

Monitoring d'un ouvrage d'art par GNSS

Journée instrumentation
AFGC Hauts de France / IMGC
4 juin 2025 – Amiens



Plan de la présentation

- I. Les GNSS : définitions et fonctionnement
- II. Un cas d'étude : la surveillance du pont de Brotonne
- III. Analyse des données : quelques exemples
- IV. Modélisation par apprentissage
- V. Conclusions



Les GNSS

Définitions et fonctionnement



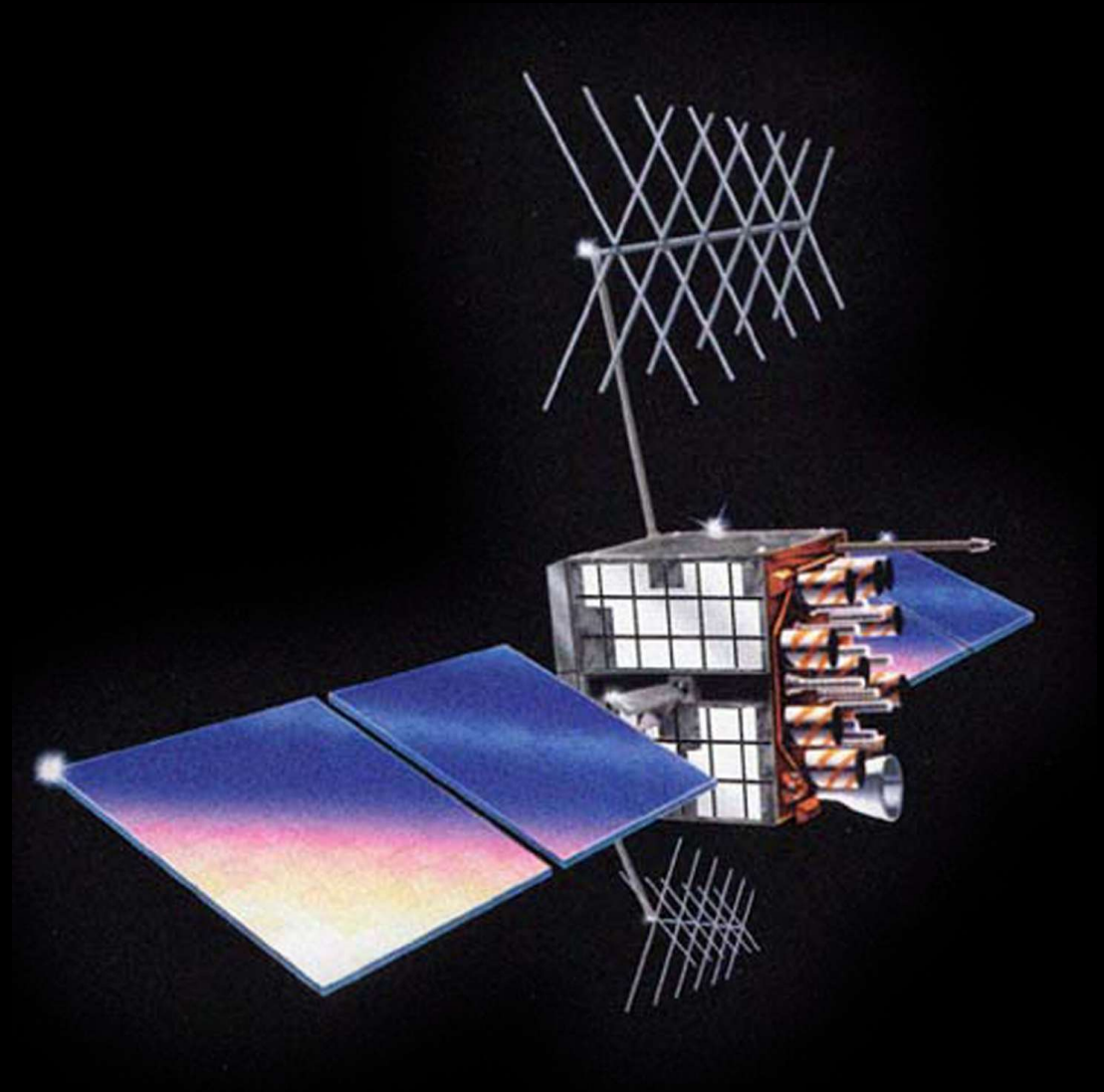
Le GPS

GPS : Global Positioning System

- ▶ Développé par l'US Navy depuis 1973
- ▶ Opérationnel depuis 1995
- ▶ Constellation de 32 satellites
- ▶ Aujourd'hui, système public et gratuit

Des applications variées :

- ▶ La navigation,
- ▶ La topographie,
- ▶ La géodésie,
- ▶ La bourse...



Les GNSS

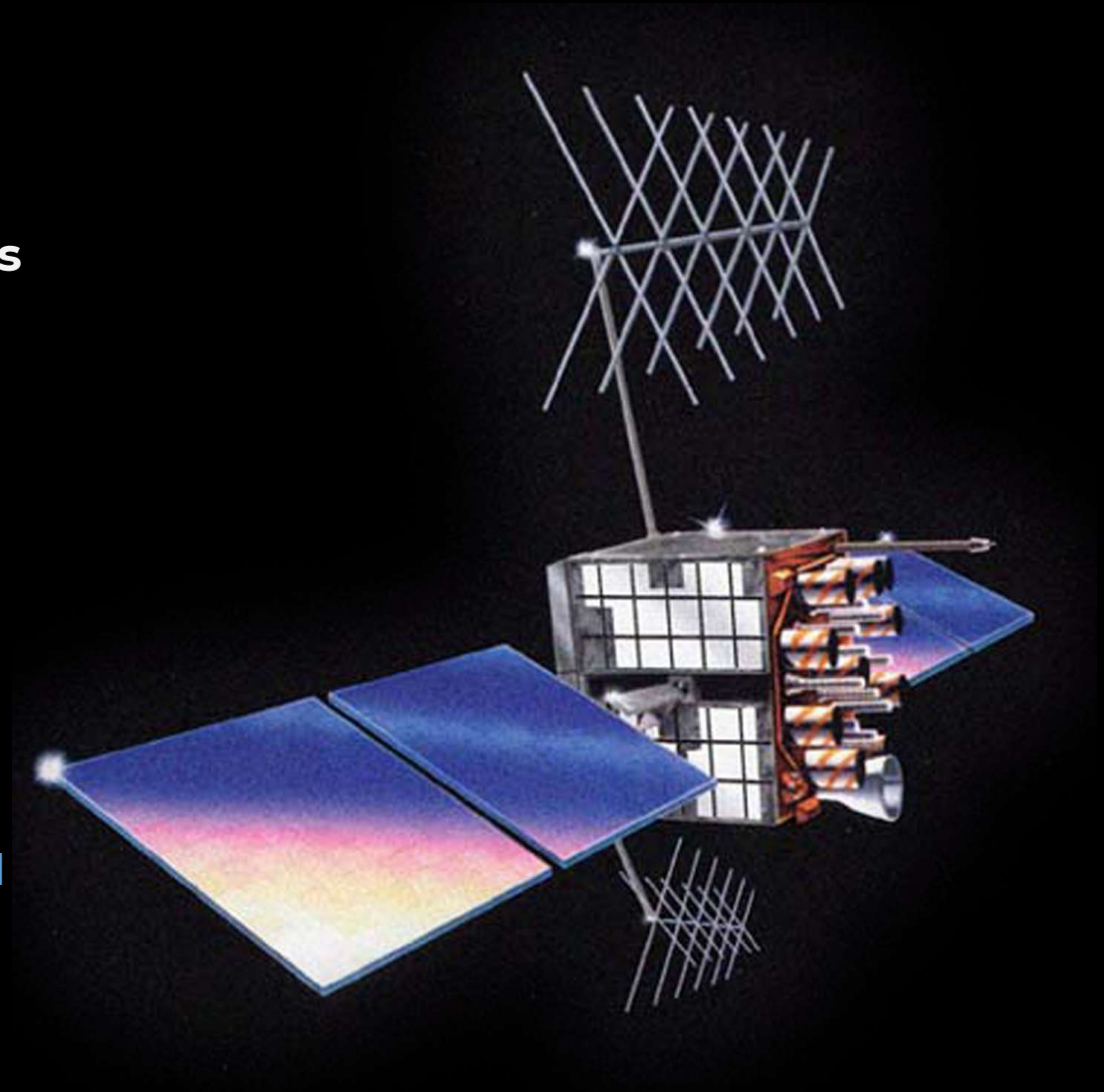
Global Navigation Satellite Systems

Un terme qui englobe plusieurs systèmes au fonctionnement similaire :

- ▶ GPS, le système Américain ;
- ▶ Glonass, le système Russe ;
- ▶ Beidou, le système Chinois ;
- ▶ Galileo, le système Européen.

