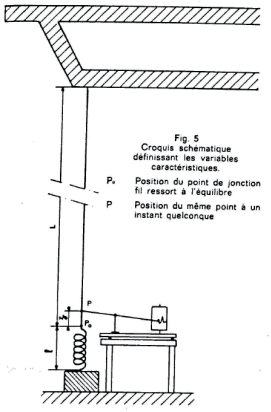
MESURE DES DÉFORMATIONS SOUS CHARGEMENT (flèches)

PRINCIPE ET DESCRIPTION SOMMAIRE

OBJECTIF	Mesures des déplacements verticaux (flèches et contre-flèches) sous cas de chargement connus lors d'épreuves de chargement en fin de construction dans le cadre de la réception ou dans le cadre d'expertise sur le fonctionnement de l'ouvrage. Elles ont pour objet : – d'apprécier l'aptitude au service de l'ouvrage ; – de vérifier la conformité du modèle de calcul et du bon fonctionnement mécanique de l'ouvrage ; – d'établir un point zéro de référence et/ou d'apprécier l'évolution du comportement de l'ouvrage dans le temps.
PRINCIPE	On distingue les différents principes suivants par type d'appareil : – les fleximètres mécaniques du type « Jules Richard » : le déplacement de l'ouvrage est transmis à l'aide d'un fil invar fixé au 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 de l'ouvrage est transmis comme pour les fleximètres mécaniques à l'aide d'un fil invar ; – les flexigraphes laser : le déplacement de l'ouvrage est contrôlé par rapport à un faisceau laser de référence ; – les matériels de nivellement : le déplacement de l'ouvrage est contrôlé à l'aide d'un niveau de précision et d'une mire invar positionnée sur des repères ; – 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 ; – les GPS utilisés en différentiel.
CARACTÈRE DESTRUCTIF DE LA MÉTHODE	Non destructif
MATURITÉ	Grande pour tous les types de mesure, à l'exception du GPS dont la maturité est plus faible.
MATÉRIEL SPÉCIFIQUE EMPLOYÉ	 flexigraphe mécanique (CEREMA)  principe de mesure (CEREMA) **Flexigraphe mécanique** de type « Jules Richard » selon la configuration la plus courante : – appareil relié au tablier par un fil invar tendu au moyen de ressorts et d'un lest reposant sur le sol ; – amplification mécanique de 2, 5, 10 ou 20 ; – le tracé du stylet sur le papier graphité disposé sur le tambour permet l'enregistrement du signal ; – le tambour est mu en rotation par un mouvement mécanique dont la vitesse de rotation peut être adaptée à la durée du chargement (possibilité d'enregistrement des flèches dynamiques).

MATÉRIEL SPÉCIFIQUE EMPLOYÉ

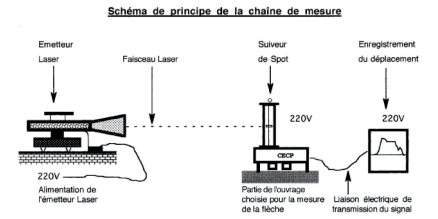


capteur de déplacement LVDT sur trépied (CEREMA)



capteur de déplacement sur trépied (CEREMA)

Le capteur de déplacement
(généralement de type LVDT) est relié au tablier par un fil invar tendu au moyen de ressort et d'un lest reposant sur le sol.
Dans certaines configurations il est possible d'utiliser des capteurs à ressort de rappel (comparateur électronique) disposés au bout d'une perche.



principe de mesure (CEREMA)



émetteur sur tête de pile (CEREMA)



suiveur de spot (CEREMA)

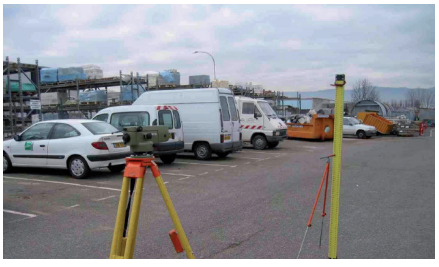
Flexigraphe LASER
un faisceau LASER modulé en fréquence est généré par un émetteur disposé généralement hors de l'ouvrage ou sur une partie d'ouvrage. Un suiveur de spot disposé sur l'ouvrage à l'endroit où on veut mesurer la flèche se centre automatiquement sur le faisceau LASER. La variation de position entre le corps du suiveur et le faisceau est traduite en signal électrique proportionnel au déplacement et enregistrable au moyen d'un enregistreur potentiométrique à tracé continu ou d'une centrale d'acquisition.
Dans le cas où l'émetteur est disposé au droit d'un appui, il est nécessaire de corriger la valeur apparente de la mesure de la rotation du faisceau.
Il est possible de réaliser des enregistrements continus et d'apprécier les composantes dynamiques des flèches.



niveau de précision avec micromètre optique (CEREMA)



mire en invar à double graduation (CEREMA)



niveau en station (CEREMA)

Nivellement
Mesure 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.

