

IMGC

L'INSTRUMENTATION AU SERVICE DES OUVRAGES DE GÉNIE CIVIL

Journée Technique

MARDI 13 JUIN 2023

FNTP – 3 Rue de Berri, 75 008 PARIS

Présentation du guide IMGC sur l'instrumentation

Renaud LECONTE – Setec Diadès

Constitution du groupe de travail

- Groupe de 9 personnes dont 1 animateur, représentant les MOA, MOE, BE et entreprises

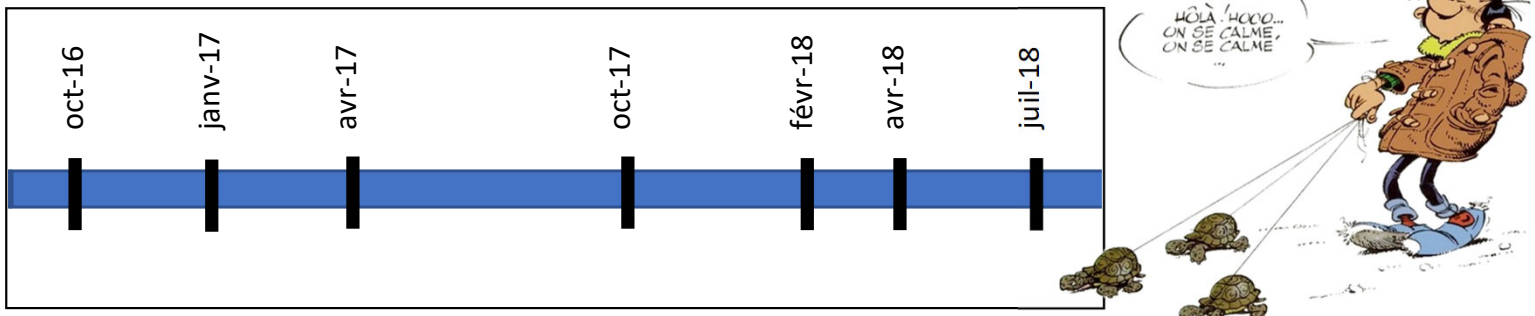
- En chiffres …

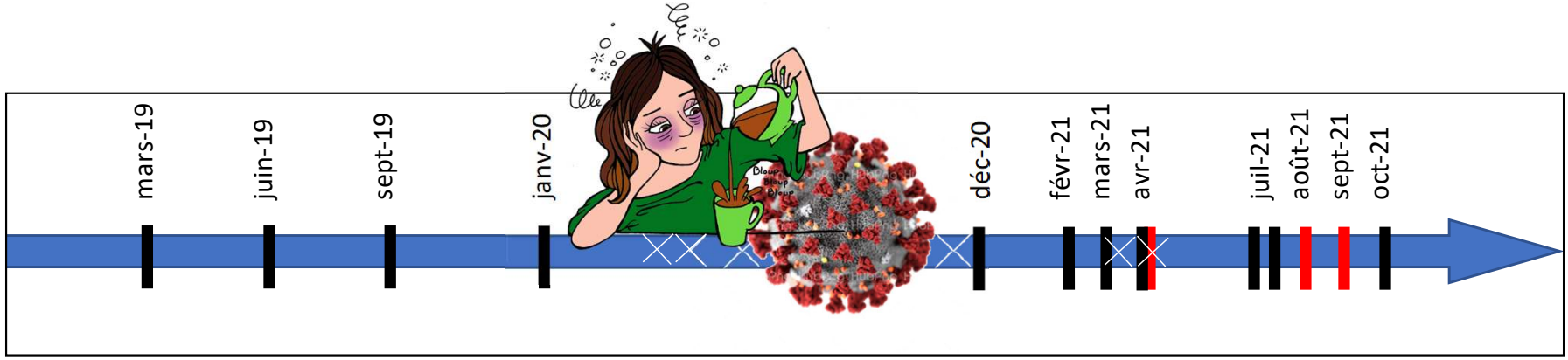
  - 15 réunions dont 1 de démarrage,
  - 9 rédacteurs & 10 relecteurs
  - 3 réunions de prise en compte des remarques
  - Document de 50 pages environ + 45 pages d'annexe
  - Environ 5 ans dont la période Covid



