

Traitement des données de la Ligne Grande Vitesse Bretagne Pays-de-la-Loire dans le cadre du projet Minerve

Johann Priou ¹,
Juliette Blanc¹ & Suzy Maddah ² & Thomas Attia ³

2024/2025

¹Université Gustave Eiffel Bouguenais

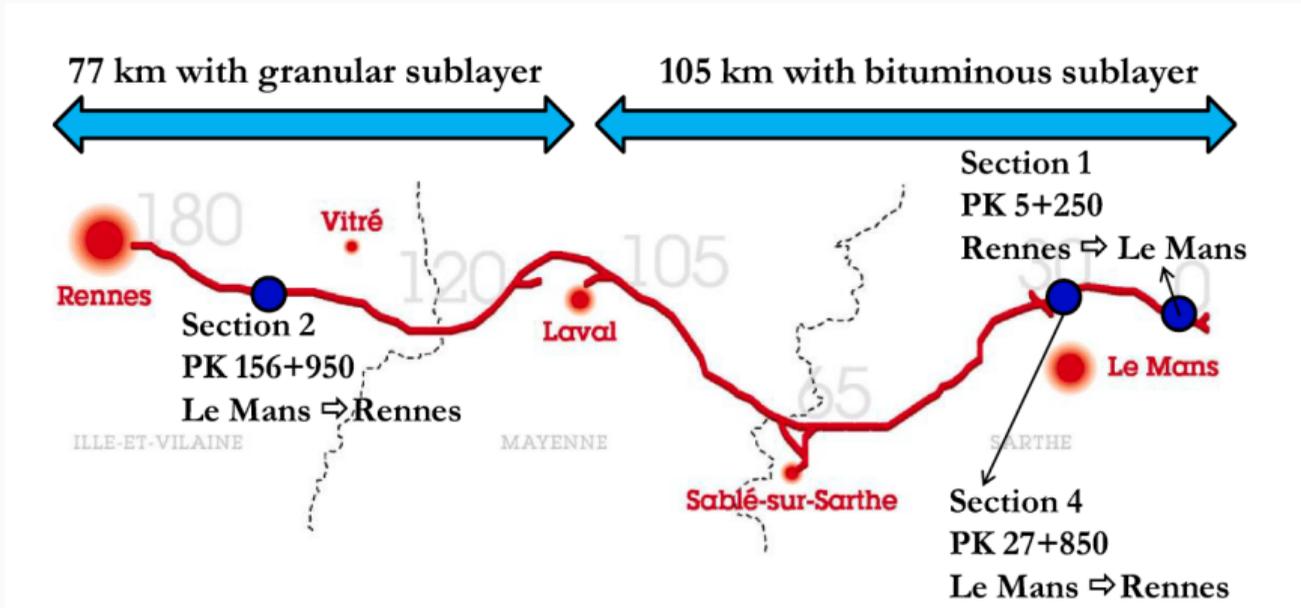
²Eiffage Energie Système

³Eiffage

- Contexte
- Méthode
- Résultats
- Comparaison GB GNT
- Conclusions

Contexte

Instrumentation de la LGVBPL



197 Capteurs sur 4 sections ; accéléromètres, extensomètre, déflexion, météo, humidité

Système d'acquisition et instrumentation



PEGASE boards of section2 PK27+850

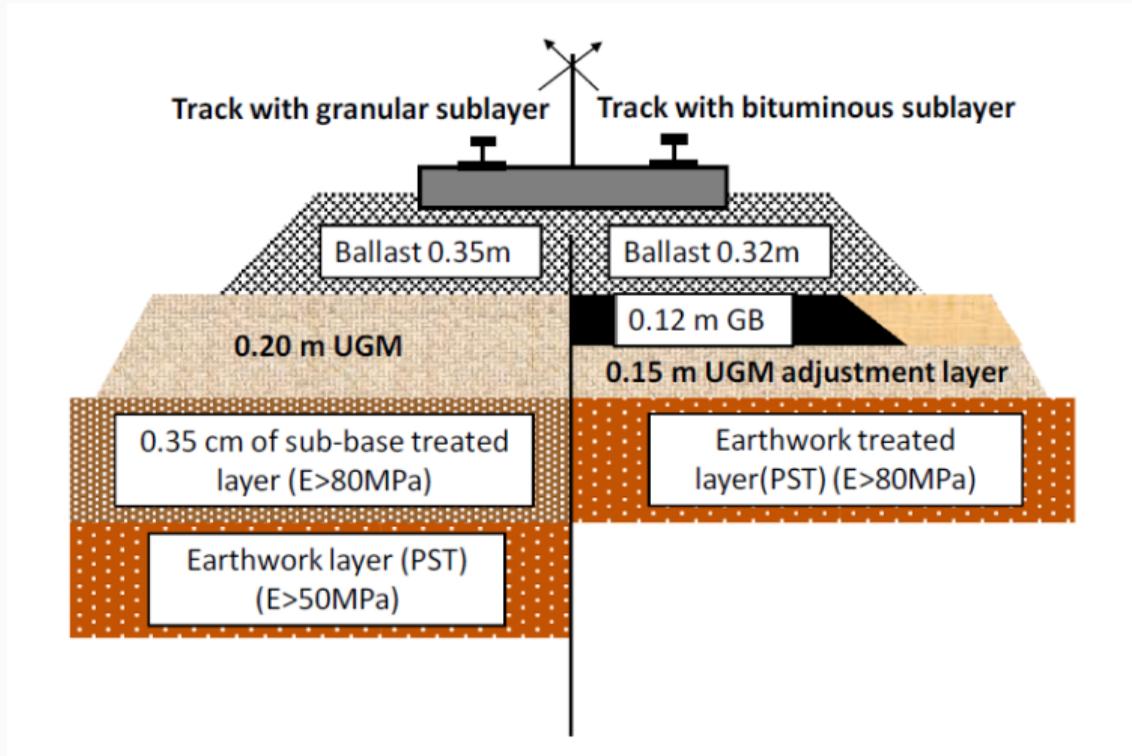


Système d'acquisition installé sur la section 1, PK5+250



Objectif initial de l'instrumentation LGVBPL (avant Minerve)

Mettre en évidence l'intérêt d'une couche de Grave bitume sous le ballast.



Objectif du post-doctorat avec Minerve

Post-doctorat exploratoire :

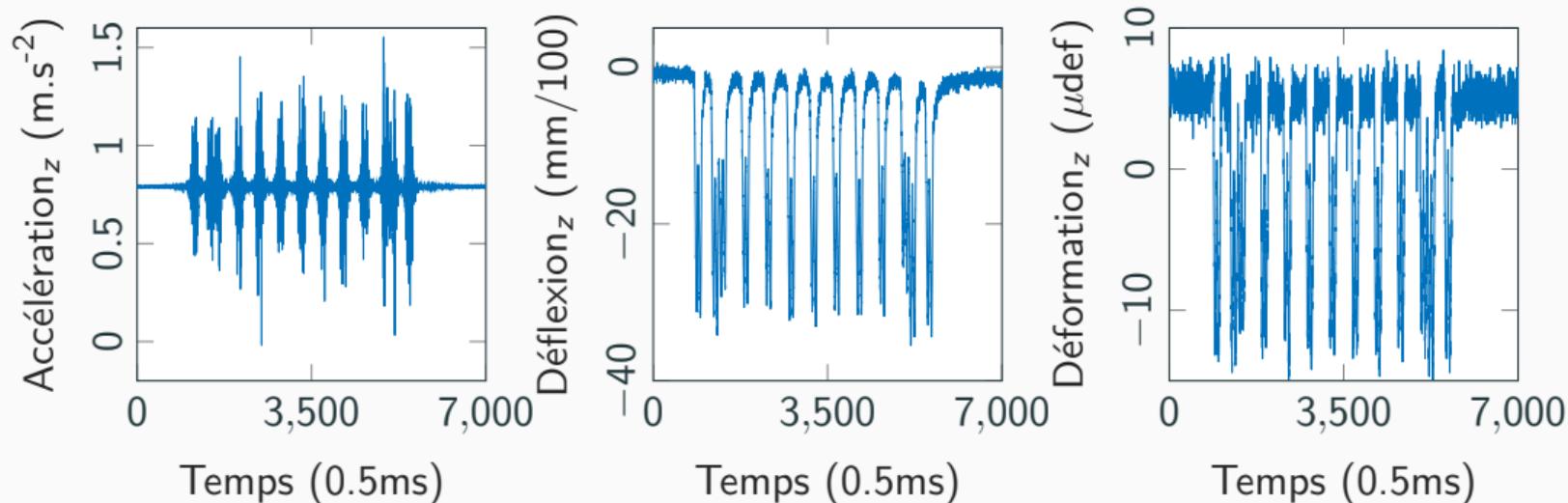
- Définition de nouveaux objectifs :
 - caractérisation de dégradation de voie,
 - quantification de l'apport du GB,
 - prédire les dégradations de voie avec des méthodes type "IA",
 - comprendre la physique des voies et quels sont les paramètres influents,
 - *etc.*

Méthode : Définir des paramètres d'entrée et de sorties permettant de couvrir l'ensemble des objectifs sans exploser le coup de calcul.

Méthode

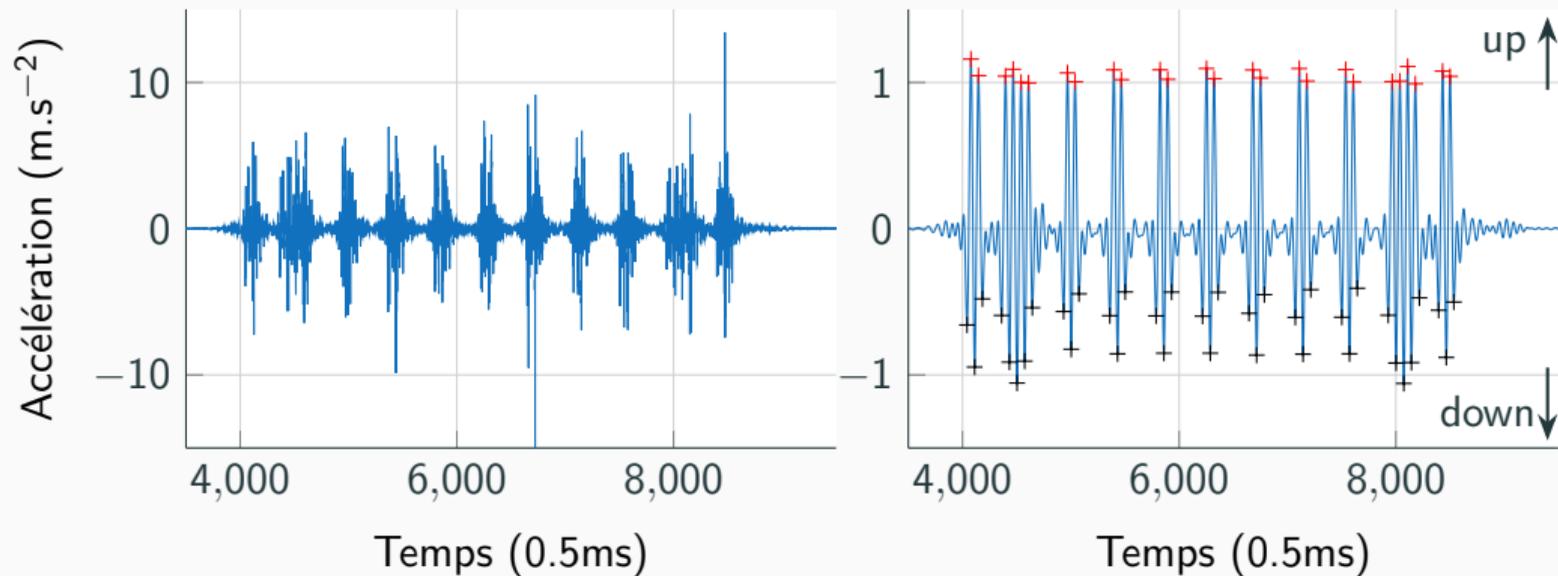
Paramètres d'entrées

Définition : paramètres descriptif du passage de train permettant de caractériser le train, la voie et le passage.



Mesures : accélération verticale à différentes profondeurs, déflexion et déformation verticale dans la GNT

Traitement du signal d'accélération

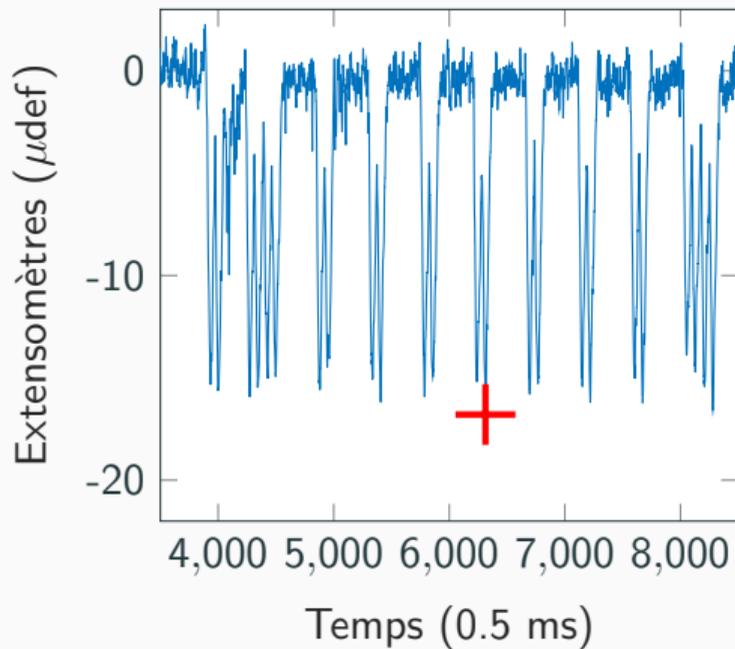
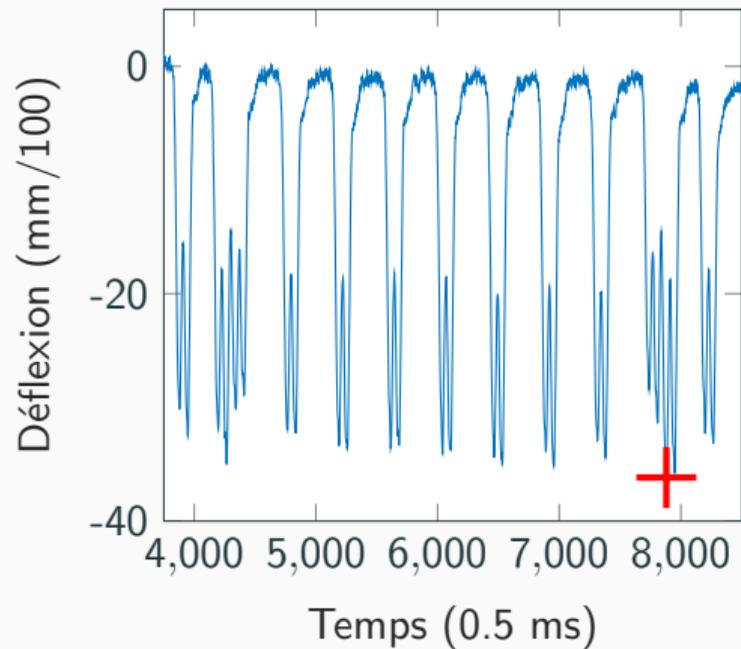


Détermination de chaque pic positif et négatif

⇒ Accélération par moyenne des pics

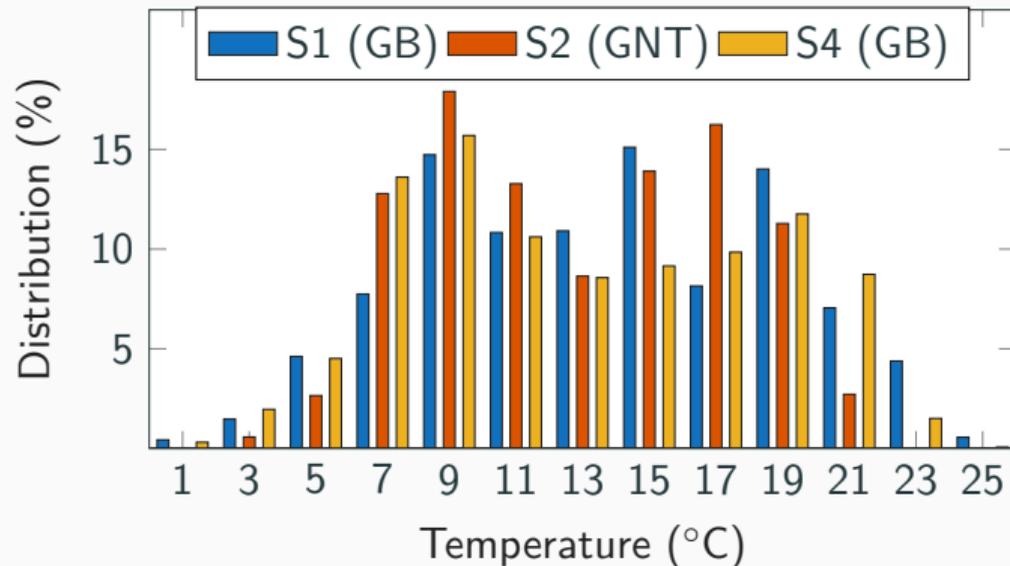
⇒ Vitesse moyenne de chaque bogie simple

Signal de déflexions et extensomètres



⇒ Détermination de la déflexion et de la déformation verticale maximales

Températures sur les Sections 1, 2 et 4 pendant les 8 années de mesures



Distribution bi-modale :

- Section 1 :

- $\mu_{\text{Hiver}}^T = 9.84^\circ\text{C}$

- $\mu_{\text{Été}}^T = 17.96^\circ\text{C}$

- Section 2 :

- $\mu_{\text{Hiver}}^T = 8.64^\circ\text{C}$

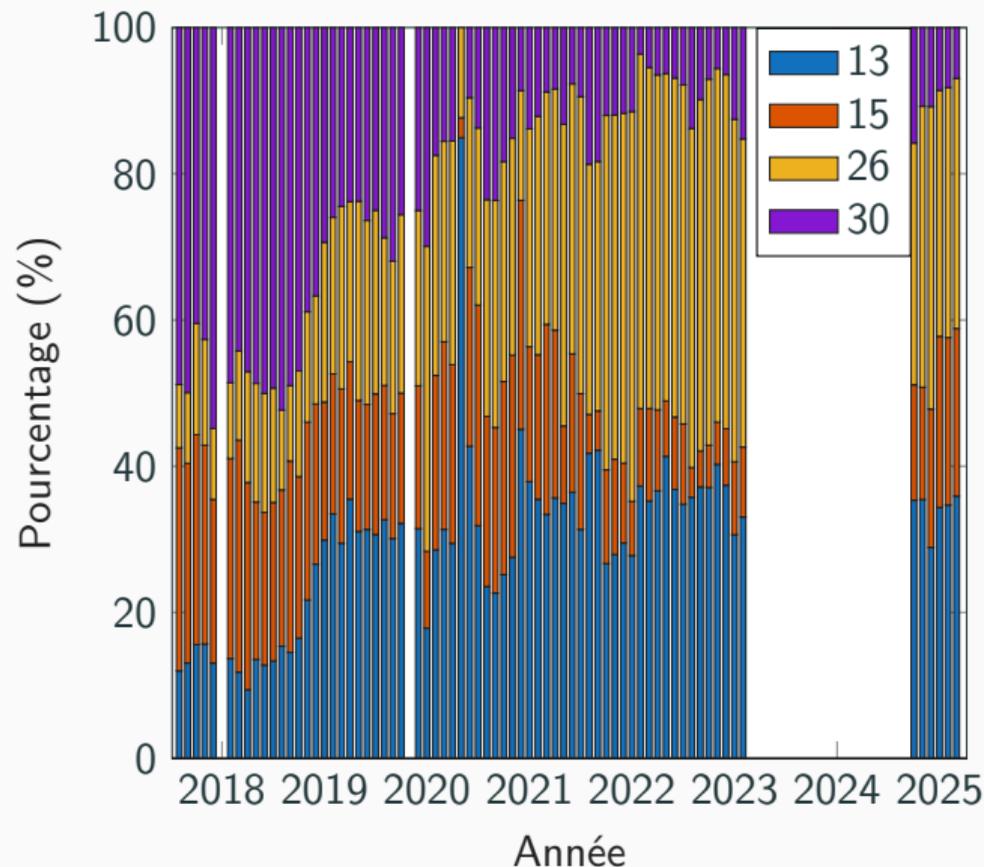
- $\mu_{\text{Été}}^T = 15.94^\circ\text{C}$

- Section 4 :

- $\mu_{\text{Hiver}}^T = 9.14^\circ\text{C}$

- $\mu_{\text{Été}}^T = 18.16^\circ\text{C}$

Répartition mensuelle des types de train pour la section 4



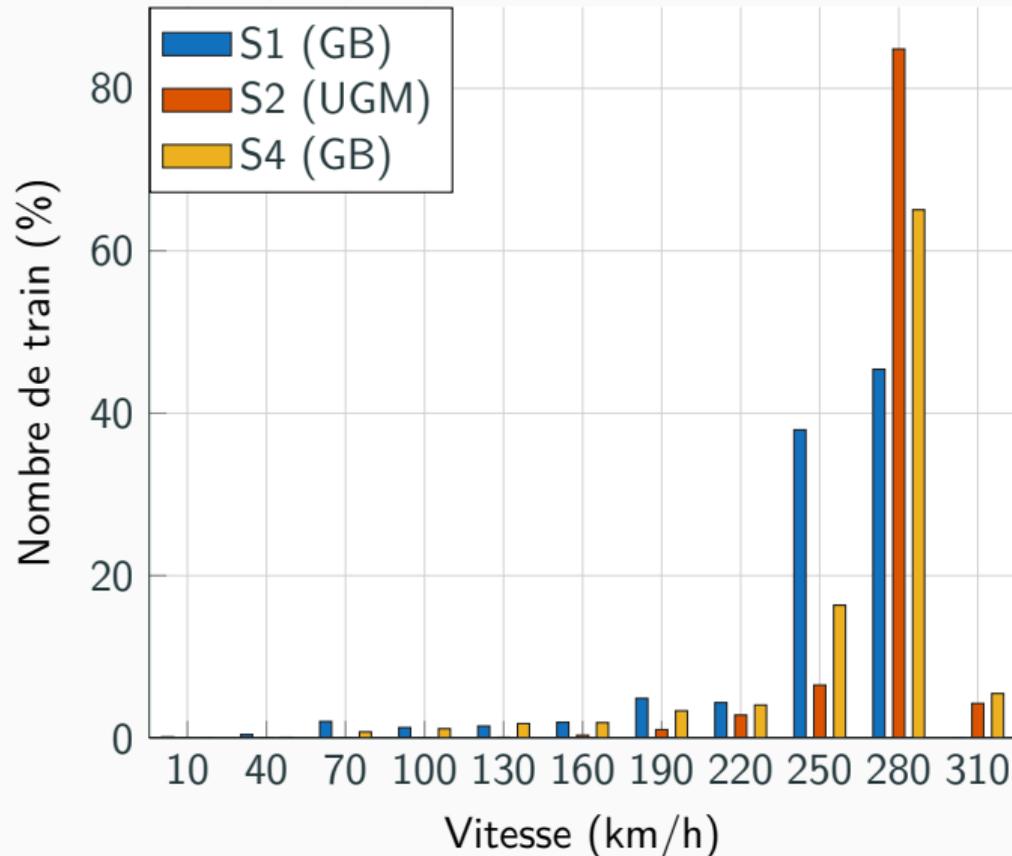
Sélection du type de train :

⇒ diminuer les variables

- 13 bogies : $36\% \pm 22$
- 15 bogies : $18\% \pm 13$
- 26 bogies : $27\% \pm 15$
- 30 bogies : $19\% \pm 16$

⇒ Trains à 13 bogies.

Diagramme des vitesses pour les Sections 1, 2 et 4

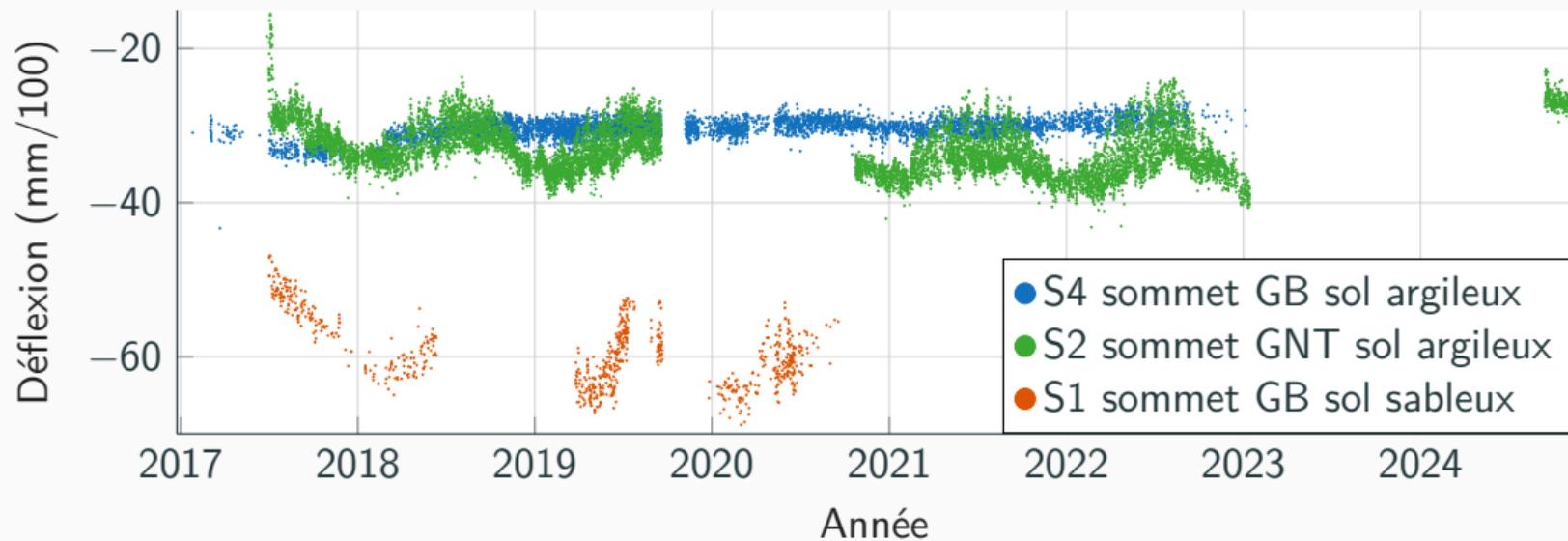


L'intervalle de vitesse possédant le plus grand nombre de train est : 270 – 300 km/h.

Les prochaines figures présenteront les trains de 13 bogies ayant des vitesses entre 270 et 300 km/h.

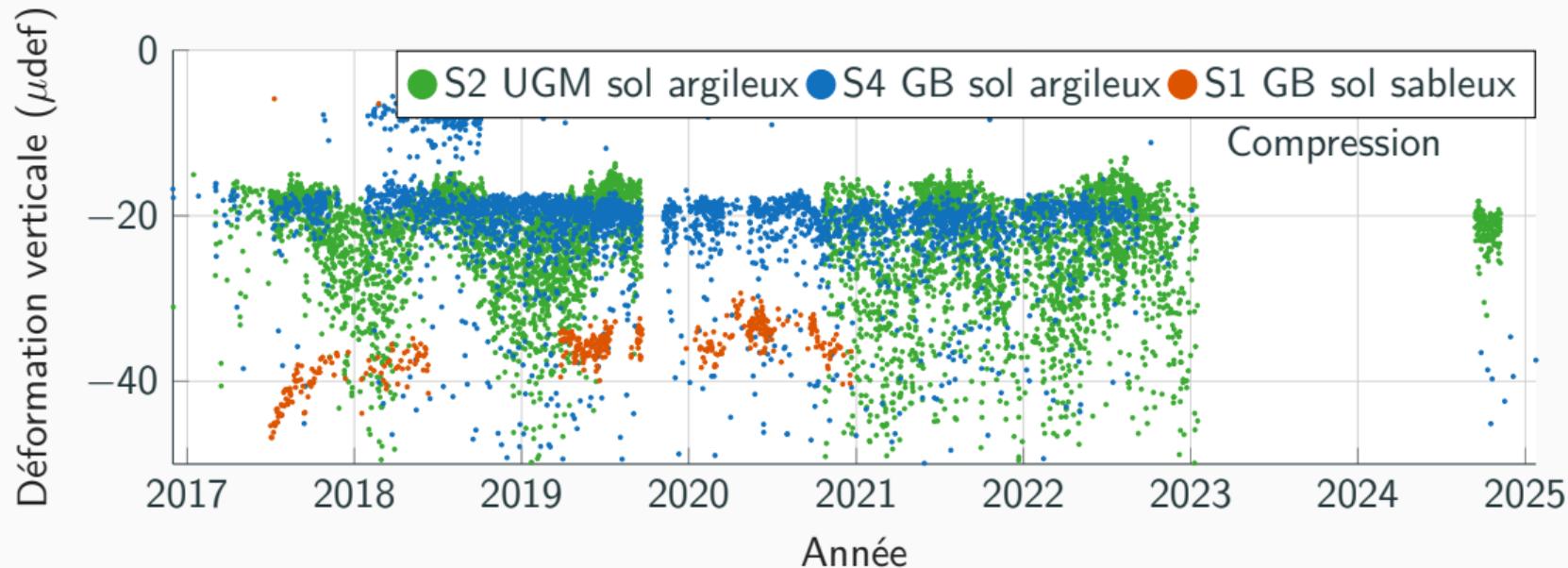
Résultats

Évolution des déflexions durant les 8 ans de mesure



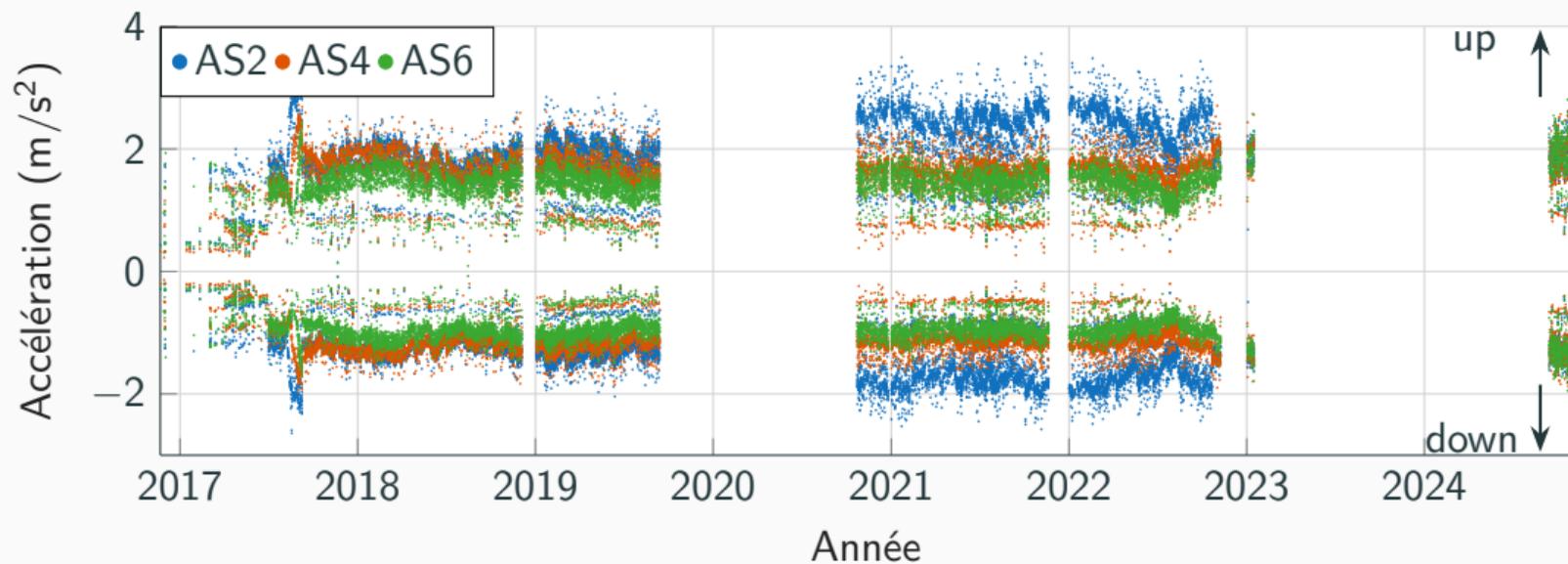
- Déflexions relativement proches sur les sections 2 (GNT) et 4 (GB) avec des variations saisonnières plus importantes sur la section avec GNT
- Déflexions plus importantes sur la section 1 (GB) présentant un sol sableux

Évolution des déformations verticales durant les 8 ans de mesure



- Déformations verticales relativement proches sur les sections 2 (GNT) et 4 (GB) avec plus de variations saisonnières avec sous couche en GNT
- Déformations verticales plus importantes sur la section 1 (GB) présentant un sol sableux

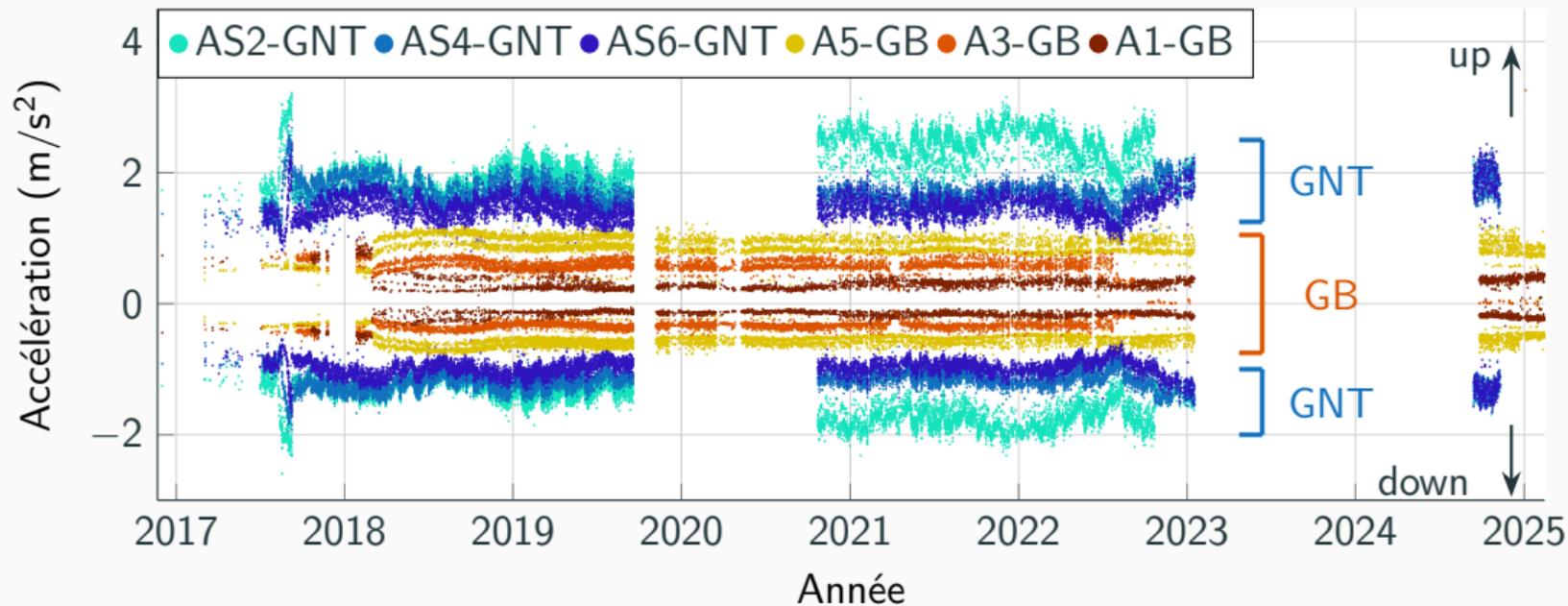
Évolution des accélérations verticales sur la section sous couche en GNT (accéléromètres situés au sommet de la GNT, sous le rail extérieur)



Pas d'évolution des valeurs d'accélérations durant les huit ans de mesure

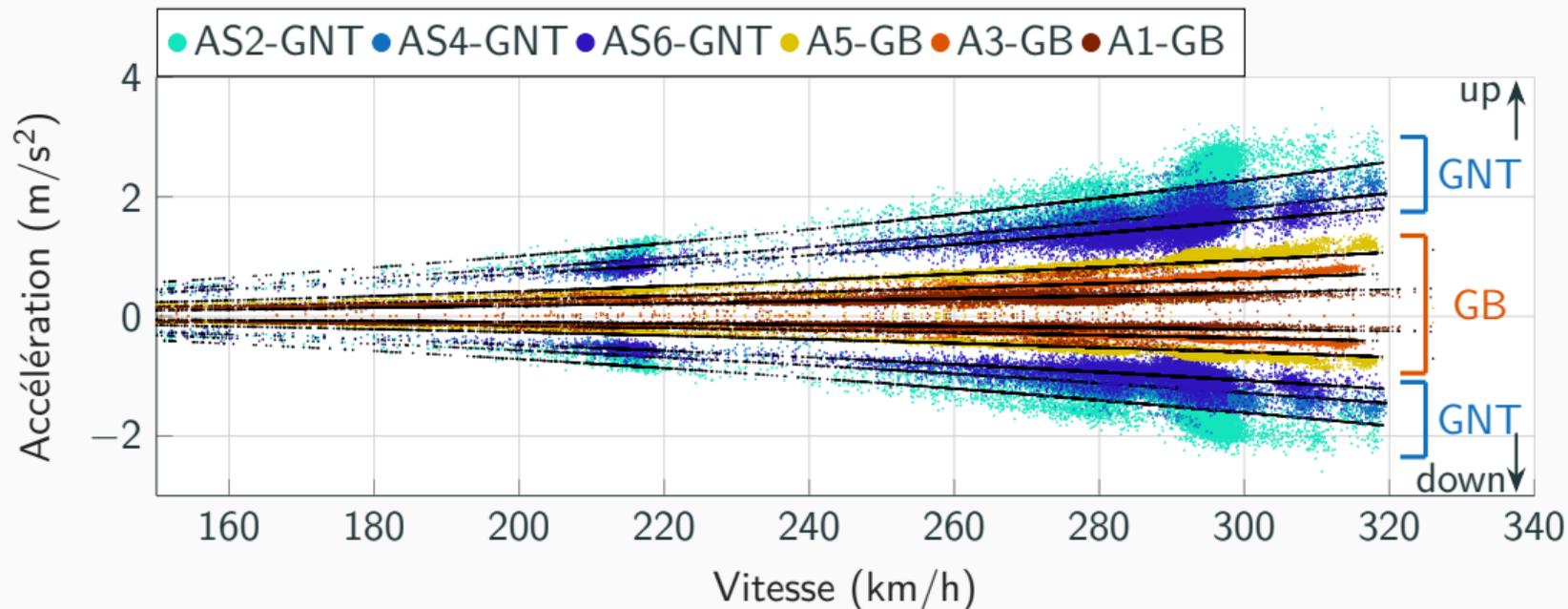
Comparaison GB GNT

Comparaison entre les mesures d'accélération sur les sections bitumineuses et granulaires



Réduction des accélérations verticales d'un facteur au moins 2, par l'insertion d'une couche de GB, même après 8 ans

Évolution des accélérations verticales sur les sections GNT et GB, en fonction de la vitesse



Évolution quadratique des accélération en fonction de la vitesse \Rightarrow Réduction de cette évolution d'un facteur au moins 2, par l'insertion d'une couche de GB

Conclusions

- L'instrumentation est toujours fonctionnelle 8 ans après.
- Pas d'évolution des mesures pouvant indiquer un endommagement de la voie, même après 8 ans.
- La couche de GB permet de réduire d'un facteur 2 les accélérations verticales.

