Université Gustave Eiffel Cerema

D3-2

DÉTECTION DE CAVITÉS DANS LA MAÇONNERIE

CONTEXTE

Les structures concernées par la présente procédure de diagnostic sont principalement les ponts et les murs de soutènement en maçonnerie. Les structures peuvent être constituées de maçonnerie jointoyée de pierres ou de briques, ainsi que, pour les murs de soutènement, d'une maçonnerie de pierres sèches. Cette procédure est également applicable aux autres ouvrages en maçonnerie tels que tunnels, aqueducs, murs de quai, barrages et bajoyers d'écluses, etc.

Ces ouvrages peuvent être décomposés en deux parties : une partie structurelle, composée des maçonneries de pierres ou de briques proprement dites, et une partie de remplissage pour les ponts ou de remblai pour les murs de soutènement (Figures 1 et 2).

La présente procédure porte sur la détection et la caractérisation d'anomalies internes aux maçonneries, internes aux remplissages (ou aux remblais) ou situées à l'interface entre les parties structurelles et les remplissages (ou remblais), voire, pour les murs de soutènement, à l'interface avec le terrain naturel. Les anomalies recherchées se définissent par des cavités, des évidements et des zones de décohésion avancée avec pertes importantes de matériau (correspondant au stade avancé d'une création de vide).

La présente procédure ne porte pas sur la détection de défauts de subsurface de type délaminage qui concernent la dégradation superficielle des pierres ou briques de parement des structures en maçonnerie (pierres ou briques gélives par exemple) ou résultant d'une interface dégradée entre une protection, réparation antérieure et la maçonnerie sous-jacente.

À la suite d'une inspection détaillée d'un ouvrage en maçonnerie, la présence de désordres spécifiques ou de doutes relevés par l'équipe d'inspection peut conduire à établir un programme d'auscultations et de diagnostic ciblé sur les anomalies internes faisant l'objet de cette procédure. Ces dernières peuvent prendre plusieurs formes géométriques, avoir des dimensions et profondeurs très variables et avoir différentes origines. Il convient donc d'établir un programme d'intervention détaillé, incluant des techniques d'auscultation non destructives, généralement complétées par des sondages destructifs, pour établir un diagnostic fiable. [1, 2].

