

Guide technique

Épreuves de chargement des ponts-routes et passerelles piétonnes



pages laissée intentionnellement blanche

Guide technique

Épreuves de chargement des ponts-routes et passerelles piétonnes



collection les outils

Nous remercions tous ceux qui ont contribué à ce document pour leur aide, leurs remarques ou leurs observations, et notamment :

Pierre Trouillet (R/CA), Daniel Poineau (Sétra), Claude Bois (MISOA), Jean-Michel Lacombe (DREIF/DEITOA).

Document réalisé par :

- Dominique Cochet (CETE de l'Est)
- Pierre Corfdir (CETE de l'Est)
- Gérard Delfosse (Sétra/Division de la Méthodologie)
- Yann Jaffré (Sétra/Division de la Méthodologie)
- Thierry Kretz (LCPC)
- Gilles Lacoste (Sétra/Division de la Méthodologie)
- Daniel Lefaucheur (Sétra/Division des Grands Ouvrages)
- Vu Le Khac (Sétra/Division des Logiciels et Ouvrages types)
- Michel Prat (Sétra/Mission Recherche et Réglementation)

Sommaire



1. Objet des épreuves	5
1.1 - Finalité du guide	5
1.2 - Les épreuves et la réception des ouvrages	5
1.3 - Rappel des objectifs des épreuves	6
1.4 - Contexte réglementaire	6
1.5 - Ouvrages soumis à contrôle	7
1.6 - Ouvrages réparés ou renforcés	7
2. Charges d'épreuve et grandeurs mesurées	8
2.1 - Charges de chaussée	8
2.1.1 - Charges générales statiques	8
2.1.2 - Charges générales dynamiques	9
2.1.3 - Charges locales routières	9
2.2 - Trottoirs et pistes cyclables	10
2.3 - Passerelles piétonnes et cyclables	10
2.4 - Grandeurs physiques mesurées	11
3. Organisation des épreuves par le maître d'œuvre	12
3.1 - La place des épreuves dans la construction des ouvrages	12
3.2 - Les épreuves, éléments de contrôle	13
3.3 - Les acteurs des épreuves	13
3.4 - Déroulement des épreuves	13
3.4.1 - La note de calculs	13
3.4.2 - Le programme des épreuves et l'organisation des chargements	13
3.4.3 - Les moyens mis en œuvre pour effectuer les mesures	14
3.4.4 - Examen préalable de la structure	14
3.4.5 - La vérification des charges appliquées	15
3.4.6 - Le chargement de l'ouvrage et les mesures	15
3.4.7 - Examen après les épreuves	16
3.4.8 - Analyse des résultats et validation après les épreuves	16
3.4.9 - Cas de certains ouvrages	16
4. Note de calculs des épreuves et analyse des résultats	17
4.1 - Hypothèses de calculs des épreuves	17
4.2 - Note de calculs des épreuves	17
4.4.1 - Préalablement aux essais	17
4.4.2 - Postérieurement aux essais	18
4.3 - Analyse des résultats	18

5. Réalisation des mesures et présentation des résultats	19
5.1 - Informations nécessaires à une bonne instrumentation	19
5.1.1 - Caractéristiques géométriques et topographiques	19
5.1.2 - Programme de mesures	19
5.2 - Nature des mesures possibles	20
5.2.1 - Généralités sur les caractéristiques métrologiques	20
5.2.2 - Mesures de déplacement	20
5.2.3 - Mesures de déformation	20
5.2.4 - Mesures de rotation	20
5.2.5 - Mesures de vibration	21
5.2.6 - Pesées	21
5.3 - Présentation des résultats	21
6. Programmes d'épreuve pour les ouvrages d'art courants	22
6.1 - Ponts-cadres et portiques	22
6.1.1 - Examen préalable de la structure	22
6.1.2 - Note d'hypothèses	23
6.1.3 - Note de calculs	23
6.1.4 - Programme de chargement	23
6.1.5 - Interprétation	23
6.1.6 - Possibilités d'épreuves allégées	23
6.2 - Ponts-dalles, ponts à nervures larges	24
6.2.1 - Examen préalable de la structure	24
6.2.2 - Exemple de programme de charges	24
6.3 - Ponts à poutres sous chaussée	26
6.3.1 - Examen préalable de la structure	26
6.3.2 - Note d'hypothèses	26
6.3.3 - Note de calculs	26
6.3.4 - Programme de chargement	26
7. Spécificités des ouvrages non-courants	27
7.1 - Tabliers reposant sur des appuis rigides	27
7.1.1 - Tabliers rigides en torsion et indéformables transversalement	27
7.1.2 - Tabliers souples en torsion et rigides transversalement	28
7.1.3 - Tabliers déformables transversalement	28
7.1.4 - Ponts courbes et biais	28
7.2 - Ouvrages complexes	29
7.3 - Comportement local	31
7.4 - Pesée de réactions d'appui	31
Annexe 1 - Clauses types de CCTP	32
Annexe 2 - Fiches techniques sur les matériels de mesure et domaine d'emploi	39

1. Objet des épreuves



1.1 - Finalité du guide

Ce guide est destiné aux maîtres d'ouvrage et aux maîtres d'œuvre, aux ingénieurs des bureaux d'études et des laboratoires qui ont à commander, concevoir, organiser, réaliser, et interpréter les épreuves sous charges des ponts routiers et des passerelles piétonnes, préalablement à leur réception. Il doit également constituer la base d'un document normatif en accompagnement de l'Eurocode EN 1991-2. En l'attente d'un statut juridique, les prescriptions du présent guide doivent être reprises dans les marchés liant les intervenants au maître d'ouvrage. À cette fin, il est structuré en différents chapitres précisant successivement le rôle de chacun. Des clauses types correspondantes sont proposées et regroupées en annexe pour les marchés d'ingénierie et de travaux.

1.2 - Les épreuves et la réception des ouvrages

La réception est l'acte par lequel le maître de l'ouvrage déclare accepter l'ouvrage avec ou sans réserve (Code Civil, article 1792). La date d'effet de la réception marque le début :

- d'une part, de la garantie contractuelle dite de "parfait achèvement des travaux" visée par l'article 44-1 du CCAG,
- d'autre part, des responsabilités visées par l'article 45 du CCAG et résultant des principes dont s'inspirent les articles 1792 et 2270 du Code civil et qui visent la "responsabilité décennale",
- enfin, des garanties contractuelles particulières (par exemple, la protection anticorrosion) visées par l'article 43-3 du CCAG.

La garantie de "parfait achèvement", à laquelle est tenu l'entrepreneur pendant un délai d'un an, à compter de la réception, s'étend à la réparation de tous les désordres signalés par le maître de l'ouvrage, soit au moyen de réserves mentionnées au procès-verbal de

la réception, soit par la voie de notifications écrites pour ceux relevés postérieurement à la réception. À ce titre, l'entrepreneur doit :

- exécuter les travaux ou prestations éventuels de finition ou de reprise prévus aux articles 5 et 6 de l'article 41 du CCAG,
- remédier à tous les désordres signalés par le maître de l'ouvrage ou le maître d'œuvre, de telle sorte que l'ouvrage soit de nouveau conforme aux exigences du marché après correction des imperfections apparues depuis la réception ou constatées lors de celle-ci,
- procéder, le cas échéant, aux travaux confortatifs ou modificatifs dont la nécessité serait apparue à l'issue des épreuves effectuées conformément au CCAP,
- remettre au maître d'œuvre, les plans de l'ouvrage conformes à l'exécution dans les conditions précisées à l'article 40 du CCAG et complétées par le CCAP.

Les dommages concernés par la responsabilité décennale sont ceux qui compromettent la solidité de l'ouvrage ou qui le rendent impropre à sa destination et qui n'étaient pas apparents lors de sa réception.

La responsabilité contractuelle de l'entrepreneur peut être également mise en jeu en cas de désordres ne relevant pas de la garantie décennale lorsqu'ils sont dus à un défaut de conformité au contrat (défaut d'enrobage, chape non efficace, décollement de la peinture...) voire à une faute lourde ou un dol.

La réception étant une acceptation des travaux par le maître de l'ouvrage, les vices et non-conformités apparents à cette date et qui n'auraient pas fait l'objet de réserves mentionnées au procès-verbal de réception ne peuvent plus ensuite être incriminés par le maître de l'ouvrage qui est réputé les avoir acceptés. Ceci montre l'importance de la réception et des opérations qui s'y rattachent au regard de la responsabilité décennale et des autres garanties. Le CCAG - Travaux précise que la réception des ouvrages est prononcée par la personne responsable du marché au vu du procès-verbal des opérations préalables à la réception et des propositions du maître d'œuvre. Les opérations préalables à la

réception comportent en particulier :

- la reconnaissance des ouvrages exécutés,
- les épreuves de chargement prévues par le CCAP et les éventuels contrôles complémentaires permettant de vérifier la qualité de l'exécution des travaux,
- les examens de l'ouvrage avant, pendant et après les épreuves de chargement menées de manière contradictoire avec l'entrepreneur qui établissent un constat des imperfections ou malfaçons éventuelles.

À ces trois examens, il est vivement conseillé de rajouter l'Inspection Détaillée Initiale au sens de l'Instruction Technique sur la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art de 1979 modifiée en 1995. Il est rappelé que cette opération est à la charge du service constructeur et non du futur gestionnaire de l'ouvrage.

La durée de réalisation de l'IDI est parfois incompatible avec les délais applicables aux opérations de réception qui sont visées par l'article 41 du CCAG. Deux solutions sont envisageables pour pouvoir lier la réception au résultat de l'IDI :

- augmenter les délais de réception en dérogeant à l'article 41 du CCAG dans le CCAP,
- assortir la réception d'une réserve sur les conclusions de l'Inspection Détaillée Initiale, ce qui permet de reporter la réception dans le cas où l'IDI révèle des problèmes.

Par ailleurs, il y a lieu de rappeler que c'est tout au long de la construction d'un ouvrage qu'il faut s'assurer de sa conformité aux exigences du marché et de ne pas attendre la réception pour le faire.

1.3 - Rappel des objectifs des épreuves

Les épreuves poursuivent les objectifs suivants :

- assurer au maître d'ouvrage que l'ouvrage livré est apte à bien supporter les charges d'épreuve, et, par extrapolation, à assurer sa destination finale en terme de portance. À cette fin, on exige notamment le passage de poids lourds simulant les charges d'essais définies au chapitre 2, en s'assurant qu'aucune dégradation de la structure n'est observable. Les épreuves peuvent concerner également les trottoirs et les remblais adjacents qui font l'objet de chargements adéquats. L'aptitude au service d'ouvrages sensibles aux effets dynamiques tels que les ponts de grande portée (> 200 m), les ponts à câbles, les passerelles piétonnes, demande un contrôle de leur comportement dynamique,
- vérifier que le fonctionnement mécanique de l'ouvrage sous charge est conforme à sa modélisation de calculs. On procède dans ce but à la mesure de quelques grandeurs représentatives du fonctionnement

de l'ouvrage. On contrôle simplement que les grandeurs mesurées restent dans une plage acceptable compte tenu des incertitudes provenant des mesures, de la modélisation, et des matériaux. Pour certains ouvrages courants, les épreuves de chargement peuvent être simplifiées (cf. chapitre 6),

- constituer un des éléments de l'état de référence de l'ouvrage qui peut s'avérer indispensable à l'établissement du diagnostic, en cas de problèmes ultérieurs. Le futur gestionnaire de l'ouvrage doit être associé dans la mesure du possible aux opérations préalables à la réception. Les épreuves doivent être reproductibles et les résultats obtenus sont consignés dans le dossier de l'ouvrage. Le contenu des épreuves d'ouvrages d'art comprend en particulier, une inspection avant et après chargement et, d'une façon générale, la mesure de grandeurs physiques significatives reflétant le comportement de l'ouvrage dans son ensemble ainsi que le travail des matériaux sous charges d'épreuve. Les constats avant, pendant, et après les épreuves, permettent l'identification des éventuels défauts apparents.

1.4 - Contexte réglementaire

Actuellement, les épreuves d'ouvrages d'art sont régies par :

- le CCAG - Travaux qui précise dans son article 38 que les essais et contrôles des ouvrages lorsqu'ils sont définis dans le marché, sont à la charge de l'entrepreneur (ainsi que dans son article 41 : les opérations préalables à la réception),
- le fascicule 61 titre II chapitre V qui définit dans son principe le contenu du programme des épreuves (article 20-3 et commentaires).

Le fascicule 61 titre II rappelle également l'objet des épreuves, qui est : " le contrôle de la bonne conception et de la bonne exécution des ponts par l'examen de leur comportement sous des charges normales ". Il définit le programme des épreuves qui comprend les étapes suivantes :

- l'application des charges définies,
- les visites détaillées du pont avant, pendant et après l'application des charges,
- la mesure des flèches et le nivellement des appuis,
- toute mesure utile à l'initiative du maître d'œuvre.

A court terme, le fascicule 61 titre II va être remplacé par l'Eurocode EN 1991-2 sauf pour ce qui concerne le chapitre V relatif aux épreuves qui reste, pour un temps, intégré aux annexes nationales.

Les charges d'épreuve définies dans ce guide ne s'appliquent qu'aux ouvrages calculés avec les Eurocodes.

1.5 - Ouvrages soumis à contrôle

Tout pont doit être soumis à des épreuves suivant les modalités définies dans le présent guide, sauf dérogation ministérielle. La date des épreuves est fixée par le maître d'œuvre et celles-ci sont exécutées sur ordre de service en présence du maître d'œuvre ou de son représentant.

Pour les ouvrages de faible ouverture, par exemple des PICF de moins de 10 mètres ou sous remblai important (épaisseur d'au moins 1,5 mètres et supérieure au quart de l'ouverture), on peut se contenter d'épreuves allégées n'impliquant pas la mesure de grandeurs physiques. On se reportera aux indications du chapitre 6.

Dans le cas où un même marché comporte l'exécution de plusieurs ponts de même type (structures et travées semblables construites avec les mêmes matériaux par la même entreprise), le maître d'œuvre fixe le programme des épreuves dans les conditions suivantes :

- dix pour cent des ouvrages, et bien sûr au moins un, doivent faire l'objet de l'ensemble des épreuves,
- pour les autres, il est possible d'alléger les épreuves, notamment en limitant le nombre de mesures de grandeurs physiques caractéristiques du fonctionnement de l'ouvrage.

Les ponts ou ensemble de ponts présentant un caractère particulier (ponts mobiles, ponts comportant une travée de plus de 200 mètres de portée, ponts suspendus ou à haubans, passerelles piétonnes...) doivent faire l'objet d'un programme spécial fixé par le CCTP.

1.6 - Ouvrages réparés ou renforcés

Dans le cas des ouvrages réparés, il est souvent pertinent de reproduire des chargements d'essai déjà retenus lors de la réception de l'ouvrage de manière à apprécier par comparaison la pertinence des réparations.

Pour des ouvrages renforcés, pour pouvoir admettre les charges définies dans les Eurocodes, les prescriptions du chapitre 2 s'imposent. Pour des renforts destinés à permettre le passage de convois exceptionnels, le niveau de la charge d'essai peut déroger aux préconisations du chapitre 2 pour avoisiner le niveau de charges imposé par les futurs convois.

En général, le programme des épreuves décrit aux chapitres suivants pourra être adapté à partir des principes suivants :

- seules sont nécessaires les épreuves en rapport avec l'objet de la réparation ou du renforcement,
- les chargements préalables d'appui pour tassements sont inutiles,

- des mesures et instrumentations particulières en rapport avec l'objet de la réparation ou du renforcement peuvent être ajoutées pour apprécier son efficacité (par exemple mesure de l'absence de souffle d'une fissure ou d'un joint sec comprimé par une précontrainte additionnelle).

2. Charges d'épreuve et grandeurs mesurées



2.1 - Charges de chaussée

Les charges d'épreuve de chaussées comprennent les épreuves par poids mort et les épreuves par poids roulant. Les charges d'épreuve sont composées et organisées avec des véhicules dont la circulation est normalement autorisée sur route.

2.1.1 - Charges générales statiques

La vérification de l'aptitude au service de l'ouvrage est menée en soumettant le tablier à des charges routières représentant des actions de trafic ayant une période de retour comprise entre une semaine et un an. L'intensité de ces charges permet de solliciter de manière significative l'ouvrage sans risquer de l'endommager. En pratique, les effets des charges routières d'épreuve doivent être compris entre les effets des charges routières fréquentes et les trois-quarts des effets des charges routières caractéristiques définies dans l'Eurocode EN 1991-2, sans être toutefois inférieurs aux effets d'une charge uniformément répartie sur la chaussée de $2,5 \text{ kN/m}^2$.

Pour les ouvrages permettant le passage de convois exceptionnels, aucune épreuve de charge particulière n'est à prévoir vis-à-vis de ces convois. Les ouvrages destinés à recevoir le passage de convois exceptionnels très lourds (classes D et E) peuvent néanmoins faire l'objet de charges d'épreuve spéciales. Ce point n'est pas abordé dans le présent document.

