

ÉVALUATION DE LA RÉPONSE EN DÉFORMATIONS D'UN PONT OU D'UNE PASSERELLE SOUS CHARGEMENT STATIQUE

CONTEXTE

Les épreuves de chargement d'un ouvrage après construction, réparation structurale ou renforcement (voir [1]) offrent l'exemple le plus manifeste de mesures sous chargements maîtrisés. Ces épreuves fournissent une référence quantitative pour toute épreuve de chargement postérieure.

En effet, les mesures de déformation sous chargement peuvent être renouvelées dans la vie d'un ouvrage, en prenant en compte l'état actualisé de sa structure. C'est en particulier le cas lors de phases de diagnostic/évaluation structurale d'un ouvrage dans le but de valider une modélisation et le niveau d'endommagement global de l'ouvrage ou à l'issue de travaux de réparations structurales ou de renforcement, pour en vérifier l'efficacité.

L'attention est attirée sur le fait que la décision de réaliser une épreuve de chargement d'un ouvrage jugé « très endommagé » doit être mûrement réfléchie et faire l'objet de précautions particulières.

La notion de déformation s'entend ici au sens le plus large, comme changement de géométrie de l'ouvrage ; elle ne se limite pas à la déformation locale¹ mais recouvre les mesures de dilatation, flèche, courbure, inclinaison, tassement, etc.

Les techniques de mesure employées vont des mesures globales de longueur ou de déplacement ([fiches C2](#)), parmi lesquelles les méthodes topométriques ([fiche C2.1](#)) ou les mesures de flèche ([fiche C2.2](#)) sont les plus fréquemment utilisées, jusqu'aux mesures de déplacement ou d'inclinaison locales ([fiches C3](#)).

L'intérêt des mesures de déformation réside naturellement dans leur relation avec le chargement : il s'agit de vérifier la répétabilité des déformations, leur simultanéité avec le moment d'application des charges et leur cohérence avec les valeurs théoriques attendues au regard des charges imposées et la réversibilité du comportement de la structure. Par ces différents aspects, l'épreuve de chargement permet de s'assurer que l'ouvrage fonctionne conformément à la prévision d'un modèle.

Le plan d'instrumentation associé aux épreuves de chargement doit faire appel à des méthodes et matériels de mesure adaptés aux éléments recherchés, possédant les précisions nécessaires, judicieusement positionnés...

Le programme de chargement doit être conçu en cohérence avec les éléments recherchés, par exemple comportement en flexion transversale d'une structure multi-poutres...

Le modèle de calcul doit être approprié, basé sur des hypothèses confirmées ou probables, et d'un niveau de sophistication adapté à la complexité et à l'échelle de la structure.

Les déformations mesurées sont comparées aux valeurs issues d'un calcul élastique linéaire, résultant de l'application de charges toujours inférieures aux charges théoriques de dimensionnement à l'État Limite de Service.

La mesure de déformations anormales peut révéler une rigidité de la structure différente de celle attendue (et prise en compte par le calcul). Dans ce cas :

- si les déformations sont plus faibles que celles attendues théoriquement, cela peut tenir à un module réel du béton plus élevé que le module réglementaire, à une raideur additionnelle apportée par certaines superstructures (longrines, corniches, chaussée) non prise en compte dans le modèle de calcul ;
- si les déformations sont supérieures aux déformations théoriques, cela peut provenir d'une fissuration non détectée visuellement auparavant, de la souplesse d'assemblages métalliques, etc. Une analyse, faisant appel à des constats visuels voire à des auscultations complémentaires, est indispensable et peut conduire à mettre en évidence une insuffisance structurale et/ou à la modification nécessaire de certaines hypothèses des calculs.

La mesure de déformations anormales permet en outre de détecter le cas échéant des comportements non linéaires à l'échelle de la structure, résultant par exemple de contacts anormaux, de décollements d'appareils d'appui..., qui doivent être analysés et confirmés par l'observation.

Pour les ponts et passerelles, on ne s'intéresse généralement qu'aux déformations de flexion du tablier, ainsi qu'aux déformations et déplacements de ses appareils d'appui.

