certain que, dans la vie de l'ouvrage, l'évolution de ce module restera dans des limites satisfaisant les hypothèses de dimensionnement.

En outre, les conditions pratiques d'exécution (régalage, compactage) exigent que le matériau utilisé ne présente pas d'éléments trop grossiers (dimension maximum inférieure à 100 mm) pour ne pas risquer de créer des saillies ou "têtes de chat" qui pourraient endommager la buse.

La classification des sols proposée dans la "Recommandation pour les Terrassements Routiers"* distingue différentes classes de sols qui sont définies en grande partie en fonction de ces critères. Il est donc commode de s'y référer pour caractériser l'aptitude des sols à être utilisés dans les remblais contigus aux buses, comme le montrent les tableaux ci-après :

a) Matériaux particulièrement aptes (cf Tableau n° II):

Il s'agit des sols granulaires propres. Leur module présente des valeurs relativement élevées qui varient peu avec leur teneur en eau. En outre lorsque ces matériaux sont entièrement roulés (graves et sables alluvionnaires) ils sont relativement faciles à compacter mais leur module dans ce cas ne dépasse généralement pas des valeurs de 80 à 100 MPa. Si on leur ajoute, même en faible proportion (environ 25%), des éléments concassés, leur module peut croître très rapidement jusqu'à des valeurs de 200 à 300 MPa, mais leur compactage devient alors plus difficile. A la limite, il est évident que les modules les plus élevés sont obtenus avec les graves entièrement concassées (valeurs supérieures à 300 MPa).

Il est recommandé d'utiliser ces matériaux dans le remblaiement des buses chaque fois que faire se peut et notamment dans les cas suivants :

- remblais de calage et dans la zone annulaire contiguë (cf § 6.2.4.3) des buses-arches et des buses du type Super-Span;
- lorsque le dimensionnement de la buse suppose un matériau de remblai de module supérieur à 40 MPa;
- pour tous les ouvrages pour lesquels on prévoit qu'il sera difficilement possible en pratique d'exercer un contrôle et une surveillance fiables de la mise en oeuvre.

b) Matériaux utilisables sous réserve d'un contrôle strict de leur état (W_g, γ_d) à la mise en oeuvre (cf tableau III):

Il s'agit principalement des sols sensibles à l'eau dont l'emploi en remblai de buse ne peut être toléré que s'ils sont mis en oeuvre dans des conditions très voisines de celles de l'optimum proctor normal afin de satisfaire à la double condition énoncée précédemment :

- obtention d'un module suffisant pour le dimensionnement;
- conservation de la valeur de ce module à long terme.

Ces matériaux ne doivent pas être utilisés dans les cas cités en (a) mais étant donné leur faible coût, il peut être économiquement intéressant de les utiliser pour les remblais de butée et le dôme des grandes buses en raison des volumes importants que cela peut représenter. Dans ce cas, un contrôle strict de leur état à la mise en oeuvre ainsi qu'une vérification sur planche d'essai des modules effectivement obtenus sont indispensables.

c) Matériaux à ne pas utiliser dans les remblais contigus aux buses (cf Tableau n° IV):

Pour le détail des caractéristiques d'identification de ces matériaux se reporter à la classification des sols figurant dans le Fascicule 2 de la Recommandation pour les Terrassements Routiers.

* R.T.R., document SETRA - LCPC, janvier 1976, figure en annexe du fascicule 2 du CCTG.

TABLEAU II: Matériaux particulièrement aptes à l'utilisation en remblai contigu aux buses métalliques.

Classe de sol R.T.R	Caractéristiques d'identification	Exemples	Ordre de grandeur du module à considérer (1)	Observations
B ₁	D: < 50 mm (2) % < 80 μ _m : compris entre 5 et 12% % > 2 mm: < 30% ES: > 35 (3)	Sables silteux	50 à 100 MPa	Bien qu'en principe insensibles à l'eau, ces sols peuvent matelasser à la mise en oeuvre si celle-ci s'effectue dans des conditions hydriques très défavorables (nappe). Toutefois, après la mise en oeuvre, ils retrouvent des caractéristiques mécaniques élevées (draînage).
D ₁	D: < 50 mm % < 80 μ _m : < 5% % > 2 mm: < 30%	Sables fins Sables de dune*		
B ₃	D: < 50 mm % < 80 μ _m : compris entre 5 et 12% % > 2 mm: > 30% ES: > 25	Graves silteuses	50 à 100 MPa	
D ₂	D: < 50 mm % < 80 μ _m : < 5% % > 2 mm: > 30%	Graves alluvionnaires brutes ou concassées Roches concassées	50 à 300 MPa	Les valeurs de module les plus élevées correspondent aux roches concassées.
D ₃	D: compris entre 50 et 250mm % < 80 μ _m : < 5%	Graves alluvionnaires Roches minées ou concassées	80 à 300 MPa	Certains de ces matériaux nécessitent un écrêtage. Les valeurs de module les plus élevées correspondent aux roches minées ou concassées.
C _{Ra}	craie dense γ _d ≥ 1,7g/cm ³ (4)	Craie	150 à 200 MPa	La granularité de cette craie obtenue après extraction nécessite souvent un écrêtage ou une fragmentation complémentaire.

(1) Modules mesurés à l'essai de chargement statique à la plaque Ø 600 mm, au 2ème chargement.

(2) D : dimension maximale des éléments.

(3) ES: équivalent de sable.

(4) γ_d: densité sèche de la craie dans son gisement.

* Sauf précautions particulières, ces matériaux sont à éviter pour les ouvrages hydrauliques.

TABLEAU III: Matériaux utilisables sous réserve d'un contrôle strict de leur état à la mise en oeuvre.

Classe de sol R.T.R	Caractéristiques d'identification	Exemples	Ordre de grandeur du module à considérer	Observations
A _{1m}	D: < 50 mm % < 80 μ _m : > 35% I _p : < 10 (1) W _g : comprise (2) entre W _{OPN} -2 et (3) W _{OPN} +1	Limons peu plastiques Sables fins limoneux	30 à 80 MPa	Les valeurs les plus faibles des modules correspondent aux valeurs maximales tolérées pour la teneur en eau de mise en oeuvre.
A _{2m}	D: < 50 mm % < 80 μ _m : > 35% I _p : compris entre 10 et 20 W _g : comprise entre W _{OPN} -2 et W _{OPN} +2	Limons Sables argileux	30 à 60 MPa	idem
A _{3m}	D: < 50 mm % < 80 μ _m : > 35% I _p : compris entre 20 et 50 W _g : comprise entre W _{OPN} -4 et W _{OPN} +4	Limons argileux Marnes Argiles	15 à 60 MPa	idem Les plus argileux de cette classe (I _p > 35) sont en outre à exclure de l'utilisation en remblai de buse.
B _{2m}	D: < 50 mm % < 80 μ _m : compris entre 5 et 12% % > 2 mm: < 30% ES: < 35 W _g : comprise entre W _{OPN} -1 et W _{OPN} +2	Sables limoneux	30 à 80 MPa	Les valeurs les plus faibles des modules correspondent aux valeurs maximales tolérées pour la teneur en eau de mise en oeuvre.
B _{4m}	D: < 50 mm % < 80 μ _m : compris entre 5 et 12% % > 2 mm: > 30% ES: < 25 W _g : comprise entre W _{OPN} -1 et W _{OPN} +2	Graves argileuses	30 à 100 MPa	idem

(1) I_p : indice de plasticité.

(2) W_g : teneur en eau naturelle.

(3) W_{OPN}: teneur en eau optimum proctor normal.

TABLEAU III (suite)

B _{5m}	D: < 50 mm % < 80 μ _m : compris entre 12 et 35% I _p : < 10 W _g : comprise entre W _{OPN-2} et W _{OPN+1}	Sables et graves silteuses	30 à 100 MPa	Les valeurs les plus faibles des modules correspondent aux valeurs maximales tolérées pour la teneur en eau de mise en oeuvre.
B _{6m}	D: < 50 mm % < 80 μ _m : compris entre 12 et 35% I _p : > 10 W _g : comprise entre W _{OPN-2} et W _{OPN+2}	Sables et graves argileux	30 à 100 MPa	idem
C _{1m}	D: > 50 mm % < 80 μ _m : 10 à 20% W _g : comprise entre W _{OPN-2} et W _{OPN+4}	Argiles à silex Argiles à meulières Eboulis Moraines Roches altérées Alluvions grossières	20 à 100 MPa	idem La W _{OPN} considérée pour cette classe de matériaux est celle déterminée sur la fraction 0/20 mm. La granularité de ces matériaux peut nécessiter un écrêtage à 100 mm.
C _{2m}	D: < 250 mm % < 80 μ _m : compris entre 5 et 10 à 20% W _g : doit être telle que le matériau se présente dans un état d'humidité moyenne.	idem	50 à 150 MPa	L'état d'humidité de cette classe de sols ne peut être apprécié que visuellement du fait des difficultés pratiques d'exécution d'essais sur des sols aussi grossiers. La granularité de ces matériaux exigera presque toujours un écrêtage à 100 mm.
E ₂	Il s'agit de matériaux évolutifs à structure grossière fragile mais ne contenant pas ou peu d'argile. Leur évolution conduit à un sol peu ou pas sensible à l'eau du type B ₁ à B ₄ ou D	Matériaux gréseux Conglomérats Pouzzolanes Schistes brûlés	50 à 200 MPa	La granularité de ces matériaux obtenue après extraction peut nécessiter un écrêtage ou une fragmentation complémentaire. Le compactage devra être réalisé de manière particulièrement soignée pour être certain que l'évolution sera terminée avec la mise en oeuvre.

TABLEAU IV: Matériaux à ne pas utiliser en remblai contigu aux buses métalliques.

Classes de sols R.T.R	Exemples	Justification du rejet de l'emploi en remblai contigu aux buses
A _{1h} ; A _{2h} ; A _{3h} ; B _{2h} ; B _{4h} ; B _{5h} ; B _{6h} ; C _{1h} ; C _{2h} .	Limons et argiles humides Sables et graves argileux humides	Il s'agit de sols sensibles à l'eau qui se trouvent dans un état d'humidité élevée. Ils ont donc des caractéristiques mécaniques faibles (modules < 30 MPa) mais par contre ils se compactent facilement et leurs caractéristiques mécaniques restent celles mesurées à la mise en oeuvre. Pour les moins humides d'entre eux une étude spécifique peut être entreprise pour décider de leur rejet ou non.
A _{1s} ; A _{2s} ; A _{3s} ; B _{2s} ; B _{4s} ; B _{5s} ; B _{6s} ; C _{1s} ; C _{2s} .	Limons et argiles secs Sables et graves argileux secs	Il s'agit de sols sensibles à l'eau qui se trouvent dans un état d'humidité faible. Ils ont des caractéristiques mécaniques élevées au moment de la mise en oeuvre ce qui rend leur compactage difficile. Soumis à une humidification postérieure à la mise en oeuvre, leurs caractéristiques mécaniques pourront chuter dans des proportions considérables, qu'il est par ailleurs impossible de prévoir avec précision. Pour les moins secs d'entre-eux une étude spécifique peut être entreprise pour décider de leur rejet ou non.
A ₃ avec I _p > 35 A ₄	Argiles plastiques à très plastiques	Il s'agit de sols trop argileux dont on risque de ne pas maîtriser le comportement à la mise en oeuvre.
C ₃ ; D ₄	Moraines Alluvions grossières Roches minées	Il s'agit de matériaux très grossiers pour lesquels un écrêtage n'est plus intéressant économiquement. Pour les moins grossiers d'entre eux une étude spécifique peut être entreprise pour décider de leur rejet ou non.
CRb	Craie peu dense à teneur en eau moyenne ou faible.	Cette craie peut encore se densifier sensiblement après la mise en oeuvre si la fragmentation et le compactage n'ont pas été suffisants. Pour les plus denses d'entre-elles une étude spécifique peut être entreprise pour décider de leur rejet ou non.
CRc; CRd	Craies peu denses à teneur en eau élevée	Ces craies peuvent encore se densifier sensiblement après la mise en oeuvre d'autant plus que leur compactage est difficile, compte tenu de leur teneur en eau élevée.
E ₃	Marnes Schistes	Il s'agit de roches évolutives argileuses dont le comportement est encore trop mal connu pour prendre le risque de les utiliser dans les remblais contigus aux buses.
F	Terres végétales Déchets industriels	Il s'agit de matériaux putrescibles, solubles, combustibles ou polluants.

*oui
pas certain*

oui

*oui
pas certain*

non

*oui
pas certain*

non

5.2.2 - Caractéristiques chimiques et électrochimiques

Un certain nombre de paramètres simples permettent de caractériser le degré d'agressivité d'un sol envers les métaux qui se trouvent à son contact, ce sont essentiellement:

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

Bien qu'il soit impossible de supprimer totalement la corrosion du métal, on peut en pratique limiter celle-ci à des valeurs faibles en choisissant un matériau de remblai pour lequel ces paramètres restent dans une fourchette donnée, en dehors de laquelle les risques de corrosion rapide ne sont pas négligeables.

Le présent paragraphe fixe les valeurs minimales (et éventuellement maximales) de ces paramètres. Il est en étroite relation avec les réserves d'épaisseur d'acier données en 5.5, ces surépaisseurs ne pouvant en aucun cas être considérées comme suffisantes si le matériau de remblai ne satisfait pas aux critères chimiques et électrochimiques définis ci-après.

5.2.2.1 - La résistivité

La résistivité du matériau de remblai, déterminée dans tous les cas, est mesurée suivant le mode opératoire n°1 de l'annexe 3.

Elle doit être supérieure à :

- 1000 ohm-centimètre (Ω .cm) pour les ouvrages hors d'eau,
- 3000 ohm-centimètre (Ω .cm) pour les ouvrages en eau douce*

5.2.2.2 - L'activité en ions hydrogène ou "pH"

L'activité en ions hydrogène du sol, également déterminée dans tous les cas, est mesurée conformément à la norme NFT 01013 dans l'eau extraite du mélange sol-eau dans les conditions du mode opératoire n°2 de l'annexe 3. Sa valeur doit être comprise entre 5 et 10.

5.2.2.3 - La teneur en sels solubles

Elle n'est déterminée en principe que pour les matériaux de remblai naturel dont la résistivité est comprise entre 1000 Ω .cm et 5000 Ω .cm, et pour les matériaux de remblai d'origine industrielle.

On mesure la concentration en chlorure $[Cl^-]$ selon la norme NFT 90010 et la concentration en sulfate $[SO_4^{--}]$ selon la norme NFT 90009 dans l'eau extraite selon le mode opératoire n°2 de l'annexe 3.

Les valeurs de concentration doivent respecter les conditions suivantes:

- | | |
|--------------------------|---|
| - Ouvrages hors d'eau: | $\left\{ \begin{array}{l} [Cl^-] < 200 \text{ mg/kg} \\ [SO_4^{--}] < 1000 \text{ mg/kg} \end{array} \right.$ |
| - Ouvrages en eau douce: | $\left\{ \begin{array}{l} [Cl^-] < 100 \text{ mg/kg} \\ [SO_4^{--}] < 500 \text{ mg/kg} \end{array} \right.$ |

5.2.2.4 - La teneur en sulfures totaux

Elle n'est déterminée en principe que lorsque l'origine du matériau de remblai laisse supposer la présence de sulfures. La détection qualitative de ces sulfures est effectuée selon le mode opératoire n°3 de l'annexe 3. Leur dosage éventuel doit être effectué par un laboratoire compétent.

*Dans ce cas la résistivité doit également être mesurée en saturant le sol avec l'eau du site.

* La concentration en soufre doit être inférieure à 300 mg/kg pour
* les ouvrages hors d'eau et 100 mg/kg pour les ouvrages en eau douce.
*

5.2.2.5 - Les matières organiques

* Les matériaux de remblai utilisés ne doivent pas contenir de ma-
* tières organiques.
*

* En cas de doute, on peut vérifier que la teneur en matières organi-
* ques exprimée en carbone, déterminée suivant le mode opératoire n°4 de l'an-
* nexé 3, ne dépasse pas 100 parties par million (p.p.m.).
*

5.2.2.6 - L'activité biologique

* Elle n'est prise en considération que lorsque les résultats des
* critères précédents laissent craindre une telle activité.
*

* On caractérise la présence de micro-organismes aérobies par la me-
* sure de la "Demande biochimique en oxygène" (DBO) suivant le mode opératoire
* défini par la norme NFT 90103.
*

* Les micro-organismes anaérobies sont déterminés par un comptage
* spécifique de chaque espèce, effectué selon les procédés reconnus par
* l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA).
*

5.3 - QUALITES DES FOURNITURES METALLIQUES

5.3.1 - Tôles

* Les tôles sont en acier au carbone, de construction d'usage géné-
* ral. Elles doivent être conformes à la norme NF A 35-501.
*

* Elles sont formées à froid pour créer leurs ondulations et leur
* forme cintrée. Il est conseillé d'utiliser des aciers dits "aptés à la galva-
* nisation"*.
*

* Les caractéristiques géométriques des tôles sont:

- l'épaisseur nominale de l'acier et l'épaisseur totale compren-
nant l'éventuelle couche de galvanisation,
- l'amplitude et la hauteur des ondulations,
- le rayon de cintrage,
- le diamètre de perçage des trous pour le passage des boulons et
la position de ceux-ci par rapport au sommet d'une onde.

* Les caractéristiques mécaniques des tôles sont:

- la résistance à la traction R_m ,
- la limite d'élasticité R_e (ou $R_{p0,2}$)
- l'allongement à la rupture A .

* Ces caractéristiques sont déterminées sur des éprouvettes préle-
vées dans la tôle mise en forme, conformément au schéma du mode opératoire
n° 5 de l'annexe 3 et soumises à un essai de traction selon la norme
NF A 03-151. Les valeurs des caractéristiques à considérer sont les moyennes
des valeurs mesurées sur trois éprouvettes par tôle.

* Il est exigé d'utiliser des aciers satisfaisant au moins aux nor-
mes de qualité E 24 (A 37)-1.

* Sont habituellement considérés comme tels les aciers dont la teneur en silicium est inférieure à 0,04%.

5.3.2 - Boulons

Les boulons sont en aciers au carbone ou alliés, aptes aux déformations à froid et aux traitements thermiques, conformes par exemple à la norme NF A 35-556 concernant les boulons HR destinés à l'exécution des ouvrages d'art, ou à la norme NF A 35-557 concernant les boulons à hautes performances destinés à la construction mécanique.

Les caractéristiques géométriques des boulons sont :

- le diamètre de la partie filetée (vis),
- la longueur de la partie filetée et la longueur totale de la vis,
- la forme et les dimensions latérales de la tête de vis,
- les formes et les dimensions (hauteur, dimensions latérales) de l'écrou.

Elles doivent être compatibles avec celles des tôles et, lorsqu'il s'agit de boulons à tête hexagonale, être conformes aux spécifications de la norme NF E 27-711.

Les caractéristiques mécaniques des boulons sont les résistances à la traction de la vis et de l'écrou. Ces résistances à la traction doivent être supérieures ou égales à $1,7 R_m$, celle de la tôle étant égale à R_m .

Il est exigé d'utiliser des boulons dont les caractéristiques mécaniques correspondent à la classe h.r. 8.8 ou h.r. 10.9 de la norme NF E 27-701.

5.3.3 - Joints boulonnés

La résistance des joints boulonnés sera prise égale à celle donnée par les fiches techniques constituant l'annexe n° 1, à condition que le matériel fourni, tôles et boulons, corresponde exactement à celui décrit dans la fiche. Cette conformité devra faire l'objet d'une attestation écrite du fournisseur.

Dans les autres cas, ou pour des applications particulières, elle pourra être évaluée par des essais de compression, effectués suivant le mode opératoire n°5 de l'annexe 3.

5.4 - NATURE ET QUALITES DES PROTECTIONS VIS-A-VIS DE LA CORROSION

Les protections contre la corrosion sont liées à la nature électrochimique du processus de détérioration.

Il s'agit :

- a) de mettre un écran sur le métal (cas des revêtements),
- b) de placer le métal dans les conditions où toute dissolution est impossible (cas de la protection cathodique),
- c) d'utiliser les produits de corrosion comme barrière plus ou moins étanche (cas de la surépaisseur),
- d) de combiner l'effet d'écran et, en cas de détérioration locale de celui-ci, l'effet de protection cathodique (cas des revêtements métalliques à base de zinc ou d'aluminium).

Ces quatre types de protection ne sont pas également répandus. Par exemple la galvanisation est usuelle alors que la protection cathodique est extrêmement rare.

5.4.1 - Revêtement métallique (galvanisation)

5.4.1.1 - Caractéristiques

Le revêtement de galvanisation est obtenu soit au trempé de la tôle déjà mise en forme dans un bain de zinc fondu, soit en continu dans le cas des tôles peu épaisses non encore ondulées ni cintrées.

La qualité du revêtement galvanisé au trempé est spécifiée par la norme NF A 91-121 et celle des tôles galvanisées en continu spécifiée par la norme NF A 36-321.

La masse moyenne de zinc déposée doit être au moins de 725 g/m² double-face, la masse en tout point devant dépasser 640 g/m².

Les boulons sont protégés par un revêtement de zinc dont les caractéristiques sont au moins égales à celles de la classe de qualité 10-20 microns définie par la norme française NF E 27-016.

5.4.1.2 - Contrôles

a) Masse de zinc

Lorsqu'un contrôle est envisagé, il est conseillé d'avoir recours à un essai destructif par dissolution chimique, qui est le seul pouvant donner des informations fiables. On pourra s'inspirer des essais décrits par les normes NF A 91-121 et NF A 36-321, en découpant dans une des tôles fournies trois éprouvettes, ou plusieurs groupes de trois éprouvettes, d'une section unitaire d'au moins 30 cm².

La moyenne des mesures devra être, pour chaque groupe de trois éprouvettes, supérieure ou égale à la masse spécifiée de 725 g/m² double face, les mesures individuelles devant donner des résultats supérieurs à 640 g/m².

Il est à noter que, dans le cas de la galvanisation au trempé, les tôles sont galvanisées par lots comportant très peu d'éléments. Un résultat défavorable lors du contrôle doit donc être interprété en fonction du contexte avant d'envisager le refus de l'ensemble du lot.

b) Adhérence

Les essais d'adhérence spécifiés par la norme NF A 91-121 ne s'appliquent pas aux tôles, la méthode d'essai d'adhérence à utiliser est donnée par le mode opératoire n°6 de l'annexe 3.

5.4.2 - Revêtement par peintures

Dans le cas général les buses ont reçu en atelier un revêtement de galvanisation au trempé constituant une bonne protection anticorrosion. Toutefois, si le remblai est constitué d'un terrain agressif vis-à-vis du revêtement de zinc, ou si le milieu intérieur à la buse est aussi agressif vis-à-vis du zinc, une protection complémentaire par peinture de l'acier galvanisé est nécessaire (cf § 5.6).

La mise en peinture de l'acier galvanisé est toujours une opération délicate, le choix du type de protection étant très important, ainsi que la préparation de surface avant application de la peinture, qui doit être faite avec un soin particulier si on ne veut pas risquer de décollements ultérieurs.

5.4.2.1 - Conditions d'emploi

Les revêtements non métalliques sur les tôles sont soit des peintures, soit des produits noirs à base de bitume ou d'asphalte.

* Si la peinture est appliquée directement en usine après l'opération
* de galvanisation, il n'y a généralement pas de difficulté pour appliquer sur
* un support propre et sec.
*

* L'application des brais traditionnels peut être faite au trempé;
* par contre, en raison de la durée de vie en pot limitée des produits à deux
* composants, l'application des brais-époxy doit être faite à la brosse ou au
* pistolet.
*

* L'application de la peinture sur le site est à éviter dans la mesu-
* re du possible. Au cas où on devrait néanmoins y avoir recours, un certain
* nombre de précautions sont à prendre:
*

* - élimination de toutes les souillures de l'acier galvanisé par la-
* vage ou même lessivage si nécessaire, en particulier, tous les sels de zinc
* doivent être éliminés par brossage;
*

* - reprises des dégradations de la galvanisation si nécessaire;
* ces reprises s'effectuent avec une peinture riche en zinc (époxy ou silicate
* d'éthyle) appliquée après élimination complète de la rouille par décapage ou
* par projection d'abrasif si nécessaire;
*

* - application des brais (ou brais-époxy) sur des surfaces débarras-
* sées de toutes traces de sels de zinc après dérochage*; le dérochage est tou-
* jours préférable bien qu'une exposition naturelle confère à l'acier galvanisé
* une rugosité de surface par attaque superficielle du zinc.
*

* Les conditions d'application des peintures sont très importantes;
* en particulier le respect de la température et de l'hygrométrie limites, des
* délais entre couches, des conditions de dilution et de préparation des pro-
* duits sont fondamentaux; elles doivent être scrupuleusement respectées, comme
* l'impose le fascicule 67 du CCTG.
*

* Les produits (brai-époxy en particulier) peuvent être choisis
* dans les produits agréés par la Commission d'agrément des peintures pour la
* protection des ouvrages métalliques. Cette Commission ne traite pas le cas
* des ouvrages enterrés ni de la protection de l'acier galvanisé mais le choix
* de brai-époxy agréé conduit l'utilisateur à la certitude d'un produit auto-
* contrôlé par le fabricant, dont l'autocontrôle est vérifié par la Commis-
* sion. Ce produit est parfaitement défini et ses conditions d'emploi sont spé-
* cifiées dans la fiche d'agrément correspondante (circulaire n° 80-2 du
* 9.1.80).
*

5.4.2.5 - Contrôles de réception

* Les travaux de préparation de surface et d'application du revête-
* ment doivent être contrôlés afin d'obtenir des résultats satisfaisants; dans
* la qualité de ces contrôles réside en grande partie le respect des spécifica-
* tions du marché et la certitude d'une bonne tenue ultérieure du revêtement.
*

* Des indications sur la réalisation de ces contrôles sont données
* dans le "Guide de contrôle de chantier de peintures sur ouvrages métalliques"
* publié en Avril 1978 par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
*

* Dans le cas de l'application de revêtements épais comme les brais
* ou les brais-époxy, un certain nombre de contrôles doivent être réalisés, en
* particulier:
*

* - Contrôle de l'épaisseur du revêtement sec: cette mesure est en
* principe réalisée avec un appareil de type électromagnétique correctement
* étalonné donnant une lecture directe de l'épaisseur. Avec ce type de produit,
* les irrégularités d'épaisseur sont souvent importantes, mais l'exploitation
* des mesures doit permettre de vérifier que le minimum d'épaisseur fixé au
* marché est respecté (il est à noter que, par principe, les appareils électro-
* magnétiques donnent une mesure de l'épaisseur totale du revêtement, galvani-
* sation comprise). En cas de désaccord entre les parties seule une mesure
* micrométrique avec coupe destructive peut permettre de conclure.
*

* Attaque acide donnant une légère rugosité de surface.

* - Contrôle de l'adhérence du revêtement sec: cet essai destructif
* doit être réalisé par résistance à l'arrachement; il reste délicat sur chan-
* tier en raison du matériel à utiliser. Il peut donner des indications intéres-
* santes sur le niveau de décollement (entre couches, à partir du support...).

* - Contrôle au peigne électrique: l'efficacité du revêtement peut
* être contrôlée au moyen d'un "peigne électrique" sous tension de 2500 volts
* conforme à la norme Pr E 86 901. Ce test permet de détecter les défauts, po-
* rosités, maigreurs, etc. du revêtement. Les zones présentant des défauts de-
* vront faire l'objet d'un complément de protection puis d'un nouveau contrôle.

5.4.2.6 - Mise en peinture à des fins esthétiques

* Dans certains cas, une mise en peinture des parties vues de la
* buse peut être réalisée à des fins esthétiques. Il convient alors de choisir
* un système de peintures applicable sur acier galvanisé, dont les possibilités
* de teinte soient multiples et la durée de vie des couleurs bonne.

* L'application de ces peintures étant généralement réalisée sur
* chantier, la préparation de surface de l'acier galvanisé est fondamentale.
* Après un nettoyage et un dégraissage soignés, il est nécessaire d'effectuer
* un traitement de surface du type dérochage acide, suivi d'un rinçage abon-
* dant (on portera une attention particulière à l'évacuation des eaux de rin-
* çage).

* Ensuite on pourra appliquer un système de protection avec pein-
* ture primaire réactive comme couche d'accrochage.

* Dans ce cas, une garantie de tenue doit être prévue au marché, con-
* cernant principalement les risques de décollement et de modification de cou-
* leur. Des indications sur la rédaction de ce paragraphe du CCTP sont données
* dans la Circulaire n° 80.2 du 9.1.80.

5.4.3 - Protection cathodique

* Dans certains cas très particuliers, on peut être amené à placer
* une buse sous protection cathodique mais dans ce cas le projet doit être exa-
* miné avec l'aide de sociétés installatrices et calculé pour chaque type de
* buse dans un remblai donné. Par ailleurs le coût d'une telle installation de
* protection cathodique est souvent très élevé.

* On peut utiliser:

* - un système à courant imposé à condition d'avoir près de l'ouvra-
* ge une source de courant;

* - un système à anodes sacrificielles à condition de choisir correc-
* tement le type d'anodes en fonction du remblai.

5.5 - RESERVE D'ÉPAISSEUR D'ACIER

* Les produits de corrosion peuvent ralentir la détérioration lors-
* que la quantité de métal oxydé atteint une certaine valeur. Une surépaisseur
* d'acier peut ainsi servir de protection.

* Les réserves d'épaisseur à considérer sont données par les ta-
* bleaux V (côté remblai) et VI (côté atmosphère). Lorsqu'une galvanisation est
* nécessaire, elle doit être conforme aux indications du paragraphe 5.4.1. Dans
* tous les cas, les boulons sont protégés par un revêtement métallique conforme
* à ces mêmes indications.

* L'épaisseur sacrifiée e_s à prendre en compte dans les justifica-
* tions (cf § 4.5) est la somme des épaisseurs e_r et e_a .

Le tableau VI tient compte de la corrosion atmosphérique proprement dite. Dans le cas des ouvrages hydrauliques, la réserve d'épaisseur indiquée peut être suffisante, si les conditions sont favorables, pour couvrir la détérioration due à l'eau, mais il sera parfois nécessaire d'avoir recours à une protection supplémentaire. Ce problème est abordé en 5.6.2 ci-après.

Tableau V: réserve d'épaisseur d'acier e_r (mm) côté remblai.

Classification des ouvrages (cf § 3.5)	Provisoires	Permanents	
		ouvrages ordinaires	ouvrages de grande importance
Hors d'eau	0*	0,50	0,75
En eau douce	0	0,75	1,00

* Seul cas où les tôles peuvent ne pas être galvanisées.

Tableau VI: réserve d'épaisseur d'acier e_a (mm) côté atmosphère.

Teneur en SO_2 dans l'air (moyenne annuelle)	Provisoires	Permanents	
		visitables	non visitables
$SO_2 < 0,1 \text{ mg/m}^3$	0*	0,25	0,50
$SO_2 \geq 0,1 \text{ mg/m}^3$	0	0,50	0,75

* Seul cas où les tôles peuvent ne pas être galvanisées.

5.6 - PROTECTIONS SUPPLEMENTAIRES

5.6.1 - Protection vis-à-vis du matériau de remblai

Dans tous les cas, les matériaux de remblai utilisés doivent satisfaire les critères exposés au paragraphe 5.2.2; cependant, lorsque leur résistivité est inférieure à $5000 \Omega \cdot \text{cm}$, il est nécessaire de prévoir, dans les cas indiqués par le tableau VII, une protection supplémentaire par revêtement non métallique. Son emploi doit être cumulé avec les prescriptions du paragraphe 5.5 ci-dessus concernant la réserve d'épaisseur d'acier et la galvanisation.

Lorsque les tôles sont recouvertes d'un revêtement non métallique, les têtes de boulons et l'écrou doivent être protégés par un produit répondant aux mêmes spécifications.

Tableau VII: Revêtement non métallique sur les tôles côté remblai sur acier galvanisé ($\rho < 5000 \Omega \cdot \text{cm}$).

Teneur en anions $a^- = [Cl^-] + [S^{--}] + [SO_4^{--}]$	Provisoires	Permanents	
		ouvrages ordinaires	ouvrages de grande importance
$a^- < 500 \text{ mg/kg}$	non	oui si $\text{pH} \geq 9$	oui
$a^- \geq 500 \text{ mg/kg}$	non	oui	oui

"oui" : protection supplémentaire nécessaire

"non" : protection supplémentaire non nécessaire

5.6.2 - Protection contre la corrosion et l'abrasion par l'eau *

Dans le cas d'eaux acides (ou basiques) une protection de l'acier galvanisé est absolument indispensable afin d'éviter une dégradation du zinc. Cette protection est à appliquer sur les deux faces des tôles.

Le tableau VIII détaille les cas d'emploi d'une telle protection lorsque l'eau n'est pas trop acide (pH > 4,5).

Tableau VIII : Protection contre la corrosion par l'eau dont le pH est compris entre 4,5 et 12.

Caractéristiques de l'eau			Type d'ouvrage	
vitesse	pH	$[a^-] = [Cl^-] + [SO_4^{--}] + [S^{--}]$	Provisoire	Permanent
$v < 2,5$ m/s	4,5 à 5,5		A	B
	5,5 à 9	$a^- < 400$ mg/l $a^- \geq 400$ mg/l	A A	A B
	≥ 9		C	C
$v \geq 2,5$ m/s	4,5 à 5,5		B	B
	5,5 à 9	$a^- < 400$ mg/l $a^- \geq 400$ mg/l	A B	B B
	≥ 9		C	C

A: protection identique à celle de la partie au contact de l'atmosphère.

B: protection supplémentaire par revêtement non métallique.

C: à examiner cas par cas en liaison avec un service spécialisé.

Lorsqu'il existe un risque d'abrasion, il sera en outre nécessaire de prévoir un radier en béton (cf § 3.3.5) ou, à la rigueur, l'emploi d'un revêtement non métallique dur et épais, par exemple trois couches de brai-époxy comportant 35 à 40% de résine époxy en poids dans le film sec (cf § 5.4.2).

* Il est rappelé que seul est envisagé le cas des eaux potentiellement potables (cf § 3.5.2).

Mise en oeuvre

* La justification des ouvrages constitués de buses métalliques repose sur des hypothèses dont la validité dépend essentiellement du respect des qualités requises pour les matériaux fournis et du respect des prescriptions de mise en oeuvre, tant en ce qui concerne le montage des buses elles-mêmes que l'exécution des remblais qui les entourent.

* Par ailleurs, si la souplesse des buses métalliques se présente comme une caractéristique nécessaire au bon fonctionnement des ouvrages sous sollicitations de service, elle constitue la principale contrainte lors de l'exécution, et plus particulièrement pendant la mise en oeuvre des remblais de butée, et impose de ce fait un strict respect de certaines règles.

* Pratiquement, beaucoup de cas de ruine d'ouvrages et d'incidents divers sont directement associés à l'inobservation de certaines de ces règles de mise en oeuvre, par méconnaissance de celles-ci ou parfois même par négligence, qui fait que des erreurs grossières puissent être commises ou que les matériaux mis en oeuvre n'aient pas les qualités requises.

* Il faut souligner qu'il sera généralement difficile, voire même impossible pour les maîtres d'oeuvre de contrôler après réalisation des ouvrages que les matériaux mis en oeuvre ont bien les qualités requises ou que certaines prescriptions du marché ont été respectées. Pour ces raisons notamment, il leur est recommandé de mettre en oeuvre les moyens nécessaires pour que les contrôles indispensables puissent être effectués en temps utile et que, dans la mesure du possible, une surveillance de chantier soit correctement assurée.

* Les recommandations qui suivent ont essentiellement pour objet de renseigner les maîtres d'oeuvre et leurs surveillants de chantier sur les principales règles de construction des ouvrages et sur les contrôles auxquels il leur est recommandé de procéder aux différentes étapes de leur exécution.

* Elles ne sauraient en aucun cas être considérées comme suffisantes pour les ouvrages n'entrant pas explicitement dans le cadre d'application du présent document, que ce soit en raison de leurs caractéristiques particulières (voir avant-propos), ou bien de par l'impossibilité de leur appliquer les règles de dimensionnement en cours de construction définies en 4.4.1.

* En sont également exclus les ouvrages dont l'exécution et les contrôles nécessitent que soient prises des dispositions inhabituelles et la mise en oeuvre de moyens spéciaux, comme cela est par exemple le cas pour des buses entièrement préassemblées sur une aire de montage avant mise en place par levage, par tirage ou par flottaison sur un fond de fouille noyé. Il est toutefois important de souligner que de telles conditions d'exécution, qui ne peuvent avoir qu'un caractère exceptionnel, ne doivent en aucun cas relever d'une improvisation tardive et doivent être très soigneusement préparées avant travaux. Elles nécessitent en effet une étude particulière préalable fixant dans le détail les phases d'exécution et les moyens à employer pour éviter que la buse ne puisse souffrir de manutentions mal conduites et pour assurer l'obtention des qualités requises pour les matériaux mis en oeuvre. Elles imposent par ailleurs une surveillance continue durant les travaux et des contrôles fréquents effectués avec des moyens adaptés.

6.1 - AVANT LE DEBUT DES TRAVAUX

6.1.1 - Agrément des matériaux de remblai

La connaissance préalable des matériaux doit être acquise par une étude de reconnaissance géotechnique utilisant les moyens classiques en la matière (géologie, études réalisées à l'occasion de travaux antérieurs, sondages, essais d'identification,...), complétée par les essais et analyses spécifiques nécessaires pour s'assurer que les matériaux répondent aux critères définis au § 5.2. L'importance de cette étude de reconnaissance doit être adaptée notamment aux conditions particulières de l'ouvrage (volume des matériaux de remblai nécessaires, qualités requises,...), à l'hétérogénéité géotechnique de la zone d'emprunt et aux valeurs plus ou moins limites des caractéristiques des sols dont l'utilisation est envisagée.

Lorsque l'entrepreneur est chargé de fournir les matériaux de remblai, il est tenu de présenter au maître d'oeuvre les éléments justifiant le choix des matériaux proposés (résultats d'essais, sondages, prélèvements, références,...) compte tenu des prescriptions du C.C.T.P. La décision d'accepter ou de refuser les matériaux relève dans tous les cas du maître d'oeuvre, qui pourra s'appuyer sur les recommandations du paragraphe 5.2 et éventuellement exiger des essais complémentaires avant agrément.

Il est rappelé par ailleurs que lorsque les justifications des ouvrages conduisent à requérir pour les matériaux de remblai après mise en oeuvre un module d'élasticité supérieur à 40 MPa (cf § 4.3.2.2 et 4.3.3), ou lorsque ces matériaux ne sont pas classés parmi ceux particulièrement aptes à constituer les remblais techniques des ouvrages (cf § 5.2.1), il peut s'avérer nécessaire de procéder à la réalisation de planches d'essais. Celles-ci sont destinées notamment à préciser dans quelles conditions (épaisseur des couches, type d'engin de compactage et conditions d'utilisation de celui-ci,...) la valeur requise pour le module d'élasticité du matériau en place pourra être obtenue; elles peuvent permettre en outre de définir la nature et l'importance des contrôles à effectuer.

6.1.2 - Conditions générales de réalisation des ouvrages

**
** En règle générale, les ouvrages doivent être entièrement réalisés à
** sec. Ils ne peuvent être mis en exploitation qu'après réalisation de toutes
** les parties d'ouvrage participant directement ou indirectement à leur résis-
** tance ou à leur stabilité (remblais techniques, dispositifs de raidissement,
** dôme de protection, lestage des extrémités des ouvrages hydrauliques s'il y a
** lieu,...). En principe seule la réalisation de certains ouvrages secondaires
** de protection ou d'amélioration esthétique peut être différée (par exemple
** certains perrés).
**

Pour certains ouvrages hydrauliques il peut être toléré de procéder à une mise en eau anticipée, par exemple sitôt que les remblais techniques ont atteint une certaine cote (généralement définie par référence à un niveau des eaux en cas de crue), sous réserve toutefois que des dispositions soient prises pour assurer la stabilité et la protection des parties d'ouvrages déjà réalisées notamment en cas de montée brutale des eaux. Ces dispositions consistent généralement à réaliser au préalable certaines parties de l'ouvrage (parafouilles, lestages, radiers, parties immergées de perrés ou de murs de soutènement,...) et éventuellement à prévoir des dispositifs provisoires de protection (mise en place d'enrochements,...). Il convient cependant de rappeler qu'il peut être dangereux de construire certaines parties de l'ouvrage à des stades où la buse peut encore subir des déformations ultérieures.

D'une manière générale, lorsque certaines propositions de l'entrepreneur relatives aux conditions d'exécution des travaux ont un caractère inhabituel ou susceptible de déroger aux règles de l'art, comme cela peut être le cas dans certaines situations particulières (ouvrages multiples, contraintes particulières de site ou d'environnement,...), il y a lieu d'exiger qu'elles soient présentées avec l'accord du fournisseur, de manière à assurer une concertation entre ce dernier et l'entrepreneur.

En tout état de cause ces dispositions devront figurer dans le programme d'exécution des travaux que l'entrepreneur sera tenu de soumettre au visa du maître d'oeuvre en vertu de l'article 28.2 du C.C.A.G.