Pour les ouvrages sensibles aux actions naturelles comme la température ou le gradient thermique, il convient de s'assurer que le cumul des effets de ces actions prises avec les valeurs maximales prévisibles au jour des essais avec ceux des charges d'essais ne dépasse pas 0,9 fois les effets de la combinaison de dimensionnement. Ceci impose, notamment pour les ouvrages en béton précontraint, la pose de sondes thermiques.

Les épreuves de chargement comportent la vérification du fonctionnement mécanique des éléments porteurs du tablier. Pour les ponts à poutres sous chaussée, par exemple, cette vérification demande des essais

sous charges centrées et sous charges excentrées, sans qu'il soit généralement nécessaire d'éprouver toutes les poutres.

Il convient de produire dans les éléments constitutifs de l'ouvrage les sollicitations développées par les charges routières d'essai. En pratique, pour les tabliers travaillant essentiellement en flexion, on s'intéresse principalement aux sections de l'ouvrage les plus sollicitées en flexion, appelées "sections remarquables". Il s'agit, en général, d'une section pour chaque travée et des sections sur appuis intermédiaires. Pour certains ouvrages, il peut être nécessaire de contrôler le comportement d'autres éléments structurels. Par exemple, pour les ponts fortement courbes ou biais, on peut souhaiter vérifier le non-soulèvement des appareils d'appui.

Les véhicules d'épreuves sont disposés à l'arrêt sur la chaussée et peuvent être serrés tant dans le sens longitudinal que transversal, indépendamment du découpage de la chaussée en voies de circulation (*Figure 1*).

Pour simplifier le déroulement des épreuves, et pour éviter de surcharger indûment une section de l'ouvrage, on cherche à limiter la variation du nombre de véhicules d'essais suivant les sections d'études. Il peut être ainsi admis que les sollicitations engendrées par les charges d'essais dans quelques "sections remarquables", en particulier les sections sur appuis intermédiaires, peuvent être inférieures de 10 % aux sollicitations dues aux charges routières fréquentes.

Dans la plupart des cas, les charges d'épreuve sont constituées d'un groupe de camions à déplacer progressivement le long de l'ouvrage, permettant ainsi l'épreuve successive des sections remarquables d'une poutre maîtresse. L'épreuve des sections situées sur les appuis intermédiaires peut demander quelques cas de charges complémentaires. Pour certaines positions du groupe de camions, on procède à la mesure de quelques grandeurs physiques significatives du fonctionnement du tablier, ce qui permet d'établir, le cas échéant, une pseudo-ligne d'influence de la grandeur mesurée dans une ou plusieurs sections remarquables sous l'effet de ce groupe.

2.1.2 - Charges générales dynamiques

Pour la plupart des ouvrages, les effets dynamiques sont contrôlés qualitativement par des épreuves simplifiées sous charges roulantes :

- parmi les véhicules utilisés pour les épreuves par poids mort, on en conserve un nombre égal à celui des voies de circulation, en choisissant ceux qui comportent les essieux les plus lourds. Ces véhicules étant disposés de front et dans le même sens, on les fait circuler de bout en bout du pont à une vitesse adaptée aux exigences de la sécurité,
- un essai de freinage sur l'ouvrage peut être organisé avec un véhicule lourd de plus de 19 t. Cet essai permet d'appréhender d'éventuels mouvements anormaux (mise en butée des joints, déformations irréversibles des appareils d'appui...).

Pour les ouvrages sensibles aux phénomènes dynamiques tels que les ponts de grande portée (> 200 m), les ponts à câbles, certaines passerelles piétonnes, il convient de mesurer les premières fréquences propres du tablier susceptibles d'être excités par une action dynamique (vent, piétons), l'amortissement des modes correspondants, et accessoirement les déformées propres, de manière à valider les analyses modales théoriques. La charge d'excitation, l'erreur maximale tolérée sur les mesures, le nombre de capteurs et le nombre de modes à mesurer dépendent de la sensibilité prévisionnelle de l'ouvrage aux phénomènes dynamiques.

2.1.3 - Charges locales routières

Pour les charges locales, les effets des charges routières d'épreuves doivent être compris entre les effets des charges routières fréquentes et les trois-quarts des effets des charges routières caractéristiques définies dans l'Eurocode EN 1991-2.

Cette épreuve vise les éléments ou parties de la structure pour lesquels les valeurs significatives de l'effet à mesurer impliquent de concentrer les charges d'essais sur une faible étendue. Ceci concerne, par exemple :

- les pièces de pont et les consoles métalliques,
- les suspentes de ponts à tablier suspendu,
- les zones situées aux angles de tabliers-dalles biais.
- les encorbellements sous chaussée par rapport à la poutre de rive, lorsque la largeur de l'encorbellement atteint au moins 1,50 mètres.

Pour les éléments structurels répétitifs, il convient de procéder à la mise en charge d'un nombre significatif d'entre eux (environ 10 %), sauf cas particuliers.

Pour les pièces souples (consoles métalliques par exemple), ces essais peuvent être éventuellement complétés par le relevé et le contrôle du profil en long en rive du tablier sous les charges d'épreuve générales de manière à mettre en évidence, par une irrégularité du profil en long, une éventuelle malfaçon.

Pour les éléments soumis à des sollicitations importantes provenant à la fois des charges locales et des charges générales de chaussée, il y a lieu de laisser en place les charges locales pendant le déroulement des épreuves par charges générales de chaussée.

Figure 1 : chargement de la première travée d'un pont-dalle.



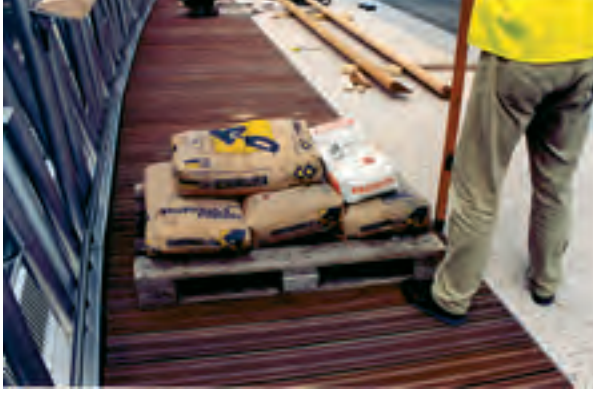


Figure 2 : mise en place d'un chargement de trottoir.



Figure 3 : épreuves par poids mort sur une passerelle.

2.2 - Trottoirs et pistes cyclables

Aucune épreuve de charge de l'ensemble des trottoirs n'est demandée pour les ponts dont les poutres maîtresses supportent à la fois chaussées et trottoirs. Il faut simplement éprouver sa résistance locale sous l'effet des charges d'essai. L'intensité des charges locales d'essai permettra d'obtenir des effets compris entre les effets des charges fréquentes et les trois-quarts des effets des charges caractéristiques définies dans l'Eurocode EN 1991-2.

Dans le cas de trottoirs non séparés de la chaussée par un dispositif de sécurité ou par une bordure infranchissable, pour des ponts situés en zone urbaine, l'épreuve de charge, si elle est imposée, peut dans certains cas être réalisée avec des camions se déplaçant sur les trottoirs.

Dans le cas de trottoirs non accessibles aux véhicules routiers, on éprouve localement les trottoirs, les pistes cyclables et les bandes de séparation de ces dernières, en disposant un lest sur une partie de leur surface (Figure 2).

La surface à charger, en plusieurs parties, est le dixième de la surface totale, la longueur chargée de chaque partie devant atteindre environ trois fois la largeur du trottoir ou de la piste cyclable.

2.3 - Passerelles piétonnes et cyclables

Pour les ponts réservés à la circulation des piétons et des cycles, on procède à des épreuves par poids mort (Figure 3) ainsi qu'à des essais dynamiques.

Pour les épreuves par poids mort, la charge composée d'un lest ou, si cela est possible, de véhicules de poids appropriés, doit engendrer des sollicitations comprises entre les effets des charges fréquentes et les trois-quarts des effets des charges caractéristiques définies dans l'Eurocode EN 1991-2.

Les épreuves de charge comportent la vérification du bon fonctionnement du tablier en flexion, en balancement (déplacement horizontal) et en torsion.

Pour les épreuves par chargement dynamique, il convient de se reporter au paragraphe 2.1.2, en notant que les modes de flexion de fréquence comprise entre 1,6 et 2,4 Hz, et les modes de balancement de fréquence comprise entre 0,5 et 1,5 Hz, sont les plus susceptibles d'être excités par le passage des piétons. Pour les ouvrages particulièrement sensibles, on mesure l'accélération maximale des principaux modes sous une excitation représentative du passage des piétons. Ces valeurs sont comparées à celles obtenues par référence au critère de service que l'on trouve dans les Eurocodes.



Figure 4 : capteurs pour mesures des déplacements d'un appareil d'appui.

2.4 - Grandeurs physiques mesurées

Les mesures peuvent porter sur les flèches, les tassements (des appuis et appareils d'appui), les déplacements horizontaux des appuis (*Figure 4*), en tête de béquille ou en tête de pylône, les rotations de flexion (en pied ou en tête de béquille), les déformations (extensométrie sur des poutres métalliques, non-ouverture de joints secs), les courbures, et les tensions (suspente, hauban).

Les quantités à mesurer doivent être significatives en regard des incertitudes sur leur détermination et leur mesure. Elles doivent caractériser au mieux le comportement de l'ouvrage.

Le fonctionnement mécanique des ouvrages en torsion est délicat à appréhender, et il est prudent, en général, de privilégier les mesures sous des chargements ne sollicitant pas le tablier en torsion.

Pour les ouvrages sensibles aux effets thermiques (ponts en béton précontraint, ponts à câbles suspenseurs), la température moyenne et le gradient thermique sont mesurés en différents points de l'ouvrage de manière à apprécier leur effet et à corriger en conséquence les mesures.

Pour les structures porteuses secondaires (console métallique), les mesures des déformations de ces éléments doivent être dissociées des déformations provenant de la structure principale. Pour limiter ces interférences, il est intéressant de procéder aux mesures sur des éléments secondaires proches des appuis.

3. Organisation des épreuves par le maître d'œuvre



3.1 - La place des épreuves dans la construction des ouvrages

Les épreuves des ouvrages d'art constituent, dans la plupart des cas, le dernier acte du contrôle extérieur lors de la construction d'un ouvrage neuf.

Ces épreuves ne peuvent se dérouler qu'après la réalisation d'une couche de roulement protégeant le tablier et son étanchéité, la vérification de la capacité des matériaux constitutifs à subir les charges d'épreuve, et le calage définitif des appareils d'appui.

Pour les structures ou parties de structures réalisées en béton, le béton doit avoir atteint un âge suffisant à la date des épreuves. Les épreuves ne peuvent commencer avant un délai minimal de 28 jours après le dernier bétonnage et sous réserve de l'obtention des valeurs de résistance de béton prévues dans les notes de calculs.

Le marché peut prescrire à l'entrepreneur de mettre à disposition pendant une certaine période un ouvrage non encore achevé pour permettre l'exécution d'autres travaux (par exemple des travaux de terrassement). Il convient dans ce cas de se reporter à l'article 43 du CCAG.

Avant et après la mise à disposition de ces ouvrages, il convient de dresser un état des lieux contradictoirement entre le maître d'œuvre et l'entrepreneur. Bien entendu, l'ouvrage doit avoir été conçu et exécuté pour pouvoir supporter les effets des charges prévues.

Si le marché prévoit que les épreuves sont réalisées longtemps après l'achèvement des travaux, la réception de l'ouvrage doit être assortie d'une réserve liée à l'exécution ultérieure des épreuves à prévoir dans le CCAP.

L'entrepreneur établit la note d'hypothèses, la note de calculs, et le programme des épreuves. Les autres opérations, comme la reconnaissance des ouvrages exécutés, la constatation éventuelle de l'inexécution des prestations prévues au marché, doivent bien sûr être maintenues. Dans ce cas, l'exécution des épreuves et leur interprétation sont à la charge du maître d'œuvre, en présence d'un représentant de l'entrepreneur.

Sauf s'il y a urgence, toute prise de possession des ouvrages par le maître d'ouvrage doit être précédée de leur réception.

	Entreprise		Maîtrise d'Œuvre		
	BE ⁽¹⁾	Entreprise	Mesure	BE ⁽²⁾	MOE
Examen préalable de l'ouvrage		X		X	V
Note d'hypothèses	X			PV	V
Note de calculs	X			PV	V
Programme des épreuves		X			V
Charges d'épreuve		X			V
Mesures			X		
Analyse des résultats	X		X	PV	V
Détermination de l'acceptabilité				X	V

Légende :

X : Réalisation ; V : Validation par visa ; PV : Proposition de validation

BE : Bureau d'études ; MOE : maître d'œuvre

⁽¹⁾ Bureau d'Etudes de l'entrepreneur.

3.2 - Les épreuves, éléments de contrôle

Les épreuves contribuent à fournir des éléments d'appréciation permettant au maître d'œuvre de proposer ou non au maître d'ouvrage la réception de l'ouvrage.

Les épreuves constituent une mesure globale d'un ou de plusieurs comportements de l'ouvrage sous une sollicitation extérieure, permettant de juger de l'acceptabilité de l'ouvrage au regard de sa destination, supporter un trafic routier. Cette mesure est d'interprétation délicate et les conditions de sa réalisation doivent donc être particulièrement soignées.

3.3 - Les acteurs des épreuves

Beaucoup d'acteurs ayant des rôles divers interviennent dans le déroulement des épreuves. L'implication du maître d'œuvre est donc particulièrement importante pour coordonner les différents intervenants. À cet effet, il doit définir, notamment au travers du cahier des charges de chaque commande, le rôle, les tâches, et les missions de chacun :

- l'entrepreneur, titulaire du marché,
- le bureau d'études de l'entrepreneur,
- le bureau d'études du maître d'œuvre,
- le laboratoire d'essais de génie civil et/ou le géomètre procédant aux mesures et les exploitant,
- les entreprises de transports, propriétaires des véhicules d'épreuves,
- l'organisme chargé des relevés de désordres avant, pendant et après chargement,
- le responsable des opérations de pesée permettant de déterminer les charges appliquées.

Il est utile de s'inspirer de l'organisation suivante qui reprend l'approche traditionnellement utilisée au sein des DDE (ces exigences doivent figurer dans le marché) :

- l'entrepreneur assure l'organisation générale, établit les notes de calculs, définit le programme des épreuves, et propose l'interprétation des épreuves. Il assure par ailleurs au maître d'œuvre les moyens d'accès permettant le travail des personnes chargées de l'inspection et des mesures, et fournit les camions ou lests nécessaires aux épreuves. Ces prestations sont à la charge de l'entrepreneur,
- le maître d'œuvre assure le contrôle extérieur des prestations de l'entrepreneur, établit les constats de l'état des ouvrages avant et après chargement, et procède à la mesure des grandeurs physiques prévues,
- les mesures et les inspections sont en général confiées par le maître d'œuvre à des sous-traitants. Ces interventions sont menées de manière contradictoire avec l'entrepreneur.

Les épreuves doivent se dérouler en présence du maître d'œuvre (ou d'un représentant qualifié du maître d'œuvre) et d'un représentant qualifié de l'entrepreneur. Ces personnes doivent suivre en temps réel le bon déroulement des épreuves et les arrêter en cas d'anomalie.

L'analyse des résultats des épreuves dressée par l'entrepreneur doit être validée formellement par le maître d'œuvre, c'est-à-dire visée avec ou sans réserves.

Le maître d'ouvrage peut également faire à l'occasion de cette opération préalable à la réception, l'état de référence de l'ouvrage. On rappelle que les vices et non-conformités apparents qui n'auraient pas fait l'objet de réserves lors de la réception sont réputés acceptés par le maître d'ouvrage.

3.4 - Déroulement des épreuves

3.4.1 - La note de calculs

3.4.1.1 - La note d'hypothèses

L'entrepreneur fournit au maître d'œuvre la note d'hypothèses conforme aux exigences décrites au chapitre 4. Le maître d'œuvre doit retourner cette note d'hypothèses visée avec ses observations éventuelles.

3.4.1.2 - La note de calculs

Le maître d'œuvre doit viser la note de calculs, ce qui constitue une condition au lever du point d'arrêt préalable à la réalisation des chargements. La consistance d'une telle note est développée au chapitre 4.

3.4.2 - Le programme des épreuves et l'organisation des chargements

L'entrepreneur propose un programme de chargement destiné à décrire tous les éléments nécessaires aux épreuves de l'ouvrage.

Ce document précise en particulier :

- l'organisation générale des épreuves, avec la désignation explicite des responsabilités,
- l'ordre des chargements des différentes parties d'ouvrage,
- la nature des moyens à utiliser, tant en termes de véhicules que de dispositifs de mesure et de communication,
- le plan de rotation des véhicules, conforme à la note de calculs, visant à optimiser les déplacements et les mises en position des matériels de mesure,
- l'adéquation géométrique entre les moyens de mesures optiques et les chargements qui peuvent former un obstacle à certaines visées,

- le mode de repérage de la position des chargements,
- si nécessaire, les moyens à mettre en oeuvre pour stabiliser les effets thermiques.