Modelling the Impact of Linear Infrastructure on Species Migrations in a Changing Climate: Building a surrogate model for RangeShifter

Jean-Baptiste Page¹, Didier Clouteau¹, Pierre Jehel¹, Filippo Gatti¹, Carmen Bessa-Gomes²

¹Université Paris-Saclay, CentraleSupélec

LMPS - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay ²Laboratoire Écologie, Systématique et Évolution – IDEEV

08/10/2025

0 / 20

Sommaire

Introduction

Progress

Discussion and prospects

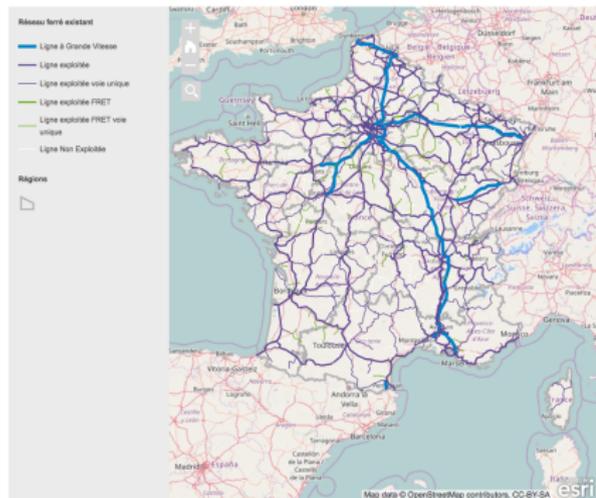
Discussion and prospects

Annex

0 / 20

The SNCF network

CARTE INTERACTIVE DU RÉSEAU FERRÉ FRANÇAIS



French rail network :
50km/1000km² (Germany :
108, Spain : 31, Italy : 56) 1
national parks (25% surface
area), 7269 threatened species

Important migrations to come
within the territory

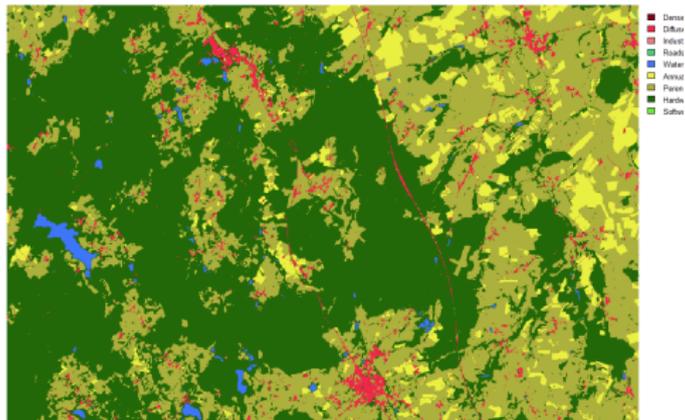
France is one of the first
countries concerned by climate
change impact on ecological
population migration

The Data question

- ▶ Experiences to check the impact of infrastructure section on migration : ecological corridor vs barrier.
- ▶ Need to use a population movement simulation algorithm to generate enough simulations given a landscape focused on the SNCF infrastructure.
- ▶ Need for large amounts of data to establish a robust model.
- ▶ Lack of surveys along roadsides, both for species presence and their approach behavior.
- ▶ In physics/engineering : generation of data using simulation tools, possibly supplemented by machine learning when the cost of computation becomes significant

The RangeShifter algorithm

Main features



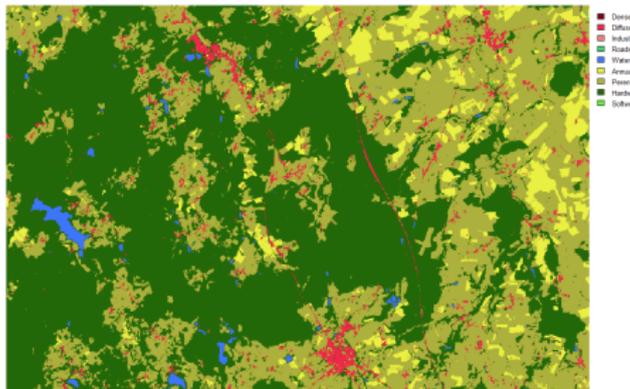
Algorithm for population modeling using an individual approach

Ecology of movement, reproduction and genetics spatial and temporal dimensions aspect with populations by stages (juveniles, young adults, adults) with survival and reproduction rates.

Raster maps with cells characterized by their sustenance index K as well as their relative resistance to movement (surface resistance value)

The RangeShifter algorithm

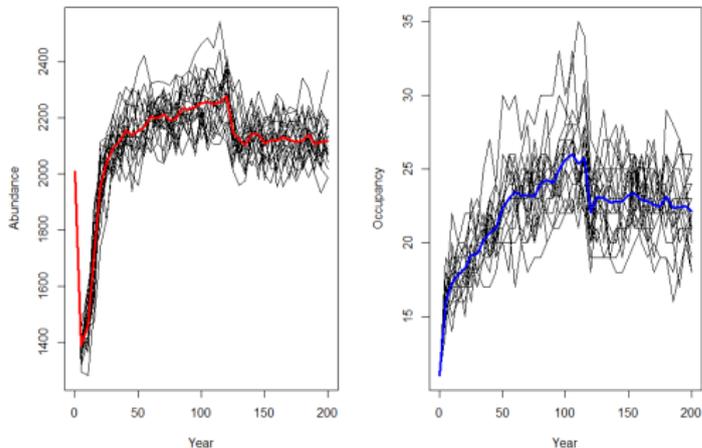
The dispersion model



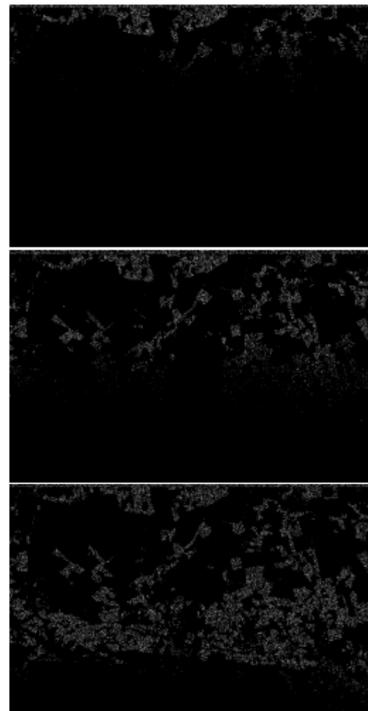
- ▶ Dispersion model : stochastic movement
- ▶ Random draw among the 4/8 neighbours
- ▶ Direction bias : decreasing probability with the angle of your next move and the previous ones. Limited memory
- ▶ Installation/emigration decision : decision in $\text{softmax}(\frac{N}{K})$

The RangeShifter algorithm

Dispersion model



- (a) Reference : RangeShifter : a platform for modelling spatial eco-evolutionary dynamics and species' responses to environmental changes, Bocedi et al, 2014
Introducing a 'stochastic movement simulator' for estimating habitat connectivity, Palmer et al., 2011



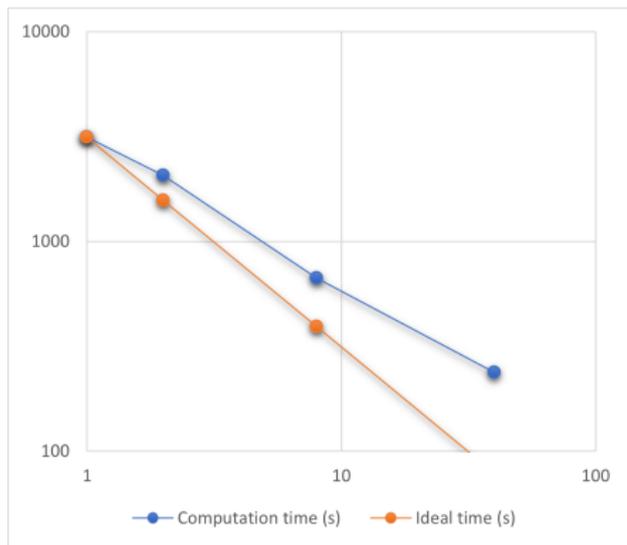
- (b) Population diffusion maps
at years = 15, 20, 25

5 / 20

Problem statement

- ▶ Climate change : need to assess the impact of railway infrastructure on migrating species
- ▶ Data requirements : Théia maps (10m resolution)
- ▶ Simulation tool available RangeShifter : agent-based model moving on a rasterized map, possibility to configure reproduction, movement (stochastic), mortality, settlement/migration
- ▶ Calculations too complex for maps >10 km over dozens of breeding seasons
- ▶ 1st solution : speed up the RangeShifter code
- ▶ 2nd solution : build a model similar to RangeShifter, which significantly improves simulation time while controlling the error compared to the original simulation (substitution model).

OpenMP parallelization



Duration of a 50-year simulation, 1 replicate in seconds depending on the number of CPU cores used

- ▶ 50 years 1 replica : 3200s (~1h)
- ▶ Parallelization using OMP processes for acceleration
- ▶ HDF data output format
- ▶ Now : 1 replica 50 years in ~6 min and ~ 5-10 GB output files

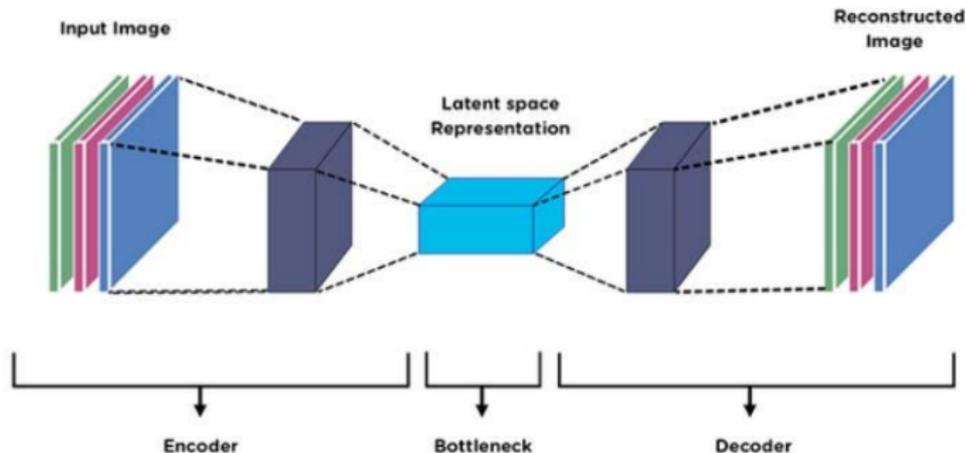
Dataset generation process

- ▶ Maps and parameter files from Job Aben's work.
- ▶ Database of 364 landscapes measuring 1000x1000 pixels from the Thèia database (10m resolution) with a 10-pixel wide strip at the bottom for population initialization.
- ▶ Scenario of northward migration of a population starting from the south, interaction with a railway line.
- ▶ A set of species parameters : butterflies, *Maniola jurtina*
- ▶ Simulations over 50 years and 20 replicates
- ▶ So far : 100 landscapes have been simulated
- ▶ Transformation of population files into a 1010x1000 map with the number of individuals for each year of each replicate
- ▶ 102,000 maps



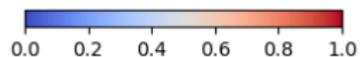
Data compression

- ▶ Data to be generated : size $\sim 1,000,000$, too heavy to train a model or for inference
- ▶ Need for data compression
- ▶ Use of an autoencoder to compress the conditioning data (encoder) and then to decode the generative model's prediction (decoder)
- ▶ Import of a pre-trained autoencoder model used in Standard Diffusion
- ▶ For optimal reconstruction, the inputs are the maps copied onto 3 channels

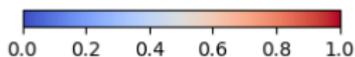
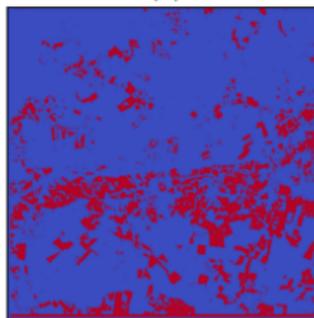


Examples of maps reconstruction

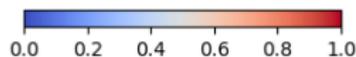
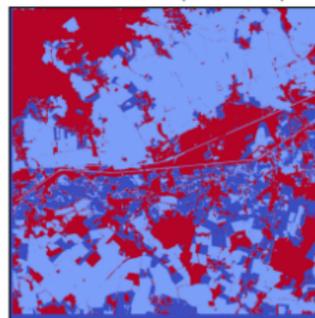
Population map



Landscape sustainability (k)



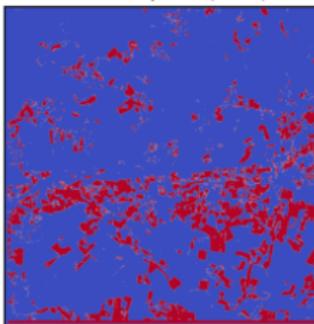
Landscape cost of movement (costhab)



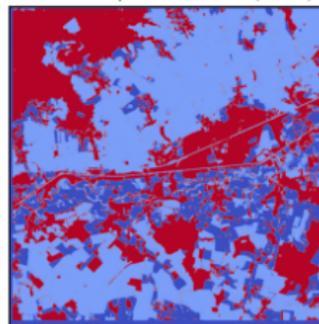
Population map (VAE)



Landscape k (VAE)

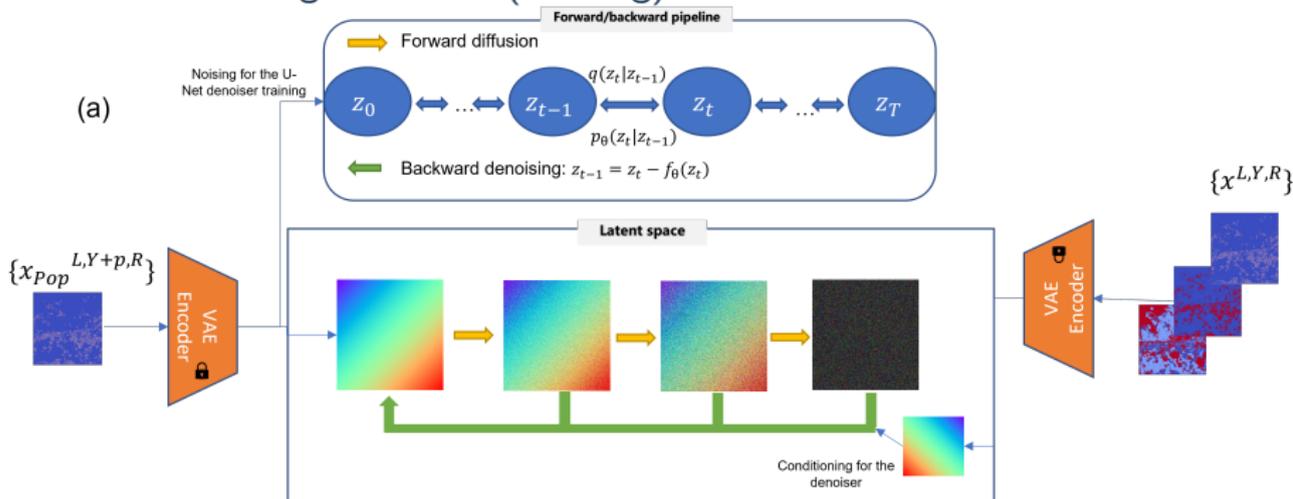


Landscape costhab (VAE)



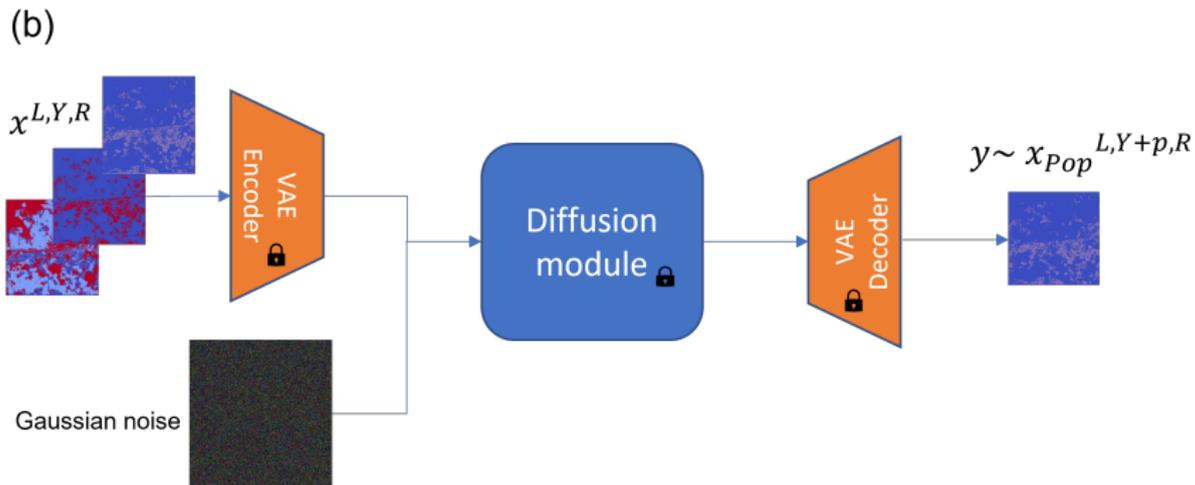
10 / 20

Architecture Surrogate Model (training)

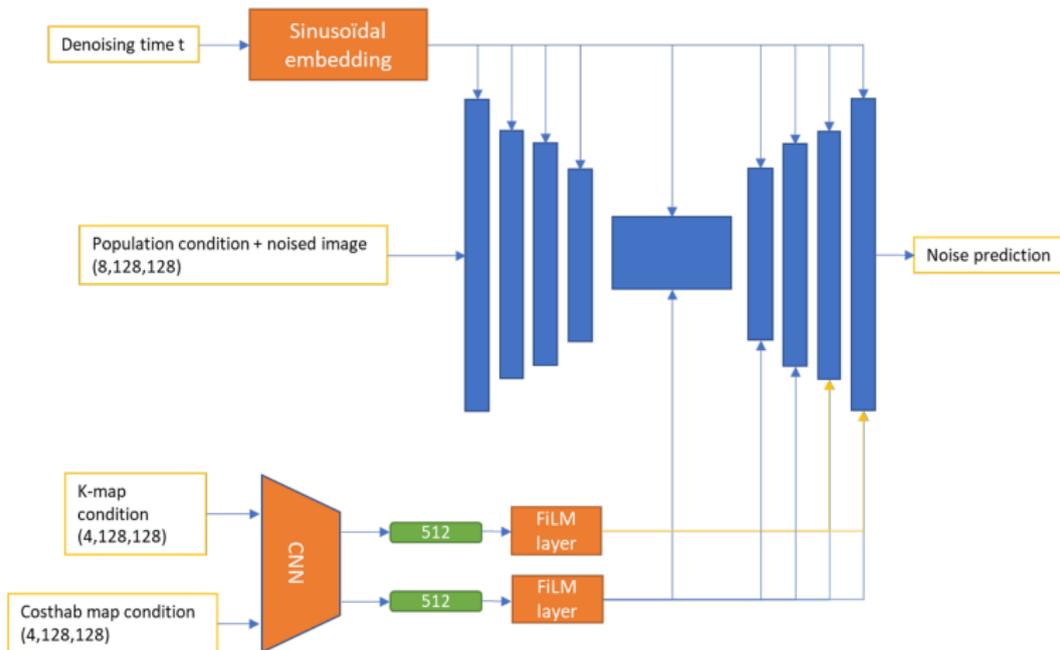


- ▶ Training of three models for $p=1,5,10$
- ▶ Calculation of loss in latent space to avoid interference related to imperfect reconstruction of the decoder. The MSE calculates the difference between the noise predicted by the denoiser and the noise effectively added during the forward diffusion phase.
- ▶ Training over 50k steps with a late validation loss of $\sim 10^{-3}$

Architecture Surrogate Model (inference)

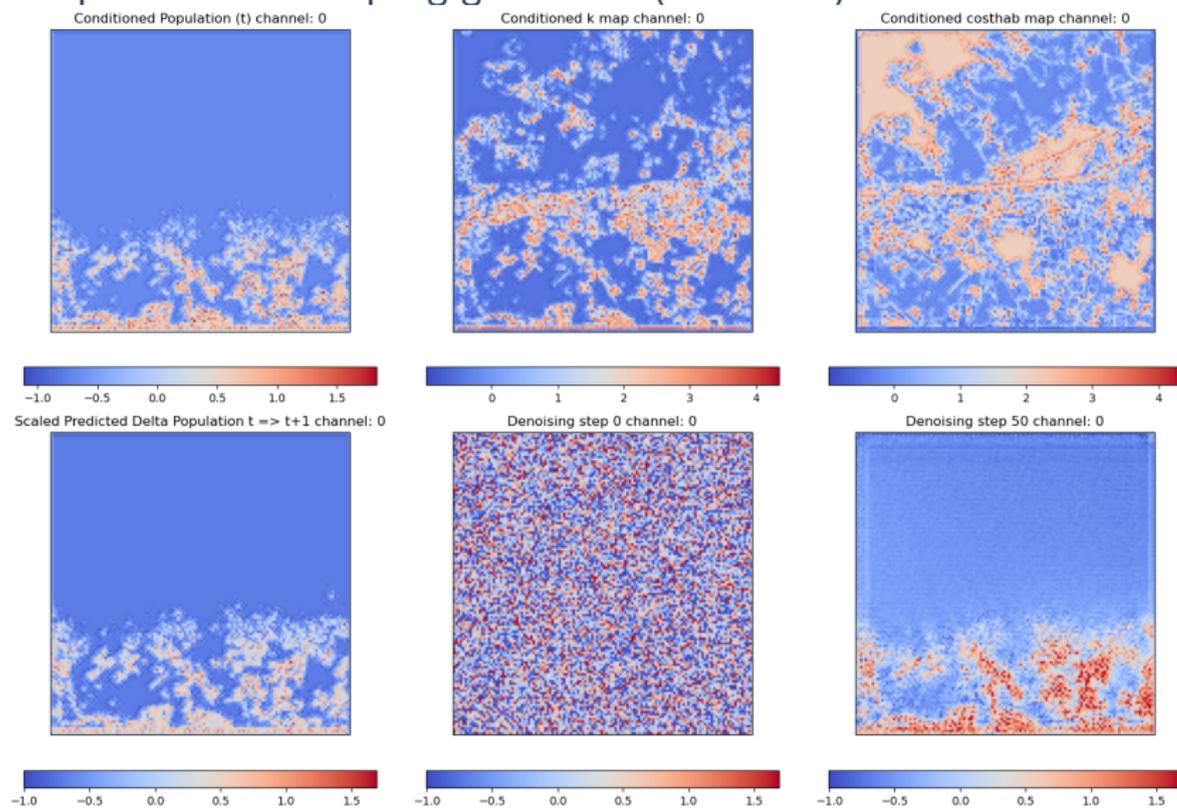


Denoiser architecture

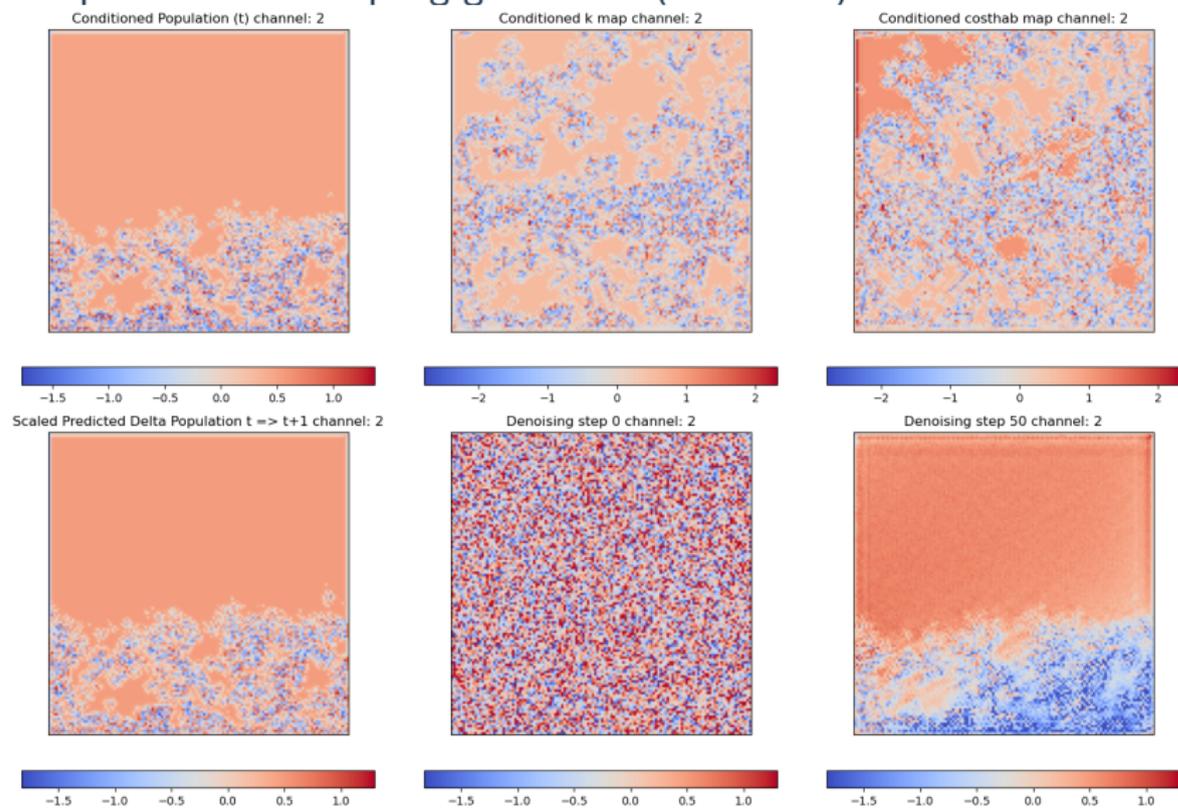


FiLM layer : affine recalibrage of the tensor in the Unet, the affine coefficients are calculated from the landscape conditioning (K-map and costhab-map)

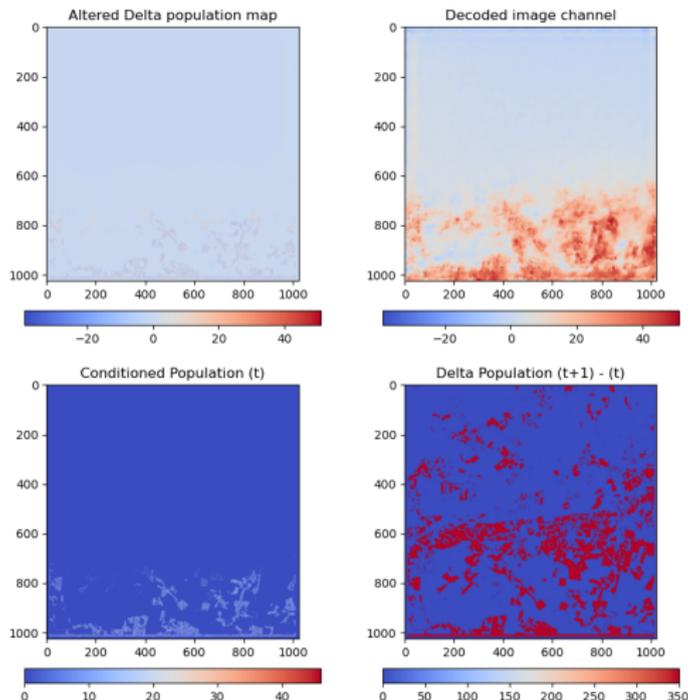
Example of latent sampling generation (channel 0)



Example of latent sampling generation (channel 2)



Decoding of the latent sampling generation



Observation : the residual noise in the latent sampling causes a background noise in the decoded map

Problem of value level
Maps must be reworked to be used in any test (ex : filtering by a threshold value)

- ▶ Short-term : obtain a better sampling method and ecologically relevant maps.
- ▶ Ecologically relevant tests : % of uninhabitable where population is > 0 , width ; difference in depth between the progression front on the original algorithm and that of the surrogate
- ▶ Verify the stability of the prediction over 1/5/10 years and performance by iterating up to 50 years.
- ▶ Test the prediction of the difference between two time steps, rather than the following year (better stability with lower values to predict)
- ▶ Extension to several species ; redo the learning base, slightly change the architecture and learning of the model to integrate the parameter vector.
- ▶ Longer term : proposition of a large-scale framework to test the effect of railway infrastructure on range-shifting species and possible amenities.

Thank you for your attention

- ▶ Coût effectif d'une cellule : $C'_{k,l} = C_{k,l} + \sum_{(m,n) \in \mathcal{V}(k,l) | \mathcal{V}(i,j)} C_{m,n}$
- ▶ Probabilité de tirage cellule : $\mathbb{P}(i,j) = \frac{\frac{1}{c'_{i,j}}}{\sum_{i',j'} \frac{1}{c'_{i',j'}}$
- ▶ $dX_t = A(X_t, Z)$ avec $Z \sim \mathcal{N}(0, 1)$ et $A(X_t, Z) = \mathbb{1}(Z \leq q_1(X_t)) - \mathbb{1}(Z \geq q_{-1}(X_t))$
et $p_{\pm 1}$ les quantiles des probabilité d'aller à gauche /droite
- ▶ On peut écrire : $\begin{cases} dX_t = A(X_t, Z_t) \\ dZ_t = dW, \text{ avec } dW \text{ un mouvement brownien} \end{cases}$
on retrouve une équation d'Ito : $dU = v(U, t) + AdW$ pour $U = (X, Z)$,
 $v(U, t) = (A(X, Z), 0)$ et $A = (0, 1)$, ce qui correspond à un processus de diffusion

$C'_{1,-1}$	$C'_{1,0}$	$C'_{1,1}$
$C'_{0,-1}$	X_t	$C'_{0,1}$
$C'_{-1,-1}$	$C'_{-1,0}$	$C'_{-1,1}$

- ▶ Mouvement markovien dans le cadre d'une DP=1
- ▶ $C'_{i,j}$: coûts effectifs de chaque cellule
- ▶ Evolution de X : $dX_t = X_{t+1} - X_t$
- ▶ X_t suit un processus de diffusion non-linéaire, on peut retrouver une équation d'Ito avec l'ajout d'une variable-outil
- ▶ Possibilité d'utiliser les outils mathématiques d'étude des processus de diffusion pour le comportement à long terme

Un pipeline pour la segmentation de grands nuages de points ferroviaire

GABRIELIDIS Hugo

Supervisée par : VIALLE Stephane, GATTI Filippo

October 3, 2025



Description Jumeau Numérique

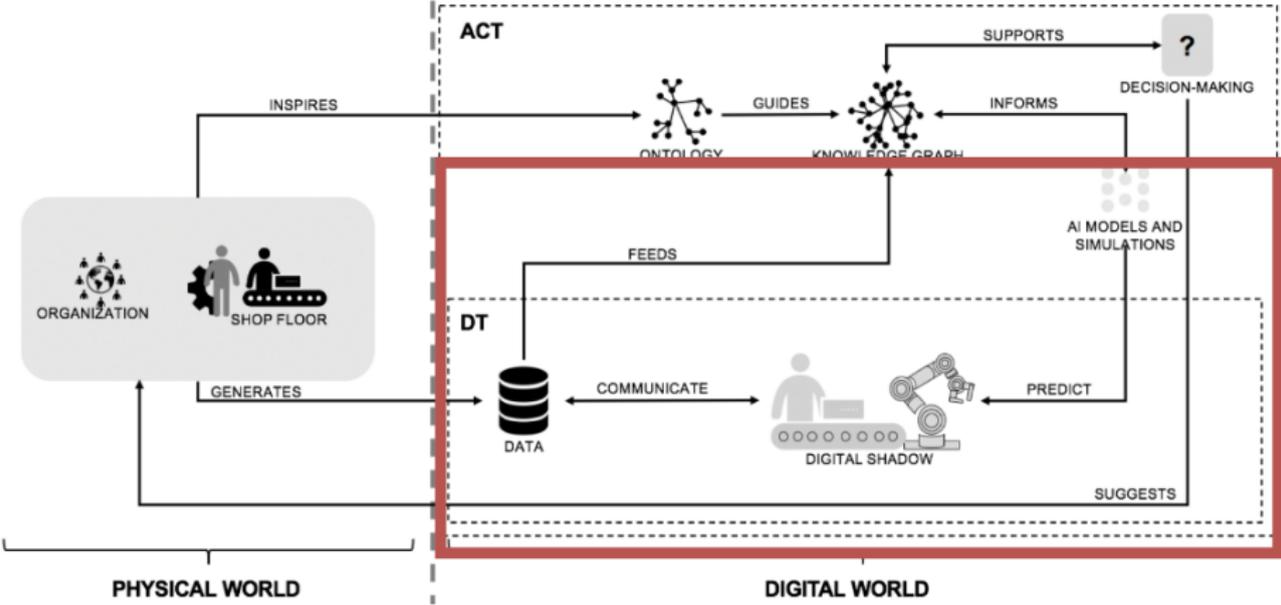


Figure: Digital Twin architecture [2]

Segmentation Sémantique de Nuages de Points LIDAR

Nuage de points : Les nuages de points sont obtenus en plaçant une caméra LIDAR au sommet du train en mouvement, obtenant ainsi une sorte d' hologramme du chemin de fer. En traitant la sortie de la caméra LIDAR, nous obtenons un tenseur de forme (N,c) où N est le nombre de points dans le nuage de points et c le nombre de caractéristiques pour chaque point, généralement $c = (x,y,z,I)$ avec (x,y,z) les coordonnées spatiales du point et I l'intensité reçue par la caméra LIDAR.

