



Rapport intermédiaire du 23 janvier 2025

Smart Penstock

Smart real time monitoring system for aerial penstocks



Source : HYDRO Exploitation



Prestataire de subvention :

Office fédéral de l'énergie OFEN
Section recherche énergétique et cleantech
CH-3003 Berne
www.recherche-energetique.ch

Bénéficiaires de la subvention :

HES-SO Valais Wallis
CH-1950 SION
www.hevs.ch

HYDRO Exploitation SA
CH-1950 SION
www.hydro.ch

ALPIQ SA
CH-1903 LAUSANNE
www.alpiq.com

FMV SA
CH-1950 SION
<https://fmv.ch/>

Auteur(s) :

Samuel Rey-Mermet, HES-SO Valais-Wallis, samuel.rey-mermet@hevs.ch
Louis Mayencourt, HYDRO Exploitation SA, louis.mayencourt@hydro.ch
Laurent Rapillard, HES-SO Valais-Wallis, laurent.rapillard@hevs.ch

Suivi du projet à l'OFEN :

Karin Söderström, karin.soederstroem@bfe.admin.ch
Klaus Jorde, klaus.jorde@kjconsult.net

Numéro du contrat de l'OFEN : SI/502742-01

Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions du présent rapport.



Résumé

Généralement le suivi géodésique des conduites forcées est réalisé périodiquement par exemple à une fréquence annuelle. Pourtant les conduites sont soumises à des variations d'exploitation journalières et potentiellement à des aléas environnementaux pouvant entraîner des conséquences immédiates (glissement de terrain) ou réversibles (gel-dégel du sol) sur leur structure qui ne sont donc pas détectées. Ce projet vise à implémenter un système de mesure en temps réel MTR complétant les données d'exploitation et les mesures géodésiques périodiques et de la coupler à un jumeau mécanique JM de la conduite forcée. Le terme « mécanique » est utilisé pour se différencier des approches de Machine Learning uniquement fondées sur une analyse de données : Physics Based versus Data Driven Model. Le JM consiste en un modèle numérique simple basé sur un modèle analytique de poutres sur appuis, encastrées aux points fixes (massifs), avec des frottements dans les joints d'expansions et au droit des appuis. Celui-ci sera utilisé pour reproduire en temps réel le comportement mécanique de la conduite en fonction des mesures en temps réelles et des conditions d'exploitation acquises via le SCADA. Ce système permettra de détecter instantanément les mouvements subis par les conduites forcées, de réduire l'incertitude quant à leurs causes et d'anticiper les interventions. Ce qui aura un impact positif sur la sécurité et la disponibilité de la production hydroélectrique.

Zusammenfassung

Die geodätische Überwachung von Druckleitungen wird in der Regel periodisch, z. B. jährlich, durchgeführt. Die Leitungen sind jedoch täglichen Betriebsschwankungen und potenziellen Umwelteinflüssen ausgesetzt, die unmittelbare (Erdrutsch) oder reversible (Frost-Tau-Wechsel) Auswirkungen auf ihre Struktur haben können und daher nicht erfasst werden. Dieses Projekt zielt darauf ab, ein Echtzeit-Messsystem MTR zu implementieren, das die Betriebsdaten und die periodischen geodätischen Messungen ergänzt, und es mit einem mechanischen Zwilling JM der Druckleitung zu koppeln. Der Begriff „mechanisch“ wird verwendet, um sich von Machine-Learning-Ansätzen zu unterscheiden, die ausschließlich auf einer Datenanalyse basieren: Physics Based versus Data Driven Model. Das JM besteht aus einem einfachen numerischen Modell, das auf einem analytischen Modell von Balken auf Auflagern beruht, die an festen Punkten (Massivbauten) eingespannt sind, mit Reibung in den Dehnungsfugen und an den Auflagern. Dieses Modell wird verwendet, um die mechanische Tragfähigkeit der Leitung in Echtzeit zu reproduzieren, basierend auf Echtzeitmessungen und Betriebsbedingungen, die über das SCADA-System erfasst werden. Dieses System wird es ermöglichen, Bewegungen in den Druckleitungen sofort zu erkennen, die Unsicherheit über die Ursachen zu verringern und Eingriffe zu antizipieren. Dies wird sich positiv auf die Sicherheit und Verfügbarkeit der Wasserkraftproduktion auswirken.



Summary

Generally, geodetic monitoring of penstocks is carried out periodically, for example on an annual basis. However, pipelines are subject to daily operating variations and potentially to environmental hazards that can have immediate (landslides) or reversible (ground freeze-thaw) consequences on their structure, which therefore go undetected. The aim of this project is to implement a real-time MTR measurement system, supplementing operating data and periodic geodetic measurements, and to couple it to a JM mechanical twin of the penstock. The term “mechanical” is used to differentiate it from Machine Learning approaches based solely on data analysis: Physics Based ver-sus Data Driven Model. The JM consists of a simple numerical model based on an analytic model of beams on supports, embedded at fixed points (massifs), with friction in the expansion joints and at the supports. This will be used to reproduce the mechanical behaviour of the pipe in real time, based on real-time measurements and operating conditions acquired via SCADA. This system will enable instant detection of movements in penstocks, reduce uncertainty as to their causes, and anticipate interventions. This will have a positive impact on the safety and availability of hydroelectric generation.



Table des matières

Résumé.....	3
Zusammenfassung.....	3
Summary	4
Table des matières	5
Liste des abréviations.....	7
1 Introduction.....	8
1.1. Contexte et motivation.....	8
1.2. Objectifs du projet.....	9
2 Activités, méthodes, résultats et discussions	10
3 Conclusions et perspectives	29
4 Coopération nationale et internationale.....	30
5 Publications et autres communications	30
6 Bibliographie.....	30
7 Annexe.....	30





Liste des abréviations

API	Application Programing Interface
CF	Conduite Forcée
FTP	File Transfer Protocol
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IoT	Internet of Things
JN	Jumeau Numérique
LoRa	Long Range
MQTT	MQ Telemetry Transport
MTR	Mesures en Temps Réel
OFEN	Office fédéral de l'énergie
REST	REpresentational State Transfer
SCADA	Supervision Control and Data Acquisition



1 Introduction

1.1. Contexte et motivation

Les conduites forcées aériennes permettent de transférer l'eau des barrages jusqu'aux centrales hydroélectriques où elle est turbinée pour produire de l'énergie. Les conduites sont indispensables à la production électrique car il n'existe généralement pas de redondance. En plus de la production, un dysfonctionnement ou une défaillance de ces ouvrages présente un risque pour la sécurité des personnes et des biens dans la zone considérée. Les propriétaires et exploitants de centrales hydroélectriques veillent à ce que ce type d'événements ne puisse pas avoir lieu et arrêtent la production afin de s'assurer du bon état et du bon fonctionnement de ces installations avant de les remettre en service fig.1. Même si ces interruptions de production restent très rares, elles ne sont pas planifiées et peuvent s'avérer très coûteuses. Elles pourraient aussi causer un blackout si le marché électrique est très tendu comme c'est dorénavant le cas à la fin de l'hiver.

