

MINERVE

avec la filière ferroviaire

RÉUNION TECHNIQUE ENTRE DOCTORANTS



Le projet MINERVE a été financé par le gouvernement dans le cadre de France 2030

SOMMAIRE

1

INTRODUCTION

2

PRÉSENTATION 1 – Mouhammed ACHHAB

Approches numériques efficaces pour la conception des ponts ferroviaires en béton armé

3

PRÉSENTATION 2 – Rami EI MASRI

Développement d'une méthodologie d'aide au diagnostic de la capacité résiduelle des structures en maçonnerie dans un contexte

4

PRÉSENTATION 3 – Asmaa BENZIDANE

Évaluation des performances environnementales des projets ferroviaires : couplage BIM (Building Information Modeling) et ACV (Analyse du Cycle de Vie)

5

PRÉSENTATION 4 – Kuralay KADEKESHOVA

Hybrid methods combining physical models and learning algorithms for predicting the aging of mechanical track systems

6

PRÉSENTATION 5 – Jean-Baptiste PAGE

Impact du réseau ferré français dans la migration des espèces dans le cadre du changement climatique

7

PRÉSENTATION 6 – Hibat Allah BABTY

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

8

PRÉSENTATION 7 – Johann PRIOU

Traitement de données sur la LGV entre le Mans et Rennes, étudier l'impact de couche de grave bitume sous le ballast et mieux comprendre le problème de dégradation des voix

9

CONCLUSION

1

INTRODUCTION

· MOT D'ACCUEIL



2

PRÉSENTATION 1

APPROCHES NUMÉRIQUES EFFICACES POUR LA CONCEPTION DES
PONTS FERROVIAIRES EN BÉTON ARMÉ



APPROCHES NUMÉRIQUES EFFICACES POUR LA CONCEPTION DES PONTS FERROVIAIRES EN BÉTON ARMÉ

La conception de ponts ferroviaires en béton armé est complexe en raison des incertitudes liées aux matériaux, paramètres géométriques, conditions environnementales et manque de données. Pour gérer ces incertitudes sans recourir à des simulations coûteuses, un modèle de substitution est utilisé dans un algorithme d'apprentissage actif, permettant d'explorer efficacement les scénarios de conception et de distinguer ceux qui sont sûrs de ceux qui ne le sont pas. Cette méthode a été testée sur une poutre en béton armé et sera étendue pour intégrer plusieurs fonctions de performance, comme la flèche, les dommages, et les contraintes dans les armatures.



MINERVE
avec la filière ferroviaire



CentraleSupélec

université
PARIS-SACLAY

Efficient numerical approaches for the design of reinforced concrete rail bridges

Avancement: Tâche 1.4

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

Outline

- Introduction
- Problem
- Methodology
- Results
- Conclusions

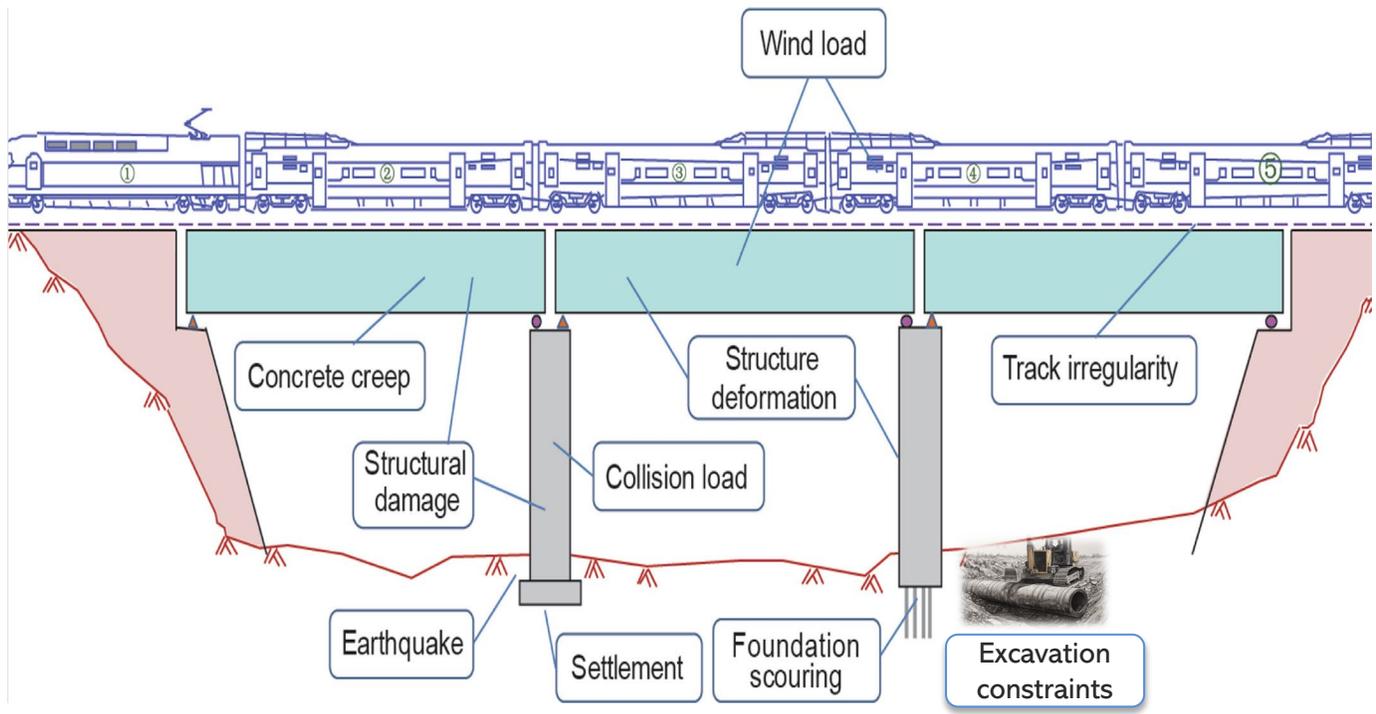
Introduction

Uncertainties; Performance

Introduction

Uncertainties: Sources and Types

Bridges design in the context of uncertainties propagation

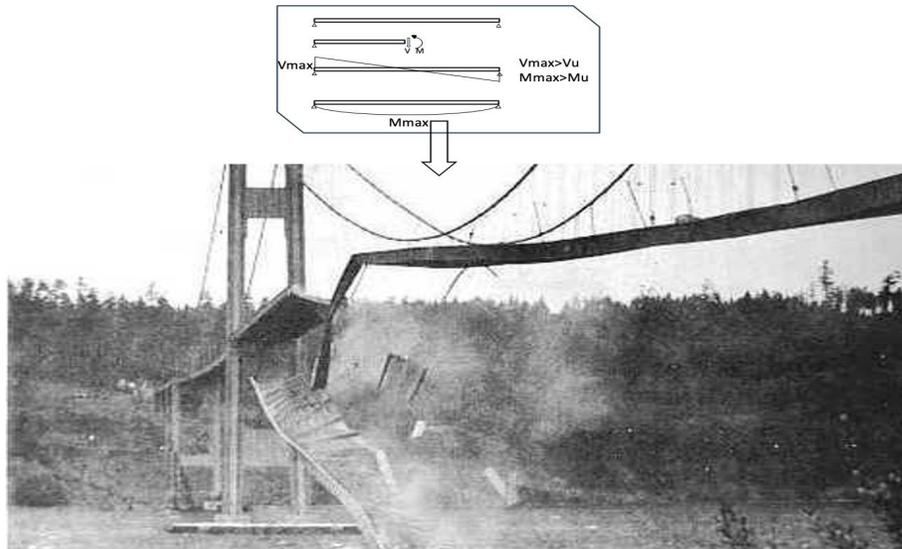


Physical properties	Operational conditions	Lack of knowledge
Manufacturing tolerances	Loads uncertainties	Poor site investigations
Material strength	irregularities	Non-destructive tests

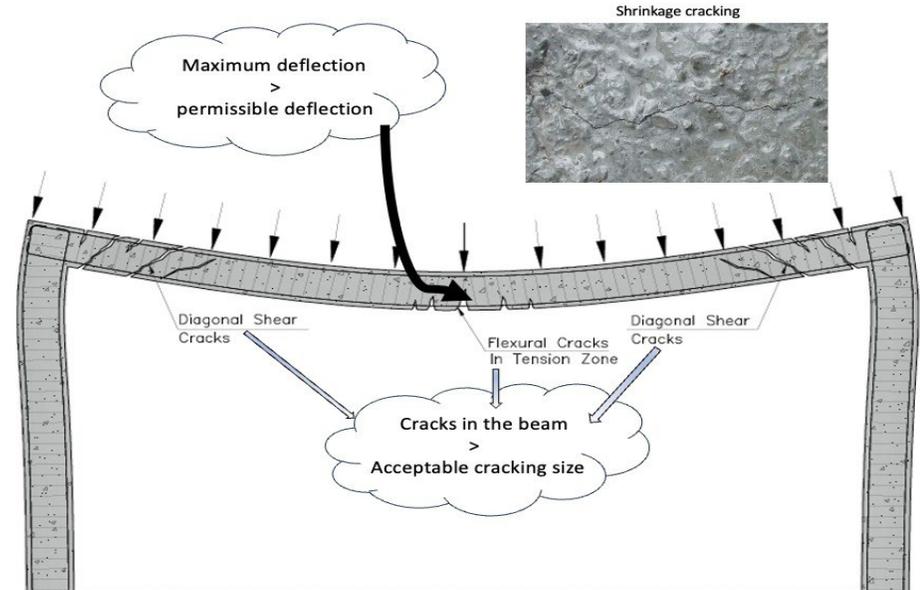
Sources of uncertainties in the operation of reinforced concrete rail bridges. Zhang, Tian, and Xia 2016

Introduction

Performance of reinforced concrete bridges: LRFD



Tacoma Bridge (ULS failure)



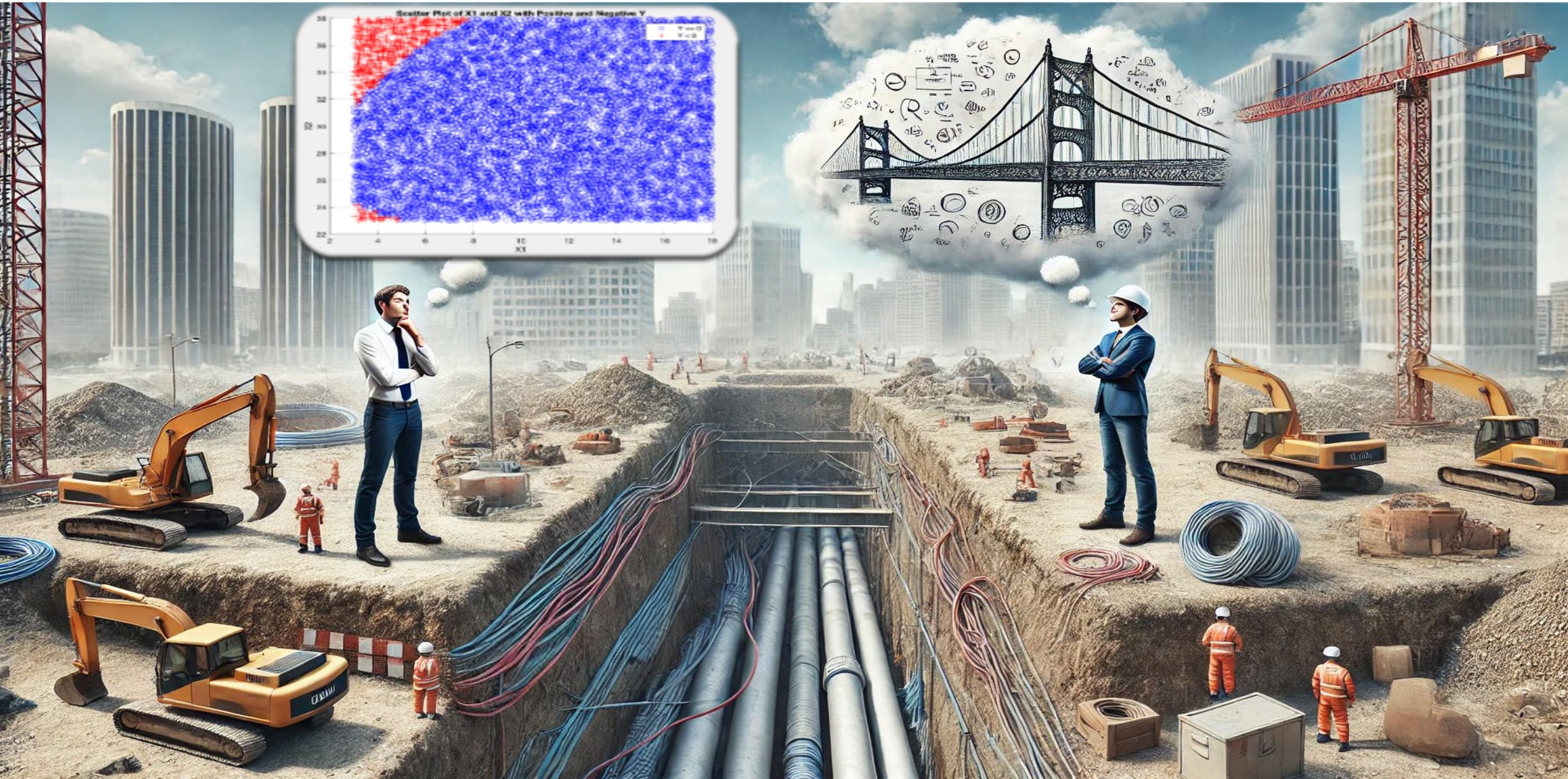
Cracking and deflection (SLS)

$$\phi_i R_i \leq \gamma_{Di} S_{Di} + \gamma_{Li} S_{Li} + \dots$$

Ultimate limit state (ULS)	Service limit state (SLS)
Stress	Deflection
Strain	Cracking control
Damage	Dynamic acceleration

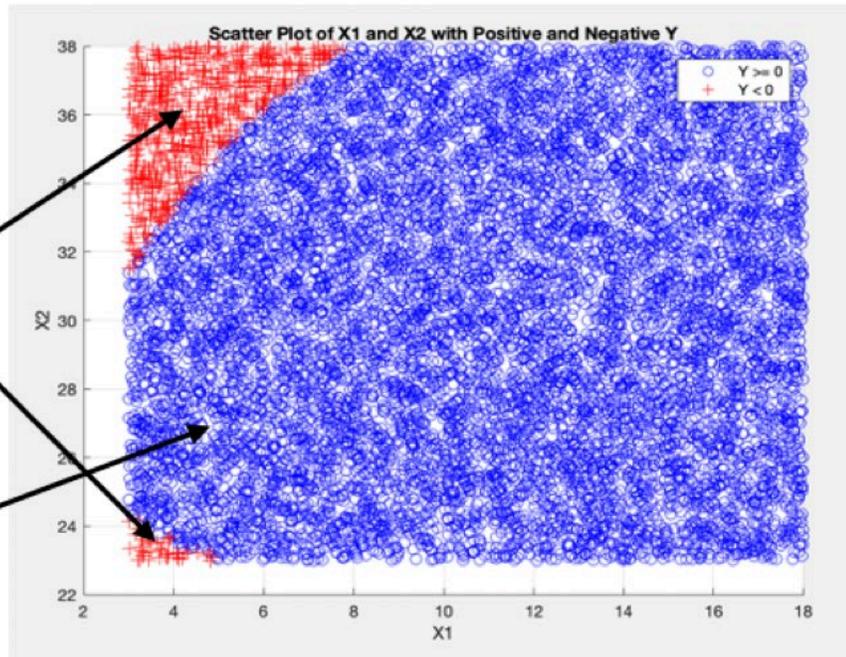
Problem Illustration

Problem



Problem

Poor site investigations



Failure zone

Safe zone

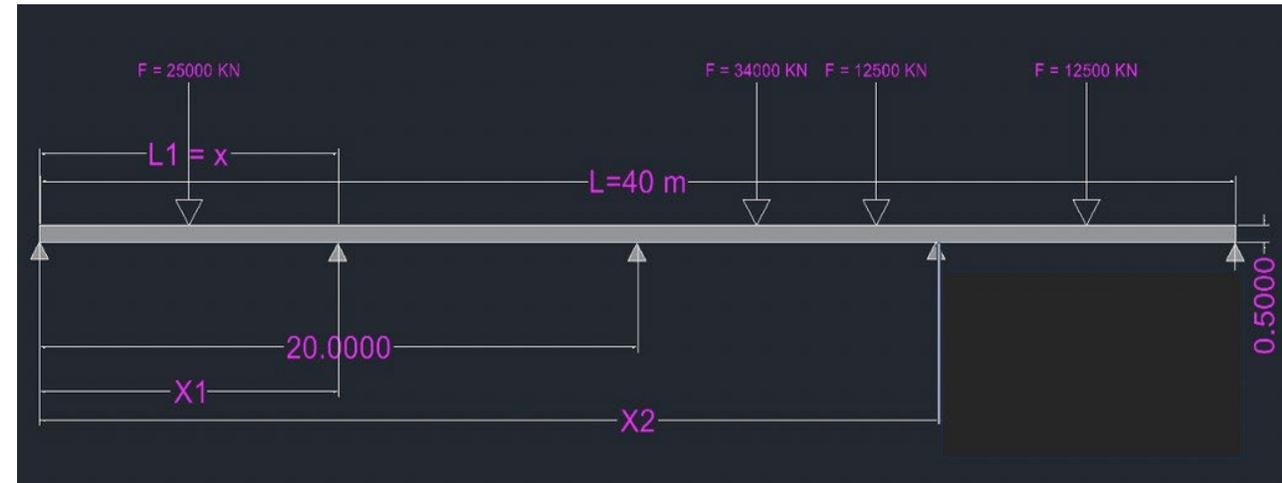
Projection of the deflection performance curve on the design space

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

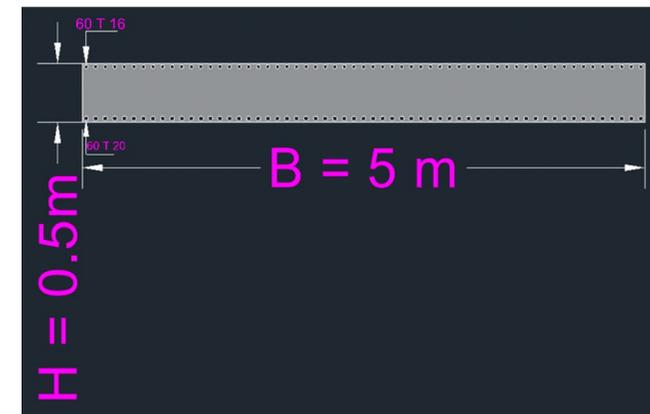
$g(X) < 0$: failure zone

$g(X) > 0$: safe zone

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



Longitudinal section of the reinforced concrete beam

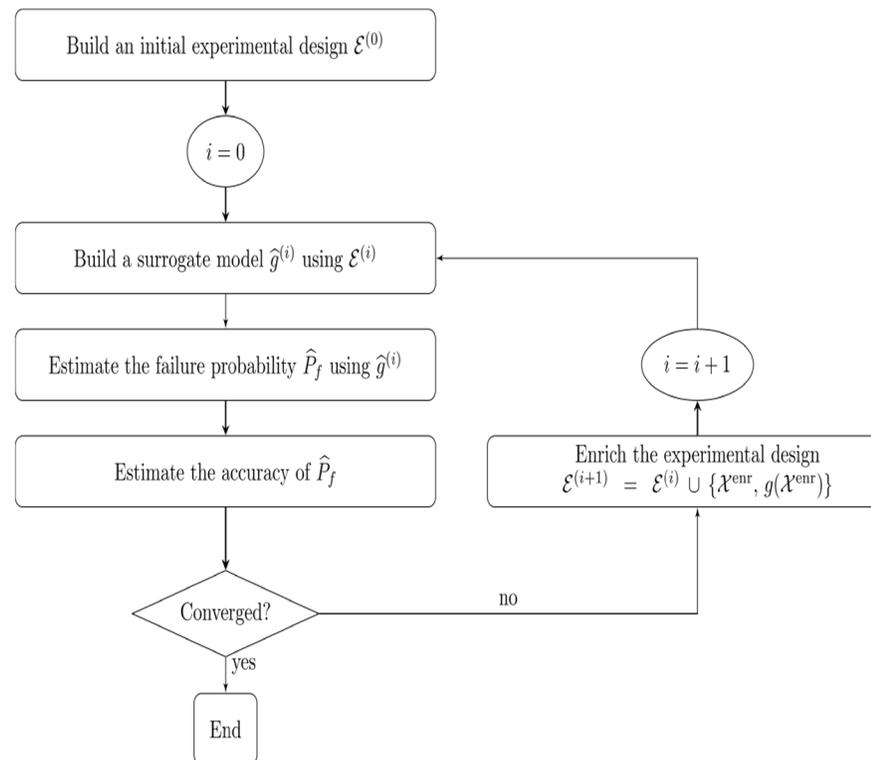


Transversal section of the beam

Methodology

Methodology

Active learning algorithm

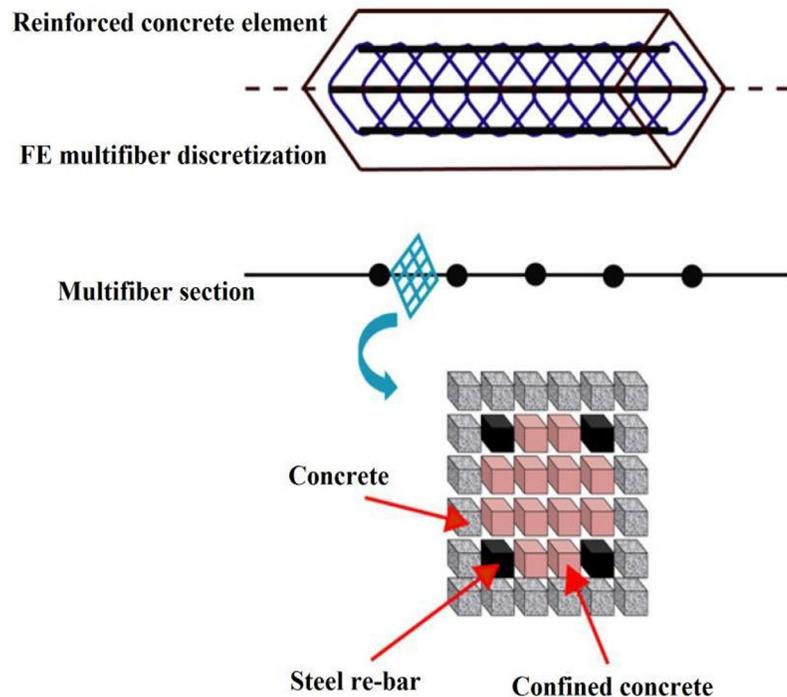


- Sampling technique for data selection
- Finite Element model
- Surrogate model of the limit state
- Reliability analysis for failure
- Probability estimation
- Learning function
- Stopping criterion

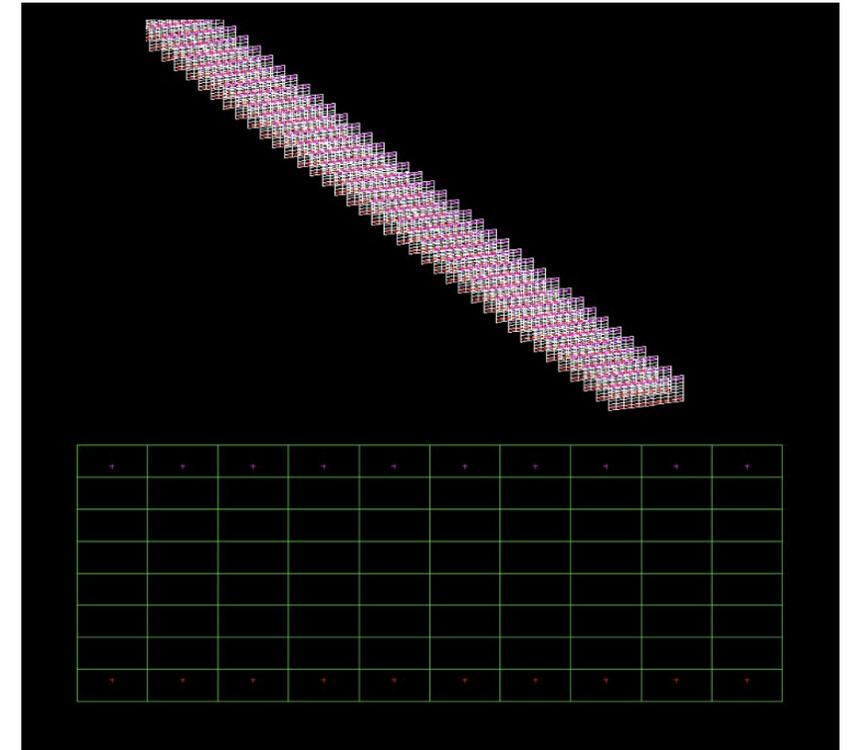
Active learning algorithm.
Moustapha, Marelli, and Sudret 2022

Methodology

Multi-fiber FEM

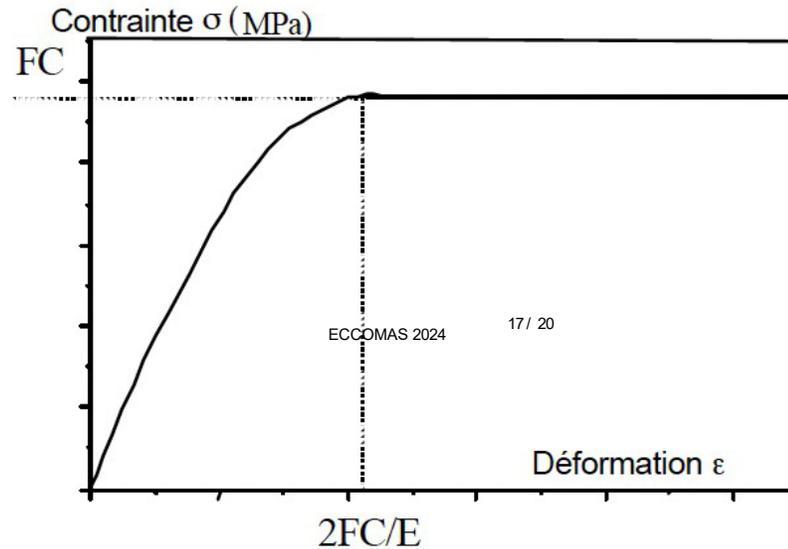


- Beam element predicts the non-linear behavior inaccurately.
- 3D volumetric finite elements provide the required accuracy but are too computationally expensive for a campaign of structure calculations.
- As a compromise, enhanced beam elements have been developed, called multi-fiber beam elements.



Methodology

Multi-fiber FEM

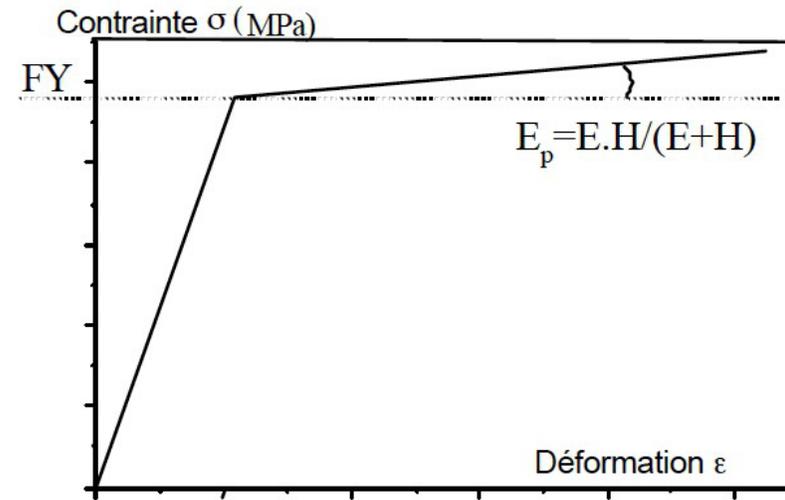


Beton BAEL for concrete:

$$F_c = 40 \text{ MPa}$$

$$E_c = 29.7 \text{ GPa}$$

$$\text{Poisson ratio} = 0.2$$



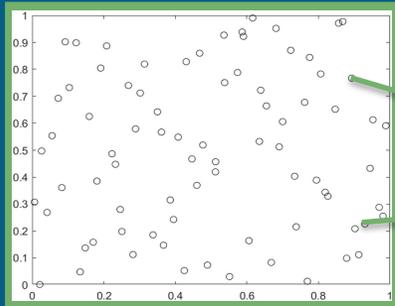
Parfait-Uni for steel (kinematic hardening):

$$E_p = \frac{E \cdot H}{E + H} \quad F_y = 420 \text{ MPa}$$

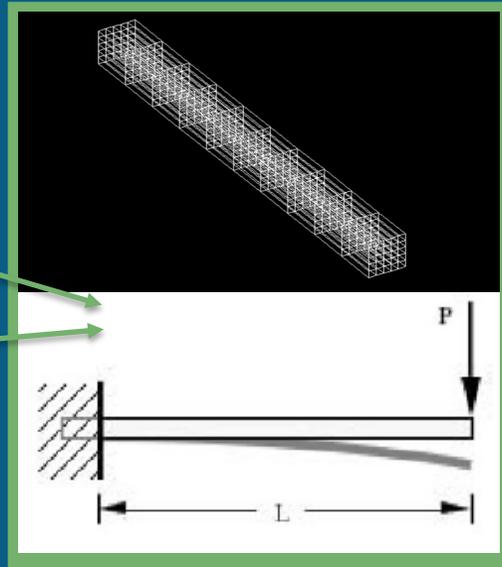
$$H = 10 \text{ GPa}$$

$$\text{Poisson ratio} = 0.3$$

Surrogate Modeling



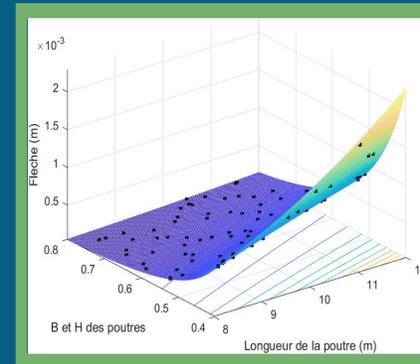
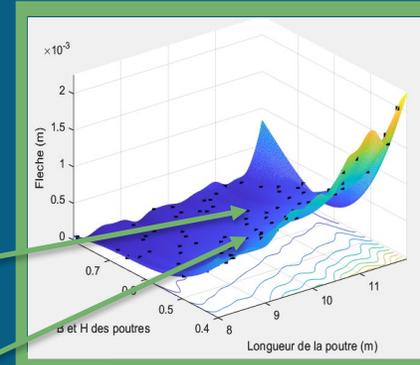
LHS Sampling