Une évolution utile :

- ▶ Indépendance stratégique
- ▶ Protection contre le brouillage d'état
- ▶ Galileo est le seul système entièrement civil
- ▶ Un gain en performance



Le fonctionnement (1)

Des constellations de satellites

Chaque système comporte une trentaine de satellites orbitant autour de la Terre.

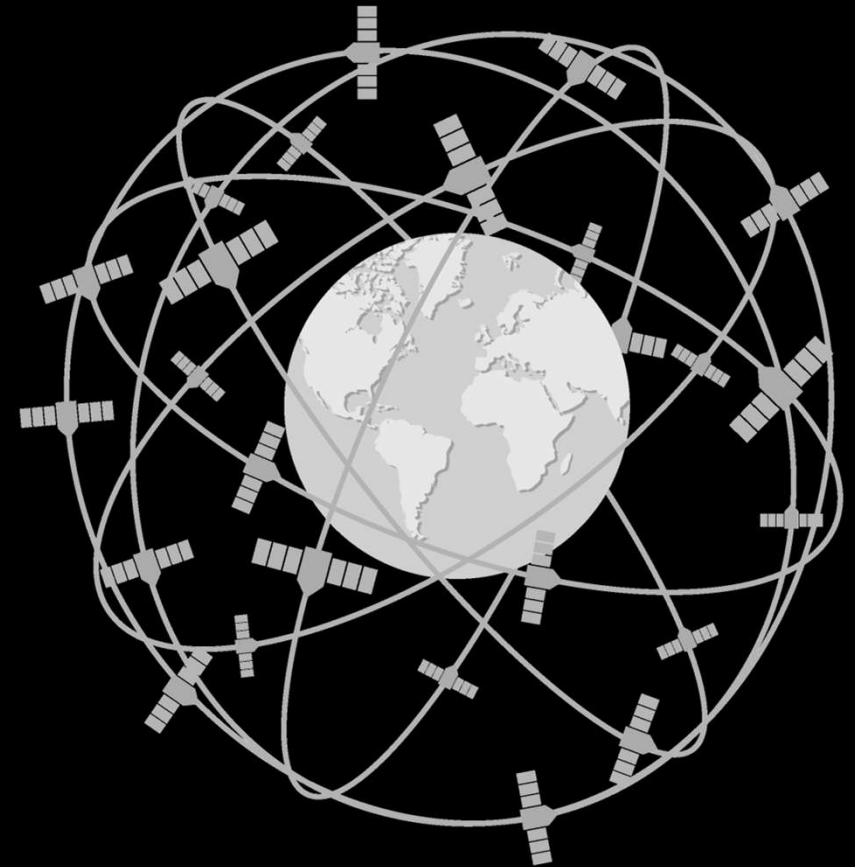
Leurs positions sont recalculées en permanence par l'agence / le laboratoire gérant le système.

Un fonctionnement similaire

Les satellites sont équipées d'horloges atomiques et d'antennes pour transmission d'informations.

Chaque satellite va transmettre des informations sur plusieurs fréquences de signaux :

- Les informations pour calculer sa position
- Un code pseudo-aléatoire, dépendant du temps.



Le fonctionnement (2)

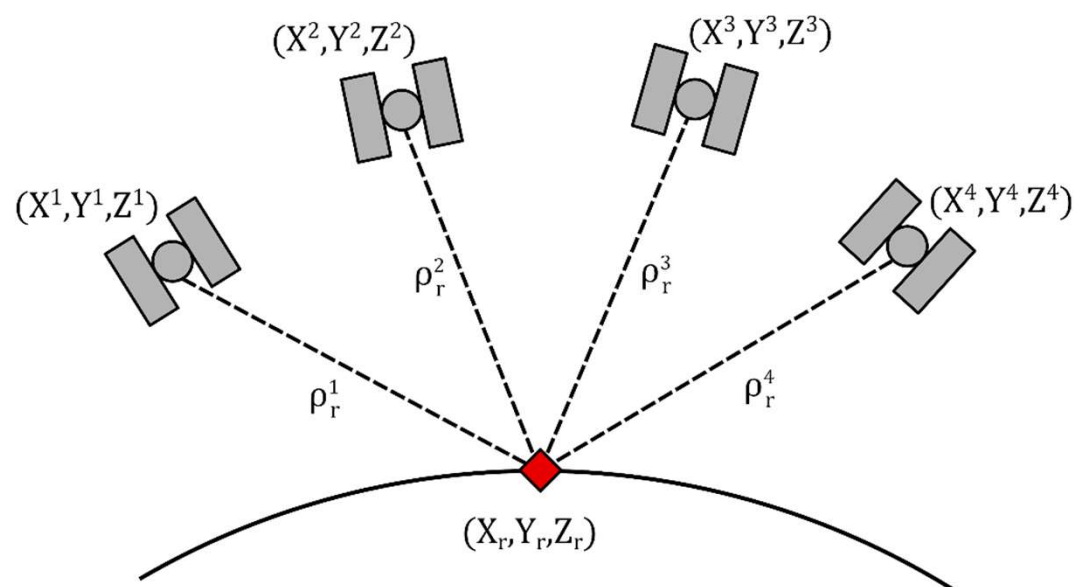
Au sol, un récepteur GNSS reçoit et décode les signaux envoyés par chaque satellite, et récupère les informations sur leurs positions.

Le récepteur génère le code attendu pour chaque satellite : en comparant à celui reçu, on estime le temps de trajet du signal et une pseudodistance.

Avec les positions et les pseudodistances d'au moins 4 satellites, le récepteur peut calculer sa position dans leur référentiel : la trilatération.

Précision : 5-10m en plani, +10m en vertical.

Applications : navigation, suivi de flotte.



Le fonctionnement (3)

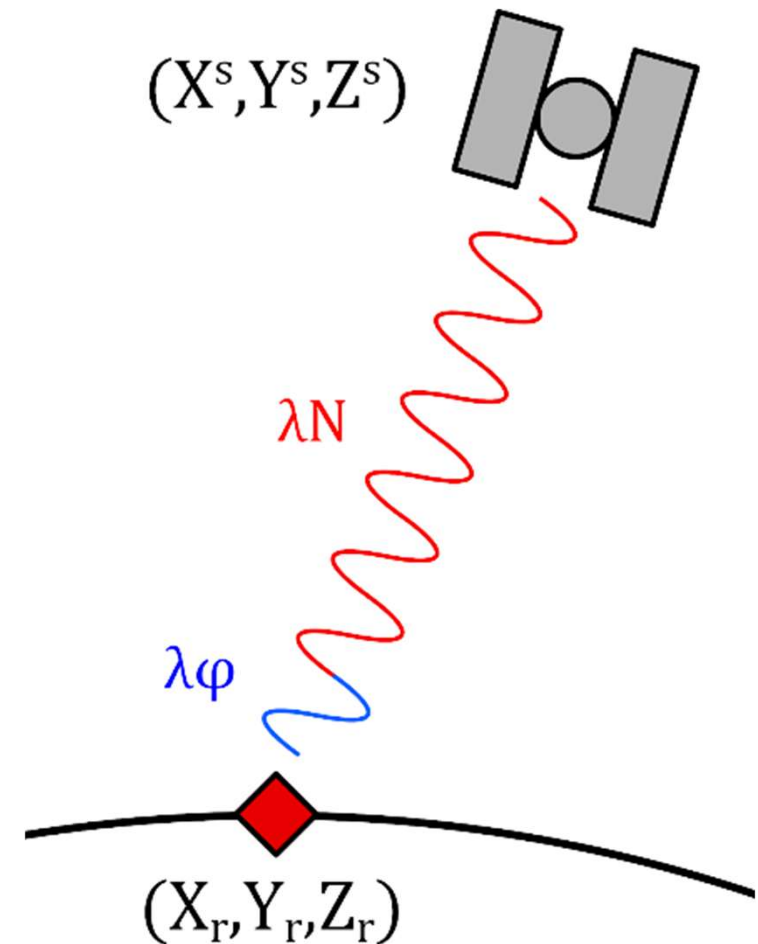
Cette précision n'est pas suffisante pour du monitoring.