Une fois l'installation mise hors service, la cause du dysfonctionnement doit être détectée rapidement, sinon l'indisponibilité peut se prolonger pendant plusieurs jours ou semaines, par exemple si une vidange et une inspection intérieure sont réalisées. Après qu'une analyse ait permis de déterminer les causes et le mode de défaillance redouté, les mesures nécessaires à la remise en service sont mises en place sur la base d'une évaluation des risques.

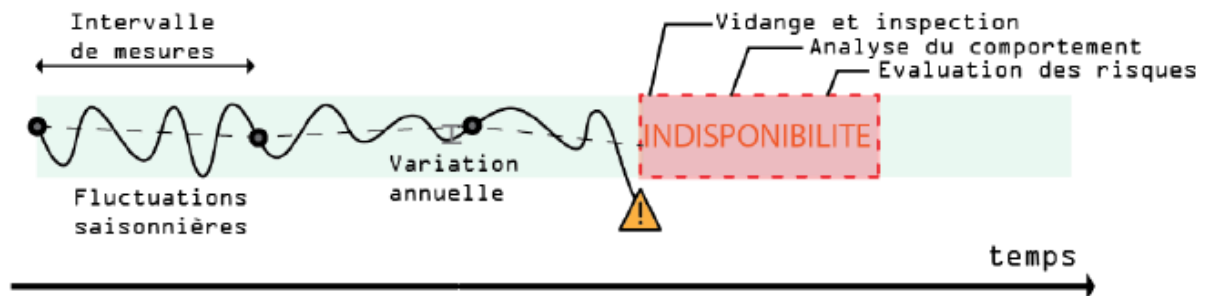


Figure 1: Représentation temporelle de l'exploitation d'une conduite forcée

Exposition aux aléas naturels

Les conduites forcées sont soumises aux mouvements de masses tels que les glissements de terrains ou les avalanches. La fréquence et l'amplitude de ces événements vont augmenter avec le réchauffement climatique. Lorsqu'un événement imprévu touche une conduite forcée, son aptitude au service doit être réévaluée. Il faut alors disposer de données permettant de définir précisément son état juste avant et juste après l'incident.

Actuellement les conduites sont inspectées ponctuellement à l'aide de mesures géodésiques. Cela permet de contrôler que ces changements lents et non-réversibles ne présentent pas de risque immédiat pour la conduite. Les changements brusques ne sont pas pris en compte, de même que les variations cycliques journalières ou saisonnières. Dans la plupart des cas, les mesures ponctuelles ne permettent pas de connaître l'historique complet des sollicitations impactant la conduite. Ce manque d'information complique l'analyse du comportement de la conduite et l'évaluation des risques liés à son exploitation.

Complexité du système

Les conduites forcées sont des systèmes complexes, comprenant divers composants et donc potentiellement soumises à différents modes de défaillances : déboîtement ou tassement d'une expansion, basculement ou effacement d'une sellette, flexion excessive dans la tôle causée par un désalignement d'un massif...

Un système de Mesures en Temps Réel MTR sera intégré à la surveillance de la conduite. Le système de MTR permettra de suivre en temps réel la position de plusieurs points sur la conduite choisis sur



différents composants tel que les sellettes, les joints d'expansions, les massifs et certains points du terrain.

La mécanique de l'ouvrage doit être prise en compte pour déterminer le mode de défaillance le plus probable en fonction des données mesurées. Un jumeau numérique JN sera développé pour simuler en temps réel le comportement de la conduite forcée en fonction des conditions d'exploitation, de mesures déjà existantes et des MTR. Il servira à traiter les MTR de manière à identifier les modes de défaillances et à analyser en temps réel les risques liés à chacun d'eux. Grâce à ces informations, le jumeau numérique pourra aussi réévaluer le facteur de sécurité instantanément et servir d'aide à la décision quant à l'exploitation future.

Avantages de la solution proposée

Le système MTR permettra donc de s'assurer rapidement que l'ouvrage n'a pas subi de déplacement ou de dégâts pouvant nécessiter un arrêt de production. De plus, comme les mesures géodésiques sont ponctuelles, aucune corrélation n'est faite en temps réel avec les conditions d'exploitation et les mesures réalisées par le SCADA.

Ce projet vise à intégrer de nouveaux outils de monitoring au suivi des conduites (fig.2). Ils permettront de détecter les changements brusques et de les comprendre en les analysant en temps réel à l'aide d'un jumeau numérique reproduisant le comportement mécanique de la conduite. Cette analyse permettra de différencier les mouvements « normaux », dus à l'exploitation, et les événements anormaux causés par l'environnement de la conduite. Cela permettra aussi de les quantifier et d'évaluer leurs impacts sur la durée de vie résiduelle de la conduite forcée et finalement d'adapter le plan de maintenance pour limiter les risques. Il faut noter que la fatigue n'est pas prise en compte dans ce projet. Cela nécessiterait de tenir compte de toutes les fluctuations de pression causées par les différentes manœuvres c-à-d. des mesures à hautes fréquences nécessitant des capteurs haut de gamme et une adaptation du SCADA.

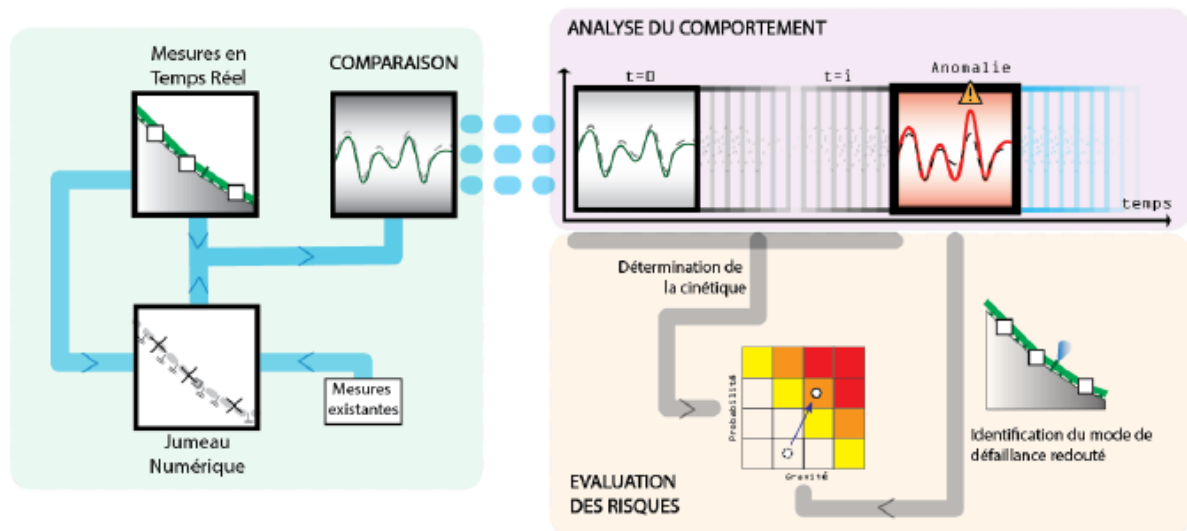


Figure 2 : Résumé du projet Smart Penstock

1.2. Objectifs du projet

Les objectifs du projet Smart Penstock sont les suivants :