One FEM simulation

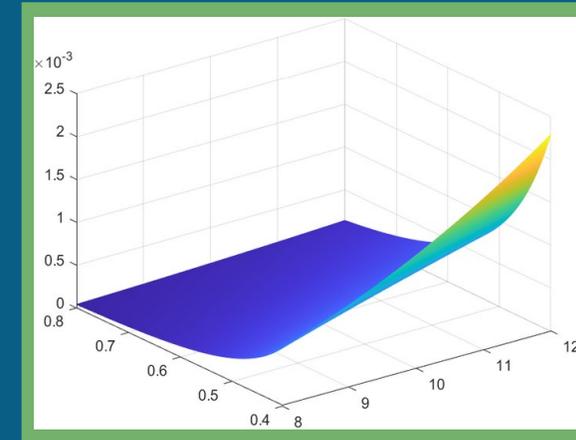
=

One sample



$\mathcal{M}^K(X)$

Low fidelity function

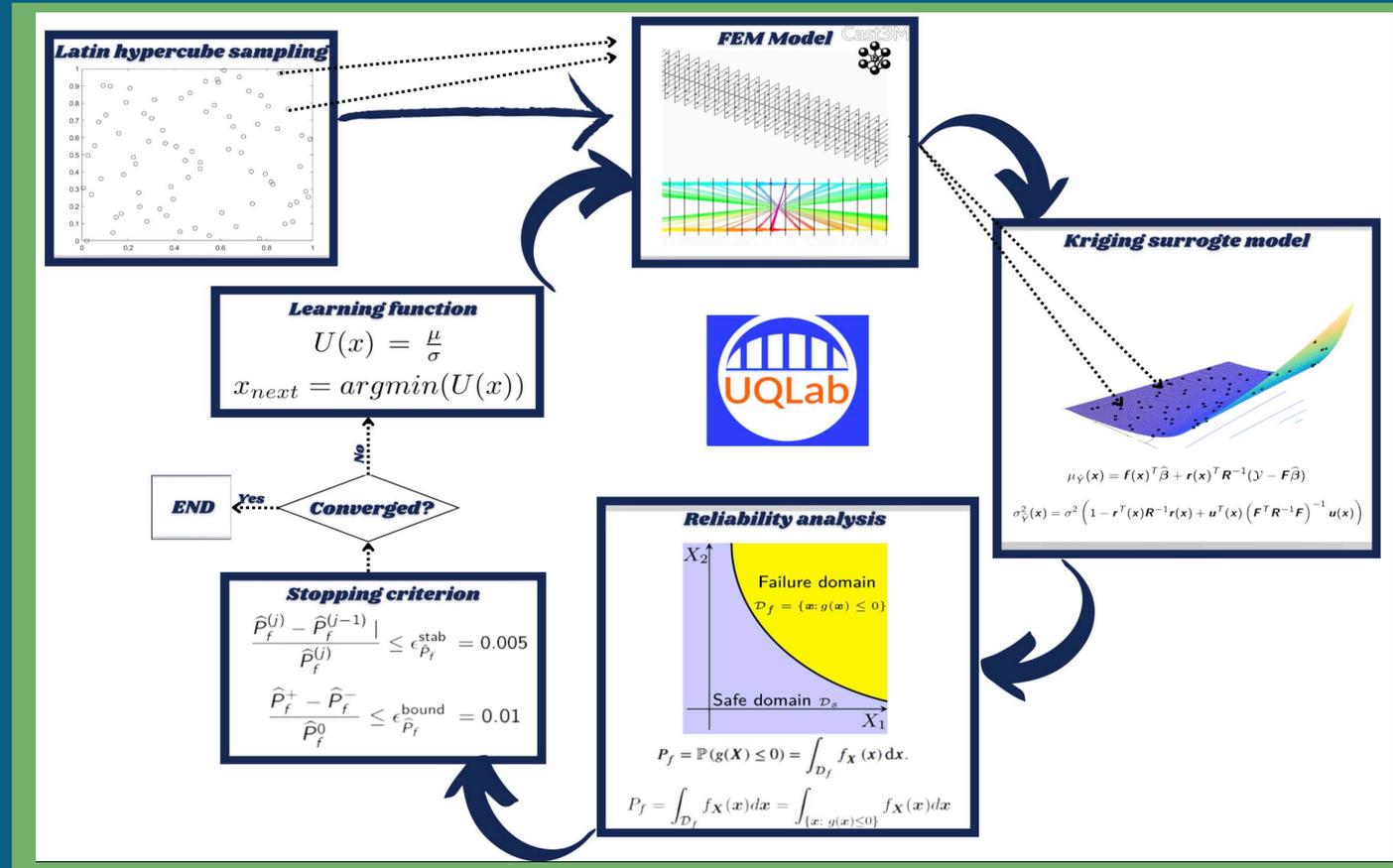


$f(X)$

High fidelity function

Kriging $\mathcal{M}^K(\mathbf{x}) = \beta^T \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \sigma^2 Z(\mathbf{x}, \omega)$
 PC-Kriging $y \approx \mathcal{M}^{(PCK)}(\mathbf{x}) = \sum_{\alpha \in \mathcal{A}} y_{\alpha} \Psi_{\alpha}(\mathbf{X}) + \sigma^2 Z(\mathbf{x}, \omega)$

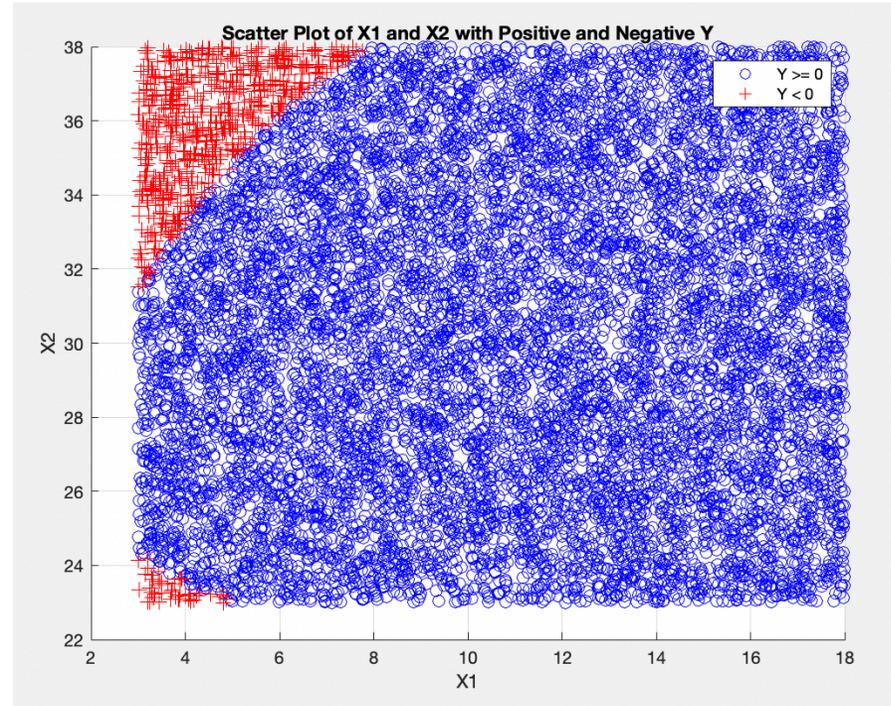
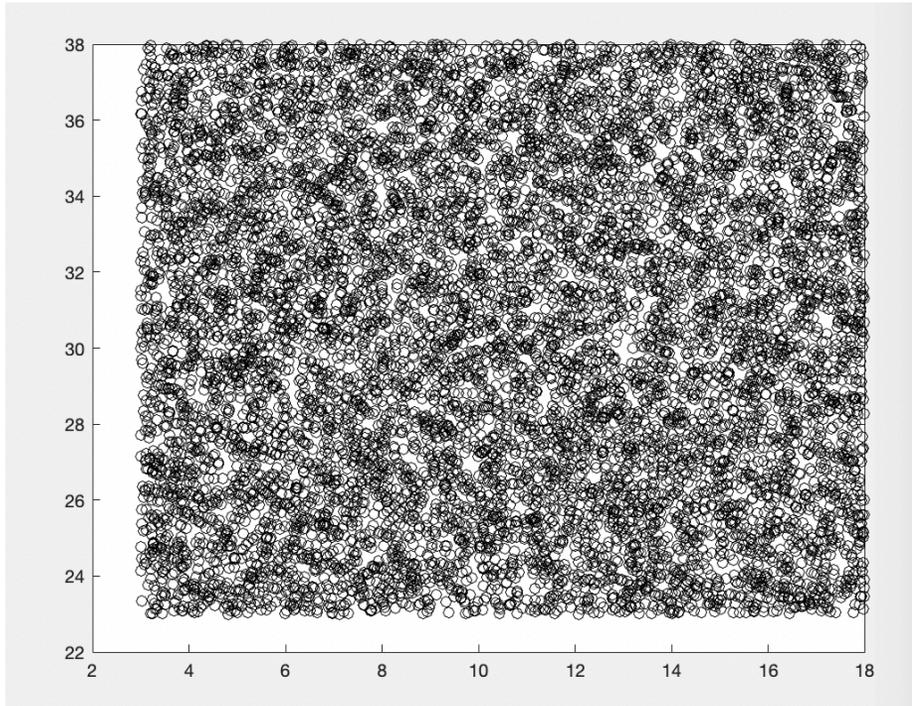
Learning Function and stopping criterion



Results

Results

Real Problem based on Monte Carlo and 10000 FEM simulations



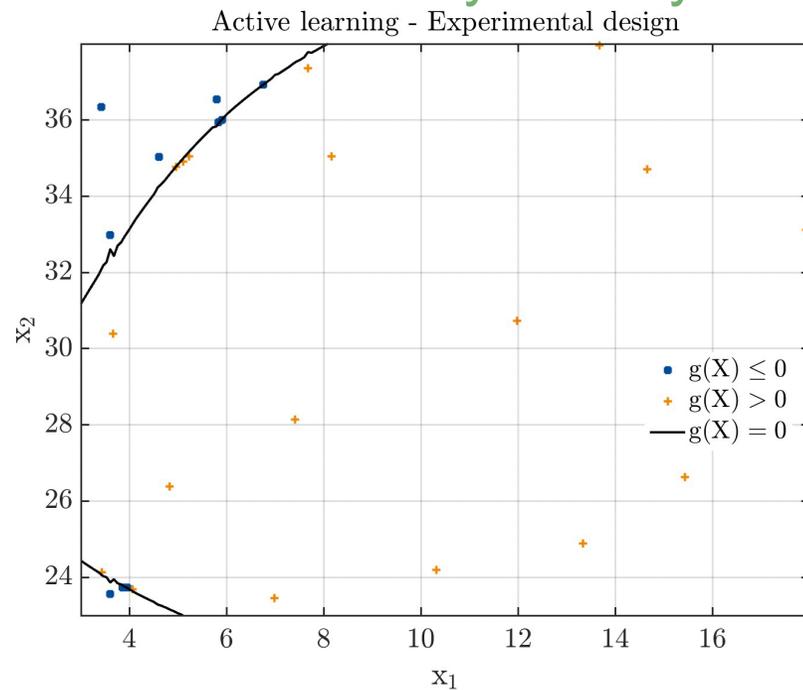
$P_f = 0.0671$

$COV = 0.0376$

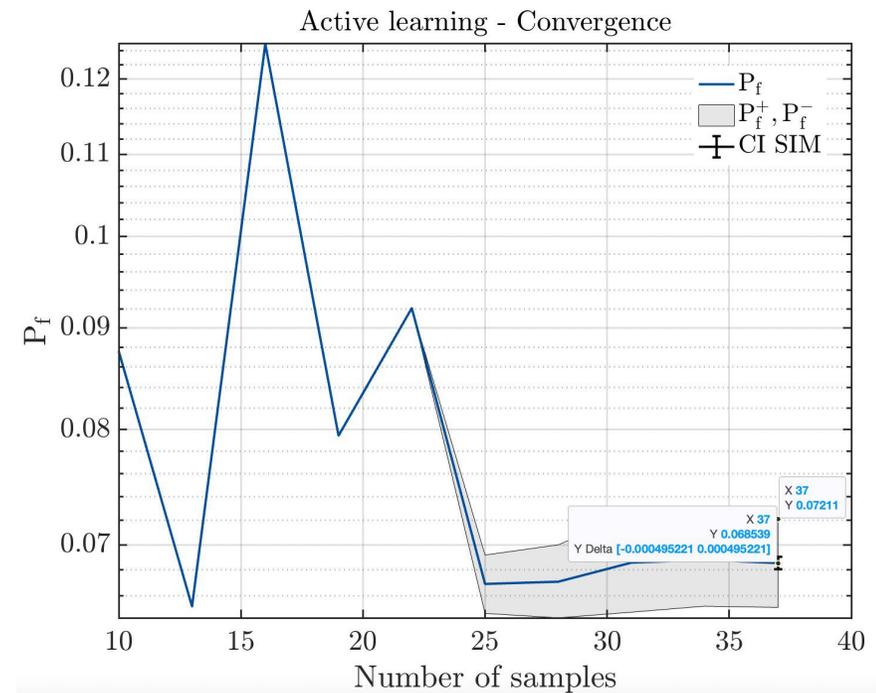
Results

Results of the active learning using kriging surrogate model

- 10 initial simulations
- 27 added simulations through active learning
- Probability stability: 0.005



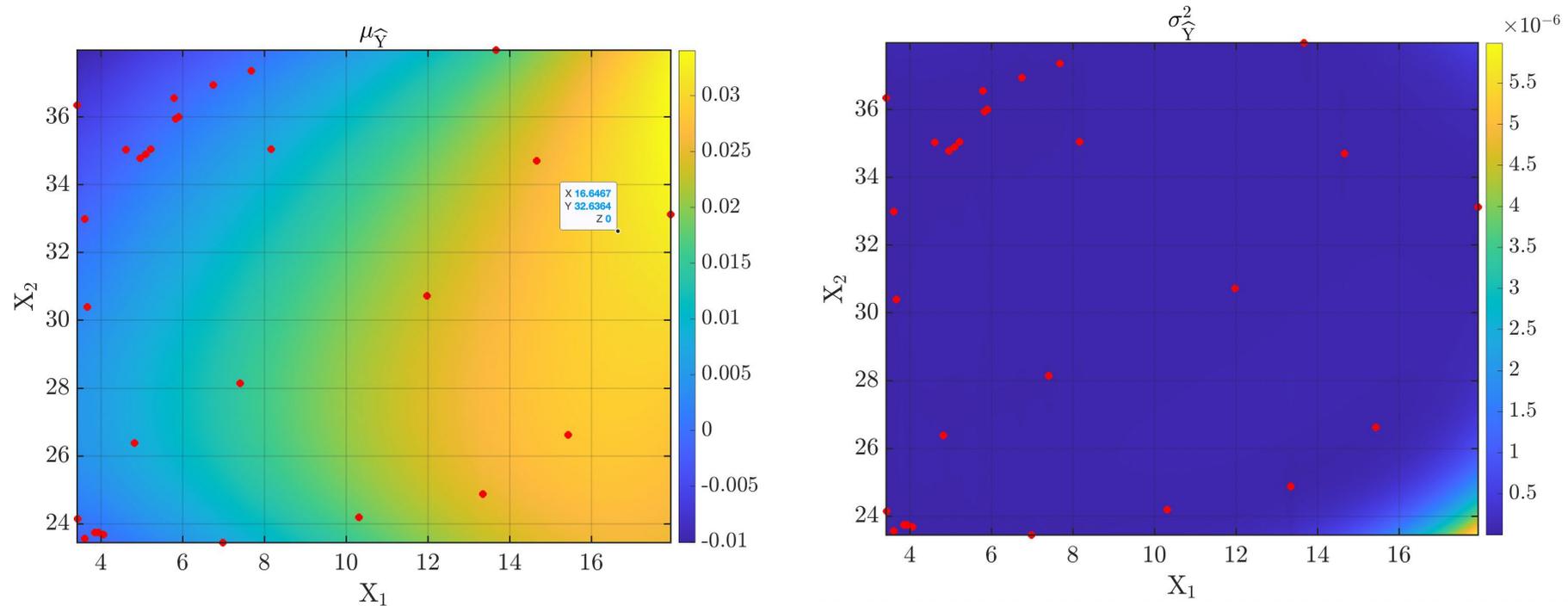
Reliability analysis



Problem convergence

Results

Kriging prediction and variance



kriging model predictions

kriging model uncertainties

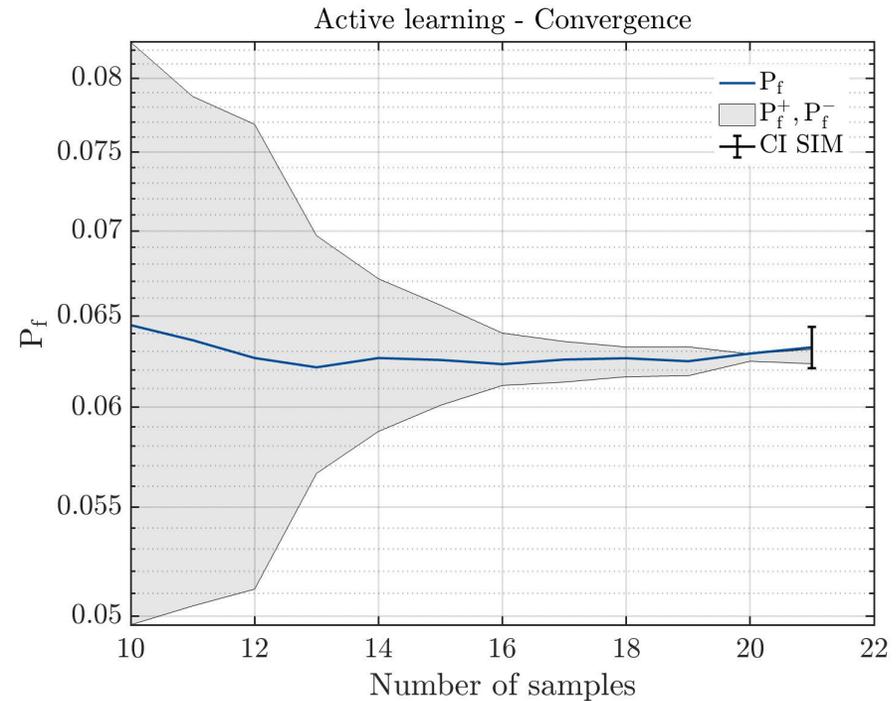
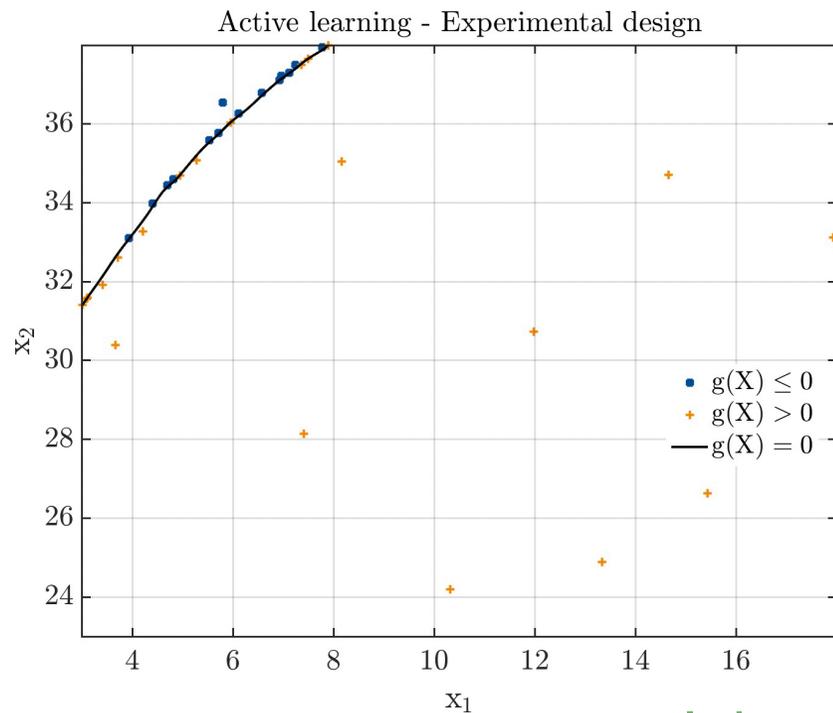
$$\mu_{\hat{Y}}(x) = f(x)^T \hat{\beta} + r(x)^T R^{-1} (y - F\hat{\beta})$$

$$\sigma_{\hat{Y}}^2(x) = \sigma^2 \left(1 - r^T(x) R^{-1} r(x) + u^T(x) (F^T R^{-1} F)^{-1} u(x) \right)$$

Results

Results of active learning based on PC-Kriging surrogate model

$$\frac{\hat{P}_f^+ - \hat{P}_f^-}{\hat{P}_f^0} \leq \epsilon_{\hat{P}_f}^{\text{bound}} = 0.005$$

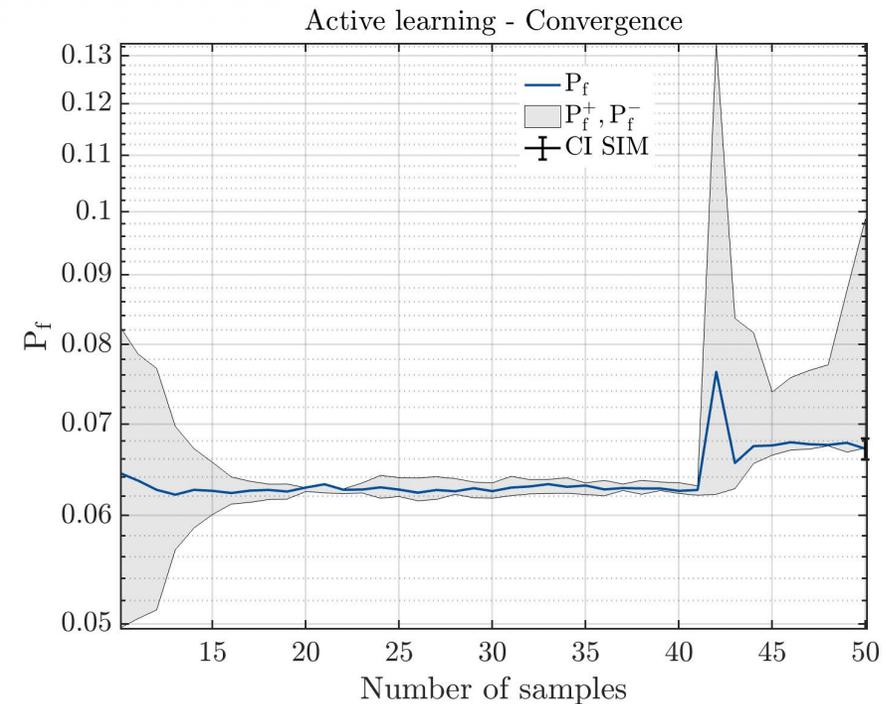
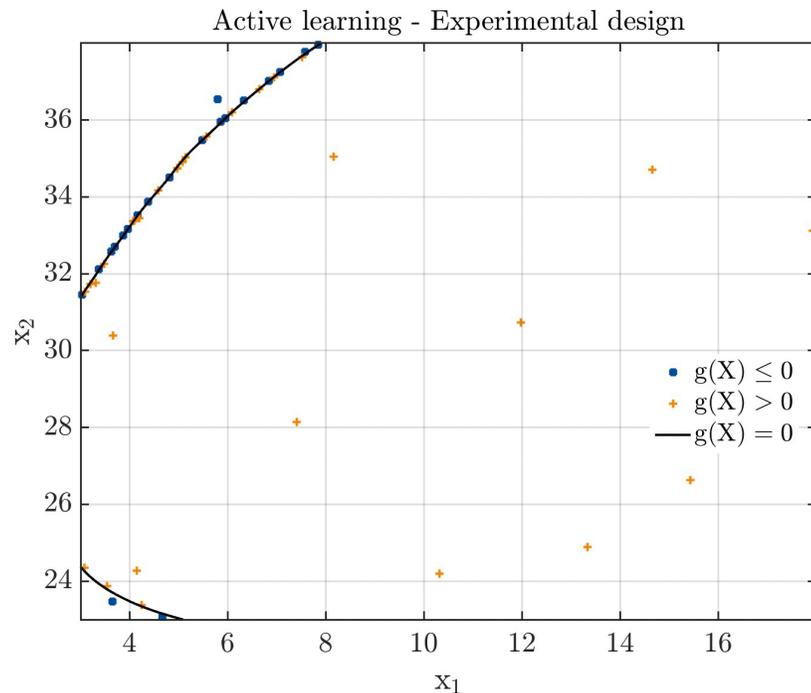


Initial design of experiments: 10

Results

Results of active learning based on PC-Kriging surrogate model

$$\frac{\hat{P}_f^+ - \hat{P}_f^-}{\hat{P}_f^0} \leq \epsilon_{\hat{P}_f}^{\text{bound}} = 0.001$$



Conclusions

- In order to prevent substantial calls to computationally expensive FEM simulations, surrogate models are very efficient.
- Active learning algorithm could also help reducing the number of needed simulations as it increases the reliability of surrogate model by selecting the necessary points
- A better performance was obtained by using Kriging instead of PC-kriging surrogate model

3

PRÉSENTATION 2

DÉVELOPPEMENT D'UN MÉTHODOLOGIE D'AIDE AU DIAGNOSTIC DE LA
CAPACITÉ RÉSIDUELLE DES STRUCTURES EN MAÇONNERIE DANS UN
CONTEXTE MULTIRISQUE



DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODOLOGIE D'AIDE AU DIAGNOSTIC DE LA CAPACITÉ RÉSIDUELLE DES STRUCTURES EN MAÇONNERIE DANS UN CONTEXTE MULTIRISQUE

Cette thèse porte sur l'évaluation de la capacité résiduelle des structures en maçonnerie de la SNCF afin d'assurer leur sécurité et leur durabilité. Face à des charges multiples, cumulatives ou soudaines, le projet développe des outils de modélisation avancés pour analyser l'endommagement progressif et la vulnérabilité structurelle. Une approche multi-fidélité combinant des modèles détaillés et simplifiés permettra d'optimiser les interventions de maintenance. Enfin, l'approche probabiliste visera à quantifier la capacité résiduelle, validée par des études de cas réels, y compris sur des structures dégradées.

Development of a methodology to assist in the diagnosis of the residual capacity of masonry structures in a multi-hazard context.

Rami EL MASRI¹

Fernando Lopez-Caballero¹ , Frederic Ragueneau ¹ , Cédric Giry ¹

¹Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS,
LMPS - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay,
91190, Gif-sur-Yvette, France.

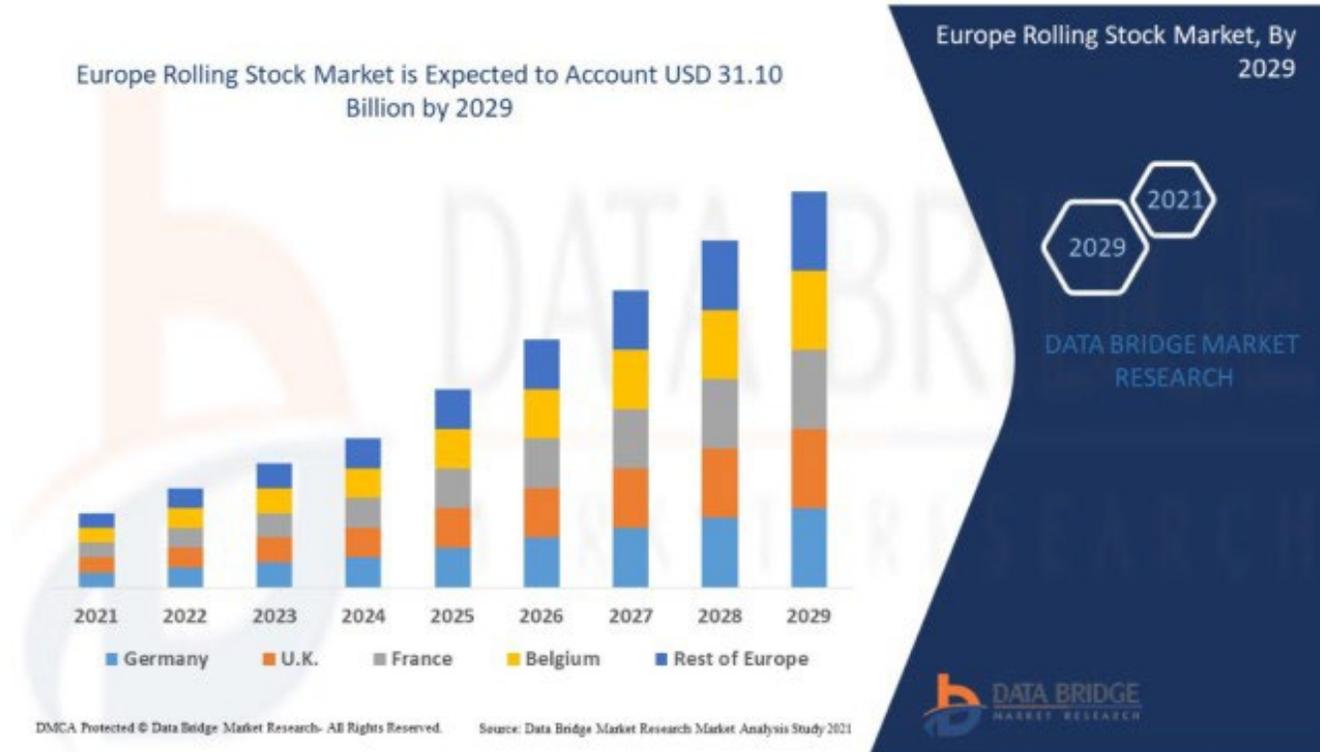
MINERVE PROJECT

19 novembre 2024

0 / 59

Railways

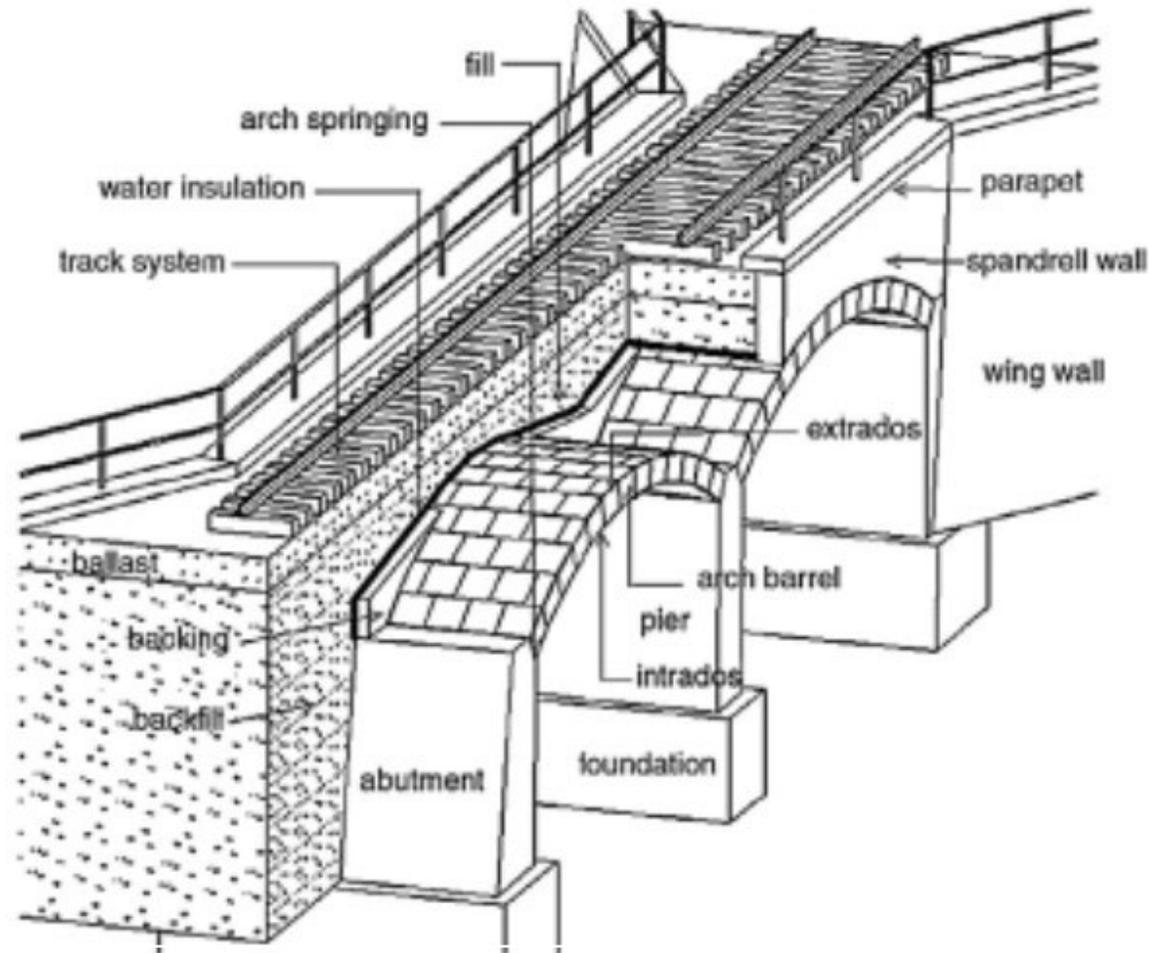
Bridges
Masonry material
Simulations on
structures
Ongoing works
Références



Data bridge market research

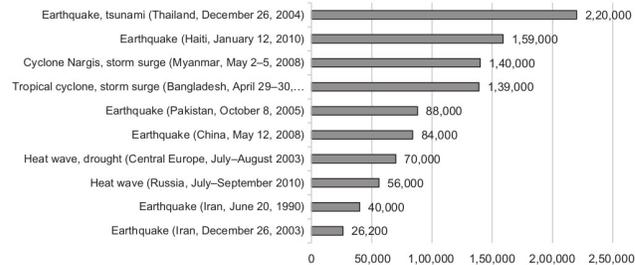
Masonry bridges

- ▶ Masonry bridges are essential tools throughout history for connection between villages and countries.
- ▶ The most used materials for constructing bridges were wood and stones.
- ▶ Masonry bridges are very important for French public transportation. More than 1800 bridges still existing today.