MATÉRIEL SPÉCIFIQUE EMPLOYÉ



théodolite en station (CEREMA)



théodolite motorisé (CEREMA)



cible amovible (CEREMA)

Théodolite motorisé
Détermination des coordonnées de cibles à partir d'une station. Obtention de la flèche par différence d'altitude.
Possibilité d'obtenir les autres composantes du déplacement.



théodolite en station (CEREMA)

GPS
Possibilité de mesurer les déplacements x, y et z par rapport à un réseau satellitaire, à l'aide de récepteurs GPS fixés sur la structure.
Technique plutôt adaptée pour des ouvrages dont la configuration ne permet pas de mesurer les déplacements par une technique conventionnelle et qui ont une flexibilité importante (comme les OA à câbles).

MODALITÉS D'APPLICATIONS

DOMAINE D'APPLICATION

Les différents matériels de mesure sont adaptés aux types d'ouvrage et aux ordres de grandeur des flèches à mesurer.

Matériel	Type d'ouvrage	Étendue de mesure
Flexigraphe mécanique	Tous les types d'ouvrage si hauteur sous ouvrage < 30m	0,1 à 100 mm
Capteur de déplacement	Tous les types d'ouvrage si hauteur sous ouvrage < 30m Possibilité d'utiliser un capteur sur perche si la hauteur sous ouvrage < 6m	0,1 à 250 mm
Flexigraphe LASER	Ouvrages importants sur cours d'eau ou voies circulées	0,5 à 300 mm
Niveau de précision	Ouvrages courants dont les accès en intrados sont impossibles	0,1 à plusieurs dizaines de cm
Théodolite motorisé	Ouvrages importants sur cours d'eau ou voie ferrée	0,1 à plusieurs dizaines de cm
GPS	Ouvrages de dimensions exceptionnelles	1 cm à plusieurs dizaines de mètres

SUJÉTIONS PRATIQUES D'INTERVENTION

Les sujétions pratiques dépendent de la position des points de mesure sur l'ouvrage (en intrados ou en extrados).
Les mesures avec des fils invar fixés sous le tablier (flexigraphe Jules Richard et capteurs de déplacement) nécessitent l'accès à l'intrados pour fixer le support du fil et un accès sous l'ouvrage pour disposer d'un contrepoids et de ressorts ; on peut cependant s'affranchir de ces sujétions en disposant le matériel de mesure sur le tablier et en constituant le point fixe sous l'ouvrage.
Le positionnement de cibles ou de suiveur de spot sur des poutres en intrados nécessite l'accès à l'intrados au moyen d'une passerelle négative ou d'une nacelle positive.

LIMITES D'UTILISATION	L'utilisation de flexigraphe mécanique ou de capteur est limitée par la longueur du fil invar. L'utilisation des moyens optiques ou opto-électroniques est restreinte par les distances de visée ou les distances entre émetteur et récepteur.	
PRÉCISION ET/OU SENSIBILITÉ	Flexigraphe Jules Richard	0,1 à 0,5 mm selon la longueur de fil
	Capteurs de déplacement	0,1 à 0,5 mm selon la longueur de fil
	Flexigraphe LASER	0,2 à 1 mm*
	Niveau de précision	0,2 à 0,5 mm*
	Théodolite motorisé	0,2 à 0,5 mm*
	GPS	De l'ordre du cm#
	* valeurs courantes influencées par la distance de visée et les conditions environnementales # dépend du type de traitement sélectionné (mono ou bi-fréquence) et des orbites utilisées	
PERSONNEL ET COMPÉTENCES	Chargé d'investigation ou opérateur qualifié et expérimenté	

CARACTÉRISTIQUES OPÉRATOIRES

ACCÈS À 1 OU 2 FACES	Sans objet
COUPURES OU RESTRICTIONS DE CIRCULATION NÉCESSAIRES	Pas de sujétions particulières sauf en cas de mise en place des supports de fils en intrados, des suiveurs de spots ou des cibles ou repères au moyen d'une passerelle négative sur l'ouvrage ou positive sur la voie franchie.
RENDEMENT ET/OU ÉCHANTILLONNAGE	Les mesures sont immédiates avec les flexigraphes mécaniques, les capteurs de déplacement, les flexigraphes laser, les théodolites motorisés et les GPS. Le délai nécessaire aux mesures de nivellement ou de triangulation est fonction du nombre de points de mesure.
DÉLAIS DE DISPONIBILITÉ DES RÉSULTATS	Résultats immédiatement disponibles pour les flexigraphes mécaniques, les capteurs, les flexigraphes LASER, les théodolites motorisés et les GPS. L'obtention des résultats nécessite des exploitations pour les nivellements et la triangulation. Des corrections liées à la rotation sont à prévoir en cas de pose des appareils de mesure (flexigraphe LASER, niveau, théodolite) sur le tablier au droit des appuis. Des corrections liées à la variation de longueur du fil invar sont à prévoir en cas d'utilisation de fils de grande longueur (>15m).
PERTURBATIONS DU TRAFIC SUR LES MESURES	Le nivellement de précision et la triangulation nécessite l'absence d'obstacle entre l'appareil et la mire ou la cible. Les mesures sous trafic sont influencées par les vibrations et les perturbations de l'environnement.
PERTURBATIONS DE L'ENVIRONNEMENT SUR LES MESURES	Flexigraphe et capteurs : mesures perturbées par le vent notamment avec des fils invar de grande longueur. Mesure optiques et électro-optiques : perturbations liées aux conditions environnementales (ensoleillement, brouillard, pluie, vent, poussières, etc. GPS : obstacles (mileu urbain) et sources d'interférences.
RISQUES POUR LES UTILISATEURS OU LE PUBLIC	Pour le flexigraphe LASER, il existe des précautions particulières d'emploi liées à l'utilisation du rayonnement LASER.
ENCOMBREMENT – POIDS	Faible à élevé selon le type de matériel et le nombre de points de mesure

