DIAGNOSTIC DE LA PRÉCONTRAINTE EXTÉRIEURE PROTÉGÉE PAR DU COULIS DE CIMENT AU CONTACT DES ARMATURES

CONTEXTE

Les câbles de précontrainte extérieure des ouvrages construits ou renforcés avant 2001 sont majoritairement protégés par des conduits en PEHD dans lesquels un coulis à base de ciment directement au contact des armatures a été injecté.

Ces dernières années, des ruptures de câbles extérieurs protégés par du coulis de ciment au contact des armatures ont été observées. Ces ruptures résultent de la corrosion de câbles mal ou non protégés par le coulis de ciment.

Ces défauts de protection ont pour origine :

– des problèmes de formulation (coulis instables) ou de mise en œuvre, et peuvent se traduire par l'absence de coulis, la présence d'air, d'eau avec ou sans produit (pâte) blanchâtre à la surface du coulis ;
– des défauts d'étanchéité des conduits.

Dans le cas de problèmes de formulation de coulis, leur localisation peut être quelconque le long du conduit, mais ils sont de préférence situés dans les points hauts du tracé, les risques d'anomalies augmentant avec l'absence d'évents d'injection dans ces points hauts.

Dans le cas de défauts d'étanchéité des conduits, leur localisation est généralement située au droit des zones de raccordement des conduits (manchons, assemblages soudés, etc.) ou de fissuration des conduits.

L'explication détaillée du premier phénomène, qui concerne essentiellement les coulis très adjuvantés postérieurs à 1980, est décrite dans la note d'information Sétra/LCPC n°21 de juillet 1996 [1].

La note d'information n°29 du Sétra « Note de sensibilisation sur les ouvrages existants à précontrainte extérieure protégée par du coulis de ciment au contact des armatures » [2] vise à informer les différents maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre sur ce phénomène en présentant l'état des connaissances sur le sujet et en faisant des recommandations :

– sur les investigations qui peuvent être réalisées pour évaluer l'état d'une précontrainte extérieure ;
– sur les consignes de sécurité à appliquer ;
– sur la conduite à tenir en cas de doute sur un câble ou en cas de rupture constatée.

Consignes de sécurité

La rupture d'un câble de précontrainte tendu est dangereuse pour les personnes situées à proximité. En cas de rupture, le câble peut fouetter violemment. Le risque de fouettement est théoriquement nul pour les câbles courts (< 40 mètres) et il augmente avec la longueur des câbles et dans la première travée après l'ancrage. De même, en cas de rupture, l'ancrage peut reculer de plusieurs mètres.

Les interventions à proximité des câbles de précontrainte correspondant aux étapes 2 et 3 de la présente fiche, nécessitent donc l'établissement préalable d'un PPSPS ou plan de prévention adapté au cas d'espèce, avec évaluation des risques encourus par le personnel, définissant la mission et le trajet de chacun.

Les consignes générales de sécurité suivantes sont rappelées ci-après :

– *Il convient de ne pas stationner inutilement dans l'ouvrage.*
– *Il convient d'éviter de se placer derrière les ancrages dans l'axe du câble.*
– *Des mesures par auscultations soniques réalisées sur un ouvrage présentant une rupture de câble ont montré que les ruptures de fils constitutifs des torons se produisent plutôt lorsque la température est basse. Il convient de ne pas visiter l'ouvrage si la température extérieure est descendue en dessous de 0°C dans les sept jours qui précèdent l'inspection.*
– *Toute intervention à réaliser sur un conduit présentant des signes extérieurs laissant planer un doute sur l'état de la précontrainte (traces de corrosion aux ancrages, gonflements sur des conduits, etc.), nécessite une réflexion préalable permettant de confirmer la possibilité de l'intervention, ses modalités et les mesures de sécurité particulières à prévoir pour le personnel.*