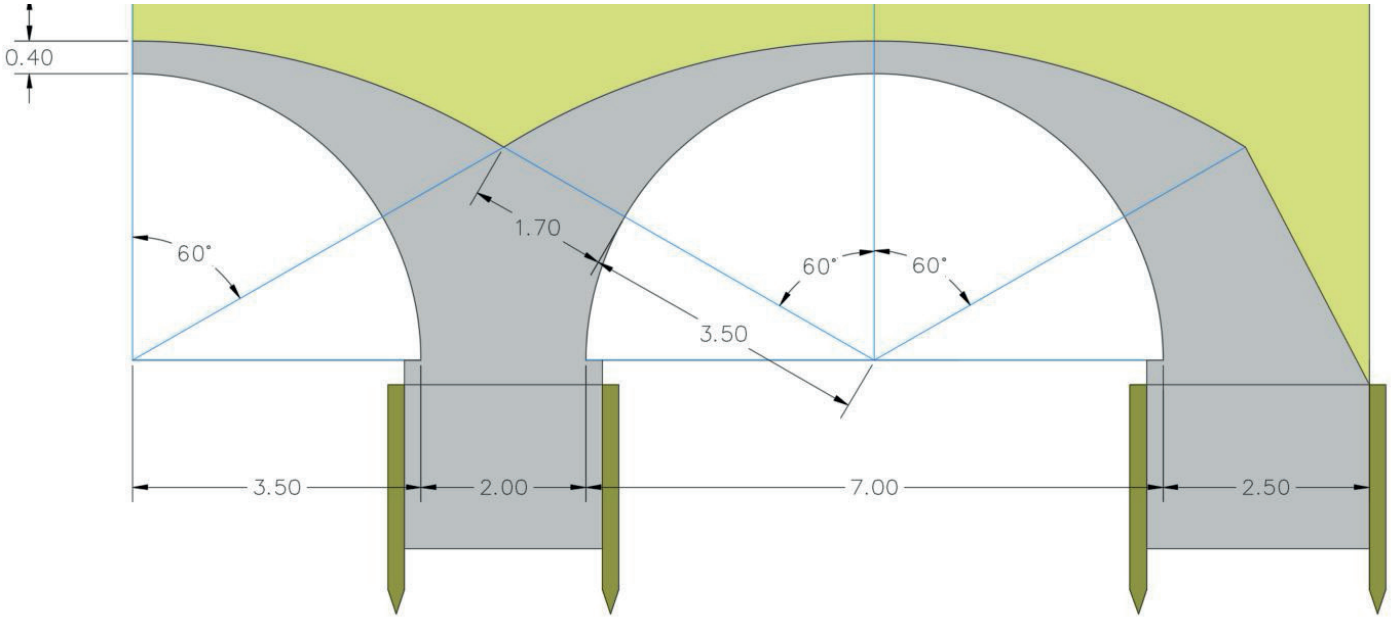


Figure 1 : Exemple de géométrie d'une voûte

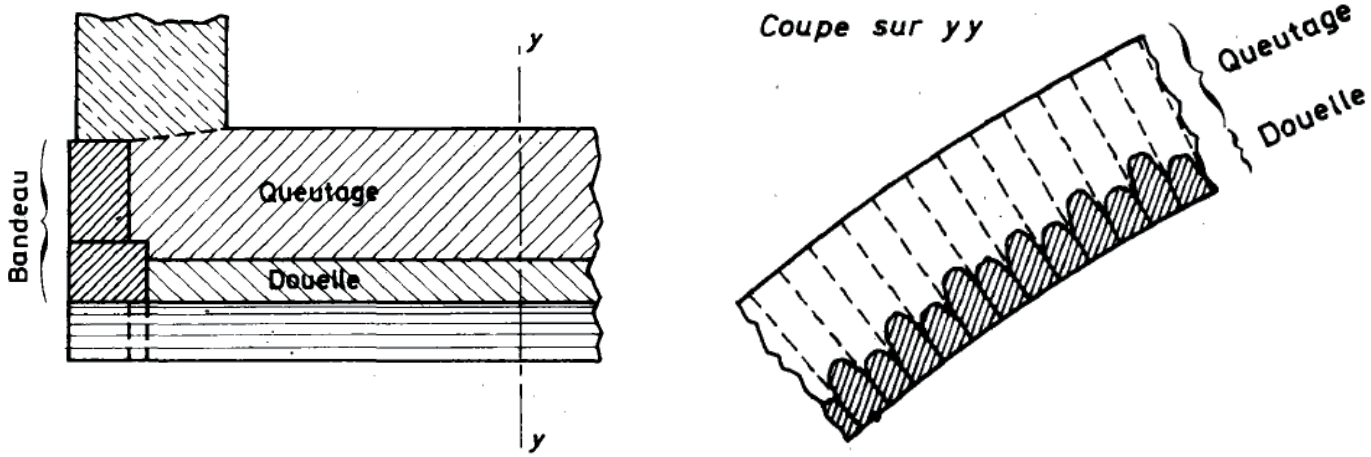


Figure 2 : Exemple de constitution du corps d'une voûte

Un bon niveau d'expertise sur les ouvrages en maçonnerie du chargé d'études responsable du programme d'auscultations est requis pour permettre l'identification de la pathologie d'origine et choisir les techniques à déployer pour répondre à la problématique.

Outre les sondages sonores au marteau (pratiqués dès l'inspection détaillée), les matériels et les techniques non destructives disponibles pour la détection et la quantification de ces types d'anomalies sont :

