RECONNAISSANCE DES CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES ET MÉCANIQUES D'UNE VOÛTE EN MAÇONNERIE

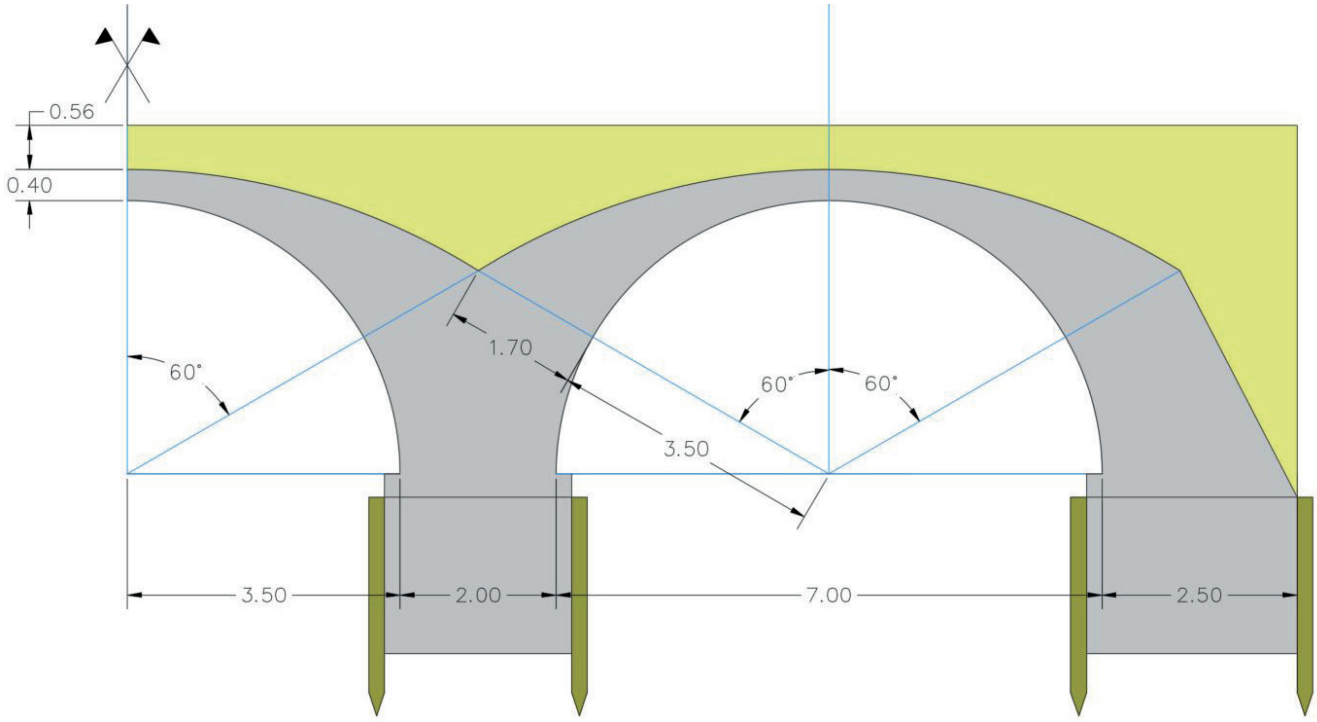
CONTEXTE

La présente procédure a pour objectif de définir les modalités de reconnaissance des caractéristiques géométriques et mécaniques d'une voûte en maçonnerie, données indispensables pour l'évaluation de la stabilité du corps de voûte au moyen d'un logiciel de calcul comme, par exemple, le logiciel VOUTE du Cerema [1].

Cette procédure est applicable notamment dans les cas d'études suivants :

– recherche des causes d'un schéma de désordres de type fissuration et/ou fendage par excès de compression ;
– passage de charges exceptionnelles ;
– élargissement d'un ouvrage (qui majore les efforts dus aux charges permanentes et aux charges d'exploitation appliquées sur la voûte) ;
– réparation ou renforcement par une contre-voûte en béton (en intrados ou extrados de corps de voûte), après vérification de l'insuffisance de stabilité de la voûte sous les chargements envisagés.

Il s'agit de définir la géométrie de la partie résistante de la voûte (ou corps de voûte), délimitée par les courbes d'intrados et d'extrados, et les caractéristiques mécaniques des matériaux constitutifs (résistance à la compression simple essentiellement), ce qui nécessite des investigations particulières.



Exemple de géométrie d'une voûte

une procédure spécifique E4-2 du cahier interactif est consacrée à la reconnaissance des appuis et fondations des ouvrages en maçonnerie nécessaire à la vérification de leur stabilité, et est un complément indispensable à la vérification de la stabilité de la voûte.

ÉTAPE 1
ANALYSE DU DOSSIER DE L'OUVRAGE
	On identifiera dans le dossier de l'ouvrage la présence ou l'absence des éléments utiles au diagnostic :
	– dates ou période de construction ;
	– nom de l'ingénieur concepteur ;
	– plans d'archives :
	  – élévation précisant pour chaque arche le type de voûte (plein cintre, surbaissée, anse de panier) et sa géométrie (ouverture, flèche),
	  – coupe longitudinale précisant pour chaque arche la géométrie de l'intrados et de l'extrados ainsi que du remplissage,
	  – coupes transversales à la clef et sur appui précisant en particulier la géométrie des murs tympans,
	  – adaptations éventuelles (élargissements par encorbellements béton, dalle béton générale, poutres transversales, etc.) ;
	– pour chaque appui, géométrie, mode de fondation, niveaux, nature des sols supports ;
	– profil en travers fonctionnel sur l'ouvrage (avec ses évolutions depuis l'origine) ;
	– identification de la (des) carrière(s) d'où proviennent les matériaux ;
	– modes de construction (cintres multiples ou cintre unique, rouleaux, anneaux, etc.) ;
	– nature des joints ;
	– travaux réalisés sur l'ouvrage (rechargements, modifications du profil en travers) ;
	– surveillance et entretien de l'ouvrage (visites d'évaluation, inspections détaillées, travaux, etc.).
	
