



SURVOUT

Surveillance dynamique et distribuée des voûtes
maçonnées



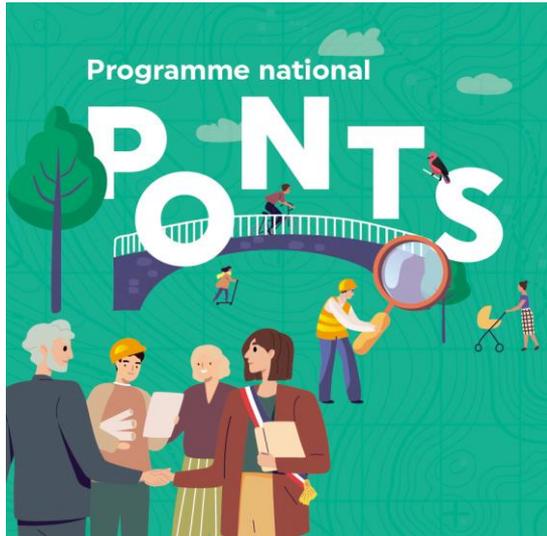
Journée SHM - France – 14/03/2023
PONTS CONNECTES 2021-2023



Appel à projet Ponts connectés

UN SOUTIEN À L'INNOVATION POUR LA SURVEILLANCE DES PONTS :

Objectif : offrir aux collectivités des moyens pratiques, performants et peu onéreux contribuant à une optimisation de la gestion de leur patrimoine



17 projets lauréats pour soutenir l'innovation en matière de surveillance des ponts



Partenaire	Rôle dans le projet	Compétences apportées au projet	Apports du projet au partenaire
QUADRIC	Développement, déploiement	R&D Instrumentation Surveillance acoustique	Solution de surveillance universelle à coût réduit
CD38	Prêt des ouvrages	Connaissance des ouvrages et de leurs pathologies	L'étude des ouvrages

Début du projet : Novembre 2021

Durée du projet : 2 ans



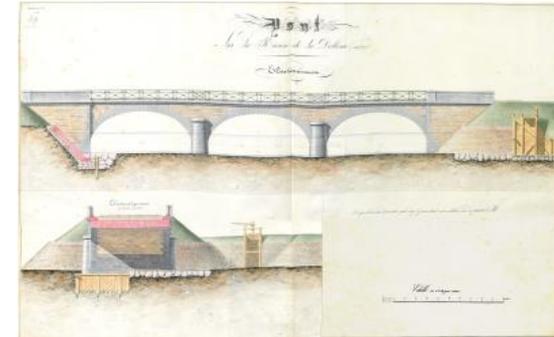
Sommaire

- Contexte et objectifs du projet
- Surveillance Continu, Dynamique, Autonome et Connecté
- Surveillance Exhaustive par CFOD
- Instrumentation des voûtes
- Résultats de suivi des ouvrages
- Perspectives

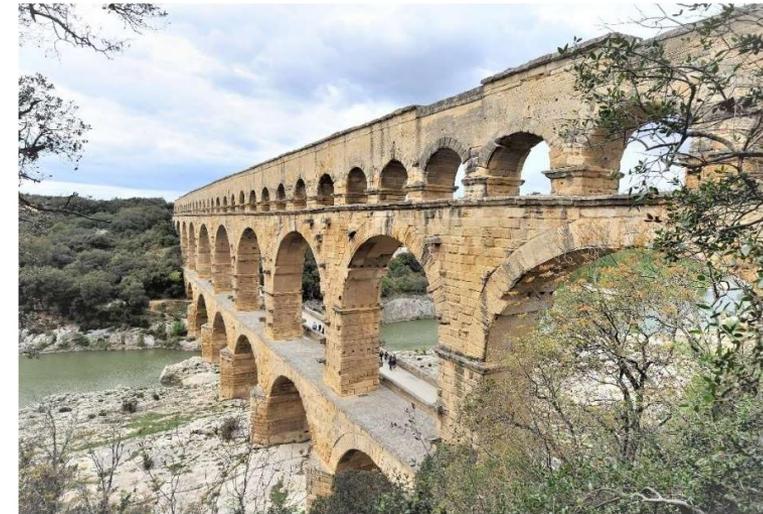
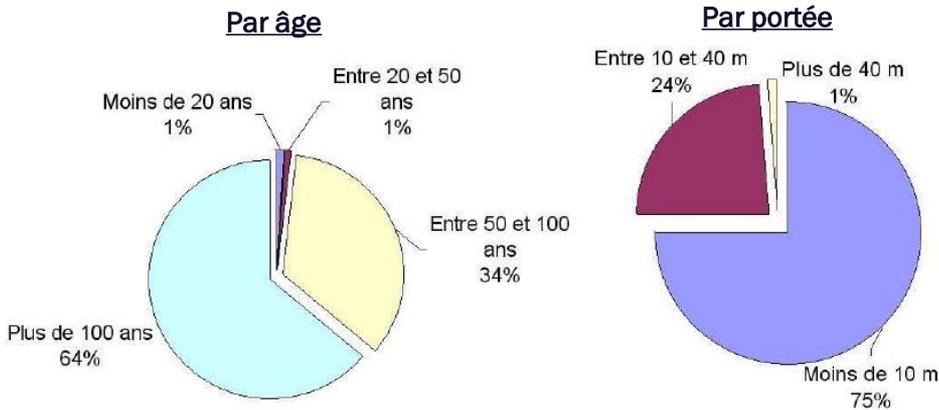


Pourquoi les ouvrages en maçonnerie ?