Note - Préalablement au chargement de l'ouvrage, l'entrepreneur marque, par exemple à la peinture, la position des véhicules, pour les différents cas de charges à réaliser. Il peut être établi une codification des cas de charges par le nombre de traits, et des types de véhicules par la couleur, en précisant la partie du camion repérée (dernier essieu arrière). Comme il est très fréquent que les véhicules utilisés soient légèrement différents des véhicules définis dans la note de calculs, il est préférable que le repérage s'effectue sur l'essieu le plus chargé pour se rapprocher des hypothèses de calcul.

3.4.3 - Les moyens mis en oeuvre pour effectuer les mesures

Le maître d'oeuvre doit s'assurer que les moyens prévus par l'organisme d'essais de génie civil pour réaliser les mesures sont bien adaptés à la nature des problèmes posés et permettent de satisfaire aux exigences de qualité définies au chapitre 5. Il vérifie en particulier :

- le domaine d'emploi du matériel, les caractéristiques métrologiques des appareils,
- leur étalonnage,
- la qualification du personnel ayant à mettre en oeuvre le matériel de mesures,
- la cohérence entre l'organisation du chantier de mesure et les chargements : faisabilité des mesures, délai entre chaque mesure,
- l'accès rapide aux valeurs permettant de contrôler en temps réel le bon fonctionnement de l'ouvrage.

On vérifie également que l'organisme d'essais de génie civil dispose bien des moyens d'enregistrement des grandeurs physiques mesurées sur l'ouvrage et des paramètres susceptibles d'influencer la mesure : température de l'air et de la structure, gradient thermique, niveau de l'eau, hygrométrie...

L'enregistrement de ces paramètres est très important, car il permet de procéder à des mesures tout au long de la vie de l'ouvrage, de comparer deux états, et d'apprécier l'évolution de son comportement dans le temps.

Il faut noter que si une relative constance de ces paramètres ne peut être mise en évidence durant les épreuves, il est préférable de réaliser ces épreuves à des moments ou dans des conditions où les variations sont minimales, par exemple tôt le matin, par temps nuageux, par marée de morte-eau, en l'absence de vent fort, etc.



Figure 5 : inspection à l'aide d'une passerelle.

3.4.4 - Examen préalable de la structure

Préalablement à toute action de chargement, une visite détaillée contradictoire de la structure doit être menée afin de relever les éventuels désordres ou défauts, de les mesurer et les quantifier. Ceci permet de vérifier leur éventuelle évolution pendant ou après les épreuves de chargement.

Les résultats de l'examen préalable sont notifiés au titulaire du marché de travaux, pour que ce dernier puisse mener une contre-visite, et proposer, si nécessaire, d'éventuelles mesures confortatives.

Le niveau de détail de cette action de surveillance est celui d'une inspection détaillée d'ouvrage d'art, menée selon les principes du fascicule 02 de l'Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art, relatif aux conditions d'exercice de la surveillance.

Elle doit être confiée à un organisme ou laboratoire spécialisé disposant d'un personnel formé et qualifié en inspection d'ouvrages d'art (Figure 5). En général, c'est l'organisme chargé du contrôle extérieur des travaux du fait de sa connaissance du chantier qui est retenu. Les laboratoires de l'équipement assurent traditionnellement cette fonction avec leur savoir-faire et peuvent donc constituer une ressource précieuse.

Le résultat de cette inspection doit permettre d'apprécier l'aptitude de l'ouvrage à supporter les épreuves. En effet, si les désordres constatés sont révélateurs d'un risque pour l'ouvrage, il faut arrêter la procédure de réception et demander à l'entrepreneur d'analyser les désordres et de proposer si nécessaire les réparations. En cas d'exécution d'une réparation, il convient de tester son efficacité préalablement au déroulement des chargements d'épreuve.

Enfin, sur des désordres ne mettant pas en cause la stabilité et la résistance de la structure, le maître d'œuvre, peut accepter que les désordres ne soient pas réparés avant les épreuves. Le maître d'œuvre peut alors décider d'une instrumentation particulière, destinée à contrôler l'évolution (supposée réversible) du désordre sous l'effet du chargement d'épreuves. Dans ce cas, il est opportun de procéder à un chargement par paliers.

Note - On peut citer comme exemple de désordres susceptibles d'être instrumentés : une fissuration de quelques dixièmes de millimètres sur des structures en béton armé, une déplanation excessive de l'âme d'une poutre métallique, un défaut de réalisation engendrant des poussées au vide...

3.4.5 - La vérification des charges appliquées

Il est exigé pour chaque camion un bon de pesée (poids total et poids des essieux), établi le jour même de chaque phase d'épreuves sur une installation de pesage statique récemment étalonnée ou vérifiée (Figure 6). La tolérance admise sur la masse totale de chaque camion est généralement prise égale à 3 %.

Lors d'épreuves réalisées sous très forte pluie, la variation de la masse doit être contrôlée du fait de la variation de la teneur en eau des chargements.

Il est rappelé la nécessité d'un strict respect des règles du code de la route, notamment en matière de charge totale autorisée.

L'entrepreneur contrôle que la position réelle des essieux est proche de la position théorique tant dans le sens longitudinal que transversal avec un écart inférieur à 10 cm.

L'attention est attirée sur le fait que certains chargements ne sont pas toujours bien connus en gabarit. Certaines charges peuvent déborder de l'arrière des véhicules et empêcher le respect des dispositions prévues. Il y a lieu dans ce cas d'apporter les ajustements nécessaires dans la note de calculs.



Figure 6 : pesée d'un camion sur une bascule.

3.4.6 - Le chargement de l'ouvrage et les mesures

En premier lieu, l'organisme d'essais en génie civil propose un programme de mesures conforme aux exigences du paragraphe 5.1.2.

Il est utile de demander à cet organisme de s'informer des conditions climatiques prévisibles pendant son intervention, particulièrement en termes de neige, de vent, de température, de brouillard... Ainsi, une vérification des prévisions météorologiques la veille du jour retenu pour le déroulement des épreuves, peut éviter un déploiement inutile.

Préalablement aux épreuves, le maître d'œuvre vérifie que toutes les autorisations administratives (exploitation de la route, accès aux terrains riverains pour faire des mesures...) sont bien obtenues, et que les moyens de communications (radio, par exemple) nécessaires entre les divers intervenants (entreprise générale, mesureurs et géomètres, coordonnateur des camions, maître d'œuvre) sont bien mis à disposition et qu'ils fonctionnent.

Le chargement des appuis (Figure 7) permet de provoquer le tassement immédiat des appuis. Ces tassements sont généralement très faibles (de l'ordre de quelques dixièmes de mm). Il convient simplement de suivre les tassements et d'établir le nivellement du tablier à vide après l'enlèvement des chargements. Si les tassements ne sont a priori pas négligeables, c'est-à-dire supérieurs à 0,5 cm (cette valeur dépend des types de structures), ils devront avoir été évalués dans la note de calculs de l'ouvrage. Les différentes mesures topométriques après déchargement de la structure (retour à vide) peuvent, dans la mesure où elles sont réalisées selon les conditions spécifiées dans le fascicule 04 de l'Instruction Technique, constituer l'Etat Initial de Référence Topométrique.



Figure 7 : chargement d'un appui.

Les travées sont chargées dans l'ordre précisé par le programme de chargement. Les consignes de sécurité n'autorisent pas le déplacement simultané de plusieurs camions sur l'ouvrage. Ce point doit être vérifié également à la fin des épreuves lorsque les camions quittent l'ouvrage.

L'organisme d'essais en génie civil vérifie à tout moment que la valeur physique significative mesurée sous le cas de charge étudié ne dépasse pas 1,5 fois la valeur prévue, de manière à ne pas mettre l'ouvrage en péril. Le dépassement de ce seuil commande l'arrêt des épreuves. La mesure des tassements d'appui sous les différents cas de charge permet de recalibrer les mesures faites sur les autres parties du tablier. Quand l'ouvrage est instrumenté pour permettre l'évaluation d'un désordre particulier ou d'un comportement spécifique, ces instrumentations complémentaires doivent être assorties de seuils d'alerte.

3.4.7 - Examen après les épreuves

Cet examen a pour but de constater l'état de l'ouvrage après les épreuves et de le comparer à l'état initial déjà enregistré avant les épreuves. Ces constats sont reportés sur le document ayant servi à l'examen préalable, en les différenciant des constats initiaux.

Cette inspection peut avantageusement être conduite au sens de l'Instruction Technique, afin de constituer alors l'Inspection Détaillée Initiale (IDI). Dans ce cas, bien évidemment, cette inspection doit être menée de manière contradictoire avec l'entrepreneur.

Il est rappelé que les délais liés à l'acte de réception et visés par l'article 41 du CCAG ne permettent pas toujours d'effectuer toutes les opérations préalables à la réception notamment si l'on inclut l'IDI. C'est souvent le cas pour les ouvrages d'art non courants. Deux solutions peuvent être envisagées dans le CCAP :

- prévoir un délai contractuel plus important dans le marché,
- assortir la réception d'une réserve relative aux résultats de l'IDI.

3.4.8 - Analyse des résultats et validation après les épreuves

L'organisme d'essais en génie civil fait au maître d'œuvre un rapport sur les mesures réalisées lors des épreuves comprenant :

- le rappel des charges réellement mises en œuvre et de leurs positions,
- le rappel et l'analyse des conditions de mesures,

- le rappel des valeurs attendues et des variations admissibles de ces valeurs au regard des incertitudes concernant les modèles et les valeurs,
- le rappel des incertitudes affectant les mesures,
- la comparaison entre résultats mesurés et traités, et valeurs calculées.

À partir de ce rapport, le bureau d'études de l'entrepreneur établit une note d'analyse des résultats qui comprend au moins les parties suivantes :

- le rappel des hypothèses,
- la reprise éventuelle des calculs,
- l'interprétation des différences, le cas échéant,
- les conclusions sur la capacité de l'ouvrage à assurer ses fonctions et sa pérennité,
- les indications sur le régime de surveillance approprié à l'ouvrage, sur d'éventuelles instrumentations complémentaires permanentes ou temporaires.

Le maître d'œuvre analyse le rapport de l'entrepreneur avec l'aide de son bureau d'études et conclut sur la suite à donner à l'opération de réception de l'ouvrage.

3.4.9 - Cas de certains ouvrages

Les principes décrits ci-dessus concernent la majorité des ouvrages, y compris les ouvrages exceptionnels. Les épreuves réalisées après réparations ou renforcements d'ouvrages anciens doivent être adaptées au cas par cas.

Toutefois, certains ouvrages particulièrement simples et robustes, réalisés conformément aux dossiers types du Sétra, tels que les P1CF, les P1PO de dimensions modestes (d'une portée inférieure à 10 m), peuvent faire l'objet de dispositions allégées (*Figure 8 et chapitre 6*).



Figure 8 : essai de chargement d'un ouvrage de faible portée.

4. Note de calculs des épreuves et analyse des résultats



4.1 - Hypothèses de calculs des épreuves

Le calcul de l'ouvrage sous charges d'épreuve n'a pas pour objet de contrôler la résistance ultime de l'ouvrage mais d'éprouver le bon fonctionnement de la structure. En conséquence, les hypothèses servant à ce calcul n'ont pas à être conservatrices mais à être les plus réalistes possibles, dès lors que la mesure de grandeurs physiques s'impose. De même, la modélisation de la raideur de l'ouvrage doit être adaptée au calcul des déformations sous les charges d'essais. Il est possible de trouver des indications intéressantes dans les Eurocodes. Il est nécessaire en particulier de prendre en compte :

- la déformation d'effort tranchant dans les poutres,
- la participation de certains équipements dans la rigidité de la structure (BN1, BN2, corniche en BA, contre-bordure de trottoirs en BA...),
- la loi de comportement réelle des matériaux à partir des essais sur éprouvettes,
- la rigidité des appuis principalement vis-à-vis de la rotation,
- le biais des ouvrages,
- la courbure des structures,
- la fissuration des parties fonctionnant en béton armé, notamment la fissuration des dalles de pont mixte sur appui et la réduction des inerties de torsion du fait de la fissuration,
- la largeur participante du hourdis et des dalles sur appuis,
- la valeur probable de la précontrainte (utilisant les résultats des mesures des coefficients de transmission) pour les ouvrages en précontrainte partielle,
- la géométrie réelle de l'ouvrage, si des aléas de chantier ont conduit à des modifications.

Il est demandé un calcul complet de l'ouvrage établi à partir d'hypothèses réalistes permettant la détermination de l'état probable de l'ouvrage. On admet généralement une incertitude de +10 % et -20 % sur les valeurs probables calculées des grandeurs physiques (déformation...), sauf justifications particulières du bureau d'études. Pour chaque chargement, on définit la grandeur physique

la plus significative qui doit servir de témoin principal caractéristique du bon fonctionnement de l'ouvrage. Le bureau d'études détermine la valeur limite de cette grandeur physique qui, si elle était atteinte, doit commander l'arrêt des épreuves. À défaut d'analyse particulière, on retient 1,5 fois la valeur nominale prévue.

Note - La rigidité apportée par les superstructures peut devenir très importante lorsque les portées sont faibles. Des barrières de sécurité en béton (BN1, BN2, GBA...) apportent une grande rigidité qu'il est assez difficile de modéliser du fait des joints, de la fissuration, et du traînage de cisaillement. L'entrepreneur fournit au maître d'œuvre la note d'hypothèses que celui-ci doit viser avec ses observations éventuelles.

4.2 - Note de calculs des épreuves

Cette note de calculs, à la charge de l'entrepreneur, comprend :

- un rappel succinct des caractéristiques de l'ouvrage,
- le rappel des hypothèses prises en compte,
- la description des différents cas de chargement,
- la nature et les valeurs théoriques des mesures à effectuer dans chaque cas.

La cinématique des déplacements des camions doit être étudiée de manière à ne produire dans aucune section remarquable des effets supérieurs à ceux des charges d'essais.

4.2.1 - Préalablement aux essais

Sont demandés :

- le calcul de l'état probable de l'ouvrage au jour des essais sous l'effet des charges permanentes réelles,
- le calcul des effets des charges routières fréquentes et caractéristiques,
- l'incidence sur l'ouvrage des actions naturelles comme la température, le gradient thermique (différence de température entre parties d'ouvrage),

de manière à pouvoir interpréter les mesures in-situ,

- le choix des charges d'épreuve et leurs simulations par des camions réservés par l'entrepreneur. Le calcul des effets de ces charges est mené sans pondération, en prenant en compte les caractéristiques réelles des camions (charges des essieux, distances entre essieux...),
- la définition des incertitudes admissibles sur le poids des convois de chargement et sur leur position,
- la définition du positionnement (longitudinal et transversal) successif des camions et des sections remarquables à contrôler à chaque position,
- la quantification des grandeurs physiques représentatives du fonctionnement mécanique de l'ouvrage lors des essais et l'établissement des pseudo-lignes d'influence si elles sont nécessaires,
- la mise en évidence des incertitudes portant sur le calcul des grandeurs physiques et sur les mesures,
- les calculs dynamiques éventuels, avec également une étude de leur précision,
- la détermination des tassements des appuis et appareils d'appui sous charges routières, s'ils sont importants (supérieurs à 1 ou 5 mm suivant le type de structure).

4.2.2 - Postérieurement aux essais

Sont demandées :

- la vérification des résultats expérimentaux et théoriques, et la compréhension des écarts éventuels,
- si nécessaire, des études complémentaires s'appuyant sur des modèles plus réalistes.

Ce dernier point concerne particulièrement les épreuves de charges locales, lorsque les mesures donnent des valeurs inadéquates mais attestent toutefois un fonctionnement homogène des éléments testés. Si un élément apparaît déficient du fait d'un défaut d'exécution, l'entrepreneur doit proposer au maître d'œuvre une méthode de contrôle adaptée permettant de garantir la bonne exécution de tous les éléments similaires. En pratique, il devient souvent nécessaire de généraliser les mesures ou contrôles pour détecter tous les éléments déficients. Par ailleurs, l'entrepreneur doit proposer les dispositions qu'il compte prendre pour rendre l'ouvrage ou la partie d'ouvrage conforme.

4.3 - Analyse des résultats

L'analyse des résultats doit être conduite avec le souci de mettre en relief d'éventuels dysfonctionnements mécaniques par référence aux procès-verbaux établis avant, pendant, et après les épreuves. Les calculs doivent donc considérer non seulement le poids et le positionnement réels des camions, mais aussi l'influence des conditions climatiques.

Les épreuves sont satisfaisantes lorsque les valeurs mesurées, en tenant compte de l'incertitude de la mesure, respectent la fourchette autorisée sur les valeurs calculées (entre 1,1 fois et 0,8 fois les valeurs probables). En cas de non-respect, les résultats doivent être examinés avec un esprit critique, afin d'expliquer les anomalies : non-linéarités du comportement, évolution anormale des flèches mesurées dans une section remarquable...