	Même si la totalité du dossier d'ouvrage est disponible (géométrie, matériaux, mode de construction, étude géotechnique, etc.), ce qui est rare, il est fortement conseillé de valider les données fournies par ces documents par des investigations sur l'ouvrage : vérification des cotes principales, des épaisseurs de voûtes à la clef et de la nature et des propriétés des matériaux, confirmation de l'étude géotechnique, etc.
	
	Il est par exemple utile de comparer les valeurs d'épaisseur de la voûte à la clef et aux reins ou aux naissances fournies par ces documents, avec les valeurs données par les formules classiques de prédimensionnement utilisées à l'époque de la construction de l'ouvrage (voir la référence [2] où l'on trouve les formules de prédimensionnement de Perronet, Dupuit, Croisette-Desnoyer et Séjourné).
	
	À défaut de dossier d'ouvrage, il est fondamental d'essayer de connaître la date ou la période de réalisation de l'ouvrage et si possible le nom de l'ingénieur concepteur. Il sera alors utile de se reporter à la documentation relative à la construction des ponts en maçonnerie pour en extraire notamment les principes de conception, de dimensionnement et d'exécution de l'époque, les préconisations pour le choix des matériaux, etc. (Voir notamment les références [3] à [6]).
	
	Il existe également un document du Sétra, qui inventorie la réalisation des ouvrages routiers antérieurs à 1750 [7] et il est possible de trouver des documents similaires par département ou région. Il est notamment conseillé de s'adresser aux archives départementales ou aux archives de précédents gestionnaires pour les ouvrages déclassés ou rétrocédés (par exemple la SNCF).
	
	Des données sur les matériaux peuvent être obtenues en utilisant le tableau en annexe de la première partie du document [8] « Technologies des maçonneries » du LCPC, qui donne pour certaines pierres, la masse volumique et la résistance à la compression.
	
	Pour l'évaluation de la résistance à la compression des pierres, briques et maçonneries, on peut aussi utiliser le fascicule n°1 « Historique et constitution » du document [1] donnant la résistance à la compression en fonction de la densité apparente.

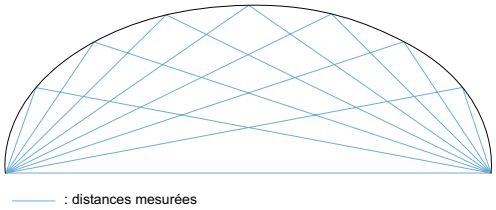
ÉTAPE 2 INSPECTION DÉTAILLÉE ET RELEVÉS GÉOMÉTRIQUES ÉVENTUELS	En préalable à l'inspection détaillée, en l'absence de données sur la géométrie extérieure de l'ouvrage, il est indispensable de procéder à des relevés géométriques simples, pour permettre de constituer les fonds de plan nécessaires à la cartographie des désordres. **Étape 2-1 Relevés géométriques simples** On utilise alors essentiellement le mètre, le décamètre, la perche télescopique et/ou le distancemètre laser, pour reconstituer : – le profil en travers fonctionnel de l'ouvrage (largeurs des trottoirs, des voies de circulation, des équipements en rives) ; – les principales dimensions géométriques de la voûte : largeur, longueur entre extrémités des éventuels murs en retour ou parapets, ouverture, flèches, hauteurs libres, hauteurs des éventuels piédroits, hauteurs des élévations des murs de tête (tympan + bandeau) de la voûte, etc. ; – la géométrie de l'intrados.

Les techniques à employer dépendent surtout des difficultés d'accès au-dessous de l'ouvrage.

Attention, l'épaisseur des bandeaux ne correspond généralement pas à l'épaisseur du corps de voûte.

Pour déterminer la courbe d'intrados de la voûte, en l'absence de données précises dans le dossier de l'ouvrage, on peut recourir au distancemètre laser et mesurer plusieurs distances entre repères pris sur le bandeau ou sur la voûte, pour décrire sa géométrie. À titre d'exemple :

– pour une voûte plein cintre ou surbaissée, on peut se contenter de 3 repères au niveau des naissances et de la clef de voûte ;
– pour une voûte en anse de panier, il peut être considéré 7 repères (voir schéma ci-après).



Relevé de distances pour une voûte en anse de panier

En dessinant les trajets mesurés avec un logiciel de dessin assisté par ordinateur (DAO), on peut déterminer la géométrie de la courbe (ellipse, arcs par morceaux, etc.).

Dans certains cas, il peut être préférable de procéder à un relevé topographique de l'ouvrage par un géomètre ou une personne qualifiée, permettant de définir quelques profils en long et en travers des superstructures de l'ouvrage (chaussée, trottoirs, parapets par exemple) et la géométrie des appuis et de l'intrados des voûtes. La photogrammétrie ou le scanner 3D peuvent également être utilisés.

On accède alors aux épaisseurs totales « chaussée + remplissage + corps de voûte ».

ÉTAPE 2
INSPECTION DÉTAILLÉE ET RELEVÉS GÉOMÉTRIQUES ÉVENTUELS

Étape 2-2 Inspection détaillée

Elle doit permettre de définir l'état apparent de l'ouvrage, elle a pour finalité :

– de reconnaître le type de roche ou matériau constitutif de la maçonnerie (pierres de taille, moellons ou briques) pour les diverses parties de la voûte, ainsi que son état apparent ;
– d'estimer qualitativement l'homogénéité et la dureté des matériaux au moyen de tests simples (choc au marteau par exemple) ;
– outre les relevés habituels de désordres, de vérifier à l'échelle des diverses parties de la voûte l'homogénéité de la maçonnerie, ou le cas échéant de mettre en évidence une diminution de section résistante ou un affaiblissement de la structure ;
– de déterminer la nature et l'épaisseur du mortier constitutif des joints de parement, même si elle n'est pas forcément la même que celle du mortier de hourdage, sa dureté au moyen de tests simples (tournevis, etc.) (classement de « mortier M1 » à « mortier M4 », cf fascicule n°1 de la référence [1]) et son degré d'altération, etc.