- Les ouvrages en maçonnerie constituent encore une part très importante du patrimoine du génie civil (20% des ponts et 80% des murs)
- En France, le patrimoine SNCF présente 44% d'ouvrages en maçonnerie



Répartition des ponts en maçonnerie du réseau ferroviaire européen



Pont aqueduc du Gard (30)
(crédit photo : C. Levillain)

- Une part non négligeable parmi les ouvrages structurellement dégradés



SHM : Comment avancer?

Comment avancer le monitoring des ouvrages?

- Rendre les systèmes SHM plus accessibles : en développant des systèmes **peu coûteux** qui peuvent être **facilement installés** et entretenus
- Développer des logiciels conviviaux : qui permettent de réaliser un prétraitement des données puis les analyser et les interpréter

Comment avancer notre connaissance des ouvrages en maçonnerie ?

- En réalisant plus d'expérimentation sur ouvrages réels:
 - Pour surveiller en **continu** la structure afin de détecter des changements de comportements.
 - Pour surveiller son comportement sous charge (**dynamique**)
- En réalisant des analyses croisées instrumentation/calcul pour l'étude des phénomènes naturels

Les ponts voûtés et leurs pathologies

La maçonnerie est l'assemblage de blocs, liaisonnés et calés à l'aide d'un mortier