MÉTHODOLOGIE DU DIAGNOSTIC

ÉTAPE 1 ANALYSE DU DOSSIER DE L'OUVRAGE	**Objectif : analyse préliminaire de l'aléa** On identifiera dans le dossier de l'ouvrage tous les éléments utiles au diagnostic : – procédé de précontrainte et type d'unité (câbles) ; – nature des conduits et de leurs raccordements ; – éventuelles anomalies lors des opérations de mise en tension des câbles de précontrainte, ruptures de torons, etc. ; – composition des coulis (nature et provenance du ciment, nature de l'adjuvant éventuellement employé) et résultats de l'épreuve de convenance ; – méthode d'injection utilisée ; – période d'injection (froide, chaude) ; – ordre et dates d'injection des conduits ; – incidents d'injection éventuellement notés ; – voire les témoignages des personnes ayant contrôlé ou participé aux mises en tension et à l'injection ; – etc.
ÉTAPE 2 INSPECTION DÉTAILLÉE DE LA PRÉCONTRAINTE EXTÉRIEURE ET AUSCULTATIONS « AU MARTEAU »	**Objectif : poursuite de l'analyse préliminaire de l'aléa, localisation des éventuelles zones de défaut d'injection (vides)** Bien que les défauts internes recherchés ne puissent pas être détectés visuellement (conduits opaques), la première étape consiste à réaliser une inspection détaillée des conduits de précontrainte extérieure et des capots d'ancrage, avec auscultations par sondage au marteau. *Note 1 : Les parties de conduits situées en point haut à l'intérieur de déviateurs ou de blocs d'ancrage, dont la longueur peut atteindre plusieurs mètres, ne peuvent être auscultées à ce stade.* *Note 2 : Cette intervention doit se conformer aux règles de sécurité applicables aux interventions sur l'ouvrage.* On relève les défauts externes (fissures, orifices, raccords défectueux, présence de traces de coulis, de bouchons ou de trous, déformations anormales des conduits), notamment ceux pouvant traduire des ruptures des armatures de précontrainte ou des réinjections pendant le chantier. On examine également l'état extérieur des capots de protection des ancrages des câbles de précontrainte (s'ils sont visibles) : – présence de ruissellements ;d'humidité résultant de défauts d'étanchéité ; – présence de rouille sur la surface des capots et sur la tromplaque ; – position et qualité du remplissage des évents ou orifices d'injection ; – présence de coulis à l'extérieur du capot, etc. On examine les évents ou injecteurs intermédiaires, s'il y en a, en vérifiant le niveau de remplissage du coulis et son aspect. On relève la fissuration éventuelle des déviateurs et des massifs d'ancrage et on vérifie l'état des éventuels dispositifs antivibratoires. Le sondage au marteau est réalisé en partie supérieure sur toute la longueur des conduits. On localise et marque les zones « sonnant le creux ». Dans ces zones, le sondage doit être fait sur la périphérie du conduit, afin de préciser si le défaut est partiel (seules les parties supérieures « sonnent le creux » dans ce cas) ou de plus grande ampleur. *Note 3 : Le sondage au marteau est capable de mettre en évidence un vide, lorsqu'on a l'opportunité de sonder au droit de celui-ci ; il est cependant difficile d'interpréter à l'oreille le son émis par le choc du marteau, ce qui laisse à l'inspecteur un doute sur le remplissage effectif du conduit (vide plus ou moins grand ou simple retrait du coulis). L'attention est attirée sur le fait que certains PEHD de fabrication ancienne peuvent durcir et paraître « sonner le creux ». De même, une zone « sonnant le creux » peut traduire un simple décollement du conduit. Par ailleurs, il ne permet pas de se prononcer sur la nature du produit interne au conduit (coulis, pâte blanche, eau).*

