

Fiche bilan de l'appel à projets Ponts Connectés (2021-2023)

Nom du projet : AUDACE

LE CONSORTIUM

Partenaires : SISGEO, LEMTA et SNCF Réseau



Logos des entreprises :

Montant du projet : 530 561.45 € (subvention versée : 277 004.00 €)

Ouvrage(s) instrumenté(s) : Après une première expérimentation dite « [CRASH TEST](#) » portant sur la mesure du comportement d'un tablier de pont rail soumis à une série de heurts contrôlés, réalisée à **Vignacourt (80)** (*Fig. 1*), quatre ouvrages de type pont rail (PRA) de la SNCF ont été équipés : **Villeneuve-le-Roi (94)** (« VLR »), **St Georges sur Loire (49)** (« SGL »), **Trignac (44)** (« TRG ») & **Mulhouse (68)** (« MLH »).

LE PROJET

AUDACE (AUto-Diagnostic Après un Choc Endommageant) met au point une solution économiquement abordable composée de capteurs connectés et d'un algorithme intégrant de l'I.A. afin qu'elle soit adaptable à l'ensemble des ponts (ponts rail ou ponts route) potentiellement soumis à l'aléa « heurt » (heurt routier le plus souvent) pour en détecter l'occurrence, en évaluer les conséquences de façon automatisée et créer des alertes.

Le projet s'articule autour de 3 objectifs majeurs :

1. Développer des capteurs autonomes capables d'acquérir de façon fiable les données nécessaires et suffisantes.
2. Concevoir un algorithme automatique de détection et d'évaluation des chocs à partir des données collectées.
3. A terme, la solution doit pouvoir être industrialisée et diffusée à grande échelle.

LES AVANCEES TECHNIQUES

Les développements des capteurs autonomes ont porté sur trois types de capteurs. Deux de ces trois types ont fait l'objet d'un développement à partir d'une feuille blanche : la série dénommée « **VeRi** » et la série dénommée « **WSN** » (*Fig. 2 & 3*).

Dans le cadre du projet AUDACE, ces capteurs sont utilisés pour suivre l'évolution des déplacements des accotements/tabliers par rapport aux appuis. Cette donnée permet de qualifier un heurt « critique » puisqu'il aura eu pour conséquence de déplacer l'ouvrage de ses appuis.

Le troisième type de capteur utilisé constitue une évolution d'un système industrialisé de suivi de la signature vibratoire de structure dénommé Ad-Signum (www.ad-signum.fr). Ce système passif autonome composé de plusieurs capteurs (géophones & accéléromètre) et d'une capacité de traitement intégré (Edge Computing) est destiné au suivi global de l'état de la structure basé sur l'analyse fréquentielle opérationnelle en suivant l'évolution de la répartition des fréquences propres de la structure soumise au seul « bruit ambiant ». Le « capteur d'acquisition » des données de la solution Ad-Signum est dénommé PROBE-2 (*Fig. 4*).

L'indicateur de probabilité d'endommagement fourni par le système est une quantification du changement de la réponse vibratoire de la structure.

Dans le cadre du projet AUDACE, le capteur PROBE-2 a été adapté pour également pouvoir répondre à la problématique de détection et d'évaluation des heurts, y compris le déclenchement de la transmission de la photographie de zone sous l'ouvrage.

En résumé, le capteur PROBE-2 détermine *in-situ* les paramètres de tous les heurts potentiels, réduit l'information à quelques paramètres et ne transmet que des messages courts à très haute densité d'information. **Les caractéristiques des détections sont ensuite analysées *ex-situ* conjointement avec les photographies et les mesures de déplacement pour qualifier de façon certaine les heurts endommageant (voir plus bas) et déterminer les paramètres critiques qui peuvent ensuite être utilisés par le capteur, pour procéder à une discrimination *in-situ* des heurts.**

La première étape (transmission des paramètres des heurts potentiels, y compris les spectres) est totalement réalisée et implémentée. Les travaux de développement de la seconde étape (analyse *ex-situ*) ont commencé et ont fait l'objet **d'une publication** (EVACES 2023). Les perspectives sont très encourageantes : une première approche directe (non IA) basée sur l'analyse des spectres. L'analyse conjointe de ces deux paramètres sur l'ouvrage « VLR » pendant quelques mois a permis en effet d'isoler les heurts confirmés (photos, déplacement du tablier) de l'ensemble des événements détectés.