Un nouveau calcul doit établir une fourchette des valeurs théoriques à contrôler sur l'ouvrage, à partir d'hypothèses hautes et basses réalistes faites sur les grandeurs physiques significatives. En règle générale, il n'est pas nécessaire de recommencer tout ou partie d'épreuves. Si des épreuves sont à refaire, elles sont à la charge de l'entrepreneur.

5. Réalisation des mesures et présentation des résultats



5.1 - Informations nécessaires à une bonne instrumentation

5.1.1 - Caractéristiques géométriques et topographiques

D'une manière générale, la nature et la géométrie du franchissement (cours d'eau, hauteur sous poutre...) et plus particulièrement les caractéristiques du tablier (longueur, largeur, épaisseur, biais, courbure, distances entre appuis...), des appuis (hauteur...) et des appareils d'appui (liberté de mouvement permise) influencent le choix et l'implantation des moyens de mesure.

La fourniture d'une vue en plan, d'une coupe transversale, et d'une coupe longitudinale permet généralement de répondre aux questions posées, du moins pour les ouvrages courants. Une visite préalable est nécessaire en cas de franchissement de brèches ou de cours d'eau importants, en zone urbaine ou portuaire, pour définir le choix et l'implantation des moyens de mesure. C'est souvent le cas pour les ouvrages d'art non courants (Figure 9).

5.1.2 - Programme de mesures

Le programme de mesures est établi par l'organisme d'essais en génie civil chargé des mesures. Il permet de définir la quantité et la qualité des appareils de mesure, leur emplacement, ainsi que l'effectif et la qualification du personnel affecté aux mesures. Il comprend au minimum les opérations suivantes :

- l'implantation des positions des charges et des points de mesure,
- la visite détaillée contradictoire avant tout chargement,
- le nivellement préalable,
- la vérification des caractéristiques des moyens de chargement, vérification des bons de pesée et éventuellement des bascules utilisées pour les pesées,
- le chargement des appuis et mesures de nivellement,

- les chargements prévus dans la note de calculs (indication de la succession des cas ainsi que des mesures et des observations correspondantes),
- la réalisation de la visite détaillée, voire de l'inspection détaillée initiale, après l'enlèvement des chargements par des agents d'inspection qualifiés, et du nivellement de référence.

Ces opérations sont à la charge du bureau d'études chargé des mesures. Les visites détaillées avant et après chargement peuvent être confiées par le maître d'œuvre à un autre sous-traitant.

Figure 9 : Essai de chargement d'un bow-string.



5.2 - Nature des mesures possibles

Les fiches descriptives des différents matériels présentés sont fournies en annexe.

5.2.1 - Généralités sur les caractéristiques métrologiques (selon NF X07-001 - déc. 94)

Il convient de préciser le vocabulaire utilisé en métrologie :

- les limites de l'étendue de mesure : valeurs minimale et maximale mesurables,
- l'étendue de mesure : différence entre la valeur maximale et la valeur minimale mesurables,
- la résolution : plus petite variation mesurable,
- l'incertitude de mesure : valeur qui caractérise la dispersion des résultats.

5.2.2 - Mesures de déplacement

Ce sont les mesures les plus couramment utilisées lors des épreuves de chargement. Les mesures de déplacements verticaux sont les plus fréquentes, car ces déplacements sont généralement révélateurs du comportement mécanique d'ensemble du tablier et facilement mesurables.

Ces mesures permettent de contrôler les flèches sous charges, les déformations transversales du tablier, et les éventuels tassements d'appui. Parfois, il est également nécessaire de contrôler les déplacements horizontaux : têtes de piles de grande hauteur, mâts des ponts à haubans ou suspendus, têtes de béquille ou de contre-béquille des tabliers de pont à béquilles.

Les appareils utilisables pour les mesures de déplacement sont :

- les fleximètres mécaniques du type "Jules Richard" : le déplacement de l'ouvrage est transmis à l'aide d'un fil invar fixé sous le tablier et tendu verticalement. Par un jeu de bras de levier, le fleximètre trace le déplacement sur un tambour enregistreur,
- les capteurs de déplacement : le déplacement est transmis comme pour les fleximètres mécaniques à l'aide d'un fil invar ; ces capteurs peuvent également être placés sur un support rigide à proximité du tablier,
- les flexigraphes laser : le déplacement de l'ouvrage est contrôlé par rapport à un faisceau laser de référence (attention aux effets thermiques),
- les matériels de nivellement : le déplacement de l'ouvrage est contrôlé à l'aide d'un niveau de précision et d'une mire invar,

- les théodolites motorisés : c'est un appareil de nivellement qui suit automatiquement le déplacement de l'ouvrage à l'aide de cibles dont on détermine les coordonnées initiales.

5.2.3 - Mesures de déformation

Les mesures de déformation sont rarement utilisées lors des épreuves parce que les mesures de déplacement sont plus globales et plus facilement exploitables. Toutefois elles sont irremplaçables pour connaître le comportement local des sections les plus sollicitées ou présentant de fortes concentrations de contraintes. Le courburemètre permet une mesure du comportement semi-global des poutres en béton en détectant par exemple une fissuration sous charges d'essais.

Les matériels utilisables pour les mesures de déformation sont les suivants :

- les jauges électriques : la déformation du support, sur lequel elles sont collées (acier ou béton), modifie leur résistance électrique,
- les cordes vibrantes : elles sont positionnées dans le coffrage avant bétonnage et suivent ensuite la déformation du béton qui modifie leur fréquence de résonance. Elles peuvent également être fixées sur le parement,
- les extensomètres : la déformation du support, sur lequel les extensomètres sont appliqués, est mesurée par des moyens mécaniques ou électriques. Ils permettent de contrôler des bases plus grandes que les jauges électriques (longueurs réglables de 10 à 50 cm selon nécessité),
- les fibres optiques : la déformation du support, sur lequel les fibres sont collées, modifie le signal qu'elles peuvent transmettre,
- les courburemètres : la mesure de la rotation relative de deux sections voisines permet de connaître la courbure provoquée par une surcharge.

5.2.4 - Mesures de rotation

Les mesures de rotation servent actuellement, dans la plupart des cas, à contrôler la rotation des sections dans lesquelles sont situés d'autres équipements (émetteurs laser en particulier). Elles sont essentiellement utilisées dans les zones d'appui, sur les appuis de grande hauteur, près des encastresments des arcs...

Les matériels adaptés à la mesure des rotations sont des nivelles ou des clinomètres qui permettent de mesurer la rotation de la base sur laquelle ils sont placés.

Il peut également être utile de mesurer la rotation de certains appareils d'appui (appuis à pot, appuis métalliques) pour contrôler leur bon fonctionnement.

5.2.5 - Mesures de vibration

Les mesures de vibration sont actuellement rarement utilisées lors des épreuves. Elles permettent essentiellement de mesurer les fréquences propres de l'ouvrage. Dans l'état actuel des connaissances, les résultats obtenus par ce type de mesure ne permettent cependant pas de caractériser suffisamment finement le comportement des matériaux ou des structures. Ceci peut certainement évoluer, notamment pour les structures souples ou sensibles aux phénomènes dynamiques ; c'est la raison pour laquelle ces mesures sont abordées sommairement.

Les principaux capteurs envisageables pour les mesures de vibrations sont les suivants :

- les accéléromètres : associés à un amplificateur de charge, ils délivrent une tension proportionnelle à l'accélération,
- les géophones : ils délivrent une tension proportionnelle à la vitesse.

5.2.6 - Pesées

Les pesées dont il est question ici ne concernent pas les ouvrages, mais les moyens de chargement des ouvrages. En général, ces moyens sont constitués de camions préalablement pesés sur des ponts-bascules.

L'attention des intervenants doit être attirée sur l'incidence que peuvent avoir les irrégularités de la surface de roulement sur la répartition des charges.

Dans certaines circonstances (durée des épreuves supérieure à une demi-journée, utilisation de granulats humides, temps de pluie ...), il peut être judicieux de réaliser une pesée des camions après les épreuves.

5.3 - Présentation des résultats

Les épreuves de chargement et les observations qualitatives et quantitatives réalisées aux cours des épreuves donnent lieu à la production d'un procès-verbal établi par l'organisme d'essais en génie civil chargé des mesures qui décrit en particulier :

- le programme de chargement réalisé (succession des différents chargements, horaires, mesures, observations...),
- les caractéristiques des charges (pour les camions : poids total, poids par essieu, distance entre essieux),
- les matériels de mesure utilisés,
- les valeurs mesurées (avec leur incertitude) comparées aux valeurs théoriques correspondantes,
- les observations réalisées,
- les conditions dans lesquelles se sont déroulées les épreuves (température, ensoleillement...) et leurs conséquences mécaniques sur l'ouvrage (gradient thermique...).

Les différents appareils de mesure sont présentés en annexe 2 de ce document.

6. Programmes d'épreuve pour les ouvrages d'art courants



Il s'agit le plus souvent d'ouvrages types, à propos desquels le Sétra a publi e différents documents méthodologiques, guides de conception et de calcul, ou d'ouvrages d'un type homologu e par le Sétra. Ces ouvrages, en béton armé ou en béton précontraint, peuvent être class es en trois grandes familles :

- les ponts-cadres et portiques,
- les ponts-dalles ou ponts à nervures larges coul es en place,
- les ponts à poutres.

Les opérations à effectuer au sein de chacune de ces familles présentent de nombreuses similitudes. Il convient toutefois de distinguer les particularités li es au type de matériel (béton armé ou béton précontraint), ainsi qu'au fonctionnement mécanique de la structure (travées continues ou travées indépendantes).

Pour ces ouvrages courants, les déformations d'effort tranchant peuvent à juste titre être suppos es négligeables, c'est pourquoi on se préoccupe essentiellement de l'effet des efforts de flexion. Les sollicitations prépondérantes   considérer sont donc les moments en travée et, pour les ouvrages continus, les moments sur appuis. Pour les ponts-dalles de biais prononc e, les flèches aux bords libres sont toutefois sensibles aux déformations de cisaillement qui s'y développent. On ne peut donc comparer les flèches mesur es aux bords libres qu'à celles qui résultent d'un calcul fiable, tenant compte de ces phénomènes.

Les mesures pertinentes concernent essentiellement les flèches en travée. La mesure des rotations des sections sur appuis n'est généralement pas effectuée.

  l'occasion du premier cycle de chargement/déchargement des appuis, des mesures de tassement des appareils d'appui sont effectuées, permettant de concourir à la détermination d'un état de référence de l'ouvrage. Les tassements peuvent également provenir du sol de fondation ; ils se produisent notamment au début de la vie de l'ouvrage. Il peut être intéressant, pour les petits ouvrages fond es sur

semelles superficielles, de mesurer le tassement des appuis sous l'effet du premier chargement.

La pesée des réactions d'appui reste exceptionnelle pour les ouvrages droits ou de biais mod er e. En revanche, pour des ouvrages présentant une courbure particulièrement prononcée (rayon de courbure inférieur à 5 fois la portée) et/ou un biais important, dans lesquels il existe un risque de soulèvement dans les angles, des pesées peuvent être prévues ainsi que des mesures de déplacement, par des comparateurs ou par nivellement. Il faut noter que selon les configurations, ces soulèvements sous charges d'épreuve peuvent concerner soit les angles obtus, soit les angles aigus. Pour ces ouvrages, l'examen préalable de l'état des appareils d'appui (distorsion éventuelle et qualité du contact avec le tablier) est particulièrement utile.

Une implantation des points de mesure dans l'axe de l'ouvrage est suffisante dans la plupart des cas. Toutefois, pour des ouvrages particulièrement larges (  titre indicatif, supérieur à 15 mètres) ou au biais prononc e (angle de biais inférieur à 50 grades), il peut être judicieux d'en prévoir en outre sur une fibre proche des bords libres. Dans le cas des ponts à poutres, il est d'usage d'instrumenter une file de poutres centrales et une file de poutres de rive.

6.1 - Ponts-cadres et portiques

6.1.1 - Examen préalable de la structure

Les défauts et désordres susceptibles d'être observ es dans les ponts-cadres et portiques sont communs à la plupart des ouvrages en béton armé. Ils peuvent relever de la conception ou de l'exécution des travaux. Ils peuvent parfois être imputables aux matérielles mis en œuvre.

  la date des épreuves, on peut noter des défauts de bétonnage, des fissurations anormales, des irrégularités géométriques. Ces défauts sont classiquement dus à des erreurs de réglage des cintres et coffrages,

des tassements sous le poids du béton frais, des insuffisances d'aciers dits «secondaires», du retrait plastique du béton...

L'essentiel des problèmes reste néanmoins lié aux phases de remblaiement, lorsqu'une exécution non conforme introduit dans la structure des poussées non prévues. Pour plus de détails, il convient de se reporter au chapitre 5 du Guide de conception des ponts-cadres et portiques, ainsi qu'à l'Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art.

Note - Pour les portiques doubles (POD) et les cadres multiples, on procède comme pour les cadres et portiques précédents.

6.1.2 - Note d'hypothèses

Comme il est dit au paragraphe 4.2 du présent document, il importe de faire des hypothèses réalistes dans le choix des paramètres permettant de calculer les efforts et les flèches. Chacune des grandeurs physiques utilisées est frappée d'une incertitude, de sorte que la flèche probable calculée se situe en réalité dans un certain intervalle de valeurs. S'agissant d'ouvrages en béton armé, les grandeurs physiques qui interviennent sont :

- les caractéristiques mécaniques des sections (inertie),
- le module d'élasticité du béton, qui doit être évalué à partir des résultats des éprouvettes, et non pas d'après la résistance théorique du projet,
- les caractéristiques des camions utilisés pour les épreuves.

À cela s'ajoutent, pour les cadres et portiques, les caractéristiques du sol et les conditions de remblaiement.

6.1.3 - Note de calculs

La note de calculs fournit les résultats des efforts et de la flèche au milieu de la traverse supérieure, sous l'effet des camions réels retenus pour les épreuves.

6.1.4 - Programme de chargement

La position des camions produisant l'effet le plus défavorable est repérée par marquage sur la chaussée. Les camions se déplacent un par un pour prendre position. Il est en général suffisant de disposer le convoi de chargement de manière centrée transversalement (Figure 10).

6.1.5 - Interprétation

Les flèches mesurées doivent se trouver à l'intérieur d'une fourchette résultant des incertitudes évoquées dans la note d'hypothèses. Cela constitue un simple indicateur du bon fonctionnement de l'ouvrage.

6.1.6 - Possibilités d'épreuves allégées

Pour les ouvrages de faible ouverture, par exemple des PICF de moins de 10 mètres, on peut se contenter d'observer l'effet du passage des camions, sans mesurer les flèches. Il en est de même pour les ouvrages sous remblai important (épaisseur d'au moins 1,5 mètres et supérieure au quart de l'ouverture), car les phases de remblaiement et de compactage sont plus critiques que les charges d'épreuve. Il est important en ce cas de surveiller particulièrement le phasage de construction en séparant bien les déformations des tassements.

Figure 10 : chargement centré d'un portique à travées multiples.



6.2 - Ponts-dalles, ponts à nervures larges

6.2.1 - Examen préalable de la structure

Les défauts et désordres susceptibles d'être observés dans les ponts-dalles sont peu nombreux par rapport à leur population.

Cela tient au fait qu'il s'agit de structures massives, relativement faciles à concevoir et à réaliser. À la date des épreuves, les défauts peuvent avoir notamment les origines suivantes :

- insuffisance d'aciers passifs,
- fissures en zone d'about (diffusion de la précontrainte),
- fissures longitudinales,
- fissures transversales (pointes de moment, gradient thermique, retrait différentiel),
- mauvaise position des câbles de précontrainte,
- défauts de bétonnage,
- distorsion éventuelle des appareils d'appui, défaut de leur contact avec le tablier, notamment dans le cas des ponts-dalles de biais prononcé.

Note - Pour plus de détails, il convient de se reporter au chapitre 5 du Guide de conception des ponts-dalles, ainsi qu'à l'Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art.

6.2.2 - Exemple de programme de charges

L'ouvrage retenu dans l'exemple est relativement important, ce qui a justifié un programme particulièrement complet et détaillé. Ce programme pourrait être allégé pour des ouvrages plus modestes. Il s'agit d'un pont à deux nervures précontraintes comportant quatre travées dont les portées sont les suivantes : 27,00 m ; 38,00 m ; 27,00 m ; 23,00 m. L'ouvrage est droit et sa largeur chargeable est de 9,30 m (3 voies de circulation).



Schéma 1 : Coupe transversale de l'ouvrage.

6.2.2.1 - Programme de chargement

Les épreuves nécessitent dans ce cas la présence de $2 \times 3 = 6$ camions de 26 t (essieu avant = 5 t ; essieux arrière = $2 \times 10,5$ t)

a) Chargement préalable des appuis

Les camions sont successivement disposés sur chaque ligne d'appui. Il est rappelé qu'on ne doit déplacer qu'un camion à la fois, les autres demeurant à l'arrêt. On compare les tassements observés avec les tassements prévisibles.

b) Description des cas de chargement

On recherche les positions permettant d'obtenir les efforts souhaités dans les quatre travées et sur les trois appuis intermédiaires P2, P3, P4. Dans la plupart des cas, le chargement est centré et comporte trois files de deux camions.

