

DÉTECTION DE DÉFAUTS INTERNES DANS LE BÉTON

CONTEXTE

La présente méthodologie porte sur la détection et la caractérisation d'anomalies internes au béton (cavités, feuilletages, délaminages, etc.) ou à l'interface entre différents éléments de structures (interface avec une réparation, interface entre la structure et le terrain qu'il soit naturel ou artificiel – remblai). Cette méthodologie est valable pour les structures en béton armé ou béton précontraint.

La présence de désordres spécifiques ou de doutes relevés par le chargé d'étude en charge de l'inspection peut permettre d'établir un plan de diagnostic ciblé sur les anomalies recherchées.

Ces dernières peuvent prendre plusieurs formes géométriques et avoir différentes origines. Il convient donc d'établir une méthodologie détaillée d'intervention, incluant des techniques d'auscultation non destructives, éventuellement complétées par des sondages destructifs, pour établir un diagnostic fiable [1, 2]. Un bon niveau d'expertise est requis pour permettre l'identification de la pathologie d'origine et choisir les techniques à déployer pour répondre à la problématique.

En effet, et pour exemple, les anomalies recherchées dans la masse de la structure peuvent se situer en subsurface et prendre la forme d'un délaminage ou feuilletage (exemple : décollement d'un ragréage dans la zone d'enrobage), ou se situer plus profondément en gardant la forme d'un délaminage au droit des premiers lits d'aciers (exemple : corrosion des aciers ou problème de fatigue en zone comprimée ou tendue), voir plus profondément et au-delà du premier lit d'armature (exemple : interface d'altération physico-chimique dans la masse de la structure, zone de concentration de contrainte et de fatigue).

Ces délaminages ou feuilletages, situés entre la surface du béton et l'environnement du premier lit d'armature, peuvent se présenter sous forme de fissures micrométriques à millimétriques, saturées en eau ou non, positionnées sur un plan parallèle ou subparallèle au parement.

De même et dans le cas de réparation de la structure, le délaminage ou défaut de contact peut se situer à l'interface entre la structure d'origine et le produit de réparation (exemple : décollement entre le produit de réparation et la structure suite à des circulations d'eau, incompatibilité entre les produits, absence de liaison mécanique résistant à l'effet du retrait) ou se situer dans le corps de la réparation (exemple : délamination entre passes de béton projeté sous l'effet des contraintes thermiques, de retrait et des contraintes mécaniques liées au chargement).

Les anomalies recherchées peuvent se situer au-delà du lit d'armature, dans le corps du béton (exemple : altération dans l'environnement du second lit d'armature) ou à l'interface entre différentes structures (typiquement pièce en béton, remblais ou terrain naturel) et prendre la forme de défauts de contact sous forme de cheminement préférentiel d'eau, de cavité, ou de présence de matériaux altérés (réaction mécanique si mouvement différentiel entre les structures ou physico-chimique). Ces anomalies se situent généralement à l'interface opposée au parement accessible (exemple : recherche de vide sous dalle de transition, recherche de circulation d'eau en arrière d'un mur de front de culée).

Enfin, on peut rechercher des vides dans la structure, liés à leur conception tels que élagissements, fourreaux de canalisation, etc.

Les matériels et les techniques non destructives disponibles pour la détection et la quantification de ces types de pathologies sont :

- Les méthodes à sondage mécanique (marteau, scléromètre, Impact-echo) : elles exploitent un choc sur la surface pour remonter à des informations permettant la caractérisation mécanique de la structure ou pour détecter des défauts internes (fissures, décollement, vides) (Fiches [B1-1](#), [B1-4](#)) ;
- 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 avec représentation graphique directe en plan X Z pour un Y donné des armatures et défauts géométriques dont des fissurations d'épaisseurs plurimillimétriques. L'investigation peut concerner une profondeur de 20 à 60 cm de béton, avec des antennes présentant des fréquences dans la gamme du GHz, mais la profondeur d'investigation peut être portée à des distances plus importantes avec des antennes de la gamme du MHz, au détriment de la résolution verticale (Fiches [B6-2](#), [C1-1](#), [C1-2](#), [C1-3](#)) ;
- Les méthodes ultrasonores (auscultation sonore, auscultation par onde de surface, tomographie ultrasonore multi-capteurs ou Ultrasonic 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. Certaines de ces méthodes peuvent atteindre des profondeurs métriques (Fiches [B1-2](#), [B1-3](#), [B1-11](#), [C1-8](#)).
- Les méthodes thermo-infrarouges qui visent à détecter des défauts en analysant les transferts de chaleur qui se produisent à la surface des éléments ; elles sont utilisées selon deux modes :
 - un mode passif où la surface à ausculter est dans un état thermique permettant à l'opérateur de relever à sa surface des différences de température qui peuvent révéler des anomalies
 - un mode actif où l'on applique un échauffement contrôlé afin de repérer et de quantifier les hétérogénéités présentes dans les structures.