On utilise alors la phase de l'onde porteuse du signal plutôt que son contenu : **mesure plus précise**.

Cependant, il va également y avoir de nombreuses sources d'erreur à mitiger :

- Erreurs liées aux horloges des satellites ;
- Erreurs liées à la propagation dans l'atmosphère ;
- Être dans un référentiel adapté.

Plus d'inconnues à résoudre = calcul plus complexe.



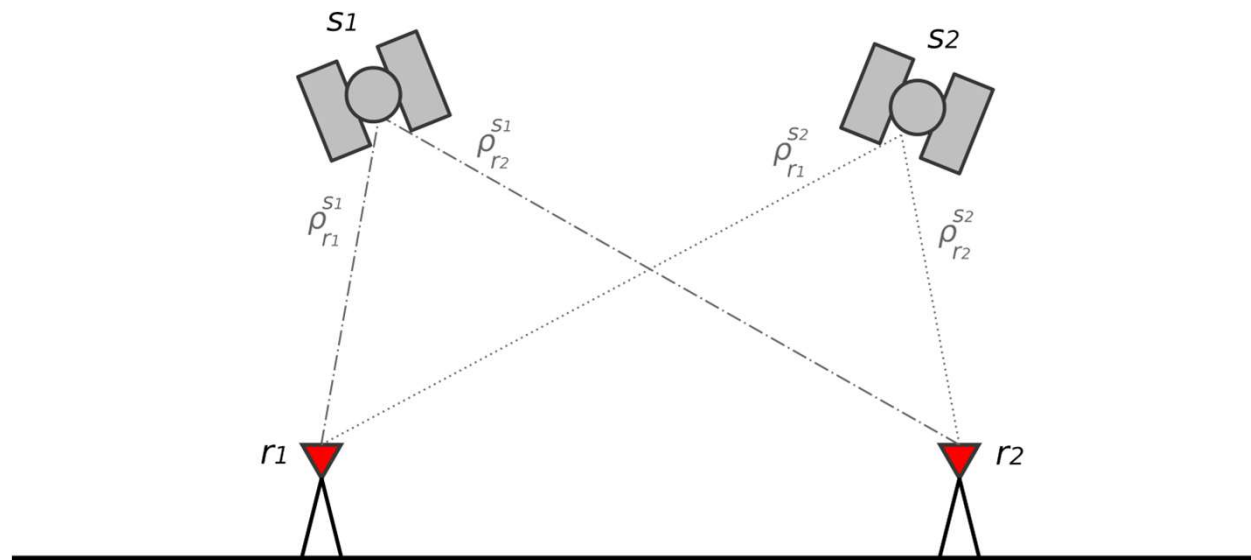
Le fonctionnement (4)

Une méthode pour faciliter ce calcul précis : le positionnement relatif.

On utilise une station **de base** : cette station est fixe et de coordonnées connues.

Si la station **de base** est proche de la station **de mesure**, alors elles observent les mêmes erreurs : en faisant la différence, on supprime ces erreurs.

On positionne la station **de mesure** par rapport à **la base** : on est dans son référentiel (ex : *RGF 93 en France*). Cette démarche peut être réalisée en post-traitement ou en temps réel (type RTK).



Cas d'étude

La surveillance du pont de Brotonne





Le pont de Brotonne

Présentation du pont de Brotonne (1)

Le pont de Brotonne est un pont à haubans en béton précontraint, dont la construction s'est achevée en 1977.

Il franchit la Seine qui relie Le Havre à Rouen.

La longueur totale de l'ouvrage est 1278 m.

La travée centrale, qui s'élève jusqu'à 50 m au-dessus du niveau de la Seine, est constituée de voussoirs entièrement en béton précontraint assemblés par encorbellement, pour une longueur de 320 m.



Présentation du pont de Brotonne (2)

La travée était la plus grande au monde lors de sa construction.

Il s'agit d'une méthode innovante de construction pour l'époque, qui lui vaut aujourd'hui encore d'être qualifiée de prototype.

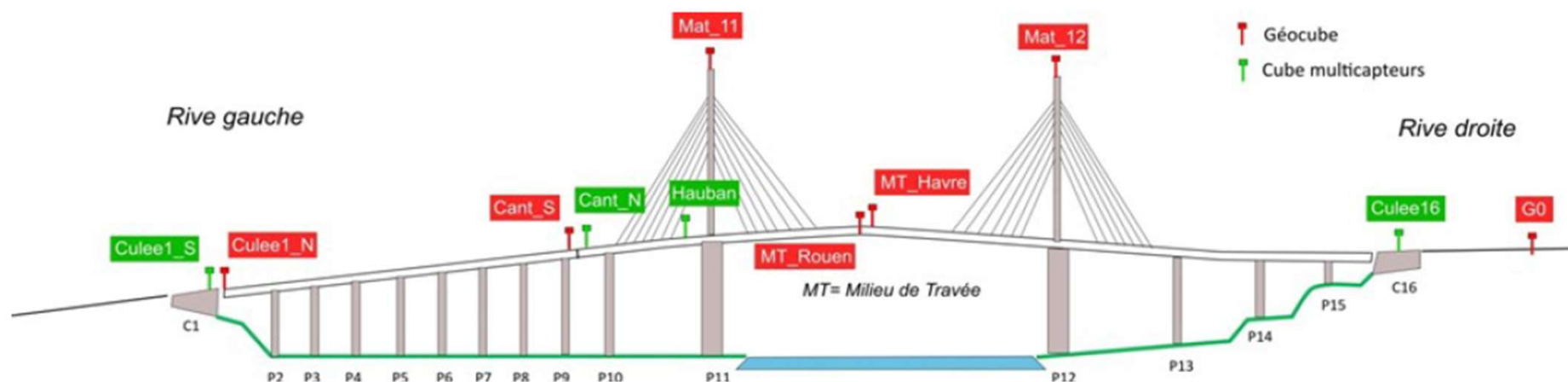
Les deux pylônes atteignent une hauteur de 125 m.

Le commanditaire et exploitant de l'ouvrage est le département de la Seine Maritime. Environ 15000 véhicules empruntent le pont de Brotonne chaque jour (dont 7% de PL).



Instrumentation de l'ouvrage par l'IGN (1)

L'instrumentation pour la surveillance géométrique du pont de Brotonne par l'IGN consiste en un réseau de 11 stations GNSS, réparties sur différentes sections caractéristiques de l'ouvrage :



Deux types de stations ont été déployées :

- 7 stations « Géocube » (en rouge), fournissant une position 3D, dont la station G0, qui est utilisée comme la référence fixe ;
- 4 stations « GEOSTIX » (en vert), fournissant une position 3D et collectant des mesures d'autres capteurs conventionnels déployés



Instrumentation de l'ouvrage par l'IGN (2)

Les capteurs suivants sont associés aux différents GEOSTIX :

Au niveau du joint viaduc d'accès / tablier :

- 2 inclinomètres 2 axes
- 1 extensomètre

Au niveau du joint de la culée sud :

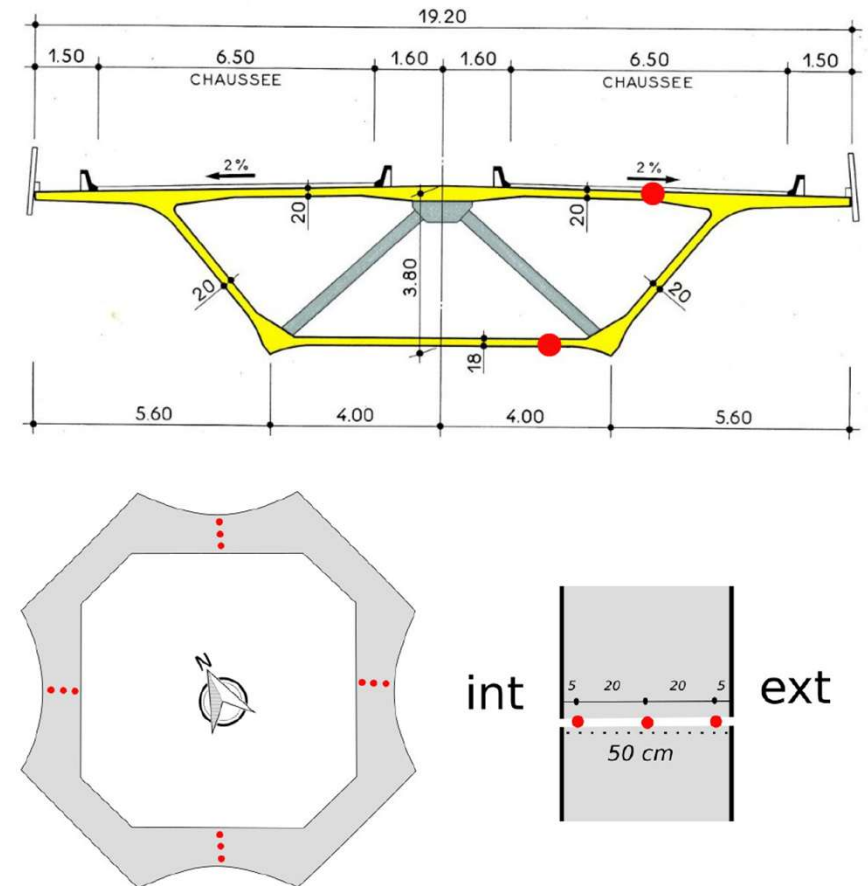
- 2 capteurs d'appuis
- 2 sondes de température dans le tablier
- 1 extensomètre