Le programme d'exécution des travaux comprendra notamment les pièces suivantes:

- * Une note décrivant les différentes phases d'exécution des ouvrages et la durée prévisionnelle de celles-ci;
- * S'il y a lieu, une note récapitulative des dispositions prévues pour assurer l'exécution et le maintien à sec des ouvrages comprenant en particulier:
 - les plans des déviations des cours d'eau et des ouvrages provisoires éventuels;
 - la description des différentes phases prévues pour ces dispositions et leur correspondance avec les phases d'exécution des différentes natures d'ouvrages;
- * Une note décrivant les conditions de réalisation des ouvrages, approuvée par le fournisseur, et précisant en particulier:
 - le mode de montage des buses, en indiquant éventuellement l'importance approximative des parties d'ouvrages préassemblées, et l'aire d'assemblage de celles-ci;
 - le mode de maintien ou de raidissement des extrémités des buses en phase provisoire, s'il y a lieu;
 - les conditions de réalisation de l'assise des buses, et le mode et les moyens d'approvisionnement de régilage et de compactage des matériaux pour les différentes parties des remblais techniques des ouvrages.

6.1.3 - Matériel d'exécution

L'entrepreneur doit soumettre les matériels qu'il compte utiliser au visa du Maître d'Oeuvre. Ceci ne concerne pas le petit matériel tel que les outils de montage des buses (normalement livrés à l'entrepreneur par le fournisseur), mais vise plus spécialement les matériels de mise en oeuvre, de répandage et de compactage des remblais. Les moyens de compactage des matériaux de remblai utilisés devront être adaptés aux qualités de ces matériaux, aux conditions de mise en oeuvre et de compactage prévues (qui doivent faire l'objet de propositions de l'entrepreneur lorsqu'elles ne sont pas fixées par le C.C.T.P.), et aux qualités requises pour ces matériaux après mise en oeuvre.

6.1.4 - Organisation du chantier

L'organisation du chantier revêt une importance d'autant plus grande pour le bon déroulement des travaux que les dimensions de l'ouvrage à réaliser sont importantes (portée, longueur,...) et que les conditions de site



Figure 6.1

- Evolution des engins de régilage et de compactage de part et d'autre de la buse.

et d'environnement sont difficiles. Toutefois, elle relève normalement de la responsabilité de l'entrepreneur.

Il est à souligner notamment que la réalisation des massifs de butée nécessite de nombreuses interventions successives de part et d'autre de l'ouvrage et que, de ce fait, lorsque les mêmes engins sont utilisés, il est particulièrement important que leurs déplacements puissent être assurés dans les meilleures conditions d'accessibilité (fig. 6.1).

6.1.5 - Préparation du contrôle

Les procédures de contrôle prévues au marché doivent faire l'objet d'une concertation préalable entre le maître d'oeuvre, le Laboratoire chargé d'effectuer les contrôles, et l'entreprise (et éventuellement le fournisseur) afin que les modalités d'intervention au cours du chantier soient bien définies, notamment en ce qui concerne les rôles et les relations des intervenants en présence.

Il est rappelé que les ouvrages de conception non courante du fait de leurs dimensions transversales (cf § 3.6) doivent normalement faire l'objet de mesures des déformations pendant les phases de mise en oeuvre des remblais.

Cette disposition est à considérer comme un moyen de contrôle de l'exécution auquel l'entrepreneur doit procéder pour contrôler l'adaptation des conditions de mise en oeuvre des remblais et l'efficacité des dispositifs de raidissement provisoires des extrémités, s'il y a lieu. Dans ces conditions le C.C.T.P. pourra simplement prescrire:

L'entrepreneur sera tenu de procéder à un contrôle des déformations transversales de la buse pendant la mise en oeuvre des remblais; il devra soumettre au visa du maître d'oeuvre avant le début des travaux une note définissant notamment:

- le nombre de sections de contrôle et leur implantation,
- les dimensions qui feront l'objet de mesures et les fourchettes de valeurs à l'intérieur desquelles devront se situer ces dimensions,
- les moyens de mesure qui seront utilisés,
- le programme des mesures en fonction des différentes étapes de construction des ouvrages.

En tout état de cause:

- le nombre minimal de sections de contrôle sera de 3, dont une au centre de la buse et une au voisinage immédiat de chacune de ses extrémités,
- la précision des mesures sera au moins du demi-centimètre,
- il conviendra de procéder à un contrôle des dimensions visées ci-dessus au moins à chacune des étapes suivantes:
 - . après montage de la buse et avant tout remblaiement,
 - . lorsque les remblais de butée auront atteint la mi-hauteur de la buse,
 - . lorsque les remblais de butée auront atteint la clé de la buse,
 - . à une étape de remblaiement intermédiaire entre ces deux dernières,
 - . lorsque les remblais auront atteint la cote du dôme de protection éventuel.

A l'issue de chacune de ces étapes de réalisation des ouvrages et de mesure des déformations l'entrepreneur sera tenu de fournir au maître d'oeuvre un relevé complet de ces mesures en précisant l'amplitude des déformations enregistrées depuis le début de la mise en oeuvre des remblais de butée et en y joignant éventuellement tout commentaire utile.

6.2 - DURANT LES TRAVAUX

6.2.1 - Approvisionnement et stockage des éléments préfabriqués de buse

La réception sur chantier des éléments préfabriqués constitutifs des buses, leur contrôle (contrôle visuel des qualités, marquage, état de la galvanisation, conformité des dimensions géométriques des plaques, métré...) et leur stockage dans les meilleures conditions pour une organisation rationnelle du montage relèvent en principe de la responsabilité de l'entrepreneur. Le surveillant de chantier doit toutefois veiller à ce que les éléments ne présentent pas de défauts flagrants, et qu'ils soient manutentionnés et stockés avec soin pour éviter leur détérioration ou celle de leur revêtement (galvanisation, enduit bitumineux...).

Les éléments présentant des défauts tels que des écaillages du zinc, des soufflures, des piqûres, des pliures ou des amorces de fissures seront rebutés, et remplacés aux soins et aux frais de l'entrepreneur.

On pourra toutefois tolérer que certaines déformations mineures consécutives aux manipulations ou au transport soient redressées au maillet.

En ce qui concerne l'empilement des plaques ou des paquets de plaques, il convient de s'assurer que les dispositions que les fournisseurs recommandent d'adopter dans leur notices techniques soient respectées.

En tout état de cause l'aire de stockage des éléments devra être plane, propre et résistante. Il en sera de même, s'il y a lieu, de l'aire de préassemblage.

Chaque plaque devra porter une marque indélébile indiquant ou identifiant :

- son origine ou la marque du fabricant,
- l'épaisseur de la tôle,
- son rayon de courbure ou sa position, (sommet, coin, radier) sur le périmètre de la buse.

Lorsque l'ouvrage comprend des plaques de différentes épaisseurs, elles devront comporter un marquage visible de l'intérieur de la buse après montage (marque à la peinture par exemple) permettant une identification facile de l'épaisseur. Ce marquage pourra être effectué sur chantier, à la réception des éléments, lorsqu'il est complémentaire au marquage indiqué ci-dessus.

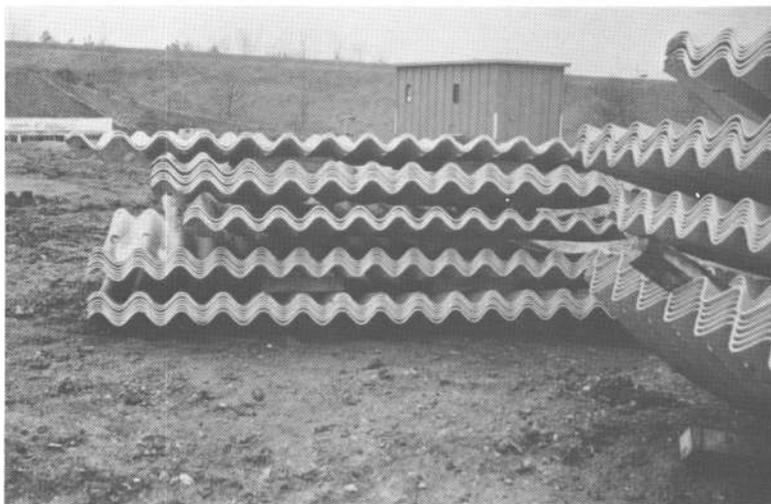


Figure 6.2 - Stockage des éléments réceptionnés

6.2.2 - Réception du fond de fouille

Ce que l'on appelle fond de fouille concerne la plateforme d'assise de l'ouvrage ou de sa fondation éventuelle en terrain rapporté; dans tous les cas le fond de fouille est donc constitué par le terrain naturel en place (éventuellement traité).

La réception du fond de fouille consiste à s'assurer que l'on a bien atteint la cote définie dans les plans d'exécution, que ses dimensions et son implantation ont été respectées, et que l'on est bien en présence sur toute son étendue des terrains que l'étude préalable de sols a permis de prévoir. Ces dispositions concernent aussi bien le fond de fouille que les parois latérales de la tranchée lorsque l'ouvrage est réalisé partiellement ou totalement en déblai.

Selon les conditions locales et l'importance de l'ouvrage, il peut être souhaitable que la réception du fond de fouille se fasse en présence d'un représentant qualifié du Laboratoire qui a été chargé de l'étude de sol.

Lorsque le fond de fouille sert directement de plateforme d'assise à la buse (fondation artificielle non prévue), il faut s'assurer que le terrain est homogène et qu'il présente une portance régulière. Dans les cas douteux, on peut avoir recours à des essais de contrôle rapides effectués avec des appareils relativement légers tels que des essais de type pénétrométrique par exemple, s'il s'agit de reconnaître une certaine épaisseur de sol en place, ou parfois même de simples mesures de portance, avec les matériels classiques utilisés pour les plateformes routières, (Dynaplaque par exemple), lorsqu'il s'agit d'effectuer des comparaisons de portance superficielle.

L'entrepreneur sera tenu de procéder à l'enlèvement ou à la purge de tous les éléments, blocs, poches ou lentilles susceptibles de provoquer des désordres dans l'ouvrage, et au comblement des vides ainsi créés par un matériau de bonnes qualités, compacté si nécessaire pour obtenir des caractéristiques équivalentes à celles du terrain environnant.

La profondeur sur laquelle les poches de sol mou doivent être curées et les obstacles durs dégagés dépend bien entendu du risque qu'ils impliquent vis-à-vis du bon comportement de l'ouvrage, et donc de leur emplacement par rapport à la paroi de la buse et, dans une certaine mesure, des tassements attendus et des caractéristiques du terrain environnant. En tout état de cause, lorsqu'un obstacle dur est rencontré au voisinage immédiat de la position théorique de la paroi de la buse, il convient de tenter de l'extraire s'il est isolé et de faible dimension ou, dans le cas contraire, de le démolir sur une profondeur d'environ le dixième de la portée de la buse, avec un minimum de trente centimètres.

Lorsque le fond de fouille est destiné à recevoir une fondation artificielle et que ses hétérogénéités, tant en ce qui concerne la nature des terrains, que leurs qualités, n'ont pas été reconnues par l'étude des sols, le Maître d'Oeuvre doit convenir avec l'entrepreneur des dispositions particulières à prendre, après consultation éventuelle du Laboratoire. On ne peut en effet dans ces cas fixer des règles a priori, les dispositions à prendre dépendant dans une large mesure de l'importance de ces hétérogénéités et de leur influence sur le comportement de l'ouvrage.

Il en est de même en ce qui concerne les parois latérales des tranchées pour les ouvrages réalisés partiellement ou totalement en déblai. L'influence d'hétérogénéités du sol sur le comportement de l'ouvrage durant sa construction (plus particulièrement lors de la réalisation des remblais supérieurs) ou en service, dépend notamment de l'importance de celles-ci (volume, nature et qualités des sols concernés par rapport à celles du terrain environnant) et de la distance prévue entre parois de la tranchée et nus extérieurs de la buse.

Il convient de veiller également à ce que le nécessaire ait été fait pour assurer la protection du fond de fouille (et des parois de la tranchée s'il y a lieu) vis-à-vis des intempéries, ainsi que l'évacuation des eaux en phase de chantier.

Lorsqu'il a été prévu de donner une contreflèche au profil en long de l'assise de la buse, il faut s'assurer que cette disposition a été respectée, et réalisée, aux tolérances près, conformément aux plans.

L'assise de la buse devra être profilée transversalement en forme de berceau sur une profondeur suffisante, compatible avec les conditions de mise en oeuvre et de compactage des matériaux sous les reins de la buse, de telle sorte qu'aucun creux ni aucune zone de qualités moindres que celles requises ne puisse subsister sous la buse.

La contreflèche éventuelle et la forme en berceau de l'assise étant le plus souvent obtenues à l'aide d'un remblai d'apport, il convient de procéder à une première réception du fond de fouille avant que celui-ci ne soit recouvert par ce remblai.

6.2.3 - Montage des buses - Réception du montage

Le mode de montage des buses dépend généralement de leur origine (marque du fabricant), de leur type (emboîtables, à plaques peu nombreuses ou multiples sur la circonférence,...) de leur forme et de leurs dimensions, et plus spécialement de leur portée. Chaque fabricant dispose d'instructions de montage relatives aux divers produits de sa gamme, qui doivent être respectées.

L'entrepreneur devra soumettre au visa du maître d'oeuvre un plan de montage suffisamment détaillé approuvé par le fournisseur, et précisant notamment le sens de progression du montage, l'importance des préassemblages s'il y a lieu et leur ordre de montage, et le principe d'assemblage des plaques.

Durant le montage de la buse, le surveillant de chantier doit veiller à ce que les plaques, les éléments, et éventuellement les anneaux et les tronçons de buses préassemblés sur une aire de montage soient manutentionnés et mis en oeuvre avec soin et à l'aide d'un matériel adéquat de telle sorte qu'ils ne subissent pas de dégradations (cf § 6.2.1). En effet, certaines d'entre elles peuvent ne plus être visibles (partie inférieure des radiers par exemple) une fois la buse montée.

Si la forme en berceau de l'assise de la buse a été obtenue à partir de deux ou trois lignes brisées (cas courant), il est important de veiller à ce qu'il soit procédé à un bourrage correct des creux subsistant entre ce berceau et le radier de la buse, avec un bon matériau d'apport, au fur et à mesure du montage.

Lorsque le montage de la buse est terminé, celle-ci étant à son emplacement définitif, il convient de procéder à certains contrôles. Il s'agit en particulier de s'assurer :

- de son implantation,
- de ses dimensions géométriques,
- des qualités des éléments constitutifs et de leur revêtement de protection s'il y a lieu,
- de la qualité de l'assemblage de ces divers éléments et de sa conformité au plan de montage.

*** Pour les ouvrages comprenant des tôles d'épaisseurs décroissantes aux extrémités, il faut vérifier que les plaques sont correctement disposées et qu'il n'y a pas eu d'interversion. C'est pour limiter les risques d'erreur et faciliter le contrôle qu'il est recommandé dans certains cas d'exiger un marquage particulier et très visible des tôles de différentes épaisseurs, en usine ou dès réception sur chantier (cf § 6.2.1).

*** Il convient en outre de procéder contradictoirement avec l'entrepreneur à un contrôle du serrage d'un certain nombre de boulons de l'ouvrage, à l'aide d'une clé dynamométrique préalablement étalonnée.

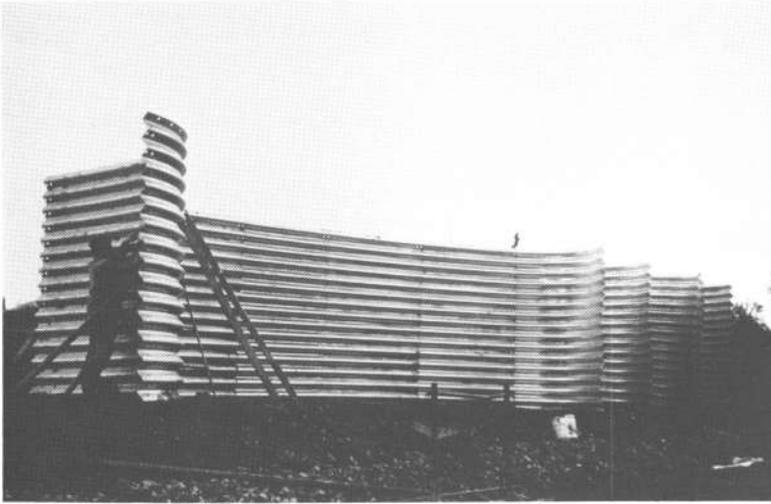


Figure 6.3

- Préassemblage
d'éléments

Figure 6.4

- Mise en place d'une
plaque d'extrémité

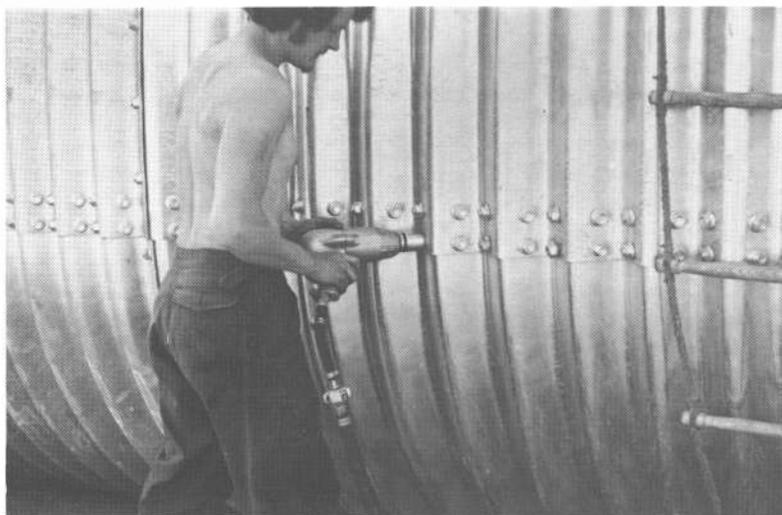


Figure 6.5

- Serrage des boulons

Le couple de serrage des boulons devra être compris dans la fourchette de valeurs donnée dans la fiche technique correspondante figurant en annexe n°1.

Le maître d'oeuvre désignera les boulons dont le serrage sera contrôlé; leur nombre pourra atteindre deux pour cent (2%) du nombre total de boulons que comprend l'ouvrage, sans être toutefois inférieur à 50.

Si, pour une buse, le couple de serrage d'un des boulons contrôlés sort de la fourchette de valeurs définie ci-dessus, le maître d'oeuvre pourra faire procéder à un nouveau contrôle sur un nombre égal de boulons.

L'entrepreneur devra procéder à ses frais à la vérification de tous les boulons de la buse si ce dernier contrôle ne s'avère pas satisfaisant ou si, au cours du premier contrôle, le serrage de deux boulons ou plus n'est pas satisfaisant.

6.2.4 - Mise en oeuvre des matériaux de remblai

Ce paragraphe traite uniquement des conditions générales de mise en oeuvre et de compactage des matériaux de remblai destinés aux diverses parties du massif de sol entourant les buses métalliques. Il s'inspire en partie des règles que certains fournisseurs recommandent de respecter dans leurs notices d'installation mais aussi de l'expérience acquise en la matière, notamment à la lumière d'incidents et d'accidents divers survenus durant les travaux.

Les problèmes spécifiques de contrôle des qualités des matériaux de remblai, au fur et à mesure de leur approvisionnement puis après mise en oeuvre, sont traités au paragraphe 6.2.5 ci-après.

6.2.4.1 - Fondation artificielle

La réalisation d'une fondation artificielle est généralement prévue au projet, mais elle peut aussi résulter d'une décision du maître d'oeuvre prise en cours de travaux, notamment s'il s'avère que, localement ou sur l'ensemble du fond de fouille, les caractéristiques du sol en place ne sont pas conformes à celles déduites de l'étude de sol.

Dans tous les cas, les matériaux utilisés pour les fondations artificielles doivent répondre aux indications du paragraphe 5.2 et être méthodiquement compactés lorsque le terrain de fondation est meuble.



Figure 6.6 - Réalisation d'une fondation artificielle

En règle générale, compte tenu des résultats recherchés (valeur minimale du taux de compactage de 95% de l'O.P.N.), les règles de compactage des matériaux proprement dites (épaisseur des couches, intensité de compactage,...) pourront être directement extraites des fascicules 2 et 3 de la Recommandation pour les Terrassements Routiers (cf § 5.2.1) en considérant qu'il s'agit d'une utilisation normale en remblai. En cas d'utilisation d'engins de compactage légers, non visés par le document précité, ces mêmes règles de compactage pourront être définies en s'appuyant sur les indications fournies par la "Note technique sur le compactage des remblais de tranchées"*.

Il est à noter que dans le cas particulier des buses-arches et des passages, lorsque la valeur requise pour le module du sol sous les plaques de coin est supérieure à 40 MPa (cf § 4.3.3 et 3.2.2.2) il y aura lieu d'utiliser un matériau "particulièrement apte" (cf § 5.2.1.a) et de procéder à un compactage plus intense.

Pour ces formes de buses, et pour les buses circulaires de grand diamètre, le bourrage correct des matériaux entre le radier et un fond de fouille plan est très difficile à assurer, voire même impossible. Il est recommandé dans ces cas de profiler transversalement l'assise de la buse en berceau, suivant la forme du radier (fig. 6.7) ou selon deux ou trois lignes brisées. Dans ce dernier cas les creux subsistant entre le berceau et le radier doivent être correctement comblés, au fur et à mesure du montage, avec le même matériau que celui utilisé pour constituer la fondation artificielle.

Avant d'autoriser le montage de la buse, il y aura lieu de s'assurer que les dimensions géométriques de la fondation artificielle, son profil en long (pente, contreflèche éventuelle,...) et son profil en travers (forme en berceau notamment) sont conformes aux plans d'exécution.



Figure 6.7

- Fondation artificielle profilée en berceau

6.2.4.2 - Remblais de calage

La mise en oeuvre des remblais de calage sous les reins des buses métalliques est une opération délicate à exécuter correctement compte tenu des exigences contradictoires concernant les moyens à utiliser et les résultats à obtenir. En effet, l'exiguïté des zones à remblayer et à compacter, les difficultés d'accès à ces zones, notamment dans le cas des ouvrages réalisés en tranchée ou des ouvrages multiples très rapprochés, et la présence de la paroi de la buse, qu'il est indispensable de ne pas endommager, obligent à recourir à des moyens peu puissants, à faible rentabilité, et dont l'efficacité est souvent mal connue. Par ailleurs, il est exigé que les matériaux présentent une fois mis en oeuvre des caractéristiques au moins équivalentes à celles des remblais de butée, ou supérieures à celles-ci dans de nombreux cas (cf § 4.3.3).

Ces exigences contradictoires justifient toute l'importance qui doit être attachée d'une part au choix des matériaux à utiliser (cf § 5.2.1) et aux conditions de mise en oeuvre, et d'autre part à la surveillance des travaux compte tenu des difficultés qu'il y aura généralement à procéder à des contrôles a posteriori.

* Document SETRA-LCPC Janvier 81.

Pour les buses d'une certaine importance dont l'assise a été profilée en berceau, l'utilisation de plaques vibrantes permet généralement d'assurer une mise en oeuvre satisfaisante des remblais de calage. Dans ce cas, l'aménage et le réglage du matériau s'effectuent manuellement par couches minces, d'épaisseur compatible avec le matériau utilisé, les caractéristiques des engins et les résultats recherchés (10 à 15 cm en moyenne). Les dispositions adoptées doivent également tenir compte du fait que ces engins ne peuvent pas être utilisés efficacement sur des pentes supérieures à 30% (fig. 6.8).

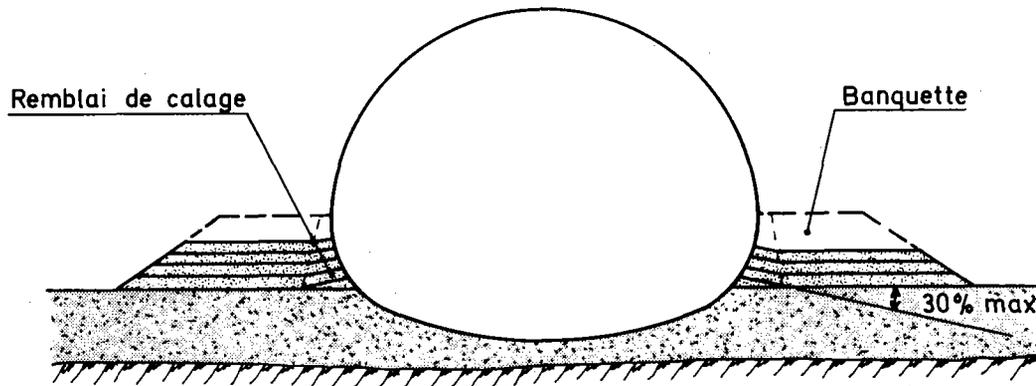


Figure 6.8 - Mise en oeuvre des remblais de calage et des banquettes latérales

L'utilisation de rouleaux, même les plus légers, n'est généralement pas possible mais elle pourra toutefois être envisagée pour le compactage des banquettes latérales éventuelles (cf § 3.2.2.2).

En cas d'utilisation d'engins légers visés par la "Note technique sur le compactage des remblais de tranchées" déjà citée (plaques vibrantes, petits rouleaux,...), les règles de compactage (épaisseur des couches, nombre de passes à effectuer,...) pourront être définies a priori en s'inspirant des indications fournies dans ce document, et éventuellement ajustées avant travaux par des planches d'essais, ou en cours de travaux en fonction des résultats obtenus.

D'autres moyens de compactage peuvent être utilisés (tels que des pilonneuses ou des dames pneumatiques par exemple) si le maître d'oeuvre possède une expérience suffisante de l'emploi de ces moyens ou si l'entrepreneur justifie leur utilisation par des références satisfaisantes dans des conditions d'emploi analogues. Ainsi, par exemple, pour de petits ouvrages, et d'une manière générale lorsque les zones à combler sont très exiguës, l'utilisation de perches de faible section (de l'ordre de 50 cm² environ) ou de moyens similaires peut permettre l'obtention de résultats satisfaisants en bourrant, arrosant et compactant énergiquement le matériau mis en oeuvre.

Cette technique, parfois employée pour des buses de faibles dimensions dont l'assise n'a pas été profilée en berceau, nécessite un calage provisoire de la buse à l'aide de monticules de matériau de remblai bourrés manuellement ou de cales en bois. Dans ce dernier cas, il est important de s'assurer que les cales sont bien enlevées au fur et à mesure de la mise en oeuvre des remblais de calage, l'expérience montrant qu'il n'est pas rare qu'elles soient oubliées en place, créant ainsi des points durs sous la buse.

La mise en oeuvre hydraulique, au sens précis donné à ce terme, permet également d'obtenir de bons résultats sans compactage mécanique complémentaire lorsqu'elle est correctement employée et que le matériau utilisé est compatible avec ce type de mise en oeuvre (sols granulaires propres notamment). Elle serait donc en principe particulièrement bien adaptée aux remblais de calage et de butée des buses métalliques, mais la spécificité des moyens qu'elle requiert fait qu'elle est en pratique très peu utilisée. Elle impose en outre que les sols en place soient insensibles à l'eau.

La méthode qui consiste à déverser simplement de l'eau sur les matériaux, plus connue sous le nom de "fichage à l'eau", ne dispense en aucune façon d'un compactage mécanique complémentaire, mais présente par contre les mêmes inconvénients que la mise en oeuvre hydraulique en ce qui concerne la sensibilité à l'eau des sols en place.

D'une manière générale les conditions de mise en oeuvre et de compactage des remblais de calage dépendront dans une large mesure des conditions générales d'exécution de l'ouvrage, de l'importance de celui-ci, des possibilités d'accès, de la nature des sols en place et des matériaux mis en oeuvre, et des qualités requises après mise en oeuvre de ces derniers.

Les dispositions que l'entrepreneur compte adopter pour assurer la mise en oeuvre et le compactage des matériaux de remblai sous les reins de la buse, seront soumises au visa du maître d'oeuvre.

En tout état de cause la montée des remblais devra s'effectuer de manière symétrique de part et d'autre de la buse, soit en procédant à la mise en oeuvre des matériaux alternativement d'un côté puis de l'autre, soit en procédant simultanément des deux côtés, de telle sorte qu'à aucun moment la différence de niveau n'excède vingt centimètres (20 cm).

6.2.4.3 - Remblais latéraux de butée

La mise en oeuvre des remblais latéraux de butée de part et d'autre des buses métalliques n'est pas une opération dont la réalisation présente des difficultés particulières, mais elle impose un strict respect de règles de mise en oeuvre dont le principe ne relève généralement que du bon sens. La plupart des incidents survenus en cours de travaux se produisent durant cette phase de construction, ou peu de temps après, et sont souvent dus au non respect de ces règles.

Les règles définies ci-après sont compatibles avec les hypothèses sur lesquelles s'appuient les justifications des ouvrages en phase de construction (cf § 4.1.6 et 4.4.1). Elles sont beaucoup moins restrictives et contraignantes qu'elles pourraient le paraître dans certains cas.

En effet pour les ouvrages de faibles dimensions les volumes de matériaux mis en oeuvre dans les conditions fixées par ces règles sont en tout état de cause suffisamment peu importants pour que celles-ci ne puissent constituer une contrainte excessive. Pour les ouvrages de grandes dimensions, et plus particulièrement pour les ouvrages de grande portée, les volumes de matériaux concernés sont certes plus importants, mais ces conditions de mise en oeuvre se justifient pleinement du fait que ces ouvrages sont plus déformables et souvent dimensionnés par les justifications en cours de construction. Le maître d'oeuvre ne pourra donc autoriser que certaines propositions de l'entrepreneur dérogent en partie à ces règles que dans certaines situations très particulières, et sous réserve toutefois que ces propositions soient présentées avec l'accord écrit du fournisseur (cf § 6.1.2).

Ces règles de mise en oeuvre et de compactage des matériaux conduisent à distinguer différentes zones dans les massifs de butée, à l'intérieur desquelles les caractéristiques des engins qui peuvent être utilisés et les conditions de mise en oeuvre des matériaux seront différentes (cf fig. 6.9).

On distinguera les deux zones suivantes:

- la zone intérieure, qui concerne la partie des massifs de butée comprise entre deux plans verticaux situés de part et d'autre de la buse, à une distance mesurée par rapport aux nus extérieurs de la paroi de celle-ci égale au quart de la portée de la buse ($D/4$) avec un minimum de un mètre (1,0 m).

Cette zone comprend la zone annulaire contiguë à la buse (cf § b ci-après), encore appelée anneau, dans laquelle il est recommandé d'utiliser des matériaux classés comme "particulièrement aptes", du moins dans certains cas (cf § 5.2.1 a).

- la zone extérieure, qui concerne la partie des massifs de butée extérieure à la zone visée ci-dessus.

La limite de séparation de ces deux zones sera matérialisée par l'entrepreneur par des moyens de balisage appropriés pendant toute la durée des travaux de remblaiement.

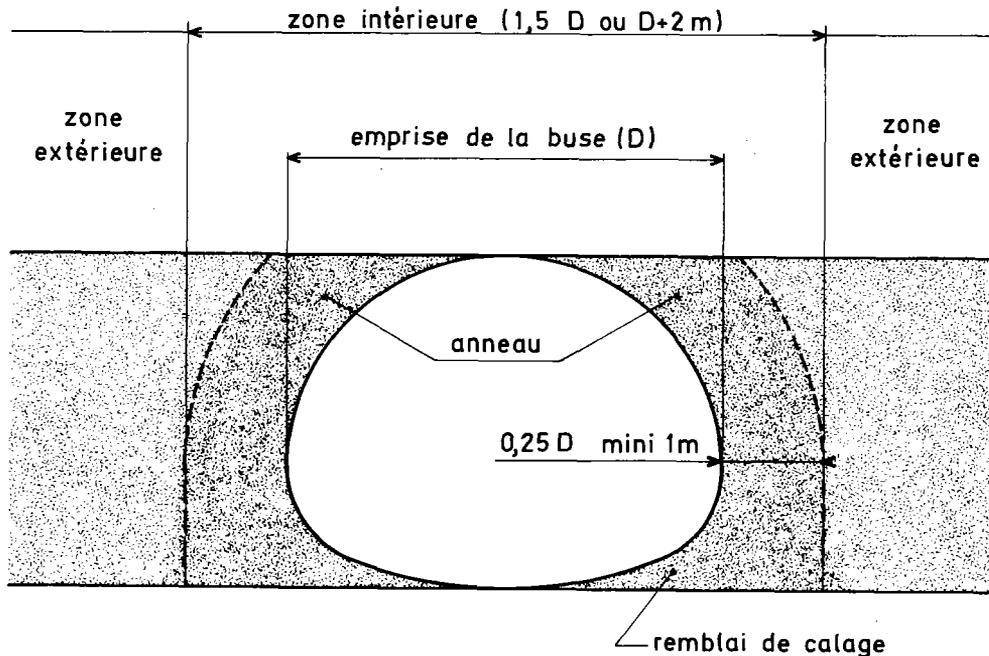


Figure 6.9 - Les différentes zones des remblais latéraux de butée

a) Déchargement et régalinge des matériaux

Tout apport massif de remblai dans la zone intérieure définie ci-dessus est interdit. Le déchargement des matériaux sera effectué dans la zone extérieure, en rubans si possible, ou en tas dont la hauteur maximale ne devra pas excéder 1,5 m.

Le régalinge des matériaux devra s'effectuer par bandes parallèles à l'axe longitudinal de la buse et par couches horizontales régulières n'excédant pas 0,25 m d'épaisseur. Le remblayage en talus est interdit.

Dans la zone intérieure des massifs de butée la circulation des engins à pneus et de tous les engins lourds de chantier est interdite. Le régalinge des matériaux ne pourra être effectué qu'à l'aide d'engins légers à chenilles ou manuellement.

En tout état de cause, dans une zone annulaire contiguë à la buse d'une épaisseur de 0,50 m environ, le régalinge des matériaux ne pourra être effectué que manuellement.

La montée des remblais de part et d'autre de la buse se fera de manière symétrique, simultanément des deux côtés ou alternativement d'un côté puis de l'autre, de telle sorte qu'à aucun moment la différence de niveau entre les matériaux mis en oeuvre n'excède 0,25 m.

L'entrepreneur devra prendre les dispositions nécessaires (légères pentes transversales et éventuellement longitudinales, réalisation et entretien d'ouvrages provisoires de drainage, fermeture de la plateforme,...) pour éviter toute stagnation d'eaux pluviales, étant entendu que l'écoulement de ces eaux doit toujours se faire vers l'extérieur et non vers la buse.

Par ailleurs, lorsque des dispositions particulières ont été prévues pour assurer le raidissement des extrémités des buses durant l'exécution des remblais, il conviendra de veiller à ce que ces dispositions soient correctement appliquées et en temps utile.



Figure 6.10

- Régalage des matériaux en partie courante des remblais de butée.

Figure 6.11

- Mise en place du matériau au grappin contre la paroi de la buse (anneau)



Figure 6.12

- Compactage à proximité immédiate de la buse (anneau)

b) Compactage

Sauf en cas de mise en oeuvre hydraulique (cf § 6.2.4.2), il est impératif de procéder au compactage méthodique des matériaux.

Le compactage des matériaux devra être effectué par bandes parallèles à l'axe longitudinal de la buse; l'épaisseur des couches à compacter ne devra pas excéder 0,25 m.

Dans la zone annulaire contiguë à la buse, d'une épaisseur égale à la distance comprise entre les nus extérieurs de la buse et les plans verticaux délimitant les deux zones visées ci-dessus, le compactage des matériaux ne pourra être effectué qu'au moyen de petits engins, du type plaques vibrantes, ou rouleaux vibrants de petit format dont la charge statique par unité de largeur du rouleau vibrant n'excède pas 10 kg/cm.

Cette disposition implique notamment l'utilisation de ces petits engins de compactage dans toute la zone des remblais délimitée par l'emprise horizontale de la buse.

L'utilisation de ces petits engins de compactage devra être étendue à toutes les parties des massifs de butée situées à moins de deux mètres des extrémités de la buse.

Dans la partie restante des remblais latéraux de butée, le compactage ne pourra être réalisé qu'au moyen de rouleaux à pneus dont la charge statique par roue n'excède pas 4 tonnes (limitation aux rouleaux à pneus de la classe P1 de la "Recommandation pour les Terrassements Routiers" figurant en annexe du fascicule 2 du C.C.T.G.), ou de rouleaux vibrants dont la charge statique par unité de largeur du cylindre vibrant n'excède pas 25 kg/cm (limitation aux rouleaux vibrants de la classe VI de la R.T.R).

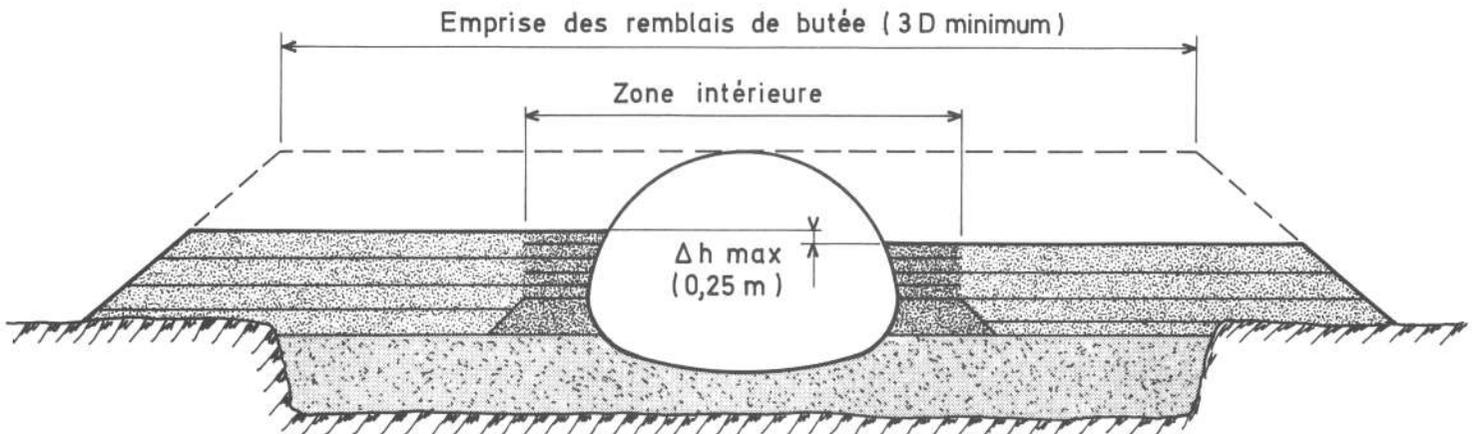


Figure 6.13 - Mise en oeuvre des remblais latéraux de butée (exemple)

Lorsque les justifications conduisent à requérir pour les remblais un module d'élasticité n'excédant pas 40 MPa, et que des matériaux "particulièrement aptes" (cf § 5.2.1,a) sont utilisés, les règles de compactage (épaisseur des couches, intensité de compactage), pourront être extraites directement de la R.T.R ou de la Note Technique pour le compactage des remblais de Tranchées (cf § 6.2.4.1), en considérant qu'il s'agit d'une utilisation normale en remblai. Dans les autres cas, la définition des résultats à obtenir (taux de compactage généralement) ou des règles de compactage à respecter seront généralement à examiner cas par cas, en fonction du matériau utilisé, des qualités requises après mise en oeuvre et des moyens de compactage employés, en s'appuyant si nécessaire sur des résultats obtenus à partir de planches d'essais ou à l'issue des premiers contrôles.

6.2.4.4 - Dôme de protection

Aucun véhicule ni aucun engin de chantier ne devra circuler sur la buse avant qu'elle ne soit recouverte d'une hauteur de remblai suffisante.

Tant que la hauteur du remblai du dôme de protection n'aura pas atteint à la clé de la buse la valeur minimale fixée par les justifications en phase de construction pour le passage des engins de terrassement, l'amenée et le réglage du matériau, s'ils sont réalisés mécaniquement, ne pourront être effectués qu'à l'aide d'engins à chenille de petit format et de faible puissance circulant sur le matériau déjà versé.

Le compactage du matériau ne pourra être effectué qu'à l'aide de petits engins de compactage, du type rouleaux vibrants de petit format dont la charge statique par unité de largeur du rouleau vibrant n'excède pas 10 kg/cm.

En général, les règles de compactage pourront être extraites des tableaux figurant dans la Note Technique déjà citée en considérant qu'il s'agit d'une utilisation normale en remblai (valeur minimale du taux de compactage de 95% de l'O.P.N).

La mise en oeuvre du matériau sur l'ensemble du dôme de protection devra s'effectuer de manière symétrique couche par couche, par exemple en progressant d'une extrémité de la buse vers l'autre.

Toute méthode de construction des remblais de couverture, y compris au-delà du dôme de protection s'il y a lieu, susceptible d'engendrer des efforts de poussée dissymétriques de part et d'autre de la buse, est interdite. En tout état de cause la pente de ces remblais transversalement à la buse ne devra pas excéder dix pour cent (10%).