ÉTAPE 2 INSPECTION DÉTAILLÉE DE LA PRÉCONTRAINTE EXTÉRIEURE ET AUSCULTATIONS « AU MARTEAU »	**Conclusions de l'étape 2** – En l'absence de mise en évidence de défaut visuel ou sonore, l'ouvrage pourra faire l'objet d'une surveillance périodique normale. – En cas de mise en évidence de défauts d'injection *a priori* significatifs (présence d'une zone "sonnant le creux" significative, traces d'humidité ou de corrosion, présence constatée dans les conduits de vides, de pâte blanche visible au droit de trous d'évents, d'orifices de réinjection ou de fissures, etc.), ou de défauts d'étanchéité des conduits, il est nécessaire de passer à une troisième étape du diagnostic. – En cas de mise en évidence de défauts graves pouvant faire penser à une rupture d'armatures de précontrainte (bosses, excroissances en forme d'hélice par exemple), il est recommandé : – de vérifier dans le dossier de l'ouvrage si des ruptures d'armatures ont été identifiées à la mise en tension, et correspondent aux défauts actuellement constatés (localisation, etc.) ; dans ce cas, l'ouvrage pourra *a priori* faire l'objet d'une surveillance périodique normale ; – éventuellement de procéder au démontage des capots et à la démolition du cachetage, pour examiner les têtes d'ancrage, en faisant appel à une entreprise spécialisée en précontrainte et en formalisant une procédure rigoureuse intégrant les conditions de sécurité liés à l'intervention ; – éventuellement de procéder à quelques clichés gammagraphiques, localisés judicieusement sachant que le lieu de rupture de l'armature peut être éloigné de la zone où se trouve l'excroissance ; un cliché gammagraphique réalisé au droit de cette zone peut cependant tenter de confirmer le nombre de torons détendus, détecter des anomalies du type présence de doigt d'enfilage de toron ; – en cas de confirmation de ruptures d'armatures non identifiées à la construction ou d'impossibilité de conclure, de solliciter l'intervention d'experts qui définiront les modalités de la démarche de diagnostic à mener et les éventuelles mesures immédiates de gestion de l'ouvrage. – En cas de constat de rupture de câble, il convient de sortir de l'ouvrage (cas des caissons), de prévenir immédiatement le gestionnaire. La gestion du diagnostic et des suites à donner (gestion en situation d'urgence) fait obligatoirement appel à des experts.
ÉTAPE 3 AUSCULTATION	**Objectifs : analyse complémentaire de l'aléa, localisation et reconnaissance des zones « douteuses » (vides ou présence possible de pâte blanche) en l'absence de mise en évidence de défaut grave pouvant faire penser à une rupture d'armatures de précontrainte.** Il s'agit de localiser et de reconnaître les zones « de défaut d'injection » avec plus de certitudes, par méthode non destructive (étape 3.1), puis de mettre en oeuvre d'éventuelles investigations complémentaires à partir de l'ouverture d'orifices (étape 3.2), voire de fenêtres (étape 3.3) dans les conduits. On procèdera dans cette troisième étape : – à l'utilisation du capteur capacitif 3CP (MLPC) qui permet de détecter des vides et la présence de pâte blanche dans les conduits sans avoir à les ouvrir ; – à tout autre moyen permettant de donner des informations sur le contenu des conduits (thermographie infrarouge active pour la détection de vides, etc.). – au démontage de capots, si l'opération peut être faite rapidement et sans exercer d'effort important sur les câbles ; – à des observations endoscopiques dans les conduits, à partir d'orifices ou de fenêtres, notamment aux points hauts, près des entretoises sur pile, si cela est possible ; – à l'ouverture de fenêtres dans le conduit sans endommager les armatures et aux prélèvements éventuels de matériaux pour analyse (eau, pâte blanchâtre, produits de corrosion, etc.) ; ces ouvertures de l'ordre de 10 x 25 cm sont à réaliser dans les zones réputées douteuses à l'issue du premier bilan ; l'attention est attirée sur la nécessité de parfaitement refermer les conduits dès la fin des prélèvements ; – à des gammagraphies, etc.

ÉTAPE 3
AUSCULTATION

Auscultation des conduits en section courante

Le capteur capacitif 3CP permet de détecter les vides, en discriminant les simples décollements liés au retrait du coulis et la présence de pâte blanche dans certaines conditions géométriques ; la détection d'eau n'est pas possible.

La thermographie infrarouge active permet quant à elle de détecter les vides, avec une capacité de détection de quelques cm³ selon la sensibilité thermique de la caméra infrarouge utilisée.

Le capteur capacitif, comme la thermographie infrarouge active, doit être mis en oeuvre sur des longueurs importantes de câbles afin d'avoir une vision plus complète des zones de vide et éventuellement de détecter des zones avec présence de pâte blanche :

– passage du capteur « en longitudinal » le long de la génératrice supérieure des conduits ;
– passage du capteur « en circulaire » dans les zones apparaissant douteuses lors du passage « en longitudinal » (si la géométrie le permet).