¹ La déformation locale (exprimée par exemple en micromètre par mètre) n'est bien sûr qu'un aspect de la réponse mécanique des ouvrages : elle n'informe pas directement sur l'état de contrainte, ni sur la fissuration des matériaux. La déformation n'est en effet liée aux contraintes que tant que le matériau déformé est élastique, et c'est précisément là une information que l'on peut souhaiter acquérir par ces mesures (confirmation de la réversibilité des déformations) ; quant à la fissuration, il s'agit d'un phénomène local qui, lorsqu'il est d'origine mécanique, crée une discontinuité dans une structure et cette discontinuité s'oppose à l'idée même de déformation : l'existence d'une déformation repose sur la continuité (au moins locale) du matériau. Ainsi il peut être opportun de prévoir des instrumentations variées en fonction des objectifs attendus des essais de chargement, de la nature et de l'état de l'ouvrage.

Les mesures de déformation sous chargement sont de peu d'intérêt lorsque les déformations attendues sous charges d'exploitation sont très faibles. C'est en particulier le cas lorsque la part des charges d'exploitation est très faible par rapport à celle des charges permanentes, comme pour les passages à faune.

En tout état de cause, il n'est opportun d'entreprendre des mesures sous chargement que si l'on est capable de les confronter à un modèle préalablement établi et à condition que la précision des instruments de mesure utilisés soit adaptée aux valeurs des déformations attendues.

MÉTHODOLOGIE DU DIAGNOSTIC

ÉTAPE 1 ANALYSE DU DOSSIER D'OUVRAGE

Les épreuves de chargement contribuant à la réception des travaux de construction, de réparation ou de renforcement d'un ouvrage d'art imposent l'établissement par l'entreprise attributaire du marché de travaux d'un ensemble de documents définissant précisément les épreuves à exécuter : note d'hypothèses et de calculs et procédure spécifiques avec schémas.

Si ces épreuves sont consécutives à une réparation ou un renforcement de l'ouvrage, il est possible que l'ouvrage ait fait l'objet d'une épreuve de chargement avant travaux, qui constitue dans ce cas une base importante de comparaison pour apprécier l'efficacité des travaux.

L'analyse du dossier d'ouvrage est la première étape nécessaire lorsque les épreuves de chargement sont envisagées dans le cadre d'une étude de diagnostic et d'évaluation structurale d'un ouvrage existant.

On recherche dans ce dossier toutes les informations utiles à la modélisation de l'ouvrage nécessaire à son évaluation structurale, puis à la définition technique des épreuves de chargement envisagées dans le cadre de l'étude de diagnostic ou de l'étude de réparation de l'ouvrage et à leur exploitation :

- les **plans d'exécution et notes de calculs de dimensionnement initial et/ou d'exécution d'éventuels travaux de réparation ou de renforcement antérieurs** ;
- le **procès verbal des épreuves de chargement les plus récentes** : les épreuves de chargement initiales ou faisant suite à des travaux de réparation ou de renforcement de l'ouvrage constituent en effet une référence précieuse pour juger de l'évolution éventuelle du comportement de la structure.

Note : à défaut de retrouver ce document, les épreuves de chargement sont en principe détaillées dans le Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP) du marché de travaux.

- On doit en principe également retrouver dans le dossier un **procès-verbal d'inspection de l'ouvrage avant, pendant et après ces épreuves**.
- Les **rapports d'inspection détaillée, de visite, d'auscultations ou de diagnostic antérieurs** : ces rapports peuvent contenir des informations quantitatives ou qualitatives sur les matériaux, le comportement de l'ouvrage ou de certaines de ses parties, sur les réparations ou adaptations antérieures de l'ouvrage, des informations qui peuvent avoir disparu du dossier d'ouvrage au fil des années. Ils comportent, bien sûr, la mention des dégradations ou singularités observées, dont il peut être utile de tenir compte pour définir le modèle de calcul ; il s'agit notamment du constat du renouvellement des couches de chaussée, qui ont pu alourdir (ou parfois alléger) un pont ou une voûte, des renforts additionnels ou à l'opposé de la disparition de matériaux (pierres dégradées, lacunes, appareils d'appui, etc.), du dysfonctionnement des appareils d'appui du tablier, etc. Mais ils identifient aussi des particularités de l'ouvrage (zones devenues difficilement accessibles, présence de réseaux tiers, etc.), qu'il faut prendre en compte.

