

Instrumentation du pont d'Osserain et description de son fonctionnement par le spectre de la mesure

PN DOLMEN¹

¹GT instrumentation du PN DOLMEN

RESUME Dans le cadre de la déconstruction programmée du pont d'Osserain (64) par le Conseil Départemental des Pyrénées-Atlantiques, un partenariat a été établi entre la collectivité et le PN DOLMEN ; la convention de partenariat, finalisée en octobre 2023, prévoyant la mise à disposition de l'ouvrage à la communauté scientifique du programme de recherche DOLMEN dans ses phases de déconstruction. Les interventions réalisées dans le cadre du programme de recherche consistaient notamment à déployer une instrumentation sur ouvrage afin de caractériser les phénomènes mis en jeu durant des essais de chargement spécifiques réalisés avant la déconstruction. L'instrumentation a été mise en place entre le 9 et le 23 octobre 2023, les essais de chargement ont eu lieu les 24 et 25 octobre 2023. L'ouvrage a été déconstruit le 31 octobre 2023. Cet article vise à décrire l'instrumentation mise en place lors du chargement de l'ouvrage et les principaux résultats obtenus durant les phases de chargement de l'ouvrage.

Mots-clefs PN DOLMEN, chantier démonstrateur du pont d'Osserain, instrumentation

I. INTRODUCTION

Le chantier démonstrateur du pont d'Osserain mené dans le cadre du PN DOLMEN a permis de regrouper sur un même objet d'étude près de 24 partenaires (industriels et académiques) afin d'améliorer la compréhension du comportement de ce type de structures maçonnées et de proposer des éclairages sur leur instrumentation et leur modélisation dans un objectif prédictif. Le chantier démonstrateur est exceptionnel à bien des égards : disposer d'un ouvrage réel à trois travées de 14 mètres d'une telle qualité qui puisse être utilisé pour des essais de chargement à l'échelle 1 est rare sinon inédit en France ; proposer une instrumentation d'une telle richesse est peu courant ; faire de cette structure un benchmark de calcul permettant de confronter objectivement une dizaine d'approches de modélisation utilisées par des BET et/ou universitaires entre elles et aux données expérimentales tirées des essais reste un exercice exceptionnel. La suite de ce document se concentre sur la partie instrumentation. Le chantier démonstrateur doit permettre de fournir un retour objectif sur les résultats de mesures obtenus en regard des choix d'instrumentation réalisés.

II. MOYENS D'INSTRUMENTATION

Sur la base des résultats d'une pré-étude de modélisation visant à valider le plan de chargement final du pont d'Osserain (application d'une charge de 360 t sur une aire de 8x4.8 m² sur la première demi-travée du pont avec des blocs de béton), à décrire le comportement de l'ouvrage chargé, identifier les mécanismes à mesurer, préciser les zones d'occurrence de ces phénomènes et

leur amplitude / intensité, un plan d'instrumentation de l'ouvrage a été défini fixant les technologies à déployer sur le pont en vue de son suivi au cours de l'essai de chargement. L'instrumentation du pont a permis d'assurer sur l'ouvrage (Figure 1) :

- un suivi topographique (pose de 2 fois 10 prismes en amont et en aval du pont),
- un suivi inclinométrique de l'ouvrage (pose de 10 inclinomètres),
- un suivi fissurométrique (pose de 6 fissuromètres dans des zones d'ouvertures potentielles de joints prédites par les modélisations),
- un suivi des déformations (pose de 3 fibres optiques déployées au niveau de la travée chargée longitudinalement sous tympan et à mi-distance entre les deux tympans et transversalement à l'ouvrage sous la zone de chargement),
- un suivi de la réponse vibratoire de l'ouvrage par le bruit de fond (installation de 2 vélocimètres),
- et un suivi par imagerie (corrélation d'image et capture motion).