- Compléter le système de mesures existants pour la surveillance de conduites forcée en y ajoutant un système de Mesures en Temps Réel (MTR) de manière à pouvoir surveiller le comportement de la conduite en temps réel. Les MTR seront adaptés aux deux démonstrateurs choisis.
- Créer un jumeau numérique de la conduite qui permette de corréler les données d'exploitations transmises par le SCADA et les MTR à l'aide d'un modèle physique de la conduite forcée.
- Le JN n'est pas basé sur un modèle par éléments finis mais consiste en un modèle numérique simple basé sur un modèle mécanique de poutres sur appuis, encastrées aux points fixes (massifs), avec des frottements dans les joints d'expansions et au droit des appuis. Le JM sera utilisé pour reproduire en temps réel le comportement mécanique de la conduite en fonction des mesures en temps réelles et des conditions d'exploitation acquises via le SCADA. Le terme « mécanique » est utilisé pour se différencier des approches de Machine Learning uniquement fondées sur une analyse de données : Physics Based versus Data Driven Model.
- Optimiser la stratégie de maintenance et l'exploitation en tenant compte des deux points précédents.

Grâce aux deux démonstrateurs sur la conduite forcée d'Ernen et celle de Condémines, le projet doit aussi démontrer que les MTR et JN peuvent être adaptés et déployés sur différents types de conduites forcées.

La vérification de ces objectifs sera réalisée de la manière suivante :

1. Cohérence entre les MTR et les autres mesures réalisées sur les deux démonstrateurs.
 - a. Comparaison entre un système de mesures géodésique complet et un système de mesures SMART basée sur des capteurs IoT et ayant un coût minimal (> 50 kCHF)
 - b. Après une année d'utilisation sur la conduite de Condémines et sur celle d'Ernen
2. Validation du fonctionnement du jumeau numérique
 - a. Traitement cohérent et continu des données SCADA et MTR
 - b. Comportement du jumeau cohérent avec le comportement réel
3. Comparaison entre les stratégies de maintenance avec et sans MTR et jumeau numérique permettant de :
 - a. Tenir compte des tous les mouvements journaliers et de les agréger à l'aide de lois de vieillissements adaptées.
 - b. Définir des seuils d'alarme dans le jumeau numérique

2 Activités, méthodes, résultats et discussions

WP2 Système de mesures en temps réel

Cette section décrit l'environnement du système Smart-Penstock et les systèmes avec lesquels il interagit fig. 3.

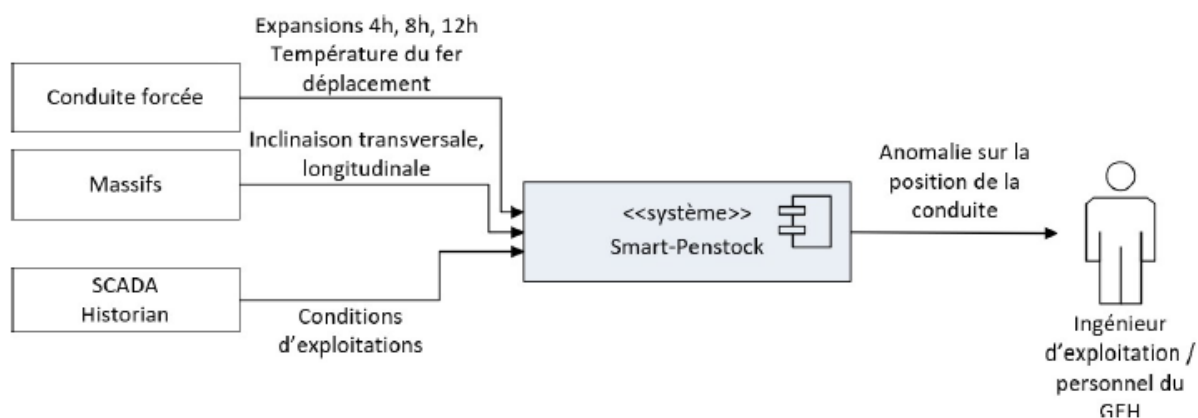


Figure 3 : Diagramme du contexte projet

Système voisin	Description
Conduite forcée	Représente le principal élément sous surveillance. Le déplacement mécanique est surveillé par une mesure en continue de l'expansions des joints par des capteurs de distance positionnés à 4h, 8h et 12h. Le glissement de la conduite par rapport aux sellettes sera également mesuré. La température de l'acier de la conduite (effet ombre-soleil) est également mesurée.
Massifs / Sellettes	Représente le deuxième élément sous surveillance. Le déplacement mécanique est surveillé par une mesure en continue de l'inclinaison transversale et longitudinale du massif. Un test sera mené pour mesurer le déplacement relatif d'un massif par rapport à l'autre ou d'une sellette par rapport à l'autre.
SCADA	Contient les points de mesures utilisés pour l'exploitation standard de la conduite.
Ingénieur d'exploitation / personnel du GEH	Personnel exploitant l'aménagement hydroélectrique. Ils se réfèrent aux informations présentées sur le Scada. C'est le personnel de première intervention soumis à un service de piquet.

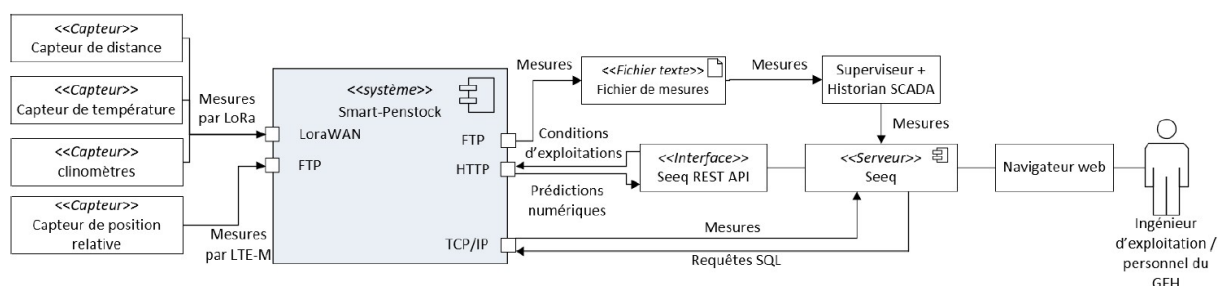


Figure 4 : Diagramme du contexte technique



Système voisin	Description
Capteur de distance / Extensomètre	Fournit les mesures d'expansions de la conduite forcée par transmission radio à l'aide de la technologie LoRa à un serveur LoRaWAN.
Inclinomètres	Fournit les mesures d'inclinaisons des massifs par transmission radio à l'aide de la technologie LoRa à un serveur LoRaWAN.
Capteur de température	Fournit la température de l'acier de la conduite par transmission radio à l'aide de la technologie LoRa à un serveur LoRaWAN.
Capteur de position relative	Fournit le déplacement relatif des différentes sections de la conduite à un serveur FTP. La transmission est effectuée par transmission radio à l'aide de la technologie LTE-M ou Ethernet en fonction du site.
Fichier de mesures	Fichier texte .csv contenant des mesures générées par le système Smart-Penstock.
Superviseur + Historian SCADA	Consomme les fichiers de mesures générés par le système Smart-Penstock afin d'ajouter les valeurs dans la base de données « Historian ».
Seeq REST API	Permet un logiciel tiers d'accéder aux fonctionnalités de Seeq.
Seeq	Accède les données de l'Historian SCADA et fournit une interface web pour la visualisation de time-series. Un connecteur SQL permet l'accès aux données des capteurs LoRa.