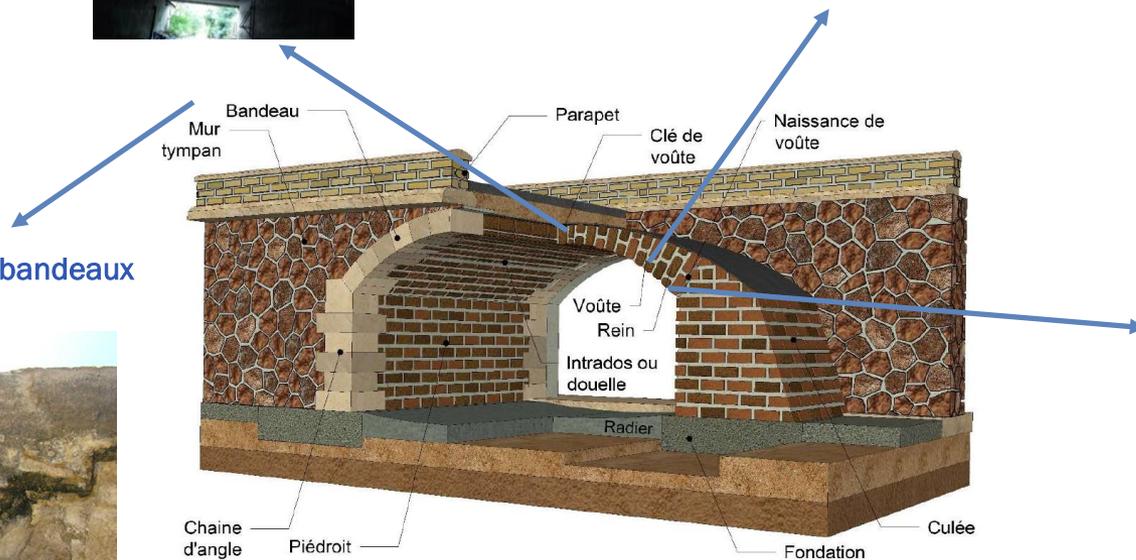
Fissures en clé de voûte



Décompression des joints



Écartement des bandeaux



Écartement des reins

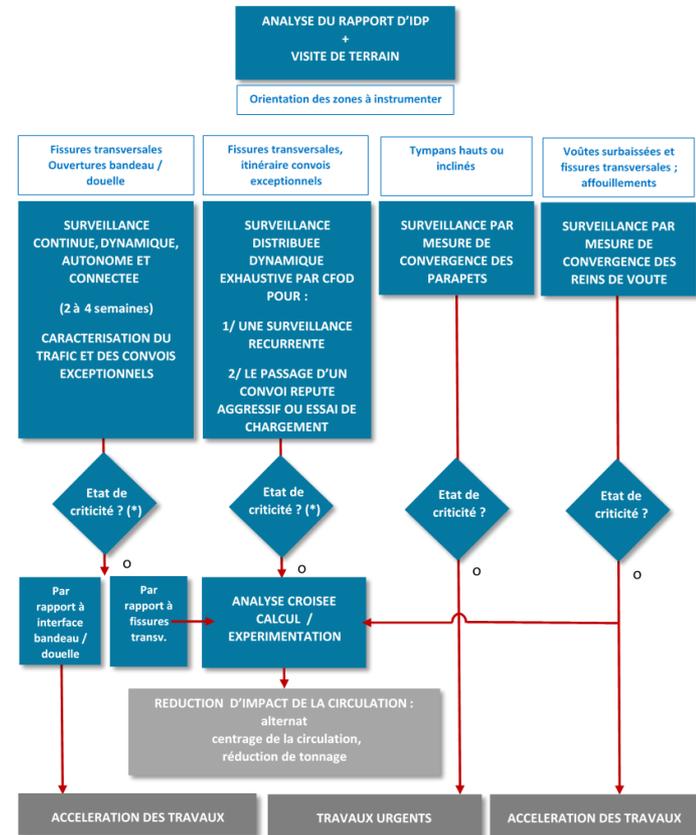
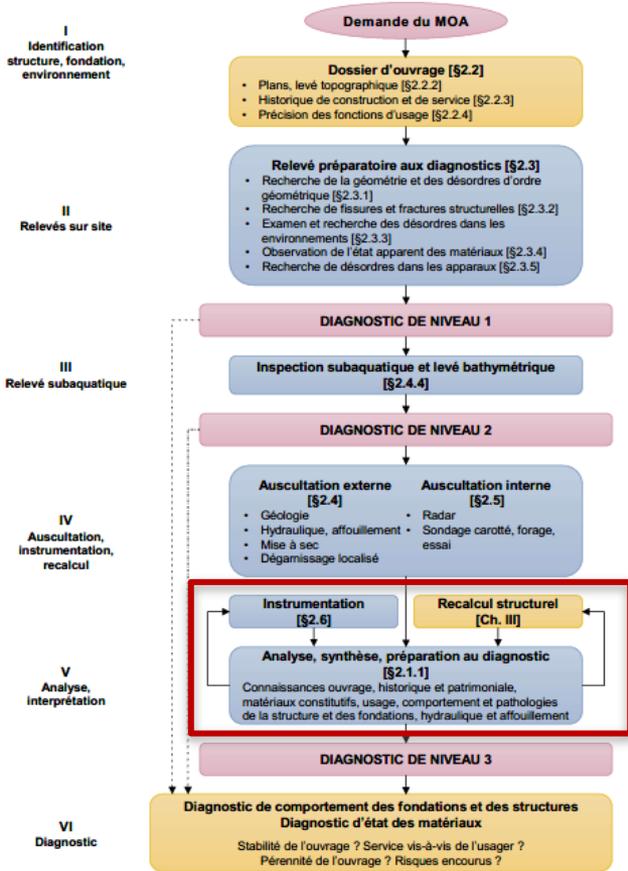
Figure 6 : Schéma de principe d'un pont en maçonnerie (crédit : O. Moreno Regan)



Diagnostic - logigramme décisionnel

Amélioration de notre analyse et interprétation du comportement des voûtes

Une instrumentation pour chaque type de pathologie



SURVEILLANCE DYNAMIQUE ET DISTRIBUEE DES VOÛTES MAÇONNÉES

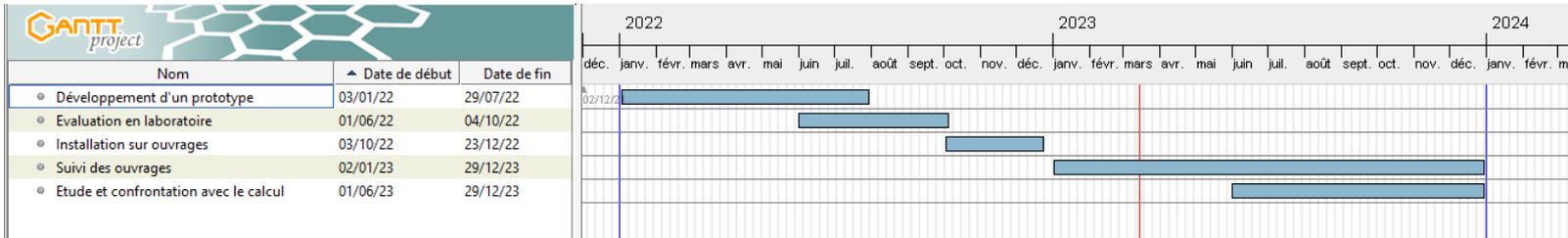


Figure 16 : Logigramme de la démarche de diagnostic

Des investigations complémentaires peuvent être nécessaires

Différentes phases du projet

Planning



Surveillance Continu, Dynamique, Autonome et Connecté

- Pose de capteurs pour le suivi des fissures et écartement de la douelle
- Période d'apprentissage pour jauger les effets du trafic
- Définition de seuils de surcharge
- Prise de cliché du convoi par caméra en cas de dépassement de seuils

Surveillance distribuée et Exhaustive

- Pose de capteurs CFOD pour suivre le comportement de TOUS les joints
- Mesures discontinues et ponctuelles