ÉTAPE 2 INSPECTION DÉTAILLÉE (PRÉ-DIAGNOSTIC), ÉVENTUELLES AUSCULTATIONS, ÉTUDES DE DIAGNOSTIC ET D'ÉVALUATION STRUCTURALE

Les épreuves de chargement contribuant à la réception des travaux de construction, de réparation ou de renforcement d'un ouvrage d'art s'accompagnent, lorsque le contrat l'a bien prévu, de la réalisation par l'entreprise attributaire des travaux d'une inspection de l'ouvrage, avant, pendant et après réalisation.

Dans le cadre d'une étude de diagnostic et d'évaluation structurale d'un ouvrage existant, il est indispensable de disposer des résultats d'une inspection détaillée récente de l'ouvrage.

Si l'on en dispose, une visite de l'ouvrage est néanmoins nécessaire pour appréhender les particularités de l'ouvrage et du site.

Si l'on n'en dispose pas, une inspection détaillée est à réaliser afin d'actualiser le relevé des éventuels désordres ou défauts, de les mesurer ou de les quantifier. Cela permettra entre autres de vérifier leur éventuelle évolution, pendant ou après les épreuves de chargement.

<p>ÉTAPE 2 INSPECTION DÉTAILLÉE (PRÉ-DIAGNOSTIC), ÉVENTUELLES AUSCULTATIONS, ÉTUDES DE DIAGNOSTIC ET D'ÉVALUATION STRUCTURALE</p>	<p>L'inspection détaillée de l'ouvrage d'art doit se conformer à l'ITSEOA [2] et être confiée à un organisme spécialisé disposant d'un personnel formé et qualifié en inspection des ouvrages d'art.</p> <p>En cas de constat de désordres structurels graves, cette inspection peut remettre en cause la réalisation envisagée d'une épreuve de chargement.</p> <p>Si des désordres pouvant remettre en cause la capacité portante de l'ouvrage sont relevés, ils doivent donner lieu à l'établissement d'un programme d'auscultations dans le cadre d'une étude de diagnostic et d'évaluation structurale (cf. [3]). Les auscultations prévues doivent permettre notamment de connaître le caractère évolutif des désordres, leur conséquence sur la rigidité de l'ouvrage, l'influence de facteurs extérieurs (température, gradient thermique...). C'est dans ce cadre, en fonction des résultats de l'évaluation structurale de l'ouvrage et des auscultations menées, qu'il peut être décidé du besoin de réaliser une épreuve de chargement de l'ouvrage.</p> <p>De même, ce besoin d'une épreuve de chargement de l'ouvrage peut s'imposer dans le cadre des études de réparation ou de renforcement de l'ouvrage à suivre, par exemple pour confirmer le déficit de précontrainte d'un pont caisson en béton précontraint et permettre le dimensionnement d'une précontrainte additionnelle (cf. fiche E2-6).</p>
<p>ÉTAPE 3 ÉPREUVE DE CHARGEMENT STATIQUE</p>	<p>Définition du chargement envisagé :</p> <p>La Le protocole de chargement doit être adapté à la destination de l'ouvrage.</p> <p>Dans le cas d'une épreuve de chargement contribuant à la réception de travaux de construction d'un ouvrage d'art, les effets des charges pour l'épreuve doivent être compris ([1], p. 32) entre ceux des charges routières « fréquentes » et les 3/4 des effets des charges routières « caractéristiques » (définies à l'Eurocode 1-2 [4]).</p> <p>Dans le cas d'une épreuve de chargement contribuant à la réception de travaux de réparation ou de renforcement d'un ouvrage d'art, les effets des charges pour l'épreuve doivent être « encadrés » (effets suffisamment importants pour vérifier l'efficacité des travaux, mais ne risquant pas d'endommager l'ouvrage) en cohérence avec les charges de dimensionnement de la réparation ou du renforcement retenues par le maître d'ouvrage.</p> <p>Dans le cas d'une épreuve de chargement réalisée dans le cadre d'une étude de diagnostic et d'évaluation structurale d'un ouvrage, ou de son étude de réparation ou de renforcement, le programme de l'épreuve de chargement progressif de l'ouvrage est établi en cohérence avec les résultats des auscultations et recalculs réalisés.