• Chargement 1

Il concerne le moment positif en travée 1 sous l'action de trois files de deux camions disposés sur la travée 1.

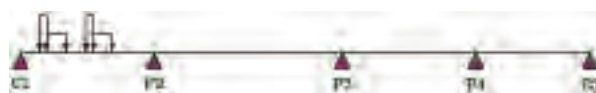


Schéma 2 : Chargement de la travée 1.

• Chargement 2

Il concerne simultanément le moment positif en travée 2 et le moment négatif sur l'appui P3. Il correspond à trois files de deux camions disposés sur la travée 2.

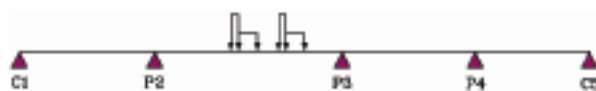


Schéma 3 : Chargement de la travée 2.

• Chargement 3

Il concerne le moment positif en travée 3 dû à trois files de deux camions disposés sur la travée 3.

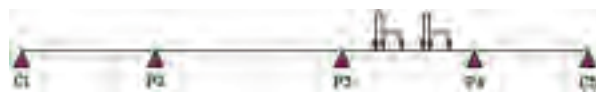


Schéma 4 : Chargement de la travée 3.

• Chargement 4

Il concerne le moment négatif sur l'appui P4 et s'obtient en disposant :

- la première rangée de trois camions sur la travée 4,
- la seconde rangée de trois camions sur la travée 3.



Schéma 5 : Chargement pour moment négatif sur appui P4.

• **Chargement 5**

Il concerne le moment positif en travée 4 et correspond à trois files de deux camions disposés sur la travée 4.

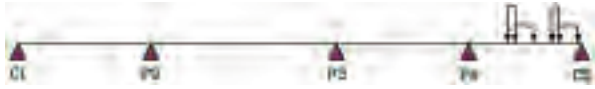


Schéma 6 : Chargement de la travée 4.

Dans le cas d'espèce, il n'est pas possible d'atteindre le moment négatif souhaité sur l'appui P2, au moyen d'un chargement centré de trois files de deux camions. Pour éviter de faire appel à des camions supplémentaires, des chargements excentrés transversalement, successivement à gauche et à droite sont mis en place. Compte tenu de cette excentricité, les deux nervures sont ainsi, à tour de rôle, sollicitées de manière adéquate.

• **Chargement 6**

Il concerne le moment négatif sur l'appui P2, pour la nervure de droite. Il est obtenu en excentrant transversalement vers la droite :

- deux rangées de deux camions sur la travée 2,
- une rangée de deux camions sur la travée 1.



Schéma 7 : Position transversale pour le moment négatif sur P2 - nervure de droite.



Schéma 8 : Position longitudinale pour le moment négatif sur P2 - nervure de droite.

• **Chargement 7**

Il concerne le moment négatif sur l'appui P2, pour la nervure de gauche. Il est obtenu en excentrant transversalement vers la gauche :

- deux rangées de deux camions sur la travée 2,
- une rangée de deux camions sur la travée 1.



Schéma 9 : Position transversale pour le moment négatif sur P2 - nervure de gauche.



Schéma 10 : Position longitudinale pour le moment négatif sur P2 - nervure de gauche.

6.2.2.2 - Instrumentation

Il s'agit principalement de mesurer les flèches.

Des repères de nivellement sont disposés à cet effet sous l'intrados de chaque nervure, au droit des sections déterminantes de chaque travée.

D'autres possibilités existent, telles que l'utilisation du flexigraphe ou de capteurs de déplacement.



6.3 - Ponts à poutres sous chaussée

La famille des ponts à poutres précontraintes comprend les ouvrages de type VIPP (post-tension) et les ouvrages de type PRAD (pré-tension).

Les VIPP à plusieurs travées sont constitués d'une succession de travées indépendantes ; les PRAD sont de plus en plus souvent rendus continus au moyen d'un noyau de clavage en béton armé sur les appuis intermédiaires.

Dans le cas des PRAD à travées continues, la mesure des flèches dans les différentes travées constitue une opportunité de vérifier a posteriori la validité de l'hypothèse de continuité du tablier sur pile, prise en compte dans le calcul de l'ouvrage. En tout état de cause, seules des pertes de continuité importantes peuvent être décelées.

6.3.1 - Examen préalable de la structure

Les défauts et désordres inhérents à l'exécution sont le plus souvent dus à de mauvaises conditions de mise en œuvre du béton, dans des zones à forte densité d'armatures. La mise en tension des câbles de précontrainte sur un béton trop jeune peut également causer des sollicitations excessives du béton, entraînant sa fissuration. Des opérations de manutention mal conduites peuvent occasionner des épaufrures des arêtes, voire des éclatements locaux du béton. Il faut considérer toutefois que ces désordres doivent être décelés et réparés bien avant le jour des épreuves.

Note - Pour plus de détails, il convient de se reporter au chapitre 5 du Guide de conception des ponts à poutres préfabriquées précontraintes par post-tension, ainsi qu'à l'Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art diffusée par le Sétra.

6.3.2 - Note d'hypothèses

Les grandeurs physiques qui interviennent dans le calcul des moments et des flèches sont les suivantes :

- les caractéristiques mécaniques des sections (inertie),
- les modules des bétons, qui doivent être évalués à partir des résultats des éprouvettes, et non d'après les résistances théoriques du projet. Il est à noter que les bétons des poutres et du hourdis peuvent être différents, ce qui ajoute une source d'incertitude supplémentaire,

- les caractéristiques des camions utilisés pour les épreuves.

6.3.3 - Note de calculs

La note de calculs présente les résultats des efforts et des flèches, au quart, à la moitié et aux trois quarts de la travée, pour chacune des poutres instrumentées.

6.3.4 - Programme de chargement

On considère généralement qu'il est suffisant de contrôler une poutre centrale et une poutre de rive par travée. Il est évidemment loisible d'aller au-delà, afin d'étudier le comportement d'une poutre particulière. On retient donc deux positions transversales pour le groupe de camions :

- une position centrée transversalement sur l'ouvrage, qui entraîne la flèche maximale pour une poutre centrale,
- une position excentrée, du côté de la poutre de rive pour laquelle on veut observer la flèche maximale.

7. Spécificités des ouvrages non-courants



Il s'agit principalement des ouvrages dont l'une des travées dépasse 40 m de portée. On rencontre aussi des ouvrages plus modestes aux formes inhabituelles dont le fonctionnement est plus complexe. Les maîtres d'œuvre classent généralement les ouvrages à partir de leur principal matériau constitutif :

- ouvrages en béton précontraint,
- ouvrages métalliques,
- ouvrages mixtes acier-béton,
- ouvrages en béton armé (rarement utilisé pour ces portées),
- ouvrages en bois (très rarement utilisé pour ces portées).

Pour les épreuves, il est préférable de les classer à partir de leur fonctionnement mécanique général. Il convient alors de distinguer les ouvrages dits classiques, dont le tablier repose sur des appuis rigides, des ouvrages complexes dont le tablier est soutenu par une structure porteuse élastique comme des câbles suspenseurs ou un arc.

7.1 - Tabliers reposant sur des appuis rigides

Pour ces ouvrages, le tablier joue le rôle de poutre porteuse entre les appuis et fonctionne principalement en flexion simple sous l'effet des charges routières. Sous ces actions le tablier fléchit, et le déplacement vertical en milieu de travée est la grandeur physique significative à mesurer. Les flèches en milieu de travée (ou au point de flèche maximale dans les travées de rive) sont souvent significatives et donc facilement mesurables. On prend soin de mesurer simultanément les tassements sur appuis pour corriger les flèches mesurées en travée. Les essais conduisent à éprouver de manière systématique toutes les sections remarquables de l'ouvrage, à savoir, au minimum, les sections sur appuis et les sections de plus grande flexion en travée.

Lorsque l'ouvrage comporte un grand nombre de travées presque identiques, les épreuves des sections d'appui peuvent être limitées à quelques appuis. En revanche, il convient de maintenir un chargement d'épreuves pour chaque milieu de travée.

7.1.1 - Tabliers rigides en torsion et indéformables transversalement

Ces ouvrages ont une section transversale indéformable qui subit un déplacement vertical global accompagné d'une faible rotation d'ensemble.

Dans cette catégorie, on trouve la majorité des grands ouvrages :

- les caissons en béton précontraint mis en place par poussage,
- les caissons en béton précontraint construits par encorbellements successifs,
- les caissons métalliques à dalle orthotrope,
- les caissons à ossature mixte acier-béton.

Pour les grands ouvrages, l'intrados est souvent difficilement accessible. On peut dans certains cas envisager de faire des mesures à l'intérieur du caisson. Du fait du comportement transversal rigide, on peut se contenter de placer les repères en rive de l'extrados en dehors de la largeur roulable. La rotation de torsion du tablier peut être obtenue soit à partir de la différence des flèches sur les deux rives, soit à partir d'une mesure directe par inclinomètre. Il convient de noter que la mesure ponctuelle de la rotation au moyen d'un inclinomètre peut intégrer de légères déformations transversales et s'écarter d'avantage de la rotation moyenne.

Pour chaque section remarquable, le chargement d'épreuves est en général centré et réparti sur les différentes voies. Quelques chargements excentrés permettent de solliciter l'ouvrage en torsion.

7.1.2 - Tabliers souples en torsion et rigides transversalement

Ce sont les ponts à poutres sous chaussée, dont les poutres sont reliées régulièrement par des entretoises ou par des pièces de pont très rigides. Dans cette catégorie, on rencontre essentiellement les bipoutres à ossature mixte acier-béton. Du fait de la grande rigidité transversale, les sections demeurent quasiment indéformables dans ce plan, mais les rotations de torsion sont importantes. Cela conduit généralement à prévoir pour chaque section remarquable un chargement centré et un chargement excentré. On contrôle alors préférentiellement les flèches sur les deux poutres plutôt que sur les rives.

7.1.3 - Tabliers déformables transversalement

Ce sont les ponts à poutres sous chaussée, dont les poutres sont simplement reliées par le hourdis ou faiblement entretoisées. Dans cette catégorie on trouve les ponts à ossature mixte acier-béton constitués de plusieurs caissons ou de plusieurs poutres (≥ 3), les tabliers à nervures larges, et certains tabliers de type VIPP. Les sections ne sont plus indéformables et chaque poutre fonctionne un peu de manière indépendante des autres. Il convient alors de contrôler les flèches de chaque poutre. Lorsque les poutres sont identiques, on peut se contenter d'éprouver la poutre centrale et une poutre de rive. Les essais comprennent :

- un chargement de travée destiné à valider la répartition des charges routières entre les différentes poutres, en mesurant la flèche au droit de chaque poutre,
- un chargement destiné à éprouver les sections remarquables de chaque poutre, en concentrant les poids lourds sur une ou deux files au-dessus de la poutre.

7.1.4 - Ponts courbes et biais

La courbure et le biais créent des moments de torsion importants dans la structure, même lorsque le chargement routier est centré transversalement sur l'ouvrage, et la déformation transversale est alors accrue par rapport à un ouvrage droit. Des points de mesure des flèches sont prévus sur les deux rives.



7.2 - Ouvrages complexes

Pour ces ouvrages, le tablier repose généralement sur des appuis élastiques, parfois nombreux (des câbles porteurs) et/ou fonctionne en flexion composée sous l'effet des charges routières. Il faut donc multiplier le nombre de points de mesures par travée et mesurer le déplacement longitudinal du tablier. Il faut adapter les chargements aux formes particulières des lignes d'influence des moments sur appuis et en travée.

Par exemple, pour un pont en arc, les déformations maximales s'obtiennent en chargeant une moitié d'ouvrage depuis une culée jusqu'à la clé.

Pour les tabliers supportés par des câbles, il est souvent intéressant de déplacer un convoi comprenant un ou deux camions par voie.

Pour les ponts à haubans, on mesure les flèches du tablier et les déplacements longitudinaux des pylônes et du tablier (*Figure 11*). Les points de mesure de la flèche dans la grande travée sont par exemple implantés tous les 25 m et au moins aux quarts de travée. Il est aussi intéressant de mesurer les variations de tension dans les haubans lorsque cela est possible (pesons, jauges de déformation, fréquence de vibration).

En général il faut prévoir des chargements assez répartis pour solliciter les pylônes en flexion (travées de rive et au moins la moitié de la grande travée), et des chargements plus concentrés pour solliciter les haubans et le tablier en flexion dans la grande travée haubanée. Ces derniers chargements peuvent souvent prendre la forme d'un convoi de géométrie constante que l'on déplace sur toute la longueur de l'ouvrage

au voisinage des sections à solliciter. Pour les tabliers souples, ce convoi est composé de 1 ou 2 camions par voie ; pour les tabliers plus raides, la longueur chargée est augmentée pour obtenir le niveau de sollicitation recherché (par exemple le quart de la grande travée).

Ces ouvrages étant en général très importants ou supportés par deux nappes de haubans, il convient de prévoir des chargements excentrés.

Pour les ponts suspendus, il convient d'ajouter à la liste précédente la mesure du déplacement de la selle par rapport au sommet du pylône lorsqu'elle est mobile.



Figure 11 : chargement d'épreuve d'un pont à haubans.

Pour les ponts en arc, on mesure les flèches du tablier et de l'arc, ainsi que la rotation du massif d'appui et les déplacements longitudinaux. Les points de mesure sur le tablier et l'arc sont placés au droit des pilettes et entre les pilettes. On prévoit des chargements sur chaque travée du tablier pour solliciter le tablier, et des chargements plus généraux pour solliciter l'arc. Pour l'arc, les essais peuvent comprendre un convoi d'essai simulant le chargement d'une demi-portée de l'ouvrage que l'on déplace par quart de portée de l'arc (Figure 12).

Ces structures sont souvent instrumentées pour suivre, lors de la construction, la rotation du massif d'appui (par inclinomètre) et le moment fléchissant lors des vérinages dans une section à la base de l'arc, et il faut bien évidemment profiter de cette instrumentation existante.

Pour les bow-string, comme pour tout pont en arc, les essais comprennent au moins l'épreuve des deux demi-travées (chargement depuis une culée jusqu'à la section de clé), puis de la travée entière (Figure 13). Comme précédemment, il est aussi utile de déplacer un convoi comprenant 1 ou 2 camions par file. Les points de mesure des flèches sont disposés sur le tablier et sur l'arc au moins tous les quarts de travée.

Pour les ponts à béquilles, on mesure les flèches du tablier, le déplacement longitudinal du tablier, et la rotation à la jonction du tablier avec la béquille et à la base de la béquille. Les points de mesure de la flèche sur le tablier comprennent le nœud de jonction avec la béquille et au moins les quarts de travée.

Pour les structures très souples, sensibles aux phénomènes dynamiques, le chapitre 2 définit les mesures complémentaires à effectuer pour quantifier le comportement dynamique de l'ouvrage sous les actions du vent ou des piétons. La mesure d'un amortissement beaucoup plus faible que prévu peut entraîner la reprise de certains calculs, et faire apparaître la nécessité de disposer des amortisseurs.

Note - Lorsque des appareils de mesure ont été placés dans l'ouvrage pour assurer un suivi pendant la construction, il est possible d'exploiter les informations fournies par ces appareils (jauges de déformations, inclinomètres...) lors des essais. Pour le contrôle de la géométrie, si les repères utilisés pendant les épreuves sont différents de ceux déjà mis en place, il ne faut pas oublier d'établir une correspondance entre ces repères.

Pour ces ouvrages complexes, il est en général pertinent d'enregistrer le mouvement du tablier sous cycle thermique pendant les jours qui précèdent ou qui suivent les épreuves, du fait de leur grande sensibilité aux effets thermiques.

Pour ces ouvrages complexes, il est utile de réfléchir aux éventuels moyens de mesure permanents à mettre en œuvre : anémomètres, accéléromètres, sondes thermiques, cordes vibrantes...

Figure 12 : chargement d'un pont en arc.





Figure 13 : mesure de flèches pendant les épreuves d'un bow-string.



Figure 14 : appareillage pour pesée des réactions d'appui.

7.3 - Comportement local

Des éléments particuliers de la structure peuvent être instrumentés pour vérifier le comportement local sous des chargements relativement concentrés (1 ou 2 camions). On peut citer :

- un nœud de liaison complexe, par exemple la jonction béquille-tablier,
- une console métallique prolongeant une pièce de pont sous les encorbellements,
- un bracon métallique ou en béton portant une partie d'ouvrage en encorbellement,
- les rotations sur culée des poutres d'un ouvrage mixte très biais, liées à la flexion de l'entretoise sur appui ;
- la flexion locale des dalles orthotropes (avec des jauges de déformation).