Organisation des travaux du groupe

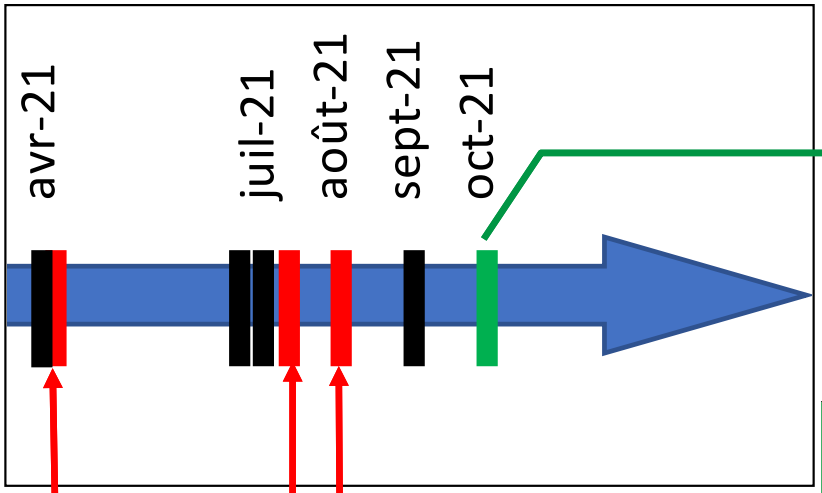
Chronologie d'un travail de longue haleine





Et processus de relecture

Dernière ligne droite …



IMGC
Mise en forme & publication 09/22

Université Gustave Eiffel
Cerema
setec lerm
SNCF
EDF

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE
Liberté Égalité Fraternité

CCI SEINE ESTUAIRE



Genèse de la rédaction du guide

Et avant-propos …

Points évoqués en brainstorming

- Utilisation de l'instrumentation. [maintenance préventive, suivi particulier des structures pathologiques à très dégradées ou « simplement » ouvrage stratégique]

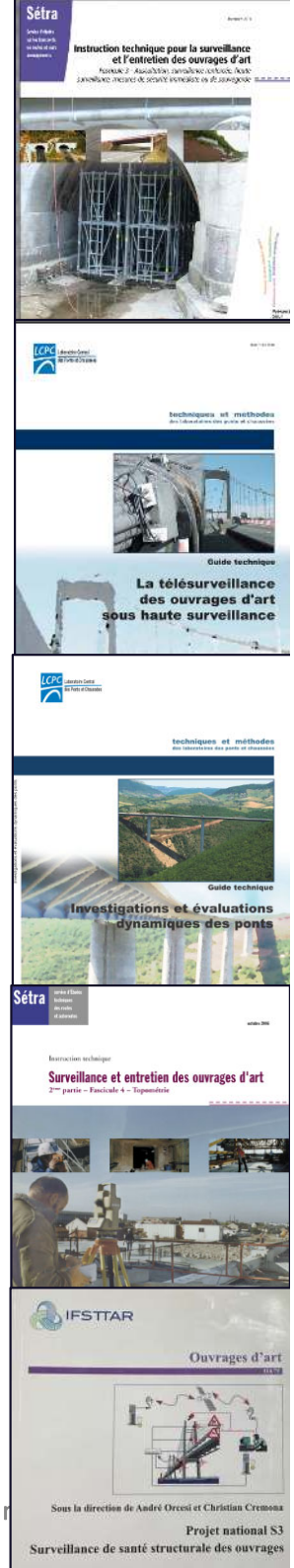
- De quels risques veut-on parler ? [enjeux de : **sécurité** (humaine, environnementale, …), **exploitation** (financier, image, juridique, social, sociétal, culturel, …)]

- Quels objets sont concernés ? limitation aux seuls OA existants [ponts, tunnels, murs, barrages, (centrales nucléaires), digues, barrages, …, à l'exclusion des structures linéaires telles que les routes, voies ferrés, pistes d'aéroport… ainsi que les gros équipements type ponts roulants, structures offshores, ouvrages en terre].

