E4-2

RECONNAISSANCE DES APPUIS EN MAÇONNERIE ET LEURS FONDATIONS

CONTEXTE

La présente procédure a pour objectif de définir les modalités de reconnaissance des appuis en maçonnerie et de leurs fondations (géométrie, nature et qualité des matériaux, nature des fondations et des sols de fondations, etc.). Cette procédure complète celle consacrée à la « Reconnaissance des caractéristiques géométriques et mécaniques d'une voûte en maçonnerie » (Procédure E4-1). La maîtrise de la présente procédure nécessite la connaissance des documents cités en références [1, 2] et [3].

La reconnaissance des appuis et fondations engage des investigations lourdes, délicates à mener et souvent destructives. L'opportunité de ces investigations et le programme correspondant doivent être évalués avec soin. Ces investigations peuvent être envisagées dans les cas suivants :

– étude de diagnostic, suite à l'apparition de désordres ou symptômes pouvant indiquer des problèmes de stabilité d'appuis : fissures transversales des voûtes en maçonnerie, ouverture de joints, fissuration longitudinale des voûtes, fissuration verticale des corps de pile, altération de la base des appuis, etc. ;
– étude de travaux de renforcement des fondations ou d'amélioration de la stabilité de l'ouvrage suite à un diagnostic ou bien dans le cas de modifications importantes des actions transmises aux fondations d'un ouvrage ou de leur mode de fonctionnement (élargissement d'ouvrage par exemple) ;
– étude de portance d'un ouvrage (passage d'un convoi exceptionnel par exemple), etc.

Ces reconnaissances ont alors pour objet :

– de déterminer le mode de fondation en l'absence de document d'archives ;
– de rechercher des désordres de toutes natures (cavités sous les appuis, circulations d'eau sous les appuis, hétérogénéité des maçonneries, etc.) en liaison avec les désordres relevés sur les parties aériennes et subaquatiques ;
– de déterminer l'état interne de la maçonnerie des appuis et des fondations ainsi que de l'interface appui/fondation ;
– de permettre d'évaluer la portance des appuis et de procéder à une analyse par le calcul de la stabilité des fondations de l'ouvrage.

Fig. 1. — Fondation sur pieux du début du XVIII[e] siècle (d'après Gautier).