</p> <p>L'attention est attirée sur le fait que le chargement envisagé ne doit pas forcément se conformer à celui de précédentes épreuves de chargement réalisées sur l'ouvrage, même si cela permettrait une comparaison directe des mesures, car il faut tenir compte de l'évolution des dégradations ainsi que de circonstances particulières (travaux ou adaptations réalisés depuis...). En fonction de l'état de l'ouvrage actualisé, le chargement pourra être réduit. La prudence recommande de progresser par paliers et d'interrompre la mise en œuvre du programme de chargement prévisionnel dès détection d'un comportement anormal.</p> <p>Dans tous les cas, un programme de l'épreuve de chargement doit être établi, qui comprend :</p> <ul style="list-style-type: none"> - un rappel succinct des caractéristiques de l'ouvrage ; - le rappel des hypothèses prises en compte dans les calculs ; - la description précise des différents cas de chargement, se conformant à la note de calculs spécifique établie, et leur durée d'application ; - les plans, schémas de positionnement des charges en cotes précises par rapport à un point fixe facilement identifiable sur le dessus du pont ; - la nature, le nombre et la localisation des mesures et les valeurs théoriques attendues pour chacune des grandeurs mesurées (issues de la note de calculs), ainsi que les valeurs d'alerte et d'arrêt des épreuves (avec les dispositions à mettre en œuvre en cas d'atteinte de ces valeurs) ; - les types et précisions attendues des appareils de mesure qui doivent être adaptés aux valeurs attendues ; - un planning horaire détaillé des épreuves. <p>Dans le cas d'épreuves de chargement contribuant à la réception de travaux, ce programme doit impérativement être validé par le maître d'œuvre comme tous les autres documents d'exécution, ce qui suppose le respect d'un délai d'examen suffisant.</p> <p>L'établissement du programme nécessite la réalisation préalable d'un modèle et d'une note de calculs définissant :</p> <ul style="list-style-type: none"> - les cas de chargement à envisager en tenant compte, pour les ouvrages existants, de leur état au jour des essais (prise en compte des désordres identifiés, des charges permanentes réelles...), des actions thermiques d'accompagnement...

– les effets des charges prises en compte ainsi que les valeurs théoriques attendues des grandeurs à mesurer, le cas échéant pour chacun des paliers de chargement envisagés.
La note de calculs définit les incertitudes admissibles sur le poids des charges et sur leur position.

Compensation thermique des mesures : Pour les ouvrages particulièrement sensibles aux effets thermiques (par exemple, ouvrages métalliques et mixtes, grands ponts en béton précontraint), il faut tenir compte de l'effet combiné de la distribution de température dans la structure et du chargement maîtrisé. Pour cela :

- ou bien on réalise un enregistrement thermique ([cf. Fiche C3-17 « Mesures de température par thermocouple, thermistance ou sonde »](#)) pendant l'épreuve, et on compense les résultats de mesure *a posteriori* ;
- ou bien on cherche à limiter au maximum l'amplitude des effets thermiques, en déchargeant l'ouvrage entre chaque cas de chargement et en procédant à la remise à zéro des instruments de mesure. Cette option nécessite de disposer de suffisamment de temps. Le relevé des instruments après chaque déchargement de l'ouvrage (éventuel défaut de retour à zéro) permettra une compensation des mesures à chaque chargement.

Le transfert de chaleur étant progressif, il est également important d'adapter la méthode de mesure pour réduire au maximum la durée du cas de chargement (ce qui peut impliquer une multiplication des moyens humains ou matériels).