Elles sont bien adaptées pour la détection de défauts de taille importante comme des décollements superficiels. Les défauts de surface inférieure à 4 cm² ne sont pas observables à une profondeur supérieure à 2 cm. Les défauts plus grands le sont sous réserve que leur profondeur soit inférieure à 4 cm [3, 4].



En dehors de ces techniques non destructives, il peut être nécessaire de recourir à des investigations destructives appliquées localement, pour valider ces premières techniques, sans porter atteinte à l'intégrité fonctionnelle de l'élément. Il s'agit de :

- perçages
- carottages ([Fiche A1-1](#))
- saignées ou fenêtres par burinage ([Fiche A1-9](#))

Dans tous les cas, ces méthodes devront être les moins intrusives possible et préserver au maximum l'intégrité des armatures rencontrées, en tenant compte du niveau d'exigence demandé, du coût de la démarche et des conséquences d'agression physique au droit des sondages sur la structure.

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

Matériel / Technique	Profondeur de détection maximale (mm)	Domaine d'emploi	Rendement
Marteau	Sub-surface à 1 ^{er} lit d'armature	- Détection de plan de délaminage - Détection de vide - Détection interface réparation	élevé
Scléromètre	Sub-surface	- Évaluation de la dureté et de l'homogénéité de surface d'un parement en béton - Délimitation de zones dégradées	élevé
Thermographie infra-rouge passive	Sub-surface à 1 ^{er} lit d'armature	- Détection de plan de délaminage - Détection de vide	élevé
Radar (antenne GHz)	2,6 GHz : 300 – 350 1,5 GHz : 350 – 500	- Repérage des armatures superficielles - Détection de plan de délaminage pluri-millimétrique - Détection de vide - Détection d'interfaces ou d'anomalies internes - Détection et caractérisation de l'interface opposée au parement (pièces peu épaisses)	élevé
Radar (antenne MHz)	900 MHz : ~900 400 MHz : ~1300	- Repérage des armatures - Détection de plan de délaminage pluri-millimétrique - Détection de vide - Détection d'interfaces ou d'anomalies internes - Détection et caractérisation de l'interface opposée au parement	élevé
Pachomètre ou profomètre Scanner	couramment 70 à 90, voire jusqu'à plus de 150	- Repérage des armatures superficielles	élevé
Scanner	Couramment < 100	- Repérage des armatures superficielles	élevé
Sonique surface	1000 – 1200	- Détection de fissuration - Détection de vide - Détection de l'interface opposée au parement	moyen
Sonique transparence	Couramment 1500 (voire 10 000) Implique accès aux deux faces auscultées	- Détection de fissuration - Détection de vide	moyen
Tomographie sonique / ultrasonique	1000 à 1500	- Détection de fissuration - Détection de vide	moyen à faible
UPE	1000 – 1200	- Détection de fissuration - Détection de vide - Détection de l'interface opposée au parement	faible
Impact-Echo	~1000	- Détection de fissuration - Détection de vide - Détection et caractérisation de l'interface opposée au parement - Détection aciers (avec faible précision)	moyen à faible (en fonction de la problématique)

Les radars avec antenne opérant dans la gamme 1,5 à 2,6 GHz ont une profondeur d'auscultation limitée mais une résolution importante vis-à-vis de la détection de défauts, alors que les radars opérant dans la gamme 400 à 900 MHz ont une profondeur d'auscultation plus importante mais ne peuvent détecter les défauts de petite taille.