Solution

Cette section contient un bref aperçu et une explication des idées et stratégies fondamentales qui ont façonné la solution.

Transport des données des capteurs

La technologie sans-fil LoRa est particulièrement adaptée pour ce projet : Elle permet une installation aisée des instruments sur la conduite sans tirer de câble de communication ou d'alimentation. Chaque capteur est autonome, ce qui permet d'adapter l'instrumentation déployée à la conduite.

La disposition d'une conduite permet également d'être couverte par une ou deux gateway LoRa, située à la vanne de tête et/ou à la centrale selon la portion de conduite à monitorer.

Détection des déplacements relatifs

Afin de compléter l'instrumentation placée directement sur la conduite (extensomètre et inclinomètre), il est également intéressant de mesurer les déplacements relatifs de ces différentes sellettes et massifs. Pour cela, la compagnie AIMSight possède une solution de monitoring basée sur la vision. L'installation d'une ou plusieurs AIMSight CAM Station sur le bâtiment de la vanne de tête et/ou à la centrale peut fournir une couverture de la portion à monitorer. Ces emplacements garantissent une disponibilité en énergie et réseau. Le déplacement relatif de la majorité des sections visibles de la conduite peut ainsi être obtenu. Plusieurs caméras pourraient être nécessaires ou certaines portions ne pourront pas être monitorées facilement. L'installation de ce type d'instrumentation dépend fortement du profil en long de la conduite et des emplacements possibles de la caméra.

Choix des capteurs LoRaWAN

Pour les mesures d'extensions et de températures, des capteurs du fabricant DECENTLAB sont utilisés. HY-DRO a déjà une bonne expérience avec ce fournisseur. Leurs capteurs sont robustes, faciles à installer et fournis avec un décodeur de trame pour le serveur LoRa.

Le modèle DL-LPW-001 standard avec une course de 100 [mm] est utilisé comme extensomètre. Le modèle DL-SHT35-001 est utilisé pour la mesure de température de l'air.



Pour les inclinomètres, le capteur LWHD-WM400 du fabricant BWSENSING fournit un capteur 3 axes, avec une précision suffisante pour notre application (fig.5).



Figure 5 : De gauche à droite : Mesure de température DL-SHT35-001, extensomètres DL-LPW-001 et inclinomètre LWHD-WM400

Accès aux données des capteurs dans Seeq

Les données des capteurs LoRa sont stockées dans la base de données du serveur IoT ChirpStack. Un connecteur SQL Seeq est utilisé afin de rendre ces signaux disponibles dans Seeq (fig. 6).

Les signaux sont construits à partir de requêtes composées de variables, dans le but de garder une structure évolutive. Deux tables dédiées existent dans la base de données afin de fournir les informations spécifiques aux capteurs.

- `Sensor_seeq_metadata`, qui fournit le nom du signal seeq ainsi que la description du signal en fonction du `device_name` (ID unique représentant un capteur disponible dans le serveur LoRa Chirpstack).
- `Sensor_chanel_seeq_metadata`, qui fournit le nom ainsi que l'unité de chaque canal de mesure d'un capteur, en fonction du `device_profile` (ID représentant un type de capteur dans le serveur LoRa Chirpstack)



Figure 6 : Visualisation des données de capteurs dans Seeq pour la Sellette 4

Vue en bloc



Cette section décrit la décomposition statique du système Smart-Penstock en modules, avec leurs relations (fig. 7).

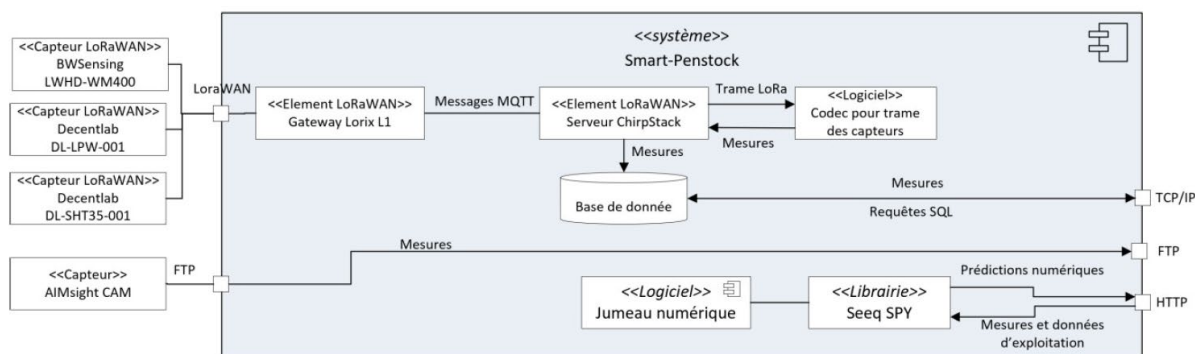


Figure 7 : Décomposition en bloque de la solution Smart-Penstock

Nom	Responsabilité
AIMSight CAM	Fournit les déplacements relatifs des éléments de la conduite par fichier CSV sur un FTP.
Capteur LoRaWAN	Fournit les mesures d'expansions, inclinaisons et température par LoraWAN au système.
Gateway Lox L1	Réceptionne les trames LoRa transmises par les capteurs LoRaWAN et les retransmet avec le protocole MQTT
Serveur LoRa ChirpStack	Crée un réseau LoRaWAN privé contenant les capteurs LoRaWAN ainsi que le gateway Lox L1. Réceptionne les messages MQTT du gateway Lox L1 et exécute le codec pour trame des capteurs. Sauvegarde les mesures décodées par le coded pour tram des capteurs dans la base de données ChirpStack. Gère la configuration de la communication LoRa(WAN) entre les capteurs LoRaWAN et le gateway Lox L1.
Codec pour trame des capteurs	Extrait les mesures d'expansions, d'inclinaisons et de température des trames LoRa émises par les capteurs LoRaWAN.
Base de données ChirpStack	Sauvegarde de façon persistante les mesures. Fournit un accès aux mesures.
Jumeau numérique	Fournit une prédiction numérique du comportement mécanique de la conduite, basée sur les données acquises.
Seeq SPY	Fournit une interface par accéder à l'aide de Python au données disponible dans Seeq.

Vue de déploiement

Cette section décrit l'infrastructure technique dans laquelle les composants du système Smart Penstock sont exécutés sur la conduite forcée d'Ernen.



Déploiement géographique

Les capteurs LoRaWAN sont installés le long de la conduite forcée, spécifiquement entre le massif 1 et 2. Toutes les sellettes sont équipées d'un inclinomètre. Les sellettes jugées intéressantes sont équipées d'un extensomètre ainsi qu'une cible pour le système AIMSight (fig. 10-21).

Le joint d'expansion avant le massif 2 est équipé de 3 extensomètres, placés à 4h, 8h et 12h (selon une vue en coupe de la conduite).