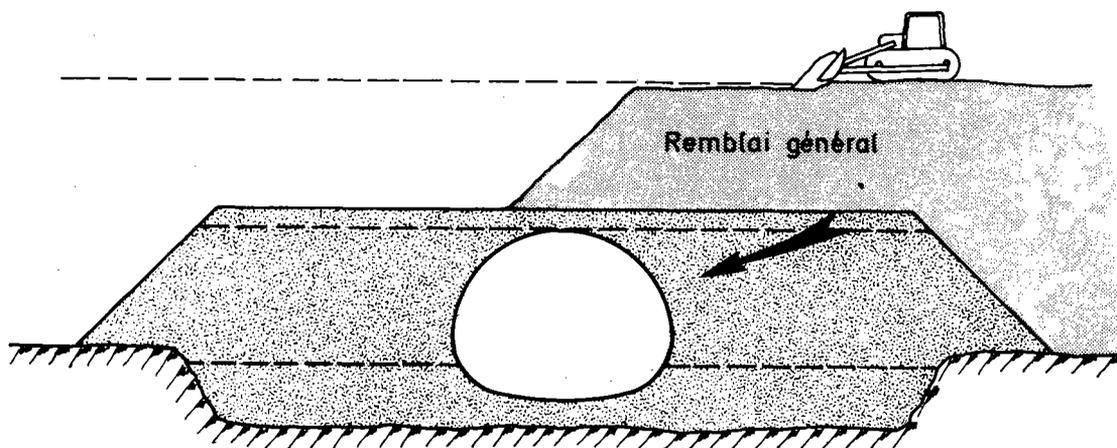


Figure 6.14 - Mise en oeuvre dissymétrique du remblai général : A PROSCRIRE

6.2.5 - Contrôle des matériaux de remblai et de leur mise en oeuvre

Ce contrôle comporte deux volets:

- le contrôle de la qualité des matériaux utilisés dans les différentes parties des remblais techniques,
- le contrôle de la mise en oeuvre (ou des qualités des matériaux après mise en oeuvre).

Il convient naturellement de leur associer, surtout pour des ouvrages tels que les buses métalliques, une surveillance particulière des conditions de mise en oeuvre des matériaux et d'évolution des engins utilisés. Cet aspect de la surveillance relève du paragraphe 6.2.4 qui précède.

6.2.5.1 - Contrôle de la qualité des matériaux de remblai

Ce contrôle a pour objet de s'assurer que la nature et l'état des matériaux mis en oeuvre sont conformes aux prescriptions du C.C.T.P.

Il importe d'avoir avant travaux une connaissance suffisante des matériaux pour qu'en cours d'exécution un simple examen visuel, appuyé en cas de doute par quelques essais d'identification complémentaires, suffise à identifier les différents matériaux approvisionnés (cf § 6.1.1).

En pratique, les essais d'identification le plus couramment envisagés sont:

- des analyses granulométriques des matériaux, en recherchant notamment la dimension "D" des plus gros éléments de chaque matériau ainsi que les passants à 80 microns;
- pour les matériaux sensibles à l'eau, des mesures de leur teneur en eau que l'on comparera à leurs teneurs en eau caractéristiques (Optimum Proctor Normal ou Modifié, limites d'Atterberg);
- des mesures de l'équivalent de sable, des "valeurs de bleu" (ou, plus rarement pour les sols envisagés, des limites d'Atterberg).

Il convient donc de prévoir les moyens de laboratoire permettant l'exécution de ces essais. L'importance des moyens à mettre en oeuvre dépend naturellement du nombre d'essais nécessaires pour une identification correcte des matériaux, c'est-à-dire de la qualité de la reconnaissance préalable, de l'hétérogénéité du gisement, et aussi de l'expérience du personnel chargé de cette opération.

Les propriétés mécaniques des matériaux naturels dépendant tout autant de leurs caractéristiques d'identification que de leur mise en oeuvre, il y aura lieu d'intensifier le contrôle d'identification des matériaux approvisionnés lorsque leurs caractéristiques mécaniques présumées (ou issues des résultats obtenus sur planches d'essais) seront voisines des valeurs minimales requises par les justifications de l'ouvrage.

6.2.5.2 - Contrôle de la mise en oeuvre

Ce contrôle a essentiellement pour objet de s'assurer que les matériaux une fois mis en oeuvre ont bien les qualités requises par les justifications des ouvrages; il peut permettre, le cas échéant, d'ajuster les modalités d'exécution pour obtenir les résultats recherchés.

Ce contrôle peut s'effectuer soit de manière directe, en contrôlant les résultats obtenus sur les matériaux au fur et à mesure de leur mise en oeuvre, soit de manière indirecte en contrôlant les modalités d'utilisation des engins de régalinge et de compactage. Pour ce qui concerne les spécifications du marché, il est important de souligner qu'il s'agit bien d'un choix à effectuer, car au plan contractuel il convient de ne pas spécifier simultanément les résultats à obtenir et les moyens pour y parvenir.

a) Contrôle direct des résultats obtenus

Ce contrôle doit porter essentiellement sur le taux de compactage atteint, c'est-à-dire le rapport entre la densité sèche du matériau compacté et sa densité sèche de référence (généralement densité Optimum Proctor Normal). Il peut être éventuellement complété par une vérification des valeurs obtenues pour le "module de déformation" du matériau, généralement mesuré à l'essai de plaque.

Les mesures de la densité et de la teneur en eau des matériaux (nécessaires à l'estimation du taux de compactage) au fur et à mesure de leur mise en oeuvre sont généralement suffisantes lorsque des matériaux classés comme particulièrement aptes sont utilisés (cf § 5.2.1) et que la valeur requise pour leur module d'élasticité après mise en oeuvre n'excède pas 40 MPa. Dans ces cas, les prescriptions du C.C.T.P. consisteront simplement à imposer une valeur minimale du taux de compactage, généralement fixée à 95% de l'O.P.N., et une fréquence d'exécution des essais de contrôle, qui peut être variable suivant la partie concernée des remblais techniques.

Dans les autres cas, de telles mesures ne pourront généralement suffire à elles seules que si des essais préalables ont permis de fixer les valeurs minimales du taux de compactage à exiger, en fonction des valeurs minimales requises pour le module d'élasticité du matériau utilisé (par exemple à partir de planches d'essais avec mesures comparatives du taux de compactage et du module mesuré à la plaque).

Le contrôle du taux de compactage atteint est le seul possible dans des zones d'accès difficile (sous les reins de la buse notamment), mais il présente toutefois des limites d'application pratique considérables du fait qu'il ne peut s'appliquer qu'aux matériaux sur lesquels l'essai Proctor est réalisable (sols ayant moins de 25% d'éléments supérieurs à 20 mm), qu'il exige des moyens de Laboratoire relativement importants, et surtout que les délais de réponse des essais sont généralement peu compatibles avec la cadence de mise en oeuvre des remblais.

Le contrôle direct du "module d'élasticité" des matériaux au fur et à mesure de leur mise en oeuvre, effectué à partir d'essais de chargement à la plaque systématiques (module de deuxième chargement), qui peut paraître plus significatif, présente des difficultés d'application pratique importantes. Elles sont dues d'une part à la nécessité de disposer en permanence sur chantier d'un matériel lourd et inutilisable dans les zones d'accès difficile, et d'autre part à leur manque de représentativité dans les cas d'utilisation de matériaux sensibles à l'eau, le module de ces derniers pouvant évoluer de façon considérable si les conditions de mise en oeuvre ne sont pas respectées (cf § 5.2.1 et fig. 5.1).

Pour ces raisons, les essais de chargement à la plaque sont plus couramment utilisés soit avant travaux sur des planches d'essai, pour établir des corrélations avec d'autres moyens de contrôle qu'il est envisagé d'employer, soit en cours de travaux, mais de manière non systématique, pour effectuer des vérifications complémentaires. Ces dernières peuvent être nécessaires lorsque, par exemple, la valeur présumée du module d'élasticité du sol après mise en oeuvre (ou la valeur initialement mesurée sur planches d'essai) est proche de la valeur minimale requise pour les justifications de l'ouvrage, soit parce qu'une valeur élevée de ce module est requise, soit parce que le sol utilisé est peu performant.

b) Contrôle des modalités d'utilisation des engins

Le contrôle des modalités d'utilisation des engins de régilage et de compactage des matériaux impose de connaître avant travaux l'épaisseur des couches à régiler et le nombre de passes de compactage à effectuer, en fonction notamment du matériau et des types d'engins susceptibles d'être utilisés, et des qualités requises après mise en oeuvre. Une connaissance préalable suffisante de ces deux paramètres n'étant possible que dans un nombre limité de cas, et la qualité des matériaux approvisionnés pouvant parfois varier, il est recommandé que le C.C.T.P. stipule systématiquement que les valeurs de ces paramètres pourront être ajustées autour des valeurs prescrites en fonction des résultats obtenus avant travaux sur planches d'essais, ou même en cours de travaux.

En général, lorsque des matériaux classés comme particulièrement aptes sont utilisés et que la valeur requise pour leur module d'élasticité n'excède pas 40 MPa, les valeurs de ces paramètres pourront être extraites directement des tableaux présentés dans la "Recommandation pour les Terrassements Routiers" ou dans la "Note Technique pour le compactage des remblais de tranchées" (selon les types d'engins susceptibles d'être utilisés), en considérant qu'il s'agit d'une utilisation normale en remblai.

Dans les autres cas, ou en cas de doute, les valeurs extraites de ces tableaux ne pourront donner que des indications et devront être ajustées avant travaux en fonction des résultats obtenus sur des planches d'essais. Lorsque la valeur du module de déformation escompté est assez proche de la valeur minimale requise par les justifications de l'ouvrage, il pourra en outre s'avérer nécessaire d'effectuer quelques vérifications supplémentaires en cours de travaux (cf (a) ci-dessus). Il convient toutefois de signaler que les résultats de tels essais de contrôle, destinés à ajuster les modalités d'exécution, ne peuvent être opposables à l'entrepreneur.

Durant les travaux, le contrôle des modalités d'utilisation des engins de régalinge et de compactage des matériaux consiste principalement à veiller au respect de l'épaisseur des couches mises en oeuvre et du nombre de passes effectué. Ce contrôle impose la présence quasi permanente sur chantier d'un surveillant, compte tenu notamment de la fréquence assez élevée de renouvellement des couches, mais il s'agit là toutefois d'une sujétion généralement inévitable, quel que soit le type de contrôle prévu.

Cette méthode de contrôle de la qualité de la mise en oeuvre présente généralement les meilleures conditions d'application, et offre de ce fait une bonne garantie d'efficacité. En règle générale il est donc recommandé d'y recourir dans la mesure du possible, en se donnant toutefois les moyens nécessaires, notamment en personnel.

6.2.6 - Contrôle des déformations

Le contrôle des déformations de la buse par le maître d'oeuvre peut comprendre deux volets:

- Un contrôle quantitatif des variations de certaines dimensions significatives de sections droites de la buse, entre les phases d'exécution les plus caractéristiques. Il s'appuie sur des mesures bien définies et programmées en fonction des phases d'exécution.

- Un contrôle essentiellement qualitatif de l'aspect et des déformations de la paroi de la buse, auquel il est indispensable de procéder avant toute réception ou mise à disposition de l'ouvrage. Ce contrôle s'appuie généralement sur un examen visuel de la paroi intérieure bien que certaines déformations puissent faire l'objet de mesures et de tolérances.

a) Contrôle des variations dimensionnelles

Ce contrôle est à distinguer de celui qui vise à surveiller les déformations en cours d'exécution, évoqué en 6.1.5, qui est normalement conduit par l'entrepreneur pour contrôler la bonne adaptation des moyens de mise en oeuvre. Il est exécuté par le maître d'oeuvre ou en sa présence et vise à déceler les éventuelles malfaçons dans l'exécution pouvant se traduire par un comportement anormal de l'ouvrage.

Ce contrôle peut être étendu à tous les types d'ouvrages, quelles que soient leurs dimensions, mais son intérêt sera d'autant plus marqué que la taille de l'ouvrage est importante. Bien entendu, lorsqu'une surveillance des déformations est prévue par ailleurs, les dispositifs de mesure seront communs aux deux types de contrôle.

Les mesures nécessaires au contrôle des déformations de la buse porteront notamment sur la flèche (ou plus grand diamètre vertical) de la buse, mesurée entre les deux points de repère matérialisant les axes du sommet et du radier de la buse dans chaque section concernée, et sur le défaut de verticalité entre ces deux points. Ces mesures pourront toutefois être étendues à toute autre dimension significative définie par le maître d'oeuvre.

Dans le cas des ouvrages de conception courante le contrôle des déformations des deux grandeurs définies ci-dessus est généralement suffisant. En outre, il importe de limiter le nombre de sections de contrôle à trois ou quatre au plus, par exemple une à chaque extrémité de l'ouvrage et une ou deux en section courante.

Après achèvement complet du montage de la buse à son emplacement définitif, l'entrepreneur sera tenu de matérialiser par un trait de peinture indélébile les points de repère nécessaires dans toute section que lui aura désignée le maître d'oeuvre.

Il sera tenu en outre d'assister aux mesures.

Ces mesures seront effectuées dans les trois configurations suivantes:

Configuration 1: Après achèvement complet du montage de la buse à son emplacement définitif et avant tout remblaiement ultérieur;

Configuration 2: Après que les remblais techniques de butée aient atteint la clé de la buse et avant tout remblaiement ultérieur;

Configuration 3: Après exécution des remblais généraux de couverture, y compris s'il y a lieu la chaussée portée par ces remblais.

D'autres configurations peuvent être envisagées dans certains cas très particuliers, mais il convient d'éviter de les multiplier inutilement. Il est à noter en outre que la configuration 3 permettra de contrôler les dimensions intérieures de l'ouvrage par référence aux dimensions théoriques telles qu'elles résultent des plans d'exécution. A ce stade d'autres dimensions, telles que le gabarit dégagé par exemple, pourront faire l'objet de mesures.

Entre la configuration 1 et la configuration 2, pour chaque section concernée:

- l'augmentation relative de la flèche de la buse, exprimée en pourcentage, ne devra pas excéder la valeur suivante:

$$\frac{\Delta V}{V} (\%) = 0,015 \frac{V}{v_0} \frac{e_{\text{omin}}}{e_{\text{oréel}}} \quad (e_{\text{omin}} \leq e_{\text{oréel}})$$

où:

- V désigne la flèche de l'ouvrage exprimée en m,
 - v_0 la distance en mètres de la fibre extrême à l'axe neutre,
 - e_{omin} l'épaisseur minimale de la tôle telle qu'elle résulte du calcul exposé au paragraphe 4.4.1,
 - $e_{\text{oréel}}$ l'épaisseur nominale réellement retenue dans la section considérée.
- le défaut de verticalité défini par le rapport de la distance entre les axes verticaux passant par les deux points de repère et la flèche de la buse ne devra pas excéder 3%.

Dans la configuration 3, pour chaque section de mesure:

- la valeur de la flèche de la buse devra être comprise entre celles mesurées dans les configurations 1 et 2;
- le défaut de verticalité, défini comme ci-dessus, ne devra pas excéder 3%.

Dans la configuration 3 ces dernières tolérances portent sur les déformations. Elles sont indépendantes des tolérances dimensionnelles évoquées ci-dessus, qui doivent faire l'objet de clauses spécifiques du CCTP.

En cas de dépassement des valeurs définies ci-dessus, le maître d'oeuvre pourra refuser l'ouvrage et exiger son remplacement, ou son déblaiement partiel ou total et la reconstruction des remblais, aux frais de l'entrepreneur.

b) Contrôle de l'aspect de la paroi

L'examen visuel de la paroi de la buse ne devra révéler aucune cassure angulaire d'une plaque à l'autre, aucune inversion de courbure, ni aucune déformation ou aucun poinçonnement localisés.

Dans certains cas particuliers il sera possible d'apprécier l'aplatissement d'une partie de la paroi de la buse à l'aide d'une règle de longueur appropriée aux dimensions de la buse et au rayon de courbure de la zone concernée (en particulier sommet ou radier d'une buse-arche), placée dans le plan d'une section droite de l'ouvrage.



Pathologie - Réparation

La quasi-totalité de la pathologie des buses métalliques est directement liée à une conception défectueuse ou à une exécution mal conduite, souvent dues à une transgression des règles de conception ou de dimensionnement de ces ouvrages ou à une connaissance insuffisante des règles de construction propres à ces derniers.

Cet état de fait est naturellement plus marqué encore lorsque les dimensions transversales des ouvrages sont importantes et qu'ils s'écartent sur certains points des règles de conception, de dimensionnement ou de mise en oeuvre habituelles, car celles-ci s'appuient essentiellement sur l'expérience acquise en la matière.

*
* Il est assez fréquent dans ces cas que des désordres, parfois importants, se produisent durant la construction des ouvrages. Ainsi la plupart des cas de ruine par effondrement brutal de la buse ou d'une partie de celle-ci, survenus en France ces dernières années, se sont produits avant même la réalisation ou l'achèvement des remblais de couverture. En outre un grand nombre de désordres observés sur des ouvrages en service qui se traduisent par des déformations locales ou d'ensemble du corps de la buse, ont leur origine, en partie du moins, dans la phase de construction de ces ouvrages.
*

Il existe naturellement d'autres causes de désordres, plus directement liées par exemple à des tassements excessifs de l'ouvrage, à la dégradation des matériaux qui le constituent (parfois anormalement accélérée du fait de l'inadaptation de ces matériaux aux conditions particulières du site) ou encore à l'exploitation de celui-ci, qui peuvent engendrer des désordres d'une autre nature et dont parfois des signes précurseurs peuvent être décelés au cours des opérations de surveillance conduites sur l'ouvrage.

Il convient de signaler à cet égard que les principes et les modalités de la surveillance des ouvrages d'art sont définis de manière précise dans la première partie de "l'Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art"* dont le champ d'application s'étend en particulier à tous les ouvrages constitués de buses métalliques (ou d'arches) de portée supérieure ou égale à 2,00 m du réseau routier. La deuxième partie de cette instruction comprend un fascicule "Buses Métalliques"*** qui traite plus spécialement des aspects de la surveillance, de l'entretien et de la réparation spécifiques à ces ouvrages.

Les renseignements contenus dans ce fascicule et relatifs à la nature et à l'origine des principaux désordres susceptibles d'affecter ces ouvrages, ainsi que ceux relatifs aux réparations qu'il est possible d'effectuer sont extraits du présent chapitre.

* Direction des Routes, 19 Octobre 1979.

** Fascicule 50 - En projet au 1.3.81.

7.1 - NATURE ET ORIGINE DES PRINCIPAUX DESORDRES

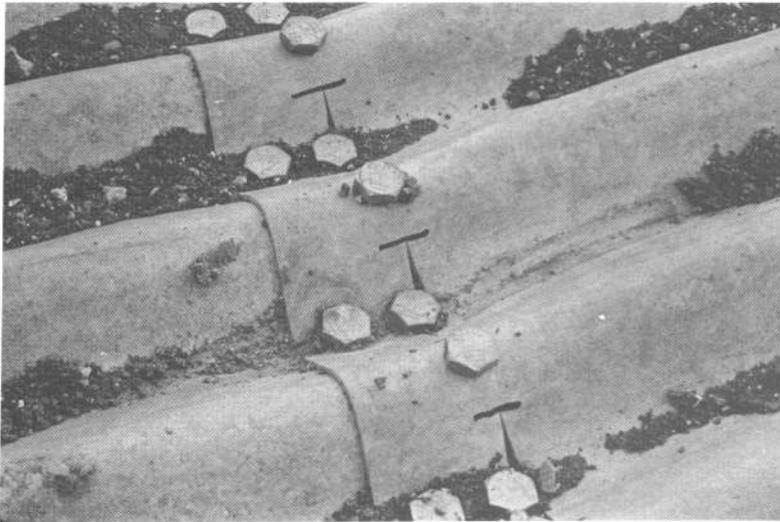
La liste des désordres et de leurs causes les plus probables donnée ci-après ne se veut certes pas exhaustive; elle ne présente que les principaux d'entre eux, et plus particulièrement ceux qui sont spécifiques aux buses métalliques. Elle s'appuie en grande partie sur des cas de pathologie rencontrés.

* Il convient toutefois d'attirer l'attention sur le fait que si certains désordres sont parfois assez caractéristiques de causes bien précises, * il n'en reste pas moins que les désordres constatés résultent 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 une investigation * très complète. *

a) Déformations d'ensemble du corps de la buse

Les déformations d'ensemble du corps de la buse sont dues dans la quasi-totalité des cas à des fautes de conception des ouvrages ou à une exécution défectueuse. Elles se produisent généralement, du moins en grande partie, pendant la phase de construction.

Ces déformations présentent rarement un caractère grave lorsqu'elles sont peu accentuées et totalement stabilisées en fin de construction, 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 générer un sentiment d'insécurité.



a) Fissuration de la tôle au droit des trous de passage des boulons

b) Pliage de la tôle au droit d'un joint

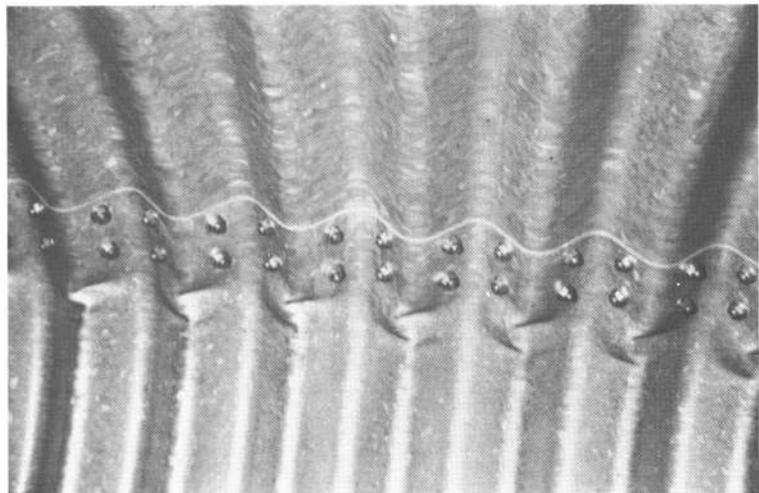


Figure 7.1

- Désordres au droit de joints longitudinaux pouvant accompagner des déformations importantes du corps d'une buse

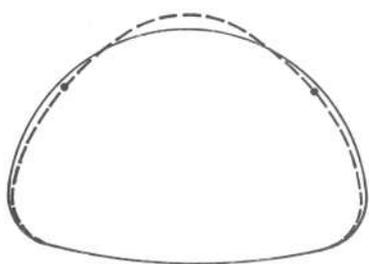
Elles peuvent avoir un caractère nettement plus grave lorsqu'elles sont accentuées ou qu'elles se poursuivent durant l'exploitation de l'ouvrage. Dans ces cas, elles peuvent s'accompagner de désordres dans certains joints longitudinaux (glissements, fissurations au niveau des trous de passage des boulons, 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 est possible de distinguer certains types de déformations d'ensemble du corps de la buse, qui sont généralement caractéristiques de causes bien précises. Il est à noter toutefois que les déformations rencontrées résultent assez souvent de la concomitance de plusieurs de ces causes, et peuvent de ce fait être plus complexes.

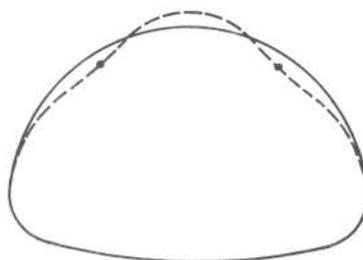
- Déformation en ogive ou en forme de poire

Une déformation en ogive se traduit par une diminution du rayon de courbure à la clé. Elle reflète généralement une insuffisance de rigidité de la paroi vis-à-vis des efforts de poussée qui l'ont sollicitée durant la construction des remblais latéraux de butée, ou une intensité anormale de ces poussées.

Dans certains cas, une telle déformation aura pu être provoquée ou aggravée par l'utilisation d'engins de compactage trop lourds à proximité immédiate de la buse (notamment pour la mise en oeuvre de la partie supérieure des remblais de butée), par la mise en oeuvre de couches de remblai trop épaisses, ou par toute autre cause ayant pu conduire à une augmentation des efforts de poussée engendrés ou transmis par ces remblais.



a) Déformation en ogive



b) Déformation en forme de poire

Figure 7.2 - Déformations en ogive et en forme de poire du corps d'une buse

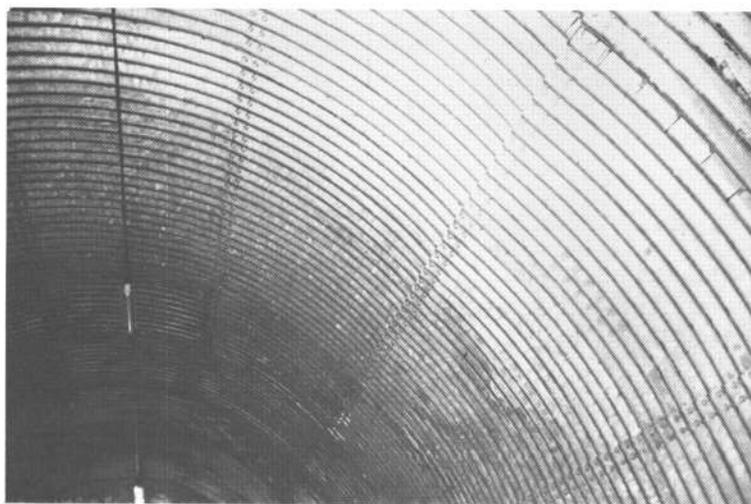


Figure 7.3 - Défaut de continuité de la forme d'une buse (légère rotation visible des plaques autour de leur joint longitudinal)

Une déformation en forme de poire est un état nettement plus accentué et plus grave de la déformation en ogive, des inversions de courbure se développant symétriquement de part et d'autre de la buse. Elle est provoquée par les mêmes causes et n'est le plus souvent qu'un état transitoire avant l'effondrement de l'ouvrage, qui peut survenir parfois brutalement.

Ces déformations en ogive ou en forme de poire sont plus fréquemment observées sur des ouvrages dont les caractéristiques de la paroi ont été dimensionnées pour les efforts que celle-ci subit en cours de remblaiement, ce qui est souvent le cas des ouvrages dont les dimensions transversales sont importantes, ou des ouvrages faiblement chargés à la clé en service.



Figure 7.4

- Effondrement d'une buse en cours de construction

- Aplatissement transversal

Dans la recherche de sa position d'équilibre sous l'action du poids des terres qui la surmontent, une buse métallique a toujours tendance à s'aplatir. Toutefois, une déformation trop importante du corps de la buse est caractéristique d'une insuffisance de raideur des massifs de butée. Suivant la nature du matériau constitutif de ces massifs et la raideur de ces derniers, l'aplatissement du corps de la buse peut s'accroître plus ou moins rapidement puis, lorsqu'il atteint un seuil critique, s'accompagne de désordres importants, au niveau des joints longitudinaux notamment, et entraîner à terme l'effondrement de l'ouvrage. Il est important de noter que l'insuffisance de raideur des massifs de butée est l'une des principales causes de ruine des ouvrages métalliques flexibles pendant la phase de service, mais cette ruine peut parfois survenir avant la fin de construction de l'ouvrage.

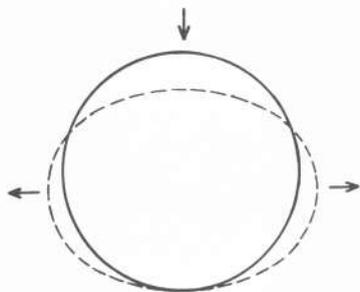


Figure 7.5 - Aplatissement transversal

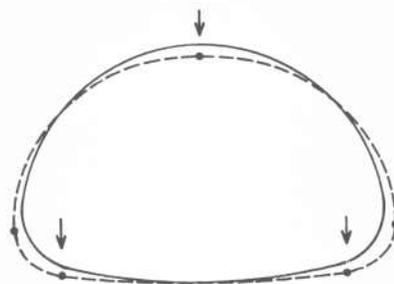


Figure 7.6 - Aplatissement transversal avec enfoncement des plaques de coin

L'insuffisance de raideur des massifs de butée peut être due à la nature du matériau de remblai, trop argileux, évolutif ou sensible à l'eau, à une insuffisance ou à une absence totale de compactage, voire à la concomitance de ces deux causes. Dans le cas d'ouvrages réalisés en tranchée étroite, il peut s'agir plus directement des qualités médiocres du sol en place, insuffisamment reconnu ou de celles du matériau de remplissage, parfois simplement déversé.

- Inversion ou 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 jusqu'à l'inversion de courbure dans les cas extrêmes (ruine de l'ouvrage).

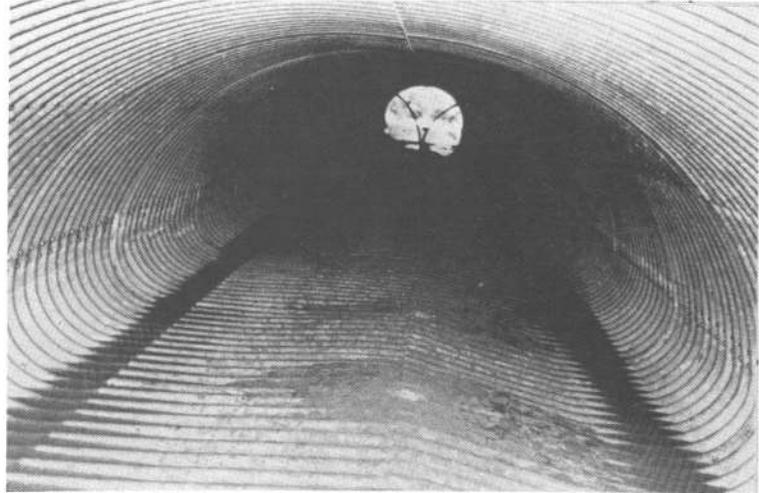


Figure 7.7

- Aplatissement transversal d'une buse avec enfoncement des plaques de coin et inversion de courbure du radier

- Déversement de la section

Un déversement de la section d'une buse supportant un remblai pratiquement horizontal traduit généralement une mise en oeuvre dissymétrique des remblais latéraux de butée ou même des remblais de couverture.

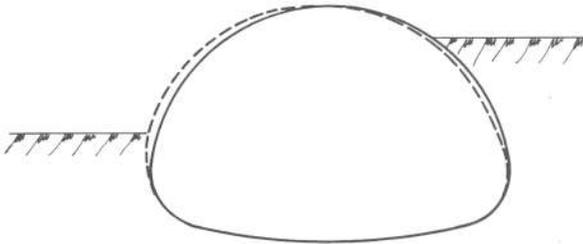


Figure 7.8

- Déversement de la section

Dans le même ordre d'idée, il peut s'agir également d'efforts de poussées trop dissymétriques s'exerçant de part et d'autre de la buse et dus à un remblai général en trop forte pente transversalement à l'ouvrage. Dans ce cas, il peut se produire un aplatissement de la partie de la buse la plus sollicitée par ces efforts de poussée, et parfois même une inversion de courbure par excès de flexion, entraînant un effondrement local.

Figure 7.9

- Déversement de la section avec effondrement partiel de la buse



b) 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, du 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.

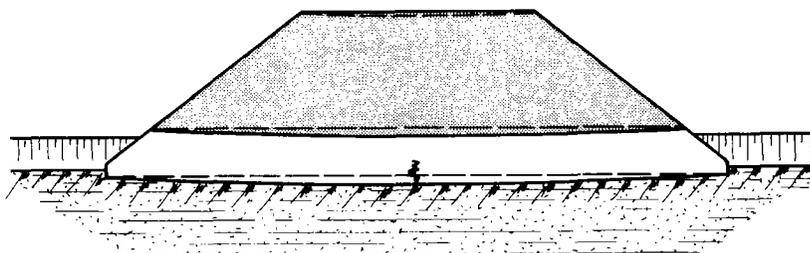


Figure 7.10 - Remblai sur sol très compressible pouvant entraîner des tassements différentiels importants

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 (passages inférieurs routiers notamment) ou entraîner d'autres désordres (dégradation d'une chaussée rigide ou d'un radier en béton, stagnations et infiltrations d'eau pouvant être la cause d'une corrosion anormale de l'acier,...).

Lorsque le tassement différentiel entre le centre et les extrémités de la buse est trop accentué, il peut par contre entraîner des désordres graves 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,...).

Par ailleurs, des ruptures brutales et 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.

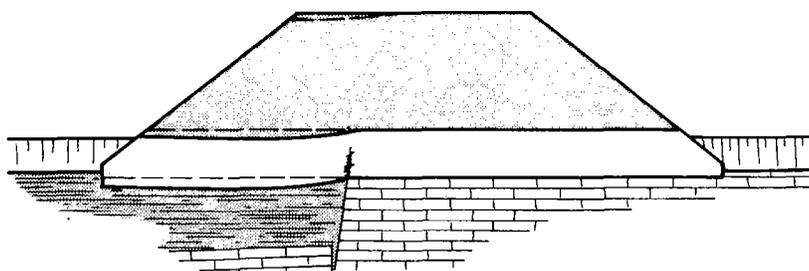


Figure 7.11 - Hétérogénéités très marquées du sol de fondation pouvant entraîner le cisaillement de la buse

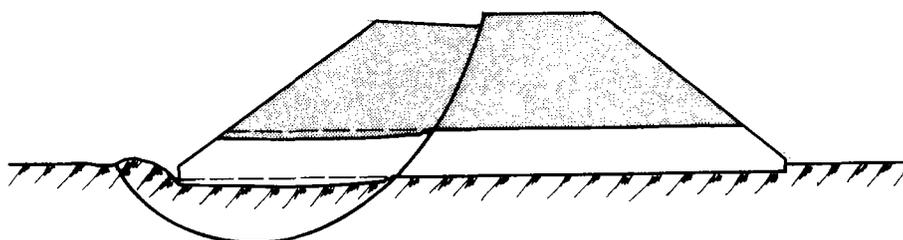


Figure 7.12 - Entraînement partiel d'une buse par un remblai instable

Il est important de 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.

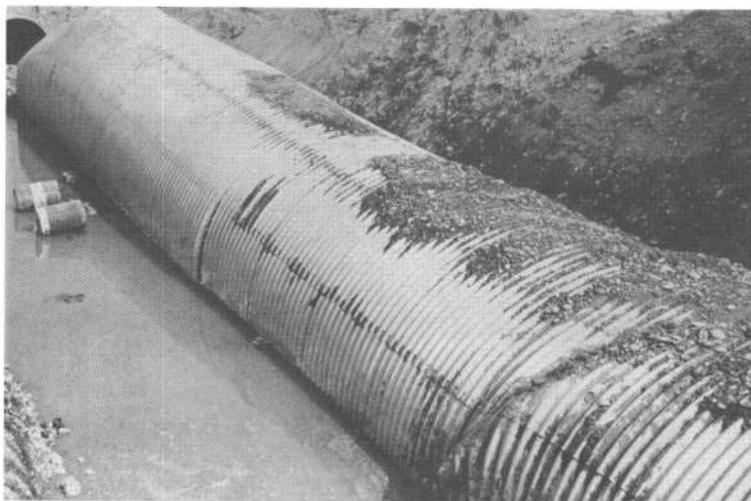


Figure 7.13 - Déchirure des joints circonférentiels par excès de tassements différentiels longitudinalement à l'ouvrage et torsion

c) Déformations des extrémités des buses

- 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 ou à l'insuffisance des dispositifs de raidissement.

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 7.14 - Extrémité déformée en poire

De telles déformations, qui n'affectent en principe que les extrémités de buses simplement coupées en sifflet ou en biseau sifflet, peuvent survenir soit durant la construction des remblais latéraux de butée ou des remblais de couverture, soit parfois pendant l'exploitation de l'ouvrage. Elles peuvent être provoquées ou aggravées en cours de construction par l'utilisation d'engins lourds de compactage a proximité immédiate des extrémités de la buse. 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.

Il est à noter que les désordres qui ont pu être observés sont souvent d'autant plus graves et plus spectaculaires que les dimensions transversales de la buse sont importantes, que le biais de l'ouvrage est prononcé et que la pente du talus est faible.

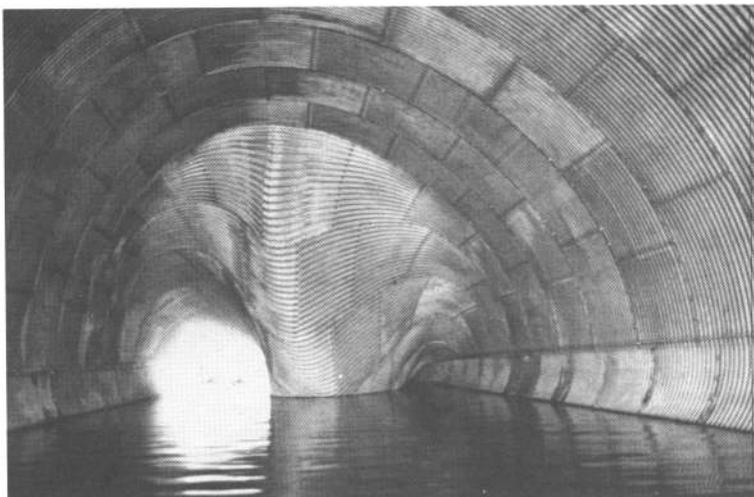


Figure 7.15

- Effondrement d'une extrémité de buse

- 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 insuffisants notamment). 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.

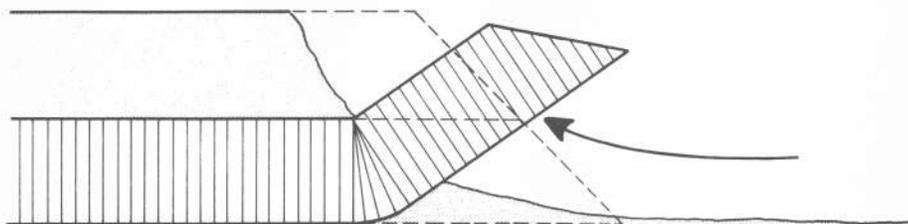


Figure 7.16 - Soulèvement important d'une extrémité en saillie d'un ouvrage hydraulique en charge

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 très spectaculaires.

Les extrémités des buses coupées en sifflet ou en biseau-sifflet suivant le plan contenant le talus sont moins sensibles à ces sous-pressions, mais souvent, et notamment pour les formes surbaissées, 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 parafouille.

d) Enfoncements, poinçonnements et dégradations locales des tôles

Les parois des buses métalliques peuvent présenter divers désordres locaux tels que notamment, des enfoncements, des poinçonnements de la tôle, des déchirures ou d'autres dégradations. Leur gravité dépend dans une large mesure de leur étendue, de leur localisation, des autres désordres qu'ils peuvent entraîner et de la gêne qu'ils sont susceptibles d'apporter à l'exploitation de l'ouvrage. Les causes de ces désordres sont diverses; on peut relever notamment:

- la circulation d'engins lourds de chantier sur une buse non recouverte, ou recouverte d'une hauteur insuffisante de remblai, qui peut être la cause d'un enfoncement plus ou moins accentué et plus ou moins localisé de la clé de la buse;

- les chocs d'engins contre la paroi qui peuvent se produire durant la construction des remblais latéraux (enfoncements locaux, pliage des tôles, déchirures ou fissurations des tôles,...);

- un apport massif de terres contre la paroi d'une buse durant la construction des remblais latéraux, qui a généralement pour effet d'entraîner un aplatissement ou un enfoncement local de la paroi;

- la présence contre la paroi de la buse de corps durs naturels (blocs durs ou rocher dans le sol de fondation ou rapportés (blocs rocheux dans les remblais d'apport, cales en bois, madriers ou autres objets durs "oubliés"..), qui peut être à l'origine d'un enfoncement ou d'un poinçonnement local de celle-ci;

- les chocs de véhicules circulant dans la buse pour les passages inférieurs routiers (déformation ou déchirure locale de la tôle aux extrémités de l'ouvrage, arrachage des boulons en saillie,..) ou des chocs de corps flottants pour les ouvrages hydrauliques dont l'extrémité est insuffisamment protégée;

- l'ouverture d'une fouille ou d'une tranchée à proximité immédiate de la paroi d'une buse chargée à la clé (ouvrage en construction ou en service), et d'une manière plus générale l'exécution mal conduite de travaux effectués dans la zone d'influence directe de l'ouvrage ou de réparations effectuées sur celui-ci.

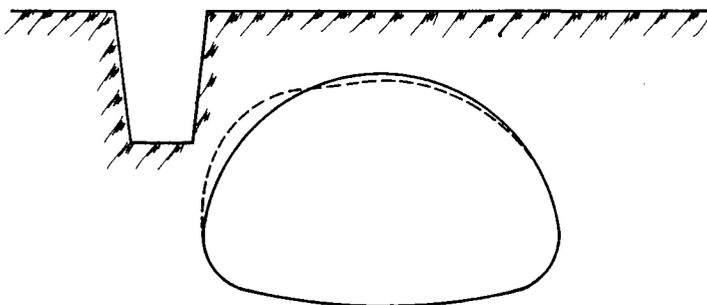


Figure 7.17 - Ouverture d'une fouille à proximité immédiate d'une buse

Figure 7.18

- Enfouissement local dû à l'action d'une roue de camion durant la construction des remblais latéraux

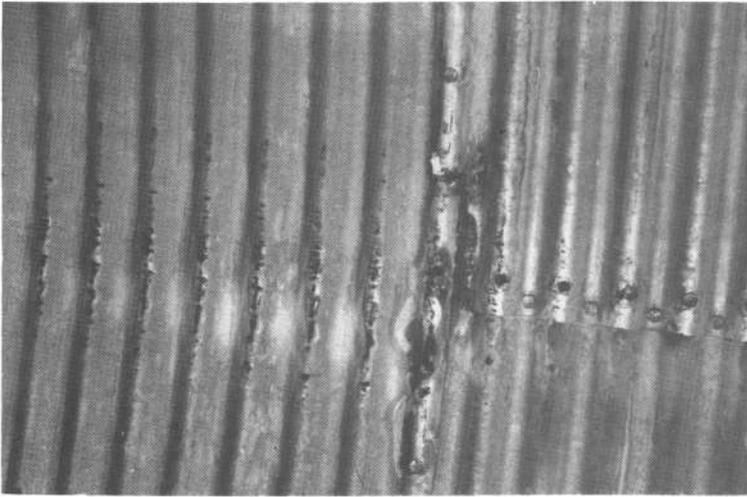


Figure 7.19

Dégradation de la tôle et cisaillement des boulons par un véhicule circulant dans la buse

Figure 7.20

- Déformation locale d'une extrémité



e) Corrosion

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 éventuels de protection supplémentaire n'assurent plus efficacement leur rôle du fait de leur dégradation naturelle ou accidentelle.