Modèle de calcul en flexion longitudinale

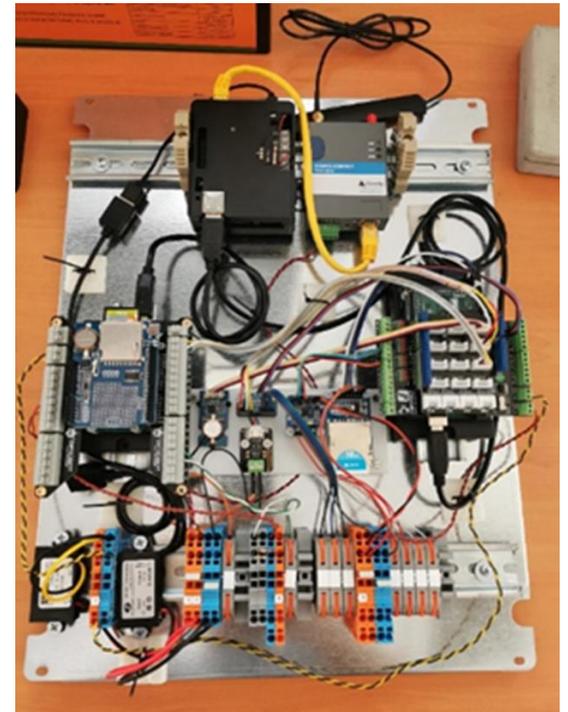
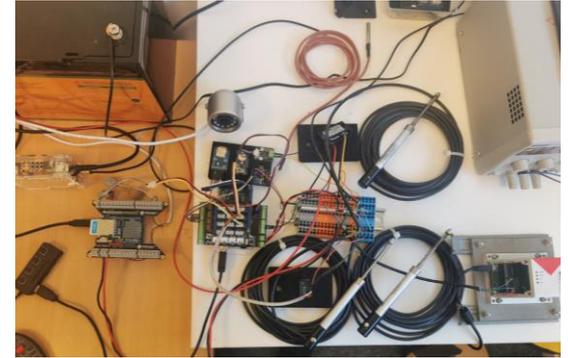
- Estimation de la contrainte admissible de compression de la maçonnerie
- modélisation prenant en compte le comportement non linéaire
- Définition de l'état de contrainte et ouverture des joints



Surveillance Continu, Dynamique, Autonome et Connecté

Développement du prototype

- Interroger différents types de capteurs (**fissuro, distancemètre, temp**)
- Atteindre des fréquences d'acquisition dynamique (**50 à 100Hz**)
- Assurer la prise d'image sur seuil (**instantanée**)
- Assurer une certaine précision et répétabilité des mesures (**proche des systèmes éprouvés**)
- Assurer une autonomie du système sur batterie (**~10W**)
- Assurer une connexion à distance au système (**connexion 4G**)
- Avec un coût faible de système (**~1000euros**)



Développement des logiciels

- paramétrage et configuration des capteurs,
- l'acquisition, le pré-traitement et l'enregistrement des données et clichs sur cartes SD

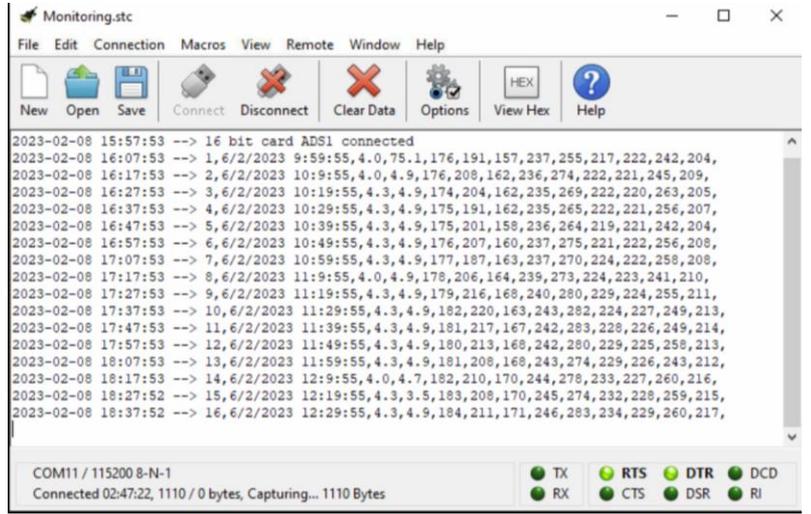
Le logiciel Arduino IDE – config du firmware

```

2022_12_15_bisgood_MEGA_MON.ino
1 //-----Include Librairies -----
2 #include <SPI.h>
3 #include <SD.h>
4 #include <RTClib.h> // horodatage
5 #include <Wire.h> // Pour la communication I2C horodatueur
6 #include <ADSI1X15.h> // Carte 16 bit
7 #include <AdaFruit_MAX31865.h> // Converter RTD (Pt100)
8
9 //-----Define variables-----
10
11 RTC_DS1307 RTC; // Horloge
12 ADS1115 ADS1(0x48); // carte 16 bit
13 //ADS1115 ADS2(0x49); // 2ème carte 16 bit
14 Adafruit_MAX31865 PT_RS = Adafruit_MAX31865(5, 6, 7, 8); // pt100 type RS - Use software SPI: CS, DI, DO, CLK
15
16 // Carte SD
17 const int chipSelect = 53; // CS pin - 53 (MEGA)/10 (UNO)
18 char filename[16]="000000.CSV"; //declare filename as a character string
19 File dataFile; //declare dataFile as File type
20
21 // Paramètres de cycles d'enregistrements
22 const unsigned long CycleDuration = 600000; // Cycles duration in milliseconds
23 const unsigned long eventInterval = 20; // measurement time period in ms
24 const unsigned long sampleCount = CycleDuration / eventInterval; // Number of samples per cycle
25 const unsigned long SnapTime = 25000 / eventInterval; // 25s stop time after snap
26
  