I. Plan du pilotis avec indication de l'ordre de battage.

II. Elévation de la fondation.

III. Détail du rideau d'enceinte.

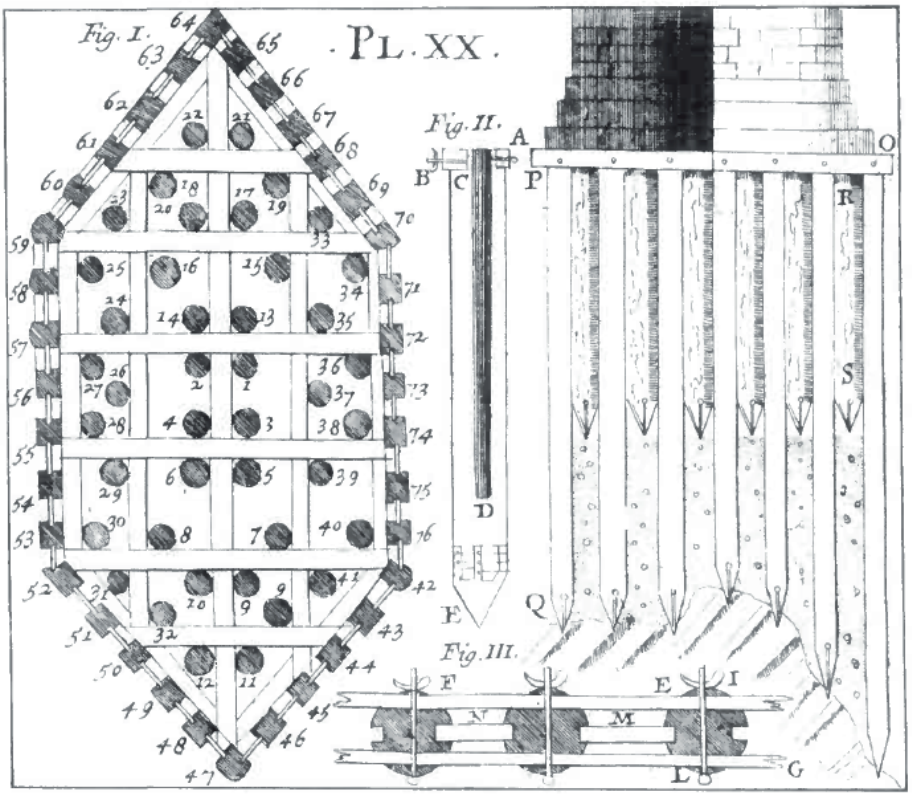


Figure 1 : Exemple de fondation d'ouvrage en maçonnerie (extrait de [3]).

MÉTHODOLOGIE DU DIAGNOSTIC

ÉTAPE 1
ANALYSE DU DOSSIER DE L'OUVRAGE

Objectif : détermination des caractéristiques des appuis et des fondations, identification des données manquantes, et reconstitution d'hypothèses

On cherchera à accéder aux documents et informations suivants :

– date ou période de construction de l'ouvrage ;
– plans des appuis et fondations de l'ouvrage (géométrie, matériaux constitutifs, modes de fondation, niveaux, nature des sols supports, etc.) ;
– modes d'exécution des fondations, éventuels incidents ;
– données géotechniques, nature et caractéristiques des terrains sols sous-jacents *(à défaut de données précises, se reporter aux cartes géologiques, à des études réalisées à proximité de l'ouvrage)*, niveau de la nappe phréatique, etc. ;
– données géotechniques, nature et caractéristiques des sols situés à l'arrière des culées ;
– nature des liaisons entre tablier / appuis et entre appuis / fondations, types d'appareils d'appui, etc. ;
– évaluation des descentes de charges et des efforts transmis aux appuis et à leurs fondations ;
– constats réalisés lors des visites et inspections détaillées des parties hors d'eau de l'ouvrage : défauts apparents sur les appuis, défauts apparents sur la structure et les équipements pouvant traduire un problème de fondation, etc. ;
– résultats de l'éventuelle surveillance renforcée de l'ouvrage (nivellement, inclinométrie, etc.) ;
– travaux d'entretien ou de réparation réalisés sur les appuis ou leurs fondations ;
– travaux réalisés dans la zone d'influence des fondations des appuis.

Cas d'appuis d'ouvrage en site aquatique :

– plans des éléments de protection des fondations (radier, enrochements, parafouilles, crèche, enceintes de palplanches, ceinturage béton, etc.) ;
– hydrologie du cours d'eau (crues, périodes de retour, hauteurs d'eau, vitesses du courant, etc.) ;
– données hydrauliques, études spécifiques (estimation de la profondeur d'affouillement général, nature des matériaux constituant le lit de la voie d'eau franchie, granulométrie, etc) ;
– constats réalisés lors des inspections subaquatiques des appuis de l'ouvrage (désordres observés sur les massifs de fondation et éléments de protection des fondations, affouillements, etc.) ;
– suivi d'évolution des fonds et de la position en plan par rapport aux appuis du cours d'eau franchi : relevés bathymétriques (variations du lit, fosses d'érosion, nature des fonds, etc.) ;
– travaux ayant pu modifier l'évolution des fonds : extraction de matériaux dans le lit de la voie d'eau franchie (notamment à l'aval), présence de seuil à proximité de l'ouvrage (notamment à l'amont) ou autres.

> Compte tenu du peu de fiabilité d'archives parfois très anciennes, il convient de toujours procéder à une analyse critique des données recueillies. Il faut également signaler le cas d'ouvrages reconstruits plusieurs fois (éventuellement sur plusieurs siècles avec conservation de fondations anciennes) pour lesquels les archives sont particulièrement douteuses.