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 coffrage, de ferrailage, le cas échéant de précontrainte, et les phasages de bétonnage. Il convient de se méfier des informations recueillies dans des documents non explicitement « conformes à l'exécution » ;
- les différentes opérations de surveillance, telles les inspections détaillées périodiques (IDP) qui permettent un suivi de l'évolution du comportement global de l'ouvrage ;
- les comptes rendus des réunions de chantier pouvant faire états de problèmes, d'incidents ou d'accidents survenus pendant la phase de construction et les réponses qui ont été apportées ;

<p>ÉTAPE 1 ANALYSE DU DOSSIER DE L'OUVRAGE</p>	<ul style="list-style-type: none"> - les fiches d'anomalie et procédures de réparation associées le cas échéant ; - dans certains cas, les différentes formulations de béton employées (nature et dosage du ciment, rapport E/C, adjuvants, etc.) ainsi que les suivis de bétonnage (dont température ambiante et température du béton frais) peuvent s'avérer utiles à la compréhension de certaines pathologies ; - les notes et hypothèses de calcul sont également une source d'informations intéressantes ; - le suivi de la vie de l'ouvrage avec les entretiens spécialisés, travaux de réparation ou de renforcement intervenus dans le cours de la vie de l'ouvrage (ainsi que leurs causes). <p>Tout ceci se base sur l'hypothèse de l'existence de dossiers d'ouvrages bien renseignés, ce qui en pratique n'est pas toujours le cas (informations rarement regroupées en un même lieu).</p> <p>Dans tous les cas de figure, la recherche par les gestionnaires du dossier d'ouvrage est une étape cruciale (et trop souvent négligée) dans la recherche des origines d'une (ou des) pathologie dont souffre un ouvrage. La stratégie d'auscultations non destructives, éventuellement complétées ou partiellement remplacées par des sondages destructifs, seront ensuite mises en œuvre pour essayer de confirmer les informations disponibles et de recueillir les informations manquantes recherchées en fonction des objectifs des consultations.</p>
<p>ÉTAPE 2 INSPECTION DÉTAILLÉE</p>	<p>L'inspection détaillée périodique (IDP), qui présuppose une prise de connaissance du dossier d'ouvrage, constitue la pierre angulaire du suivi des ouvrages. L'IDP consiste au relevé visuel exhaustif de l'ensemble des désordres constatés sur un ouvrage et leurs reports 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.</p> <p>L'inspection s'accompagne généralement d'un moyen d'investigation simple à mettre en œuvre, le sondage au marteau qui permet de détecter – et de reporter sur un plan – les zones « sonnante le creux » sur les parements béton. Le plus souvent, les désordres détectés de cette manière, sur les parements d'origine, correspondent à des débuts d'éclats sur fer consécutifs à la corrosion des armatures sous-jacentes, mais peuvent néanmoins trouver d'autres origines.</p> <p>In 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).</p> <p>À l'instar de l'étude du dossier d'ouvrage, l'inspection détaillée est un élément indispensable d'une étude de diagnostic pour la recherche de l'origine des pathologies dont souffre un ouvrage. Si elle n'est pas à l'origine d'une telle étude, l'inspection (selon le cas, exhaustive ou de parties d'ouvrage) sera la première étape à réaliser, avant la programmation de la mise en œuvre des méthodes d'investigations non destructives et destructives.</p> <p>Ce sont les conclusions de l'inspection détaillée qui préconisent la réalisation d'un diagnostic spécifique permettant de répondre à un questionnement (origine de la pathologie, ampleur du phénomène, etc.).</p> <p>Après inspection et consultation du dossier de l'ouvrage, dans le cas où le chargé d'étude est en capacité d'identifier et de qualifier la pathologie affectant la structure et est en mesure de rédiger le rapport d'inspection sans recours à des investigations complémentaires, il n'y a pas lieu de déployer les procédures d'auscultation.</p> <p>Si la pathologie n'est pas reconnue, on va vers l'étape 3.</p> <p>Les constats visuels pouvant entraîner le déclenchement de l'étape trois peuvent prendre différentes formes, à savoir (liste non exhaustive) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - défaut de réalisation : nid de cailloux important, reprise de bétonnage fortement marquée, forte densité d'aciers apparents corrodés (défauts d'enrobage), etc. - altération physico-chimique : teinte suspecte du béton, trace d'incendie, altération de surface du béton (dé laminage, pelade, déchaussement), schéma de fissuration dense et anarchique, forte densité d'aciers apparents corrodés (sans défaut d'enrobage), etc. - autre : tache ou trace d'humidité, venues d'eau, fissuration atypique, fuites de matériaux, zones sonnante le creux ne pouvant être rattachées à la corrosion des armatures, etc.
<p>ÉTAPE 3 AUSCULTATION</p>	<p>Dans le cadre de la recherche des origines des pathologies observées sur un ouvrage, ou pour obtenir des données quantitatives sur l'ampleur des dégradations, ou pour détecter des vides dans la structure, les deux premières étapes (inspection détaillée et analyse du dossier d'ouvrage) peuvent ne pas se révéler suffisantes et il faut alors passer par l'étape « auscultation ».</p> <p>En fonction des données obtenues aux étapes précédentes et des objectifs assignés à l'étape « auscultation » (recherche de cause, quantification de dégradations, types de défauts suspectés, etc.), le chargé d'étude établit un plan d'auscultation qui permet de définir l'étendue des zones à ausculter et les moyens à utiliser.</p>