```

Software

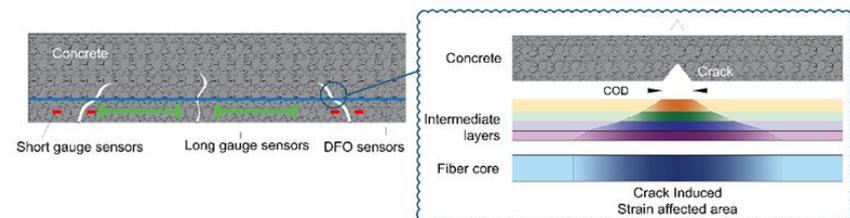
- Le démarrage automatique de l'acquisition
- L'enregistrement des données sur PC



Surveillance distribuée et Exhaustive

Choix du système CFOD

- Capteurs de température et de déformations
- Capteurs sensibles à l'apparition et/ou évolution des microfissures
- Capteurs robustes pour installation sur site
- Des résolutions spatiales élevées
- Fréquences d'acquisition dynamiques



Instrumentation des ouvrages

Choix des ouvrages

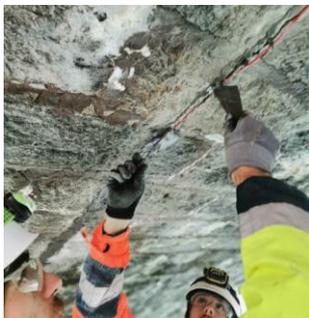
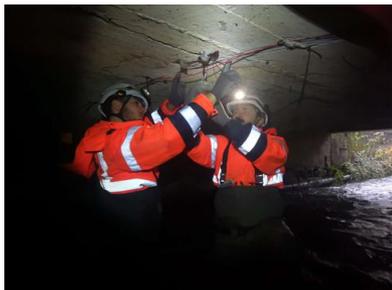
Ouvrage	Type	Photo	Pathologie	Condition d'exploitation
Le Touvet	Voûte 12m		Fissure trans' en clé Fissures long' en douelle	Forte circulation + transport exceptionnel
Brignoud	Voûte 4 m		Fissure trans' en clé	Forte circulation + transport exceptionnel
St Christophe en Oisans	2 voûtes 20 m		Fissures sur tympans Fissures trans' sur reins	Conditions extrêmes en montagne (faible ensoleillement, très basse température, connexion internet limitée)



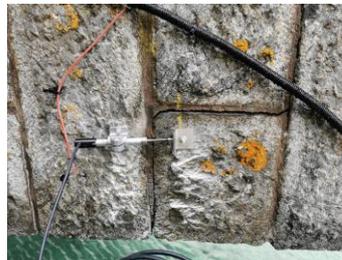
Instrumentation des ouvrages

Mise en place de l'instrumentation

Installation des capteurs CFOD



Installation des capteurs électriques et de la caméra



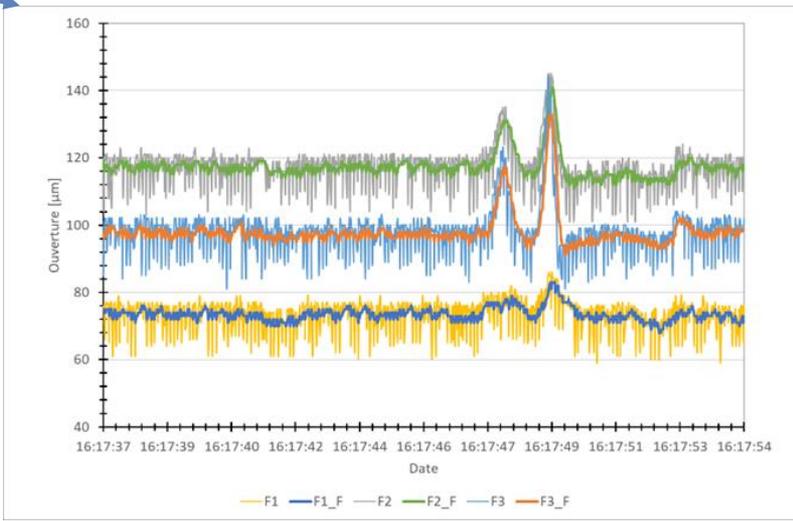
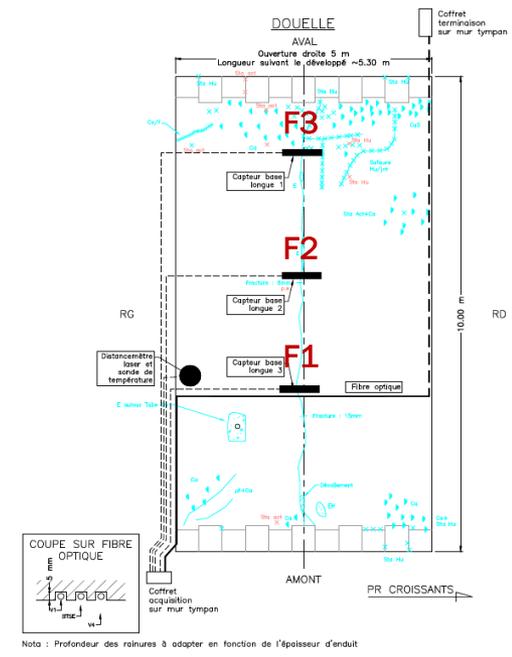
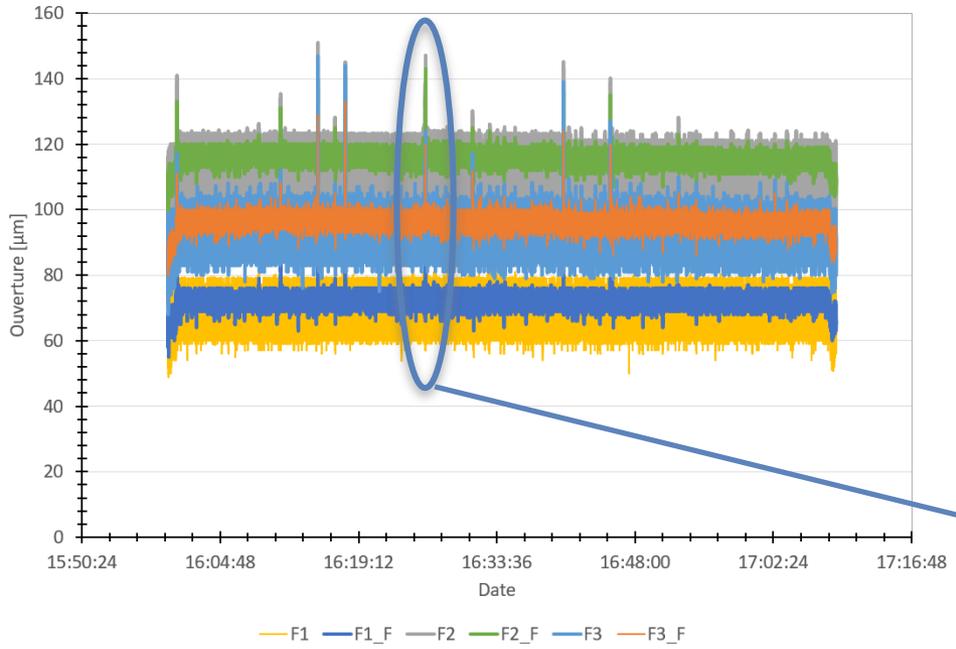
Installation des batteries et panneaux solaires