Toutefois, cette corrosion est généralement plus accentuée dans certaines parties d'ouvrage plus exposées aux agents agressifs, et se trouve anormalement aggravée parfois 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, qui résulte le plus souvent d'un mauvais choix du matériau de remblai (ou de la mise en oeuvre d'un matériau de caractéristiques non conformes à celles prescrites dans le marché);

- l'infiltration d'eaux agressives (défaut de drainage), en provenance notamment de la plateforme routière supportée par l'ouvrage (eaux chargées de sels de déverglaçage par exemple) ou de la voie de circulation empruntant la buse, pour certains passages inférieurs non hydrauliques;

- la circulation d'eaux agressives dans la buse (ouvrages hydrauliques), qui peut être la conséquence d'une évolution de la qualité de ces eaux (installation d'usines,...);

- l'insuffisance d'entretien de dispositifs de protection (radiers d'usure, revêtements,...).

Il est à noter que la corrosion de l'acier, qui entraîne une perte de résistance de la paroi de la buse souvent inégalement répartie, peut être directement à l'origine de désordres caractéristiques d'une insuffisance locale de résistance de cette paroi (déformations accentuées, pliage des tôles,...).

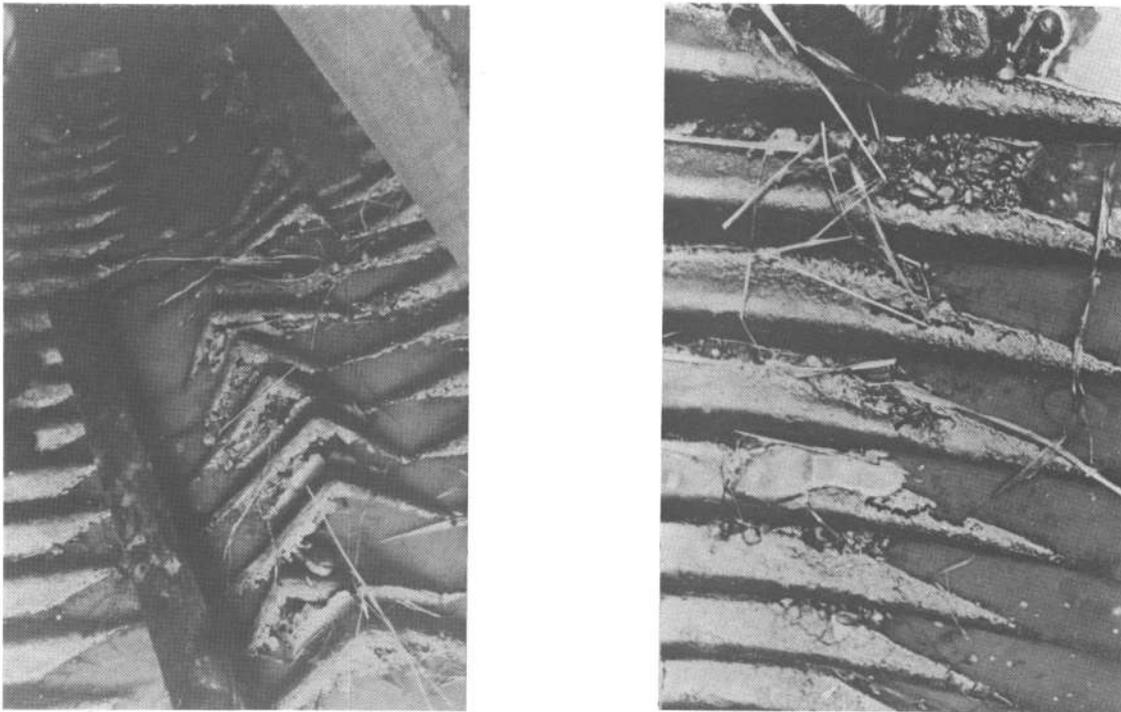


Figure 7.21 -Dégradation du radier d'une buse par corrosion

f) Abrasion - érosion et affouillement

Ces désordres, qui sont dus à l'action directe de l'eau et des particules de sol qu'elle peut transporter, ne peuvent en principe concerner que certaines parties des ouvrages hydrauliques. Il peut s'agir en particulier des talus, du sol de fondation et des ouvrages d'extrémités, mais également des radiers d'usure et des revêtements de protection éventuels en ce qui concerne l'abrasion. Ces désordres ne sont pas spécifiques aux buses métalliques, mais ils peuvent être à l'origine de désordres affectant la paroi de celle-ci lorsqu'ils deviennent trop importants (déformations aux extrémités, érosion et accélération de la corrosion par enlèvement des produits de corrosion formant couche protectrice,...).

7.2 - REPARATION

Il peut s'avérer nécessaire de procéder à une réparation ou à une reconstruction partielle ou totale d'un ouvrage soit à la suite d'incidents survenus en cours d'exécution, soit lorsque l'ouvrage est en exploitation, les exigences ainsi que les conditions de réalisation de la réparation n'étant pas nécessairement les mêmes dans les deux cas.

Ce paragraphe traite plus particulièrement le cas des ouvrages en service, pour lesquels l'instruction technique précédemment citée définit une réparation comme une opération qui consiste à remettre partiellement ou totalement l'ouvrage dans son état de service.

Il convient toutefois de distinguer les structures annexes (perrés, radiers, chaussées, équipements...) des principales parties résistantes de l'ouvrage, constituées notamment par la paroi de la buse et les remblais techniques. Seules les opérations de réparation relatives à ces dernières ont un caractère spécifique aux ouvrages constitués de buses métalliques et sont présentées ci-après. Il ne s'agit cependant que des principales d'entre elles car, bien que les possibilités soient assez limitées, d'autres opérations de réparation soient envisageables dans certains cas particuliers (soudure d'une plaque, renforcement local,...).

En tout état de cause il est indispensable de s'assurer que les dispositions prévues sont réellement efficaces et qu'il ne s'agit pas de faux remèdes qui peuvent davantage porter préjudice à l'ouvrage que le conforter. En particulier, il convient de s'attacher en priorité à déterminer et à supprimer les causes qui sont à l'origine des désordres constatés. S'il s'avère impossible d'agir sur celles-ci, le projet de confortement devra être adapté à ces nouvelles conditions d'environnement.

D'une manière générale une opération de réparation d'une buse métallique est toujours délicate à réaliser. Il convient donc de porter le plus grand soin à sa préparation, à son exécution et à la surveillance des travaux. Il faut souligner que, sauf cas de force majeure, il faut éviter de recourir à l'étaisage provisoire ou définitif d'une buse, surtout lorsque les déformations ne sont pas stabilisées. L'étaisage est une construction rigide dont la présence perturbe complètement le fonctionnement d'un ouvrage flexible et dont l'effet peut être plus nuisible qu'utile. D'une façon générale tout ouvrage rigide utilisé pour conforter un ouvrage flexible défaillant doit être conçu et calculé pour supporter seul les sollicitations auxquelles il serait soumis si la buse n'existait pas.

a) Changement d'une ou plusieurs plaques

Cette opération peut être envisagée lorsque les désordres sont locaux et n'affectent que quelques plaques de la paroi de la buse. Elle n'est généralement possible toutefois que lorsqu'il s'agit de plaques d'extrémité, facilement accessibles, ou de plaques situées au sommet d'une buse recouverte par une faible hauteur de remblai à la clé (accès par excavation dans le remblai de couverture). Si, dans ce dernier cas, les désordres constatés sont dus précisément à une hauteur de couverture insuffisante, il est indispensable d'y remédier pour éviter que ces désordres ne se reproduisent.

Il convient de veiller à ce que les terrassements effectués ne puissent entraîner de sollicitations susceptibles de provoquer des déformations, voire même des désordres plus importants dans la buse. Avant de procéder au démontage des plaques, les plaques adjacentes seront si nécessaire raidies ou boulonnées par des dispositifs provisoires. Le comblement de l'excavation doit s'effectuer avec le matériau extrait, ou un matériau d'apport, compacté pour obtenir des qualités équivalentes à celles du remblai en place, jamais avec du béton.

b) Raidissement d'une extrémité déformée

Il peut être procédé au raidissement d'une extrémité déformée, soit par l'adjonction d'un dispositif spécialement prévu à cet effet (cf § 3.2.3.3) ou d'un ouvrage d'extrémité (généralement un perré de raidissement), soit par une modification de la géométrie de celle-ci et un reprofilage du talus. Ces opérations nécessitent généralement le remplacement des plaques

trop déformées. En tout état de cause, l'extrémité doit être dégagée sur une distance suffisante pour éviter que les démontages successifs de plaques ne fassent progresser la déformation vers le corps de la buse. Lorsqu'un perré de raidissement est envisagé, des dispositions devront être prises (raidissement provisoire notamment) pour éviter la déformation des nouvelles plaques mises en place avant l'exécution du raidissement définitif.

Dans le même ordre d'idée il peut être procédé à l'ancrage (ou au lestage) du radier de l'extrémité d'une buse s'il est constaté que des soulèvements s'amorcent. Cette opération nécessite en principe la mise hors d'eau de l'ouvrage, ou d'une partie de celui-ci, qui pourra être assurée par exemple par une petite buse ou un tuyau passant dans l'ouvrage et de petits batardeaux en terre aux extrémités.

c) Chemisage partiel ou total de l'ouvrage

Il est possible de chemiser intérieurement tout ou partie de l'ouvrage par une autre buse (métallique ou en béton) en réservant un espace annulaire suffisant entre les deux parois pour permettre un comblement correct de cet espace. Il s'agit là parfois de la seule opération possible sur l'ouvrage lorsque pour une raison quelconque (corrosion, insuffisance de résistance ou de raideur des remblais techniques,...) la paroi de la buse présente une résistance insuffisante ou des désordres trop importants, et qu'il ne peut être procédé à la reconstruction de l'ouvrage par déblaiement (hauteur de remblai à la clé trop importante, grande difficulté d'interrompre la circulation sur la voie portée,...).

Il est à noter que le chemisage d'un ouvrage peut réduire de manière sensible son débouché hydraulique ou son gabarit (cf § 3.2.1.4). En outre, il peut être inefficace si un remède n'est pas apporté à la cause principale des désordres. Ainsi, par exemple, le chemisage d'une buse métallique par une autre buse métallique est insuffisant, voire totalement inadapté si des dispositions ne sont pas prises pour supprimer la cause des désordres lorsque ces derniers se traduisent par une corrosion anormale de la paroi de l'ouvrage.

Le chemisage peut être effectué à l'aide d'une autre buse métallique, mais il est également possible d'utiliser des buses en béton, en particulier lorsque la forme et les dimensions de l'ouvrage existant s'y prêtent, et que la hauteur de couverture n'est pas excessive. Il est rappelé qu'un tel ouvrage doit être conçu et dimensionné pour résister seul (sans tenir compte notamment d'une réaction latérale des terrains) aux sollicitations induites par le remblai qui le surmonte. Cette solution de buse en béton peut présenter un intérêt tout particulier lorsque la cause principale des désordres est directement liée aux qualités mécaniques ou électro-chimiques des matériaux constitutifs des remblais techniques auxquelles il est généralement très difficile, voire même le plus souvent impossible de remédier (cf § e ci-après). Dans certains cas, il peut être envisagé de couler en place l'anneau de béton, la paroi de la buse existante pouvant servir de coffrage extérieur.

D'une manière générale, 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, le remplissage de l'espace annulaire entre les deux parois, et éventuellement les dispositions particulières aux extrémités, notamment lorsqu'il s'agit d'assurer la solidarisation d'une nouvelle buse métallique à des ouvrages d'extrémité existants, sont parmi les opérations les plus délicates à exécuter correctement. Il est souhaitable que le matériau de remplissage soit meuble et ne fasse pas prise; toutefois les difficultés de mise en oeuvre du matériau 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 petites perforations pratiquées au sommet de la nouvelle buse ou de cheminées exécutées dans le remblai de couverture (lorsque celui-ci est de faible hauteur).

d) Démontage et reconstruction partielle ou totale de l'ouvrage

Le démontage et la reconstruction partielle ou totale de l'ouvrage, obtenus en procédant à son déblaiement puis au remplacement de la buse ou de la partie de buse concernée par une autre buse, ou par un autre type d'ouvrage, est une opération qui ne peut généralement convenir que lorsque la hauteur de remblai à la clé est assez faible. Il est à noter que lorsque l'ouvrage de remplacement est également une buse métallique, le réemploi de plaques (ou de tronçons entiers de la buse existante) n'est possible que si

celles-ci ne présentent aucune dégradation susceptible de nuire à la qualité de ce nouvel ouvrage. Dans ces cas, une attention particulière doit être portée à l'exécution des travaux de terrassement, et notamment au déblaiement, qui doit être effectué avec le plus grand soin pour éviter la détérioration de ces plaques, et de manière symétrique de part et d'autre de la buse.

e) Traitement des sols en place par injection

Lorsque les causes des désordres observés sur l'ouvrage (aplatissement du corps de la buse en l'occurrence, avec enfoncement éventuel des plaques de coin) sont directement liées à une insuffisance de raideur ou de portance des terrains autour de la buse, il peut être tentant de chercher à arrêter l'évolution de ces désordres en procédant au traitement de ces terrains par injection. D'une manière générale, cette technique de confortement de l'ouvrage ne paraît pas 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 matériau 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 oeuvre. Mal conduite, cette technique peut en outre porter préjudice à l'ouvrage.

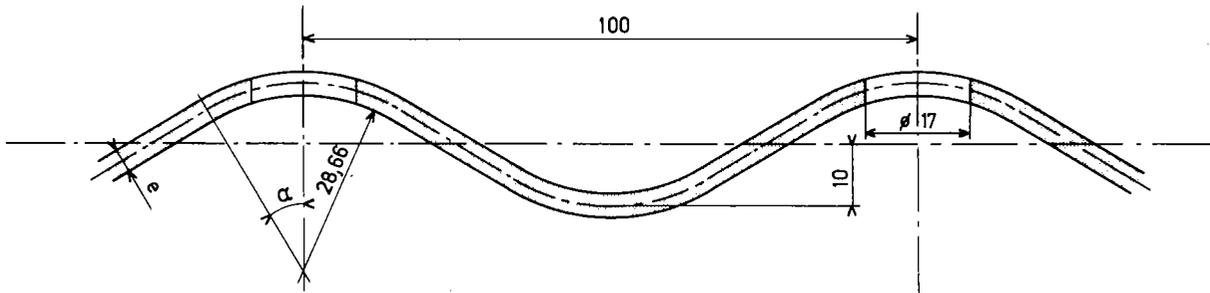
ANNEXE 1

Fiches techniques des matériels

1 - A R M C O	Miniplaque 100
2 - A R V A L	Minijoint
3 - A R M C O	MP 200
4 - A R V A L	Multijoint
5 - T U B O S I D E R	Polysectionnée
6 - A R M C O	152 X 51

ARMCO Miniplaque 100

1) CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DES ONDULATIONS



Les valeurs de "e" sont exprimées en mm.

- Distance des fibres extrêmes à l'axe neutre:

$$v \text{ (cm)} = 1 + \frac{e}{20}$$

- Section de métal par mètre de paroi:

$$S \text{ (cm}^2\text{/m)} = 10,94 e$$

- Rigidité de la paroi:

$$E_a I \text{ (kN.m}^2\text{/m)} = 10,90 e$$

- Module d'inertie par mètre de paroi:

$$\frac{I}{v} \text{ (cm}^3\text{/m)} = 4,75 e$$

2) EPAISSEUR MINIMALE EN FONCTION DE LA RESISTANCE REQUISE (Rp en kN/m) :

- * 1,5 boulons/onde $e = 0,60 + \frac{R_p}{324}$ limité à 3,5 mm d'épaisseur nominale
- * 2 boulons/onde $e = 0,64 + \frac{R_p}{411}$ limité à 3,5 mm d'épaisseur nominale

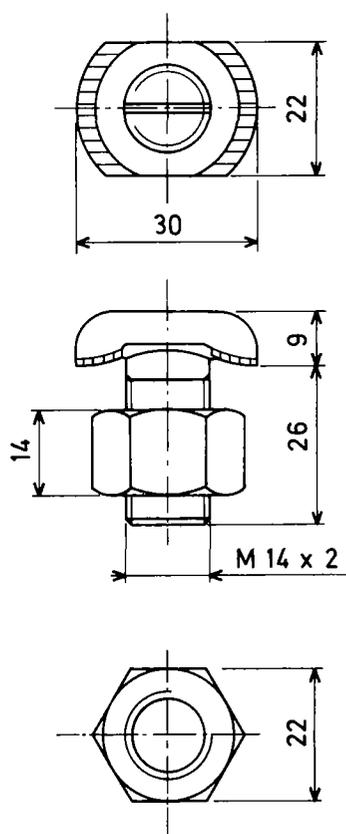
3) ELEMENTS DE FIXATION

3.1 - Caractéristiques géométriques

Les vis et écrous utilisés sont conformes au schéma ci-dessous.

Couple de serrage:

maximum: 150 N.m
minimum: 100 N.m



3.2 - Matières utilisées

VIS: - Acier XC-32-F traité par trempe et revenu.
- Limite de rupture: 850-950 MPa.
- Classe de qualité 8.8 suivant NF E 27 701.

ECROUS: - Acier XC-32-F non traité.
- Limite de rupture: 550-600 MPa.
- Classe de qualité 8 suivant NF E 27 701.

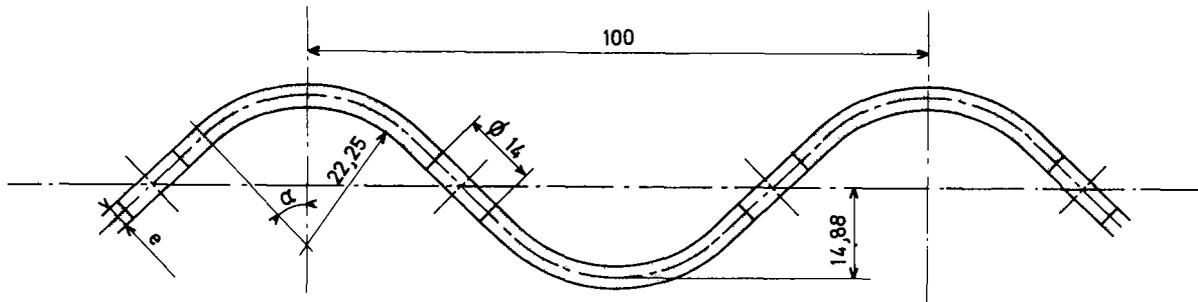
3.3 - Protection vis-à-vis de la corrosion

Zingage électrolytique avec bichromatation.
Classe de qualité 10-20 microns suivant NF E 27 016.

Cette fiche décrit les caractéristiques relevées sur le matériel au 1.03.1981. Elle n'implique aucun contrôle de la fabrication et ne préjuge pas des modifications pouvant être ultérieurement apportées par les fabricants.

ARVAL Minijoint

1) CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DES ONDULATIONS



Les valeurs de "e" sont exprimées en mm.

- Distance des fibres extrêmes à l'axe neutre:

$$v \text{ (cm)} = 1,488 + \frac{e}{20}$$

- Section de métal par mètre de paroi:

$$S \text{ (cm}^2\text{/m)} = 12,02 e$$

- Rigidité de la paroi:

$$E_a I \text{ (kN.m}^2\text{/m)} = 27,43 e$$

- Module d'inertie par mètre de paroi:

$$\frac{I}{v} \text{ (cm}^3\text{/m)} = 7,99 e$$

2) EPAISSEUR MINIMALE EN FONCTION DE LA RESISTANCE REQUISE (R_p en kN/m) :

* 3 boulons/onde $e = 0,52 + \frac{R_p}{500}$ limité à 4 mm
d'épaisseur nominale

3) ELEMENTS DE FIXATION

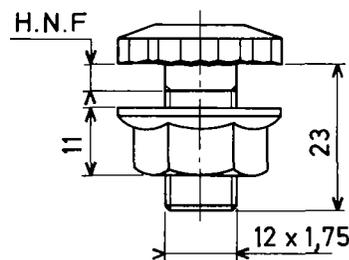
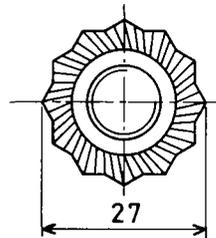
3.1 - Caractéristiques géométriques

Les vis et écrous utilisés sont conformes au schéma ci-dessous.

Couple de serrage:

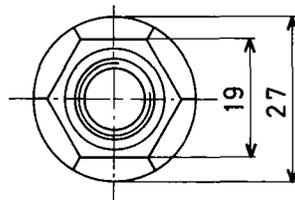
maximum: 100 N.m

minimum: 50 N.m



modèle A pour les
tôles de 1,5 à 3,5 mm
H.N.F. = 1 mm

modèle B pour les
tôles de 4 mm
H.N.F. = 7 mm



3.2 - Matières utilisées

VIS: - Acier XC-38-F ou équivalent traité par trempe et revenu.
- Limite de rupture: 1000 - 1250 MPa.
- Classe de qualité 10.9 suivant NF E 27 701.

ECROUS: - Acier dur non traité, nuance A-60 ou XC-42.
- Classe de qualité 10 suivant NF E 27 701.

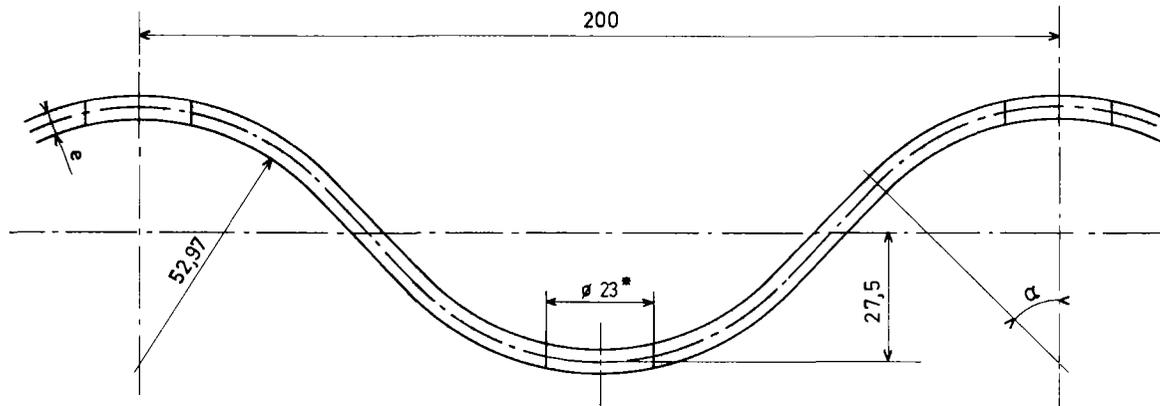
3.3 - Protection vis-à-vis de la corrosion

Zingage électrolytique avec bichromatation.

Classe de qualité 10-20 microns suivant NF E 27 016.

ARMCO MP 200

1) CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DES ONDULATIONS



* \varnothing 25 pour les joints circonférentiels

Les valeurs de "e" sont exprimées en mm.

- Distance des fibres extrêmes à l'axe neutre:

$$v \text{ (cm)} = 2,75 + \frac{e}{20}$$

- Section de métal par mètre de paroi:

$$S \text{ (cm}^2\text{/m)} = 11,83 e$$

- Rigidité de la paroi:

$$E_a I \text{ (kN.m}^2\text{/m)} = 93,03 e (1 + e/148)$$

- Module d'inertie par mètre de paroi:

$$\frac{I}{v} \text{ (cm}^3\text{/m)} = 15,20 e$$

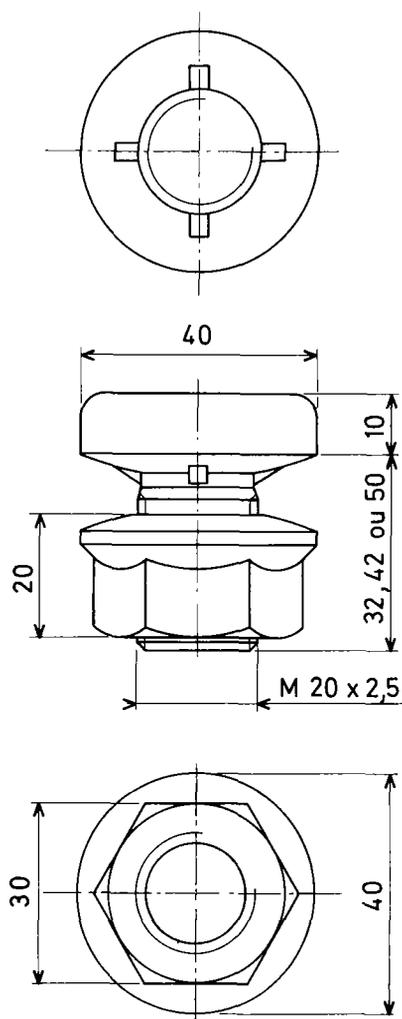
2) EPAISSEUR MINIMALE EN FONCTION DE LA RESISTANCE REQUISE :

* 3 boulons/onde	}	$e = 1 + \frac{R_p}{500}$	$0 \leq R_p \leq 500 \text{ kN/m}$
		$e = 0,9 + \frac{R_p}{455}$	$500 \leq R_p$ limité à 7 mm d'épaisseur nominale
* 4 boulons/onde	}	$e = 1 + \frac{R_p}{523}$	$0 \leq R_p \leq 523 \text{ kN/m}$
		$e = 1,07 + \frac{R_p}{563}$	$523 \leq R_p \leq 1936$
		$e = \frac{R_p}{429,4}$	$1936 \leq R_p$ limité à 8 mm d'épaisseur nominale

3) ELEMENTS DE FIXATION

3.1 - Caractéristiques géométriques

Les vis et écrous utilisés sont conformes au schéma ci-dessous.



Couple de serrage:

maximum: 300 N.m
minimum: 150 N.m

3.2 - Matières utilisées

Boulons de 32 mm: (pour les tôles de 2,75 à 4,25 mm)	}	VIS: - Acier XC-32-F traité par trempe et revenu. - Limite de rupture: 850-950 MPa. - Classe de qualité 8.8. suivant NF E 27 701
		ECROUS: - Acier XC-32-F non traité. - Limite de rupture: 550-600 MPa. - Classe de qualité 8 suivant NF E 27 701.
Boulons de 42 mm: (pour les tôles de 4,75 à 6,25 mm)	}	VIS: - Acier 38 C4 traité par trempe et revenu. - Limite de rupture: 980-1180 MPa. - Classe de qualité 10.9 suivant NF E 27 701.
		ECROUS: - Acier C 35 d. - Limite de rupture: \geq 800 MPa. - Classe de qualité 10 suivant NF E 27 701.
Boulons de 50 mm: (pour les tôles de 7 à 8 mm)	}	ECROUS: - Acier C 35 d. - Limite de rupture: \geq 800 MPa. - Classe de qualité 10 suivant NF E 27 701.

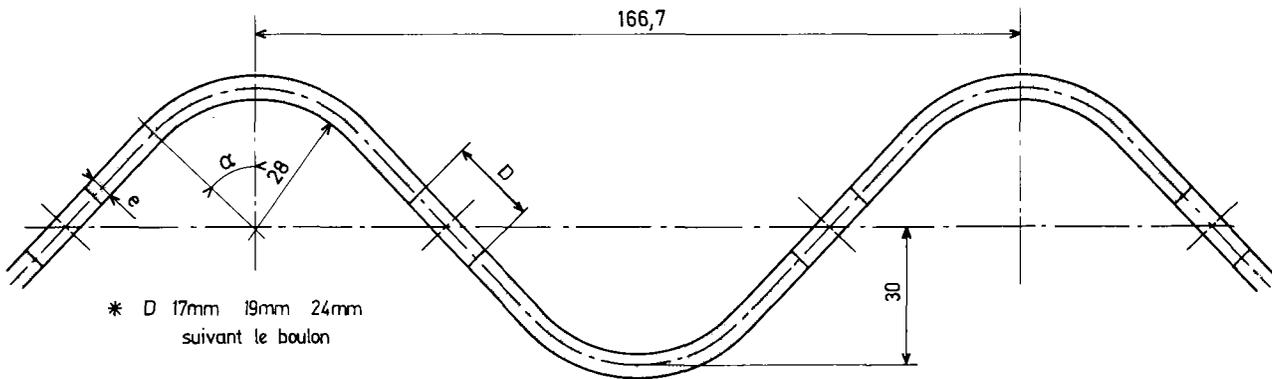
3.3 - Protection vis-à-vis de la corrosion

Zingage électrolytique avec bichromatation.

Classe de qualité 10-20 microns suivant NF E 27 016.

ARVAL Multijoint

1) CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DES ONDULATIONS



Les valeurs de "e" sont exprimées en mm.

- Distance des fibres extrêmes à l'axe neutre:

$$v \text{ (cm)} = 3 + \frac{e}{20}$$

- Section de métal par mètre de paroi:

$$S \text{ (cm}^2\text{/m)} = 12,74 e$$

- Rigidité de la paroi:

$$E_a I \text{ (kN.m}^2\text{/m)} = 106,81 e (1 + e/120)$$

- Module d'inertie par mètre de paroi:

$$\frac{I}{v} \text{ (cm}^3\text{/m)} = 16,26 e$$

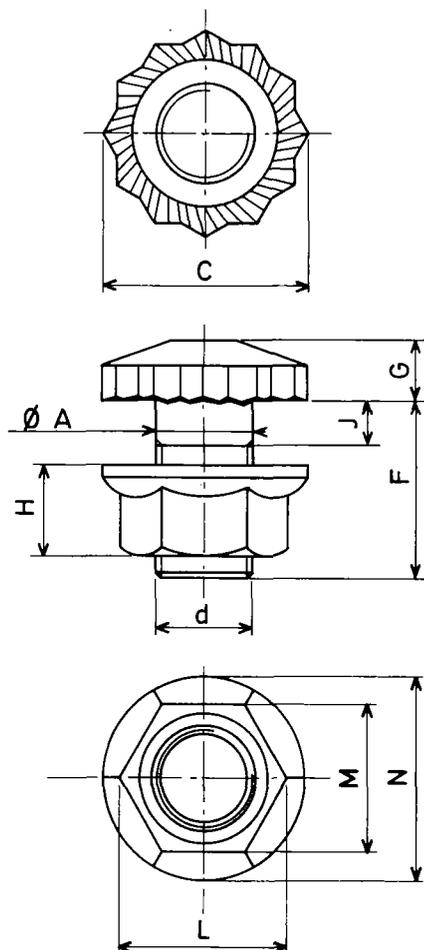
2) EPAISSEUR MINIMALE EN FONCTION DE LA RESISTANCE REQUISE :

* 4 boulons/onde	}	$e = 1 + \frac{R_p}{740} \quad 0 \leq R_p \leq 740 \text{ kN/m}$
		$e = 0,59 + \frac{R_p}{524} \quad 740 \leq R_p \leq 2312 \text{ kN/m}$
		$e = \frac{R_p}{462,4} \quad 2312 \leq R_p \quad \text{limité à 8 mm d'épaisseur nominale}$

3) ELEMENTS DE FIXATION

3.1 - Caractéristiques géométriques

Les vis et écrous utilisés sont conformes au schéma ci-dessous.



TYPE	1	2	3
Ø d mm	14	16	20
Ø C mm	31	34	37
G mm	8	10	12,5
F mm	23	28	36
J mm	4	7	11
H mm	15	15	16
M mm	24	24	28
N mm	34	34	38
Ø A mm	12,5	16	20
L mm	27	27	32
Pas mm	2	2	2
Couple max. N.m	200	250	500
Couple min. N.m	100	150	200

Type 1 - pour les tôles de 2,5 à 3,5 mm
Type 2 - pour les tôles de 4,0 à 5,0 mm
Type 3 - pour les tôles de 6,0 à 8,0 mm

3.2 - Matières utilisées

VIS: - Acier XC-38-F ou équivalent traité par trempe et revenu
- Limite de rupture: 800 - 950 MPa.
- Classe de qualité 8.8 suivant NF E 27 701.

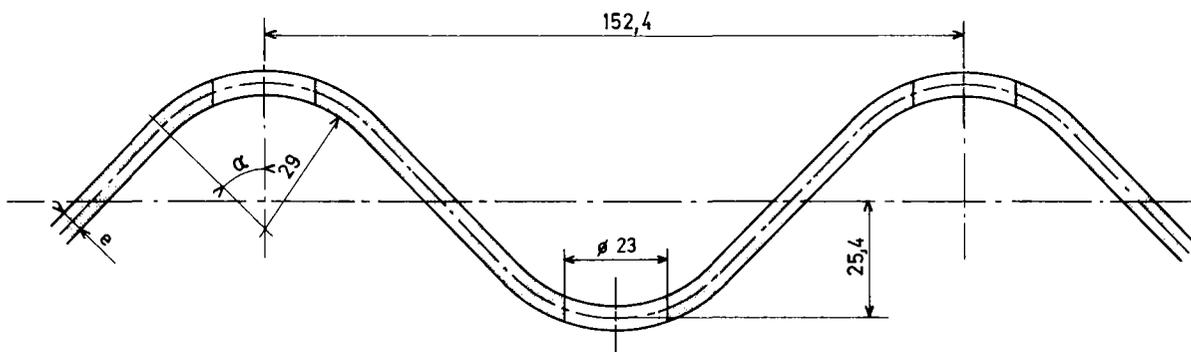
ECROUS: - Acier dur non traité. FB 10 ou FM 18.
- Classe de qualité 8 suivant NF E 27 701.

3.3 - Protection vis-à-vis de la corrosion

Zingage électrolytique avec bichromatation (finition jaune).
Classe de qualité 10-20 microns suivant NF E 27 016.

TUBOSIDER Polysectionnée

1) CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DES ONDULATIONS



Les valeurs de "e" sont exprimées en mm.

- Distance des fibres extrêmes à l'axe neutre:

$$v \text{ (cm)} = 2,54 + \frac{e}{20}$$

- Section de métal par mètre de paroi:

$$S \text{ (cm}^2\text{/m)} = 12,44 e$$

- Rigidité de la paroi:

$$E_a I \text{ (kN.m}^2\text{/m)} = 76,67 e (1 + e/104)$$

- Module d'inertie par mètre de paroi:

$$\frac{I}{v} \text{ (cm}^3\text{/m)} = 13,64 e$$

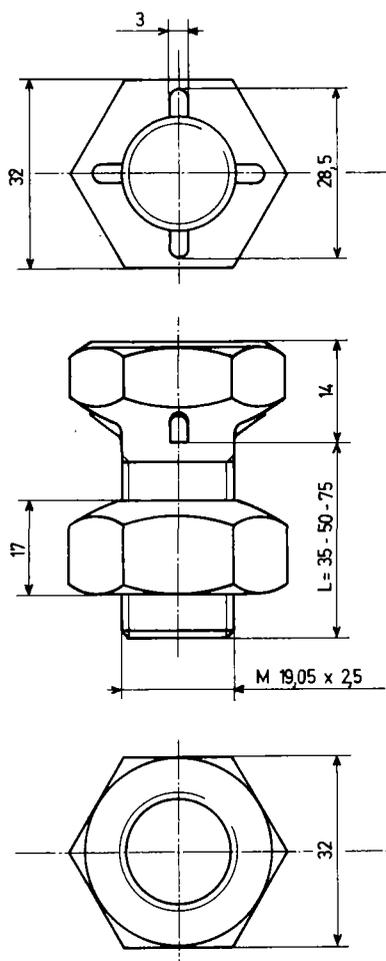
2) EPAISSEUR MINIMALE EN FONCTION DE LA RESISTANCE REQUISE :

* 2 boulons/onde	}	$e = 1 + \frac{R_p}{400}$	$0 \leq R_p \leq 400 \text{ kN/m}$
		$e = 1,25 + \frac{R_p}{530}$	$400 \leq R_p$ limité à 6,2 mm d'épaisseur nominale
* 4 boulons/onde	}	$e = 1 + \frac{R_p}{400}$	$0 \leq R_p \leq 400 \text{ kN/m}$
		$e = 1,58 + \frac{R_p}{952}$	$400 \leq R_p \leq 1357$
		$e = \frac{R_p}{451,5}$	$1357 \leq R_p$ limité à 7 mm d'épaisseur nominale

3) ELEMENTS DE FIXATION

3.1 - Caractéristiques géométriques

Les vis et écrous utilisés sont conformes au schéma ci-dessous.



Couple de serrage:

- Boulons 8.8.
maximum: 300 N.m
minimum: 220 N.m
- Boulons 10.9.
maximum: 450 N.m
minimum: 300 N.m

3.2 - Matières utilisées

Boulons h.r. 10.9
utilisés sur les
joints à 2 boulons
par onde avec les
tôles de 4,2 à 6,2 mm

- | | | |
|---|---------|--|
| } | VIS: | - Acier 38-C4 ou 42-C4 traité par
trempe et revenu
- Limite de rupture: 1000-1200 MPa.
- Classe de qualité 10.9 suivant NF E 27 701 |
| | ECROUS: | - Classe de qualité 10 suivant NF E 27 701. |

Boulons h.r. 8.8
utilisés dans les
autres cas.

- | | | |
|---|---------|--|
| } | VIS: | - Acier XC-38 traité par trempe et revenu.
- Limite de rupture: 800-1000 MPa.
- Classe de qualité 8.8 suivant NF E 27 701. |
| | ECROUS: | - Classe de qualité 8 suivant NF E 27 701. |

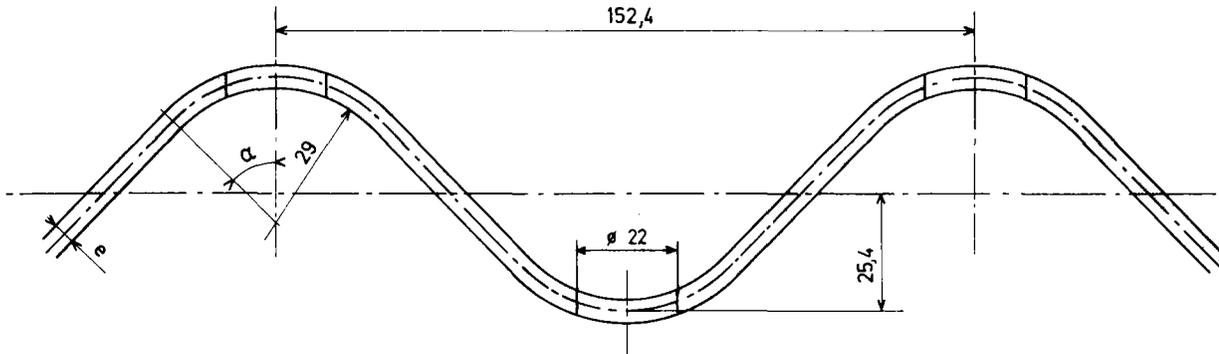
3.3 - Protection vis-à-vis de la corrosion

Zingage électrolytique avec bichromatation.

Classe de qualité 10-20 microns suivant NF E 27 016.

ARMCO 152 x 51

1) CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DES ONDULATIONS



Les valeurs de "e" sont exprimées en mm.

