

Guide d'application de l'instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art

Fascicule 10 - Fondations en site aquatique



Page laissée blanche intentionnellement

Guide d'application de l'instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art

Fascicule 10 - Fondations en site aquatique



Composition du groupe de travail de refonte du fascicule 10 :

- Nicolas Rouxel (CETE de l'Ouest)
- Michel Pioline (CETE Normandie-Centre)
- Jacques Billon (CETE de l'Ouest)
- Jean-Claude Jouanneau (CETE Normandie-Centre)
- Vincent Gilard (DRIEA IF)
- Jean-Luc Astruc (DIR A)
- Nelson Gonçalves (DIR NO)
- Rafaël Ortiz (DIR Est)

Composition du comité de pilotage de l'ITSEOA :

- Présidente : Évelyne Humbert (CGEDD)
- Rapporteur : Gilles Lacoste (ex-Sétra)
- Jean-François Douroux (RATP)
- Bruno Godart (IFSTTAR)
- Philippe Guignard (Conseil général de la Gironde)
- Jean-François Kersalé (SNCF)
- Jean-Michel Lacombe (Sétra)
- Manuel Le Moine (RFF)
- Bernard Plu (SNCF)
- Jean-Christophe Schlegel (MEDDE-DIT)

Remerciements au réseau ouvrages d'art des DIR et du RST pour les contributions apportées à ce document.

Couverture : tassement d'une pile d'un ouvrage communal (Photo CG 54)

Sommaire

Avant-propos	5
Chapitre 1 - Champ d'application	7
Chapitre 2 - Généralités	9
2.1 - Particularités de la surveillance des fondations subaquatiques	10
2.2 - Connaissance de la fondation	10
2.2.1 - Dossier d'ouvrage	10
2.2.2 - Documents du dossier d'ouvrage concernant les fondations en site aquatique	11
2.2.3 - En l'absence de données	11
Chapitre 3 - Notions sur les causes et la nature des désordres	13
3.1 - Origine des désordres	13
3.1.1 - Impact hydraulique de l'ouvrage	13
3.1.2 - Évolution du cours d'eau	15
3.1.3 - Mouvement des alluvions en période de crue	15
3.1.4 - Affouillement local et effet du rétrécissement	16
3.1.5 - Tassement des sols	16
3.1.6 - Interventions humaines inopportunes	16
3.1.7 - Autres causes	17
3.1.8 - Pathologie des matériaux de la fondation	17
3.2 - Manifestations visibles lors des inspections	17
3.2.1 - Massifs d'enrochements	18
3.2.2 - Rideaux et éléments de protection	18
3.2.3 - Sol de fondation	19
3.2.4 - Massif et éléments de fondation	19
Chapitre 4 - Surveillance	21
4.1 - Les actions périodiques de surveillance	22
4.1.1 - Périodicité de la surveillance	22
4.1.2 - Le contrôle annuel	23
4.1.3 - La visite d'évaluation	23
4.1.4 - L'inspection détaillée ou inspection détaillée de partie d'ouvrage	24
4.2 - Les actions liées à des événements particuliers de la vie de l'ouvrage	29
4.2.1 - L'Inspection Détaillée Initiale (IDI)	29
4.2.2 - L'inspection spécifique de fin de garanties contractuelles	30
4.2.3 - Actions liées à des événements imprévus	30
4.3 - Surveillance renforcée et haute surveillance	31
Chapitre 5 - Entretien	33
5.1 - Entretien courant	33
5.1.1 - La végétation	33
5.1.2 - Travaux aux abords des ouvrages	33
5.1.3 - Préparation à une inspection détaillée	34



5.2 - Entretien spécialisé	34
5.2.1 - L'entretien des massifs d'encrochements	34
5.2.2 - Le rejointoiement des maçonneries (sur de petites surfaces)	35
5.2.3 - La protection des aciers des bétons armés dégradés	35
Chapitre 6 - Réparation	37
6.1 - Le diagnostic	37
6.2 - Le projet de réparation	39
6.3 - L'interface avec le milieu	40
6.4 - Le déroulement des travaux	41
6.5 - Les aménagements réalisables en accompagnement des travaux de réparation	42
6.6 - Les solutions courantes de réparation	43
Bibliographie	49
Annexes	51
Annexe 1 : Aide à la mise au point du marché d'inspection des parties immergées d'ouvrages d'art	51
Annexe 1.1 - Notice d'aide à la préparation et à la réalisation de l'inspection	51
Annexe 1.2 - Proposition du candidat	55
Annexe 1.3 - Exemple de CCTP pour l'inspection de parties immergées d'ouvrages d'art	56
Annexe 1.4 - Modèle de procès verbal	69
Annexe 1.5 - Modèles d'élévations et coupes types et tableau de constatations	70
Annexe 1.6 - Exemple de bordereau des prix	73
Annexe 2 : Fiches « Techniques de réparation »	74
Annexe 2.1 - Comblement simple de cavités dans les maçonneries ou éléments de fondations, directement accessibles de l'extérieur	74
Annexe 2.2 - Semelles et radiers, encagement des appuis. Augmentation de la surface d'appui des fondations	75
Annexe 2.3 - Micropieux	77
Annexe 2.4 - Injection solide	79
Annexe 2.5 - Jet-grouting	81
Annexe 2.6 - Injections d'imprégnation et de remplissage de petites cavités non accessibles de l'extérieur	84
Annexe 3 : Protocole de suivi bathymétrique aux instruments destiné aux ouvrages de franchissement de cours d'eau	87
Annexe 3.1 - Description de l'environnement	87
Annexe 3.2 - Le matériel	90
Annexe 3.3 - Conclusions	98

Avant-propos

Le présent document est l'un des fascicules techniques constituant le corpus technique de la nouvelle Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (ITSEOA).

L'Instruction est constituée du fascicule 0 - « Dispositions générales applicables à tous les ouvrages » et des fascicules d'application suivants qui lui sont annexés :

- Fascicule 1. Dossier d'ouvrage
- Fascicule 2. Généralités sur la surveillance
- Fascicule 3. Mesures de sécurité - Auscultation - Surveillance renforcée - Haute surveillance

Cet ensemble de documents sert de référentiel aux services de l'État pour mettre au point leur politique de gestion, en donnant des indications générales relatives à leur organisation. C'est aussi un élément du référentiel pour les contrats de concession ou de partenariat public-privé à passer pour le réseau routier de l'État.

Il peut également être utilisé par les collectivités territoriales et par les opérateurs chargés d'infrastructures de transport pour construire leur propre référentiel. Les éléments spécifiques aux services de l'État sont signalés dans le texte.

Les autres fascicules qui constituaient la seconde partie de l'ITSEOA de 1979 ne font plus partie intégrante de l'Instruction et sont désormais des guides techniques. Ces guides techniques sont les suivants :

- Fascicule 4. Surveillance topométrique
- **Fascicule 10. Fondations en site aquatique**
- Fascicule 11. Fondations en site terrestre
- Fascicule 12. Appuis
- Fascicule 13. Appareils d'appui
- Fascicule 20. Zone d'influence - Accès - Abords
- Fascicule 21. Équipements des ouvrages
- Fascicule 30. Ponts et viaducs en maçonnerie
- Fascicule 31. Ponts en béton non armé et en béton armé
- Fascicule 32. Ponts en béton précontraint
- Fascicule 33. Ponts métalliques (acier, fer, fonte)
- Fascicule 34. Ponts suspendus
- Fascicule 34-2. Ponts à haubans
- Fascicule 35. Ponts de secours
- Fascicule 40. Tunnels
- Fascicule 50. Buses métalliques
- Fascicule 51. Ouvrages de soutènement
- Fascicule 52. Déblais et remblais
- Fascicule 53. Ouvrages de protection

Ce document est composé :

- d'une partie générale qui constitue le fascicule 10 proprement dit, et comprend les caractéristiques des fondations en site aquatique dans leur environnement, des éléments sur les désordres et leurs causes, des préconisations sur les opérations de surveillance, d'entretien et de réparation ;

- d'annexes qui constituent des aides pratiques pour les gestionnaires d'ouvrage. Elles ne revêtent pas un caractère exhaustif. En cas de doute, le gestionnaire pourra s'appuyer sur le réseau des organismes scientifiques et techniques (RST) pour de plus amples renseignements.

Ce document constitue un guide destiné principalement aux personnels techniques des organismes chargés de la surveillance (visiteurs et inspecteurs d'ouvrage) et aux gestionnaires du réseau routier dans les collectivités territoriales, les services de l'État et les autres organismes.

Ce document annule et remplace l'ancienne version du fascicule 1 de 2000.

Il a été rédigé par un groupe de travail comportant des membres appartenant aux services du réseau des organismes scientifiques et techniques du MEDDE.

Son contenu a été validé par le comité de pilotage de l'Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art dans lequel sont représentés :

- le ministère (DGITM/DIT) ;
- les directions interdépartementales des routes (DIR) ;
- les collectivités locales ;
- le réseau scientifique et technique (Sétra, IFSTTAR, CETE, CETU) ;
- des maîtres d'ouvrage d'infrastructures ferroviaires (RFF, RATP) ;
- des gestionnaires délégués d'infrastructures de transport (SNCF).



Chapitre 1 - Champ d'application

Les dispositions du présent fascicule sont applicables à toutes les fondations en site aquatique, quelle que soit la nature de l'ouvrage, et aux parties d'ouvrage soumises en permanence ou par intermittence à l'action d'un cours d'eau ou plan d'eau dans les mêmes conditions que les fondations. En particulier, les ouvrages hydrauliques (buses métalliques, buses en béton armé, dalots, etc.) et les murs de soutènement sont concernés, ainsi que le dessus des caissons immergés peu profonds. Ce fascicule ne s'applique pas aux tunnels immergés, mais il peut donner quelques éléments utiles pour la surveillance de ces ouvrages.

Ces dispositions s'étendent à tout dispositif (enrochements, batardeau, gabion, etc.) destiné à assurer la stabilité ou la protection de la fondation proprement dite (semelles, radiers, pieux, caissons), ainsi qu'au volume de sol fournissant la réaction aux actions transmises par l'ouvrage.

Bien entendu, étant donné son caractère essentiellement technique, le présent guide est utilisable pour les ouvrages du réseau routier des collectivités locales (communes, conseils généraux, etc.) et d'autres organismes, aussi bien que pour le réseau routier national.



Chapitre 2 - Généralités

Le présent fascicule, s'appliquant à toutes les fondations et parties d'ouvrage en site aquatique, concerne des dispositions constructives très diverses de par leur nature et leur mode de fonctionnement comme les fondations sur pieux en bois ou les caissons havés en béton armé.

À cette diversité des fondations s'ajoute celle des structures. Il ne faut pas oublier que les fondations anciennes ne portent pas seulement des ouvrages en maçonnerie ; les anciens massifs ont souvent été réutilisés pour porter une structure neuve (voire un élargissement). Plus généralement, nombreux sont les cas où fondations et structures datent d'époques très différentes.



Figure 1 : Pont de Segré (Photo : CETE Ouest)

Pour les détails relatifs aux divers modes de fondations d'ouvrages anciens, il est recommandé de se référer aux documents « Fondations de ponts en site aquatique en état précaire – chapitre 2 » [9] et « Guide méthodologique cours d'eau et ponts » [1].

Le mode de fonctionnement d'une fondation est comparable en site aquatique et en site terrestre ; il est rappelé dans le chapitre 2 du fascicule 11 « Fondations en site terrestre ».

2.1 - Particularités de la surveillance des fondations subaquatiques

Même si des raisons d'opportunité conduisent à programmer les visites et inspections des fondations à des dates différentes de celles concernant le reste de l'ouvrage, il ne faut pas dissocier la surveillance des fondations de la surveillance du reste de l'ouvrage et de la zone d'influence, pour de nombreuses raisons :

- les désordres en structure sont parfois imputables à des anomalies dans les fondations, et l'existence de ces anomalies n'est quelquefois décelable que par le biais des désordres qui apparaissent en structure (cas de mouvements d'appuis) ;
- la topographie du lit du cours d'eau et les conditions d'écoulement peuvent être l'indice de désordres dans les fondations ;
- la stabilité de certaines fondations évolue avec les conditions hydrauliques.

Il faut donc que les équipes chargées de la surveillance des fondations prennent connaissance dans le dossier d'ouvrage d'art, avant toute opération, des rapports de surveillance établis pour les autres parties de l'ouvrage.

Le lit du cours d'eau, tant en amont qu'en aval de l'ouvrage, fait partie intégrante de la zone d'influence. Pour un cours d'eau stable et un ouvrage ancien, cette zone peut se limiter à la portion sur laquelle l'écoulement est perturbé de manière appréciable par la présence de l'ouvrage.

Pour un cours d'eau instable, la zone d'influence peut être beaucoup plus étendue, et son appréciation doit reposer sur une étude morphodynamique⁽¹⁾ qui peut se trouver dans le dossier d'ouvrage. Elle peut représenter la totalité du cours d'eau lorsque se produit, par exemple, un abaissement général des fonds.

Pour les ouvrages construits depuis la loi sur l'eau de 1992, il faut se fixer une limite pour la zone d'influence à partir des études hydrauliques ou éventuellement à partir de l'expérience et du contexte morphodynamique régional ou local. Dans le cas d'un constat d'une évolution des conditions hydrauliques, le maître d'ouvrage gestionnaire peut être amené à faire réaliser une nouvelle étude morphodynamique.

Il convient dans tous les cas de disposer des précédents rapports des inspections subaquatiques avant de commencer toute nouvelle inspection.

Des fondations de natures différentes n'ayant pas le même mode de fonctionnement, l'évolution des conditions extérieures se traduit par des effets différents sur la fondation. Une surveillance efficace suppose donc une connaissance précise de la nature des fondations. Le type de fondation peut d'ailleurs varier selon les appuis d'un même ouvrage, voire selon les parties d'un même appui (ces différences peuvent exister à la construction ou faire suite à la réparation, l'élargissement des ouvrages ou leur évolution au cours des siècles).

2.2 - Connaissance de la fondation

En premier lieu, le maître d'ouvrage gestionnaire doit consulter le dossier d'ouvrage pour juger de sa qualité et de sa complétude. S'il est incomplet, il est souhaitable de le reconstituer au mieux.

L'exactitude des données concernant les fondations est le plus souvent difficile à confirmer, pour autant qu'elles existent ; une analyse attentive et critique des informations recueillies est de rigueur.

2.2.1 - Dossier d'ouvrage

Le dossier d'ouvrage, tel qu'il est décrit dans le fascicule 1, comprend au moins les études géologiques, géotechniques, hydrauliques et sismiques, les plans certifiés conformes à l'exécution, un dossier de photos en cours de travaux ainsi que le PV d'inspection détaillée initiale.

Il conviendra de demander aux services constructeurs chargés de constituer les dossiers d'ouvrage de faire compléter le cas échéant le PV d'inspection détaillée initiale par la partie concernant l'inspection subaquatique des fondations immergées ainsi que le levé bathymétrique correspondant.

(1) Morphodynamique : changement naturel de la forme des lits des rivières en fonction du type de sédiment, du substratum, de la végétation, des débits hydrauliques et de leurs variations.

2.2.2 - Documents du dossier d'ouvrage concernant les fondations en site aquatique

Documents sur les fondations

Les éléments à rechercher dans le dossier d'ouvrage pour chacun des appuis sont :

- les plans de récolement des fondations : vue en plan, coupes et élévation ;
- leur mode d'exécution, le journal de chantier, les comptes rendus de réunion de chantier et les correspondances, avec notamment les fiches de non-conformité et les actions correctives se rapportant à l'exécution des fondations ;
- les rapports des précédentes inspections subaquatiques.

Données géologiques et géotechniques

Cette partie du dossier de l'ouvrage est constituée des éléments nécessaires à l'évaluation de la stabilité des fondations. Ces éléments proviennent des études géotechniques réalisées lors du projet de l'ouvrage mais aussi des compléments d'études réalisés par l'entrepreneur en cours de chantier. Cela se traduit par une coupe des différents horizons sous chaque appui, comportant :

- cote et identification des différentes couches ;
- caractéristiques mécaniques et, éventuellement, de compressibilité ;
- granulométrie des alluvions.

La connaissance de ces éléments est indispensable chaque fois qu'une évolution de la situation peut faire craindre une modification de la stabilité des fondations :

- apparition de désordres dans le massif de fondations ou en structure ;
- variation du lit ;
- passage de convois exceptionnels ;
- chocs de bateaux ;
- projet de modification de la structure (changement de schéma statique, élargissement) ;
- etc.

Si elles ne sont pas disponibles et en cas de doute sur l'évolution de l'ouvrage, les données géotechniques sont à rechercher par une reconnaissance appropriée. Il est à noter que les valeurs de ces paramètres peuvent varier au cours du temps.

Études hydrauliques

Dans les études hydrauliques, on trouvera les données hydrauliques et celles relatives au cours d'eau permettant :

- d'apprécier les risques encourus par les appuis ;
- de définir les consignes d'entretien des dispositifs de protection éventuels (enrochements, batardeaux, gabions, etc.) ;
- d'élaborer un projet de confortement (choix de la nature des travaux, fixation des contraintes de chantier, cotes des niveaux d'eau, etc.) ;
- etc.

On tiendra compte de l'évolution dans le temps des conditions hydrauliques (crues, modifications des vitesses et directions des courants, etc.) et de la morphologie du cours d'eau (approfondissement du lit, modification du débouché, etc.).

Pour les ouvrages les plus anciens, en cas d'absence de données hydrauliques, ou si les conditions hydrauliques ont évolué dans le temps, et en cas de doute sur l'évolution de l'état de l'ouvrage, le maître d'ouvrage gestionnaire pourra faire réaliser de nouvelles études et investigations.

2.2.3 - En l'absence de données

Les dossiers d'ouvrages anciens sont souvent incomplets. Il faut donc exploiter les archives afin de les compléter (archives départementales, mais aussi presse régionale et témoignages pouvant donner des indications sur les hauteurs d'eau maximales connues). Dans le cas où les données géologiques ou géotechniques seraient absentes et en cas d'évolution de l'ouvrage, il convient de réaliser les investigations nécessaires à leur connaissance (sondages).

Une analyse attentive et critique des informations recueillies ainsi que des plans d'exécution ou de récolement doit être effectuée en particulier pour identifier les références de nivellement des ouvrages anciens ; en effet, le niveau de référence peut avoir été modifié suite à des travaux sur l'ouvrage ou bien à la suite d'une évolution du réseau de nivellement de l'IGN (IGN69).



Chapitre 3 - Notions sur les causes et la nature des désordres

Seules sont évoquées les causes et la nature des désordres les plus fréquents, propres aux fondations en site aquatique. De plus amples développements sont donnés dans le document « Fondations de ponts en site aquatique en état précaire » [9].

3.1 - Origine des désordres

L'action de l'eau est la cause la plus fréquente des désordres relevés sur les fondations en site aquatique ou sur leurs éléments de protection. Cette action peut elle-même résulter de différents phénomènes et se manifester de diverses façons.

3.1.1 - Impact hydraulique de l'ouvrage

La construction d'un ouvrage d'art a souvent entraîné la réduction de l'emprise du lit majeur et/ou mineur d'un cours d'eau liée à la construction des piles ou des culées de l'ouvrage. Ces travaux peuvent entre autres provoquer localement un exhaussement de la ligne d'eau en amont et une accélération des vitesses en aval.

Ces modifications doivent être limitées au maximum, car elles entraînent des perturbations sur le comportement hydraulique du cours d'eau, mais également sur l'environnement, notamment dans les zones inondables.

Un sillage de pile mal dirigé peut entraîner un affouillement, une érosion de berge et même une modification du tracé du lit du cours d'eau (figure 2). Une pile doit donc être bien orientée par rapport au courant et les massifs de fondation adaptés au site. Ce sont souvent ces derniers qui sont la cause de désordres, notamment liés à une mauvaise orientation, un surdimensionnement ou un manque d'hydrodynamisme.



Figure 2 : Atterrissements près d'une pile (Photo : CETE Normandie-Centre)

Pour les ouvrages neufs, ces enjeux sont réglementés par le Code de l'environnement⁽¹⁾ au travers de différentes rubriques de sa nomenclature (article R. 214-1 modifié). Parmi ces rubriques, deux thèmes principaux se dégagent : l'un hydraulique, et l'autre plus orienté environnement. Dans la suite du texte, sont explicitées les rubriques du Code de l'environnement qui peuvent être consultées :

Hydraulique – hydrologie

Rubrique 3.1.1.0 du Code de l'environnement

Elle vise les installations, ouvrages, remblais et épis, dans le lit mineur d'un cours d'eau, constituant soit un obstacle à l'écoulement des crues, soit un obstacle à la continuité écologique.

La continuité écologique des cours d'eau se définit par la libre circulation des espèces biologiques et par le bon déroulement du transport naturel des sédiments.

Rubrique 3.1.2.0 du Code de l'environnement

Elle vise les installations, ouvrages, travaux ou activités conduisant à modifier le profil en long ou le profil en travers du lit mineur d'un cours d'eau, à l'exclusion de ceux visés à la rubrique 3.1.4.0⁽²⁾. Le lit mineur d'un cours d'eau est l'espace recouvert par les eaux coulant à pleins bords avant débordement.

Rubrique 3.2.2.0 du Code de l'environnement

Elle vise les installations, ouvrages, remblais dans le lit majeur d'un cours d'eau.

Dans cette rubrique, le lit majeur du cours d'eau est défini comme la zone naturellement inondable par la plus forte crue connue ou par la crue centennale si celle-ci est supérieure. Le Code de l'environnement réglemente la surface soustraite à l'expansion des crues du fait de la surface occupée par l'installation, l'ouvrage ou le remblai lorsqu'ils se trouvent dans le lit majeur.

Rubrique 3.2.4.0 du Code de l'environnement

Elle vise la modification des berges des cours d'eau.

Environnement - ressources halieutiques

Rubrique 3.1.3.0 du Code de l'environnement

Elle vise les installations ou ouvrages ayant un impact sensible sur la luminosité nécessaire au maintien de la vie et de la circulation aquatique dans un cours d'eau.

Rubrique 3.1.5.0 du Code de l'environnement

Elle vise les installations, ouvrages, travaux ou activités, dans le lit mineur d'un cours d'eau, étant de nature à détruire les frayères, les zones de croissance ou les zones d'alimentation de la faune piscicole, des crustacés et des batraciens, ou dans le lit majeur d'un cours d'eau, étant de nature à détruire les frayères de brochet.

De plus, la circulaire DE/SDGE/BPIDPF-CCG n° 426 du 24 juillet 2002 précise la notion de transparence hydraulique exigée pour les ouvrages neufs, ainsi que le degré d'exigence et de tolérance en termes d'impacts.

La transparence hydraulique totale est exigée pour la crue de référence du risque d'inondation (plus hautes eaux connues ou crue centennale si celle-ci leur est supérieure), au droit des zones à forts enjeux. La transparence est jugée totale lorsque l'impact calculé entre l'état avant aménagement et l'état après aménagement est inférieur à la précision relative du modèle utilisé pour ce calcul. La circulaire fait référence, à titre indicatif, à la précision relative de 1 cm (pour la hauteur d'eau) admise comme usuelle pour les modèles fluviaux. Mais il est également rappelé que cette précision relative peut être bien moindre (plusieurs centimètres à plusieurs décimètres) dans le cas d'un régime torrentiel.

Le concepteur du projet se doit donc d'analyser les zones d'enjeux forts qui se trouvent vraisemblablement dans l'aire d'influence de son aménagement, à l'aide des documents réglementaires existants du risque d'inondation, confortés par une analyse in situ de l'état actuel de l'occupation de ces zones. Dans ces zones de forts enjeux, l'impact hydraulique de son aménagement doit être nul, c'est-à-dire indécélable à l'aide de l'outil numérique. En dehors de ces zones de forts enjeux, l'impact hydraulique de son aménagement peut être non nul. Le concepteur peut déroger à l'obligation d'annuler l'impact de son aménagement dans les zones de forts enjeux s'il fait la démonstration que les mesures correctrices nécessaires pour respecter cette obligation portent gravement préjudice à d'autres aspects

(1) Il n'est pas nécessaire de mettre les ouvrages existants en conformité avec les articles du Code de l'environnement qui s'appliquent à des projets d'ouvrages neufs. Par contre, la lecture des rubriques du Code de l'environnement peut permettre d'aider à comprendre les modifications du lit observées près d'un ouvrage.

(2) Cette rubrique concerne la consolidation ou protection des berges, à l'exclusion des canaux artificiels, par des techniques autres que végétales vivantes.

environnementaux (hydroécologiques ou morphodynamiques notamment) ou sont incompatibles avec les fortes contraintes du site, et qu'aucune variante de tracé dûment étudiée ne peut mieux satisfaire à ces contraintes.

3.1.2 - Évolution du cours d'eau

Cette évolution peut être naturelle dans le cas de cours d'eau n'ayant pas atteint leur profil d'équilibre ou être le résultat d'interventions humaines telles que : anciennes extractions de matériaux dans le lit, construction de barrages, dragage et creusement de chenaux maritimes et de navigation, remblaiement dans les champs d'inondation, déplacement de l'embouchure, pompages, aménagements, etc. Elle se traduit généralement dans la modification du profil en long (creusement ou exhaussement), avec modification du tracé en plan de la morphologie du lit (apparition, disparition ou déplacement de la position des bancs et îles).

Il est à noter que, selon les cas, la modification du profil en long peut se propager de l'amont vers l'aval ou au contraire de façon « régressive » de l'aval vers l'amont.

Les effets de telles évolutions peuvent être très nombreux ; citons entre autres le déchaussement des fondations à la suite d'un creusement du lit, qui peut entraîner une mise à l'air et un pourrissement des têtes de pieux ; une modification de l'angle d'attaque de l'ouvrage par le courant, le contournement des piles ou des culées en lit majeur.

Le dérèglement induit par le changement climatique, les modifications de l'utilisation des sols, l'urbanisation, pourrait conduire à terme à des évolutions des régimes des cours d'eau, du niveau des mers (marnage) et du niveau des nappes, sans que l'on puisse aujourd'hui quantifier ces évolutions.

3.1.3 - Mouvement des alluvions en période de crue

Les grandes crues ont été la cause première de destruction des ouvrages anciens fondés insuffisamment bas et mal protégés. Au cours des crues, il se produit un approfondissement général du lit et un remaniement des alluvions, sur une épaisseur parfois importante (plusieurs mètres), avec modification défavorable de leurs caractéristiques mécaniques. Ces phénomènes peuvent être très rapides (cf. figure 3).

La stabilité latérale des massifs de fondation due aux terrains encaissants s'en trouve alors considérablement réduite. Selon l'importance des atterrissements postérieurs à la crue, et selon le type de fondation, l'instabilité peut subsister au-delà de la période de crue.

Les crues exceptionnelles peuvent aussi modifier durablement la configuration du lit.



Figure 3 : Effondrement du pont sur la rivière Saint-Étienne dû à un affouillement (Photo : CETE Méditerranée)

3.1.4 - Affouillement local et effet du rétrécissement

L'obstacle à l'écoulement et la réduction fréquente du débouché que constitue la présence d'ouvrages anciens implantés dans le lit du cours d'eau (lit mineur ou majeur) sont à l'origine de l'apparition de fosses d'affouillement à l'amont et à l'aval des ouvrages, de vides sous les appuis, pour les cours d'eau à fond mobile. Il peut aussi y avoir des phénomènes de contournement de culées sur les cours d'eau à fond non mobile (cf. figure 4). Dans ce cas, l'effet du courant provoque une érosion progressive des remblais d'accès ou du terrain naturel attenant à l'ouvrage avec un phénomène de contournement pouvant déstabiliser l'appui et la fondation.

L'observation, après la crue, ne permet pas, en général, de connaître la profondeur maximale du surcreusement temporaire qui se produit pendant la crue et qui se trouve partiellement ou totalement comblé pendant la décrue de matériaux ayant des caractéristiques mécaniques différentes.



Figure 4 : Différences de niveau à proximité des piles à l'étiage (Photo : J-P Levillain)

3.1.5 - Tassement des sols

Les tassements sont dus à la consolidation ou, plus généralement, au fluage d'une couche de sol sous-jacente. Il s'agit en général d'une couche de sol compressible soumise à un niveau de sollicitation excessif (par exemple, lors de la mise en place exagérée ou injustifiée d'enrochement autour ou sur les appuis) ou à un rabattement de la nappe (lié à des travaux ou des pompages d'eau potable).

3.1.6 - Interventions humaines inopportunes

L'utilisation de la voie d'eau peut avoir des conséquences sur les ouvrages et leur fondation :

- efforts dus à l'amarrage des bateaux sur l'ouvrage ;
- chocs de bateaux ;
- effet du batillage et du remous des hélices.

Outre l'incidence des travaux d'aménagement déjà évoquée, certaines interventions humaines mal conduites lors d'investigations ou de travaux peuvent être la cause de désordres très importants occasionnés aux fondations et à l'ouvrage. Par exemple :

- le dégarnissage et le creusement d'une souille tout autour de l'appui d'un pont peuvent provoquer la rupture du sol de fondation et l'effondrement de l'ouvrage ;
- le vibrofonçage de palplanches à proximité immédiate de fondations superficielles ou sur pieux flottants ou radier général peut entraîner un tassement de l'appui ;
- des injections mal conduites peuvent occasionner un mouvement de l'appui, voire un tassement ;
- le pompage de la nappe peut entraîner un abaissement de son niveau et un tassement des sols ;
- l'extraction de matériaux dans le cadre de l'entretien de chenaux de navigation, le surengraisement des fondations par des enrochements ou par des banquettes en béton peuvent modifier les conditions hydrauliques ;
- la suppression d'un ouvrage hydraulique de gabarit inférieur à l'amont ;
- etc.

3.1.7 - Autres causes

En plus des actions naturelles sur les fonds citées plus haut, d'autres phénomènes peuvent être la cause de dégradations des fondations, comme :

- les variations de la cote du plan d'eau favorisent l'altération des matériaux, outre leur effet mécanique par abrasion de la surface suivi d'une oxydation à l'air libre, une amplification du phénomène par le changement de pH est possible y compris au niveau des nappes ;
- les délestages rapides des plans d'eau de retenue ;
- le déversement d'eaux chimiquement agressives ;
- l'action des eaux agressives (eaux acides, séléniteuses ou eaux très pures) ;
- la présence d'embâcles ou l'accumulation de corps flottants augmentant la pression sur l'ouvrage ;
- les poussées hydrauliques en cas de crues ;
- la formation ou l'existence de cavités sous les fondations (exemple : karst) ;
- les chocs de corps flottants ;
- l'abrasion due aux corps solides transportés par l'eau ;
- l'abaissement de la nappe, grande sécheresse ;
- etc.

3.1.8 - Pathologie des matériaux de la fondation

Les principales pathologies rencontrées sont les suivantes :

- pathologie de la maçonnerie (gonflement, dissolution) ;
- altération des pierres ;
- altération chimique des mortiers par l'eau ;
- altération des mortiers par les agents agressifs de l'air et du sol ;
- corrosion métallique ;
- altération des bétons ;
- altération du bois.

3.2 - Manifestations visibles lors des inspections

Les actions évoquées plus haut peuvent s'exercer isolément ou de manière combinée et provoquer des désordres structurels aux fondations de ponts, de murs de soutènement, de buses, ou encore aux pieds de talus se manifestant par des fissures, fractures, basculement, renversement, effondrement total ou partiel de la partie d'ouvrage incriminée.

Des désordres sur la structure de l'ouvrage (profil en long anormal, déformation des dispositifs de retenue, fissuration des tabliers, etc.) peuvent être révélateurs d'une pathologie des fondations (cf. figure 5).