- Les radars, par l'émission d'impulsions électromagnétiques qui se réfléchissent partiellement sur des interfaces ou des hétérogénéités présentant des contrastes électromagnétiques ; ils permettent un repérage bidirectionnel des éventuels défauts géométriques et anomalies dans l'épaisseur du corps de voûte ou du remplissage (ou du remblai), avec représentation graphique directe en plan X (sens de déplacement de l'antenne sur le parement ausculté) / Z (équivalent profondeur) pour un Y donné (axe orthogonal à l'axe X sur le parement ausculté). L'auscultation peut concerner une profondeur de 20 à 60 cm, avec des antennes présentant des fréquences dans la gamme du GHz, mais la profondeur d'auscultation peut être augmentée avec des antennes de la gamme de quelques centaines de MHz, au détriment de la résolution en profondeur[1] (Fiches C1-1, C1-2, C1-3).
- Les méthodes reposant sur des sondages mécaniques (impact écho, scléromètre) ; elles exploitent un choc sur la surface pour remonter à des informations permettant la caractérisation mécanique du matériau de surface ou pour détecter des défauts internes (fissures, décollement, vides) (Fiches B1-1, B1-4). Ces techniques sont adaptées à la détection de défauts de subsurface ; elles sont ici mentionnées, bien qu'elles sortent du cadre de cette procédure.
- Les méthodes ultrasonores (auscultation sonique par transparence, tomographie ultrasonore multi-capteurs ou Ultra Pulse Echo - UPE) ; elles permettent d'associer des vitesses et amplitudes de transmission de l'onde ultrasonore à une résistance mécanique ou de détecter, et pour certaines de localiser, des fissures ou des vides. Certaines de ces méthodes peuvent atteindre des profondeurs métriques (Fiches B1-2, B1-3, B1-4, B1-11).

  Remarque : Les deux dernières familles de techniques mentionnées ci-dessus permettent de détecter les premières interfaces matériau/vide, mais sans information sur les dimensions de ce vide, qui peut être millimétrique comme pluri-décimétrique. En effet les ondes concernées ne se propagent pas dans l'air.

En dehors de ces techniques non destructives, il est le plus souvent nécessaire de recourir à des auscultations destructives appliquées localement, pour valider ces premières avec une atteinte minimale à l'intégrité fonctionnelle de l'élément. Il s'agit de :

- perçages ;
- carottages (Fiche A3-1) ;
- sondages destructifs (Fiche C1-4).

Dans tous les cas, ces méthodes devront être le moins intrusives possible en tenant compte du niveau d'exigence demandé, du budget disponible pour les auscultations et des conséquences des sondages sur la structure.

Quelques éléments de comparaison des différentes techniques non destructives précédemment évoquées sont précisés dans le tableau suivant :

Matériel / Technique [réf. Cahier Interactif]	Profondeur de détection maximale indicative (mm)	Domaine d'emploi	Rendement
Impact écho [Fiche B1-4] / Scléromètre [Fiche B1-1]	Subsurface du parement	– Détection de plan de délaminage – Détection interface protection ou réparation / maçonnerie	Faible

1 Les résolutions en profondeur associées aux différentes antennes radar sont les distances minimales pour pouvoir détecter deux « interfaces » parallèles sans signaux radar qui s'entremêlent.

Radar (antenne haute fréquence GHz) [Fiche C1-2]	2,6 GHz : 300 – 350 mm 1,5 GHz : 350 – 500 mm	– Détection de plan de délaminage pluri-millimétrique – **Détection de cavité** – Détection d'interfaces (exemple : protection ou réparation / maçonnerie) ou d'anomalies internes – Détection et caractérisation de l'interface opposée au parement (pour les pièces peu épaisses)	Élevé
Radar (antenne MHz) [Fiche C1-2]	900 MHz : 900 mm 400 MHz : 1500 mm	– **Détection de cavité** – Détection d'interfaces (exemple : réparation / maçonnerie) ou d'anomalies internes – Détection et caractérisation de l'interface opposée au parement	Élevé
Sonique transparence qui implique un accès à deux faces parallèles [Fiche B1-2]	Couramment 1500 mm, (voire quelques mètres)	– Détection de décollement – **Détection de cavité (saturée en eau) ***	Faible
Tomographie sismique qui implique un accès à au moins deux faces [Fiche B1-3]	Couramment 1500 mm entre deux faces parallèles	– Détection de décollement – **Détection de cavité (saturée en eau) ***	Très faible
UPE et tomographie ultra-sonore [Fiche B1-11]	1000 – 1200 mm	– Détection de décollement – Détection de cavité (saturée en eau) * – Détection de l'interface opposée au parement	Faible

***** Dans le cas où la cavité n'est pas saturée en eau, il n'est pas possible de différencier la détection d'un décollement de celle d'une cavité.