ÉTAPE 2
INSPECTION DÉTAILLÉE DES PARTIES HORS D'EAU, INSPECTION SUBAQUATIQUE DES APPUIS DE L'OUVRAGE

L'inspection détaillée doit être préparée et réalisée conjointement avec une équipe de spécialistes possédant des compétences en mécanique des sols et, le cas échéant, avec l'équipe spécialisée en inspection subaquatique. On pourra profiter de l'inspection détaillée pour vérifier l'exactitude des informations recueillies grâce au dossier de l'ouvrage et pour essayer de collecter les informations manquantes les plus élémentaires (notamment géométriques).

Il est indispensable de relever les défauts apparents sur la structure et ses équipements pouvant traduire un problème de fondation (par exemple fissuration ou ouverture de joints des voûtes en maçonnerie, défaut de profil en long des parapets, défaut d'horizontalité des lignes de joints de la maçonnerie des tympans et appuis, etc.).

En cas de découvertes de désordre grave pouvant compromettre la stabilité de l'ouvrage, et en fonction de leur ancienneté et de leur évolution estimée, il pourra être nécessaire de préconiser des mesures d'urgence (réduction ou arrêt de l'exploitation, confortement d'urgence, etc.) et/ou de surveillance renforcée ou de haute surveillance (fissurométrie, nivellement, mesures de rotation ou de verticalité, etc.). À titre indicatif, les désordres les plus graves liés à des problèmes de fondation peuvent être :

– un tassement d'appui ;
– un basculement d'appui ;
– une cavité importante sous un appui ;
– une fracturation du corps d'appui ;
– une fissuration de la douelle ou du bandeau de la voûte avec ouverture de joints ou fracturation de pierres, etc.

ÉTAPE 2 INSPECTION DÉTAILLÉE DES PARTIES HORS D'EAU, INSPECTION SUBAQUATIQUE DES APPUIS DE L'OUVRAGE	**Cas d'appuis d'ouvrage en site aquatique :** L'inspection détaillée subaquatique doit être réalisée si possible **en période de très basses eaux** pour observer la base des appuis dans les meilleures conditions. Cependant, des événements météorologiques ou autres (crues, chocs de bateau ou de corps flottant, etc.) peuvent également motiver une reconnaissance des appuis et fondations d'un ouvrage à tout moment. Outre l'inspection de l'ouvrage proprement dite, il peut être utile de constater l'état de l'environnement de l'ouvrage. Dans ce cadre, l'inspection est complétée par les observations suivantes : – cours d'eau : position du lit par rapport aux appuis, topographie et nature des fonds, amoncellement de corps flottants, présence d'affouillements et de fosses d'érosion, etc. ; – berges : détection des signes d'attaques et de détérioration des berges dans la zone d'influence de l'ouvrage ; – massifs d'enrochements et perrés : entraînement et/ou désorganisation des blocs, affaissement des talus ou des quarts de cône ; – rideaux de protection : altération, dislocation ou ruptures, disparition des matériaux de remplissage – base des piles et des culées : disjointoiements, dislocation ou fracturation des moellons, abrasion, etc. ; – interface sols/fondation : présence de cavités ou d'indices révélateurs tels que les altérations des protections, ceintures, margelles accompagnées ou non de circulation d'eau avec résurgences ou tourbillons. Il est indispensable que le plongeur dispose d'outils pour dégager les terrains meubles. Pour la suite du diagnostic, l'inspection détaillée et l'inspection subaquatique doivent permettre de mieux définir la nature et l'implantation des investigations ultérieures.
ÉTAPE 3 AUSCULTATION	**3.1 Évaluation de l'évolution des fonds** À l'issue de ce **pré-diagnostic** réalisé en fin d'étape 2 et en fonction des informations « essentielles » non disponibles dans les archives et de celles obtenues à l'issue de l'inspection *in situ*, il pourra être nécessaire d'envisager des investigations complémentaires afin d'effectuer un **suivi de l'évolution des fonds du cours d'eau** pour évaluer : – l'évolution probable de la zone d'influence ; – les conséquences de cette évolution sur la stabilité des fondations. Pour cela, on se base essentiellement sur les techniques d'auscultation **bathymétrique** : fiche C1-6 : Reconnaissance des fonds aquatiques et fiche C1-7 : Cartographie bathymétrique **3.2 Reconnaissance des types et des sols de fondation, recherche de cavités, circulations d'eau sous les appuis de l'ouvrage** Cette étape a pour objet de déterminer le type de fondation avec, pour les fondations superficielles, le niveau et la nature du sol support et, pour les fondations profondes, la disposition, le diamètre et la longueur des pieux, et si possible leur nombre, ainsi que l'état de conservation des têtes de pieux en bois et du platelage. Il convient de garder à l'esprit que pour un même ouvrage, le mode de fondation peut varier d'un appui à l'autre (niveau et pendage du substratum, faille, type, géométrie, etc.). Elle vise également à reconnaître la présence éventuelle de cavités ou circulations d'eau sous les appuis ou de fosses à proximité pouvant entraîner des remous puis des affouillements. Pour les travaux réalisés en milieu aquatique, il convient de prendre en compte les règles administratives liées aux enjeux environnementaux découlant de la loi sur l'eau, et qui sont de la responsabilité du maître de l'ouvrage. **3.2.1 Mise à sec (avec ou sans réalisation de fouille)** Si une étude de faisabilité montre que la mise à sec de l'appui est possible, on commence par effectuer cette opération en période de basses eaux. À l'issue de cette opération, il est alors possible de réaliser des relevés géométriques, d'observer un éventuel platelage en bois ou d'éventuels pieux en bois (état, diamètres et espacements à relever), d'observer les sols sous-jacents et la présence de vides ou de cavités, etc. Si cette opération n'est pas suffisante pour reconnaître la nature et l'état des fondations (en raison de la présence d'enrochements, de sols meubles déposés pendant la décrue par exemple, de la grande profondeur des semelles) ou si elle n'est pas praticable, des investigations particulières (fouilles locales : fiche C6-1 : Ouverture de fouilles et/ou forages et/ou puits blindés) doivent être envisagées (cf. étapes 3.2.2 et 3.2.3). Les méthodes de reconnaissance ne doivent pas avoir un caractère destructif important, ni porter atteinte à la stabilité de l'ouvrage. L'appui d'un géotechnicien est indispensable pour confirmer les constatations.