Résultats : Voûte de Brignoud

Mesures continues, statiques et dynamiques

SURVEILLANCE dynamique et distribuée des VOÛTES maçonnées



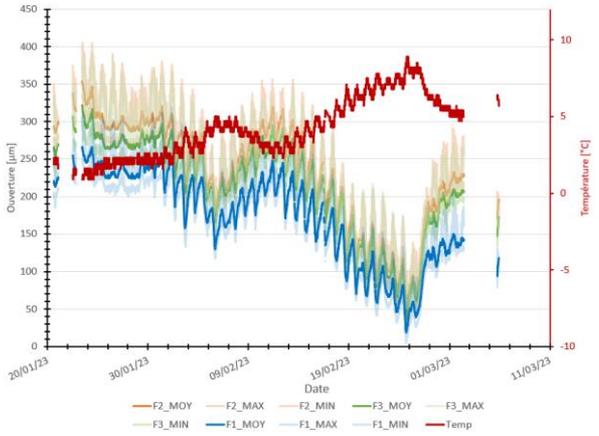
- Introduction d'un filtre exponentiel
- Stabilité des mesures à une fréquence de 50Hz
- Bonne réponse dynamique sous passage de trafic



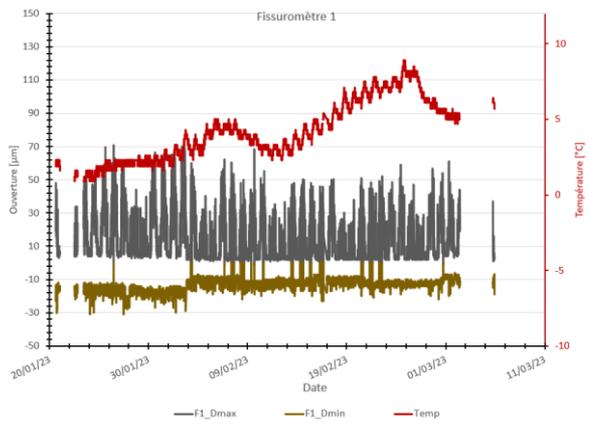
Résultats : Voûte de Brignoud

Mesures continues, statiques et dynamiques

Variations sous effets thermiques



Variations sous effets du trafic



PL 4 essieux direction Villard Bonnot



2 PL simultanés

- Corrélation entre l'ouverture de fissures et les variations thermiques
- Battements sous passage de poids lourds
- Prise d'image instantanée sous seuil de variation d'ouvertures