Type de mortier	Résistance moyenne (MPa)	Caractérisation
M1	20	Difficile à rayer avec un tournevis, un couteau Épaisseur des joints entre 1 et 2 cm
M2	10	Se raye avec un tournevis, un couteau
M3	5	Se raye à l'ongle
M4	2,5	Se désagrège au grattage Mortier épais

Caractérisation des types de mortier [1]

L'inspection détaillée doit permettre d'évaluer l'opportunité et la faisabilité d'un recalcul dans le cadre d'une évaluation structurale de l'ouvrage. En effet, si l'ouvrage présente des désordres très importants (cavités apparentes, joints dégarnis en profondeur, etc.) il est difficile, voire impossible, de modéliser réellement ces désordres, mais par contre il est possible de rentrer dans les données de géométrie de la voûte, une « épaisseur résiduelle estimée » d'une voûte dégradée.

ÉTAPE 3
AUSCULTATION - DÉTERMINATION DE LA GÉOMÉTRIE DU CORPS DE VOÛTE ET DES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DE LA MAÇONNERIE

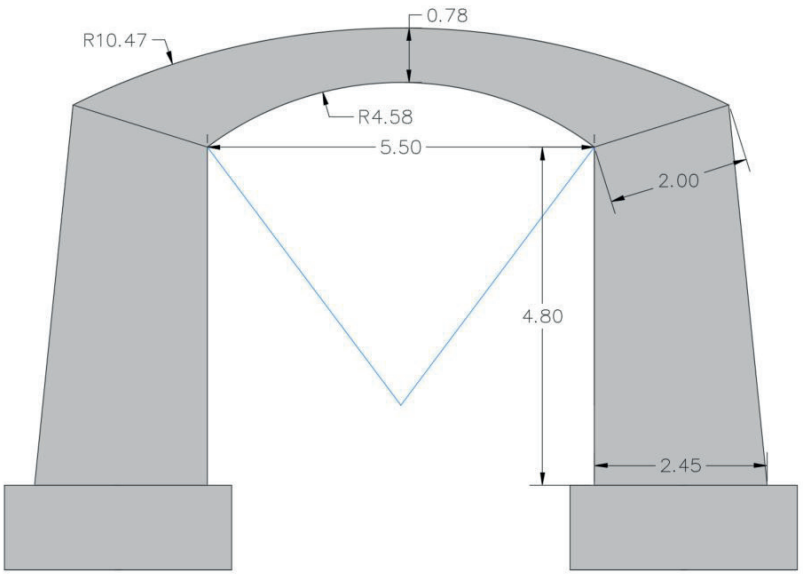
Cette étape a pour objectif de déterminer la courbe d'extrados du corps de voûte, donc les épaisseurs de voûte dans les sections nécessaires au recalcul, l'épaisseur du matériau de remplissage et de la chaussée, ainsi que la résistance à la compression des pierres.

La courbe d'intrados du corps de voûte est supposée connue à l'issue des étapes 1 et/ou 2-1.

L'auscultation fait appel à des sondages destructifs qui nécessitent l'établissement d'un plan de sondages soumis à l'accord du gestionnaire de l'ouvrage. Ce plan est établi pour minimiser le nombre de carottages effectués dans la maçonnerie.

Dans un premier temps, il est nécessaire de déterminer les sections de la voûte les plus appropriées pour la détermination des épaisseurs du corps de voûte.

La forme de l'extrados pour les voutes en plein cintre est généralement composée d'un arc de cercle à sommet correspondant à l'axe de la voûte, prolongé à proximité des piédroits par deux segments de droite tangents. Pour les voûtes surbaissées, c'est en général un seul arc de cercle allant jusqu'aux culées.



Exemple de géométrie d'une voûte surbaissée

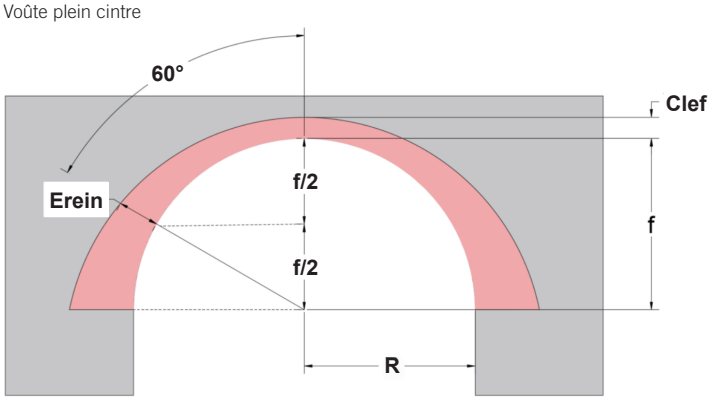
La connaissance du niveau de l'extrados du corps de voûte nécessite de caler la courbe d'extrados en 2 ou 3 points :

– à la clef,
– en un point situé au droit des reins (*) pour les voûtes plein cintre, peu surbaissées (ouverture angulaire supérieure à 120°) et en anse de panier,
– ou en un point situé au niveau des naissances pour les voûtes surbaissées d'ouverture angulaire inférieure à 120°.

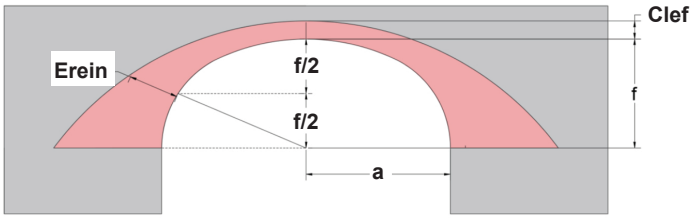
Pour les voûtes plein cintre, peu surbaissées et en anse de panier, il peut être utile d'évaluer en outre l'épaisseur "horizontale" de maçonnerie en tête de piédroit.

(*) : le point est situé sur la voûte à mi-hauteur de la flèche, c'est à dire à mi-hauteur entre les naissances et la clef ; pour les voûtes plein cintre et peu surbaissées, le point est situé dans la section inclinée à 60° par rapport à la verticale.

