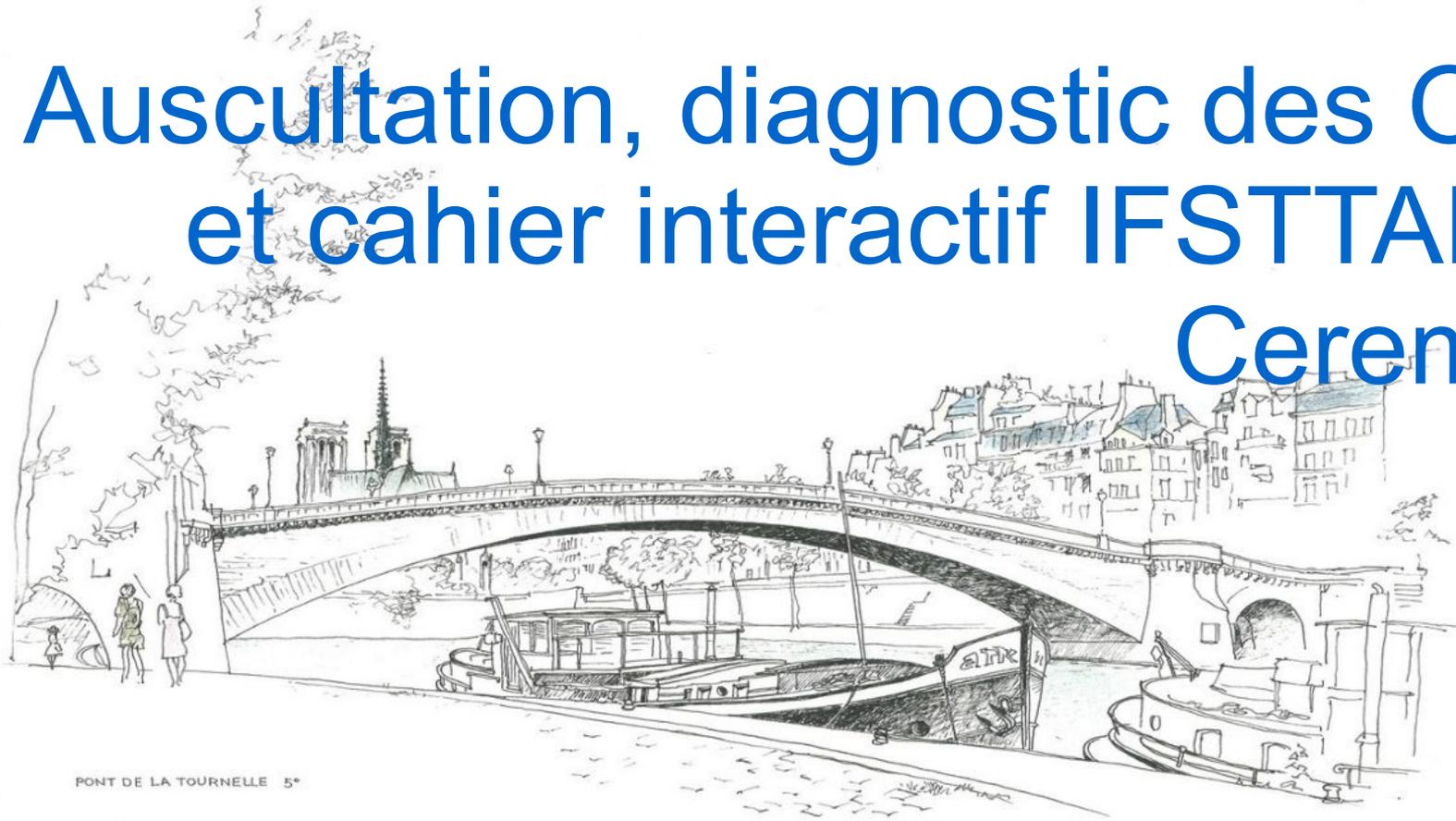


Journée technique – Auscultation et diagnostic des OA

Auscultation, diagnostic des OA et cahier interactif IFSTTAR- Cerema



PONT DE LA TOURNELLE 5°

Sommaire de la présentation

- Contexte et objectifs du cahier interactif IFSTTAR-Cerema « Auscultation des OA »
- Définition et place de l'auscultation
- Présentation du cahier interactif IFSTTAR-Cerema
- Procédures d'auscultation et de diagnostic abordées
- Exemple d'une fiche « méthode d'auscultation »
- Exemple d'une fiche « méthodologie de diagnostic »

Contexte et objectifs du cahier interactif IFSTTAR-Cerema « Auscultation des OA »

Contexte et objectifs

Importance d'une « **bonne** » **gestion** des patrimoines

- diminution des programmes d'investissement,
- vieillissement des ouvrages et **accélération de la dégradation** des matériaux,
- contraintes croissantes liées à l'exploitation des réseaux,
- exigence croissante de sécurité d'usage des infrastructures...

Contexte et objectifs

Littérature technique (en France) pour la gestion patrimoniale des OA

- Sur les inspections (fascicules de l'ITSEOA)
- Sur les évaluations rapides de l'état des ouvrages (fascicules IQOA)
- Sur les réparations (normes NF EN 1504, normes NF P 95-100, divers guides techniques du LCPC, les guides du STRRES)
- Sur la gestion (méthode VSC, Méthode départementale, IQOA)
- Sur les logiciels de gestion (SIAMOA, OASIS, SCANPRINT, AERO

Mais aucun document de référence dans le domaine de l'auscultation, sauf :

- le livre de l'AFGC-COFREND (presses ENPC - 2005) sur la méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton,
- le livre sur la maintenance et la réparation des ponts (presses ENPC - 1997) (cf chapitre 2 sur l'auscultation des ponts).

=> Besoin d'un état de l'art sur les méthodes d'auscultation et d'instrumentation des OA ainsi que de préconisations pour les diagnostics !

Définition et place de l'auscultation

L'auscultation – définition (fascicule 03 de l'ITSEOA)

L'auscultation :

- un ensemble d'examens et de mesures spécifiques
 - faisant appel à des techniques élaborées
 - mieux connaître l'état réel d'un ouvrage
 - pour **aboutir à un diagnostic de sa pathologie.**
- englobe l'instrumentation et la mise en œuvre d'essais, destructifs ou non.
- un outil de pronostic de l'évolution de l'ouvrage et d'estimation de sa durée de vie résiduelle.
 - fait appel à des modèles de vieillissement (paramètres évalués par des mesures et affinés au fur et à mesure du suivi de l'ouvrage).