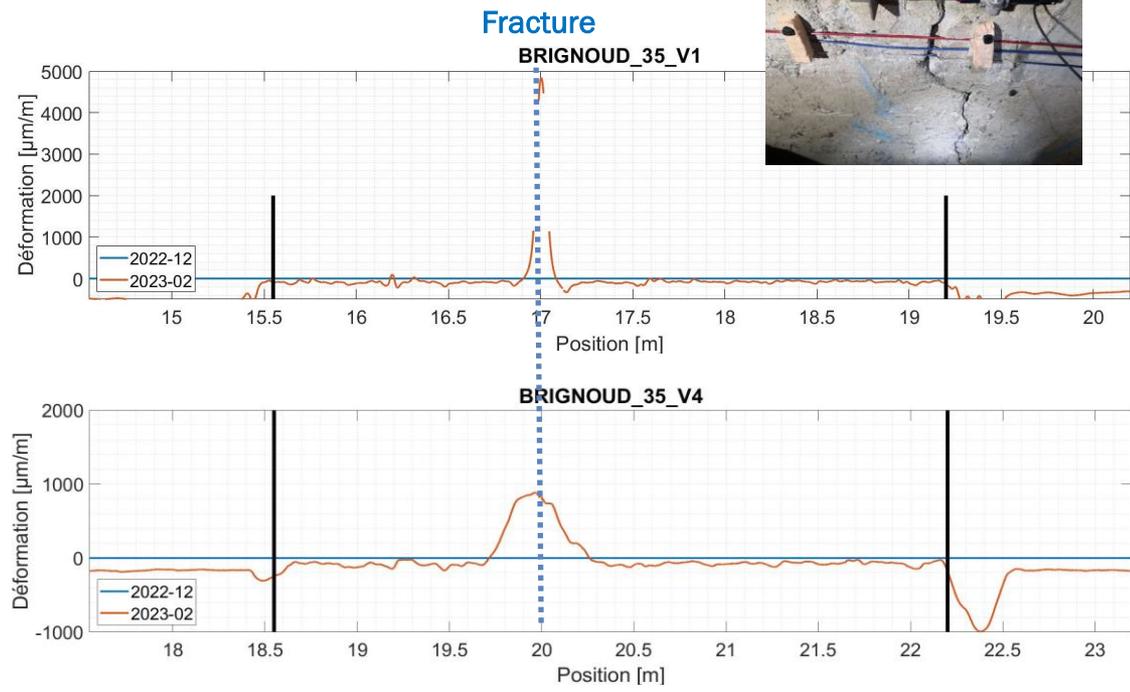
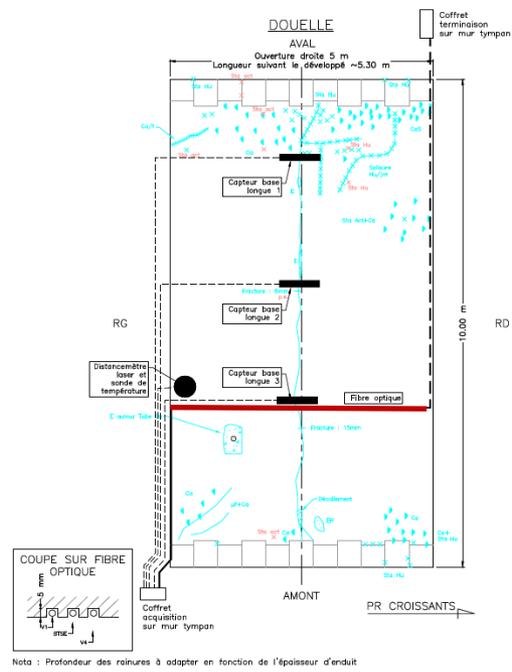
SURVEILLANCE DYNAMIQUE ET DISTRIBUÉE DES VOÛTES MAÇONNÉES



Résultats : Voûte de Brignoud

Mesures distribuées et exhaustives - Relevés périodiques

SURVEILLANCE dynamique et distribuée des VOÛTES maçonnées

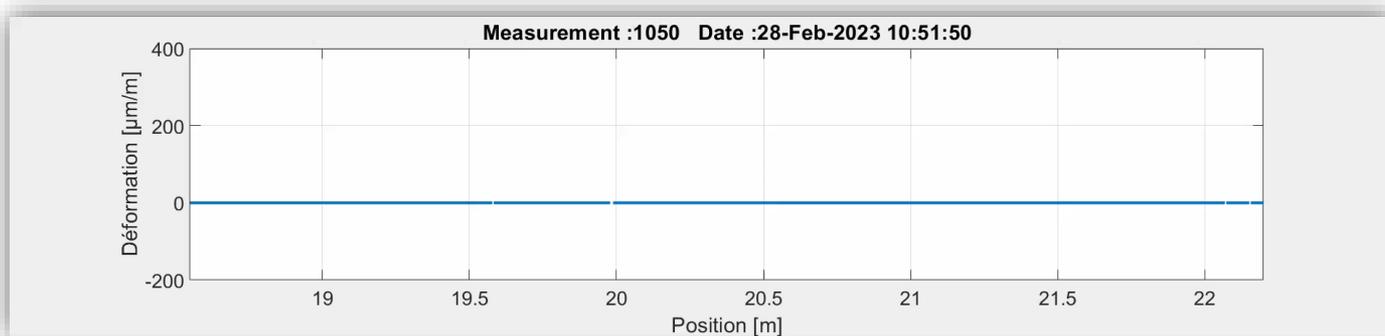
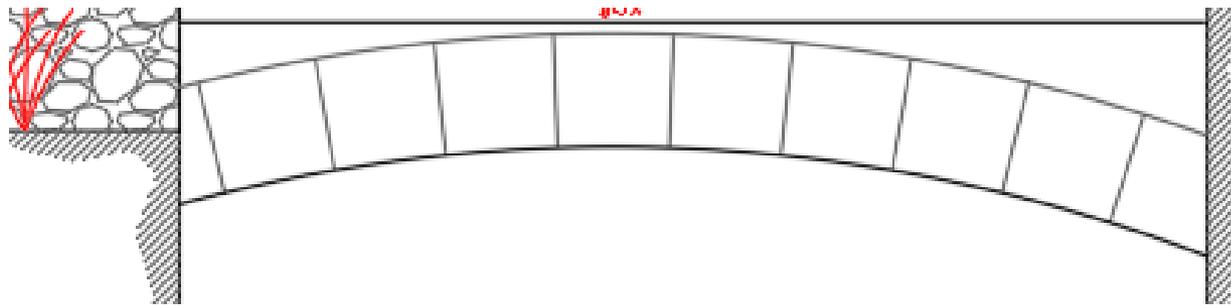