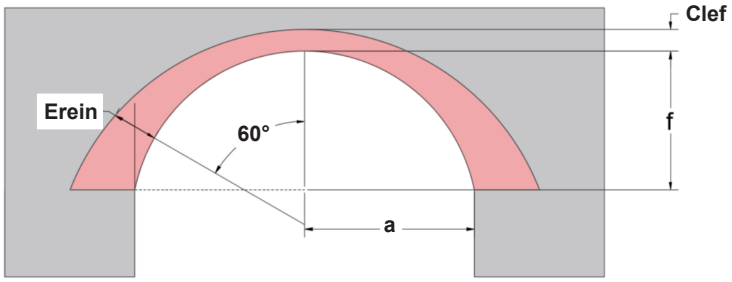
Voûte plein cintre



Voûte en anse de panier



Voûte peu surbaissée



Voûte très surbaissée

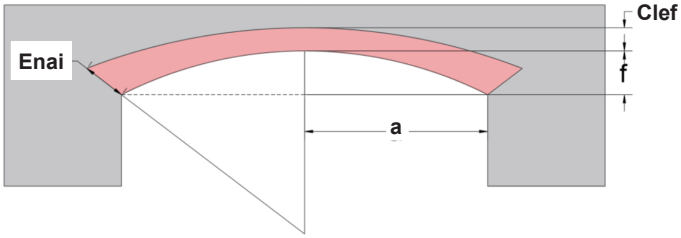


Illustration des épaisseurs à la clef, au rein et à la naissance de la voûte en fonction du type de voûte

ÉTAPE 3
AUSCULTATION - DÉTERMINATION DE LA GÉOMÉTRIE DU CORPS DE VOÛTE ET DES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DE LA MAÇONNERIE

Sont présentées dans la suite, les techniques pouvant apporter une réponse à un ou plusieurs points de l'objectif.

Étape 3-1 Auscultation radar (fiche C1-3)

Il est en général plus aisé de débuter par une auscultation radar de l'ouvrage au niveau de la surface de la chaussée car cela ne nécessite pas de moyen d'accès particulier.

Une telle intervention nécessite la mise en place d'une signalisation adaptée.

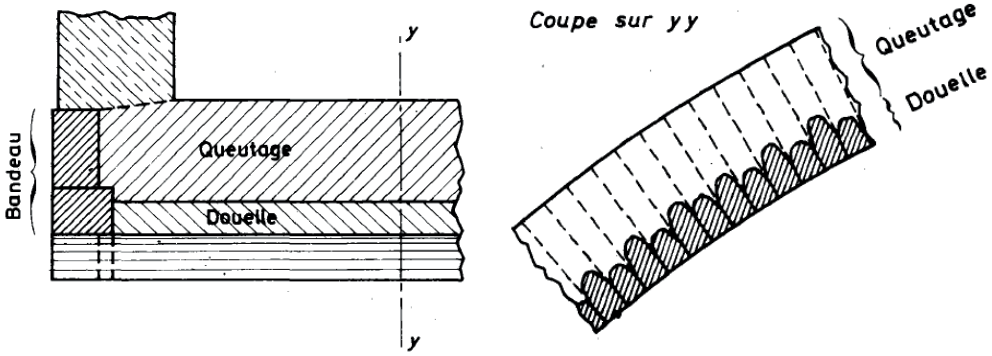
Cette investigation « à grand rendement » peut permettre, suivant la nature des matériaux de remplissage et leur épaisseur, d'accéder aux informations suivantes :
– épaisseur des couches de chaussée ;
– épaisseurs du matériau de remplissage et du corps de voûte souvent limitées aux zones de clef, en particulier pour les voûtes plein cintre ;
– mise en évidence de singularités internes, par exemple élégissements internes non débouchants, caniveaux, réseaux, etc. ;
– positionnement de la couche d'étanchéité (suivant la profondeur : étanchéité basse, intermédiaire ou haute) ;
– repérage d'éventuelles zones de rétention d'eau ;
– repérage dans les cas favorables de la présence de redans ou identification d'un fruit de la face interne des murs tympans ;
– identification, dans le cas d'un ouvrage élargi, de la présence d'une dalle en pleine largeur ou en encorbellement.

Le repérage de singularités radar de type cavité, zone de rétention d'eau, etc. nécessite généralement l'ouverture de fenêtres pour validation.

L'attention est attirée sur le fait que les investigations radar réalisées depuis la surface de la chaussée sont limitées par les points suivants :

– présence d'une dalle générale ferraillée ;
– présence de matériaux de remplissage ou d'une couche d'étanchéité en extrados du corps de voûte à base de matériaux argileux ou de feuille métallique intégrée, qui peuvent faire « écran » à la propagation des ondes électromagnétiques ;

– difficulté voire impossibilité de définir la position de l'extrados du corps de voûte sur les profils radar (profondeur trop importante, absence de transition nette entre matériau de remplissage et queutage) ; il n'est en outre pas possible de distinguer la séparation entre queutage et douelle ;
– humidité importante et variable du matériau de remplissage ;
– hétérogénéité du matériau de remplissage.



Exemple de la constitution du corps d'une voûte

Ces investigations nécessitent en outre une qualification et une compétence spécifiques du personnel chargé de leur mise en œuvre et surtout de l'exploitation des résultats.

On réalise généralement a minima un profil longitudinal par voie de circulation, au moyen d'antennes de 200 à 400, voire 900 MHz, déplacées manuellement. Suivant le cas, il est possible de compléter les profils longitudinaux à l'arrière des murs tympans par quelques profils transversaux, etc.

ÉTAPE 3
AUSCULTATION - DÉTERMINATION DE LA GÉOMÉTRIE DU CORPS DE VOÛTE ET DES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DE LA MAÇONNERIE

Les profondeurs d'investigation sont très dépendantes de la nature des matériaux en présence. Le tableau ci-dessous fournit un ordre de grandeur des profondeurs d'investigation maximales et résolutions verticales[1] des antennes radar dans les cas favorables :

Antenne radar	Profondeur d'investigation maximale	Résolution verticale
900 MHz	1 - 1,5 m	8 - 9 cm
400 MHz	3 - 4 m	15 - 20 cm
200 MHz	jusqu'à 10 m	30 - 40 cm

Si le profil radar exécuté depuis la chaussée permet de visualiser l'intrados de l'ouvrage dans les zones de clef, il est indispensable de réaliser une « calibration » des résultats. Afin d'estimer la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques :

– soit il est possible de caler la constante diélectrique relative moyenne des matériaux traversés pour que l'épaisseur estimée au voisinage de la clef (épaisseur de remplissage minimale) corresponde à l'épaisseur mesurée (géométrie extérieure visible de l'ouvrage)[2] ;
– soit le cas échéant il est possible d'utiliser les hyperboles de diffraction sur des objets ponctuels (par exemple tirants d'enserrement des bandeaux) pour caler les vitesses (ces hyperboles doivent être parfaitement définies) ;
– soit il est nécessaire de réaliser un ou plusieurs carottages ou fouilles et de faire des constats visuels et métrés (cas le plus rigoureux et précis).