  - ➔ Une instrumentation pour quels usages ?

- Quelle instrumentation & Adéquation entre instrumentation, besoins et finalité. [Longévité de l'instrumentation, Format des données dans le temps, Maintenance des matériels … dans la continuité, Apprentissage, …]

- Aide au choix d'une instrumentation (Recommandations pour CCTP ?)



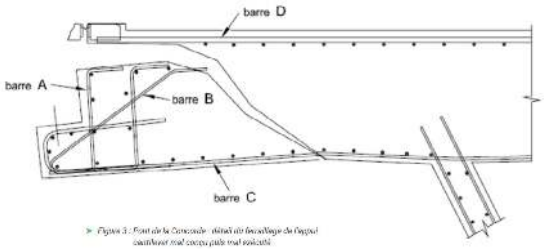
Contenu synthétique

- Contexte général et domaine d'application ➔ Chap. 1 AVANT-PROPOS
- Différents risques auxquels sont soumises les structures existantes, et la manière dont l'instrumentation permet de les suivre, comprendre voire « maitriser ».
  ➔ Chap. 2 RISQUES
- Principes de l'instrumentation **ET** importance à réaliser une **profonde réflexion amont à sa conception** ➔ Chap. 3 INSTRUMENTATION
- Relations entre modèle de comportement. numérique des structures et comportement réel extrait à partir de l'instrumentation ➔ Chap. 4 ANALYSE DES DONNEES
- **Points de vigilance à la rédaction d'un CCTP** : alerter le MOA et MOE sur les points minimaux à définir / exiger ➔ Chap. 5 CCTP : POINTS DE VIGILANCE
- Illustré par des annexes et exemples

Risques évoqués

- Rappel des grands principes de l'analyse des risques
- Listing de différents risques
  - Description succincte du risque,
  - Présentation des causes et des conséquences,
  - Information sur la cinétique,
  - Exemple éventuel.

Mauvaise conception et/ou exécution / Vieillissement des matériaux / Changement d'usage ou de conditions l'exploitation / Changement climatique / Evénements exceptionnels / Interaction sol/structure / Interaction structure/structure / Modification de l'environnement & travaux à proximité de l'ouvrage









Instrumentation

- Rappel des grands principes de l'instrumentation
  - Instrumenter ce n'est pas QUE METTRE des capteurs

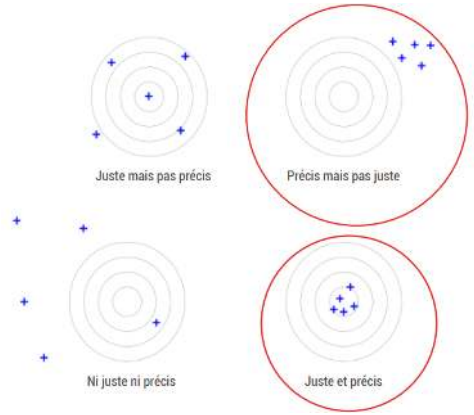
  Mesure et acquisition / Stockage et base de données / Transmission / Traitement des données / Management et contrôle de données / Restitution des données / Analyse / Maintenance et gestion du système

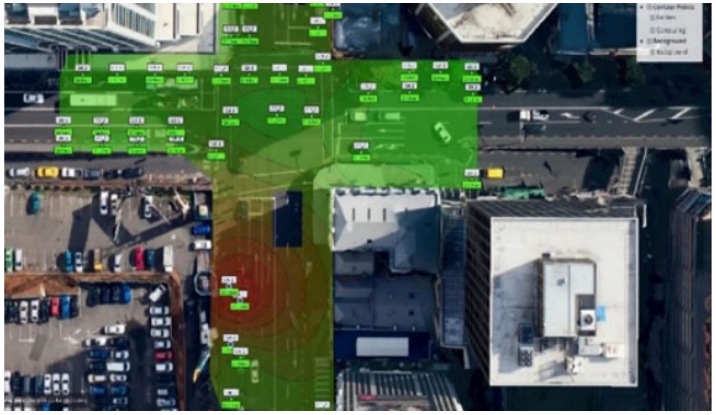
  - Conçue pour répondre à un besoin défini