Au niveau du joint de la culée nord :

- 1 extensomètre

Au niveau de la pile P11 :

- 12 sondes de température installées dans la pile P11
- 2 sondes de température tablier



Capteurs déployés

Les capteurs déployés sont des systèmes initialement développés par l'IGN, puis commercialisés et développés par Ophelia Sensors et Geobsys :



Photos du terrain



Pourquoi une instrumentation avec des GNSS ?

Pour le gestionnaire :

- Un suivi « monitoring GNSS » entamé à partir de 2017 avec la première version du Geocube,
- Un suivi 3D en continu des différents points de l'ouvrage,
- La possibilité de comparer directement les mouvements de plusieurs parties de la structure,
- L'absence de dérive des capteurs,
- Des données obtenues directement dans le référentiel de l'ouvrage, et le même que celui des campagnes topographiques périodiques.

Pour les prestataires :

- Une validation terrain d'une solution initialement développée pour le suivi géotechnique,
- Un REX précieux pour les développements itératifs de la solution,
- L'opportunité de développement commercial sur le marché des GNSS à coûts modérés.



Analyse de données

Quelques exemples

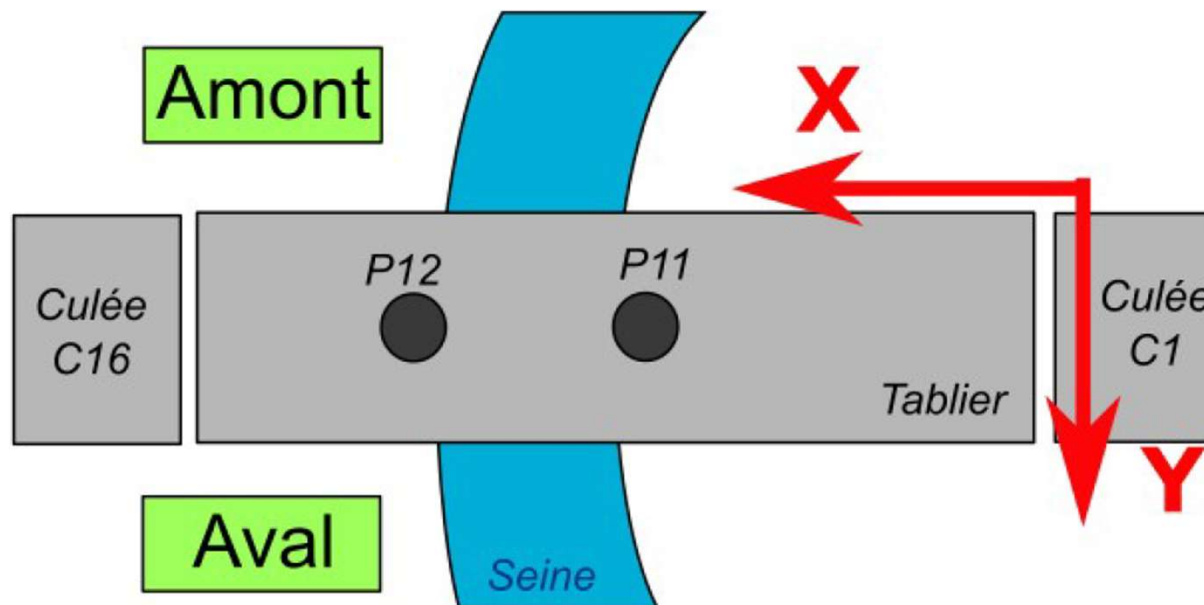


Contexte de l'analyse

SITES intervient en sous-traitance de l'IGN pour la réalisation des études annuelles.

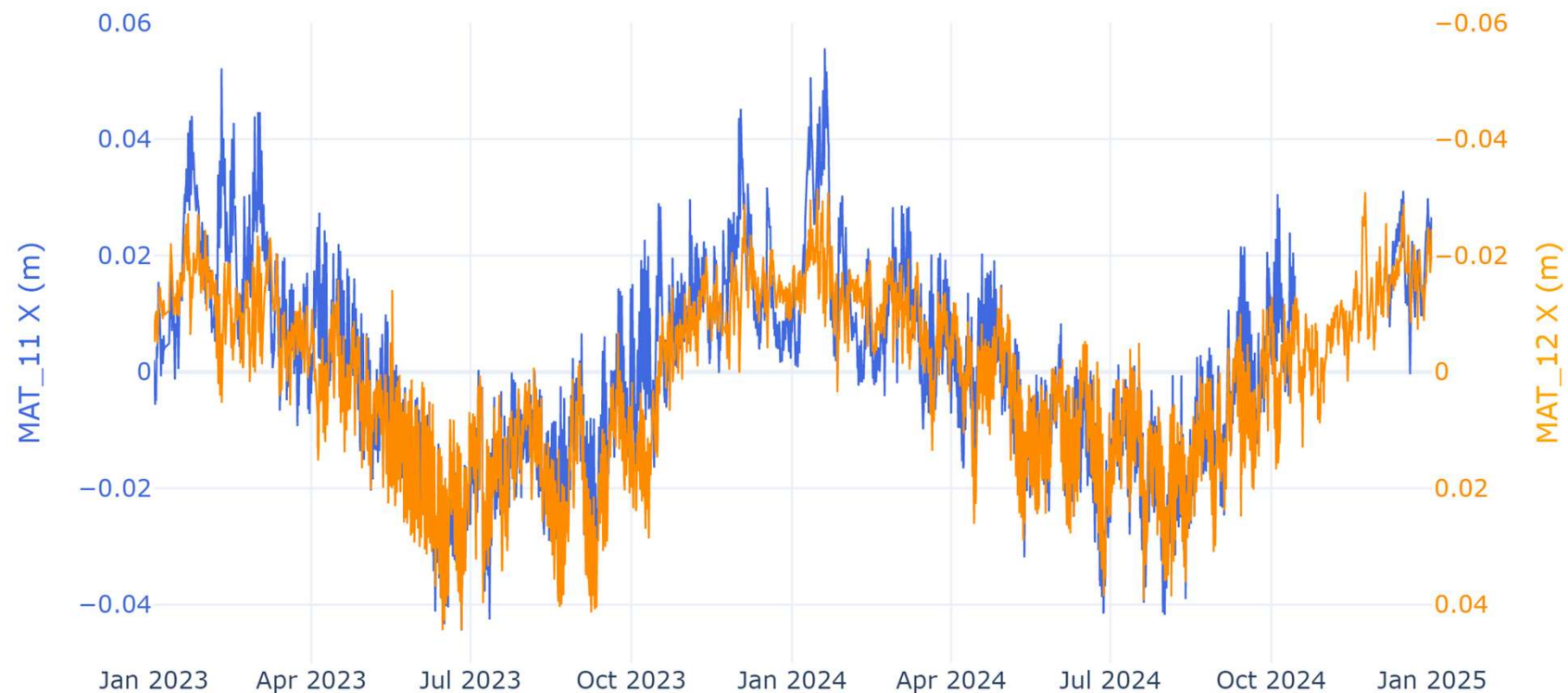
L'objectif : évaluer le comportement de l'ouvrage, expliquer les observations faites par le système déployé, et proposer des métriques / indicateurs de suivi.