Pour estimer les épaisseurs du corps de voûte au niveau des reins ou des naissances et *a fortiori* dans le cas où il n'est pas possible de déterminer l'épaisseur du corps de voûte à partir de l'auscultation par la chaussée, il est donc nécessaire de faire des profils radar depuis la douelle (intrados de l'ouvrage) afin d'obtenir la géométrie de la voûte (épaisseur de la maçonnerie de la douelle en recherchant l'interface maçonnerie - matériaux de remplissage). Depuis la douelle il est possible de voir les changements d'épaisseur du corps de voûte. Cette opération permet en outre de détecter la présence de tirants ou clous métalliques et de vérifier leur continuité. Elle nécessite généralement le recours à des moyens d'accès particuliers.

Il est toujours nécessaire d'étalonner la méthode d'auscultation radar (constante diélectrique relative de la maçonnerie de la douelle) par un essai destructif : un unique carottage exécuté en intrados est généralement suffisant (fiche A1-1).

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

2. Il est nécessaire de vérifier que les vitesses de propagation estimées par cette méthode sont cohérentes avec les vitesses attendues. Ces vitesses ne sont pas projetables au droit des reins et naissances des voûtes car l'augmentation de l'épaisseur des matériaux de remplissage fait évoluer la constante diélectrique.

ÉTAPE 3
AUSCULTATION - DÉTERMINATION DE LA GÉOMÉTRIE DU CORPS DE VOÛTE ET DES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DE LA MAÇONNERIE

Étape 3-2 Réalisation de fouille(s) (fiche C6-1)

Lorsque cela est possible (*), la réalisation d'une fouille en clef de voûte, en s'inspirant de la fiche C6-1, voire de plusieurs fouilles (par exemple en clef, au droit d'un rein, voire de piles), est une étape indispensable pour :

– calibrer les résultats de l'éventuelle auscultation radar comme il a été dit auparavant ;
– procéder à une première estimation de l'épaisseur du corps de voûte, en réalisant au moyen d'un mètre, quelques mesures d'épaisseur totale sur les élévations de la voûte et de profondeur de fouille, à partir d'une référence commune qui peut être le dessus du parapet ou du garde-corps.

Le nivellement comparatif de l'intrados et de l'extrados du corps de voûte au droit des fouilles permet également d'obtenir l'épaisseur de la voûte.

(*) Les facteurs limitants sont notamment :

– les possibilités de restriction de largeur de chaussée (voire de fermeture de l'ouvrage) et d'exploitation de l'ouvrage se conformant aux règles de sécurité pendant la réalisation des fouilles ;
– les épaisseurs importantes de matériau de remplissage ;
– la présence de réseaux (à identifier au préalable) ;
– la présence d'une structure d'élargissement, etc.

Pour toutes ces raisons et en particulier dans le cas d'un dossier d'ouvrage succinct, il est recommandé de procéder à une auscultation radar préalablement à l'ouverture de la fouille.

Pour les très petits ouvrages, l'extrados du corps de voûte peut être déterminé par une tranchée parallèle à l'axe longitudinal de l'ouvrage descendant jusqu'à l'extrados, suivi d'un relevé de cet extrados.

L'ouverture de fouille(s) permet en outre :

– de réaliser des prélèvements du matériau de remplissage pour évaluer sa qualité et sa densité, (cas d'argiles gonflantes par exemple) ;
– de connaître la nature et l'état de l'éventuelle couche d'étanchéité en extrados du corps de voûte,
– d'évaluer l'état de conservation de la maçonnerie en extrados du corps de voûte ;
– de relever la géométrie au niveau de points particuliers de l'ouvrage : jonction entre une voûte béton et une voûte maçonnerie, élargissement par encorbellement avec contrepoids, présence de redans des murs tympans, etc.

L'exécution de fouille(s) nécessite le recours à une entreprise, la mise en place d'une signalisation adaptée, le comblement ultérieur de la fouille avec réfection éventuelle de l'étanchéité. Il faut en effet ne pas dégrader l'étanchéité et la reconstituer « au mieux » si elle a été localement éliminée.

L'exécution de fouille(s) doit être réalisée avec précaution vis-à-vis de l'ouvrage, il est préconisé d'utiliser des moyens manuels légers (petits marteaux piqueurs, pelle manuelle, etc.) et de proscrire le recours à des engins mécaniques de terrassement.

L'exécution d'une seule fouille en clef de voûte, hormis le cas d'ouvrages simples possédant un corps de voûte d'épaisseur constante, est en règle générale insuffisante et il sera nécessaire de réaliser plusieurs fouilles et/ou des carottages pour déterminer la courbe d'extrados du corps de voûte (cf étape 3.3).

Étape 3-3 Réalisation de carottages

3-3-1 Réalisation de carottages en intrados de la voûte (fiche A1-1)

En l'absence de problème suspecté et de nécessité de reconnaissance au niveau des fondations de l'ouvrage, les carottages sont de préférence exécutés en intrados de la voûte. En effet, cette investigation ne pénalise pas l'exploitation sur l'ouvrage s'il n'est pas nécessaire d'utiliser une passerelle négative et est souvent moins onéreuse que la réalisation de sondages carottés depuis le dessus de la chaussée, sauf si des moyens d'accès à l'intrados coûteux (échafaudages, etc.) sont nécessaires.

Ces carottages sont exécutés au moyen d'une carotteuse « type béton », fixée à la maçonnerie de la douelle.

*Le matériel doit être adapté et **se conformer aux règles de sécurité** pour éviter tout risque d'électrocution en cas de carottage à l'eau.*

Le carottage à l'eau peut être remplacé par du carottage à l'air, ceci afin de préserver les joints de la maçonnerie et d'éviter le délavage des matériaux prélevés.