Figure 5 : Tassement d'appui du pont sur le Larivot visible au niveau du garde-corps (Photo : CETE de l'Ouest)

Les principales manifestations sont classées par partie d'ouvrage, dans les paragraphes suivants.

3.2.1 - Massifs d'enrochements

- désorganisation et affaissement, par suite d'affouillements, des massifs d'enrochements disposés autour d'appuis ou des blocs assurant la protection de pieds de talus ou de murs ;
- ensouillement des blocs dans les alluvions ;
- entraînement des alluvions par le courant à travers les enrochements ;
- entraînement des enrochements de taille moyenne ou faible, surtout si le fond du lit est « dur ».

3.2.2 - Rideaux et éléments de protection

- pourrissement des pièces en bois en contact avec l'air (palplanches en bois) ;
- abrasion des matériaux constitutifs des éléments de protection (béton, pierre, métal, etc.) par les matériaux charriés ;
- corrosion des pièces métalliques (principalement en zone de marnage) ;
- entraînement des matériaux fins des batardeaux et crèches⁽³⁾ ;
- affouillement en pied ;
- renversement et/ou déchirement de rideaux ;
- défaillance des têtes d'ancrage ;
- etc.

(3) Enceinte de pieux en bois réalisée autour d'une fondation.

3.2.3 - Sol de fondation

- formation de cavités et décompression du sol de fondation ;
- abrasion du sol de fondation par les matériaux charriés ;
- tassement du sol de fondation.

Dans le cas de fondations superficielles, l'existence de cavités entraîne une réduction de la portance par diminution de la surface portante, voire un basculement.

Dans le cas de fondations sur pieux, la portance est également réduite par diminution du frottement latéral mobilisable pouvant aller jusqu'à l'instabilité de la fondation (portance, flambement). En outre, pour les fondations anciennes sur pieux en bois, la résistance aux efforts horizontaux, assurée par les alluvions bloquant le massif de pieux, se trouve considérablement réduite en cas de dégarnissage des têtes de pieux. L'ouvrage est alors dans un état de stabilité précaire, pouvant se maintenir quelque temps durant, pour se rompre brutalement sous l'action d'une perturbation, parfois minime. Cette réduction de la résistance aux efforts horizontaux affecte aussi les fondations sur puits ou pieux en béton ou métalliques.

3.2.4 - Massif et éléments de fondation

- dissolution de la chaux entraînant la désagrégation des anciens massifs de béton de chaux (cf. figure 6) ;
- désagrégation et dégarnissage des joints des ouvrages en maçonnerie ;
- pourrissement et abrasion des pieux et pièces de bois ;
- abrasion des matériaux constitutifs de la fondation (béton, pierre, métal, etc.) par les matériaux charriés ;
- trace de chocs ;
- dislocation de la maçonnerie provoquée par la croissance de racines d'arbres ;
- altération par des eaux agressives, des chaux, des ciments, des pièces de bois ;
- altération et corrosion des éléments métalliques, plus particulièrement en zone de marnage ;
- altération, fissuration d'élément de fondation en béton.



Figure 6 : Dissolution partielle du béton de chaux (Photo : SNCF)



Chapitre 4 - Surveillance

La surveillance des fondations en site aquatique est une tâche généralement délicate en raison des difficultés d'accès et d'observation directe.

Ces difficultés conduisent à souligner l'intérêt de la surveillance topographique pour déceler les mouvements de ces parties d'ouvrages (cf. fascicule 4), ce moyen n'étant pas à lui seul suffisant pour mettre en évidence toutes les formes d'évolution préjudiciables à la stabilité des fondations.

Une attention toute particulière doit être portée à la surveillance des fondations anciennes, car la limitation des moyens techniques (avant le xx^e siècle) ne permettait pas toujours d'établir les appuis à une profondeur suffisante pour que la stabilité de l'ouvrage ne soit pas compromise par l'action des eaux.

Certains ouvrages sont, de par leur nature, particulièrement sensibles aux mouvements d'appuis (voûtes, structures hyperstatiques).

Par ailleurs, le dimensionnement de certaines fondations, même récentes, ne leur permet pas de résister à toutes les conditions d'affouillement dont l'évolution peut être rapide (cf. figure 7). Ainsi, la surveillance des fondations en site aquatique ne saurait être dissociée d'une surveillance de l'évolution des conditions hydrauliques.



Figure 7 : Pont sur le Vidourle, affouillements (Photo : CETE Méditerranée)

L'impression de sécurité déduite du « bon aspect » extérieur est parfois illusoire ; il a été constaté que des massifs d'encrochements pouvaient dissimuler de graves désordres, et notamment des cavités sous les appuis, susceptibles de compromettre gravement la stabilité de l'ouvrage. Des cavités peuvent aussi se développer sous des rideaux en palplanches ou des voiles de béton disposés en protection autour d'appuis, mais conçus avec une fiche insuffisante vis-à-vis des affouillements susceptibles de se produire.

Les actions de surveillance doivent donc être conduites en faisant preuve d'une « méfiance » particulière, en se demandant si l'état apparent de l'ouvrage ne cache pas certains désordres. Cette méfiance doit être de règle dans le cas des fondations entourées d'encrochements, en l'absence de certitude sur l'existence de pieux, sur leur état, voire sur la nature même de la fondation.

De plus, toutes les actions de surveillance doivent être menées dans un cadre sécuritaire strict, notamment pour les interventions en site aquatique. Toutes les dispositions de protection du personnel prévues dans les règlements et les normes en vigueur doivent être mises en œuvre (port d'équipements de protection individuels, signalisation, etc.). En fonction du type de mission, la composition de l'équipe de surveillance sera adaptée aux conditions dans lesquelles celle-ci se déroule.

4.1 - Les actions périodiques de surveillance

4.1.1 - Périodicité de la surveillance

On rappelle que les actions périodiques de la surveillance comprennent :

- un contrôle annuel ;
- des visites d'évaluation ;
- des inspections détaillées ;
- des inspections détaillées de parties d'ouvrage.

Les fondations aquatiques ne pouvant, pour des raisons d'accès, être vues lors d'une visite d'évaluation ou d'une inspection détaillée, doivent faire l'objet d'une inspection détaillée spécifique contenant une inspection subaquatique.

Les fondations en site aquatique atteintes uniquement par les crues ou celles suffisamment découvertes à l'étiage pour être visitables à pied sec ou à l'aide d'équipements de protection individuels seront inspectées lors de la visite d'évaluation et de l'inspection détaillée.

Comme pour les inspections détaillées de structure d'ouvrage, les inspections détaillées de parties d'ouvrage contenant les inspections subaquatiques ont généralement lieu tous les six ans. Toutefois, le niveau décisionnel peut, en le justifiant, déroger à cette règle pour certains ouvrages en portant la périodicité à neuf ans pour les ouvrages fondés sur du rocher ou, à l'inverse, en la réduisant à trois ans ou même un an pour les ouvrages particulièrement vulnérables ou présentant des désordres significatifs. Il s'appuiera pour justifier de la périodicité sur une analyse des risques simplifiée. Cette analyse des risques devra prendre en compte l'exposition des fondations à l'action de l'eau, l'évolution (naturelle ou non) des conditions hydrauliques et du cours d'eau, les travaux à proximité de l'ouvrage pouvant déstabiliser les fondations, etc. Il est ainsi souhaitable de retenir une fréquence élevée dans les cas suivants :

- fondations très exposées à l'action des eaux (vitesses d'écoulement élevées, charriage important) ;
- lorsqu'il est constaté une évolution rapide, naturelle ou du fait d'interventions humaines (dragages, extractions, travaux d'aménagement, etc.) des conditions hydrauliques et du cours d'eau ;
- lorsque des travaux dans la zone d'influence de l'ouvrage laissent craindre une évolution défavorable pour la stabilité des appuis.

Il ne saurait y avoir ici de règle générale, la périodicité est à fixer en ayant apprécié la vitesse d'évolution des phénomènes agressifs.

Les visites d'évaluation ayant lieu tous les trois ans, si les risques sont modérés, l'ouvrage sera alors considéré comme évalué à l'issue de la visite d'évaluation de la structure seule (puisque les fondations sont inaccessibles à pied) et on reprendra comme cotation, la cotation de l'inspection détaillée subaquatique précédente. Dans le cas contraire (risques importants, évolutions de certains symptômes), une l'inspection détaillée subaquatique sera programmée pour évaluer la fondation.

Les inspections détaillées subaquatiques et les inspections détaillées classiques portant sur la structure doivent faire l'objet de commandes ou marchés séparés. Par contre, l'inspection détaillée subaquatique doit être, dans la mesure du possible, faite la même année que l'inspection détaillée pour évaluer l'ouvrage en totalité.

Il est à noter que, par souci d'efficacité, toute action de surveillance doit être, autant que possible, précédée par une opération de nettoyage permettant un accès et une visibilité correcte des éléments à inspecter.

4.1.2 - Le contrôle annuel

L'équipe chargée du contrôle annuel, constituée d'un personnel ayant été sensibilisé à la surveillance et à l'entretien des ouvrages d'art, doit se rendre sur le site à une période de basses eaux (étiage, chômage) pour observer la base des appuis dans les meilleures conditions.

Pour de nombreux cours d'eau, le débit à l'étiage est assez faible pour qu'il soit possible d'accéder aux appuis à pied et de procéder à l'examen des fondations.

Il est souhaitable de procéder en même temps, chaque fois que possible, à la visite des fondations et à celle de la structure.

La visite réalisée lors du contrôle annuel est faite sans mise en œuvre de moyens particuliers. Il s'agit d'un examen visuel global pour permettre de mettre au jour, par rapport à la précédente visite, d'éventuelles anomalies qui pourraient justifier de déclencher une inspection plus approfondie anticipée (inspection détaillée) ou la mise en œuvre de travaux d'entretien préventifs.

Dans le cas des fondations immergées en permanence et visitables uniquement par plongeurs, le contrôle annuel se limite à observer la structure de l'ouvrage et ses abords. Les défauts relevés sur ladite structure peuvent être l'indice de problèmes directement imputables à des défaillances des fondations. Cette analyse ne pourra être faite que par une personne spécialiste du domaine des ouvrages d'art.

Les personnels chargés du contrôle annuel pourront s'inspirer des conseils donnés pour la visite d'évaluation afin de trouver les désordres éventuels.

Lors du contrôle annuel, outre les observations évoquées précédemment sur les fondations, le constat mentionnera le niveau de l'eau le jour de la visite, à partir d'une échelle limnimétrique présente sur le site ou de toute autre référence fixe (point de l'ouvrage lui-même, par exemple).

Cas des ouvrages du réseau routier national

Le constat de contrôle annuel sera visé par le niveau opérationnel.

4.1.3 - La visite d'évaluation

Réalisée tous les trois ans, cette visite plus approfondie que le contrôle annuel doit, elle aussi, être réalisée à une période de basses eaux (étiage, chômage) pour observer la base des appuis dans les meilleures conditions possibles. Cette visite doit être réalisée par des personnels ayant suivi une formation spécifique et adaptée à l'évaluation des fondations en ouvrages d'art.

La visite d'évaluation s'effectue sans moyens particuliers.

Il est aussi recommandé de procéder en même temps à la visite des fondations et à celle de la structure.

Cette visite est un examen visuel qui doit permettre de détecter l'apparition de nouveaux désordres ou d'anomalies dans le comportement des fondations et de contrôler l'évolution de ceux qui sont connus. La visite d'évaluation aboutit à une cotation de l'état apparent de chaque partie de l'ouvrage, puis à sa cotation globale.

Les personnels chargés des visites d'évaluation pourront s'inspirer des conseils donnés ci-après pour l'inspection détaillée afin de mieux appréhender les éventuels désordres.

Ces désordres seront reportés sur un support adapté (avec schémas, commentaires et photos).

Cas des ouvrages du réseau routier national

La visite d'évaluation est dirigée et exploitée par un agent ayant reçu une formation à la méthodologie IQOA. Les procès-verbaux de visite d'évaluation seront validés par le niveau organisationnel.

4.1.4 - L'inspection détaillée ou inspection détaillée de partie d'ouvrage

4.1.4.1 - Généralités

Le maître d'ouvrage gestionnaire peut se trouver dans deux situations lors de l'inspection détaillée :

- soit les fondations sont accessibles à pied, et l'inspection détaillée peut se dérouler comme une inspection détaillée d'ouvrage terrestre ;
- soit les fondations sont immergées, et l'inspection détaillée (inspection détaillée de parties d'ouvrage selon le fascicule 2 de l'ITSEOA) devra comprendre une inspection subaquatique combinée à un levé bathymétrique sommaire des abords des appuis. En effet, le recours aux examens subaquatiques doit avoir lieu dès qu'il n'est pas possible d'observer directement l'ensemble des fondations ainsi que le fond du lit avoisinant. L'inspection des parties aériennes des fondations, et celle des parties immergées des fondations doivent donner lieu à un rapport unique, même si ces examens ne sont pas pratiqués le même jour.

Dans le second cas, l'inspection détaillée doit être effectuée, par une équipe spécialisée en fondations et ayant suivi une formation d'inspecteur en ouvrages d'art, et dans toute la mesure du possible, en périodes de basses eaux. Elle est dirigée et exploitée par un agent ayant reçu une formation qualifiante de chargé d'études en ouvrage d'art.

L'inspection détaillée doit être encadrée et contrôlée par les services du maître d'ouvrage gestionnaire. Un représentant du gestionnaire doit être présent au début des opérations pour vérifier si le prestataire a pris les dispositions nécessaires, notamment vis-à-vis de la sécurité.

IMPORTANT : l'inspection subaquatique doit être programmée aussi bien sur des ouvrages soumis à inspection détaillée que sur des ouvrages non soumis à inspection détaillée au sens du fascicule 2 « Généralités sur la surveillance » : toute fondation immergée doit être soumise à une inspection détaillée subaquatique, même si l'ouvrage n'est pas soumis à une inspection détaillée.

Avant de réaliser une inspection détaillée des fondations en site aquatique, le prestataire devra obtenir les autorisations nécessaires auprès du gestionnaire du cours d'eau, du service de la navigation, etc. Il devra également s'informer des risques ou des restrictions liés aux lâchés d'eau, à la navigation, à la présence de réserve de pêche, ou à toute autre règle particulière liée à la protection de l'environnement.

L'inspection détaillée subaquatique

L'intervention de plongeurs pour réaliser les inspections détaillées subaquatiques entre dans le cadre des chantiers soumis aux dispositions du Code du travail pour lesquels des travailleurs sont appelés à intervenir à une pression supérieure à la pression atmosphérique locale. Ces dispositions sont régies en particulier par le décret n° 2011-45 du 11 janvier 2011 relatif à la protection des travailleurs intervenant en milieu hyperbare.



Figure 8 : Inspection subaquatique (Photo : CETE Ile-de-France)

La responsabilité de l'inspection détaillée subaquatique et de son accompagnement doit être assumée par l'organisme qui réalise la prestation.

Les travaux en milieu hyperbare ne peuvent être effectués que par des travailleurs titulaires d'un certificat d'aptitude à l'hyperbarie approprié à la nature des opérations et détenteurs d'un livret individuel.

Ce certificat d'aptitude indique l'une des classes ou sous-classes de travaux hyperbares auxquelles le travailleur a accès et mentionne l'activité qu'il est habilité à pratiquer (décret n° 2011-45 du 11 janvier 2011).

Dans le cas d'emploi de matériels de mesure (épaisseur de peintures, épaisseur d'acier, etc.), les scaphandriers devront être formés et qualifiés pour leur utilisation.

Cette mission, à caractère qualitatif, est à réaliser par des scaphandriers compétents ayant suivi une formation professionnelle d'inspecteur et de chargé d'inspection d'ouvrages d'art, dans le cadre d'une démarche qualité mise en œuvre au sein de l'entreprise.



Figure 9 : Inspection subaquatique, relevé de désordres
(Photo : CETE Méditerranée)

Il est souhaitable que les inspections détaillées subaquatiques soient menées en coordination avec le responsable de l'inspection détaillée des parties aériennes de la structure et cela, dans le souci d'optimiser les deux missions qui sont totalement complémentaires. La visite subaquatique doit être préparée par un examen du dossier de l'ouvrage et des précédentes actions de surveillance.

Le levé bathymétrique

Le levé bathymétrique doit couvrir l'ensemble des fonds influencés par la présence de l'ouvrage ; dans certains cas, la couverture du levé peut être nécessaire sur plusieurs centaines de mètres de part et d'autre de l'ouvrage.

En première approche et sans connaissance particulière sur l'ouvrage, une longueur de levé équivalente à la moitié de la largeur du cours d'eau est un bon compromis pour les cours d'eau importants. Le levé pourra être prolongé si des désordres sont observables sur les rives jusqu'à englober ceux-ci. L'observation d'une évolution des désordres (consignée dans le dossier d'ouvrage) peut permettre de mieux définir le levé à réaliser.

Dans les cas courants (cours d'eau stable, pas de désordre observé sur les rives, profondeur faible du cours d'eau et faible courant), une bathymétrie sommaire pourra être réalisée à l'aide de méthodes classiques (canne graduée). Cette prestation pourra alors être intégrée au marché d'inspection subaquatique.

Pour des cours d'eau larges ou pour des raisons de sécurité, de profondeur d'eau, de courant ou de chute d'eau, de visibilité du milieu et pour les ponts en état précaire pour cause de mobilité importante des fonds, on pourra être amené à réaliser une « bathymétrie aux instruments ». Ce levé bathymétrique aux instruments est réalisé à l'aide d'un sondeur ou d'un sonar couplés à un système de positionnement automatisé. Cette prestation fera l'objet d'un marché séparé de celui de l'inspection détaillée subaquatique (ou d'un marché à lots séparés).

Cas des ouvrages du réseau routier national

Le recours à une « bathymétrie aux instruments » devra être validé par le niveau décisionnel.

Le type de levé (description et positionnement des zones à lever, précision et résolution demandées pour chaque zone, etc.) à effectuer doit être défini par cahier des charges. Le type de levé doit être adapté à la recherche d'informations désirée : en particulier, les profils devront être resserrés aux abords des fondations de façon à pouvoir mettre en évidence la présence d'affouillements.

Le levé bathymétrique pourra dans certains cas être utilisé pour reconnaître la position des appuis d'un ouvrage, ou des éléments de protection : rideaux de palplanches, pieux, massifs de protection, enrochements et structures diverses pouvant interférer sur la dynamique hydraulique et sur la faisabilité des travaux de confortement.

Dans certains cas, il pourra être utile de recalibrer les résultats d'une bathymétrie aux instruments par des méthodes simples (cannes graduées).

Le levé bathymétrique doit être raccordé à un système de nivellement assurant une référence fixe permettant le recalage relatif du niveau du lit par rapport à la structure.



Figure 10 : Matériel utilisé pour le levé bathymétrique (Photo : CETE Normandie-Centre)

Pour les détails relatifs à la réalisation des relevés bathymétriques, il est recommandé de se référer au document « Recommandations pour la conduite d'un levé bathymétrique » publié par l'Association pour la promotion de l'hydrographie (octobre 2008)[20].

La périodicité des levés bathymétriques doit être adaptée comme la périodicité des inspections détaillées subaquatiques.

4.1.4.2 - Contenu de l'inspection détaillée

Tant pour l'inspection détaillée subaquatique que pour l'inspection des fondations accessibles à pied, la mission de l'équipe d'inspection détaillée comprend :

- l'exécution de relevés sur les plans d'inspection, avec :
 - la cartographie complète et l'inventaire des désordres ;
 - le catalogue des photographies repérées sur les plans et commentées ;
 - l'inventaire, la localisation et le relevé de tous les dispositifs de mesure ou de surveillance implantés ou en place le jour de l'inspection détaillée ;

- le lever des fonds et des cotes du plan d'eau aux abords de l'ouvrage, et le tracé de profils en travers du lit ;
- la mention des parties d'ouvrage qui n'ont pas pu être inspectées avec la justification de cette non-inspection, en particulier en cas d'eaux troubles ou turbides ;
- la rédaction d'un procès-verbal d'inspection détaillée, avec :
 - l'inventaire exhaustif de toutes les parties inspectées avec la description des désordres ;
 - la description du cours d'eau au droit et aux abords de l'ouvrage en indiquant notamment la position du lit, des passes navigables éventuelles, les aménagements hydrauliques sur le cours d'eau (barrage, seuil, épis, etc.) ;
 - l'état de fonctionnement des dispositifs de mesure et de surveillance renforcée en place ;
- la rédaction d'une note de synthèse. Cette note doit mentionner en particulier clairement l'incidence du cours d'eau sur l'état des fondations, faire apparaître l'évolution probable de la zone d'influence et ses conséquences sur la stabilité des fondations. Elle doit permettre d'interpréter les constatations, mesures, essais et reconnaissances effectuées dans le cadre de l'inspection subaquatique, et proposer des suites à donner relatives à l'état des fondations.

L'inspection subaquatique se borne à faire des constatations et donne une appréciation sur l'état des fondations sans constituer un diagnostic de l'ouvrage dans son ensemble.

Les conclusions sur les suites à donner portant sur l'avis sur l'état de l'ouvrage, les suggestions sur les travaux d'entretien courants ou spécialisés et de réparation, les suggestions sur les travaux d'aménagement, les investigations et les actions de surveillance à prévoir sont à réaliser dans le cadre des conclusions de l'inspection détaillée de l'ouvrage par le chargé d'études ou dans le cas d'un ouvrage non soumis à inspection détaillée par un agent spécialisé en ouvrages d'art de niveau chargé d'études.

Dans tous les cas, la définition des travaux de réparation des fondations en site immergé nécessite un diagnostic préalable basé sur les résultats des investigations complémentaires définies à l'issue de l'inspection détaillée.

En cas de désordres importants, le maître d'ouvrage gestionnaire peut être amené à prendre des mesures de sécurité immédiate, restrictions de circulation, fermeture de l'ouvrage et/ou des mesures de sauvegarde, confortement d'urgence (cf. fascicule 3).

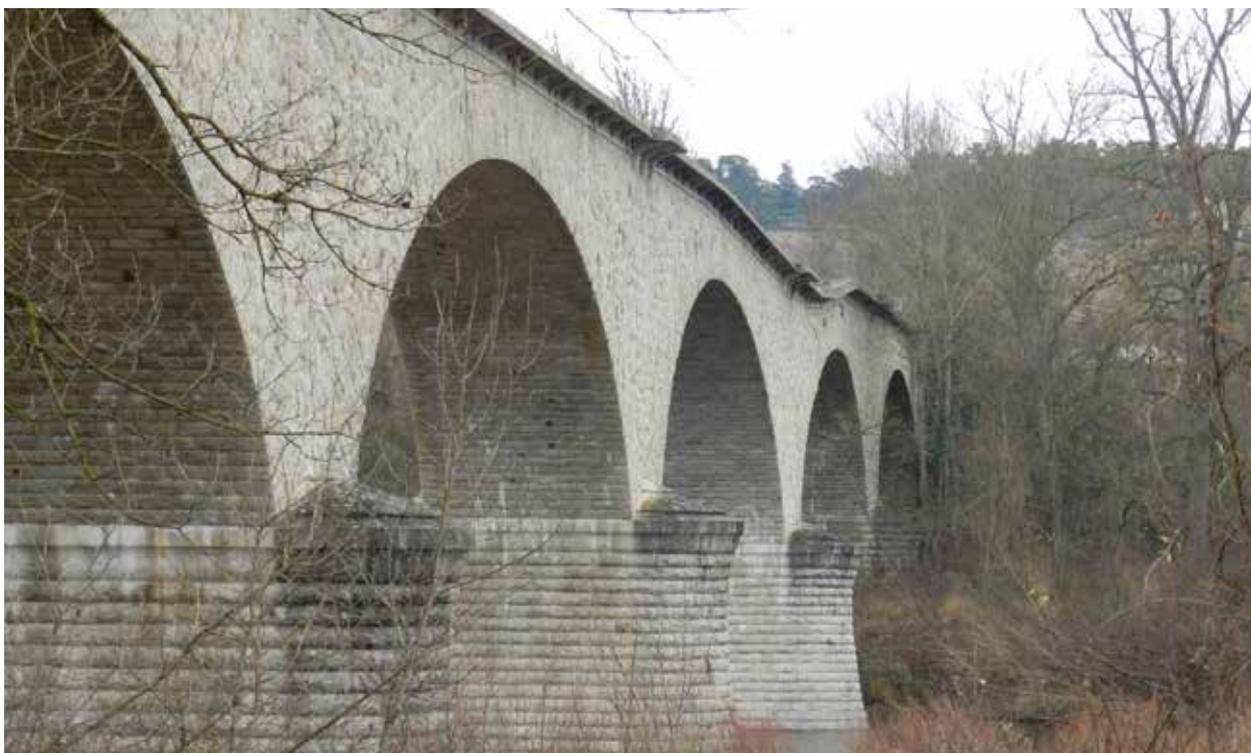


Figure 11 : Tassement d'appui du pont d'Orzilhac (Photo : CETE de Lyon)

La mission de l'équipe d'inspection subaquatique peut aussi comprendre la réalisation d'investigations ou d'auscultations telles que des mesures d'épaisseur de peinture, des mesures d'épaisseur d'acier, des mesures d'ouverture de fissures, et le cas échéant, des prélèvements de béton. Il faudra alors veiller à ce que l'équipe ait des références et des qualifications dans le domaine.

4.1.4.3 - Points à examiner

Les points suivants sont à examiner et à reporter sur un compte rendu détaillé (cf. annexe 5 du fascicule 2) :

Cours d'eau

- la position du lit et le niveau de l'eau par rapport à l'ouvrage ;
- la nature des fonds et les anomalies de leur topographie, en particulier les géométries et positions de fosses imputables à l'affouillement local des appuis et à l'effet du rétrécissement ;
- la présence de tourbillons avec relevé de leur position ;
- l'amoncellement de corps flottants et d'alluvions obstruant le débouché.

Berges

- les signes d'attaque et de détérioration des berges au voisinage de l'ouvrage ;
- les traces témoignant d'une amorce de contournement de culée (érosion, désorganisation ou effondrement des protections de talus, etc.).

Massifs d'enrochements du voisinage immédiat de l'ouvrage

- les variations de la géométrie des massifs par rapport à l'inspection détaillée précédente.

Enceintes et rideaux de protection

- les marques d'altération, de dislocation ou de rupture des rideaux et batardeaux, qu'ils soient en bois, métalliques ou en béton ;
- la disparition du matériau de remplissage des batardeaux et crèches.

Radiers

- l'état des parafouilles amont et aval ainsi que tout signe d'affouillement, d'altération ou de dislocation de ceux-ci ;
- tout signe de cheminement d'eau sous le radier ;
- les traces d'abrasion ou de désagrégation du radier ;
- les dislocations et disparitions des blocs ou pierres des ouvrages en maçonnerie ;
- les fractures et les fissures.

Base des appuis

- l'aspect général de la base des appuis en notant la désagrégation du liant, le disjointoiement des pierres, les pierres fracturées et manquantes des ouvrages en maçonnerie, les traces d'abrasion intense, d'altération ou de chocs ;
- les fractures et les fissures dans les appuis avec leur ouverture et leur orientation ;
- les fuites de matériau de remplissage.

Fondation et sol support

- la présomption de l'existence de cavités. L'existence de cavités sous l'ouvrage constitue un danger important pour sa stabilité ; la recherche d'éventuelles cavités doit ainsi être menée avec une attention et des précautions particulières vis-à-vis de la sécurité ;
- les cavités ne sont souvent pas visibles de l'extérieur, mais certains indices peuvent être fournis par l'état des protections ou par l'existence de circulations d'eau anormales : résurgences à l'aval ou sur le côté de l'appui, tourbillons se détachant de l'appui, dépression localisée, etc. ;
- si l'ouvrage est fondé sur pieux, l'inspection ne peut être que partielle et porte sur l'état du béton (abrasion, désagrégation, etc.) et des gaines éventuelles (corrosion, perforation, etc.).

Structure

- les désordres dans la structure (fissures, fractures, etc., cf. figure 12). Il convient de signaler que des désordres dans la structure, notamment dans les voûtes en maçonnerie ou dans les piles en élévation, mais aussi à l'intrados de l'ouvrage quel que soit le type de structure ou de tablier, sont fréquemment l'indice d'anomalies dans les fondations ;
- à l'inverse, il faut aussi indiquer que des désordres importants peuvent exister dans les fondations sans aucune manifestation en structure.



Figure 12 : Fracture dans un mur de soutènement (Photo : DRIEA Île-de-France)

Remblais d'accès

- relever sur les schémas en plan et en élévation les traces d'érosion des remblais d'accès ; leur bon état est un élément important pour la protection et le bon comportement des culées.

Tous les points non examinés devront faire l'objet d'une justification.

Cas des ouvrages du réseau routier national

L'évaluation résulte d'une inspection effectuée conformément aux modalités définies dans les documents méthodologiques IQOA établis et diffusés par le Sétra.

L'inspection est effectuée conformément à la description faite dans le fascicule 10 et la cotation est effectuée à l'aide des documents méthodologiques IQOA.

4.2 - Les actions liées à des événements particuliers de la vie de l'ouvrage

4.2.1 - L'inspection détaillée initiale (IDI)

Cette inspection est réservée aux ouvrages neufs pour établir un point zéro de la vie d'un ouvrage, ou aux ouvrages ayant fait l'objet d'une campagne de réparation ou de transformation importante.

Les fondations en site aquatique sont, comme pour le reste de l'ouvrage, concernées par cette action.

Le but principal de l'IDI est de dresser un état de référence du milieu aquatique dans la zone d'influence de l'ouvrage.

Pour un ouvrage neuf, du fait de l'application du Code de l'environnement, des compensations hydrauliques sont faites systématiquement, ce qui peut modifier les conditions hydrauliques aux abords des ouvrages. Cela peut justifier un examen approfondi des fondations lors de l'IDI de l'ouvrage.

De plus, entre la réalisation des fondations et la mise en service d'un ouvrage, suivant l'importance de la structure, il peut s'écouler une période suffisamment longue (un à deux ans, voire plus) pendant laquelle les fonds du cours d'eau peuvent évoluer.

En fonction de l'exposition des fondations à l'action de l'eau, de l'évolution prévisible (naturelle ou non) des conditions hydrauliques et du cours d'eau, les travaux à proximité de l'ouvrage pouvant déstabiliser les fondations, il sera réalisé une bathymétrie générale des fonds du cours d'eau. Ce levé bathymétrique devra être raccordé au nivellement de l'ouvrage et de ses appuis.

L'inspection détaillée initiale doit être encore plus minutieuse qu'une inspection détaillée périodique, car elle constitue l'état de référence pour le suivi de l'ouvrage dans le temps et les actions de surveillance périodiques.

4.2.2 - L'inspection spécifique de fin de garanties contractuelles

Ce type d'inspection est identique, tant dans le fond que dans la forme, à l'inspection détaillée périodique. Elle intervient comme son nom l'indique en fin de la période de garantie contractuelle d'un ouvrage.

À l'issue de l'analyse de cette inspection, le maître d'ouvrage gestionnaire s'attardera sur les désordres apparus sur l'ouvrage qui peuvent être directement imputables au constructeur ou au concepteur et pouvant mettre en cause leur responsabilité et donner lieu à un recours en garantie.

Pour des problèmes de délais, la réalisation de l'inspection détaillée des fondations en site aquatique devra être réalisée au moins l'année précédant la fin de la période de garantie contractuelle, pour permettre de faire jouer les garanties ou responsabilités avant expiration de leurs délais.