- Distance des fibres extrêmes à l'axe neutre:

$$v \text{ (cm)} = 2,54 + \frac{e}{20}$$

- Section de métal par mètre de paroi:

$$S \text{ (cm}^2\text{/m)} = 12,44 e$$

- Rigidité de la paroi:

$$E_a I \text{ (kN.m}^2\text{/m)} = 76,67 e (1 + e/104)$$

- Module d'inertie par mètre de paroi:

$$\frac{I}{v} \text{ (cm}^3\text{/m)} = 13,64 e$$

2) EPAISSEUR MINIMALE EN FONCTION DE LA RESISTANCE REQUISE :

* 2	boulons/onde	$\left\{ \begin{array}{l} e = 1 + \frac{R_p}{561} \\ e = 0,7 + \frac{R_p}{431} \end{array} \right.$	$0 \leq R_p \leq 561 \text{ kN/m}$	
			$561 \leq R_p$	limité à 6,2 mm d'épaisseur nominale
* 3	boulons/onde	$\left\{ \begin{array}{l} e = 1 + \frac{R_p}{680} \\ e = 0,6 + \frac{R_p}{486} \end{array} \right.$	$0 \leq R_p \leq 680 \text{ kN/m}$	
			$680 \leq R_p$	limité à 6,2 mm d'épaisseur nominale
* 4	boulons/onde	$\left\{ \begin{array}{l} e = 1 + \frac{R_p}{782} \\ e = 0,52 + \frac{R_p}{528} \\ e = \frac{R_p}{451,5} \end{array} \right.$	$0 \leq R_p \leq 782 \text{ kN/m}$	
			$782 \leq R_p \leq 1610$	
			$1610 \leq R_p$	limité à 7 mm d'épaisseur nominale

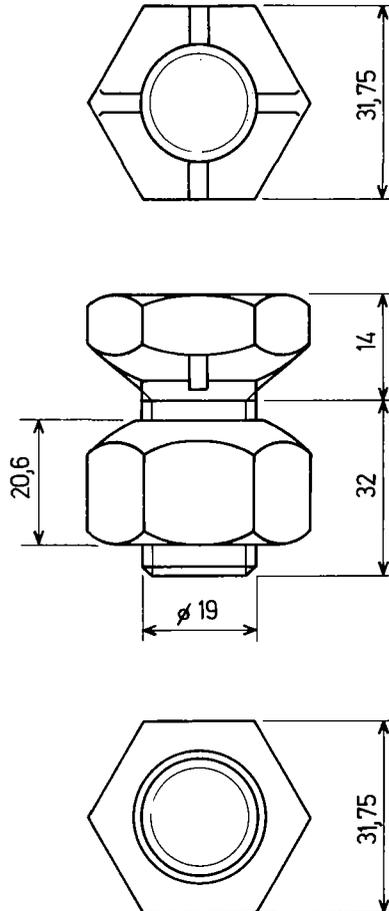
3) ELEMENTS DE FIXATION

3.1 - Caractéristiques géométriques

Les vis et écrous utilisés sont conformes au schéma ci-dessous.

Couple de serrage:

maximum: 300 N.m
minimum: 150 N.m



3.2 - Matières utilisées

Boulons de 32 mm
(pour les tôles
de 2,7 à 4,7 mm)

VIS: - Acier XC-32-F traité par trempe et revenu.
- Limite de rupture: 850-950 MPa.
- Classe de qualité 8.8 suivant NF E 27 701.

ECROUS: - Acier XC-32-F non traité.
- Limite de rupture: 550-600 MPa.
- Classe de qualité 8 suivant NF E 27 701.

Boulons de 38, 44 et 51 mm
dans les autres cas

VIS: - Acier 38 C4 traité par trempe et revenu.
- Limite de rupture: 1030-1230 MPa.
- Classe de qualité 10.9 suivant NF E 27 701

ECROUS: - Acier C 35 d.
- Limite de rupture: 800 MPa.
- Classe de qualité 10 suivant NF E 27 701.

3.3 - Protection vis-à-vis de la corrosion

Zingage électrolytique avec bichromatation.

Classe de qualité 10-20 microns suivant NF E 27 016.

ANNEXE 2

Calcul du débouché hydraulique

1) GENERALITES

La méthode de calcul présentée ici, basée sur des abaques, est destinée à couvrir les cas d'utilisation les plus fréquents des buses métalliques que constituent les écoulements à surface libre.

Comme il sera vu par la suite, la seule méthode théorique "exacte" pour évaluer le débit dans un ouvrage donné consiste à effectuer le tracé de la ligne d'eau en respectant sa compatibilité avec les conditions imposées à l'amont et à l'aval; cependant, cette méthode présente l'inconvénient d'être longue et d'exiger une bonne pratique alliée à des moyens de calcul puissants.

La méthode développée ici est basée sur le fait que le tracé de la ligne d'eau peut être évité et la solution "exacte" facilement trouvée dans deux cas extrêmes: celui de l'ouvrage infiniment court (orifice) et celui de l'ouvrage infiniment long (régime uniforme). Dans la très grande majorité des cas, l'encadrement que l'on pourra trouver en faisant successivement ces deux hypothèses sera suffisamment resserré pour aboutir à une estimation satisfaisante des performances compte tenu du degré de précision requis pour les études hydrauliques. Si l'encadrement trouvé est jugé trop large, il faudra définir une démarche adaptée dans chaque cas; on pourra, suivant le degré de précision cherché et la fiabilité des résultats de l'étude hydraulique:

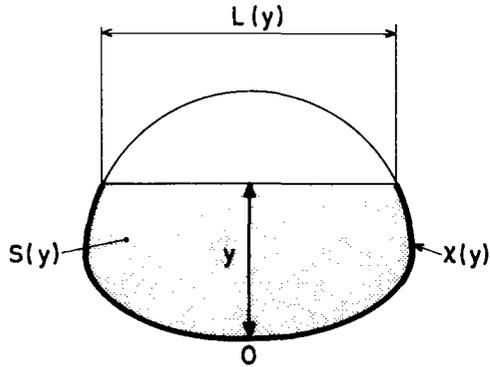
- se rapprocher de l'une ou l'autre des solutions limites suivant que l'on juge que l'ouvrage est "plutôt long" ou "plutôt court";
- retenir les résultats les plus défavorables si cela n'introduit pas un surcoût appréciable pour l'ouvrage;
- faire procéder à un calcul de ligne d'eau par un organisme spécialisé, cette démarche ne se justifiant que dans la mesure où les données de base (débit de crue, débouché aval,...) sont fiables. Dans ce cas, pour être significative, l'étude devra généralement porter sur une certaine distance de part et d'autre de l'ouvrage.

2) RAPPELS D'HYDRAULIQUE

Les quelques rappels théoriques qui suivent sont établis dans le cadre des hypothèses classiques des écoulements graduellement variés (pentes faibles du fond du lit et de la ligne d'eau). Bien que certains développements puissent être laissés à l'écart en première lecture, une bonne compréhension des notions fondamentales est indispensable avant d'aborder l'étude des paragraphes suivants. Pour plus de compléments, on pourra consulter utilement l'ouvrage "Étude et tracé des écoulements permanents en canaux et rivières" de R. SILBER (DUNOD - 1968).

2.1) Grandeurs caractéristiques des sections

L'étude d'un écoulement à surface libre fait intervenir, dans une section donnée et pour une hauteur d'eau donnée, un certain nombre de grandeurs attachées à la géométrie de l'écoulement (fig. 1):



- $S(y)$: surface mouillée
- $\chi(y)$: périmètre mouillé
- $L(y)$: largeur "au miroir"
- $R_h(y)$: rayon hydraulique = $\frac{S(y)}{\chi(y)}$

Figure 1

2.2) Charge spécifique dans une section

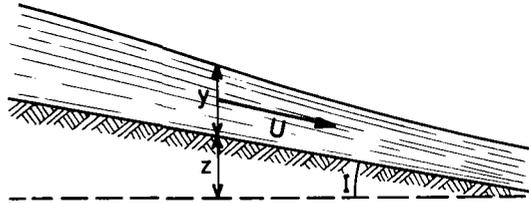


Figure 2

Dans une section donnée, la charge totale est définie par l'expression suivante:

$$H = z + y + \frac{U^2}{2g}$$

où:

- z est la cote du fond par rapport à un plan horizontal quelconque de référence;
- y est la hauteur d'eau dans la section;
- $U = \frac{Q}{S(y)}$ la vitesse moyenne de l'écoulement, Q étant le débit;
- g l'accélération due à la pesanteur (9,81 m/s²).

Moyennant une légère approximation sur la répartition transversale des vitesses dans la section, on peut considérer que cette grandeur est directement représentative de l'énergie du flot.

On appelle charge spécifique H_s la charge mesurée par rapport au fond du lit, soit:

$$H_s = H - z = y + \frac{U^2}{2g} = y + \frac{Q^2}{2g \cdot S(y)^2} \quad (1)$$

Dans un écoulement, le frottement sur les parois et le fond introduit une perte d'énergie, ce qui implique que la charge totale soit toujours décroissante dans la direction du courant. La charge spécifique peut par contre être, suivant les cas, décroissante, constante ou croissante dans la direction de l'écoulement. Dans la suite de la présente annexe, lorsque le terme "charge" sera utilisé sans autre précision, il s'agira toujours de la charge spécifique.

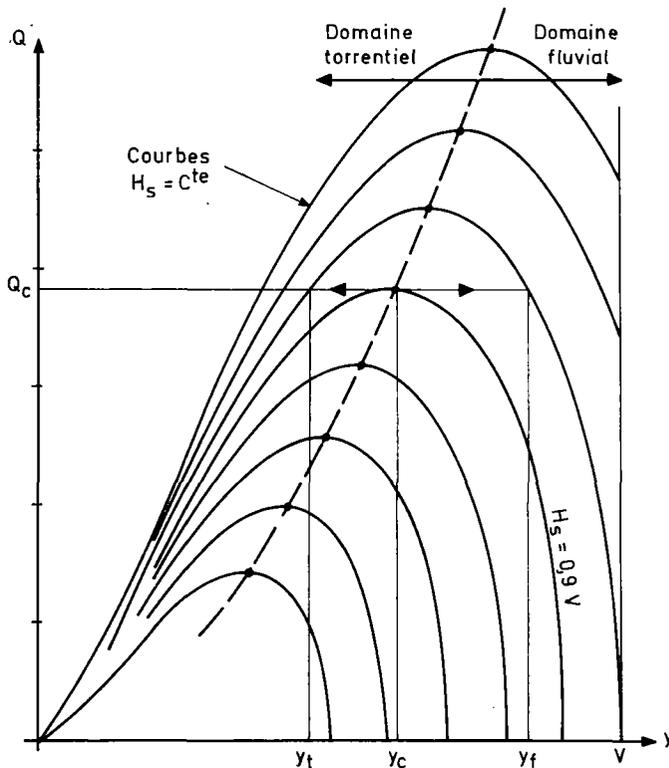


Figure 3

Il est intéressant de tracer, pour une forme de buse donnée, et une charge spécifique H_s donnée, le diagramme liant Q à y . Ce diagramme est représenté figure 3 pour une buse-arche ($V/D = 0,75$), pour plusieurs valeurs de la charge spécifique (pour une bonne compréhension, on pourra s'imaginer qu'il s'agit de coupes d'une surface à trois dimensions, l'axe des charges spécifiques H_s étant perpendiculaire à la feuille).

On constate que, pour une charge spécifique donnée (par exemple $H_s = 0,9.V$), il est impossible à la section d'écouler plus d'un débit Q_c , dit débit critique relatif à la charge H_s , ou débit d'orifice. C'est le débit qu'écoulerait un orifice de même forme percé sur le côté d'un réservoir où règnerait la charge H_s . A ce débit critique correspond une hauteur d'eau dans l'orifice y_c .

A l'inverse, pour un débit Q donné, il correspond une et une seule courbe de charge H_s atteignant son maximum en Q , c'est la charge minimale nécessaire pour évacuer le débit Q .

La courbe en pointillés représente le lieu des extrémums des courbes $H_s = Cte$, elle associe à l'un quelconque des paramètres y , Q ou H_s les valeurs dites "critiques" des deux autres paramètres qui lui correspondent.

Pour un débit Q donné, on obtient en différenciant la relation (1):

$$dH_s = dy \left[1 - \frac{Q^2 \cdot L(y)}{g \cdot S(y)^3} \right] \quad (2)$$

on en déduit que le débit critique associé à une hauteur d'eau " y " vaut:

$$Q_c = S(y) \left[\frac{g \cdot S(y)}{L(y)} \right]^{1/2}$$

et, par substitution dans (1), l'expression de la charge spécifique critique associée à cette même valeur de " y ":

$$H_c = y + \frac{S(y)}{2 \cdot L(y)}$$

Dans le cas général, pour un débit donné, la charge spécifique sera supérieure à la charge critique correspondant à ce débit (elle ne peut lui être inférieure). On constate alors que le débit Q peut être évacué de deux manières:

- avec une hauteur d'eau y_t inférieure à y_c , ce type de régime étant dit torrentiel;
- avec une hauteur d'eau y_f supérieure à y_c , ce type de régime étant dit fluvial.

Pour obtenir une même charge spécifique, la vitesse sera bien entendu supérieure dans le premier cas que dans le second.

2.3) Pertes de charge par frottement

L'expression la plus connue et la plus utilisée donnant les pertes de charge par frottement de l'écoulement est celle de Manning-Strickler qui s'écrit:

$$\frac{dH}{dx} = \frac{d}{dx} (z + H_S) = - \frac{n^2 U^2}{R_h^{4/3}}$$

tenant compte de ce que $Q = S.U$ et $\frac{dz}{dx} = -I$, on en déduit:

$$\frac{dH_S}{dx} = I - \frac{n^2.Q^2}{S(y)^2.R_h(y)^{4/3}} \quad (3)$$

Cette relation permet, conjointement avec la relation (1) de procéder au tracé des lignes d'eau, qui se fait généralement point par point, par une méthode de différences finies.

Il découle effectivement de (2) et (3) que:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{I - \frac{n^2.Q^2}{S(y)^2.R_h(y)^{4/3}}}{1 - \frac{Q^2.L(y)}{g.S(y)^3}} \quad (4)$$

Si l'on part d'une section où, par exemple, Q et y sont connus, on peut obtenir par (4) la valeur de (dy/dx) et en déduire la hauteur d'eau $y+dy$ dans la section distante de dx de la première. La répétition de cette opération aboutira au tracé de la ligne d'eau.

Si l'ouvrage considéré est suffisamment long, le régime qui finira par s'établir est le régime dit uniforme, où les pertes de charge totale sont exactement compensées par la pente du fond. Les caractéristiques de l'écoulement ne dépendent alors plus de l'abscisse considérée et l'on aura en particulier:

$$H_S = \text{Cte} \quad \text{et} \quad y = \text{Cte}$$

Pour évacuer un débit Q donné, on voit alors d'après (3) que l'eau se stabilise à une profondeur y_n , dite profondeur normale vis-à-vis du débit Q , telle que:

$$Q = \frac{\sqrt{I}}{n} . S(y_n) . R_h(y_n)^{2/3}$$

La pente de l'ouvrage et sa rugosité " n " étant connues (voir § 4.1 ci-après pour le choix de " n "), il est possible de représenter cette relation sur le même graphique que celui de la figure 3 (figure 4).

Plusieurs propriétés remarquables sont à signaler sur cette figure:

- On peut noter que, quels que soient les paramètres imposés, le débit Q est toujours constant le long de l'ouvrage, le point figuratif de l'écoulement évoluera donc, pour diverses sections, sur l'horizontale relative à ce débit.

- Le point défini par (y_n, Q) est représentatif du régime uniforme, ce qui signifie que toute la zone de l'ouvrage où règne ce régime est représentée par le même point (exemple du débit Q_2).

- Le point défini par (y_c, Q) est singulier, les relations (2) et (4) montrant que (dy/dx) devient théoriquement infini (exemple du débit Q_2). En fait, à l'approche de ce point, l'écoulement devient rapidement varié et les hypothèses de départ ne sont plus satisfaites.

- Dans une certaine plage de valeurs de la pente I de l'ouvrage, il existe une profondeur d'eau y_k particulière associée à cette pente telle que $y_k = y_c = y_n$. On peut montrer que, quel que soit le débit, la tangente à la ligne d'eau est horizontale lorsque la profondeur est égale à y_k .

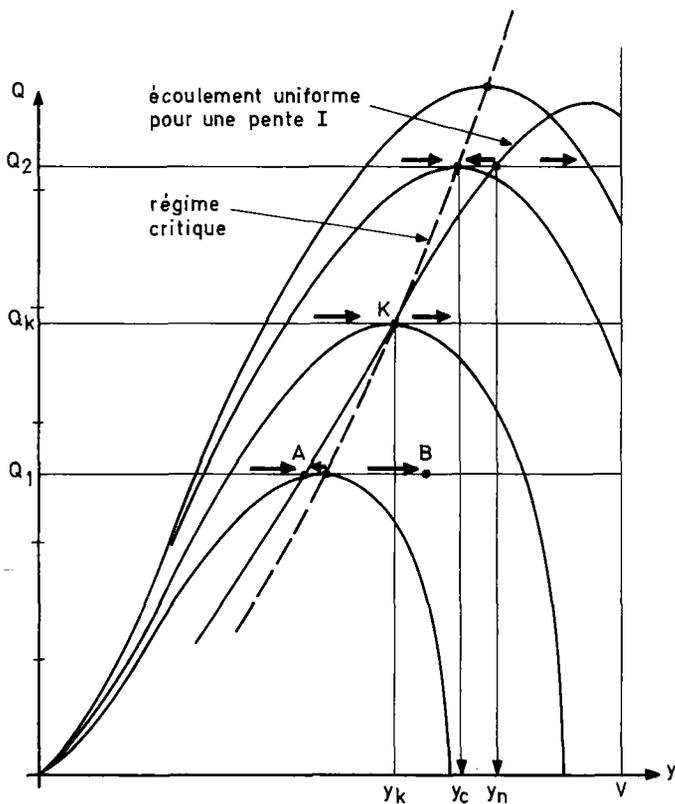


Figure 4

- Il est intéressant de noter que la méthode exposée ci-dessus pour le tracé des lignes d'eau permet théoriquement, une fois le débit Q et la hauteur d'eau en un point donné connus, de déterminer pas à pas à partir de ce point l'ensemble de la surface libre, aussi bien vers l'infini amont que vers l'infini aval. En fait, il sera généralement impossible de trouver une ligne d'eau unique satisfaisant à toutes les contraintes imposées et l'écoulement sera en réalité composé de plusieurs lignes d'eau se raccordant entre elles par des singularités (chutes, ressauts, points où $y = y_c$).

- En faisant l'hypothèse que, pour un débit donné, il n'existe qu'une seule profondeur normale (ce qui est vrai dans le domaine d'utilisation conseillé), on peut montrer, à partir de la relation (4), que:

- * lorsque la profondeur " y " est extérieure à l'intervalle (y_c, y_n) , cette même profondeur doit croître dans le sens de l'écoulement;
- * lorsque la profondeur " y " est intérieure à cet intervalle, elle doit décroître dans le sens de l'écoulement.

Cette dernière propriété implique que les lignes d'eau doivent respecter d'amont en aval le sens indiqué par les flèches. A titre d'exemple, si un écoulement uniforme torrentiel ($y_n < y_c$) s'est établi dans l'ouvrage (débit Q_1 , point A), il sera impossible de rejoindre des conditions d'écoulement fluvial qui seraient imposées en aval (point B par exemple) par une ligne d'eau. Il se forme alors un ressaut, qui consiste en une surélévation brusque de la hauteur d'eau accompagnée d'une dissipation localisée d'énergie; le ressaut est caractéristique du passage d'un régime torrentiel à un régime fluvial.

3) CLASSIFICATION DES PROBLEMES REELS - PRINCIPES DE RESOLUTION

3.1) Classification des problèmes réels

L'étude hydrologique (cf chapitre 3) pourra fournir tout ou partie des données suivantes en vue du dimensionnement hydraulique:

Q : débit de projet, centenal en général.

U_{am} : vitesse des eaux dans le canal d'aménée concomitante avec Q .

y_{am} : hauteur des eaux comptée à partir du fond du canal d'aménée dans une section de celui-ci où la ligne d'eau est à peu près parallèle au fond.

y_{max} : valeur maximale admissible de y_{am}

y_{av} : hauteur des eaux comptée à partir du radier de la buse, dans une section immédiatement à l'aval de la sortie. Dans la présente annexe, on considèrera toujours que y_{av} est un niveau d'eau imposé par un réservoir de très grande capacité (lac par exemple). Dans la pratique, y_{av} sera déterminé par la façon dont le canal d'évacuation peut faire transiter le débit Q .

L_0 : longueur de l'ouvrage.

Dans ce qui suit, on désignera de plus par y_e et y_s les niveaux des eaux dans la section d'entrée et dans la section de sortie, comptés à partir du radier de la buse (y_s sera différent de y_{av} dans le cas où il se forme une chute ou un ressaut à la sortie de l'ouvrage).

Ces notations sont illustrées par la figure 5 ci-dessous:

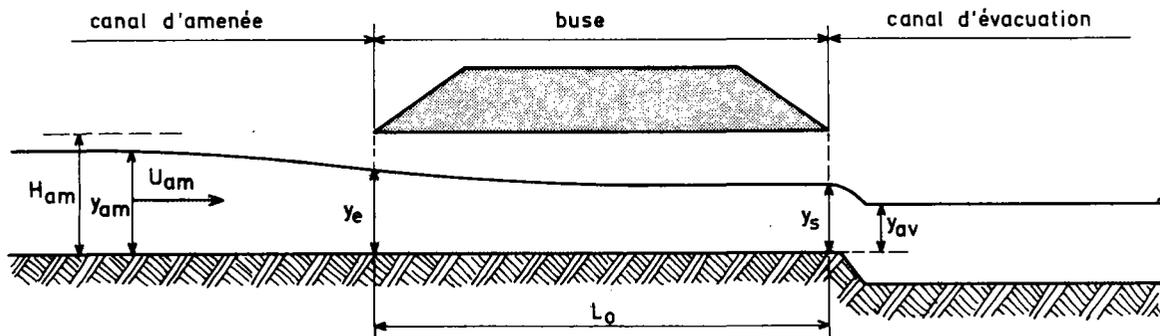


Figure 5

Parmi les données précédemment citées (Q , U_{am} , y_{am} , y_{av} , y_{am}), toutes n'auront pas une égale importance, soit parce que, étant donné le niveau de l'étude, certaines ne sont pas connues, soit parce que certaines d'entre elles dépendront précisément de la buse elle-même.

D'un point de vue théorique, les problèmes réels peuvent être rattachés à l'une ou l'autre des deux catégories suivantes:

* **catégorie A:** le canal d'amenée peut être comparé à un réservoir alimenté par un débit Q qui se vide dans la buse. En supposant qu'au départ le canal d'amenée est vide, les profondeurs d'eau dans celui-ci et dans la buse vont augmenter jusqu'à ce que l'ouvrage évacue le débit Q en régime permanent. Cette configuration est illustrée par la figure 6 dans le cas où la vitesse à l'amont U_{am} est nulle c'est-à-dire lorsque la charge spécifique à l'amont H_{am} est égale à y_{am} .

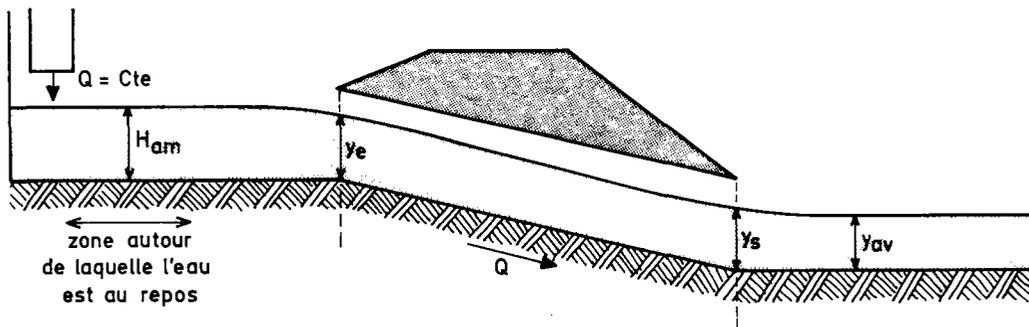


Figure 6

Ce type de problème sera appelé "à débit imposé" et noté de type A. C'est dans ces termes que se posent la plupart des problèmes d'hydraulique. Connaissant le débit à évacuer, le paragraphe 3.2 ci-après indique comment l'on peut, à l'aide des abaques proposés, estimer (pour un ouvrage et une hauteur d'eau à l'aval donnés) y_{am} et la profondeur d'eau dans l'ouvrage, afin de vérifier que ces valeurs ne sortent pas des limites admissibles.

* **Catégorie B:** lorsque la capacité de stockage du réservoir amont devient très importante, le débit que peut évacuer l'ouvrage n'a qu'une faible influence sur le niveau des eaux à l'amont, qui peut ainsi se trouver imposé, du moins pendant un certain temps. C'est le cas idéal d'un lac maintenu à niveau constant ou, de façon plus réaliste, du lit majeur d'un cours d'eau rempli par une crue rapide jusqu'à une profondeur y_{am} puis se vidant progressivement dans l'ouvrage. Cette configuration est illustrée par la figure 7, où l'on a également supposé que, la vitesse amont étant sensiblement nulle (cas d'un lac par exemple), H_{am} est égal à y_{am} .

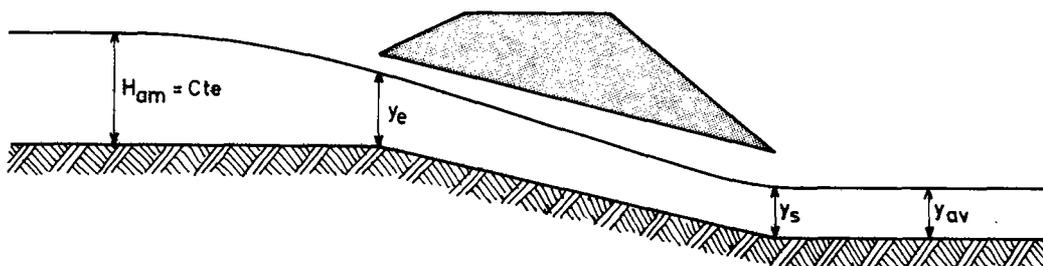


Figure 7

Ce type de problème sera appelé à "charge amont imposée" et noté de type B. Dans la pratique un problème se trouvera plus rarement posé dans ces termes, néanmoins, la valeur du débit de projet Q étant souvent entachée d'une assez forte incertitude, on pourra avoir intérêt à estimer dans certains cas quel est le débit maximum que peut évacuer l'ouvrage lorsque la hauteur d'eau (ou la charge) à l'amont est imposée, par exemple lorsqu'elle devient égale à y_{max} . Le paragraphe 3.3 ci-après donne les indications nécessaires pour procéder à une telle estimation.

Le problème de type A part de l'hypothèse que le débit en régime permanent est connu de façon suffisamment fiable, pour que l'indétermination à lever ne concerne plus que la profondeur d'eau dans la buse et à l'amont; dans le problème de type B la démarche est inverse en ce sens qu'on se fie à une valeur de la hauteur des eaux à l'amont et de leur état de vitesse, pour connaître le débit en régime permanent. Ces deux démarches ne s'excluent nullement, et on pourrait dans bien des cas y avoir recours de façon parallèle; il n'en est pas moins vrai que c'est à la résolution de type A qu'on a le plus fréquemment recours car, à quelques exceptions près, c'est la donnée du débit de projet qui est la donnée fondamentale. On trouvera ci-après un tableau en fonction de diverses combinaisons des paramètres de départ (Q , y_{am} , y_{av} , U_{am}) le mode d'approche conseillé du problème.

Combinaison de données disponible	Type de problème	Commentaires
Q	A	Stade du prédimensionnement en général.
Q , y_{av}	A	La plupart des cas; connaissant Q et la géométrie du canal d'évacuation une estimation de y_{av} est toujours possible.
U_{am} , y_{am} , y_{av}	B	Cas par exemple d'un réservoir qui se vide dans la buse.
y_{am} , y_{av}	-	Pour mémoire (cas par exemple d'une buse de pente nulle) doit faire l'objet d'un calcul de ligne d'eau.
Q , U_{am} , y_{am} , y_{av}	A (ou B)	Étude complète d'une section de cours d'eau.

3.2) Principe de résolution du problème à débit Q_0 imposé (type A)

Tout au long du présent paragraphe, on notera:

$y_n = y_n(Q_0)$, $H_n = H(y_n, Q_0)$, les caractéristiques normales associées à Q_0 et à la pente I ;

$y_c = y_c(Q_0)$, $H_c = H_c(Q_0)$, les caractéristiques critiques associées à Q_0 .

On supposera par ailleurs, pour simplifier l'exposé, que les eaux à l'amont sont au repos et que leur mise en vitesse se fait à charge constante; (on verra par la suite comment tenir compte de U_{am} et de la perte de charge à l'entrée).

3.2.1) Cas du régime fluvial ($y_n > y_c$)

a) Cas où $y_{av} > y_n$

On peut tracer la ligne d'eau de l'aval vers l'amont, en partant de du point A imposé de coordonnées Q_0 et y_{av} (fig. 8).

Si l'ouvrage est infiniment court, on reste au point A, la charge spécifique à l'amont (donc la hauteur d'eau dans le réservoir si $U_{am}=0$) vaut $H(y_{av}, Q_0)$; il s'agit d'un transfert entre deux réservoirs par un orifice. La ligne d'eau est celle schématisée à la figure 8,a.

Si l'ouvrage est infiniment long on atteint asymptotiquement le point B, caractéristique de la profondeur normale y_n associée au débit Q_0 . La charge spécifique à l'amont est celle du point B, soit H_n . La ligne d'eau est celle schématisée à la figure 8,b.

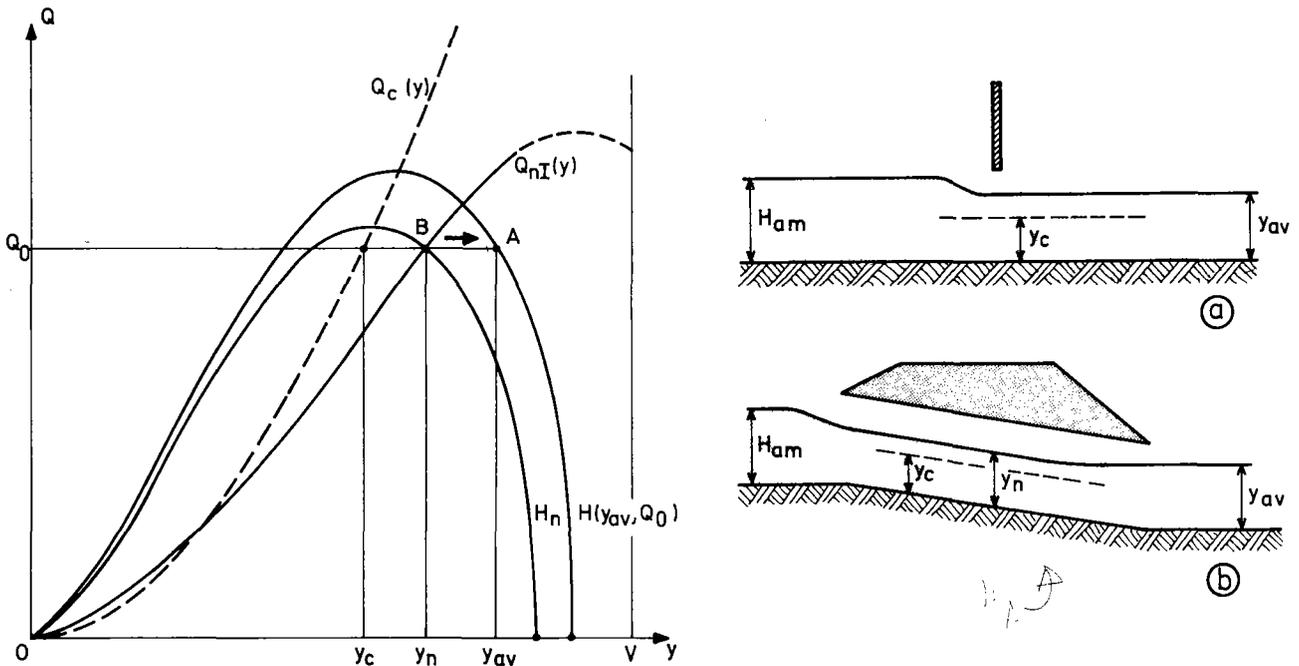


Figure 8

Dans le cas d'un ouvrage réel (de longueur finie non nulle), le point représentatif de l'entrée sera situé entre A et B, on aura donc:

$$y_{av} > y_e > y_n \quad , \quad H(y_{av}, Q_0) > H_{am} > H_n$$

On peut montrer par ailleurs à partir de (4) que la pente de la ligne d'eau (dy/dx) est, en régime fluvial, toujours inférieure à I , ce qui revient à

dire que le niveau absolu de l'eau dans l'entrée est toujours supérieur à celui de la sortie. On aura donc aussi:

$$y_{av} > y_e > y_{av-I.L_0} \quad , \quad H(y_{av}, Q_0) > H_{am} > H(y_{av-I.L_0}, Q_0)$$

ce qui peut constituer un meilleur encadrement que le précédent dans le cas des ouvrages très courts.

b) Cas où $y_c < y_{av} < y_n$

Il s'agit du cas de y_{av1} de la figure 9. En tenant compte du sens des flèches on ira, en partant de l'aval, du point A_1 vers le point B. Dans le cas de l'ouvrage infiniment court on reste au point A_1 et on obtient encore une ligne d'eau du type de celle représentée figure 8,a. Dans le cas de l'ouvrage très long on part de A_1 et on atteint B asymptotiquement. La ligne d'eau est du type de celle représentée figure 9,a.

Pour les longueurs d'ouvrage intermédiaires, on obtient l'encadrement suivant:

$$y_n > y_e > y_{av} \quad , \quad H_n > H_{am} > H(y_{av}, Q_0)$$

c) Cas où $y_{av} < y_c$

Il s'agit du cas de y_{av2} à la figure 9. Le sens des flèches ne permet plus de remonter la ligne d'eau. On voit par continuité avec le cas précédent que la section de sortie devient une "section de contrôle" où s'instaura le régime critique relatif au débit Q_0 . L'écoulement se termine par une chute. Quelle que soit la longueur de l'ouvrage, les conditions de la section de sortie sont les conditions critiques, au point C de la figure 9, à partir duquel on peut remonter la ligne d'eau jusqu'à y_n si la longueur de l'ouvrage est suffisante.

L'allure de la ligne d'eau est donnée figure 9,b dans le cas de l'ouvrage infiniment court et figure 9,c dans le cas de l'ouvrage infiniment long.

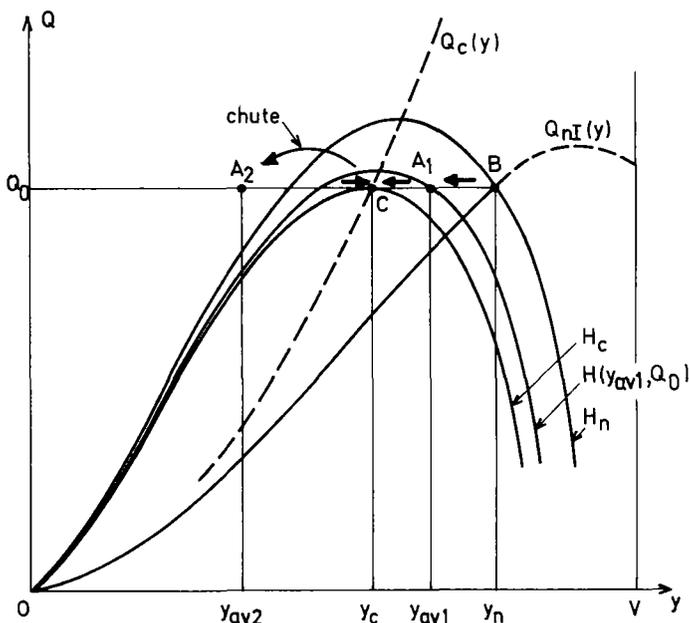
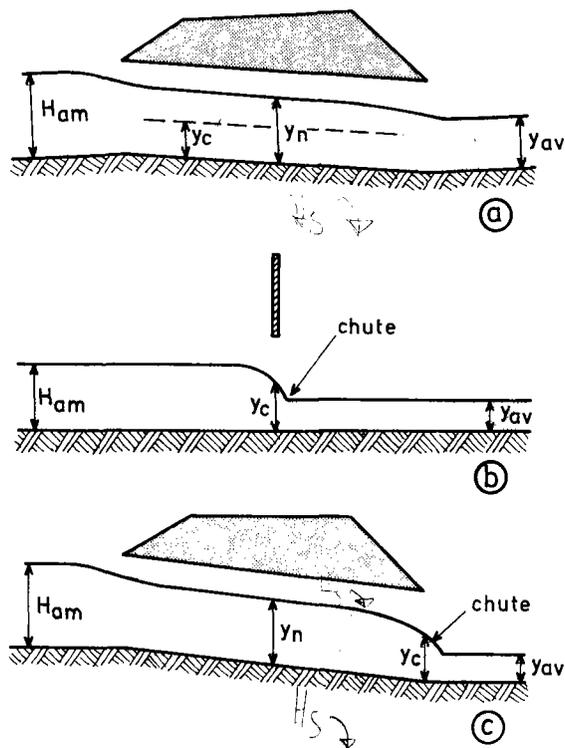


Figure 9



Pour les longueurs d'ouvrage intermédiaires, on obtient l'encadrement suivant:

$$y_n > y_e > y_c \quad , \quad H_n > H_{am} > H_c$$

3.2.2) Cas du régime torrentiel ($y_n < y_c$)a) Cas où $y_{av} > y_c$

Il est dans ce cas possible (exemple de y_{av1} , figure 10), en partant du point caractérisé par (y_{av}, Q_0) de remonter l'ouvrage avec des profondeurs d'eau décroissantes.

Si l'ouvrage est infiniment court, entrée et sortie sont confondues, on reste au point (y_{av}, Q_0) (A_1 dans le cas de l'exemple) et on obtient une ligne d'eau du type de celle représentée figure 8,a. La charge à l'amont est alors égale à $H(y_{av}, Q_0)$.

Si l'ouvrage est infiniment long, on atteindra obligatoirement le point critique C. Le sens des flèches montre qu'il est alors impossible de continuer à tracer une ligne d'eau en "remontant" l'ouvrage. On peut par contre montrer que ce sont alors les conditions du régime critique qui s'installent à l'entrée, qui joue alors le rôle de "section de contrôle", et il est possible de tracer une deuxième ligne d'eau, descendante cette fois et partant du point y_c à l'entrée pour tendre asymptotiquement vers y_n . La charge à l'amont est alors égale à H_c . Ces deux lignes d'eau, l'une torrentielle partant de l'amont et l'autre fluviale aboutissant à l'aval sont disjointes, et il est impossible de les relier l'une à l'autre de façon continue. Il s'établit en fait un ressaut caractéristique du passage d'un régime torrentiel à un régime fluvial, qui permet d'établir la transition par une dissipation locale d'énergie. Suivant des conditions qui ne seront pas étudiées, le ressaut va s'établir ou bien à la sortie de l'ouvrage si y_{av} ne dépasse pas une certaine valeur limite, ou bien à l'intérieur de l'ouvrage dans le cas contraire, d'autant plus loin de la sortie que y_{av} sera grand. L'allure des lignes d'eau correspondantes est donnée par les figures 10,a et 10,b.

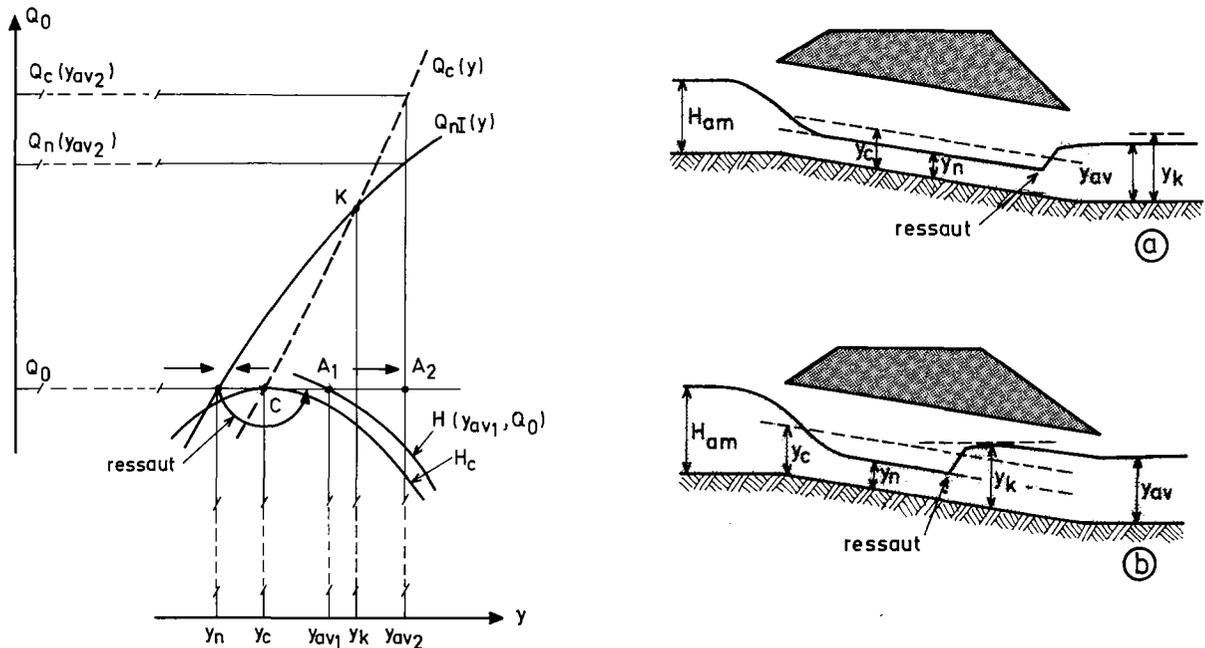


Figure 10

Dans le cas d'un ouvrage réel (de longueur finie non nulle), on aura toujours l'encadrement suivant:

$$y_{av} > y_e \geq y_c \quad , \quad H(y_{av}, Q_0) > H_{am} \geq H_c$$

En se basant sur les propriétés du point K, mentionnées en 2.3 (la tangente à la ligne d'eau y est horizontale), il est possible d'obtenir des résultats plus précis (il faut noter que y_k existe toujours, même si, dans certains cas, il se trouve en dehors du champ couvert par les abaques proposés à la fin de la présente annexe).