Outre l'implantation en plan précise de chaque carottage et son niveau altimétrique, il convient de relever précisément (et de définir à l'avance) l'angle du carottier par rapport à la courbe d'intrados pour pouvoir reconstituer la courbe d'extrados.

Lorsqu'on ne dispose pas d'informations suffisantes pour définir la courbe d'extrados du corps de voûte, on réalise en général trois carottages de diamètre compris entre 50 et 100 mm selon la nature et la finesse des matériaux constitutifs de la maçonnerie de la douelle :

– 1 carottage vertical à la clef ;
– 1 carottage perpendiculaire à l'intrados au niveau des reins ;
– 1 carottage perpendiculaire au parement à la naissance.

Ces carottages, suivant leur longueur, peuvent permettre d'évaluer la nature du matériau de remplissage et éventuellement de renseigner sur la nature d'une éventuelle couche d'étanchéité en extrados du corps de voûte.

Il ne sera alors pas possible de reconstituer l'intégrité de l'étanchéité.

L'épaisseur du corps de voûte est alors déterminée par mesure de la longueur des carottes, après examen des faces du carottage. Dans certains cas, il peut être difficile de définir précisément la limite entre corps de voûte et matériau de remplissage.

On procède à l'examen visuel des pierres ou briques, des éventuels joints, en vue d'en déterminer leur nature et état ; on mesure leur densité et il est possible de procéder à des tests de dureté. On peut également examiner l'état du jointoiement dans les trous de carottage réalisés, à l'aide d'un endoscope.

Lorsqu'on ne cherche qu'à déterminer les caractéristiques mécaniques des pierres de la maçonnerie, on réalise de préférence trois carottages « courts », de diamètre préconisé compris entre 50 et 100 mm selon la nature de la roche (finesse, inclusions,…), dont la profondeur doit permettre de respecter l'élancement de 1 requis pour l'essai de compression simple (NF EN 1926) [9]

Généralement dans le cas des briques, la résistance mécanique est estimée à partir de la mesure de la densité (cf fascicule n°1 de la référence [1]).

Si l'on souhaite réaliser des prélèvements pour essais de compression, il est possible d'utiliser la norme NF EN 772-1+A1 [10].

Une fois la carotte extraite, le trou est rebouché à l'aide d'un mortier sans retrait.

3-3-2 Réalisation de sondages carottés à partir du dessus de la chaussée (fiche A3-1)

ÉTAPE 3
AUSCULTATION - DÉTERMINATION DE LA GÉOMÉTRIE DU CORPS DE VOÛTE ET DES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DE LA MAÇONNERIE

Lorsque les conditions de réalisation de carottages depuis l'intrados sont difficiles (brèche de grande profondeur, franchissement de voie d'eau importante, chaussée étroite ne permettant pas l'utilisation d'une passerelle négative ou impossibilité de restreindre la largeur roulable sur l'ouvrage pendant les investigations, etc.) ou impossibles (ouvrage classé par exemple), on s'oriente alors vers des sondages carottés exécutés à partir de la surface de la chaussée qui permettent notamment de reconnaître la maçonnerie d'appuis de l'ouvrage et leurs niveaux de fondation (Fiche E4-2).

Lorsqu'il est en outre nécessaire de reconnaître les natures et caractéristiques géotechniques des sols de fondation, les sondages carottés au droit des appuis peuvent être complétés par des sondages pressiométriques dans les sols supports.

Les sondages carottés sont réalisés à l'aide de sondeuses géotechniques par une équipe de sondeurs compétente en ouvrages d'art ou encadrée par un chargé d'études ouvrages d'art. Ces sondages sont exécutés de préférence verticalement car ils sont plus faciles à maîtriser, ou éventuellement avec une inclinaison pour reconnaître notamment la géométrie interne du corps de voûte aux reins voire aux naissances de la voûte.

Avant l'exécution des sondages, il est conseillé d'estimer leur longueur à partir des relevés de l'intrados du corps de voûte et de la chaussée et des valeurs données par les formules classiques de prédimensionnement des épaisseurs de voûte utilisées à l'époque de la construction de l'ouvrage, en établissant une coupe longitudinale approximative de l'ouvrage et en tenant compte des positions et inclinaisons des sondages prévus.

L'implantation en plan, le niveau altimétrique sur chaussée et l'inclinaison éventuelle de chaque sondage doivent être relevés précisément.

Les murs tympans ayant fréquemment un fruit arrière ou des redans surtout lorsqu'ils sont hauts, il est vivement conseillé d'effectuer les sondages à proximité de l'axe de l'ouvrage pour éviter aux sondages d'intercepter les redans et la face arrière de ces murs.

Il faut bien sûr veiller à récupérer dans son intégralité la carotte après l'opération de carottage.

Le trou du sondage sera rebouché avec un micro béton sans retrait jusqu'à une dizaine de centimètres au-dessus de l'extrados du corps de voûte. Le reste du forage sera rempli de sable ou grave fine dans l'épaisseur du remplissage sur voûte, puis par des produits bitumineux dans l'épaisseur des couches de chaussée.

L'interprétation des sondages doit être faite par un spécialiste, car il est souvent difficile d'apprécier le niveau où commencent réellement les maçonneries du corps de voûte, notamment quand le remplissage, dans ses couches inférieures, contient beaucoup de résidus de taille des pierres.

La nature des matériaux doit être déterminée par un géologue qui pourra mesurer le pourcentage de récupération et le RQD (Rock Quality Designation) des carottes pour apprécier la qualité des matériaux vis-à-vis de la fissuration (voir la norme ASTM D6032 / D6032M–17 [11]).

S'il en a été prélevé lors du carottage, la qualité du mortier de hourdage des pierres peut être appréciée (de « mortier M1 » : difficile à rayer avec un tournevis à « mortier M4 » : se désagrégeant au grattage cf fascicule 1 de la référence [1]).