4.2.3 - Actions liées à des événements imprévus

Une visite exceptionnelle ou une inspection détaillée exceptionnelle (IDE) doit être organisée :

1) Suite à des événements :

- suite à un événement ponctuel (par exemple une crue), dans l'objectif de vérifier l'état de l'ouvrage après cet événement. À titre indicatif, et en fonction de la connaissance de l'ouvrage, une IDE pourra être organisée suite à une crue dépassant le niveau de la crue décennale ;
- par l'observation d'anomalies graves reconnues lors des actions de surveillance organisées ;
- par l'élaboration de projets de travaux apportant des modifications importantes aux actions transmises aux fondations ou à leur mode de fonctionnement, que ces travaux concernent l'ouvrage proprement dit ou sa zone d'influence (cours d'eau, abords, etc.). L'inspection détaillée exceptionnelle a ici pour objet de recueillir les données manquantes nécessaires à la définition de l'état de service du moment et au dimensionnement des projets de travaux.

2) Dans le souci, pour certains ouvrages, de mener des investigations plus complètes que celles effectuées dans le cadre des actions périodiques, et cela grâce à la mise en œuvre de techniques et de moyens particuliers⁽¹⁾.

La visite exceptionnelle est réalisée à l'occasion de circonstances particulières qui peuvent endommager un ouvrage. L'inspection détaillée exceptionnelle est organisée lorsqu'une anomalie grave a été décelée.

Dans le cas de crues importantes (dépassant le niveau de la crue décennale), une visite exceptionnelle est réalisée pendant et après la crue. Pendant la crue, sont à relever :

- la cote de la ligne d'eau à l'amont et à l'aval de l'ouvrage par appréciation visuelle, ou lecture sur les échelles lorsqu'elles existent ;
- l'étendue du plan d'eau ;
- tout signe traduisant des conditions d'écoulement agressives pour l'ouvrage (amoncellement de corps flottants, début de contournement de l'ouvrage, attaque de biais des appuis, etc.).

Il convient ensuite de revenir sur les lieux, d'observer l'ouvrage et le cours d'eau après la crue et de relever alors les changements importants tels qu'une modification de la configuration du lit, et les affouillements.

(1) Certains procédés et modes opératoires des moyens à disposition sont exposés dans le document « Fondations de ponts en site aquatique, en état précaire ».

Outre les périodes de crues importantes vis-à-vis de l'ouvrage, il faut intensifier la surveillance des fondations :

- lorsque l'ouvrage est pris par les glaces et après la débâcle (voir la circulaire d 9506 du 4 février 1963 et les notes de février 1956 qui lui sont annexées, relatives à la protection des ponts routiers contre les phénomènes d'embâcle et de débâcle) ;
- à l'occasion d'une forte augmentation de la circulation de poids lourds, par exemple lors de la mise en place d'une déviation ;
- en cas de travaux de terrassement dans le lit (passage d'une canalisation, etc.) ;
- au passage de convois exceptionnels particulièrement agressifs ;
- et pour tout autre événement pouvant mettre en cause la stabilité des appuis (choc de bateau ou séisme, par exemple).

4.3 - Surveillance renforcée et haute surveillance

Lorsque l'état d'un ouvrage le justifie ou en cas d'incertitude sur l'origine, la nature et la cause de désordres, lorsque l'ouvrage a un caractère innovant ou exceptionnel, ou lorsque le modèle géotechnique ne peut être établi avec un degré de précision suffisant (aléa résiduel géotechnique), le maître d'ouvrage gestionnaire peut décider de le soumettre à une surveillance renforcée, plus intense que la surveillance définie précédemment.

Lorsque des désordres constatés sur un ouvrage paraissent susceptibles de mettre en cause la sécurité ou la tenue de l'ouvrage, le maître d'ouvrage gestionnaire peut décider de le placer sous haute surveillance de manière à permettre, en cas de danger imminent, le déclenchement immédiat par les autorités compétentes des actions nécessaires pour assurer la sécurité.

Les modalités de ces surveillances sont précisées dans le fascicule d'application sur la surveillance renforcée et haute surveillance (fascicule 3).

Cas des ouvrages du réseau routier national

Pour les ouvrages du RRN, dans les cas complexes, la DIR peut demander la création d'un comité technique réunissant des experts choisis en fonction de la nature du problème et susceptibles d'apporter toute assistance technique nécessaire pour définir les mesures conservatoires, établir le diagnostic et étudier les solutions de réparation.



Chapitre 5 - Entretien

Les travaux d'entretien peuvent paraître routiniers. Mais c'est du soin apporté à leur exécution et à la régularité de l'entretien que dépendra le plus souvent la bonne conservation de l'ouvrage. Il importe donc de veiller au maintien en état des éléments de protection, massifs d'enrochements, rideaux, radiers, etc., et au bon écoulement de l'eau sous l'ouvrage, afin d'éviter notamment l'attaque directe des fondations par l'eau.

L'entretien (courant et spécialisé) doit se faire dans le respect du Code de l'environnement et des règles de la police de l'eau.

De plus, avant de réaliser des travaux d'entretien, le maître d'ouvrage de ces travaux devra obtenir les autorisations nécessaires auprès du gestionnaire du cours d'eau, du service de la navigation, etc. Il devra également s'informer des risques ou des restrictions liés aux lâchés d'eau, à la navigation, à la présence de réserve de pêche, ou à toute autre règle particulière liée à la protection de l'environnement.

5.1 - Entretien courant

Les opérations d'entretien courant qui ne concernent que les parties accessibles des fondations doivent être effectuées lors de la visite annuelle et en période d'étiage ainsi que lors de la préparation de chaque inspection pour permettre d'observer les différentes parties de l'ouvrage⁽¹⁾.

Cas des ouvrages du réseau routier national

L'entretien courant est réalisé par le niveau opérationnel.

5.1.1 - La végétation

La végétation gênante (en particulier arbustive), qui contribue au fil du temps à l'éclatement des maçonneries, doit être éliminée régulièrement.

De même, le développement d'une végétation importante à proximité de l'ouvrage (susceptible de réduire le débouché hydraulique, ou de modifier la vitesse et l'orientation des écoulements) doit être évité.

Des précautions particulières doivent être prises en cas de présence de plantes envahissantes comme la Jussie. Dans la mesure du possible, ces plantes ne doivent pas être manipulées. Si elles devaient être supprimées, elles doivent être éradiquées en respectant un protocole adapté et traitées de même.

5.1.2 - Travaux aux abords des ouvrages

Le débouché doit être maintenu en supprimant les amoncellements de corps flottants devant les piles et de débris divers (cf. figure 13). Les atterrissements susceptibles de modifier l'équilibre des flux en débit normal doivent être curés.

Les dispositifs d'écoulement des eaux (barbacanes, drains, etc.) doivent être nettoyés et entretenus, en particulier pour les murs de soutènements.

(1) Fiches en annexe du guide « Entretien des ouvrages d'art, guide à l'usage des subdivisions », janvier 2000.



Figure 13 : Embâcles (Photo : SNCF)

Certaines opérations d'entretien courant peuvent donner lieu à des opérations d'entretien spécialisé quand les moyens à mettre en œuvre sont plus importants (embâcles de taille importante).

5.1.3 - Préparation à une inspection détaillée

Afin de pouvoir observer toutes les parties de l'ouvrage, les abords de l'ouvrage devront être nettoyés et débroussaillés et les embâcles enlevées. Un nettoyage au jet d'eau claire sous pression pourra être effectué. Pour les ouvrages en maçonnerie, on veillera cependant à ne pas arracher les joints qui seraient en bon état. Si les joints sont dégradés, cette opération devra être suivie d'une opération d'entretien spécialisé visant à rejointoyer la maçonnerie.

Ces actions, y compris le faucardage⁽²⁾, ne doivent être entreprises qu'après avoir sollicité l'avis des services chargés de la police de l'eau et des organismes concernés par les ressources halieutiques.

5.2 - Entretien spécialisé

L'entretien spécialisé nécessite des moyens particuliers et peut être décidé soit après une visite annuelle, une visite d'évaluation ou soit après une inspection détaillée. Cet entretien spécialisé doit faire l'objet d'une étude et d'une préparation afin d'être réalisé de préférence en période d'étiage. Les travaux d'entretien spécialisé doivent respecter la géométrie initiale de l'ouvrage et ne pas modifier son débouché hydraulique.

5.2.1 - L'entretien des massifs d'enrochements

C'est une opération essentielle pour la protection des fondations anciennes, et le plus souvent indispensable. Il faut au préalable s'assurer, aux moyens d'investigations complémentaires appropriées, que les enrochements ne masquent pas de cavité sous les appuis.

La géométrie et la cote du sommet des talus d'enrochements que le service entend garantir ne doivent pas être exagérément évaluées pour ne pas réduire inutilement le débouché. Une telle surestimation tend à accroître l'ampleur des affouillements et à accélérer la désorganisation des massifs que l'on s'efforce de maintenir en état. Il faut aussi veiller à ce que les enrochements ne surchargent pas la fondation (exemple des platelages débordants).

(2) Le faucardage désigne l'opération qui consiste à couper et exporter les roseaux et autres herbacées poussant dans l'eau des fossés, rivières, canaux, étangs et autres surfaces toujours en eau. L'opération peut parfois aussi intégrer un curage de la vase.

La mise en place d'encrochements est une tâche qui peut s'avérer très difficile en fonction des conditions hydrauliques (positionnement, contrôle, etc.). On veillera à effectuer ces opérations lors des périodes d'étiages dans la mesure du possible. Cet entretien spécialisé ne concerne que de petites opérations. Dans le cas de rechargement important, celui-ci doit faire l'objet d'un projet de réparation ; de plus, la question peut alors se poser de savoir si la solution d'encrochements doit réellement être maintenue.

La mise en place des encrochements s'effectue normalement par la tête des talus en s'efforçant d'obtenir des pentes régulières et en contrôlant l'extension de la base des massifs. Dans le cas de tapis, il faut veiller à leur continuité.

La taille des blocs doit être suffisante pour qu'ils ne soient pas entraînés par le courant ; à cet effet, la situation du moment et celle des autres ouvrages situés sur le même cours d'eau sont à observer avec attention.

Pour plus de précisions, il est recommandé de se reporter au guide « Encrochement » du CETMEF [21].

5.2.2 - Le rejointoiement des maçonneries (sur de petites surfaces)

Avant la réfection des joints, l'état de la maçonnerie sous-jacente sera vérifié. L'opération de rejointoiement comporte successivement l'enlèvement des joints dégradés, le nettoyage des espaces entre les moellons puis la mise en place du mortier de rejointoiement.

5.2.3 - La protection des aciers des bétons armés dégradés

Les dégradations du béton peuvent mettre à nu les armatures, ou à l'inverse, les armatures corrodées peuvent faire éclater le béton. La réparation nécessite la mise à nu complète des armatures et l'enlèvement du béton dégradé ou pollué. Les armatures seront décapées à blanc sur une longueur suffisante (sablage et brossage), enduites d'un produit passivant puis enrobées par un produit de ragréage ou un béton.

Ces opérations se réalisant à sec, il peut être nécessaire de réaliser un batardeau pour mettre à sec certaines parties de l'ouvrage. Si les opérations de rejointoiement ou de protection des aciers concernent une petite partie de l'ouvrage, elles seront effectuées dans le cadre de l'entretien spécialisé, sinon ces opérations seront intégrées dans un projet de réparation

Pour plus de précisions, il est recommandé de se reporter au guide « Choix et application des produits de réparation et de protection des ouvrages en béton » [22] et au guide « Protection des bétons par application de produits à la surface des parements » [24].



Chapitre 6 - Réparation

L'étude du projet de confortement ne doit être engagée qu'une fois le diagnostic établi sur l'ensemble de l'ouvrage, fondations et structure, et une fois connue l'évolution probable du cours d'eau. Ce diagnostic est réalisé à l'issue des investigations complémentaires portant sur la qualité des matériaux, le fonctionnement de la structure et les recalculs éventuels permettant d'identifier la cause réelle des désordres observés sur l'ouvrage et ses fondations.

Le projet de réparation doit être élaboré selon les principes généraux suivants :

- les travaux doivent être un réel traitement de la cause des problèmes observés et non une dissimulation des désordres reconnus ou non identifiés ;
- les travaux ne doivent pas uniquement porter remède aux dégradations constatées, mais aussi se prémunir de l'évolution prévisible à long terme du cours d'eau : évolution naturelle, travaux et aménagements pouvant modifier les conditions d'écoulement, etc. ;
- la possibilité de l'amélioration de la situation hydraulique du moment (débouché notamment) ou à venir (prise en compte de la politique d'aménagement du cours d'eau) doit être examinée à cette occasion, si besoin est ;
- le projet doit tenir compte de l'ensemble des contraintes environnementales prises au sens large⁽¹⁾ ;
- Il est conseillé avant tout démarrage de l'étude de vérifier les prescriptions du Code de l'environnement et les arrêtés de classement en vigueur.

L'intervention sur les fondations doit, si nécessaire, être précédée d'un renforcement ou d'une amélioration de la structure (travaux d'opportunité), afin d'assurer un bon comportement de l'ensemble de l'ouvrage pendant les travaux de réparation des fondations. Le phasage des travaux de réparation des fondations doit permettre d'assurer la stabilité de l'ouvrage pendant l'intervention.

Des recommandations pour l'élaboration du projet de confortement des fondations et un exposé des différentes méthodes de réparation sont contenus dans le document « Fondations de ponts en site aquatique en état précaire »[9].

6.1 - Le diagnostic

La complexité et la diversité des ouvrages existants en milieu aquatique imposent que le diagnostic soit mené par une équipe de personnes qualifiées, ayant des compétences en :

- structures,
- matériaux,
- géotechnique,
- hydraulique, voire hydromorphologie.

Nombre de structures en site aquatique présentent une configuration rendant délicat l'accès à tout ou partie de leurs éléments (zones de marnage ou en permanence immergées, etc.). La préparation des interventions sur ces ouvrages, tant pour les inspections que pour les investigations et les réparations, doit prendre en compte ce type de contraintes qui s'avèrent souvent très pénalisantes, aussi bien techniquement que financièrement.

Pour conduire un diagnostic fiable d'un ouvrage il faut, dans un premier temps, avoir une parfaite connaissance de sa structure : ses matériaux constitutifs, sa géométrie, son fonctionnement mécanique, son environnement, son accessibilité et toutes les contraintes de site et d'exploitation. Pour cela, il est indispensable de **consulter le dossier de l'ouvrage**.

(1) Faune, flore, mais aussi activité humaine, exploitation du cours d'eau et autres interférences.

La consultation du dossier de l'ouvrage et une visite rapide de l'ouvrage permettent, d'une part de définir le programme **des inspections visuelles (visite d'évaluation, inspection détaillée ou inspection détaillée subaquatique)**, d'autre part, si les conclusions de ces inspections le préconisent, de définir **les investigations complémentaires**.

Avant d'amorcer la procédure de réalisation d'un diagnostic sur un ouvrage, le maître d'ouvrage gestionnaire doit savoir ce qu'il attend dudit diagnostic et préciser le programme dans **un cahier des charges** afin que la commande soit la plus précise et la plus pertinente possible, et surtout que la restitution par le prestataire réponde aux attentes initiales du maître d'ouvrage gestionnaire.

Le maître d'ouvrage gestionnaire peut sous-traiter la partie technique du diagnostic, mais il doit piloter la mission et assurer la coordination des différents intervenants.

Le diagnostic est l'ensemble des opérations conduisant à l'évaluation de l'état de l'ouvrage à un instant t et comprend :

- l'analyse du dossier d'ouvrage :
 - identification des différences entre les plans d'exécution (ou de récolement) et la structure en place ;
 - recherche des notes de calculs et vérification de leur pertinence et de leur bonne application lors de la réalisation de la structure ;
 - recherche et analyse des derniers rapports d'inspection détaillée et d'inspection subaquatique ;
 - analyse de l'environnement ;
 - historique des principaux événements subis par l'ouvrage ;
- une inspection visuelle aérienne et/ou subaquatique ;
- d'éventuelles investigations complémentaires (auscultation, recalcul) :
 - auscultation en place ;
 - prélèvements d'échantillons de matériaux pour évaluer en laboratoire ses propriétés mécaniques ;
 - organisation d'une reconnaissance géotechnique dans le cas où les données géotechniques disponibles sont insuffisantes ;
 - vérification du niveau de nappe (sondes piézométriques) ;
 - réalisation d'un levé topographique de la structure pour déterminer les zones soumises à des mouvements, notamment en ce qui concerne les mouvements liés à des défaillances des fondations. Un levé bathymétrique en complément pourra permettre de détecter d'éventuels mouvements de fonds importants dans la zone d'influence de l'ouvrage.

Avec les données recueillies dans le dossier d'ouvrage, *in situ* et après analyse des matériaux, un recalcul de la structure, excluant ou non les désordres, peut être réalisé en prenant en compte les contraintes réelles d'exploitation (surcharges, poussée hydrostatique) et les conditions réelles d'environnement.

Les résultats de ces calculs feront ressortir les faiblesses éventuelles de la structure pouvant expliquer les désordres qui ont été relevés. Les calculs permettent aussi d'évaluer la capacité portante et de définir la nécessité ou non d'un renforcement.

Si, à l'issue des trois étapes précédentes, il subsiste encore des doutes, un suivi de l'ouvrage par instrumentation (inclinométrie, extensométrie, mesures de déplacements, jauges, etc.) peut être réalisé. Cette instrumentation peut aussi être couplée avec des essais de chargement de la structure. En fin d'investigations, il peut alors être établi un programme d'actions pour remédier aux désordres détectés (réparation, renforcement, suivi spécifique et/ou surveillance périodique).

L'étude du dossier d'ouvrage, l'analyse des éléments de contexte environnemental et l'inspection visuelle doivent permettre d'établir un prédiagnostic qui identifie l'origine probable des défauts observés sur la structure.

Les investigations, si elles sont nécessaires, permettent de compléter et valider les hypothèses formulées à l'occasion du prédiagnostic et de formuler le diagnostic définitif. En cas de doute, de nouvelles investigations peuvent s'avérer nécessaires à l'établissement du diagnostic final et éviter ainsi les erreurs de diagnostic.

Cas des ouvrages du réseau routier national

Pour les ouvrages du RRN, dans les cas complexes, le DIR peut demander la création d'un comité technique réunissant des experts choisis en fonction de la nature du problème et susceptibles d'apporter toute assistance technique nécessaire pour définir les mesures conservatoires, établir le diagnostic et étudier les solutions de réparation.

6.2 - Le projet de réparation

Malgré les coûts, les réparations doivent viser à être un remède efficace et durable des désordres rencontrés. Les « cache-misère » et réparations partielles et/ou limitées aux zones accessibles sont non seulement inefficaces, mais dangereux car ils procurent une impression de sécurité illusoire. Par ailleurs, ils rendent encore plus difficile la détection de la progression de l'attaque des appuis en masquant les désordres. En particulier, les désordres ayant une origine géotechnique (poussée des sols, poinçonnement, tassement, etc.) doivent être clairement identifiés afin de ne pas traiter uniquement les symptômes visibles sur la structure, mais bien les phénomènes qui en sont à l'origine.

Le confortement ne doit pas uniquement porter remède aux dégradations constatées, mais se prémunir de l'évolution prévisible à long terme du cours d'eau.

Il est souhaitable par ailleurs d'examiner la possibilité d'améliorer à cette occasion, si besoin est, la situation hydraulique du moment ou à venir.

Les travaux de confortement ne doivent être entrepris qu'une fois le projet de réparation défini avec précision, à la suite d'un diagnostic portant sur l'ensemble de l'ouvrage, fondations et superstructures. La pérennité d'une réparation ne peut être assurée que si cette dernière est adaptée à l'ouvrage et à son environnement.

Le dossier du projet doit en particulier :

- expliciter clairement les contraintes techniques et environnementales et les prendre en compte ;
- expliciter le principe des travaux ;
- comprendre un phasage réaliste et précis (prévoyant les travaux à l'étiage) et ne mettant pas en péril la structure ;
- expliciter les méthodes d'exécution ;
- prévoir le contrôle des travaux (plan de contrôle et points d'arrêt) et les moyens adaptés (passage de caméra, etc.).

Pour les ouvrages en milieu aquatique, le choix d'une action préventive ou curative est fortement orienté, économiquement et techniquement, par le milieu environnant.

En effet, un ouvrage intégralement découvert en période d'étiage sera traité différemment d'un ouvrage avec parties immergées en permanence.

L'accessibilité sous les ouvrages en milieu aquatique est souvent délicate. La mise en place d'accès pour les traiter et les réparer est un des postes principaux dans le coût de réparation.

Le fait de travailler uniquement en période d'étiage peut limiter les temps d'intervention et par voie de conséquence, augmenter les coûts. La démarche de sélection des actions se trouve donc limitée avec une marge de manœuvre restreinte compte tenu des critères précités.

Avant toute intervention, une étude fine de faisabilité est à réaliser. En fonction de l'enjeu, dès ce stade, le service en charge de la police des eaux pourra être associé.

Ouvrages intégralement découverts en période d'étiage

Totalement accessibles, ces ouvrages peuvent théoriquement accepter tous les types de techniques de réhabilitation. Toutefois, la durée limitée des périodes d'étiage élimine de fait sans aménagement spécifique les interventions nécessitant des durées de réalisation trop longues et incompressibles.

Pour ces ouvrages et pour la qualité des travaux, on privilégiera donc la réalisation des travaux en période d'étiage, si la durée des travaux est compatible avec la durée de l'étiage.

Ouvrages soumis ou non au marnage avec parties immergées en permanence

Les parties immergées en permanence rendent difficiles les techniques de réparation devant être impérativement réalisées à l'air libre.

Compte tenu des difficultés de réalisation, l'organisation détaillée du contrôle des travaux devra être prévue lors de l'établissement du projet de réparation.



Remarque :

Il est possible de s'affranchir des problèmes d'immersion par la réalisation d'enceintes de mise hors d'eau (batardeaux, etc.). Toutefois, cette solution onéreuse et lourde n'est applicable que pour des chantiers de grande ampleur et/ou lorsque l'appel à cette technique est jugé totalement indispensable et économiquement viable et si elle est possible vis-à-vis de l'environnement.



Figure 14 : Ceinturage d'un appui à l'abri d'un batardeau (Photo : J.P. Levillain)

6.3 - L'interface avec le milieu

Le Code de l'environnement établit ainsi une procédure d'autorisation ou de déclaration pour tous les IOTA (installations, ouvrages, travaux et aménagements), notamment lorsqu'ils entraînent :

- des prélèvements restitués ou non dans les eaux superficielles ou souterraines, des modifications de niveau ou du mode d'écoulement des eaux, et des déversements, écoulements, rejets ou dépôts directs ou indirects, chroniques ou épisodiques, même non polluants ;
- des travaux d'assèchement, des remblais, des épandages, des stockages souterrains de produits chimiques et d'hydrocarbures, des forages, etc.

Cette police de l'eau s'applique à toutes les eaux superficielles, souterraines, domaniales ou non, aux eaux maritimes littorales ainsi qu'aux milieux humides.

Dans la pratique, la quasi-totalité des projets de réparation d'ouvrages en milieu aquatique est ainsi soumise au régime d'autorisation administrative et peut donc faire l'objet d'une enquête publique de police de l'eau⁽²⁾. Dès l'établissement du projet de réparation, le maître d'ouvrage prendra contact avec le représentant de la police de l'eau pour connaître le régime auquel les travaux sont soumis.

Les travaux d'entretien (hors entretien courant), de réparation ou de renforcement de la structure des ponts et viaducs dont la réalisation est prévue en tout ou partie à l'intérieur d'un site Natura 2000 doivent faire l'objet d'une déclaration au titre du Code de l'environnement (décret n° 2011-966 du 16 août 2011 relatif au régime d'autorisation administrative propre à Natura 2000).

De plus, avant de réaliser des travaux de réparation, le maître d'ouvrage devra obtenir les autorisations nécessaires auprès du gestionnaire du cours d'eau, du service de la navigation, etc. Il devra également s'informer des risques

(2) Des informations peuvent être trouvées dans le guide « Cours d'eau et ponts » [1].

ou des restrictions liés aux lâchés d'eau, à la navigation, à la présence de réserve de pêche, ou à toute autre règle particulière liée à la protection de l'environnement et traduire ces contraintes dans son marché.

Si ces procédures ne sont pas respectées, les travaux en site aquatique peuvent être rapidement stoppés et prendre un retard important. Les études hydrauliques nécessaires à la réalisation de certains travaux peuvent être longues. Il est conseillé de vérifier les prescriptions du Code de l'environnement au moment de l'étude.

Le maître d'œuvre vérifiera ensuite que l'entreprise suit bien les prescriptions du marché vis-à-vis de ces contraintes. Dans certains sites à enjeu, le marché peut prévoir l'application de pénalités destinées à inciter les entreprises à respecter les contraintes environnementales.

6.4 - Le déroulement des travaux

Pour la sécurité des usagers et des entreprises travaillant à la réparation de l'ouvrage, le maître d'ouvrage gestionnaire doit examiner les conditions du maintien de la circulation ou faire prendre les arrêtés nécessaires à des limitations éventuelles de charge.

Ces mesures doivent s'accompagner de la mise en place d'un dispositif de surveillance de l'ouvrage à définir dans chaque cas avec les spécialistes compétents (ingénieur ouvrages d'art, géotechnicien). Il est souhaitable que le dispositif de surveillance soit mis en place à l'avance pour que l'on puisse disposer d'une période d'observation avant l'intervention (influence des variations thermiques, des charges roulantes, etc.). Dans le cas des ouvrages en maçonnerie, la surveillance de la géométrie et l'évolution de la fissuration sont des sources d'informations importantes.

Certains cours d'eau peuvent connaître des crues pratiquement à toute période de l'année. Il est alors nécessaire de pouvoir définir avant le début du chantier un système d'alerte et d'organiser le repli éventuel du chantier (cf. figure 15).



Figure 15 : Estacade d'accès pendant une crue (Photo : SNCF)

Compte tenu de la difficulté de réalisation des travaux, ceux-ci doivent être particulièrement suivis et contrôlés.

En fin de travaux, un dossier de récolement est établi et inclus au dossier d'ouvrage par le maître d'ouvrage. À l'issue des travaux, une nouvelle inspection détaillée initiale est réalisée (structure et subaquatique) accompagnée d'un nivellement de référence.

6.5 - Les aménagements réalisables en accompagnement des travaux de réparation

Aménagements hydrauliques

La protection des ouvrages peut, dans certains cas, être assurée efficacement par des aménagements hydrauliques tels que seuils, radiers, digues, etc. destinés à enrayer l'érosion du lit au droit de l'ouvrage ou à protéger celui-ci de l'action directe de l'eau. Cependant, avant d'engager des travaux sur les ouvrages pris isolément, lorsque l'origine des désordres est liée à une évolution générale du cours d'eau, un aménagement de l'ensemble du cours d'eau peut être une meilleure solution tant technique qu'économique ; cette possibilité doit être étudiée.

L'incidence des aménagements sur l'environnement est à examiner et il convient de réfléchir aux conséquences à long terme de certaines situations (cote fixée par un radier, par exemple).

Le projet de tels travaux est à établir avec le concours, entre autres, de spécialistes de l'hydraulique. En outre, les études nécessitent de recueillir un nombre parfois important de données (évolution du lit et des débits hydrauliques, etc.).

Les contraintes liées aux actions sur les cours d'eau doivent être étudiées en amont dans le cadre du Code de l'environnement (étude d'impact, recensement de la faune et de la flore, adéquation du projet vis-à-vis du SAGE (schéma d'aménagement et de gestion des eaux), etc.).

Protection par enrochements et matériaux associés

Lorsqu'une protection par enrochements, gabions, géosynthétiques, etc., doit être entièrement reconstituée, les précautions suivantes sont à respecter :

- satisfaire les conditions de filtre pour limiter l'ensouillement des blocs ;
- établir si possible les extrémités des talus ou tapis sous le niveau du lit non mobilisé par les affouillements et adapter les dispositions constructives pour limiter les affouillements.

Comme indiqué au chapitre 5 « Entretien », une surélévation ou un surdimensionnement des massifs d'enrochements peuvent conduire à obtenir au final l'inverse du résultat cherché en augmentant à terme l'importance des affouillements.

Il est possible de concevoir :

- soit un dispositif perméable de souplesse adaptée ;
- soit un dispositif étanche, rigide, fondé plus profondément.

Pour plus de précisions, il est recommandé de se reporter au guide « Enrochement » du CETMEF (2009) [21].



Figure 16 : Mise en place de tapis de gabion (Photo : CETE Nord-Picardie)

6.6 - Les solutions courantes de réparation

Les solutions courantes de réparation sont présentées succinctement ci-après. Des détails sur certaines de ces techniques sont fournis en annexe 3.

Recouvrement des maçonneries par un voile en béton

Cette opération peut être rendue nécessaire, soit suite à un effondrement du parement en maçonnerie, soit dans le cas d'un ouvrage dégradé en surface et dans sa masse. Il ne faut cependant pas que le voile contribue à accumuler de l'humidité dans des maçonneries dégradées et non régénérées (mise en œuvre de barbacanes en parties émergées) ou permette des circulations d'eau, à son interface avec les anciennes maçonneries, faute de parafouille suffisamment profond.

L'adjonction d'un voile en béton n'est possible que si la réduction de gabarit qui en découle est acceptable. Une attention particulière doit être portée à l'augmentation de charge permanente apportée par le voile.

Bétonnage de cavités

Le comblement par bétonnage doit être précédé de l'enlèvement des débris et dépôts dans la cavité et du nettoyage des parties de l'ouvrage en contact avec la zone à bétonner. Dans le cas du comblement de cavités débouchant à l'extérieur, la liaison entre partie existante et partie comblée doit être assurée par des armatures en nombre suffisant (lorsque leur mise en place est possible).

Dans certains cas, le comblement est à compléter par l'injection de coulis de ciment pour les zones d'accès difficile, dont on ne peut assurer a priori le bon remplissage par bétonnage. À cet effet, des cannes d'injection et des tubes évents sont à mettre en place avant bétonnage.

La nature des bétons, mortiers et coulis et leur mise en œuvre doivent être définies à chaque fois, en fonction du problème à traiter. Il peut également s'avérer nécessaire de définir les précautions à respecter pour éviter toute dispersion des produits dans le milieu aquatique.

Lors du bétonnage, les mouvements de l'ouvrage doivent être suivis attentivement et une instrumentation appropriée peut être mise en œuvre de façon à vérifier que les seuils de déplacement spécifiés dans l'étude ne sont pas dépassés.

C'est une solution utilisée pour boucher des cavités ponctuelles dans une fondation.

Encagement des appuis ; utilisation des palplanches métalliques et de profilés dérivés

L'encagement d'un appui consiste à ceinturer celui-ci par un rideau étanche (le plus souvent en palplanches) de façon à supprimer les circulations d'eau dans les maçonneries et le sol de fondation (cf. figure 17).

Lorsque la stabilité des ouvrages est précaire, il est nécessaire de procéder à un confortement des fondations – comblement des cavités, notamment (voir ci-après) – avant de foncer des palplanches à proximité immédiate de l'ouvrage.

Toujours à proximité immédiate de l'ouvrage, certaines techniques de fonçage sont à proscrire en règle générale (lançage ou vibrofonçage) en raison des conséquences du remaniement ou de perturbations importantes du sol de fondation que leur emploi provoque.

Un soin particulier doit être attaché aux dispositifs de guidage des profils en cours de battage et à l'étalement provisoire des rideaux, dont la stabilité doit être assurée à chaque phase de l'opération.

De façon générale, il est souhaitable d'encager au plus près les massifs de fondations, ce qui est facilité par de nouvelles techniques de battage au moyen de mouton à frappe latérale.

Les profils ne doivent pas simplement être arrêtés au niveau du fond du lit, mais ils doivent être ancrés au-delà des profondeurs affouillables définies par l'étude. La profondeur d'ancrage et l'inertie des palplanches sont à définir par le calcul, tout en veillant à une mise en œuvre conforme aux bonnes pratiques. Il est par exemple important de noter que les palplanches en U ne présentent pas la même inertie lorsqu'elles sont assemblées par paires (après pinçage ou soudage des serrures) ou mises en œuvre une à une.