Note : Utilisation possible de méthodes d'auscultation, avec une fréquence adaptée, pour un suivi du comportement d'une structure (surveillance renforcée ou d'une haute surveillance selon fascicule 03 de l'ITSEOA)

Place de l'auscultation

Quand effectuer l'auscultation ?

- **ouvrage douteux ou défectueux** (cas le plus fréquent) ;
- étude approfondie de la **réparation ou du renforcement** d'un ouvrage (au même titre que les calculs ou recalculs) ;
- suivi des paramètres **caractéristiques du vieillissement** ou de l'endommagement d'un ouvrage (par exemple : indicateurs et témoins de durabilité) ou dans le cadre « d'inspections ciblées », déclenchées à des moments opportuns de façon à favoriser les travaux d'entretien préventif ;
- **modification structurelle** d'un ouvrage en état normal ou quasi-normal (par exemple : élargissement d'un ouvrage en béton nécessitant de connaître l'état, la nature et la position des armatures, la capacité portante des fondations...).

Note : sauf cas d'un diagnostic fiable sans investigation

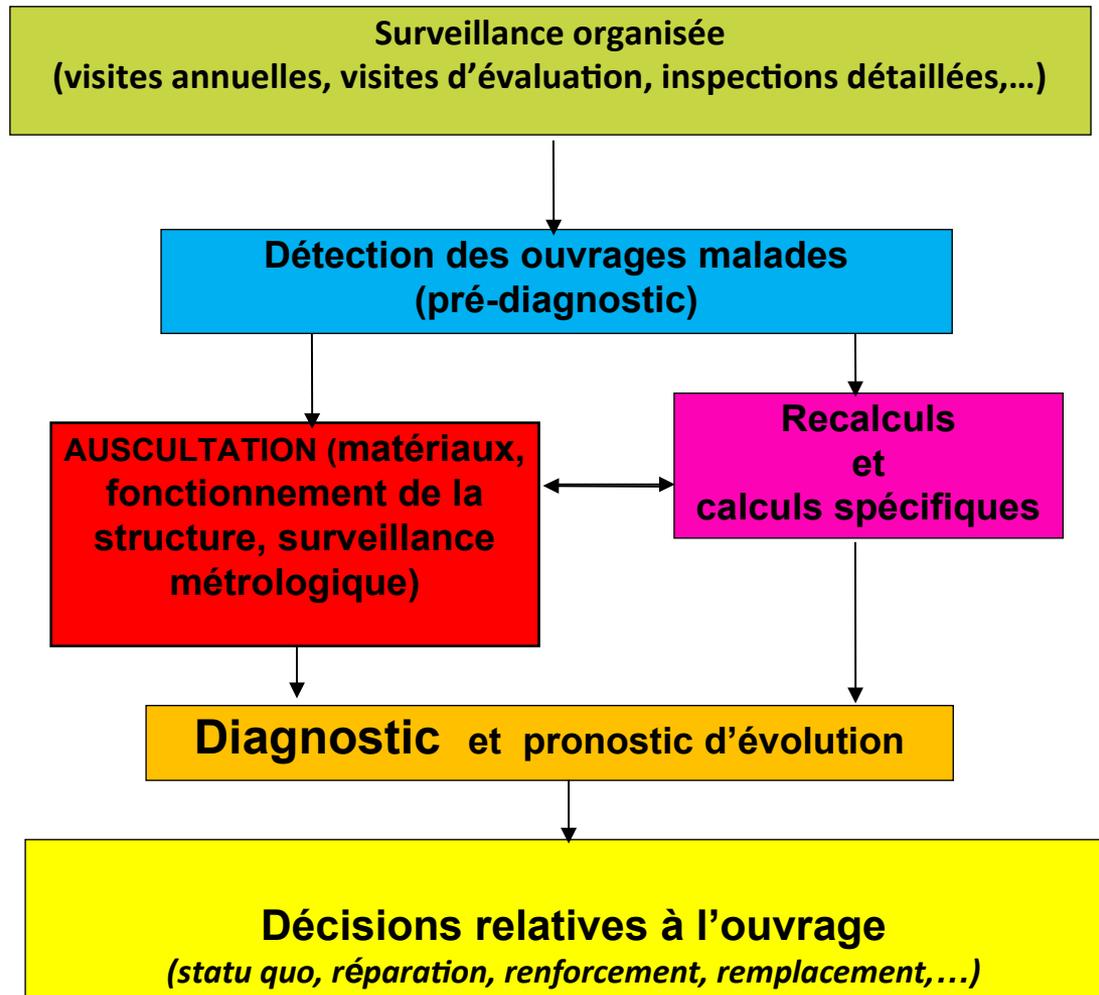
- **ne pas négliger la phase d'auscultation** → gros problèmes en phase travaux d'entretien spécialisé, de réparation, de renforcement ou de modification !

Place de l'auscultation

L'auscultation nécessite :

- une analyse poussée du **dossier d'ouvrage**,
- un examen détaillé des désordres constatés lors des actions de surveillance (dont **inspections détaillées**, récentes !),
 - Avec objectif principaux :
 - d'opérer un **pré-diagnostic** (causes possibles voire probables) de la pathologie présentée par l'ouvrage,
 - pour orienter le choix de la **méthodologie de diagnostic**, de la ou des techniques d'auscultation à appliquer
- l'intervention d'une ou plusieurs **équipes compétentes** (toujours),
- des **moyens spécialisés** ou des techniques de laboratoire (le plus souvent).

Place de l'auscultation au sein du processus de gestion des ouvrages pathologiques



Objectifs de l'auscultation

L'auscultation peut concerner à la fois la structure et ses fondations et peut avoir plusieurs objectifs, notamment les 3 principaux suivants :

- 1 - un bon diagnostic,
- 2 - l'ampleur des désordres,
- 3 - les hypothèses de calculs.

1 - L'établissement du « bon » diagnostic

- pré-diagnostic réalisé à l'issue de l'inspection visuelle pas suffisant pour identifier complètement la pathologie (hormis cas simples) ;
- condition sine qua non avant de s'engager dans une réparation !
 - Absence de diagnostic → solutions de réparation inadaptées ou des techniques de réparation dommageables

Objectifs de l'auscultation

2 - L'évaluation de l'ampleur et de la gravité des désordres

- souvent conjugaison de techniques CND (généralement qualitatives) et de techniques quantitatives appliquées sur des prélèvements,
- évaluation difficile des désordres cachés (exemple : corrosion des câbles de précontrainte d'un VIPP !),
- parfois indispensable :
 - pour choix technique de réparation
 - ou pour déterminer les conditions de sécurité lors des travaux (par exemple : dégradations superficielles dues à la corrosion des armatures de béton armé).