ÉTAPE 3
AUSCULTATION

3.2.2 Dégarnissage local de la base de l'appui :

Cette opération, qui peut se réaliser en présence d'eau moyennant le recours à des plongeurs ou à l'utilisation de moyens spécifiques (pontons flottants, pelles à godet, lances à eau, etc.), peut mettre en péril la stabilité de l'ouvrage et nécessite une étude préalable. En tout état de cause, les dégarnissages seront conduits par plots de dimensions réduites par rapport aux dimensions des appuis à expertiser.

Le dégarnissage local permet de faire des observations semblables à celles opérées lors d'une mise à sec, mais de manière plus ponctuelle. Les zones dégarnies, de largeurs limitées, doivent être rapidement et très soigneusement rebouchées (procédure à établir avant le dégarnissage).

Ces investigations doivent être réalisées sous surveillance de l'ouvrage et ne sont à confier qu'à des entreprises expérimentées.

3.3 Exécution de sondages ou forages visant à reconnaître la nature des fondations et sols de fondations

Des sondages destructifs exécutés depuis la base des appuis voire la chaussée de l'ouvrage (*), permettent de définir la nature et la profondeur des massifs de fondation, de mettre en évidence la présence d'un platelage bois, voire d'éventuels pieux en bois et de déterminer les hypothèses géotechniques indispensables à un recalcul. Ces sondages peuvent être exécutés avec une inclinaison par rapport à la verticale. Ces sondages s'appuient sur les fiches d'auscultation C1-4 sondage destructif d'un ouvrage en maçonnerie et A3-1 Sondage carotté d'un ouvrage en maçonnerie.

(*) Pour les appuis en équilibre précaire, il est recommandé de réaliser les investigations depuis l'extérieur de l'appui chaque fois que possible, sous une surveillance attentive de l'ouvrage [3].