Figure 17 : Encagement des appuis (Photo : SNCF)

Lors de la mise en place et du fonçage des profils, les mouvements de l'ouvrage et l'évolution de la fissuration doivent être suivis attentivement et une instrumentation appropriée doit être mise en œuvre de façon à vérifier que les seuils de déplacement spécifiés dans l'étude ne sont pas dépassés.

Pour plus de précisions, il est recommandé de se reporter au guide technique « Recommandations pour l'inspection détaillée, le suivi et le diagnostic des rideaux de palplanches métalliques » du LCPC [23].

Confortement des maçonneries ou du sol de fondation par imprégnation ou injection de coulis ou de résines

Le choix de l'implantation des forages, des produits d'imprégnation ou d'injection, et de la technique d'injection, doit être fait pour chaque cas selon le but assigné aux injections (amélioration des caractéristiques mécaniques, écran d'étanchement, régénération de maçonneries, etc.) et suivant la nature du milieu à injecter.



Figure 18 : Injection de maçonnerie (Photo : RFF)

La conception de ce type de réparation nécessite la réalisation préalable d'essais de caractérisation des maçonneries et des sols. Le gestionnaire devra donc faire appel à un laboratoire spécialisé.

L'attention est attirée sur l'importance qu'il faut accorder aux divers contrôles :

- contrôle de la nature et des caractéristiques des produits d'imprégnation ou d'injection ;
- suivi en cours de forage des paramètres pressions, débits et quantités injectées (des débits importants ou de trop fortes pressions peuvent être nocifs à la stabilité de l'ouvrage) ;
- essais visant à contrôler l'efficacité des travaux (carottages pour prélèvement d'échantillons, essais mécaniques, essais d'eau, etc.).

L'ouvrage doit être surveillé attentivement durant toutes les phases de perforation et d'injection. En effet, les surpressions créées par l'introduction de coulis peuvent avoir un effet déstabilisateur (effet vérin). De plus, le coulis d'injection est un milieu visqueux qui détruit le frottement qui pourrait régner entre les différentes parties de l'ouvrage. Une attention particulière doit être portée à l'expérience lors du choix de l'entreprise mettant en œuvre ces techniques spécifiques.

Constitution d'un radier connecté à un dispositif de corsetage des appuis défailants

Ce dispositif est surtout utilisé pour les ouvrages de faible ouverture (typiquement moins de 15 à 20 m). Il permet d'augmenter la surface de répartition des charges tout en protégeant de façon radicale le lit du cours d'eau. Le rôle du radier peut aussi être de buter les culées soumises à des poussées horizontales parasites induites par les remblais adjacents. Le radier doit être bordé à ses extrémités amont et aval de rideaux parafoilles. L'existence possible de sous-pressions doit être prise en compte et un dispositif d'évents est éventuellement à prévoir.

Cette solution, qui améliore l'écoulement des eaux et ne nécessite pas de battage sur le pourtour des appuis, présente l'inconvénient de fixer définitivement le profil en travers.

L'amélioration des sols et/ou la reprise en sous-œuvre au droit des appuis constituent une alternative à la constitution d'un radier. Ces options ne doivent être envisagées qu'après identification et analyse de l'origine des désordres.

Amélioration et/ou renforcement du sol de fondation par injection solide

La technique de l'injection solide (appelée également « compactage statique horizontal ») consiste à injecter un mortier raide sous pression, dans des forages répartis selon un maillage prédéfini.

L'injection s'effectue en remontant, depuis la base des forages, par passes de l'ordre de 0,50 à 1 m en respectant un critère de limitation de volume injecté ou de pression d'injection.

Ce processus permet, au minimum, de remplir des cavités interceptées par les forages, l'objectif étant plus généralement de recomprimer des sols déstructurés (typiquement, des sables ou graves ayant été sujets à de l'érosion interne).

L'amélioration des sols est mesurée au moyen d'essais in situ (pressiomètre ou pénétromètre statique) réalisés au centre de la maille.

Lorsque l'amélioration constatée est insuffisante, on a recours à un maillage secondaire, voire tertiaire.

Le cas échéant, la résistance propre des colonnes de mortier peut être prise en compte, lorsque leur géométrie (diamètre, continuité) et leur résistance mécanique le justifient.

Le domaine d'emploi le plus courant est l'amélioration des sols sablo-limoneux avec cependant des limitations près de la surface, où ce procédé peut entraîner une légère décompression ou un soulèvement du sol.

Dans les sols argileux, l'injection solide peut entraîner des pressions interstitielles qui, en se dissipant, peuvent provoquer de légers tassements différés.

Un intérêt majeur de l'injection solide est l'autoadaptation de l'injection en fonction de la résistance mécanique du terrain, ce qui améliore l'homogénéité du massif de fondation. De plus, cette technique ne génère pas de déchets.

Reprise en sous-œuvre par jet-grouting

La technique du jet-grouting consiste dans son principe à réaliser des colonnes de « béton de sol » en injectant un coulis de ciment, à haute pression, à partir d'un forage (cf. figure 19).

L'exécution comporte les phases suivantes :

- réalisation d'un forage destructif jusqu'au niveau de la base de la colonne ;
- injection du coulis sous haute pression (plusieurs dizaines de mégapascals, MPa) au moyen d'un jet tournant, en réglant le temps de station à chaque cote et le pas de remontée. L'action du jet permet la déstructuration des matériaux en place dans un certain voisinage du jet, puis la formation d'un mélange sol-coulis par malaxage.

Moyennant la réalisation d'une planche d'essai, il est possible de régler les paramètres d'exécution en fonction du sol de façon à obtenir des colonnes d'un diamètre minimum donné.

La technique du jet simple (injection de coulis de ciment uniquement), permet de réaliser, dans les sols mous ou déstructurés, des colonnes d'un diamètre de l'ordre du mètre.

Les procédés dérivés de jet double (eau-coulis) ou triple (injection air-eau pendant la phase de découpage puis coulis de ciment pendant la phase d'injection) permettent dans certains cas d'atteindre un diamètre de plusieurs mètres.



Figure 19 : Matériel de jet-grouting (Photo : IFSTAR)

Les colonnes, réalisées à travers les maçonneries, présentent l'avantage d'offrir une grande surface de contact avec celles-ci, ce qui simplifie la reprise en sous-œuvre en terme de transmission des charges verticales.

Vis-à-vis de la portance, les colonnes de jet-grouting sont assimilées à des pieux injectés sous faible pression et se justifient comme tels.

Il convient cependant d'être vigilant vis-à-vis des aléas d'exécution pouvant être à l'origine de discontinuités. Cela est le cas, en particulier, lorsqu'une baisse rapide du niveau de coulis dans la colonne se produit (franchissement d'un horizon très poreux).

D'autres difficultés peuvent être liées à un effet d'ombre occasionné par d'anciens pieux empêchant une répartition homogène du coulis.

Enfin, lorsque le coulis excédentaire n'a plus la possibilité de s'évacuer vers la surface en raison de l'obstruction du forage, il peut se produire un claquage avec soulèvement du sol sus-jacent, pouvant être dommageable à la fondation.

Dans tous les cas, il convient d'être très vigilant vis-à-vis du phasage d'exécution de façon à ne pas affaiblir une trop grande superficie de la fondation pendant le temps de la prise du coulis. Une réalisation des colonnes en pianotage est généralement préconisée.

La réalisation de colonnes de jet-grouting est réalisable avec les précautions nécessaires dans tout type de terrain, bien que les sols très organiques soient sources de difficultés particulières en raison des difficultés à mélanger le coulis au matériau en place.

De façon courante, la réalisation de colonnes de jet-grouting peut s'accompagner d'un léger soulèvement du sol dû au coulis excédentaire dans les sols fins environnants. Des tassements millimétriques après les travaux peuvent parfois être constatés.

Un inconvénient du procédé est qu'il génère une quantité appréciable de rejets de coulis de forage (de l'ordre du volume des colonnes) qu'il est nécessaire de traiter.

Reprise en sous-œuvre par micropieux

Les micropieux présentent un diamètre inférieur ou égal à 250 mm et sont, dans le domaine de la reprise en sous-œuvre, le plus souvent mis en œuvre par forage puis scellés par injection de coulis ou de mortier (cf. figure 20). Cette technique ne nécessite que des ateliers de taille modeste permettant d'intervenir dans un espace réduit. Les performances obtenues sont susceptibles de varier de façon importante selon les technologies utilisées.

Les moyens de contrôle de la qualité d'exécution, mis en œuvre pour les pieux traditionnels (tubes d'auscultation sonique, essais d'impédance) ne sont pas utilisables pour les micropieux en raison de leur taille réduite.

Lorsque cela apparaît nécessaire, on effectue un contrôle de leur comportement sous chargement axial en prenant appui sur la superstructure.

De façon générale, toutes les techniques de reprise en sous-œuvre nécessitent que l'on assure un transfert correct des efforts de l'ancienne fondation vers la nouvelle. Pour cela, il convient, avant toute chose, de vérifier l'intégrité de la partie d'ouvrage assurant ce transfert des efforts et de restituer alors si besoin est :

- le monolithisme des parties fracturées ;
- des caractéristiques mécaniques suffisantes.

Par ailleurs, le transfert des efforts vers la nouvelle fondation ne peut s'effectuer que moyennant certaines déformations : déformation de la zone de transfert, raccourcissement élastique des nouvelles fondations. L'amplitude et l'incidence de ces déformations doivent être appréciées. Il est recommandé de continuer à surveiller l'ouvrage pendant quelques années (mesure des tassements résiduels) afin de s'assurer de l'efficacité de la réparation entreprise.

Les micropieux doivent être réalisés selon la norme NF EN 14199 « Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Micropieux ».



Figure 20 : Micropieux (Photo : J.P. Levillain)

Bibliographie

Réf.	Titre	Éditeur
1	Cours d'eau et ponts – Guide technique – Juillet 2007	Sétra
2	Guide pour la commande et le pilotage des études d'ouvrages d'art – Novembre 1997	Sétra
3	Assainissement routier – Guide technique – Octobre 2006	Sétra
4	Guide méthodologique pour le pilotage des études hydrauliques – Septembre 2007	DGUHC
5	Guide de protection des berges de cours d'eau en techniques végétales – Bernard Lachat – 1994	Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement
6	Milieu aquatique : état initial et précision d'impact dans les documents d'incidences – D. Baril – 2000	Conseil supérieur de la Pêche
7	Sollicitations hydrodynamiques du talus sous fluvial des berges – Étude bibliographique – Notice n° 87-2 - Octobre 1987	Cetmef
8	Choc de bateau sur une pile de pont – Bulletin technique n° 10 – Novembre 1970	Sétra
9	Fondations de ponts en site aquatique en état précaire – Guide pour la surveillance et le confortement – Décembre 1980	LCPC, Sétra
10	Prise en compte de la loi sur l'eau lors de la réalisation de chantiers – Octobre 2004	Comité français pour les techniques routières
11	Entretien des ouvrages d'art – Guide à l'usage des subdivisions – Janvier 2000	Sétra
12	Surveillance et entretien courant des ouvrages d'art routiers – Guide à l'usage des communes – Juillet 2011	Sétra
13	Les études d'environnement dans les projets routiers – Octobre 1997	Sétra, Certu
14	Nomenclature loi sur l'eau, application aux infrastructures routières – Juin 2004	Sétra
15	Surveillance et confortement des fondations d'ouvrage d'art en site aquatique – M. Ramette – La Houille Blanche n° 1 – 1982	Laboratoire national d'hydraulique
16	Hydraulique des ouvrages de franchissement des vallées fluviales – G. Nicollet – La Houille Blanche n° 4 – 1982	Laboratoire national d'hydraulique
17	Théorie et méthodes de détermination des affouillements pour les ponts – J. P. Levillain – 1998	ENPC Formation
18	Les affouillements et la protection des berges dans les coudes des rivières à fond mobile – Rapport de synthèse de la Sogreah – 1990	CETMEF

Réf.	Titre	Éditeur
19	Recommandations pour la restauration des ponts et autres ouvrages routiers – Mai 2006	Conseil supérieur de la Pêche
20	Recommandations pour la conduite d'un levé bathymétrique réalisé dans le domaine portuaire, côtier ou fluvial – Octobre 2008	Association pour la promotion de l'hydrographie
21	Guide « Enrochement ». L'utilisation des enrochements pour les ouvrages hydrauliques. Version française du « Rock Manual » – 2009	CETMEF
22	Choix et application des produits de réparation et de protection des ouvrages en béton – Août 1996	LCPC, Sétra
23	Recommandations pour l'inspection détaillée, le suivi et le diagnostic des rideaux de palplanches métalliques – Juillet 2003	LCPC
24	Protection des bétons par application de produits à la surface des parements – Décembre 2002	LCPC
25	Réparation et renforcement des fondations (FAFO 1)	STRRES

Annexe 1 : Aide à la mise au point du marché d'inspection des parties immergées d'ouvrages d'art

Annexe 1.1 – Notice d'aide à la préparation et à la réalisation de l'inspection

Annexe 1.2 – Proposition du candidat

Annexe 1.3 – Exemple de CCTP pour l'inspection de parties immergées d'ouvrages d'art

Annexe 1.4 – Modèle de procès-verbal

Annexe 1.5 – Modèles d'élévations et coupes types et tableau de constatations

Annexe 1.6 – Exemple de bordereau des prix

Annexe 1.1 – Notice d'aide à la préparation et à la réalisation de l'inspection

Cette notice a pour objet de donner des éléments de choix pour assister un maître d'ouvrage dans la réalisation d'inspections des parties immergées d'ouvrages d'art.

Elle aborde successivement :

- l'opportunité de l'opération ;
- les documents de la consultation ;
- l'analyse des propositions ;
- la mise au point du contrat ;
- le suivi de la prestation ;
- l'acceptation du résultat de la prestation.

A - OPPORTUNITÉS DE L'OPÉRATION

Tous les ouvrages possédant des parties immergées nécessitent une inspection régulière de ces parties. La décision de programmer cette inspection doit être prise en fonction des constatations effectuées lors des visites précédentes.

L'urgence s'impose lorsque l'on constate des mouvements du fond du lit, après une crue importante ou en cas de signes alarmants sur l'ouvrage.

Avant de lancer une consultation pour l'organisation d'une visite des parties immergées d'un ouvrage, il faut réfléchir aux points suivants :

- Les précautions à prendre en urgence, (diligences normales) ont-elles été prises ?

- Quels sont les documents qui seront mis à la disposition de l'attributaire ?
- Quelle est la période optimale pour l'inspection ?
 - La profondeur de l'eau permet-elle une visite à pied de l'ouvrage à l'étiage et/ou avec l'activation de tout dispositif permettant d'abaisser le niveau des eaux (blocage de vannage amont, ouverture de vannage aval) ? Dans le cas contraire, l'intervention de plongeurs est indispensable (à titre indicatif, on peut considérer que l'intervention relève des plongeurs quand la hauteur d'eau est supérieure à 70-80 cm ou moins en cas de conditions locales défavorables).
 - La portance du fond est-elle douteuse ? Dans les cas délicats (présence de vases, limon en suspension, etc.), la prudence imposera l'appel à des spécialistes des évolutions en site aquatique.
 - Quelle est la force du courant ? Elle est à apprécier à l'étiage et/ou avec l'activation de tout dispositif permettant d'en réduire l'ampleur. Là encore, la prudence impose l'appel à des spécialistes.
- Quels sont les objectifs à atteindre ?

Lors de la visite, les moyens mis en œuvre doivent permettre :

 - de poser la main « à plat » sur les parements en béton ou en maçonnerie ;
 - d'approcher à faible distance afin de voir toutes les parties immergées de l'ouvrage ;
 - toutefois, même lorsque ces conditions sont remplies, il est parfois impossible de tout voir, en fonction des conditions dans lesquelles se déroule la visite (forts courants avec matériaux en suspension, cavités de faibles dimensions dans l'ombre, etc.)
- Comment se déroulera l'inspection ?

L'incidence éventuelle du déploiement des moyens à mettre en œuvre pour l'inspection sur l'exploitation de la voie d'eau doit être examinée (avis à la navigation, interdiction d'accès, jours ou périodes d'ouverture de vannages amont ou aval, etc.).

Les visites subaquatiques doivent être menées avec les mêmes règles de sécurité que celles qui encadrent les autres plongées (nombre d'intervenants, protections individuelles, information des services de secours). Il faut aussi penser à avertir tous les services pouvant avoir une influence sur le régime des eaux (gestionnaires de barrage et/ou des vannages, aval et amont).
- Quels sont les impacts de la réalisation des inspections en matière de sécurité ?
 - pour les usagers du cours d'eau ;
 - pour les tiers voisins ;
 - pour les intervenants.
- Est-il possible de grouper des visites ?

Il faut exploiter les possibilités de recourir à des inspections groupées pour plusieurs ouvrages lorsqu'ils sont à visiter la même année : en effet, si le nombre de visites est important dans un même marché, les prestations seront moins chères. Il est particulièrement intéressant de grouper les visites pour :

 - des ouvrages comparables présentant des pathologies voisines et demandant le déploiement de compétences proches ;
 - des ouvrages exigeant le déploiement de moyens d'accès identiques ;
 - des ouvrages implantés sur le même cours d'eau ;
 - etc.

B - DOCUMENTS DE CONSULTATION

Choix de la procédure

La procédure à mettre en place sera du type appel d'offres ou pour des cas particuliers (petite commune, etc.) un MAPA (comportant un CCAP et un CCTP détaillés, compte tenu de la complexité de la prestation).

En cas d'appel d'offres, la procédure ouverte est à privilégier : les propositions sont faites en pleine connaissance de cause de la prestation attendue et il est alors encore possible de récuser l'offre d'un candidat, fût-il moins-disant, si des propositions sont peu ou mal argumentées, voire si elles se révèlent inadéquates.

Avis d'appel d'offres à la concurrence (AAPC)

Il doit préciser :

- le nombre d'ouvrages, leur importance et la nature des appuis ;
- la zone géographique d'intervention ;
- la période d'intervention, qu'il est recommandé de prévoir très large, compte tenu des aléas, (crues, gel, interventions sur le réseau proche interdisant la réduction ou la neutralisation de l'usage d'un ouvrage, interventions des concessionnaires sur les réseaux portés, franchis ou proches, etc.).

Règlement de la consultation (RC)

Il est souhaitable que le règlement de la consultation impose la visite effective des lieux pour les candidats en demandant que soit renseigné le tableau de l'annexe 1.2 au présent fascicule, qui doit être joint à l'acte d'engagement (AE). Ce tableau reprend la liste des ouvrages concernés.

Le mémoire technique devra comporter au minimum des informations générales sur :

- les références récentes du candidat pour des prestations comparables portant sur des structures comparables ;
- les CV des personnes dont l'intervention est envisagée en cas d'attribution de la mission ;
- les cadres usuellement employés par le candidat pour la restitution des observations s'ils ne sont pas annexés au CCTP.

Le mémoire technique devra reprendre les informations du tableau de l'annexe 2.2 du présent fascicule et comporter au moins les informations complémentaires suivantes :

- les moyens humains, en précisant leurs qualifications et leurs expériences pour des prestations similaires ;
- les moyens matériels proposés pour la réalisation complète de la prestation (appareils de mesure, certificats d'étalonnage, embarcations, barges, protections individuelles de sécurité, etc.) ;
- les informations et intentions en matière de sécurité et d'hygiène.

Pour les grands ouvrages, le règlement de consultation imposera la décomposition des prix forfaitaires par ouvrage, en faisant apparaître pour chacune des phases de réalisation, les catégories de personnel, la durée d'emploi de chacune d'elles, le coût et la durée d'emploi des matériels. Dans le cas général, on demandera un prix forfaitaire par ouvrage.

La fourniture des moyens d'accès particuliers (embarcations, barges, etc.) est à la charge du prestataire. Il est conseillé de demander un prix pour les moyens d'accès particuliers avec un sous-détail de ces prix.

À ce stade, on ne peut demander qu'un planning d'exécution indicatif.

Si l'acte d'engagement laisse libres les délais, ou certains d'entre eux, le RC doit prescrire des délais maximaux pour maîtriser le calendrier et le bon déroulement de la prestation.

Les pondérations permettant le choix du prestataire doivent privilégier les aspects techniques plus que financiers. Pour le critère prix, il sera tenu compte des sous-détails afin de vérifier que les prix sont bien justifiés.

Le RC doit préciser qu'un poids particulier sera donné aux informations suivantes :

- la structure du plan qualité, en particulier les étapes du contrôle intérieur et la compétence des personnes qui exerceront ce contrôle ;
- les références récentes comparables ;
- les CV des intervenants pressentis ;
- la durée d'intervention sur chaque ouvrage ;
- les moyens d'accès ;
- les travaux préparatoires demandés.

les documents graphiques de restitution, en particulier leur réemploi comme « support de visite » des inspections ultérieures (support vidéo dans le cas d'ouvrages importants).

Tous ces éléments doivent être demandés dans le mémoire technique.

Acte d'engagement (AE)

L'acte d'engagement est le premier dans la hiérarchie des pièces du contrat ; il doit indiquer le prix, les délais et les sous-traitants.

Il comporte une annexe qui reprend la liste des ouvrages concernés dont le modèle est donné dans l'annexe 1.2 au présent fascicule.

Les délais d'exécution sont à moduler en fonction du nombre d'ouvrages à traiter, de leur importance et des moyens d'accès à mobiliser.

Cahiers des clauses particulières

Ils comprennent un volet administratif (le CCAP) et un volet technique (le CCTP).

Il est loisible au rédacteur de fusionner ces documents en un seul cahier dans le cadre d'un MAPA.

Le CCAP doit préciser les délais et pénalités pour retards.

Le maître d'œuvre doit prendre des engagements en matière de délais, pour ne pas « faire traîner » les choses.

En matière de délai, entre la fin du délai d'exécution de la phase de préparation et le début de la phase d'inspection, il n'y a pas lieu de laisser trop longtemps le prestataire « l'arme au pied », car lui-même est tenu par des engagements vis-à-vis des fournisseurs d'accès. Un temps d'attente de dix à quinze jours semble raisonnable. Au-delà, le prestataire serait fondé à réclamer la compensation totale ou partielle de l'immobilisation de ses agents.

Dans le cas présentant des enjeux particuliers, des pénalités différentes de celles prévues au CCAG pourront être fixées. La pénalité prévue par le CCAG-FCS 2009 est de 1/1 000 de la valeur de la prestation par jour de retard.

L'annexe 2.3 au présent fascicule donne des indications sur les options du CCTP :

- le type d'inspection,
- les travaux de nettoyage,
- les travaux de dégagement,
- les référentiels altimétriques,
- la forme du rapport.

Ces options doivent être levées en fonction des résultats recherchés.

Bordereau des prix

Pour simplifier la gestion du marché, il est recommandé de prévoir un prix forfaitaire par ouvrage et un prix forfaitaire pour la restitution de l'ensemble de la campagne de visites (à titre indicatif, un bordereau des prix est joint en annexe 2.6).

Sous-détail des prix

Sa présence est contractuellement suggérée pour faciliter l'analyse des offres et servir de base lors d'éventuelles discussions financières ultérieures imposées par les circonstances.

Le sous-détail sépare les moyens d'accès et la prestation de visite *in situ* (moyens humains et matériels) pour des ouvrages particuliers.

C - ANALYSE DES PROPOSITIONS - VALEUR TECHNIQUE

L'analyse portera sur les informations demandées dans le RC et sur les réponses apportées par les candidats, notamment dans le tableau des ouvrages à inspecter annexé à l'acte d'engagement : la lecture de ces documents sera très révélatrice car elle permettra de savoir :

- si le candidat s'est effectivement rendu sur les lieux avant de calibrer son offre ;
- si les travaux préalables, identifiés par le candidat comme indispensables, sont bien détaillés. L'absence de demandes d'évacuation de végétation ou obstacles interdisant l'accès à certaines parties d'ouvrage doit conduire à s'interroger sur le sérieux de la prévisite et/ou sur celui des intervenants.

L'analyse des propositions doit être concentrée sur la phase d'intervention sur le terrain, sur le temps qui y sera consacré et sur la qualité des intervenants. Ces critères sont les critères essentiels d'appréciation de la qualité d'une proposition. La durée prévue pour les interventions sur le terrain est un critère important de crédibilité des propositions. Une durée courte traduit une impossibilité matérielle de réaliser complètement l'inspection de toutes les parties et d'en noter toutes les particularités qui méritent restitution. Couplée avec les références des intervenants, cette durée est le critère principal de choix.

D - SUIVI DE LA PRESTATION

Il faut être vigilant quant au respect du calendrier des interventions, en particulier pour celles qui impactent directement l'exploitation des ouvrages et/ou qui imposent la mise en place d'arrêtés particuliers.

Le suivi de la prestation comprend aussi la vérification de l'effectivité du déploiement des moyens (moyens d'accès et moyens humains) prévus au contrat avec vérification de la qualification des intervenants et le respect, par leurs soins, des règles de sécurité.

Il est également important de bien préciser la nature des supports de restitution, afin que leur forme ne soit pas, a priori, source de difficultés pour le prestataire. Si ce cadrage est effectif, la restitution de la visite pourra alors être focalisée sur le fond.

Le compte rendu doit être précis et basé uniquement sur des constatations. L'inspection subaquatique donne une appréciation sur l'état des fondations, sans constituer un diagnostic de l'ouvrage dans son ensemble.

Dans le cas d'un ouvrage présentant une pathologie, une réunion de restitution avec l'ensemble des intervenants de l'inspection de l'ouvrage devra être prévue. Les propositions d'investigations complémentaires doivent être présentées et analysées. Dans tous les cas, il faut définir les données nécessaires pour affiner le diagnostic de l'ouvrage, avant d'envisager toute intervention.

Annexe 1.2 - Proposition du candidat

Ce tableau constitue l'annexe 1 de l'acte d'engagement du marché d'inspection des parties immergées d'un ouvrage d'art. Le candidat doit le remplir et le remettre avec son offre.

Acte d'engagement – Annexe 1 Ouvrages soumis à inspection des parties immergées

[Indiquer ici les coordonnées du maître d'œuvre]

Proposition du candidat

N°	Nom de l'ouvrage	Voie portée	Obstacle franchi	Type d'ouvrage	Moyens d'accès proposés	Travaux préalables attendus	Date de la visite	Durée de la visite (en heures)	Nature et durée des perturbations probables sur le cours d'eau

Annexe 1.3 - Exemple de CCTP pour l'inspection de parties immergées d'ouvrages d'art

SOMMAIRE

ARTICLE 1 - Indications générales

- 1.1. Consistance des travaux
- 1.2. Les moyens à mettre en œuvre
- 1.3. Conditions de réalisation des inspections
- 1.4. Description des ouvrages
- 1.5. Accessibilité des ouvrages
- 1.6. Données sur le cours d'eau

ARTICLE 2 - Relevé de fond de lit

- 2.1. Consistance de l'inspection
- 2.2. Implantation des lignes de sonde
- 2.3. Étendue du relevé

ARTICLE 3 - Inspection

- 3.1. Éléments et constructions annexes à une culée
- 3.2. Éléments et constructions annexes à une pile
- 3.3. Radier général (ou buton) maçonné
- 3.4. Protections étendues
- 3.5. Parties aériennes des ouvrages
- 3.6. Constitution de fond de plan

ARTICLE 4 - Nettoyage

ARTICLE 5 - Dégagement d'éléments susceptibles de gêner l'inspection

ARTICLE 6 - Repérages des parties d'ouvrage

ARTICLE 7 - Référentiel des cotes d'élévation

ARTICLE 8 - Éléments principaux à examiner, teneur des constats

- 8.1. Présence de produits divers sur les zones soumises à l'examen méthodique
- 8.2. Obliquité du courant
- 8.3. Effondrement de berge ou de terrain autour d'un appui ou de ses constructions annexes

ARTICLE 9 - Restitution

- 9.1. Documents graphiques
- 9.2. Précisions à respecter lors des relevés et des examens méthodiques
- 9.3. Note de synthèse
- 9.4. Forme du rapport

ARTICLE 10 - Gestion de la qualité

- 10.1. Accusé de réception de la commande
- 10.2. Plan d'assurance qualité
- 10.3. Points d'arrêt
- 10.4. Événements exceptionnels

ARTICLE 1 - INDICATIONS GÉNÉRALES

1.1. Consistance des travaux⁽¹⁾

Le présent contrat porte sur la reconnaissance subaquatique des appuis et fondations immergées suivantes :

[À compléter par les indications susceptibles de préciser les inspections attendues]

[Choisir parmi les paragraphes qui suivent le type d'inspection demandée]

L'inspection à réaliser sera de type A :

[Inspection détaillée exceptionnelle visant à lever un doute suite à un événement particulier : crue...]

L'inspection doit permettre au gestionnaire de l'informer sur la présence d'éventuelles anomalies susceptibles d'interférer sur la sécurité. Cette mission, à caractère qualitatif, est à réaliser par des scaphandriers compétents disposant d'un certificat de qualification professionnelle d'inspecteur et de chargé d'inspection, obtenu dans le cadre d'une démarche qualité mise en œuvre au sein de l'entreprise.

L'inspection ne donne pas lieu à un rapport détaillé, mais uniquement à un rapport signalant les parties visitées, ainsi que les constats qualitatifs de désordres susceptibles d'avoir un impact sur la sécurité de l'ouvrage.

Il n'est pas prévu de levé du fond de lit.

L'inspection à réaliser sera de type B1 :

Cette inspection détaillée descriptive comporte une reconnaissance complète détaillée des parties immergées des ouvrages. Elle doit être menée par des scaphandriers compétents disposant d'un certificat de qualification professionnelle d'inspecteur et de chargé d'inspection, obtenu dans le cadre d'une démarche qualité mise en œuvre au sein de l'entreprise.

Basée sur un examen méthodique, l'inspection détaillée vise à déterminer :

- la constitution précise de toute partie immergée saillant du toit des protections des appuis ou du fond du lit :
 - fût, ou piédroit (y compris toutes constructions annexes ou adjacentes, comme précisé ci-après),
 - socle ;
 - entablement ;
 - parements de toute fondation y compris tous dispositifs de liaisonnement et de reprise sur pieux, ainsi que tout parement de ces derniers ; pour les colonnes en fonte, les zones de transition de changement de diamètre ainsi que les entretoisements entre colonnes ;
 - parements des divers éléments ceinturant toute fondation (tôles, palplanches métalliques, ceinturages par pieux en bois, palplanches, caisson, etc.) ;
 - protections contre l'affouillement, l'abrasion du substratum (enrochements, gabions, solins en béton, ainsi que tout dispositif du genre crèches comblées avec des enrochements, blocs en béton, blochets, éléments divers liaisonnés ou recouverts par du mortier, du béton, etc.), y compris tout perré et pavage ;
 - ducs d'Albe ;
- la position des éléments précités (en x, y, z, par rapport au plan de référence, cf. article 7), leurs dimensions en plan et en élévation, les configurations respectives ;
- les dégradations ou détériorations éventuelles les affectant, en précisant leur nature, leur localisation, leur géométrie et nature, l'identification et l'état des parois des cavités éventuelles.

Du fait des conditions d'intervention et de la qualité requise en matière de résultats, l'examen méthodique des parties immergées est pratiqué par bandes de 1 m d'étendue au plus.