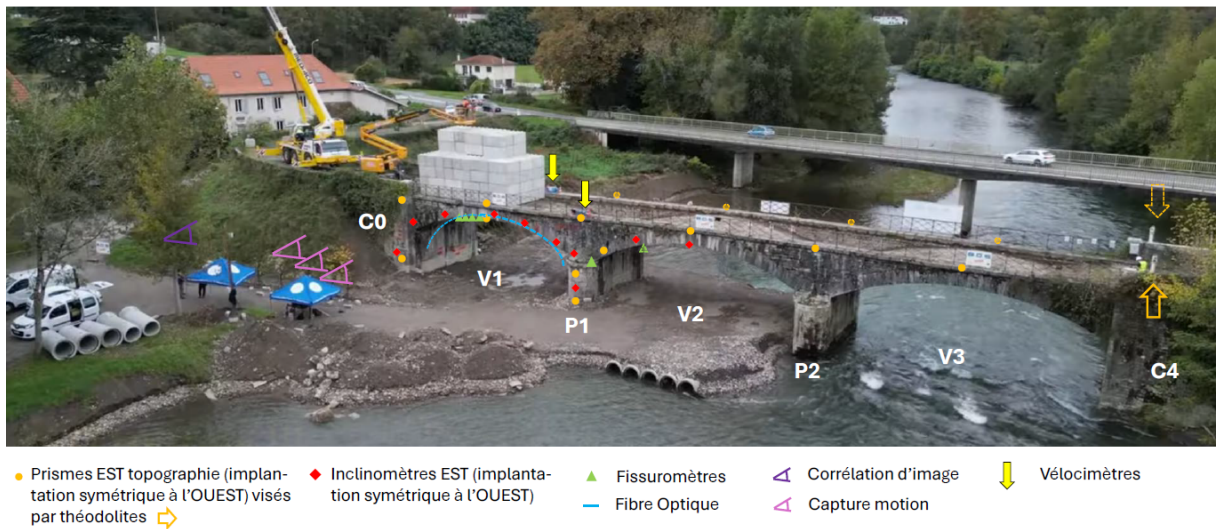


FIGURE 1. Moyens d'instrumentation déployés sur le pont d'Osserain

La richesse des moyens de mesures mis en œuvre pour décrire le plus finement possible le comportement du pont est à souligner (Figure 1). L'approche numérique a guidé leur mise en œuvre. Les discussions, en amont du chantier, sur le potentiel basculement de la pile P1 du pont prédit par les modèles, ont permis ainsi de « mailler » finement cette zone avec des cibles de suivi topographique et inclinométrique.

III. INTERPRETATION DU COMPORTEMENT DE L'OUVRAGE PAR LE BIAIS DE LA MESURE

De manière générale, le comportement structural attendu sous chargement (via les travaux de modélisation prédictive), a pu être confirmé par les mesures réalisées lors de l'opération de chargement. Les mesures inclinométriques ont confirmé la localisation des effets maximums du

chargement attendus par calcul sur l'ouvrage sur la voûte V1, avec des « sens d'inclinaisons » cohérents vis-à-vis du chargement maximal centré dans le 1er tiers de la voûte. Une amorce de basculement de la pile P1 sous chargement a également pu être détectée par ce biais. Dans le plan vertical, ce comportement est également confirmé par les mesures topographiques et par imagerie, avec des mouvements « descendants » sur V1 et « ascendants » sur V2. L'amorce de basculement de la pile P1 semble également se traduire à la lecture des graphiques de mouvement des pierres sous imagerie et des cibles topographiques (Figure 1). Enfin, les effets attendus par calcul se retrouvent également sur l'analyse des ouvertures des fissuromètres, aussi bien sur V1 que sur V2, semblant traduire l'apparition de rotules sous chargement dans les zones instrumentées.

Des dysfonctionnements constatés sur la fibre optique ne permettent pas d'établir clairement les niveaux de déformations sur la voûte V1 sous chargement (aussi bien dans les pierres que dans les joints). L'interprétation de ces données reste de fait qualitative. La compréhension des mécanismes d'ouvertures de fissure (rotules) au niveau des joints constatés par imagerie et par fissuromètres aurait pu être plus riche en les comparant à des données fibre plus précises.

L'analyse modale numérique réalisée en amont des essais se trouve confortée par les mesures vibratoires. En effet, on retrouve les deux premiers modes de vibrations de la structure (hors chargement) par mesures du bruit de fond, avec les bons ordres de grandeur de fréquence de résonance.