Objectifs de l'auscultation

3 - La définition ou la confirmation d'hypothèses de calcul

- pour **approcher le comportement réel** de la structure
 - exemple : détermination de caractéristiques mécaniques des matériaux bétons, armatures passives...),
 - pour confirmer la **pertinence des modèles de calcul**
 - exemple : vérification des conditions d'appui, rotation effective d'articulations, connaissance des réactions d'appui, vérification du fonctionnement mixte d'une section acier-béton, flèche prise par une travée sous un chargement donné, vérification du fonctionnement transversal d'un tablier à poutres sous chaussées
- Note : certaines caractéristiques impossibles à obtenir dans l'état actuel des techniques d'auscultation (exemple : valeur globale de la résistance résiduelle d'une précontrainte corrodée)...
- pour confirmer les **hypothèses à retenir pour les sols** environnants dans les calculs de soutènements et fondations
 - exemple : connaissance du niveau de la nappe phréatique ; reconnaissance de la géométrie des fondations ; caractéristiques mécaniques des sols).

Nature des investigations

*Rque : **pas de méthodologie générale** d'auscultation applicable à tous les OA.*

Chaque ouvrage est un cas particulier (nature des désordres constatés diff. → Méthodes d'auscultation diff.)

Le pré-diagnostic doit orienter vers des méthodes d'auscultation :

- des **matériaux** en place (pour apprécier leur état ou leurs propriétés),
- de la **structure** (pour analyser son mode de fonctionnement réel ou celui de l'un de ses éléments, à vide et/ou sous chargements).

Les deux possibles au cours d'une même campagne :

- une défectuosité du matériau peut avoir une incidence directe sur le fonctionnement de la structure (par exemple : corrosion d'armatures de précontrainte),
- le mauvais fonctionnement d'un ouvrage pour des raisons structurelles peut se manifester par une détérioration, au moins partielle, de certains des matériaux constitutifs (par exemple fissuration d'ouverture excessive).

Nature des investigations

Rque 1

pas de méthode d'auscultation structurelle permettant l'évaluation directe de la capacité portante d'une structure !

Rque 2

la surveillance métrologique, une aide au diagnostic et surtout au pronostic :

- identification,
- quantification de l'évolution des phénomènes par des mesures au cours du temps.

Moyens d'auscultation de l'état des matériaux

Moyens permettant d'apprécier l'**état des matériaux** :

- les études et analyses sur **prélèvements**,
- les techniques d'examen des **matériaux en place**,
 - soit simples (par exemple : examen visuel, mesure du diamètre résiduel d'une armature passive),
 - soit plus sophistiquées et plus performantes (par exemple : gammagraphie),
- 2 catégories identifiées,
 - ponctuelles,
 - globales.

Moyens d'auscultation de l'état des matériaux

Première catégorie de moyens :

- données quantitatives ou des observations directes, **ponctuelles**,
- caractère partiellement destructif des prélèvements d'échantillons sur ouvrage (recommandé d'extraire des échantillons les plus petits possible, en nombre limité et aux endroits les moins sollicités de la structure).

Deuxième catégorie de moyens (END ou CND) :

- fournit des informations qualitatives sur la **globalité** de la structure,
- méthodes physiques qui fournissent des résultats sous forme de grandeur physique à relier à des grandeurs mécaniques ou géométriques pour pouvoir les interpréter...

Rque : Intérêt de la combinaison de ces deux catégories pour l'auscultation.

- Méthodes non destructives → distribution qualitative des caractéristiques recherchées → positionnement des prélèvements → balayer l'ensemble de la plage de ces caractéristiques et de les quantifier (par exemple : résistance du béton in situ).

Moyens d'auscultation de l'état de la structure

Moyens permettant d'apprécier le **fonctionnement de la structure**

- mesures d'ordre **topométrique ou géométrique** (évolution du nivellement ou mesure de déformation générale ou de déplacement sous chargement),
- **mesures locales** de fonctionnement (mesure de déformation locale, extensométrie, fissurométrie, mesure de contrainte, ...),
- **mesures de forces** (pesée de réaction d'appui, mesure de tension dans les câbles de précontrainte, les haubans...),
- mesures des **facteurs extérieurs influents** (température, hygrométrie, niveau d'eau...).

L'utilisation de ces moyens techniques et l'interprétation des résultats

- recours à des **spécialistes**,
- **association** d'agents spécialisés de laboratoire, de bureau d'études ET du MOE de la réparation.

Programme d'auscultation

- Contenu du programme d'auscultation d'un OA
 - **fixe les objectifs** généraux,
 - précise la **nature des investigations** à effectuer.
- Établi par le laboratoire ou la société en charge de l'auscultation,
- Proposé à la **validation du gestionnaire**,
- souvent après **consultation de spécialistes** ou d'un bureau d'études.

Rque : méthodes d'auscultation souvent coûteuses → nécessité d'optimiser le programme

- procéder à toutes les investigations nécessaires à la détermination des désordres et mécanismes, ainsi qu'à l'établissement du projet de réparation,
- éviter essais et recherches inutiles.

→ Phase de réflexion pour établissement du programme

→ Révision du programme en cours d'exécution, si nécessaire (en fonction des premiers résultats)

Présentation du cahier interactif IFSTTAR-Cerema

Présentation du cahier interactif sur l'auscultation des OA

- Traite des méthodes d'auscultation des ouvrages d'art
 - en incluant celles relatives aux structures, aux fondations, aux équipements et éléments de protection.
 - *Note : il ne traite pas des sols.*
- Traite les matériaux:
 - béton,
 - métal,
 - maçonnerie,
 - bois.
- OA visés : les ponts, les murs de soutènement et les tranchées couvertes (peut aussi s'appliquer -en totalité ou partiellement- aux ouvrages de génie civil, aux bâtiments et aux monuments historiques).