1) Cas où $y_{av} \leq y_k$ (cas de y_{av1} sur la figure 10).

Deux cas peuvent se présenter:

* Si l'ouvrage est suffisamment long pour que $y_c + I.L_o > y_{av}$, le point C sera atteint de façon certaine à l'intérieur de l'ouvrage par la ligne d'eau fluviale "montante". Les conditions régnant à l'entrée seront donc les conditions critiques, et l'on aura:

$$y_e = y_c, \quad H_{am} = H_c$$

* Dans le cas contraire, le point C pourra ne pas être atteint (la ligne d'eau torrentielle n'existera pas dans ce cas), mais on reste néanmoins assuré que le niveau absolu de l'eau à l'entrée sera inférieur à celui de la sortie, on aura donc:

$$y_{av} - I.L_o > y_e \geq y_c, \quad H(y_{av} - I.L_o, Q_o) > H_{am} \geq H_c$$

2) Cas où $y_{av} > y_k$ (cas de y_{av2} sur la figure 10).

Pour un ouvrage relativement long, la majoration $y_e < y_{av}$ peut s'avérer trop pessimiste. Une meilleure valeur, notée y_{em} , peut être obtenue en tirant parti du fait que la ligne d'eau fluviale se trouve entièrement située sous sa tangente au point de sortie, elle s'exprime par:

$$y_{em} = y_{av} - I.L_o \cdot \frac{1 - \left[\frac{Q_o}{Q_n(y_{av})} \right]^2}{1 - \left[\frac{Q_o}{Q_c(y_{av})} \right]^2}$$

Deux cas peuvent se présenter:

* si $y_{em} \leq y_c$, le point C sera atteint à coup sûr, et l'on aura:

$$y_e = y_c, \quad H_{am} = H_c$$

* si $y_{em} > y_c$, on retiendra l'encadrement:

$$y_{em} > y_e \geq y_c, \quad H(y_{em}, Q_o) > H_{am} \geq H_c$$

b) Cas où $y_{av} \leq y_c$

Quelle que soit la longueur de l'ouvrage, les conditions critiques s'instaurent dans la section d'entrée, et l'on a:

$$y_e = y_c, \quad H_{am} = H_c$$

Dans le cas d'un ouvrage infiniment court, on se trouve exactement dans les conditions du paragraphe 3.2.1,c (ligne d'eau de la figure 9, a), et il se forme une chute à la sortie de l'ouvrage. b

Pour l'ouvrage infiniment long, la section de sortie sera le siège d'un ressaut si y_{av} est compris entre y_c et y_n (ligne d'eau (a) de la figure 11, correspondant à y_{av1}), ou d'une chute si y_{av} est inférieur à y_n (ligne d'eau (b), correspondant à y_{av2}).

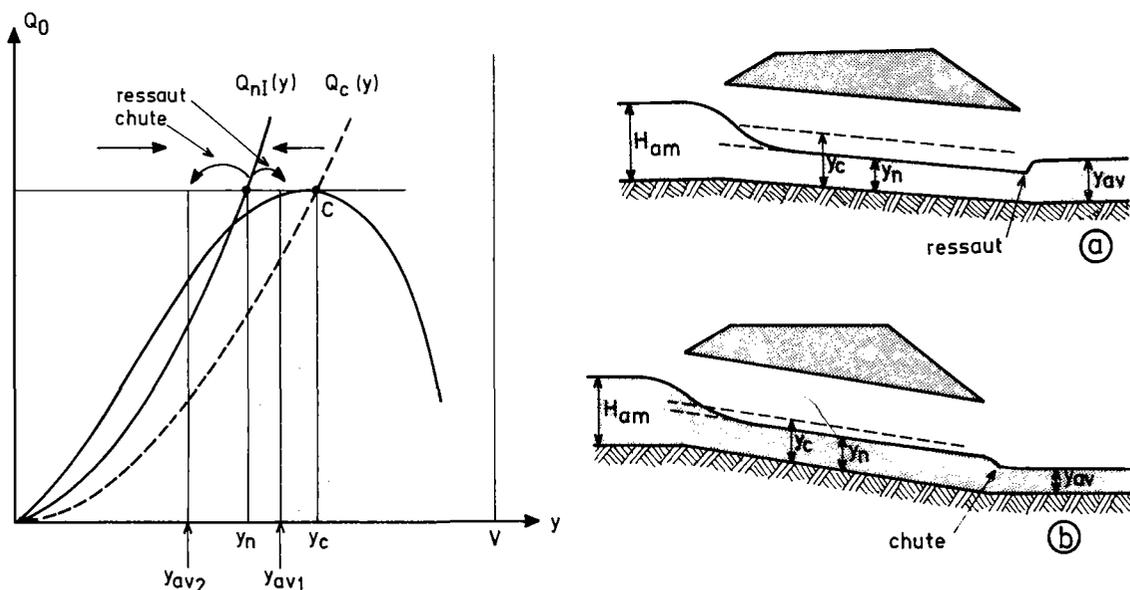


Figure 11

3.3) Principe de résolution du problème à charge amont H_{S0} imposée (type B)

Tout au long du présent paragraphe, on notera :

$y_n = y_n(H_{S0})$, $Q_n = Q_n(H_{S0})$, les caractéristiques normales associées à H_{S0} et à la pente I;

$y_c = y_c(H_{S0})$, $Q_c = Q_c(H_{S0})$, les caractéristiques critiques associées à H_{S0} .

Q le débit de l'ouvrage réel.

On fera, dans le même but qu'en 3.2, l'hypothèse que les eaux à l'amont sont au repos et que leur mise en vitesse se fait à charge constante.

Il faut noter que, d'une façon générale, la résolution complète d'un problème de type B est plus difficile que celle d'un problème de type A dans la mesure où le débit Q , et donc la ligne d'eau sur laquelle doivent être effectués les calculs, sont a priori inconnus. Dans la pratique, une telle résolution exige de procéder par tâtonnements (ou itérations), en traçant les lignes d'eau pour plusieurs valeurs de Q et en retenant celle qui satisfait à la fois aux conditions à l'amont et à l'aval.

3.3.1) Cas du régime fluvial ($y_n > y_c$)

a) Cas où $H_{S0} > y_{av} > y_n$ (figure 12)

Une fois fixée une valeur de Q , il est possible de remonter la ligne d'eau à partir de y_{av} jusqu'à l'entrée de l'ouvrage. La bonne valeur de Q sera celle qui conduit à l'entrée de l'ouvrage à une charge égale à H_{S0} .

Dans le cas d'un ouvrage infiniment court, la ligne d'eau est représentée par un point, qui ne peut être que le point A, intersection de la courbe H_{S0} avec y_{av} , le débit valant $Q(y_{av}, H_{S0})$. La ligne d'eau correspondante est schématisée sur la figure 12,a.

Dans le cas d'un ouvrage infiniment long, la ligne d'eau évoluera, en remontant vers l'amont, vers les conditions de l'écoulement uniforme; l'entrée est donc représentée par le point B, intersection de la courbe H_{S0} avec la courbe $Q_{nI}(y)$, le débit étant égal à Q_n . La sortie est caractérisée par le point A', de coordonnées (y_{av}, Q_n) . La ligne d'eau correspondante est schématisée sur la figure 12,b.

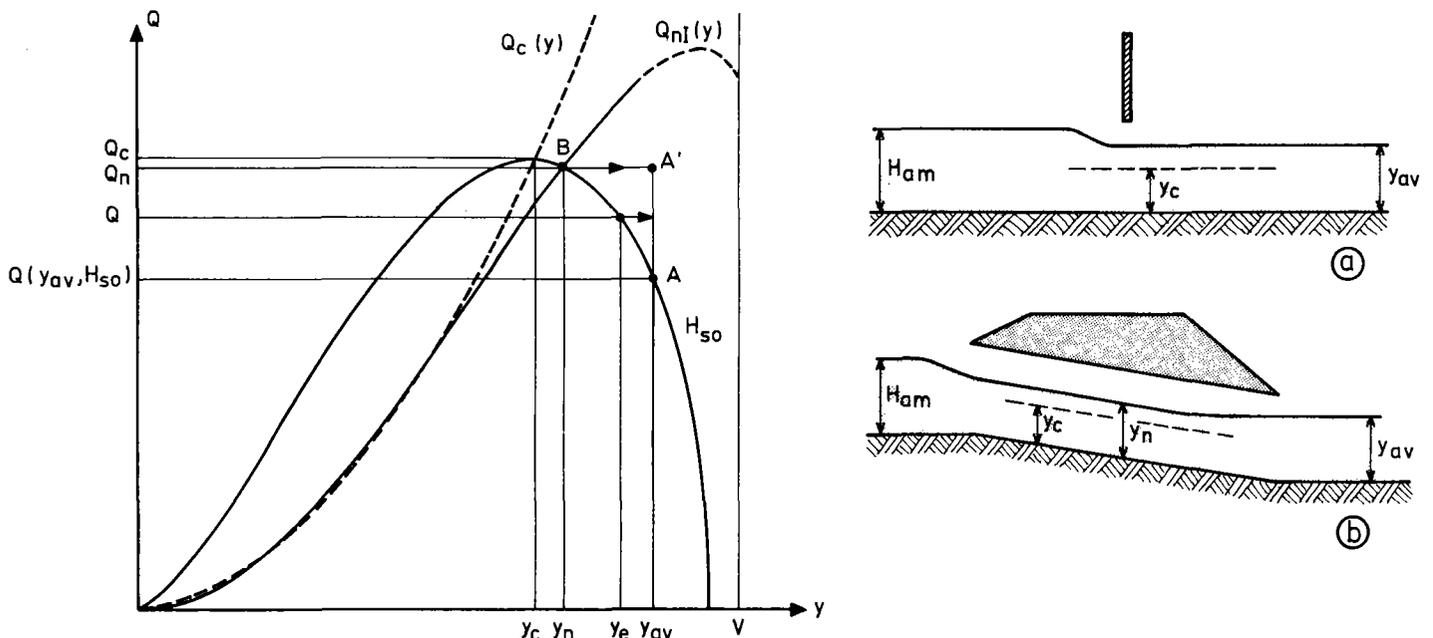


Figure 12

Dans le cas d'un ouvrage réel (de longueur finie non nulle), on aura une ligne d'eau et un débit intermédiaires, soit:

$$y_{av} > y_e > y_n, \quad Q_n > Q > Q(y_{av}, H_{so})$$

b) Cas où $y_c < y_{av} < y_n$

Il s'agit du cas de y_{av1} de la figure 13.

Compte tenu du sens des flèches, il est possible de remonter la ligne d'eau avec des profondeurs d'eau croissantes de l'aval vers l'amont. Dans le cas de l'ouvrage infiniment court, l'écoulement est défini par le point A_1 , la ligne d'eau étant du même type que celle représentée sur la figure 12,a. Le débit vaut $Q(y_{av}, H_{so})$.

Dans le cas de l'ouvrage très long, on part du point A'_1 pour atteindre asymptotiquement le point B caractéristique de l'écoulement uniforme, le débit valant Q_n . La ligne d'eau est schématisée par la figure 13,a.

Dans le cas d'un ouvrage réel, de longueur finie non nulle, on obtient l'encadrement suivant:

$$y_n > y_e > y_{av}, \quad Q(y_{av}, H_{so}) > Q > Q_n$$

c) Cas où $y_{av} < y_c$

Si l'on fait baisser progressivement la valeur de y_{av} en partant de y_{av1} définie ci-dessus, l'écoulement évolue de la façon suivante:

Dans le cas de l'ouvrage infiniment court, le point A_1 se déplace sur la courbe H_{so} en se rapprochant du point C, point critique relatif à la charge H_{so} . Pour toute valeur de y_{av} inférieure à y_c , l'orifice devient une "section de contrôle" où s'installent les conditions critiques (y_c, Q_c) relatives à la charge H_{so} , l'écoulement se terminant alors par une chute. La ligne d'eau correspondante est schématisée sur la figure 13,b.

Dans le cas de l'ouvrage infiniment long, le point A'_1 se déplace vers le point C' sur l'horizontale d'ordonnée Q_n , le point B, représentatif de l'entrée, restant inchangé. Pour toute valeur de y_{av} inférieure à $y_c(Q_n)$, les conditions critiques ($y_c(Q_n), Q_n$) s'installent dans la section de sortie. La ligne d'eau correspondante est schématisée sur la figure 13,c.

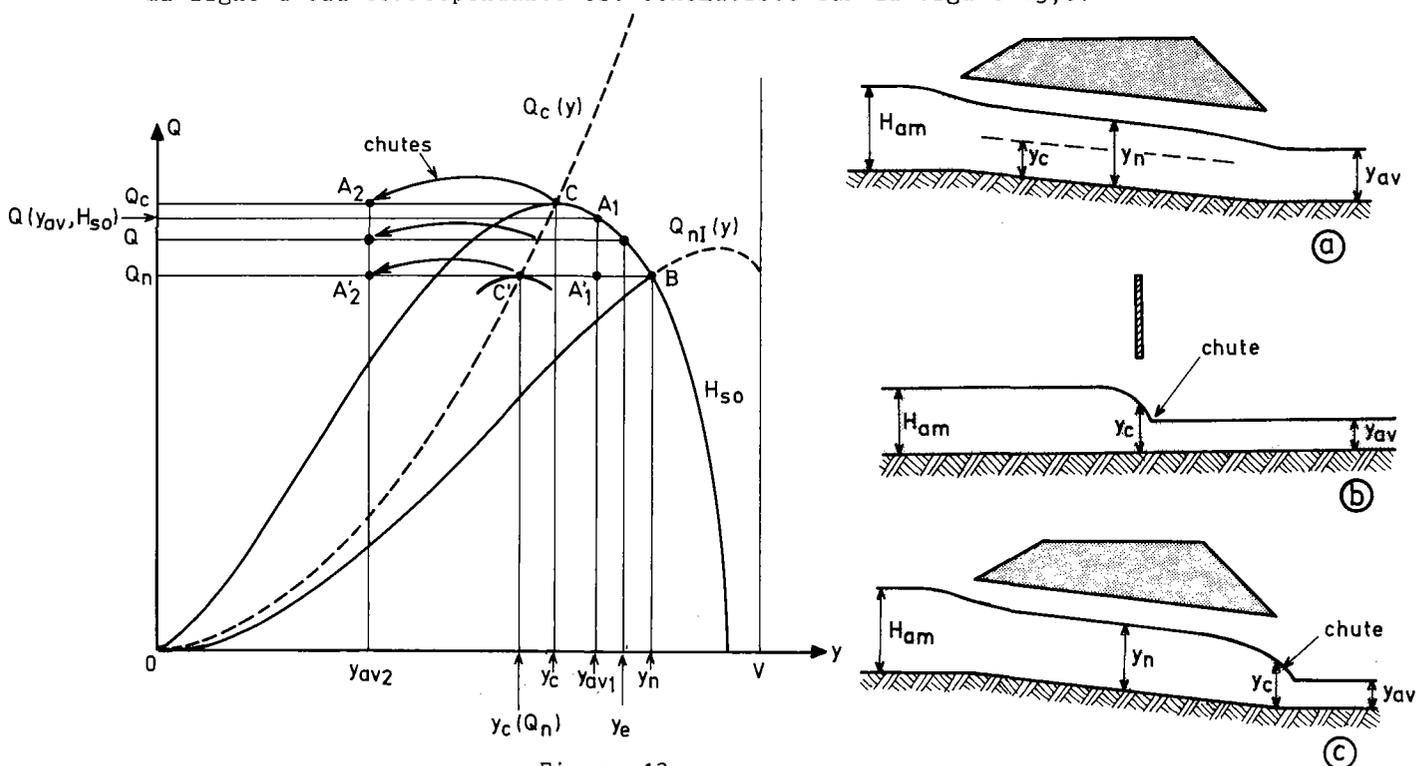


Figure 13

Dans le cas d'un ouvrage réel, on obtient l'encadrement suivant:

$$y_n > y_e > y_c, \quad Q_c > Q > Q_n$$

3.3.2) Cas du régime torrentiel ($y_n < y_c$)a) Cas où $H_{s0} > y_{av} > y_c$ (figure 14)

Dans le cas de l'ouvrage infiniment court le point caractéristique A de l'écoulement est identique à celui obtenu dans les conditions analogues en 3.3.1,a.

Dans le cas de l'ouvrage infiniment long, des considérations analogues à celles exposées en 3.2.2,a amènent à considérer deux lignes d'eau, l'une CB, torrentielle, partant de l'amont avec les conditions critiques et évoluant vers l'écoulement uniforme, l'autre B'A', fluviale, aboutissant à l'aval avec la profondeur y_{av} . Ces deux lignes d'eau se raccordent par un ressaut, localisé dans la section de sortie ou à l'intérieur de l'ouvrage suivant la valeur y_{av} . Les deux types d'écoulement résultants, identiques à ceux obtenus en 3.3.2,a, sont reproduits sur les figures 14,a et 14,b.

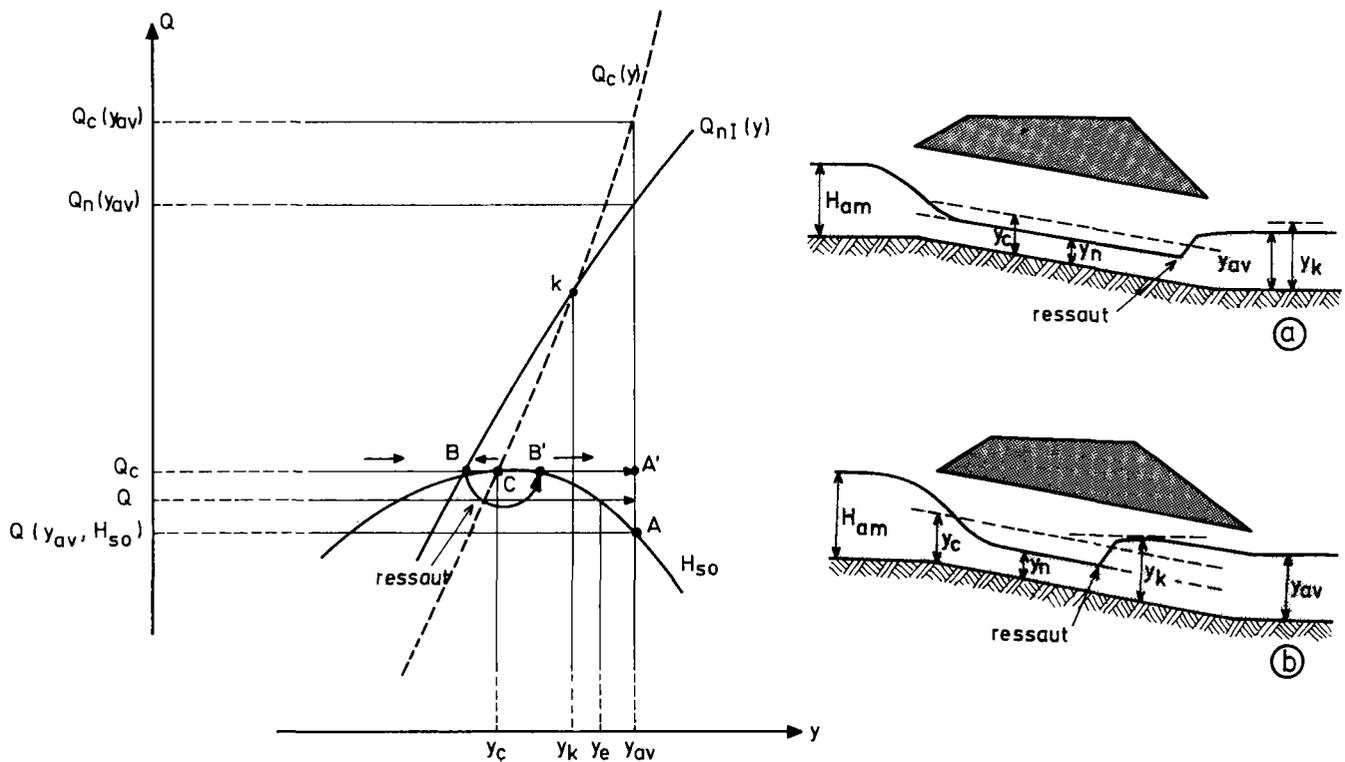


Figure 14

Dans le cas d'un ouvrage réel (de longueur finie non nulle), on obtient l'encadrement suivant:

$$y_{av} > y_e > y_c, \quad Q_c > Q > Q(y_{av}, H_{s0})$$

Si cet encadrement est jugé par trop imprécis (prendre Q voisin de $Q(y_{av}, H_{s0})$ est certainement très pessimiste dans le cas d'un ouvrage long), il est possible de l'affiner comme suit par une démarche analogue à celle du paragraphe 3.2.2,a, auquel on se reportera pour des explications plus détaillées:

1) Cas où $y_{av} \leq y_k$

Deux cas peuvent se présenter:

- * Si $y_c + I.L_0 \geq y_{av}$, on aura:

$$y_e = y_c, \quad Q = Q_c$$

- * Dans le cas contraire:

$$y_{av} - I.L_0 > y_e \geq y_c, \quad Q_c > Q \geq Q(y_{av} - I.L_0, H_{s0})$$

2) Cas où $y_{av} > y_k$

On pose:

$$y_{em} = y_{av} - I.L_0 \cdot \frac{1 - \left[\frac{Q_c/Q_n(y_{av})}{Q_c/Q_c(y_{av})} \right]^2}{1 - \left[\frac{Q_c/Q_c(y_{av})}{Q_c/Q_c(y_{av})} \right]^2}$$

Deux cas peuvent se présenter:

* si $y_{em} \leq y_c$, le point C sera atteint à coup sûr, et l'on aura:

$$y_e = y_c, \quad Q = Q_c$$

* si $y_{em} > y_c$, on retiendra l'encadrement:

$$y_{em} > y_e \geq y_c, \quad Q_c \geq Q > Q(y_{em}, H_{s0})$$

b) Cas où $y_{av} < y_c$

Quelle que soit la longueur de l'ouvrage le débit réel Q sera égal à Q_c puisqu'il s'agit du seul débit permettant de parcourir une ligne d'eau de l'amont (où $H_s = H_{s0}$) vers l'aval dans le sens des charges spécifiques croissantes, caractéristique d'un régime torrentiel à profondeur supérieure à y_n .

On est alors ramené au cas exposé en 3.2.2,b, et l'on a:

$$y_e = y_c, \quad Q = Q_c$$

3.4) Cas de la pente nulle

Dans le cas où $I = 0$ l'équation (4) devient:

$$\frac{dy}{dx} = - \frac{\frac{n^2 \cdot Q^2}{S(y)^2 \cdot R_h(y)^{4/3}}}{1 - \frac{Q^2 \cdot L(y)}{g \cdot S(y)^3}} \quad (5)$$

La simplification de l'expression de la tangente à la ligne d'eau en tout point, du fait de la disparition du paramètre I , est telle qu'il devient matériellement possible de présenter sous forme d'abaques les lignes d'eau correspondant à une gamme très étendue de débits.

On trouvera de tels abaques ainsi que leur mode d'utilisation à la fin de la présente annexe.

Dans la pratique, on peut être amené à résoudre un tel type de problème pour vérifier la capacité d'un ouvrage de pente très faible, si l'on craint que les tassements ne viennent annuler tout ou partie de cette pente.

4) APPLICATION PRATIQUE DES PRINCIPES DE RESOLUTION

4.1) Choix du coefficient de rugosité

Il a été vu au paragraphe 2.3 que les pertes de charge par frottement peuvent être considérées comme proportionnelles au coefficient de Manning "n" dont la valeur dépend du type d'ondulation. On retiendra en pratique les valeurs suivantes:

profondeur approximative de l'onde (mm)	13	26	60
n	0,024	0,027	0,030

Des expériences menées en vraie grandeur sur des formes circulaires aux U.S.A ont permis de montrer que le coefficient de rugosité de Manning était en fait une fonction décroissante du rayon. Dans le cas des ondulations de grande profondeur on pourra tenir compte de cette diminution en prenant:

- $n = 0,035 - 1,6 \cdot 10^{-3} V$ (V en m) pour $3 m \leq V \leq 5 m$
- $n = 0,027$ au-delà.

Dans le cas particulier des arches ou des buses munies d'un radier on pourra déduire un coefficient de rugosité moyen de la formule suivante:

$$n_{\text{moyen}} = \left[\frac{n_{\text{lit}}^{3/2} \chi(\text{lit}) + n_{\text{parois}}^{3/2} \chi(\text{parois})}{\chi(\text{lit} + \text{parois})} \right]^{2/3}$$

où:

- n_{lit} est le coefficient de rugosité du fond du lit (0,012 lorsqu'il s'agit d'un radier béton);
- $\chi(\dots)$ désigne le périmètre mouillé de la fraction de l'ouvrage décrite dans la parenthèse.

4.2) Prise en compte des pertes de charge à l'entrée

Il a été supposé jusqu'ici, à titre de simplification, que la mise en vitesse des eaux entre l'amont et l'intérieur de la buse se faisait à charge spécifique constante (sans perte d'énergie). Dans la réalité, elle s'accompagne d'une perte de charge dont la valeur dépend de l'importance du rétrécissement, de la forme de l'entrée et de la vitesse des eaux. On peut considérer en pratique que la perte de charge s'exprime sous la forme:

$$H_{\text{am}} - H_e = K_e \frac{U_e^2}{2g} \quad (6)$$

où U_e est la vitesse moyenne dans la section d'entrée et K_e un coefficient de forme dont on pourra prendre la valeur dans le tableau suivant (extrait du dossier P.O.H, lui-même établi à partir de documents américains):

Type de l'entrée	K_e
Extrémité en saillie	0,9
Extrémité taillée en sifflet	0,7
Extrémité avec mur de tête et murs en aile	0,5

En exprimant dans (6) H_e à l'aide de la relation (1), on peut écrire:

$$H_{\text{am}} = y_e + \frac{U_e^2}{2g} + K_e \frac{U_e^2}{2g} = y_e + \frac{(\sqrt{1+K_e} \cdot Q)^2}{2g \cdot S(y_e)^2} \quad (7)$$

La manière de prendre en compte cette perte de charge dépend du type de problème envisagé:

a) Problème à débit Q_0 imposé (type A)

Les principes de résolution exposés en 3.2 restent entièrement valables, mais les encadrements qui y sont proposés ne concernent alors plus la charge amont H_{am} , mais la charge dans la section d'entrée H_e .

Il est facile de passer de cette dernière à H_{am} en ajoutant la perte de charge, soit $K_e \cdot U_e^2 / 2g$, mais il est encore plus simple de remarquer que la relation (7) implique que:

$$H_{\text{am}}(y, Q) = H(y, \sqrt{1+K_e} \cdot Q) \quad (8)$$

Moyennant cette remarque, il suffit donc de résoudre le problème de la manière indiquée en 3.2 et de lire, pour une valeur donnée de y , les valeurs de la charge dans la section d'entrée sur l'horizontale d'ordonnée Q_0 et les valeurs de la charge à l'amont sur l'horizontale d'ordonnée $\sqrt{1+K_e} \cdot Q_0$ (voir exemple en 5.2.1 ci-après).

b) Problème à charge amont H_{S0} imposée (type B).

Ce type de problème est moins facile à traiter, car la charge dans la section d'entrée n'est plus constante, mais devient fonction du débit Q .

La relation (8) montre que le point figuratif de la section d'entrée (y_e, Q), doit se trouver sur la courbe déduite de la courbe $H_{S0} = C^t e$ par une affinité de rapport $1/\sqrt{1+K_e}$, cette dernière n'étant effectivement pas une courbe $H = C^t e$.

Dans ce cas, le mode de résolution proposé (qui n'est pas très commode mais devrait permettre de résoudre les cas relativement rares où un problème de type B peut se poser) consiste à suivre la démarche suivante:

- tracer sur une copie de l'abaque correspondant la courbe affine de la courbe $H_{S0} = H_{am}$ imposée, dans le rapport $1/\sqrt{1+K_e}$;
- procéder comme il est indiqué au paragraphe 3.3, mais en tenant compte de ce que le point représentatif de l'entrée ne se trouve plus sur la courbe $H = H_{S0}$, mais sur la courbe qui vient d'être tracée (voir exemple en 5.2.1 ci-après).

4.3) Conditions auxquelles l'ouvrage doit satisfaire

Malgré toutes les simplifications généralement admises, il est impossible de déduire directement du débit qu'il est nécessaire d'évacuer les caractéristiques géométriques de l'ouvrage. De ce fait, la démarche du dimensionnement consiste à vérifier une ouverture dont les dimensions ont été fixées a priori. Dans la pratique, pour limiter le nombre de tâtonnements, on pourra chercher quel est le diamètre minimal à donner à une buse circulaire pour que les critères donnés ci-après soient satisfaits et en déduire l'ordre de grandeur des dimensions de la forme envisagée.

On rappelle en outre que toute vérification peut être superflue dès lors que l'ouvrage retenu conserve à peu de choses près les dimensions originales du cours d'eau et que ce dernier est réputé stable.

4.3.1) Fonctionnement à surface libre

Comme il a été vu au chapitre 3, les buses ne doivent pas normalement fonctionner en charge, ce qui exige de respecter une certaine revanche entre la surface libre de l'écoulement et le sommet de l'ouvrage.

De plus, de façon générale pour les ouvrages voûtés, il existe une valeur de la profondeur " y ", notée y_0 , au-delà de laquelle un même débit Q peut être évacué sous deux profondeurs normales y_n différentes (cette zone est représentée en pointillés sur les abaques situés à la fin de la présente annexe, ainsi que sur les courbes du paragraphe 3 ci-dessus). Une valeur approchée de y_0 est donnée par:

$$y_0 = V [0,725 + 0,1 (V/D)]$$

Au-delà de cette limite, il existe un risque important de voir apparaître des phénomènes d'instabilité pouvant aboutir à la mise en charge de l'ouvrage; elle servira donc très naturellement comme critère pour définir la limite des écoulements à surface libre.

Dans la pratique, on vérifiera que:

$$y_{av} \leq y_0 \quad , \quad y_e \leq y_0 \quad , \quad H_{am} \leq 1,2 y_0$$

Cette dernière expression tenant compte de la perte de charge à l'entrée et de la vitesse incidente, qui limitent la hauteur d'eau à l'intérieur de l'ouvrage.

4.3.2) Evacuation du débit

Comme il a été vu en 3.1, la donnée principale est généralement le débit de projet Q .

Si le problème est de type A, il suffira surtout de vérifier que les autres critères sont satisfaits.

Si le problème est de type B, il faudra vérifier que le débit Q est inférieur à la valeur estimée à partir de H_{am} suivant les indications du paragraphe 3.3.

4.3.3) Limitation de la surélévation des eaux à l'amont

Cette limitation concerne essentiellement les problèmes de type A, pour lesquels on peut, en suivant les indications du paragraphe 3.2, estimer un encadrement des profondeurs à l'entrée et à l'amont. Il faudra vérifier que la valeur plausible retenue à partir de cet encadrement reste inférieure à la valeur admissible y_{max} .

4.3.4) Limitation de la vitesse des eaux

L'accent a été mis au chapitre 3 sur la nécessité de prévoir systématiquement des dispositifs tels que murs ou radiers parafoilles, solidaires des extrémités et destinés à protéger celles-ci ainsi que les remblais environnants. Ces dispositifs doivent être conçus et dimensionnés en fonction de la vitesse des eaux et de la configuration du site (caractéristiques des matériaux du fond du lit), toutefois, leur efficacité ne pouvant être absolue, on s'efforcera si nécessaire d'adopter par ailleurs des dispositions tendant à limiter la vitesse des eaux (cf § 3.3.2.2 et 3.3.5.2).

5) NOTICE D'UTILISATION DES ABAQUES

5.1) Principe d'établissement

La multiplicité des formes proposées par les fabricants rend impossible l'établissement d'abaques couvrant tous les cas de figure. La modélisation utilisée ici comporte un demi-cercle en partie supérieure et une anse de panier en partie inférieure, avec la condition supplémentaire que la tangente au point de raccordement soit parallèle à la corde (fig. 15).

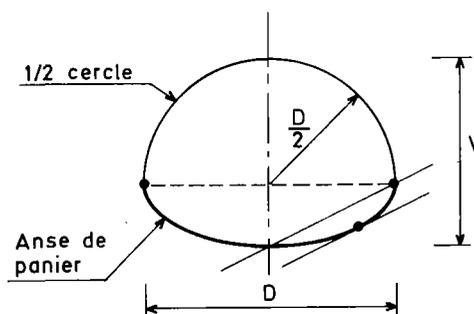


Figure 15

Les abaques sont tracés pour des valeurs de V/D allant de 0,5 à 1 avec un pas de 0,1, les formes obtenues par la modélisation ci-dessus étant reportées sur chacun d'entre eux. Ils couvrent la plupart des formes habituelles, depuis l'arche plein-cintre jusqu'à la buse circulaire, cependant, on devra prendre soin de vérifier dans chaque cas particulier que la forme envisagée est convenablement représentée par cette modélisation*.

* Des programmes développés sur calculatrice de poche sont disponibles auprès de la DOA du SETRA. Ils remplissent les mêmes fonctions que les abaques en tenant compte de la forme réelle des ouvrages, pourvu que ceux-ci ne comportent pas plus de trois rayons de courbure.

5.2) Mode d'utilisation

5.2.1) Abaques généraux

a) Abaques n° 1 à 6

Ces abaques sont directement représentés sous la forme de la figure 4 et, plus généralement, de toutes les figures du paragraphe 3. Pour qu'ils soient d'application générale, tous les paramètres ont été rendus adimensionnels; en particulier, les paramètres représentant respectivement le débit et la pente s'écrivent:

$$\bar{Q} = \frac{Q}{DV\sqrt{2gV}} \quad K = \frac{V^{1/6}}{n} \sqrt{\frac{I}{2g}}$$

Q étant le débit réel, D et V les dimensions de l'ouvrage (fig. 15), n le coefficient de rugosité de Manning (cf § 4.1), I la pente de l'ouvrage (ex: 0,01 pour 1%).

Pour l'utilisation pratique de ces abaques, il est conseillé de photocopier celui qui est relatif à la forme envisagée et de se reporter aux paragraphes 3.2 ou 3.3, suivant que l'on a à résoudre un problème de type A ou de type B.

b) Abaque n° 7

Cet abaque donne, pour chaque forme de buse considérée, la section mouillée en fonction du taux de remplissage. Il permet, à partir d'un débit Q, de calculer la vitesse moyenne par:

$$U = \frac{Q}{S}$$

c) Exemple d'application

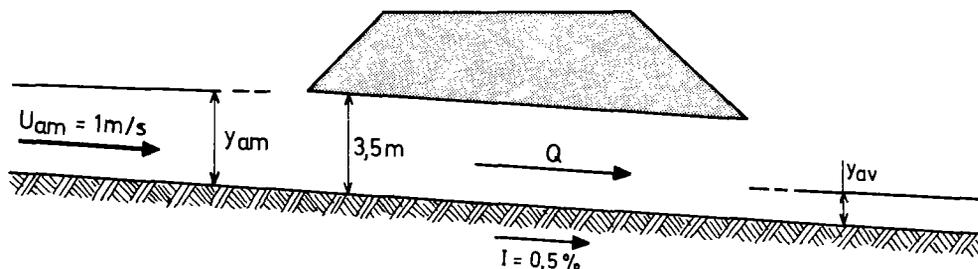


Figure 16

Considérons l'ouvrage représenté sur la figure 16 ci-dessus, avec les données suivantes:

$$\text{Buse-arche: } V = 3,5 \text{ m} \quad D = 5 \text{ m}, \quad V/D = 0,7, \quad U_{am} = 1\text{m/s}.$$

On choisit par ailleurs:

$$n = 0,035 - 1,6 \cdot 10^{-3} \times 3,5 = 0,029 \quad (\text{cf } \S 4.1)$$

$$K_e = 0,7 \quad (\text{cf } \S 4.2)$$

* Problème à débit imposé

Supposons que l'on ait $Q = 30 \text{ m}^3/\text{s}$ et $y_{av} = 1 \text{ m}$, on obtient successivement:

$$\bar{Q} = \frac{Q}{DV\sqrt{2gV}} = \frac{30}{5 \times 3,5 \times \sqrt{2 \times 9,81 \times 3,5}} = 0,207$$

$$K = \frac{3,5^{1/6}}{0,029} \sqrt{\frac{0,005}{2 \times 9,81}} = 0,678 \quad , \quad \frac{y_{av}}{V} = \frac{1}{3,5} = 0,286$$

La vitesse à la sortie de l'ouvrage n'est par contre pas changée par rapport au cas précédent.

On constate par ailleurs sur la figure 17 que la charge amont est sensiblement identique à celle obtenue précédemment (il s'agit simplement d'une coïncidence).

Il faut noter à ce propos que, contrairement au cas où on néglige la perte de charge à l'entrée, la charge amont n'est plus en théorie encadrée par celles trouvées dans le cas d'un ouvrage infiniment court puis infiniment long. Dans l'exemple ci-dessus, la charge amont passe par un minimum lorsque la longueur de l'ouvrage est telle que son entrée se trouve au point C.

* Problème à charge amont imposée

Supposons maintenant que l'on ait $H_{am} = 3,5$ et $y_{av} = 2,5$ m.

D'après les indications du paragraphe 4.2,b, il faut commencer par tracer la courbe E affine de la courbe $H_s/V = 1$, dans le rapport:

$$k = 1/\sqrt{1+0,7} = 0,767$$

Cette courbe, sur laquelle le point représentatif de l'entrée doit se trouver par hypothèse, peut être facilement tracée à partir de 4 ou 5 points; elle est représentée sur la figure 18 ci-dessous.

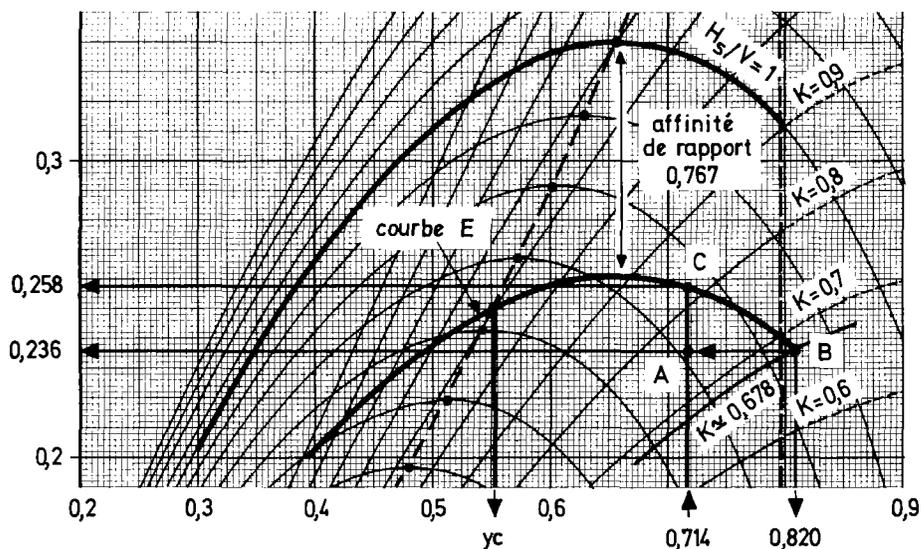


Figure 18

On se trouve en présence d'un régime fluvial avec $y_c < y_{av} < y_n$, décrit en 3.3.1,b. La ligne d'eau a l'allure représentée sur la figure 13,a.

K conserve la même valeur que ci-dessus, et l'on a:

$$\frac{y_{av}}{V} = \frac{2,5}{3,5} = 0,714$$

- Dans l'hypothèse d'un ouvrage infiniment court, entrée et sortie sont confondues. Le point correspondant, C, se trouve donc à l'intersection de la courbe E avec la verticale $y/V = 0,714$.

On obtient alors:

$$\bar{Q} = 0,258$$

$$Q = 0,258 \times 3,5 \times 5 \times \sqrt{2 \times 9,81 \times 3,5} = 37,4 \text{ m}^3/\text{s}$$

L'abaque n° 7 donne

$$S_e = 3,5 \times 5 \times 0,62 = 10,85 \text{ m}^2$$

$$U_e = 37,4/10,85 = 3,45 \text{ m/s}$$

- Dans l'hypothèse d'un ouvrage infiniment long, le régime uniforme règne à l'entrée, qui est donc représentée par le point B, intersection de la courbe E avec la courbe K = 0,678 (on constate que y_{am} se trouve légèrement au-dessus de la zone permise). La ligne d'eau est alors représentée par le segment BA, et rejoint y_{av} à la sortie de l'ouvrage. On obtient cette fois:

$$\bar{Q} = 0,236$$

$$Q = 0,236 \times 3,5 \times 5 \times \sqrt{2 \times 9,81 \times 3,5} = 34,2 \text{ m}^3/\text{s}$$

La plus grande vitesse est atteinte à la sortie, où la profondeur d'eau est la plus faible. On trouve:

$$U_s = 34,2/10,85 = 3,15 \text{ m/s.}$$

5.2.2) Abaques relatifs aux ouvrages de pente nulle (n°8 et n°9)

a) Présentation

Ces abaques constituent pour chacune des valeurs de V/D envisagées précédemment, un moyen de tracer les lignes d'eau les plus couramment rencontrées dans la pratique et par là même de lever l'indétermination propre aux problèmes à pente nulle. Cependant, seul le problème de type A (débit imposé) est susceptible d'avoir une résolution n'exigeant pas d'itérations, contrairement au problème de type B (charge imposée) qui ne sera pas traité ici. Ce dernier type de problème qui se pose bien moins fréquemment que le premier, peut toujours être résolu à partir de l'emploi répété du mode de résolution relatif au problème de type A pour plusieurs débits successifs réajustés jusqu'à convergence vers la valeur de la charge que l'on impose.