- ***Synthèse des résultats obtenus par le LEMTA sur les données récoltées***

Plusieurs modèles basés sur différents algorithmes d'apprentissage supervisé ont été entraînés sur les données d'une année provenant de deux ponts différents. Le modèle le plus performant qui a donné la meilleure précision (99,99%) dans la classification des signaux enregistrés par les capteurs a été retenu. Il utilise l'algorithme de la forêt aléatoire (Random Forest ou RF). Ce travail a fait l'objet d'une communication à une conférence internationale en 2023 et d'un article accepté pour publication dans une revue scientifique en 2024.

Des informations supplémentaires issues de l'analyse spectrale (DSP densité spectrale de puissance) ont été intégrées dans les données d'entraînement du modèle sur la période couverte par le capteur Ad-Signum du Pont Rail (PRA) VLR, avec le piège photo asservi. Sur les données d'entraînement, la précision de ce modèle était de 100% (19 chocs détectés sur 19 validés par les photos). Quand ce modèle a été utilisé pour classer les signaux enregistrés sur ce même PRA entre les 03/03/2023 et le 15/06/2023, il a classé 35 événements comme des chocs dont seulement 10 ont été signalés aux autorités. En examinant les données temporelles sur ce pont à la même période pour les 25 signaux restants, 21 chocs ont pu être identifiés comme pouvant correspondre à des heurts mais sans certitude absolue.

L'approche de l'apprentissage non supervisé a également été développée pour s'affranchir des difficultés liées à l'étiquetage des données notamment pour les chocs de faible intensité.

L'algorithme des k-moyennes (K-Means) a été utilisé pour classer les signaux enregistrés sur VLR avec le capteur Ad-Signum. Alors qu'au total, 29 heurts ont pu être validés par les photos et les signalements aux autorités, le modèle a détecté 41 anomalies parmi lesquelles 25 correspondent effectivement à des chocs validés. En analysant les données, il s'est avéré que pour les 4 autres chocs, la vitesse n'a pas dépassé le seuil de déclenchement du capteur.

Pour résumer, le modèle supervisé entraîné sur des données labélisées sur la base des observations pendant le « crash test » et les observations complémentaires effectuées sur VLR, a permis d'obtenir une précision de prédiction très satisfaisante de 99,99% sur des données de 1 an sur deux ponts. Ces résultats ont fait l'objet d'un article scientifique accepté dans le journal « Artificial Intelligence and Applications » en 2024. L'intégration des données spectrales fournies par le capteur Ad-Signum en supplément a légèrement amélioré la précision sur les données d'entraînement mais n'a pas été aussi performante sur les données de test sur la courte période étudiée. Le modèle non supervisé a réussi à détecter plus de 90% des chocs avérés sur la période de test de 6 mois mais a détecté d'autres anomalies qui ne sont pas validées par d'autres données.

A l'issue de ces travaux, **nous retenons donc le modèle utilisant l'algorithme de la forêt aléatoire (RF) entraîné sur les données issues d'environ une année de surveillance sur les ouvrages VLR et SGL et validé sur les autres données disponibles.**

LES PERSPECTIVES D'AVENIR

La détection des heurts est qualifiée. La caractérisation de ces derniers est qualifiée sur un ouvrage. Il convient maintenant de déployer le système sur d'autres types d'ouvrages et notamment plus légers car ils constituent un caractère plus risqué pour SNCF Réseau notamment en cas de déplacement de la voie supportée par l'ouvrage. Cette phase permettra d'ajuster les seuils de déclenchement d'une alerte avec pour objectif que ces seuils soient déterminés de façon automatique par auto-apprentissage.