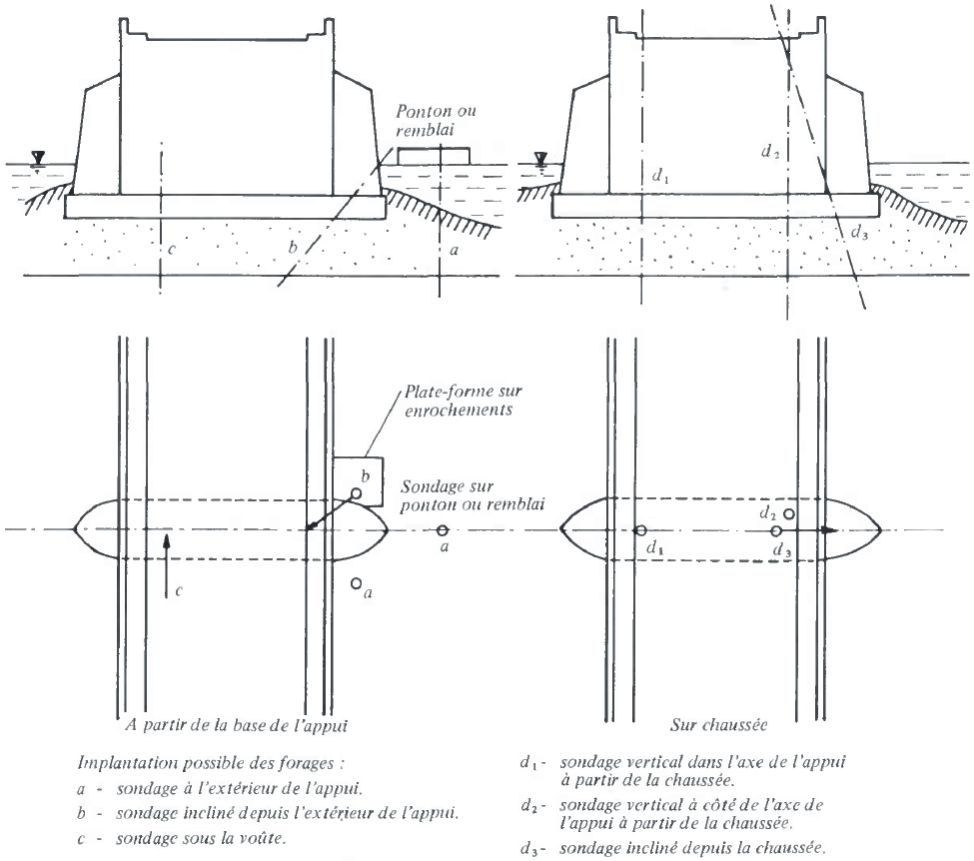


Figure 2 : Exemple d'implantation de forages (extrait de [3]).

Selon leur mode de réalisation, des sondages avec prélèvement permettent :

– si réalisés à la tarière, de prélever des échantillons remaniés pour examen et mesures de paramètre physiques ;
– si réalisés au carottier, de prélever des échantillons intacts et d'effectuer des essais mécaniques en laboratoire (essais de cisaillement, essais oedométriques etc.).

Les forages permettent par ailleurs de réaliser :

– des essais mécaniques en place (pressiométriques ou pénétrométriques) ;
– des essais de perméabilité, en s'inspirant notamment d'essais de perméabilité de pompage ou d'injection en forage de type Lefranc [4] ou Lugeon [5].