La caméra AIMSight est installée à proximité de la sellette 1, sous la passerelle qui chevauche la conduite.

Le gateway LoRaWAN est installé sur l'extérieur du bâtiment de service de la vanne de tête de la conduite.



Figure 8 : Déploiement des cibles le long de la conduite forcée

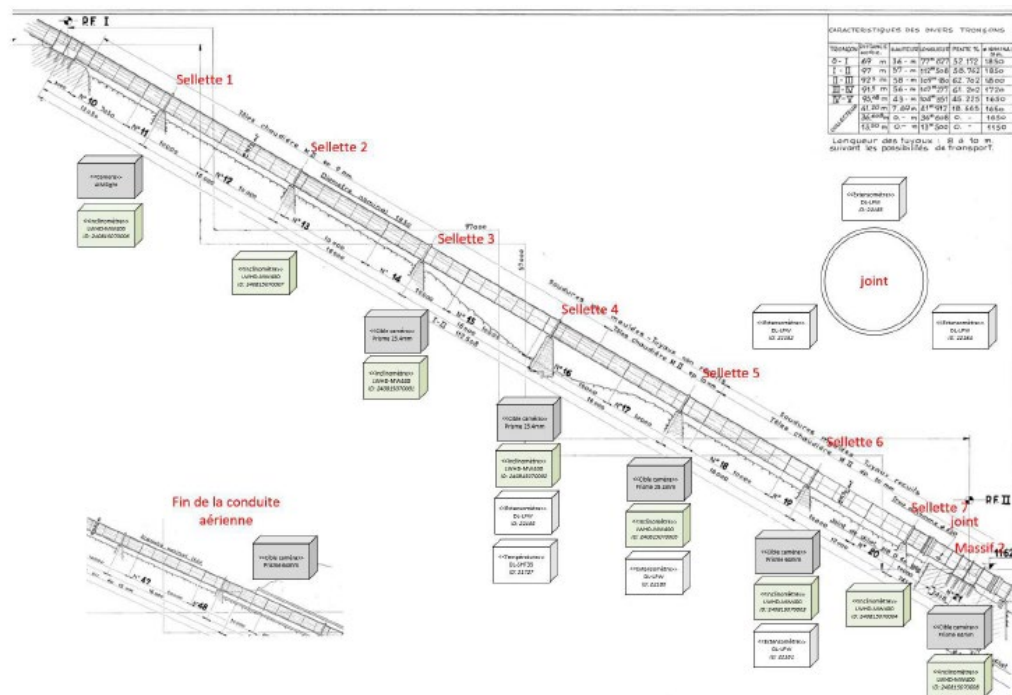


Figure 9 : Déploiement des capteurs sur la conduite



Figure 10 : Emplacement de la caméra AIMSight à proximité de la sellette 1



Figure 11 : Emplacement du gateway LoRaWAN au bâtiment de la vanne de tête



Figure 12 : Déploiement de la caméra AIMsight à la sellette 1, sous la passerelle



Figure 13 : Capteur à la sellette 2



Figure 14 : Capteurs à la sellette 3

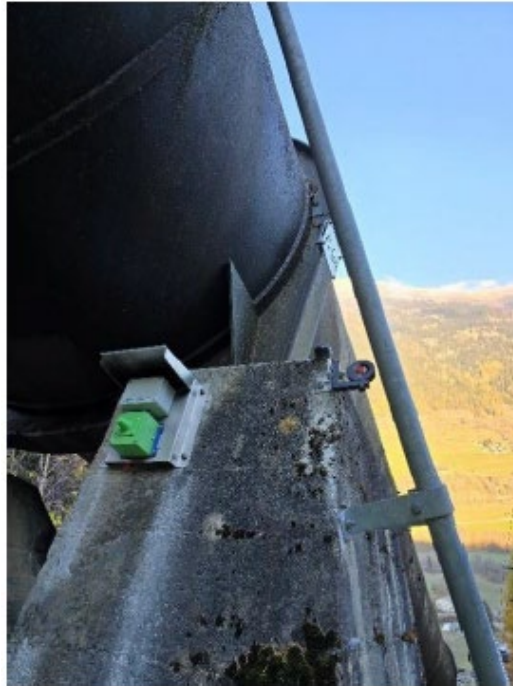


Figure 15 : Capteurs à la sellette 4



Figure 16 : Capteurs à la sellette 4



Figure 17 : Capteurs à la sellette 5



Figure 18 : Capteurs à la sellette 5



Figure 19 : Capteurs à la sellette 7



Figure 20 : Capteurs aux joints, 12h, décroché pour la photo



Figure 21 : Capteurs au massif 2

Déploiement technique

Cette section décrit l'infrastructure technique dans laquelle les composants du système Smart Pens-tock sont exécutés (fig. 22).

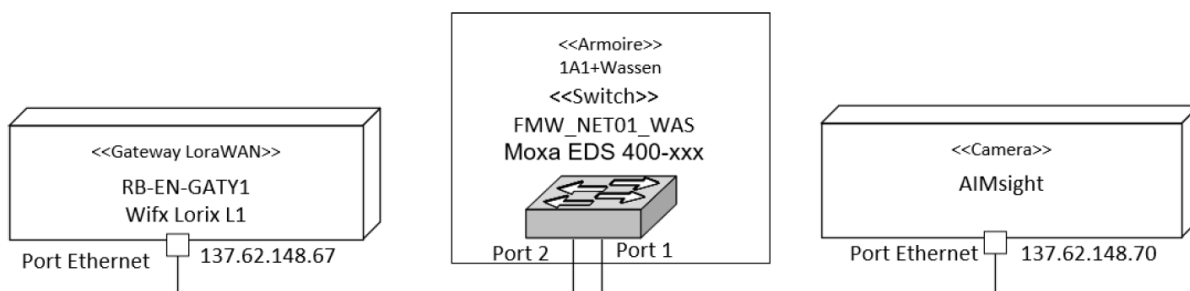


Figure 22 : Déploiement technique de l'installation à la vanne de tête de Wassen

Le gateway LoRaWAN ainsi que la caméra AIMSight sont reliées au réseau télématique externe de la centrale de Ernen (fig. 23). Le switch de l'armoire de la vanne de tête est utilisé afin de connecter ces éléments au réseau. Le réseau télématique externe fourni un accès au serveur LoRa Hydro pour le traitement et stockage des données.