Remarque : Les techniques employées ne doivent être utilisées que dans les limites de leur domaine d'emploi et en particulier vis-à-vis de l'épaisseur du matériau à ausculter (voir fiches matériel correspondantes et fiches d'auscultation du cahier interactif). Ces techniques sont à mettre en œuvre par un personnel qualifié ayant une parfaite connaissance de la technique utilisée et des pathologies et anomalies pouvant affecter une structure en maçonnerie.

MÉTHODOLOGIE DU DIAGNOSTIC

ÉTAPE 1 ANALYSE DU DOSSIER DE L'OUVRAGE

Dans l'analyse du dossier d'ouvrage, les points – a priori – les plus intéressants sont :

- Les plans de l'ouvrage. Parmi les données difficilement accessibles autrement que par les plans, on peut citer pour les ponts l'épaisseur du corps de voûte en clef et au niveau des reins.

  Note : l'épaisseur variable du corps de voûte peut être très différente de celle des bandeaux.
- Les rapports, procès-verbaux des différentes opérations de surveillance, telles les inspections détaillées périodiques (IDP) qui permettent un suivi de l'évolution du comportement global de l'ouvrage (date du premier constat d'un bombement par exemple).
- Les éventuelles données du dimensionnement initial de la maçonnerie, voire notes de recalcul, qui sont également une source d'informations intéressantes.
- Le suivi de la vie de l'ouvrage avec les opérations d'entretien spécialisé, les travaux de réparation ou de renforcement intervenus au cours de la vie de l'ouvrage (ainsi que leur cause).

ÉTAPE 1 ANALYSE DU DOSSIER DE L'OUVRAGE	Tout ceci se base sur l'hypothèse de l'existence de dossiers d'ouvrage bien renseignés, ce qui en pratique est rarement le cas (les derniers ouvrages en maçonnerie datent du tout début du XX^{e} siècle). Dans tous les cas de figure, la recherche par le gestionnaire du dossier d'ouvrage est une **étape cruciale (et trop souvent négligée)** pour l'identification des origines d'une (ou des) pathologie(s) dont souffre un ouvrage. Note : en l'absence de données suffisantes, la procédure E4-1 « Reconnaissance des caractéristiques géométriques et mécaniques d'une voûte en maçonnerie » donne des indications sur des sources bibliographiques consultables. Une stratégie d'auscultations non destructives, souvent complétées par des sondages destructifs, devra ensuite être élaborée pour essayer de confirmer les données disponibles et de recueillir les informations manquantes recherchées.
ÉTAPE 2 INSPECTION DÉTAILLÉE	L'inspection détaillée périodique (IDP), qui présuppose une prise de connaissance du dossier d'ouvrage lorsqu'il existe, consiste au relevé visuel exhaustif de l'ensemble des désordres constatés sur un ouvrage et à leur report sur un plan à l'échelle (cartographie des désordres). Cette inspection doit se faire « au contact du parement » (c'est à dire que l'inspecteur doit être en mesure de toucher le parement à la main), ce qui nécessite le plus souvent l'emploi de moyens d'accès spécifiques : nacelles (positive ou négative), passerelles, cordistes, etc. L'inspection s'accompagne généralement d'un moyen d'auscultation simple à mettre en œuvre, le sondage sonore au marteau qui permet de détecter – et de reporter sur un plan – les zones « sonnant le creux » sur les parements des ouvrages. Le plus souvent, les désordres détectés de cette manière, sur les parements d'origine, correspondent à des dégradations superficielles des pierres ou briques constituant la maçonnerie (par exemple en raison de pierres ou briques gélives). Remarque : en pratique, ce sondage au marteau déployé lors de l'inspection détaillée n'est pas exhaustif (avec l'expérience, l'inspecteur sait reconnaître les indices de pathologie sur les parements et quelles zones sonder pour répondre à son interrogation). L'étude de diagnostic peut s'appuyer sur une inspection détaillée si elle est suffisamment récente ; à défaut, la réalisation d'une inspection détaillée est un passage obligé pour avoir un état des lieux exhaustif localisé et quantifié des désordres apparents affectant l'ouvrage. Le relevé des désordres doit être reporté sur des plans, idéalement représentant le calepinage des pierres ou briques de la maçonnerie. Les constats visuels pouvant laisser craindre la présence de cavités internes et de ce fait nécessiter le déclenchement de l'étape 3 peuvent prendre différentes formes, à savoir (liste non exhaustive) : – Déchaussement de pierres ou briques de l'intrados d'une voûte ; – Présence de bombement de la maçonnerie, de surcroît évolutif ; – Zones sonnant le creux au marteau ; – Présence de coulures, traces de circulations d'eau avec concrétions, traces de calcite, entraînement de matériaux internes… ; – Tassement localisé, flache, symptômes de renard, fontis, entraînement de fines visible sur le corps de chaussée au droit de l'ouvrage ou à la surface du remblai retenu par un mur de soutènement…
ÉTAPE 3 AUSCULTATION	Dans le cadre de la recherche des origines des désordres observés sur un ouvrage, pour détecter d'éventuels vides internes dans la structure voire les quantifier, il faut mettre en œuvre des auscultations appropriées. En fonction des données obtenues aux étapes précédentes et d'éventuels objectifs spécifiques, le chargé d'étude établit un plan d'auscultations qui permet de définir les zones à ausculter, leur étendue et les moyens à utiliser. Note : un tel plan d'auscultations constitue une base de travail et sera certainement amené à évoluer en fonction des résultats des auscultations menées sur site. Dans la suite de la présente procédure, la méthode de contrôle non destructif radar, à grand rendement, est présentée, éventuellement associée la tomographie ultra-sonore UPE. Dans des contextes plus particuliers (enjeux forts, valeur patrimoniale importante, etc.) pouvant justifier de moyens techniques et financiers importants, les méthodes à faible rendement ou impliquant des dispositions particulières à mettre en œuvre, pourront être déployées en complément en suivant des procédures propres à chaque cas d'espèce.