Conclusions des auscultations en section courante

Deux cas peuvent se produire :

– Si les méthodes ne détectent pas de zone de vide important ou de pâte blanche dans le cas du capteur capacitif, mais confirment la présence de zones de défauts de remplissage autres que le simple décollement entre conduit et coulis, il est recommandé de procéder à l'ouverture de quelques orifices « de confirmation » dans les conduits au droit des zones concernées ; il pourra être étudié la possibilité de réinjection des conduits ; l'ouvrage pourra faire l'objet d'une surveillance périodique normale.
– Lorsque les méthodes confirment la présence d'un vide important ou présument de la présence de pâte blanche dans le cas du capteur capacitif, il est nécessaire de procéder ensuite à l'ouverture du conduit. Dans ce second cas, il est alors procédé systématiquement au perçage d'un orifice (diamètre recommandé de 20 mm) dans le conduit (étape 3.2). Préalablement au perçage, on disposera un récipient à l'aplomb du futur orifice, pour récupérer l'eau susceptible d'en sortir.

Il s'agit de confirmer les doutes en permettant un examen visuel, voire par endoscopie (notamment des zones situées en points hauts du câblage, non directement accessibles).

On examinera :

– la qualité du remplissage ;
– la présence de produits ou pâte blanche, d'eau, de coulis humide ;
– l'état de conservation des armatures de précontrainte.

Si possible, on procédera à des prélèvements de matériaux (eau, pâte blanche, coulis) pour analyses. Des examens in situ peuvent être réalisés immédiatement après l'ouverture du conduit afin que les échantillons ne soient pas modifiés :

– détermination du pH du liquide éventuellement présent ;
– mesures d'oxygène dissout dans l'eau et/ou si possible dans la pâte blanche humide éventuellement présentes.

Examen des têtes d'ancrage pour les capots démontables

Il est procédé :

– à la dépose (par une entreprise spécialisée en précontrainte) des capots d'ancrage ;
– à la démolition éventuelle du cachetage, dans le cadre d'une procédure spécifique rigoureuse formalisant notamment les conditions de sécurité à mettre en œuvre pour procéder à cette opération ;
– et si possible à l'auscultation par endoscopie de la partie de conduit située à l'aval de l'ancrage (en cas de trous excédentaires dans les plaques d'ancrage).

Il est recommandé de disposer un récipient sous le capot pour récupérer l'eau qui est susceptible de s'y trouver et de réaliser un prélèvement pour analyses en laboratoire (pH -une première mesure de pH peut être effectuée à l'aide d'un papier pH-, teneur en chlorures, etc.).

Après démontage du capot, plusieurs actions sont à entreprendre :

– Observation de l'intérieur des capots pour noter la présence d'eau, de produits délétères blanchâtres, de coulis (niveau de remplissage), de graisse et d'huile, de traces de corrosion, etc.
– Observation de l'état du cachetage de la tête d'ancrage : présence ou non d'un cachetage, fissuration du cachetage, présence de produits de corrosion, de traces d'huile, etc.
– Observation de la tête d'ancrage si possible : cette opération est réalisée par l'entreprise spécialisée en précontrainte dans le cas où le remplissage du capot est incomplet ou lorsque le cachetage est fissuré et relativement facile à enlever. On observe alors l'état de la tête d'ancrage (corrosion, etc.), l'état des torons et des clavettes (corrosion, fissures, etc.), les sorties de clavettes pouvant faire craindre une rupture de toron, etc.

ÉTAPE 3
AUSCULTATION

– Auscultation endoscopique si possible : avec certains dispositifs d'ancrage, il est possible d'enfiler un endoscope à travers les orifices de type évents ou lamages lorsque ceux-ci ne sont pas colmatés par le coulis. L'endoscope doit avoir un diamètre suffisamment faible pour pouvoir être enfilé (3 à 4 mm de diamètre pour pouvoir être introduit par un lamage). L'auscultation endoscopique peut permettre d'examiner : la qualité de l'injection, l'étendue des vides d'injection, l'état d'enrouillement et la diminution de section des fils de précontrainte, la rupture éventuelle de torons juste derrière l'ancrage, etc.