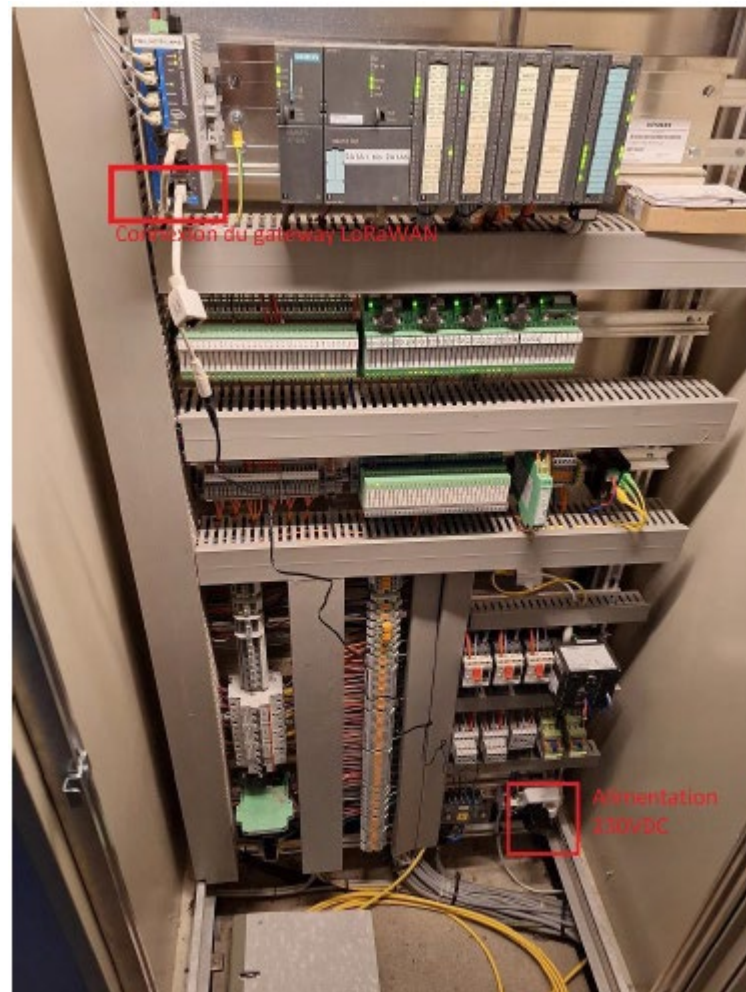


Figure 23 : Connexion du gateway LoRaWAN dans l'armoire 1A1+Wassen, dans le bâtiment de la vanne de tête

Concept Jumeau Numérique JN (WP3)

Le Jumeau Numérique (Digital Twin) peut être représenté selon le schéma bloc suivant (fig. 24) :

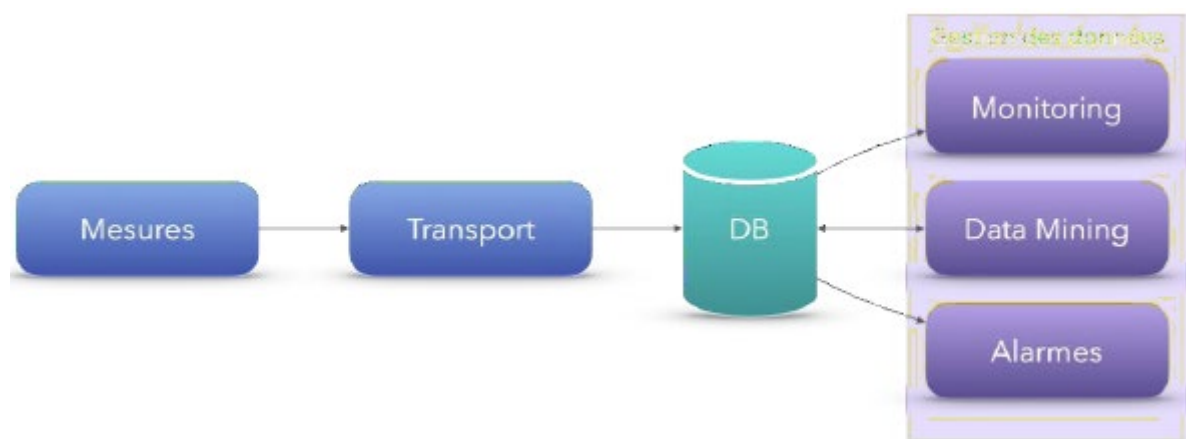


Figure 24 : Schéma bloc du JN



Description détaillée

Les mesures

Les capteurs sont reliés à un automate programmable qui fait les premiers calculs et agrégations. Les mesures sont ensuite poussées au module transport.

Le transport

Plusieurs technologies peuvent être envisagées pour transmettre les données récoltées à la base de données : Ethernet, wifi, Lora, 5G...

La base de données

Les données récoltées dans notre cas sont du type « Time Series » (on associe un temps à une donnée). Il existe plusieurs moteurs de base de données sur le marché spécialement conçus pour gérer ce genre de données. On peut citer InfluxDB, MongoDB, TimescaleDB, OpenTSDB.

Nous connaissons très bien le moteur Influx, qui pourrait être un candidat intéressant dans le cadre de ce projet.

Cependant, après plusieurs recherches, il s'avère que TimescaleDB et un moteur de BD basé sur PostgreSQL, qui est déjà utilisé dans le cadre d'un autre système de monitoring et donc connu des partenaires du projet. Il serait donc très intéressant de l'utiliser.

Le lien suivant propose une comparaison entre influxDB et TimescaleDB :

<https://db-engines.com/en/system/InfluxDB%3BTimescaleDB>

L'utilisation de TimescaleDB aurait donc les avantages suivants :

- Outil déjà connu des partenaires du projet
- Réutilisation possible du modèle de données de CA Vision
- Basé PostgreSQL, utilisant le langage SQL pour les requêtes à la base
- PostgreSQL est un moteur connu et éprouvé dans le monde industriel

La gestion des données

On a identifié 3 parties différentes dans la gestion des données récoltées par les capteurs. Il y a :

- Leur traitement (Data Maining) pour déceler des anomalies
- Leur affichage (Monitoring)
- Et la gestion d'alarmes en fonction des problèmes décelés.

Monitoring & Alarmes

De nos jours, les données de type « times series » sont de plus en plus présentes et les technologies liées à leur traitement et leur surveillance ont beaucoup évolué.

On peut évident imaginer faire un développement spécifique (logiciel) pour avoir une visualisation moderne de ces données tout en utilisant des framework connus, comme Seeq.

Analyse des données

Des mouvements relatifs des appuis d'une conduite forcées (sellettes ou des massifs) entraînent une augmentation des contraintes dans la section de la conduite, puisque la conduite doit fléchir pour s'adapter à l'appui. Les calculs de dimensionnement d'une conduite forcée prennent les positions et inclinaisons de ces appuis comme fixes, c'est-à-dire que la conduite est alignée parfaitement lors de sa construction. Néanmoins des mouvements de terrains peuvent entraîner des mouvements de plusieurs dizaine de centimètres de ces appuis. Un monitoring régulier de ces mouvements permettrait d'alimenter les conditions aux limites d'une modèle FEM et ainsi de calculer l'évolution de ces 1con-traintes «



parasites ». Il s'agirait ensuite de fixer des valeurs seuils qui permettront de lancer une alarme lorsque la sécurité de l'infrastructure en serait fortement diminuée.

C'est pour cette raison qu'un logiciel a été créé avec pour objectif prioritaire de calculer les contraintes supplémentaires conséquentes à ces mouvements de terrain. Le facteur de sécurité d'une conduite étant connue en fonction de la position (différent sur la longueur de la conduite), une valeur admissible de ces contraintes pourrait être déterminée. Dans un deuxième temps il est aussi souhaitable d'intégrer efforts traditionnels que subit une conduite forcée (pression, flexion dues au poids propre, frottement).