Toutes les données présentées sont dans le référentiel local du pont :



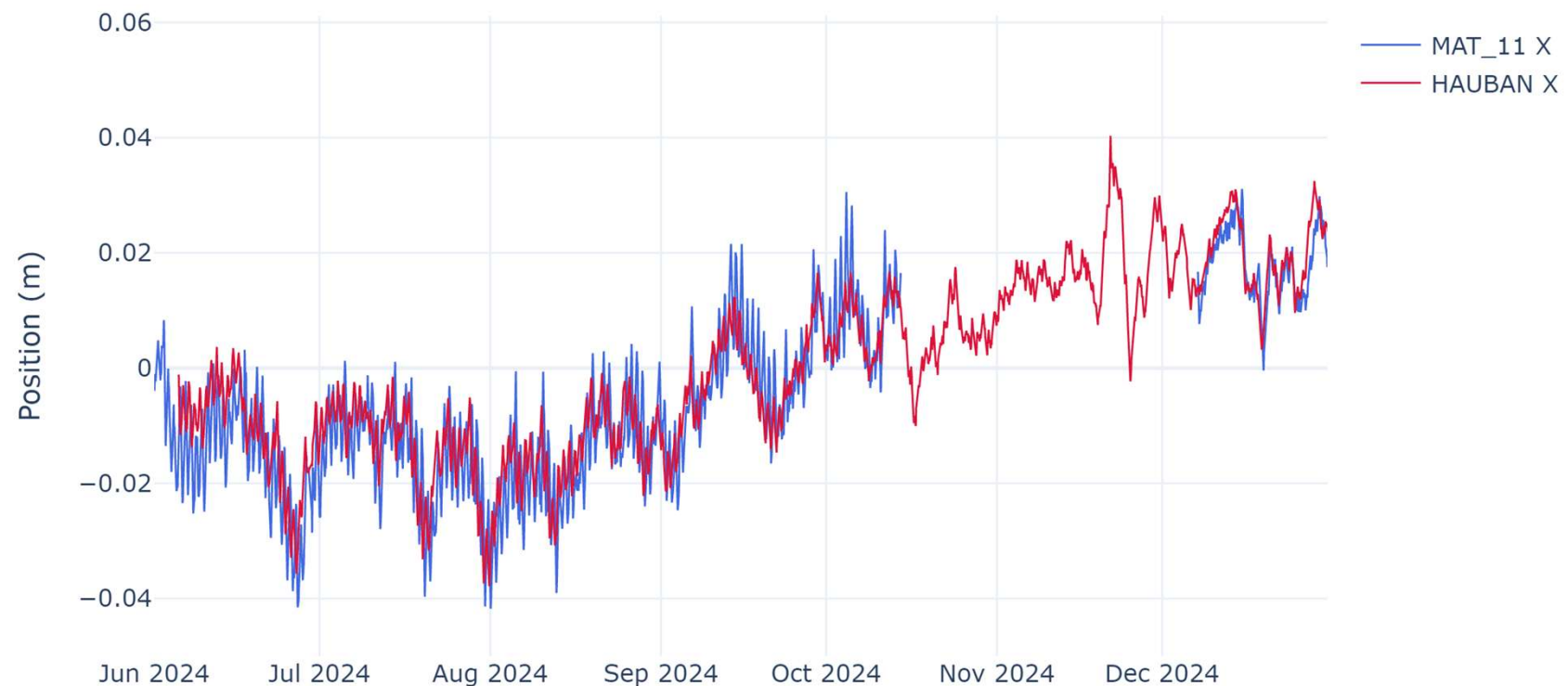
Exemple : mouvements longitudinaux des mâts (1)

Les mouvements longitudinaux : similaires sur les deux pylônes et fortement corrélés à la T°



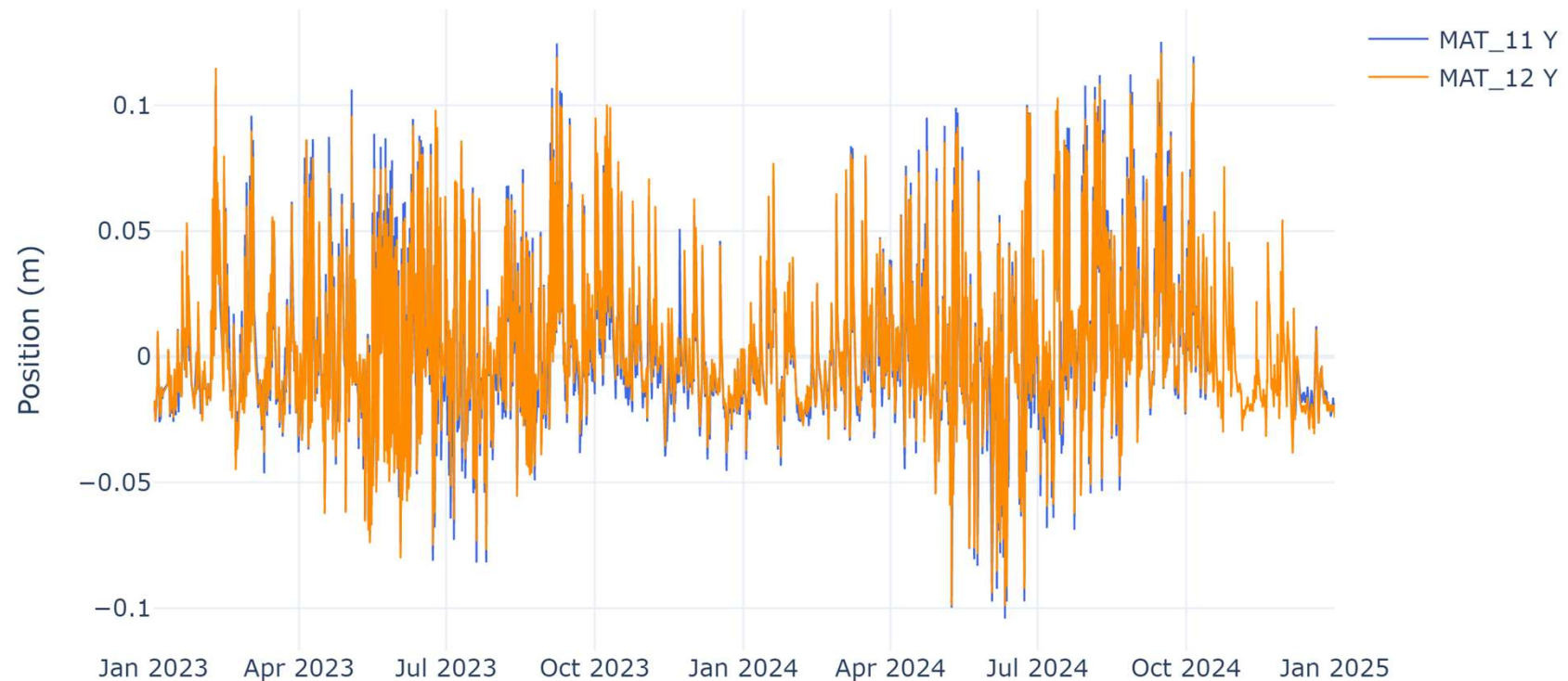
Exemple : mouvements longitudinaux des mâts (2)

Comparaison entre capteur en haut et un au pied du pylône nord :