Masonry bridges

- ▶ Increase in the frequency of disasters in the last decade.
- ▶ Warnings toward climate change effect.
- ▶ Structures are not prepared to overcome these events.



(a) [Statista 2018]



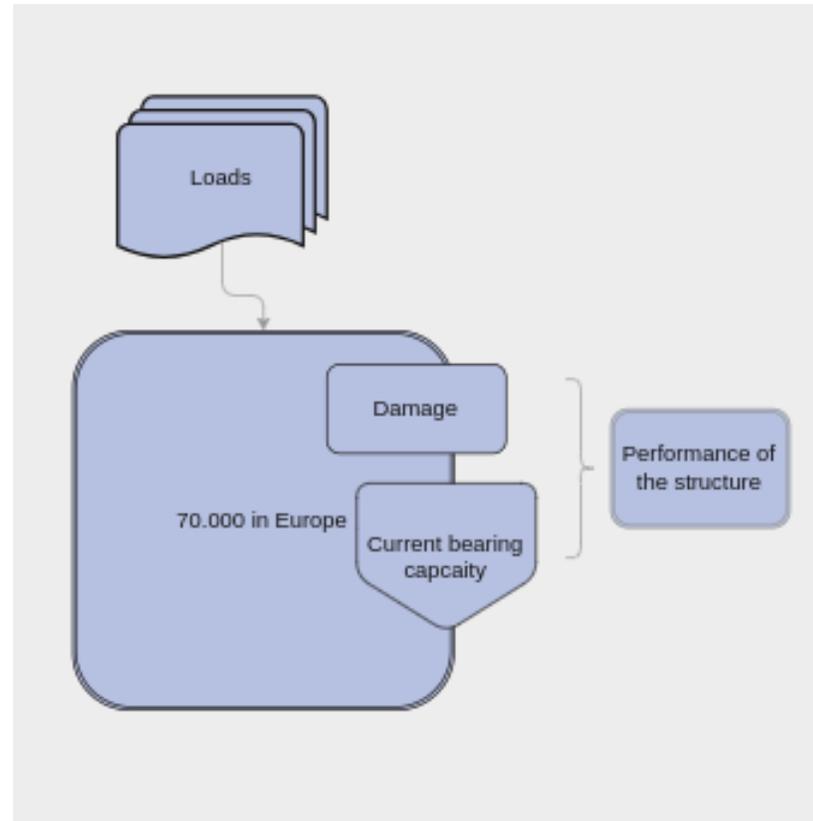
(b) [Rota and al. 2005]



(c) [Rodrigues and al. 2008]

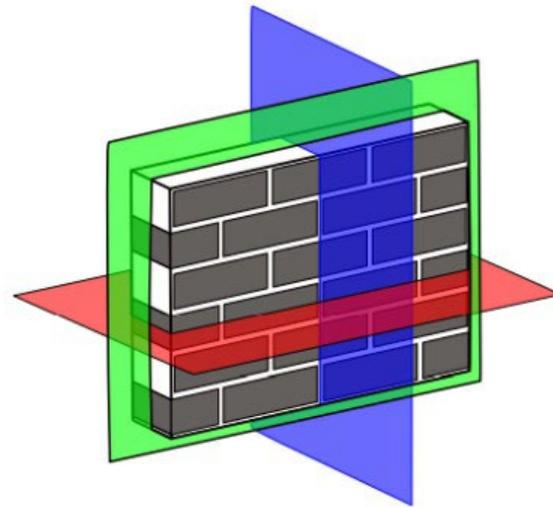
Masonry bridges

1. Is the structure performance maintained during an ordinary exploitation of the traffic transportation system ?
2. Is the structure capable of withstanding future events while considering the aging and climate change effects ?

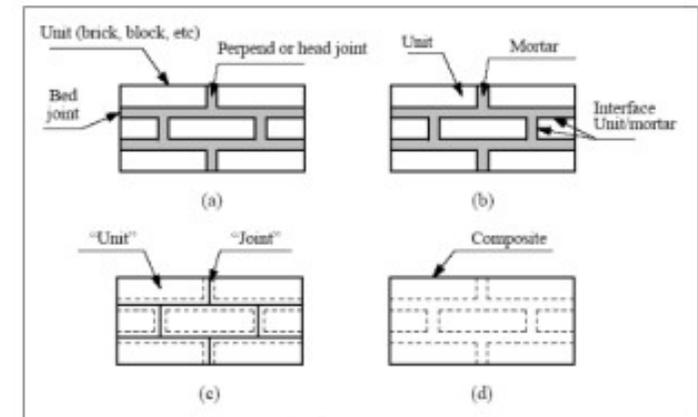


Masonry material

- ▶ Heterogeneity
 - ▶ Masonry units
 - ▶ Mortar
- ▶ Orthotropic nature
 - ▶ Three plans of symmetry coexists



(a) [P.Tisserand 2020]

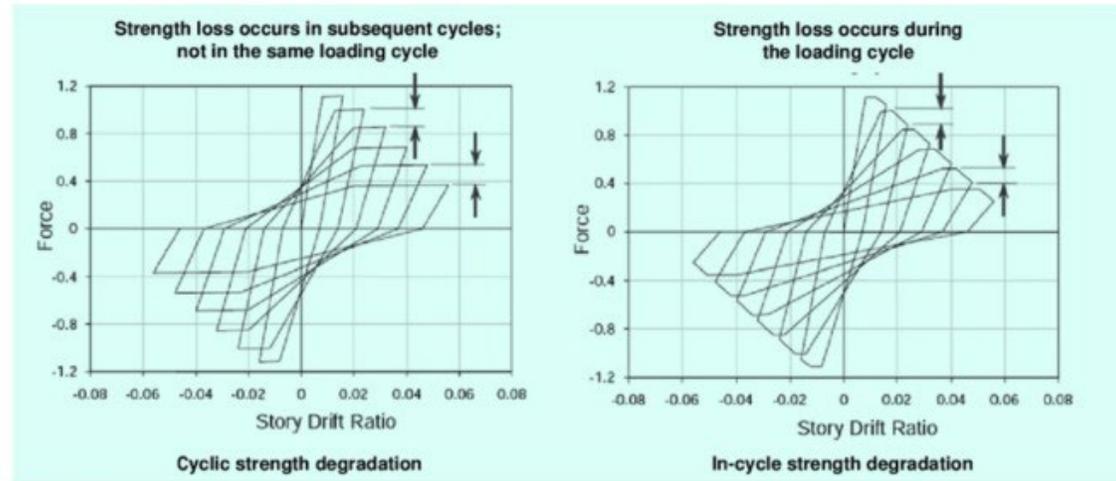


(b) [Lourenco 2000]

Masonry material

Masonry as a quasi-brittle material

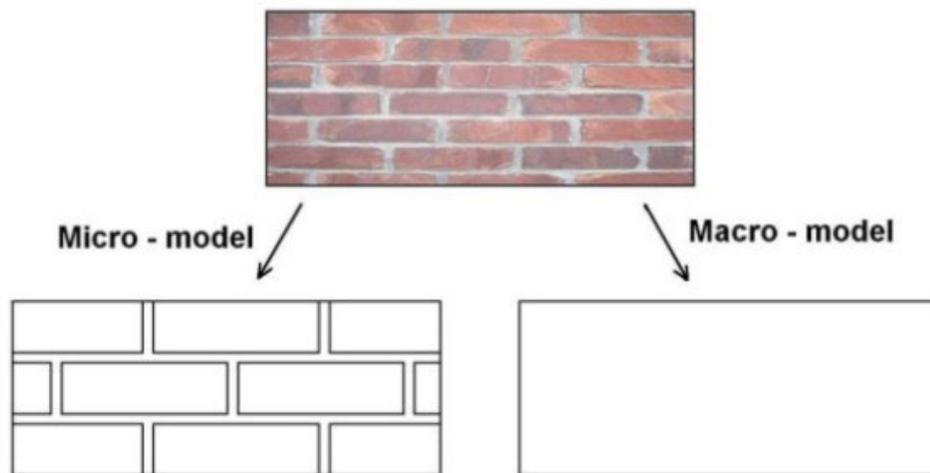
- ▶ Hysteresis behavior where the system is loaded and unloaded based on the previous loading path



- ▶ Material nonlinearities :
 - ▶ Permanent deformation
 - ▶ Cracking and damage
 - ▶ Energy dissipation
- ▶ Different behavior in tension and compression

Masonry material

- ▶ Macro modeling approaches
- ▶ Micro modeling approaches
- ▶ Nonlinear approaches are better to represent the possible regions of cracks and where damage could occur [Alpaslan, Yilmaz et Dinç Şengönül 2023]



Masonry material

Models

Ricbet:

Symbol	Parameter
E	Young's modulus
ν	Poisson's ratio
Y_0	Initial threshold for damage activation
A_d	Brittleness coefficient
γ	Kinematic hardening modulus 1
a	Kinematic hardening modulus 2
σ_f	Mean closure stress
f_c	Compressive strength
α_f	Plastic surface modulus
α_ϕ	Plastic pseudo potential modulus
a_R	Plastic hardening modulus 1
b_R	Plastic hardening modulus 2

[B. Richard, F. Ragueneau 2013]

$E = 2,9 \text{ GPa}$
 $\nu = 0,2$
 $Y_0 = 0.4167e6 \text{ J/m}^3$
 $A_d = 7.5e-3 \text{ m}^3/\text{J}$
 $\gamma = 1e8 \text{ Pa}$
 $a = 4.0e-6 \text{ 1/Pa}$
 $\sigma_f = -3e6 \text{ Pa}$
 $f_c = 6e6 \text{ Pa}$

Asymptotic stress in compression
 $\sigma_{un} = -4e6 \text{ Pa}$
Yield surface 1 = 0.7
Yield surface 2 = 0.3
 $\alpha_f = 0.6$
 $\alpha_\phi = 0.45$
 $a_R = 3.2e10 \text{ Pa}$
 $b_R = 700.0$
 $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$

Linear elastic orthotropic:

-Parameters:

$E_1 = 2,9 \text{ GPa}$
 $E_2 = 3 \text{ GPa}$
 $E_3 = 2,8 \text{ GPa}$
 $\nu_{12} = 0,2$
 $\nu_{13} = 0,2$
 $\nu_{23} = 0,25$
 $G_{12} = 1,21 \text{ GPa}$
 $G_{13} = 1,21 \text{ GPa}$
 $G_{23} = 1,2 \text{ GPa}$
 $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$

Mazars:

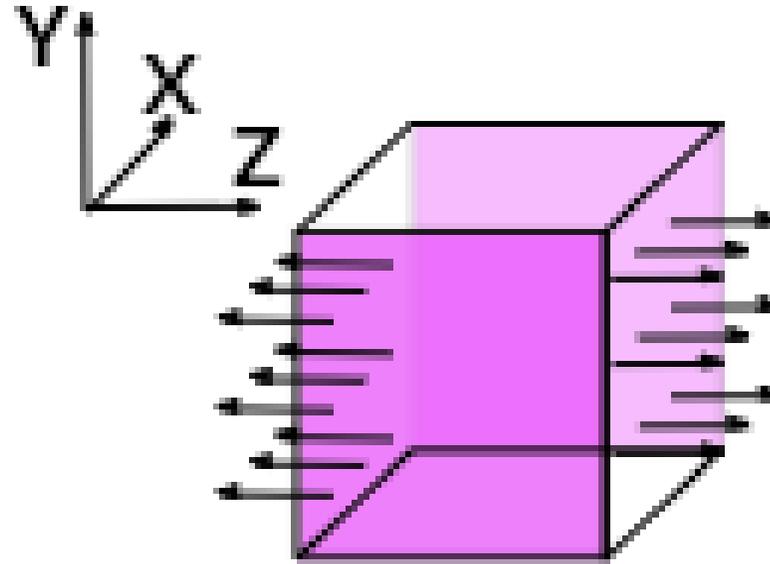
$E = 2,9 \text{ GPa}$
 $\nu = 0,2$
Deformation limit first crack
 $y_0 = 1.724e-4$
Ac (Non linear behavior in compression)
 $ac = 1.25$
Bc (Non linear behavior in compression)
 $bc = 1000$
At (Post pick behavior in traction)
 $at = 0.95$

Bt (Post pick behavior in traction)
 $bt = 10000$
beta (correction in shear)
 $bet = 1.06$
 $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$

[J. Mazars 1986]

Masonry material

- ▶ Traditionally Ricbet model is implemented taking into account traction and compression separately :
 1. Parameters when activated highlight the presence of some physical phenomenon.
 2. Some type of load paths are not sensitive to the parameters
- ▶ There is a need to calibrate them with a more rich numerical model
- ▶ A way to do that is by trial and error on laboratory tests like : monotonic traction and compression, cyclic traction and compression

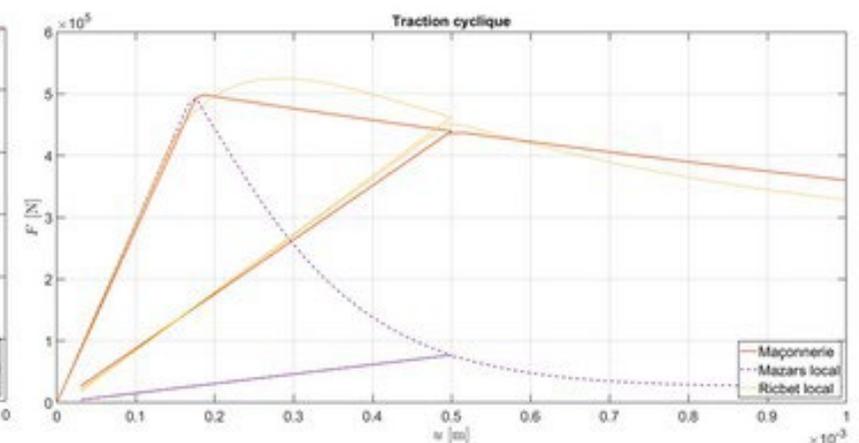
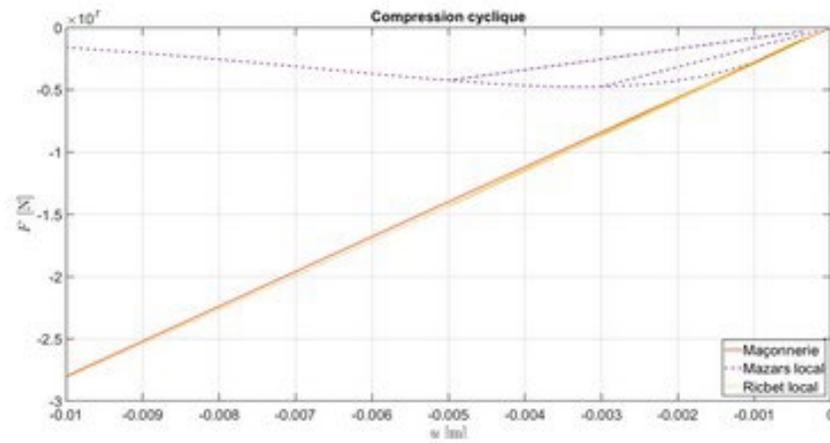
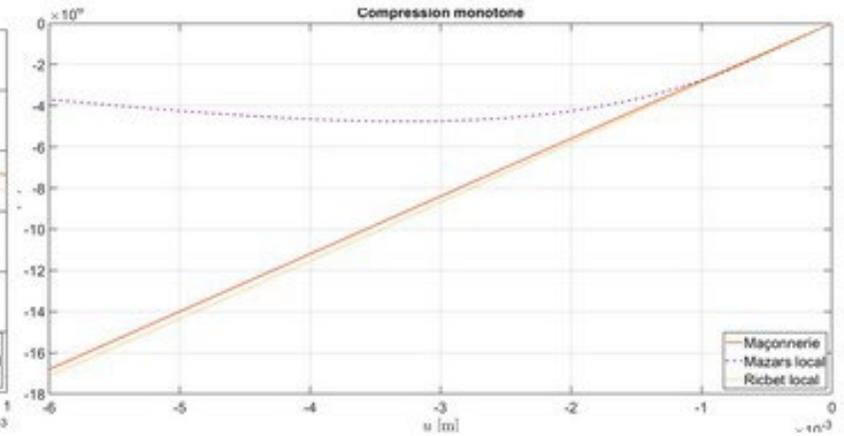
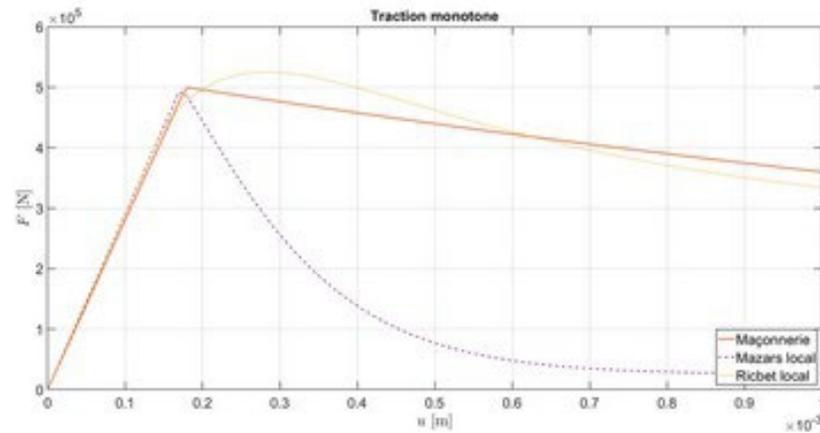


Monotonic traction

Masonry material

Models

Bridges
Masonry material
Simulations on
structures
Ongoing works
Références

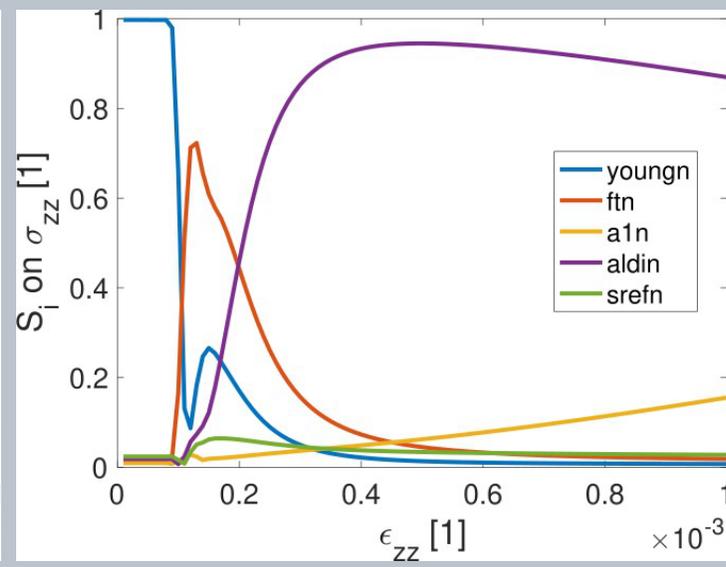
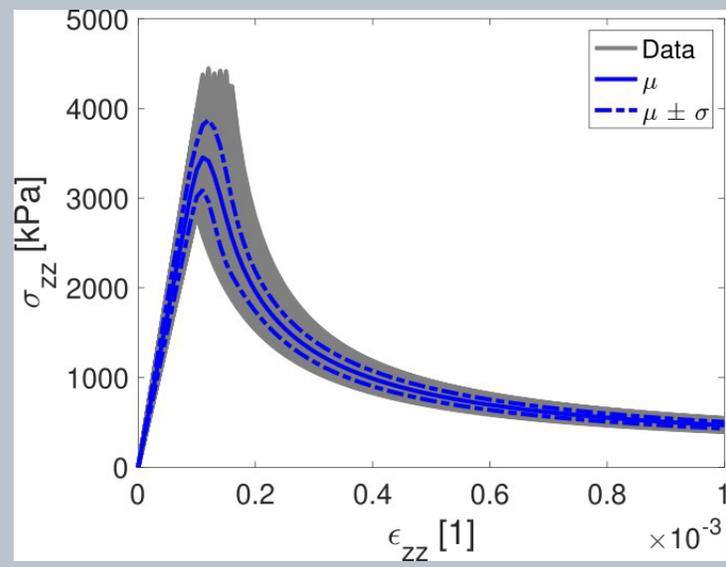


Masonry material

Bridges
Masonry material
Simulations on
structures
Ongoing works
Références

For example :

Numerical simulation of laboratory test-sensitivity analysis

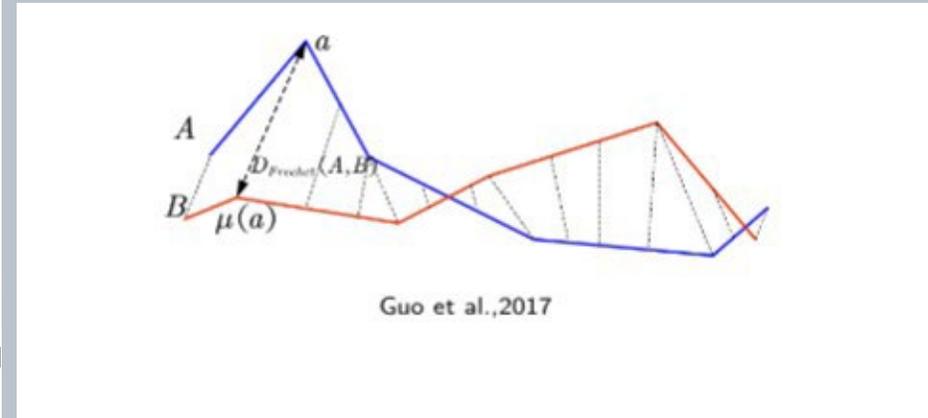
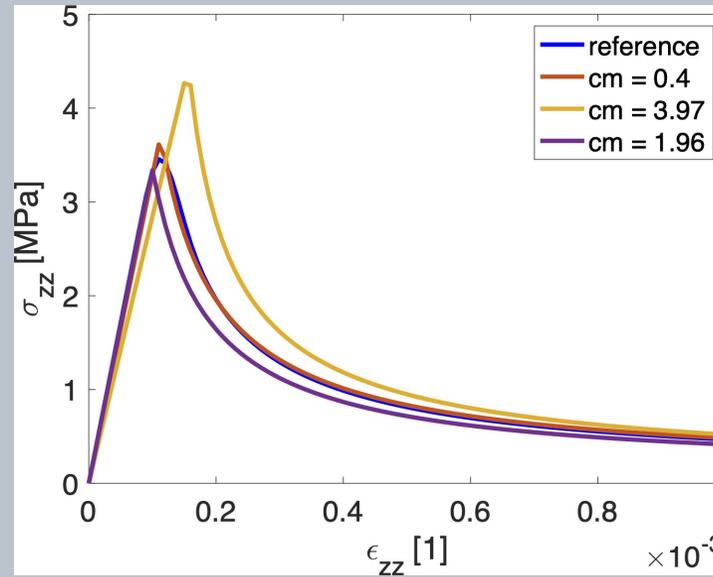


Monotic traction

Masonry material

The aim is to calibrate the model by manipulating the parameters that directly affect the behavior of the element when a specific loading is applied.

Reference is either from experimental data or from a more rich numerical model



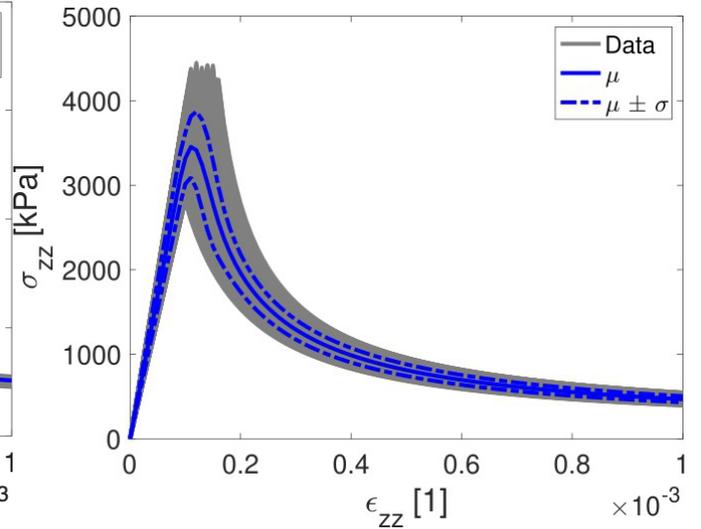
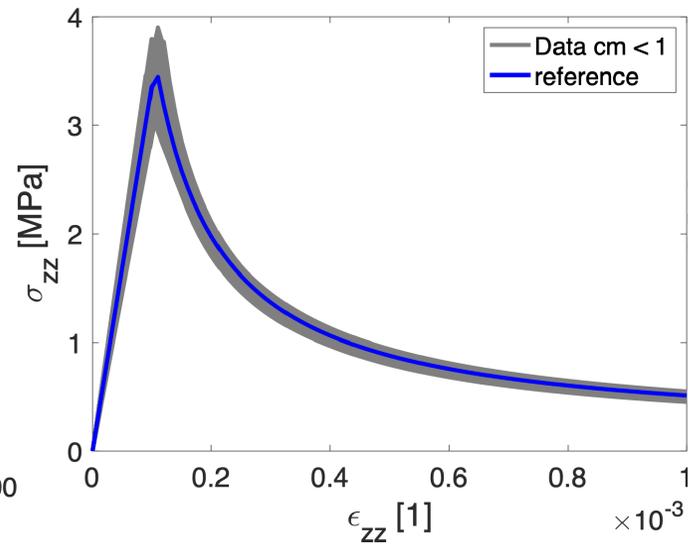
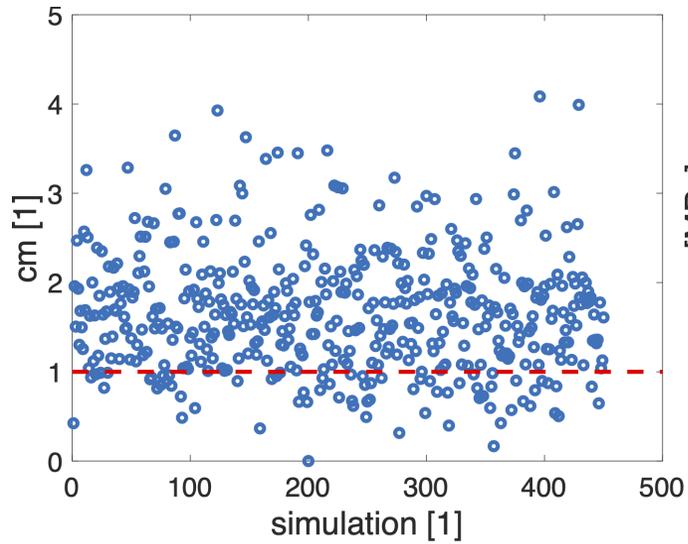
Discrete Frechet distance

The discrete frechet distance

$$\delta_{(d)F}(A, B) = \min_{a, \beta} \delta_{(d)F}(c_a(A), c_\beta(B))$$

Masonry material

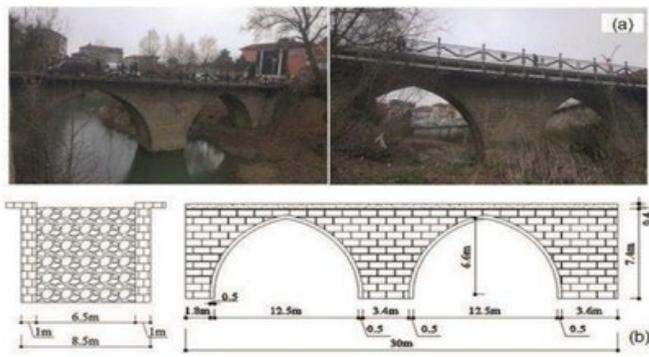
Bridges
Masonry material
Simulations on structures
Ongoing works
Références



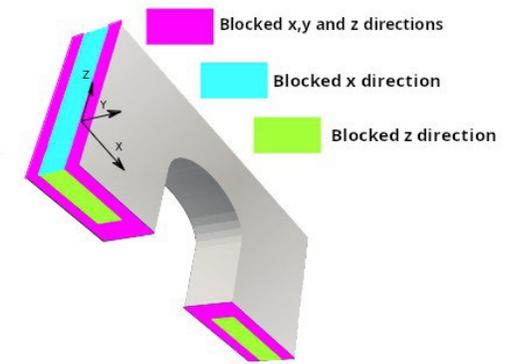
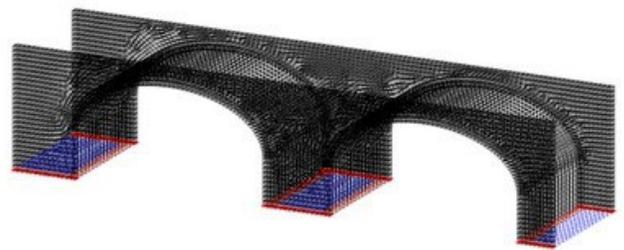
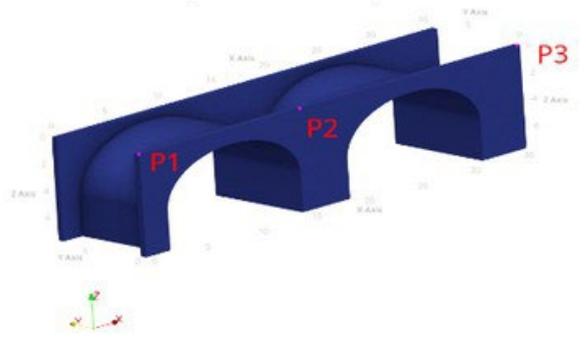
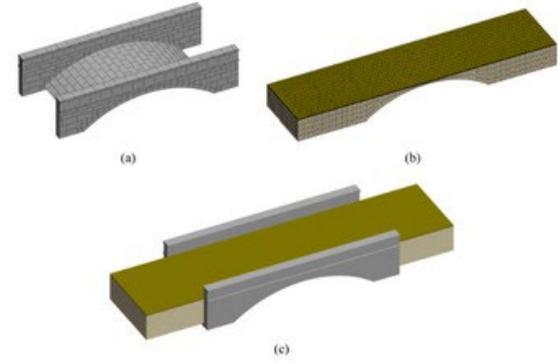
cm :frechet distance
Each simulation represents a set of parameters

Simulations on structures

Bridge: geometry and boundary conditions



[Hökeleli 2019]



[P.Tisserand 2020]

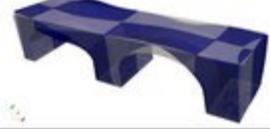
Simulations on structures

Modal analysis

Bridges
Masonry material
Simulations on
structures
Ongoing works
Références

Mode	f [Hz]	Déformée	Direction
1	5,54		Flexion x $m_x^{eff} = 74 \% M_{tot}$
2	7,00		Flexion y $m_y^{eff} = 62 \% M_{tot}$
3	7,53		Flexion y $m_y^{eff} = 6,3 \% M_{tot}$