(1) L'intervention de plongeurs pour réaliser les visites subaquatiques entre dans le cadre des chantiers soumis aux dispositions du Code du travail pour lesquels des travailleurs sont appelés à intervenir à une pression supérieure à la pression atmosphérique locale en particulier le décret no 2011-45 du 11 janvier 2011 relatif à la protection des travailleurs intervenant en milieu hyperbare. La responsabilité de la visite subaquatique et de son accompagnement doit être assumée par l'équipe qui réalise l'inspection. Les travaux en milieu hyperbare ne peuvent être effectués que par des travailleurs titulaires d'un certificat d'aptitude à l'hyperbarie approprié à la nature des opérations et détenteurs d'un livret individuel. Ce certificat d'aptitude indique l'une des classes ou sous-classes de travaux hyperbares auxquelles le travailleur a accès et mentionne l'activité qu'il est habilité à pratiquer en hyperbarie. Dans le cas d'emploi de matériels de mesure, les scaphandriers devront être familiarisés avec leur manipulation. Il est rappelé que les travaux en site aquatique sont classés « dangereux » par le ministère du Travail. À cet effet, les scaphandriers doivent être qualifiés selon la réglementation en vigueur. Il convient donc d'être très attentif à la préparation des travaux.

L'examen est poursuivi sur les parties émergeant de la ligne d'eau jusqu'aux limites définies ci-après :

- 1 m au-dessus du plan d'eau

- [à préciser]

Option B1a : l'inspection comprend également des levés du fond de lit aux abords immédiats des ouvrages détaillés à l'article 2.

Option B1b : l'inspection comprend également des investigations ou auscultations telles que la réalisation de mesures d'épaisseur de peinture, de mesures d'épaisseur d'acier, de prélèvements de béton, etc.

L'inspection à réaliser sera de type B 11 :

Cette inspection détaillée comparative est menée de façon à mettre en évidence les évolutions éventuelles par rapport à la dernière campagne d'inspection.

Elle doit être réalisée par des scaphandriers compétents disposant d'un certificat de qualification professionnelle d'inspecteur et de chargé d'inspection, obtenu dans le cadre d'une démarche qualité mise en œuvre au sein de l'entreprise.

À cette fin, le maître d'ouvrage fournit les documents suivants :

- rapports des inspections précédentes,
- plans et relevés.

Option B1a : cette inspection comprend également les levés du fond de lit aux abords immédiats des ouvrages décrits à l'article 2.

Option B1b : elle comprend également des investigations ou auscultations telles que la réalisation de mesures d'épaisseur de peinture, de mesures d'épaisseur d'acier, de prélèvements de béton, etc.

1.2. Les moyens à mettre en œuvre

L'équipe d'inspection doit comprendre au minimum :

- deux ou trois scaphandriers inspecteurs d'ouvrages d'art qualifiés (un ou deux scaphandriers immergés et un scaphandrier de secours selon le mode de plongée choisie) ;
- un chef d'opération hyperbare.

L'inspection est menée dans le respect des procédures réglementaires de plongée régissant les dispositions à prendre en cas d'intervention subaquatique, en particulier le décret n° 2011-45 du 11 janvier 2011 relatif à la protection des travailleurs intervenant en milieu hyperbare.

Tout personnel effectuant un examen doit être doté de moyens de mesure afin de déterminer les dimensions et les positions respectives des divers éléments à observer, mais aussi d'outils manuels simples (poignard de plongée, brosse métallique, tige d'acier, etc.), afin de s'assurer de l'état des matériaux rencontrés (joints, structures en bois notamment). Il doit être à même de préciser en particulier l'importance des cavités (profondeurs, étendues) pouvant être décelées à l'arrière de ceinturages en bois, par « sondages » dans les espaces entre leurs pièces constitutives non jointives.

Les inspections ne nécessitent pas la mise en œuvre de moyens particuliers autres que ceux normalement employés pour ce type de travail. En particulier, il n'est pas exigé d'outils et de matériel de dégagement ou d'enlèvement de corps, d'objets, de végétation autres que les grattoirs, raclettes, serpettes, et autres outils à main, sauf spécifications particulières portées aux articles 4 et 5.

Le prestataire doit fournir ses procédures internes de prévention des risques à la remise de son offre.

1.3. Conditions de réalisation des inspections

Les valeurs portées dans le tableau ci-après sont considérées comme les valeurs limites au-delà desquelles les travaux ne peuvent plus être conduits normalement. Le dépassement d'une de ces valeurs donne lieu à l'établissement d'un constat.

Phénomène	Intensité limite
Hauteur d'eau	Inondation des accès
Courant	> 1,00 m/s (*)

(*) À proximité des appuis et sous réserve de la possibilité au scaphandrier de pouvoir réaliser le travail dans des conditions permettant l'observation en sécurité.

1.4. Description des ouvrages

Le tableau joint au présent CCTP renseigne sur la description schématique des ouvrages, appuis à inspecter et travaux à réaliser.

1.5. Accessibilité des ouvrages

La mise à l'eau des engins nautiques ordinaires, de type bateau venant par route sur remorque légère ou pneumatique, peut s'effectuer aux lieux suivants :

[À préciser par le gestionnaire : la position des cales de mise à l'eau]

Les secours peuvent accéder à chaque ouvrage aux lieux suivants :

[À préciser par le gestionnaire : la position des cales de mise à l'eau, les points de récupération possibles, les difficultés particulières, etc.]

1.6. Données sur le cours d'eau

Le cours d'eau, au droit des ouvrages à inspecter, présente les caractéristiques suivantes :

[À préciser par le gestionnaire

- situation,
- zone protégée (nécessité d'une éventuelle déclaration pour le Code de l'environnement),
- présence d'associations (piscicoles ...) dans la zone d'influence de l'ouvrage,
- étiage, marées, crue,
- cours d'eau soumis à des lâchers éventuels de barrages hydrauliques.]

La rivière est gérée par [compléter]

ARTICLE 2 – RELEVÉ DE FOND DE LIT

Sans objet dans le cadre d'une inspection type A.

2.1. Consistance de l'inspection

L'inspection comprend le lever de profils en long et en travers, espacés de 2 à 3 m, autour des piles, culées ou murs.

Les cotes sont rapportées selon le référentiel précisé à l'article 7 du présent cahier des charges.

La précision de la mesure en z, liée à l'agitation du plan d'eau au moment de la mesure, est portée dans le rapport.

Les moyens de détermination des positions x et y sont précisés dans le plan d'assurance qualité, en mentionnant dans le rapport l'incertitude attachée à la méthode de positionnement.

Le rapport indique également la dureté relative du fond : toucher franc avec la pige, enfoncement dans des sables ou zone vasarde, ainsi que la géométrie en plan de la zone vasarde.

En cas de mesure au sondeur électronique, il est mentionné la fréquence sonique utilisée, afin de préciser le niveau relevé (plafond de la vase, ou substratum induré).

[Pour inspection type B11 uniquement]

Le lever indique par un jeu de couleurs les zones engraisées et les zones affouillées. Il fait apparaître l'importance de ces mouvements relatifs des sols par le tracé des courbes isobathes dans ces zones.

2.2. Implantation des lignes de sonde

Les lignes de sondes sont établies comme suit :

- une dans l'axe longitudinal de l'ouvrage (largeur de la brèche), sauf si la largeur de l'ouvrage est inférieure à 4 m ;
- une située à l'aplomb de chaque bord amont et aval de l'ouvrage ;
- une dans l'axe de chaque pile (axe de la brèche) ;
- deux par pile à 45° ayant pour origine l'intersection de la ligne de rive et de l'axe de l'appui, et ce pour l'amont et l'aval de l'ouvrage ;
- une par culée à 45° ayant pour origine l'intersection de la ligne de rive et l'angle de la culée, et ce pour l'amont et l'aval de l'ouvrage.

Cf. dessins « modèles d'élévations et coupes types » en fin du présent CCTP.

2.3. Étendue du relevé

La zone couverte par le relevé s'étend de part et d'autre de l'ouvrage sur une surface comprenant toute la voie d'eau et limitée par deux parallèles (amont et aval) à l'axe longitudinal de l'ouvrage situées à une distance du bord de l'ouvrage établie comme suit : $d = 1/2$ largeur du cours d'eau (d est arrondi à la valeur par excès comportant un nombre entier de profils).

ARTICLE 3 - INSPECTION

L'inspection porte sur toutes les parties immergées de l'ouvrage. Les parties situées dans la zone marnante sont inspectées à l'air libre, lors des basses eaux, et elles sont comprises dans la présente commande.

3.1. Éléments et constructions annexes à une culée

L'examen méthodique relatif à une culée comprend aussi celui de ses éléments et de ses constructions annexes :

- murs en retour, en aile, quarts de cône, puis jusqu'à 5 m au-delà de leurs parties les plus en amont et en aval ;
 - murs autres que ceux précités, digues, guideaux, perrés prolongeant un piédroit, jusqu'à 25 m de part et d'autre de l'axe longitudinal de l'ouvrage ;
- ainsi que de leurs protections éventuelles contre l'affouillement.

3.2. Éléments et constructions annexes à une pile

L'examen méthodique relatif à une pile englobe aussi celui de toute construction « annexe » placée dans le prolongement (amont, aval) de sa ou de ses fondations, telle que guideau, digue, perré ainsi que de ses protections éventuelles contre l'affouillement, et, ce, jusqu'à 25 m de part et d'autre de l'axe longitudinal de l'ouvrage.

3.3. Radier général (ou buton) maçonné

L'examen méthodique relatif à chaque appui englobe le radier en totalité et ses protections, quelle que soit la distance entre appuis.

[Le paragraphe suivant n'est à retenir que pour les cas particuliers qu'il évoque]

3.4. Protections étendues

Lorsque les protections contre l'affouillement s'étendent à plus de 10 m du périmètre de la fondation d'un appui et de ses constructions « annexes », l'examen méthodique demandé pour tout appui n'est conduit qu'à 10 m du périmètre de sa fondation et de celui de ses éléments et/ou constructions « annexes » (sauf indication contraire ci-dessous).

Si un désordre est repéré dans les 10 m autour de la fondation, le maître d'œuvre devra être rapidement averti : il pourra alors prendre la décision de faire compléter l'examen.

L'inspection des protections étendues dont l'emprise s'étend en aval de l'ouvrage sur [préciser] m fait partie de la consultation.

3.5. Parties aériennes des ouvrages

Les parties aériennes, ne pouvant faire l'objet d'un relevé de désordres depuis les accès terrestres de l'ouvrage, font l'objet d'un relevé limité des désordres. Il a pour objet d'alerter le gestionnaire sur d'éventuels désordres dans les structures. Il est compris dans la présente prestation. Le relevé n'enregistre que les désordres observables avec les moyens normalement utilisés par les scaphandriers, lors de la mission (appareils assurant la flottaison du scaphandrier, embarcation, etc.).

Le niveau de détail du relevé des désordres est fonction de la distance séparant l'observateur de la partie d'ouvrage. Les éléments de désordres à préciser en fonction du type d'ouvrage et qui peuvent être relevés sont :

- fissuration dans le béton d'ouverture supérieure à 0,5 mm d'ouverture jusqu'à une distance d'observation inférieure à 2 m et fissure d'ouverture supérieure à 1 mm au-delà ;
- fracture d'ouverture supérieure à 10 mm pour des distances d'observation comprises entre 5 et 15 m, fracture d'ouverture supérieure à 10 mm dans la maçonnerie jusqu'à une distance d'observation de 7 m ;
- état apparent des matériaux.

Le relevé s'effectue de façon à faire ressortir les évolutions depuis la dernière inspection.

3.6. Constitution de fond de plan

Le maître d'œuvre fournit les fonds de plan, le prestataire les complète par le relevé du fond du lit.

[À ne retenir qu'exceptionnellement et pour une inspection de type B1 uniquement]

En l'absence de fond de plan des parties immergées et aériennes de l'ouvrage, la constitution de ces documents (vue en plan, élévation amont et aval, coupes des appuis, etc.) fait partie de la prestation.

Les plans complets seront dressés à l'échelle 1/100 et 1/50.

ARTICLE 4 - NETTOYAGE

Tout désordre apparaissant soit dans les parties aériennes, soit dans la zone marnante, susceptible de se prolonger dans la partie immergée de l'ouvrage, ainsi que tout désordre constaté dans la partie immergée et partiellement masqué, fait l'objet d'une recherche de continuité. Les salissures, végétations et autres, susceptibles d'être éliminées par grattage ou brossage manuels font l'objet du traitement approprié. Ce travail est limité aux conditions suivantes :

- défauts linéaires, de type fissure, fracture, etc. : réalisation du nettoyage sous forme d'une bande centrée sur le désordre d'une largeur de 20 cm ;
- défauts surfaciques, de type dégarnissage, disjointoiment, etc. : dégagement de la zone affectée par le désordre jusqu'à concurrence de 1 m² par désordre.

Dans la mesure où la surface unitaire de 1 m² n'a pas permis de mettre en évidence la totalité de la zone affectée par le désordre, il est procédé à des nettoyages ponctuels linéaires de largeur de 10 cm, à la maille de 1 × 1 m, afin de déterminer l'étendue probable du désordre. Si ce mode opératoire a été utilisé, il en sera fait mention dans le rapport d'inspection.

En présence de plantes invasives (Jussies, etc.), le nettoyage est réalisé avec précautions en récupérant systématiquement les plantes arrachées.

[La présence de ce type de végétation est généralement connue. Il sera donc préférable de faire appel à des spécialistes pour enlever la végétation préalablement à l'intervention des plongeurs]

Dans le cas où des mesures d'épaisseur de métal sont prévues, des nettoyages localisés seront réalisés.

ARTICLE 5 - DÉGAGEMENT D'ÉLÉMENTS SUSCEPTIBLES DE GÊNER L'INSPECTION

[Préciser l'option à retenir]

Option 1 : Aucun dégagement n'est requis dans le cadre de la présente commande.

Option 2 : Après information et accord du maître d'œuvre, les éléments qui peuvent être dégagés par le scaphandrier sans recourir à des moyens extérieurs (branches, petits atterrissements) seront enlevés des parois ou des éléments qu'ils masquent.

ARTICLE 6 - REPÉRAGES DES PARTIES D'OUVRAGE

À défaut, les appuis d'ouvrages à inspecter sont repérés en les numérotant de 0 à n. La culée extrême située côté origine de l'ouvrage, c'est-à-dire située au plus petit PR + abscisse de la voie portée, est appelée C0. Les autres appuis sont numérotés de 1 à n dans le sens des PR croissants de la voie portée. Les piles sont désignées par la lettre P, indiquée du numéro correspondant au rang de l'appui. Les travées sont numérotées de 1 à n-1, la travée T1 étant située entre les appuis C0 et P1 (ou C1 pour les ouvrages à travée unique).

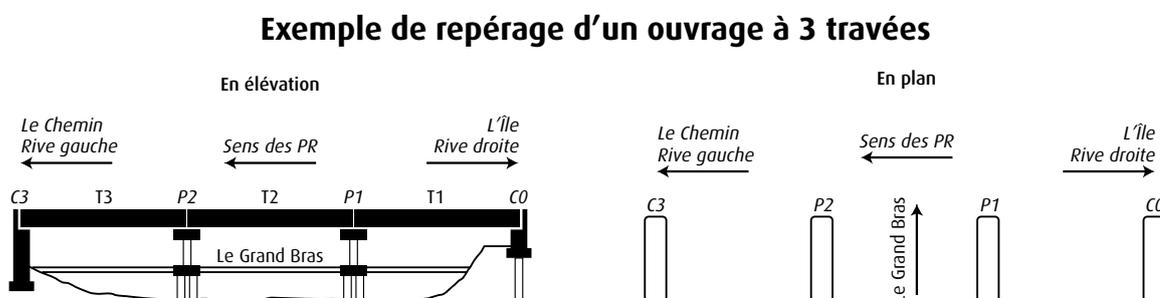
Dans tous les cas, le prestataire indiquera le système utilisé (les numérotations pouvant être inversées sur d'anciens plans).

Pour les ouvrages linéaires de type quai ou paroi, le repérage est réalisé par point métrique.

L'origine adoptée est :

[Compléter]

Le plan de repérage des appuis de l'ouvrage est conforme au schéma suivant :



ARTICLE 7 - RÉFÉRENTIEL DES COTES D'ÉLEVATION

L'ensemble des relevés cotés en Z, terrestres et subaquatiques est réalisé à partir d'un point de mesure altimétrique et bathymétrique unique. Le prestataire précisera dans quel système de nivellement est rattaché ce point.

[Préciser l'option à retenir]

Option 1 : Ce point de mesure est situé à l'emplacement indiqué sur le plan de repérage ci-joint.

Option 2 : Ce point de mesure doit être choisi avec les propriétés suivantes :

- hors d'eau pendant les crues de fréquence de retour annuelle ;
- accessible à la mesure sans moyen spécifique ;
- réputé invariant, ou tout du moins tel que les déplacements absolus l'affectant soient suffisamment faibles au regard de la précision requise.

ARTICLE 8 - ÉLÉMENTS PRINCIPAUX À EXAMINER, TENEUR DES CONSTATS

[Choisir parmi les paragraphes qui suivent les éléments qui correspondent au type d'inspection demandé]

Dans le cadre d'une inspection de type A :

L'examen, objet du présent contrat, vise à éclairer le gestionnaire sur la présence, sur les parties immergées, d'éventuelles anomalies susceptibles d'interférer sur la sécurité des ouvrages.

L'examen, nécessairement effectué par un spécialiste, porte particulièrement sur la recherche de cavités, de vides, de déplacement d'éléments structuraux ou de protection, sur les érosions et les altérations manifestes de matériaux.

L'examen comprend un relevé des niveaux atteint par les crues à partir des traces existantes.

Dans le cadre d'une inspection de type B :

La liste ci-après n'est pas exhaustive, car l'examen méthodique vise à restituer un constat le plus précis et le plus détaillé possible. Elle reprend les éléments les plus fréquemment rencontrés :

- maçonneries, pavages :
 - nature des parements observés,
 - dimensions courantes des moellons, des pierres de taille,
 - étendue des arases,
 - hauteur des redans,
 - état des joints, valeur et étendue du disjointoiment, ouverture et profondeur des joints dégarnis,
 - absence d'éléments du parement ainsi que l'importance de la cavité en résultant, fissures et fractures, y compris leurs ouvertures et les désaffleurements éventuels, signes d'abrasion ou d'usure, décollements, etc. ;
- bétons :
 - aspect et état du parement,
 - délavage, cavités, fissures, fractures (comme ci-avant),
 - armatures visibles, décollement de « peau », etc. ;
- éléments en bois :
 - état apparent,
 - abrasion, attaque par des mollusques (de type vermiforme ou autre),
 - ramollissement des fibres (en général par effluents chimiques),
 - valeur des espaces entre éléments successifs réputés « jointifs », nature du remplissage de ces espaces, importance des vides arrière,
 - distance en tête entre la partie arrière des bois et le parement du béton,
 - moises arrachées, cassées, manquantes,
 - état des broches et des boulons, longrines, traversines, platelages ou planchers : mêmes éléments que ci-avant ;

(L'examen et les relevés concernent également toutes les enceintes ou parties d'enceintes encore en place au voisinage des

fondations, limitant une crèche – comblée avec des enrochements –, ou ayant permis de constituer un batardeau, ainsi que tout rideau, pieu ou élément ayant une fonction de portance, de soutènement, de retenue de terres, en pied de toute partie d'ouvrage et de ses constructions « annexes ».)

• caissons et palplanches métalliques :

- corrosion, déchirures, décolllements(2) (état de son parement ou nature du matériau comblant éventuellement un tel espace, importance de l'espace, étendue), parties manquantes,
- défauts de rivets, de boulons, de tirants, dégrafages, déformation de serrures,
- profilés non enclenchés, « déboîtés », non encastrés en pied, en saillie de l'entablement, démunis d'éclissage ou de soudure entre tronçons superposés, recépés suivant une ligne non régulière (des cotes doivent préciser l'importance et l'étendue de telles situations) ;

(Les défauts de verticalité ou les fruits de construction – cas du recours à des caissons en bois notamment – seront systématiquement relevés et quantifiés, ainsi que les restes de construction.

Les hauteurs saillant respectivement des protections – du toit du lit ou du terrain – et celles exposées à l'air sont précisées.)

- dispositifs de protection contre les affouillements : pour tous les types, l'étendue des protections est examinée sur toute partie non recouverte par d'autres matériaux puis sur sa périphérie, jusqu'à leur limite.

Cet examen est mis à profit pour préciser notamment, selon la nature de la protection :

- pour les blocs : les diamètres moyens et extrêmes, les irrégularités en toit, en pied, les zones d'entraînement, les inclusions sablo-graveleuses constituant des « coupures » dans la protection, le liaisonnement éventuel par mortier ou béton (et les vides sous-jacents s'il en est alors : importance, étendue) ;
- pour les gabions : leurs dimensions, la valeur des espaces les séparant de l'appui et entre eux, les détériorations éventuelles ;
- pour les solins : dégradations de « peau », fissures, fractures, déplacements éventuels, vides en sous-face ;
- pour les crèches : outre ce qui relève des blocs (cf. ci-avant), une attention particulière sera apportée aux défauts de verticalité des éléments en bois ou en palplanches les « ceinturant », et aux ruptures locales sur les diverses pièces de bois, de béton, de métal ou autres. En présence d'une différence d'altitude des éléments en bois de crèches, les deux périmètres ainsi définis font alors l'objet d'un levé complémentaire d'altitude tous les 2 m sur chacun.

Cet examen de l'état et de la constitution des dispositifs de protection est toujours complété par un examen du lit sur une étendue de 2 m à leur périphérie. Le toit du lit sera sondé à l'aide d'une tige d'acier : sa nature est autant que possible précisée ainsi que l'enfoncement moyen de la tige.

Tout dépôt sur les protections est relevé et décrit.

Si les dispositifs de protection ne sont pas « observables », le toit du lit fait l'objet d'un examen et de sondages à l'aide d'une tige d'acier, sur une étendue de 6 m à partir du périmètre de la fondation ainsi qu'en avant des éléments et/ou des constructions « annexes ».

8.1. Présence de produits divers sur les zones soumises à l'examen méthodique

Tout élément ou produit dont la présence n'est, a priori, pas normale au voisinage d'une fondation, de l'élément supporté et de toutes ses constructions annexes, sur l'étendue faisant l'objet des prestations précitées, doit être signalé, décrit, quantifié, dans le rapport d'inspection et représenté sur les coupes et vues en plan.

Sont notamment concernés :

- les atterrissements ;
- les dépôts divers sur les protections contre l'affouillement ;
- les produits de destruction par faits de guerre (maçonneries, tronçons de tabliers, rails, etc.), mais aussi ceux résultant de « décharges sauvages » ou d'actes de malveillance (gravats, véhicules, etc.) ;
- les embâcles (outre leur volume, par appui, préciser la nature et les dimensions des éléments les plus importants) ;
- les vestiges de construction ou de reconstruction (pieux en bois, dalles en béton, allongements d'appuis etc.) ;
- les autres vestiges : parties d'ouvrages antérieurs laissées en place (piles, culées ou leurs fondations, leurs

(2) Il existe pour des ouvrages récents, des batardeau de palplanches qui ne sont pas en contact avec le béton de la semelle (cela afin de pouvoir araser les palplanches).

protections, etc.), les chaussées pavées, les passages à gué, etc. ;

- la végétation « arbustive » susceptible de retenir des éléments, face au débouché hydraulique (amont, aval, voire sous l'ouvrage), contre ou sur les constructions ;
- les algues, lichens ainsi que tout autre végétal, les mollusques, les dépôts de toute nature, masquant les parements.

8.2. Obliquité du courant

Lorsque le courant ne s'écoule pas parallèlement aux faces latérales d'une pile, au piédroit d'une culée, la valeur de l'obliquité est à préciser.

Dans toute la mesure du possible, il convient d'en formuler les causes si celles-ci sont évidentes, par exemple :

- atterrissements ;
- creusement ou déplacement (« naturel » ou par interventions humaines récentes évidentes) du lit mineur ;
- importance des protections (ou d'un banc rocheux) en saillie du lit, voire émergentes ;
- présence d'obstacles divers (nature et position à préciser) ;
- appuis d'un ouvrage voisin non alignés avec ceux de l'ouvrage concerné ;
- établissement dans un coude du cours d'eau.

Les risques de contournement de culée sont signalés.

8.3. Effondrement de berge ou de terrain autour d'un appui ou de ses constructions annexes

Dans tous les cas, le prestataire précise la nature des matériaux observables et indique si leur aspect (local notamment) traduit une dégradation et/ou une évolution récente(s).

ARTICLE 9 - RESTITUTION

9.1. Documents graphiques

[Pour les inspections de type B1 et B11 uniquement]

L'ensemble des résultats de l'examen méthodique de toute fondation précédemment décrit est restitué sous forme :

- d'une vue en plan ;
- pour une pile :
 - de deux vues en élévation, par projection suivant des plans verticaux passant respectivement, par :
 - l'axe longitudinal de l'ouvrage, pour la zone d'avant ou d'arrière-bec (choisir la plus significative, tracer le toit des protections au droit de la zone de bec concernée puis suivant l'axe précité),
 - l'axe longitudinal de l'appui, pour la face latérale la plus significative (tracer le toit des protections au droit de la face latérale retenue puis suivant le plan de projection). Toute construction « annexe » éventuelle sera figurée,
 - d'une coupe longitudinale de l'appui.
- pour une culée :
 - d'une vue en élévation par projection sur un plan vertical passant par la partie basse du piédroit,
 - de trois coupes ou plus :
 - l'une suivant l'axe longitudinal de l'ouvrage,
 - les autres en amont et en aval de l'axe longitudinal.

Les zones les plus représentatives ou significatives des désordres font également l'objet de plan de détail.

Ces documents couvrant toute l'étendue examinée (y compris tous éléments et constructions « annexes ») sont établis à l'échelle 1/100 et 1/50 et (sauf cas particulier à justifier) sur des formats A3 ou A4, portant bien la trace du plan de référence (cf. coupes). Ils sont accompagnés de toutes les vues et coupes locales nécessaires afin que tout lecteur puisse très rapidement appréhender la constitution, la position, l'état de toutes les parties examinées, mais aussi, la localisation, l'étendue, l'importance de toute dégradation ou détérioration.

Les résultats de l'examen méthodique sont également utilisés afin de compléter les coupes et vues en plan

restituées, de manière à bien faire figurer les fondations (socles, rideaux en bois effectivement observés, etc.).

Sur tous les documents graphiques doivent figurer la date de l'inspection et le niveau d'eau relevé.

[Pour les inspections de type B11 uniquement]

Les documents évoqués ci-dessus sont exécutés en surchargeant les documents de la campagne précédente, fournis par le maître d'ouvrage (ou maître d'œuvre).

[Pour les inspections de type B1 et B11 uniquement]

9.2. Précisions à respecter lors des relevés et des examens méthodiques

Les moyens et les méthodes adoptés par le prestataire doivent garantir (à la restitution sur les documents remis en exécution) les précisions ci-après en matière de mesures, par rapport au plan de référence :

- des éléments représentatifs de l'ouvrage : ± 1 cm ;
- des éléments constituant les fondations, y compris tous rideaux, enceintes : ± 2 cm ;
- des fonds et des protections : ± 10 cm jusqu'à 10 m de toute fondation ainsi que de ses éléments et constructions « annexes », ± 15 cm au-delà ;
- du sol hors d'eau : ± 5 cm ;
- des arases sur murs, guideaux, digues, perrés, autres maçonneries : ± 2 cm.

En outre, la précision du positionnement des points levés par rapport aux parties basses des appuis des ouvrages de franchissement et à celles de tous autres ouvrages restera en deçà de, en x, y :

- socles : ± 2 cm ;
- entablements et enceintes : ± 2 cm ;
- enrochements, protections de tout type, toit du lit :
 - jusqu'à 10 m de la base de l'appui d'un ouvrage de franchissement ainsi que des parties basses de tout autre ouvrage : ± 10 cm,
 - au-delà : ± 20 cm ;
- murs, guideaux, perrés, digues sur toutes maçonneries : ± 10 cm.

Les sections planes en base de fûts et de piédroits sont restituées avec une précision sur les cotes, de ± 2 cm.

Tout socle est restitué avec une précision par rapport au parement de l'élément supporté de ± 1 cm ; la trace de l'entablement avec une tolérance de ± 3 cm.

[Pour les inspections de type A uniquement]

Pour chaque désordre significatif rencontré lors d'une inspection de type A, le prestataire rend un croquis coté (approximativement) décrivant la nature et l'importance du désordre. Par ailleurs, des photographies significatives sont jointes avec texte explicatif, repérage et date.

[Pour les inspections de type B uniquement]

9.3. Note de synthèse

Pour chaque appui (ainsi que ses constructions et/ou éléments « annexes » éventuels, ses protections contre l'affouillement, le lit au voisinage), le prestataire établit une note de synthèse faisant plus particulièrement ressortir :

- les dégradations constatées (nature étendue, localisation) ;
- la présence a priori inopportune de tout produit ;
- l'obliquité éventuelle des écoulements.

Cette note présente des constats sans interprétation ou appréciation sur la tenue des appuis. En outre, le prestataire signale tout élément (dégradation, effondrement de berge, etc.) que son intervention sur l'ouvrage ainsi qu'à son voisinage lui a permis de découvrir, en sus des zones soumises à examen méthodique.

Le prestataire précise les compléments d'investigations et d'auscultations qu'il préconise, afin de permettre l'établissement d'un diagnostic de l'état des fondations, là où il apparaît que les constatations réalisées ne permettent pas de l'établir avec suffisamment de fiabilité.

[Pour les inspections de type B11 uniquement]

La note de synthèse met particulièrement l'accent sur les évolutions identifiées depuis la dernière campagne.

9.4. Forme du rapport

Les documents sont présentés sur un support papier au format A4, reliés en présentation de type portrait. La page de garde est fournie par le maître d'œuvre. Ces documents seront aussi livrés sur un CD-Rom comportant un plan et une arborescence de répertoire pour classer les différents documents. [À préciser par le maître d'œuvre, formats informatiques des rapports, des pièces écrites, des plans et des photos – donner une définition pour les photos]

Tous les documents sont repérés et datés.

Si des vues particulières nécessitent des présentations sur des formats plus importants, ces derniers sont pliés au format A4 et insérés à l'emplacement où leur consultation éclaire le texte général. Il en va de même pour tous les croquis, plans, relevés et photographies (subaquatiques et « classiques ») qui sont insérés dans le document à l'emplacement correspondant à l'illustration du texte. Il est admis que la page de gauche puisse être utilisée à cette fin, sous réserve de la cohérence avec le texte porté en regard sur la partie droite.

Toutes les présentations nécessitant des formats plus grands que le format courant (21 × 29,7 cm) sont regroupées dans un dossier annexé au rapport. Tous ces plans, schémas, relevés, photographies sont regroupés dans un dossier annexé au rapport.

Tous les films sont regroupés sur un support [à préciser]. Chaque film est identifié suivant la date de prise de vue, le nom de l'ouvrage et sa localisation.

Les pages sont numérotées, le nombre total de pages figurant sur la première.

Les mentions suivantes : niveau d'eau, température de l'eau, vitesse du courant, visibilité du jour de l'inspection sont indiquées.

Les noms et qualités des intervenants sur le site (CQP, etc.) sont indiqués.

Le document est daté et signé par le responsable de l'inspection. Il est également visé par le responsable de la qualité au sein de l'entreprise. Si, concernant l'inspection réalisée, la même personne assure les deux fonctions, le document est visé par un autre responsable au sein de l'entreprise, exerçant un rôle de double regard.

Les autres documents complétant le compte rendu d'inspection (documents vidéo, supports informatiques, etc.) sont référencés dans le document écrit, constituant le support principal du rapport.

[On pourra joindre au CCTP le modèle de procès-verbal et les exemples de plans ainsi que le tableau de constatations fournis en annexes 2.4 et 2.5 du présent fascicule]

En cas d'une commande portant sur plusieurs ouvrages, le prestataire établit et présente une note de synthèse générale traitant de l'ensemble des ouvrages ayant fait l'objet d'une inspection.