Conclusions des auscultations des têtes d'ancrage

– Si les résultats des divers examens, mesures et analyses infirment le risque de corrosion des armatures de précontrainte, il pourra être étudié la possibilité de réinjection des conduits ; l'ouvrage pourra faire l'objet d'une surveillance périodique normale.
– En cas de constat d'anomalies internes et d'impossibilité de réaliser des prélèvements par les petits orifices, on procède ensuite à l'ouverture d'une fenêtre plus importante (par exemple 25 cm x 10 cm) dans le conduit (étape 3.3).

Prélèvements pour examens en laboratoire

Il est possible d'effectuer des prélèvements de coulis (pour examen de sa composition chimique par analyse minéralogique), d'eau (pour la détermination de sa teneur en chlorures, en sulfates et son pH), de pâte blanche (pour la détermination de son pH et de sa teneur en sulfates), de produits de corrosion, voire de torons ou de fils (en cas de torons ou de fils rompus) (examen métallographique et fractographie, etc.).

Les prélèvements devront être réalisés dans les règles de l'art (notamment le conditionnement).

L'accès aux extrémités des armatures de précontrainte peut en outre permettre de réaliser des mesures de potentiel électrochimique des armatures dans leur milieu au droit d'une fenêtre située « en aval » et à proximité de l'ancrage.

Il s'agit d'appliquer une électrode de référence (par exemple Cu/CuSo4) sur le matériau cimentaire humide au niveau des ouvertures réalisées sur les conduits, l'autre borne du voltmètre étant reliée à une des armatures au niveau de l'ancrage (sous réserve de continuité électrique et de non interférence entre réseaux d'armatures actives et passives. Dans ce cas la mesure de potentiel donne des informations sur l'état de l'acier à proximité de l'ouverture sur le conduit.

En fonction des résultats des divers examens, mesures et analyses :

– on décidera des modalités de gestion de l'ouvrage (surveillance renforcée voire haute surveillance avec constitution d'un Comité technique d'experts) ;
– on lancera l'étude d'éventuelles solutions de réparation des câbles ou du remplacement du câblage extérieur de l'ouvrage, etc.

Note 4 : Toute ouverture de conduit doit être suivie par une fermeture rapide de l'orifice ou de la fenêtre pratiqué (soudage de la partie découpée, ou encore mieux demi-coquilles thermo-soudées, etc.), surtout si l'ouvrage se situe dans un environnement préjudiciable vis-à-vis de la corrosion (atmosphère marine, industrielle, etc.). Des préconisations de remplissage pourront être proposées au gestionnaire (ces opérations doivent être exécutées par une entreprise spécialisée en précontrainte).

RÉFÉRENTIEL

[1] Sétra / LCPC, Coulis pour injection de conduits de précontrainte - Note d'information, Série Ouvrages d'art, n° 21 - juillet 1996.

[2] Sétra / LCPC, Note de sensibilisation sur les ouvrages existants à précontrainte extérieure protégée par du coulis de ciment au contact des armatures - Note d'information, Série Ouvrage d'art, n°29 - décembre 2007.

[3] Circulaire 2001-16 du 28 février 2001 relative à la conception de la précontrainte extérieure au béton.