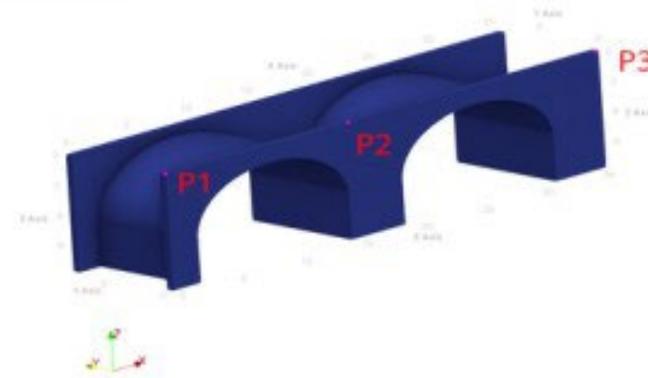
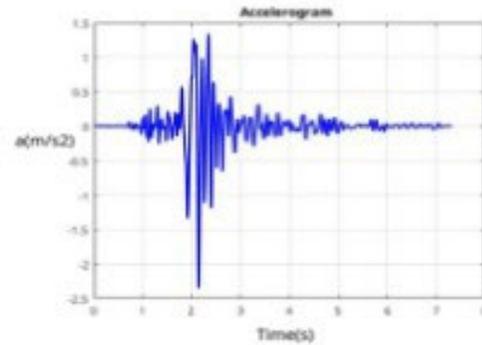
8	11,06		Flexion z $m_z^{eff} = 19,5 \% M_{tot}$
9	13,95		Flexion y $m_y^{eff} = 9,8 \% M_{tot}$
10	15,24		Flexion x $m_x^{eff} = 11,8 \% M_{tot}$

4	9,20		Flexion locale arche $m_z^{eff} = 8,4 \% M_{tot}$
5	9,21		Flexion y $m_y^{eff} = 5 \% M_{tot}$
6	9,73		Flexion locale arche $m_z^{eff} = 2,4 \% M_{tot}$
7	11,04		Torsion

[C.Giry 2024]

Simulations on structures

Multi-risk environment :
EARTHQUAKES

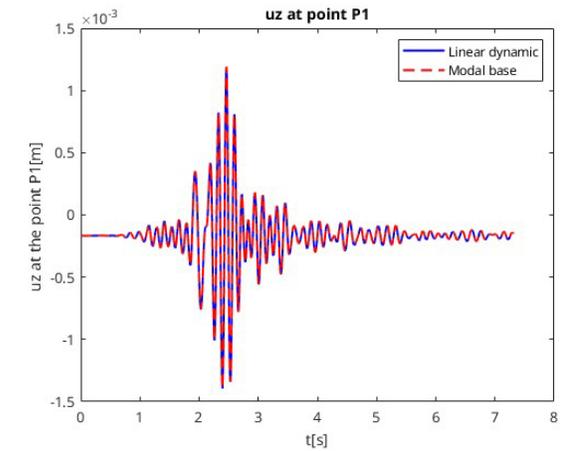
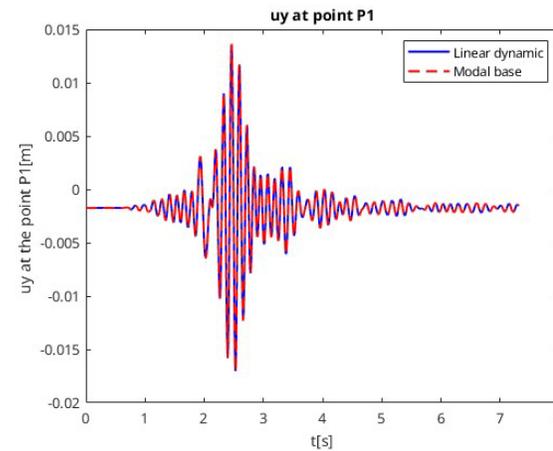
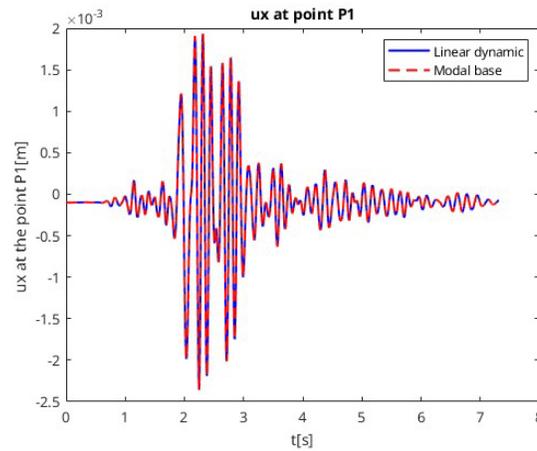


Bridges
Masonry material
Simulations on
structures
Ongoing works
Références

Simulations on structures

Bridges
Masonry material
Simulations on
structures
Ongoing works
Références

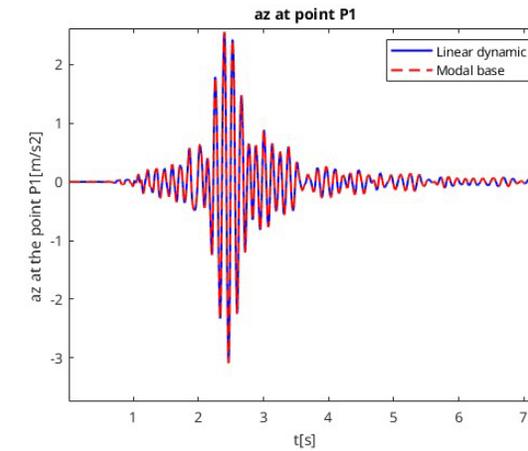
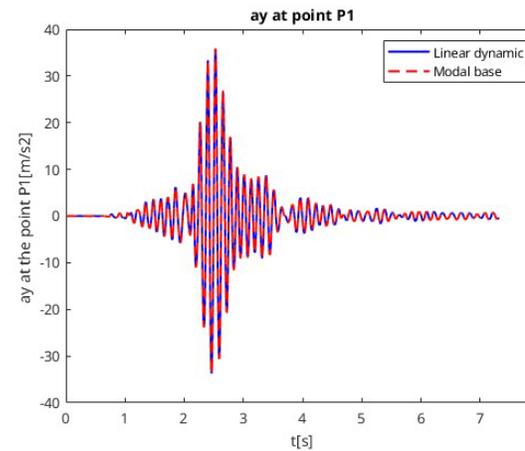
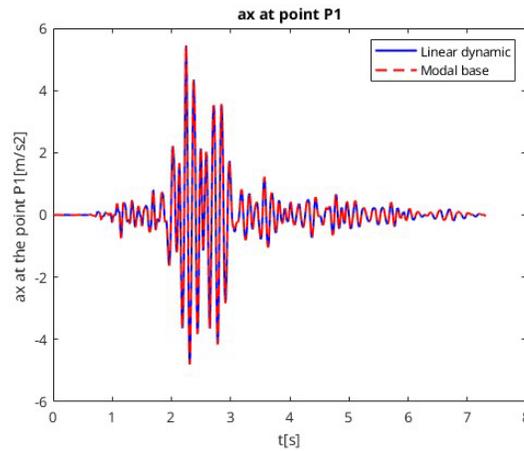
Verification : Linear dynamic time history analysis and calculation based on modal base



Simulations on structures

Bridges
Masonry material
Simulations on
structures
Ongoing works
Références

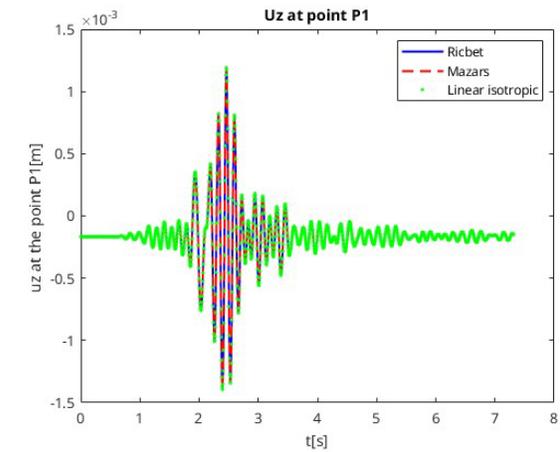
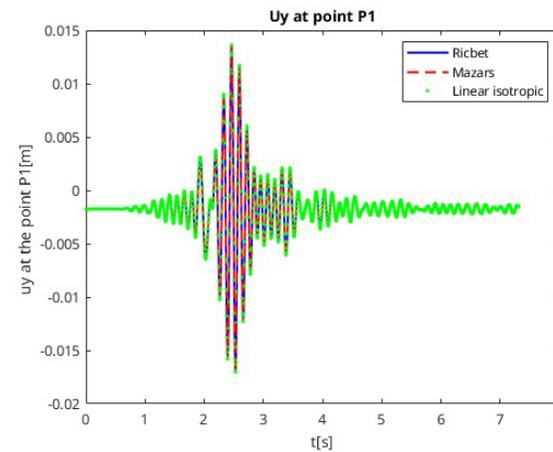
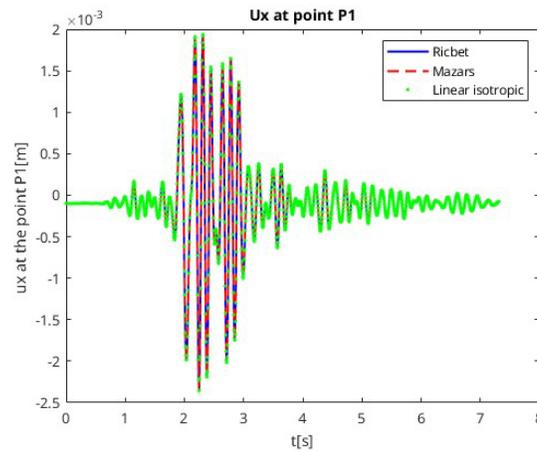
Verification : Linear dynamic time history analysis and calculation based on modal base



Simulations on structures

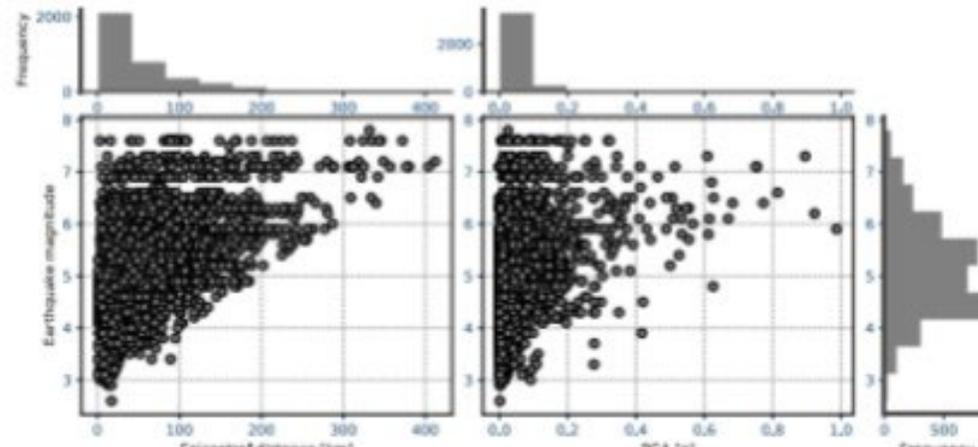
Bridges
Masonry material
Simulations on
structures
Ongoing works
Références

Verification : Linear domain using different models



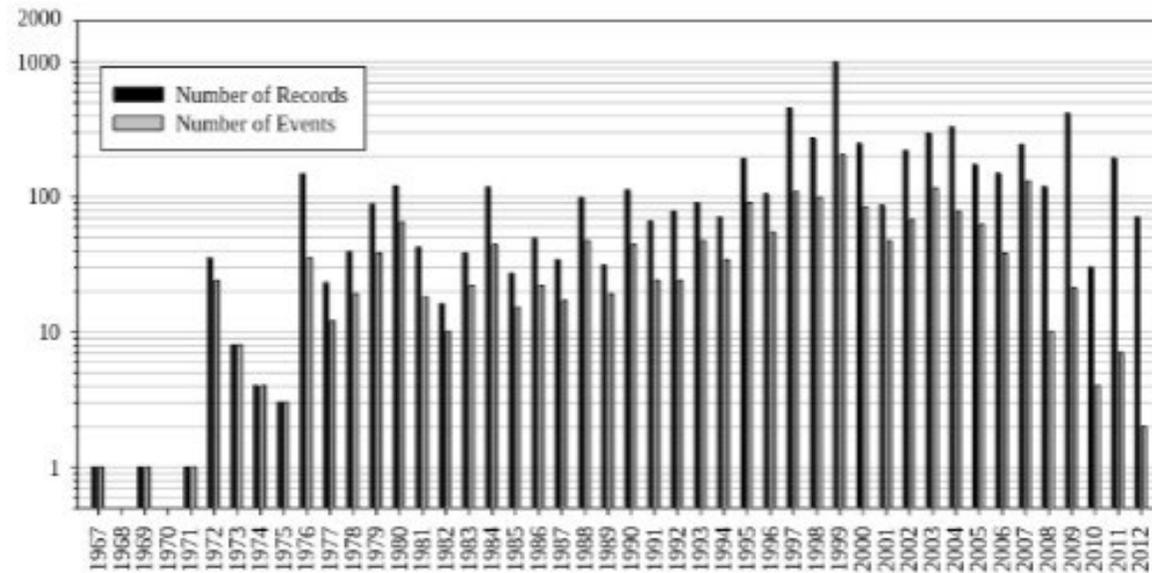
Resorce

- ▶ Natural as recorded earthquakes will be used
- ▶ Resorce includes 5882 accelerograms from 1814 events and 1540 strong-motion stations
- ▶ The moment magnitude range :
 $2.8 \leq M_w \leq 7.8$ The distances are between $0 \text{ Km} \leq d \leq 587 \text{ km}$
- ▶ Components:
 1. horizontal 1 orientation NS
 2. H1, horizontal 2 orientation WE
 3. H2, vertical V
- ▶ Aim of Resorce is to improve seismic hazard assessment methods in Europe by characterizing of aleatory and epistemic uncertainties



Resorce

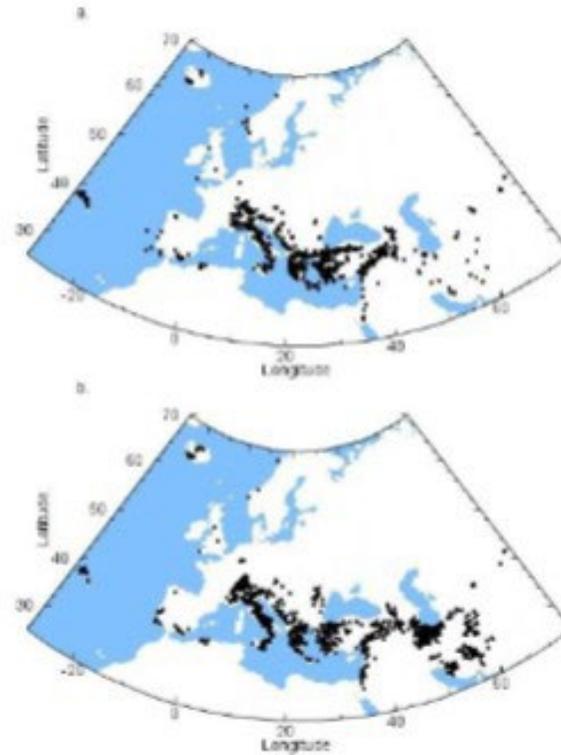
Bridges
Masonry material
Simulations on
structures
Ongoing works
Références



Annual distribution of earthquakes in Resorce

Resorce

Bridges
Masonry material
Simulations on
structures
Ongoing works
Références



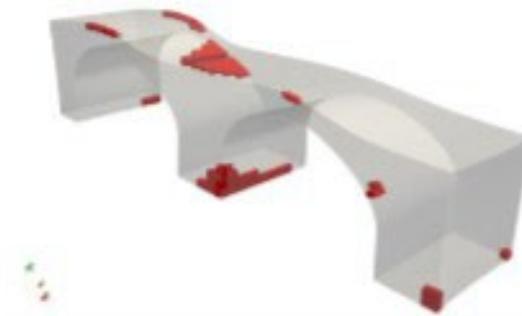
Geographical distributions of (a) earthquakes and (b) strong-motion stations in Resorce



Simulations on structures

Dolmen Project :Linear domain

$$f_{Rankine}(\sigma) = \max_I \sigma_I - f_t$$
$$D_{Irank} = \frac{V_{rank}}{V_{tot}}$$



Damage zones

Bridges
Masonry material
Simulations on
structures
Ongoing works
Références

Ongoing works

Bridges
Masonry material
Simulations on
structures
Ongoing works
Références

- ▶ Apply different level of earthquakes to see where the damage is localised in each zone
- ▶ Have an indicator for nonlinear calculations to capture the global damage
- ▶ Add other types of loadings like the differential settlement on the supports

Ongoing works

Bridges
Masonry material
Simulations on
structures
Ongoing works
Références

**THANK YOU
FOR YOUR ATTENTION**

4

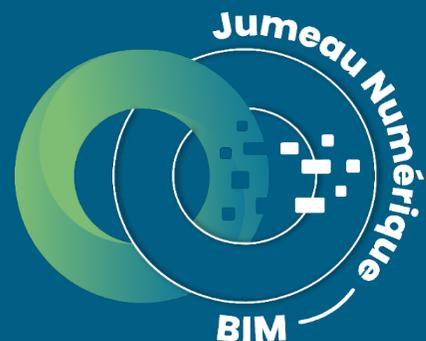
PRÉSENTATION 3

ÉVALUATION DES PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES DES PROJETS
FERROVIAIRES : COUPLAGE BIM ET ACV



ÉVALUATION DES PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES DES PROJETS FERROVIAIRES : COUPLAGE BIM ET ACV

Cette étude se concentre sur l'évaluation des performances environnementales des projets ferroviaires grâce au couplage entre le BIM et l'ACV. L'objectif est d'élargir l'analyse au-delà de l'énergie et de l'empreinte carbone pour inclure des impacts sur la santé humaine et les écosystèmes, tout en assurant une interopérabilité optimale entre les outils BIM et ACV dès les phases initiales de planification et de conception. Cette approche intégrée vise à faciliter l'échange et la synchronisation des données entre les deux systèmes, permettant ainsi une évaluation environnementale exhaustive et la création de bases de données ACV compatibles avec les logiciels BIM pour une prise de décision plus éclairée.



MINERVE
avec la filière ferroviaire

COUPLAGE BIM & ACV POUR ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DES PROJETS FERROVIAIRES

Asmaa Benzidane

Doctorante en 2ème Année
Début en novembre 2023

Direction de thèse :

- Adelaide Feraille

Encadrement de thèse:

- Myriam Saadé (ENPC)
- 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.

SOMMAIRE

État de l'art

Avancement

Plan d'action

1

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 utilisés pour 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)

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

2- Inventaire de Cycle de Vie

3- Evaluation de l'impact

4 - Interprétation

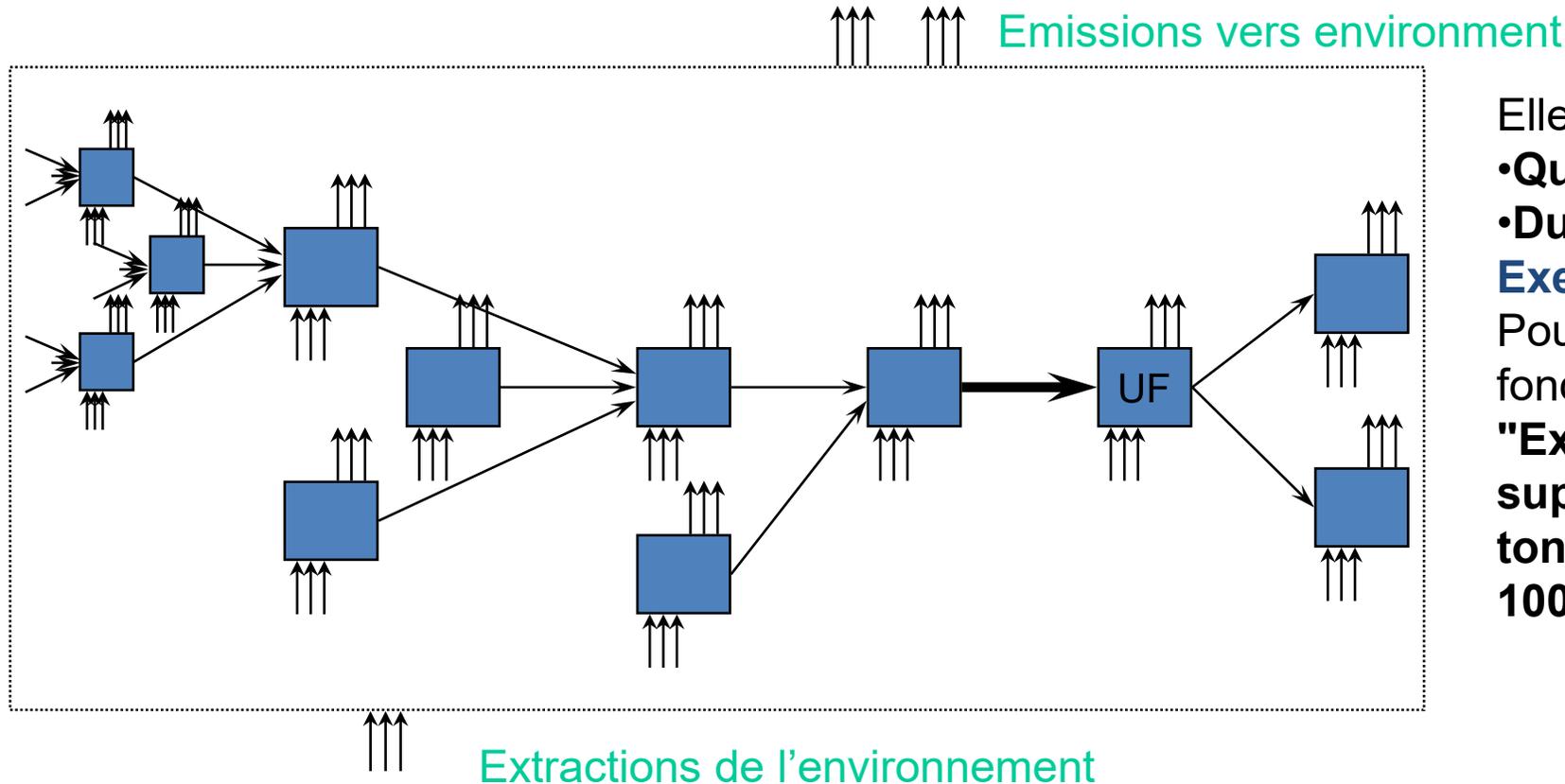
Généralités sur l'ACV

Définition des objectifs et du système

UF = Unité Fonctionnelle

La norme ISO 14044, définit l'Unité Fonctionnelle comme :

“Performance quantifiée d'un système de produits, destinée à être utilisée comme *unité de référence* dans une ACV”



Elle intègre :

- **Qualité** de la fonction assurée
- **Durée** du service du système

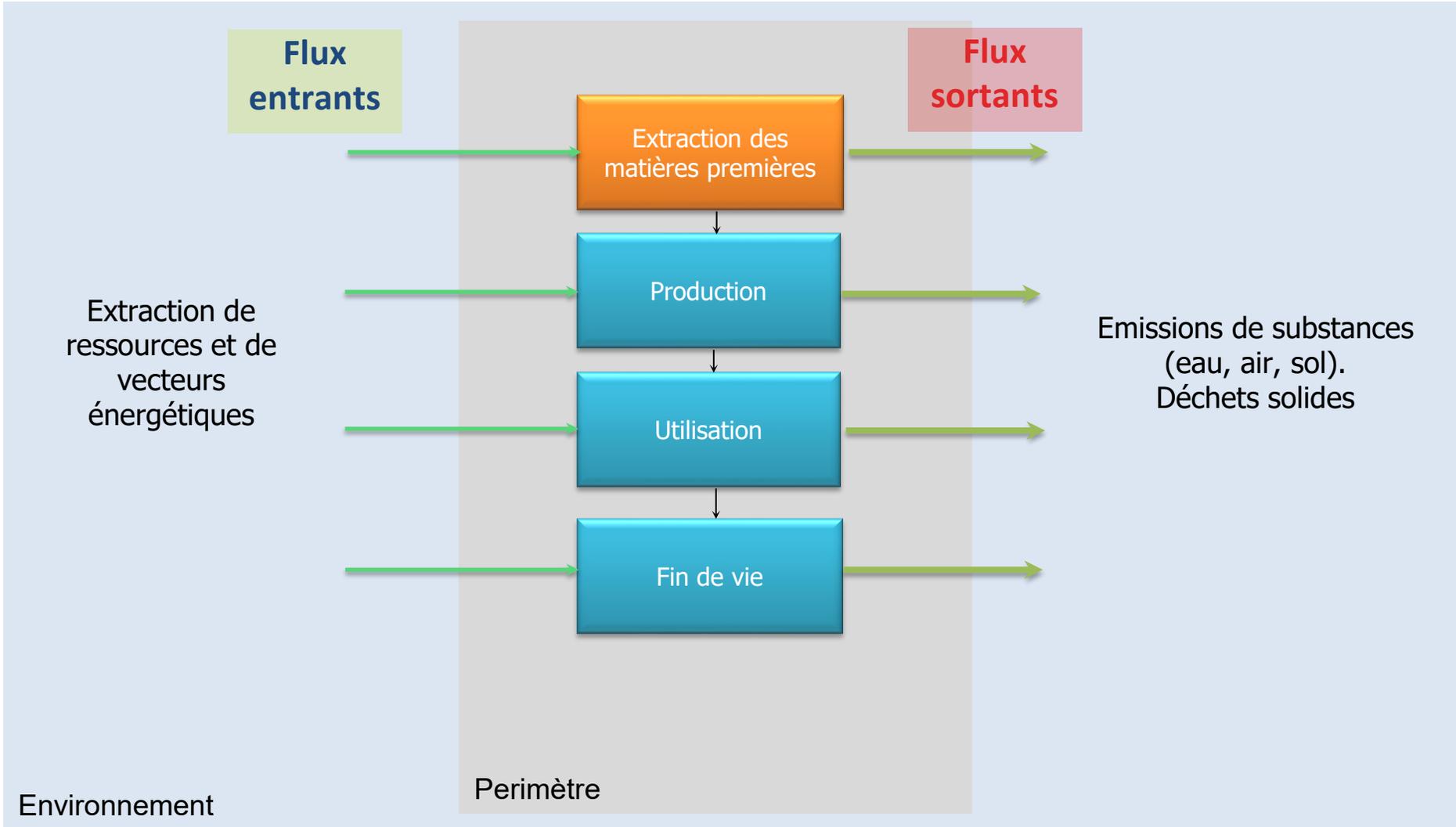
Exemple :

Pour un pont ferroviaire, l'unité fonctionnelle pourrait être :

"Exploitation d'un pont rail capable de supporter une charge de 17 tonnes/essieu pendant une durée de 100 ans"

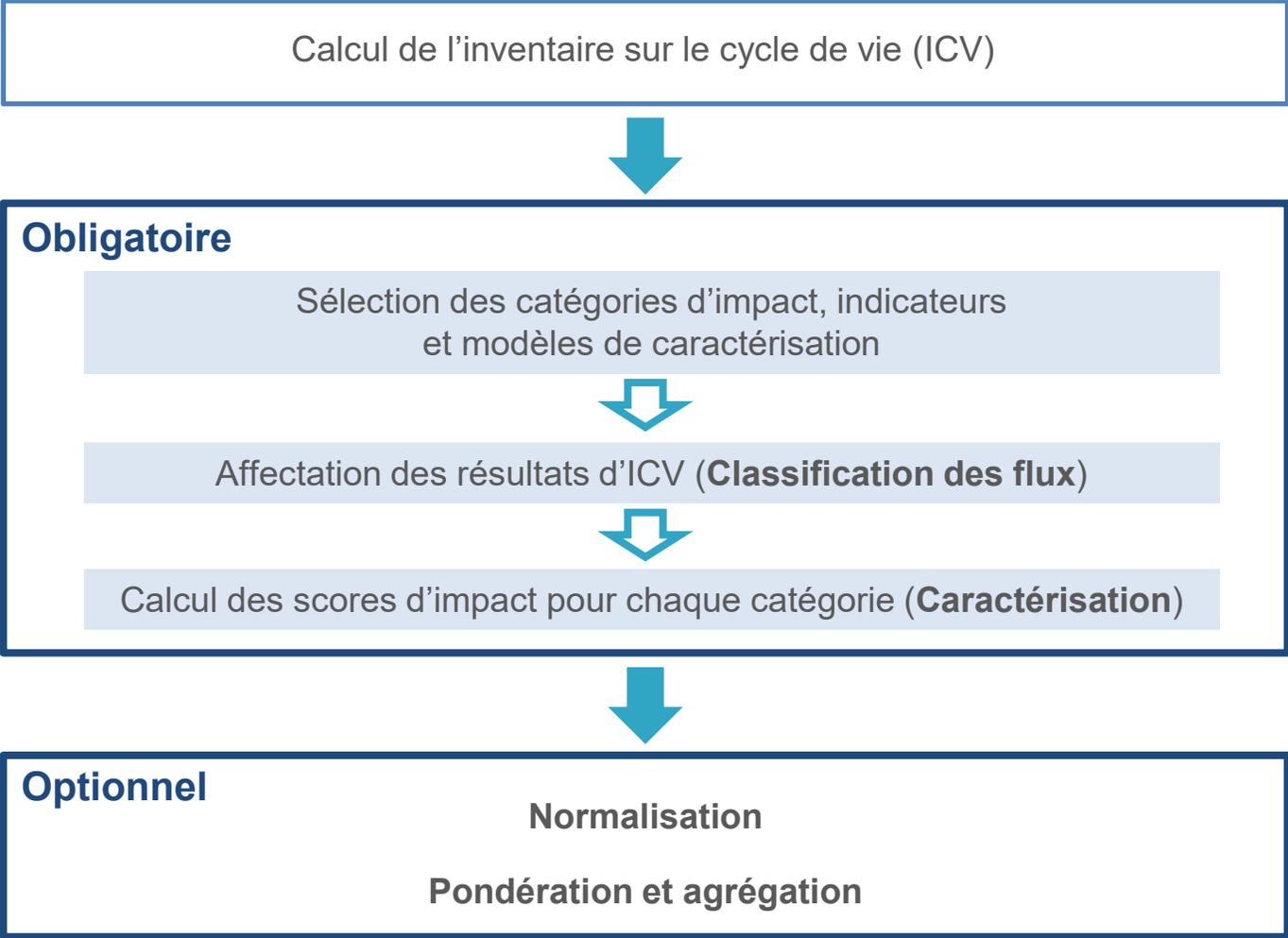
Généralités sur l'ACV

Calcul de l'inventaire (ICV)