Une autre solution, qui simplifie aussi les contraintes d'exploitation, est d'effectuer les mesures de nuit ; toutefois, les tabliers en béton continuent de rayonner la chaleur emmagasinée dans la journée jusque vers 23 h 00 environ, et l'on ne peut s'exonérer d'une compensation thermique.

Vérifications préalables :

Les épreuves de chargement des ouvrages existants sont systématiquement réalisées hors trafic.

Le repérage des points de chargement et de mesure doit avoir été réalisé et vérifié notamment dans le cadre d'un contrôle extérieur (conformité aux tolérances fixées).

Il en est de même des bons de pesée des camions ou du système de chargement.

Il est également nécessaire de vérifier la conformité, l'étalonnage et le bon fonctionnement des capteurs utilisés.

Il faut enfin s'assurer de la qualification des personnels impliqués dans les opérations de mesure, ainsi que dans la réalisation de l'inspection détaillée associée (avant, pendant et après la réalisation des épreuves de chargement).

Les moyens de mesure : techniques, échantillonnage ([se reporter aux fiches d'auscultation de la structure](#), de C2.1 à C2.4 et de C3.1 à C3.12).

La notion de déformation peut s'appréhender par différents types de mesures : dilatation, flèche, courbure, inclinaison, tassement.

La mesure de ces grandeurs est plus ou moins pertinente suivant la nature de l'ouvrage : la mesure de flèches est, par exemple, pratiquement systématique lors d'épreuves de chargement de ponts routiers de plus de 10 mètres de portée.

L'extensométrie, qui est la mesure des déformations d'un parement, convient très bien aux ouvrages en caisson, mais son usage est universel. Elle permet d'ailleurs d'étudier l'ouverture de joints secs. Elle peut se mener à l'aide de jauges ou de cordes vibrantes ([cf. fiches E2.3 et E3.1](#)).

La mesure de courbure ([cf. fiches C3.12 et E2.3](#)) est recommandée pour l'analyse du comportement en flexion des tabliers de ponts : c'est une mesure plus fine que la mesure de flèche, puisque la déflexion est une grandeur intégrale de la courbure, et qu'elle permet de retrouver, par intervalles entre points de mesure successifs, la rotation moyenne et la flèche avec une bonne précision.

Depuis 2010, la mesure des déformations connaît une profonde évolution à la faveur du développement de la photogrammétrie ([cf. fiche C1.9](#)).

Le choix des capteurs doit être adapté à l'amplitude des phénomènes à mesurer. Les mesures de flèches doivent être précises au dixième de millimètre : la topographie est donc adaptée à ce besoin et elle permet de relever au moins une dizaine de points de mesure pour chaque palier de chargement d'une durée de mesure acceptable (cinq à dix minutes).

Interprétation, diagnostic, pronostic

Les résultats des épreuves doivent faire l'objet d'une vérification et d'une interprétation.

Les épreuves sont satisfaisantes lorsque les valeurs mesurées, compte tenu de l'incertitude de mesure, sont comprises entre 80 % et 110 % des valeurs théoriques calculées.

Il convient de rappeler que les valeurs calculées le sont à l'État Limite de Service ([1], §4.1), avec des pondérations toutes égales à un. Les résultats s'écartant sensiblement de cette fourchette doivent être analysés pour identifier si les écarts sont dus à un problème de mesure (la présence d'un contrôle extérieur topographique permet généralement de lever cette éventualité), à une modélisation inappropriée de la structure conduisant à des valeurs théoriques attendues erronées, ou s'il s'agit réellement d'un comportement anormal de la structure (non linéarité, non symétrie du comportement, évolution anormale des flèches, phénomènes locaux, etc.).

Si des phénomènes non anticipés affectant le fonctionnement de l'ouvrage sont identifiés lors des épreuves de chargement (par exemple dysfonctionnement d'appareils d'appui mobiles) et s'ils peuvent être intégrés au modèle, il y a lieu de déterminer, par un nouveau calcul, une nouvelle fourchette des valeurs théoriques, à partir d'hypothèses révisées.