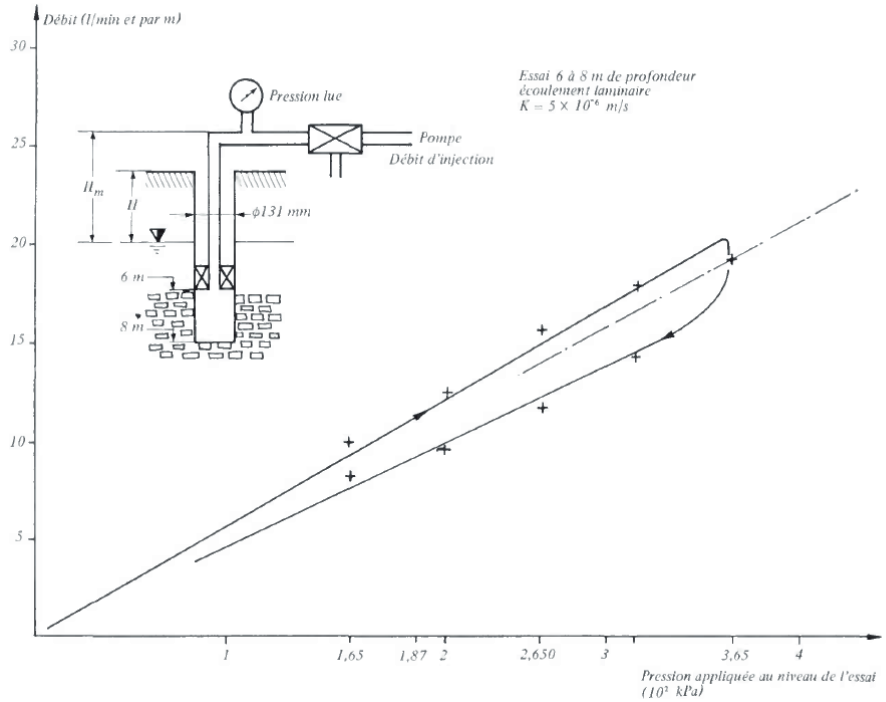


Figure 3 : Résultat d'un essai Lugeon dans la maçonnerie d'un appui (Extrait de [3]).

Lorsqu'il n'a pas été possible de reconnaître directement le mode de fondation de l'appui, la reconnaissance de la nature des terrains sous-jacents et la détermination de leurs caractéristiques peuvent permettre de « supposer » le mode de fondation de l'appui (fondation profonde sur pieux, fondation superficielle ou semi-superficielle). Cependant, il reste impossible de faire des calculs de stabilité précis.

ÉTAPE 3
AUSCULTATION

Les circulations d'eau sous les appuis qui peuvent indiquer la présence de cavités ou de phénomènes d'érosion en cours conduisant à la dégradation des propriétés mécaniques des sols en place sous la fondation peuvent être décelées au moyen de traceurs radio-actifs injectés à une cote donnée à partir d'un forage équipé d'un tube crépiné, ou de colorants (fluorescéine, etc.) injectés depuis un forage ou une cavité.

3.4 Exécution de sondages visant à reconnaître l'état des appuis et des fondations

La reconnaissance de l'état des appuis et des fondations n'est pas toujours pertinente ou utile compte tenu de l'extrême hétérogénéité des maçonneries, surtout en grande masse ; cette reconnaissance est en outre délicate à conduire et nécessite des forages destructifs. Néanmoins, dans certains cas, il peut être indispensable de relever la présence de vides, de déterminer la densité des remplissages, de vérifier l'intégrité des massifs ou bien de préciser la possibilité de forages en vue de réparations ultérieures par micro-pieux, tirants, etc.

Bien entendu, la pertinence de l'étape 3.4 et son programme résultent des conclusions des étapes antérieures.

Les forages ou sondages carottés en grand diamètre (généralement 116 mm minimum) sont les mieux adaptés à la reconnaissance des appuis et massifs de fondation, mais d'autres techniques sont envisageables (forages destructifs) en fonction de l'état de l'ouvrage et de la nature des investigations envisagées. Il est possible d'associer les deux techniques de sondage pour réduire les coûts.

La pression de l'eau de forage doit être réduite pour éviter les entraînements de fines et les dégradations internes des maçonneries. Les paramètres de forage (couple, pression appliquée sur l'outil, vitesse d'avancement) doivent être enregistrés. Tout incident ou anomalie, par exemple blocage de l'outil, perte de fluide en cours de forage, chute d'outil, etc. doit être relevé.