Présentation du cahier interactif sur l'auscultation des OA

2 grandes parties :

- recueil de **méthodes d'auscultation** (matériaux, structures)
 - 1 fiche synthétique par méthode,
- recueil de **méthodologies de diagnostic** à appliquer dans des cas de reconnaissance de structure ou d'éléments de structure, ainsi que dans les cas les plus fréquents ou importants de pathologies.
 - 1 fiche et 1 logigramme

NB : seules les méthodes validées par l'IFSTTAR et le Cerema sont traitées !

Site internet

<http://www.ifsttar.fr/collections/CahiersInteractifs/CII1/index.html>



Collection Cahiers interactifs de l'Ifsttar - Auscultation des ouvrages d'art - CII1



Auscultation des ouvrages d'art

Reconnaissance de l'état de tout ou partie d'un ouvrage et des pathologies associées

A propos de ce cahier

Présentation du cahier et rappels sur l'auscultation des structures d'ouvrages d'art

[Découvrir »](#)

Auteurs et remerciements

Les acteurs de la réalisation de ce cahier

[Consulter »](#)



© Ifsttar 2015

Méthodes d'auscultation

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

[Découvrir »](#)

Méthodologies de diagnostic

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

[Découvrir »](#)

Téléchargement du cahier

Télécharger tout ou partie de ce cahier

[Télécharger »](#)

Conditions d'usage du cahier

Comment utiliser et citer ce cahier

[Consulter »](#)

Séries A B C Séries D E

Procédures d'auscultation et de diagnostic abordées

Méthodes d'auscultation

A - Méthodes d'auscultation sur **prélèvements**

- A1 – Béton (9 fiches)
- A2 – Métal (3)
- A3 – Maçonnerie (1)



B - Méthodes d'auscultation du **matériau en place** (44 fiches)

- Par type de matériau (B1-béton, B2-béton armé, B3-acier, B4-bois)
- Par éléments de structure et de protection (B5-câbles, B6-chapes d'étanchéité, B7-peintures, B8-sol armé)

C - Méthodes d'**auscultation de la structure** (51 fiches)

- C1-Reconnaissance de la géométrie,
- Types de mesure (C2-déformations générales et mouvements, C3-mesures locales de fonctionnement, C4-forces*),
- Essais (C5-essais statiques de chargement et essais dynamiques),
- C6-Auscultations de fondation.

Méthodologie de diagnostic

Classées en 2 catégories :

- Diagnostic de l'état des matériaux (Série D)
- Diagnostic structurel (Série E)

→ Actuellement rédigées, validées et mises en ligne

D – Diagnostic de l'état des matériaux

(D1- béton, D2- acier, D3- maçonnerie, D4-bois, D5- éléments de protection)

- D1-1 Diagnostic de corrosion du béton armé
- D1-2 Diagnostic de la gélivité d'un béton
- D1-3 Diagnostic d'une réaction de gonflement interne du béton
- D1-4 Diagnostic d'un béton dégradé par incendie
- D1-7 Evaluation de la résistance du béton in-situ

Procédure de diagnostic

E- Diagnostic structurel

(E1- problèmes génériques, E2- OA en béton, E3- OA métalliques et mixtes, E4- OA en maçonnerie, E5- OA à câbles, E6- fondations et OA de soutènements)

- E2-1 Détection et localisation d'armatures passives ou actives dans le béton
- E2-4 Diagnostic de la précontrainte extérieure protégée par du coulis de ciment
- E2-5 Evaluation de la tension dans une armature de précontrainte
- E2-6 Evaluation du déficit en flexion d'un pont fissuré en béton précontraint

- E3-1 Analyse du fonctionnement d'une section de pont mixte acier-béton
- E3-2 Evaluation de la durée de vie en fatigue d'une structure métallique
- E3-3 Analyse du fonctionnement des assemblages d'une structure métallique

Procédure de diagnostic

→ en cours de validation ou à finaliser

- D1-X Diagnostic de l'état du béton attaqué par des eaux agressives
- D4-X Expertise de la pérennité des bois mis en œuvre
- D5-X Evaluation de l'étanchéité

- E3-X Diagnostic des VIPP
- E4-X Reconnaissance des caractéristiques géométriques et mécaniques d'une voûte en maçonnerie
- E4-X Reconnaissance des appuis et fondations d'un ouvrage en maçonnerie
- E6-X Diagnostic des pathologies de fondations profondes en béton armé
- E6-X Diagnostic des ouvrages en remblai renforcé par éléments métalliques

Exemple d'une fiche « méthode d'auscultation »

Exemple de fiche « méthode CND » relative à la mesure de tension des câbles à l'arbalète

MÉTHODES D'AUSCULTATION
DE LA STRUCTURE
MESURES DE FORCES



C4-3

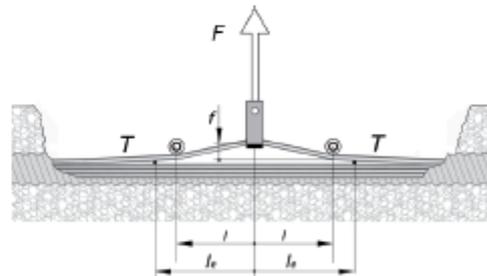
MESURE DE LA TENSION DES CÂBLES ET ARMATURES DE PRÉCONTRAINTE AU MOYEN DE L'ARBALÈTE

PRINCIPE ET DESCRIPTION SOMMAIRE

OBJECTIF

Mesure de la tension résiduelle dans les armatures et câbles de précontrainte intérieure ou extérieure au béton, que ce soit une précontrainte par post-tension ou par pré-tension.

PRINCIPE



Principe de fonctionnement (CEREMA)

Le principe de base du fonctionnement de l'arbalète, illustré par le schéma ci-dessus, est fondé sur le fait que plus une armature est tendue, plus l'effort F nécessaire à la dévier de son tracé d'une flèche f sera important : de fait, c'est la pente de la courbe d'arbalète $F(f)$ qui est exploitée pour évaluer la force de tension T dans l'armature testée.

Dans la pratique, on s'affranchit des effets parasites dus à la raideur en flexion, à la surtension introduite et à la géométrie complexe de la déformée de l'armature par une opération de calibration : l'exploitation des courbes d'arbalète s'appuie en effet sur un faisceau de courbes de référence établi en laboratoire sur le même type d'armatures.