Cette note de synthèse et les notes de synthèse de chaque ouvrage sont présentées et commentées au maître d'ouvrage, lors d'une réunion à proposer par le prestataire et à organiser par le maître d'ouvrage.

ARTICLE 10 - GESTION DE LA QUALITÉ

Les prestations faisant l'objet du présent contrat sont conduites selon les principes issus de sa démarche qualité.

10.1. Accusé de réception de la commande

Le prestataire retourne, dès réception de la commande, un accusé de réception mentionnant notamment :

- l'identification de la commande ;

- la période prévue durant laquelle le prestataire envisage les interventions sur le terrain ;
- la date prévisible de remise du ou des rapports.

10.2. Plan d'assurance qualité

Le prestataire élabore, dès réception de la commande et à partir des informations fournies par le maître d'œuvre, un plan d'assurance qualité, comprenant au moins les éléments suivants :

- les éléments fournis par le maître d'œuvre : identification des acteurs extérieurs (maître d'ouvrage, maître d'œuvre, responsables de la police du plan d'eau, interlocuteurs, intervenants sur le site, etc.) accompagnée des adresses, téléphones, télécopies et autres moyens de communications entre acteurs et entreprise ;
- les mesures de sécurité et moyens de secours envisagés (point d'accès, proximité des secours, capacité à pouvoir passer un appel) ;
- le planning prévisionnel des tâches, en mettant en évidence celles situées sur le chemin critique ;
- l'identification des personnels chargés de la réalisation de la commande au sein de l'entreprise (qualifications, certifications, degré de responsabilité, expérience) ;
- le planning détaillé des tâches ;
- la description des moyens matériels utilisés ;
- la description des procédures mises en œuvre, tant au niveau de la consignation des désordres sur le site que de leur report sur plans ou croquis ;
- la description du contrôle intérieur ;
- la gestion des anomalies et non-conformités.

10.3. Points d'arrêt

Une réunion de préparation aux opérations d'inspection proprement dites, appelée « revue de contrat », est tenue sur l'initiative du prestataire en présence du maître d'œuvre. Cette première réunion constitue un point d'arrêt.

À l'issue de la campagne, ou en cas de difficulté avérée, après report en minute des observations réalisées, une réunion est organisée sur l'initiative du maître d'œuvre. Il y sera abordé :

- les conditions matérielles ayant présidé au déroulement de la campagne ;
- les principales observations réalisées ;
- la forme à donner au compte rendu ;
- la gestion de la qualité afférente aux tâches restant à exécuter.

Cette réunion constitue un point d'arrêt dans le cas où elle est rendue nécessaire du fait de difficultés avérées.

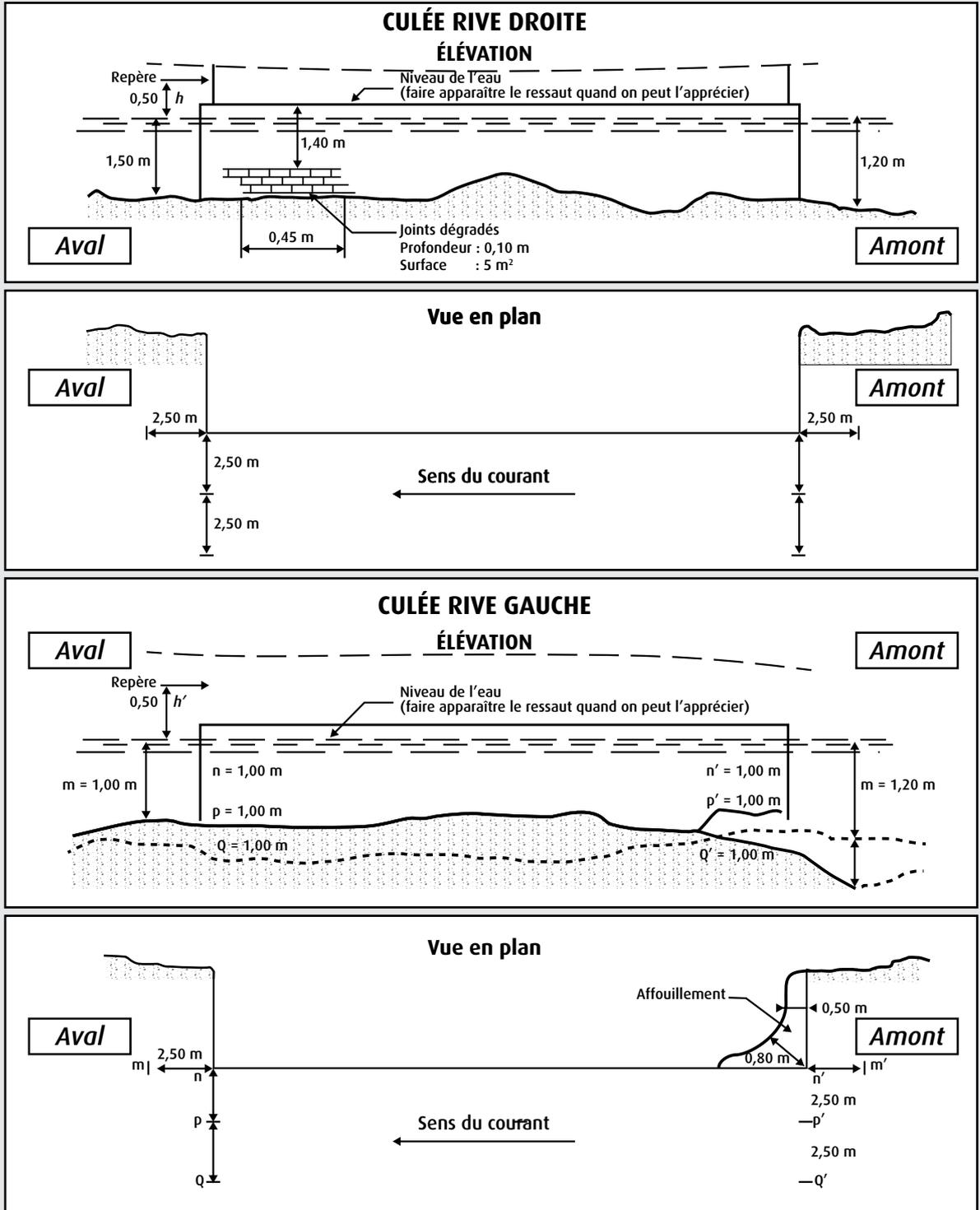
10.4. Événements exceptionnels

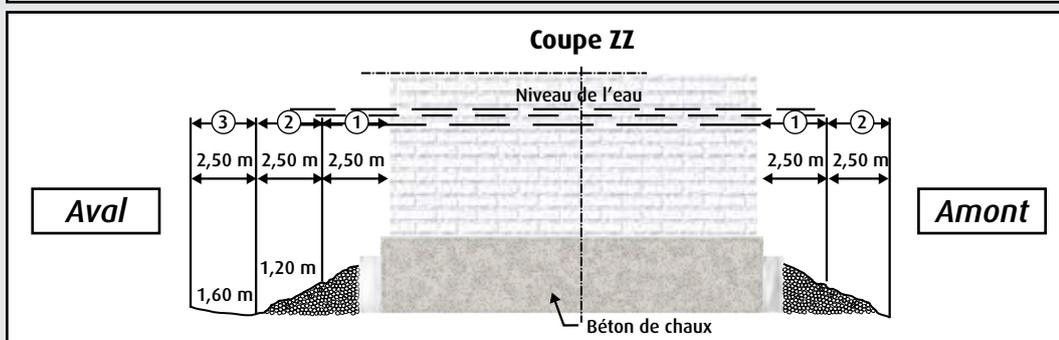
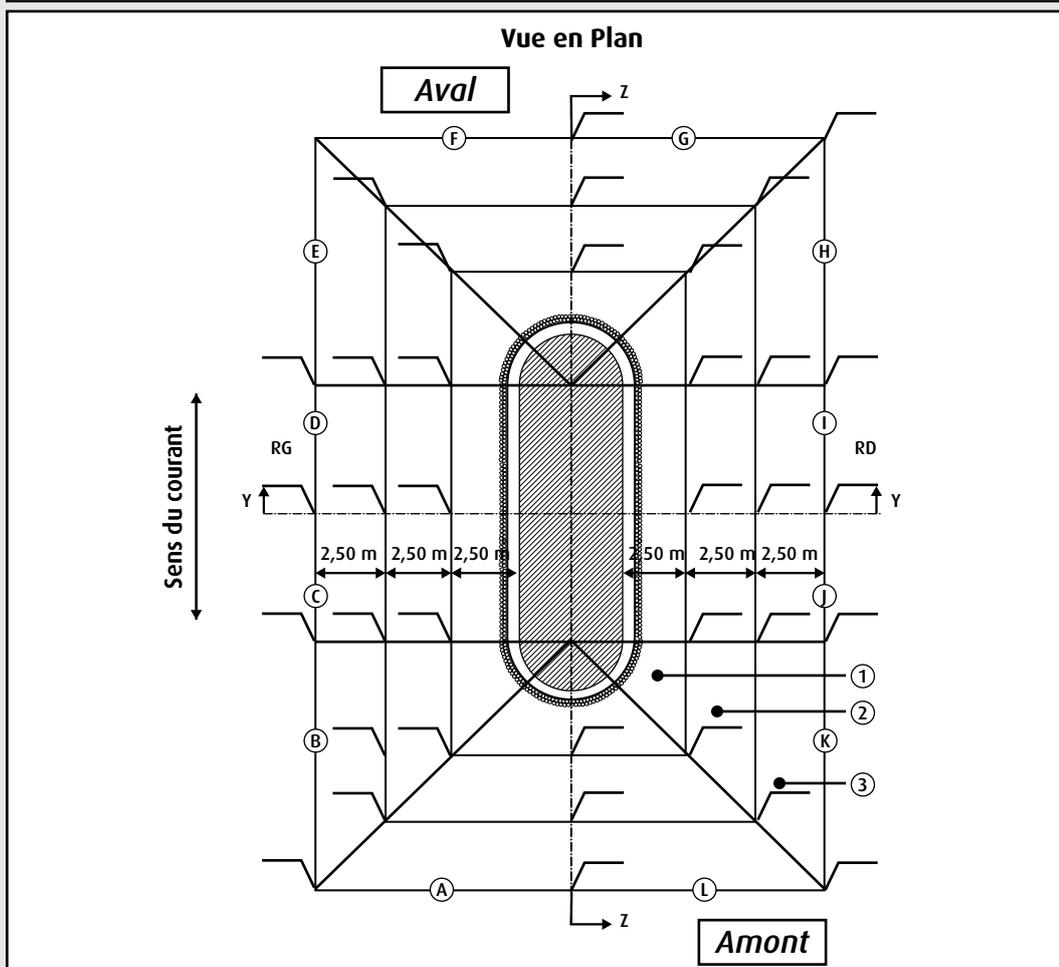
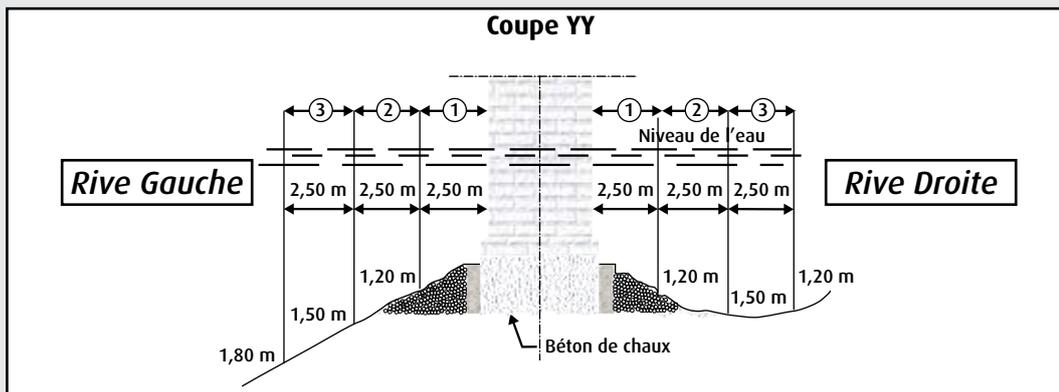
Toute inspection révélant, même partiellement, des désordres pouvant affecter à court terme la sécurité publique, la stabilité de l'ouvrage inspecté ou jugés importants donnera lieu à une information immédiate orale et écrite (avec accusé de réception) du maître d'œuvre. La poursuite des opérations sera liée à l'obtention de consignes du maître d'œuvre.

Annexe 1.5 - Modèles d'élévations et coupes types et tableau de constatations

Ces éléments sont à fournir en annexe du CCTP.

MODÈLES D'ÉLÉVATIONS ET COUPES TYPES





Exemple pour une pile

Tableau de constatations

Nature	Localisation	Importance
Fondations		
• Affouillements		
• Pieux à découvert		
• Résultat des sondages exécutés à la barre à mine		
Maçonnerie		
• Fissures		
• Joints dégarnis		
• Épaufrements		
• Ébranlements de maçonnerie		
• Manque de cohésion		
Protections		
• Caisson métallique avarié		
• Palplanches déversées		
• Rideau déformé		
• Enrochement déplacé		
• Enrochement insuffisant		
• Gabions éventrés		
• Mur de pierre		
• Perré		
• Sable apporté		
• Vase apportée		

Annexe 1.6 - Exemple de bordereau des prix

N° des prix	Définition des prix et prix hors taxes exprimés en toutes lettres	Prix HT en chiffres
1 à N	<p>INSPECTION DES PARTIES IMMERGÉES D'UN OUVRAGE</p> <p>Ce prix rémunère, forfaitairement, pour un ouvrage, toutes les actions à mettre en œuvre pour la réalisation de l'inspection de ses parties immergées.</p> <p>Ce prix comprend :</p> <p>Pour la réalisation, conformément au CCP, d'une intervention de type A, B1, B11 [<i>ne mettre que le type d'inspection prévu conformément au CCTP</i>] comprenant : [<i>ne mettre que les actions prévues conformément au CCTP</i>]</p> <ul style="list-style-type: none"> • l'examen de x culée(s), • l'examen méthodique de x pile(s), • l'examen méthodique du radier, • le relevé de fond de lit, • le relevé des désordres des parties aériennes non accessibles, • des nettoyages locaux, • des dégagements d'éléments, • la fourniture et la mise en œuvre d'un point de mesure de référence altimétrique. <p>A/ LA PRÉPARATION DE L'INTERVENTION</p> <p>Sont compris dans la préparation de l'intervention :</p> <ul style="list-style-type: none"> • la rémunération des dispositions prises par l'entreprise en vue d'assurer l'hygiène et la sécurité, • l'étude des documents remis par le maître d'ouvrage, • la préparation de l'inspection avec notamment la définition des moyens d'accès, • les déplacements éventuels sur ouvrage avant inspection, • la réalisation des supports pour reports des défauts. <p>B/ L'INTERVENTION SUR L'OUVRAGE</p> <p>Sont compris pour l'intervention sur l'ouvrage :</p> <ul style="list-style-type: none"> • toutes les dispositions et matériels spécifiques, nécessaires, permettant l'accès aux parties d'ouvrage à inspecter ; • l'amené et le repli du matériel nécessaire à l'intervention ; • le déplacement sur l'ouvrage (y compris la signalisation de position) ; • la rémunération des personnels pour la réalisation de l'inspection. <p>C/ La rédaction d'un procès-verbal d'inspection</p> <p>Sont compris pour la rédaction du procès-verbal d'inspection :</p> <ul style="list-style-type: none"> • la rédaction et la fourniture d'une minute du procès-verbal ; • la minute de la note de synthèse d'inspection ; • la fourniture des clichés ; • la confection des plans et dessins annexés au procès-verbal, <p>LE FORFAIT :</p>	
N + 1	<p>RESTITUTION DE LA CAMPAGNE</p> <p>Ce prix rémunère, forfaitairement, la restitution au maître d'ouvrage des résultats de la campagne d'inspection.</p> <p>Ce prix s'applique quels que soient le nombre et le type d'ouvrages concernés.</p> <p>Ce prix comprend notamment :</p> <ul style="list-style-type: none"> • la réalisation des supports pédagogiques de présentation ; • l'animation d'une réunion de restitution auprès du maître d'ouvrage ; • la réalisation et la fourniture en trois (3) exemplaires couleur et les fichiers informatiques du rapport de synthèse et des procès-verbaux de la campagne de l'inspection. <p>LE FORFAIT :</p>	

Annexe 2 : Fiches « techniques de réparation »

Annexe 2.1 - Comblement simple de cavités dans les maçonneries ou éléments de fondations, directement accessibles de l'extérieur

Annexe 2.2 - Semelles et radiers, encagement des appuis. Augmentation de la surface d'appui des fondations

Annexe 2.3 - Micropieux

Annexe 2.4 - Injection solide

Annexe 2.5 - Jet-grouting

Annexe 2.6 - Injections d'imprégnation et de remplissage de petites cavités non accessibles de l'extérieur

Annexe 2.1 - Comblement simple de cavités dans les maçonneries ou éléments de fondations, directement accessibles de l'extérieur

I - Principe

Ce type de réparation, qui peut aussi bien concerner les fondations que la base de piles les surmontant, consiste à remplir des cavités par un béton ou un mortier de façon à reconstituer la résistance mécanique des parties endommagées. Il ne peut être opéré que sur des cavités suffisamment accessibles depuis la périphérie de l'ouvrage ou de ses fondations.

Les cavités non directement accessibles de l'extérieur relèvent des procédés d'injection de remplissage.

II - Réalisation

Le comblement de cavités par bétonnage nécessite les opérations suivantes :

- enlèvement des débris et nettoyage à la lance à eau des pièces de maçonnerie ou formations rocheuses affleurantes éventuelles ;
- mise en place, autant que nécessaire, de pièces de coffrage. Celles-ci peuvent être de nature diverse : palplanches légères, coffrages classiques, sacs de sable, etc.

Au cas où la mise en œuvre d'armatures serait nécessaire pour rétablir le fonctionnement structurel dans ses conditions initiales :

- scellement d'armatures de liaison de la partie existante et de la partie comblée, sous réserve d'accessibilité suffisante. À défaut, il pourra être nécessaire de sceller a posteriori des barres de liaison au moyen d'un coulis gravitaire, après comblement ;
- nettoyage complémentaire ;
- réalisation du ferrailage dans la partie à bétonner ;
- bétonnage de la cavité, à sec après épuisement ou sous l'eau, ces opérations pouvant être phasées. Le béton immergé, mis en place de façon gravitaire au tube plongeur ou à la pompe diffuse dans ses constituants et son mode de fabrication des bétons traditionnels ;
- Si la cavité comporte des zones peu accessibles, mise en place de tubes d'injection en attente permettant de réaliser un clavage au coulis, après bétonnage. Une telle injection doit être menée avec une pression faible et contrôlée, permettant la mise en œuvre du coulis sans risquer de provoquer un effet de vérin. Les tubes d'injection sont ensuite lavés et recépés.

III - Essais et contrôles

Les contrôles réalisables pour ce type de solution portent sur les points suivants :

- composition et caractéristiques des bétons ;
- aspect des parties visibles de la cavité avant remplissage ;
- estimation du volume de la cavité et comparaison avec le volume de béton de comblement ;
- contrôle des produits et de leurs paramètres de mise en œuvre lorsque le comblement doit être complété par un coulis gravitaire ou par un mortier.

IV - Avantages, inconvénients, limitations

Malgré sa simplicité de principe, cette technique nécessite de nombreuses précautions liées à la stabilité de l'appui, pouvant être précaire, et au caractère fragmentaire des informations dont on dispose pour s'assurer de la qualité d'exécution. De façon courante, le comblement de cavités doit être complété par la mise en œuvre de techniques plus élaborées permettant d'assurer une bonne continuité géométrique et mécanique de l'appui réparé.

Lorsqu'une cavité affecte le sol de fondation en raison de phénomènes hydrauliques, la cause doit en être traitée par des dispositifs appropriés : parafouille horizontal ou vertical, par exemple. La cavité sera ensuite comblée au moyen de matériaux assurant la meilleure continuité mécanique possible.

Annexe 2.2 - Semelles et radiers, engagement des appuis. Augmentation de la surface d'appui des fondations

I - Principe

L'engagement consiste à ceinturer un appui défaillant au moyen d'un rideau étanche dans le but de le protéger des circulations d'eau internes et/ou des affouillements.

Généralement associé à d'autres types de travaux, il participe aux fonctions suivantes :

- reconstitution du caractère monolithique de la base de l'appui reposant directement sur le sol ou sur des éléments de fondations profondes ;
- reconstitution de la continuité et des caractéristiques mécaniques du sol de fondation ;
- éventuellement, participation à la reprise des charges de superstructure.

L'engagement est un préalable indispensable à tous travaux de création de semelles élargies ou de radier.

II - Réalisation

De façon usuelle, l'engagement est réalisé au moyen d'un batardeau en palplanches en prenant les précautions indispensables pour que sa mise en œuvre n'aggrave pas la stabilité précaire de l'appui. En priorité, il y aura donc lieu de combler les cavités accessibles de l'extérieur par des techniques simples (par exemple, utilisation de sacs de sable). La mise en fiche des palplanches, jusqu'à une cote nécessairement inférieure à celle des affouillements prévisibles, devra proscrire tout risque de mise en mouvement du sol de fondation que pourraient causer les vibrations, le lançage ou la décompression. On privilégiera le vérinage (presse hydraulique) ou le battage en adaptant l'énergie en fonction de l'évolution éventuelle des désordres. Dans certains cas, le vibrofonçage à très haute fréquence avec découplage des basses fréquences apparaît également applicable.

Lorsque le batardeau doit participer à la reprise des charges verticales, on se trouve confronté à la difficulté de transférer les charges sans entraîner de désordres supplémentaires dans la superstructure ni de déformations excessives des palplanches. Cette solution conduit à mettre en œuvre une pièce rigide de béton armé ceinturant l'appui, connectée à celui-ci par des armatures métalliques (corsetage), et à renforcer le batardeau au moyen de palpieux.

En raison de sa complexité, cette option pourra être écartée au profit de conceptions plus traditionnelles consistant à élargir la semelle sans participation du batardeau à la reprise des charges verticales.

Pour les ouvrages de faible ouverture, il est concevable de relier des piles voisines au moyen d'un radier connecté à celles-ci, réalisé à l'intérieur d'un batardeau général.

Ces solutions doivent être appréhendées en prenant en compte le volet hydraulique global de l'aménagement.



Vérinage des palplanches (Photo : JP. Levillain)

III - Essais et contrôles

Les incertitudes relatives au batardeau portent principalement sur l'adaptation de celui-ci aux conditions géotechniques ou hydrauliques lorsque celles-ci sont très variables (notamment en site karstique).

Le suivi de mise en fiche et le contrôle de verticalité de la partie visible du batardeau sont donc indispensables.

En cas d'anomalie, il pourra s'avérer nécessaire de procéder à des investigations géotechniques complémentaires.

IV - Avantages, inconvénients, limitations

La réalisation d'un engagement permet de réaliser dans un environnement relativement maîtrisé les travaux de reconstitution, d'amélioration et/ou de renforcement de sols et maçonneries. Cet engagement est lui-même intégrable au fonctionnement de la structure et en constitue une protection pérenne vis-à-vis des affouillements.

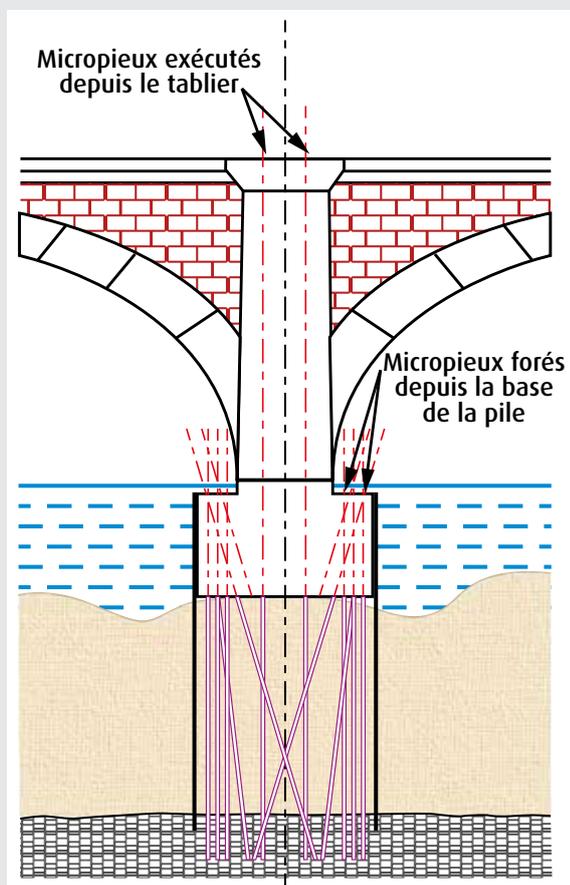
Les inconvénients résultent des nuisances occasionnées par la mise en œuvre.

Les limitations d'emploi sont liées aux possibilités d'accès de l'atelier près des appuis ainsi qu'à l'impact hydraulique éventuel. L'adaptation aux conditions géotechniques peut être rendue difficile en site très hétérogène (notamment en présence de terrains karstiques).

Annexe 2.3 – Micropieux

I - Principes et objectifs de la réparation

Le terme de micropieux s'applique à des pieux mis en œuvre avec ou sans refoulement du sol, dont le diamètre n'excède pas 300 mm. Ceux-ci sont scellés par injection d'un mortier ou d'un coulis. Les micropieux sont soit réalisés à travers la fondation existante, soit connectés à celle-ci au moyen d'un dispositif approprié.



Exemple de disposition de micropieux

II - Réalisation

On privilégie la mise en œuvre par forage selon des techniques limitant les perturbations en évitant le battage, les vibrations ou le lançage, par exemple. Le mode d'exécution (injection en particulier) influence grandement la capacité portante mobilisée par frottement latéral. À ce titre, la norme NF P 94-262 distingue quatre types de micropieux :

- type I, forés tubés, remplis de mortier mis en œuvre au tube plongeur, équipés ou non d'armatures. Le tubage est récupéré après exécution ;
- type II, exécuté comme le précédent mais équipé d'une cage d'armature ;
- type III, foré et équipé d'une cage d'armatures et d'un système d'injection par tubes à manchettes. Après claquage du coulis de gaine, l'injection est globale sous une pression au moins égale à la pression limite du sol. Il existe des variantes d'exécution faisant appel à des tubes ou profilés métalliques battus équipés de tubes à manchettes ;
- type IV, de technologie identique au précédent en procédant cependant, après le claquage du coulis de gaine, à une injection manchette par manchette sous une pression au moins égale à la pression limite du sol.

Les aspects technologiques sont décrits dans les normes et documents spécialisés, en particulier le guide STRRES « Réparation et renforcement des fondations ».

De façon générale, les micropieux utilisés en génie civil comportent une armature métallique pouvant, outre les charges axiales, résister à de légers efforts parasites transversaux occasionnés par des déplacements du sol dans les horizons remaniés ou instables rencontrés dans les couches supérieures.

La liaison mécanique avec la superstructure s'effectue :

- soit par frottement lorsque les micropieux traversent des éléments de celle-ci ;
- soit par l'intermédiaire d'un dispositif de connexion.

La reprise des charges verticales de superstructure, qui ne doit pas aggraver ou entraîner de désordres doit respecter certains principes :

- les micropieux reprennent les charges par réaction axiale en traction ou en compression. Il est donc nécessaire que leur disposition permette d'aboutir à l'équilibre de la fondation sans entraîner d'efforts transversaux ;
- lorsque des micropieux très élancés traversent des couches de sol de très faible résistance au cisaillement, il est nécessaire de vérifier la stabilité au flambement en tenant compte des tolérances d'exécution ;
- dans le cas où l'on n'apporte pas d'éléments de rigidité pour l'appui à conforter, il est nécessaire de répartir le plus possible les micropieux en limitant les charges unitaires. On doit en particulier éviter tout effet de « point dur » pouvant générer ou accentuer des désordres dans les superstructures ;
- on doit s'assurer que la mobilisation de la capacité portante peut se faire au prix de déplacements supplémentaires compatibles avec une non-aggravation des désordres.



Forage de micropieux (Photo J.P. Levillain)

III - Essais et contrôles

Les moyens de contrôle de l'exécution, qui relèvent du contrôle interne, portent sur les moyens et paramètres de forage, et sur la formulation, les caractéristiques et conditions de mise en œuvre des coulis et/ou mortiers.

Concernant le contrôle extérieur, les moyens de contrôle de qualité d'exécution mis en œuvre pour les pieux traditionnels (tubes d'auscultation sonique, essais d'impédance), ne sont pas utilisables pour les micropieux en raison de leur taille réduite. On pourra cependant tirer profit de l'existence des pièces d'appui formant massif de réaction pour effectuer des essais de chargement statiques en compression ou traction, conformes aux modes opératoires en vigueur.

Le contrôle extérieur porte donc essentiellement sur la bonne mise en œuvre du contrôle interne et sur le constat de l'efficacité en terme de stabilisation de tassements. Il est donc usuel, comme pour tous travaux d'amélioration ou de renforcement de sol et de reprise en sous-œuvre, de spécifier des objectifs en termes de tassements admissibles à courte et moyenne échéance.

IV - Avantages, inconvénients, limitations

Les micropieux présentent une relative facilité de mise en œuvre dans des conditions d'espace restreint et pour des géométries d'ouvrages complexes. Ils offrent également la possibilité de reconnaître les couches de terrain lors de l'exécution et de rechercher un niveau d'ancrage à grande profondeur. Leur exécution n'est cependant pas exempte de difficultés en présence de matériaux hétérogènes ou instables. La réalisation d'un traitement de sol préalable peut donc être nécessaire. Par ailleurs, il est impératif de concevoir avec la plus grande attention leur disposition afin de ne pas créer ou accentuer des déséquilibres de la superstructure, ce qui implique une étude globale fine. Leur grande souplesse d'utilisation peut inciter à les utiliser sans analyse préalable suffisante avec un risque de surdimensionnement ou, au pire, d'inadaptation plus ou moins préjudiciable.

En toute hypothèse, ces travaux sont à conduire uniquement par une entreprise spécialisée ayant une bonne connaissance du procédé, de ses difficultés et limitations, et ayant de solides références.

Annexe 2.4 - Injection solide

I - Principes et objectifs de la réparation

L'injection solide (ou compactage statique horizontal) consiste à incorporer un mortier raide sous pression à partir de forages de façon à comprimer radialement le sol. Les forages sont disposés selon un maillage régulier et sont injectés par passes successives, en remontant. Par ce principe, il est possible de remplir de petites cavités, d'améliorer la compacité des sols ayant été remaniés ou décomprimés par suite d'affouillement, d'effondrement karstique ou d'érosion interne, par exemple, et de réaliser des colonnes de mortier assurant une portance.

II - Réalisation

II-1 - Atelier de mise en œuvre

Il comprend le matériel de préparation ou de réception et de malaxage du mortier et un ou plusieurs ateliers réalisant à la fois ou successivement le forage puis l'injection l'incorporation du mortier.