La suite de ce rapport présente la structure du logiciel qui est fonctionnelle aujourd'hui. En toute fin de rapport les perspectives pour la suite du projet sont également présentées.

Présentation du logiciel

Architecture

Le logiciel doit pouvoir être intégré dans la plateforme de surveillance et monitoring, dans le cas de notre partenaire « Seeq ». De plus la mise à jour des calculs doit être assez rapide. Pour ce faire il a été décidé de développer notre propre code d'éléments finis 1D (FEM 1D). Le langage utilisé pour la programmation est « Python ». L'ensemble du code commun à toutes les conduites est contenu sous un même fichier (code principal FEM). La géométrie ainsi que les paramètres de la conduite sont rentrés dans un fichier « Jason », il s'agit d'un fichier unique à créer une seule fois pour chaque nouvelle conduite. Les conditions aux limites sont-elles intégrées dans un fichier « Panda ». Ce fichier est remis à jour pour ne conserver que le dernier jeu temporel de donnée monitorée par les capteurs.

Une interface utilisateur, exécutable sur Microsoft ou Apple a été créée. Elle permet de sélectionner la conduite, de charger les dernières conditions aux limites monitorées et de visualiser les résultats. La visualisation se fait sous forme graphique avec l'affichage de divers types de contraintes en fonction de la longueur de la conduite. La déformée de la conduite est également représentée en fonction de la longueur.

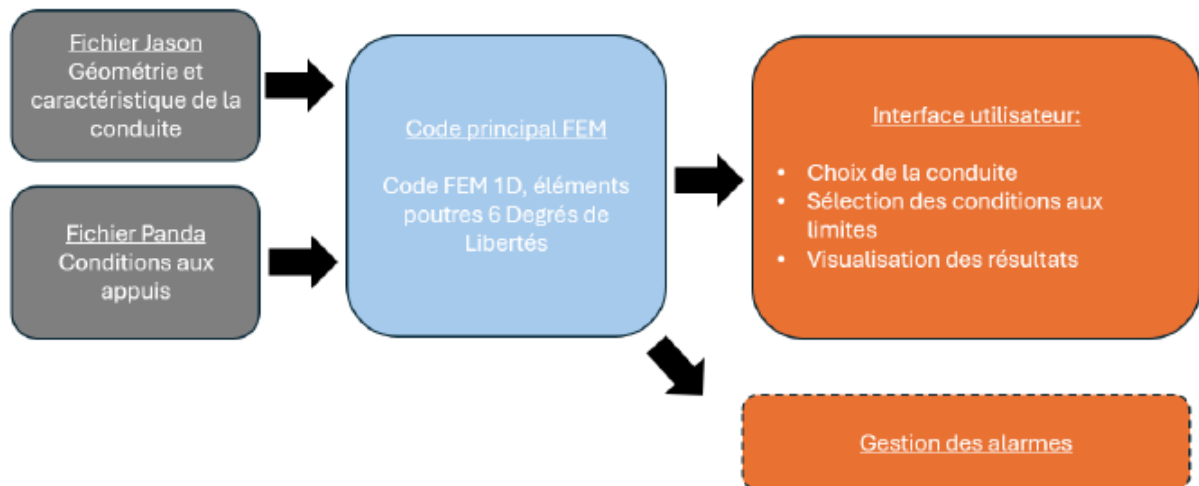


Figure 25: Architecture de l'ensemble du développement

Géométrie

Le repère utilisé est le suivant :

- L'axe x suit la conduite, son origine est au sommet de la conduite
- L'axe y est radial et son sens positif dirigé vers 12h
- L'axe z est radial et son axe positif dirigé vers 9h



La géométrie est transmise au programme sous forme de matrice regroupant un tronçon de même inclinaison (tronçon entre deux massifs consécutifs). Les éléments transmis sont les suivants :

- Altitude du massif supérieur
- Nombre de sellettes
- Nombre d'élément (peut-être ajustés par l'utilisateur)
- Pente de la conduite
- Diamètre interne de la conduite et épaisseur et position en x des changements d'épaisseur

L'ensemble de ces données est regroupé dans un fichier « Jason » (fig. 26). Le code principale lit ces fichiers et discrétise l'ensemble afin d'obtenir la géométrie complète de la conduite.

```
"penstock": {
  "name": "Nendaz",
  "altitude": 1406.305,
  "total_length": 185,
  "vertical_drop": 900.5,
  "year": 1974,
  "pipe": [
    {
      "anchor": {
        "id": 1,
        "is_first": "yes",
        "is_last": "no",
        "anchor_altitude": 1406.305,
        "anchor_position": 0,
        "half_length": 11.1,
        "inside_diameter": 3.15,
        "entry_angle": 0.0,
        "exit_angle": 43.635,
        "supports_list": [
          {
            "support": {
              "id": 1,
              "length": 3.77,
              "deviation_matrix": {
                "ux": -1,
                "uy": 0,
                "uz": -1,
                "tx": -1,
                "ty": -1,
                "tz": 0
              }
            }
          }
        ]
      }
    }
  ]
}
```

Figure 26 : Extrait du code "json"

Loi de comportement de l'acier

Il s'agit d'un modèle purement élastique. Les seules données utilisées pour le calcul sont le module de Young et le coefficient de Poisson (valeur actuelle : $E=210\text{GPa}$, $\text{Poisson}=0.3$). Lors de la définition des seuils d'alarme il faudra également fournir la limite élastique et la résistance mécanique.

Type d'élément et maillage

L'élément choisi est un élément poutre 2D auquel a été rajoutée la flexion autour de l'axe y puisque cela pourrait arriver en considérant un décalage latéral d'un appui. Nous tenons ainsi compte des efforts suivants :



Traction

$$\frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_A \\ u_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_A \\ N_B \end{pmatrix}$$

E : Module de Young, L : longueur élémentaire, A : section de la conduite, u déplacement des nœuds ici A et B, N : effort aux nœuds dans la direction x

Torsion :

$$\frac{GI_T}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \theta_A \\ \theta_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_A \\ T_B \end{pmatrix}$$

G : Module de cisaillement, IT : moment polaire, θ rotations aux nœuds autour de x, T : effort de torsion aux nœuds

Cisaillement et flexion dans le plan xy :

$$\begin{bmatrix} \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} v_A \\ \psi_A \\ v_B \\ \psi_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_A \\ M_A \\ Q_B \\ M_B \end{pmatrix}$$

I : moment d'inertie autour de z, v : déplacements radiaux (en y) aux nœuds, ψ : rotations autour de z aux nœuds, Q : effort tranchant aux nœuds direction y, M : Moment de flexion au nœuds autour de z.

Cisaillement et flexion dans le plan xz :

La matrice est identique à celle du plan xy mais les indices des paramètres changent comme suit :

I : moment d'inertie autour de y, v : déplacements radiaux (en z) aux noeuds, ψ : rotations autour de y aux noeuds, Q : effort tranchant aux noeuds direction z, M : Moment de flexion au noeuds autour de y.