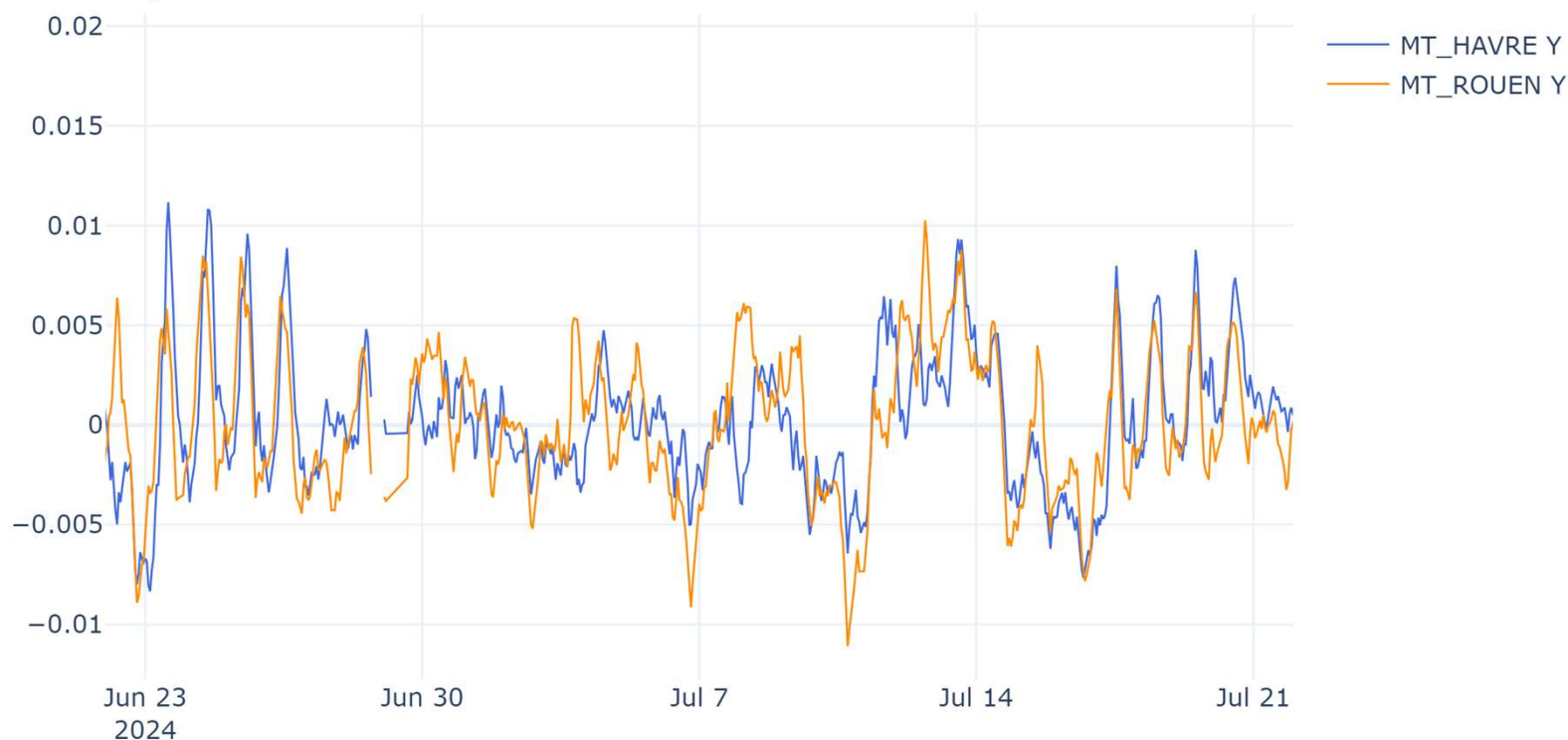
Exemple : mouvements transversaux des mâts (1)

Les mouvements transversaux :



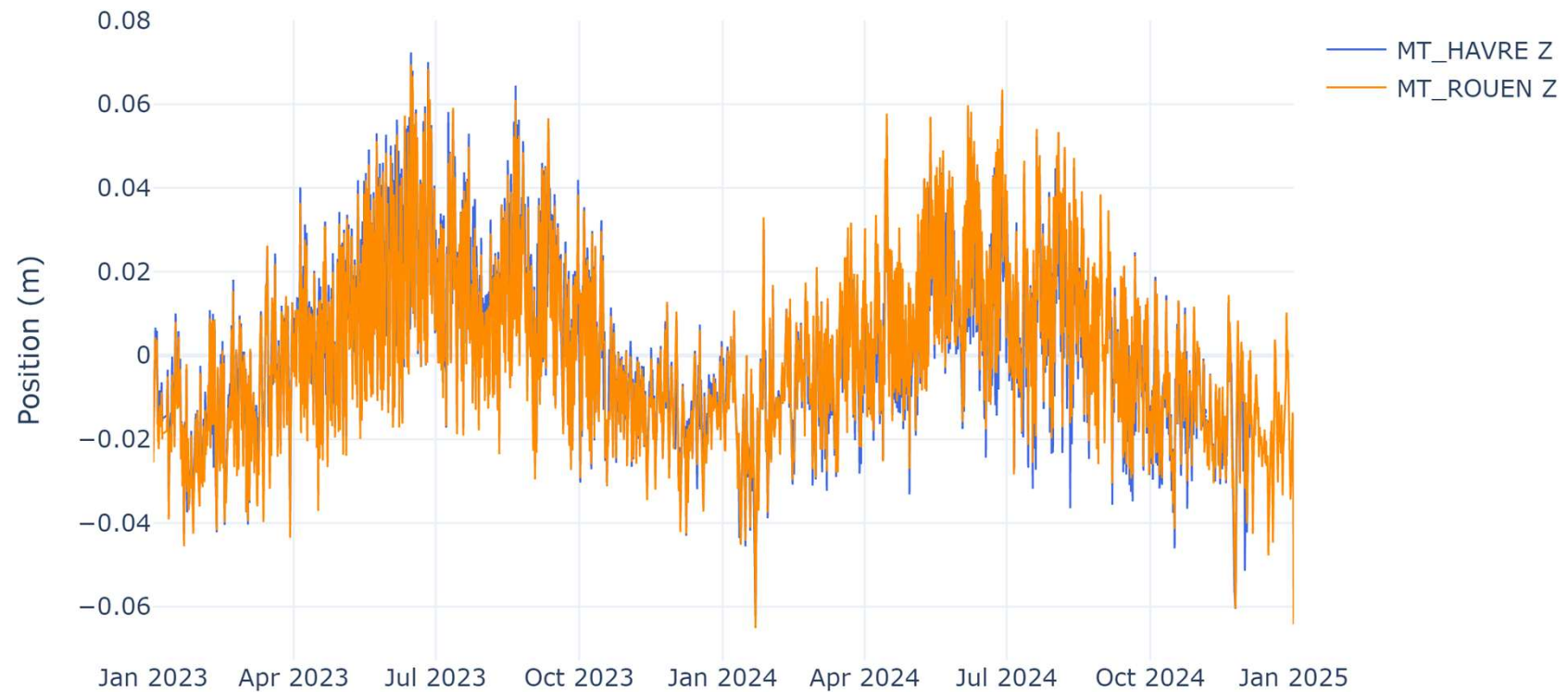
Exemple : mouvements transversaux des mâts (2)

Zoom sur un mois pour mettre en évidence les profils quotidiens très différents (en fonction de l'ensoleillement) :



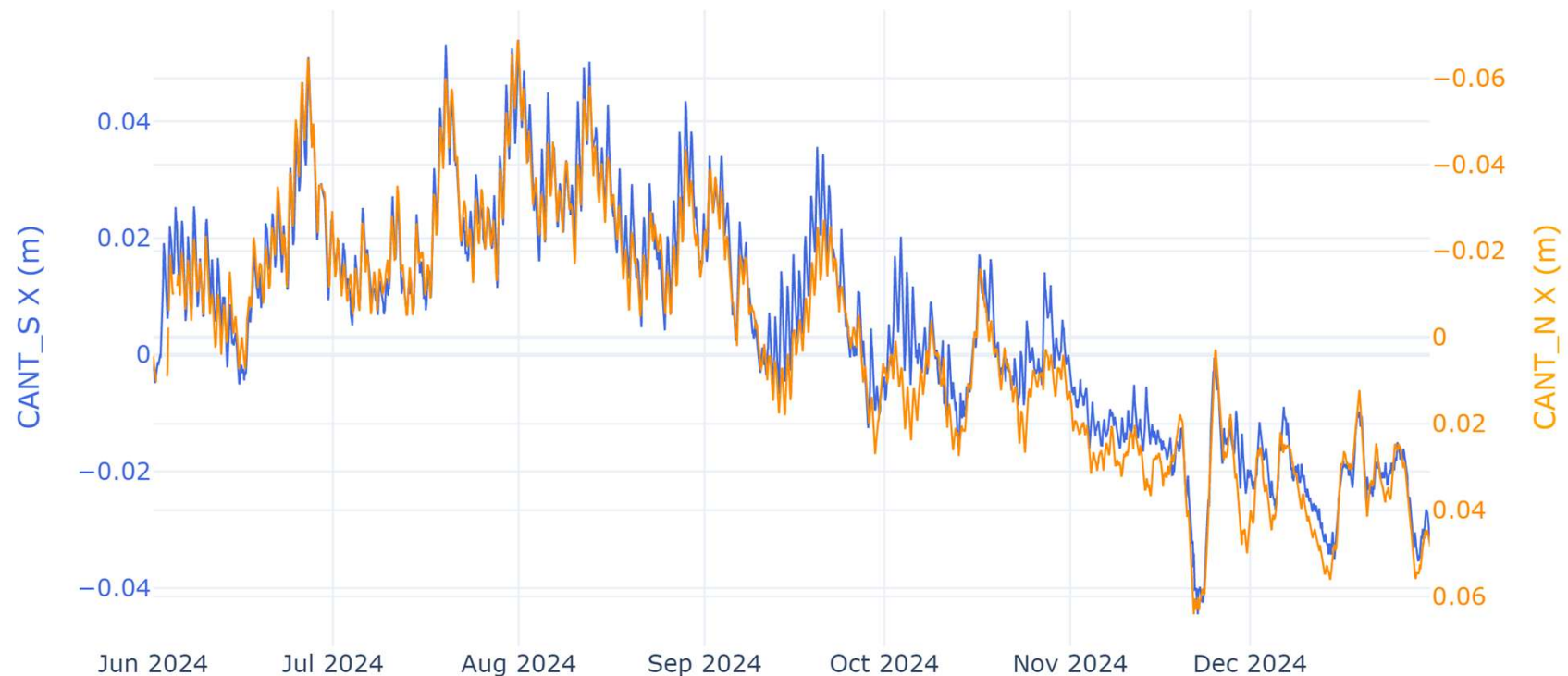
Exemple : mouvements du tablier (1)