ÉTAPE 3
AUSCULTATION

Le déroulement général des auscultations est décrit dans le logigramme présenté à la fin du présent document. Deux cas de figure se dégagent selon que les vides internes sont suspectés dans un matériau saturé en eau (typiquement zone de marnage) ou non saturé (matériau sec ou soumis à des alternances humidité / séchage, par exemple parties aériennes des ouvrages concernés).

> Note : il n'existe pas à ce jour à notre connaissance de matériel d'auscultation non destructive immergeables dans ce domaine d'emploi.

Cas 1 : Matériau saturé en eau (typiquement zone de marnage)

Deux sous-cas de figure se présentent : le vide interne suspecté se trouve dans la partie structurelle de l'ouvrage ou du mur en maçonnerie, ou bien dans son remplissage pour les ponts ou dans le remblai pour les murs de soutènement.

Sous-cas A : vide suspecté dans la partie structurelle en maçonnerie

On balaye la surface concernée avec le radar, le choix de l'antenne étant lié à l'épaisseur supposée de la partie de structure maçonnée. À l'arrière de la maçonnerie, le matériau de remplissage saturé en eau s'oppose à la propagation des ondes radar et limite ainsi la profondeur de la zone auscultée. Pour maximiser la profondeur de l'auscultation radar, l'emploi de plusieurs antennes de fréquences différentes est recommandé.

En cas de détection d'anomalies, il sera possible de délimiter en plan la zone de désordre et éventuellement d'estimer sa profondeur, sachant que les vitesses de propagation des ondes radar peuvent être substantiellement diminuées dans des matériaux saturés en eau.

Après analyse des résultats, des sondages destructifs sont réalisés, qui peuvent permettre l'introduction d'endoscope ou de vidéo-endoscope pour relier les observables déduits des auscultations à la réalité des défauts constatés et ainsi confirmer la présence, la localisation voire le volume des vides internes.

En cas de non détection d'anomalie, on se reporte au sous-cas B.