On peut aussi profiter des épreuves pour quantifier la rigidité d'une partie de la structure lorsque cette rigidité est mal connue et qu'elle influence fortement les sollicitations.

Pour certains ouvrages mixtes particulièrement sollicités en fatigue (pont autoroutier par exemple), les variations de déformations de fatigue sous le passage d'un poids lourd peuvent être mesurées au moyen de jauges collées sur les semelles métalliques. On prévoit alors d'éprouver la section à mi-travée en équipant la semelle inférieure d'au moins 3 jauges permettant de calculer une contrainte nominale moyenne.

7.4 - Pesée de réactions d'appui

Pour certains ouvrages, il peut être opportun de procéder à la mesure de réactions d'appui sous charges permanentes. La pesée est généralement prévue au droit des culées où les réactions d'appui sont faibles (Figure 14). Cela concerne principalement :

- les ouvrages en béton précontraint,
- les ouvrages fortement courbes ou biais ou présentant un mauvais équilibrage entre la travée de rive et la travée adjacente.

Compte tenu de la forte incidence des variations thermiques (gradients thermiques) sur les résultats des mesures, celles-ci doivent se dérouler sur une période d'environ 24 heures. Des mesures du gradient thermique doivent être opérées durant les pesées de manière à pouvoir corriger les mesures.

Annexe 1 - Clauses types de CCTP



1 - Ouvrage pour lequel aucune mesure de déformation n'est requise⁽¹⁾

Le présent ouvrage est soumis à des épreuves de charges sans qu'il soit procédé à des mesures de flèches.

1.1 - Objet des épreuves

Ces épreuves poursuivent les objectifs suivants :

- assurer au maître d'ouvrage que l'ouvrage livré est apte à bien supporter les charges d'épreuve, et par extrapolation, à remplir sa destination finale en terme de portance,
- constituer un des éléments de l'état de référence de l'ouvrage.

1.2 - Organisation des épreuves

L'entrepreneur assure l'organisation générale, l'établissement des notes de calculs, définit le programme des épreuves, et propose l'interprétation des épreuves. Il assure par ailleurs au maître d'œuvre les moyens d'accès à l'ouvrage permettant le travail des personnes chargées de l'inspection et des mesures, et fournit les camions ou lests nécessaires aux épreuves. Ces prestations sont à la charge de l'entrepreneur.

Les inspections et les nivellements sont à la charge du maître d'œuvre. Ces opérations sont menées de manière contradictoire avec l'entrepreneur. L'entrepreneur assure la direction des épreuves, dont l'interprétation sera soumise à l'approbation du maître d'œuvre. [Par dérogation au fascicule 61 titre II]⁽²⁾, l'âge minimal du béton peut être inférieur à 90 jours à la date des épreuves. On exige un âge minimal d'un mois pour le dernier béton coulé, sous réserve de l'obtention des valeurs de résistance de béton prévues dans les notes de calculs.

1.3 - Charges d'épreuve

L'ouvrage subit des charges statiques générales qui génèrent des effets compris entre ceux des charges routières fréquentes et les trois-quarts des charges routières caractéristiques définies dans l'Eurocode EN 1991-2, sans être toutefois inférieurs aux effets d'une charge uniformément répartie sur la chaussée de 2,5 kN/m².

Il convient de solliciter tous éléments constitutifs de l'ouvrage par les charges d'essai. En pratique, on s'intéresse ici à la section de milieu de travée.

Les véhicules d'épreuve sont disposés à l'arrêt sur la chaussée et pourront être serrés tant dans le sens longitudinal que transversal, indépendamment du découpage de la chaussée en voies de circulation.

Les effets dynamiques sont contrôlés qualitativement par des épreuves simplifiées sous charges roulantes. Parmi les véhicules utilisés pour les épreuves par poids mort, on en conserve un nombre égal à celui des voies de circulation, en choisissant ceux qui comportent les essieux les plus lourds. Ces véhicules étant disposés de front et dans le même sens, on les fait circuler de bout en bout du pont à la vitesse adaptée compte tenu des exigences de la sécurité.

1.4 - Note de calculs

L'entrepreneur établit [deux mois]⁽³⁾ avant la date prévue pour les épreuves la note de calculs qui comprend :

- une note d'hypothèses,
- le calcul de l'état probable de l'ouvrage au jour des essais sous l'effet des charges permanentes,
- le calcul des effets des charges fréquentes et

⁽¹⁾ PICF de moins de 10 mètres, ouvrages sous remblai important (épaisseur d'au moins 1,5 mètres et supérieure au quart de l'ouverture)

⁽²⁾ Le fascicule 61 titre II doit continuer à être visé en l'attente d'une norme nationale sur les épreuves

⁽³⁾ Valeur à préciser par le maître d'œuvre

caractéristiques,

- le choix des charges d'épreuve,
- le calcul des effets de ces charges, sans pondération, en prenant les caractéristiques réelles des camions prévus, avec une estimation de leur incertitude.

Cette note est soumise au visa du maître d'œuvre qui dispose d'un délai de quinze jours ouvrés pour faire ses remarques éventuelles.

1.5 - Programme des épreuves

L'entrepreneur propose le programme des épreuves [un mois]⁽⁴⁾ avant la date prévue pour celles-ci. Ce programme comprend dans l'ordre les opérations suivantes :

- le schéma d'implantation des repères de nivellement,
- l'examen détaillé contradictoire, avec si nécessaire, une proposition d'adaptation de la suite du programme aux observations réalisées,
- l'implantation des positions des charges,
- la vérification des caractéristiques des moyens de chargement (pesée, géométrie),
- le chargement des travées (ordre des différents chargements),
- l'inspection spécifique pendant chargement : partie centrale de l'intrados, parties latérales de l'encastrement de la traverse sur les piédroits, parties latérales des piédroits des ponts-cadres,
- l'inspection détaillée après déchargement,
- le nivellement de référence avant et après les essais,
- les caractéristiques des moyens d'accès.

Cette note est soumise au visa du maître d'œuvre qui dispose d'un délai de quinze jours ouvrés pour faire ses remarques éventuelles.

Après acceptation du programme, l'entrepreneur fournit et place des repères de nivellement inoxydables sur les rives du tablier, au droit des appuis et à mi-portée de chaque travée. Ces repères sont scellés dans des réservations prévues à cet effet, éventuellement obtenues par perçage, l'emploi de chevilles auto-foreuses ou de pistolets de scellement est interdit. Le maître d'œuvre se réserve la possibilité de faire mettre en place en temps utile tout dispositif de contrôle ou de surveillance qui lui paraît justifié (tassomètre, sonde de température, extensomètre...) et de réaliser

des mesures au cours des épreuves. L'entrepreneur :

- fournit les moyens d'accès éventuellement nécessaires pour accéder aux différentes parties de l'ouvrage à chacune des phases des épreuves où cela est nécessaire,
- réalise le repérage de la position des moyens de chargement,
- fournit les moyens de chargement conformes aux cas décrits précédemment et fait réaliser les différents cas de chargement prévus, en dirigeant les manœuvres de déplacements.

Les résultats des examens détaillés des inspections et des nivellements commandités par le maître d'œuvre doivent être conformes aux spécifications suivantes :

- absence de fissuration anormale ou d'autre anomalie avant les chargements,
- absence de désordre décelable pendant ou après les chargements,
- absence de tassement résiduel.

En cas de non-conformité à ces spécifications, l'entrepreneur fournit dans un délai d'un mois les explications, propose si nécessaire les opérations permettant de mettre l'ouvrage en conformité et après accord du maître d'œuvre, les réalise.

2 - Ouvrage pour lequel des mesures de différentes natures sont requises

2.1 - Objet des épreuves

Ces épreuves poursuivent les objectifs suivants :

- assurer au maître d'ouvrage que l'ouvrage livré est apte à bien supporter les charges d'épreuve, et, par extrapolation, à remplir sa destination finale en terme de portance,
- vérifier que le fonctionnement mécanique de l'ouvrage sous charges routières est conforme à sa modélisation de calculs,
- constituer un des éléments de l'état de référence de l'ouvrage.

2.2 - Organisation des épreuves

L'entrepreneur assure l'organisation générale, l'établissement des notes de calculs, définit le programme des épreuves et propose l'interprétation

⁽⁴⁾ Valeur à préciser par le maître d'œuvre

des épreuves. Il assure par ailleurs au maître d'œuvre les moyens d'accès à l'ouvrage permettant le travail des personnes chargées de l'inspection et des mesures et fournit les camions ou lests nécessaires aux épreuves. Ces prestations sont à la charge de l'entrepreneur.

Les inspections, les mesures et les nivellements sont à la charge du maître d'œuvre. Ces opérations sont menées de manière contradictoire avec l'entrepreneur.

L'interprétation des épreuves est soumise à l'approbation du maître d'œuvre.

Par dérogation au fascicule 61 titre II, l'âge minimal du béton peut être inférieur à 90 jours à la date des épreuves. L'âge minimal du dernier bétonnage est de un mois, sous réserve de l'obtention des valeurs de résistance de béton prévues dans les notes de calculs.

2.3 - Charges d'épreuve

L'ouvrage doit être soumis à des charges statiques générales qui génèrent des effets compris entre ceux des charges routières fréquentes et les trois-quarts des charges routières caractéristiques définies dans l'Eurocode EN 1991-2, sans être toutefois inférieurs aux effets d'une charge uniformément répartie sur la chaussée de $2,5 \text{ kN/m}^2$ ⁽⁵⁾.

Les sollicitations développées par les charges routières d'essai doivent être engendrées dans les éléments constitutifs de l'ouvrage. En pratique, il s'agit des sections de l'ouvrage les plus sollicitées en flexion, appelées "sections remarquables", c'est-à-dire, en général, de la section de mi-travée pour chaque travée et des sections sur appuis intermédiaires.

Les véhicules d'épreuve sont disposés à l'arrêt sur la chaussée et peuvent être serrés tant dans le sens longitudinal que transversal, indépendamment du découpage de la chaussée en voies de circulation.

Pour simplifier le déroulement des épreuves, et pour éviter de charger indûment une section de l'ouvrage, il convient de limiter la variation du nombre de véhicules d'essai suivant les sections d'études. Il est ainsi admis que les sollicitations engendrées par les charges d'essais dans quelques "sections remarquables", il peut en être ainsi des sections sur appuis intermédiaires, puissent être inférieures, au maximum, de 10 % aux sollicitations dues aux charges routières fréquentes.

Les effets dynamiques sont contrôlés par des épreuves simplifiées sous charges roulantes :

- parmi les véhicules utilisés pour les épreuves par poids mort, il en est conservé un nombre égal à celui des voies de circulation, en choisissant ceux qui comportent les essieux les plus lourds. Ces véhicules étant disposés de front et dans le même sens, ils doivent circuler de bout en bout du pont à la vitesse adaptée compte tenu des exigences de la sécurité,
- un essai de freinage sur l'ouvrage est organisé avec un véhicule lourd à 2 essieux arrières et de plus de 19 tonnes. Cet essai permet d'appréhender d'éventuels mouvements anormaux (mise en butée des joints, déformation irréversible des appareils d'appui...).

Aucune épreuve de charge de l'ensemble des trottoirs n'est demandée pour les ponts dont les poutres maîtresses supportent à la fois chaussées et trottoirs. Il faut simplement éprouver sa résistance locale sous l'effet des charges d'essai.

2.4 - Hypothèses de calculs

L'entrepreneur établit au moins [un mois]⁽⁶⁾ avant la date prévue pour la remise de la note de calculs des épreuves la note des hypothèses de calculs. Cette note est soumise au visa du maître d'œuvre qui dispose d'un délai de 15 jours ouvrés pour faire ses remarques éventuelles.

2.5 - Note de calculs

Préalablement aux essais, l'entrepreneur établit [3 mois]⁽⁷⁾ avant la date prévue pour les épreuves la note de calculs qui comprend :

- le calcul de l'état probable de l'ouvrage le jour des essais sous l'effet des charges permanentes,
- le calcul des effets des charges routières fréquentes et caractéristiques,
- l'incidence sur l'ouvrage des actions naturelles comme la température, le gradient thermique (différence de température entre parties d'ouvrage), de manière à pouvoir autoriser ou non les essais et interpréter les mesures in-situ. L'entrepreneur évalue la nécessité d'enregistrer le mouvement du tablier sous cycle thermique lors des épreuves, ainsi que pendant les jours qui précèdent ou qui suivent,
- le choix des charges d'épreuve et leurs simulations par des camions réservés par l'entreprise. Le calcul des effets de ces charges est mené sans pondération, en prenant les caractéristiques réelles des camions,
- la définition des incertitudes admissibles sur le poids des camions de chargement et sur leur position,

⁽⁵⁾ Le maître d'œuvre fixe les chargements complémentaires à mettre en œuvre dans le cas où l'ouvrage est soumis à une circulation exceptionnellement lourde (convois exceptionnels des types D, E et super E)

⁽⁶⁾ Le maître d'œuvre fixe le délai en fonction de l'importance de l'ouvrage, en tenant compte des délais de visa

⁽⁷⁾ Le maître d'œuvre fixe le délai en fonction de l'importance de l'ouvrage, en tenant compte des délais de visa

- la définition du positionnement successif des camions et des sections remarquables à contrôler à chaque position. La cinématique de déplacement des camions est étudiée de manière à ne produire dans aucune des sections remarquables des effets supérieurs à ceux des charges d'essai,
- la quantification des grandeurs physiques représentatives du fonctionnement mécanique de l'ouvrage lors des essais et l'établissement des pseudo-lignes d'influence si elles sont nécessaires. Le bureau d'études de l'entrepreneur détermine la valeur limite de cette grandeur physique qui, si elle était atteinte, commanderait l'arrêt des épreuves. À défaut d'analyse particulière, il est possible de retenir 1,5 fois la valeur nominale prévue,
- la mise en évidence des incertitudes portant sur le calcul des grandeurs physiques et sur les mesures,
- la détermination des tassements des appuis et appareils d'appui sous charges routières, s'ils sont importants (> 1 mm). Cette note est soumise au visa du maître d'œuvre qui dispose d'un délai de [30 jours] ouvrés⁽⁸⁾ pour faire ses remarques éventuelles.

Postérieurement aux essais, dans un délai de [5 jours] ouvrés⁽⁹⁾ après les essais, l'entrepreneur fournit le procès-verbal des essais et une note d'interprétation des essais qui porte sur les points suivants :

- la vérification des résultats expérimentaux et théoriques et l'analyse des écarts éventuels,
- si nécessaire, des études complémentaires s'appuyant sur des modèles plus réalistes. Ceci concerne particulièrement les épreuves de charges locales, lorsque les mesures donnent des valeurs inadéquates, mais attestent toutefois d'un fonctionnement homogène des éléments testés,
- si un élément apparaît déficient du fait d'un défaut d'exécution et/ou s'il y eu un dépassement de la valeur nominale des grandeurs physiques représentatives, ceci implique l'arrêt des épreuves de ces éléments,

L'entrepreneur doit analyser la cause de ces défauts, proposer au maître d'œuvre dans le délai fixé par ordre de service⁽¹⁰⁾ les solutions correctives et détecter tous les éléments déficients.

Les épreuves concernant ces éléments doivent être refaites, à la charge de l'entrepreneur, après réparation. Cette note postérieure aux essais est soumise au visa du maître d'œuvre qui dispose d'un délai de [10 jours] ouvrés pour faire ses remarques éventuelles.

2.6 - Programme des épreuves

L'entrepreneur propose le programme des épreuves [deux mois]⁽¹¹⁾ avant la date prévue pour celles-ci. Cette note est soumise au visa du maître d'œuvre qui dispose d'un délai de 20 jours ouvrés pour faire ses remarques éventuelles. Ce programme comprend dans l'ordre les opérations suivantes :

- la liste des participants aux épreuves et la liste des différents responsables et le chargé de la coordination de l'ensemble des opérations,
- le schéma d'implantation des repères de nivellement et des moyens de mesures en conformité avec le programme des mesures,
- la définition des moyens d'accès nécessaires à la mise en œuvre de l'instrumentation et à la réalisation des mesures. [les moyens d'accès à mettre en œuvre pour accéder aux points suivants sont les suivants]⁽¹²⁾,
- les moyens de communication nécessaires entre les différents intervenants qui doivent être testés sur l'ouvrage une semaine avant les épreuves et la veille de celles-ci [les moyens minimaux à mettre à disposition sont les suivants]⁽¹³⁾,
- l'examen détaillé contradictoire initial, avec si nécessaire, l'adaptation de la suite du programme aux observations réalisées,
- l'implantation des positions des charges,
- la vérification des caractéristiques des moyens de chargement et en particulier les bons de pesage avant les épreuves et après celles-ci dans le cas où les camions ont été soumis à une forte pluie depuis la pesée,
- le chargement des appuis,
- le plan de déplacement des camions,
- le chargement des travées selon les cas définis dans la note de calculs,
- les chargements locaux,
- le chargement dynamique,
- les mesures prévues à chaque chargement,
- les inspections spécifiques pendant chaque chargement : partie centrale de l'intrados des travées chargées, appareils d'appui, zones éventuellement fissurées ou anomalies repérées lors du premier examen détaillé... [à compléter en tant que de besoin]⁽¹⁴⁾,
- l'examen final de l'ouvrage après déchargement. Cet examen est ensuite complété par l'Inspection Détaillée Initiale (IDI) à la convenance du maître d'œuvre. La réception de l'ouvrage peut être conditionnée par les résultats de cette IDI,

⁽⁸⁾ Le maître d'œuvre fixe le délai en fonction de l'importance de l'ouvrage, en tenant compte des délais de visa

⁽⁹⁾ Le maître d'œuvre fixe un délai compatible avec le déroulement des opérations de réception

⁽¹⁰⁾ Le maître d'œuvre fixe le délai par ordre de service et remet la réception à une date ultérieure

⁽¹¹⁾ Valeur à moduler en fonction de l'importance de l'ouvrage

⁽¹²⁾ Le maître d'œuvre fixe les parties à visiter et les moyens d'accès qu'il juge utiles en fonction de l'importance et du type de pont

⁽¹³⁾ Le maître d'œuvre fixe les moyens de communication en fonction de l'importance et du type de pont

⁽¹⁴⁾ Le maître d'œuvre fixe les parties qui devront être accessibles en concordance avec les moyens de visite à mettre en place

- le nivellement de référence avant et après les épreuves,
- le plan coté de l'emplacement des points de nivellement [à compléter en tant que de besoin]⁽¹⁵⁾.