Enfin, si, compte tenu des vérifications ci-dessus, les épreuves ont mis en évidence une déficience locale ou généralisée de l'ouvrage, suivant le cas :

- il doit être procédé à l'instruction d'une fiche de non-conformité, à ouvrir par l'entreprise, dans le cas d'une épreuve de chargement associée à un marché de travaux ;
- des mesures particulières d'exploitation voire de mise en sécurité immédiate peuvent s'avérer nécessaires dans le cas où l'épreuve de chargement s'inscrit dans une étude de diagnostic d'un ouvrage existant. En parallèle, les études se poursuivent pour aboutir à une solution de réparation, de renforcement, voire de démolition ou de reconstruction de l'ouvrage.

RÉFÉRENTIEL - BIBLIOGRAPHIE

[1] Routes et Autoroutes (coll. « Les outils »). Disponible sur <https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/16226/epreuves-de-chargeement-des-pont-routes-et-passerelles-pietonnes-guide-technique> (consulté le 02/09/2025).

[2] CEREMA, 2012. Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (ITSEO) - Généralités sur la surveillance : Fascicule 2. Cerema. Disponible sur <https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/16475/instruction-technique-pour-la-surveillance-et-l-entretien-des-ouvrages-d-art-itseo-generalites-sur-> (consulté le 02/09/2025).

[3] CEREMA, 2023. Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (ITSEO) - Fascicule 5, Conduite d'une intervention sur un ouvrage existant. Cerema (coll. « Les références »). Disponible sur <https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/595425/instruction-technique-pour-la-surveillance-et-l-entretien-des-ouvrages-d-art-itseo-fascicule-5-cond> (consulté le 02/09/2025).

[4] AFNOR, 2004. Eurocode 1 - Actions sur les structures - Partie 2 : actions sur les ponts, dues au trafic. NF EN 1991-2, AFNOR.

Fiches des Cahiers interactifs :

UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL & CEREMA, Auscultation des ouvrages d'art [En ligne]. Marne-la-Vallée : Université Gustave Eiffel (Cahiers Interactifs, CII). Disponible sur <https://cahier-interactif-auscultation-ouvrages-art.univ-gustave-eiffel.fr/> (consulté le 02/09/2025).

[\[C2.1\] Suivi topométriques](#)

[\[C2.2\] Mesure des déformations sous chargement \(flèches\)](#)

[\[C2.3\] Mesure de distance à fil d'invar \(type distancemètre orientable DO1 du LRPC de Lyon\)](#)

[\[C2.4\] Mesure de distance par infrarouge](#)

[\[C3-1\] Comparateur mécanique](#)

[\[C3-2\] Mesures de déplacement - capteur électrique](#)

[\[C3-3\] Mesures des rotations par nivelles et inclinomètres \(ou clinomètres\)](#)

[\[C3-4\] Mesure de rotation par pendule](#)

[\[C3-5\] Mesure de déformation par jauge](#)

[\[C3-6\] Extensomètre mécanique amovible](#)

[\[C3-7\] Mesure de déformation par corde vibrante \(ou témoin sonore\)](#)

[\[C3-8\] Mesure de déformation par fibre optique à micro-courbures](#)

[\[C3-9\] Mesure de déformation par fibre optique à cavité de Fabry-Pérot](#)

[\[C3-10\] Mesure de déformation par fibre optique à interférométrie de Michelson](#)

[\[C3-11\] Mesure de déformation par fibre optique à réseaux de Bragg](#)

[\[C3-12\] Courburemétrie](#)

[\[C3-17\] Mesures de température par thermocouple, thermistance ou sonde](#)

[\[E2-3\] Analyse du fonctionnement en flexion d'une section de pont en béton armé ou précontraint](#)

[\[E2-6\] Évaluation du déficit en flexion d'un pont fissuré en béton précontraint](#)

[\[E3-1\] Analyse du fonctionnement d'une section de pont mixte acier-béton](#)

LOGIGRAMME

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

E1-2 : ÉVALUATION DE LA RÉPONSE EN DÉFORMATIONS D'UN PONT OU D'UNE PASSERELLE SOUS CHARGEMENT STATIQUE