Chacun des graphes proposés présente pour une gamme étendue de débits (représentés par le paramètre adimensionnel \bar{Q} défini en 5.2.1.a)) la branche fluviale de la ligne d'eau unique associée à une valeur de Q donnée (cf § 2.3 et § 3.4). En l'absence de tout dispositif tendant à imposer une profondeur d'eau à l'entrée anormalement basse (tel qu'une vanne par exemple), la ligne d'eau réelle pour un débit Q donné est constituée par tout ou partie de la branche fluviale se rapportant à ce débit. C'est pourquoi il a été choisi de dessiner les lignes d'eau à partir d'une origine où la hauteur d'eau serait égale à la profondeur y_0 définie en 4.3.1 et en figurant le sens de l'écoulement de la gauche vers la droite. Les courbes ne sont interrompues que lorsque la hauteur d'eau atteint la valeur de la profondeur critique relative à la valeur de Q à laquelle elles sont associées; bien que la ligne d'eau ait à cette extrémité de la courbe une tangente qui s'approche de la verticale, ce qui est en contradiction avec une des hypothèses de base de l'hydraulique à surface libre (filets liquides à courbure quasi nulle), elle y a été figurée en vue de fournir une indication sur la localisation d'une éventuelle chute.

En outre, le caractère général de l'application de ces abaques repose sur le fait que les lignes d'eau ont été dessinées dans des axes où ont été portés les paramètres adimensionnels suivants:

$$\text{en abscisse } \frac{n^2 g L_0}{D^{1/3}}, \quad \text{en ordonnée } \frac{y}{V}$$

L_0 désigne ici l'abscisse du point considéré sur la ligne d'eau par rapport à l'origine fictive définie ci-dessus (où la profondeur est égale à y_0); en fait la longueur réelle de l'ouvrage (qui est également appelée L_0 sur la figure 5) est égale à la différence entre l'abscisse de la section de sortie (où règne y_{av}) et celle de la section d'entrée (où règne y_e). Les autres paramètres ont rigoureusement la même signification qu'en 5.2.1.

b) Exemple d'application

On reprend l'exemple du 5.2.1.c) avec toutefois les modifications et les données supplémentaires suivantes:

$$Q = 20 \text{ m}^3/\text{s}, L_0 \text{ (longueur de l'ouvrage)} = 30 \text{ m}, I = 0.$$

Toutes les autres données restent inchangées; on envisage deux cas:

$$\bullet \text{ ler cas } y_{av} = 2,5 \text{ m}$$

La ligne d'eau qu'il s'agit de tracer par interpolation approximative sur une feuille de calque millimétrée amenée en coïncidence avec l'échelle centimétrique des axes du graphe, (cf figure 19), correspond à la valeur de \bar{Q} suivante:

$$\bar{Q} = \frac{Q}{DV\sqrt{2gV}} = \frac{20}{5 \times 3,5 \times \sqrt{2 \times 9,81 \times 3,5}} = 0,138$$

On compare ensuite y_{av} et $y_c (= y_c(Q))$: y_c peut être directement lu sur le graphe correspondant (cf figure 19) ou bien déduit de la lecture de l'abaque général correspondant (ici n°3); on trouve:

$$y_c = 0,390 \times 3,5 = 1,37 \text{ m}$$

On constate que y_{av} est supérieure à y_c et on positionne donc la section de sortie à l'intersection de la ligne d'eau et de la droite horizontale $y = y_{av}$. La section d'entrée est ensuite matérialisée par une verticale située en amont de celle représentant la section de sortie, à une distance de celle-ci donnée, dans l'échelle du graphe, par:

$$\frac{n^2 g L_0}{D^{1/3}} = \frac{(0,029)^2 \times 9,81 \times 30}{5^{1/3}} = 0,145$$

On lit ensuite sur la ligne d'eau la profondeur y_e à l'entrée:

$$y_e = 0,780 \times 3,5 = 2,73 \text{ m}$$

L'abaque général correspondant à la valeur particulière de V/D (ici n°3) utilisé conformément au § 5.2.1 et faisant abstraction des courbes relative à l'écoulement normal, nous donne enfin les valeurs de H_e et H_{am} :

$$H_e = 0,825 \times 3,5 = 2,89 \text{ m et } H_{am} = 0,850 \times 3,5 = 2,98 \text{ m.}$$

*** 2ème cas $y_{av} = 1 \text{ m}$**

On se place sur la même ligne d'eau que précédemment (correspondant à $\bar{Q} = 0,138$). Cette fois y_{av} est inférieure à y_c . On positionne donc la section de sortie sur la verticale passant par l'extrémité de la courbe où $y = y_c$ (cf figure 19). La longueur de l'ouvrage restant la même on peut en déduire comme précédemment la position de la section amont, ainsi que la profondeur d'eau à l'entrée:

$$y_e = 0,630 \times 3,5 = 2,21 \text{ m.}$$

L'abaque n°3 (cf 5.2.1) nous donne les valeurs de H_e et H_{am} correspondantes:

$$H_e = 0,695 \times 3,5 = 2,43 \text{ m et } H_{am} = 0,735 \times 3,5 = 2,57 \text{ m.}$$

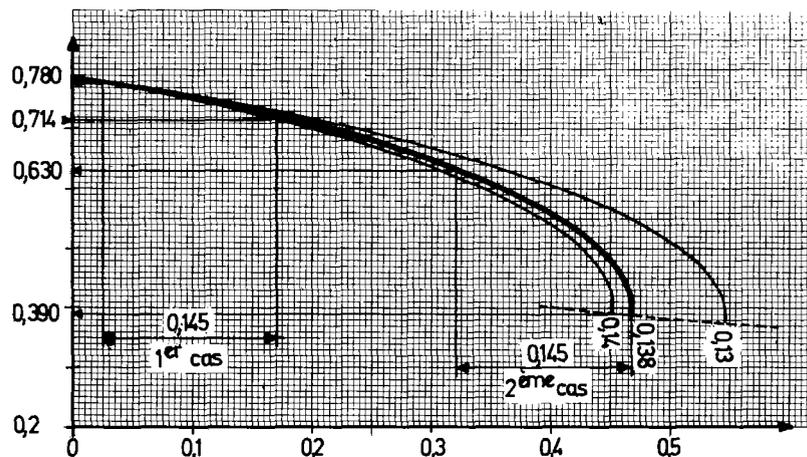
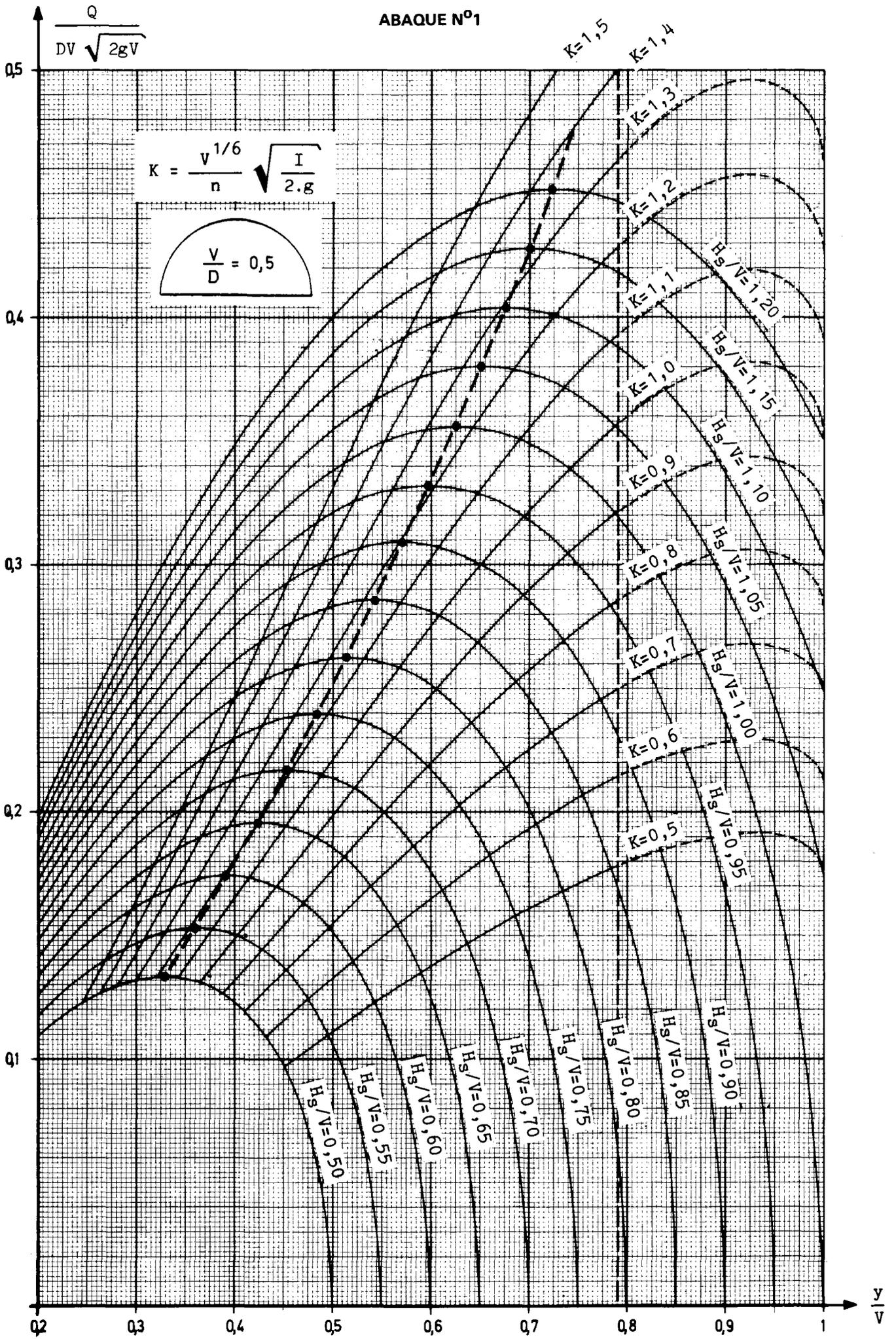
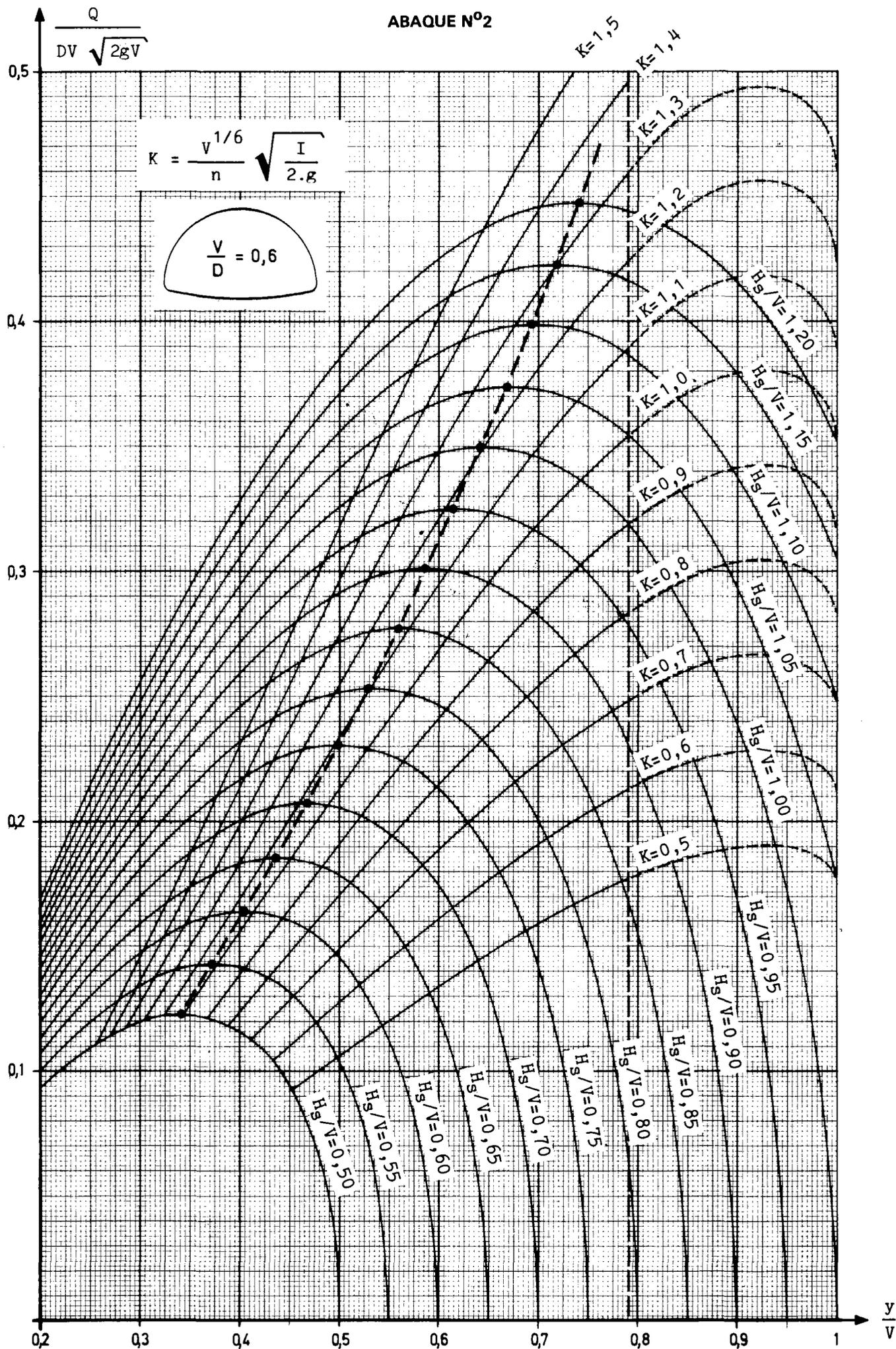


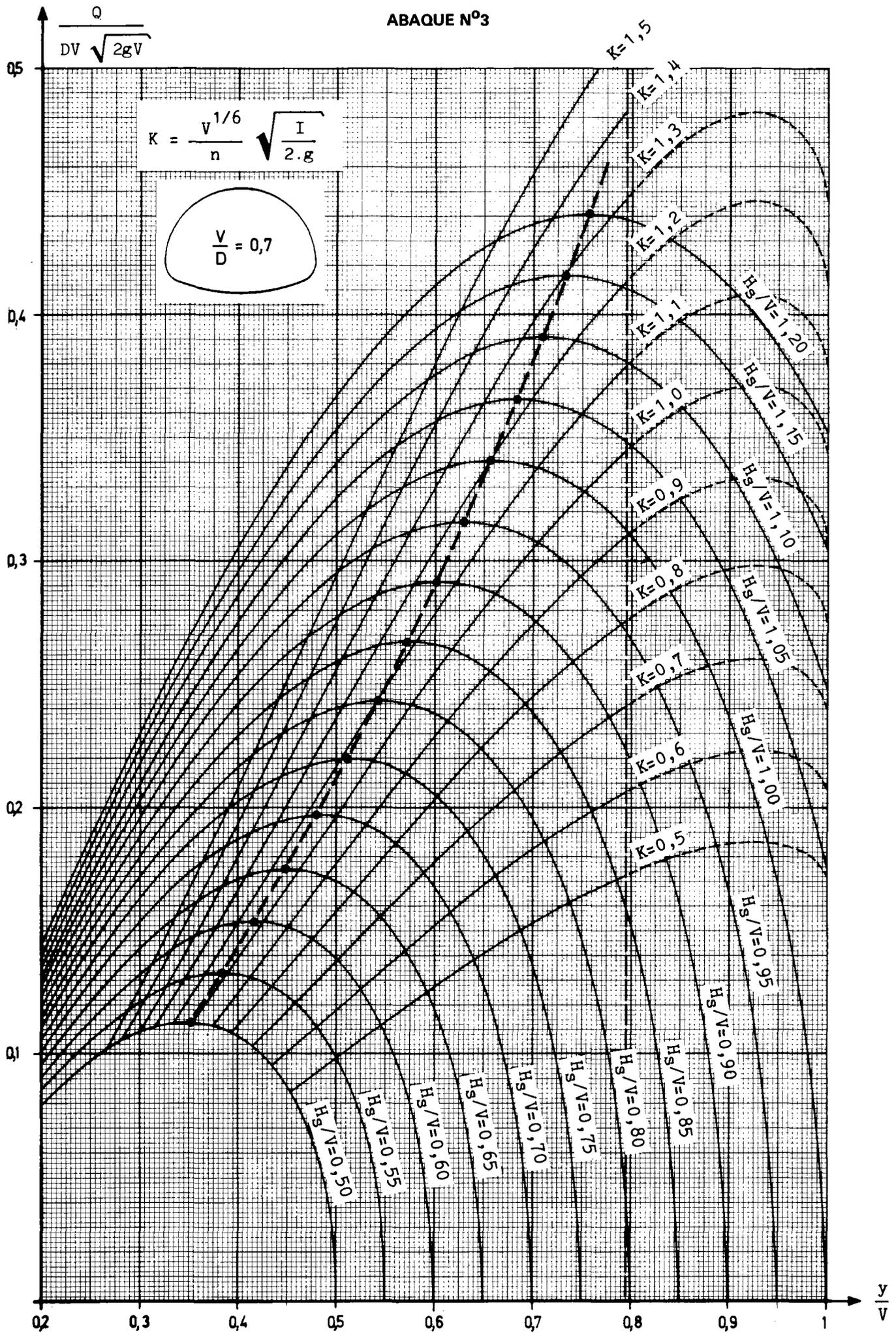
Figure 19

ABAQUE N°1

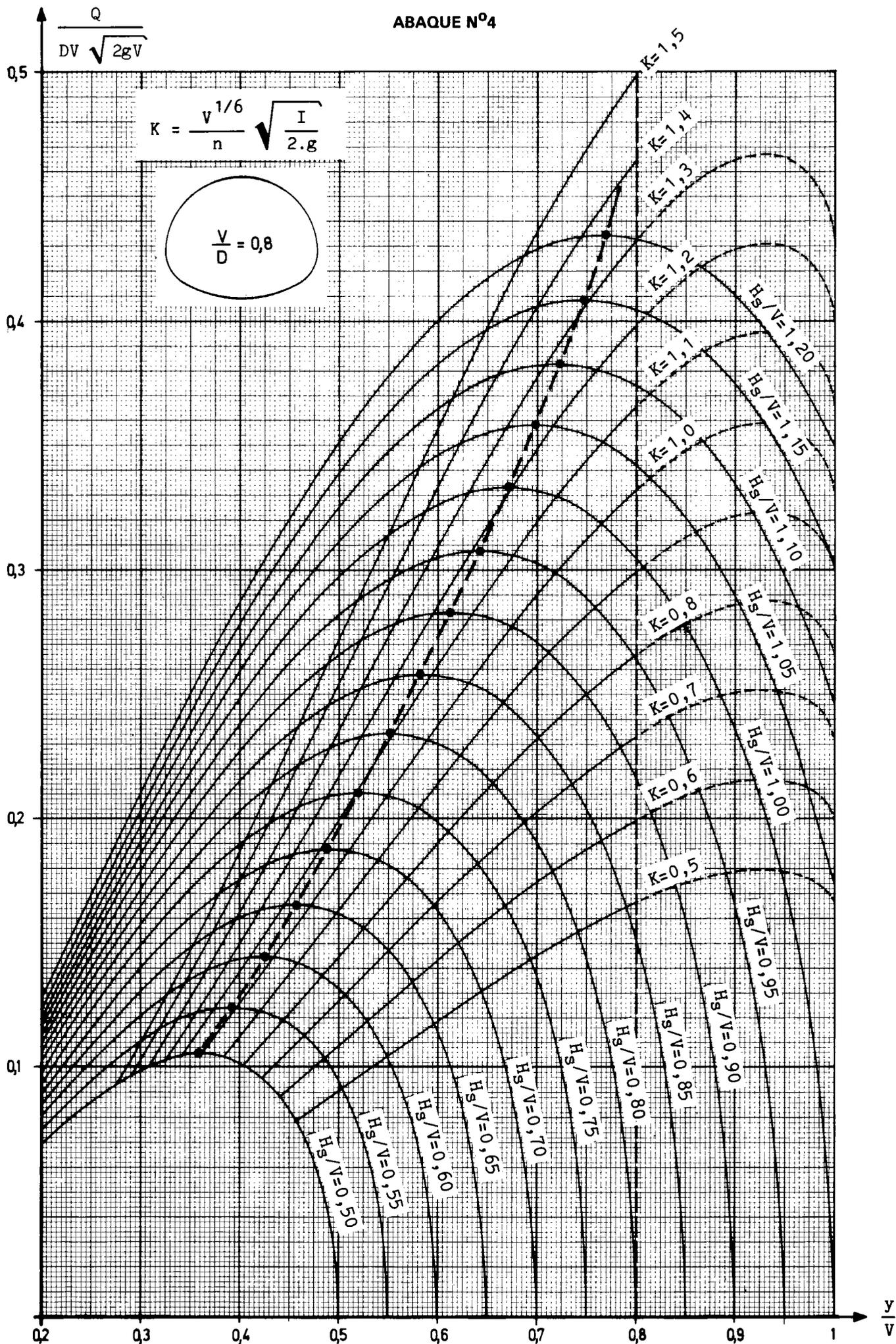


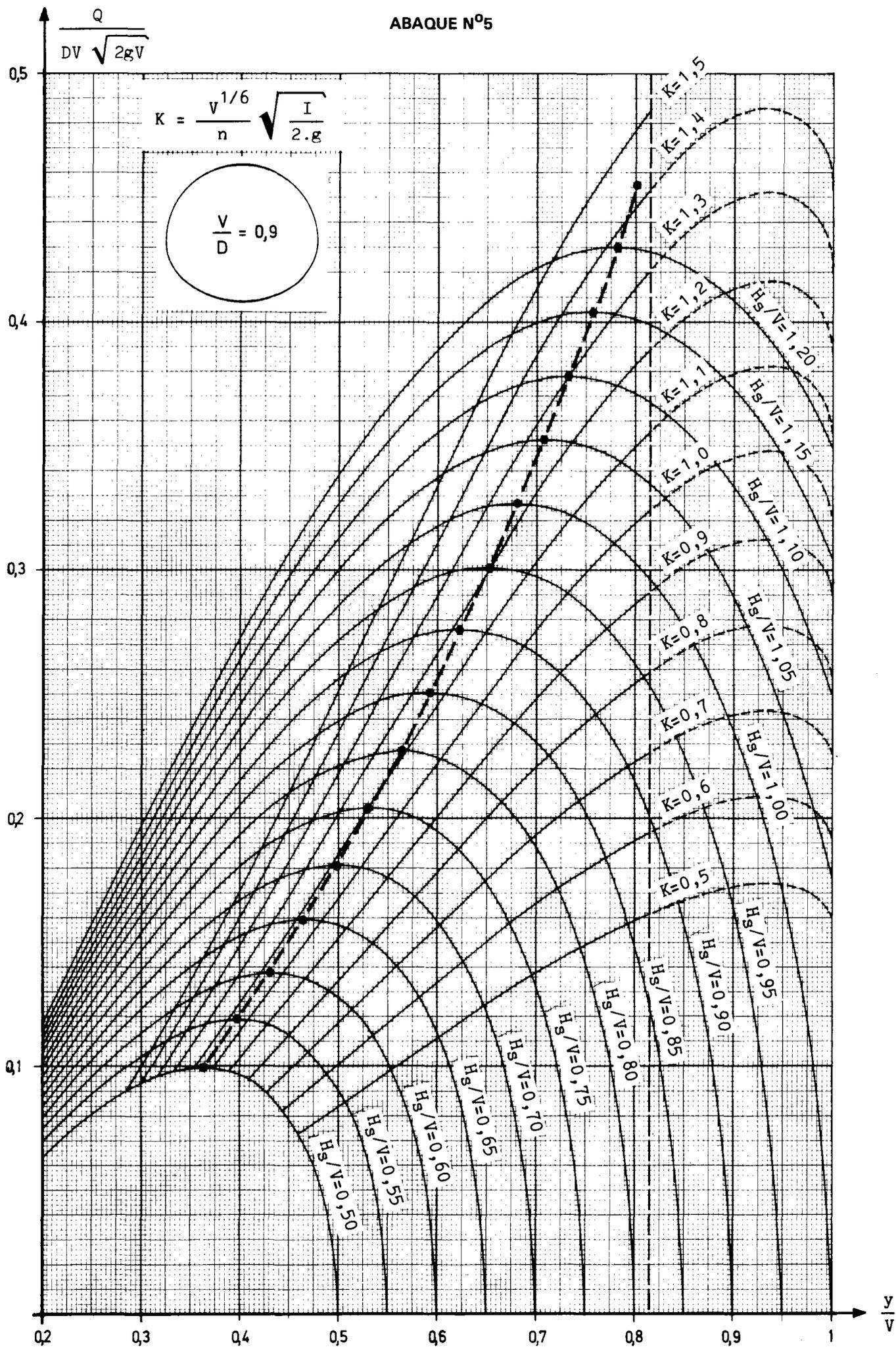
ABAUQUE N°2



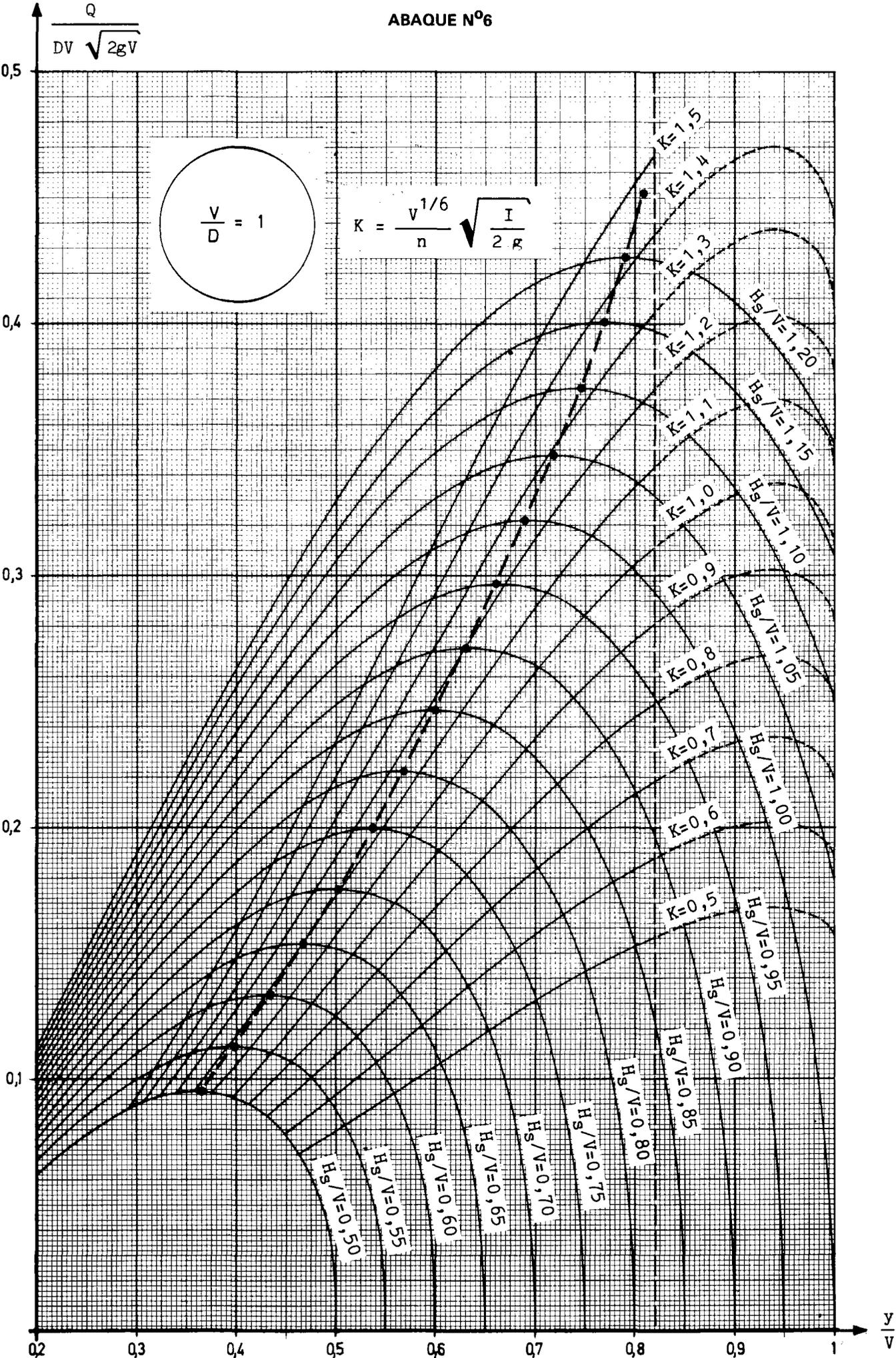


ABAQUE N°4

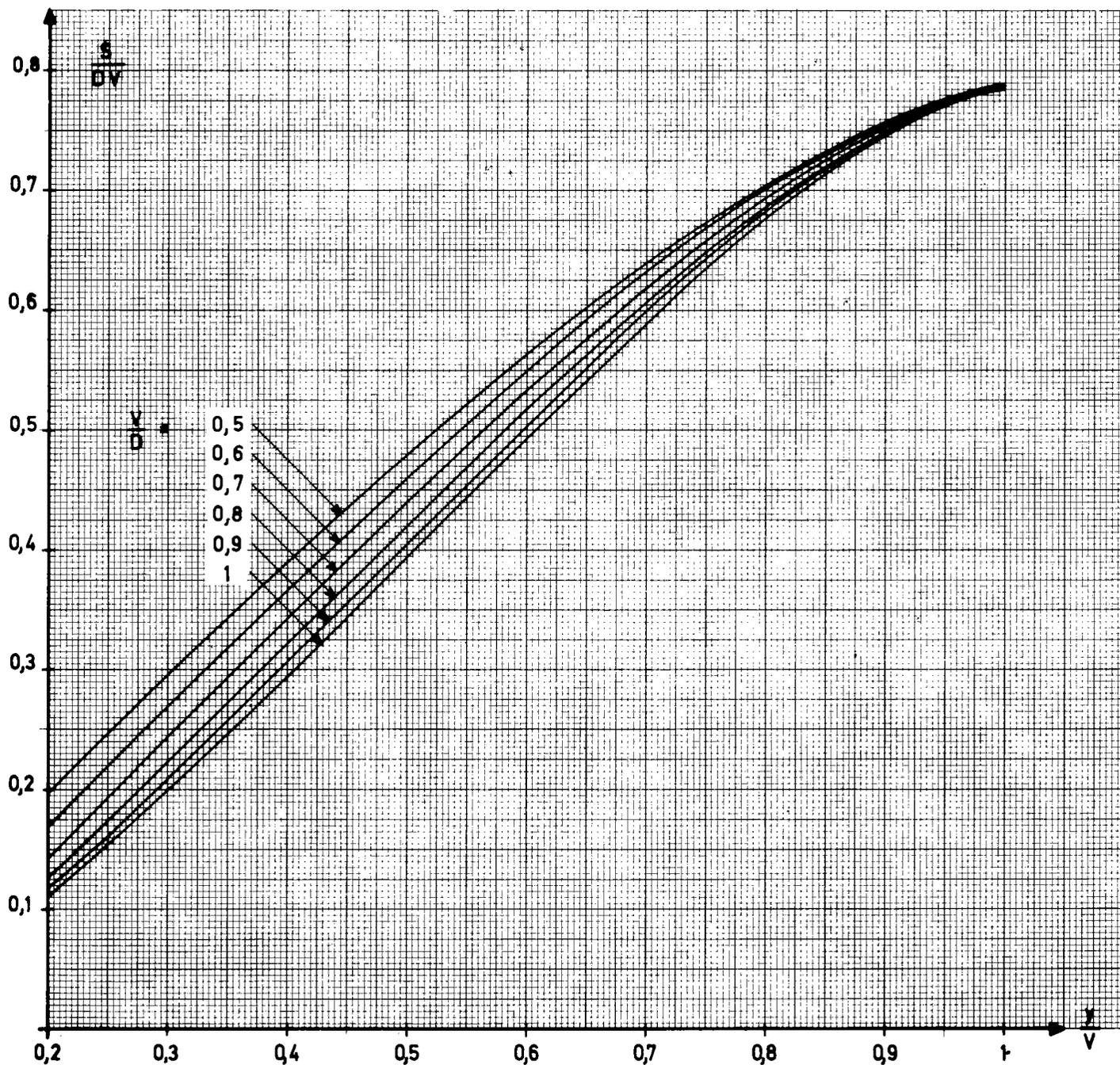




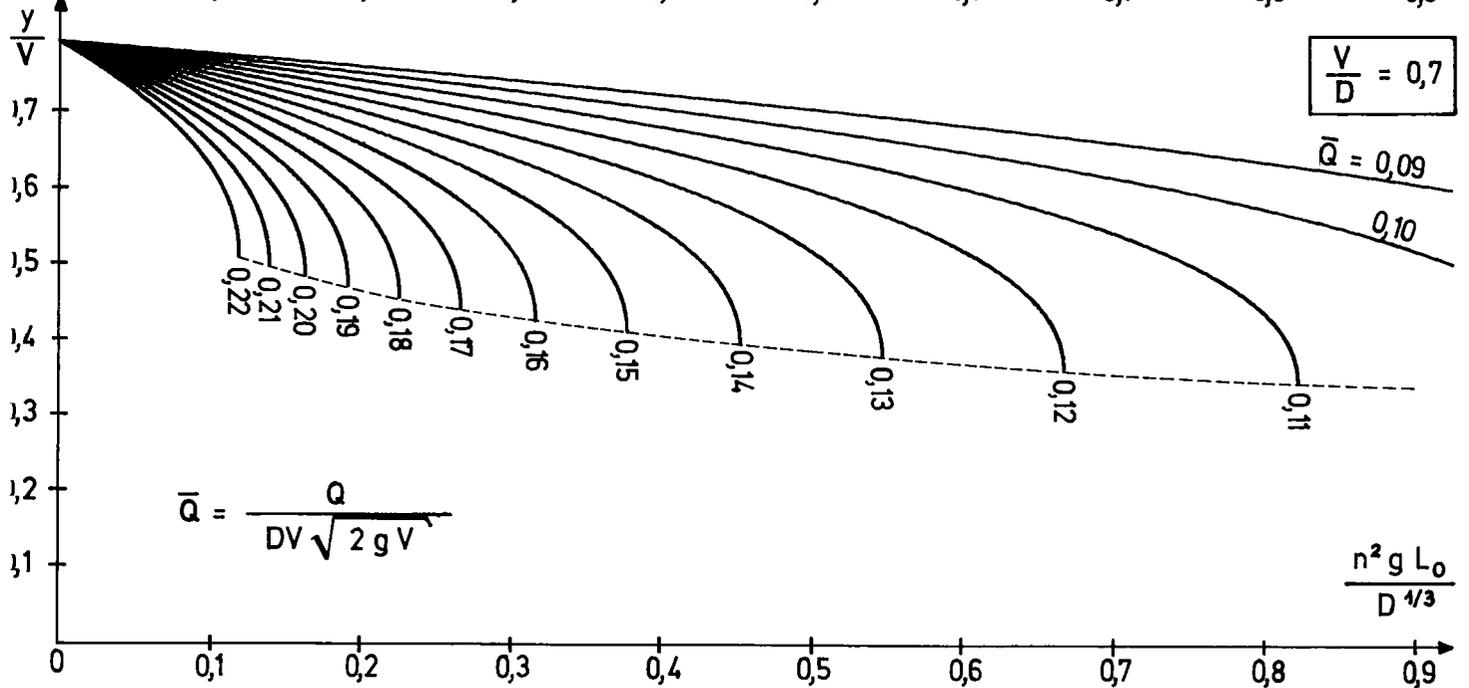
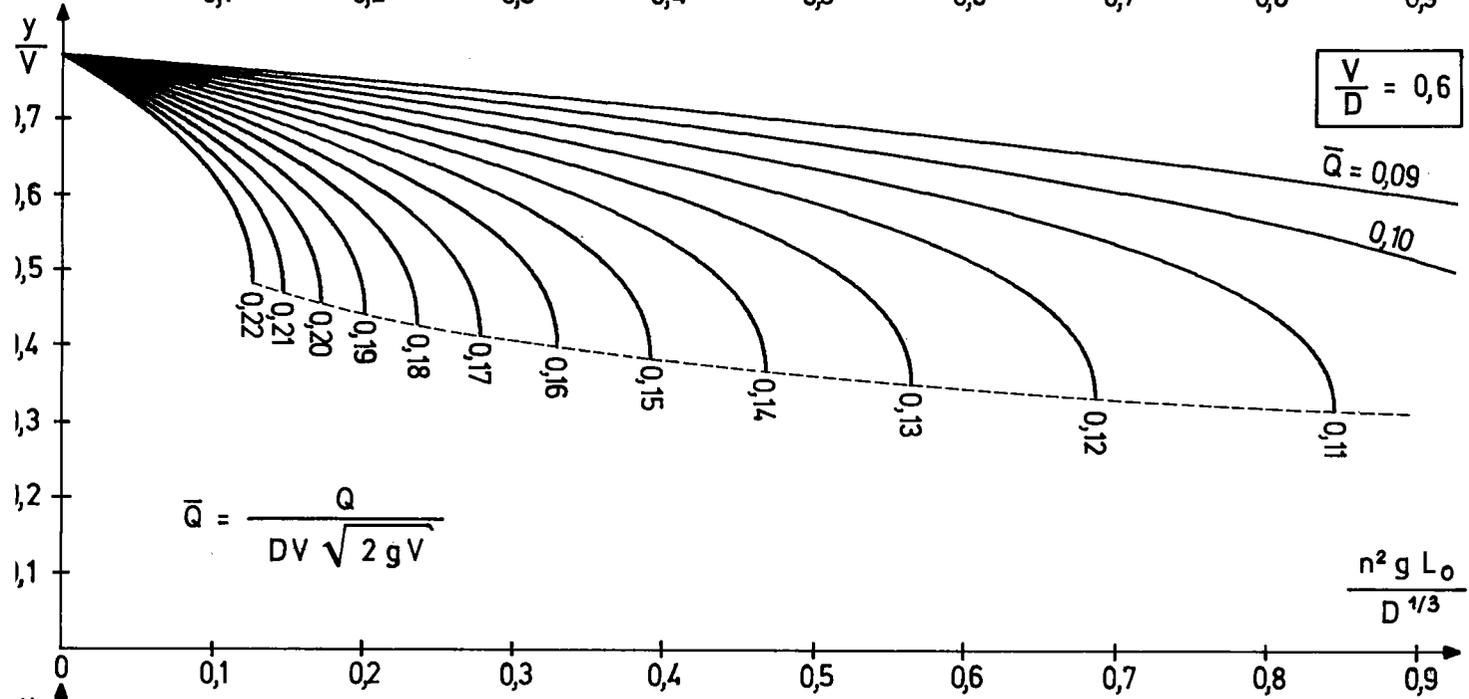
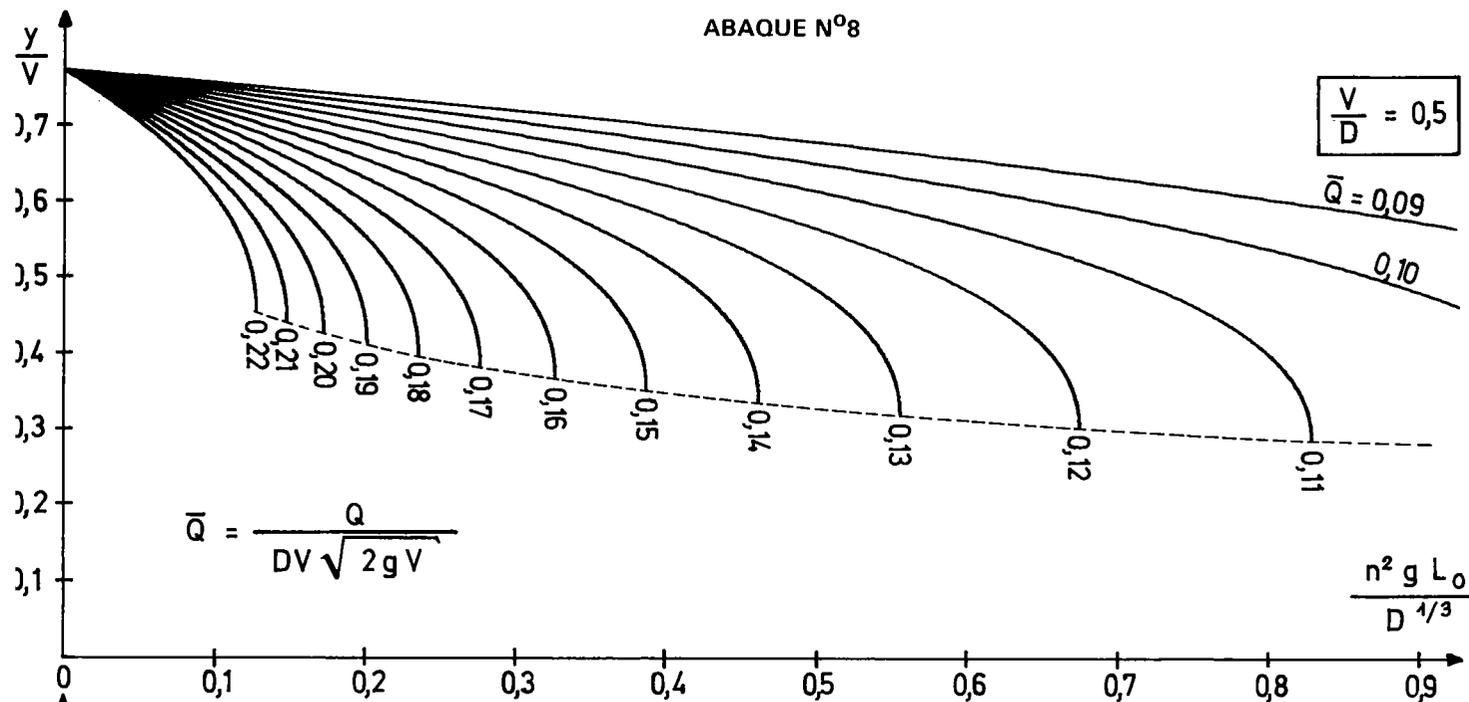
ABAQUE N°6