Exemple de fiche « méthode CND » relative à la mesure de tension des câbles à l'arbalète

| | |
|------------------------------------|---|
| CARACTÈRE DESTRUCTIF DE LA MÉTHODE | Partiellement destructif pour les matériaux traversés pour atteindre les câbles (béton, conduit, coulis), mais non endommageant pour l'armature de précontrainte. |
| MATURITÉ | Méthode éprouvée depuis une trentaine d'années |
| MATÉRIEL SPÉCIFIQUE EMPLOYÉ | <p>L'arbalète est constituée d'un châssis métallique qui est posé sur l'armature par l'intermédiaire de deux roulettes, d'un vérin de traction, d'un capteur de force (mesure de F) et d'un capteur de déplacement (mesure de f).</p> <p>Le capteur de force de plage 5 à 30 kN, est adapté à l'usage spécifique de l'arbalète : essais sur fils, torons ou câbles de précontrainte (dans ce dernier cas, il s'agit de câbles constitués de torons toronnés entre eux comme dans le procédé SEEE). La course du capteur de déplacement est de 10 mm, pour mesurer une flèche maximale imposée à l'armature de l'ordre de 3 mm.</p> <p>Le vérin est actionné par une pompe à main.</p> <p>Les deux capteurs sont raccordés à une centrale d'acquisition pilotée par un micro-ordinateur.</p> <p>Divers matériels sont par ailleurs nécessaires pour dégager le béton, découper les conduits de précontrainte (feuillard, tube métallique ou tube en PEHD), et éliminer le coulis présent.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"><div style="text-align: center;"><p>Arbalète pour fils et torons (CEREMA)</p></div><div style="text-align: center;"><p>Arbalète pour câbles (CEREMA)</p></div></div> |



Exemple de fiche « méthode CND » relative à la mesure de tension des câbles à l'arbalète

MODALITÉS D'APPLICATIONS

| | |
|------------------------------------|---|
| DOMAINE D'APPLICATION | <p>Cette méthode de mesure est la seule qui existe pour mesurer la tension dans des câbles de précontrainte intérieurs au béton. L'empattement des arbalètes est différent selon que l'on cherche à mesurer la tension dans des fils ou torons (25 cm) ou des câbles constitués de torons torsadés des anciens procédés CO2 ou F7500T de SEEE (40 cm).</p> <p>On mesure directement le véritable effort existant dans l'armature, et ceci quel que soit le degré de corrosion et donc la section résiduelle d'acier.</p> |
| SUJÉTIONS PRATIQUES D'INTERVENTION | <p>La position réelle du câble de précontrainte, notamment dans les âmes des VIPP, doit parfois être repérée au préalable à l'aide d'un profomètre ou d'un radar portatif.</p> <p>Les fenêtres ont une longueur variable de 40 à 80 cm, selon le type d'armature ou de câble testé, et une largeur d'environ 20 cm. Elles doivent être réalisées avec précaution de façon à éviter tout endommagement du câble de précontrainte.</p> <p>Le pré-découpage du périmètre de la fenêtre est réalisé à l'aide d'une tronçonneuse à béton sur les 2 à 3 premiers centimètres. Le dégagement du conduit est ensuite effectué progressivement à l'aide d'un burin et d'un marteau, ou d'outils mécaniques légers. L'ouverture du conduit est exécutée à l'aide d'un ciseau à métal ou d'un autre dispositif adéquat.</p> <p>La fenêtre est rebouchée à l'aide d'un produit de ragréage approprié (bonne tenue verticale, mortier à retrait compensé, bonne adhérence à l'ancien béton).</p> |
| LIMITES D'UTILISATION | <p>La méthode devient difficile à appliquer lorsque le câble est situé à une profondeur dans le béton supérieure à 20 cm (par exemple dans les goussets des caissons).</p> |
| PRÉCISION ET/OU SENSIBILITÉ | <p>L'incertitude sur la tension évaluée par un essai à l'arbalète dépend de nombreux facteurs dont le type d'armature, les conditions de la calibration et la qualité des courbes d'arbalète : elle ne peut donc être annoncée <i>a priori</i>. Elle reste toutefois généralement comprise dans une fourchette de +/- 2% de l'effort évalué.</p> |
| PERSONNEL ET COMPÉTENCES | <p>Un chargé d'investigations ayant l'expérience de la méthode, accompagné d'un agent d'investigations.</p> |

Exemple de fiche « méthode CND » relative à la mesure de tension des câbles à l'arbalète

| CARACTÉRISTIQUES OPÉRATOIRES | |
|---|---|
| ACCÈS À 1 OU 2 FACES | Accès à une seule face |
| COUPURES OU RESTRICTIONS DE CIRCULATION NÉCESSAIRES | Non, sauf usage d'un moyen d'accès aux fenêtres le nécessitant. |
| RENDEMENT ET/OU ÉCHANTILLONNAGE | 6 à 12 mesures par jour sur les fils ou torons, 1 à 4 sur les câbles (sur la base de fenêtres déjà ouvertes). Echantillonnage : une ou plusieurs fenêtres sur les poutres ou des éléments de structures représentatifs. Pour les VIPP, les fenêtres sont réalisées de préférence en sous-face des talons à mi-travée, ainsi que sur les âmes à proximité de l'about des poutres ; des recommandations pour l'implantation et la réalisation des fenêtres d'accès aux câbles de précontrainte sont donnés dans le guide VIPP cité en référence. |
| DÉLAIS DE DISPONIBILITÉ DES RÉSULTATS | Pour assurer la meilleure précision, les courbes d'arbalète sont exploitées au bureau, au retour du chantier. |
| PERTURBATIONS DU TRAFIC SUR LES MESURES | Aucune |
| PERTURBATIONS DE L'ENVIRONNEMENT SUR LES MESURES | Aucune |
| RISQUES POUR LES UTILISATEURS OU LE PUBLIC | Pas de problème de sécurité |
| ENCOMBREMENT – POIDS | Matériel portable, autonome et léger. Courant secteur 220V non indispensable, sauf pour outils de démolition utilisés. |

Exemple de fiche « méthode CND » relative à la mesure de tension des câbles à l'arbalète

| AVANTAGES - INCONVÉNIENTS | |
|---------------------------------------|--|
| AVANTAGES | Seule méthode « non destructive » permettant de mesurer une tension dans des armatures de précontrainte intérieure. |
| INCONVÉNIENTS | Méthode nécessitant des ouvertures de fenêtres dans le béton. Une réparation soignée limite cependant l'impact esthétique final des démolitions nécessaires. |
| DISPONIBILITÉ - COÛT | |
| DISPONIBILITÉ | Faible (méthode pratiquée par moins de cinq laboratoires en France) |
| COÛT | Moyen |
| RÉFÉRENCES | |
| NORMES – MODES OPÉRATOIRES – ARTICLES | Mesure de la tension des armatures de précontrainte à l'aide de l'Arbalète – Techniques et Méthodes des LPC, Guide technique, LCPC, novembre 2009, 23p. Viaducs à travées indépendantes à poutres précontraintes (VIPP), Guide méthodologique de surveillance et d'auscultation. Techniques et Méthodes des LPC, Guide Technique, LCPC, 2001, 72 p. |