Sous-cas B : vide suspecté dans le remplissage ou le remblai

Dans le cas où la nature ou la composition de l'eau qui sature le matériau de remplissage ou le remblai limite les profondeurs d'investigation radar, des détections par tomographie ultra-sonore UPE (voir fiche B1-11) peuvent être déployées.

Pour ce faire, on effectue des mesures selon un maillage en adéquation avec le volume de dégradation supposé ou estimé à partir de constats visuels, afin de délimiter la zone suspecte, puis on resserre le maillage pour obtenir une meilleure résolution spatiale et surfacique.

En cas de détection d'anomalies, il sera possible de délimiter en plan, sur le parement, la zone de désordre et éventuellement d'estimer sa profondeur, sachant que les vitesses de propagation des ondes ultra-sonores peuvent être substantiellement perturbées dans un milieu non homogène tel que les maçonneries.

Après analyse des résultats, des sondages destructifs sont réalisés, qui peuvent permettre l'introduction d'endoscope, vidéo-endoscope, pour relier les observables déduits des auscultations à la réalité des défauts constatés et ainsi confirmer la présence, la localisation voire le volume des vides internes.

En cas de non-détection d'anomalie par les techniques Radar et tomographie ultra-sonore UPE, il convient soit d'envisager de recourir aux méthodes d'auscultation sonique par transparence ou de tomographie sismique, si elles sont applicables au cas d'espèce, soit de revoir les hypothèses émises sur l'origine des désordres.

Cas 2 : Matériau non saturé (typiquement partie aérienne des ouvrages)

Deux sous-cas de figure se présentent : le vide interne suspecté se trouve dans la partie structurelle de l'ouvrage ou du mur en maçonnerie, ou bien dans son remplissage pour les ponts ou le remblai pour les murs de soutènement.

Sous-cas A : vide suspecté dans la partie structurelle en maçonnerie

Dans la recherche de cavités ou anomalies dans la partie structurelle d'un ouvrage (pont ou mur) en maçonnerie, l'accès à privilégier est l'intrados de la voûte pour les ponts et le parement accessible pour les murs de soutènement.

L'auscultation radar consiste à balayer la surface concernée, le choix de l'antenne étant lié à l'épaisseur supposée de la partie de structure maçonnée. Pour optimiser la résolution (en fonction de la profondeur) tout en étant en mesure d'ausculter l'épaisseur totale de la partie structurelle, l'emploi de plusieurs antennes de fréquences différentes est fortement recommandé : il est conseillé de débuter l'auscultation avec des antennes à hautes fréquences (autour du GHz) puis de diminuer progressivement la fréquence centrale des antennes dans le cas où les premières antennes utilisées ne permettent pas d'ausculter l'entièreté du corps de voûte ou de l'épaisseur du mur.

Dans le cas des ponts voûtes, il est souhaitable de combiner les mesures depuis l'intrados avec des mesures radar réalisées depuis la chaussée. Ces profils supplémentaires permettent, en règle générale, de mieux interpréter les profils radar enregistrés depuis l'intrados.

Certaines caractéristiques des ouvrages peuvent complexifier, voire rendre inopérante, l'auscultation radar menée depuis l'intrados, la chaussée ou les deux :

- Pierres constitutives des parties structurelles s'opposant à la propagation des ondes radar (exemple : pierres magnéto-ferriques) ;
- Présence d'un remplissage de nature argileuse ou présence d'une chape d'étanchéité en argile en extrados de la voûte (étanchéité dite « basse ») ;
- Présence d'une dalle en béton (élargissement, support de chape d'étanchéité dite « haute ») en partie supérieure du remplissage ;
- Présence de contrastes électromagnétiques faibles entre l'extrados de la voûte (queutage) et le remplissage ne permettant pas d'identifier la position de l'extrados sur les profils radar.

Après analyse des résultats, des sondages destructifs, qui peuvent permettre l'introduction d'endoscope, vidéo-endoscope, sont réalisés pour relier les observables déduits des auscultations à la réalité des défauts constatés et ainsi confirmer la présence, la localisation voire le volume des vides internes.