L'entrepreneur place des repères de nivellement inoxydables sur les rives du tablier, au droit des appuis et à mi-portée de chaque travée [et sur ...]⁽¹⁶⁾. Ces repères sont scellés dans des réservations prévues à cet effet, éventuellement obtenues par perçage. L'emploi de cheville auto-foreuse ou de pistolet de scellement est interdit.

Le maître d'œuvre se réserve la possibilité de faire mettre en place, en temps utile, tout dispositif de contrôle ou de surveillance qui lui paraît justifié (tassomètres, sondes de température, extensomètres...) et réalise les mesures au cours des épreuves.

L'entrepreneur fournit les moyens d'accès éventuellement nécessaires pour accéder aux différentes parties de l'ouvrage à chacune des phases des épreuves, où cela est nécessaire. Il réalise le repérage de la position des moyens de chargement, fournit les moyens de chargement conformes aux cas décrits dans la note de calculs, et fait réaliser des différents cas de chargement prévus.

2.7 - Articles spécifiques aux différents ouvrages

Tabliers rigides en torsion et indéformables transversalement :

Cas des caissons en béton précontraint, métalliques à dalle orthotrope, à ossature mixte acier-béton. On peut se contenter de placer les repères en rive de l'extrados en dehors de la largeur roulable. La rotation de torsion du tablier est obtenue à partir de la différence des flèches sur les deux rives.

Pour chaque section remarquable, le chargement d'épreuve est en général centré et réparti sur les différentes voies. Quelques chargements excentrés, au moins un par travée, permettront de solliciter l'ouvrage en torsion.

Tabliers souples en torsion et rigides transversalement :

Cas des bipoutres à ossature mixte acier-béton. On doit prévoir pour chaque section remarquable un chargement centré et un chargement excentré, en contrôlant les flèches sur les deux poutres.

Tabliers déformables transversalement :

Cas des ponts à ossature mixte acier-béton constitués de plusieurs caissons ou de plusieurs poutres (≥ 3), les tabliers à nervures larges, et généralement les tabliers de type VIPP. On doit contrôler les flèches de chaque poutre. Les essais comprendront un chargement de travée destiné à valider la répartition des charges routières entre les différentes poutres, en mesurant la flèche au droit de chaque poutre, et un chargement destiné à éprouver les sections remarquables de chaque poutre, en concentrant les poids lourds sur une ou deux files au-dessus de la poutre.

Ponts courbes et biais :

Des points de mesure des flèches sont prévus sur les deux rives.

Ponts réservés à la circulation des piétons et des cycles :

On procède à des épreuves par poids mort ainsi qu'à des essais dynamiques. Pour les épreuves par poids mort, la charge composée d'un lest ou, si cela est possible, de véhicules de poids appropriés, doit engendrer des sollicitations comprises entre les effets des charges fréquentes et 0,8 fois les effets des charges caractéristiques définies dans l'Eurocode EN 1991-2. Pour les épreuves par chargement dynamique, l'entrepreneur détermine la charge d'excitation, les exigences métrologiques, le nombre de capteurs et le nombre de modes à mesurer, de manière à valider les analyses modales théoriques. Les essais de charge comporteront la vérification du bon fonctionnement du tablier en flexion, en balancement (déplacement horizontal) et en torsion.

Charges statiques locales :

Cas des ouvrages à pièces de pont et consoles métalliques, suspentes, trottoirs en encorbellement de plus d'un mètre cinquante par rapport à la poutre de rive. Il convient de procéder à la mise en charge d'au moins 10 % d'entre eux. Pour les éléments soumis à des sollicitations importantes provenant à la fois des charges locales et des charges générales de chaussée, il y a lieu de laisser en place les charges locales pendant le déroulement des épreuves par charge générale de chaussée.

Pour les ponts à haubans :

Le calcul comprend la détermination des flèches du tablier, des déplacements longitudinaux des pylônes et du tablier, et des variations de tension dans les

⁽¹⁵⁾ Le maître d'œuvre complète les exigences en s'inspirant du fascicule n°4 de la seconde partie de l'Instruction Technique sur la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art

⁽¹⁶⁾ Le maître d'œuvre fixe si besoin est les emplacements où devront être fixés des repères de nivellement supplémentaires. Il ajoute, si besoin est, tout autre dispositif de mesure

haubans. Pour la grande travée, les points de mesures seront placés tous les 25 m et au moins aux quarts de travée. Les essais comprennent notamment des chargements répartis pour solliciter les pylônes en flexion et des chargements concentrés pour solliciter les haubans et le tablier en flexion.

Pour les ponts suspendus :

Le calcul comprend la détermination des flèches du tablier, des déplacements longitudinaux des pylônes et du tablier, des variations de tension dans les suspentes, et des déplacements des selles mobiles. Pour la grande travée, les points de mesures seront placés tous les 25 m et au moins aux quarts de travée. Les essais comprennent notamment des chargements répartis pour solliciter les pylônes en flexion et des chargements concentrés pour solliciter les suspentes, et le tablier en flexion.

Pour les ponts en arc :

Le calcul comprend la détermination des efforts et des déformations de l'ouvrage au niveau du tablier et de l'arc au droit des pilettes et entre les pilettes, de la rotation des massifs d'appui, et des variations de moments à la base des arcs à chaque phase principale des essais. Ces phases comprennent notamment le chargement de chaque travée du tablier et les chargements généraux pour solliciter l'arc.

Pour les bow-string :

Le calcul comprend la détermination des efforts et des déformations du tablier et de l'arc au moins tous les quarts de travée à chaque phase principale des essais. Ces phases comprennent notamment le chargement des deux demi-travées, celui de la travée entière, et des chargements localisés.

Pour les ponts à béquilles :

Le calcul comprend la détermination des flèches du tablier, du déplacement longitudinal du tablier, et de la rotation à la jonction du tablier avec la béquille et à la base de la béquille. Les points de mesure de la flèche sur le tablier comprennent le nœud de jonction avec la béquille et au moins les quarts de travée.

Pour les structures souples :

Cas des ponts de grande portée (> 200 m), des ponts à câbles, et des passerelles piétonnes. Il n'est pas possible d'établir un cahier des charges types pour ce genre de structure.

2.8 - Procès-verbal des épreuves

L'entrepreneur remet au maître d'œuvre les procès-verbaux des épreuves dans un délai de dix jours ouvrés qui portent sur les points suivants :

- l'horaire exact de toutes les opérations effectuées,
- la description de ces opérations et les adaptations éventuelles du programme des épreuves et les causes de ces adaptations,
- la liste des véhicules utilisés et leurs caractéristiques (dimensions, charge par essieu...),
- les dispositions exactes de ces divers véhicules à chaque phase d'épreuves,
- les résultats des mesures effectuées en liaison avec le maître d'œuvre,
- les constatations faites lors des différents examens de l'ouvrage, avant, pendant et après les épreuves.

2.9 - Validation des épreuves

Les résultats des mesures et observations doivent être conformes aux spécifications suivantes :

- lors des chargements d'appui, aucun mouvement non-prévu ne doit être détecté,
- lors des chargements des travées, les résultats des mesures doivent être compris dans la fourchette [moins 20 % / plus 10 %] des valeurs probables obtenues par le calcul,
- la validation des mesures doit intégrer la prise en compte des effets thermiques relevés,
- lors des chargements des travées, les déformations doivent être proportionnelles aux sollicitations dues aux chargements,
- les déformations doivent totalement disparaître après déchargement,
- les inspections et examens doivent permettre de constater l'absence de désordre décelable pendant ou après les chargements.

En cas de non-conformité à ces spécifications, l'entrepreneur fournit les explications dans un délai qui sera fixé par ordre de service en fonction de l'importance des non-conformités⁽¹⁷⁾, propose si nécessaire les opérations permettant de mettre l'ouvrage en conformité et après accord du maître d'œuvre, les réalise. Le cas échéant, toute partie des épreuves à refaire est à la charge de l'entrepreneur.

⁽¹⁷⁾ Le maître d'œuvre fixe le délai par ordre de service et remet la réception à une date ultérieure

Annexe 2 - Fiches techniques sur les matériels de mesure et domaine d'emploi



Cette annexe regroupe les appareils de mesure les plus couramment utilisés lors des épreuves des ponts-routes et des passerelles. Ces matériels sont classés en 5 catégories selon le type de mesure à effectuer :

- Appareils pour les mesures de déplacement :
 - les flexigraphes mécaniques ;
 - les capteurs de déplacement ;
 - les flexigraphes laser ;
 - les matériels de nivellement ;
 - les théodolites motorisés.
- Appareils pour les mesures de déformation :
 - les jauges électriques ;
 - les cordes vibrantes ;
 - les extensomètres ;
 - les fibres optiques ;
 - les courburemètres.
- Appareils pour les mesures de rotation :
 - les nivelles ou les clinomètres.
- Appareils pour les mesures de vibrations :
 - les accéléromètres ;
 - les géophones.
- Appareils de pesée des véhicules :
 - les ponts-basculés.

On se reportera au paragraphe 5.2 du document pour toutes précisions sur la nature des mesures à effectuer en fonction du type d'ouvrage et des effets recherchés.

Flexigraphe mécanique (type Jules Richard)



Principe

- Appareil relié au tablier par un fil INVAR
- Amplification des mouvements par un système mécanique
- Enregistrement sur un tambour gradué

Domaine d'utilisation

- Mesure de flèche pour ouvrages courants ou exceptionnels, lorsque les hauteurs restent inférieures à 30 m
- A partir de 10 m, des précautions doivent être prises, en fonction de l'amplitude des flèches et de l'existence de vent

Avantages

- Appareil autonome, ne nécessitant pas d'alimentation électrique

Inconvénients

- Installation du fil invar
- Nécessité de la présence d'un opérateur pour la mise en route du tambour, le repérage des cas de charge, le chargement de papier

Aspects métrologiques

- Limites d'étendue de mesure : 0,1 mm à 10 cm
- Résolution : 0,1 mm
- Incertitude sur les mesures : 0,1 à 0,5 mm selon les conditions d'installation et les amplifications

Capteur de déplacement



Principe

- Capteur de déplacement relié au tablier par un fil INVAR ou fixé au bout d'une perche télescopique
- Transformation du déplacement en tension
- Enregistrement par centrale d'acquisition et/ou enregistreur graphique

Domaine d'utilisation

- Mesure de la flèche pour ouvrages courants ou exceptionnels, lorsque les hauteurs restent inférieures à 30 m
- L'utilisation d'une perche comme support de capteur, est limitée aux ouvrages dont le tirant d'air est inférieur à 6 m
- A partir de 10 m, des précautions doivent être prises en fonction de l'amplitude des flèches et de l'existence de vent

Avantages

- Centralisation des mesures apportant un gain de temps lors du chargement des ouvrages
- Installation assez rapide si l'on a recours à l'emploi de perches. (Absence de collage ou bridage en intrados)

Inconvénients

- Installation du fil invar
- Nécessité de relier électriquement les capteurs au poste de mesure
- Limitation en hauteur lors de l'utilisation d'une perche

Aspects métrologiques

- Limites d'étendue de mesure : 0,01 mm à quelques centimètres
- Résolution : 0,01 mm
- Incertitude sur les mesures : 0,1 à 0,5 mm selon les conditions d'installation

Flexigraphe LASER



Principe

Mesure de la déflexion d'un point de l'ouvrage par rapport à un faisceau LASER de référence

Domaine d'utilisation

Ouvrages de grande hauteur sur cours d'eau ou voies ferrées

Avantages

- Enregistrement continu des flèches pour des ouvrages de grande hauteur, situés sur cours d'eau ou sur voies ferrées
- Précision satisfaisante pour les ouvrages souples, suffisante pour des ouvrages rigides où l'on optimise des distances de visée

Inconvénients

- Sensibilité du faisceau à l'environnement thermique et lumineux
- Matériel lourd d'utilisation dans les anciennes versions (mise en œuvre peu rapide)
- Réglages délicats
- Précision à grande distance insuffisante pour les structures rigides, notamment en cas d'utilisation de jour en extérieur
- Nécessité de contrôler la rotation des émetteurs placés sur et dans les ouvrages
- Nécessité de qualifier les utilisateurs

Aspects métrologiques

- Limites d'étendue de mesure : 0,5 mm à 30 cm
- Résolution : 0,2 mm
- Incertitude sur les mesures : 0,2 mm à 1 mm selon les conditions de chantier

Niveau de précision + Mire INVAR



Principe

Mesure indirecte de flèche par différence d'altitude lue sur mire INVAR avant, pendant et après chargement. Les lectures peuvent se faire par rayonnement, ou par cheminement selon l'importance de l'ouvrage et la disposition des véhicules

Domaine d'utilisation

Ouvrages courants d'importance limitée. Principe de mesure particulièrement adapté pour les accès difficiles ou impossibles sous ouvrage (ouvrages situés sur cours d'eau, sur voies ferrées ou sur voies à très fort trafic)

Avantages

- Principe de mesure d'une grande simplicité et rapidement mis en œuvre, si les points sont peu nombreux, à condition de se limiter à une station et de réduire au maximum les distances de visée

Inconvénients

- Absence d'enregistrement continu de la mesure
- Principe de mesure très lourd pour des points nivelés multiples et très espacés. Nécessité de limiter les distances de visée à 30 m et de stabiliser les mires
- Impossibilité de mesurer les flèches sous charge roulante
- Nécessité de disposer de repères scellés sur l'ouvrage et de repères de référence extérieurs

Aspects métrologiques

- Limites d'étendue de mesure : 0,1 mm à plusieurs dizaines de cm
- Résolution : 0,1 mm
- Incertitude sur les mesures : 0,2 à 0,5 mm selon les conditions de vent, de température, et d'humidité relative

Théodolite motorisé



Principe

Détermination des coordonnées de cibles à partir d'une station. Obtention de la flèche par différence d'altitude

Domaine d'utilisation

Ouvrages de grande hauteur sur cours d'eau ou voies ferrées (possibilité d'utilisation à l'intérieur de caissons)

Avantages

- Possibilité d'enregistrement des mesures

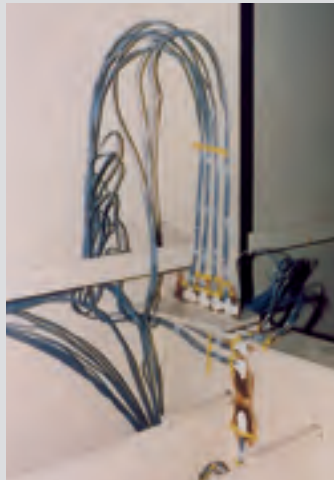
Inconvénients

- Nécessité d'étude préalable de la conception du chantier par des personnes qualifiées
- Mise en place des cibles
- Sensibilité aux réfractions
- Précautions à prendre par temps pluvieux
- En cas d'utilisation à l'intérieur des caissons nécessité de prendre en compte les rotations, y compris pour la correction des distances

Aspects métrologiques

- Limites d'étendue de mesure : sans objet
- Résolution : jusqu'à 0,1 mm selon les instruments
- Incertitude sur les mesures :
 - visées inférieures à 100 m et dans de bonnes conditions : 0,2 à 0,5 mm
 - visées supérieures à 100 m ou dans des conditions défavorables : > 1 mm

Jauge électrique



Principe

La jauge est constituée d'un fil résistant qui est collé sur la structure. La déformation de la structure modifie sa longueur, donc sa résistance qui est contrôlée par un pont de Wheatstone

Domaine d'utilisation

- Mesure de déformation des matériaux béton et acier
- Les emplacements à contrôler doivent être rendus accessibles pour l'instrumentation

Avantages

- Sensibilité et fidélité éprouvées
- Une bonne mise en œuvre permet une utilisation ultérieure, voire de la surveillance

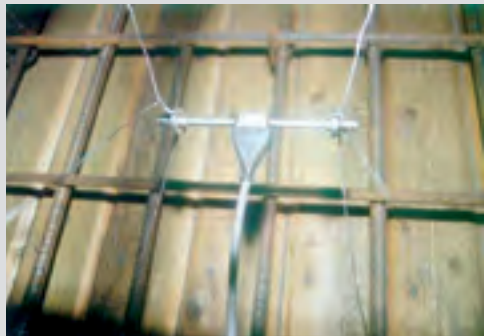
Inconvénients

- Nécessite l'accès aux points à contrôler et une mise en œuvre méticuleuse
- Sur béton fissuré, les mesures peuvent ne pas être significatives

Aspects métrologiques

- Etendue de mesure : $\pm 2 \cdot 10^{-3}$ (déformation relative)
- Résolution : 10^{-6} (déformation relative)
- Incertitude de mesures : 1 à $10 \cdot 10^{-6}$ (déformation relative)

Corde vibrante



Principe

- Un fil de longueur définie, tendu avec une force donnée, a une fréquence de résonance connue.
- Si la longueur du fil varie, sa fréquence de résonance aussi
- La mesure de celle-ci permet de connaître la variation d'allongement du fil

Domaine d'utilisation

- Mesure des déformations du béton
- Plusieurs matériels de technologies différentes existent. Certains sont nécessairement noyés dans le béton, d'autres peuvent également être fixés sur les parements

Avantages

- Sensibilité et fidélité éprouvées
- Peu de dérive dans le temps

Inconvénients

- Nécessité de définir les emplacements de mesure avant la construction de l'ouvrage pour les capteurs à noyer dans le béton

Aspects métrologiques

- Etendue de mesure : $\pm 1.10^{-3}$ (déformation relative maximale)
- Résolution : $0,2.10^{-6}$ à 5.10^{-6} (déformation relative)
- Incertitude de mesures : 3 à 15.10^{-6} (déformation relative)

Extensomètre



Mécanique.