L'analyse comparative des données mesurées par des instruments différents permet de pointer des similitudes. En effet, plusieurs partenaires ont fait le constat d'une dérive ou d'un « fluage » des mesures à charge constante à partir du chargement final soit donc à partir de 18h30 le 25 octobre, et ce, jusqu'au lendemain à 7h lors de la décharge. Ce phénomène était déjà observé dans des proportions bien plus faibles lors de la première nuit sur certaines mesures. La source de ces déformations différées pourrait être attribuée aux systèmes de mesures ou au comportement de l'ouvrage. Les matériaux qui composent la maçonnerie pourraient induire des déformations différées de fluage (pouvant elles-mêmes générer de nouveaux dommages). L'accentuation importante de ces déplacements avec le chargement (première nuit : 2 niveaux de blocs, deuxième nuit : 6 niveaux de blocs) tend à crédibiliser cette hypothèse observée sur tous les moyens de mesures. Les calculs réalisés sans prise en compte du fluage montrent des contraintes pouvant atteindre plusieurs dizaines de MPa au niveau de la saignée lors de la deuxième nuit. D'autres phénomènes pourraient être concomitants comme la variation du taux d'humidité ou de la température de la structure au moment des essais. Toutefois, au-delà des aspects purement structuraux, les phénomènes de dérives peuvent également trouver leurs sources dans l'impact des variations de températures sur les appareils de mesures. En effet, hormis les mesures inclinométriques, dont les valeurs mesurées ont été corrigées en tenant compte de ces effets, ce paramètre n'a pas été pris en compte et analysé avec les autres technologies déployées.

Plusieurs technologies d'instrumentations semblent montrer des déformations irréversibles, avec une absence de retour de la structure à son équilibre d'origine après le déchargement. On retrouve ce phénomène au travers des mesures inclinométriques, vibratoires, fissurométriques et topographiques. Là encore, on peut supposer que l'endommagement de la structure par le chargement est la principale cause de ces observations, mais l'absence de prise en compte des

effets thermiques pour plusieurs technologies de mesures ne permet pas de quantifier ce phénomène. Une part de ces déformations irréversibles pourrait également être due au fluage.

IV. FIABILISATION DES DONNEES

En collaboration avec le groupe de travail modélisation numérique du PN DOLMEN, un travail de croisement des données mesurées a été réalisé entre septembre et décembre 2024 (Figure 2) ; le croisement des données ayant pour but :

- d'affirmer la robustesse ou non de certains résultats de mesures : étude d'une «pseudo»-reproductibilité de la mesure
- d'apporter des éléments de compréhension des phénomènes pré-identifiés (inclinaison de pile P1, création et localisation des rotules, etc...)
- d'enrichir les travaux du groupe de travail Benchmark des méthodes de calcul en leur livrant des données de mesures fiabilisées, autant que faire se peut.

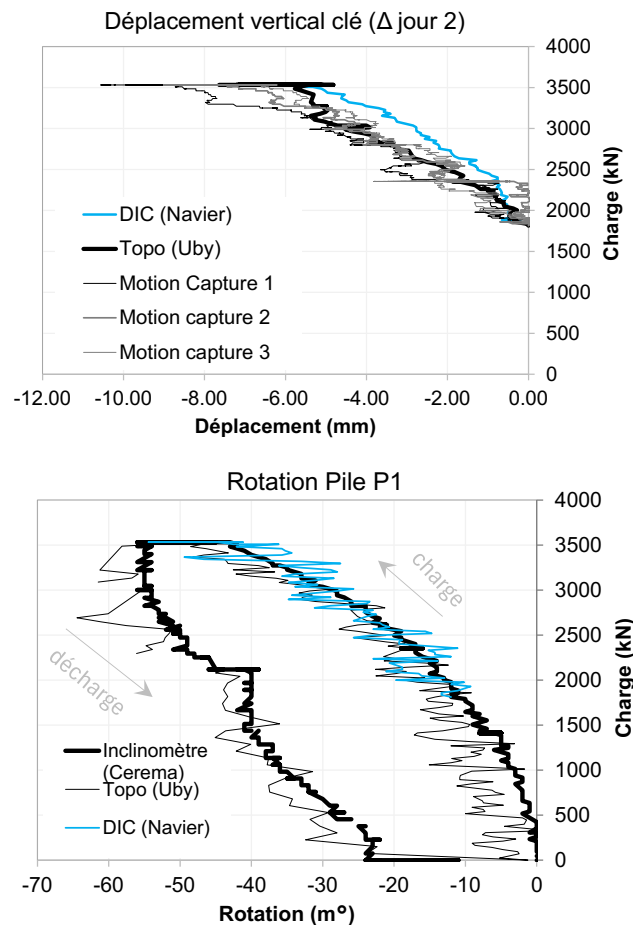


FIGURE 2. Fiabilisation des mesures (SETEC – novembre 2024) : évolution au cours du chargement de l'ouvrage de la flèche (en haut) mesurée en clé de V1 (pierre de bandeau amont) et de l'inclinaison de la pile P1 (en bas)