Exemple d'une fiche « méthodologie de diagnostic »

Exemple d'une méthodologie de diagnostic : évaluation de la tension dans une armature de précontrainte

DIAGNOSTIC STRUCTUREL
OUVRAGES EN BÉTON

E2-5



ÉVALUATION DE LA TENSION DANS UNE ARMATURE DE PRÉCONTRAINTÉ

CONTEXTE

On entreprend généralement la mesure de tension des armatures de précontrainte pour s'assurer de la pérennité d'ouvrages en béton précontraint ayant plus de 25 ans. De telles reconnaissances sont en effet souhaitables car la perte de précontrainte ne s'accompagne pas toujours d'effets visibles. Il n'en reste pas moins que le gestionnaire d'ouvrage doit, vu le coût des réparations, disposer d'informations précises pour définir suffisamment tôt un programme de réparation.

La méthode de mesure de la tension d'une armature de précontrainte dépend de la nature du procédé de précontrainte. L'objet de la présente procédure est de guider vers les méthodes existantes selon la situation à traiter. Cette procédure ne concerne pas les tirants utilisés dans les soutènements.

De façon générale, la situation à traiter est analysée suivant :

- la nature de la précontrainte : intérieure ou extérieure ;
- la nature de produit utilisé pour les injections : coulis de ciment ou produit souple (cire ou graisse) ;
- et l'accessibilité des têtes d'ancrage : accessibles ou non.

Exemple d'une méthodologie de diagnostic : évaluation de la tension dans une armature de précontrainte

MÉTHODOLOGIE DU DIAGNOSTIC

ÉTAPE 1 ANALYSE DU DOSSIER DE L'OUVRAGE

Plusieurs informations capitales pour la suite de l'opération doivent être réunies lors de cette analyse :

- l'âge de l'ouvrage : à défaut d'autres informations disponibles afin de formuler des hypothèses sur la nature des armatures et leur procédé de mise en œuvre ;
- les conditions d'accès aux armatures de précontrainte : tracés des câbles, profondeur du câble au sein du béton, nature des conduits, méthode d'injection utilisée et résultats de l'épreuve de convenance à la construction ;
- la nature des armatures à tester : simple fil, armatures de type sigma ovale du procédé KA, câble à fils parallèles, câble à torons, câble constitué de torons toronnés entre eux (procédé CO2), etc. ;
- le diamètre des fils ou torons constituant l'armature ainsi que la nuance des aciers utilisés ;
- le procédé d'ancrage : fils boutonnés, câbles « filés », système STUP, ancrage par clavettes, etc. ;
- les valeurs relevées sur les fiches de mise en tension (lorsqu'on peut les retrouver) ;
- le cas échéant : résultat de campagnes de mesures antérieures.

D'autres informations sont susceptibles d'orienter la démarche :

- les résultats des mesures de coefficients de transmission ;
- d'éventuelles anomalies lors des opérations de mise en tension des câbles de précontrainte ;
- la composition des coulis (nature et provenance du ciment, nature de l'adjuvant éventuellement employé) ;
- la période d'injection (froide, chaude), ordre et dates d'injection des conduits, chauffage éventuel du coulis avant l'injection ;
- les incidents d'injection éventuellement notés ;
- voire les témoignages des personnes ayant contrôlé ou participé aux mises en tension et à l'injection.

ÉTAPE 2 INSPECTION DÉTAILLÉE

Celle-ci est rappelée pour mémoire. Elle précède l'auscultation et permet d'examiner l'état apparent de la précontrainte, de vérifier la cohérence des plans, de détecter d'éventuels problèmes de mise en œuvre de la précontrainte qui auraient pu avoir lieu lors de la construction, de prendre les côtes nécessaires, d'aider à positionner les fenêtres, etc.

Exemple d'une méthodologie de diagnostic : évaluation de la tension dans une armature de précontrainte

Définition d'un plan d'auscultation

En fonction de la nature de la précontrainte (intérieure ou extérieure), des résultats de l'analyse du dossier et des constatations effectuées lors de l'inspection détaillée (nature du produit de protection des armatures, coulis ou produit souple, existence de clavettes permettant de réamorcer une mise en tension depuis les ancrages), on pourra choisir la méthode d'évaluation la plus appropriée et définir le contenu de l'intervention.

Évaluation par pesée au vérin creux

Il arrive exceptionnellement que la tête d'ancrage d'un câble de précontrainte soit conçue pour permettre le suivi régulier de la tension par pesée au vérin creux (cas de l'injection de la tête et du câble par un produit souple). Il faut pour cela disposer d'une longueur de câble suffisante en deçà de l'ancrage pour pouvoir y fixer, soit directement le vérin, soit une rallonge d'armature avant de mettre le vérin : cela suppose d'avoir prévu *a priori* d'effectuer ce type de mesure au moment de la construction de l'ouvrage. Peu de ponts à ce jour ont été conçus avec cet objectif secondaire d'auscultation, mais on trouve de telles dispositions pour les tirants actifs des rideaux de palplanche¹. La pesée d'une armature au niveau de la tête d'ancrage consiste à allonger l'armature. Une chaise d'appui est engagée sur la tête d'ancrage pour exercer une traction axiale en tête. Fort de ce dispositif, il est possible de tracer la courbe donnant la force exercée par le vérin en fonction du déplacement de la tête d'ancrage. La courbe obtenue (similaire à celle fournie par le matériel COMET 2 qui sert à mesurer les coefficients de transmission lors de la mise en tension des câbles) présente deux parties bien distinctes dont la seconde partie est quasi rectiligne. La tension d'ancrage s'obtient en extrapolant cette droite pour une valeur de déplacement nulle (ordonnée à l'origine). La figure 1 illustre les courbes de montée et de descente en tension d'une barre, la force dans la barre étant la moyenne des deux valeurs fournies par l'intersection des deux droites verte (montée) et rouge (descente) avec l'axe des ordonnées.