Segmentation Sémantique de Nuages de Points (SSNP) : La tâche d'attribuer une classe à chaque point du nuage de points, le transformant d'un tenseur de forme (N,c) en un tenseur de forme $(N,1)$ où la seconde dimension est un entier représentant la classe à laquelle il appartient. Notre objectif final est d'entraîner un modèle précis pour étiqueter les nuages de points ferroviaires avec les classes suivantes : Rails, Terre, Traverses, Poteau caténaire, Console de caténaire, Végétation, Feu de signalisation, Armoire électrique, Bruit.

Focus sur la segmentation sémantique du nuage de points ferroviaire

- **Exigence de l'utilisateur:** Développer un modèle réseau de neurone pour étiqueter automatiquement les nuages de points LIDAR SNCF et étiqueter les SNCF.
- **Problème:** La SNCF ne nous a fourni que 2000 nuages de points non étiquetés et 50 nuages de points annotés pas suffisant pour un apprentissage supervisé.
- **Solution:** Développer un pipeline d'apprentissage profond efficace conçu pour automatiser l'étiquetage des ensembles de données, réduisant considérablement le besoin d'intervention manuelle.

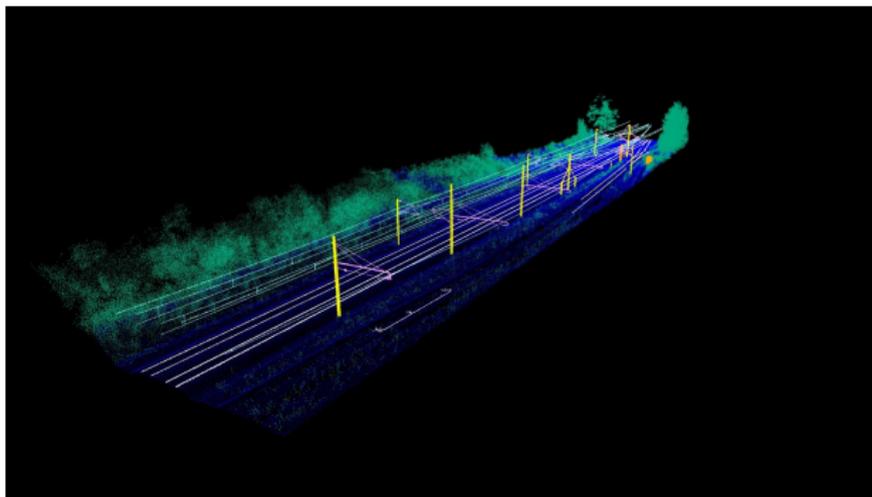


Figure: Nuage de points LiDAR 3D d'une voie ferrée française

Approches initialement considéré

- **Entraînement supervisé** Apprentissage à partir de données étiquetées où le modèle apprend à prédire des sorties connues à partir d'exemples annotés.
- **Entraînement non-supervisé** Apprentissage sans étiquettes où le modèle découvre lui-même des structures et des patterns cachés dans les données.
- **Entraînement auto-supervisé** Apprentissage où le modèle génère ses propres labels à partir des données brutes en prédisant des parties masquées ou modifiées.

Traitement des Données

Échantillonnage par grille : Chaque ensemble de données de nuages de points a été sous-échantillonné selon une grille espacée de 0,05m, tenant compte de la densité de points variable due à l'environnement scanné et à la vitesse du wagon d'inspection.

Mise à l'échelle de l'intensité : Les données d'intensité sont représentées sous forme d'entiers, et le LiDAR possède un scanner 16 bits, donc la valeur maximale autorisée est 65535. En utilisant cette valeur comme facteur d'échelle, les données d'intensité sont normalisées dans l'intervalle $[0,1]$.

Mise à l'échelle des coordonnées : Normalisation de (x,y,z) dans $[0,1]^3$ selon leur valeur maximale.

Augmentation des données : Ajout d'augmentation de données (duplication, transformations géométriques, ajout de bruit gaussien) aux nuages de points où les classes les moins représentées sont présentes.

Pipeline designé

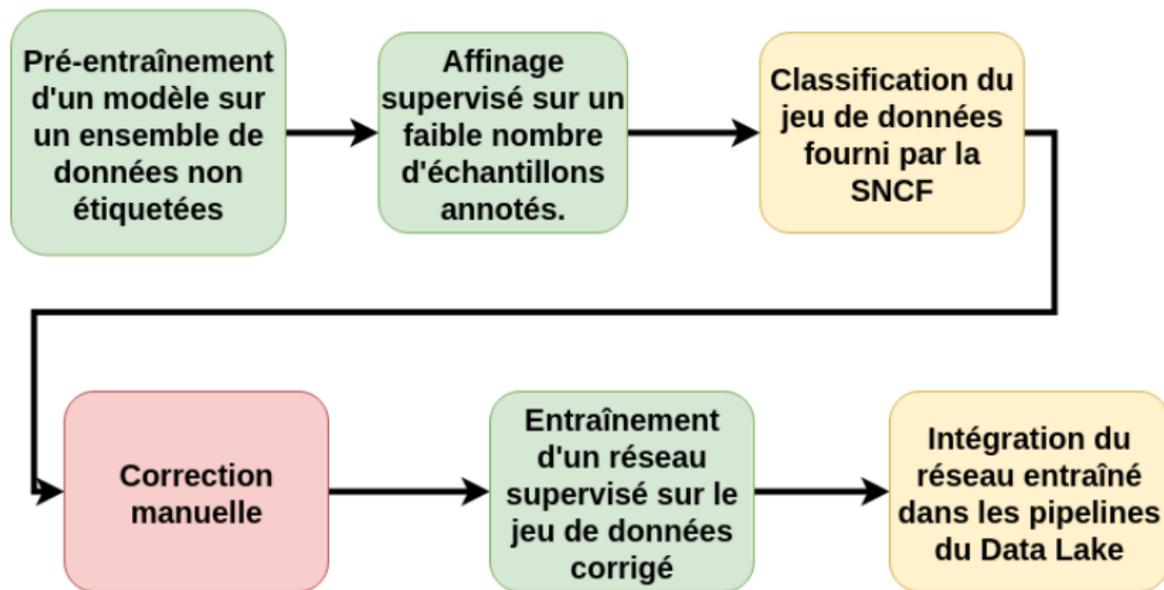


Figure: Segmentation sémantique d'un pipeline de nuages de points à l'aide de quelques échantillons étiquetés

Jeu de données

LIDARHD: Un jeu de données créé par l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN). Nous avons collecté un total de 10 000 nuages de points ferroviaires non étiquetés (730 Go).

Ensemble de données non étiqueté SNCF: Dans le cadre de notre projet, nous avons reçu un important jeu de données à annoter, composé d'environ 1500 fichiers LIDAR (.las). Ces fichiers ont été collectés à partir d'un scan embarqué d'un réseau ferroviaire autour de Nice, dans le sud de la France. Nous appelons ces 1500 fichiers le *jeu de données SNCF non étiqueté* (135 Go).

Jeu de données étiqueté SNCF: Après des tentatives infructueuses d'obtention de résultats significatifs par apprentissage non supervisé sur le jeu de données non étiqueté SNCF, nous avons demandé le jeu de données ferroviaires proche de Saint-Étienne à l'équipe Data3D. Ce jeu de données contient environ 40 nuages de points étiquetés.

Rail3D: En tant que nouvel ensemble de données facile d'accès, l'ensemble de données Rail3D[1] est idéal pour tester l'efficacité de notre pipeline de pré-entraînement, environ 50 fichiers labélisés.

Pré-entraînement

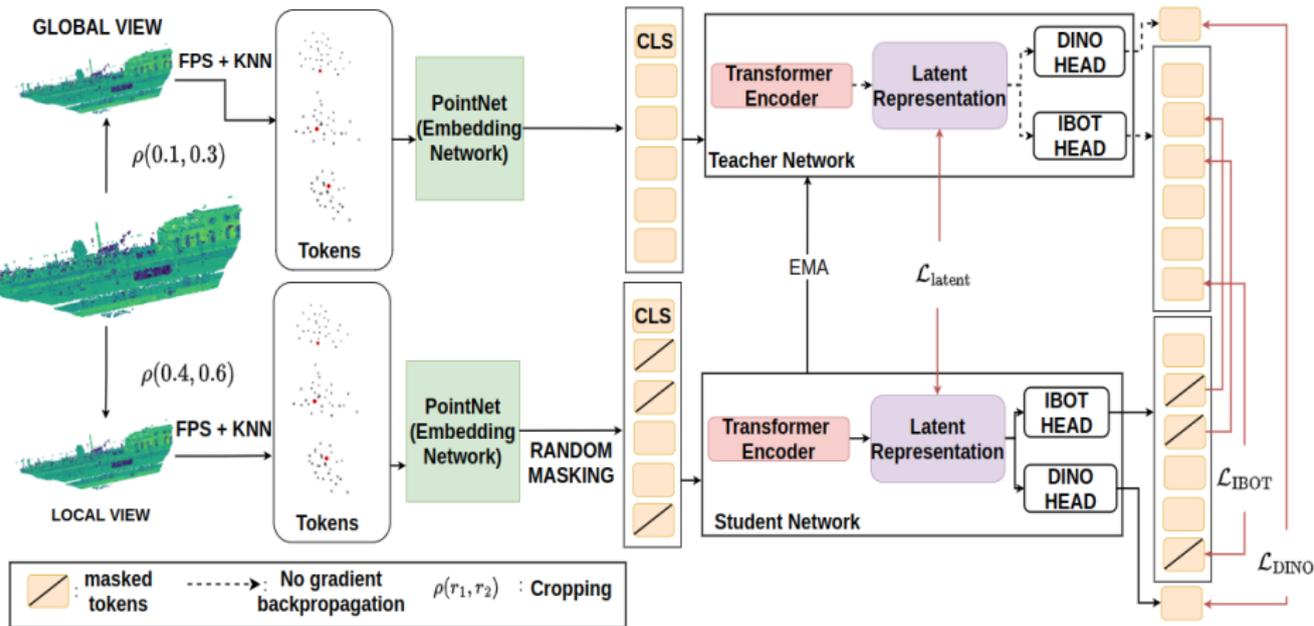
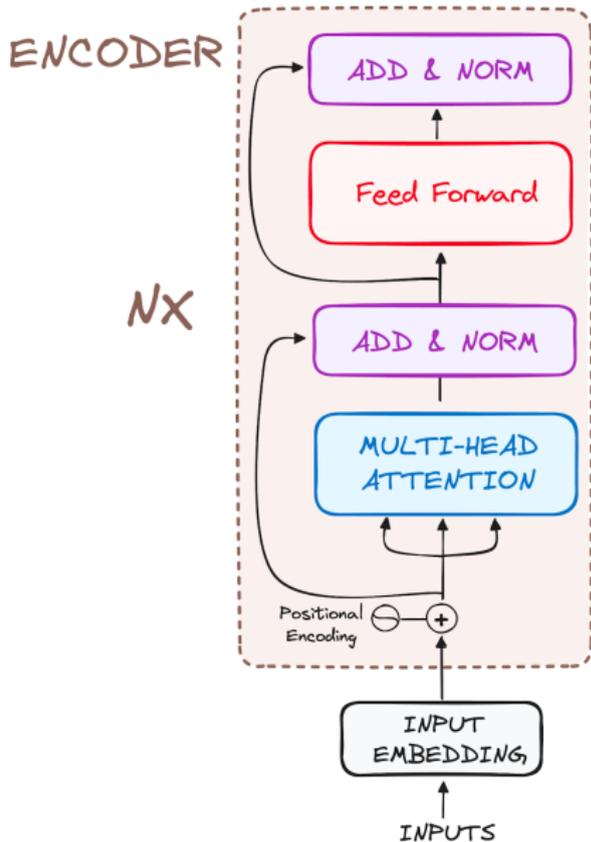


Figure: Self supervised learning (SSL) pipeline appliqué aux nuages de points ferroviaires

Model Architecture : Transformer Encoder



- Utilise un mecanisme d'attention afin de detecter les relations entre les points du nuages.
- Operation d'attention est parallelisable (bonne vitesse d'entrainement sur multi-GPU).
- A besoin d'un mecanisme de tokenization (transformation des entrees) qui peut être un encodage lossy.

Processus de Fine-Tuning

Tête de Segmentation : Afin de segmenter les nuages de points, nous avons ajouté un module convolutionnel au-dessus de notre encodeur transformer, qui prend en entrée la concaténation de tous les espaces latents de notre encodeur transformer.

Fonction de Perte (Loss function) : Nous avons employé une perte d'entropie croisée classique pour mesurer la différence entre les labels générés et les labels de vérité terrain. Pour mieux traiter le déséquilibre de classes dans notre jeu de données, nous avons appliqué des poids spécifiques à chaque classe dans la fonction de perte. L'entropie croisée de chaque classe a été multipliée par un coefficient $\rho = \sqrt[2.5]{\frac{N_{\max}}{N_c}}$, pour toutes les classes $c \in \mathcal{C}$, où N_c est le nombre de points appartenant à la classe c et N_{\max} le nombre de points dans l'ensemble d'entraînement.

Résultat en chiffre

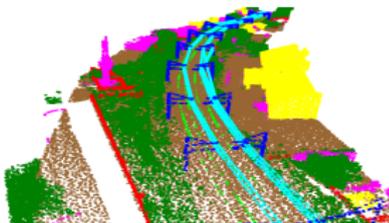
Method	mOA	mIoU	Ground	Rail	Vegetation	Fence	Building	Cat. Pole	Cat. Wire	Struct.	Env.
GrowSP	30.3	23.4	48.3	35.6	43.4	5.1	21.3	14.1	16.2	22.9	4.0
PointNet++	87.4	71.5	89.3	77.6	84.2	35.2	70.4	82.9	92.4	85.1	26
KPConv	93.2	74.7	95.3	83.6	90.1	32.3	75.2	86.4	96.2	85.6	27.5
Ours (no pre-training)	87.2	71.1	90.7	75.3	87.5	27	75.8	86.1	87.3	84.7	25.3
Ours	94.3	78.8	95.4	87.2	96.6	38.1	84.1	88.3	93.2	94.6	31.7

Table: Comparaison des performances entre nos approches et d'autres modèles classiques sur le jeu de données étiqueté SNCF, mOA (%) et mIoU (%)

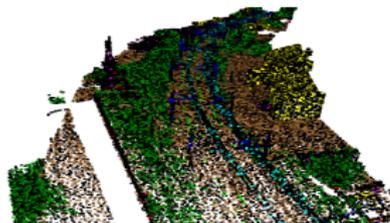
Method	mOA	mIoU	Ground	Vegetation	Rail	Poles	Wires	Signaling	Fences	Installation
GrowSP	33.2	28.1	51.3	36.6	47.1	38.6	21.3	3.1	12.1	15.1
PointNet++	95.0	75.8	92.3	90.1	71.7	85.7	94.3	61.3	79.6	31.8
KPConv	96.2	85.2	91.2	95.8	76.1	94.2	98.0	83.1	95.8	47.6
Ours (no pre-training)	94.3	74.7	90.0	87.3	71.5	85.7	90.1	67.4	70.5	35.4
Ours	98	90.5	93.7	98.0	94.4	92.1	97.6	87.4	94.2	66.4

Table: Comparaison des performances entre nos approches et d'autres modèles classiques sur le jeu de données Rail3D, mOA (%) et mIoU (%)

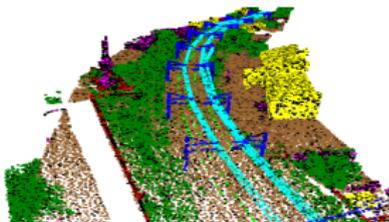
Application sur le jeu de données SNCF non étiqueté



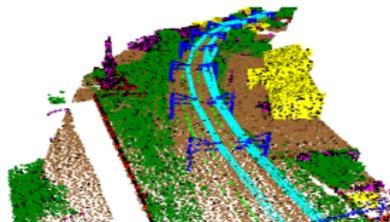
(a) Segmentation truth



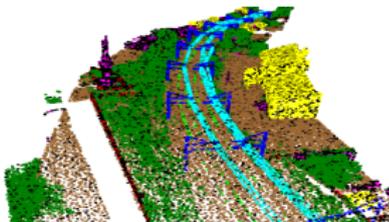
(b) GrowSP



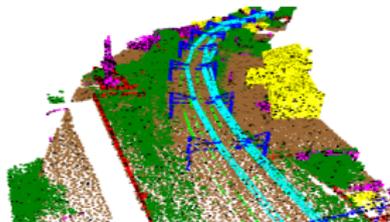
(c) PointNet++



(d) KPConv



(e) Ours without pre-training



(f) Ours with pre-training

Figure: Comparaison des méthodes de segmentation des réseaux sur le jeu de données étiqueté SNCF

Limitations

Malgré les performances de notre model et pipeline, il reste un certains nombre de limitations a évoquer :

- Mauvaises performances sur certaines classes (Installation)
- Toujours besoin d'une correction manuelle afin d'obtenir un fichier utilisable
- Nécessité d'un GPU avec 40Go de mémoire pour faire tourner le modèle

Conclusion & Travaux futurs

1. Conclusion: Soumis un article décrivant l'ensemble du projet
 - Conception d'un pipeline utilisant des données non étiquetées librement disponibles.
 - Incorporation d'un pré-entraînement adapté de la 2D à la 3D.
 - Utilisation du **transfer learning** pour raffiner le model pré-entraîné sur un nombre limité de données labélisées
 - Le modèle crée dépasse les performances des **benchmark** et démontre l'avantage de la pipeline.
2. Travaux Futurs:
 - Intégré le pipeline au Data Lake présent sur le cloud Central Supélec
 - Finir la labelisation des données non etiquetées et retrainner un model final dessus
 - Comparer les performances du pré-entraînement au fur et à mesure que des données étiquetés sont disponible

Questions ?

Bibliographie

- [1] Abderrazzaq Kharroubi et al. "Multi-Context Point Cloud Dataset and Machine Learning for Railway Semantic Segmentation". In: *Infrastructures* 9.4 (2024).
- [2] Jože M. Rožanec et al. *Actionable Cognitive Twins for Decision Making in Manufacturing*. 2021. arXiv: 2103.12854 [cs.AI].



MINERVE
avec la filière ferroviaire



Accelerating the serviceability-based design of reinforced concrete rail bridges under geometric uncertainties induced by unexpected events: A surrogate-based approach

Outline

- Introduction
- Problem
- Motivation and Objective
- Methodology
- Mesh sensitivity study
- Surrogate modeling results
- Conclusion

Introduction

Uncertainties; Performance

Introduction

Uncertainties: Sources and Types

Aleatory

 **Randomness**

**Manufacturing tolerances;
operational loads; Deviations in
construction ...**

Epistemic

 **decisions/ design scenarios**

**Unexpected events;
stockholders' interactions;
supplier availability ...**

**Track
irregularities**

**Train weight
variability**

**Concrete strength
tolerance**

**Wind load
variability**

**Steel strength
tolerance**

**Dimensional
deviations**



Concrete grade

Steel grade

**Train type and
speed**

Deck thickness

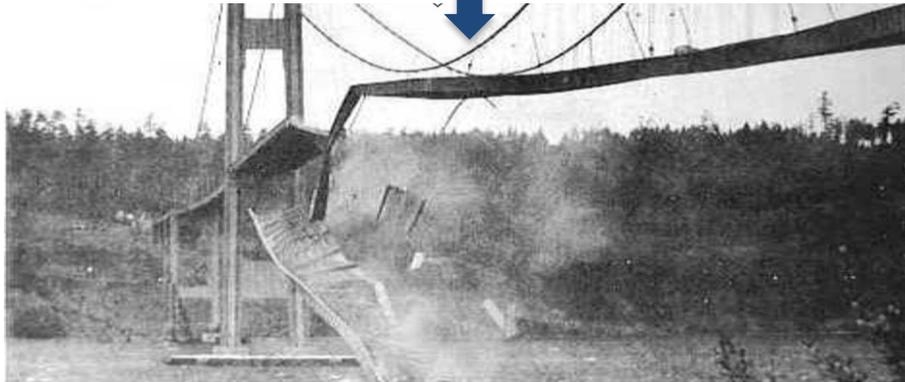
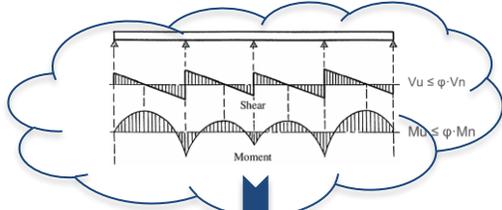
**Reinforcement
ratio**

Span length

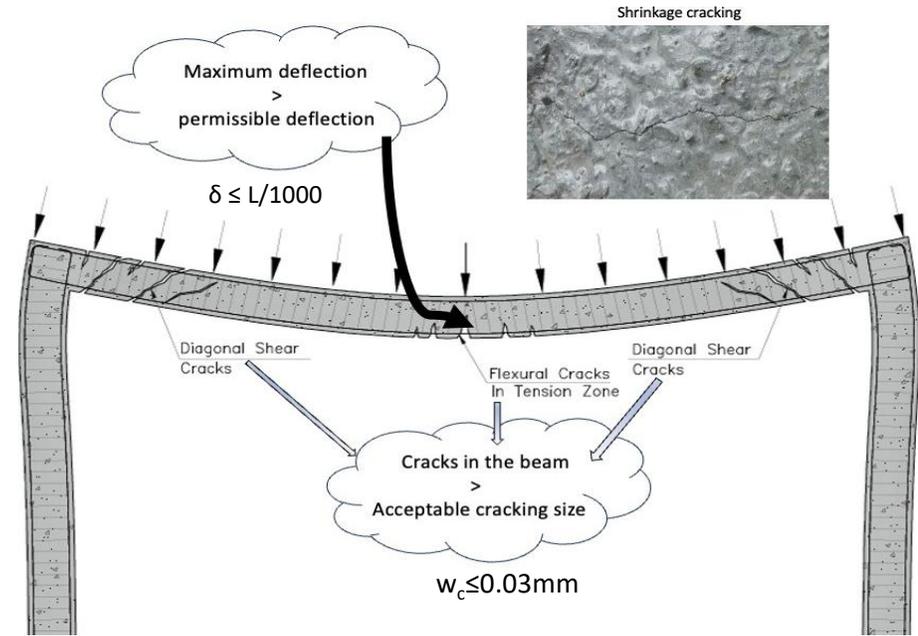


Introduction

Performance of reinforced concrete bridges: Limit States Design



Tacoma Bridge (ULS failure)



Cracking and deflection (SLS)

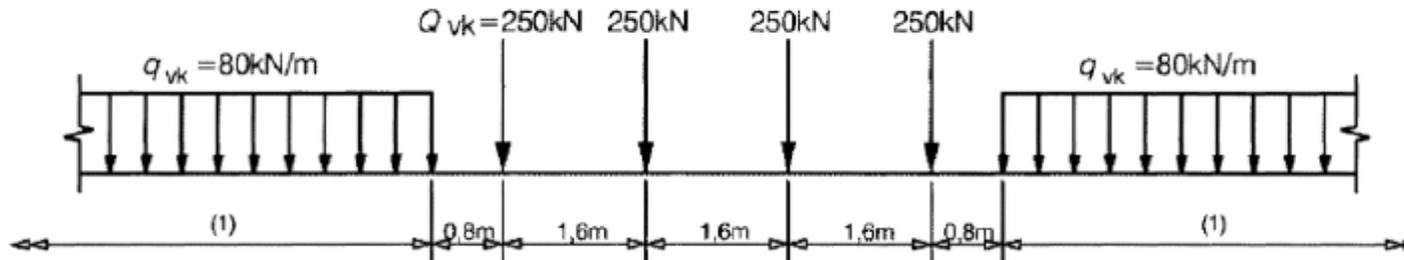
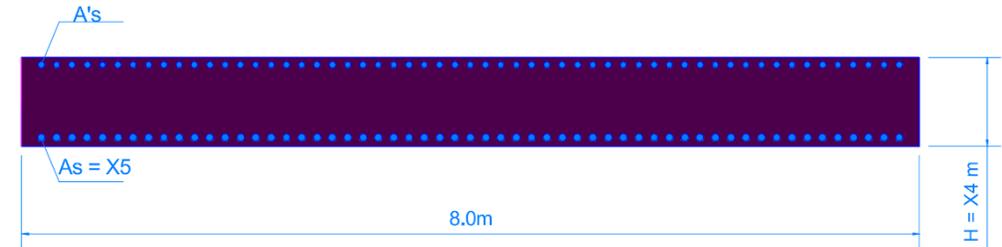
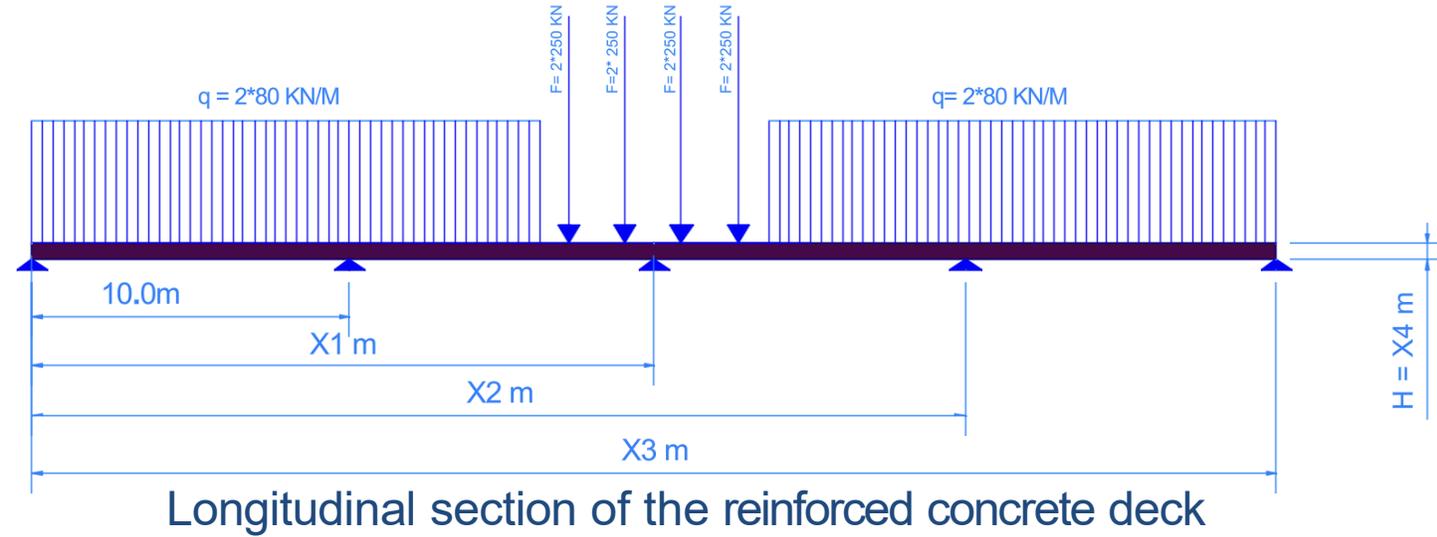
Ultimate limit state (ULS)	Service limit state (SLS)
Flexural strength	Deflection
Shear strength	Cracking control

Problem

Considered model; Selected performance function

Introduction

Considered Loading and Geometry

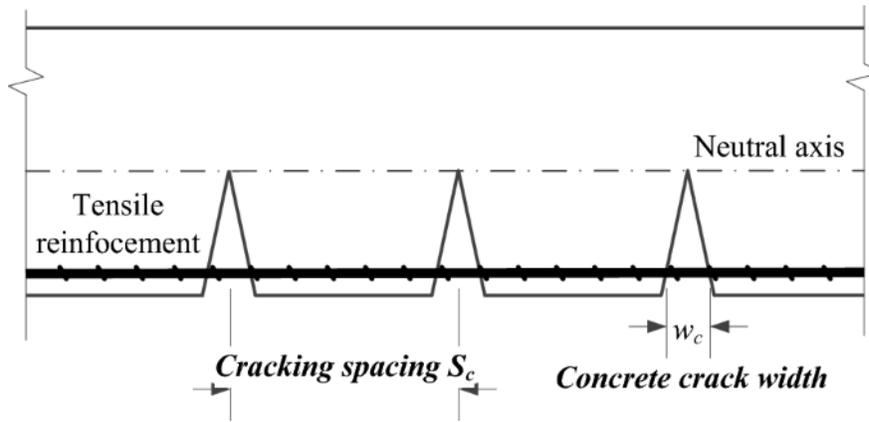


Eurocode LM71 model

Introduction

Considered uncertainties and performance function

Type	Geometric	Geometric	Geometric	Geometric
Design Parameter	Position of 2 nd pier	Position of 3 rd pier	Position of 4 th pier	Bridge Deck thickness
Symbol	X_1	X_2	X_3	H
Random Distribution	$X_1 \sim U(5m, 15m)$	$X_2 \sim U(15m, 25m)$	$X_3 \sim U(25m, 35m)$	$X_4 \sim U(30\text{ cm}, 60\text{cm})$



Limitation des contraintes dans les aciers à l'ELS à $R = 1000$ $w_{kmax} = 1000 * 0.03 = 300$ KN

Conception et calcul des ouvrages d'art du Réseau Ferré National IG90032 (AG 4 A 0)



Performance function: $g(x) = f(x) - R$

$g(x) < 0$: failure zone

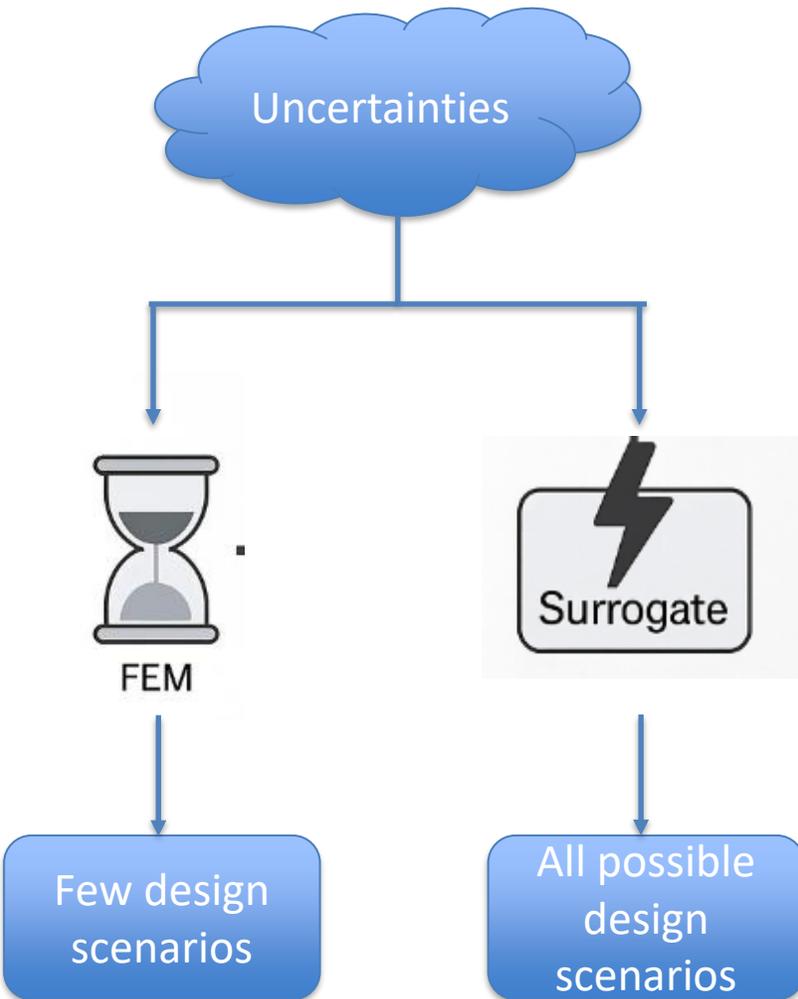
$g(x) > 0$: safe zone

$g(x) = 0$ Limit between the zones

Motivation and Objectives

Motivation and Objectives

The need for an alternative for FEM



Need for a new approach?