Quelques résultats obtenus pour le chargement maximal (hors effets différés) sont : 42m° de rotation de la pile P1, environ 8.5 mm de déplacement vertical de la voûte V1 en clé, environ 3mm de soulèvement de la voute V2, environ 4 mm de déplacement horizontal en tête de la pile P1 et des déformations de traction de la voute V1 entre 10‰ et 30‰.

A noter que ce travail de croisement s'est appuyé notamment sur les mesures de champs réalisés grâce à la corrélation d'images et sur les réponses des modèles (Figure 3).



FIGURE 3. Pont d'Osserain pendant le chargement : projection des champs de déplacements sur la structure obtenus par la modélisation (à gauche) et par la corrélation d'images (Navier) (à droite)

IV. CONCLUSION

Le chantier démonstrateur du pont d'Osserain est une expérience rare qui cherche à s'interroger à la fois sur les moyens de mesures susceptibles d'être mis en œuvre pour suivre efficacement ce type d'ouvrage mais également sur les moyens de modélisation à disposition afin d'appréhender leur comportement. Avant de tirer des enseignements spécifiques sur l'instrumentation ou la modélisation à proprement parler, le chantier démonstrateur du pont d'Osserain a le mérite de redémontrer, une fois n'est pas coutume, la juste nécessité d'appréhender le comportement de ce type d'ouvrage à la fois par le prisme de la mesure d'une part et par celui du calcul d'autre part.

Sur les aspects métrologiques et sur le plan opérationnel en particulier, l'expérience d'Osserain nous rappelle la difficulté de produire des mesures pleinement exploitables sur un ouvrage réel : Osserain a connu son lot de problèmes de fonctionnement de capteurs - *mesures de bruit ambiant* -, de repérage précis des moyens de mesure sur l'ouvrage, de mise en œuvre des capteurs, de corrections des mesures (température) - *mesures topographiques et fibre* - d'acquisition (données partielles) - *corrélation d'image* - ou encore d'exploitabilité des mesures - *motion capture* -. Le chantier démonstrateur rappelle donc l'importance de produire une mesure environnée dont on maîtrise les incertitudes.

Ces problématiques de mises en œuvre liées au temps très contraint de l'opération ou à une mauvaise prise en compte des conditions environnementales ont rendu complexe le travail d'exploitation des mesures réalisées et ont amené à ce qu'un travail de fiabilisation des données

mesurées soit mené. A l'issue de ces travaux de fiabilisation il est rassurant de constater que les mesures réalisées sont, pour la plupart, cohérentes entre elles d'une part et qu'elles permettent d'autre part de décrire le comportement de l'ouvrage. Les mesures réalisées témoignent d'une multitude de comportements physiques le plus souvent localisés et donc difficiles à interpréter globalement à l'échelle de l'ouvrage. Le travail de fiabilisation a consisté à chercher à interpréter ces mesures locales en ayant recours aux mesures « continues » cette fois qui sont à même de capter des réponses de structures et aux réponses des modèles numériques. Cette démarche qui a été adoptée pour analyser les mesures réalisées sur le pont d'Osserain a permis d'atteindre une meilleure « vérité expérimentale » du pont en proposant notamment certains recalages sur des mesures jugées déficientes. C'est ce type d'approche combinée qui nous semble devoir être préconisée pour que le suivi d'ouvrages puisse gagner en pertinence.

CONTRIBUTIONS

- *Coordination* : G. Viossanges, S. Forcioli, A.-S. Colas
- *Pilotage* : D. Lunain (instrumentation), P. Taforel (modélisation)
- *Mesures* : Cerema (D. Lunain, J. Dumoulin), UBY (A. Chabert, A. Khadour (U.G.E), I. Lamarque), Geolithe (A. Guillemot), Ecole des Ponts (D. Garnier, J. Archez)
- *Fiabilisation des mesures* : SETEC (O. Moreno Regan), MiMeTICS (D. Guérin, P. Taforel), INSA Toulouse (P. Morenon), Ecole des Ponts (S. Leonard)