Conditions aux limites

Déplacements :

Nous considérons des déplacements imposés uniquement aux appuis (massifs et sellettes). Chaque appui est défini avec 6 degrés de liberté, ceci se traduit dans le code par un vecteur à 6 composantes pour chaque appui. Si un degré de liberté est laissé libre la valeur dans le soft est fixé à -1. Pour les degrés de liberté imposés leur valeur est rentrée manuellement au départ. Par la suite les valeurs monitorées sont modifiées automatiquement à chaque nouvelle mesure. Le tout est intégré est mis à jour dans un fichier « Panda ». Lorsque l'utilisateur décide de lancer un calcul le logiciel viendra lire le fichier « Panda » le plus récent.

Efforts :

Le but de ce projet est de calculer les contraintes engendrées par les déplacements des sellettes. De ce fait avec les déplacements imposés de la section précédant nous obtenons déjà la contrainte addi-



tionnelle de ces mouvements. Néanmoins le logiciel prend également en compte au stade de développement actuelle, la pression, le poids propre de l'eau ainsi que le poids propre de l'acier.

Résultats

L'ensemble des contraintes liées aux systèmes d'axe utilisé pourrait facilement être affiché. Pour l'instant la contrainte de traction due à la pression, la contrainte de flexion dans les plans xy et xz ainsi que la contrainte de von-Mises critiques ont été affichées. La déformation de la flexion dans la direction y et z sont également affichée (fig. 27).

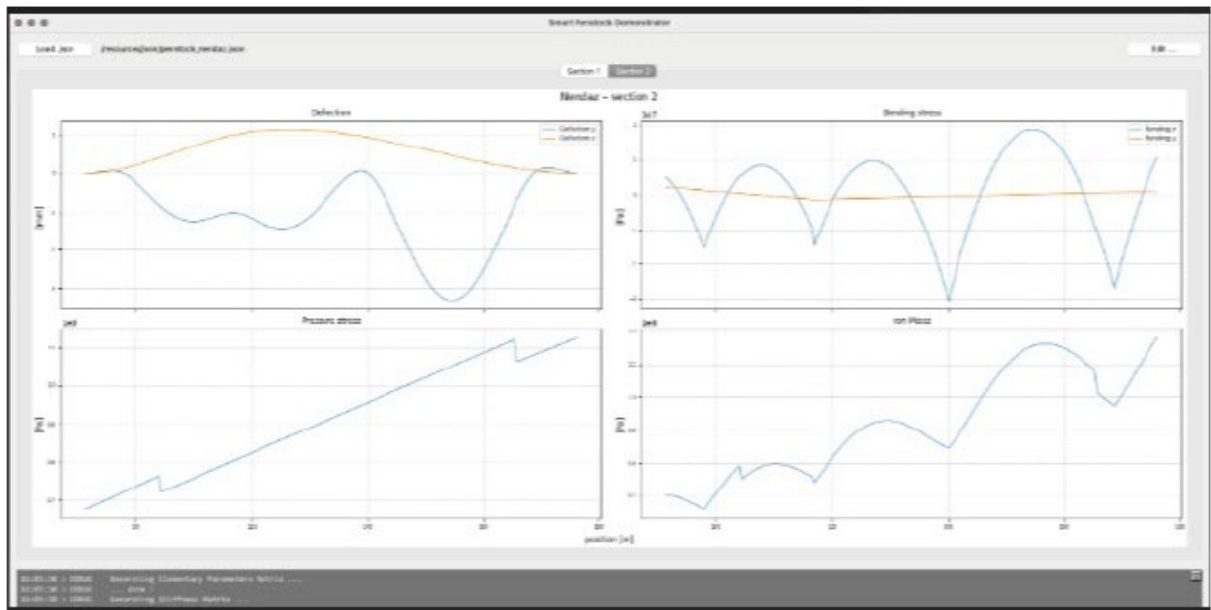


Figure 27 : Exemple de visualisation des résultats

Les travaux effectués jusqu'à présent ont permis de démontrer que nous sommes capables de lire les données monitorées, de les intégrer dans un code FEM d'une conduite forcée, d'exécuter le code et d'en obtenir les résultats sous forme de contrainte et de déflexion. Ce développement a été effectué jusqu'à présent sur un tronçon de conduite (2 massifs) afin de démontrer la faisabilité de l'ensemble de la procédure. Les résultats obtenus nous permettent d'aller de l'avant et donc de coder les deux fichiers « json » qui définiront l'ensemble des conduites d'Ernen et de Condémines. Une discussion devra également être faite avec les partenaires du projet afin de déterminer quelques valeurs sera pour eux adéquates pour définir les seuils d'alarme. Ces deux points vont demander un peu de temps mais ne sont pas très risqué d'un point de vue technique.



3 Conclusions et perspectives

Le développement du MTR et du JN a été réalisé et le système de surveillance est prêt à être testés sur les deux conduites forcées de Condémines et d'Ernen.

Les MTR peuvent être adaptés en fonction de la situation particulière d'une conduite donnée comme cela a été fait pour Ernen. Le JN générique peut être déployé sur n'importe quelle conduite simplement, ce qui a été fait pour les démonstrateurs. Le JN permet de simuler mécaniquement la conduite à partir des données provenant des MTR et du SCADA. Les démonstrateurs devraient être mis en service durant l'été 2025, ce qui permettra de montrer que la solution fonctionne en continu et procéder aux éventuels débogages liés à l'exploitation ou à des événements particuliers. Par exemple, il a été observé que les chutes de neige perturbent les caméras. Le calibrage du modèle mécanique se fera en continue pendant le WP5. Cela permettra d'affiner le modèle mécanique si nécessaire. Par exemple de corréliser plus étroitement les déplacements axiaux monitorés et le logiciel afin de pouvoir déterminer plus précisément les efforts axiaux dans la conduite. Ces derniers étant fortement influencés par le frottement ils sont souvent grossièrement approximatés. La phase d'exploitation (WP5) doit aussi permettre de vérifier le fonctionnement sur le long terme les capteurs choisis pour compléter le système de monitoring de la conduite d'Ernen. La phase d'exploitation doit aussi permettre aux partenaires de s'approprier ce nouveau système de surveillance et de l'intégrer aux systèmes de suivis des deux conduites testées. Il faudra définir comment utiliser les informations fournies par le JN et comment elles seront traitées pour les différents utilisateurs du système : exploitants, ingénieurs et gestionnaire d'actifs.

Résumé des prestations effectuées au regard du calendrier du proposal et de la planification des futures prestations :

	Réalisés	Planning	Planifiés
WP1 : Gestion du projet	Gestion administrative Pilotage du projet Séances	Selon calendrier du proposal	Selon calendrier du proposal
WP2 : Système de mesure en temps réel	Commande et montage des équipements de mesures Cf. § 2 ci-dessus	Selon calendrier du proposal	Terminé
WP3 : Jumeau numérique	Développement des concepts et de l'architecture Cf. § 2 ci-dessus	Selon calendrier du proposal	Terminé
WP4 : Installation et mise en service	Calibrage et mise ne service des équipements de mesures - Cf. § 2 ci-dessus	Selon calendrier du proposal	Selon calendrier du proposal
WP5 : Test et exploitation	Pas commencé	Selon calendrier du proposal	Selon calendrier du proposal



4 Coopération nationale et internationale

ras

5 Publications et autres communications

ras

6 Bibliographie

ras

7 Annexe

ras