- Uncertainties in design decisions (piers, thickness, reinforcement)
- Unexpected events require re-evaluations of the bridge design
- Exploring numerous design scenarios (serviceability & ultimate checks)
- FEM: accurate but computationally expensive (time limitation)

Solution: Surrogate Models

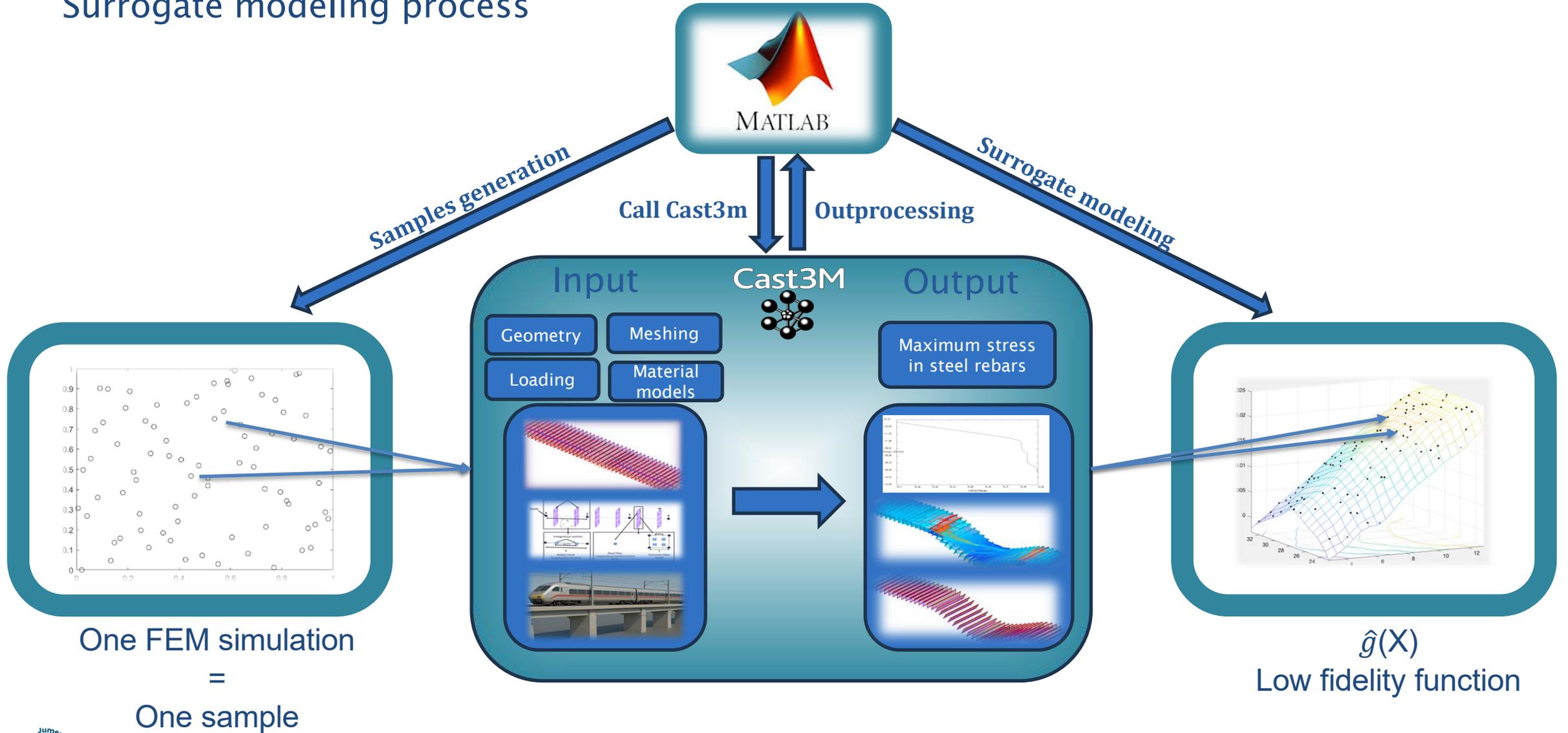
- Fast approximations of FEM responses
- Enable uncertainty quantification & reliability checks
- Classify scenarios as acceptable / non-acceptable in seconds
- Support efficient design exploration & decision-making

Objectives of This Work

1. Develop surrogate models for RC railway bridge design
2. Compare techniques (Kriging, SVR, PCE, ...) across sample sizes
3. Evaluate with 4 metrics (RMSE, MAE, MaxAE, R^2)
4. Show surrogate modeling accelerates design under uncertainty

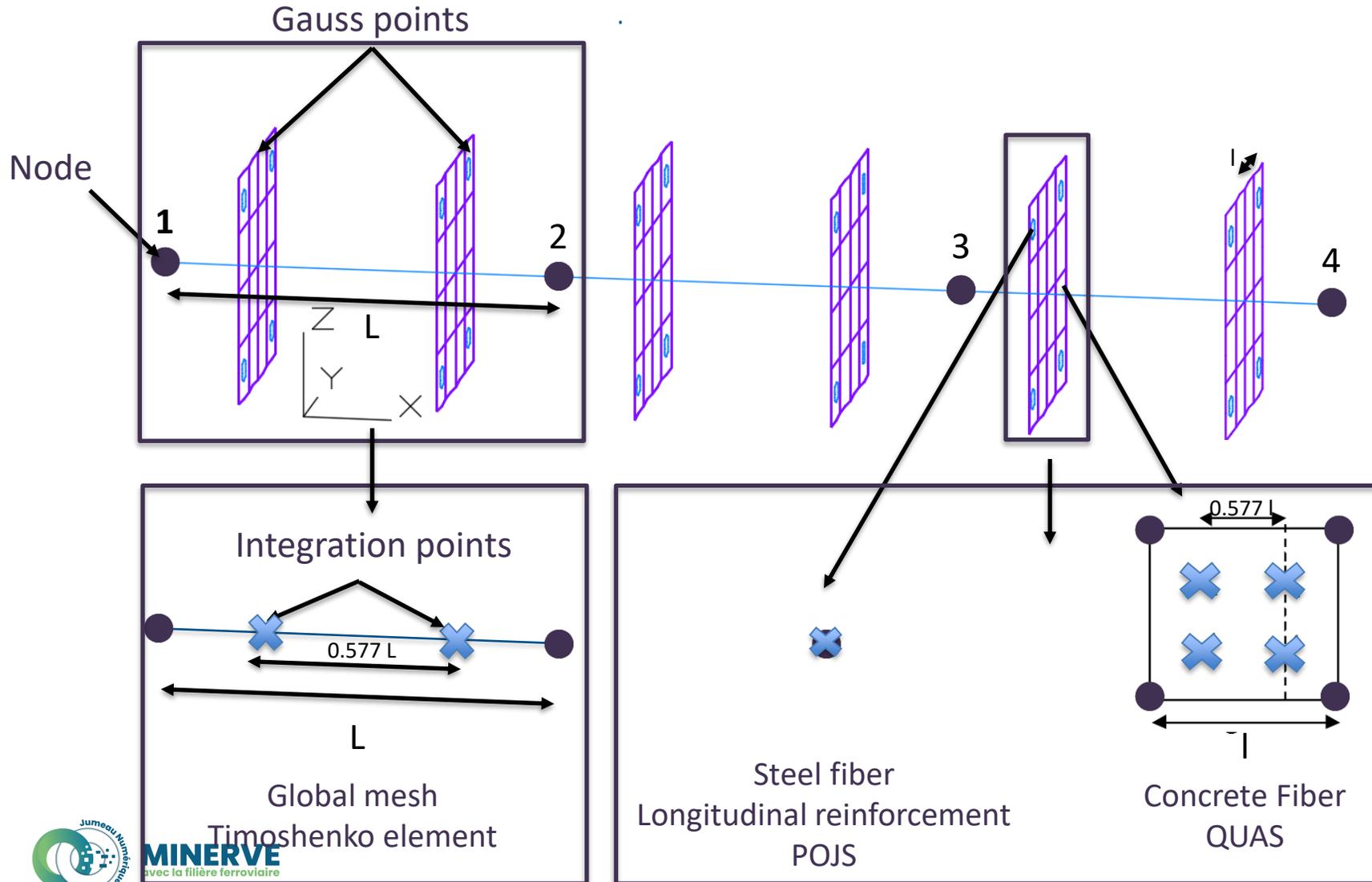
Methodology

Surrogate modeling process



Mesh sensitivity: FEM

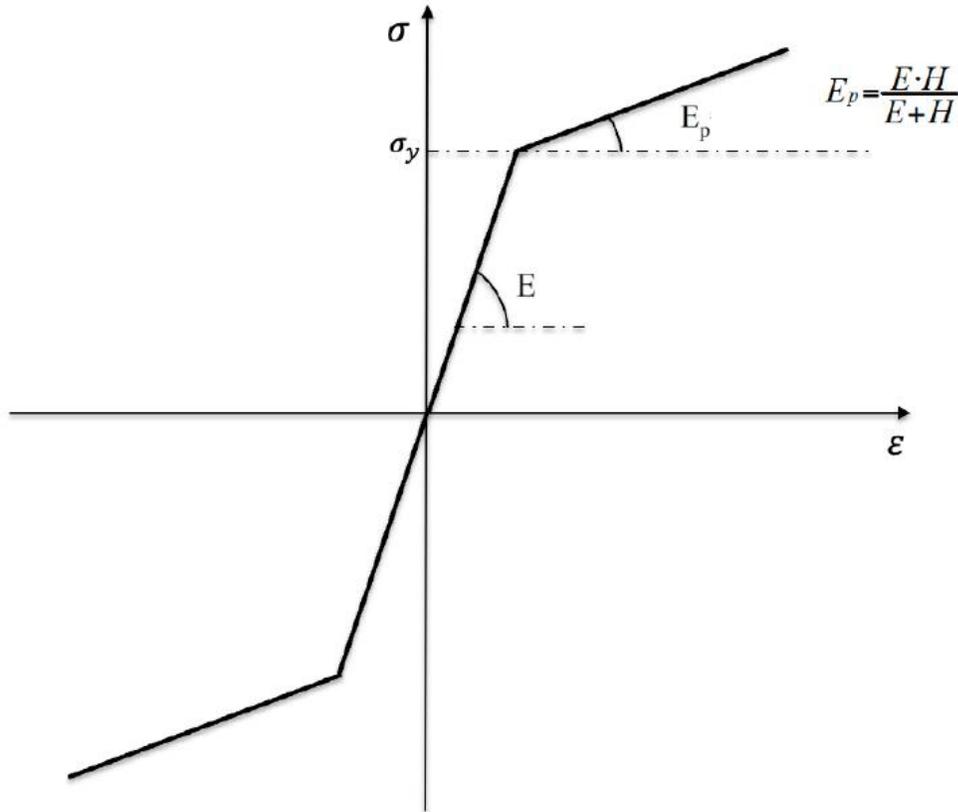
Multi-fiber FEM



- Beam element predicts the non-linear behavior inaccurately.
- 3D volumetric finite elements provide the required accuracy but are too computationally expensive for a campaign of structure calculations.
- As a compromise, enhanced beam elements have been developed, called multi-fiber beam elements.

Mesh sensitivity: FEM

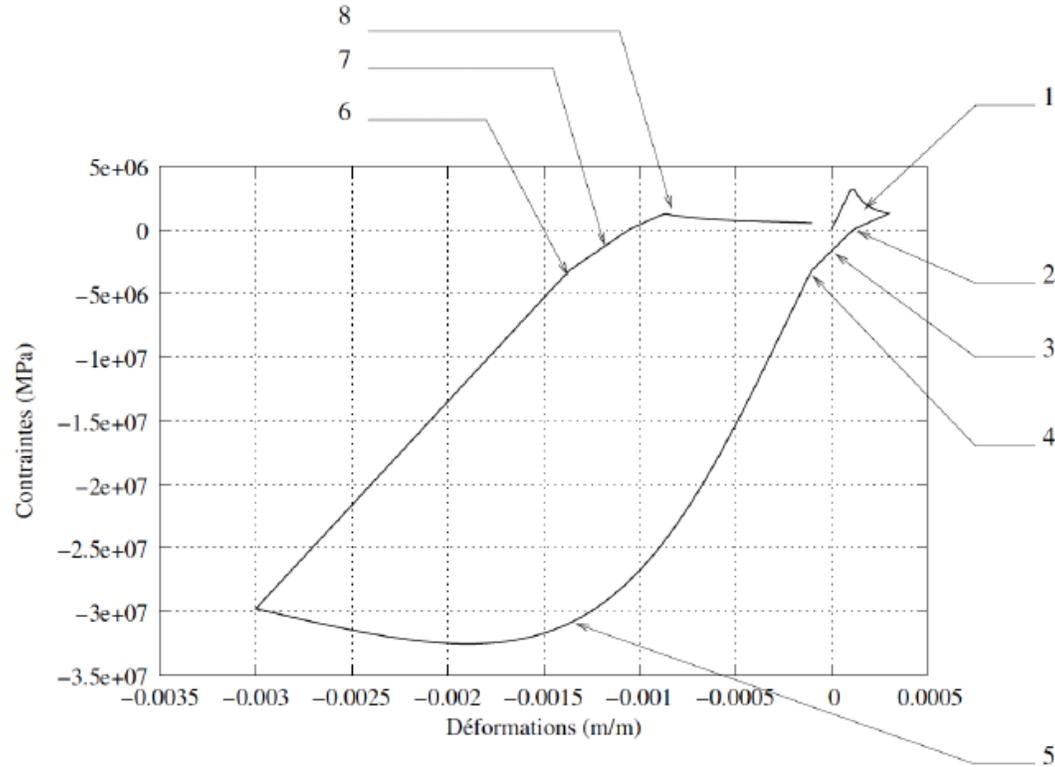
Steel model



- MODEL = 'PLASTIQUE', 'PARFAIT_UNI' (Plasticity with kinematic hardening)
- YOUN: Young's modulus: 900 GPa
- NU: Poisson's ratio: 0.3
- SIGY: yield stress: 500 MPa
- H: hardening modulus ($H = 0$ for perfect elastoplastic law): 8 GPa
- ALPY: coefficient multiplying the shear stress τ_{xy} : 0.67
- ALPZ: coefficient multiplying the shear stress τ_{xz} : 0.67

Mesh sensitivity: FEM

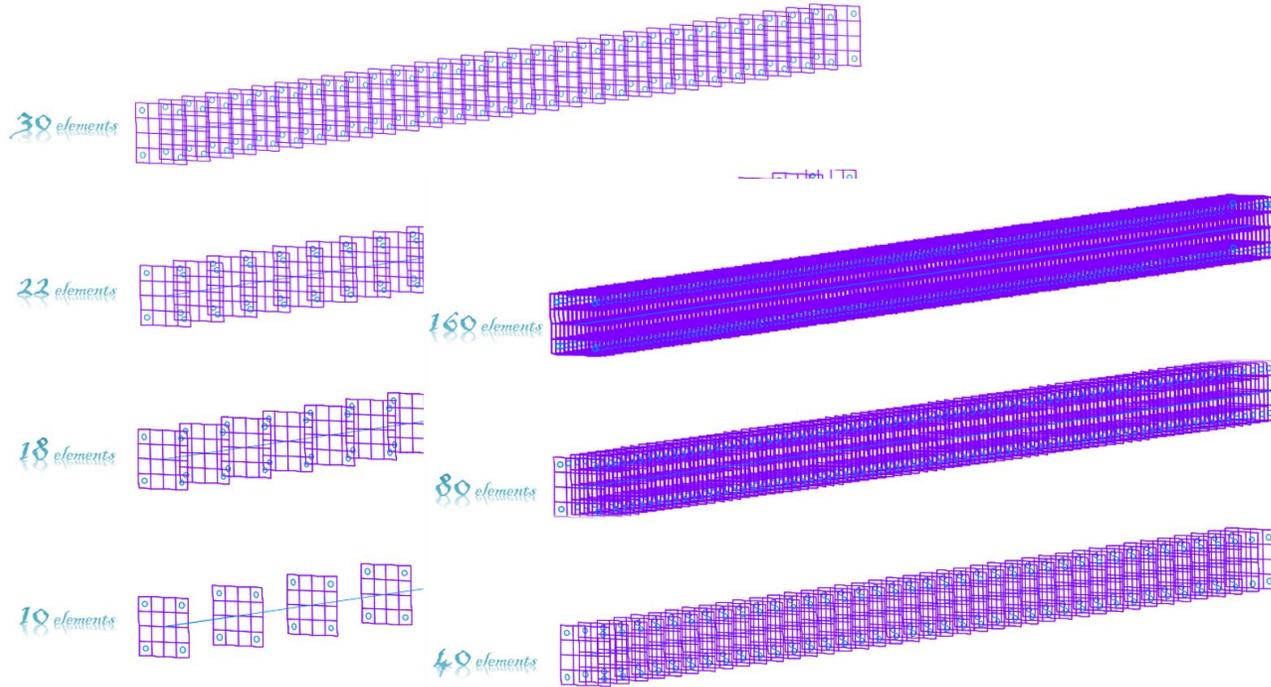
Concrete model: UNILATERAL DAMAGE MODEL: LA BORDERIE



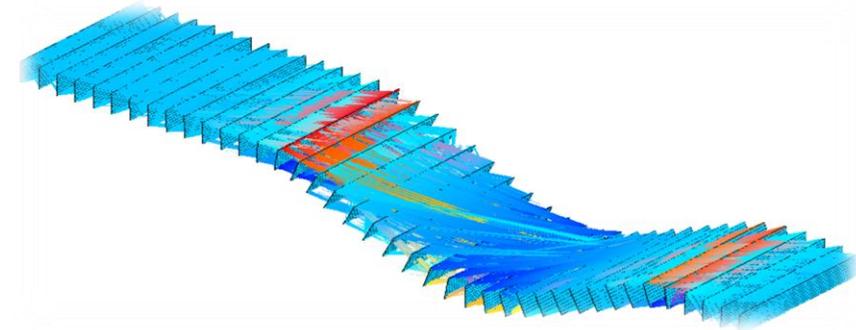
Paramètres de modèle	Valeur
Y_{01} (Seuil d'endommagement en traction)	$2.5 \times 10^{+2}$ (Pa)
Y_{02} (Seuil d'endommagement en compression)	$1.5 \times 10^{+4}$ (Pa)
A1 (Paramètre d'endommagement en traction)	4×10^{-3} (Pa)
A2 (Paramètre d'endommagement en compression)	6.5×10^{-5} (Pa)
B1 (Paramètre pour la traction)	1.2
B2 (Paramètre pour la compression)	1.5
BETA1 (Activation de la déformation permanente en traction)	$1 \times 10^{+6}$ (Pa)
BETA2 (Activation de la déformation permanente en compression)	$-40 \times 10^{+6}$ (Pa)
SIGF (Contrainte de refermeture de fissure)	$3.5 \times 10^{+6}$ (Pa)

Mesh sensitivity: FEM

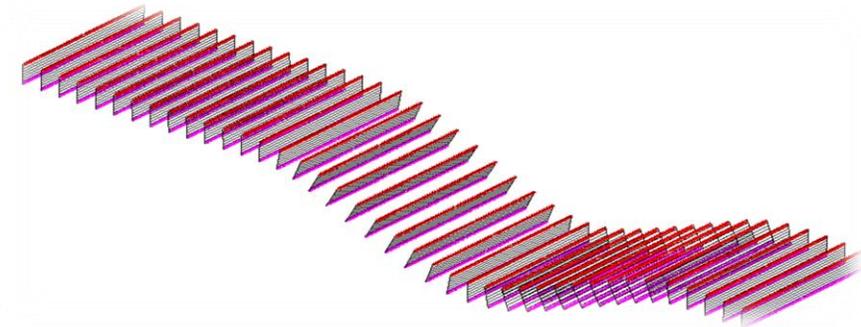
Mesh and FEM results



Different mesh sizes



Stress distribution on deformed deck

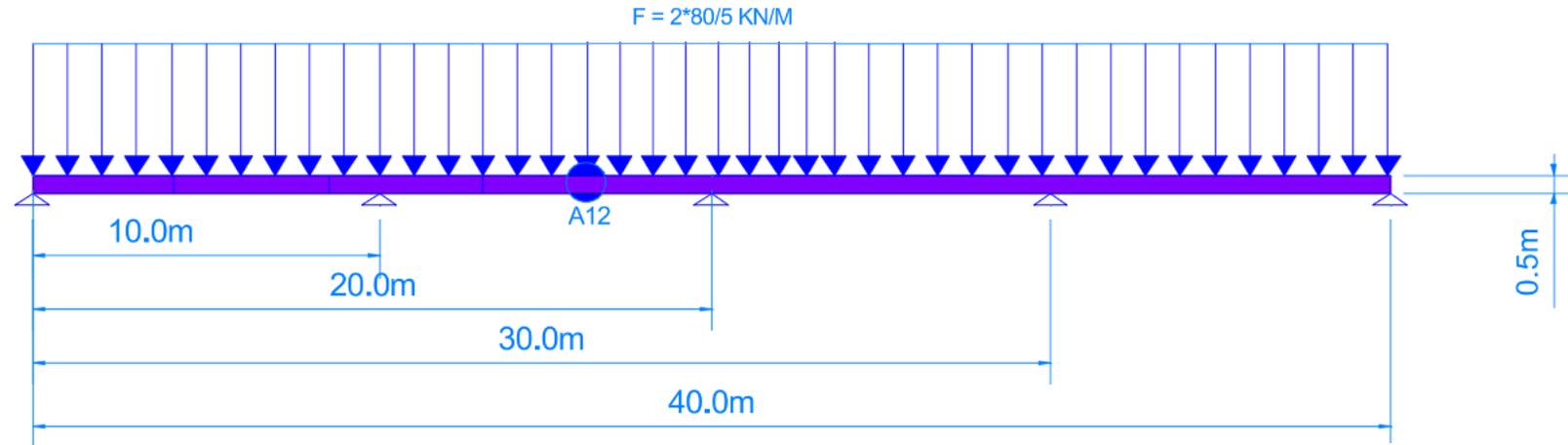


Deflection on deformed deck

FEM Results

Mesh sensitivity: FEM

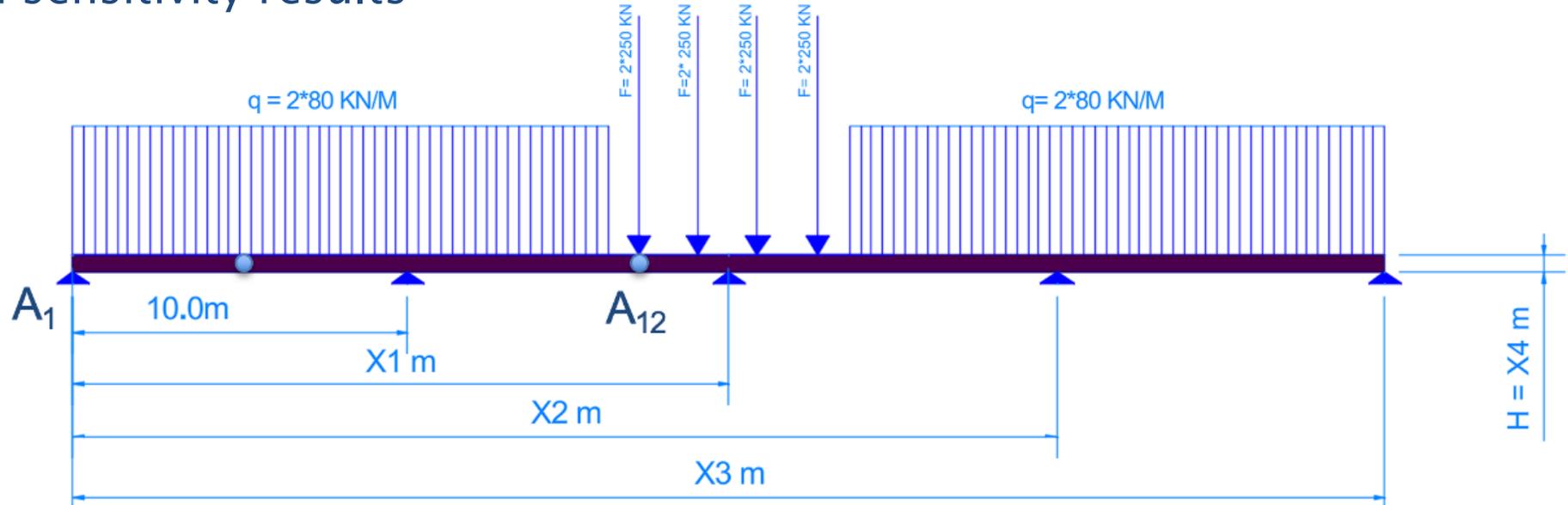
Analytical problem sensitivity results and model validation



Density	Deflection maximum	Density	reammtion first support A1
8 elements	9.528e-4	8 elements	800 KN
16 elements	1.1314e-3	16 elements	800 KN
24 elements	1.1645e-3	24 elements	800 KN
32 elements	1.176e-3	32 elements	800 KN
40 elements	1.1814e-3	40 elements	800 KN
80 elements	1.189e-3	80 elements	800 KN
160 elements	1.1906e-3	160 elements	800 KN
Analytical value	1.19e-3	Analytical value	800 KN

Mesh sensitivity: FEM

Real problem sensitivity results



Density	Deflection midspan
10 elements	1.993e-3
18 elements	1.066e-2
22 elements	1.262e-2
30 elements	1.635e-2
40 elements	1.705e-2
80 elements	1.697e-2
160 elements	1.685e-2

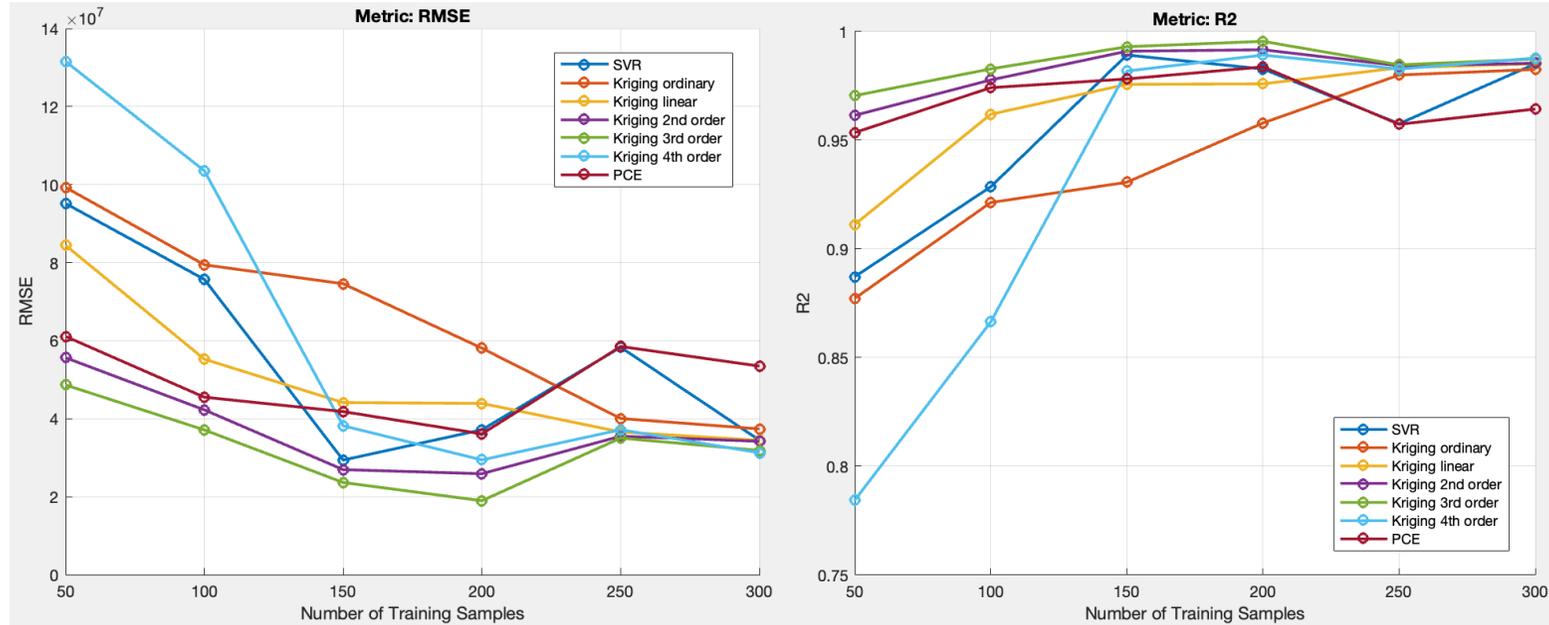
Density	Deflection A12
10 elements	9.766e-4
18 elements	1.256e-3
22 elements	1.475e-3
30 elements	1.6632e-3
40 elements	1.9e-3
80 elements	2.56e-3
160 elements	2.5723e-3

Density	Reaction A1
10 elements	1069.5e3
18 elements	1021.6e3
22 elements	1031.9e3
30 elements	1040e3
40 elements	1048.2e3
80 elements	1040.4e3
160 elements	1037.9e3

Surrogates results

Results

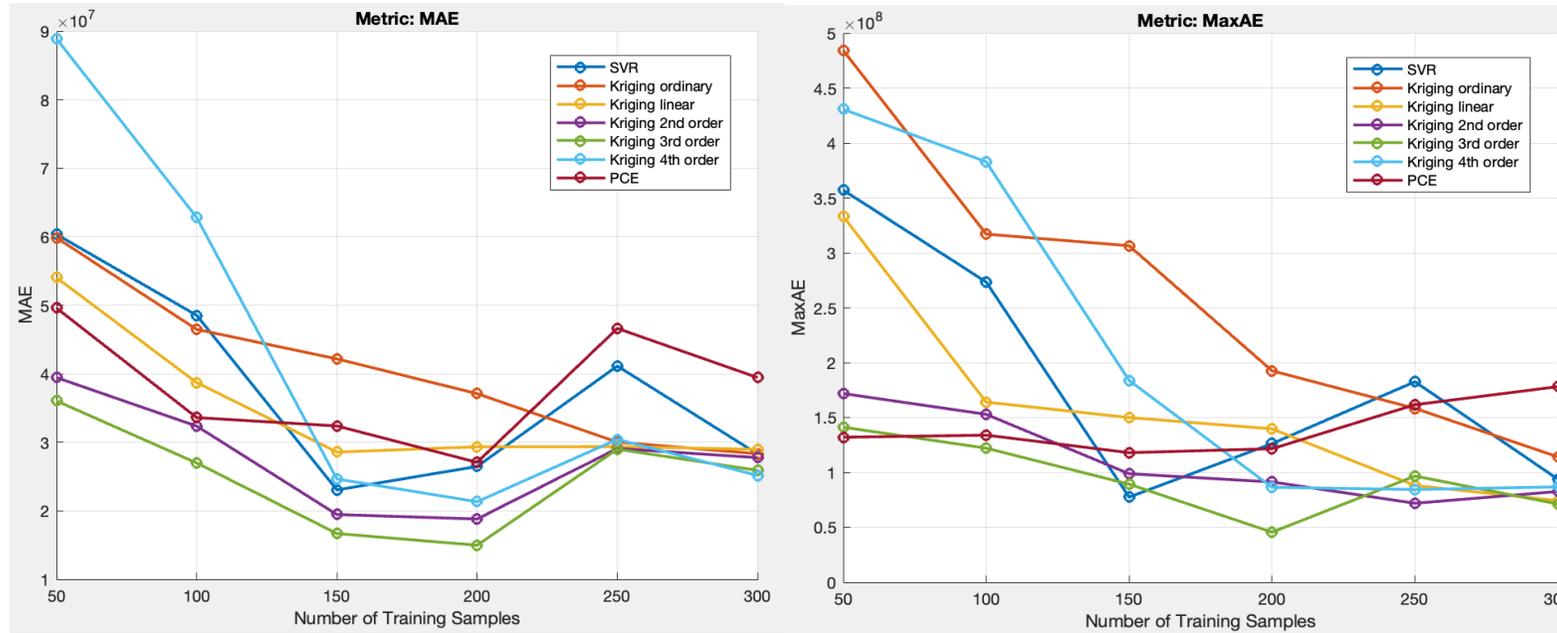
R² and RMSE



Metric	Signification / Importance	Formula
R ²	Proportion of variance in the true response explained by the surrogate. Range: $-\infty$ to 1, with 1 meaning perfect fit.	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}$
RMSE	Average magnitude of the error, penalizing large deviations. Expressed in the same units as the response.	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}$

Results

MAE and MaxAE



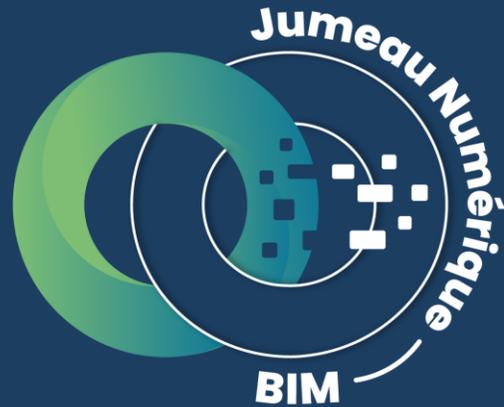
MAE	Average absolute difference between prediction and true value. Less sensitive to outliers than RMSE.	$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i - \hat{y}_i $
MaxAE	Worst-case deviation between predicted and true value. Useful for safety-critical applications.	$MaxAE = \max_i y_i - \hat{y}_i $

Conclusion

- Kriging, especially with a third-order trend, gave the most accurate and consistent results.
- Surrogate modeling greatly reduced computational cost while maintaining accuracy.
- Kriging also provides uncertainty estimates, with trend choice being key to performance.

Thank you for your attention

"This research is funded by the MINERVE project. The MINERVE project has been financed by the French government within the framework of France 2030."



MINERVE

avec la filière ferroviaire



MINERVE
avec la filière ferroviaire
bpi**france**



KAYRROS



Instanciation d'un modèle d'architecture de jumeau numérique dans le cas d'une infrastructure ferroviaire existante

Par : Hibat Allah BABTY
Début : 13/11/2023



SYSTRA



Philippe GOTTELAND
Marc BIYADI

Etienne PANSART

Benoit EYNARD
Matthieu BRICOGNE

Mots clés:

1 Jumeau numérique

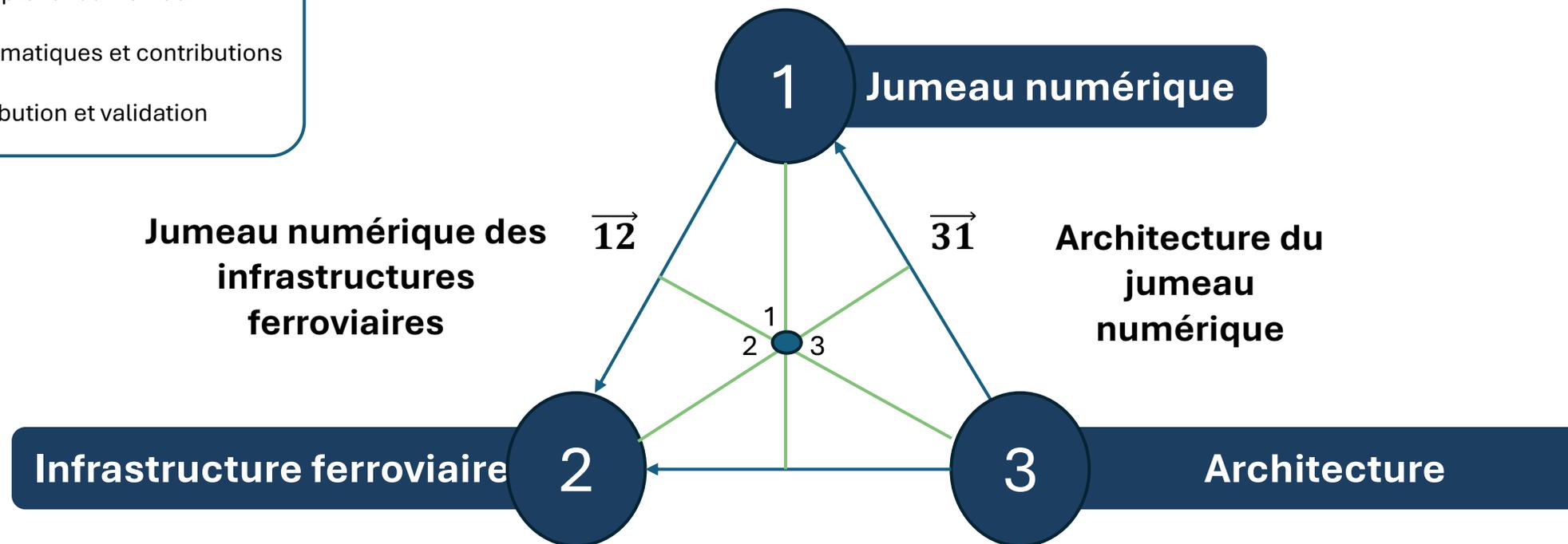
2 Infrastructure ferroviaire

3 Architecture

N Concepts fondamentaux

→ Problématiques et contributions

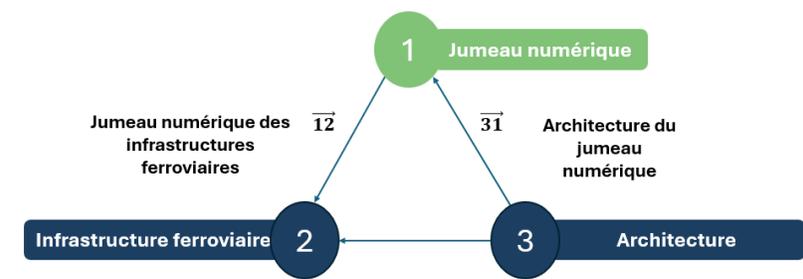
● Contribution et validation



● Architecture³ du Jumeau numérique¹ pour les Infrastructures ferroviaires²

1 Jumeau numérique

Dernière définition normalisée selon l'ISO 30173

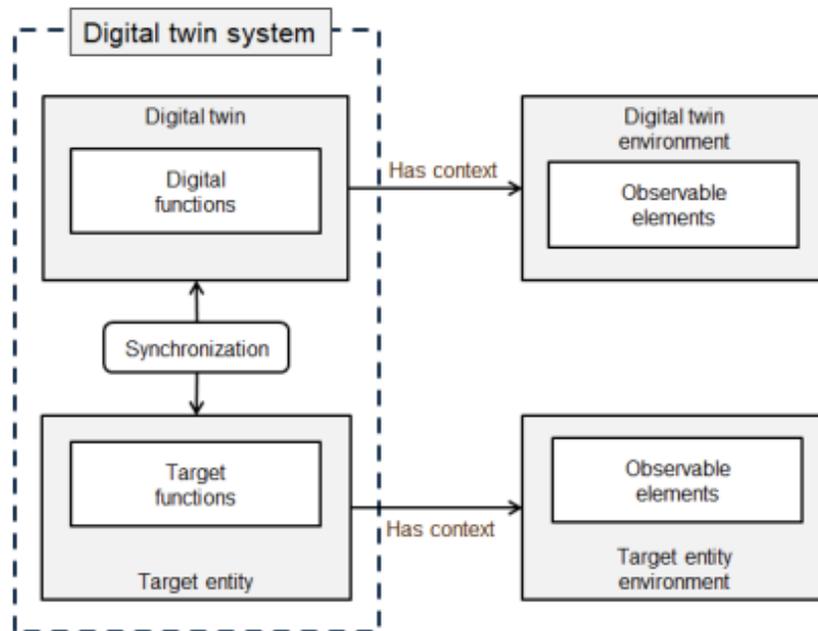


ISO/ IEC 30173:2023 Jumeau numérique "JN"

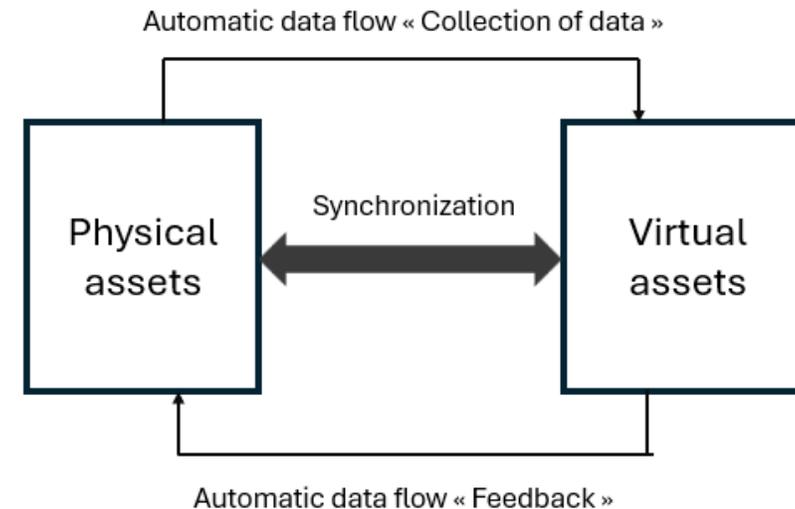
Représentation numérique d'une entité cible avec la présence de connexions de données qui assurent la convergence à un rythme de synchronisation approprié.