Les forages destructifs sont réalisés de préférence en roto-percussion (méthode du « marteau de fond de trou » par exemple).

S'il est nécessaire et possible d'apprécier l'intégrité de l'appui, et de son remplissage interne, les sondages carottés avec prélèvements d'échantillons intacts sont les mieux adaptés ; on peut envisager :

– des sondages verticaux depuis le tablier, si le profil en travers de l'ouvrage et les contraintes d'exploitation de la voie portée le permettent ;
– des sondages inclinés depuis la base de l'appui ;
– des sondages horizontaux qui permettent de préciser par exemple la constitution du noyau d'une pile, le fruit arrière de la maçonnerie d'une culée, etc.

ÉTAPE 3 AUSCULTATION	Pour la reconnaissance des culées (épaisseur de maçonnerie variable, fruit arrière, redans), il peut être utile et économique d'associer à un ou plusieurs sondages carottés (verticaux ou inclinés), des sondages destructifs, le plus souvent verticaux. Divers essais de laboratoires peuvent être réalisés sur les échantillons de maçonnerie : – essais de compression simple ; – essais de cisaillement de joints ouverts ou fermés ; – mesures de densité apparente ; – etc. Des informations sur la fracturation ou la disparition du liant de la maçonnerie peuvent être obtenues au moyen d'essais de perméabilité de type Lugeon effectués dans les forages. Ces essais sont à proscrire au voisinage des parements de la maçonnerie et dans le cas de pièces minces. Un examen visuel des parois des forages peut être effectué à l'aide d'une caméra vidéo. S'il n'est pas nécessaire d'apprécier l'intégrité de l'appui (maçonnerie saine connue) et/ou pour réduire le coût des investigations, on pourra réaliser des forages destructifs arrêtés au dessus de la base de l'appui et poursuivis en sondages carottés pour reconnaître un éventuel massif de fondation en béton de chaux, l'interface appui/fondation (présence de platelage, état de conservation du bois, présence de vides, etc.), puis les sols de fondation. La reconnaissance peut être complétée par des diagraphies de densité à l'aide d'une sonde gamma-gamma, ou de radioactivité naturelle RAN, pour préciser les variations de compacité et de natures des matériaux (bétons, mortiers, sols, etc.) ; la sonde neutron-neutron permet de mesurer la teneur en eau des matériaux (voir fiche C6-13 : Diagraphie nucléaire à radioactivité provoquée en forage). Elle peut être aussi complétée si besoin par des auscultations radar en forage (voir fiche C6-12 Technique radar en forage). **3.5 Interface avec le calcul** L'ultime étape est l'analyse de la stabilité des fondations de l'ouvrage à l'aide d'un calcul de stabilité et de portance. Les hypothèses du recalcul devront être justifiées, notamment sur la base d'une interprétation des résultats des sondages et essais. Le programme Voute du Cerema peut être utilisé pour déterminer les torseurs d'efforts à la base des fondations ; des calculs en fourchette ou des études de sensibilité de paramètres peuvent être proposés s'il subsiste des incertitudes notables sur la géométrie des appuis et/ou les dimensions des fondations.

RÉFÉRENTIEL

[1] « Les ponts en maçonnerie – Constitution et stabilité - tome 1 « Historique et constitution », Ministère des Transports - Direction des Routes – Sétra, juin 1982.

[2] Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (19 octobre 1979) :

fascicule 10 de la deuxième partie « Fondations en site aquatique » (mars 1981)
fascicule 11 de la deuxième partie « Fondations en site terrestre » (décembre 1991)
fascicule 12 de la deuxième partie « Appuis » (mars 1986)
fascicule 30 de la deuxième partie « Ponts et viaducs en maçonnerie » (juin 1981)

[3] « Fondations de ponts en site aquatique en état précaire » Guide LCPC / Sétra pour la surveillance et le confortement, Ministère des Transports, décembre 1980.

[4] NF P94-132 : Sols : reconnaissance et essais – essai d'eau Lefranc, octobre 2000.