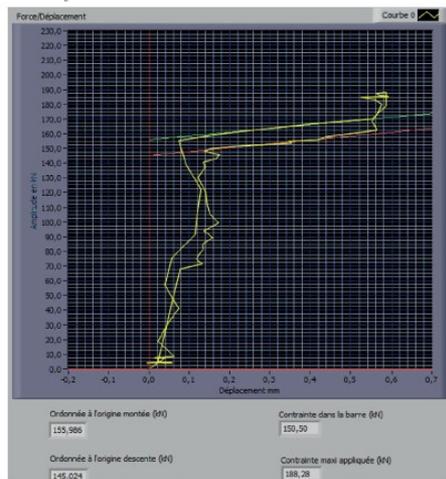


Figure 1 : exemple de courbe de pesée donnant la force moyenne dans une barre (150,50 kN)

Exemple d'une méthodologie de diagnostic : évaluation de la tension dans une armature de précontrainte

Évaluation par analyse vibratoire

Dans le cas d'une précontrainte extérieure injectée au coulis de ciment, on peut mesurer [la tension d'un câble par analyse vibratoire](#). En effet, l'analyse spectrale de la réponse d'un câble à un choc ou à des oscillations entretenues met en évidence la fréquence des premiers modes propres. En faisant l'hypothèse que les premiers modes propres du câble sont les modes de flexion, on peut s'appuyer sur l'expression théorique de la fréquence propre, qui fait intervenir la tension du câble.

La mesure de tension des câbles de précontrainte extérieure par analyse vibratoire, lorsqu'elle est possible, est peu coûteuse et donne des résultats immédiats ; elle suppose que les câbles soient injectés au coulis de ciment et aient une longueur libre d'au moins huit mètres. La présence de cire ou de graisse, ou l'absence totale de produit d'injection dans la gaine, empêche l'application de ce type de méthodes.

Ce type de méthode peut également être mis en œuvre pour des câbles plus courts. Il est alors nécessaire d'introduire l'influence de la raideur du câble (ensemble armatures + coulis + gaine), mais ceci est affaire de spécialiste.

En outre, il ne faut pas négliger la difficulté que représente la juste estimation de la longueur du câble en vibration, et la difficulté d'estimer la masse linéique du câble (sa raideur le cas échéant).

Exemple d'une méthodologie de diagnostic : évaluation de la tension dans une armature de précontrainte

Évaluation par ouverture de fenêtre et mesure de tension avec l'arbalète

Dans le cas de la précontrainte intérieure, et dans le cas de la précontrainte extérieure injectée par un produit souple ou en l'absence de prise sur l'armature au niveau des ancrages, la mesure de la tension résiduelle ne peut être effectuée qu'en utilisant la méthode dite de l'« arbalète ». La [méthode de l'arbalète](#) consiste à exercer une déviation du câble puis à tracer la courbe caractéristique effort transversal-flèche mesurée. On montre par la théorie de l'élasticité que l'analyse de cette courbe permet d'apprécier la tension du câble.

Il convient naturellement, pour pratiquer cette méthode, de dégager préalablement les armatures non seulement de la gaine et du coulis, mais aussi éventuellement du béton (précontrainte interne, à fil adhérent ou non). Il faudra, dans ces derniers cas, pratiquer des ouvertures dans la structure depuis un parement pour dégager une fenêtre de dimension suffisante pour atteindre plusieurs câbles par une même ouverture, en s'appuyant sur les plans de câblage.

La dimension de la fenêtre :

- en longueur (c'est-à-dire dans le sens des câbles), varie entre 60 cm et 1 m, pour les gros torons et câbles ;
- et en largeur, est fonction du nombre de câbles.

On trouve généralement les armatures de précontrainte à moins de 30 cm du parement, ce qui donne la profondeur maximum des ouvertures à pratiquer ; on est souvent plus près de 15 cm de profondeur en post-tension, voire quelques centimètres en pré-tension.

Dans la plupart des cas, une reconnaissance par [pachomètre](#) ou [radar](#) est requise pour s'assurer de la position des câbles avant ouverture des fenêtres. Lorsqu'une campagne de [gammagraphie](#) a été préalablement réalisée, il est pertinent d'utiliser les résultats pour implanter les fenêtres.

Rappelons que les armatures peuvent être suffisamment dégradées (ou simplement détendues) pour rendre superflue toute mesure quantitative de la tension résiduelle.

Précautions particulières

En cas de rupture, un câble de précontrainte extérieure peut se détendre violemment et l'ancrage peut reculer de plusieurs mètres. Il convient donc d'éviter de se placer derrière les ancrages dans l'axe du câble. Le risque de fouettement est théoriquement nul pour les câbles courts (moins de 40 mètres) mais il augmente avec la longueur des câbles et dans la première travée après l'ancrage. Il convient donc de ne pas stationner inutilement dans l'ouvrage. À cette fin, un plan d'intervention définissant la mission et le trajet de chacun doit être établi.

Le positionnement des fenêtres doit être judicieux afin que la mesure soit représentative des sections à vérifier (une mesure en travée de rive est, par exemple, à éviter s'il s'agit de vérifier le milieu de travée centrale).

Les opérations d'ouvertures de fenêtres, réduisant la section de béton sous charges permanentes, sont à éviter sur les poutres de petites dimensions.

ÉTAPE 3
AUSCULTATION

Exemple d'une méthodologie de diagnostic : évaluation de la tension dans une armature de précontrainte

Évaluation de la mesure

Caractère plus ou moins local de la mesure

Outre les pertes évaluées classiquement à la construction des ouvrages, la tension des armatures est une grandeur susceptible de varier d'une extrémité à l'autre d'une armature, par suite des longueurs de ré-ancrage et plus généralement des interactions entre fils, torons, armature et coulis, armature et béton. Une mauvaise qualité d'injection peut en particulier introduire des différences de tension importantes entre deux points (pas forcément très éloignés l'un de l'autre) d'un même câble.

La pesée donne la tension à l'ancrage ; la méthode vibratoire donne, par nature, une mesure de la tension moyenne entre deux déviateurs, deux dispositifs anti-vibratoires ou deux massifs d'ancrage ; enfin la méthode de l'arbalète donne une mesure locale de la tension de l'armature.