Un tel plan constitue une base de travail et sera certainement amené à évoluer en fonction des résultats des investigations menées sur site.

Le déroulement général des investigations est décrit dans le logigramme présenté à la fin du présent document. Pour un ouvrage pathologique, 2 principaux cas de figure se dégagent selon que les anomalies sont suspectées avant ou après la 1^{ère} nappe d'aciers. Il existe un troisième cas, appelé cas 1+2, qui correspond aux situations où les anomalies suspectées ne peuvent être localisées précisément.

Cas 1 - Anomalie superficielle située avant la nappe d'aciers

Les premières étapes ne sont pas suffisantes pour identifier et/ou quantifier la pathologie qui est *a priori* surfacique (comprise entre le parement et le premier lit de ferrailage).

On commence par faire une inspection exhaustive par sondage au marteau pour délimiter et confirmer le report sur plan de l'inspection et ainsi identifier les zones à ausculter afin de porter le diagnostic. Puis l'opération consiste à circonscrire précisément les zones concernées à l'aide de techniques de contrôle non destructives à grand rendement. En fonction du type de pathologie observée, à cette étape, il est possible de déployer différentes techniques, tel que le marteau (maillage resserré), le scléromètre ou la thermographie infra-rouge (TIR) passive [3], s'il existe des transitoires thermiques tels que l'ensoleillement et/ou l'exposition au vent, sur les surfaces concernées, voire la TIR active pour des défauts superficiels (réchauffement artificiel du parement).

À l'issue de cette opération, une troisième étape portant sur l'identification et la quantification de la pathologie est mise en œuvre avec des techniques de contrôle non destructif plus précises et à plus faible rendement (ultrasonores (US), impact-écho ou autre).

Ces mesures pouvant être influencées par la présence d'armature, le repérage des aciers, et marquage sur parement, est réalisé au préalable sur ces zones, par techniques radar ou EM basses fréquences (Fiche E2-1). Les mesures sont alors réalisées au centre des mailles d'armatures pour limiter les artefacts et erreurs d'analyse, ou au droit des aciers en connaissance de cause.

Après analyse des résultats, des sondages destructifs sont réalisés pour relier les observables déduits des mesures aux défauts constatés et ainsi déterminer la ou les cause(s) de ce type d'anomalie.

Cas 2 - Anomalie profonde située au-delà de la 1^{ère} nappe d'aciers

Les premières étapes ne sont pas suffisantes pour identifier et/ou quantifier la pathologie et celle-ci est *a priori* située en profondeur (soit au cœur de la pièce, soit dans l'environnement de la seconde nappe d'acier, voire au contact structure / sol).

On commence par faire une auscultation exhaustive par technique radar pour détecter et localiser toute anomalie à cœur et/ou des défauts de contact à l'interface opposée au parement accessible (contact arrière).

Cette technique par sa polyvalence permet d'une part, d'effectuer une analyse sur la pleine largeur des éléments concernés et au-delà (contact structure / sol) de la pièce concernée et d'autre part, dans le cas où cette technique ne permette pas d'aboutir à un diagnostic, de positionner les aciers en vue de mettre en œuvre d'autres méthode d'auscultation non destructive

L'investigation par technique radar peut concerner une profondeur de 20 à 60 cm de béton, avec des antennes présentant des fréquences dans la gamme du GHz, mais la profondeur d'investigation peut être portée à des distances plus importantes avec des antennes de la gamme du MHz, au détriment de la résolution verticale, lorsque la densité du ferrailage superficiel est suffisamment faible pour le permettre.