AVANTAGES – INCONVÉNIENTS

AVANTAGES	Flexigraphe mécanique	Appareil autonome sans alimentation électrique
	Capteurs de déplacement	Centralisation possible des mesures et exploitation immédiate

AVANTAGES	Flexigraphe LASER	Enregistrement continu des flèches sur les ouvrages importants avec précisions adaptées. Possibilité de réduire les distances de visées pour améliorer la précision en disposant les émetteurs sur appuis, à condition de réaliser des corrections de rotation des émetteurs sur appuis à l'aide d'inclinomètres.
	Nivellement de précision	Simplicité et rapidité de mise en œuvre sous ouvrages courants.
	Théodolite motorisé	Possibilité d'enregistrer et de multiplier les mesures pour un même cas de chargement. Possibilité d'obtenir en plus les déplacements dans les trois directions du repère orthonormé.
	GPS	Facilité d'installation des récepteurs. Possibilité d'obtenir en plus les déplacements dans les trois directions du repère orthonormé
INCONVÉNIENTS	Flexigraphe mécanique	Pose d'un fil invar et présence d'un opérateur auprès de chaque point de mesure en cas de mesure dynamique Perturbation sous un vent fort
	Capteurs	Pose d'un fil invar et d'un montage associé Perturbation sous un vent fort
	Flexigraphe LASER	Mesure électro-optique sensible aux conditions environnementales, à la distance de visée et à la stabilité de l'émetteur. Nécessite des opérateurs qualifiés et expérimentés.
	Nivellement de précision	Absence d'enregistrement continu, distance de visée réduite à 30 mètres pour précision satisfaisante, mesures lourdes en cas de points nombreux et très espacés, Impossibilité de faire des mesures sous chargement dynamique Nécessité de disposer de repères de référence extérieurs à l'ouvrage.
	Théodolite motorisé	Pose de cibles sur l'ouvrage, influence des conditions environnementales, de la distance de visée et de la stabilité de l'appareil. Nécessité de disposer de repères de référence extérieurs à l'ouvrage. Nécessite des opérateurs qualifiés et expérimentés.
	GPS	Précision encore faible des mesures. Nécessité de capter les bonnes orbites. Temps d'acquisition parfois long. Traitement sophistiqué des mesures.

DISPONIBILITÉ – COÛT

DISPONIBILITÉ	Flexigraphe mécanique	Courante
	Capteurs	Courante
	Flexigraphe LASER	Faible
	Nivellement de précision	Courante
	Théodolite motorisé	Moyenne
	GPS	Faible
COÛT	Flexigraphe mécanique	Faible
	Capteurs	faible
	Flexigraphe LASER	Moyen
	Nivellement de précision	Faible

COÛT	Théodolite motorisé	Moyen
	GPS	Moyen à élevé

RÉFÉRENCES

NORMES – MODES OPÉRATOIRES – ARTICLES	« Epreuves d'ouvrages d'art sur les ponts routes et passerelles piétonnes » , Guide technique, SETRA (CEREMA), décembre 2003. RAJADE J., 1970, Conditions d'emploi du fleximètre mécanique dans les essais d'ouvrages d'art, Bulletin de liaison des Laboratoires Routiers, n° 45, mai-juin 1970, LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES - LCPC, pp 155-164 Flexigraphe – Mesure des flèches d'ouvrages d'art. Matériel MLPC, LCPC, 2010. Le GPS et les métiers du génie civil : Journées GPS 2000 du réseau des laboratoires des ponts et chaussées, Nantes, 20 et 21 juin 2000 , Actes des Journées Scientifiques et Colloques du LCPC, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées - LCPC , 203p , DOI: 10.3829/act-actgps-fr Duranthon J.P., 2000, Application de la méthode GPS de localisation par satellite à la surveillance des sites naturels instables , Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 228, septembre-octobre 2000 , LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES - LCPC , pp 47-57 ITSEOA (Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art), Deuxième Partie, fascicule 04 : « Topométrie », SETRA (CEREMA), octobre 2006.