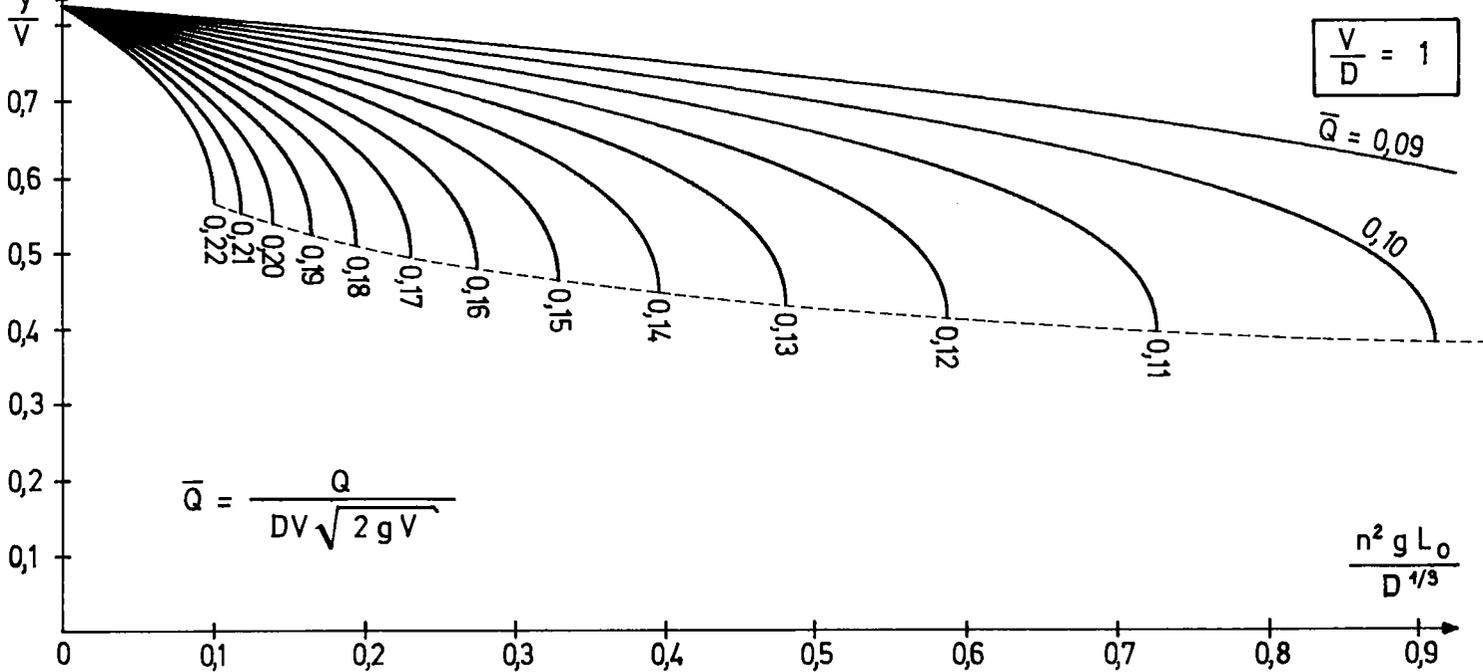
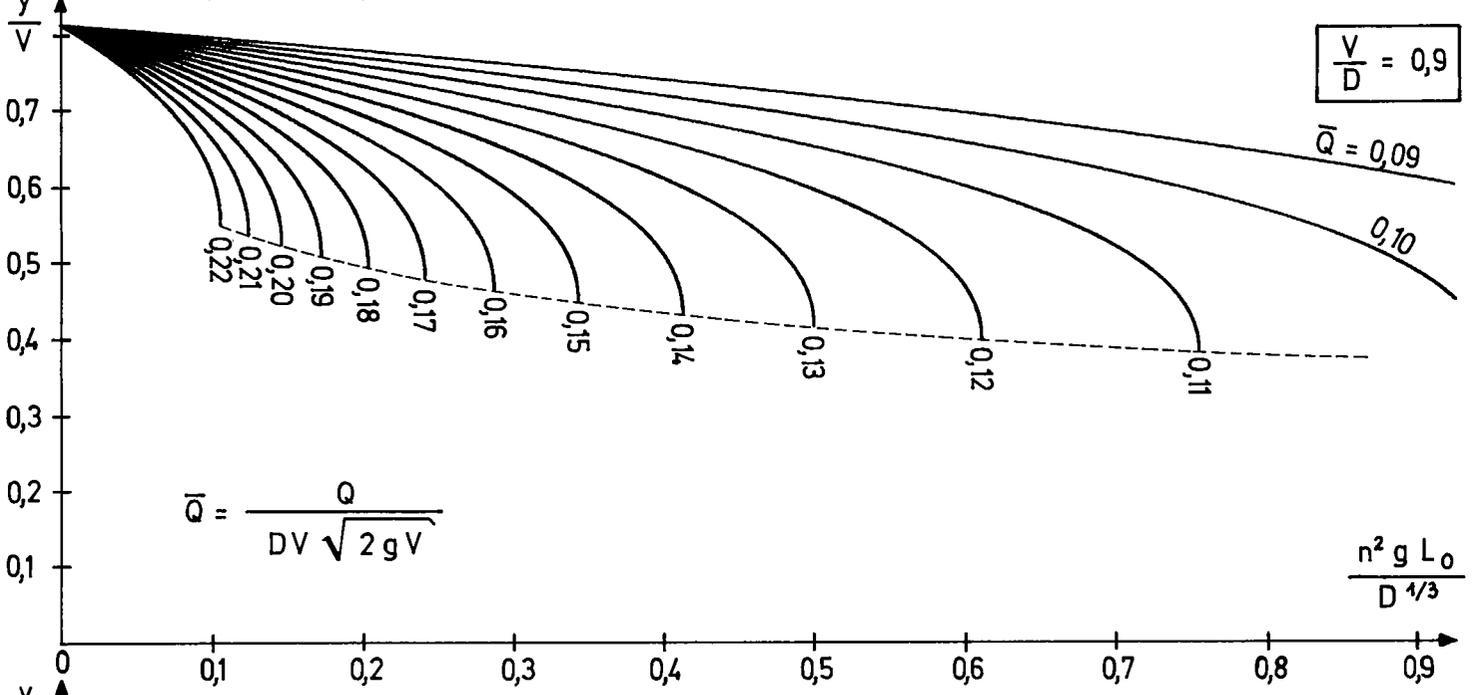
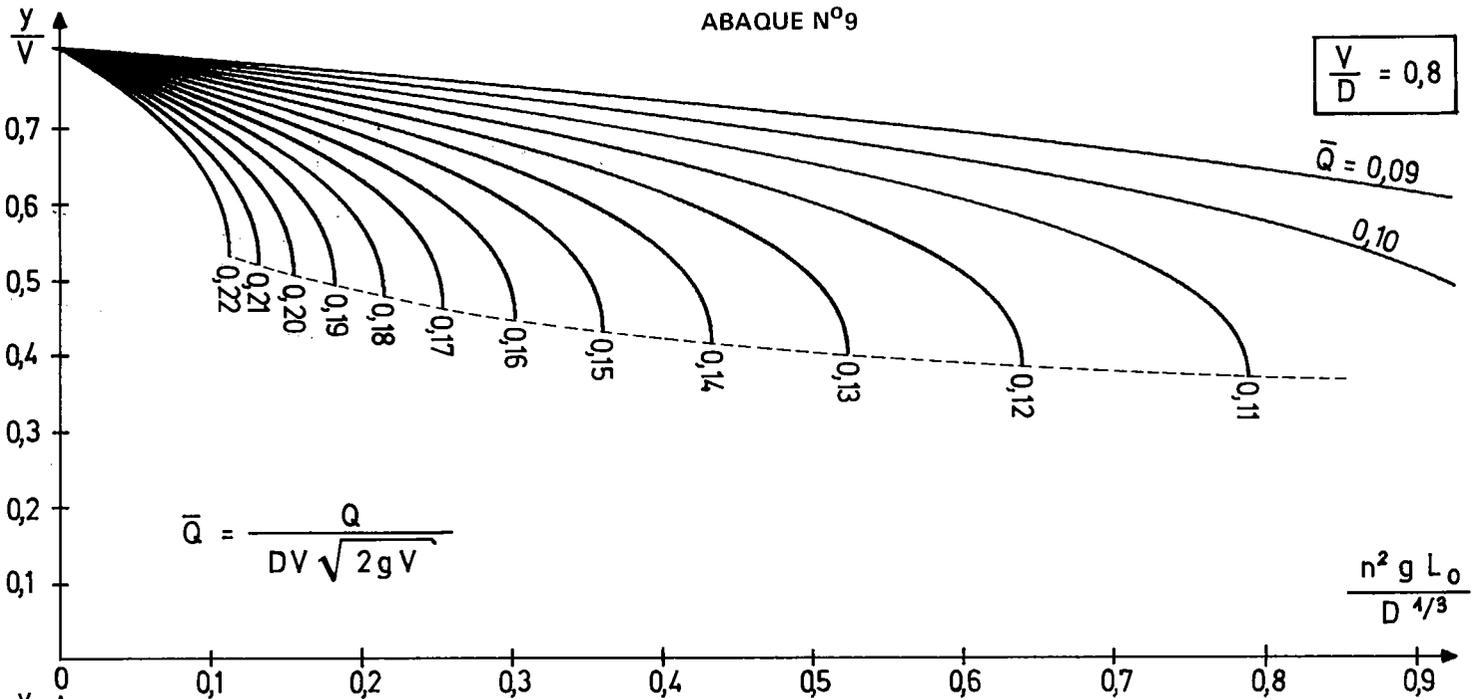
ABAQUE N°7



ABAUQUE N°8



ABAQUE N°9



ANNEXE 3

Modes opératoires

MODE OPERATOIRE N°1

MESURE DE LA RESISTIVITE DU MATERIAU DE REMBLAI A SATURATION

1) PRINCIPE

La résistivité est mesurée après la saturation en eau du matériau de remblai. Le sol soumis à l'essai est d'abord écrêté à 25 mm, puis placé dans une boîte standard* en matériau isolant à trois compartiments (fig. 1 et 2). La saturation en eau est obtenue lorsque le niveau de l'eau se stabilise au niveau de la surface du sol.

On mesure la résistance électrique R du volume de sol et l'on en déduit, en utilisant les caractéristiques géométriques de la boîte (section S, longueur du volume de sol L), la résistivité exprimée en $\Omega \cdot \text{cm}$:

$$\rho = R \frac{S}{L}$$

2) METHODES ET MATERIELS

Il est possible de déterminer la résistance du matériau de remblai par deux méthodes utilisant deux matériels différents.

2.1 - Mesure en courant continu

La cellule de mesure est en matériau isolant (matière plastique incassable et transparente, si possible), de forme parallélépipédique à section carrée S (100 mm x 100 mm), elle est munie de deux électrodes d'alimentation séparant les deux compartiments "eau" du compartiment "sol" central, et de deux électrodes de mesure placées dans le compartiment "sol" et délimitant le volume de sol testé. Les électrodes sont en acier inoxydable (type 18-10). Les électrodes d'alimentation sont des plaques percées à leur partie inférieure de trous de faible diamètre permettant le passage de l'eau seule.

* brevet LCPC.

ANNEXE 3
MODE OPERATOIRE N°1

Les électrodes de mesure sont des cadres ne perturbant pas le champ électrique créé par les électrodes d'alimentation. Les distances entre les deux électrodes de mesure sont de 200 mm et entre une électrode d'alimentation et une électrode de mesure de 50 mm (fig. 1). Le volume des compartiments "eau" doit être inférieur au dixième du volume total de la cellule.

Le dispositif de mesure comporte une alimentation en courant continu (pile, batterie...), un milliampèremètre et un voltmètre (gamme de 1 V à 10 V) (fig. 2). De la résistance $R = V/I$ de l'élément de sol de longueur L , on déduit sa résistivité:

$$\rho = R \frac{S}{L}$$

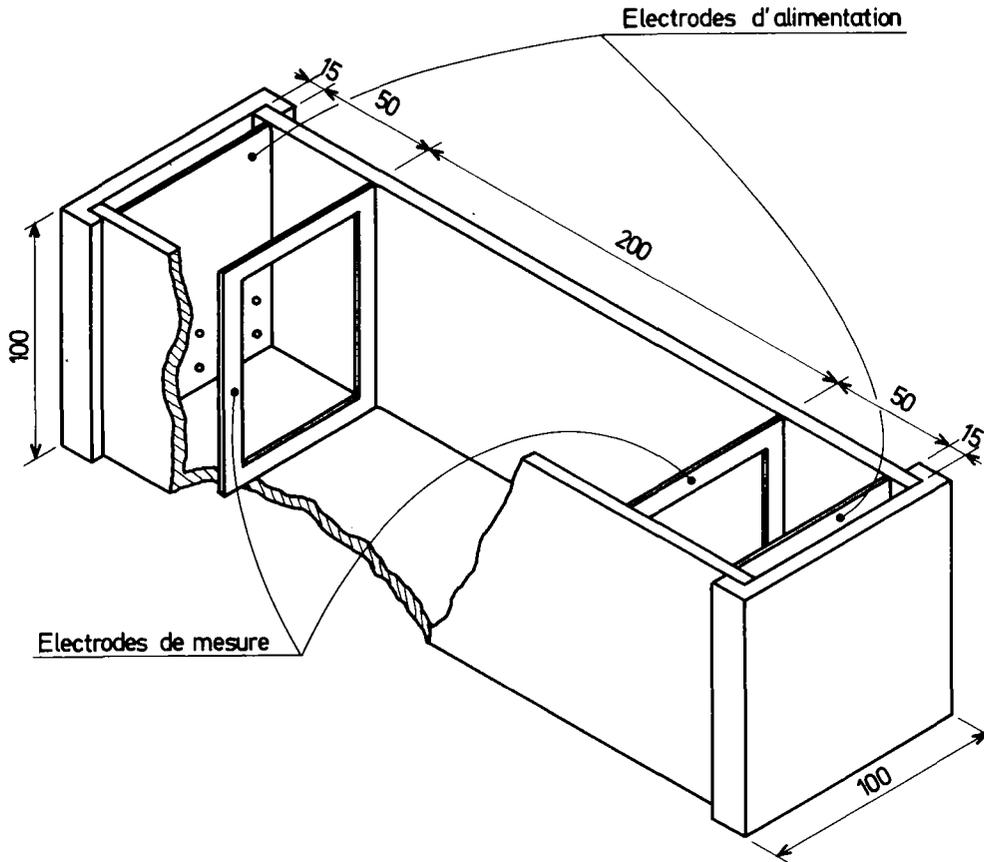


Figure 1 - Cellule de résistivité pour la mesure en courant continu (dimensions en millimètres)

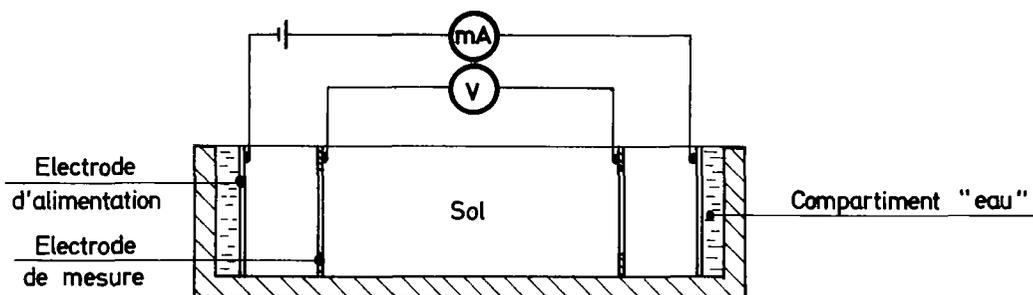


Figure 2 - Dispositif pour la mesure en courant continu

2.2 - Mesure en courant alternatif

Il est possible, en utilisant une alimentation à fréquence moyenne (1000 Hz), de déterminer la résistivité des matériaux de remblai avec une cellule ne comportant que deux électrodes. La boîte possède les mêmes caractéristiques générales que la précédente (fig. 3).

La mesure s'effectue à l'aide d'un pont de Kohlrausch (fig. 4) (pont de Wheastone en courant alternatif) possédant des gammes de 10Ω à $1 M \Omega$. La lecture donne directement la résistance R du compartiment "sol", d'où l'on déduit la résistivité. Cette méthode est adaptée à des mesures sur chantier.

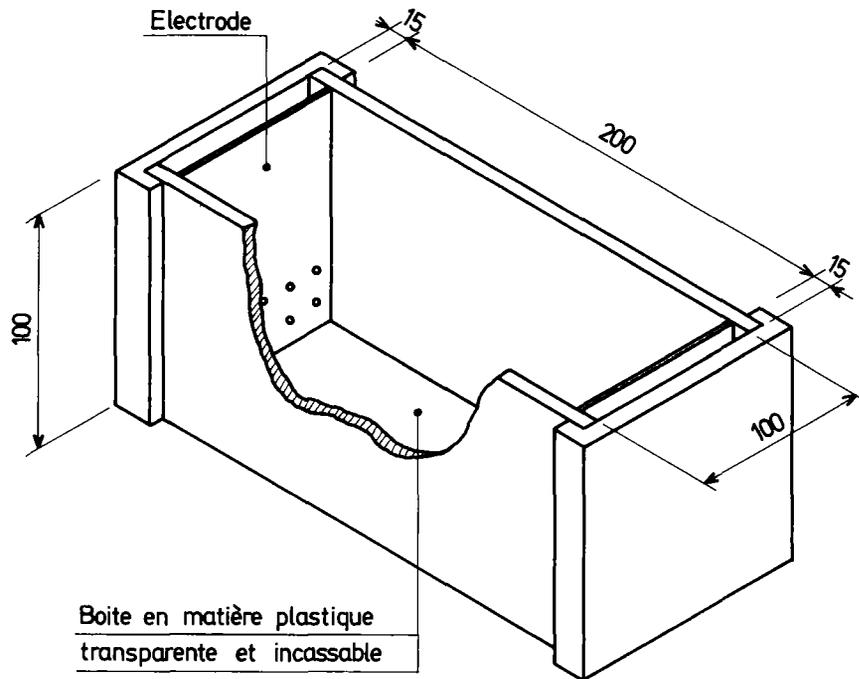


Figure 3 - Cellule de résistivité pour la mesure en courant alternatif (dimensions en millimètres)

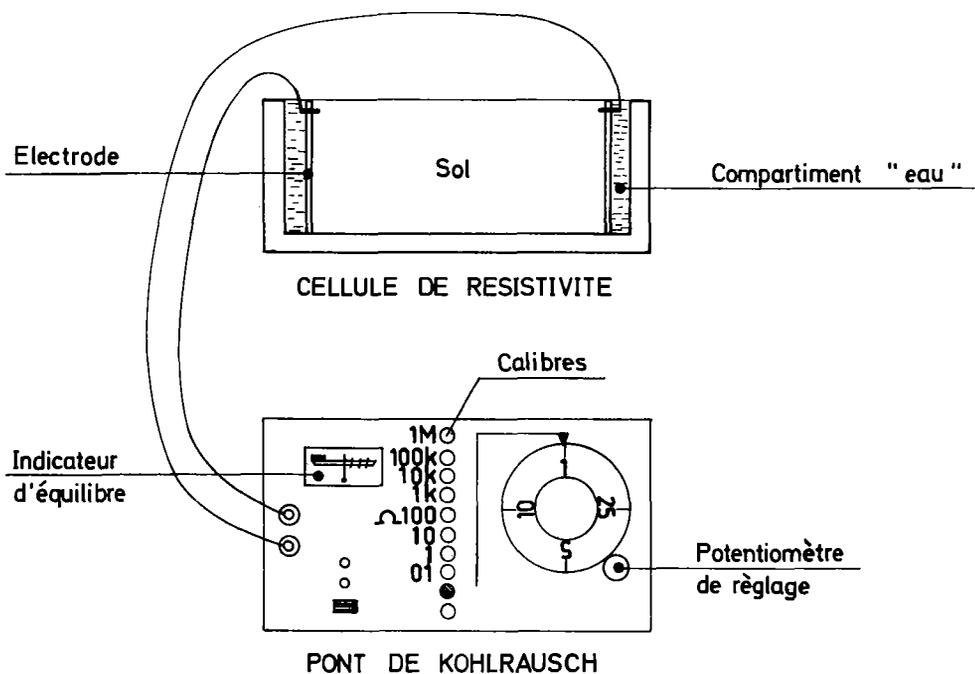


Figure 4 - Dispositif pour la mesure en courant alternatif

3) MISE EN OEUVRE

La boîte est lavée puis rincée avec une eau distillée ou permuetée, de résistivité supérieure à 0,2 MΩ.cm (cette valeur doit être contrôlée dans la boîte elle-même). Le sol écrêté à 25 mm est placé dans le compartiment central par couches successives compactées jusqu'au niveau supérieur de la cellule.

On verse doucement l'eau distillée ou permuetée sur le sol ainsi que dans les deux compartiments "eau" jusqu'à atteindre le niveau supérieur de la cellule dans les trois compartiments, ce qui correspond à la saturation.

Par convention, on adopte la valeur de la résistivité mesurée après une heure de saturation à 20°C. Pour des températures différentes, on effectue une correction de température en utilisant la formule empirique suivante, valable pour des températures comprises entre 5 et 30°C:

$$\rho_{20^{\circ}\text{C}} = \frac{\rho_t (20 + t)}{40}$$

où 't' est la température (en °C).

Remarque: Pour les ouvrages immergés en eau douce, la résistivité est également mesurée en saturant le sol avec l'eau du site.

EXTRACTION PAR L'EAU DES SELS SOLUBLES PRESENTS DANS LES MATERIAUX DE REMBLAI

Les déterminations du pH et des concentrations en sels solubles des matériaux de remblai s'effectuent sur la solution obtenue par lavage de ces matériaux, selon la procédure suivante:

- écrêter le matériau à 25 mm (ne jamais le broyer);
- déterminer la teneur en eau initiale w_0 en % de l'échantillon étudié;
- prélever une masse M de sol correspondant à un kilogramme de sol sec, soit:

$$M = \frac{1}{1 - (w_0/100)} \times 1 \text{ kg}$$

- placer cette masse dans un récipient propre de dimension suffisante (2 à 5 litres) muni d'un système de fermeture;
- ajouter un litre d'eau distillée ou permuetée (de résistivité supérieure à 0,2 MΩ.cm);
- agiter le mélange sol-eau pendant 2 mn au début, laisser reposer 45 mn, agiter à nouveau 2 mn et laisser reposer 15 mn;
- décanter, centrifuger et filtrer (sur papier) environ 200 cm³ de solution qui serviront pour les mesures.

DETECTION DES SULFURES PRESENTS DANS LES MATERIAUX DE REMBLAI

1) GENERALITES

La recherche des sulfures totaux s'effectue sur le matériau écrêté à 2 mm. On attaque les sulfures par un acide fort et on caractérise l'hydrogène sulfuré formé.

En cas de présence de sulfures, leur dosage sera effectué par un laboratoire compétent.

2) RECHERCHE QUALITATIVE DES SULFURES

Dans un tube à essai contenant au moins 5 grammes d'échantillon, ajouter quelques gouttes d'eau distillée ou permutée et 1 ml d'acide nitrique concentré. Boucher l'orifice du tube à essai par un morceau de papier filtre imbibé d'acétate de plomb, chauffer légèrement. Si le papier se colore en brun, l'échantillon contient des sulfures.

ANNEXE 3
MODE OPERATOIRE N°4

MESURE DE LA TENEUR EN MATIERES ORGANIQUES

1) PRINCIPE

La teneur en matières organiques est exprimée en teneur pondérale de carbone organique, définie comme étant la différence entre la teneur en carbone total et la teneur en carbone minéral.

2) MODE OPERATOIRE

- écrêter le sol à 2 mm;
- homogénéiser;
- sur trois prises de quelques grammes, effectuer une pyrolyse à 1000°C sous courant d'oxygène, doser le CO₂ obtenu, puis exprimer le résultat moyen en carbone total;
- sur trois autres prises du matériau, déterminer la teneur en carbone minéral selon la méthode définie par le projet de norme P.15.512 (Analyses minéralogiques des sols argileux. Eyrolles, pages 58 à 60) et exprimer la valeur moyenne obtenue en carbone minéral, la différence entre les deux valeurs moyennes donne la teneur en matières organiques.

ESSAIS A LA COMPRESSION DES JOINTS DE BUSES EN TOLES ONDULEES

1) PRINCIPE

L'essai consiste à comprimer des éprouvettes boulonnées ou non, en tôles ondulées pour buses, soudées entre deux embases perpendiculaires à l'axe de compression.

Les tôles utilisées comportent des ondulations mais ne sont pas cintrées.

Les ondulations sont parallèles à l'axe de compression et perpendiculaires au joint boulonné. Elles sont faites parallèlement au sens de la tôle.

L'essai porte sur des éprouvettes galvanisées au trempé ou en continu, ou non galvanisées.

Toutes les éprouvettes, de traction et de compression, sont repérées de façon indélébile par poinçonnage, avant découpe, de la tôle d'origine.

2) SEQUENCE DES OPERATIONS

2.1 - Essais de traction

Les éprouvettes de traction sont prélevées conformément à la norme des aciers utilisés, soit la norme NFA 35-501. La figure n° 1 donne les dimensions de ces éprouvettes, qui sont prélevées parallèlement au sens des ondulations.

2.2 - Réalisation des éprouvettes de compression

Les éprouvettes de compression sont réalisées de telle manière que les repères apparaissent dans les appendices de raidissement. Après découpe en atelier, les éprouvettes sont fraisées pour mise à hauteur parallèle et perpendiculaire aux ondes. Elles sont ensuite soudées sur plats calibrés*.

L'ensemble est alors, si nécessaire, galvanisé au trempé dans les conditions pratiquées pour la fabrication des ouvrages.

Pour assurer le parallélisme des ensembles destinés aux essais de compression, les demi éprouvettes sont soumises à une "précompression" d'environ 4% de la résistance à la compression, elles sont ensuite boulonnées à l'aide d'une clé dynamométrique en respectant les couples préconisés.

Les valeurs de ces couples sont de 17 m.daN pour les boulons 14x24 et 25 m.daN pour les boulons plus gros.

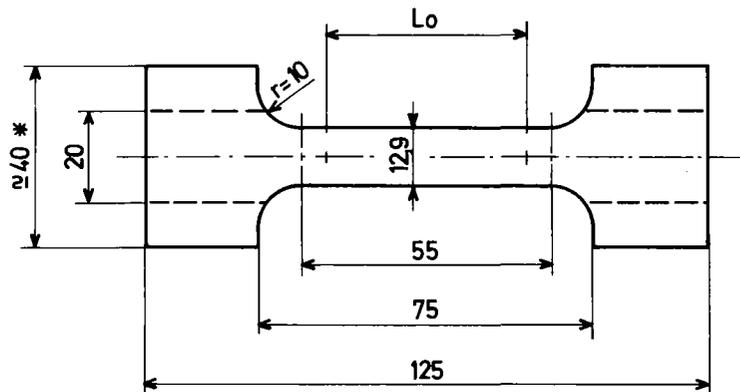
Les embases (avec ou sans boulons) sont ensuite fraisées "à profit" avec une tolérance de parallélisme de 1/100ème de mm entre les deux faces d'appui.

* Dans le cas de tôles prégalvanisées (galvanisation en continu), cette méthode nécessite une préparation de la coupe.

Dimensions de l'éprouvette

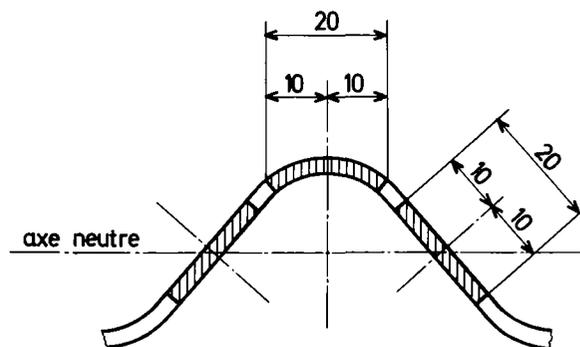
$$L_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$$

(NF. A 35, 501)



* En flanc d'onde, lorsque la taille de l'ondulation le permet

Découpe des éprouvettes
dans sommet et flanc d'onde



3 éprouvettes de 125mm
de longueur sur sommets et 3 autres sur flancs

Figure 1 - Epreuves de traction

2.3 - Essais de compression

La machine d'essai doit maintenir parallèles les embases de l'éprouvette comprimée, sans glissement latéral. Elle doit pouvoir appliquer une charge maximale de l'ordre de 1000 kN.

Les mesures des caractéristiques de compression doivent être effectuées avec une précision relative meilleure que 1%.

Les caractéristiques: force de compression et raccourcissement associé sont simultanément enregistrées.

La vitesse de déplacement des plateaux est de l'ordre de 2 mm/mn.

2.4 - Prélèvement pour mesure de l'épaisseur de la tôle et de la masse de zinc

Juste après exécution des essais de compression, un rectangle de 100x100 mm est prélevé à l'emplacement indiqué sur la figure 2. Sur ce prélèvement, la masse du revêtement est déterminée suivant la méthode prévue par la norme NFA 91-121, par dissolution du revêtement. Cet essai est suivi d'une mesure de l'épaisseur réelle de l'acier avec une précision de 1/100ème de mm.

2.5 - Mesure des caractéristiques des boulons

Après exécution des essais de compression, une mesure de la dureté Vickers est effectuée sur l'un des boulons de chaque éprouvette.

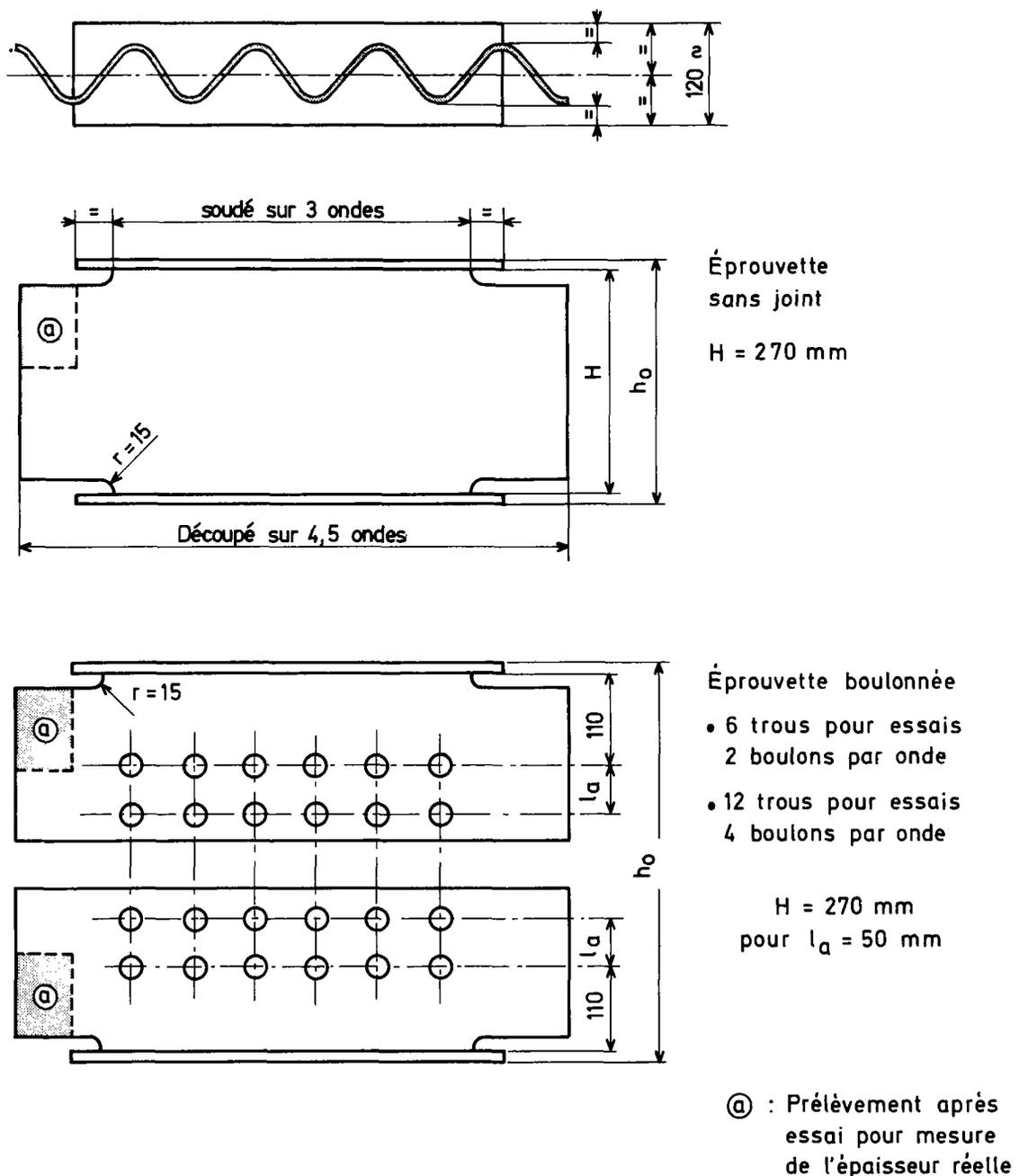


Figure 2 - Epreuves pour essai de compression

3) NOMBRE D'ESSAIS DE COMPRESSION

Pour une tôle donnée, les essais portent sur des éprouvettes de compression de hauteur $H = 270$ mm. Pour chaque tôle, 3 essais sont effectués sur des éprouvettes pleines non boulonnées, 4 essais sont effectués sur des éprouvettes boulonnées avec un joint de type donné, en particulier avec un nombre donné de boulons par onde.

4) RESULTATS

On portera sur le compte rendu d'essais, pour chaque type d'éprouvettes, un schéma indiquant notamment:

- la longueur théorique des ondes L (mm);
- le nombre théorique de boulons par onde "n";
- l'emplacement de chaque boulon de l'éprouvette.

Pour chaque éprouvette testée, les valeurs des caractéristiques suivantes sont portées sur le compte rendu d'essais:

- a) - le repère de l'éprouvette;
- b) - la hauteur réelle h_0 de l'éprouvette avant compression, à l'extérieur des platines fraisées (fig. 2) (en mm);
- c) - l'épaisseur nominale de la tôle;
- d) - l'épaisseur d'acier mesurée sur chaque demi-éprouvette (en mm);
- e) - la masse de zinc mesurée sur chaque demi-éprouvette;
- f) - la nature des boulons et la dureté Vickers mesurée;
- g) - le raccourcissement en % de l'éprouvette à la charge maximale (fig. 3):

$$\frac{h_0 - h_r}{h_0} \times 100 \quad h_r: \text{hauteur de l'éprouvette à la charge maximale}$$

- h) - la charge maximale, définie par la figure 3 (en kN);
- i) - la charge maximale ramenée au mètre de joint, obtenue en multipliant la charge mesurée en (h) par le coefficient suivant:

$$\text{* éprouvettes sans joint: } k = \frac{1000}{L \times \text{nombre d'ondes soudées}}$$

$$\text{* éprouvettes avec joint: } k = \frac{1000 \times n}{L \times \text{nombre de boulons de l'éprouvette}}$$

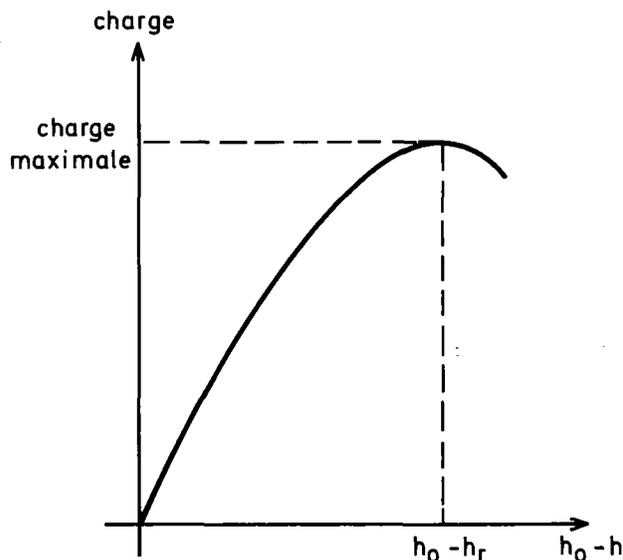


Figure 3

CONTROLE D'ADHERENCE DES REVETEMENTS
OBTENUS PAR GALVANISATION - ESSAI DE QUADRILLAGE

1) DESCRIPTION

Cet essai consiste à graver la surface du revêtement de zinc à l'aide d'un outil (figure 1) pour obtenir un quadrillage à mailles carrées. Les rayures doivent atteindre le métal de base.

Le pas de ce réseau est égal à 3 mm (à 0,5 mm près), le nombre de rayures parallèles étant de 5 par direction (figure 2). Cet essai sera pratiqué en flanc d'onde, à plus de 10 mm des bords.

2) INTERPRETATION

L'adhérence est jugée mauvaise lorsque les carrés de revêtement délimités par le réseau se décollent.

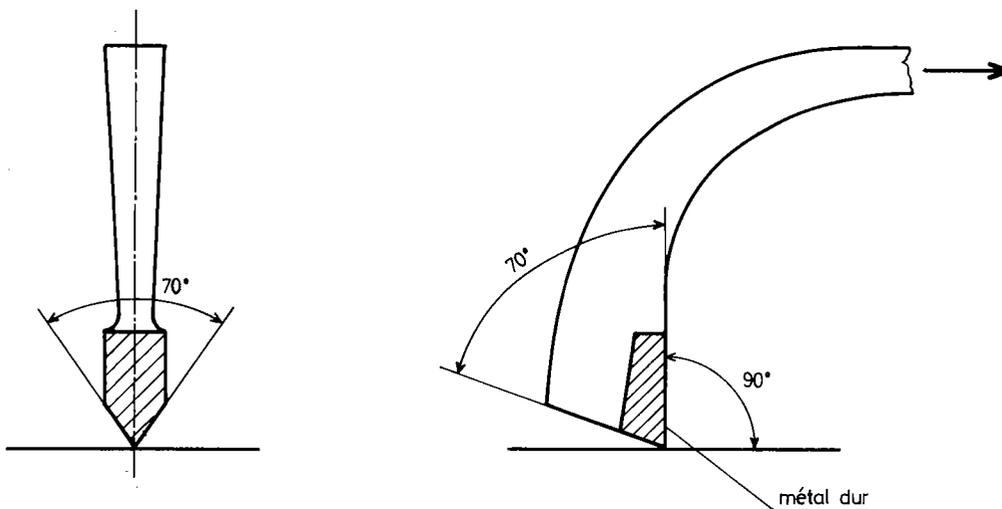


Figure 1

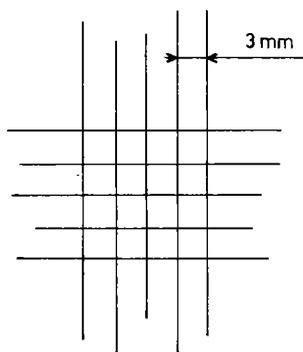


Figure 2

ORIGINE DES DOCUMENTS PHOTOGRAPHIQUES

S.E.T.R.A.	Figures 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.6, 2.5, 2.8, 2.9, 3.13, 3.16, 3.17 a, 3.17 b, 3.19, 3.20, 3.25, 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 6.11, 6.12, 6.13, 6.14, 7.0, 7.1a, 7.1b, 7.3, 7.4, 7.7, 7.9, 7.13, 7.14, 7.15, 7.18, 7.19, 7.20, 7.21.
Sté ARMCO	Figures 2.3, 2.6, 2.10, 2.12, 3.18, 3.29, 3.30, 6.7.
Sté ARVAL	Couverture, figures 1.5, 2.1, 2.11, 3.12, 3.23.
Sté TUBOSIDER	Figures 3.11, 3.26