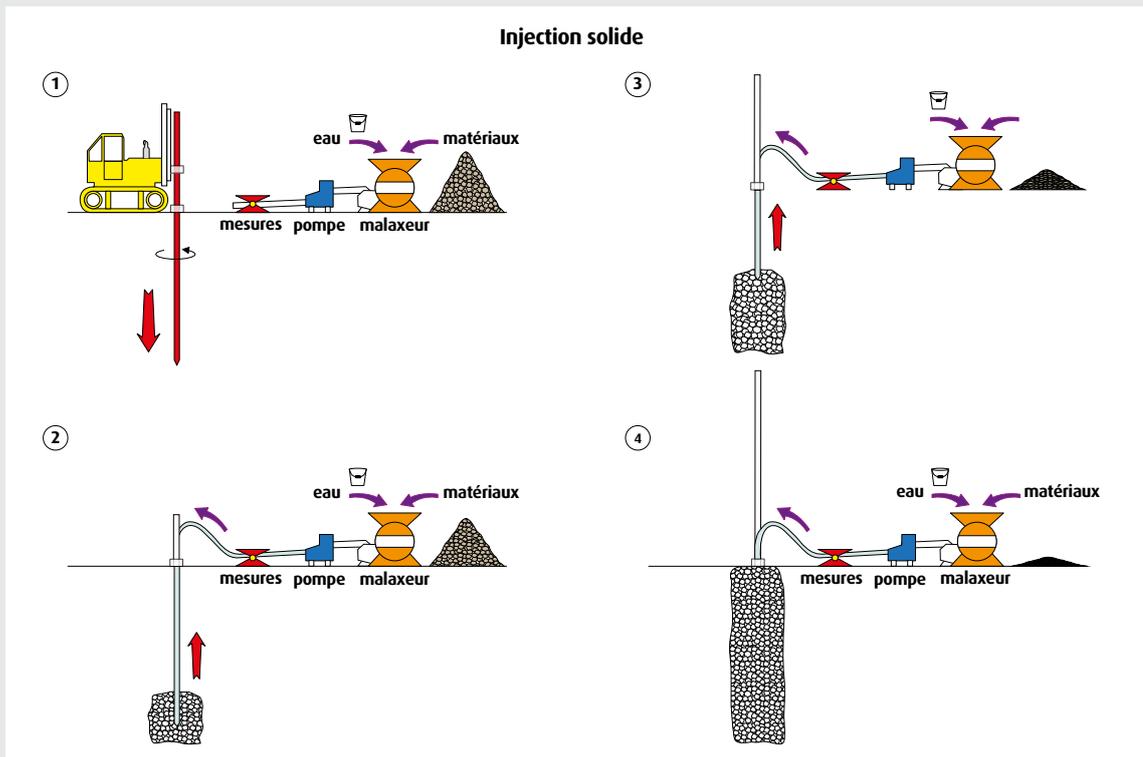


Schéma de mise en œuvre de l'injection solide

II-2 Mode d'exécution

Les forages primaires sont répartis selon un maillage prédéfini en fonction des caractéristiques initiales des terrains et des objectifs d'amélioration que l'on se fixe, la réflexion étant alimentée par la capitalisation d'expériences antérieures ainsi que par les résultats d'une nécessaire planche d'essai réalisée dans le cadre des études d'exécution. Cette dernière permet en effet de préciser, pour des caractéristiques de mortier et une pression d'injection données, le taux d'incorporation du mortier ainsi que l'amélioration de caractéristiques mécaniques des sols qui en résulte au centre de la maille. Les forages, d'un diamètre de l'ordre de 100 mm, sont le plus souvent réalisés avec outil débordant et tubage à l'avancement, en procédant à l'enregistrement des paramètres de forage. L'injection est conduite en remontant avec des passes successives espacées de 0,50 m à 2 m environ, sous une pression prédéfinie, de l'ordre de 1 à 2 fois la pression limite du sol en ayant le souci de contrôler les volumes injectés ainsi que les déformations induites à la surface du sol ou à la périphérie de parties d'ouvrages sensibles. Selon la confrontation des objectifs d'amélioration et des résultats de l'injection primaire, il peut être nécessaire de procéder à des forages secondaires, voire tertiaires. Le mortier utilisé doit être pompable sous pression, ne pas claquer le terrain (mortier trop fluide) ou, à l'inverse ne pas, sous l'effet d'un essorage, se bloquer dans le conduit d'approvisionnement ou à trop faible distance de l'extrémité de la canne d'injection. De façon usuelle, le mortier est constitué de sable grossier à fin complété de fines (cendres, fillers, limons, etc.), de ciment, ainsi que d'adjuvants destinés à faciliter la mise en œuvre. L'affaissement au cône doit être inférieur à 10 cm avec des ordres de grandeur couramment fixés entre 6 et 8 cm. Le taux d'incorporation fréquemment constaté se situe en moyenne autour de 6 % du volume de sol traité avec une variabilité fonction des cas rencontrés.

III -Essais et contrôles

Lors de la planche d'essai puis du chantier, il est indispensable, dans le cadre du contrôle interne, de contrôler l'ensemble des produits et moyens mis en œuvre pouvant avoir une incidence sur les résultats, notamment :

- forages : implantation, azimut, paramètres de forage ;
- caractéristiques physicochimiques des constituants du mortier ;
- caractéristiques physicochimiques du mortier ;
- chronologie du chantier ; enregistrement des pressions et quantités de mortier injectées.

Le contrôle extérieur, qui porte sur l'atteinte des objectifs, doit être réalisé lors de la planche d'essai puis à chaque changement de conditions géotechniques d'emprise significative par rapport aux enjeux. Ce contrôle est usuellement effectué au moyen d'essais pressiométriques, le cas échéant pénétrométriques au centre de la maille. Les résultats, s'ils sont jugés insuffisants, peuvent déclencher la réalisation d'une maille secondaire, voire tertiaire.

IV - Avantages, inconvénients, limitations

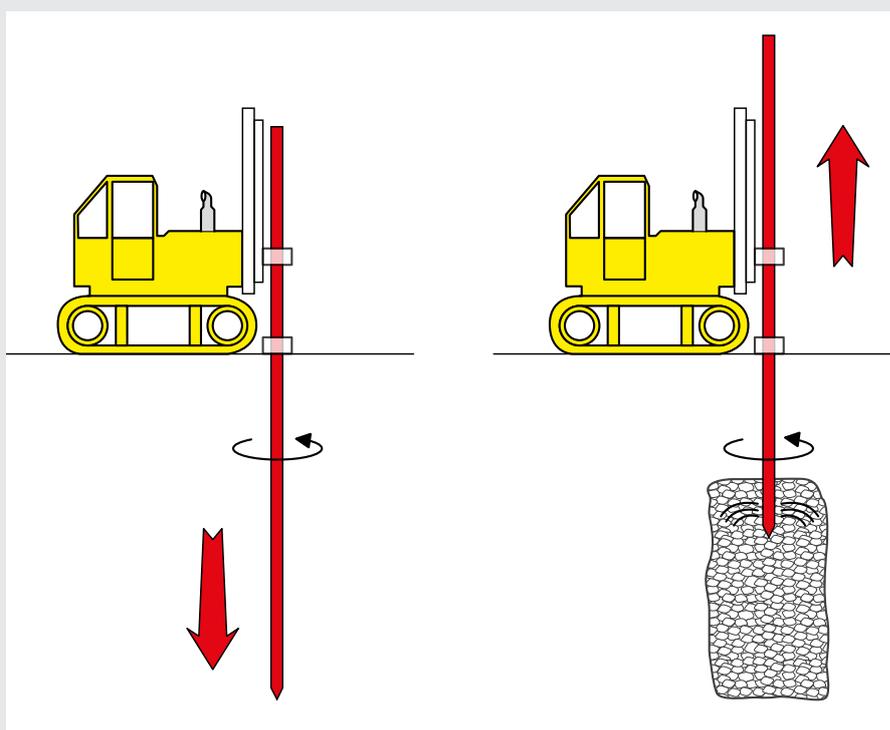
La technique de l'injection solide est particulièrement recommandée dans les sols sableux ou sablo-limoneux lâches. En présence de couches hétérogènes, le traitement, en termes de quantités de mortier injectées, s'adapte automatiquement à l'hétérogénéité mécanique des terrains. En outre, ce type de traitement n'entraîne ni rejet notable, ni vibrations.

Dans les terrains argileux, l'injection solide peut provoquer un gonflement en surface pouvant entraîner des tassements différés. L'emploi de cette technique nécessite quelques précautions près de la surface du sol ou à proximité de structures sensibles. En toute hypothèse, ces travaux sont à conduire uniquement par une entreprise spécialisée ayant une bonne connaissance du procédé, de ses difficultés et limitations et ayant de solides références.

Annexe 2.5 - Jet-grouting

I - Principes et objectifs de la réparation

Le jet-grouting consiste, dans son principe, à injecter sous très haute pression un coulis de ciment au moyen d'un jet tournant à partir d'un forage. Le coulis se mélangeant avec le sol permet de réaliser des colonnes ou des panneaux de « béton de sol » en mesure de constituer des éléments de renforcement de fondations ou des écrans d'étanchéité. Vis-à-vis de la capacité portante, les colonnes de jet-grouting sont assimilées à des pieux forés injectés sous faible pression et se justifient comme tels.



Principe du jet-grouting

II - Réalisation

Le jet-grouting comporte les phases d'exécution suivantes :

- réalisation d'un forage destructif de petit diamètre (couramment de l'ordre de 100 mm) avec utilisation d'un fluide de forage, jusqu'au niveau de la base de la colonne ;
- injection du coulis sous très haute pression (plusieurs dizaines de mégapascals, MPa) au moyen d'un jet tournant,

en tenant compte d'un temps de station et d'un pas de remontée prédéterminés. L'action du jet permet la destruction des matériaux en place dans un certain voisinage puis, par malaxage, la formation d'un mélange sol-coulis. Pendant cette phase, le coulis en excès, chargé de sédiments (spoils) remonte à la surface.

Différentes variantes de procédés ont été développées en vue d'améliorer les performances d'exécution et, par voie de conséquence, le diamètre des colonnes.

On distingue les techniques suivantes :

- *jet simple* : elle ne met en œuvre qu'un simple coulis de ciment et s'applique en priorité aux sols lâches, peu cohésifs, faciles à déstructurer et à malaxer. Une viscosité excessive du coulis peut empêcher la remontée des spoils et occasionner des claquages ;
- *jet double* : deux buses coaxiales permettent d'injecter le coulis de ciment (au centre) ainsi qu'un jet d'air sous basse pression (< 1 MPa), à la périphérie. Ce procédé a une plus grande efficacité en termes de pénétration du jet et de remontée des cuttings ;
- *jet triple* : la déstructuration s'effectue d'abord au moyen d'un jet double eau-air mettant en œuvre une très haute pression d'eau. Une buse située sous les deux premières réalise l'injection du coulis de ciment sous une pression beaucoup plus faible que précédemment : de l'ordre de 3 à 5 MPa.

En fonction des types de sols et des techniques d'exécution, il est possible de réaliser une gamme importante de colonnes en termes de résistance mécanique et de dimensions. En règle générale, il est indispensable de réaliser une planche d'essai dans le cadre des études afin de régler les paramètres d'exécution intervenant sur les caractéristiques des colonnes (notamment pression de jet, temps de station, pas de remontée).

III - Essais et contrôles

En terme de fonctionnement mécanique, les points à contrôler sont le diamètre des colonnes et la résistance du coulis.

Au stade des études d'exécution, il est vivement recommandé de procéder à l'extraction d'une ou plusieurs colonnes d'essai permettant de faire le lien entre stratigraphie, paramètres d'exécution (relevant du contrôle interne) et caractéristiques géométriques et mécaniques des colonnes obtenues, ces dernières étant mesurées sur carottes. Cette option permet également de tester les méthodes de contrôle indirectes mises en œuvre préalablement à l'extraction. Cette planche d'essai doit être conduite après avoir fait une reconnaissance géotechnique détaillée du site permettant de juger de sa représentativité.

Lors de l'exécution, le contrôle interne dispose des paramètres de forage et d'injection permettant de détecter des situations en anomalie avec le déroulement attendu des travaux.

Après exécution, le contrôle de la géométrie s'effectue par méthode géophysique, les plus usuelles étant les suivantes :

- méthode du cylindre électrique : elle consiste, connaissant la résistivité du coulis frais et celle du terrain environnant, à mesurer et analyser les différences de potentiel induites autour d'une colonne par un courant électrique généré dans un forage interne à celle-ci. Par simulations successives, il est possible de déterminer la géométrie de la colonne correspondant au champ électrique mesuré. Cette méthode nécessite un contraste de résistivité important entre le coulis et le terrain environnant, ce qui suppose des mesures avant prise du coulis ;
- méthode d'impédance mécanique : il s'agit d'une extension du procédé couramment utilisé pour le contrôle de fondations profondes. Elle consiste à générer un choc en tête de colonne et à analyser les ondes réfléchies au niveau des variations de section. Ce procédé n'est applicable que lorsque les changements de section restent en nombre limité.

Dans tous les cas, l'emploi de méthodes indirectes doit être assorti d'une analyse sur l'incertitude des résultats.

De façon courante, on constate que les mesures de diamètre sont difficiles à utiliser et imprécises. Le contrôle extérieur porte donc essentiellement sur la bonne mise en œuvre du contrôle interne et sur le constat de l'efficacité en terme de stabilisation de tassements. Il est donc usuel, comme pour tous travaux d'amélioration ou de renforcement de sol et de reprise en sous-œuvre de spécifier des objectifs en termes de tassements admissibles à courte et moyenne échéance.



*Colonne de jet-grouting découverte pour contrôle du diamètre
(Photo CETE Normandie-Centre)*

IV - Avantages, inconvénients, limitations

La réalisation de colonnes de jet-grouting est envisageable avec les précautions nécessaires dans tout type de terrain, bien que les sols très organiques soient sources de difficultés particulières pour opérer le malaxage. Les colonnes réalisées à travers les maçonneries présentent l'avantage d'offrir une grande surface de contact avec celles-ci, ce qui facilite la transmission des charges verticales. Avec les technologies maintenant disponibles, il est possible de constituer des colonnes de plusieurs mètres de diamètre.

Un inconvénient du procédé est qu'il entraîne une quantité appréciable de rejets de spoils (de l'ordre du volume des colonnes).

Les défauts couramment constatés peuvent avoir des origines diverses :

- perte brutale de coulis à la traversée d'horizons très perméables, occasionnant une striction ;
- claquage avec soulèvement du sol de fondation lorsque les spoils ne peuvent plus s'évacuer par suite d'une viscosité trop importante ;
- mauvaise répartition latérale du coulis en raison de l'effet d'ombre causé par d'anciens pieux.

Dans tous les cas, il convient d'être vigilant vis-à-vis du phasage d'exécution de façon à ne pas affaiblir une trop grande partie de la fondation pendant la prise du coulis. L'ordre d'exécution doit donc prendre en compte un pianotage. De façon courante, la réalisation de colonnes de jet-grouting peut s'accompagner d'une légère augmentation de pression interstitielle dans les sols environnants et de faibles tassements en cours de travaux.

En toute hypothèse, ces travaux sont à conduire uniquement par une entreprise spécialisée ayant une bonne connaissance du procédé, de ses difficultés et limitations, et ayant de solides références.

Annexe 2.6 - Injections d'imprégnation et de remplissage de petites cavités non accessibles de l'extérieur

I - Principes et objectifs de la réparation

Les travaux d'injection, qui peuvent aussi bien concerner les matériaux d'assise de fondations ou environnant celles-ci, que les maçonneries elles-mêmes, consistent à incorporer un liant dans les vides (pores, fissures ou petites cavités) en vue d'atteindre les objectifs conjoints ou séparés suivants :

- obtenir une amélioration des caractéristiques mécaniques de sols ;
- rétablir la continuité physique et mécanique de maçonneries ;
- réduire les débits d'infiltration.

En règle générale, on recherche dans ce type d'opération à minimiser les déplacements du milieu encaissant en cours de travaux. L'injection doit se faire par imprégnation en évitant les claquages dans le sol.

Le remplissage de cavités macroscopiques directement accessibles de l'extérieur, entrant dans la catégorie des injections de comblement, est examiné séparément.

II - Réalisation

L'incorporation de liants de types divers dans un objectif d'imprégnation s'effectue :

- soit dans un forage simple obturé ou non en tête ;
- soit dans un tube à manchettes préalablement scellé dans un forage par un coulis de gaine. L'injection est alors menée par passes successives remontantes correspondant à chacune des manchettes.

Le choix du produit d'injection et de son mode de mise en œuvre est fonction de la nature du milieu à traiter et de son environnement, ainsi que des objectifs poursuivis.

Traditionnellement, on distingue les produits d'injection et domaines d'emploi suivants :

- *mortiers* : constitués pour la partie sèche de ciment, d'argile (bentonite par exemple) et d'une charge inerte (sables, cendres, etc.) à laquelle on ajoute, le cas échéant, des adjuvants pour obtenir une prise quasi immédiate en présence de circulations d'eau. *Les mortiers sont typiquement utilisés en comblement de cavités ou en imprégnation de milieux très ouverts (larges fractures, graves grossières ou cailloux) ;*
- *suspensions granulaires* : de constitution analogue à celle des mortiers, mais ne comportant pas de fraction sableuse. Ils sont beaucoup plus homogènes et pénétrants que ces derniers, surtout pour de faibles dosages en ciment. L'emploi des suspensions granulaires est privilégié pour le collage (ou clavage) d'injections de comblement, en injection d'horizons perméables ou en régénération de maçonneries fissurées ;
- *liquides ou solutions* : il s'agit couramment de gels de silice formés par dissolution de silicate de soude dans l'eau en présence d'un réactif. Leur temps de prise est contrôlé par le dosage en réactif, permettant d'obtenir une résistance mécanique quasi immédiate en présence de circulations d'eau. Compte tenu de leur fluidité importante, ces produits peuvent être utilisés en imprégnation, après injection d'un coulis de ciment.

Si les injections de mortiers ne nécessitent que de simples forages avec mise en œuvre gravitaire ou sous une légère surpression pour permettre l'écoulement, les suspensions granulaires nécessitent requièrent le plus souvent l'emploi de tubes à manchettes. Les paramètres à considérer pour la conduite du chantier en vue d'atteindre les objectifs donnés sont nombreux : distance, orientation, technique d'exécution des forages, ordre d'injection des passes, détermination de critères d'arrêt d'injection en terme de volume pour chaque passe et surtout, cadence d'injection.

En toute hypothèse, le calage des méthodes doit s'appuyer sur les résultats d'un plot d'essai réalisé lors de la phase d'étude d'exécution.



Matériel d'injection (Photo : J.P. Levillain)



Matériel d'injection (Photo : J.P. Levillain)

III - Essais et contrôles

La mise au point méthodologique puis la conduite du chantier nécessitent, dans le cadre du contrôle interne, un suivi de l'ensemble des paramètres ayant une incidence possible sur les résultats :

- forages : implantation, azimut, paramètres de forage ;
- caractéristiques physicochimiques des constituants des produits d'injection (ciment, bentonite, charges inertes, additifs) ;
- caractéristiques physicochimiques des coulis ;
- chronologie du chantier d'injection ;
- enregistrement des pressions et débits ;
- perméabilité et indice des vides du milieu à injecter.



Le contrôle extérieur porte, d'une part sur le suivi de la mise en œuvre du contrôle interne, d'autre part sur l'évaluation de l'efficacité des travaux. Concernant les sols, il fait appel prioritairement aux investigations caractérisant les propriétés du milieu traité (méthodes géophysiques, essais mécaniques in situ au pressiomètre, essais de perméabilité, forages destructifs avec enregistrement de paramètres, éventuellement carottages et essais en laboratoire). Dans les maçonneries, on réalise couramment des essais de type Lugeon à pression limitée. À noter que les carottages réalisés trop tôt après injection sont inopérants, le coulis étant délavé par l'eau de forage.

De façon générale, les travaux qui peuvent causer des déplacements parasites de la superstructure, voire un soulèvement par effet vérin, doivent s'accompagner d'un suivi rigoureux (suivi visuel, mesures de déplacement en trois dimensions).

IV - Avantages, inconvénients, limitations

L'injection par imprégnation permet d'apporter dans la masse une amélioration diffuse et, dans une certaine mesure contrôlée, de certaines caractéristiques : généralement résistance mécanique et perméabilité. Elle permet d'intervenir dans des conditions géotechniques extrêmement variables et peut se combiner avec un traitement des superstructures par les mêmes méthodes.

La variabilité des conditions rencontrées nécessite cependant une grande richesse et une bonne fiabilité des données géotechniques ainsi qu'une expérience certaine du maître d'œuvre et des personnels chargés de la réalisation des travaux et des contrôles.

Une attention particulière doit être portée à la toxicité éventuelle des produits d'injection vis-à-vis du milieu environnant.

La conception de ces travaux au stade des études de projet reste un point délicat dans la mesure où les informations dont on dispose alors sont nécessairement limitées.

L'optimisation des moyens nécessite un personnel spécialisé possédant de solides références et passe généralement par la réalisation d'un plot d'essai dans le cadre des études d'exécution.

Annexe 3 : Protocole de suivi bathymétrique aux instruments destiné aux ouvrages de franchissement de cours d'eau

La présente annexe reproduit un rapport technique du laboratoire régional des Ponts et Chaussée de Blois de novembre 2008.

Avant-propos

Ce présent rapport a pour but de présenter un protocole de suivi bathymétrique à partir d'appareils à destination des gestionnaires d'ouvrages de franchissement de cours d'eau qui ne peuvent être réalisés par des méthodes classiques présentées dans le fascicule. Ces techniques sont à employer pour des raisons de sécurité, de profondeur d'eau, de courant ou de chute d'eau, de visibilité du milieu et pour les ponts en danger pour cause de mobilité importante des fonds. Pour résumer, ces méthodes sont à employer là où les bathymétries sommaires sont insuffisantes ou difficiles à mettre en œuvre.

Quelques exemples d'ouvrages concernés :

- Partie rive gauche du pont Wilson à Tours présentant une forte dénivellation entre l'amont et l'aval et où les courants ont été mesurés à plus de 4 m.s⁻¹.
- Pont Saint-Esprit à Bayonne ou pont de pierre de Bordeaux avec une grande profondeur d'eau, un bouchon vaseux et de très forts courants dus à l'influence de la marée.
- Ponts présentant une forte mobilité des fonds couplée quelquefois avec de grandes profondeurs d'eau comme sur le Rhône.
- Ponts constitués d'un radier continu avec chute d'eau à l'aval comme la partie rive droite du pont Wilson à Tours ou le pont-canal du Guétin sur l'Allier.

Ces investigations bathymétriques correspondent à des moyens lourds.

Elles nécessitent un bateau souvent fortement motorisé adapté aux conditions de navigation locale. Le matériel nécessaire comprend : un logiciel de navigation assurant le suivi du levé et la saisie des données, un sondeur et éventuellement un sonar latéral ainsi qu'un appareil de positionnement GPS ou optique.

Le traitement des données doit être effectué avec un logiciel adapté à la topographie ou à la bathymétrie. Seule une équipe spécialisée peut effectuer une bathymétrie avec des moyens sophistiqués de ce type.

Annexe 3.1 - Description de l'environnement d'un ouvrage

L'ouvrage s'intègre dans un système d'érosion et de sédimentation lié à son environnement.

Il est primordial dans un premier temps de bien connaître l'environnement de l'ouvrage. Les désordres pouvant avoir pour origine un élément extérieur à celui-ci : autres ouvrages, affluents, courbes ou méandres, morphologie du substratum, hauts fonds rocheux, étroiture de la vallée, tectonique, etc.

Ces informations seront recueillies dans un dossier d'ouvrage qui aura pour but de rassembler ces différentes données :

La morphologie fluviale

Il convient d'abord de préciser les conditions d'équilibre en transport solide du cours d'eau. Celui-ci est le siège d'un débit liquide, mais également d'un débit solide qui dépend de son énergie potentielle (pente, débit liquide), mais également des éléments anthropiques (extraction de matériaux alluvionnaires) et naturels (néotectonique) correspondant aux mouvements récents de l'écorce terrestre qui peuvent modifier localement la pente de la vallée.

Les formes sédimentaires décrites ci-après ne sont pas dues à l'état de l'équilibre en transport solide du cours d'eau, mais elles sont exacerbées par celui-ci ; les affouillements vont devenir beaucoup plus profonds en cas de déséquilibre négatif et risquent donc de mettre en cause la stabilité de l'ouvrage. Les extractions en lit mineur ont été la cause de l'effondrement de ponts comme le pont Wilson à Tours.

Les crues sont les événements morphogènes, et, outre que les affouillements vont être plus importants pendant le passage de la crue, les grandes modifications du chenal vont se mettre en place.

Les directions régionales de l'environnement (Diren) pourront apporter des renseignements sur l'état des cours d'eau au niveau de l'équilibre en transport solide, en particulier sur le détarage des échelles et l'évolution des lignes d'eau qui sont significatifs de l'évolution de ceux-ci.

Les courbes

Les courbes génèrent une circulation d'eau hélicoïdale qui est à l'origine d'un creusement dans la partie concave de celle-ci et d'un atterrissement dans la partie convexe. Ces formes se conjugueront avec celles dues aux éléments de l'ouvrage (voir carte).

Les piles ou les obstacles ponctuels

Les vortex (tourbillons) causés par le courant qui heurte l'amont de la pile vont aspirer les éléments du fond et créer un affouillement dans cette zone. Les contre-courants à l'aval de la pile vont occasionner des atterrissements.



Figure 1 : Affouillements à l'amont d'une pile

Les réductions de la section d'écoulement naturelles et artificielles

La réduction de la section du lit mineur par les piles et les culées, les remblais en secteur d'écoulement va entraîner une accélération des vitesses pour faire transiter le débit dans l'étranglement ; la dissipation de cette énergie à l'aval va entraîner la création d'un affouillement à l'aval de la réduction de section.

Dans les secteurs soumis à la marée, le courant changeant de sens, les affouillements vont se mettre en place en aval et en amont de la réduction de section comme sur le pont de pierre de Bordeaux



Figure 2 : Affouillement à l'aval d'une passe et atterrissement à l'aval d'une pile

Les seuils ou les radiers

Les seuils naturels ou artificiels, les radiers d'ouvrages noyés ou dénoyés vont être à l'origine d'affouillements en pied à l'aval, cette fosse est suivie d'un atterrissement et ainsi de suite sur quelquefois plusieurs centaines de mètres (voir carte Vandières).

D'autre part, une vidange du bief amont quelquefois sur plusieurs kilomètres peut être constatée lorsque le cours d'eau est en déséquilibre au niveau du transport solide.

La géologie et la sédimentologie du site

L'environnement géologique de l'ouvrage est à l'origine de la morphologie du cours d'eau. Cela aura un impact immédiat sur l'évaluation de la sensibilité des berges et du fond et par voie de conséquence, sur l'érosion induite par l'ouvrage. Les aménagements de protection du fond ou des rives seront directement concernés par le contexte géologique du secteur concerné.

Il sera indispensable de déterminer également à l'échelle de la rivière si celle-ci est en équilibre entre les écoulements et le transport de matériaux sédimentaires. En effet, appréhender l'activité d'une rivière en transport solide permet d'avoir une idée globale sur sa capacité érosive.

Des paramètres, comme la granulométrie, interviennent dans l'affouillabilité maximale d'un ouvrage.

La présence d'un affluent

Pour mieux comprendre le fonctionnement d'un ouvrage hydraulique et connaître les sources d'apport de matériaux, les affluents situés dans l'environnement immédiat de l'ouvrage doivent être localisés afin d'évaluer leur impact. L'arrivée d'un affluent va modifier localement le débit et le champ de vitesse : il peut être source d'apport de matériaux, donc de modification des écoulements.

La présence d'autres aménagements d'origine anthropique

Les effets liés à la présence d'autres ouvrages tels que les barrages peuvent s'ajouter aux impacts du pont. Ces ouvrages constituent des obstacles à l'écoulement. Ils modifient donc localement les courants et créent des turbulences favorisant les déplacements de matériaux. Selon la position du second ouvrage par rapport au pont, le résultat sera différent.

Un des cas les plus critiques sera un pont accolé à un barrage où se combinent l'effet de rétrécissement de la section d'écoulement et la création de l'affouillement à l'aval du barrage, ce dernier mettant en péril la stabilité même du pont.

La combinaison des aménagements donne ainsi une diversité de formes sédimentaires accentuées plus particulièrement à certains endroits où les désordres peuvent être accentués.

Le dossier d'ouvrage

Pour gérer au mieux le patrimoine et les interventions techniques sur chaque ouvrage, la création d'un dossier de suivi devient indispensable.

Dans le dossier d'ouvrage, on devra retrouver : l'environnement du barrage, le diagnostic à un instant t dit état de référence, un suivi des réparations, les interventions subaquatiques (plongeurs, bathymétrie), les documents de référence liés à l'ouvrage.

Les études hydrauliques réalisées pour sa construction ou pour des travaux de renforcement permettront également de repérer d'éventuels désordres et de connaître les vitesses de courant dans son environnement.

Annexe 3.2 - Le matériel

Principe

Le sondeur mesure la profondeur d'eau, l'appareil de positionnement (GPS ou optique) permet de connaître les coordonnées x , y du point de sonde et l'altitude z du transducteur (partie qui émet et réceptionne le signal du sondeur). Le logiciel de navigation stocke ces données et permet de suivre sur écran la progression du levé.

Le bateau sur lequel prend place l'équipement se déplace à vitesse lente (2 à 3 km/h, 3 à 5 nœuds) et le pilote s'assure de la bonne régularité du semis de points du levé.

La navigation

Il est nécessaire dans ce type de levé bathymétrique de pouvoir approcher au plus près des piles ou des enrochements avec un courant souvent très fort. Dans le cas d'un pont avec radier continu et chute d'eau ou d'un pont à forte dénivellation entre l'amont et l'aval, la seule possibilité d'intervention est pendant une crue avec un amortissement du remous suffisant ; le courant est alors violent. D'autre part, la présence de contre-courants (vortex) complique encore plus les manœuvres, car il est impératif de pouvoir couvrir entièrement le secteur.

Il faudra un bateau très maniable, solide et puissant. Le LRPC de Blois a opté pour un bateau de 6 m de long propulsé par une turbine, ce qui évite le risque de détérioration de l'hélice et du moteur. La turbine est entraînée par un moteur de 230 chevaux. La coque est en aluminium de 6 mm d'épaisseur.

Recommandation pour la navigation

Le travail doit être effectué dans le respect des consignes de sécurité, avec un bateau adapté au type de courant et d'état du milieu afin d'avoir une sécurité optimale.

Le positionnement

Sous un ouvrage ou aux abords de celui-ci, il n'est pas possible de recevoir les satellites, c'est pourquoi le GPS différentiel (DGPS), pour être utilisé, doit être couplé à une centrale d'inertie et à des capteurs de mouvements du bateau. Ces mouvements seront corrigés par le logiciel de navigation. Il serait préférable et plus économique de prévoir directement un système optique (théodolite et distancemètre laser) pour traiter la totalité du site.

Les évolutions des matériels permettront peut-être de réaliser des levés au GPS même sous des ponts, la trajectoire du bateau étant suivie par des capteurs directionnels. Notons que certaines zones sont perturbées par des radars ou des émetteurs d'ondes radio puissants et que les GPS sont inopérants.