Le JN offre tout ou partie des fonctionnalités suivantes : « connexion, intégration, analyse, simulation, visualisation, optimisation, collaboration, etc. »

Le JN fournit une vue intégrée tout au long du cycle de vie de l'entité cible.



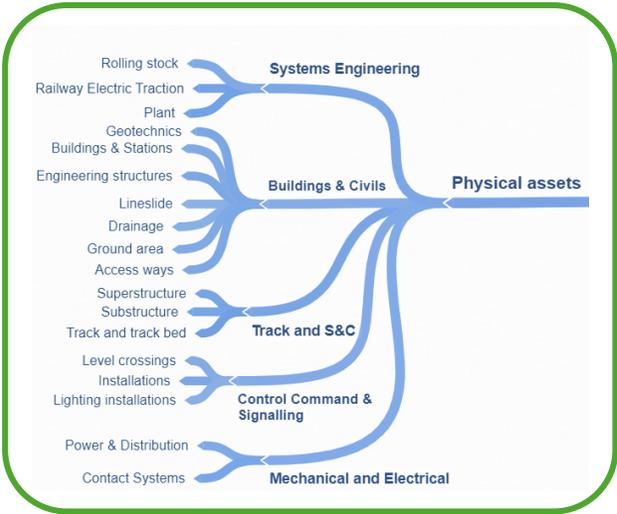
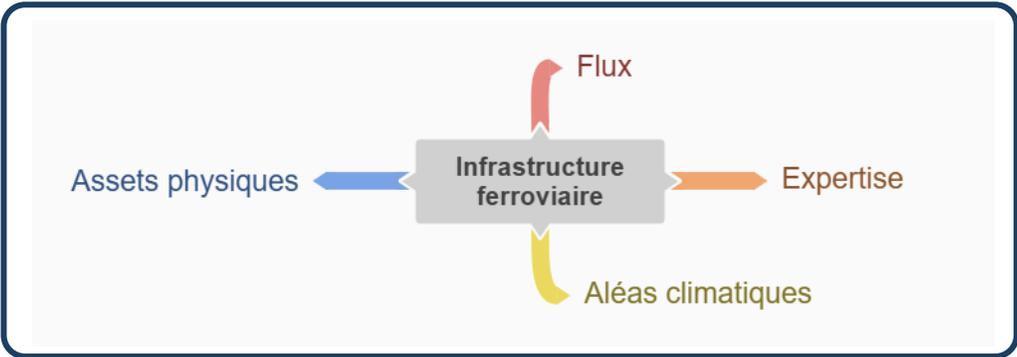
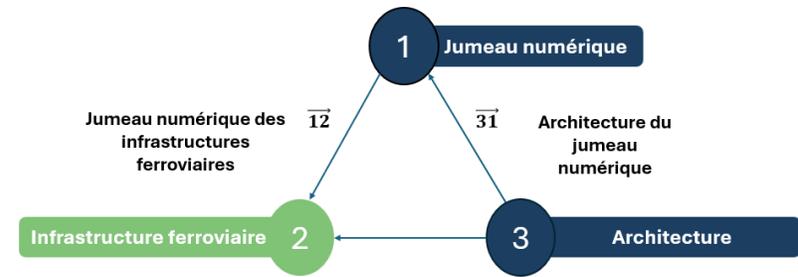
Vue conceptuelle du système de jumeau numérique dérivée de la norme ISO 30188



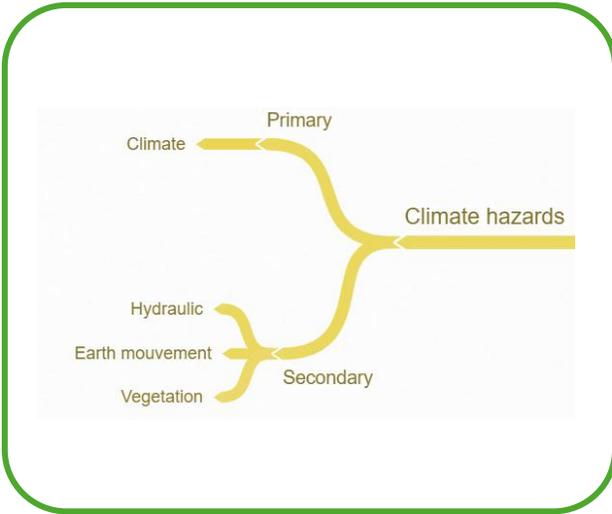
Vue conceptuelle simplifiée du système de jumeau numérique

2 Infrastructure ferroviaire

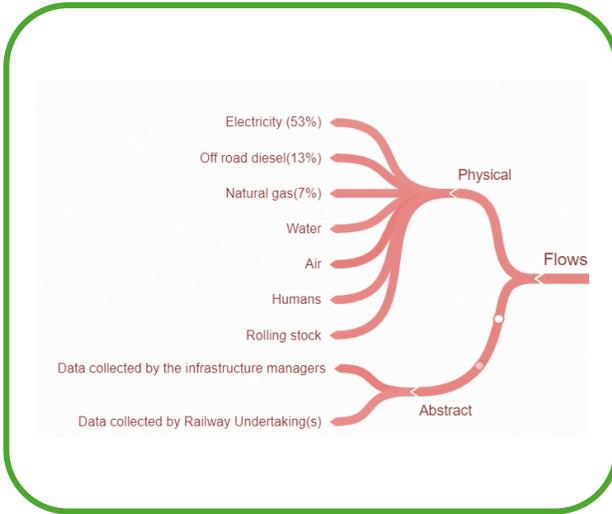
Structure de l'infrastructure ferroviaire



Assets physiques

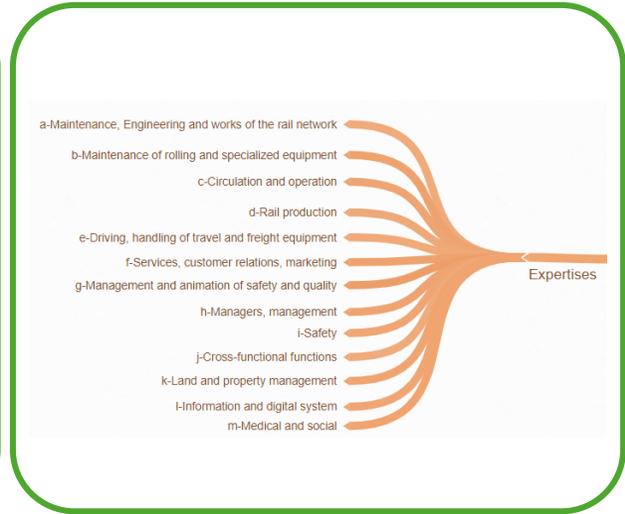


Aléas climatiques



Flux

Convention collective nationale du secteur ferroviaire



Expertise

Articles de la littérature scientifique 5



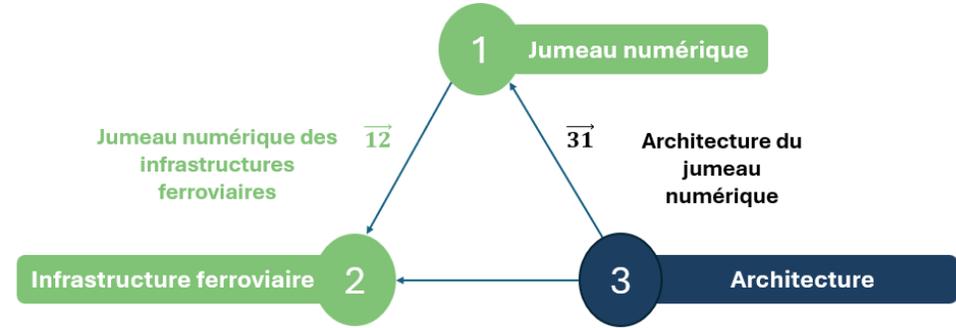
2

Infrastructure ferroviaire

Coût
 Systèmes
 Cycle de vie
 Domaines d'expertise
 Environnement



Complexe
 En silos
 Grand volume
 Qualité
 Format



12 Jumeau numérique des infrastructures ferroviaires

Cas d'usage

Flux "lecture"

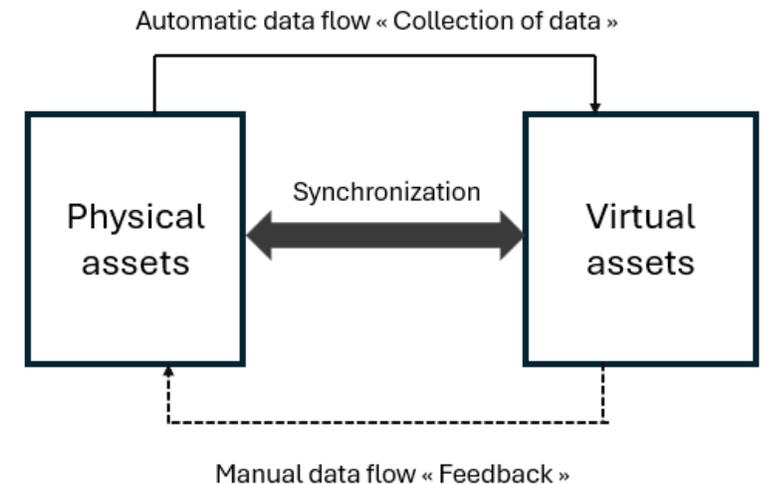
Flux "écriture"

Monitor

Analyser and optimiser

Exécuter

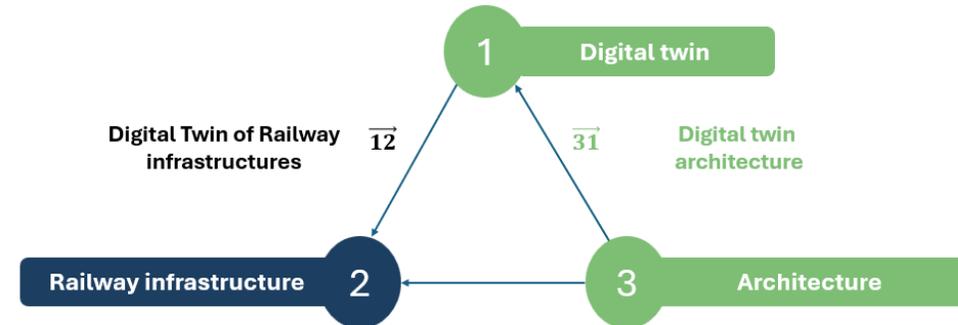
Contrôler



3

Architecture

Définition d'architecture



ISO/ IEC 42010:2022 Logiciel, systèmes et entreprise — Description de l'architecture

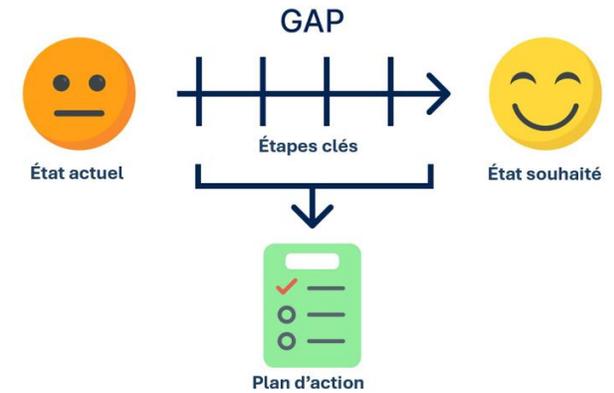
Une architecture traduit **les concepts ou propriétés fondamentaux** d'une entité dans son environnement et **principes directeurs pour la réalisation et l'évolution** de cette entité ainsi que des processus associés à son cycle de vie.

31 Architecture de jumeau numérique

Une architecture de jumeau numérique offre la possibilité de :

- Comprendre l'organisation des différentes entités du jumeau numérique ➡ « Vues d'architecture »
- Identifiera l'ensemble des flux de données qui circulent ➡ « Flux »
- Soulignera les préoccupations et les exigences majeures sur le JN ➡ « Exigences »

Gaps et Contributions



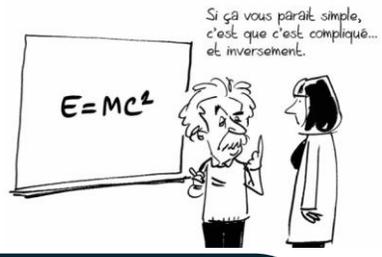
Contributions conceptuelles, méthodologiques et scientifiques :

1. Simplification et vulgarisation des concepts sur la base des normes (schémas, formules)
2. Formalisation des exigences du secteur ferroviaire concernant les jumeaux numériques
3. Proposition de critères d'évaluation pour les architectures de jumeaux numériques
4. Proposition de trois vues architecturales des jumeaux numériques

Validation des contributions

1. Exploration de la maturité du jumeau numérique à travers des cas d'usages (Livrable 2.1.5)
2. Validation des exigences du secteur ferroviaire (Fiches et entretiens)
3. Validation des vues d'architecture

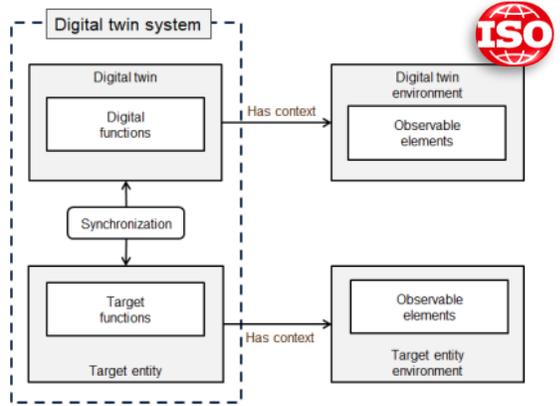
"Tout doit être le plus simple possible, mais pas plus simple que ça." Albert Einstein



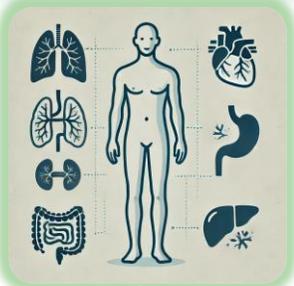
1- Concepts et mots clés



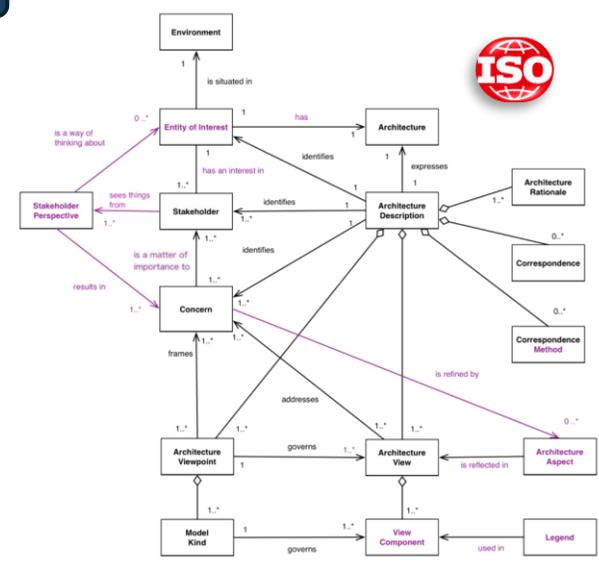
JN



- S={M,O,J,V,H,P,I,A,E}
- Modèle numérique : M
- Ombre numérique : $O = M + F1(t)$
- Jumeau numérique : $J = O + F2(t)$
- Jumeau virtuel : V
- Jumeau hybride : $H = J + V$
- Prototype de jumeau numérique : $P = V$
- Instance de jumeau numérique : $I = O$
- Agrégat de jumeau numérique : $A = \sum_{i=1}^n I_i$
- Environnement de jumeau numérique : E



Architecture



- $V_i = (C_i, B_i, M_i, F_i, E_i)$
- $C_i = \{C_{i1}, C_{i2}, \dots\}$ est l'ensemble des couches
- $B_i = \{B_{i1}, B_{i2}, \dots\}$ est l'ensemble des blocs
- $M_i = \{M_{i1}, M_{i2}, \dots\}$ est l'ensemble des modules
- $F_i = \{f_{ij}\}$ est l'ensemble des flux de données
- $E_i = \{e_{ik}\}$ est l'ensemble des exigences
- $C_{ij} = \{B_{ij1}, B_{ij2}, \dots\}$
- $B_{ijk} = \{M_{ijk1}, M_{ijk2}, \dots\}$
- $M_{ijkl} \xrightarrow{f} M_{ijkl}$
- $e \in E_i \rightarrow e: (V_i \text{ ou } C_{ij} \text{ ou } B_{ijk} \text{ ou } M_{ijkl})$

2- Exigences



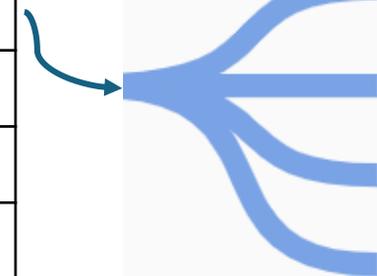
Exigences Organisationnelles	F	Framework
	R	Roles
	A	Alignment
	M	Management
	E	Empowerment

Exigences fonctionnelles	C	Capture
	O	Observe
	R	Represent
	E	Enable

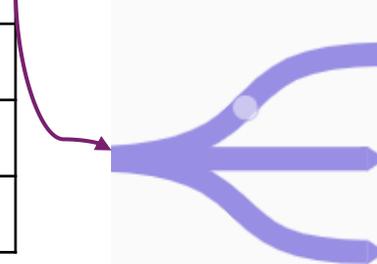
Exigences techniques	D	Data repository
	A	Accessibility
	T	Traceability
	A	Adaptability



- F1: Conformité réglementaire** "Respect des normes ferroviaires nationales"
- F2: Référentiels partagés** "Adoption de standards métiers reconnues (IFC Rail, RailML) pour un langage commun entre acteurs"
- F3: Uniformisation interne** "Usage de nomenclature partagées pour les actifs ferroviaire"



- C1: Collecte multi-source** "Capteurs IoT, systèmes existants, inspections terrain"
- C2: Modes d'acquisition** "Temps réel ou différé selon criticité"
- C3: Déclenchement événementiel** "Enregistrement lors d'événements (alerte, panne)"
- C4: Scalabilité** "Capacité à gérer un volume croissant de données"



- D1: Centralisation des sources** "Toutes les données (capteurs, SIG, GMAO, ERP) sont stockées dans un environnement commun"
- D2: Organisation technique** "Stockage structuré et versionné"
- D3: Extensibilité** "Possibilité d'intégrer de nouvelles sources sans perturber l'existant"

3- Critères d'évaluation



S'agit-il d'une architecture spécifique ou générique ?

Spécifique

Générique

S'agit-il d'une architecture testée ou non ?

Avant le test

Après le test

Syntaxe

Langage de modélisation

Respect des normes

Lisibilité/Traçabilité des flux

Sémantique

Cohérence fonctionnelle

Indépendance des couches

Réplicabilité

Pragmatique

Mise en œuvre

3- Critères d'évaluation



Après le test

Efficacité de la performance

Comportement temporel

Latence de mise à jour
Fréquence de synchronisation
Temps de traitement de données
Temps de communication entre systèmes

Utilisation des ressources

Qualité des données en entrée
Qualité des modèles
Qualité des algorithmes

Fiabilité

Tolérance aux pannes

Temps de récupération après une panne
Pourcentage de fonctionnalités maintenues en cas de panne

Disponibilité

Taux de disponibilités par rapport au nombre d'utilisateur

Scalabilité

Intégration inter-systèmes

Nombres de systèmes externes pouvant communiquer avec le JN
Services optimaux supportés par le JN
Temps d'intégration

Interopérabilité

Respect de formats standardisés

Nombre de formats supportés
Taux de compatibilité sémantique; données interprétables sans transformation manuelle

Impact

Economique

Anticipation de l'obsolescence des matériaux, équipements

Environnementale

Préparation des étapes de déconstruction, démantèlement, de mise au rebut ou de réutilisation

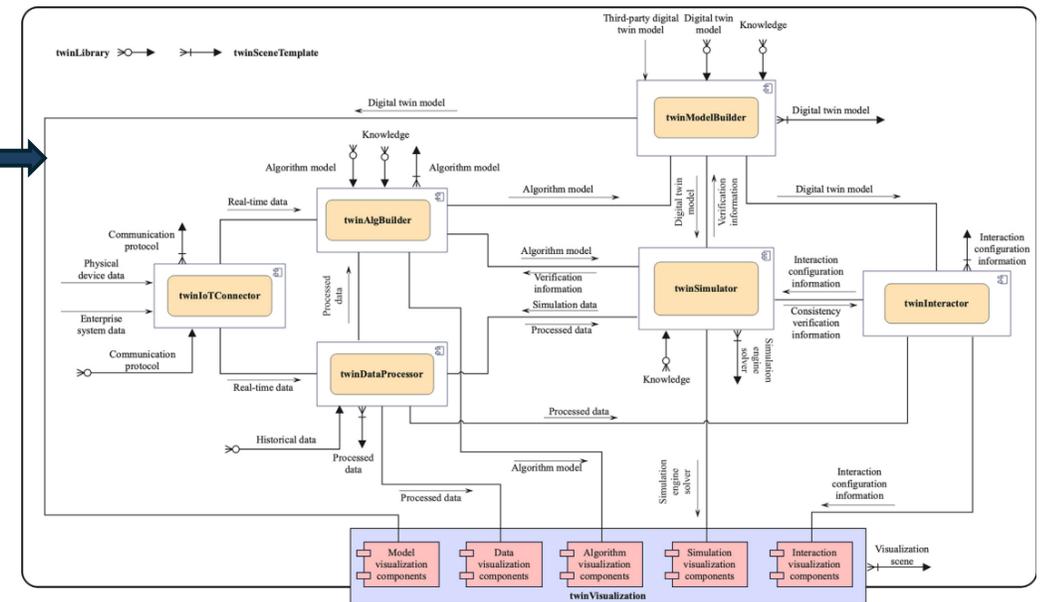
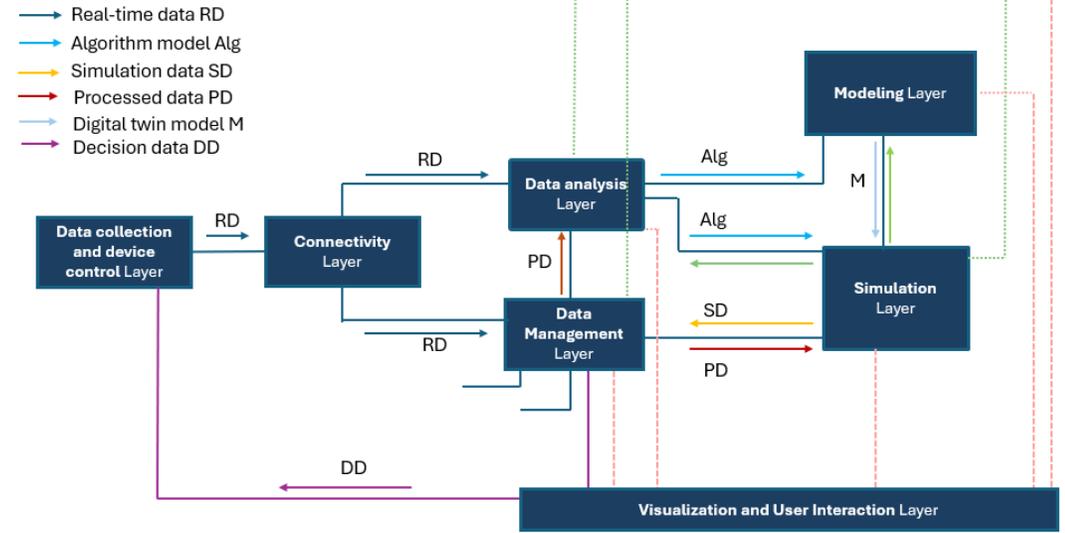
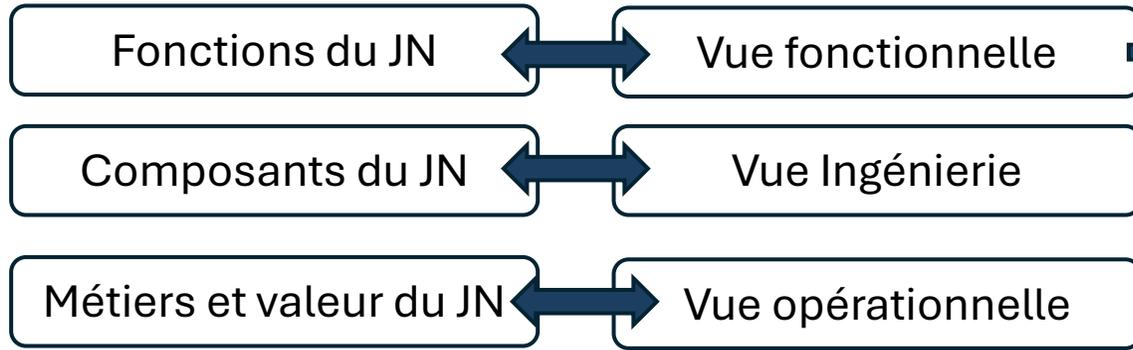
Autre

Sécurité

Sureté

4- Vues d'architecture

Architecture	Qualité syntaxique				Qualité sémantique			Qualité pragmatique
	Langage de modélisation	Respect de la norme 23247 « nomenclature des fonctions »	Respect de la norme 42010	Lisibilité/Traçabilité des flux	Cohérence fonctionnelle	Indépendance des couches	Répliquabilité	Mise en œuvre
Steindl et al, 2020	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Laamartl et al, 2020	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗
Ashtari talkhestani et al, 2019	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✓
Ferko et al, 2023	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✗
Tao et al, 2024	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓

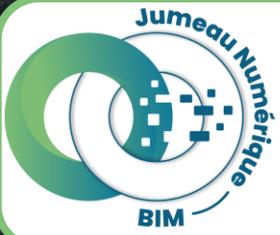


Architecture for makeTwin software platform, FEI, T. A. O., XUEMIN, S. U. N., CHENG, Jiangfeng, et al. makeTwin: A reference architecture for digital twin software platform. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2024, vol. 37, no 1, p. 1-18.

Plan



Chapitre	Sous-chapitres	Avancement
Chapitre 1: état de l'art 2 Articles	Jumeau numérique	
	Infrastructure ferroviaire	
	Architecture	
Chapitre 2: Exigences du secteur ferroviaire par rapport au Jumeau numérique 1 Articles	Besoin et contexte d'usage	
	Exigences du ferroviaire par rapport au jumeau numérique	
	Cahier de charge de référence regroupant exigences et cas d'usages	
Chapitre 3: Architecture de jumeau numérique	Critères d'évaluation des architectures	
	Analyse et critique des architectures	
	Vues d'architectures « Fonctionnelles, ingénierie et business »	Sep-Oct
Validation	Maturité du JN (Livrable Minerve) Exigences (Entretiens et fiches) Vues d'architecture (démonstrateur)	Nov-Dec



MINERVE
avec la filière ferroviaire
bpi**france**



KAYRROS



Instanciación d'un modèle d'architecture de jumeau numérique dans le cas d'une infrastructure ferroviaire existante

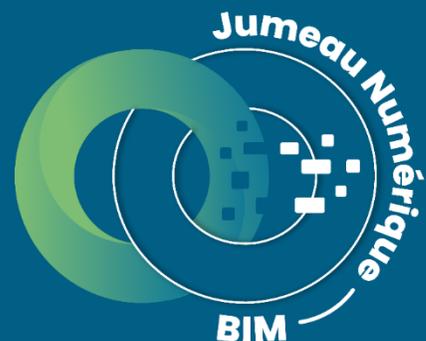
Par : Hibat Allah BABTY
Début : 13/11/2023



Philippe GOTTELAND
Marc BIYADI

Etienne PANSART

Benoit EYNARD
Matthieu BRICOGNE



MINERVE
avec la filière ferroviaire

COUPLAGE BIM & ACV POUR ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DES PROJETS FERROVIAIRES

Asmaa Benzidane

08/10/2025

Direction de thèse :

- Adelaide Feraille

Encadrement de thèse:

- Myriam Saadé (UTOPII)
- Eric Antoinet (Antea Group)
- Olivier Simon (Antea Group)
- Camilo Duran (IREX)

INTRODUCTION

Objectifs et Contexte

Couplage BIM avec l'ACV pour des évaluations environnementales des infrastructures ferroviaires .

- **Objectifs Principaux :**
- Positionner le projet en phase d'étude pour réaliser une analyse du cycle de vie lors de la conception.
- Automatiser l'évaluation des impacts environnementaux.
- Intégrer les données BIM et ACV pour une analyse environnementale multicritère.