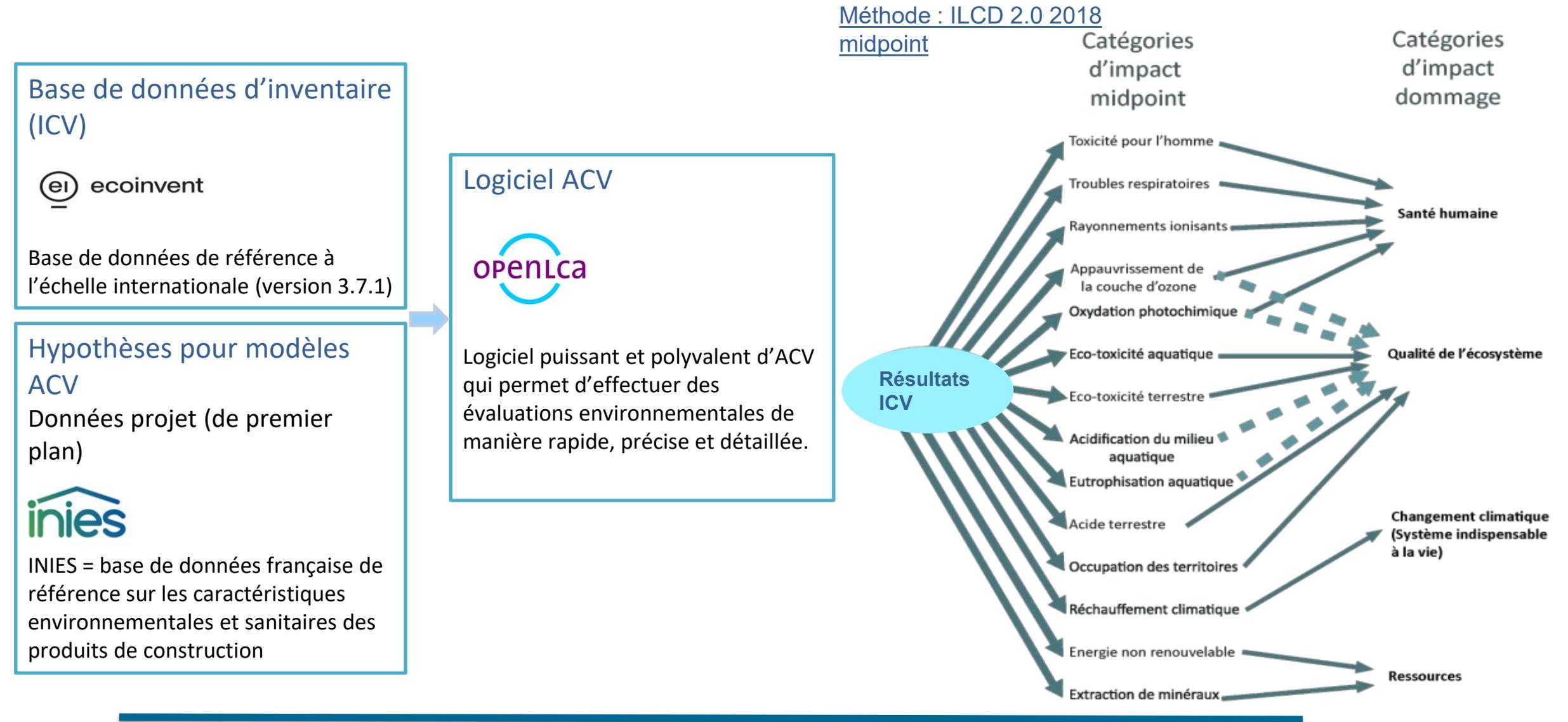
Généralités sur l'ACV

Analyse de l'impact



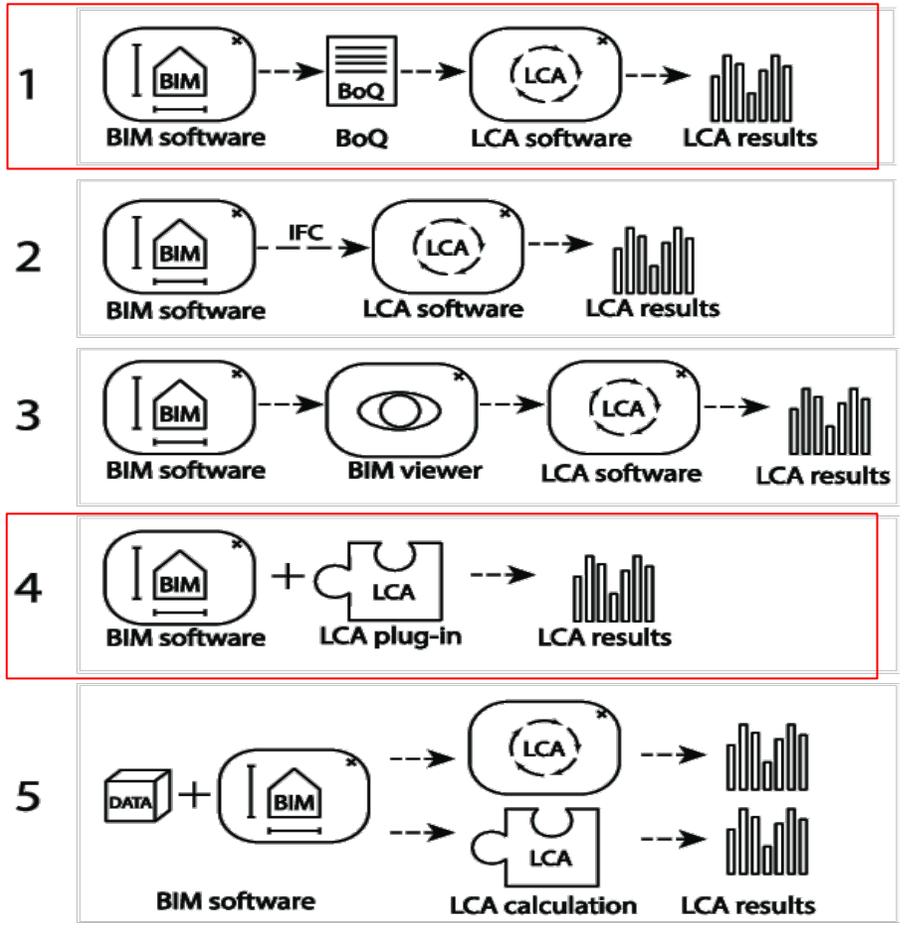
Méthodologie ACV :

Exemple de : logiciel ACV, base de données d'inventaire et méthode d'évaluation de l'impact



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

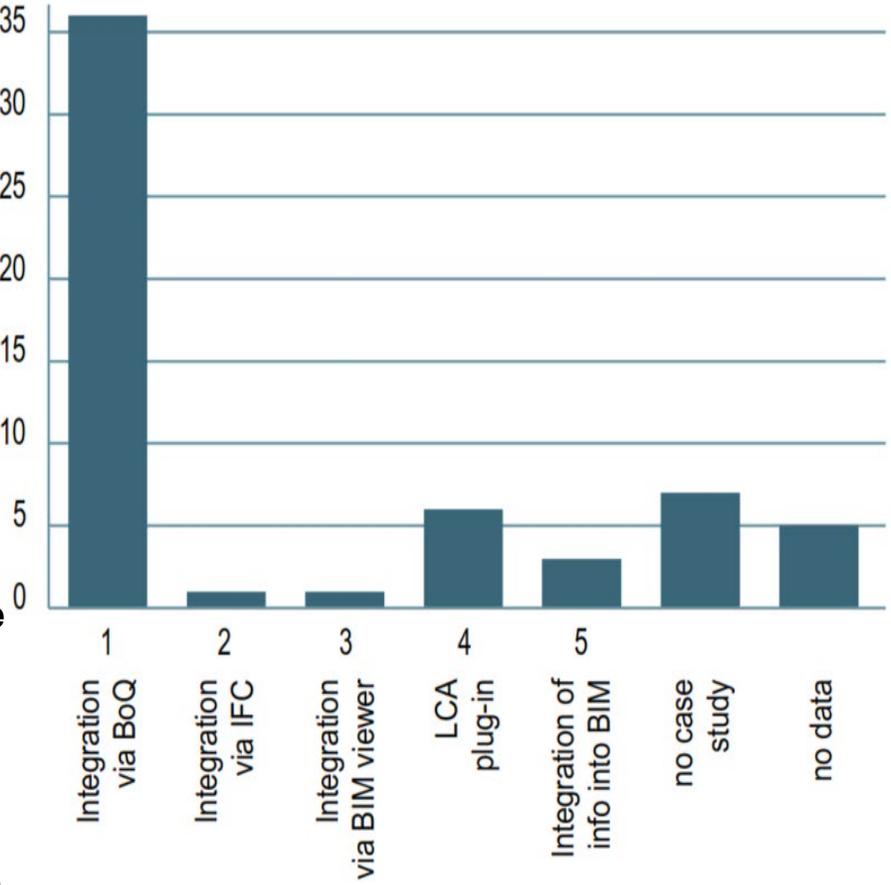


Figure. Approches d'intégration BIM/ACV . (Wastiels, L., & Decuyper, R. (2019, August). Identification and comparison of LCA-BIM integration strategies.)

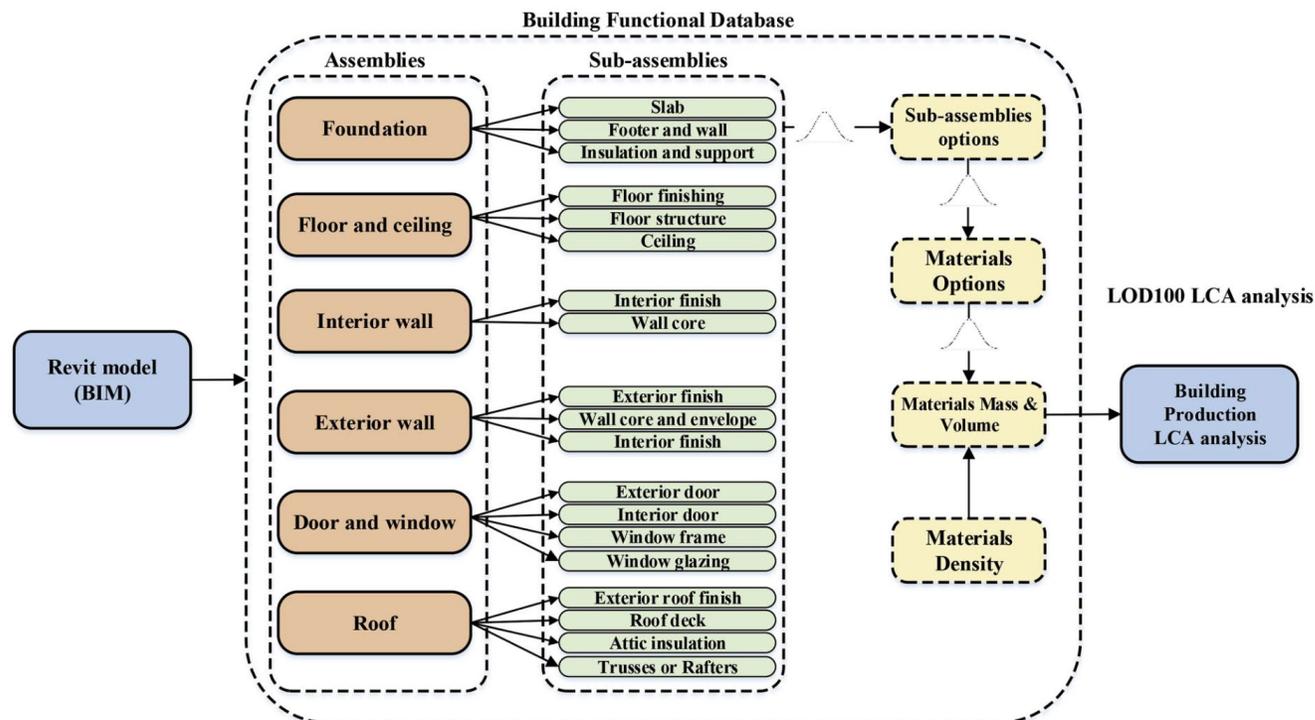
Figure. Classification de l'utilisation des approches d'intégration dans les 60 études identifiées . (Potrc Obrecht, T., Röck, M., Hoxha, E., & Passer, A. (2020). BIM and LCA integration: A systematic literature review..)

Intégration BIM-ACV : Question de développement d'une base de données fonctionnelle pour Intégrer l'ACV et le BIM dans la Conception

▷ Rezaei, F., Bulle, C., & Lesage, P. (2019). *Integrating building information modeling and life cycle assessment in the early and detailed building design stages*. Building and Environment, 153, 158-167.

□ **Objectif de l'Étude** : Développer une base de données fonctionnelle pour intégrer l'ACV et le BIM dans la conception précoce des projets résidentiels au Québec.

- **Compilation de toutes les options possibles pour chaque assemblage de bâtiment commun dans les bâtiments résidentiels au Québec.**
- **Inclusion de tous les assemblages de bâtiments, sous-assemblages, couches et matériaux possibles dans la base de données.**
- **Utilisation de la base de données Ecoinvent pour attribuer un processus approprié à chaque matériau, en tenant compte des différentes étapes de conception du bâtiment.**



■ Difficultés rencontrées:

- Problèmes d'alignement des bases de données BIM et ACV en termes de nomenclature et de niveau de détail.
- Manque d'informations au stade préliminaire (LOD 100)
- Modélisation et validation

Intégration BIM-ACV : Aperçu de la méthodologie

- ▷ Rezaei, F., Bulle, C., & Lesage, P. (2019). *Integrating building information modeling and life cycle assessment in the early and detailed building design stages*. *Building and Environment*, 153, 158-167.

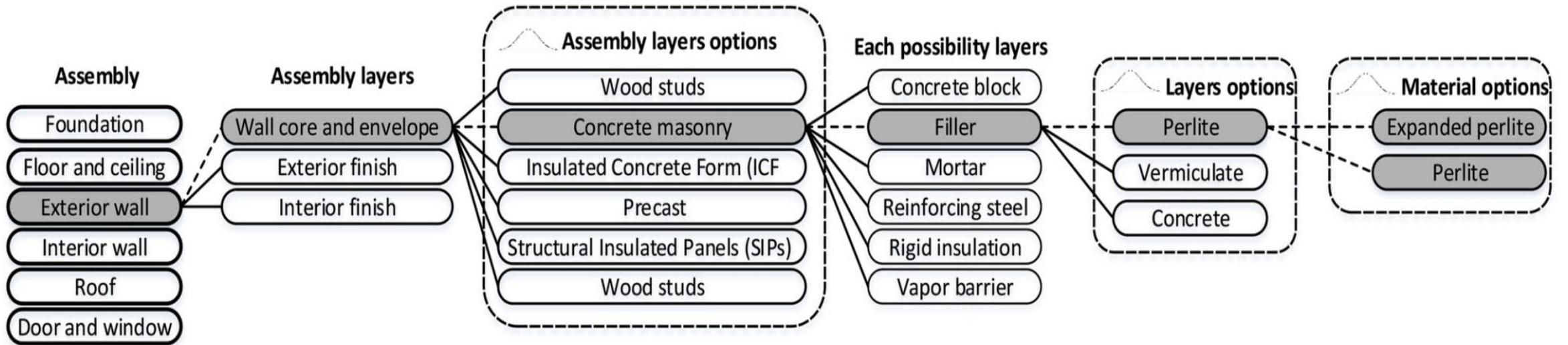
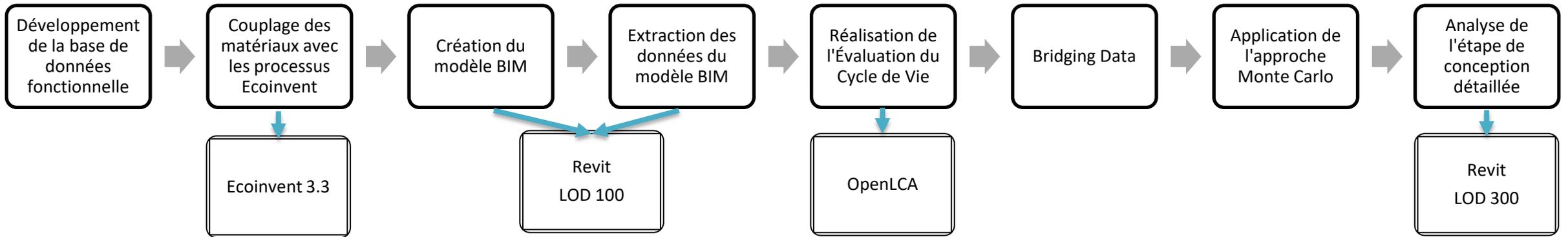
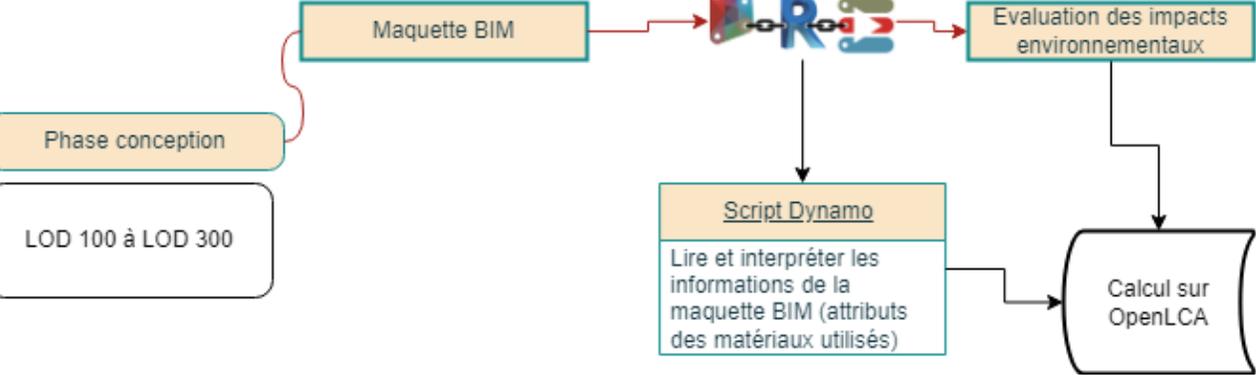


Figure :Exemple de cartographie des données utilisée dans l'étude pour le cas de remplissage d'un mur extérieur

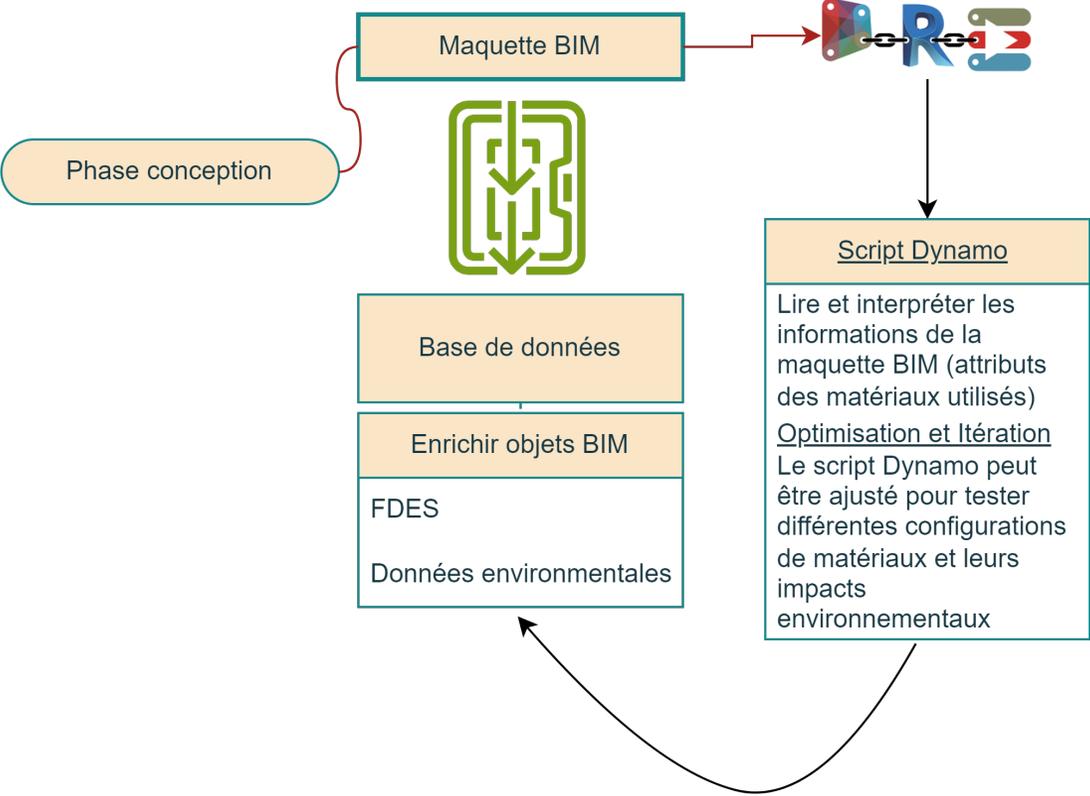
Avancement de la thèse : approches méthodologiques

Intégration des données BIM et ACV :

Process pour approche semi-automatique



Process pour approche automatique



Avancement de la thèse : approches méthodologiques

Process pour approche semi-automatique

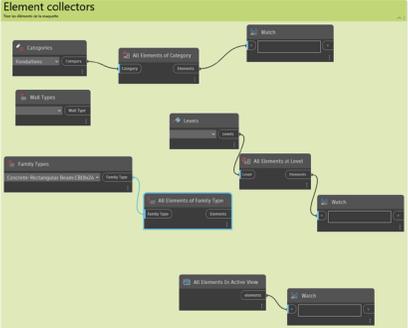
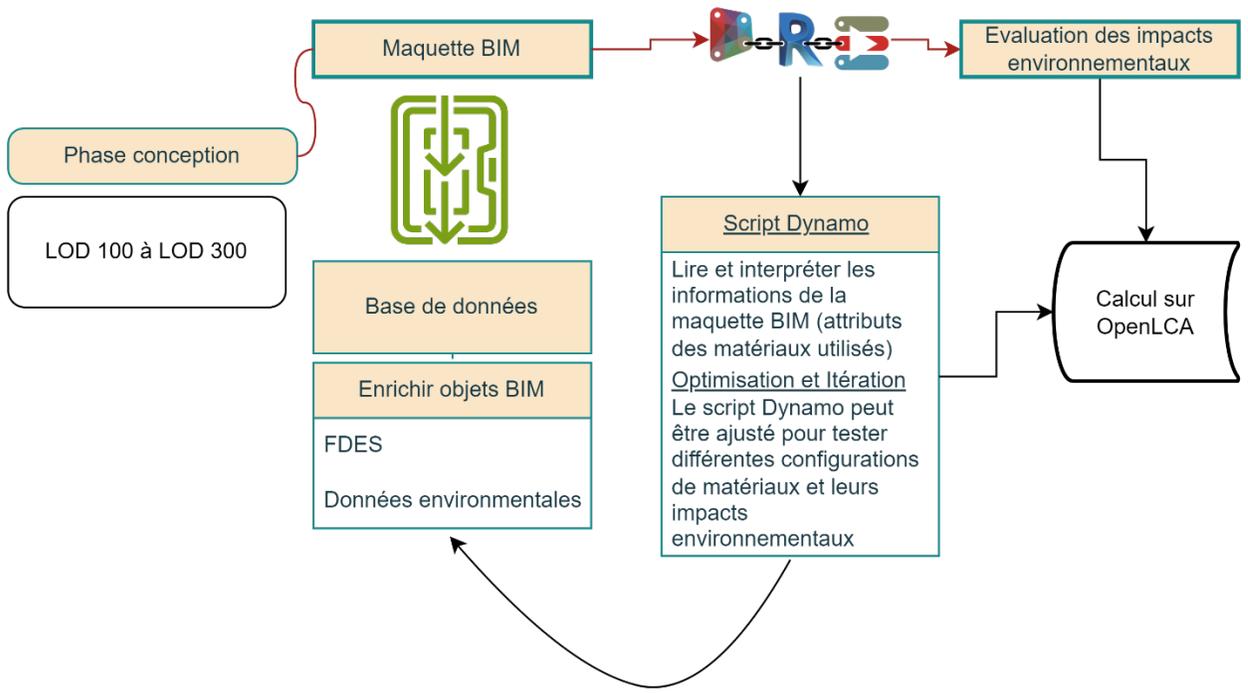
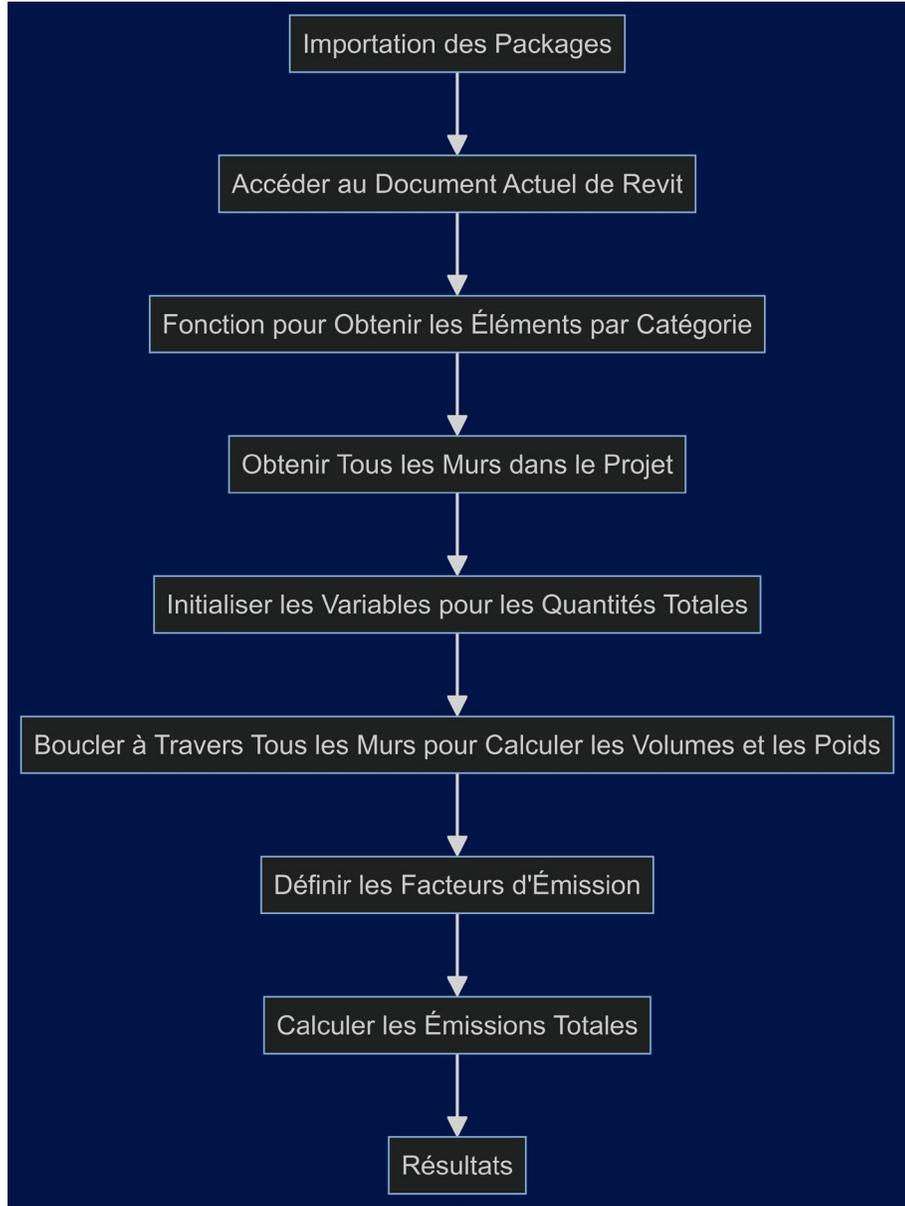


Figure : Script Dynamo pour automatiser le calcul d'impacts environnementaux

II. Avancement de la thèse : approches méthodologiques

Workflow 1 : Objectifs du Programme

- 1. Installation des Packages :** Automatiser les calculs d'impact environnemental. Installation des packages nécessaires à partir de la bibliothèque de packages de Dynamo. Intégrer les données BIM et ACV pour une évaluation continue tout au long de la phase de conception.
- 2. Création du Script Dynamo :** Utilisation des nœuds fournis par les packages installés pour connecter Dynamo à votre modèle Revit.
- 3. Extraction des Données BIM :** Utilisation des nœuds Dynamo pour extraire les quantités de matériaux des éléments du modèle BIM (Ex : les volumes de béton, les poids de l'acier).
- 4. Calcul des Impacts Environnementaux :** Application des facteurs d'émission de la base de données ACV aux quantités de matériaux extraites pour calculer les émissions de CO2.
- 5. Visualisation des Résultats :** **Dynamo et les outils de visualisation :** pour afficher les résultats des calculs (graphiques, tableaux, etc.). Optionnellement, exportation des résultats vers Excel pour une analyse plus détaillée.



Analyse du Cycle de Vie de la Ligne à Grande Vitesse (LGV) Tours-Bordeaux

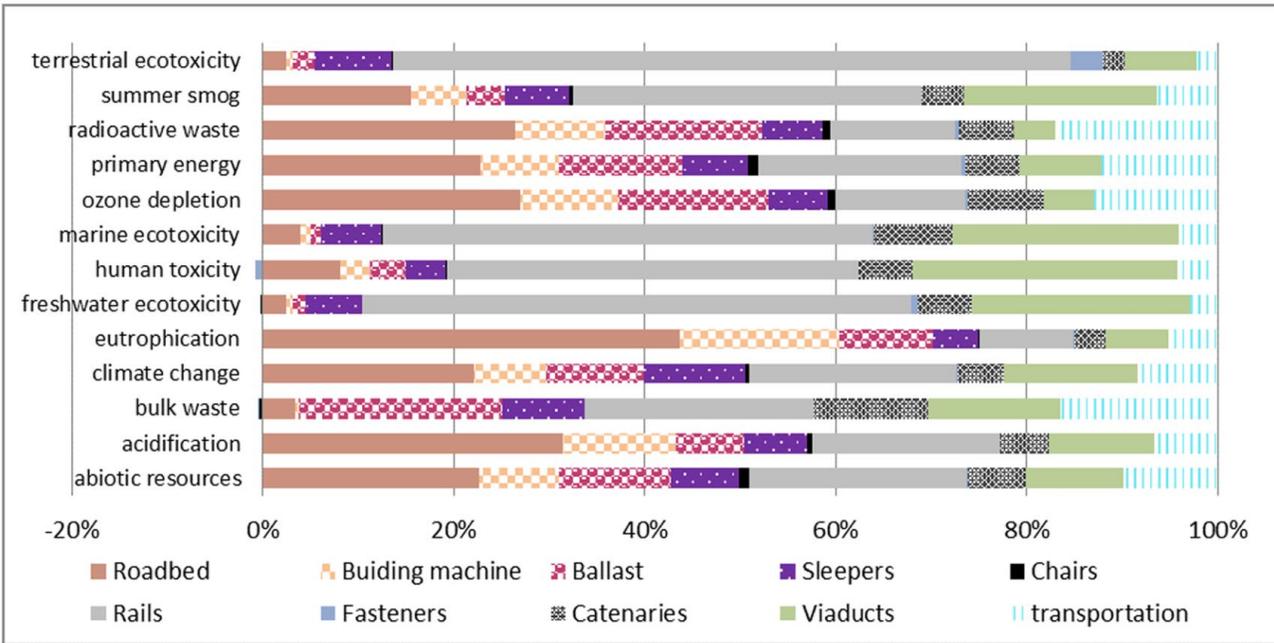
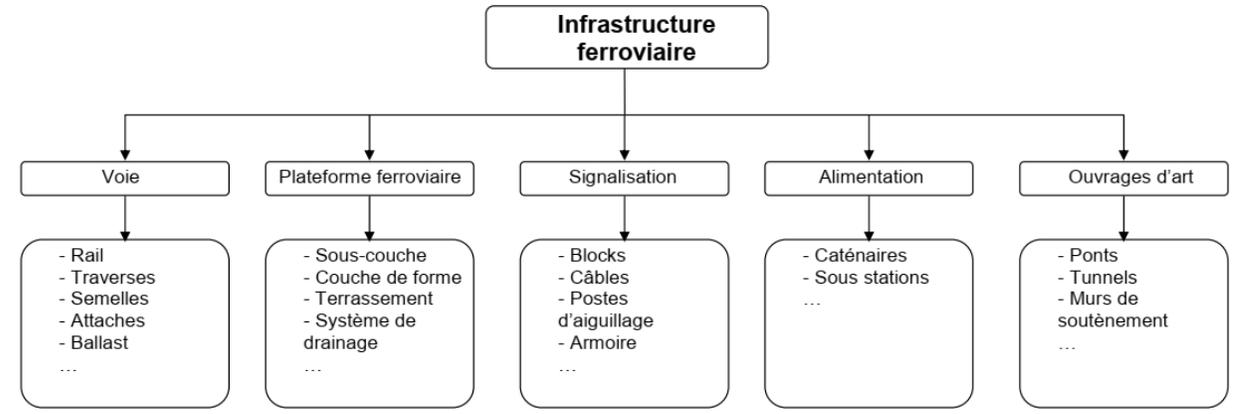


Figure : Différentes parties de l'infrastructure ferroviaire (Haut) , Contribution de chaque étape du cycle de vie aux différentes catégories d'impact (bas)

➤ de Bortoli, A., Bouhaya, L., & Feraille, A. (2020). *A life cycle model for high-speed rail infrastructure: environmental inventories and assessment of the Tours-Bordeaux railway in France*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 25, 814-830.