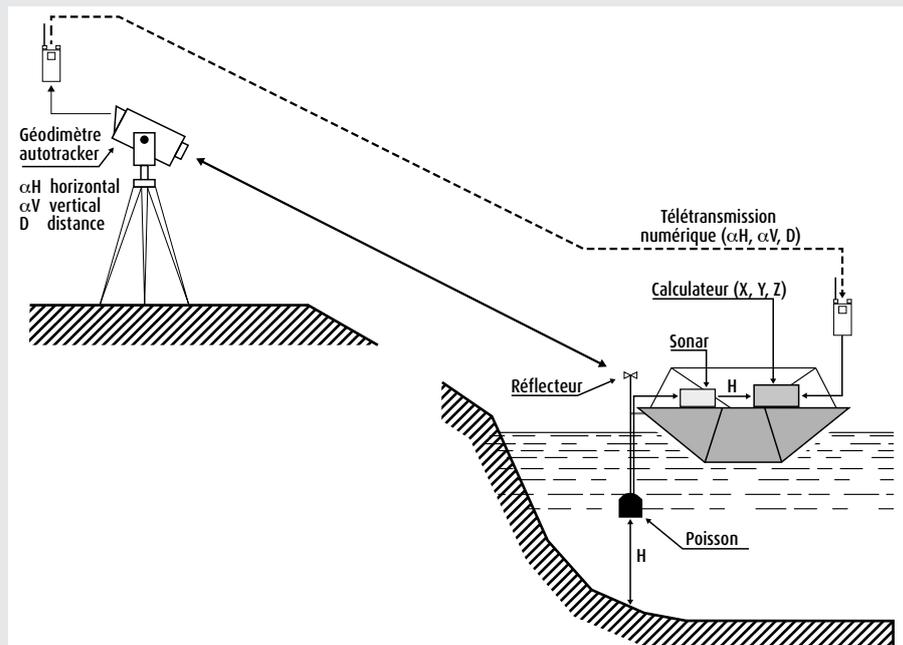


Figure 3 : Schéma de principe d'acquisition des hauteurs d'eau par un sondeur vertical et du positionnement du bateau, simultanément, grâce à un appareil topographique placé en rive

La mesure de profondeur

Le principe de mesure de la hauteur d'eau

« Le principe consiste à mesurer le temps mis par une onde sonore ou ultrasonore (qui est la seule à se propager avec une faible atténuation dans l'eau) pour traverser la tranche d'eau, se réfléchir sur le fond et revenir vers l'hydrophone de réception. Ce temps est converti en distance en associant une vitesse de propagation du son dans l'eau ; celle-ci dépend des conditions locales de température, de salinité, de pression, de turbidité et d'eutrophisation. »

« Le milieu de propagation est responsable d'une absorption partielle du faisceau. Lorsqu'il rencontre un réflecteur (le fond), il est plus ou moins réfléchi, réfracté, diffracté et absorbé. Le signal reçu en surface est donc le résultat complexe d'une combinaison de phénomènes physiques. »

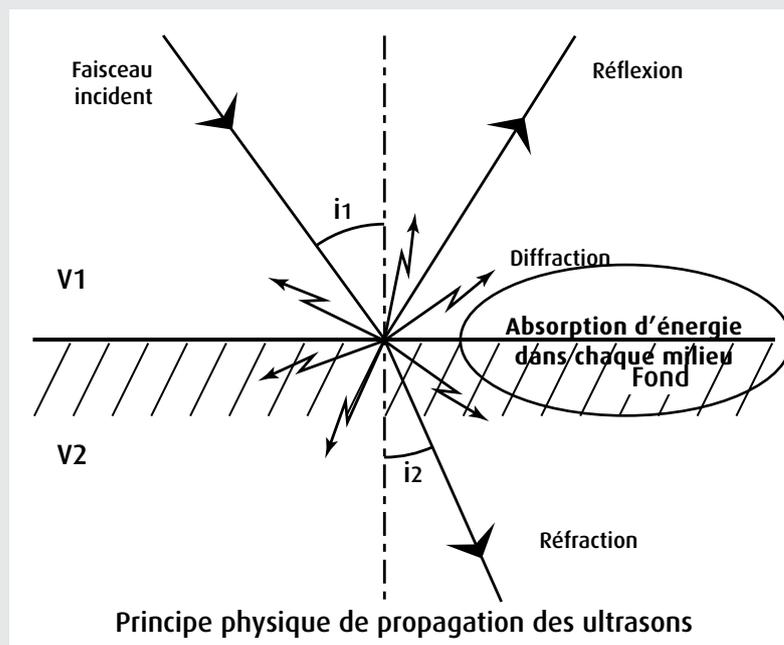


Figure 4 : Schéma de principe de la propagation des ultrasons

Les sonars et sondeurs d'hydrographie

Ces appareils émettent un son ou un ultrason par l'intermédiaire d'un transducteur qui transforme un courant électrique d'une certaine fréquence en son de la même fréquence. Ce signal est envoyé vers le fond où une partie revient vers le transducteur, il subit alors le traitement inverse ; le temps est alors mesuré par l'horloge interne du sonar et transformé en distance en fonction de la vitesse de propagation du son dans l'eau.

Un sondeur envoie un signal directement vers le fond ; un sonar latéral émet dans toutes les directions d'un plan perpendiculaire à la direction du bateau et réalise une « photographie » du fond par juxtaposition des lignes de réception ainsi obtenues.

Un nouveau matériel arrive sur le marché : il s'agit du sondeur multifaisceau, qui émet lui aussi dans toutes les directions du plan vertical à la direction du bateau et permet d'associer des profondeurs le long de la ligne reconnue. Ce matériel devra faire l'objet d'essais et de comparaisons avec des levés au sondeur avant d'être employé de façon opérationnelle.

L'emploi d'un sondeur est indispensable dans la plupart des cas. Lorsque l'eau est peu chargée en matières en suspension (MES), une fréquence classique de 100 ou 200 kHz convient. En revanche, lorsqu'un bouchon vaseux est présent (c'est le cas dans les estuaires), une fréquence de 30 kHz est requise et un sondeur bifréquence est alors employé. Cette fréquence ne permettra peut-être pas de traverser le bouchon ; il faudra alors effectuer le levé à un autre moment où le bouchon sera moins épais. La mesure de la profondeur varie suivant la fréquence utilisée, il est donc indispensable que celle-ci soit signalée dans le rapport et d'en tenir compte à l'interprétation.

Un étalonnage de la vitesse de propagation du son dans l'eau doit être effectué deux fois par jour pour régler le sondeur. Sur les sonars haut de gamme, il existe un étalonneur de vitesse du son dans l'eau. Ce type d'étalonnage, le plus fiable, est enregistré sur la bande sonar ainsi que l'échelle de mesure utilisée.

Dans le cas de chute d'eau entraînant la présence de bulles d'air dans l'eau, les sondeurs sont inopérants ; il sera possible dans certains cas, si la profondeur n'est pas trop importante, de faire une mesure avec une perche munie d'un réflecteur laser. Une autre solution sera d'attendre une crue qui noiera le seuil et régularisera la ligne d'eau.

Il est également très important que le sondeur soit équipé d'une sortie papier (bande sonar) pour conserver la trace des mesures. Cette restitution permet de corriger au traitement les valeurs fausses. Le sondeur est généralement sensible aux herbes, au bullage dû à une chute d'eau, aux vases en suspension mobilisées par les mouvements d'eau rapide et aux corps flottants ou entre deux eaux, etc.

Un nouveau type de sondeur est présent actuellement sur le marché : le sondeur multifaisceau. Celui-ci peut simultanément prendre plusieurs profondeurs sur un profil en travers par rapport à la trajectoire du bateau. Ce type de sondeur doit être couplé à un système de correction des mouvements du bateau, il peut marquer un progrès par rapport au matériel classique sous réserve que les essais soient concluants, il est toutefois peu probable qu'il soit opérationnel dans le cas d'une forte charge de MES.

Le sonar latéral

Le sonar latéral permet de connaître la nature du fond (vase, sable, graviers, galets, substratum, enrochements, épaves, constructions, etc.). Il ne laisse aucune zone non reconnue, car son signal couvre l'ensemble du fond sur une largeur donnée. L'interprétation se fait en fonction de l'intensité de l'écho et de la distance oblique par rapport à l'émetteur.

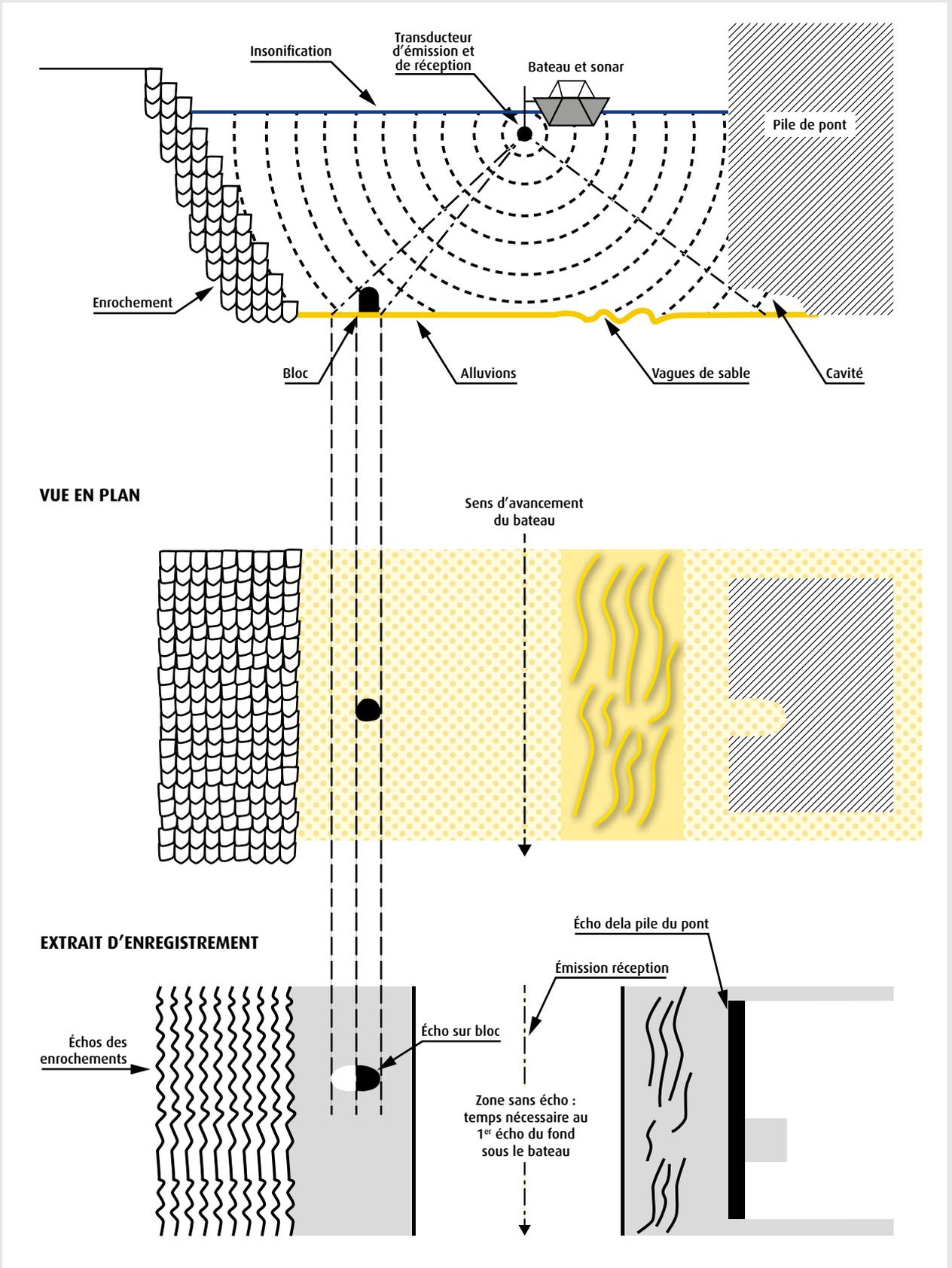


Figure 5 : Principe d'auscultation au sonar latéral

Exemple d'enregistrement au sonar latéral

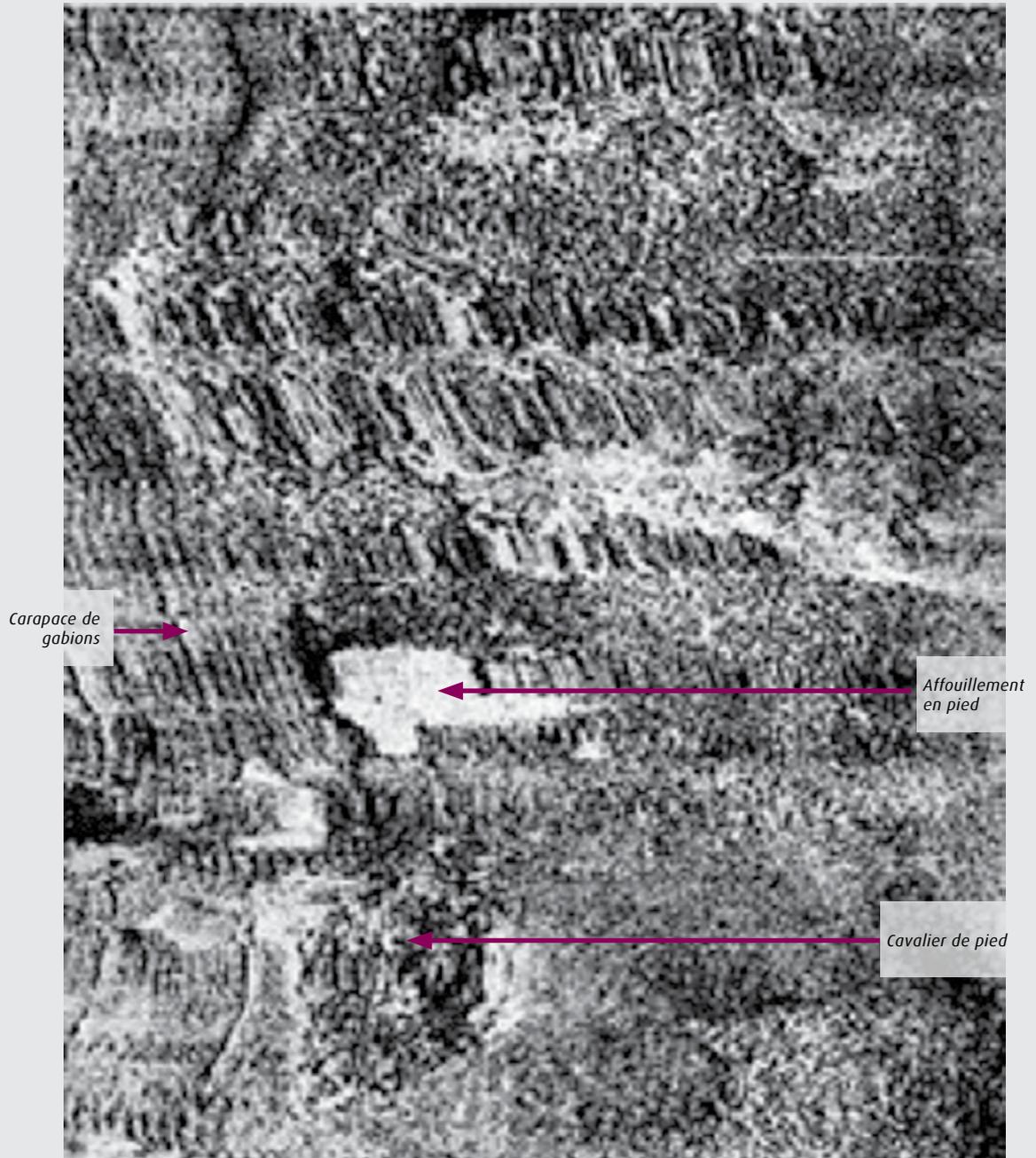


Figure 6 : Pont de pierre de Bordeaux – carapace d’enrochement, vue au sonar latéral



Le logiciel de navigation

La saisie de donnée étant à haute fréquence (plusieurs fois par seconde) pour une bonne synchronisation du positionnement et de la profondeur, un logiciel spécifique de navigation permettant également le suivi sur écran, de la couverture du secteur à lever est indispensable. Il permet en plus du stockage des données de corriger la latence, qui est le temps s'écoulant entre la prise de données du positionnement et celle de la profondeur. Il ne faut pas oublier que le bateau se déplace pendant ce temps.

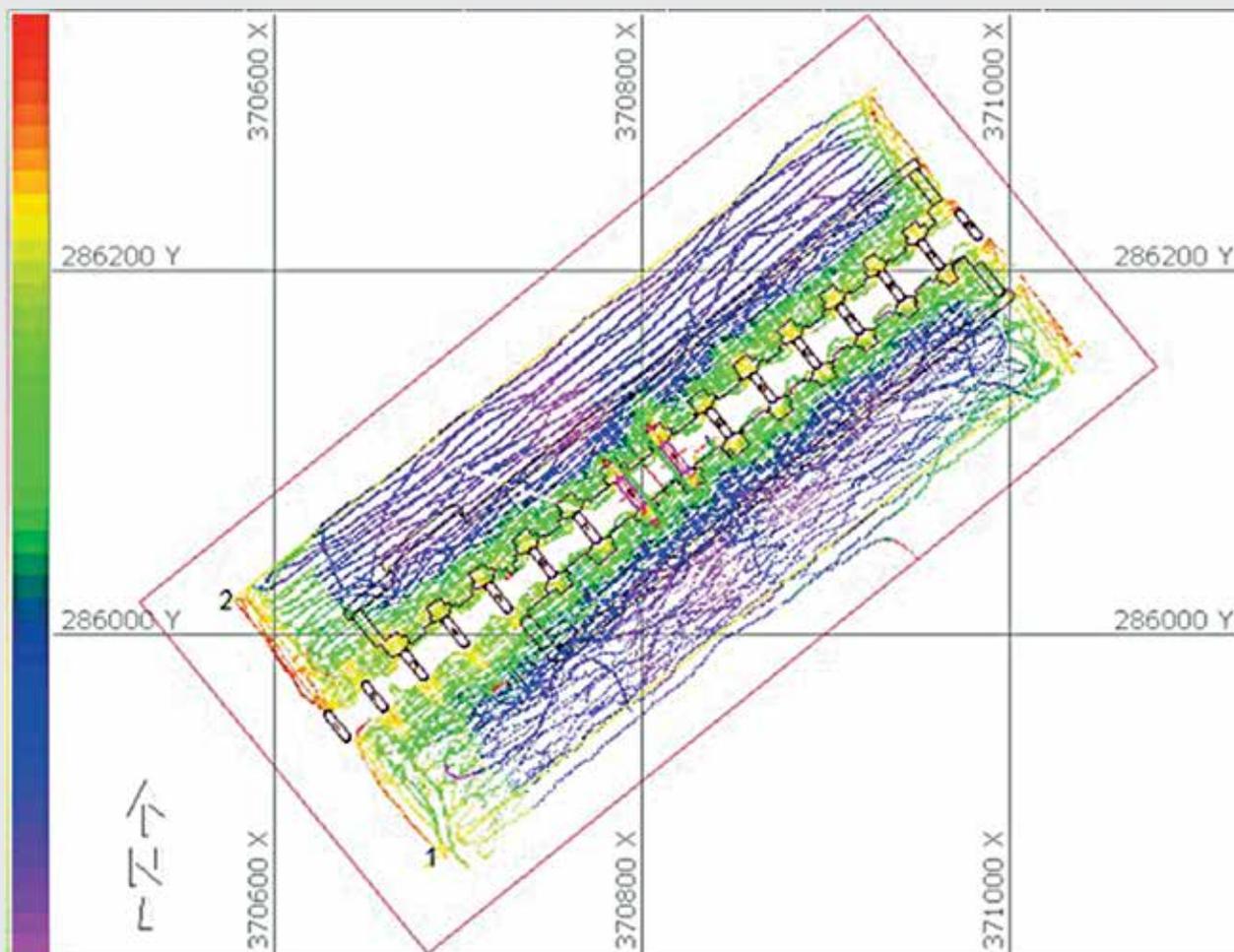


Figure 7 : Suivi du levé sur un logiciel de navigation

Le système géodésique

Il est indispensable de travailler dans un système général en vigueur dans le pays, soit le Lambert 93 en France pour la planimétrie et le NGF normal ou IGN 69 pour l'altimétrie, sauf si un système officiel local est en place sur l'ouvrage étudié. Il faut se méfier des échelles qui peuvent être multiples sur les ponts et pas toujours cohérentes entre elles. En secteur maritime, des échelles en niveau marin NGF et étiage cohabitent sur un même site et sont à l'origine d'erreurs et de confusions.

Par ailleurs, il sera intéressant pour le gestionnaire de demander au prestataire les fiches signalétiques des stations topographiques installées auprès de l'ouvrage (pour un usage ultérieur), les données informatiques correspondant à son relevé et une fiche d'observations de chantier pour constituer ainsi un recueil d'informations concernant l'ouvrage le plus fourni possible.

La maille de mesures

La maille ne peut être régulière dans de telles conditions de navigation. Elle doit être serrée à proximité des appuis, de l'ordre de 0,5 à 1 m et plus large à l'écart de ceux-ci, de l'ordre de 2 à 5 m.

Le traitement des données

Celui-ci peut être effectué soit directement par le logiciel de navigation, soit par un logiciel spécifique de topographie. Ces logiciels permettent de tracer des courbes de niveaux, des profils, de calculer des volumes différentiels et de tracer les courbes correspondantes et de faire des représentations tridimensionnelles.

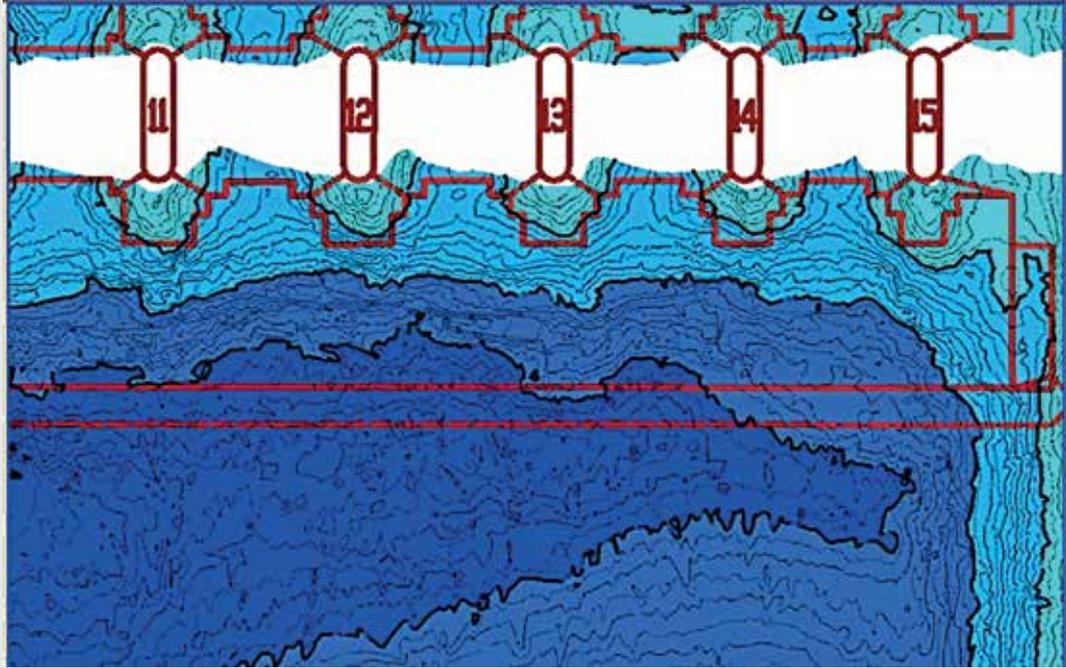


Figure 8 : Courbes de niveau, pont de Pierre de Bordeaux

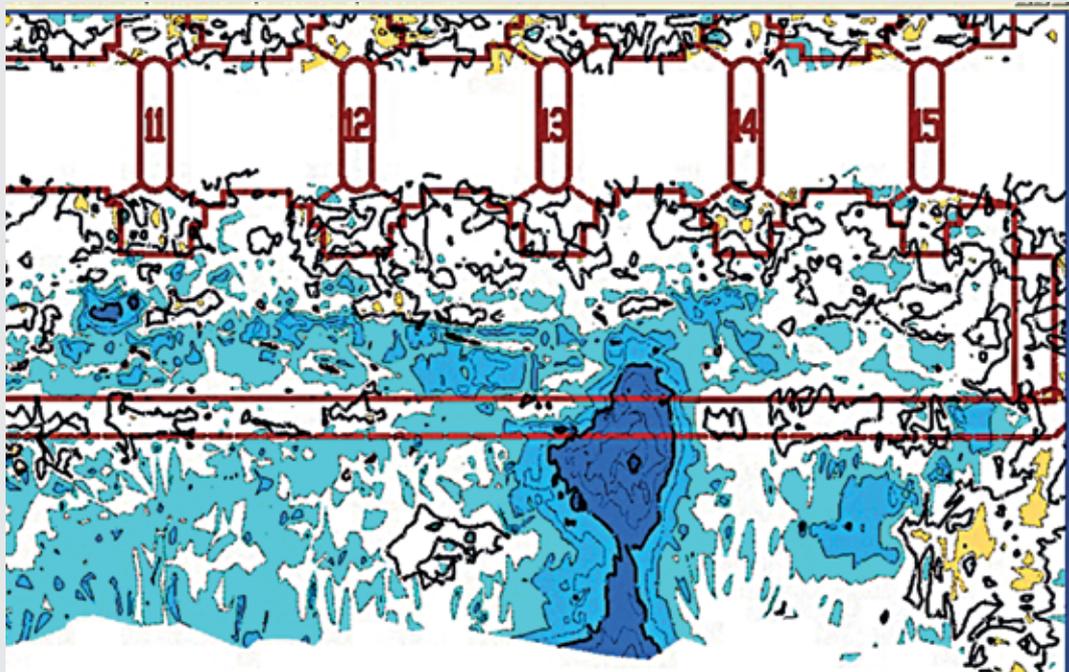


Figure 9 : Courbes isodifférentielles, pont de pierre de Bordeaux

Étendue du levé

Le levé bathymétrique doit couvrir l'ensemble des désordres du fond pour retrouver un état naturel ; dans certains cas, plusieurs centaines de mètres sont nécessaires de part et d'autre de l'ouvrage.

Le type de pathologie est généralement connu depuis fort longtemps, d'où l'intérêt du dossier d'ouvrage qui va permettre de définir le secteur à lever et les secteurs particuliers à détailler.

En première approche et sans connaissances particulières sur l'ouvrage, une longueur de levé équivalente à la moitié de la largeur du cours d'eau est un bon compromis. Le levé pourra être prolongé si des désordres sont observables sur les rives jusqu'à englober ceux-ci.

Précision de la mesure

Deux types de paramètres interviennent :

- la précision intrinsèque des appareils qui est fournie par le constructeur. Elle est de l'ordre centimétrique ;
- la synchronisation des données de positionnement et de profondeur, qui est assurée par le logiciel de navigation. Elle dépend du décalage en temps, donc en déplacement, du bateau entre la prise de mesure du positionnement et celle de la profondeur ; elle dépend de la profondeur (temps de parcours plus ou moins long de l'onde dans l'eau) et de la vitesse du bateau, car plus la vitesse est grande, plus le déplacement réalisé par le bateau sera important et plus la distance entre les points de fond et de position mesurés sera importante. C'est pourquoi une bonne précision de levé exige une vitesse de navigation lente. Le réglage de ce décalage, qui s'appelle la latence, se fait sur le logiciel de navigation et exige une bonne maîtrise de la part de l'hydrographe.

Sur un fond relativement plat et solide avec une profondeur d'eau inférieure à 5 m, il est possible d'obtenir une précision de ± 5 cm et ± 10 cm pour 10 m de profondeur.

Le cas des fonds très pentus est plus difficile à traiter, car le faisceau dirigé vers le fond n'est pas parfait : il a une certaine ouverture et le premier retour vers le sonar pris en compte est le plus haut placé. Une ouverture d'une dizaine de degrés peut générer une imprécision de 1 m pour une profondeur de 10 m.

Le cas des fonds vaseux avec des eaux très chargées comme dans les estuaires est beaucoup plus compliqué, car la question est de savoir ce que l'on considère comme fond si toutefois celui-ci peut être défini. Il sera peut-être nécessaire de comparer des levés faits dans les mêmes conditions hydrologiques et de rester prudent dans les conclusions. Sur les talus sous fluvial du pont de Pierre de Bordeaux en site soumis au marnage avec des profondeurs de l'ordre de 20 m la précision peut être évaluée à ± 2 m.

Il ne faut pas oublier que sur un fond mobile, le niveau peut varier de quelques décimètres à l'heure sans mettre en cause la validité des mesures qui peuvent être très bonnes.

Avantages et inconvénients de chaque type de matériel

Le positionnement optique est actuellement préférable au GPS, car il permet un levé sous l'ouvrage et dans les zones perturbées par les ondes radar ou radio. Dans l'avenir, il est possible que le positionnement GPS associé à des capteurs de déplacement puisse être utilisable partout.

Lorsque les eaux sont relativement claires, un sondeur de haute fréquence (200 kHz) est le meilleur choix, car il a un faisceau très étroit. Dans le cas où les eaux sont chargées (dans les estuaires avec bouchon vaseux), il sera nécessaire d'utiliser un sondeur basse fréquence (30 kHz), mais le levé sera beaucoup moins précis.

Le sonar latéral sera plutôt choisi en haute fréquence (800 kHz). Pour avoir une bonne résolution, il faut savoir alors que sa portée sera faible, ce qui n'est pas un inconvénient en milieu fluvial aux dimensions limitées.

Le sondeur multifaisceau est actuellement trop récent sur le marché pour pouvoir porter une appréciation, mais il est fort possible que son utilisation dans des eaux très chargées entraîne des imprécisions.

Les logiciels de navigation utilisés actuellement en France sont limités en nombre. L'un d'eux fait pratiquement l'unanimité – de toute façon, ce matériel n'interfère pas avec le milieu et n'apporte pas d'imprécision.

Les logiciels de traitement de données sont ceux adaptés à la topographie et l'hydrographie et sont sans influence sur la qualité des levés.

Annexe 3.3. - Conclusions

La bathymétrie est une technique de pointe qui met en jeu des appareils en perpétuel renouvellement technique en termes de qualité et de précision des mesures.

Le levé bathymétrique de tels ouvrages est une affaire de spécialistes rompus aux techniques de l'hydrographie. L'interprétation des mesures doit être effectuée par des personnes maîtrisant l'hydraulique et la sédimentologie.

Ces auscultations ont un coût non négligeable que les services gestionnaires doivent prendre en compte.



Figure 10 : bathymétrie du pont de pierre de Bordeaux





Page laissée blanche intentionnellement



Le présent document est un fascicule d'accompagnement de l'Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (ITSEOA) de 2010.

Il annule et remplace l'ancien fascicule 10 de mars 1981 de l'ITSEOA.

Il traite plus particulièrement de la surveillance, de l'évaluation, de l'entretien et de la réparation des fondations des ponts en site aquatique.

Il constitue un guide destiné principalement aux personnels techniques des organismes chargés de la surveillance (visiteurs et inspecteurs d'ouvrage) et aux gestionnaires du réseau routier dans les collectivités territoriales, les services de l'État et les autres organismes.

Au 1^{er} janvier 2014, les 8 CETE, le Certu, le Cetmef et le Sétra fusionnent pour donner naissance au Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement).



Document disponible au bureau de vente du Sétra

110 rue de Paris - 77171 Sourdon - France
Téléphone : 33 (0)1 60 52 31 31 - Télécopie : 33 (0)1 60 52 31 69
Référence : **1308** - Prix de vente : **20 €**

*Couverture, crédit photos : CETE Méditerranée et Sétra ;
Conception graphique - mise en page : SCEI - 50/54 bd du Colonel Fabien - 94200 Ivry-sur-Seine
Impression : Jouve - 1 rue du docteur Sauvé - 53100 Mayenne
L'autorisation du Sétra est indispensable pour la reproduction, même partielle, de ce document
© 2013 - Dépôt légal : 4^e trimestre 2013 - ISBN : 978-2-11-129885-9*

Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagement

110 rue de Paris
77171 SOURDON
France
tél. : 33 (0)1 60 52 31 31
fax : 33 (0)1 60 52 31 69

Le Sétra appartient
au Réseau Scientifique
et Technique du MEDDE