Pour aller plus loin, les sondages carottés à partir du dessus de la chaussée peuvent permettre également de pratiquer les investigations suivantes :

– la réalisation dans la partie du sondage carotté dans la maçonnerie, d'essais d'eau de type Lugeon (NF EN ISO 22282-3 [12]) pour apprécier la perméabilité des matériaux en place (essais permettant d'estimer les volumes et difficultés prévisibles en cas de projet d'injection de la maçonnerie) ;
– l'introduction d'une sonde « gamma-gamma » pour mesurer la densité et aider à préciser la position de l'interface entre les différents matériaux rencontrés (chaussée, remplissage, queutage, douelle) (cf fiche C6-13 Diagraphie nucléaire par radioactivité provoquée en forage) ;
– l'introduction d'une caméra de forage permettant d'identifier les interfaces entre les différents matériaux rencontrés et de vérifier les volumes des lacunes constatées sur les carottes (confirmation des résultats RQD).

Pour la reconnaissance des appuis, outre les sondages verticaux, généralement prolongés sous la base de la fondation afin de déterminer la nature et les caractéristiques géotechniques du sol de fondation, il est possible de réaliser des sondages horizontaux permettant de préciser par exemple la constitution du noyau d'une pile, le fruit arrière de la maçonnerie d'une culée, etc.

Lorsqu'il n'est pas nécessaire de reconnaître la qualité de la maçonnerie, par exemple pour la reconnaissance des culées (épaisseur de maçonnerie variable, redans, fruit, etc.), il peut être utile et économique d'associer à un ou plusieurs carottages verticaux, des sondages destructifs (voir fiche C1-4 Sondage destructif d'un ouvrage en maçonnerie). Des sondages destructifs peuvent d'ailleurs s'avérer suffisants si l'état de la maçonnerie est bien connu et sain.

Les sondages destructifs permettent de réaliser, par l'intermédiaire des enregistrements de paramètres (vitesse d'avancement, pression du fluide, pression sur l'outil, couple de rotation), des «observations» sur l'homogénéité des matériaux). Ces sondages destructifs sont réalisés de préférence en roto-percussion (avec injection d'air ou marteau fond de trou).

ÉTAPE 3
AUSCULTATION - DÉTERMINATION DE LA GÉOMÉTRIE DU CORPS DE VOÛTE ET DES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DE LA MAÇONNERIE

Étape 3-4 Essais de résistance à la compression sur carottes

L'évaluation de la résistance d'une voûte doit prendre en compte la résistance du composite pierres / joint (plus faible que la résistance de la pierre seule). Les essais de résistance en compression sur des échantillons du composite « pierres / joint » sont en général impossibles à réaliser, du fait de l'altération du joint lors des opérations de prélèvement par carottage, de sciage ou de rectification. En outre, la sollicitation exercée lors de l'essai de compression a le plus souvent une orientation différente de celle de la sollicitation réelle du composite « pierres / joint » dans l'ouvrage.

La résistance de la maçonnerie prise en compte dans les calculs, qui est la résistance caractéristique du matériau hétérogène que constitue l'association de pierres ou briques et de mortier, est ainsi évaluée à partir de la résistance moyenne à la compression des pierres (Fpm) et de la qualité et de l'épaisseur du mortier de hourdage (mortier M1, M2, M3 ou M4).

On cherche donc à évaluer la résistance à la compression moyenne des pierres de la maçonnerie et, suivant la qualité du joint, à en déduire la résistance du composite en s'appuyant sur le tableau ci-dessous extrait du fascicule 1 de la référence [1].

Résistance à la compression des pierres MPa		Type de mortier			
		M4 ~ 2,5 MPa	M3 ~ 5 MPa	M2 ~ 10 MPa	M1 ~ 20 MPa
Fpk	Fpm	Résistance à la compression des maçonneries			
2,0	2,5	1,3	1,4	1,4	1,4
5,0	6,5	2,9	3,3	3,4	3,5
7,5	10,0	3,5	4,1	4,5	4,9
10,0	13,0	4,1	4,7	5,3	6,2
15,0	20,0	5,1	5,9	6,7	8,2
20,0	26,5	6,1	6,9	8,0	9,7
30,0	40,0	7,2	8,6	10,2	12,0
40,0	53,0	8,1	10,4	12,0	14,3
60,0	80,0			16,0	18,8

Pour les pierres anisotropes (calcaire en particulier), il est nécessaire de réaliser l'essai de compression perpendiculairement aux lits de la pierre, dans le sens des efforts appliqués sur les pierres en place dans la voûte, comme le montre le schéma ci-dessous.

ÉTAPE 3
AUSCULTATION - DÉTERMINATION DE LA GÉOMÉTRIE DU CORPS DE VOÛTE ET DES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DE LA MAÇONNERIE



Si l'on cherche à réaliser un essai de compression de la pierre dans le sens de la sollicitation dans la voûte :

– soit on peut réaliser un carottage sur les pierres constitutives d'éléments annexes de l'ouvrage facilement accessibles, tels les plinthes ou les parapets, si elles sont de la même nature ;
– soit il faut réaliser un sondage incliné, depuis la chaussée, en direction de la naissance d'une voûte, ce qui est difficilement réalisable.

Les carottes prélevées doivent être préparées (sciage et rectification ou surfaçage des faces d'extrémité) préalablement à l'essai de résistance à la compression.

Le diamètre minimum préconisé par la norme NF EN 1926 est de 50 mm. Il doit être relié à la taille du plus grand cristal présent dans la roche par un rapport 10/1.

Un minimum de 3 essais de résistance en compression est souhaitable, pour obtenir une valeur moyenne.

Il peut être intéressant de réaliser des conservations différentes entre les échantillons (par exemple saturation dans l'eau de certains échantillons et séchage d'autres échantillons), afin d'évaluer l'impact de la teneur en eau sur la résistance mécanique des pierres.