- ☐ **Objectif de l'Étude :**
- Développer un modèle d'ACV avec des inventaires de cycle de vie clairs et réutilisables pour l'infrastructure de la LGV.
- Évaluer les principaux impacts environnementaux sur la durée de vie de l'infrastructure LGV.
- Identifier les enjeux environnementaux majeurs et les bonnes pratique
- ☐ **Unité fonctionnelle :** Permettre le voyage en train à grande vitesse jusqu'à 17 tonnes métriques par essieu sur une période de 120 ans
- ☐ **Sources de données :** Données du concessionnaire, inventaires EcoInvent 3.1, retours d'experts et données de terrain.

Analyse du Cycle de Vie de la Ligne à Grande Vitesse (LGV) Tours-Bordeaux

➤ de Bortoli, A., Bouhaya, L., & Feraille, A. (2020). *A life cycle model for high-speed rail infrastructure: environmental inventories and assessment of the Tours-Bordeaux railway in France*. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25, 814-830.

☐ Résultats clés :

- Contributions aux Impacts Environnementaux :
- **Principaux contributeurs** : Rails (10-71%), plateforme (3-48%), structures de génie civil (4-28%).
- **Moindres Impacts** : Ballast (1-22%), machines de construction (0-17%), traverses (4-11%), système d'alimentation électrique (2-12%).
- Impact négligeable des fixations (max 1-3%).

☐ Perspectives:

- Étudier l'impact sur changement d'occupations des sols en reprenant le modèle existant d'infrastructure ferroviaire à grande vitesse entre Tours et Bordeaux
- Comparer des variantes de conception en phase avant-projet pour un ouvrage simple appartenant à l'infrastructure.
- Création du modèle ACV sur Brightway

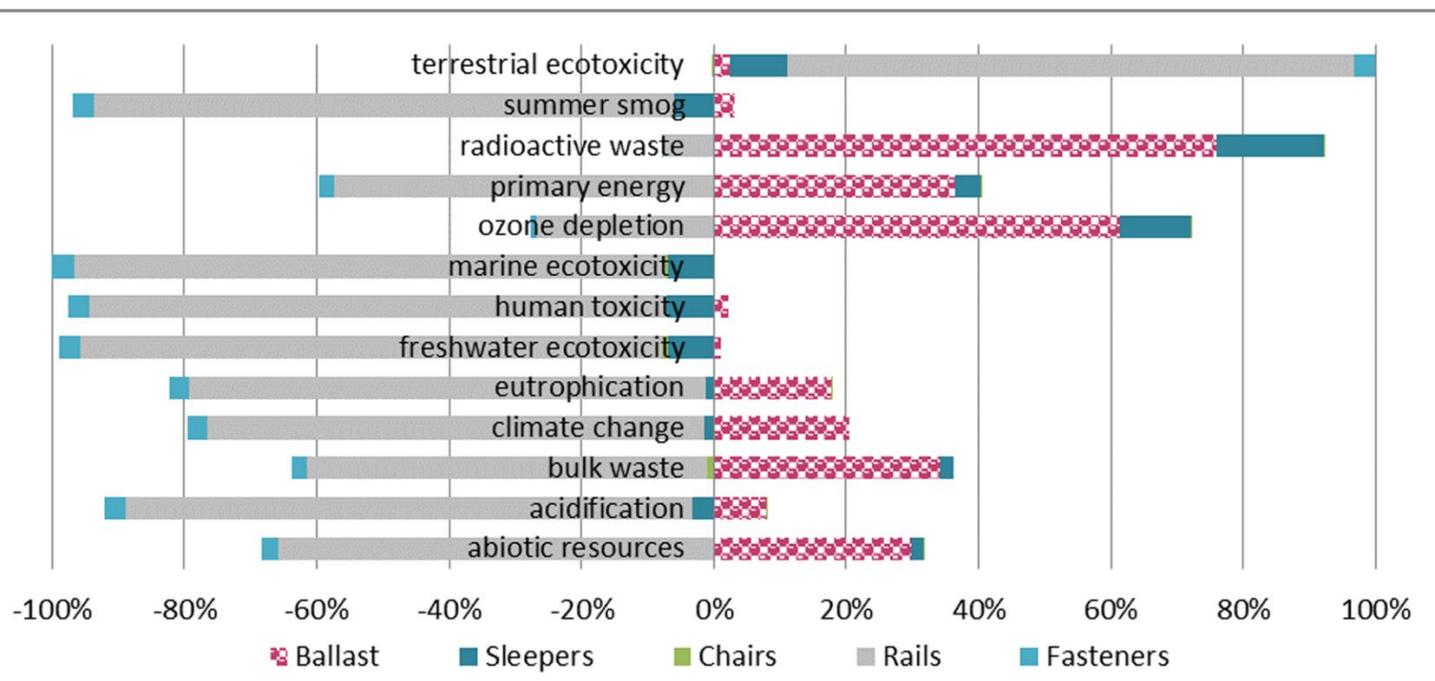
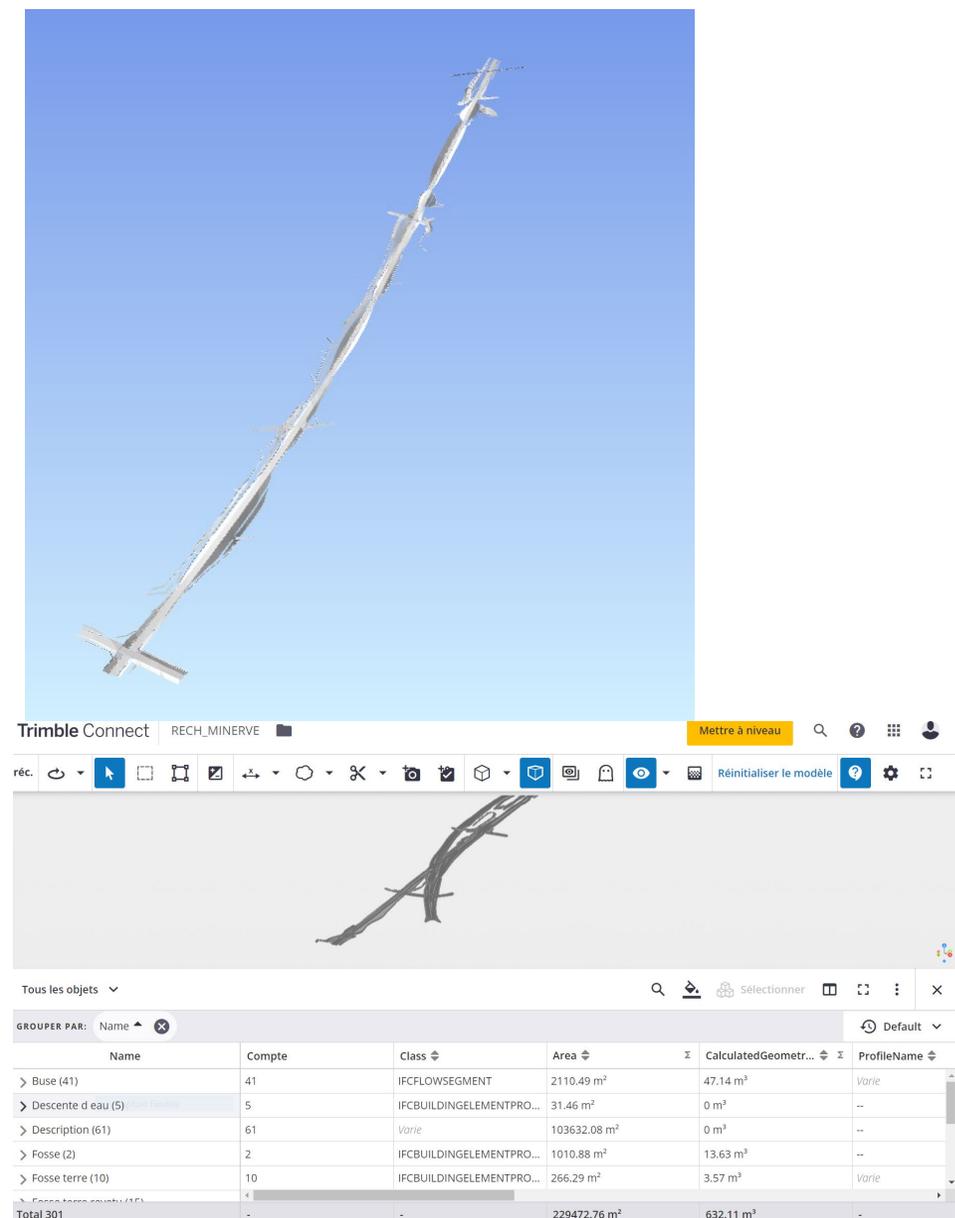


Figure : Comparaison des impacts environnementaux d'une infrastructure ferroviaire à grande par kilomètre et par an bas.

Exploration de la Plateforme Trimble et Applications Méthodologiques



Introduction à la plateforme Trimble

- **Exemples de maquettes téléchargées**
 - Tronçon de ligne de grande vitesse (LGV)
- **Données disponibles et extraction**
 - Données issues du BIM :
Quantités de matériaux
 - Données non issues du BIM :
Facteurs d'émission (Ecoinvent), données de consommation énergétique, informations sur les cycles de vie des matériaux

Prochaines étapes

- Application de la méthodologie BIM-ACV
- Intégration des données supplémentaires
- Calcul des impacts environnementaux, Analyse et visualisation des résultats
- Collaboration avec les équipes techniques de la SNCF pour optimiser l'usage des maquettes

Figure : Exemple maquette existantes

ACV des projets ferroviaires en phase conception : approche méthodologique

Base de données

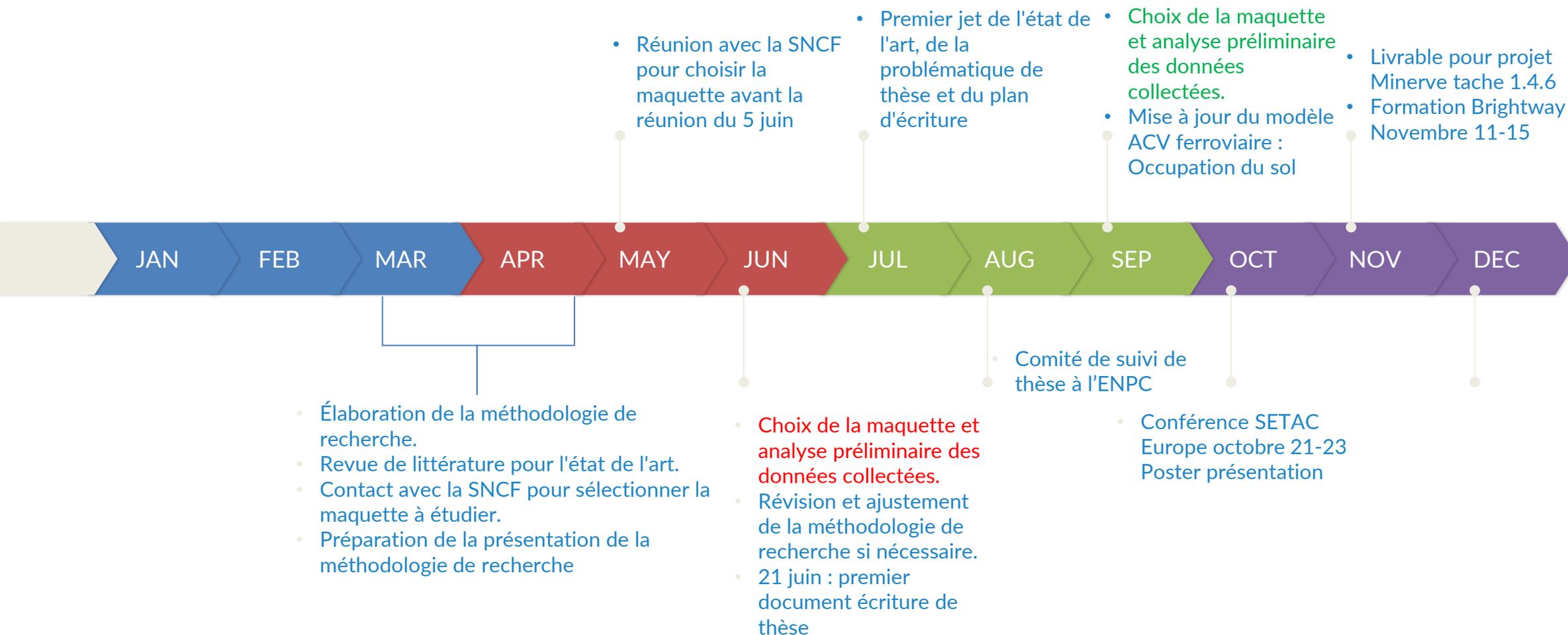
- Adapter de la base de données fonctionnelle bâtiment pour inclure les matériaux et les assemblages spécifiques aux infrastructures ferroviaires.
- Inclure des matériaux spécifiques à l'infrastructure ferroviaire et aux voies ferrées.
- Enrichir les maquettes ferroviaires (SNCF) avec des données environnementales 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 : Développer une structure de données harmonisée qui enrichit les objets BIM avec les paramètres nécessaires pour les calculs d'ACV.
 - Coupler les objets BIM avec une base de données d'inventaire de cycle de vie
- **Développement d'un script Dynamo :** Créer un script Dynamo qui automatise la comparaison des conceptions alternatives basées sur les modèles BIM et effectue des calculs d'ACV en temps réel.
- **Validation par l'application d'une étude de cas :** Valider la méthode grâce à l'application d'une étude de cas pour démontrer sa faisabilité et son potentiel en tant qu'aide à la prise de décision aux premières étapes de la conception.

Plan d'action



PERSPECTIVES

- **Positionnement de l'approche pour projets en phase amont** : données, tracés, ...
- **Biodiversité et changement d'occupation des sols** : spatialisation des données et des impacts





MERCI

5

PRÉSENTATION 4

HYBRID METHODS COMBINING PHYSICAL MODELS AND LEARNING
ALGORITHMS FOR PREDICTING THE AGING OF MECHANICAL TRACK SYSTEMS



HYBRID METHODS COMBINING PHYSICAL MODELS AND LEARNING ALGORITHMS FOR PREDICTING THE AGING OF MECHANICAL TRACK SYSTEMS

This study focuses on the impact of aging and fatigue in concrete sleepers, which are critical for railway track longevity. It examines how dynamic loads, fatigue, and environmental factors affect their structural integrity over time, as well as the interaction between track components to enhance stability. By integrating these models into railway monitoring systems, early failure detection and proactive maintenance strategies become possible. Current research is limited by the lack of comprehensive numerical models that accurately simulate real-world loading conditions and degradation processes, making it challenging to predict and prevent sleeper deterioration effectively.



HYBRID METHODS COMBINING PHYSICAL MODELS AND LEARNING ALGORITHMS FOR PREDICTING THE AGING OF MECHANICAL TRACK SYSTEMS

Kadekeshova Kuralay

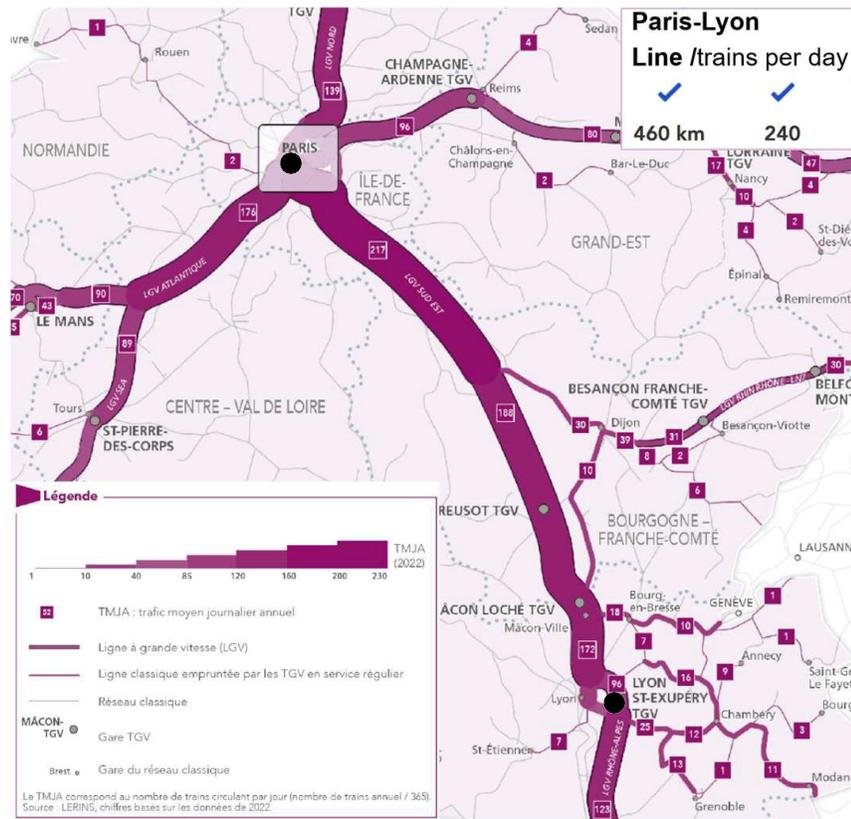


The MINERVE project has been financed by the French government within the framework of France 2030

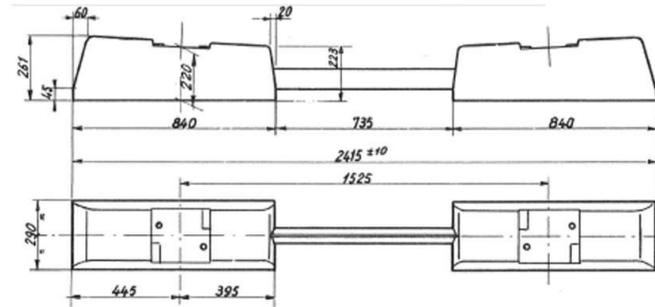
21 / 11 / 2024

Introduction

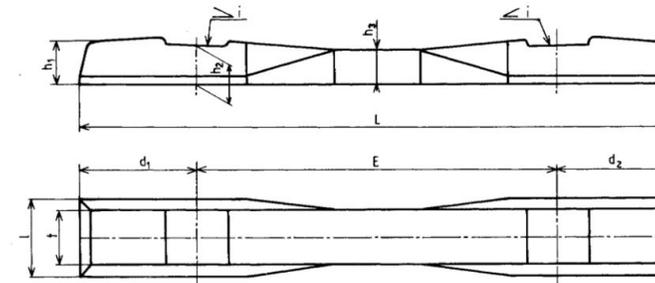
The rail network



VAX U41 NAT - biblock/twin-block sleeper



Monoblock sleeper



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 $h(t)$ at time t :

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

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

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

$\beta > 1$, $h_w(t)$ is an increasing function and thus provide a model for an aging item that is more likely to fail as it gets older;

$\beta < 1$, $h_w(t)$ decreasing function that is less likely to fail as it gets older;

$\beta = 1$, is an exponential mode.



Reasons behind the aging or failure of the high-speed rail track system

Transition zones

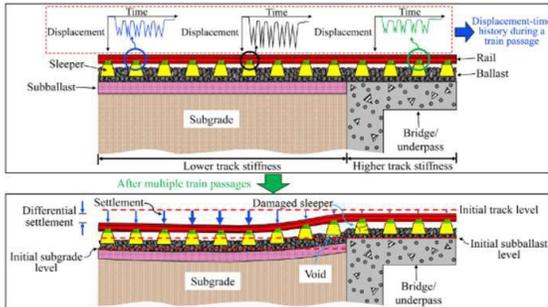


Figure 1. Transition zone between an open track and stiff structure such as a bridge or underpass, (Punetha & Nimbalkar, 2023)

Degraded ballast



Figure 2. Artificially introduced ballast damage under the left side of the concrete sleeper, (Lam et al., 2012)

Rail surface irregularities



Figure 3. Interaction between a rail surface irregularity and a hanging sleeper. The variations in the width of the shiny running band indicate rail surface irregularity, (Yang F. et al. 2021).

Improper or Lack of Maintenance

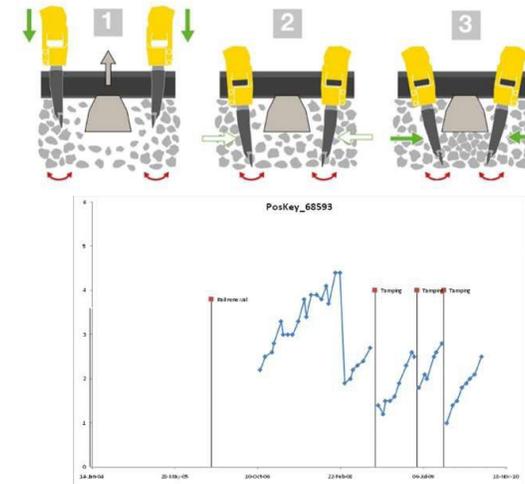


Figure 4. Tamping improvements of a single one eighth of a mile section of railway track in UK rail network, (Prescott, D. & Andrews, J., 2013).

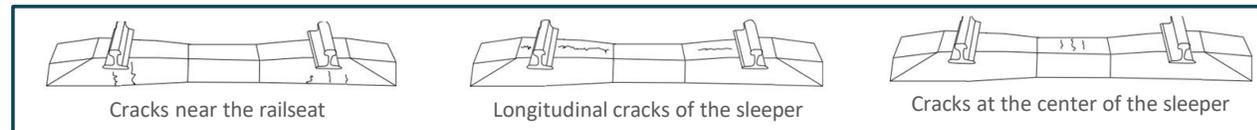


Figure 5. Cracks in the sleepers (You R. Et al. 2017)

Structural cracks and abrasion



Figure 6. Examples of damages: (a) Horizontal cracks, (b) rail seat positive crack, (c) center negative cracks on concrete ties with abraded bottom, (d) deteriorated rail seat surface, (Lam et al., 2012)

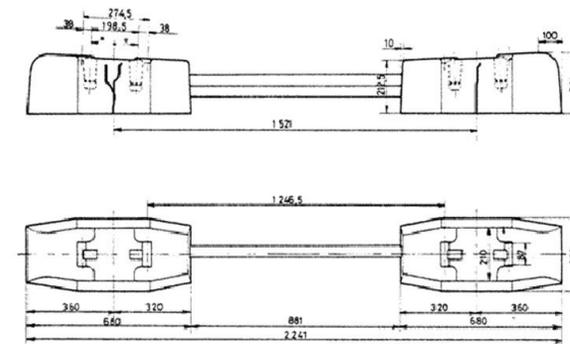


Figure 7. Twin-block Concrete Sleeper Vagneux Type U2/U3 Laid in the Greek Railway Network

Vagneux U2, U3, used in the Greek network, are similar to those used in the same period by the French Railways (SNCF).
The causes of extended cracking in concrete sleepers in Greece:
- Very stiff rail pads
- very compacted, polluted ballast bed.

Table 1. Crack appearance at the similar sleepers in two countries, (Giannakos 2004, 2008).

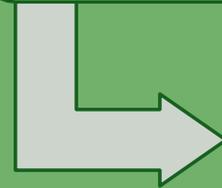
Twin-block sleepers' type	Country	Maximum operational speed	daily tonnage	Crack appearance
Vagneux U2, U3 with RN fastenings	Greece	120+140 km/hr (at 1980s)	≤10,000 t/day	yes
	France	≥160 km/hr now	50,000 t/day	no



Procedure

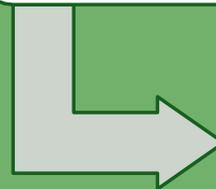
FEM model

- Model components definition
- Parameters/properties of the model
- Defining critical parameters leading to the failure or further maintenance actions (stresses/ deformations)
- Determination of tonnage/tonmile or number of cycle values at the critical state (determining the time when system fails)



Data analysis

- Processing of the statistical model data
- Comparing and combining of the results from physical model and statistical model

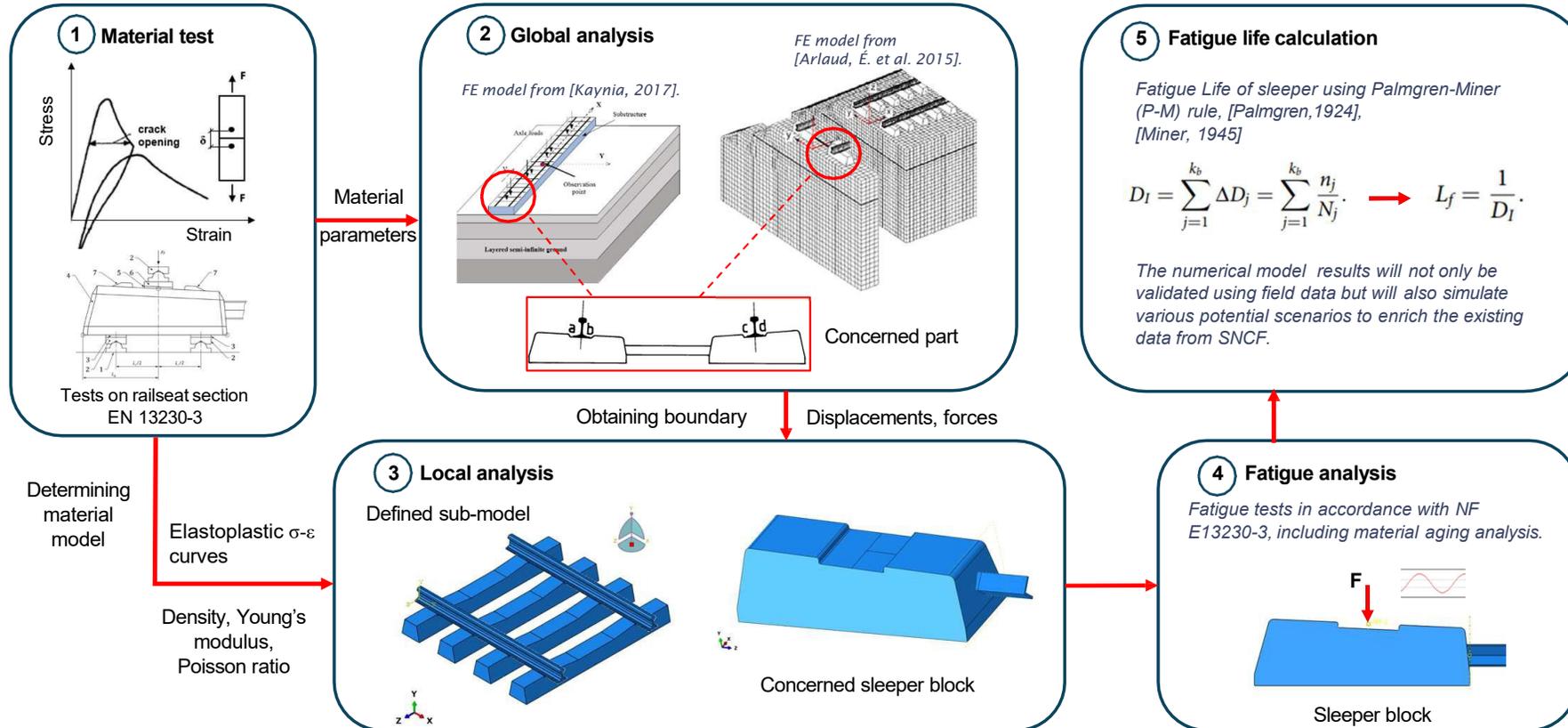


Machine learning

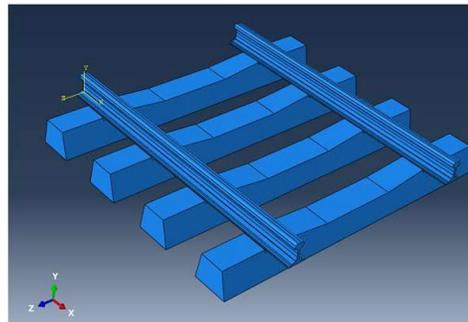
- Training the model using outputs from physical data
- Processing of the combined data



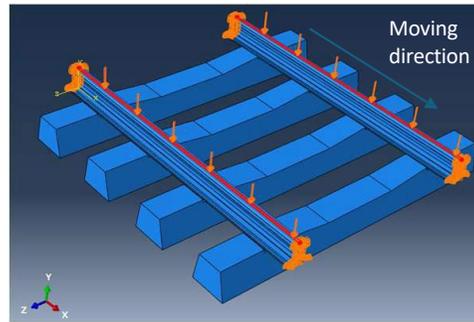
Global-Local analysis



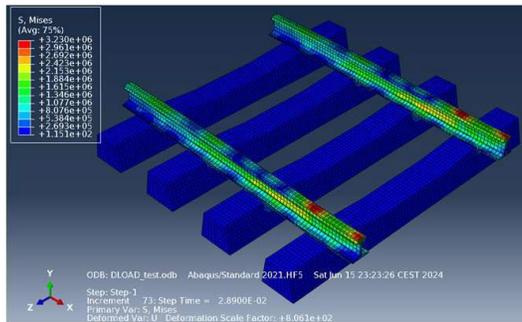
Sub-model



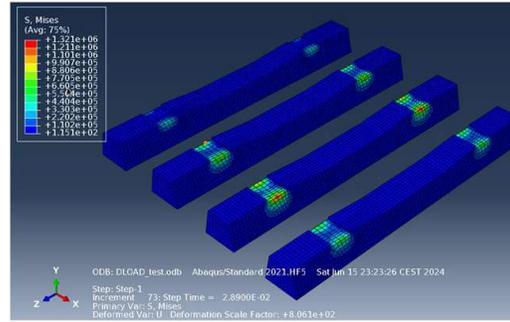
(a) Model geometry



(b) Load application



(c) Stress results of the rails



(d) Stress results of the sleepers

Figure 8. Simulation of track system

```

1  subroutine DLOAD(F,KSTEP,KINC,TIME,NOEL,NPT,LAYER,KSPT,
2  & COORDS,JLTYP,SNAME)
3
4  INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
5
6  DIMENSION TIME(2), COORDS(3)
7  CHARACTER*40 SNAME
8  X=COORDS(1)
9  Z=COORDS(2)
10 T=TIME(1)
11
12 ### USER PARAMETERS
13 one=1.d0
14 two=2.d0
15 wd=0.4d0
16 ws=03.d0
17 cd=0.015d0
18 lwd - distance between 1st-2nd wheel(m)
19 lws - wheel speed(m/s)
20 lcd - contact distance(m)
21 Wpressure=5e6 !pressure applied to contact surface(Pa)
22
23 !DEFINE APPLIED LOAD AREA
24 X1=(ws*T)-cd
25 X2=(ws*T)+cd
26 X3=(ws*T)-cd-wd !distance between wheel
27 X4=(ws*T)+cd-wd
28 l21=-0.05
29 l22=0.05
30
31 if (F .eq. 2.d0) then
32 !apply the loads within this section
33 if (X.GE.X1 .AND. X.LE.X2 .AND. Z.GE.Z1 .AND. Z.LE.Z2) THEN
34 F=Wpressure
35 ELSE if ( X.GE.X3 .AND. X.LE.X4 ) THEN
36 F=Wpressure
37 ELSE
38 F=0
39 endif
40
41 elseif (F .eq. 1.d0) then
42 !if (X.GE.X1 .AND. X.LE.X2 .AND. Z.GE.Z1 .AND. Z.LE.Z2) THEN
43 if (X.GE.X1 .AND. X.LE.X2) THEN
44 F=Wpressure
45 else
46 F=0
47 endif

```

Figure 19. DLOAD subroutine in ABAQUS



Damaged cases

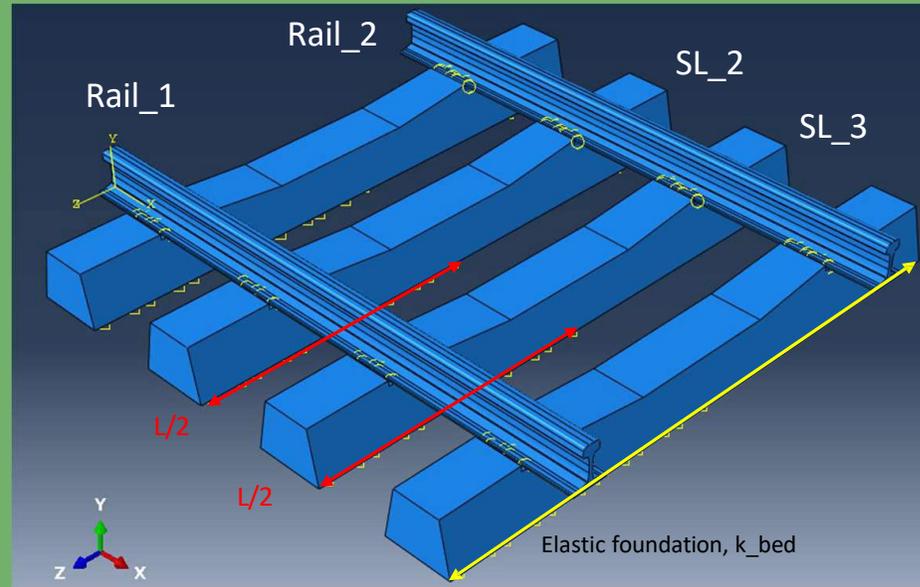


Figure 9. Configuration for damaged cases

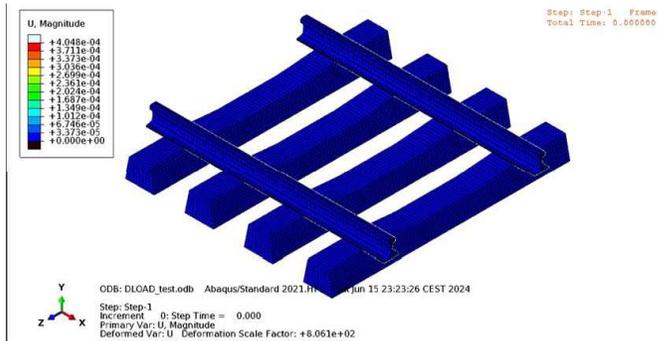
Case 0 - without any damaged;

Case 1 - free end with length of $L/2$ in sleeper SL_2, with 10% of k_{bed} ;

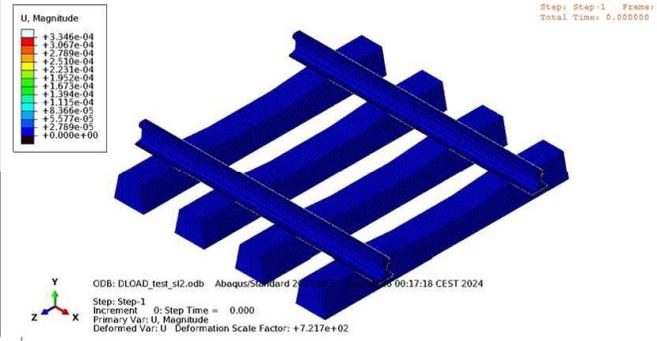
Case 2 - free end with length of $L/2$ in sleeper SL_3, with 10% of k_{bed} .