Dans ce cas 2 (anomalie profonde) et à la suite du déploiement de la technique radar, deux situations peuvent être rencontrées selon que l'on détecte ou non une anomalie (cf. logigramme) :

– **détection d'anomalie** (au cœur de la pièce ou dans l'environnement de la seconde nappe d'acier, voire au contact structure / sol) :

L'auscultation par la technique radar permet de qualifier et quantifier la zone pathogène. Après analyse des résultats obtenus par cette auscultation, des sondages destructifs sont réalisés pour relier les observables déduits des mesures aux défauts constatés et ainsi déterminer la ou les cause(s) de ce type d'anomalie. Une campagne d'endoscopie, et/ou des prélèvements pour analyse, peuvent être associés aux sondages destructifs pour collecter des informations complémentaires.

Suivant les cas de figure, il peut être intéressant de faire précéder les sondages destructifs par d'autres techniques d'auscultations non destructives, telles que les techniques ultrasonores.

– **non-détection d'anomalie :**

L'auscultation par la technique radar n'a pas permis de détecter la zone pathogène. Des investigations complémentaires basées sur les techniques ultrasonores (US) peuvent être mises en œuvre. Les résultats de ces techniques peuvent être influencés par la présence de vides (arrêt de la propagation des ondes) et une forte densité d'armature ; le repérage des aciers et le marquage sur parement est alors réalisé sur ces zones par techniques radar (aciers de peau des deux faces, éventuels conduits de précontrainte).

Des mesures US par la technique UPE peuvent être réalisées au centre des mailles d'armatures pour limiter les artefacts et erreurs d'analyse.

Après analyse des résultats obtenus par cette auscultation, des sondages destructifs sont réalisés pour relier les observables déduits des mesures aux défauts constatés et ainsi déterminer la ou les cause(s) de ce type d'anomalie. Une campagne d'endoscopie et/ou des prélèvements pour analyse, peuvent être associés aux sondages destructifs pour collecter des informations complémentaires.

En cas de non-détection d'anomalie par les techniques US, il convient de reposer le diagnostic et les hypothèses sur l'origine des désordres.

Cas 1 + 2

Les premières étapes ne sont pas suffisantes pour identifier et/ou quantifier la pathologie et celle-ci peut être aussi bien surfacique que profonde.

Dans un premier temps, on suit la procédure du Cas 1 en utilisant la technique radar pour le repérage des aciers. Les réglages d'acquisition de la technique radar sont tels qu'ils doivent pouvoir également permettre l'auscultation de la structure en profondeur (étape 1 du Cas 2).

Une fois la procédure du Cas 1 terminée, on poursuit par la procédure du Cas 2 en analysant les coupes-temps radar déjà réalisées ou en les complétant si nécessaire.

Après analyse des résultats, des sondages destructifs sont réalisés (éventuellement complétés par une campagne d'endoscopie et/ou de prélèvements pour analyse) pour relier les observables déduits des mesures aux défauts constatés et ainsi déterminer la ou les cause(s) de ce type d'anomalie.

RÉFÉRENTIEL

[1] Breyse D. et Abraham O. Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton armé. Presse des Ponts, 2005.

[2] Garnier V. et Balyssac J.P. Contrôle non destructif pour l'évaluation des ouvrages de génie civil, (éd), ISTE; Londres, GB, 2017.

[3] Cannard H., Mahrez M., Perrin T., Muzet V., Prybyla D., Brachelet F. Utilisation de la thermographie infrarouge pour la détection de délaminations superficielles affectant le béton armé. Bulletin Ouvrages d'art n°73, Cerema, Juillet 2017.

[4] ASTM D4788 :Standard Test Method for Detecting Delamination in Bridge Decks Using Infrared Thermography.