RÉFÉRENTIEL

[1] Les ponts en maçonnerie – Constitution et stabilité (fascicule 1 « Historique et constitution », fascicule 2 « Évaluation de la stabilité » et fascicule 3 « Guide pour l'utilisation du programme VOUTE ») (Ministère des Transports - Direction des Routes - Sétra juin 1982)

[2] « Cours de ponts en maçonnerie » de l'ENPC par Sénéac de 1951

[3] Fondations de ponts en site aquatique en état précaire – Guide pour la surveillance et le confortement (Ministère des Transports - Direction Générale des Transports Intérieurs - Direction des Routes et de la circulation routière – LCPC - Sétra décembre 1980) et notamment l'annexe technique II « Méthodes et techniques de reconnaissance des fondations »

[4] Thèse de Nathalie DOMEDE « Méthode de requalification des ponts en maçonnerie » (Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse - juillet 2006)

[5] Grandes voûtes de Séjourné (1916)

[6] Guide élargissement des ponts maçonnerie – SETRA 2001

[7] Répertoire des ponts routiers antérieurs à 1750. Document réalisé par Jean Mesqui et publié par la direction des routes et de la circulation routière au ministère des Transports. Paris, éd. de la SETRA, 1981

[8] Technologies des maçonneries du LCPC de 1981

[9] NF EN 1926 : Méthodes d'essai des pierres naturelles - Détermination de la résistance en compression uni-axiale

[10] Norme NF EN 772-1+A1 : Méthodes d'essai des éléments de maçonnerie — Partie 1 : Détermination de la résistance à la compression

[11] ASTM D6032 / D6032M–17 : Standard Test Method for Determining Rock Quality Designation (RQD) of Rock Core

[12] NF EN ISO 22282-3 : Reconnaissance et essais géotechniques - Essais géohydrauliques - Partie 3 : essais de pression d'eau dans des roches

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

A1-1 Carottage de béton

A3-1 Sondage carotté d'un ouvrage en maçonnerie

C1-3 Technique radar pour mesure d'épaisseur

C1-4 Sondage destructif d'un ouvrage en maçonnerie

C6-1 Ouverture de fouilles

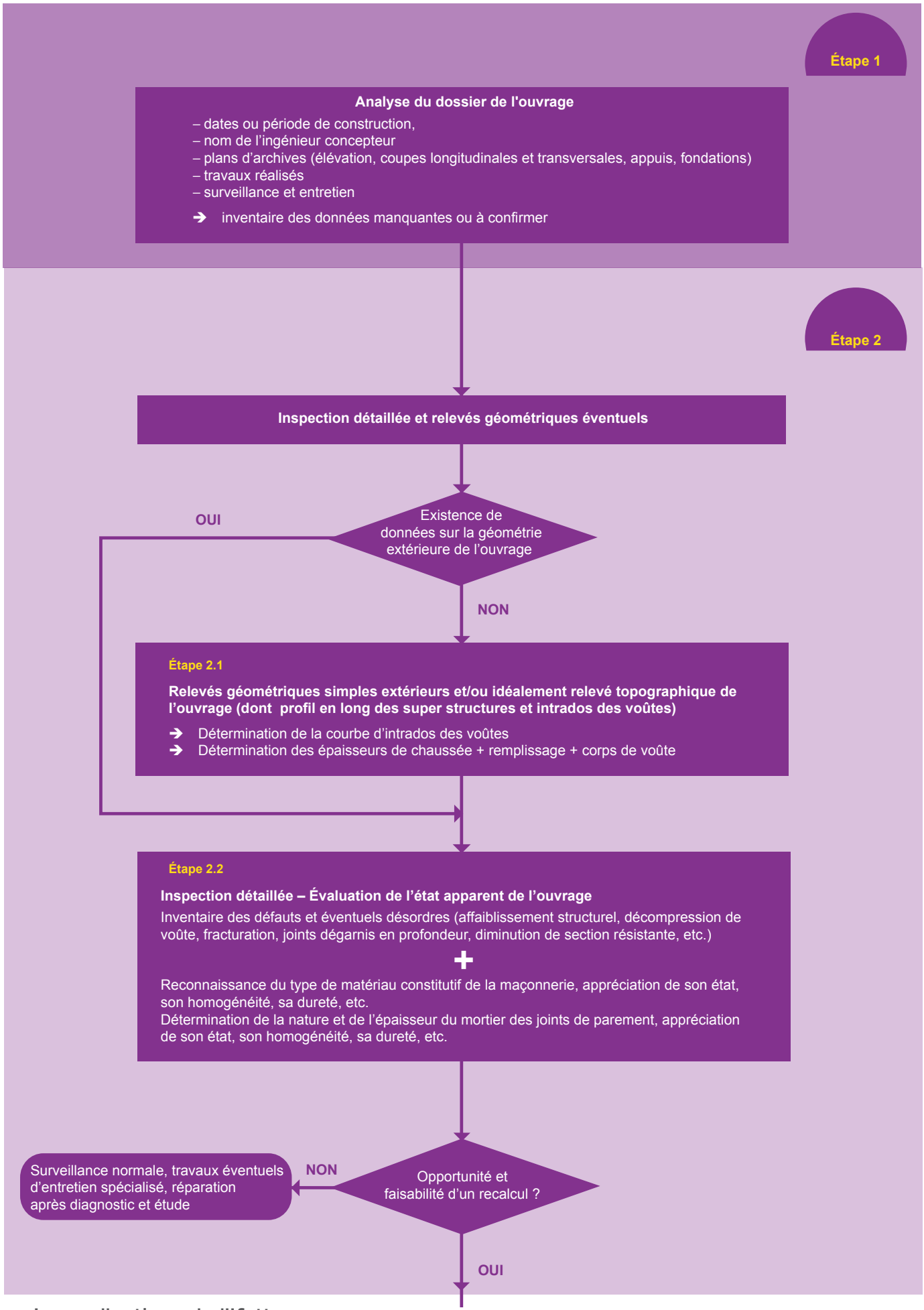
C6-13 Diagraphie nucléaire à radioactivité provoquée en forage

E4-2 Reconnaissance des appuis et fondations d'un ouvrage en maçonnerie

LOGIGRAMME

Un logigramme ou plutôt un schéma décisionnel visualisant de façon plus ou moins séquentielle les actions à mener en fonction des données qu'il est possible ou non d'acquérir pour aboutir au diagnostic, résume la méthodologie de diagnostic.

E4-1 : RECONNAISSANCE DES CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES ET MÉCANIQUES D'UNE VOÛTE EN MAÇONNERIE



E4-1 : RECONNAISSANCE DES CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES ET MÉCANIQUES D'UNE VOÛTE EN MAÇONNERIE