  Performance sur les données attendues / Contraintes sur l'intégration de l'instrumentation

- Mesures et acquisition

  Quelques notions de métrologie / système d'acquisition et architecture (matérielle et logicielle)







Instrumentation

- Les usages de l'instrumentation
  - Quelques usages et typologies de mesure associées
  - Focus sur :
    - Le diagnostic / La surveillance préventive / La surveillance renforcée / La haute surveillance / La surveillance dans le cadre de travaux sur les avoisinants

      Objectifs, Durée a priori, Conseils éventuels

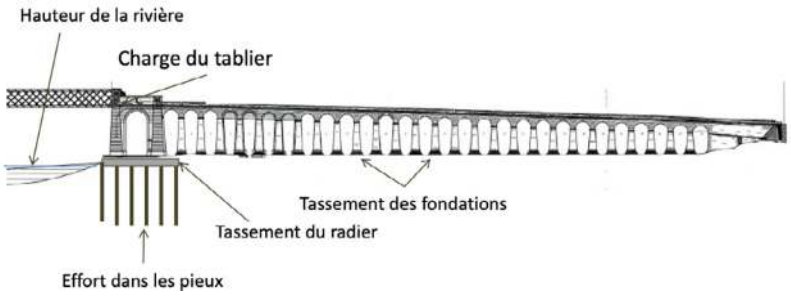
- Indicateurs d'alerte
  - ➔ Dans tous les cas ➔ définir ce qui est recherché est pourquoi !
  - ➔ Réflexion amont indispensable : critères pertinents / grandeurs à suivre ?
  - ➔ Différents niveaux de seuils & actions associées
  - ➔ Etc.

Un système d'alerte doit faire l'objet d'une phase d'apprentissage afin de faire ressortir des alertes au juste moment et éviter un nombre trop important de fausses alarmes ayant un impact délétère sur la vigilance des personnels d'astreinte.

Analyse des données

- Modèle de comportement et instrumentation
  - ➔ Adéquation de l'instrumentation à la modélisation du comportement mécanique / Objectifs de la modélisation / Les types de modèles / Liens entre modèle et instrumentation / Calage des paramètres

- Analyse du comportement : choix de la grandeur physique à mesurer
  - ➔ Conditions aux limites et sollicitations externes / Comportement « global » / Comportement « local » / Impact des sollicitations dynamiques



Point de contrôle	Type de mesure	Capteur ou ensemble de mesure	Exemple d'utilisation
Evolution de Fissures	Ouverture 1D, 2D, 3D, intégrée	Capteurs de déplacement linéaires (Fissuromètres)	Surveillance de l'évolution de fissures, multi-fissures, maçonneries
Conditions physico-chimiques	Température 1 point, multipoints	Sonde de température	Mesure de température à l'intérieur d'un ouvrage en béton
	Humidité, teneur en eau	Capteur d'humidité	
	Corrosion	Capteur de corrosion	
Conditions environnementales	Température ambiante	Sonde de température	
	Humidité	Capteur d'humidité	
	Vitesse du vent et orientation	Girouette-Anémomètre	
	Hauteur d'eau	Pluviomètres	
	Rayonnement solaire	Pyranomètres	
Rupture de câbles	Emission Acoustique	Accéléromètres, microphones	Haubans, câbles de suspension

Point de contrôle	Type d'information	Capteur ou ensemble de mesure	Exemple d'utilisation
Sollicitations externes	Température	Capteurs de température	Connaissance de la température de la structure et de son environnement
	Vent	Anémomètre	Connaissance de la vitesse et de l'orientation du vent
	Neige	Mesure de hauteur	Connaissance de la hauteur et de la densité de la neige
	Surcharges routières	Boucles de comptage	Détermination des poids et fréquences de passage
	Pluie	Pluviomètres	Connaissance des quantités d'eau de pluie
	Rayonnement solaire	Pyranomètres	Connaissance de la quantité d'énergie solaire en lumière naturelle

- Rapports d'ingénierie
  - ➔ Complet et clair sur les conclusions, il doit préciser les incertitudes / doutes sur toute ou partie des données en cas de réingénierie de ces données.