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

[A1-1 Carottage de béton](#)

[A1-9 : Ouverture / fermeture d'une fenêtre](#)

[B1-1 Mesures au scléromètre](#)

[B1-2 Auscultation sonore des bétons](#)

[B1-3 : Tomographie sismique](#)

[B1-4 : Impact écho](#)

[B1-11 : Pulse Echo et tomographie ultrasonore](#)

[B6-2 : Auscultation du support en béton sous le complexe d'étanchéité par technique radar](#)

[C1-1 : Technique radar pour localisation d'armatures](#)

[C1-2 : Technique radar pour localisation de vides](#)

[C1-3 : Technique radar pour mesure d'épaisseur](#)

[C1-8 : Reconnaissance de la géométrie par ondes ultrasonores](#)

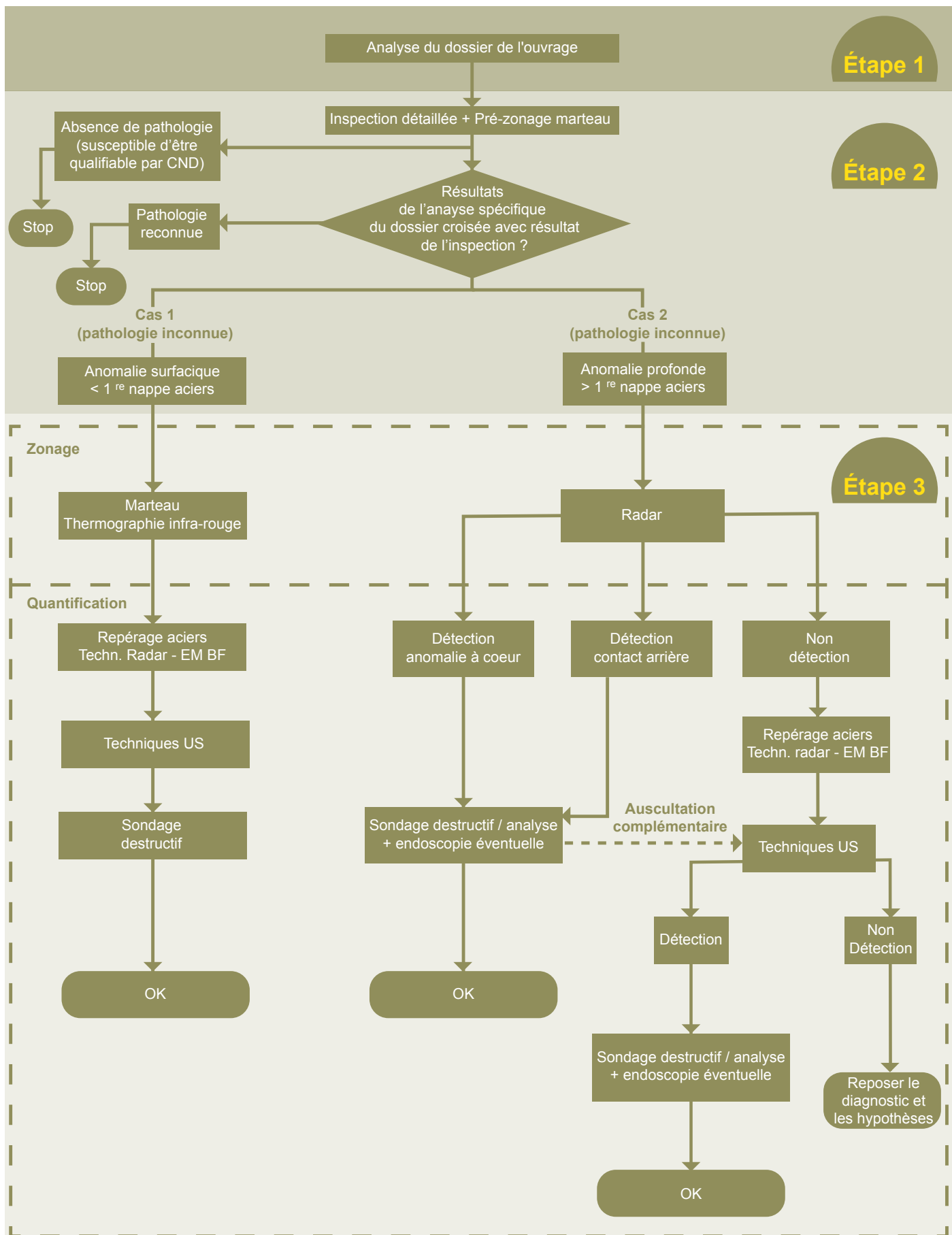
Recueil de méthodologies de diagnostic de l'état des ouvrages d'art :

[E2-1 : Détection et localisation d'armatures passives ou actives dans le béton](#)

LOGIGRAMME

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

D1-8 : DÉTECTION DE DÉFAUTS INTERNES DANS LE BÉTON



Pour rappel : 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 matériels correspondantes). 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 BA ou BP.