Il conviendra également **de développer une plateforme utilisateur dédiée multi-paramètres** combinant les données issues des systèmes Ad-Signum à celles issues des capteurs de déplacement, avec mise à disposition d'un cliché si accessible. **Un système d'alerte devra être proposé à l'utilisateur pour recevoir des notifications une fois le système activé et opérationnel.**

LES BENEFICES POUR LA GESTION DU PATRIMOINE

La solution française innovante, Ad-Signum, semble d'ores et déjà satisfaire **les objectifs généraux** de l'Appel à Projets « Ponts connectés » (*Fig.5*), à savoir :

- **Un système peu onéreux permettant une large diffusion,**
- **Un système peu vulnérable aux intempéries, au vieillissement et économe en énergie,**
- **Un système qui contribue à la gestion des ouvrages selon les méthodes classiques, comme celles portées par l'ITSEO,**
- **Un système « certifiable » quant à ses performances,**
- **Une méthode de détection d'anomalies largement automatisée,**
- **Une instrumentation permettant le suivi long terme des ouvrages.**

Elle a été améliorée grâce au projet AUDACE pour la détection, la caractérisation automatique des heurts (et/ou événements anormaux) et la prise de photo asservie (*Fig. 6*). AUDACE améliorera la prise en charge des conséquences des heurts sur les ouvrages d'art.

S'agissant des collectivités, les conséquences d'un arrêt du trafic sur ou sous le pont sont significatives puisque les voies de communication sont économiquement des points névralgiques de notre société. La disponibilité des ponts à court terme, moyen terme et long terme sera donc améliorée si l'on détecte et quantifie les conséquences d'un heurt sur l'intégrité de la structure.

Bénéfice pour les industriels partenaires : progrès de l'instrumentation.

Bénéfice pour la sécurité des ouvrages : progrès dans la gestion du risque.

LES PHOTOGRAPHIES



Fig. 1 : « Crash Test » à Vignacourt (80)



Fig. 2 : capteur autonome VeRi



Fig. 3 : Capteur autonome WSN



Fig. 4 : capteur « Probe 2 » de l'Ad-Signum installé sur un PRA

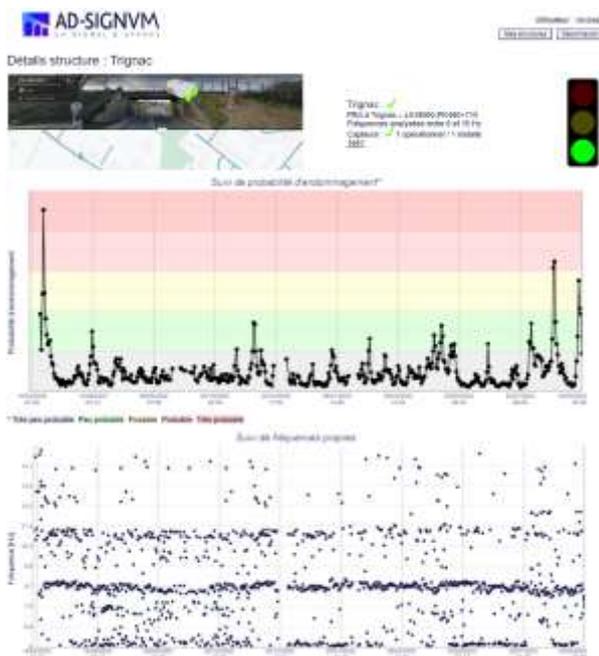


Fig. 5 : interface utilisateur de la solution Ad-Signum avec le suivi d'un indicateur dit de « probabilité d'endommagement » et de l'évolution de la répartition des fréquences propres



Fig. 6 : prise de photo asservie grâce à un piège photo connecté au PROBE 2