Sub-model - Comparisons

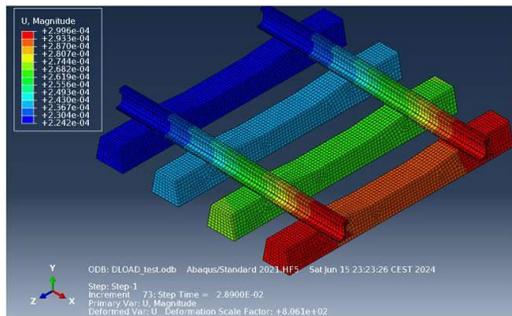
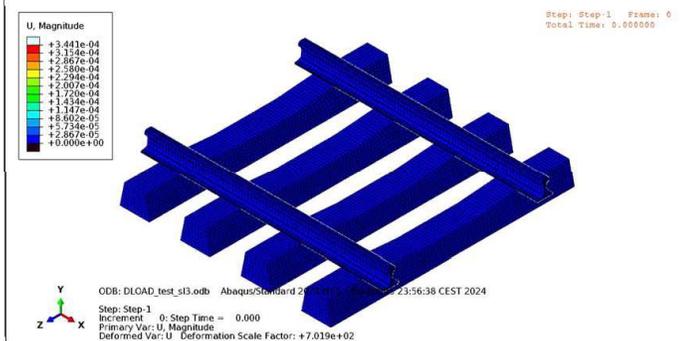
Case 0



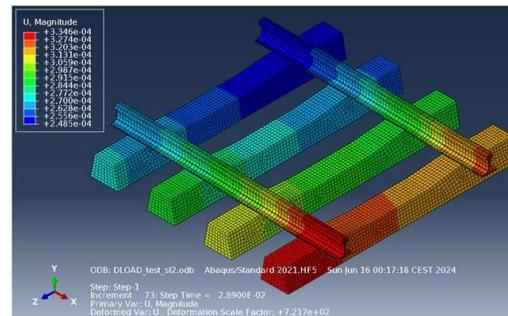
Case 1



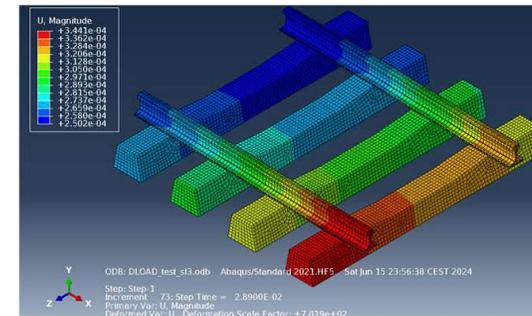
Case 2



U_max=0,0002996m



U_max=0,0003346m



U_max=0,0003441m



Ballast degradation

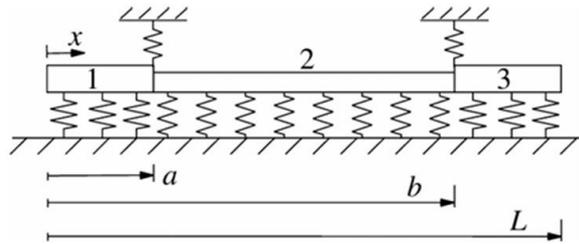
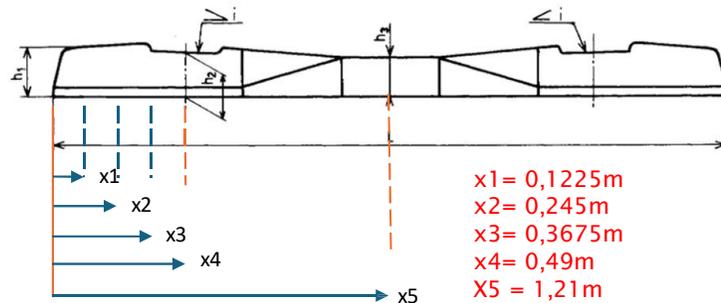


Figure 10. Three-part free-free sleeper supported by elastic foundation and connected elastically to rails. (Dahlberg, 2008)



Condition/fr eq	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5
Undamaged	51,569	106,390	256,550	428,990	592,220
Case 1	51,569	91,096	257,050	413,770	611,230
Difference,%	0,000	14,375	0,195	3,548	3,210
Case 2	51,568	90,255	256,500	401,790	648,200
Difference,%	0,002	15,166	0,019	6,340	9,453
Case 3	51,568	88,613	251,250	390,690	684,940
Difference,%	0,002	16,709	2,066	8,928	15,656
Case 4	51,567	84,672	206,640	366,460	475,840
Difference,%	0,004	20,414	19,454	14,576	19,651
Case 4 *	51,566	81,248	194,080	361,660	465,870
Difference,%	0,006	23,632	24,350	15,695	21,335
Case 5	51,570	90,391	204,860	471,260	632,600
Difference,%	0,002	15,038	20,148	9,853	6,818

Case 1 - free end with length of x_1 , with 10% of k_{bed} ;
 Case 2 - free end with length of x_2 , with 10% of k_{bed} ;
 Case 3 - free end with length of x_3 , with 10% of k_{bed} ;
 Case 4 - free end with length of x_4 , with 10% of k_{bed} ;
 Case 4* - free end with length of x_4 , without k_{bed} ;
 Case 5 - free end with length of x_5 , with 10% of k_{bed} .

Palmgren-Miner (P-M) rule

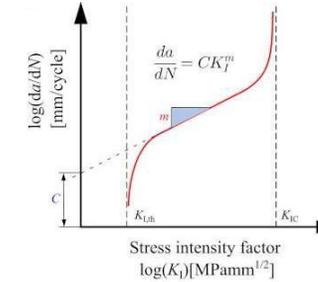
For stress time-histories with variable amplitudes due to actual traffic loads, the annual damage index (D), [Palmgren, 1924],[Miner, 1945]:

$$D_I = \sum_{j=1}^{k_b} \Delta D_j = \sum_{j=1}^{k_b} \frac{n_j}{N_j} \quad L_f = \frac{1}{D_I}$$

Paris' law

$$N_f = \frac{1}{C(\Delta\sigma\sqrt{\pi})^m} \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{a^{\frac{m}{2}} (Y_I(\alpha))^m}$$

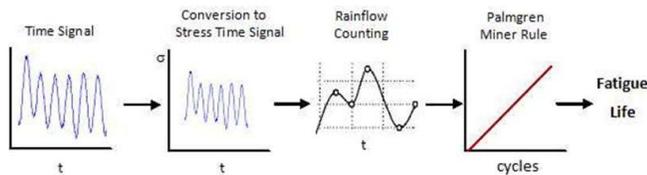
where a_0 is the initial crack length—usually notch length – and the a_c is the critical crack length at which brittle fracture occurs, [Miarka et al., 2022].



Fatigue model

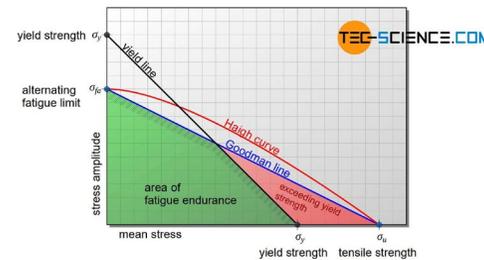
Rainflow counting algorithm

The fatigue impact of fluctuating loads, enabling the relative comparison of different load samples, [Lee, Pan, Hathaway, & Barkey, 2005].



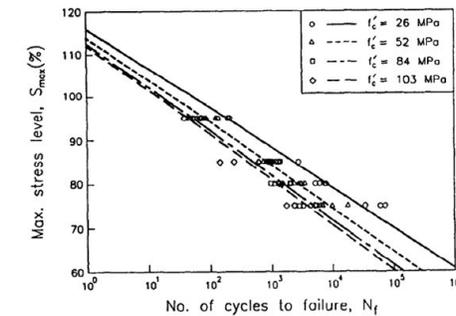
Goodman diagram

Below the fatigue limit curve are the permissible stress amplitudes for a given mean stress, [www.tec-science.com].

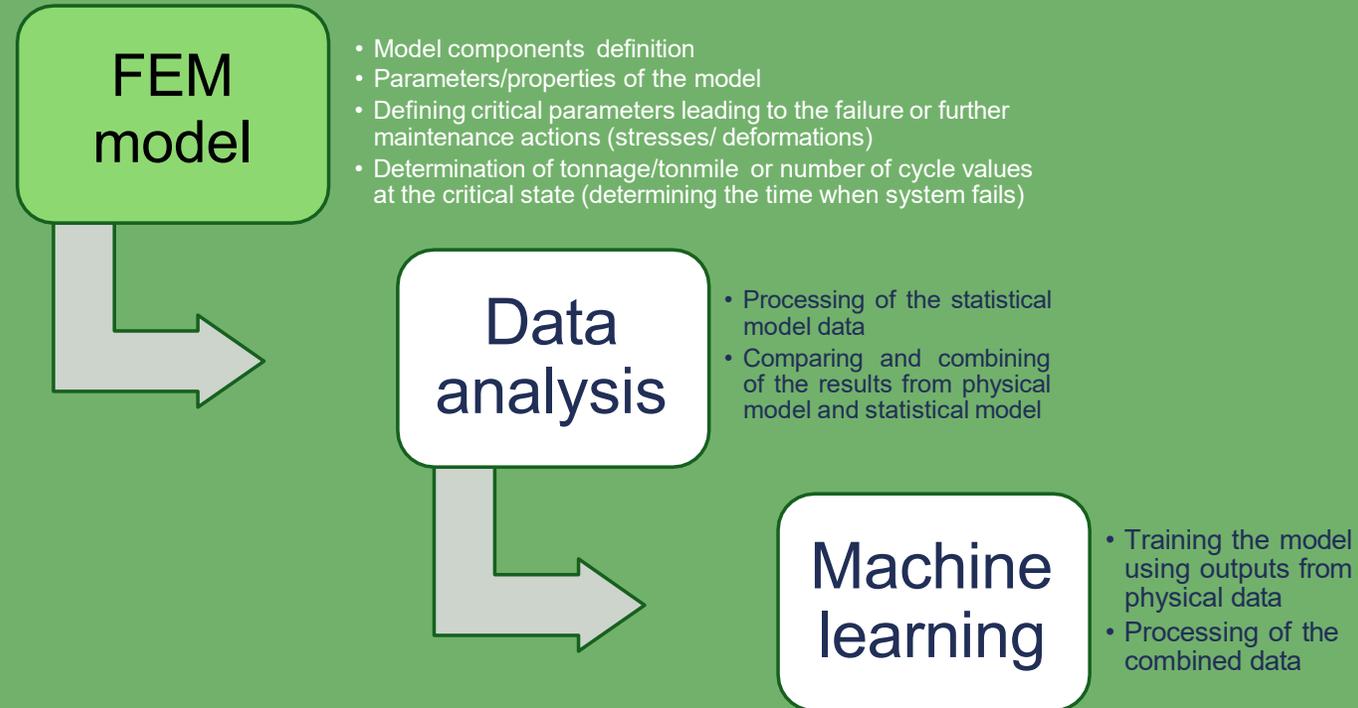


S-N curve

Test data with curves fitted, [Chen et al., 2012]



Future work



Thank you for your attention!



6

PRÉSENTATION 5

IMPACT DU RÉSEAU FERRÉ Français DANS LA MIGRATION DES ESPÈCES DANS
LE CADRE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE



IMPACT DU RÉSEAU FERRÉ FRANÇAIS DANS LA MIGRATION DES ESPÈCES DANS LE CADRE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Apprentissage machine multi-échelle pour les jumeaux numériques des ouvrages au réseau ferré

Impact des infrastructures de la SNCF dans la migration des espèces dans le cadre du changement climatique

Jean-Baptiste Page¹

¹Université Paris-Saclay, CentraleSupélec
LMPS - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay

06/06/2024

0 / 13

Sommaire

[Introduction et problématique](#)

[Données et algorithmes](#)

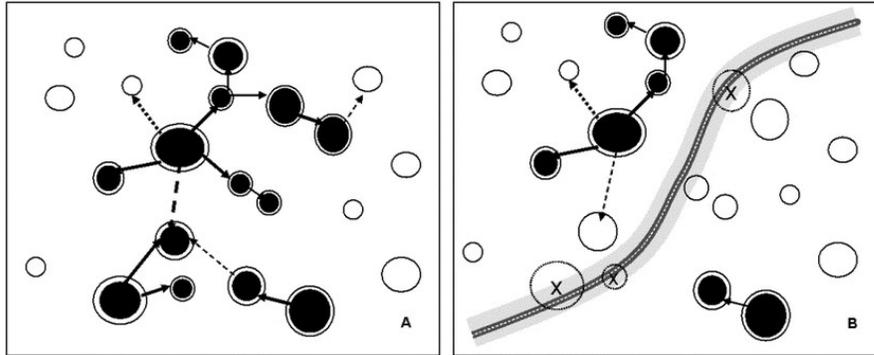
[Approche mathématique](#)

[Programme de travail](#)

[Annexe](#)

0 / 13

Infrastructures et biodiversité

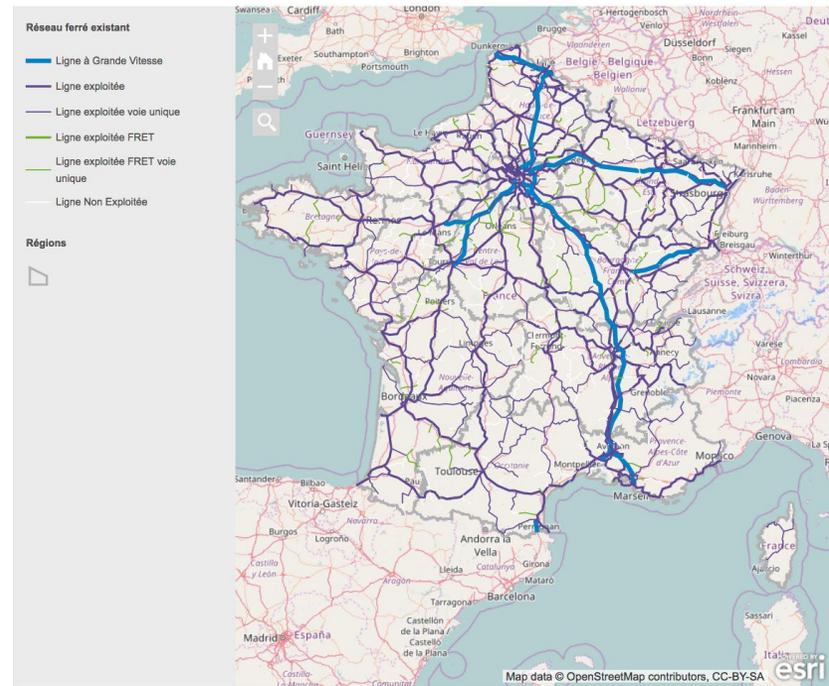


- ▶ Problématique de l'interaction entre les espèces et les infrastructures humaines
- ▶ Obstacles à la dispersion des individus, aux migrations, aux échanges génétiques entre les populations. Quid des opportunités qu'elles apportent ?
- ▶ Problème exacerbé pour des infrastructures linéaires
- ▶ Non seulement dissuasion mais aussi mortalité

Contexte du changement climatique : risque d'extinction pour des espèces incapables de migrer vers leur nouvelles niches (H. Berestycki et al, Influence of a road on a population in an ecological niche facing climate change, 2019).

Le réseau ferré français

CARTE INTERACTIVE DU RÉSEAU FERRÉ FRANÇAIS



Réseau ferré français :
50km/1000km² (Allemagne :
108, Espagne : 31, Italie : 56)

11 parcs nationaux (25%
surface du territoire), 7269
espèces menacées

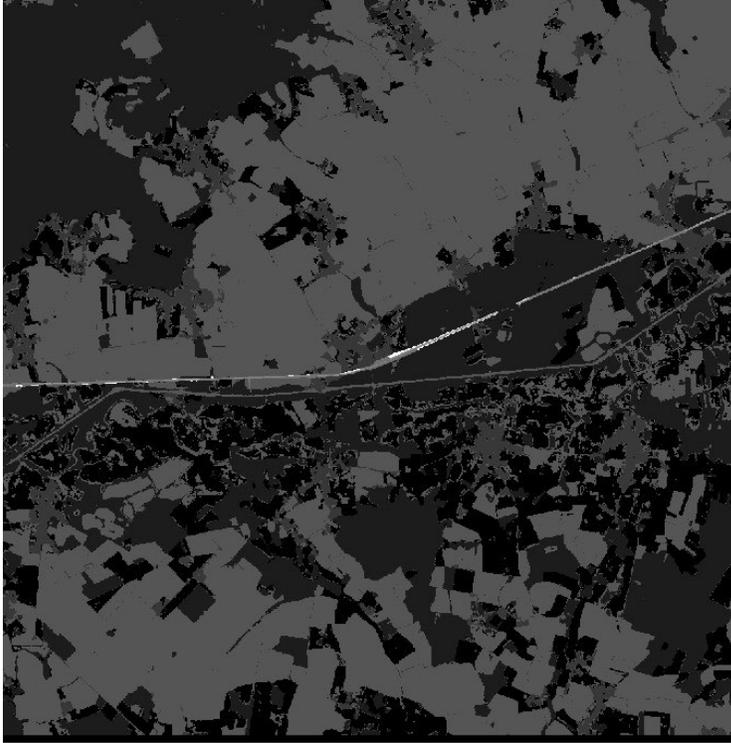
Importantes migrations à venir
au sein du territoire

La France est l'un des premiers
pays concernés

La question des données

- ▶ Besoin pour la suite de passer par un algorithme de simulation des mouvements de population pour générer des échantillons d'entraînement pour notre modèle
- ▶ Besoin de beaucoup de données pour établir un modèle robuste
- ▶ Manque de relevés aux abords des voies, tant pour la présence d'espèces que de leur comportement en approche
- ▶ En physique/ingénierie : génération de données par des outils de simulation, éventuellement complétés par de l'apprentissage quand le coût de calcul devient important

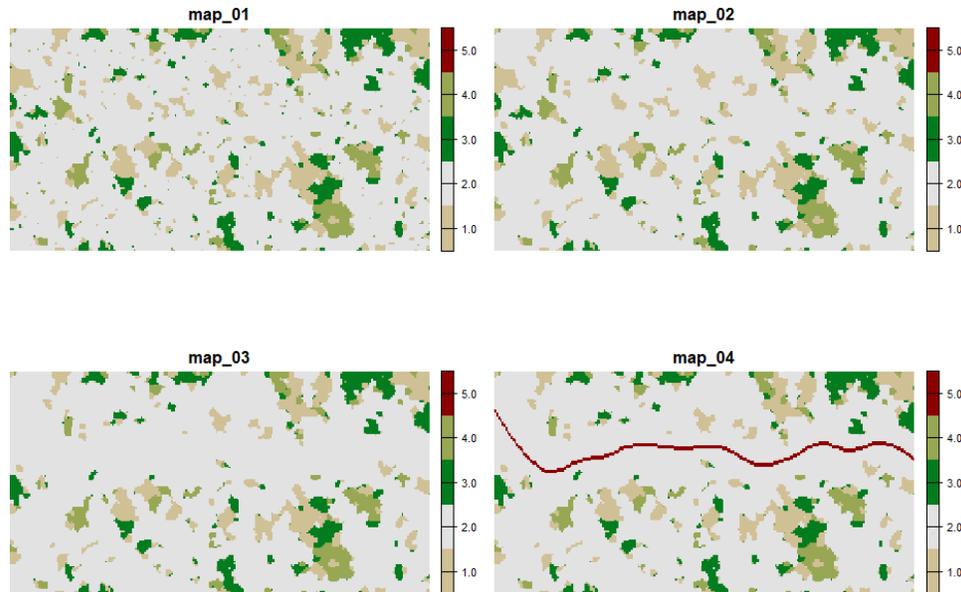
Données cartographiques



- ▶ Cartes Theia de l'occupation des sols en France métropolitaine
- ▶ 24 catégories disponibles hiérarchisées : cultures annuelles/pérennes, ligneux/non ligneux, surfaces imperméables
- ▶ Données libre de droits, réseau Sentinel-2A/B
- ▶ Résolution : 10m
- ▶ Cartes réseau ferré sous format .shp

Rangeshifter

Présentation générale



Algorithme de modélisation des populations par une approche individuelle

Ecologie du mouvement, reproduction et génétique

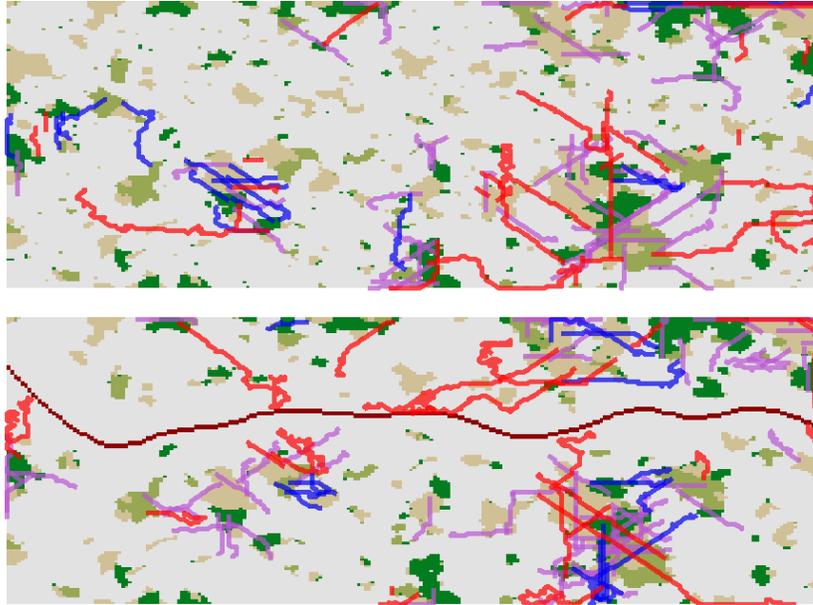
Dimensions spatiale et temporelle discrètes

Aspect reproductif avec des populations par stades (juvéniles, jeunes adultes, adultes) avec taux de survie et reproduction.

Cartes rasters avec des cellules caractérisées par leur indice de sustentation K ainsi que leur résistance relative au mouvement (surface resistance value)

Rangeshifter

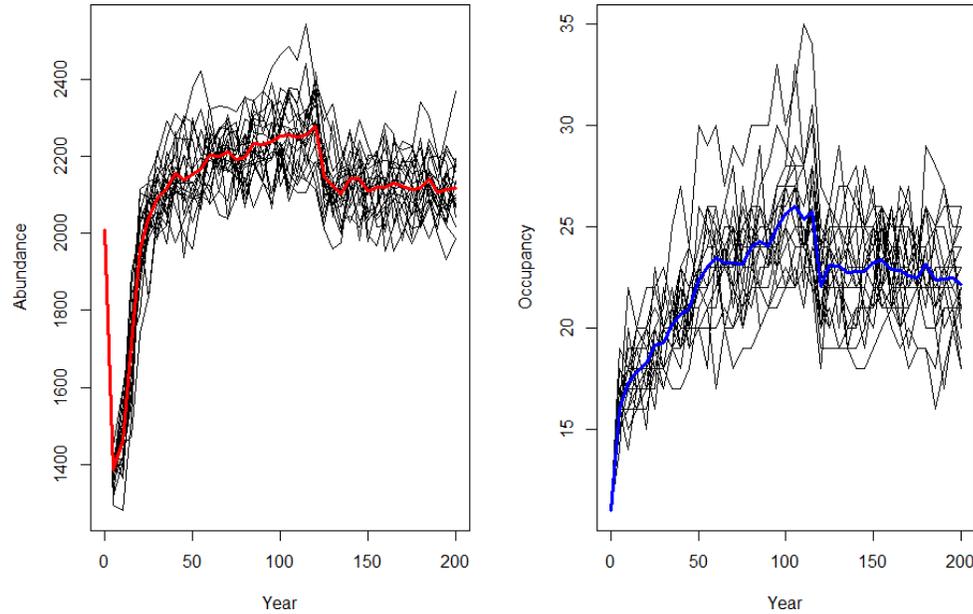
Modèle de dispersion



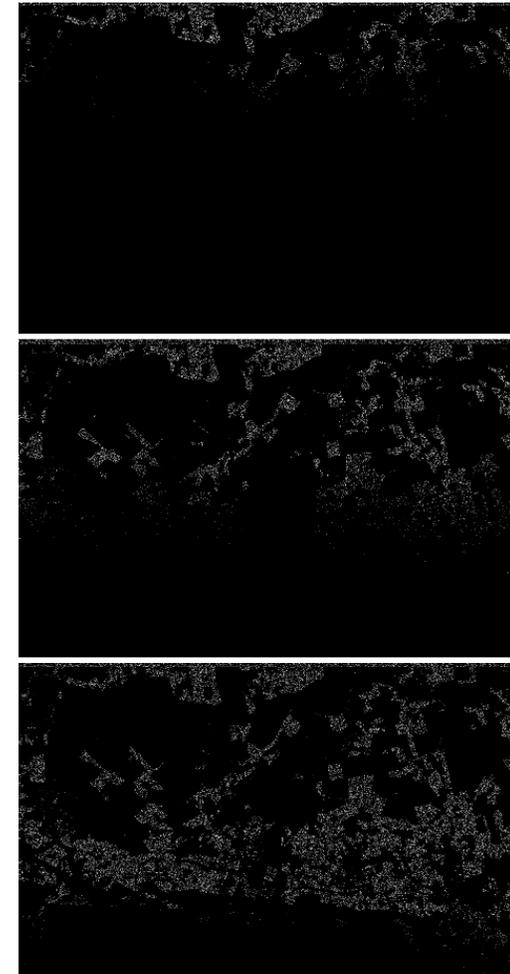
- ▶ Deux modèles de dispersion dans RangeShifter :
distribution statistique ou mouvement stochastique
- ▶ Distribution statistique :
(double) exponentielle négative
- ▶ Mouvement stochastique :
tirage aléatoire entre les 4/8 cellules voisines selon leur propriété de perméabilité au mouvement
- ▶ Biais donné à la direction : plus probable de continuer dans la direction de la trajectoire que de faire un 90° voire un 180° .
- ▶ Décision
d'émigration/installation :
dépendance en K et population

Rangeshifter

Modèle de dispersion



(a) Références : 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

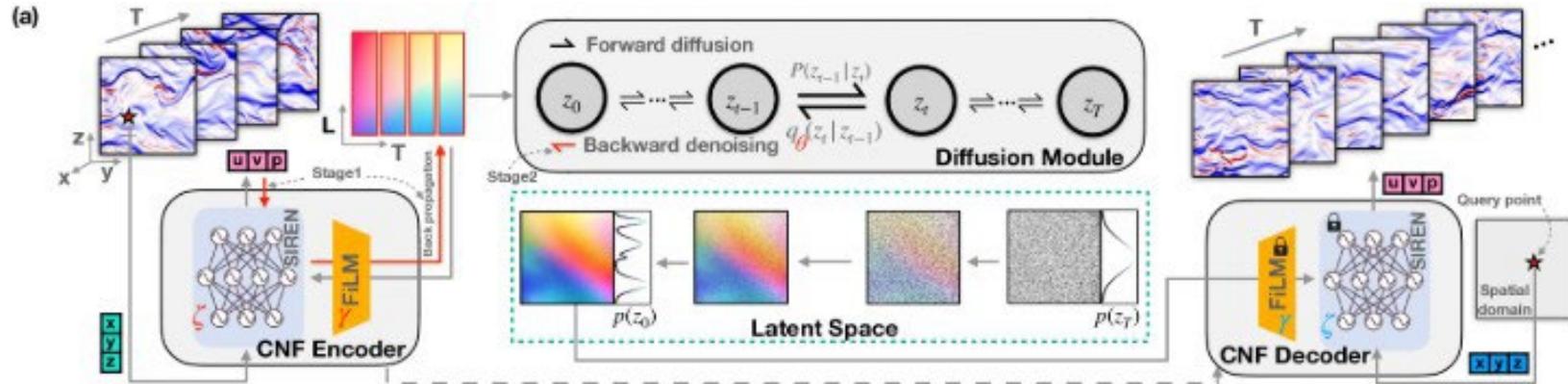
Problématique et avancement du travail

- ▶ Le modèle de Rangeshifter fournit un modèle de simulation de la dispersion à grande échelle.
- ▶ Modéliser des déplacements sur des centaines de kilomètres avec un obstacle dont la largeur est de l'ordre de 10m \Rightarrow problèmes d'échelle dans la modélisation et échelle de 20-40 ans pour les simulations
- ▶ Estimation des coûts de déplacement pour chaque type d'occupation du sol et selon les espèces
- ▶ 100000 simulations sur au moins 100km et 10 ans pour un modèle robuste
- ▶ Mode batch : version de l'algorithme sur cluster informatique
- ▶ Techniques d'optimisation : parallélisation, lectures et formats de fichiers

Perspectives

- ▶ Surrogate model : modèle mathématique simplifié qui permet d'améliorer les performance au prix de la précision
- ▶ Deep learning et algorithmes génératifs (réseaux de diffusion)
- ▶ Processus de bruitage : $p(z_t|z_{t-1}) = N(\sqrt{1 - \beta_t}z_{t-1}, \beta_t I)$, établi
- ▶ Processus de débruitage : $q_\theta(z_{t-1}|z_t) = N(\mu_\theta(z_t, t), \sigma_\theta((z_t, t))I)$, à entraîner
- ▶ On peut écrire :
$$\begin{aligned}dX_t &= A(X_t, Z_t) \\dZ_t &= dW, \text{ avec } dW \text{ un mouvement brownien}\end{aligned}$$
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
- ▶ L'intégrale d'Ito n'est pas résoluble analytiquement, on souhaite que le réseau l'approxime
- ▶ On utilise les cartes de positionnement des individus pour entraîner le réseau

Diffusion Neural Networks



Conditional Neural Field Latent Diffusion Model Generating Spatiotemporal Turbulence,
Pan Du, Meet Hemant Parikh et al, March 2024

Merci de votre attention

- ▶ Coût effectif d'une cellule : $C'_{k,l} = C_{k,l} + \sum_{(m,n) \in V(k,l) \setminus V(i,j)} C_{m,n}$
- ▶ Probabilité de tirage cellule : $P(i, j) = E \frac{\frac{1}{C'_{i,j}}}{\sum_{i',j'} \frac{1}{C'_{i',j'}}}$
- ▶ $dX_t = A(X_t, Z)$ avec $Z \sim N(0, 1)$ 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 : $dX_t = A(X_t, Z_t)$
 $dZ_t = dW$, avec dW un mouvement brownien
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

Modélisation

Annexe :Modèle de dispersion stochastique diffusif

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

- ▶ 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

7

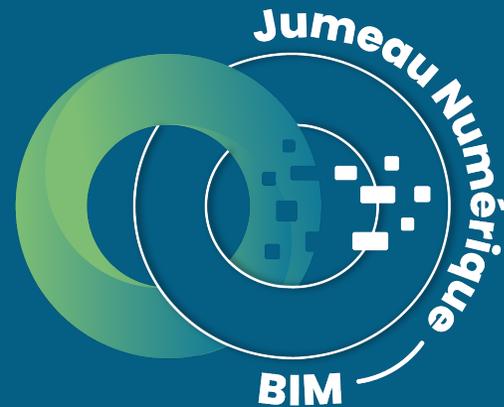
PRÉSENTATION 6

INSTANCIATION D'UN MODÈLE D'ARCHITECTURE DE JUMEAU
NUMÉRIQUE DANS LE CAS D'UNE INFRASTRUCTURE FERROVIAIRE
EXISTANTE



INSTANCIATION D'UN MODÈLE D'ARCHITECTURE DE JUMENTU NUMÉRIQUE DANS LE CAS D'UNE INFRASTRUCTURE FERROVIAIRE EXISTANCE

Cette thèse se concentre sur la mise en œuvre d'une architecture de Jumeau Numérique susceptible de répondre à une série de cas d'usages définis en collaboration avec le gestionnaire d'infrastructure ferroviaire. Elle étudie, en particulier, les travaux relatifs à la préparation, au traitement et à l'exploitation des données caractérisant l'actif virtuel. En application, le processus à l'étude consiste à développer une approche efficace pour filtrer, consolider et traiter le modèle d'information mis à disposition par le gestionnaire, et donc l'intégrer dans une architecture de Jumeau Numérique.