Sous-cas B : vide suspecté dans le remplissage ou le remblai

Dans la recherche de cavités ou anomalies dans le remplissage d'un pont en maçonnerie ou le remblai, voire le contact remblai / sol naturel pour les murs de soutènement en maçonnerie, l'accès à privilégier est la chaussée sur ouvrage et les parements latéraux (murs tympans, parements latéraux des piles, murs en retour des culées pour les ponts) et le parement accessible pour les murs de soutènement.

L'auscultation radar consiste à balayer les surfaces concernées avec des antennes dans la gamme de quelques centaines de MHz. Pour optimiser la résolution, l'emploi de plusieurs antennes de fréquences différentes est fortement recommandé.

ÉTAPE 3
AUSCULTATION

a)



b)

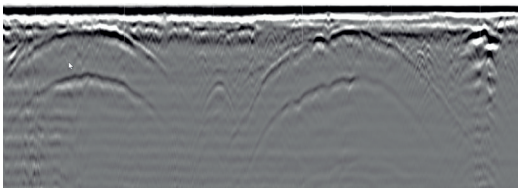


Figure 3 : a) pont sur la Loire à Digoin (Saône-et-Loire), b) Exemple de mesure radar depuis le tablier (source : Cerema)

La figure 3 présente un exemple de mesure réalisée depuis la chaussée supportée par un ouvrage en maçonnerie traversant la Loire, le profil radar obtenu permet de détecter l'extrados et l'intrados des deux voûtes du pont ainsi que l'élégissement (en œil de perdrix) équipant le tympan de l'ouvrage à l'axe de la pile.

Certaines caractéristiques des ouvrages peuvent complexifier, voire rendre inopérante, l'auscultation radar menée depuis la chaussée ou les parements « latéraux » :

- Pierres constitutives des parties structurelles s'opposant à la propagation des ondes radar ;
- Présence d'un remplissage de nature argileuse ;
- présence d'une dalle béton (élargissement, support de chape d'étanchéité dite « haute ») en partie supérieure du remplissage ;
- Présence de contrastes électromagnétiques faibles entre l'extrados de la voûte (queutage) et le remplissage ne permettant pas d'identifier précisément la position de l'extrados sur les profils radar. Il en résulte une impossibilité de confirmer la localisation d'une hétérogénéité, voire d'un éventuel vide, détectés par le radar, dans le remblai ou le corps de la voûte.

Après analyse des résultats, des sondages destructifs sont réalisés, qui peuvent permettre l'introduction d'endoscope, vidéo-endoscope, pour relier les observables déduits des auscultations à la réalité des défauts constatés et ainsi confirmer la présence, la localisation voire le volume des vides internes.

RÉFÉRENTIEL

[1] BREYSSE, Denys et ABRAHAM, Odile, 2005. *Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton armé*. Presses de l'École nationale des ponts et chaussées.

[2] BALAYSSAC, Jean-Paul et GARNIER, Vincent, 2018. *Évaluation non destructive des ouvrages en génie civil*. ISTE (Série *Durabilité des ouvrages de génie civil,* vol. 2).

Fiches des Cahiers interactifs :

UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL & CEREMA, Auscultation des ouvrages d'art [En ligne]. Marne-la-Vallée : Université Gustave Eiffel (Cahiers Interactifs, CII1). Disponible sur https://cahier-interactif-auscultation-ouvrages-art.univ-gustave-eiffel.fr/ (consulté le 31/03/2026) :

- B1-1 : Mesures au scléromètre
- B1-2 : Auscultation sonique des bétons
- B1-3 : Tomographie sismique
- B1-4 : Impact écho
- B1-11 : Pulse Echo et tomographie ultrasonore
- C1-1 : Technique radar pour localisation d'armatures
- C1-2 : Technique radar pour localisation de vides
- C1-3 : Technique radar pour mesure d'épaisseur
- C1-4 : Sondage destructif d'un ouvrage en maçonnerie
- E4-1 : Reconnaissance des caractéristiques géométriques et mécaniques d'une voûte en maçonnerie

LOGIGRAMME

.

D3-2 : DÉTECTION DE CAVITÉS DANS LA MAÇONNERIE