Mouvements verticaux au centre du tablier (absence de torsion) :



Exemple : mouvements du tablier (2)

Mouvements du joint entre le tablier et le viaduc d'accès :



Modélisation

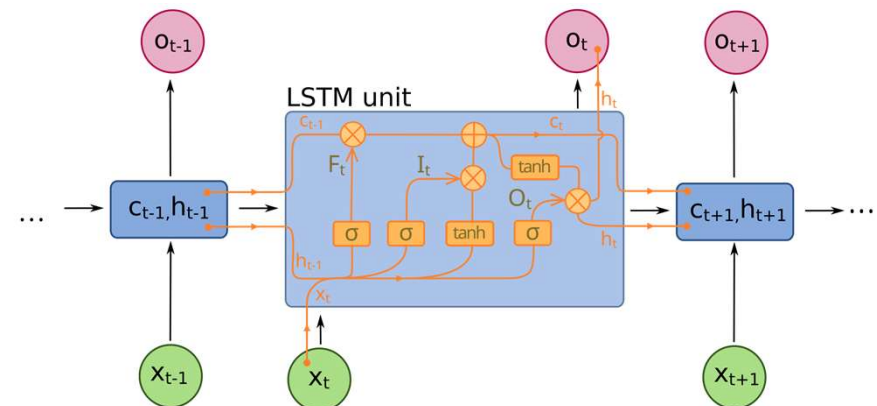
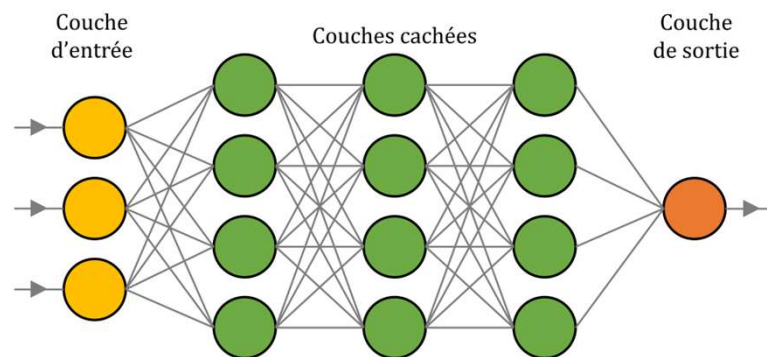
Par apprentissage



Objectif de la démarche

L'approche par modélisation par apprentissage a été choisie pour proposer une référence du comportement des différents capteurs. En date de l'analyse peu de données thermiques étaient encore disponibles. Il a donc été proposé d'apprendre les relations entre les capteurs de différentes parties d'ouvrage.

Pour cela, des modèles en réseaux de neurones LSTM ont été générés :



Contexte de la surveillance par modélisation

En 2019, l'analyse des données GNSS du pont de Brotonne avait déjà fait l'objet d'une étude, utilisant les réseaux de neurones récurrents, suivant une démarche similaire (détection d'écart au comportement prédit) :

- Manzini, N. (2020). *Surveillance de santé structurale des ouvrages d'art incluant les systèmes de positionnement par satellites* (Doctoral dissertation, Université Paris-Est).

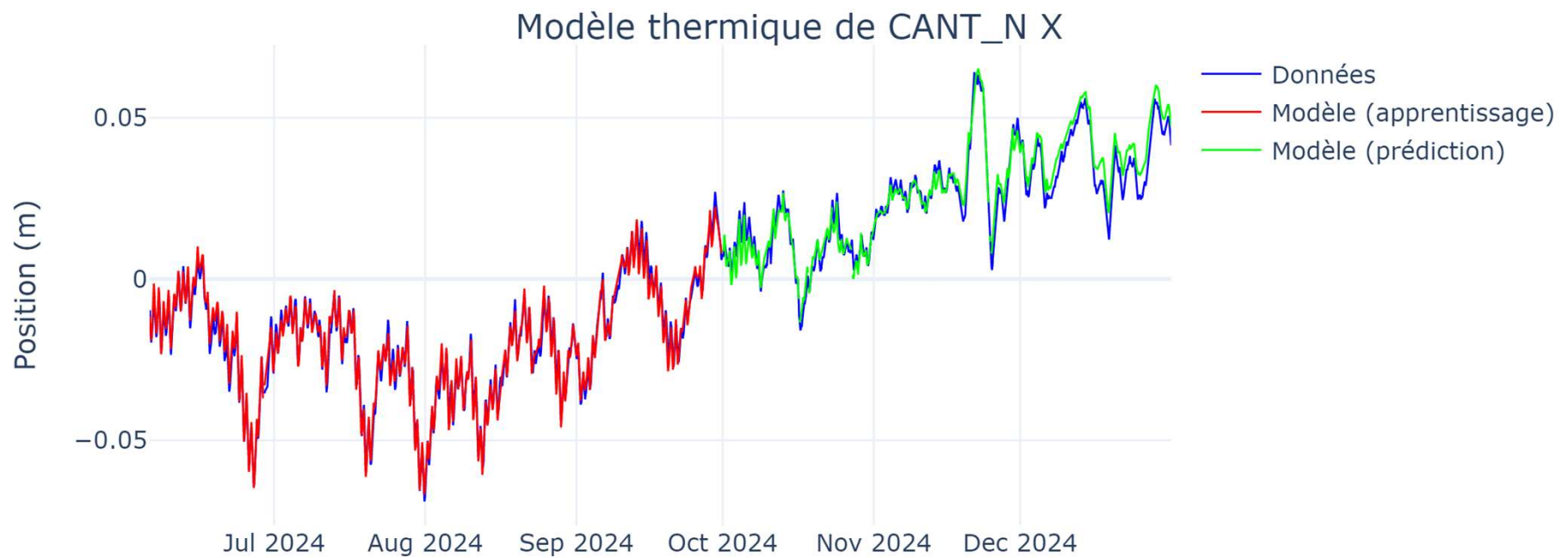
Des anomalies sur les données avaient été détectées. Après un échange avec l'exploitant, il s'est avéré que des dispositifs de chantier (échafaudage lourd, ~60t) installés pour la réfection des peintures étaient la source de mouvements inattendus sur certaines sections de l'ouvrage.

Il est donc apparu pertinent de poursuivre cette démarche, en mettant à jour les outils de modélisation (LSTM vs RNN).