[5] NF EN ISO 22882-3 - Partie 3 : Reconnaissance et essais géotechniques, essais géohydrauliques, essais de pression d'eau dans les roches, janvier 2014.

Recueil de méthodes d'auscultation des matériaux et structures d'ouvrages d'art :

A3-1 : Sondage carotté d'un ouvrage en maçonnerie
C1-4 : Sondage destructif d'un ouvrage en maçonnerie
C1-6 : Reconnaissance des fonds aquatiques
C1-7 : Cartographie bathymétrique
C6-1 : Ouverture de fouilles
C6-12 : Technique radar en forage
C6-13 : Diagraphie nucléaire à radioactivité provoquée en forage

Recueil des procédures de diagnostic :

E4-1 : Reconnaissance des caractéristiques géométriques et mécaniques d'une voûte

LOGIGRAMME

Un logigramme ou un schéma décisionnel résume la méthodologie du diagnostic en visualisant de façon séquentielle et logique les actions à mener et les décisions à prendre.

E4-2 : RECONNAISSANCE DES APPUIS EN MAÇONNERIE ET LEURS FONDATIONS

Analyse du dossier de l'ouvrage — Étape 1

Objectifs : Détermination des caractéristiques des appuis et des fondations, identification des données manquantes, et reconstitution d'hypothèses

– date ou période de construction
– plans des appuis et fondations de l'ouvrage (géométrie, matériaux constitutifs, modes de fondation, niveaux, nature des sols supports, etc.)
– données géotechniques
– travaux réalisés
– surveillance et entretien

Inspection détaillée — Étape 2

Objectif : Inspection détaillée des parties hors d'eau, inspection subaquatique des appuis de l'ouvrage.

Recherche des désordres, et notamment les plus graves :
– tassement et/ou basculement d'appui ;
– cavité importante sous un appui, affouillement :
– fracturation du corps d'appui ;
– fissuration de la douelle ou du bandeau de la voûte avec ouverture de joints ou fracturation de pierres, etc.

En cas d'appuis en site aquatique, mener une inspection détaillée subaquatique, de préférence en période de très basses eaux, et examen de l'état de l'environnement de l'ouvrage.

Étape 3

Étape 3.1 Évaluation de l'évolution des fonds par techniques bathymétriques
– évolution probable de la zone d'influence
– conséquences de cette évolution sur la stabilité des fondations

Étape 3.2 Reconnaissance des types et des sols de fondation, recherche de cavités, circulations d'eau sous les appuis de l'ouvrage

Possibilité de mise à sec lors des basses eaux?
– OUI → Observations possibles ?
  – OUI → Observations de platelage, pieux en bois, des sols, de cavités, etc. Réalisation de relevés géométriques
  – NON → **Dégarnissage local de la base de l'appui**
    – Observations de platelage, pieux en bois, sols, cavités, etc.
    – Réalisation de relevés géométriques
– NON → **Dégarnissage local de la base de l'appui**
  – Observations de platelage, pieux en bois, sols, cavités, etc.
  – Réalisation de relevés géométriques

Étape 3.3 Exécution de sondages ou forages pour reconnaître la nature des fondations et sols de fondations
– sondages avec prélèvement d'échantillons remaniés ou intacts
– forages avec essais mécaniques en place (pressiométriques ou pénétrométriques)
– forages avec essais de perméabilité (type Lefranc ou Lugeon)

Étape 3.4 Exécution de sondages pour reconnaître l'état des appuis et des fondations (si jugé pertinent)
– forages ou sondages carottés en grand diamètre (généralement 116 mm minimum), verticaux ou inclinés, avec ou sans prélèvements d'échantillons intacts

et/ou

– forages destructifs
– essais en laboratoires sur les échantillons intacts
– examen vidéo des parois des forages
– diagraphies de densité à l'aide d'une sonde gamma-gamma, ou de radioactivité naturelle RAN en forage
– auscultation radar en forage

Étape 3.5 Interface avec la calcul : Analyse de la stabilité des fondations de l'ouvrage à l'aide d'un calcul de stabilité et de portance sur la base des résultats de l'auscultation