Les points de vigilance

- Un bon CCTP est un prérequis à une bonne instrumentation
  - ➔ Structuration du CCTP : *préambule, objet, définition de l'ouvrage à instrumenter, définition de l'instrumentation, maintenance du système, définition de la surveillance, contenu des rapports, dossier d'instrumentation, autres …*
  - ➔ CCTP d'instrumentation : une étude à part entière ➔ interne, MOE ou AMO

Le maître d'ouvrage doit être alerté sur le fait que la pertinence des résultats de l'instrumentation mise en œuvre est directement liée à l'expression de son besoin et des contraintes associées. A défaut, le prestataire peut, de bonne foi, avoir une prestation conforme à la demande bien qu'elle ne permette pas de conclure à la question posée.

- Ouvrage à instrumenter : *connaissance de l'ouvrage, accès et accessibilité, réseau télécom, énergie, …*
- Instrumentation : *choix des zones, grandeurs physiques à mesurer et précision recherchée, fiabilité, nombre mini de points de mesure, durée, stockage / récupération & visualisation, alimentation en énergie*
- Maintenance du système : *préventive, adaptative, curative… fonction des objectifs*

Les points de vigilance

- Définition de la surveillance : *durée prévisionnelle du suivi, fréquence d'acquisition, avec ou sans seuil : le cas échéant actions associées, redondance nécessaire en fonction des risques…*

- Contenu des rapports : *attendus en termes de livrables (fréquence, contenu), format de données à remettre, rapport initial d'installation, fourniture des données brutes prétraitées ou de données interprétées éventuellement avec préconisations…*
  - *Si dissociation entre acquisition et traitement ➔ prévoir des réunions tripartites avec les 2 entités*

- Dossier d'instrumentation : *Livrable en fin de prestation : rappel des caractéristiques matériels, positions, actions de maintenance réalisées… / Synthèse des valeurs de référence et des formules de traitement ➔ Faciliter le transfert vers un autre prestataire le cas échéant*

- Autres : *intérêt / importance à prendre une AMO, imposer une technologie libre de droit pour instru longue à très longue durée ?, gestion particulière pour le renouvellement d'une instrumentation en place…*

Quelques annexes

- Point de terminologie & glossaire

- Familles principales de mesure: *dimensionnelles, de déformation, de rotation, de comportement dynamique, physico-chimiques, des efforts, des sollicitations extérieures*

Vélocimètre (géophone)	
Principe :	Les vélocimètres sont couramment employés pour mesurer les vitesses de déplacement sous une excitation naturelle (trafic, vent, foule, séisme, etc.) ou sous une excitation provoquée (balourd, marteau, explosif, etc.). Ils sont plus sensibles que les accéléromètres mais possèdent une plage de fréquence plus réduite. Ces vélocimètres peuvent mesurer les vitesses selon 1, 2 ou 3 directions.
Étendue de mesure courante :	De 0 à 350 Hz avec une étendue de mesure de ± 100 mm/s
Précision :	Non précisé

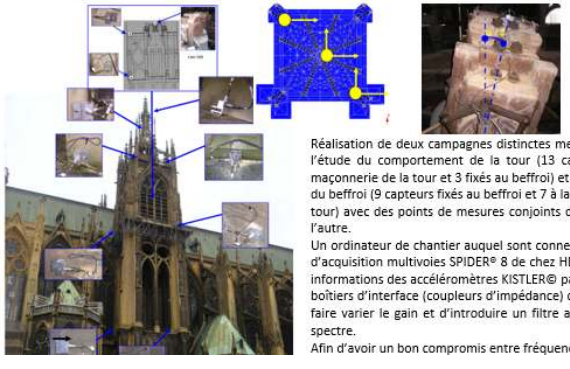
- Quelques exemples : *Descriptif du MOA, objet de l'exemple, Risques identifiés, objectifs de l'étude*