Inductif.

Principe

Un capteur de résolution égale ou inférieure à un micromètre est inséré dans un montage mécanique. Ce montage est placé sur des bases de mesure constituées de paires de plots préalablement scellés, à des distances préétablies, sur les structures à contrôler

Domaine d'utilisation

- Mesure des déformations des matériaux béton et acier
- Les emplacements à contrôler doivent être préalablement instrumentés
- Cette méthode convient pour mesurer les déformations dues à des charges de longue durée d'application

Avantages

- Sensibilité et fiabilité éprouvées
- Permet de la surveillance (ces matériels sont conçus dans ce but à l'origine)

Inconvénients

- Nécessite autant d'extensomètres que de points de mesure si on souhaite mesurer les déformations dues à des charges de courte durée d'application

Aspects métrologiques

- Limites d'étendue de mesure : 1 à $5 \cdot 10^{-3}$ (déformation relative)
- Résolution :
 - 1.10⁻⁶ (capteurs électriques)
 - 1.10⁻⁶ (capteurs mécaniques)
- Incertitude de mesure :
 - 1.10⁻⁶ (capteurs électriques)
 - 10.10⁻⁶ (capteurs mécaniques)

Fibre optique



Principe

La fibre optique est collée sur la structure. La déformation de la structure modifie sa longueur, donc le signal optique transmis par la fibre

Domaine d'utilisation

- Mesure de déformation des matériaux béton et acier
- Les emplacements à contrôler doivent être rendus accessibles pour l'instrumentation

Avantages

- Insensibilité à l'humidité et à l'environnement électromagnétique

Inconvénients

- Fragilité
- Nécessite l'accès aux points à contrôler et une mise en œuvre méticuleuse
- Nécessite du matériel spécifique relativement onéreux
- Nécessite un étalonnage

Aspects métrologiques

Ce moyen n'a pas été suffisamment utilisé actuellement pour pouvoir annoncer des valeurs généralisables. Des tests et des étalonnages sont nécessaires avant chaque application

Courburemètre



Principe

Une poutre rigide est en contact en trois points (2 fixes, 1 mobile) avec une structure. Toute courbure de la structure agit sur le point mobile, où l'on mesure le déplacement

Domaine d'utilisation

Mesure de la courbure d'un tablier soumis à une surcharge

Avantages

- Simplicité de mise en œuvre
- Exploitation possible en temps réel

Inconvénients

- Précautions à prendre lors de la mise en œuvre

Aspects métrologiques

- Etendue de mesure : supérieure à la courbure possible
- Résolution :
 $1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1}$
- Incertitude de mesure :
 $1 \text{ à } 10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}$

Nivelle - Clinomètre



Principe

- Appareils manuels : calage horizontal d'une bulle par vis micrométrique
- Appareils électriques : système pendulaire

Domaine d'utilisation

- Mesure de la rotation de l'emplacement sur lequel on place l'appareil

Avantages

- Sensibilité et fiabilité éprouvées
- Appareils manuels : possibilité de positionner une série de bases sur lesquelles les appareils peuvent être successivement positionnés
- Appareils électriques : possibilité d'enregistrement et de lecture à distance

Inconvénients

- Réglages délicats

Aspects métrologiques

	nivelles	clinomètres manuels	clinomètres électriques
- étendue de mesure :	0,1 rd	10^{-2} rd	$\pm 6 \cdot 10^{-2}$ rd
- résolution :	$2 \cdot 10^{-4}$ rd	$1,5 \cdot 10^{-6}$ rd	10^{-6} rd
- incertitude de mesure :	$5 \cdot 10^{-4}$ rd	$2 \cdot 10^{-6}$ rd	$2 \cdot 10^{-6}$ rd

Accéléromètre

Principe

- Le capteur est posé ou fixé sur la partie de structure à contrôler
- Il est relié à un amplificateur de charge qui conditionne le signal
- Il délivre une tension proportionnelle à l'accélération qui est enregistrée
- Le traitement des enregistrements par un analyseur de spectre, permet d'obtenir les fréquences et leurs amortissements

Domaine d'utilisation

- Toute partie de structure soumise à vibration

Avantages

- Mesure aisée

Inconvénients

- Nécessite :
 - une chaîne de mesure
 - une chaîne de dépouillement
 - du personnel qualifié

Aspects métrologiques

- Limite d'étendue de mesure :
 - 0,1 à 10 kHz
- Résolution :
 - 0,1 Hz

Géophone

Principe

- Le géophone qui est un capteur de vitesse électrodynamique est posé ou fixé sur la partie de structure à contrôler
- Il délivre une tension proportionnelle à la vitesse du déplacement qui est enregistrée
- Le traitement des enregistrements permet d'obtenir les vitesses de déplacement, les déplacements dynamiques, ainsi que les fréquences propres de la partie de structure

Domaine d'utilisation

- Toute partie de structure soumise à vibration.

Avantages

- Mesure aisée

Inconvénients

- Nécessite :
 - une chaîne de mesure
 - une chaîne de dépouillement
 - du personnel qualifié

Aspects métrologiques

- Limite d'étendue de mesure : 0,8 à 300 Hz
- Résolution : 0,1 Hz

Pont-bascule



Principe

Un pont-bascule est constitué d'une plate-forme métallique rigide positionnée sur un support instrumenté par des capteurs de force. Il est destiné à mesurer le poids total des véhicules qui y sont stationnés. Il est étalonné selon les procédures de la métrologie légale pour des transactions commerciales. Il peut être utilisé pour mesurer les forces d'appui des parties de véhicules sous réserve que l'ensemble du véhicule soit horizontal et au même niveau.

Il existe également des pèse-essieux et des pèse-roues déplaçables, dont l'utilisation peut être envisagée lorsqu'ils sont encastrés dans les fosses prévues à cet effet.

Domaine d'utilisation

Pesée de camions, d'essieux isolés ou de groupes d'essieux

Précautions

- Disposer du carnet métrologique, du constat de vérification périodique daté de moins d'un an et de la vignette associée
- Tout pont-bascule doit être dans la classe III de l'OIML (Organisation Internationale de Métrologie Légale)
- Tout pèse-essieu ou pèse-roue doit être de la classe III ou IV de l'OIML
- Vérifier que l'accès et la sortie du pont-bascule se trouvent rigoureusement dans le même plan que son tablier
- Vérifier que le pèse-essieu ou le pèse-roue se trouve rigoureusement dans le même plan que la plate-forme

Aspects métrologiques

- Limites d'étendue de mesure :
 - pont-bascule 10 à 600 kN (variable selon les matériels)
 - pèse-essieu 10 à 200 kN
 - pèse-roue 5 à 100 kN
- Résolution :
 - classe III : 0,5 %
 - classe IV : de 2 à 4 %
- Incertitude sur les mesures par pont-bascule pour une :
 - pesée totale : 1 % de la charge
 - pesée d'essieu isolé ou de groupe d'essieux : 3 % de la charge
- Incertitude sur les mesures par bascule déplaçable : 2 à 5 % de la charge

Moyens de mesure de flèche utilisables

Portiques ; ponts cadre

(incertitude maximale admise : 0,1 à 0,2 mm selon la valeur des flèches théoriques)

		Moyens utilisables						
		Sujétions d'accès	Implantation des points de mesure	Fleximètres Jules Richard	Capteurs de déplacement inductifs	Flexigraphes Laser	Niveau de précision et mire invar	Théodolites motorisés
Hauteur sous travée inférieure à 6 m	Accès sous OA possible	intrados	oui	oui	(3)	(3)	(3)	
	Accès sous OA impossible	extrados	(3)	(3)	(3)	oui	oui	
Hauteur sous travée supérieure à 6 m	Accès sous OA possible	intrados	oui (1)	oui (1)	(3)	oui (2)	oui (2)	
	Accès sous OA impossible	extrados	(3)	(3)	(3)	oui	oui	

(1) Utilisation d'une nacelle pour ancrage du fil invar.

(2) Précision parfois insuffisante.

(3) Déconseillé ou impossible.

Dalles BA, BP ; Dalles nervurées ; Poutres BA, BP ; Poutrelles enrobées

(incertitude maximale admise : 0,1 à 0,2 mm selon la valeur des flèches théoriques)

		Moyens utilisables						
		Sujétions d'accès	Implantation des points de mesure	Fleximètres Jules Richard	Capteurs de déplacement inductifs	Flexigraphes Laser	Niveau de précision et mire invar	Théodolites motorisés
Hauteur sous travée inférieure à 6 m	Accès sous OA possible	intrados	oui	oui	(4)	(4)	(4)	
	Accès sous OA impossible	extrados	(4)	(4)	oui (2)	(4)	oui (3)	
Hauteur sous travée supérieure à 6 m	Accès sous OA possible	intrados	oui (1)	oui (1)	oui (2) (3)	(4)	(4)	
	Accès sous OA impossible	extrados	(4)	(4)	oui (2)	(4)	oui (3)	

(1) Utilisation d'une nacelle (ou d'une passerelle) pour ancrage du fil invar.

(2) Possible si la distance de visée est inférieure à 50 m et la flèche théorique supérieure à 5 mm.

(3) Précision parfois insuffisante.

(4) Déconseillé ou impossible.

Ouvrages mixtes ou métalliques (hors caissons et arcs)

(incertitude maximale admise : 1 % de la flèche théorique)

		Moyens utilisables						
		Sujétions d'accès	Implantation des points de mesure	Fleximètres Jules Richard	Capteurs de déplacement inductifs	Flexigraphes Laser	Niveau de précision et mire invar	Théodolites motorisés
Hauteur sous travée inférieure à 6 m	Accès sous OA possible	talon des poutres	oui	oui	(4)	(4)	(4)	
	Accès sous OA impossible	talon des poutres	(4)	(4)	oui (2)	(4)	oui (3)	
Hauteur sous travée comprise entre 6 m et 30 m	Accès sous OA possible	talon des poutres	oui (1)	oui (1)	oui (2) (3)	(4)	oui (3)	
	Accès sous OA impossible	talon des poutres	(4)	(4)	oui (2)	(4)	oui (3)	
Hauteur sous travée supérieure à 30 m		talon des poutres	(4)	(4)	oui (2)	(4)	oui (3)	

(1) Utilisation d'une nacelle (ou d'une passerelle) pour ancrage du fil invar.

(2) Possible si la distance de visée est inférieure à 50 m et la flèche théorique supérieure à 5 mm, cependant l'incertitude sera comprise entre 3 et 5% ; nécessité de mesurer les rotations en cas de mise en place des émetteurs sur les appuis ou les caissons.

(3) Précision parfois insuffisante.

(4) Déconseillé ou impossible.

Ouvrages caissons

(incertitude maximale admise : 2 % de la flèche théorique)

		Moyens utilisables						
		Sujétions d'accès	Implantation des points de mesure	Fleximètres Jules Richard	Capteurs de déplacement inductifs	Flexigraphes Laser	Niveau de précision et mire invar	Théodolites motorisés
Hauteur sous travée inférieure à 6 m	Accès sous OA possible	hourdis inférieur	oui	oui	(4)	(4)	(4)	
	Accès sous OA impossible	hourdis inférieur	(4)	(4)	oui (2)	(4)	oui (3)	
Hauteur sous travée comprise entre 6 m et 30 m	Accès sous OA possible	hourdis inférieur	oui (1)	oui (1)	oui (2) (3)	(4)	oui (3)	
	Accès sous OA impossible	hourdis inférieur	(4)	(4)	oui (2)	(4)	oui (3)	
Hauteur sous travée supérieure à 30 m		hourdis inférieur	(4)	(4)	oui (2)	(4)	oui (3)	

(1) Utilisation d'une nacelle (ou d'une passerelle) pour ancrage du fil invar.

(2) Possible si la distance de visée est inférieure à 50 m et la flèche théorique supérieure à 5 mm, cependant l'incertitude sera comprise entre 3 et 5% ; nécessité de mesurer les rotations en cas de mise en place des émetteurs sur les appuis ou les caissons.

(3) Précision parfois insuffisante.

(4) Déconseillé ou impossible.

Moyens de mesure de flèche utilisables

Ponts suspendus ou à haubans, arcs

(incertitude maximale admise : 2 % de la flèche théorique)

	Implantation des points de mesure	Moyens utilisables				
		Fleximètres Jules Richard	Capteurs de déplacement inductifs	Flexigraphes Laser	Niveau de précision et mire invar	Théodolites motorisés
Ponts suspendus	à définir dans le CCTP					
Ponts à haubans		(2)	(2)	oui (1)	(2)	oui
Ponts en arcs						

- (1) - Les distances de visées doivent être réduites dans la mesure du possible
 - Nécessité de mesurer les rotations des émetteurs
 - L'implantation des appareils doit tenir compte des déformations horizontales pouvant rendre le flexigraphe laser inopérant
- (2) - Déconseillé ou impossible

pages laissée intentionnellement blanche

46 avenue
Aristide Briand
BP 100
92225 Bagneux Cedex
France
téléphone :
33 (0)1 46 11 31 31
télécopie :
33 (0)1 46 11 31 69
internet : www.setra.equipement.gouv.fr

Ce guide est destiné aux maîtres d'ouvrage, aux maîtres d'œuvre, aux ingénieurs des bureaux d'études et des laboratoires qui ont à commander, concevoir, organiser, réaliser, et interpréter les épreuves sous charges des ponts routiers et des passerelles piétonnes.

Il décrit l'ensemble des opérations de préparation, de réalisation et de vérification des essais de chargement qui permettent de s'assurer du bon comportement des ouvrages avant leur réception.

Dans l'attente des prescriptions de l' Eurocode EN 1991-2, les épreuves des ponts routes sont actuellement réalisées en conformité avec le Fascicule 61 Titre II du Cahier des Prescriptions Communes.

Ce guide a aussi pour objectif de préparer la transition vers l'Eurocode, et de constituer la base d'un document normatif qui l'accompagnera.

Dans cette attente, les prescriptions du présent guide doivent être reprises dans les marchés liant les intervenants au maître d'ouvrage. A cette fin, il comporte des clauses types qui devront être insérées dans les pièces administratives et techniques des marchés d'ingénierie et de travaux.



Document disponible au bureau de vente du Sétra
46 avenue Aristide Briand - BP 100 - 92225 Bagneux Cedex - France
téléphone : 33 (0)1 46 11 31 53 - télécopie : 33 (0)1 46 11 33 55
Référence : **0404** - Prix de vente : **14 €**

*Crédit photos : Gérard Forquet (Sétra) - Dominique Cochet (CETE de l'Est)
Conception graphique - mise en page : Eric Rillardon (Sétra)
Impression : Caractère - 2, rue Monge - BP 224 - 15002 Aurillac Cedex
L'autorisation du Sétra est indispensable pour la reproduction, même partielle, de ce document
© 2004 Sétra - Dépôt légal : 1^{er} trimestre 2004 - ISBN : 2-11-093419-0*

Le Sétra appartient
au Réseau Scientifique
et Technique
de l'Équipement