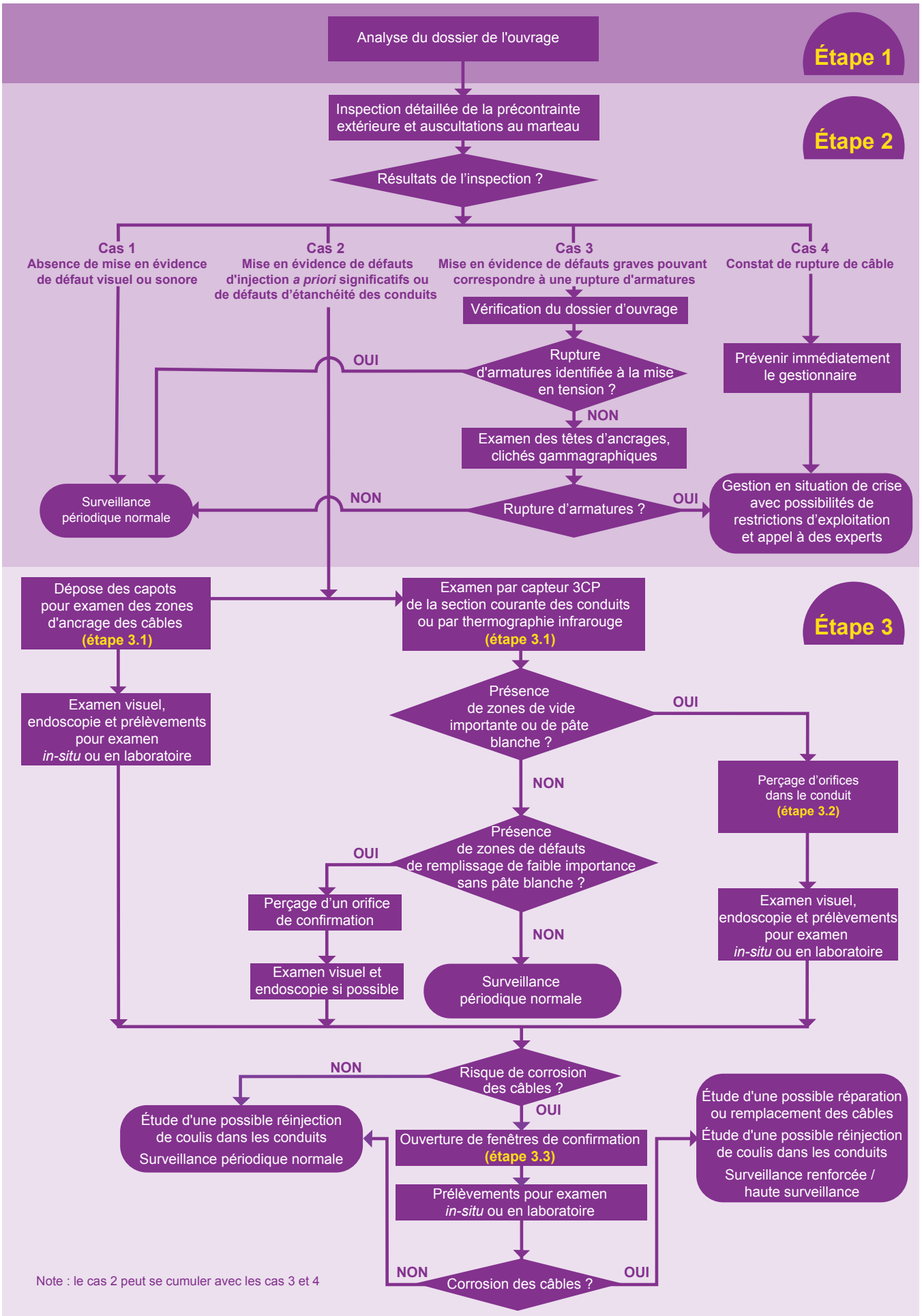
Recueil de méthodes d'auscultation des matériaux et structures d'ouvrages d'art :

A1-2 Analyse minéralogique du béton
A2-1 Examen métallographique et fractographie
B2-3 Prélèvements de poudre de béton pour la mesure de la teneur en agents agressifs
B5-1 Gammagraphie, radiographie et radioscopie
B5-2 Capteur capacitif pour conduit de précontrainte extérieure
B5-7 Thermographie active sur câble de précontrainte extérieure
C1-5 Endoscopie

LOGIGRAMME

Un logigramme ou un schéma décisionnel, visualisant de façon séquentielle et logique les actions à mener et les décisions à prendre pour aboutir au diagnostic résume la méthodologie de diagnostic.

E2-4 : DIAGNOSTIC DE LA PRÉCONTRAINTE EXTÉRIEURE PROTÉGÉE PAR DU COULIS DE CIMENT AU CONTACT DES ARMATURES



Note : le cas 2 peut se cumuler avec les cas 3 et 4