Maître d'Ouvrage	LYONDELL
Objet	Pipeway de débarquement de produits chimiques
Risques	Rupture de l'ouvrage du fait d'une structure très dégradée pouvant engendrer des risques pour les ouvriers travaillant à son renforcement et créer une pollution maritime du fait des canalisations de gaz supportées
Objectif de l'étude	Suivi sécuritaire pendant l'exploitation avant et pendant la réhabilitation
Date de l'étude	2013

VIII.1 CATHEDRALE DE METZ

Maitre d'Ouvrage : Direction Régionale des Affaires Culturelles de Lorraine
Objet : La tour de la Mutte de la cathédrale de Metz – Monument historique
Risques : Mise en résonnance de l'édifice lors de la volée de la cloche de la Mutte.
Objectif de l'étude : compréhension de phénomènes de résonnance avec couplage structure / cloche ayant conduit à l'arrêt du tintement de la Mutte.
Contexte : Les vibrations induites par les mouvements et les sonneries des cloches peuvent constituer un danger pour la stabilité de certaines églises ou cathédrales. Un exemple est fourni par la cathédrale de Metz dont la tour principale supporte une cloche de 11 tonnes à plus 50 m de hauteur. Cette cloche, dite la Mutte, produit des effets acoustiques et [illegible] historiques, ont eu des répercussions sur la structure de la cathédrale. [illegible] l'effondrement de certains éléments en pierre et en maçonnerie de cette cloche depuis de très nombreuses décennies. La communauté [illegible] mais les exigences de sécurité nécessitaient de mener des études précises avant d'autoriser la cloche à sonner de nouveau. C'est dans ce cadre que la Direction Régionale des Affaires Culturelles de Lorraine (DRAC) s'est rapprochée du LCPC et du CETE de Lyon pour mettre en œuvre une instrumentation et une modélisation de la tour de la Mutte et du beffroi support de la cloche, de manière à déterminer sous quelles conditions la cloche « la Mutte » pouvait être remise en service en sécurité.
Instrumentation : instrumentation dynamique, basée sur l'analyse de 16 capteurs accéléromètriques fonctionnant de manière synchrone mis en œuvre pour déterminer les caractéristiques modales de la structure et calibrer la modélisation numérique aux éléments finis de la cathédrale sous CESAR-LCPC, (conditions aux limites de la tour par rapport à la nef, caractéristiques de la maçonnerie et interactions entre la tour et le beffroi).

Monuments



Réalisation de deux campagnes distinctes mettant l'accent sur l'étude du comportement de la tour (13 capteurs fixés à la maçonnerie de la tour et 3 fixés au beffroi) et le comportement du beffroi (9 capteurs fixés au beffroi et 7 à la maçonnerie de la tour) avec des points de mesures conjoints d'une campagne à l'autre.
Un ordinateur de chantier auquel sont connectés deux boîtiers d'acquisition multivoies SPIDER® 8 de chez HBM© recevant les informations des accéléromètres KISTLER© par le biais de deux boîtiers d'interface (coupleurs d'impédance) qui permettent de faire varier le gain et d'introduire un filtre anti-repliement de spectre.
Afin d'avoir un bon compromis entre fréquence d'acquisition et

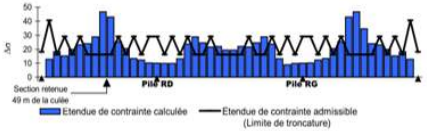
VIII.2 PONT DE SAINT-VALLIER – CD26

Maitre d'Ouvrage : Conseil Départemental 26
Objet : Bipoutre mixte de Saint-Vallier
Risques : Durée de vie en fatigue des assemblages soudées
Objectif de l'étude : Vérification de la durée de vie résiduelle de la charpente à partir d'une instrumentation d'une section
Contexte : Réflexion conduite sur l'aptitude au service des ponts mixtes, construits avant l'application des règles de calcul à la fatigue de 1995.
Etude, dans la zone d'action du CETE de Lyon, du pont de Saint Vallier, un ouvrage, construit en 1971, qui présente au calcul à la [illegible]raînte par [illegible]onstat est [illegible]e [2]. Cet Drôme et l'Ardèche, de franchir le Rhône.