Incertitude de mesure

La méthodologie employée permet d'afficher respectivement, pour les deux méthodes « [vérin creux](#) » et « [vibratoire](#) », une précision de l'ordre de 1 % et 5 %. Ces types de mesures peuvent être effectués plusieurs fois de suite pour s'assurer de la fidélité de la mesure, en l'assortissant notamment d'une analyse statistique. La bonne précision apparente de la mesure laisse cependant une large plage d'incertitudes sur la tension réelle dans le câble dans les sections à vérifier ; un calcul en fourchette est recommandé, tout particulièrement si la mesure est effectuée loin des sections à vérifier.

Interprétation au niveau de la structure

Il est recommandé de comparer les résultats des mesures aux tensions théoriques du dossier d'ouvrage ou à un recalcul prenant en compte les hypothèses de tension et de pertes existant à l'époque de la construction.

Exemple d'une méthodologie de diagnostic : évaluation de la tension dans une armature de précontrainte

RÉFÉRENTIEL

Dantec P., Dargenton J-C. et al. Notice d'utilisation de COMET2 V 1.33, contrôleur de mise en tension, CECP d'Angers, 2006, 92p.

Mesure de la tension des câbles par vibration, Paris : LCPC, 1993, Méthode d'essai des laboratoires des ponts et chaussées, ME35, 15p.

Robert J.L. et al. Mesure de la tension des câbles par méthode vibratoire, Bulletin des Laboratoires des ponts et chaussées, n° 173, Mai-Juin 1991, pp 109-114.

Mesure de la tension des armatures de précontrainte à l'aide de l'Arbalète, Paris : LCPC, 2009, Techniques et méthodes des Laboratoires des ponts et chaussées, Guide technique, GTARBA, 23p.

Godart B. et Tonnoir B. Les essais de chargement des ouvrages in Colloque IREX des 25 et 26 novembre 2003 : Auscultation, diagnostic et évaluation des ouvrages - L'apport des essais, des contrôles et des différents modèles pour l'estimation de la durée de service, 15p.

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

[B2-1 Mesure de la profondeur d'enrobage et du diamètre des aciers](#)

[B5-1 Gammagraphie, radiographie et radioscopie](#)

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

[C4-1 Pesée de tirant ou de suspente](#)

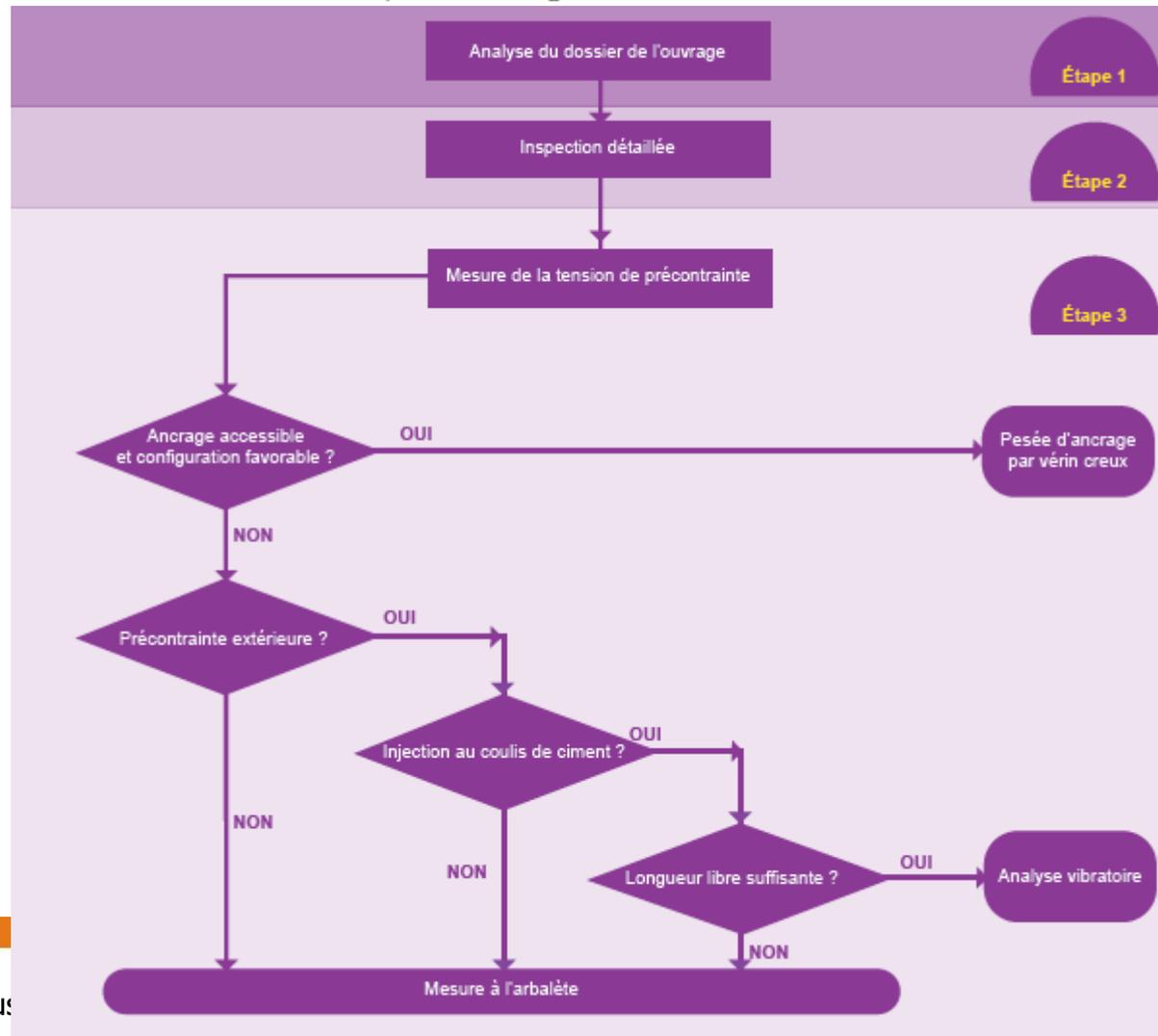
[C4-2 Estimation de la tension des câbles par méthode vibratoire](#)

[C4-3 Mesure de la tension des câbles et armatures de précontrainte au moyen de l'arbalète](#)

Exemple d'une méthodologie de diagnostic : évaluation de la tension dans une armature de précontrainte

LOGIGRAMME

Un logigramme ou un schéma décisionnel, visualisant de façon séquentielle et logique les actions à mener et les décisions à prendre pour aboutir à l'évaluation de la tension est donné ci-après à titre de guide.



Merci pour votre attention