INTRODUCTION

Etat de l'art : ACV , Couplage BIM-
ACV

État de l'art : Analyse du cycle de vie (ACV)

L'ACV : méthode d'évaluation des performances environnementales d'un produit, d'un projet ou d'un système tout au long de son cycle de vie

1. Définition des objectifs et du champ de l'étude

Intérêts des objectifs et les limites de l'étude

➤ Préciser l'unité fonctionnelle (UF): la fonction du système étudié

2. Inventaire de Cycle de Vie ICV

➤ Fournir des informations précises sur les impacts environnementaux

- Collecte de données relatif aux flux de matières, d'énergie et d'autres intrants relatifs à la réalisation de l'UF

3. Analyse de l'impact environnemental ACVI

➤ Transformation des flux en indicateurs d'impacts environnementaux

- Ex: Changement climatique, Toxicité aquatique, l'eutrophisation

4. Interprétation des résultats

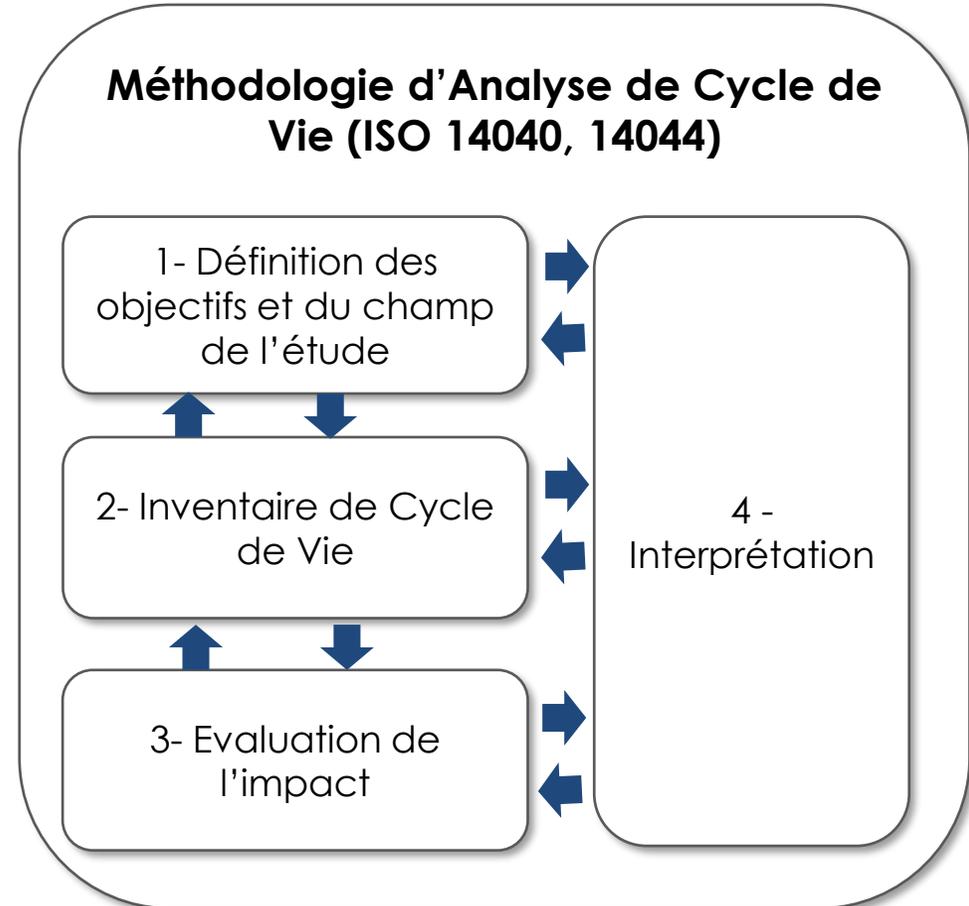
➤ Analyser et présenter les résultats de l'ACV

- Identifier les opportunités d'amélioration
- Informer les parties prenantes et orienter les décisions



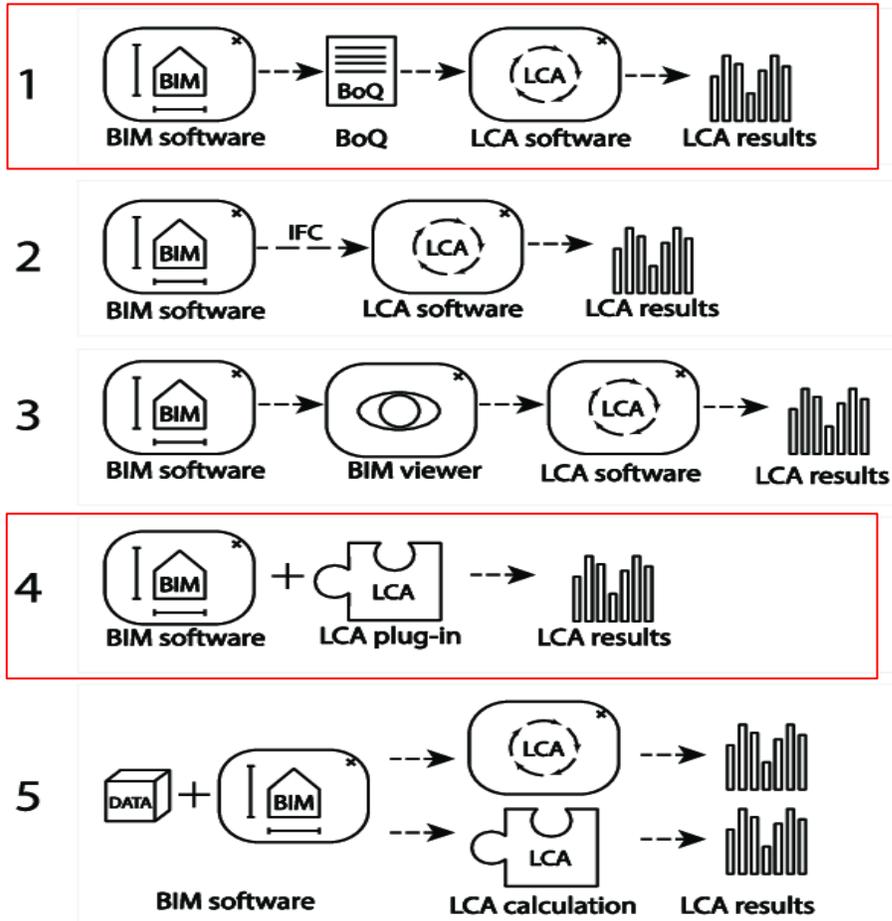
Harmonisation du développement urbain et des préoccupations environnementales

Méthodologie d'Analyse de Cycle de Vie (ISO 14040, 14044)



État de l'art:

Approches Intégration BIM-ACV



Intégration via BoQ (bill of quantity)

Intégration via IFC (Industry Foundation Classes)

Intégration via un visualiseur BIM

Utilisation de plug-ins d'ACV

Intégration des informations dans les objets BIM

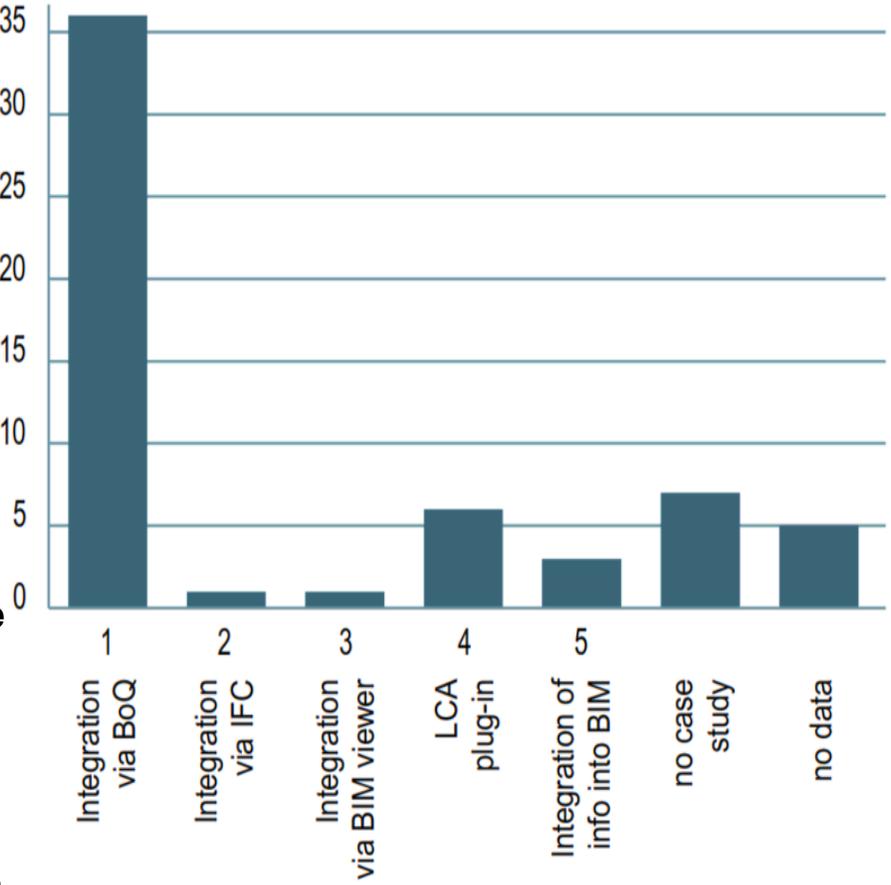


Figure. Approches d'intégration BIM/ACV . (Wastiels, L., & Decuyper, R. (2019, August). Identification and comparison of LCA-BIM integration strategies.)

Figure. Classification de l'utilisation des approches d'intégration dans les 60 études identifiées . (Potrc Obrecht, T., Röck, M., Hoxha, E., & Passer, A. (2020). BIM and LCA integration: A systematic literature review..)

Avancées et perspectives

Approches méthodologiques, cas
d'étude



Approche manuelle

➤ Approche basée sur l'estimation des quantités de matériaux utilisés dans le projet à partir du modèle BIM après définition de leurs propriétés (type de matériau)

- Défis :
- Assurer une transparence des résultats de l'ACV.
 - Réduire les efforts liés au contrôle qualité et à la visualisation en améliorant les liens entre objets BIM et données d'ACV.



ei ecoinvent
Trust in Transparency

FDES /
Données ICV

inies

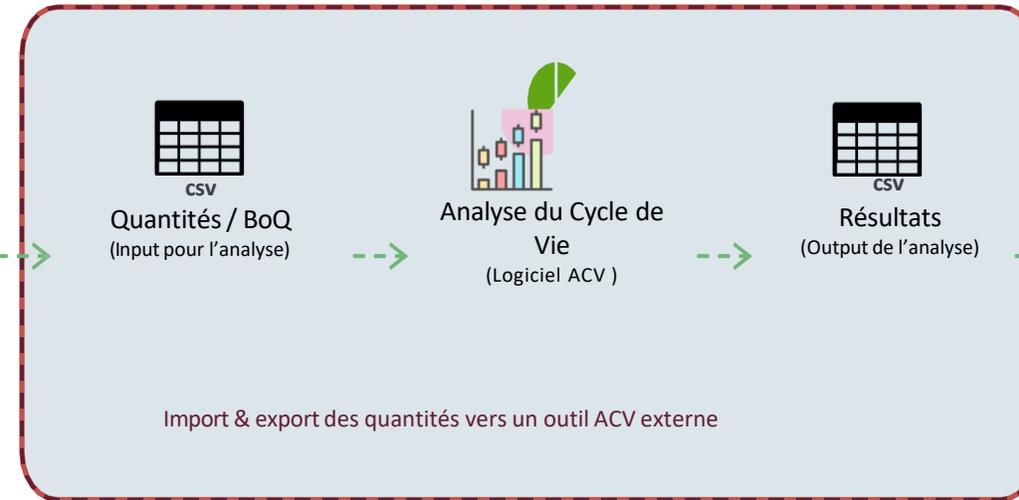
Modèle intégrant le géoréférencement de l'infrastructure



Modèle de structure



Coordination dans un modèle central

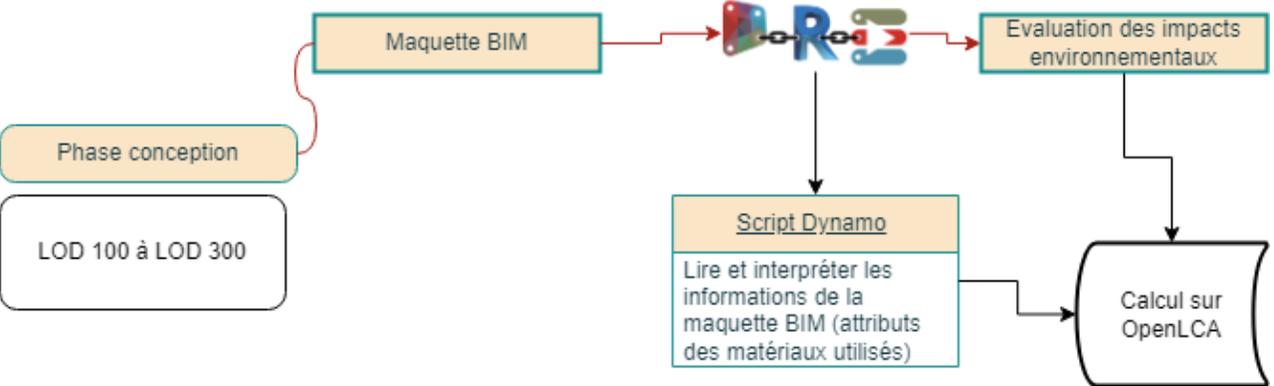


Visualisation des résultats

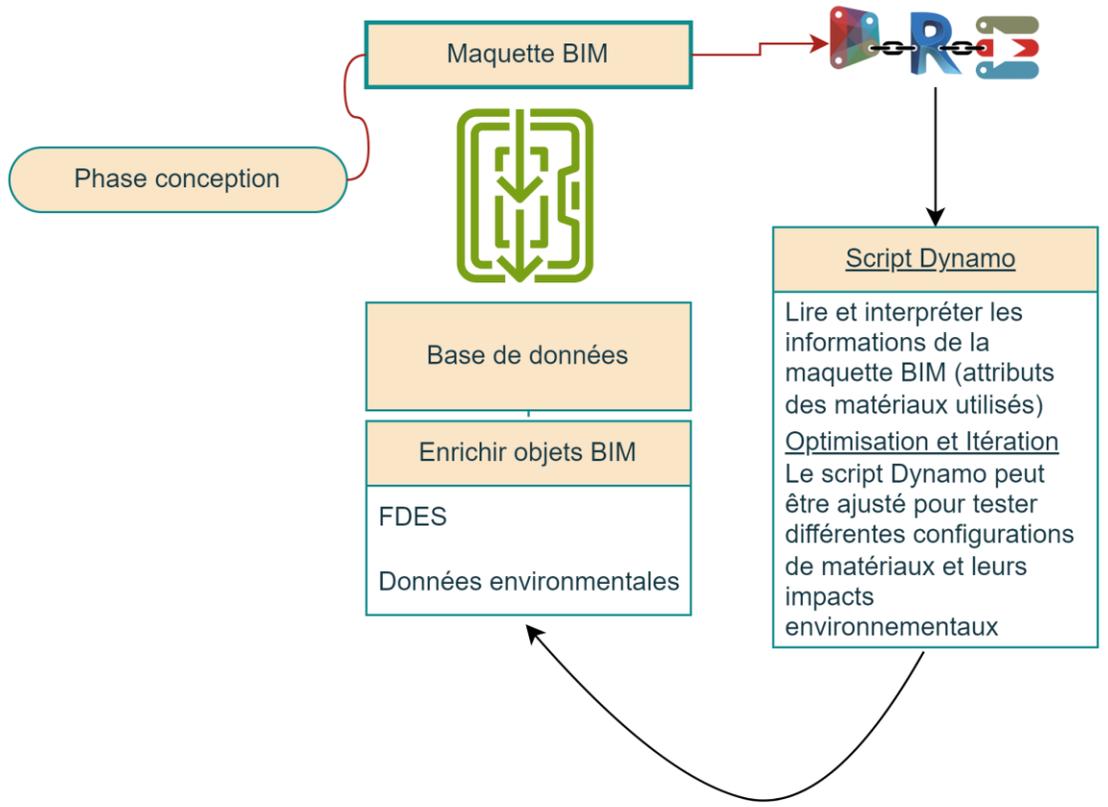
Avancement méthodologique

Intégration des données BIM et ACV :

Process pour approche semi-automatique



Process pour approche automatique



Avancement méthodologique : 3 étapes du couplage BIM–ACV

1

Exploration de BiblioBIM



2

Couplage de la maquette et de la base de données environnementale (Ecoinvent)

ecoinvent

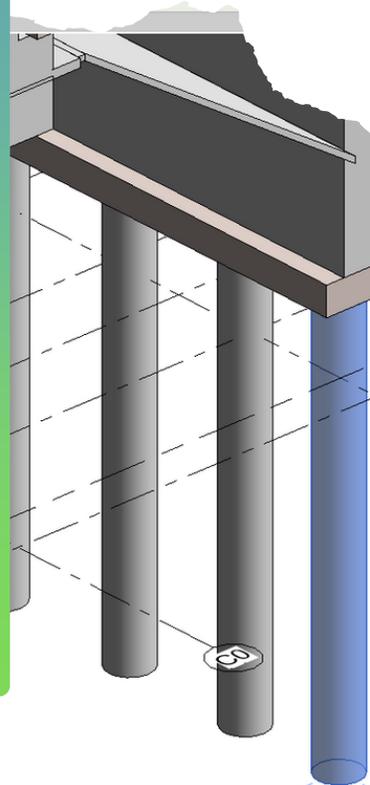
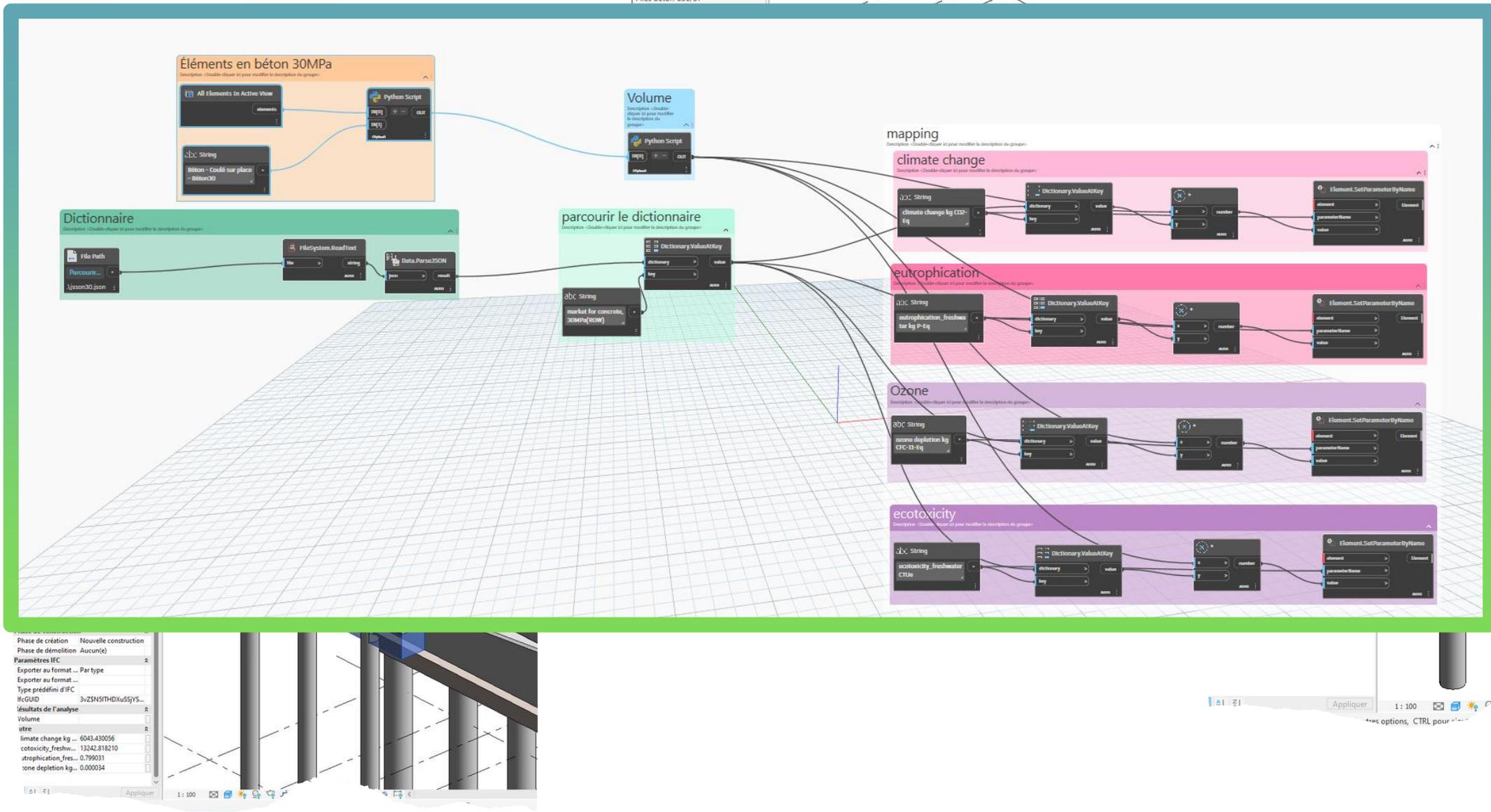


3

Mise en œuvre d'un test de compatibilité du couplage effectué



Résultats : données ACV intégrées à la maquette



Avec la contribution de H. Saadaoui (stage été 2025)

Prochaines étapes : enrichir directement l'IFC

○ Résultats obtenus

✓ Extraction des données réussie

❑ Récupération des quantités et des types de matériaux à partir du modèle IFC.

❑ Visualisation des objets avec des requêtes `ifc.by_type()`.

✓ Difficultés rencontrées

❑ Problèmes avec l'ajout de propriétés via

`IfcOpenShell`. Incompatibilité entre certaines versions de Python et `IfcOpenShell`.

❑ Données manquantes dans le fichier IFC nécessitant une vérification manuelle

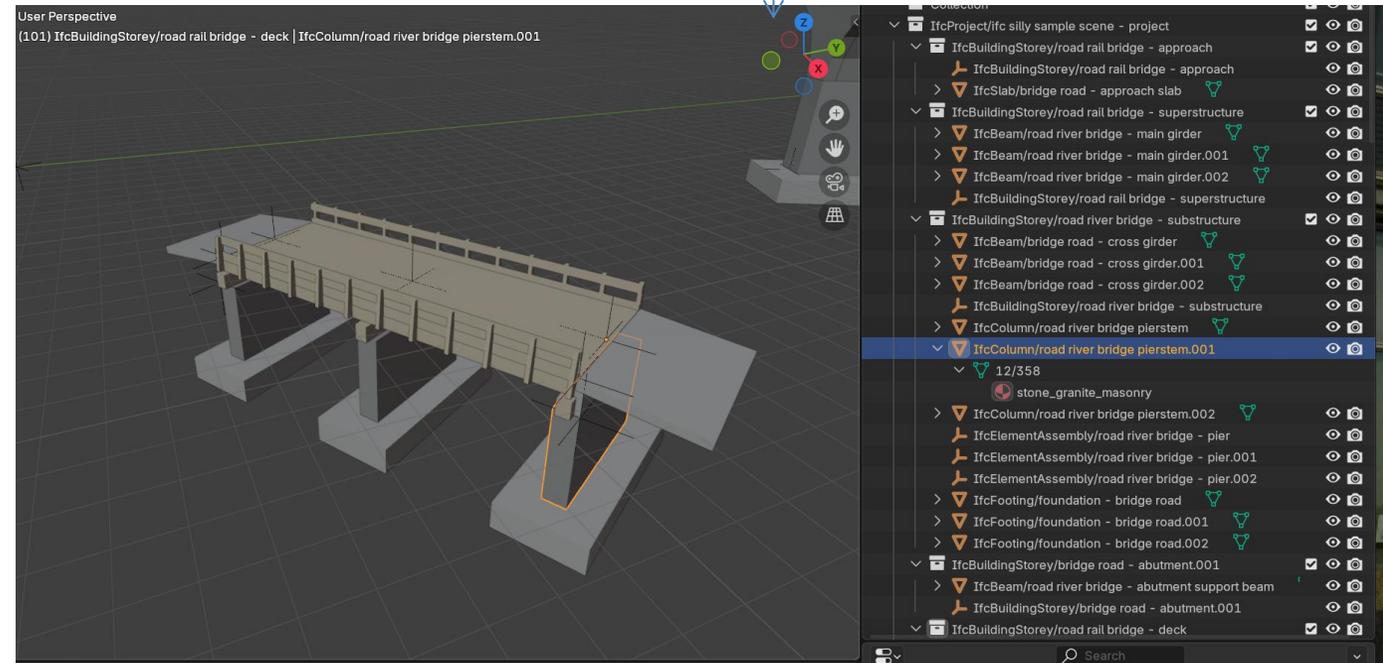
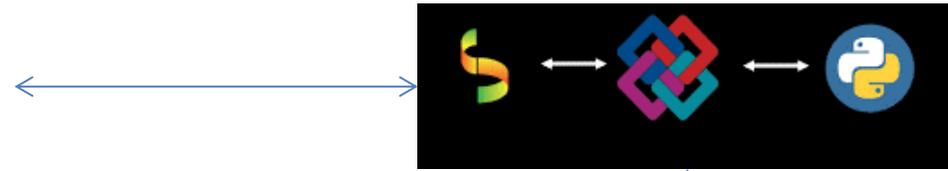


Image : Visualisation de l'ouvrage d'étude (pont rail), : objets et leurs paramètres sous format IFC

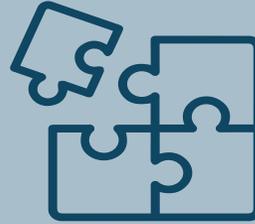
Avancées et perspectives

Objectifs de l'étude



Phase d'analyse

- Identifier l'ensemble des matériaux et constituants d'une infrastructure ferroviaire;
- Analyser leur cycle de vie considérant les entrants et les sortants;



Phase conception

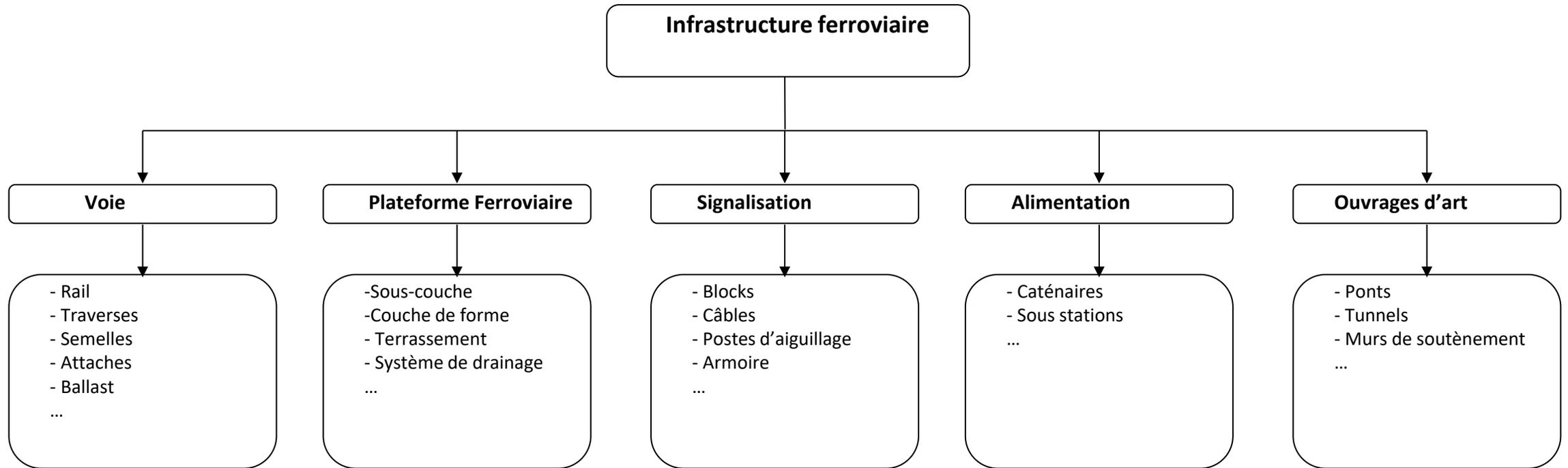
- Avoir une réflexion plus approfondie en éco-conception pour une meilleure intégration environnementale des projets;



Phase évaluation

- Évaluer les impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie pour identifier les leviers de réduction des impacts.

Avancement de la thèse : cas d'étude



Cas d'étude : LGV SEA (Tours–Bordeaux)

La section étudiée comprend 302 km de double voie LGV, plus 38 km de double voie standard se raccordant au réseau existant.

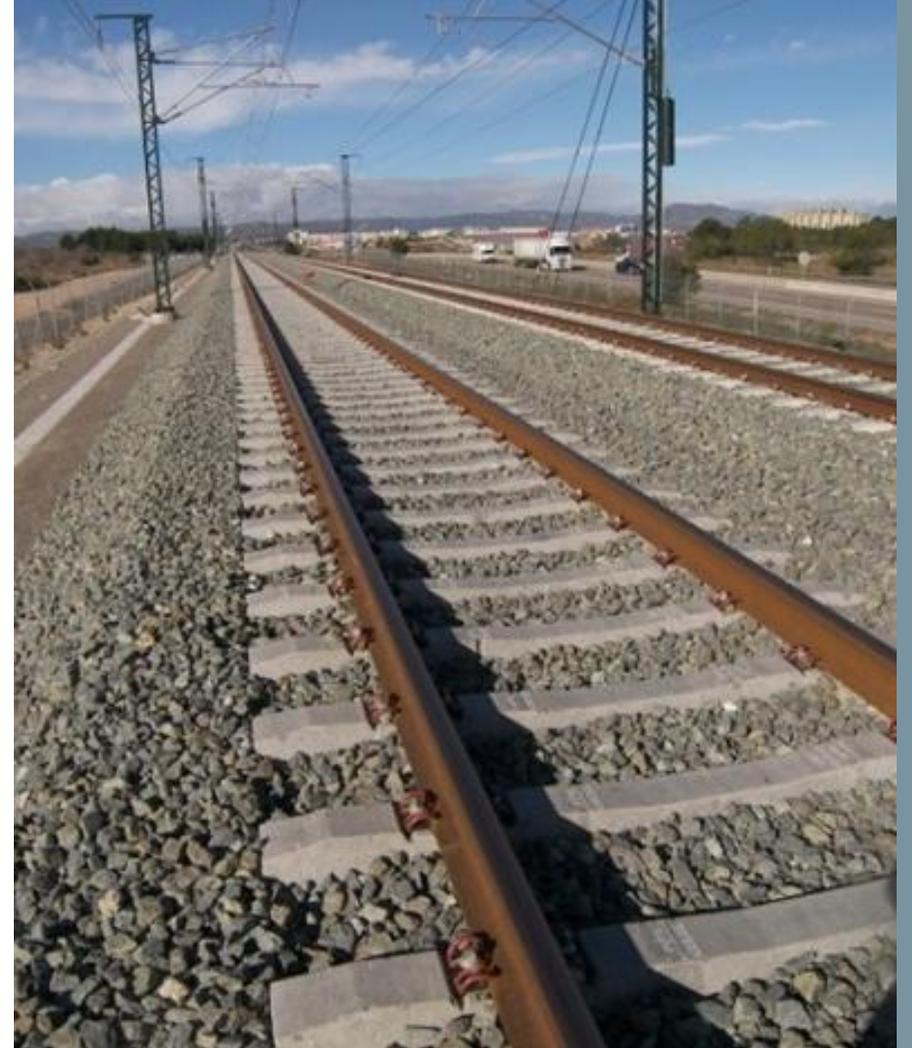
Avancement de la thèse : cas d'étude

L'unité fonctionnelle proposée :

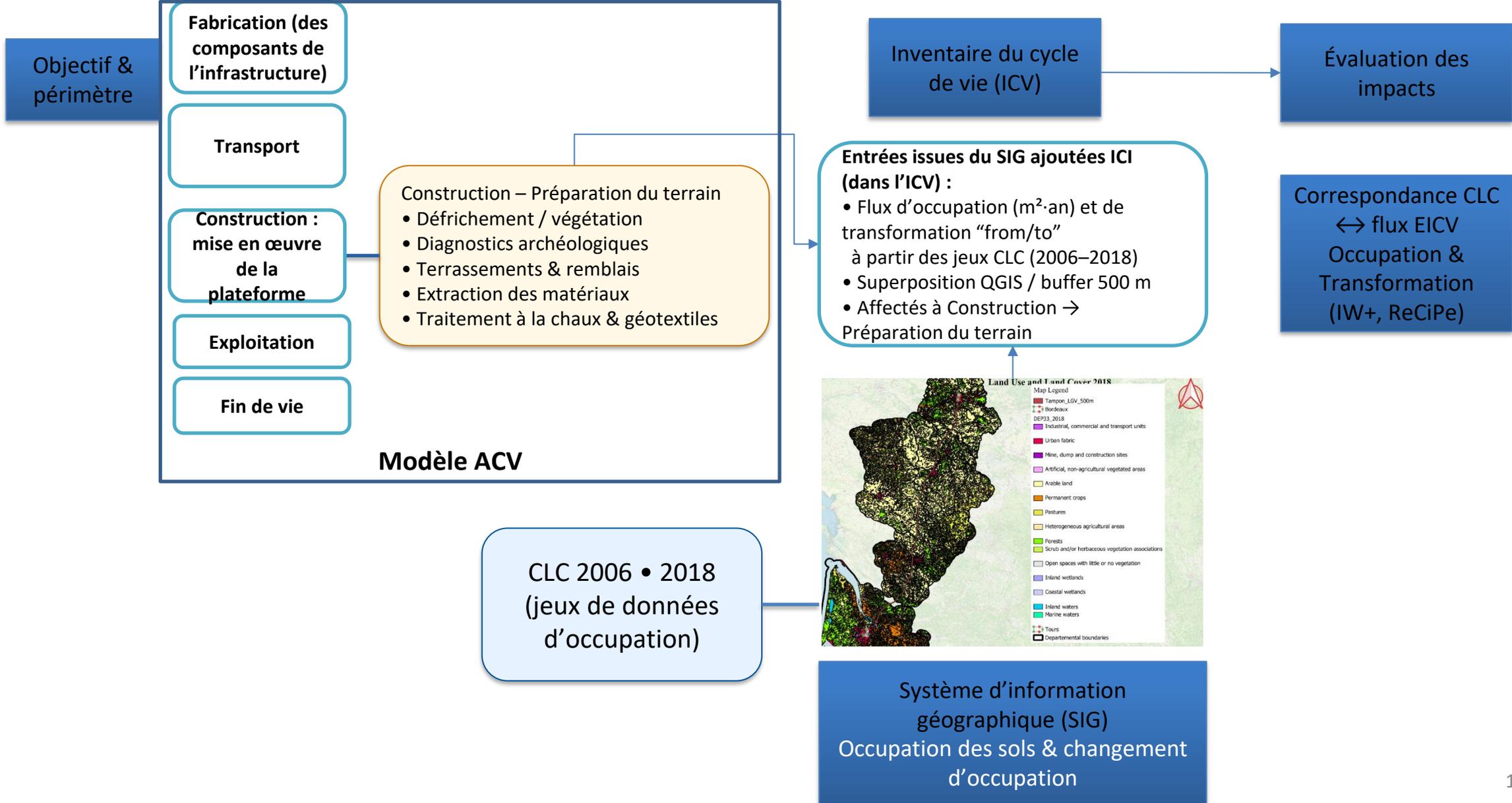
« Permettre la circulation de matériel roulant de type TGV à 300 km/h jusqu'à 17 tonnes à l'essieu pendant une durée d'observation de 100 ans. »

Rapportée à:

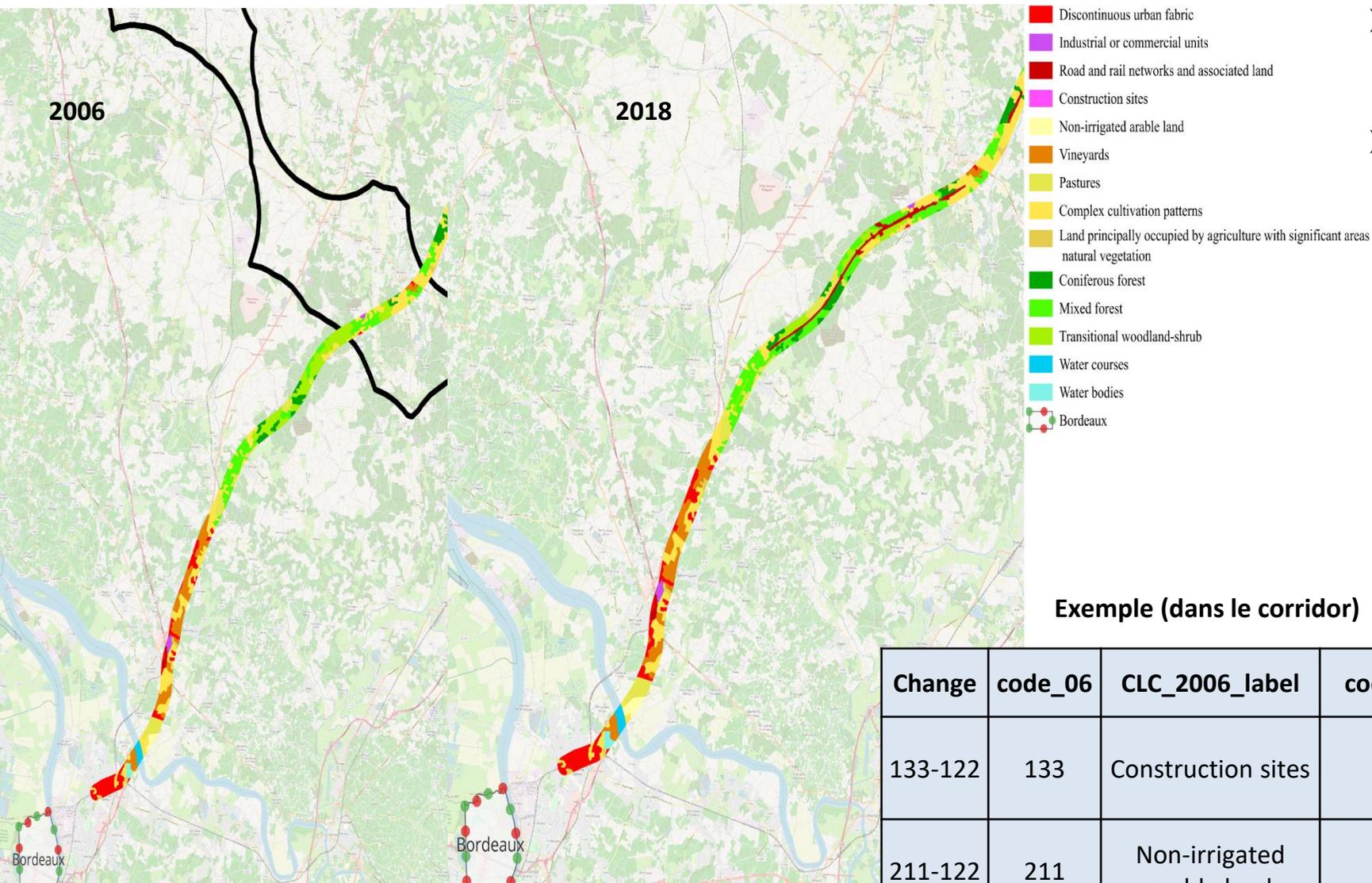
« 1km linéaire de voie ferrée double. »



Intégration SIG-ACV : approche globale



Changements d'occupation des sols entre 2006 et 2018



Exemple (dans le corridor)

Change	code_06	CLC_2006_label	code_18	CLC_2018_label	Area (ha)
133-122	133	Construction sites	122	Road and rail networks and associated land	52
211-122	211	Non-irrigated arable land	122	Road and rail networks and associated land	1152

Sources de données :

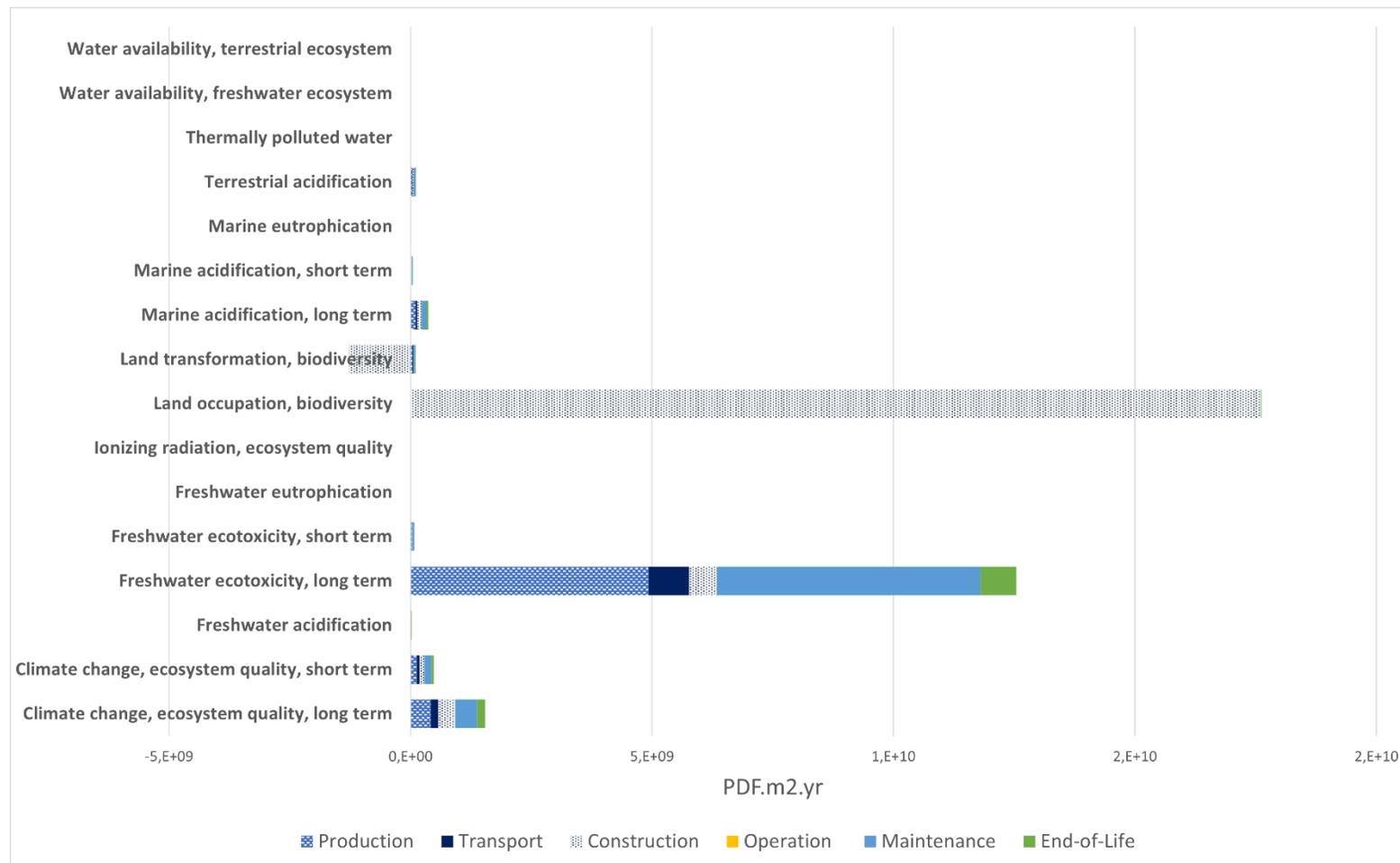
- Les bases de données cadastrales et d'occupation des sols (Corine land cover).
- Les plans du projet de la LGV SEA fournis par les acteurs impliqués dans la construction.
- Les images satellites et données SIG permettant d'affiner la classification des zones impactées.