OA mixte

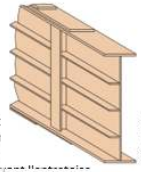


Il s'agit d'un pont mixte bipoutre métallique de hauteur variable, av[illegible] 236 m.Le tablier a une largeur de 11 m, il supporte 2 voies de circulation et il est composé de 3 travées (78 – 96 et 76 m).
Une comparaison des variations de contraintes pour la structure sous convoi de fatigue réglementaire avec les valeurs admissibles (limite de troncature) a mis en évidence deux sections où les dépassements de variation de contraintes sont très significatifs.



Instrumentation : La zone retenue pour l'instrumentation correspond à un changement de section dû à la présence d'une semelle additionnelle en partie inférieure des deux poutres amont et aval. La section étudiée regroupe trois types de jonction avec une semelle inférieure de poutre. Chacun de ces types correspond à une catégorie de détail différente vis-à-vis de la fatigue.





Pour connaître les [illegible]lues au passage de véhic[illegible]age étudié, la structure est équipée de jauges de déformation à fil résistant tant sur les poutres pr[illegible]lés constituant l'entretoise. L'instrumentation consiste à implanter des jauges sur la semelle infé[illegible]cipales (en faces supérieure et inférieure) ainsi que sur les parties hor[illegible]



VIII.4 TOUR TELECOMMUNICATION ET VENTS AU-DELA DES VENTS DE CALCULS (RL)

Maitre d'Ouvrage : Télévision De France
Objet : Emetteur TDF de Lyon Mont Pilat (42)
Risques : Comportement structurel sous vents supérieurs au vent de dimensionnement
Objectif de l'étude : Vérification de la capacité de la tour à reprendre les sollicitations et définition des renforcements éventuels.
Contexte : La société Télédiffusion de France (TDF) possède une tour antenne relais située à proximité du Mont Pilat, dans le département de la Loire (42). Cette antenne se compose d'une structure de béton armé de 50 m de haut coiffée d'un pylône métallique.

Tour



[illegible]egistrés ont été [illegible]s théoriques de béton armé ont nécessitant des renforcements structurels importants de l'ouvrage.
La structure ne présentant aucune pathologie significative, la question de la pertinence d'enclencher d'onéreux travaux de renforcement de son ouvrage s'est posée à TDF. Avant de s'engager dans cette voie du renforcement, TDF a préféré améliorer sa connaissance de l'ouvrage et de son fonctionnement réel au travers d'une nouvelle étude structurelle basée sur des calculs éléments finis dont le modèle a été calé par une instrumentation « comportemental » de l'ouvrage, dans un environnement à forts champs électromagnétiques.
Cette mission a été réalisée par Setec diadès pour les études structurales en partenariat avec ARGOTECH pour l'instrumentation de la tour.
Elle comprenait :

- l'inspection de la tour en béton armé et l'instrumentation spécifique adaptée aux contraintes du site et aux contraintes d'exploitation de la tour,
- la définition des seuils d'alerte et d'avertissement en fonction des vitesses de vent enregistrées,
- la modélisation de la tour aux éléments finis pour analyse du comportement théorique de la tour,
- l'analyse des déformations enregistrées en fonction des vents pour valider le modèle théorique et notamment les coefficients aérodynamiques retenus pour la structure,
- les vérifications structurelles règlementaires de la structure afin de déterminer le renforcement règlementairement nécessaire,
- la synthèse de la mission pour permettre au maître d'Ouvrage de statuer et d'apprécier la possibilité de ne pas renforcer et d'alléger à minima considérablement les travaux.