- Variation d'ouverture de la fracture cohérent avec les mesures des fissuromètres
- Absence d'autres fissures micrométriques
- Etat de compréhension stable de la voûte - absence de déformations au niveau des joints



Résultats : Voûte de Brignoud

Mesures distribuées et exhaustives sous trafic

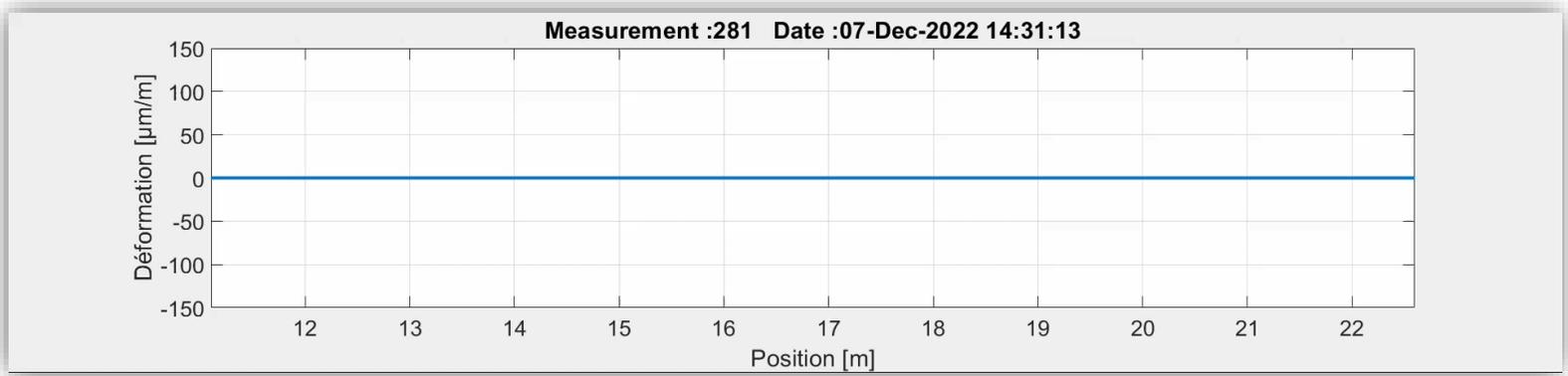
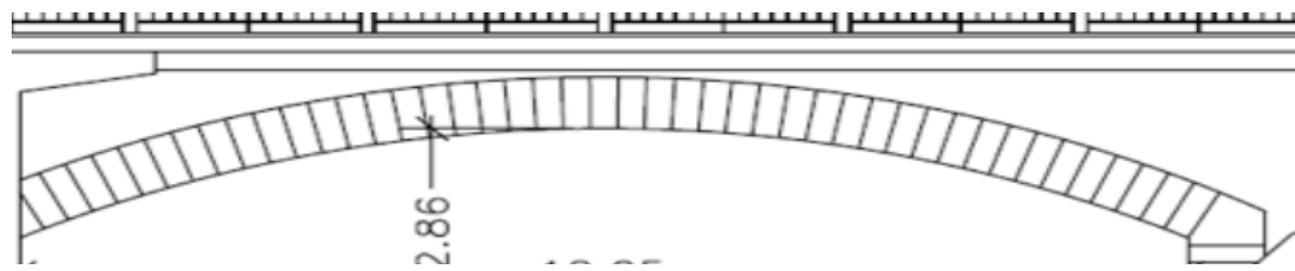


- Retour à zéro de l'ouverture des fissures de l'état des joints après passage des poids lourds
- Absence d'une décompression totale des joints



Résultats : Voûte de Touvet

Mesures distribuées et exhaustives sous trafic



- Retour à zéro de l'ouverture des fissures de l'état des joints après passage des poids lourds
- Absence d'une décompression totale des joints



Perspectives

Conclusions :

- Le prototype montre des résultats satisfaisants en termes de précisions, fiabilité et autonomie
- Un prix du système 5 à 8 fois moins cher que les systèmes éprouvés

Reste à faire :

- Réalisation d'une analyse croisée instrumentation/modèle de calcul
- Réalisation des essais de chargements
- Evaluation de la pérennité du système

Merci pour votre attention

Le projet SURVOUT a reçu une aide dans le cadre de l'appel à projets Ponts Connectés financé par l'État et porté par le Cerema qui vise à améliorer la gestion des ponts par l'emploi des techniques les plus récentes en matière d'instrumentation, de télécommunication, et de traitements des données. Les auteurs remercient le Cerema pour la bonne organisation de cet appel à projet et pour son implication scientifique dans le suivi des dossiers.