Contexte

- Étude pré-construction (2006) : situation de référence avant la mise en service de la ligne.
- Étude post-construction (2018) : situation de référence après la mise en service de la ligne (mi-2017).

Résultats niveau dommage:

IMPACTWorld+ (Default_Recommended_Damage 1.47)



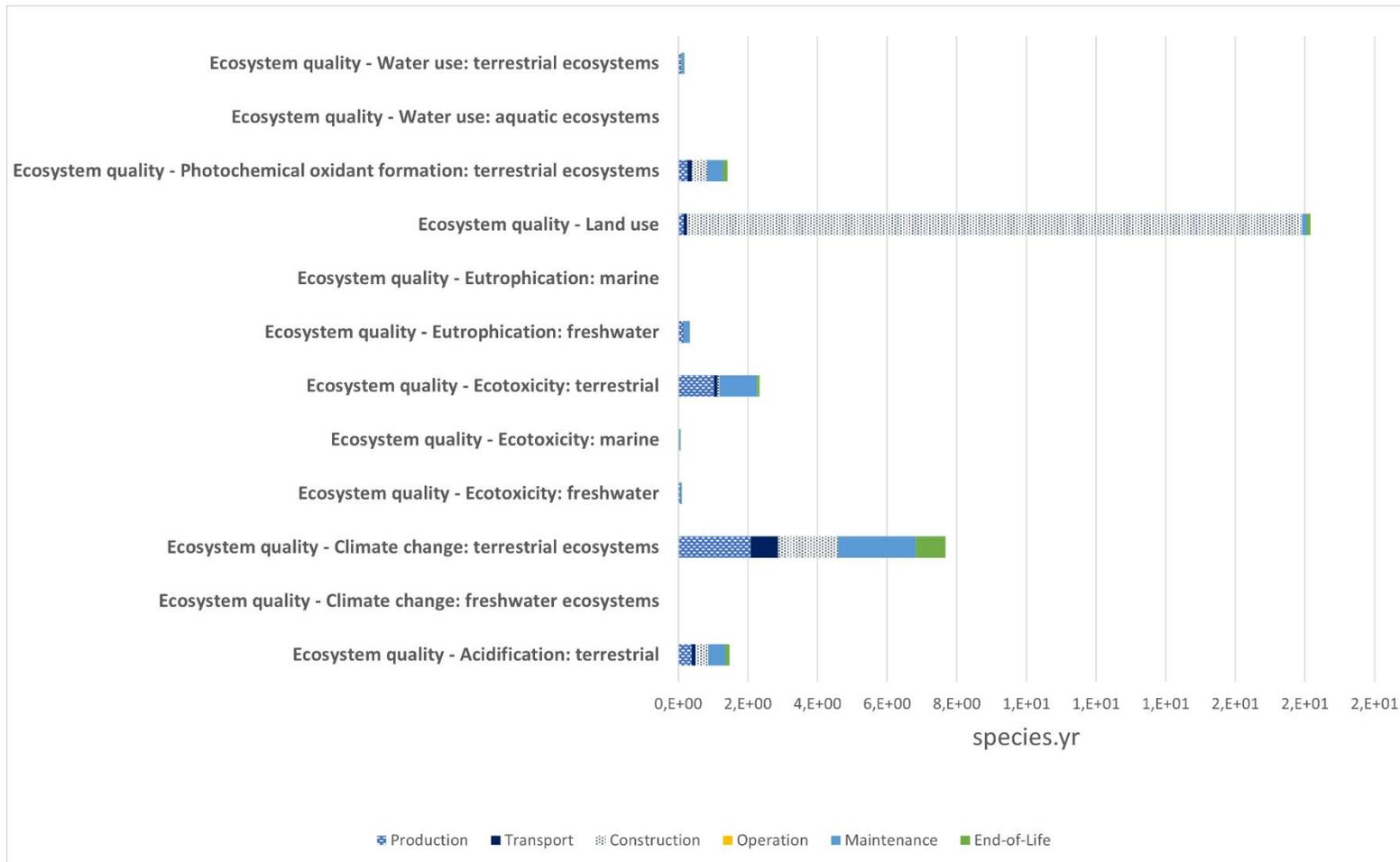
- L'occupation des sols domine ($>2 \times 10^{10}$ PDF·m²·an)
- La phase Construction est le principal contributeur
- La transformation des sols apparaît nette négative (effet de signe de la méthode)

Flux de transformation des sols*	FC (PDF·m ² ·yr /m ²)	Impact (PDF·m ² ·yr)
From annual crop, non-irrigated (FR)	-314	-4.37×10^{10}
From heterogeneous agriculture (FR)	-314	-1.78×10^{10}
From forest, extensive (FR)	-89	-5.50×10^9
From pasture, man-made (FR)	-202	-4.02×10^9
From urban, discontinuously built (FR)	-166	-1.57×10^9
To annual crop, non-irrigated (FR)	+314	$+4.10 \times 10^{10}$
To heterogeneous agriculture (FR)	+314	$+1.65 \times 10^{10}$
To pasture, man-made (FR)	+202	$+3.86 \times 10^9$
To urban, discontinuously built (FR)	+166	$+1.85 \times 10^9$
To forest, extensive (FR)	+89	$+4.43 \times 10^9$
Net balance (all flows)		-1.17×10^9

*Unités : CF en PDF·m²·an/m² ; Impact en PDF·m²·an. Négatif = transformations « from » ; positif = transformations « to ».

Résultats niveau dommages :

ReCiPe 2016 v1.03, endpoint (H)



- L'occupation des sols domine également.
 - Changement climatique = 2ème contributeur.
 - Écotoxicité et eutrophisation : contributions mineures.
- Les deux méthodes convergent : l'occupation des sols est le principal moteur

Conclusion



ACV des projets ferroviaires en phase conception : approche méthodologique

Base de données

- Inclure des matériaux spécifiques à l'infrastructure ferroviaire et aux voies ferrées.
- Enrichir les maquettes ferroviaires avec des données environnementales couplées à des bibliothèques d'objets BIM (BiblioBIM).
- Utiliser une plateforme (Ex : Trimble) pour intégrer et partager ces données dans un cadre collaboratif.



Processus d'évaluation

- Identifier les principaux choix de conception et intégrer les exigences en matière d'ACV tout au long du développement du projet.
- **Intégration des données de flux ou d'impacts :**
 - Enrichissement des objets BIM
 - Coupler les objets BIM avec une base de données d'inventaire de cycle de vie
- **Développement d'un script Dynamo**
- **Validation par l'application d'une étude de cas**

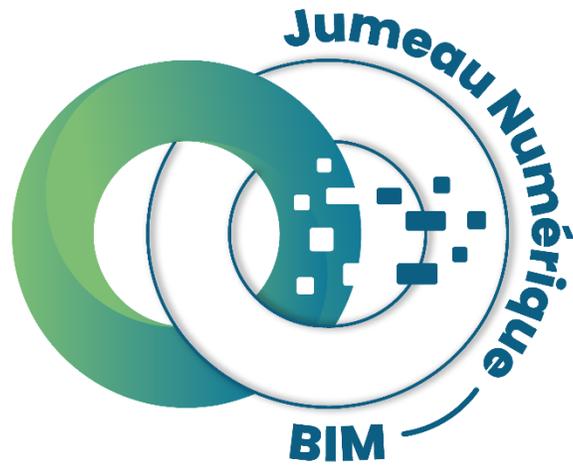
Messages clés

- **BIM + ACV = décisions chiffrées dès l'esquisse** : extraction automatique des quantités, mise en correspondance matériaux → flux, comparaison de variantes.
- **Postes dominants** : béton/ciment et acier ; l'occupation des sols pèse fortement pour les infrastructures ferroviaires.
- **Proposition concrète** : recherche de 2 à 3 cas d'essai (maquettes et tracés) pour tester la passerelle et enrichir la table de correspondance.





MERCI



MINERVE
avec la filière ferroviaire



A REVIEW OF MODELS OF HIGH-SPEED RAILWAY TRACK DYNAMICS FOR ASSESSING SLEEPERS AGING

K. Kadekeshova, P. Jehel, P. -E. Gautier, F. Gatuingt

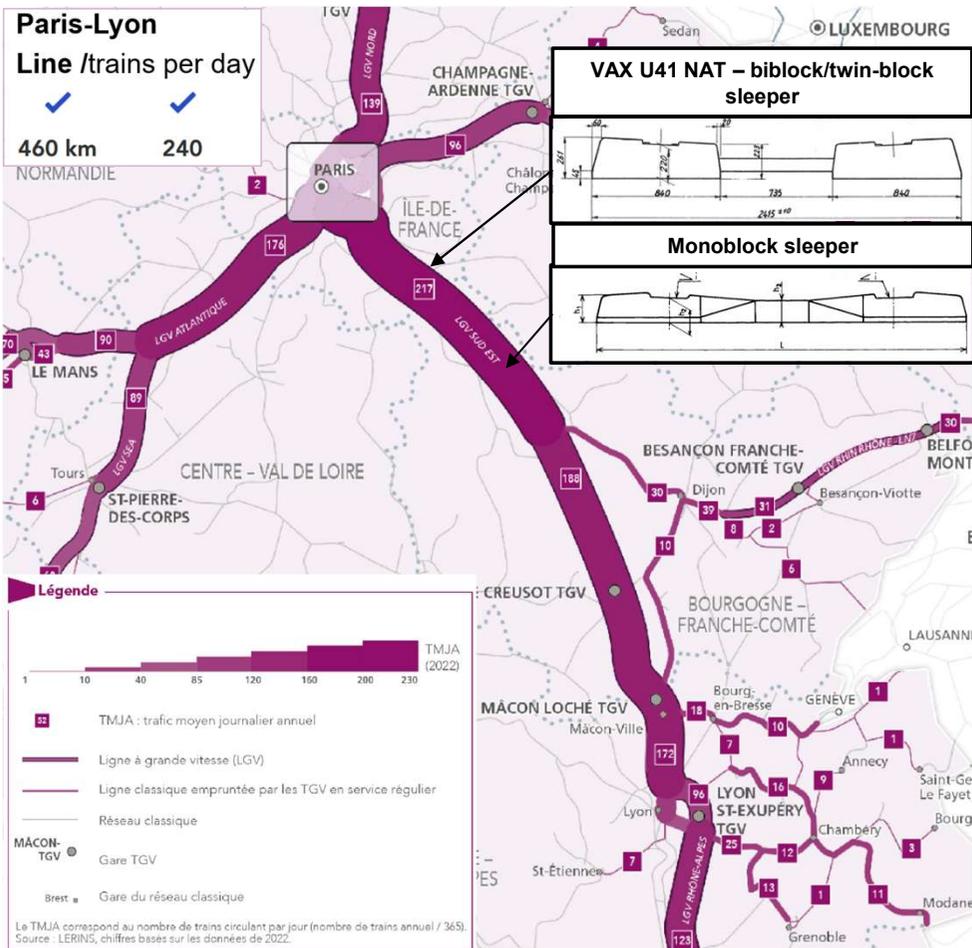
Université Paris-Saclay
CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMPS - Laboratoire de
Mécanique Paris-Saclay
91190, Gif-sur-Yvette, France



The MINERVE project has been financed by the French government within the framework of France 2030

08 / 10 / 2025

Introduction



TGV-A 325 - high speed train

Formation: 2 power cars + 8 passenger cars
Total length: 200,19m
Velocity: 300km/h = 83m/s
Load: 17t per axle or 83,4kN per wheel (26 wheels, 52 wheels)

≈ 2*10⁶ cycles
per year

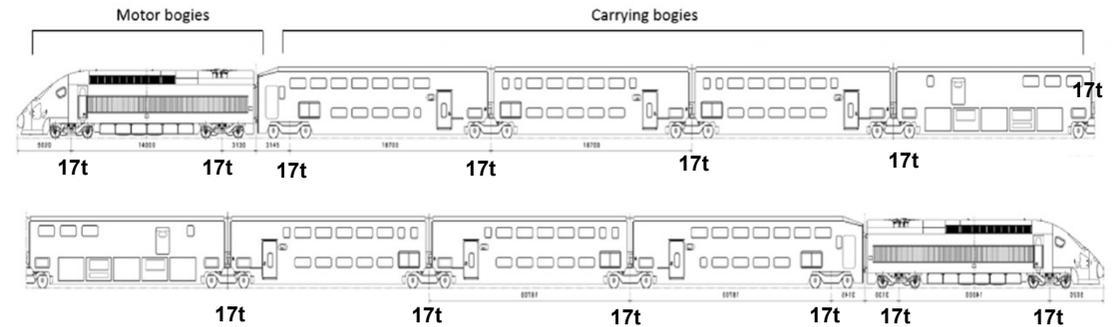


Figure 1. High-Speed Train “Brittany – Loire”,
(adapted from Khairallah et al., 2019)

Introduction

Current approach

The SNCF Reseau has already used statistical approaches to predict the lifetime before failure of track components (sleepers) and planning maintenance activities. The main tasks when using statistical models for residual life prediction consist in selecting a valid statistical model and in identifying its parameters from experimental data. The failure function to measure the probability of failure $f(t)$ at time t :

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\int_0^t f(\tau)d\tau\right)$$

The Weibull distribution is a continuous probability distribution. The probability density function of a Weibull random variable:

$$f_w(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} ; (\eta, \beta) > 0$$

$\beta > 1$, $f_w(t)$ is an increasing function and thus provide a model for an aging item that is more likely to fail as it gets older;
 $\beta < 1$, $f_w(t)$ decreasing function that is less likely to fail as it gets older;
 $\beta = 1$, is an exponential mode.

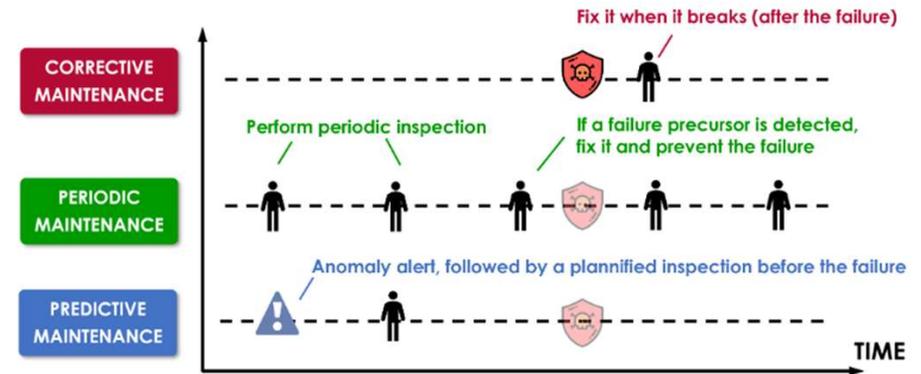


Figure 2. Maintenance strategies: corrective maintenance, time-based preventive maintenance, predictive maintenance, (Le Nguyen, 2023).

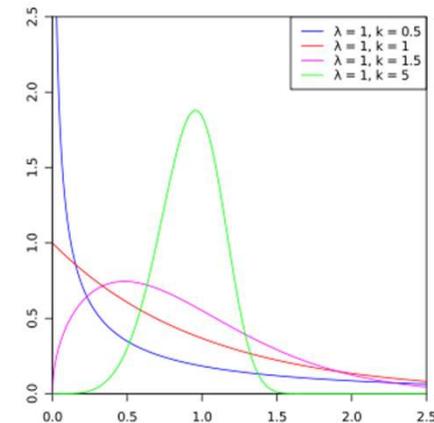


Figure 3. Probability density function (https://en.wikipedia.org/wiki/Weibull_distribution).

Introduction

In France, the National Rail Network (NRN) covers 2,024 km of high-speed lines (HSL). The network allows trains to reach speeds of up to 320 km/h, (Arlaud, 2016).

Challenges in HSL : transition zones, degraded ballast, unsupported sleeper, improper maintenance, stiff rail pads and etc.

- **Transition zones**

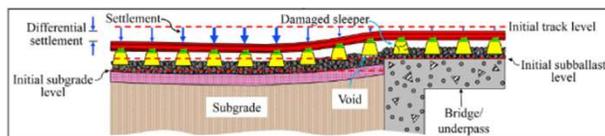


Figure 1. Transition zone between an open track and stiff structure, (Punetha & Nimbalkar, 2023)

- **Degraded ballast**
- **Stiff rail pads**

- **Unsupported sleeper**

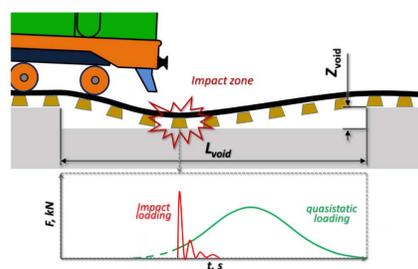


Figure 2. Track with void zone, (Sysyn et al., 2021)

- **Improper or Lack of Maintenance**

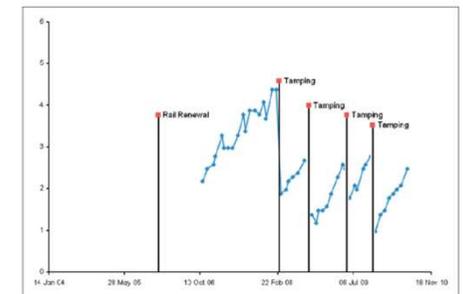


Figure 3. Vertical alignment of a track and recorded maintenance interventions, (Prescott and Andrews, 2013).

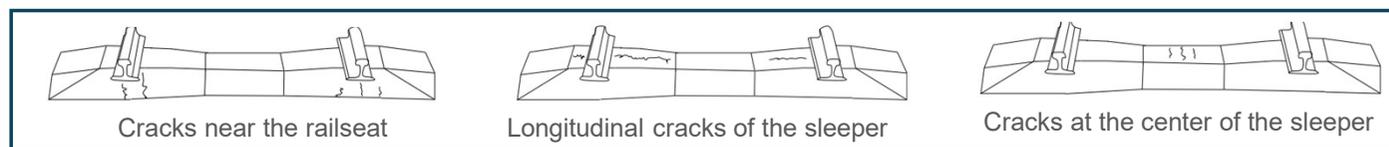


Figure 4. Cracks in the sleepers (You et al. 2017)

How can we better assess the aging and remaining lifetime of railway tracks, especially in high-speed lines?

- 1) **Physical model** for predictive maintenance, global and local **numerical simulations**;
- 2) **Sleeper failure** – local phenomena.

Track components models – Rails and Rail pads, fasteners

Rail models:

- **Euler-Bernoulli beam** model, (Khairallah et al, 2022); (Sysyn et al, 2021); (Lei and Rose, 2008); (Sheng et al, 2004); (Kaynia et al, 2017); (Pinault et al, 2020).
- **Timoshenko beams** (accounting both for bending and shear deformation), (Nguen et al, 2011); (Kargarnovin et al, 2005); (Wu and Thompson, 2004); (Dai et al, 2018); (Rhylane and Ajdour, 2024).
- **3-dimensional finite elements** (Nguyen et al, 2011); (Azizi et al, 2020); (Wang et al, 2020); (Yang et al, 2021).

Rail pad and fastener:

- In France 9.0mm thick pads with 90kN/mm of stiffness, (Sol-Sánchez et al, 2015).
- UV rays and temperature degrade pad stiffness → gradual increase reaching 33% to 41% over a lifespan of 1 to 3 years, (Carrascal et al, 2018).
- Fatigue increases the stiffness and reduces the thickness, (Carrascal et al, 2016), (Sol-Sánchez et al, 2014).

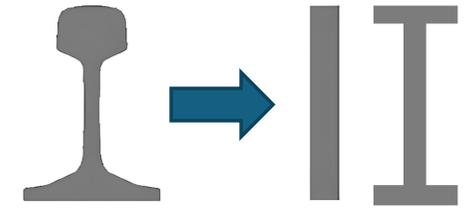


Figure 6. Rail model assumption: cross sections with equivalent moment of inertia of UIC60 rail

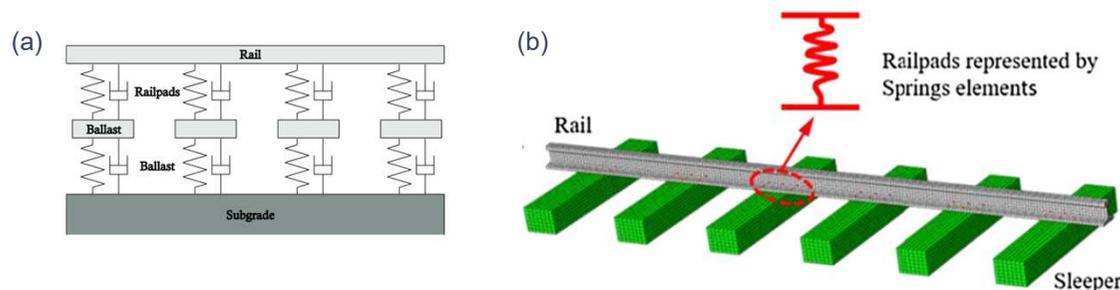


Figure 5. Railway track models: (a) two-layered track model, (Connolly et al., 2015); (b) 3D FE model, (Wang et al., 2020).

Track components models – Sleepers and Ballast

Widely used sleeper types: bi-block B 450, monoblock M 450, (Arlaud, 2016), Appendix A.

Model types of sleepers:

➤ **Simplified models**

- Rigid concentrated masses, (Wu and Thompson, 2004); (Lei and Rose, 2008); (Sheng et al, 2004).
- Beam elements (discrete/ continuous), (Kaynia et al, 2017); (Rhyllane and Ajdour, 2024); (Ngamkhanong et al., 2021); (Arlaud, 2016), (Zhou et al., 2019).
- Surface imprints, (Khairallah et al, 2022) .

➤ **Detailed model**

- Finite solid elements, (Ngyuen et al, 2011).

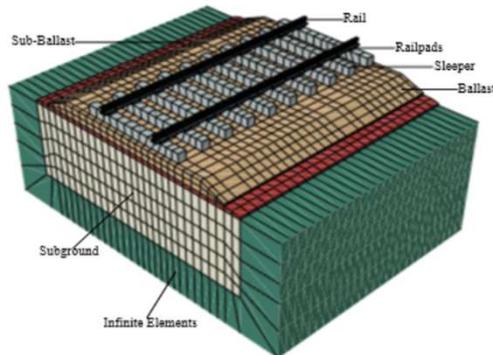


Figure 7. Sleeper model as 3D FE model representation, (Ngyuen et al., 2011).

Model types of ballast:

- Analytically as concentrated masses, (Connolly et al., 2015).
- A **continuum material** in FEM (Khairallah, 2019), (Nguyen et al., 2011) and analytically: Winkler elastic foundation (Dahlberg, 2001) or Pasternak viscoelastic foundation (Kargarnovin & Younesian, 2004).
- A **heterogeneous material**, (Cottureau et al., 2015); (de Abreu Corrêa et al, 2017).
- As **individual grains** using DEM, (Sysyn et al, 2021), (Shi et al., 2020), (Ahmadi et al., 2024)

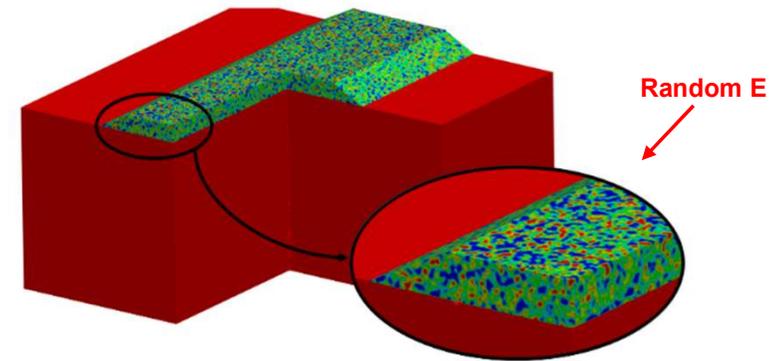


Figure 8. Ballast model as random model of Young's modulus, (de Abreu Corrêa et al, 2017)

Global Track Computational Model

Analytical model and 2D model

- ✓ Overall track response from moving loads (Sysyn et al, 2021); (Dai et al, 2018)
- ✓ Considers multi-body vehicle dynamics
- ✓ Low computational time
- ✗ Local phenomena

t_{comp} , complexity



2.5D model

- ✓ Periodic model, (Arlaud, 2016)
- ✓ Approximated using 2D geometry, while accounting for 3D loading
- ✓ Efficient frequency-domain analysis
- ✗ Not suitable for localized 3D phenomena

3D model

- ✓ Accurate replication of the railway track system behavior under repeated loads, (Wang et al, 2020)
- ✓ Fully integrated train-track systems
- ✓ Effective simulation of vibration from defects and irregularities, (Azizi et al, 2020); (Yang et al, 2021); (Kaynia et al, 2017)
- ✗ Large computational cost, (Nguyen et al, 2011)

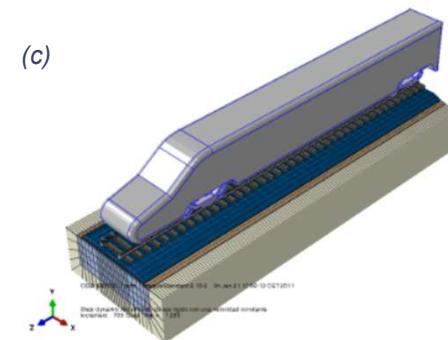
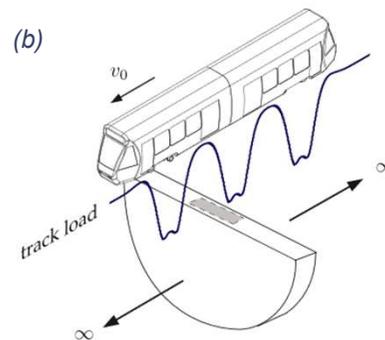
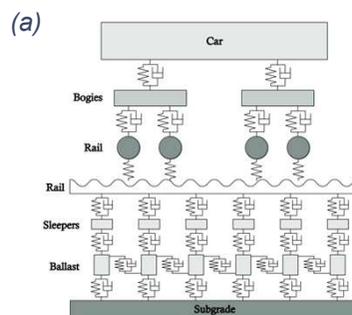


Figure 9. (a) coupled train-track 2D model, (Connolly et al, 2015); (b) A 2,5D approach (Connolly et al, 2015); (c) 3D FE coupled vehicle/track model, (Nguyen et al., 2011).

My approach: Global-Local Strategy and Fatigue Study

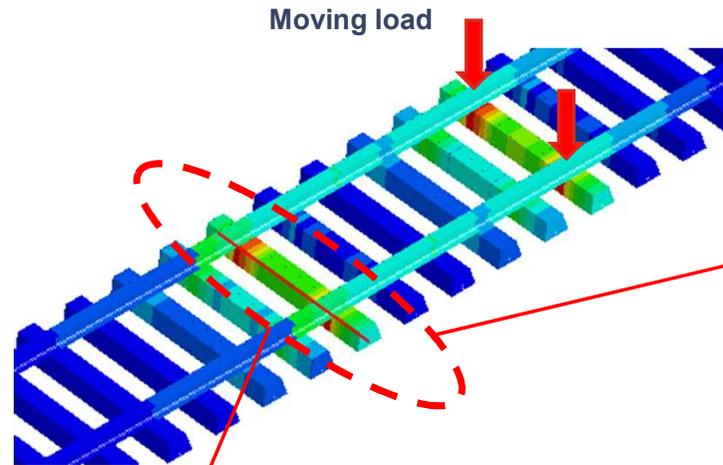
Global track behavior

Simplified model

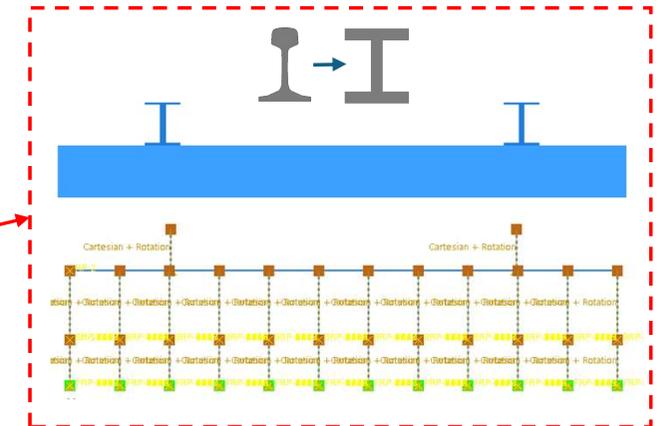
➤ Overall track model response

Model components:

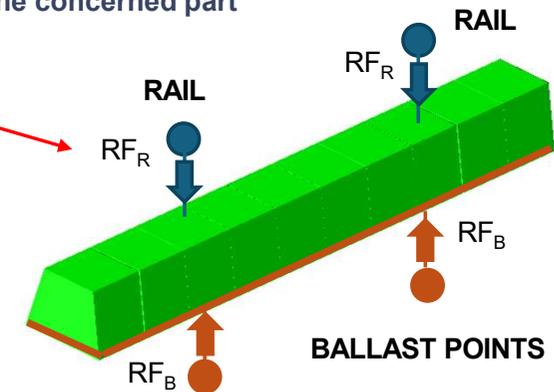
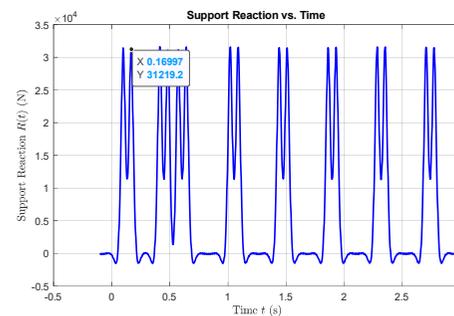
- Rails – Euler-Bernoulli beam;
- Rail pads – spring/damper system;
- Sleeper – Timoshenko beam;
- Ballast – point mass;
- Sleeper-ballast connection – spring/damper system;
- Subgrade - spring/damper system;
- Moving load – DLOAD subroutine in Abaqus.



Concerned sleeper



Extraction of the response at the concerned part



My approach : Global-Local Strategy and Fatigue Study

Local track behavior

3D model

- Sleeper 3D FE local model:
 - Reinforced concrete sleeper – solid elements
 - Forces acting from vertical loads at rail seat area – outputs from Global model
 - Forces acting from ballast - outputs from Global model
- Various loading conditions
- Global response – as inputs in local model
- **Failure in sleeper** – rupture in tensile steel

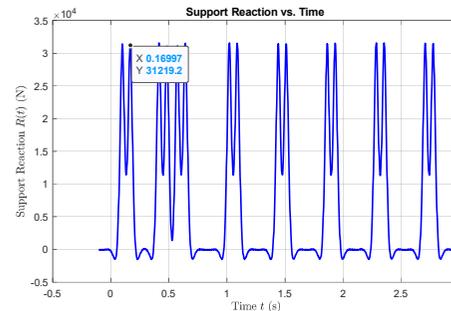


Figure 10. Reaction forces from vertical moving load

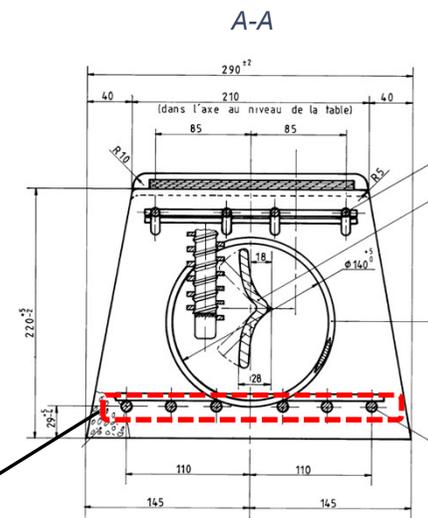
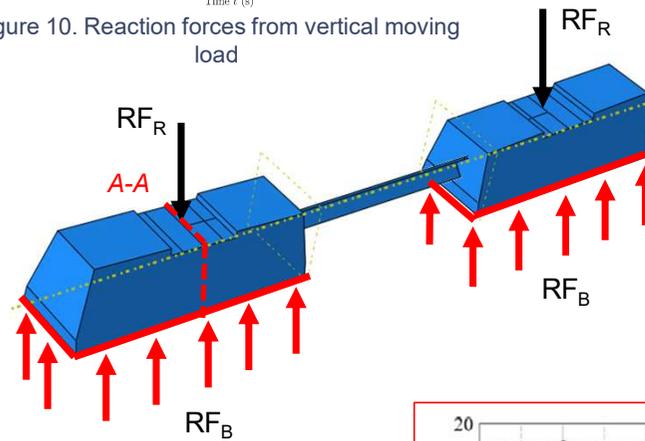


Figure 11. Sleeper cross section.