VIII.6 SURVEILLANCE DU CINEMA LE LOUXOR - PARIS

Maitre d'Ouvrage : Mairie de Paris
Objet : Réhabilitation du cinéma Le Louxor
Risques : Effondrement
Objectif : Surveillance de la stabilité des murs
Contexte : Situé dans le 10ième arrondissement de Paris, le cinéma Le Louxor est l'un des rares cinémas rescapés d'avant-[illegible] des années 20, doté d'une façade néo-égyptienne.

Bâtiment



Photos : Louxor en 1930 et en 2015 – Source Wikipédia

La réalisation d'un nouveau complexe passe, notamment, par la démolition des murs intérieurs et des planchers, la réalisation de puits blindés en sous œuvre tout en conservant l'ancienne enceinte classée. La réhabilitation de ce site prévoit l'édification d'une nouvelle structure qui accueillera de nouvelles salles ainsi qu'un espace d'exposition.
Ces travaux lourds risquant d'occasionner de sérieux mouvements au niveau de l'ancienne structure, un suivi des tassements a été préconisé.

Dans ce contexte, un réseau de tassomètres hydrostatiques de hautes précisions a été mis en œuvre.





Réseau de tassomètres

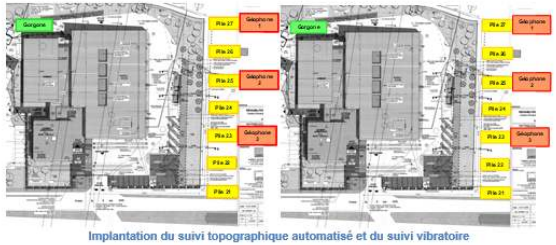
VIII.5 VIADUC EPINAY SOUS SENART

Maitre d'Ouvrage : SDIS Essonne
Objet : Extension d'une caserne de pompier
Risques : Désordres su le viaduc d'Epinay limitrophe à la caserne
Objectif : Contrôle des vibrations et des tassements du Viaduc
Contexte :
La caserne de pompier d'Epinay Sous Sénart a été agrandie. Les [illegible]ge ainsi [illegible]eptibles [illegible] de 33m

OA Maçonnerie



Elargi en début du siècle dernier pour permettre le passage de 4 voies de la ligne Paris/Lyon /Marseille, l'ouvrage est considéré comme sensible par la SNCF qui a préconisé une surveillance automatique et un suivi vibratoire en continu pendant les travaux des colonnes ballastées.



Implantation du suivi topographique automatisé et du suivi vibratoire

La surveillance topographique automatique effectuée à l'aide d'un Cyclops® a permis de garantir la précision de 0.5mm demandée en X, Y et Z. Le seuil de tassement était fixé à 2,5mm. L'appareil était installé sur la tour d'entrainement de la caserne de pompier.

Pour le suivi vibratoire, les seuils applicables aux ouvrages classées très sensibles ont été préconisés par la SNCF conformément aux préconisations de la circulaire du 23 juillet 1986.
Les géophones installés sur les piles d'ouvrage et pilotés par la Gorgone® mesurait une vitesse particulaire sur 3 axes.





VIII.7 SURVEILLANCE D'UN PIPEWAY

Maître d'ouvrage : LYONDELL

Objet : Pipeway de débarquement de produits chimiques

Risque : Ouvrage très dégradé pouvant s'effondrer et créer une pollution maritime

Objectif de l'étude : Suivi sécuritaire pendant l'exploitation avant et pendant la réhabilitation

OA béton armé

[illegible]l s'agit d'un pipeway permettant le déchargement de pro[illegible] de transformation.

[illegible] reposant sur 2 poutres (Figure 2). Cet ouvrage était forte[illegible]eures complètement dégagées, appuis dégradés (Figure 3

Ce pipeway nécessitait une réparation urgente mais assurer son exploitation avant travaux était vital pour l'usine contraintes imposées étaient importantes :

- déchargements des bateaux en sécurité afin d'éviter de graves pollutions des milieux marins
- assurer une sécurité des personnels (sous l'ouvrage) lors de la réparation et notamment des purges des pout

L'ouvrage est situé dans une région soumise à de grandes et rapides variations thermiques.





Figure 2 : description schématique du pipeway






Merci pour votre attention