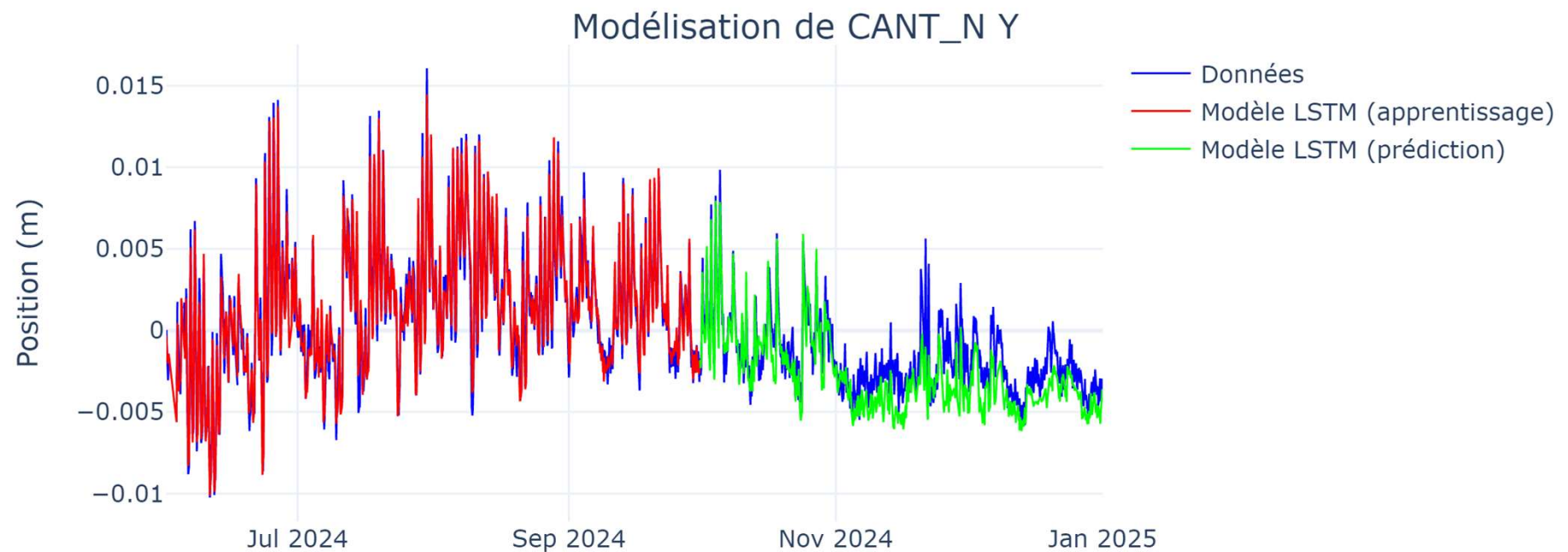
Exemple de modèle par apprentissage (1)

Mouvements longitudinaux du joint viaduc/tablier :



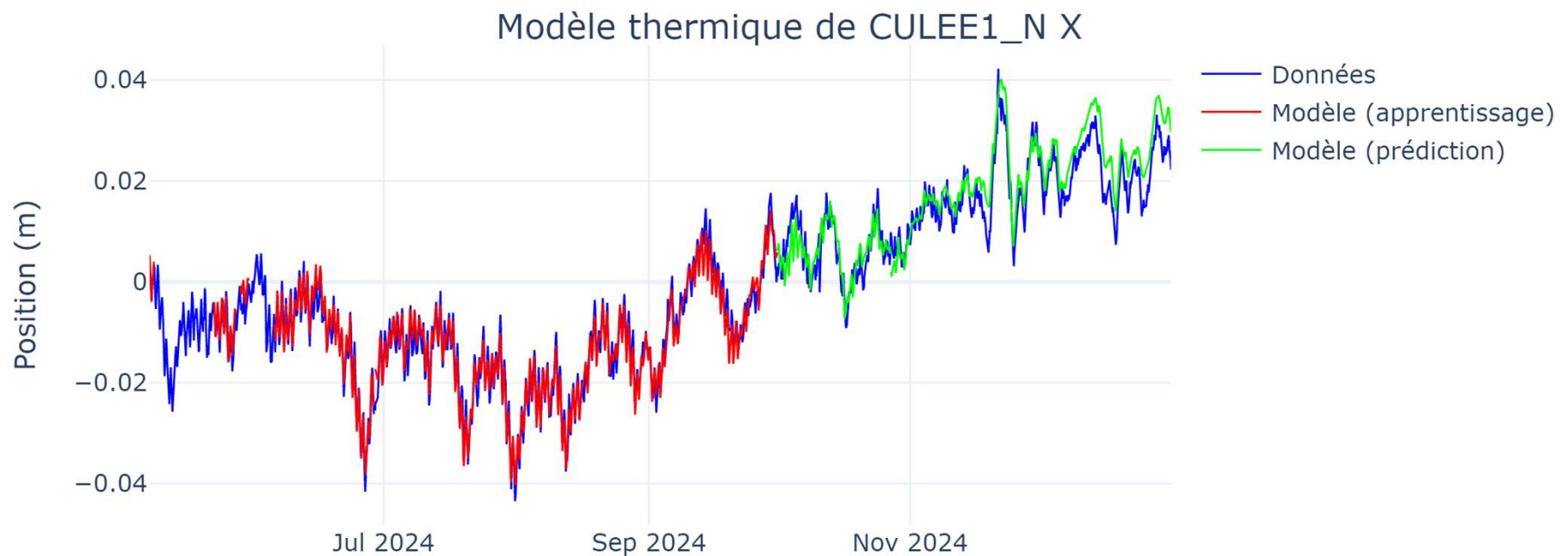
Exemple de modèle par apprentissage (2)

Mouvements transversaux du joint viaduc/tablier :



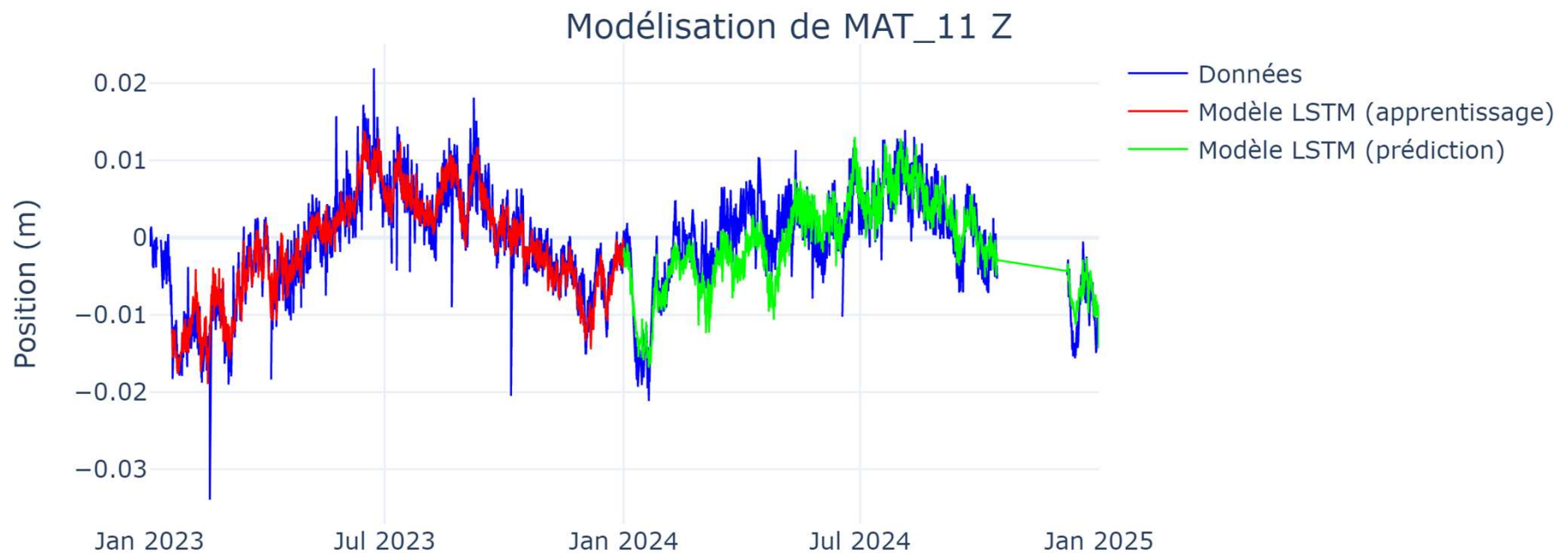
Exemple de modèle par apprentissage (3)

Mouvements longitudinaux du joint de la culée sud :



Exemple de modèle par apprentissage (4)

Mouvements verticaux d'un mât :



Conclusions



Conclusions

- Sur le comportement de l'ouvrage : aucune anomalie significative n'a été identifiée après cette première année de la nouvelle campagne d'instrumentation.
- Les comportements observés sont rattachés aux attentes, et à ceux précédemment observés dans les précédentes instrumentations.
- Un gain de précision et de fiabilité est notable sur les stations GNSS, notamment grâce à l'incorporation du traitement multi-constellation multi-fréquence.
- Précédemment, des modèles RNN avaient été réalisés. Les modèles LSTM se sont avérés plus robustes et plus simples à mettre en œuvre.



Merci pour votre attention





1, avenue Edouard Belin
92500 Rueil Malmaison

+33 1 41 39 02 00

sites@sites.fr | www.sites.fr



Suivez notre actualité



Pour la présentation
et plus d'informations



Contact par email : Nicolas MANZINI