MESURES DE ROTATIONS PAR PENDULE

PRINCIPE ET DESCRIPTION SOMMAIRE

OBJECTIF	Mesurer avec précision les déplacements horizontaux relatifs d'un point d'une structure par rapport à un autre situé sur la même verticale. On en déduit alors une rotation ou une inclinaison par le calcul.
PRINCIPE	Il existe deux types de pendule : le pendule direct et le pendule inverse. **Mesure par pendule direct :** Le principe de la méthode consiste : – à fixer en partie haute de la structure un support auquel sera fixé le fil du pendule ; – à accrocher le fil auquel est suspendu un poids ; – à fixer en partie basse de la structure une table de lecture, cette lecture pouvant être manuelle ou automatisée ; – éventuellement à fixer sur la structure en partie basse un réservoir d'eau additionnée d'anti-gel pour amortir les oscillations du poids. **Mesure par pendule inverse :** Le principe de la méthode consiste : – à fixer en partie basse de la structure une platine à laquelle sera fixé le fil du pendule ; – à fixer en partie haute de la structure un réservoir rempli de liquide sur lequel reposera le flotteur auquel est attachée l'extrémité supérieure du fil ; – à fixer en partie haute de la structure une table de lecture. Le pendule inverse est utilisé lorsque l'on n'a pas accès au point bas d'une structure ; c'est typiquement le cas d'une fondation. L'inclinaison prise par la structure est souvent corrélée à des mesures de température afin de distinguer un éventuel fonctionnement cyclique de l'ouvrage avec les variations thermiques. Les mesures brutes doivent donc être corrigées thermiquement pour tenir compte de l'effet de la température sur la structure. Pour un pendule direct ou inverse il est possible de fixer plusieurs tables de lecture à différents niveaux, ce qui permet d'améliorer la qualité des résultats.
CARACTÈRE DESTRUCTIF DE LA MÉTHODE	Méthode non destructif L'installation d'un pendule inverse peut nécessiter la réalisation d'un forage ou d'un puits, mais le plus souvent il est installé à la construction dans une réservation adéquate.
MATURITÉ	Méthode de mesure éprouvée depuis très longtemps (principe du fil à plomb utilisé en construction)
MATÉRIEL SPÉCIFIQUE EMPLOYÉ	Fil en acier inox Cuve, poids, flotteur, liquide Automatisation possible par l'ajout de capteurs de déplacements pour repérer la position du fil



Pendule direct (IFSTTAR)



Pendule inverse (IFSTTAR)

MODALITÉS D'APPLICATIONS	
DOMAINE D'APPLICATION	L'appareil est notamment utilisé pour le suivi : – de l'inclinaison prise par des piles, des culées, des murs de soutènement, etc. – de l'inclinaison prise par le corps et la fondation des barrages, par des bajoyers d'écluse, etc. Il permet une surveillance sur une grande base de mesure (jusqu'à plusieurs dizaines de mètres de hauteur), avec une bonne précision et de façon durable.
SUJÉTIONS PRATIQUES D'INTERVENTION	Lorsque le pendule est placé à l'extérieur d'une structure, il est conseillé de placer un tube autour du fil pour éviter les oscillations parasites dues aux effets du vent, aux chocs divers ou au vandalisme.
LIMITES D'UTILISATION	Limites liées au bon repositionnement de la table de lecture
PRÉCISION ET/OU SENSIBILITÉ	En lecture manuelle : la précision est de 0,1 mm, ce qui peut représenter une précision sur la rotation de 10^{-6} rd pour un pendule de 100 m. En lecture automatisée avec des capteurs de résolution 1 micron, la précision sur la rotation est d'environ 3 10^{-8} rd pour un pendule de 100 m.
PERSONNEL ET COMPÉTENCES	Agents d'investigation ayant une pratique courante de la mesure de précision
CARACTÉRISTIQUES OPÉRATOIRES	
ACCÈS À 1 OU 2 FACES	Sans objet
COUPURES OU RESTRICTIONS DE CIRCULATION NÉCESSAIRES	Sans objet
RENDEMENT ET/OU ÉCHANTILLONNAGE	L'installation sur l'ouvrage en service peut être longue suivant la configuration du site Quelques dizaines de mesures manuelles par jour L'installation d'une télémesure automatisée est possible
DÉLAIS DE DISPONIBILITÉ DES RÉSULTATS	Résultats immédiats
PERTURBATIONS DU TRAFIC SUR LES MESURES	Non (mesures ponctuelles)
PERTURBATIONS DE L'ENVIRONNEMENT SUR LES MESURES	Les mesures peuvent être perturbées par le vent en l'absence de protection spécifique
RISQUES POUR LES UTILISATEURS OU LE PUBLIC	Pas de problème de sécurité
ENCOMBREMENT – POIDS	Peu encombrant, à l'exception de la cuve
AVANTAGES – INCONVÉNIENTS	
AVANTAGES	Mesure simple Très bonne précision si mesure automatisée Bonne fiabilité sur le long terme Possibilité de remplacer le fil du pendule direct
INCONVÉNIENTS	Mesures discontinues dans le cas d'une lecture manuelle Impossibilité de remplacer le fil de certains pendules inverses Nécessité de vérifier régulièrement la présence suffisante de liquide dans le bac et pour les pendules inversés que le flotteur ne touche pas le bac

DISPONIBILITÉ – COÛT	
DISPONIBILITÉ	Très bonne
COÛT	Moyen, dépendant du type de lecture (directe ou automatisée)
RÉFÉRENCES	
NORMES – MODES OPÉRATOIRES – ARTICLES	Vignieu R., Les mesures de déplacements verticaux associés aux pendules – Colloque « Auscultation des barrages et des digues – Pratiques et perspectives », Comité Français des Barrages et Réservoirs, Chambéry, 27 et 28 novembre 2012.