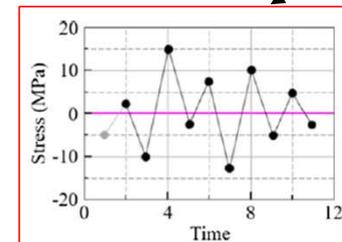


Figure 12. Stress-time history of tensile rebar, (adapted from Liu et al., 2018).

My approach : Global-Local Strategy and Fatigue Study

Remaining life time assessment

1. Stress-time history at the tensile rebars
2. Residual Life time calculation using Rain flow counting method, (Sanchez et al., 2016)
3. Constructing of S-N (stress-number of cycles) curve of reinforced concrete sleeper
4. Considering various scenarios, constructing of Master S-N Curve to predict long term response, (Houhou et al., 2014), (Fatemi et al., 2015).

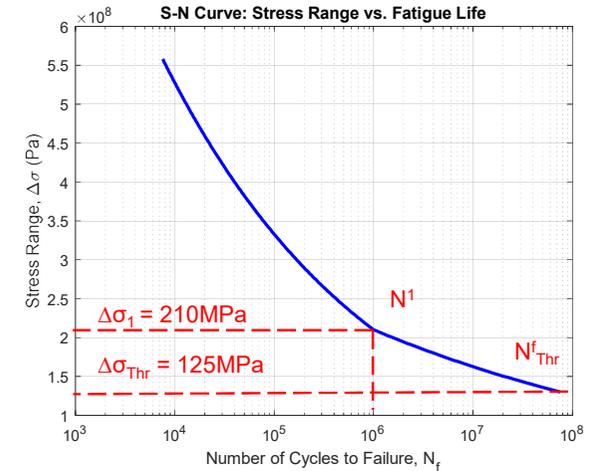
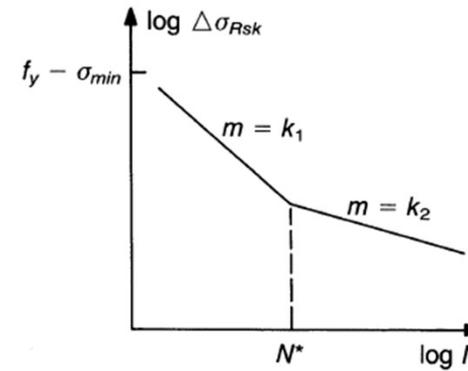


Figure 14. (a) Shape of the characteristic fatigue strength curve (FIP model code 1990); (b) constructed fatigue curve for VAX U41 NAT

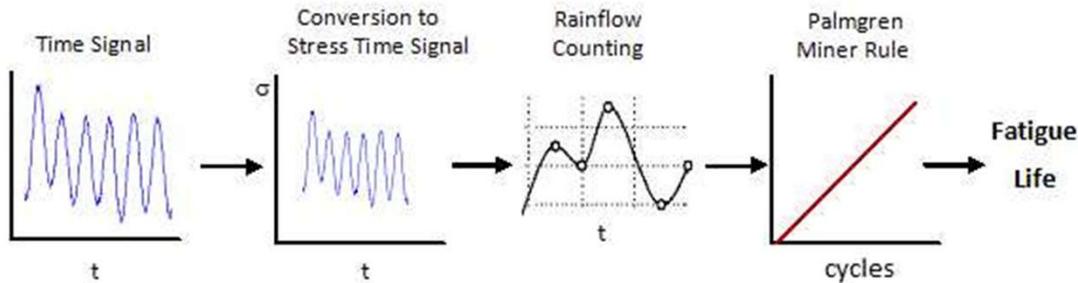


Figure 13. Rain flow counting method, (Sanchez et al., 2016).

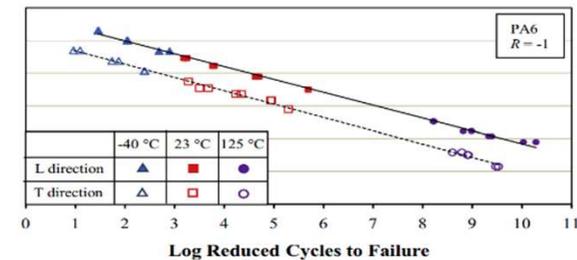


Figure 15. (a) Effect of temperature on fatigue behavior, (b) Construction of master curves of stress amplitude at different temperatures, (Fatemi et al., 2015).

My approach: Model validation

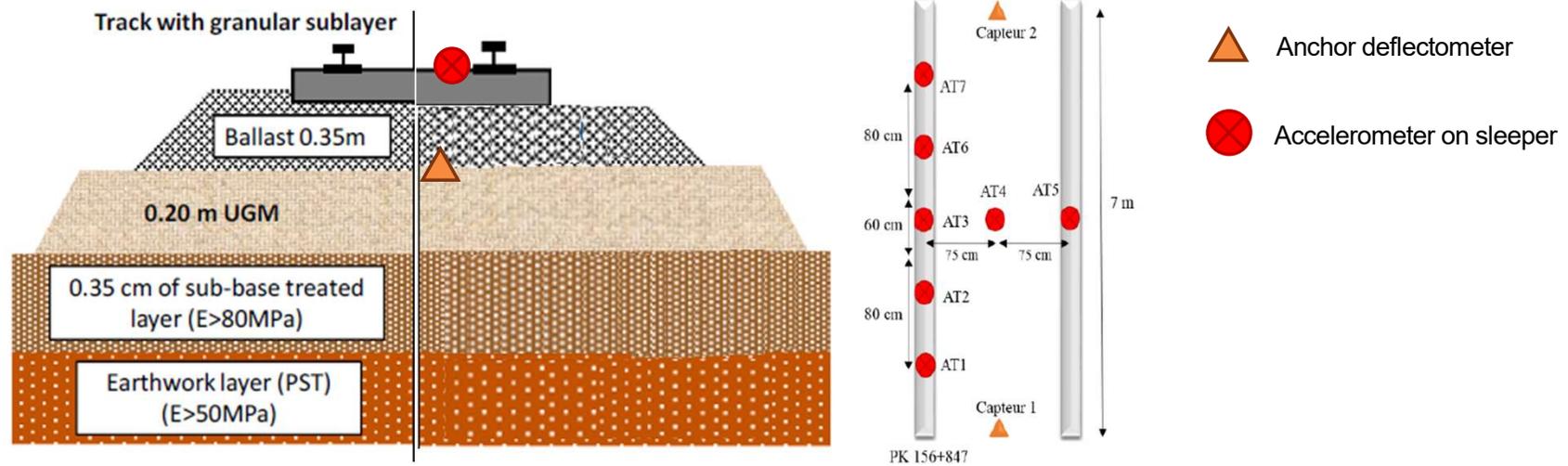


Figure 16. Structure of HSL Bretagne et Pays de la Loire and sensors placements, (adapted from Blanc et al., 2022).

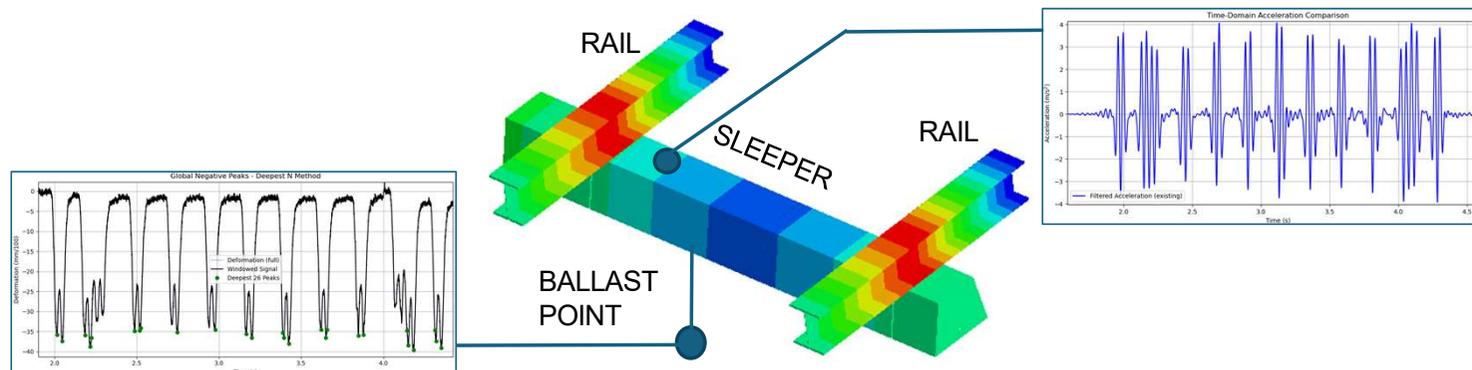


Figure 17. FEM model part and sensor data, (adapted from Blanc et al., 2022).

Results and discussions

Table 1. Parameters for ballast and subgrade

Literatures	Kb, N/m	Kf, N/m
Khairalla et al., 2020	2.58e+08 ÷ 1.03e+09	5.48e+08 ÷ 2.74e+09
Pinault et al., 2019	4.30e+08	1.49e+09
Zhai et al., 2004	189e+06	7.40e+07
Ferrara et al., 2012	240e+06	7,68e+07
Skarova A., 2025	160e+06	7,68e+07
In current study	160e+06	1,15e+07

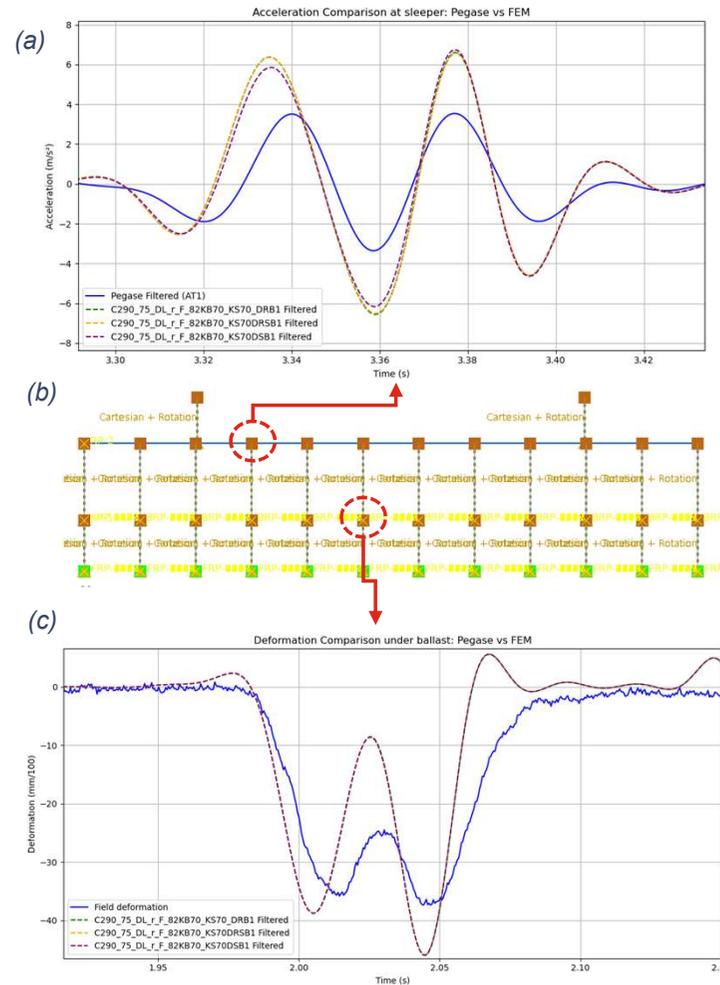


Figure 18. Parametric analysis: (a) acceleration at sleeper; (b) FEM model; (c) displacement at ballast point

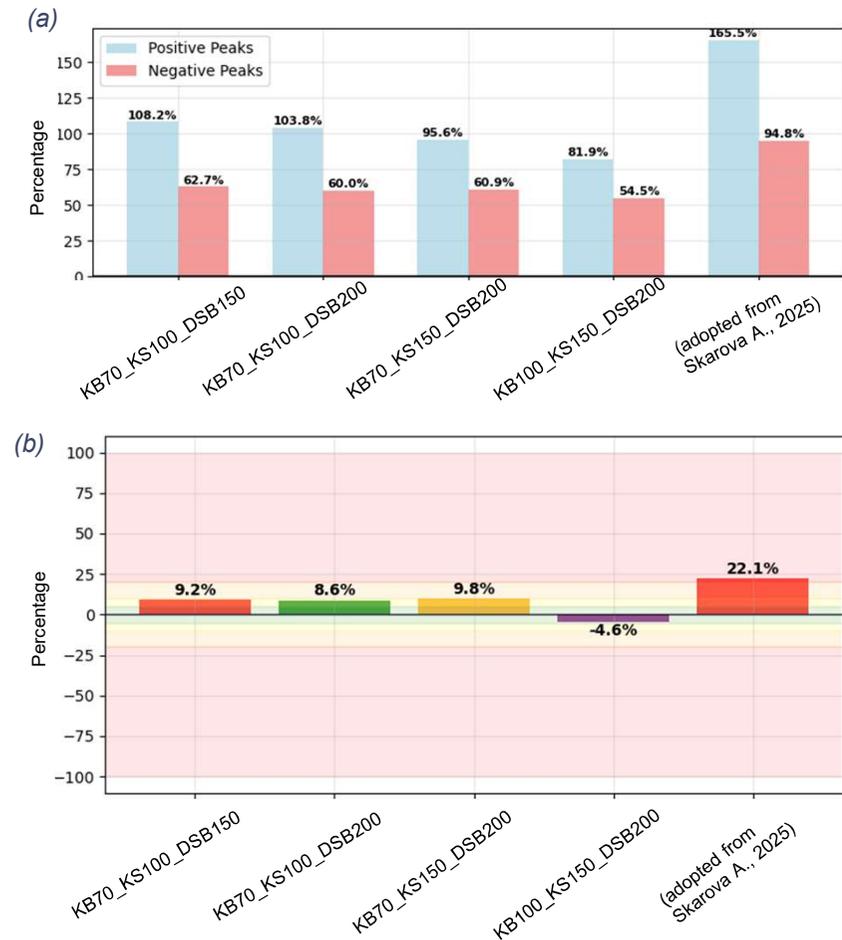


Figure 19. Comparisons of FEM results with field data: (a) acceleration at sleeper; (b) displacement at ballast point

Conclusion

- The review of existing track models shows **no single ideal model**; different models serve specific purposes.
- Analysis highlights the **need for simplified approaches** that still capture the **local interactions** between ballast-sleeper and rail pad-sleeper realistically.
- For fatigue assessment of sleepers, an **enhanced description of ballast long-term behavior** is essential, potentially supported by AI-based methods — though classical approaches remain relevant.

Perspectives and future works

Perspectives and Future Work

- Ongoing work on integrated **sleeper-embedded track models**.
- Introducing **real-life characteristics** to better capture fatigue behavior and ballast differential settlement.
- Exploration of **AI-driven models (e.g., PINNs)** for predicting and evolving track settlement over time.

Thank you for your attention!

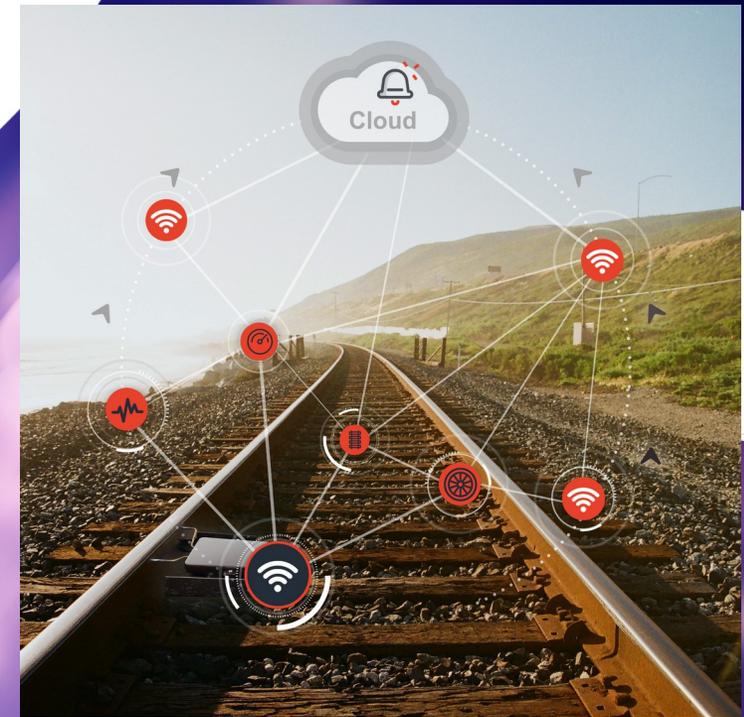
References

- Arlaud, E., 2016. Modèles dynamiques réduits de milieux périodiques par morceaux : application aux voies ferroviaires. PhD thesis, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- CEB-FIP Model Code 1990: Design Code
- de Abreu Corrêa, L., Quezada, J. C., Cottureau, R., d'Aguiar, S. C., & Voivret, C., 2017. Randomly fluctuating heterogeneous continuum model of a ballasted railway track. *Computational Mechanics*, 60(5), 845–861. <https://doi.org/10.1007/S00466-017-1446-8/FIGURES/3>
- Khairallah, D., 2019. Analyse et modélisation du comportement mécanique de structures de voies ferrées avec sous-couche bitumineuse : Instrumentation de la ligne à grande vitesse Bretagne – Pays de la Loire. PhD thesis, Ecole centrale de Nantes, Nantes.
- Lei, X., & Rose, J. G., 2008. Track vibration analysis for railways with mixed passenger and freight traffic. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 222(4), 413–421. <https://doi.org/10.1243/09544097JRRT185>
- Le-Nguyen, M. H., Turgis, F., Fayemi, P. E., & Bifet, A. (2023). Exploring the potentials of online machine learning for predictive maintenance: a case study in the railway industry. *Applied Intelligence*, 53(24), 29758–29780. <https://doi.org/10.1007/S10489-023-05092-4>
- Prescott, Darren & Andrews, John. (2013). Investigating railway track asset management using a Markov analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 229. 10.1177/0954409713511965.
- Punetha, P., & Nimbalkar, S. (2023). Numerical investigation on dynamic behaviour of critical zones in railway tracks under moving train loads. *Transportation Geotechnics*, 41, 101009. <https://doi.org/10.1016/J.TRGEO.2023.101009>
- Skarova, A. (2025). Management of rail stress with climate change for modern and legacy track specifications. PhD thesis, University of Southampton, Southampton.
- Sol-Sánchez, M., Moreno-Navarro, F., & Rubio-Gámez, M. C., (2015). The use of elastic elements in railway tracks: A state of the art review. *Construction and Building Materials*, 75, 293–305. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.11.027>
- Sysyn, M., Przybylowicz, M., Nabochenko, O., & Liu, J. (2021). Mechanism of Sleeper–Ballast Dynamic Impact and Residual Settlements Accumulation in Zones with Unsupported Sleepers. *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 7740, 13(14), 7740. <https://doi.org/10.3390/SU13147740>
- Wang, K., Zhuang, Y., Kouretzis, G. and Sloan, S.W., 2020. Shakedown analysis of ballasted track structure using three-dimensional finite element techniques. *Acta Geotechnica*, 15(5), pp.1231–1241. <https://doi.org/10.1007/S11440-019-00818-6>
- You, R., Li, D., Ngamkhanong, C., Janeliukstis, R., & Kaewunruen, S. (2017). Fatigue life assessment method for prestressed concrete sleepers. *Frontiers in Built Environment*, 3, 285383. <https://doi.org/10.3389/FBUIL.2017.00068/BIBTEX>

- 08/10/2025

- Équipe Ferroviaire :

- **Antoine Barré**
- Fabrice Blaineau
- Arthur Bouché
- Stéphane Bouron
- Émile Etourneau
- Jean-Philippe Gourdon
- Yvan Guéguen
- Vincent Le Cam
- Laurent Lemarchand



DIAM – Digitalisation Augmentée du Matériel bord de voie

Dates : 2024 – 2026

Sommaire

- Le projet
 - Financeur
 - Parties prenantes
 - Objectifs
- Instrumentation des équipements
 - Les objets étudiés
 - Les études

Le projet DIAM

Financier



CORIFER
RECHERCHE ET INNOVATION
FERROVIAIRE

AMI : « Digitalisation et décarbonation des mobilités »



Les acteurs du projet



Type de structure : Laboratoire
Département : 44

Valorisation de 40 ans de recherches menées sur le comportement mécanique et le monitoring des structures ferroviaires à travers la collaboration avec des industriels.

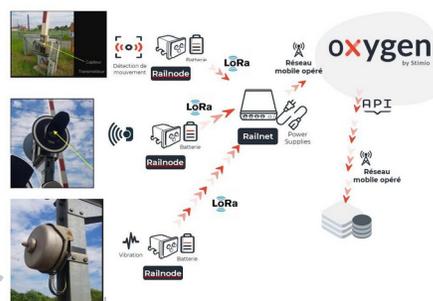


Recherche et développement



Type de structure : PME
Département : 44

Conception capteur IoT basse consommation.
Plateforme cloud pour la collecte et l'analyse des données terrain.



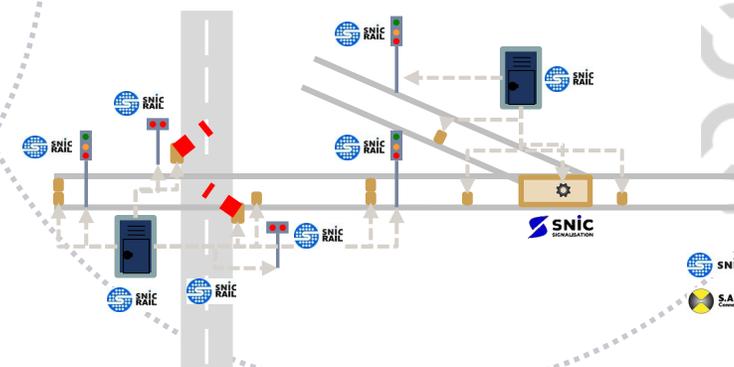
Développement de systèmes et services



Type de structure : PME industrielle
Département : 94

Co-développement de systèmes de télésurveillance de matériel de signalisation.

Conception de matériel de signalisation électronique.



Industrialisation et commercialisation de produits

Le réseau ferroviaire français

Quelques chiffres clés :

- **28 000 km** de lignes exploitées, soit 48 000 km de voies
- **120 000** ouvrages d'art, dont :
 - 28 000 ponts ferroviaires
 - 10 000 ponts routiers
 - 1 500 tunnels
- **14 500 passages à niveau**, soit environ 50 000 barrières
- **25 000 appareils de voie**, dont 2 200 postes d'aiguillage.
- **100 000 détecteurs de train** (Compteur d'essieux, Pédales électromagnétique, Capteurs électromagnétique) .

Appareils en bord de voie inspectés ponctuellement plusieurs fois par an, soit environ 40 000 jours-homme.

→ Bilan carbone à réduire



Objectifs

- Identifier et proposer des solutions de surveillance à demeure des équipements pour diagnostiquer leur usure et permettre des remontées d'alerte.
- Développer de nouveaux algorithmes
- Développer de nouveaux produits

Résultats attendus

- Une surveillance continue des équipements du réseau
- Une meilleure prévention de risque de défaillances
- Des interventions et des inspections plus adaptées au besoin de maintenance
- Une meilleure performance du réseau

Instrumentation des équipements

Les objets étudiés

- Pédale électromagnétique



- Compteur d'essieux



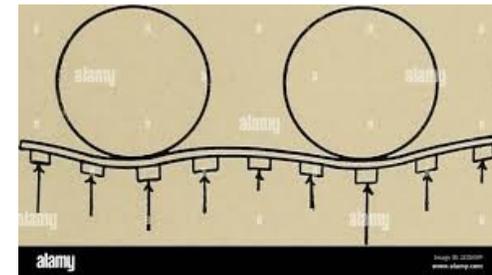
- Passage à niveau



- Guérite

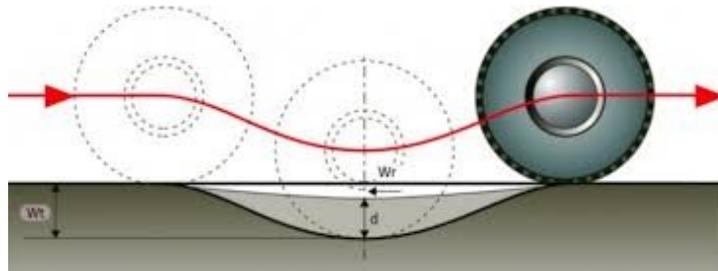


- La déflexion du rail

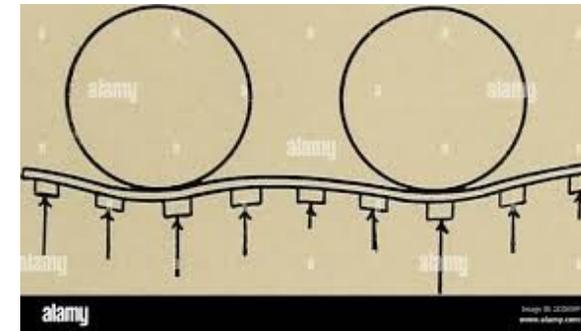


L'étude de la déflexion du rail

- Proposer une solution d'instrumentation
- Travail sur les algorithmes



Vers **ViscoRail**



ViscoRoute© LCPC, 2009 est un logiciel de calcul semi-analytique 3D de structures de chaussées prenant en compte le comportement viscoélastique des matériaux bitumineux et le passage de charges lourdes roulantes.

En 2004, une première section test d'une longueur de 3 km environ a été réalisée sur la ligne à grande vitesse (LGV) Est Européenne avec une sous-couche en grave-bitume (GB).

Quelle instrumentation légère pour généraliser ?

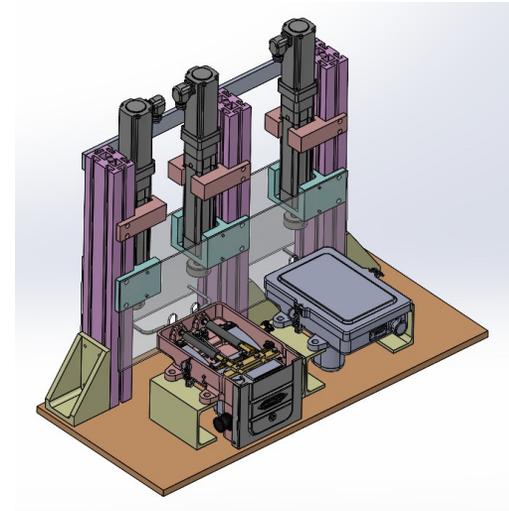
L'étude de la pédale électromagnétique

Système de détection de trains

SNIC, fabricant du détecteur de train PEM, a collaboré avec Stimio by CBM sur le développement d'un système de surveillance du dispositif PEM.



Stimio by CBM fait appel à nous pour concevoir un banc de fatigue destiné à éprouver et valider le système.



L'étude du compteur d'essieux

Systeme de detection de trains

Un bureau d'études spécialisé en électronique embarqué RcosPi, a développé le système de télésurveillance ODICE en déploiement sur le réseau national.



Ce système mesure et transmet les signaux de passage de train générés par le compteur d'essieux.



L'étude du compteur d'essieux

Objectif :

- Utiliser les jeux de données pour diagnostiquer l'état des trains.

Travaux réalisés :

- Développement d'algorithmes et d'un logiciel de traitement des données :

• Vitesse instantanée de l'essieu i

• Diamètre de l'essieu i

$$V_i = \frac{L}{|t_{G,i} - t_{D,i}|}$$

$L = 0,15\text{ m}$: distance entre capteurs Droite-Gauche
 $t_{D,i}, t_{G,i}$: temps de passage (détection) aux capteurs

$$D_i = v_i \bar{\tau}_i$$

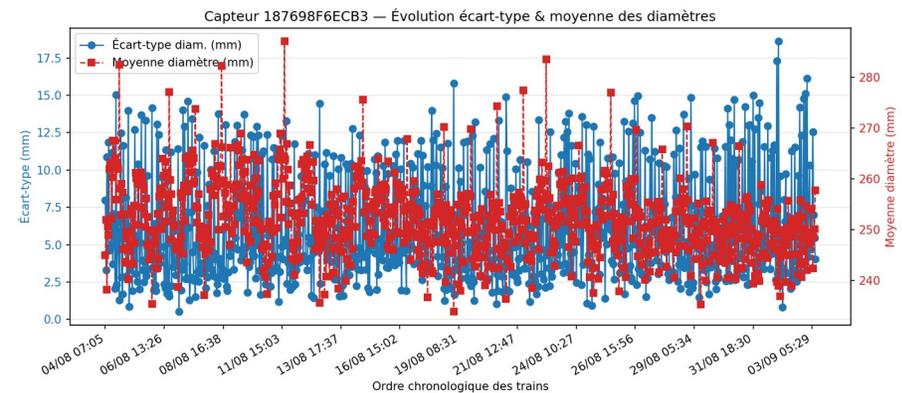
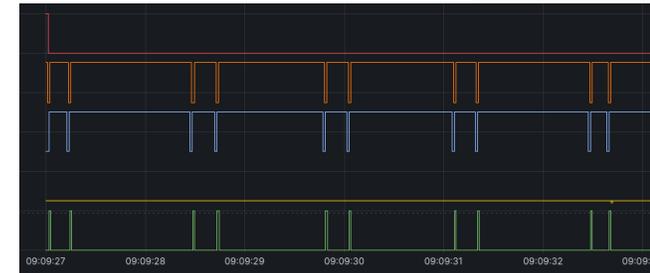
$\bar{\tau}_i = \frac{\tau_{D,i} + \tau_{G,i}}{2}$: temps de présence moyen
 $\tau_{D,i}, \tau_{G,i}$: durées d'occupation (largeurs d'impulsion)

Limites rencontrées :

- Imprécision dans les données mesurées.
- Absence d'informations sur l'état réel des trains.

Perspectives :

- Discussions en cours avec la SNCF sur la continuité du sujet.



L'étude du passage à niveau

Beaucoup de projets ont été montés par le passé, mais ils étaient :

- Incomplets
- Peu réalistes

Objectif : Surveiller tous les éléments d'un passage à niveau :

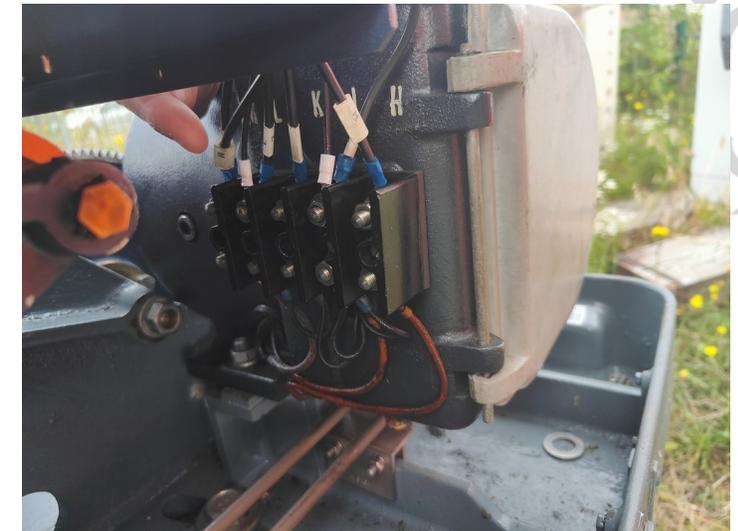
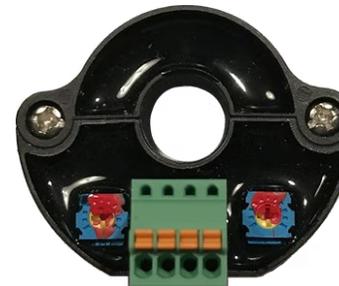
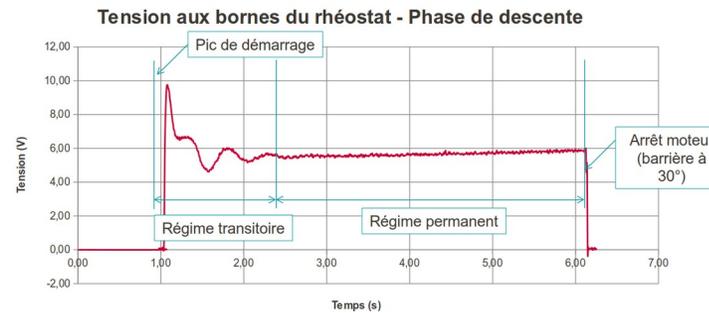
- Intégrité de la barrière et du fût
- Moteur
- Signal sonore
- Signal lumineux

Construction du cahier des charges :

- Quoi mesurer ?
- Comment le mesurer ?

Premiers travaux :

Surveillance du moteur par mesure du courant à l'aide d'un capteur à effet Hall.



L'étude de la guérite

Objectif : Permettre une communication sans fil point à point dans la guérite.

Contraintes :

- forte restriction CEM ($P < 1 \text{ V/m}$)
- Bande passante minimum ($\sim 100 \text{ kbps}$).

Recherche de solutions adéquates :

- Solution « lumineuse » : LiFi



- Solution « RF » : UWB (802.15.4)



L'étude de la guérite



Solution « lumineuse » : LiFi



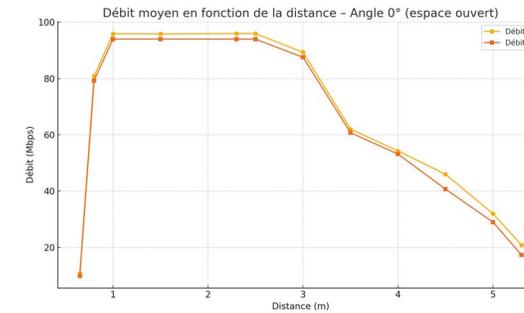
Essais en labo et sur terrain

Avantage :

- Plug & Play
- Pas de communication RF
- Débit suffisant (> 1 Mbps)

Inconvénient :

- Contrainte de positionnement des équipements



Prochaines étapes :

- Essai terrain longue durée
- Préqualification CEM



L'étude de la guérite



Solution « RF » : UWB (802.15.4)

Essais en labo et sur terrain

Avantage :

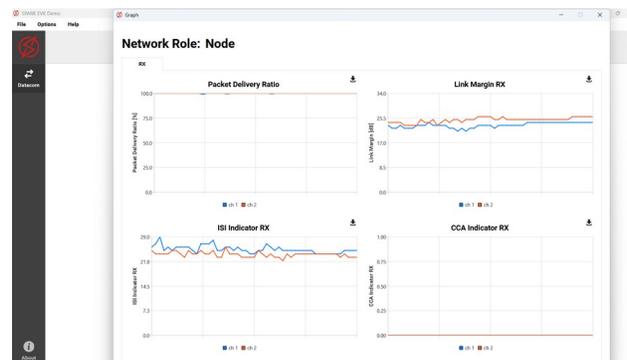
- Communication stable
- Débit suffisant (> 100 kbps)

Inconvénient :

- Qualification CEM
- Intégration logicielle

Prochaines étapes :

- Essai terrain longue durée
- Préqualification CEM



Pas de technologie privilégiée

Point d'avancement

- Pédale électromagnétique
Finalisation



- Compteur d'essieux
Stand-by



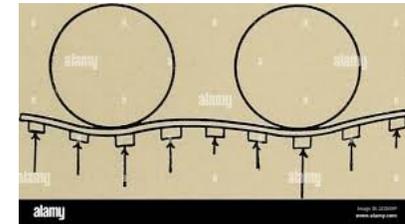
- Passage à niveau
Tour de chauffe



- Guérite
Travail en cour



- La déflexion du rail
Travail en cour



Fin du projet : fin 2026

PROJET TERMINÉ

Merci !