MINERVE

avec la filière ferroviaire

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

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

"Libérer le potentiel ferroviaire : transformer la réalité grâce à l'innovation du jumeau numérique dans les infrastructures existantes - surmonter les défis, adopter le changement et aller de l'avant avec l'adaptabilité."

Hibat Allah BABTY

Doctorante en 2ème année

Date de début Le 15/11/2023

UTC

Benoît EYNARD

Matthieu BRICOGNE

IREX

Philippe GOTTELAND

SYSTRA

Etienne PANSART

Plan

1 Contexte de la thèse

3 Projections

2 État de l'art

4 Livrables



Plan

1

Contexte de la thèse

Challenges face au ferroviaire

- Contexte général
- Problèmes, causes et conséquences

Question de recherche et focus

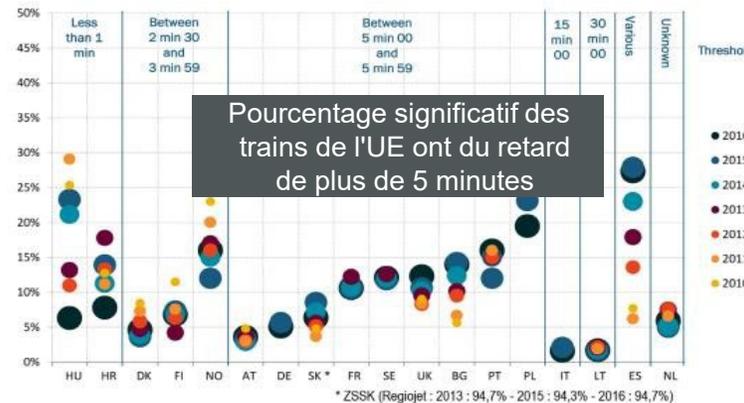
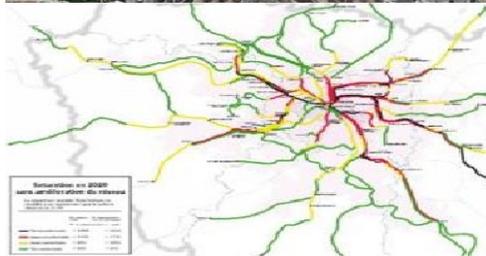


Contexte de la thèse

Challenges face au ferroviaire-Contexte général



31 Entreprises ferroviaires par pays de l'UE en moyenne
7,7% sur le rail, transports de passagers terrestres dans l'UE



Saturation des infrastructures
Besoin croissant pour le transport de passagers et de fret

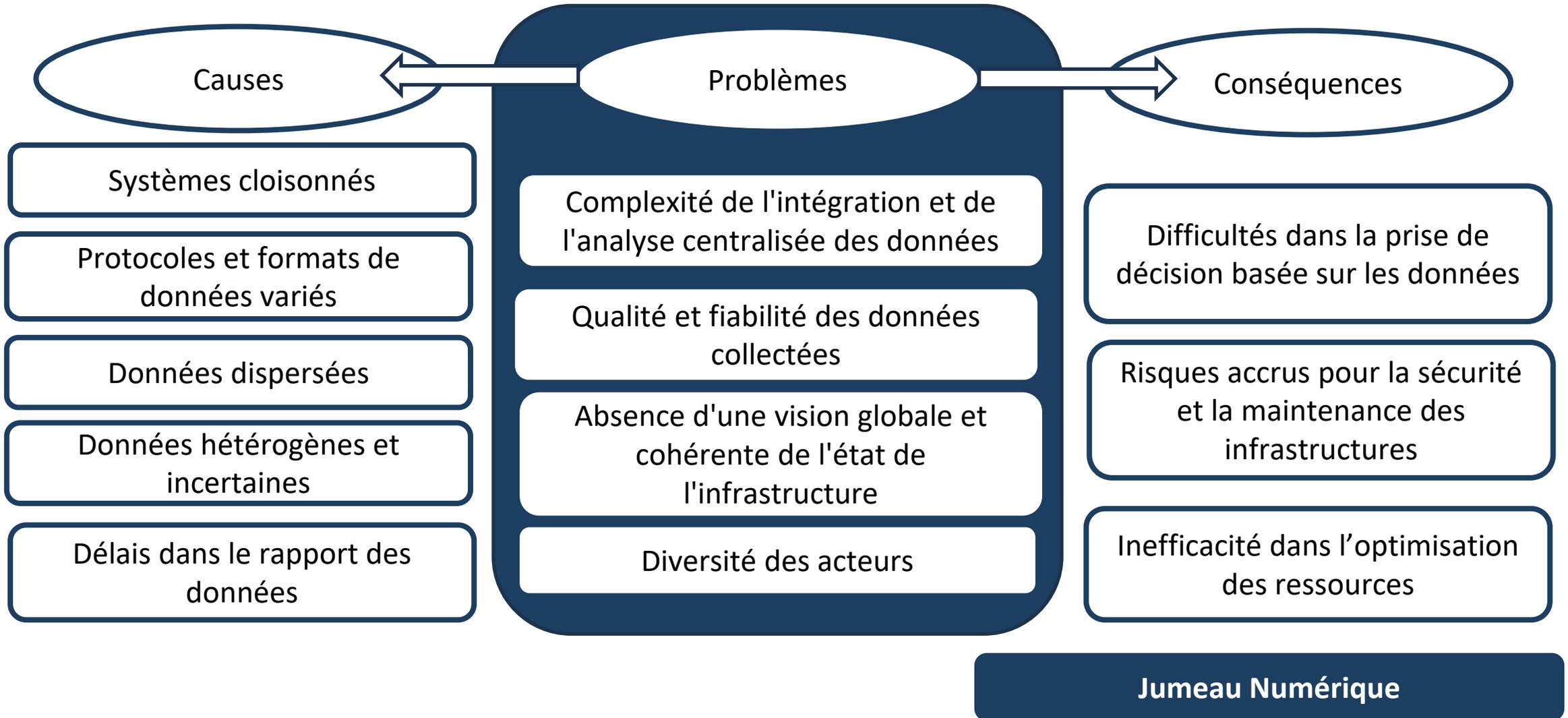
Le rail est le mode de transport de masse le plus durable
... pour combien de temps ?

Concurrence entre les nouveaux modes de transport et davantage d'entreprises ferroviaires
Attractivité du rail ?

- Améliorer la robustesse et l'attractivité du ferroviaire
-
- Connaissance des problèmes et des causes

Contexte de la thèse

Challenges face au ferroviaire-problèmes, causes et conséquences



Contexte de la thèse

Question de recherche et focus

Comment concevoir et implémenter une architecture de jumeau numérique pour les infrastructures ferroviaires existantes qui intègre efficacement les différentes sources de données, surmonte les défis d'interopérabilité et de standardisation, assure la qualité et la fiabilité des données hétérogènes y compris celles collectées sur le terrain, et garantit une communication bidirectionnelle fiable entre le jumeau numérique et les systèmes physiques ?

Connexion lecture « Intégration des Systèmes et Données » :

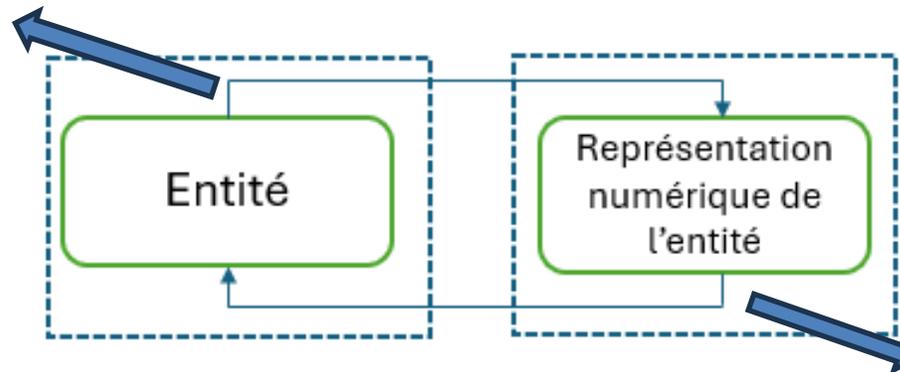
Comment intégrer efficacement les différentes données et schémas de données dans cette architecture ?

Quels défis d'interopérabilité et de standardisation doivent être surmontés ?

Quelle est la fréquence de mise à jour des données ? La fiabilité des données ?

Évaluation et Validation :

Quels sont les indicateurs de performance et les cas d'usage pertinents pour évaluer l'efficacité d'une instance d'architecture



Connexion écriture « Connexion Feedback » :

Quels mécanismes pour assurer une communication bidirectionnelle fiable entre le jumeau numérique et l'entité physique ? Feedback ?

Plan

2

État de l'art

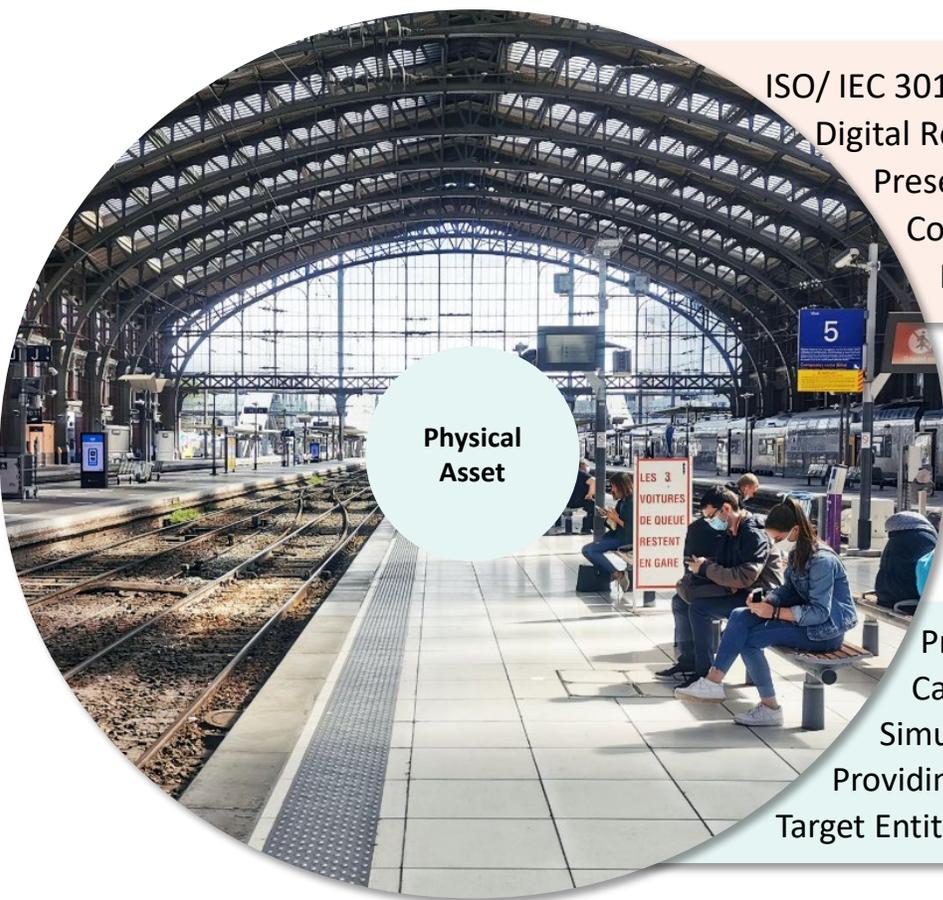
Le Jumeau Numérique comme solution

- Définition
- Terminologie
- Maturité du ferroviaire
- Position du ferroviaire par rapports aux industries



État de l'art

Le Jumeau Numérique comme solution, Définition



Physical Asset

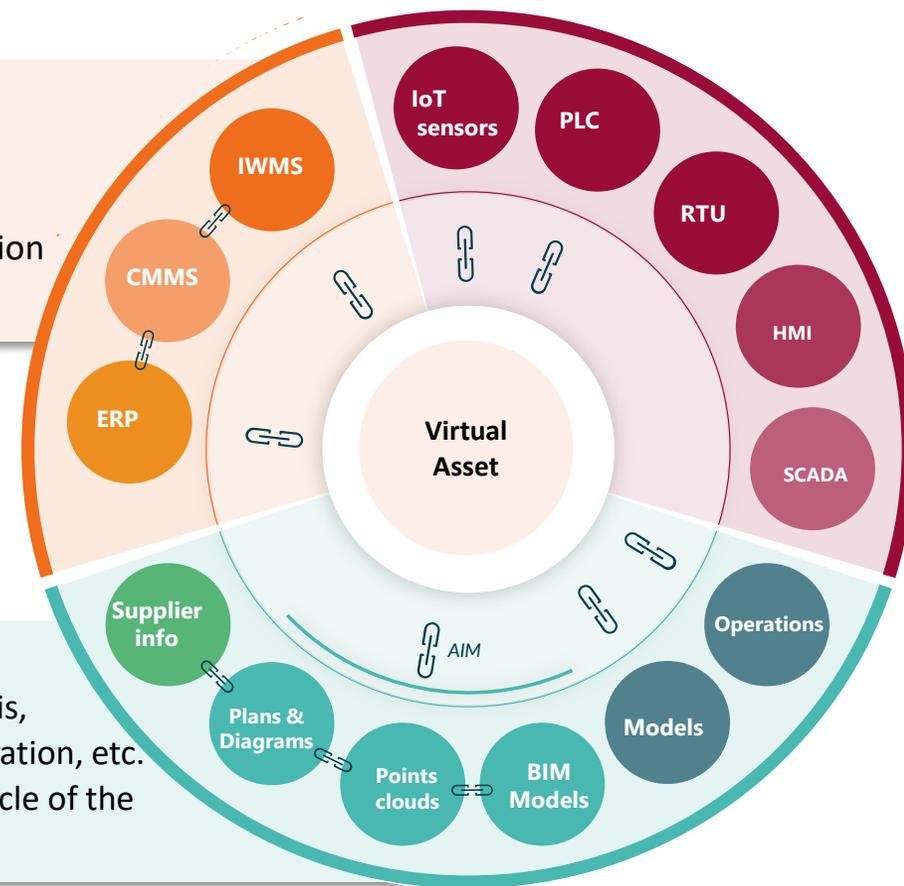
ISO/ IEC 30173:2023 "DTw"

Digital Representation of a Target Entity

Presence of Data Connections

Convergence at an Appropriate Synchronization Rate

Provision of Some or All of the Following Capabilities: "Connection, Integration, Analysis, Simulation, Visualization, Optimization, Collaboration, etc. Providing an Integrated View Throughout the Lifecycle of the Target Entity



Progression des travaux de thèse

Le Jumeau Numérique comme solution, Terminologie

Soit S l'espace des termes associés au jumeau numérique dans un domaine d'ingénierie et de recherche. Parmi ces termes, nous considérons le modèle numérique M, l'ombre numérique O, le jumeau virtuel V, le jumeau hybride H, le prototype de jumeau numérique P, l'instance de jumeau numérique I, l'agrégat de jumeau numérique A et l'environnement de jumeau numérique E.

Relations entre les termes:

$S = \{M, O, J, V, H, P, I, A, E\}$

Modèle numérique : M

Ombre numérique : $O = M + F1(t)$ où $F(t)$ est une fonction représentant le flux de données automatique variant dans le temps.

Jumeau numérique : $J = O + F2(t)$

Jumeau virtuel : V

Jumeau hybride : $H = J + V$

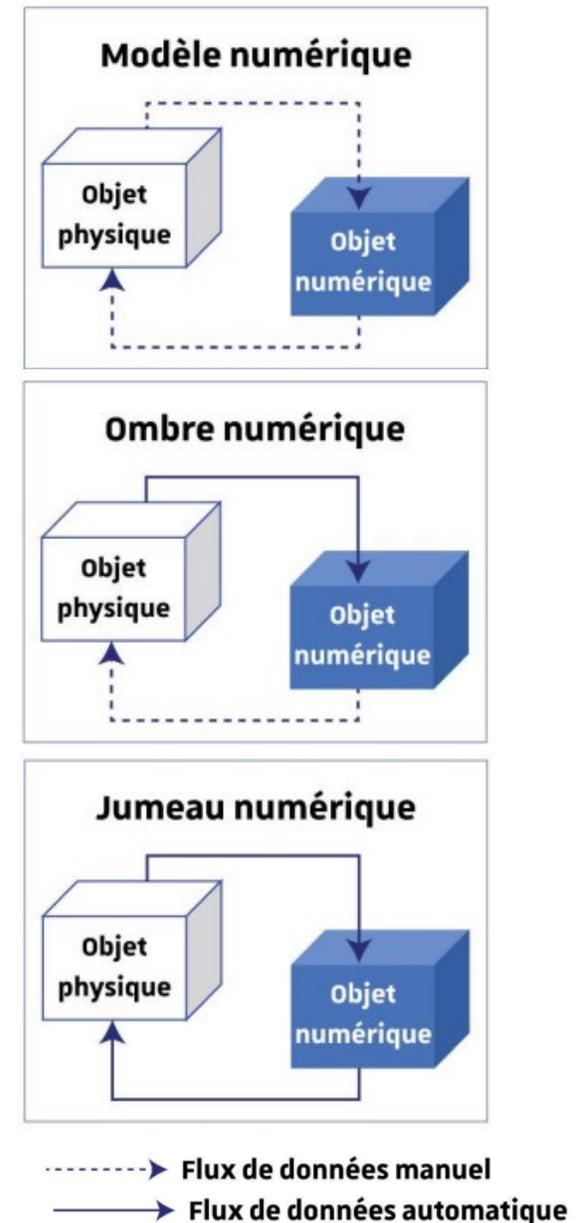
Prototype de jumeau numérique : $P = V$

Instance de jumeau numérique : $I = O$

Agrégat de jumeau numérique : $A = \sum_{i=1}^n I_i$ où I_i représente chaque instance de jumeau numérique agrégée.

Environnement de jumeau numérique : E

Grievess, Kritinzger, Chinesta



État de l'art

Le Jumeau Numérique comme solution, Maturité du ferroviaire

Draft of ISO 30186

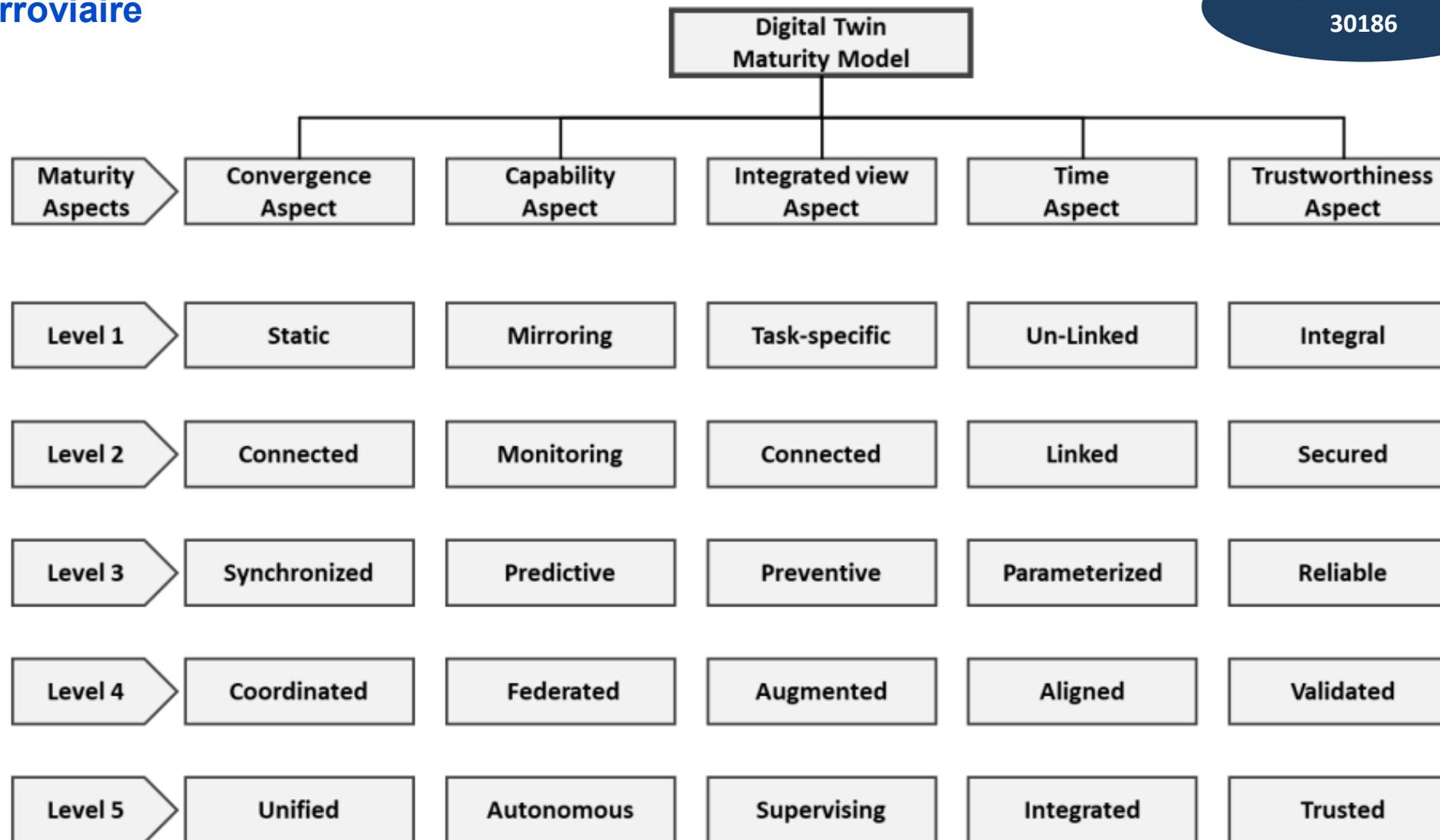


Fig : Digital twin – Maturity model and guidance for a maturity assessment ISO/IEC 30186 ED1

État de l'art

Le Jumeau Numérique comme solution, Maturité du ferroviaire

Draft of ISO 30186



Position du ferroviaire

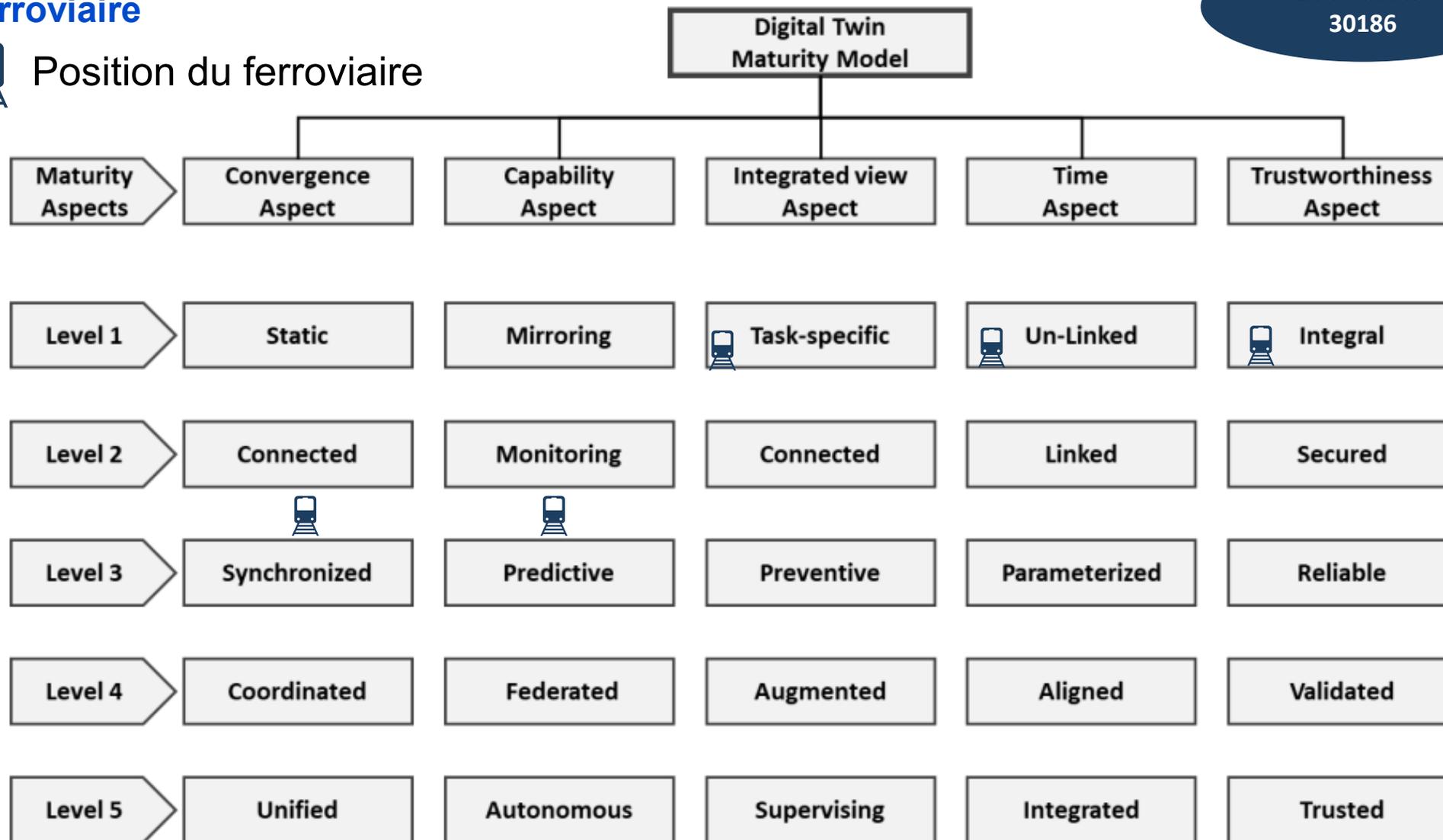
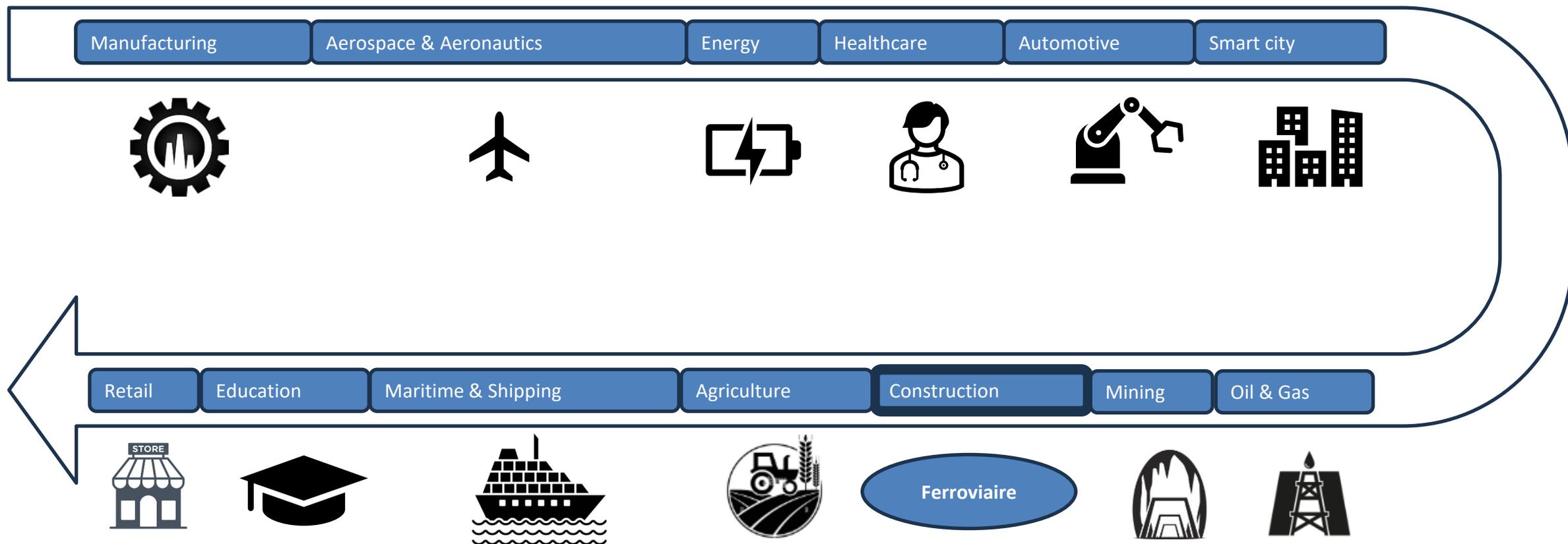


Fig : Digital twin – Maturity model and guidance for a maturity assessment ISO/IEC 30186 ED1

État de l'art

Le Jumeau Numérique comme solution, Position du ferroviaire



Plan

2

État de l'art

Le Jumeau Numérique comme solution

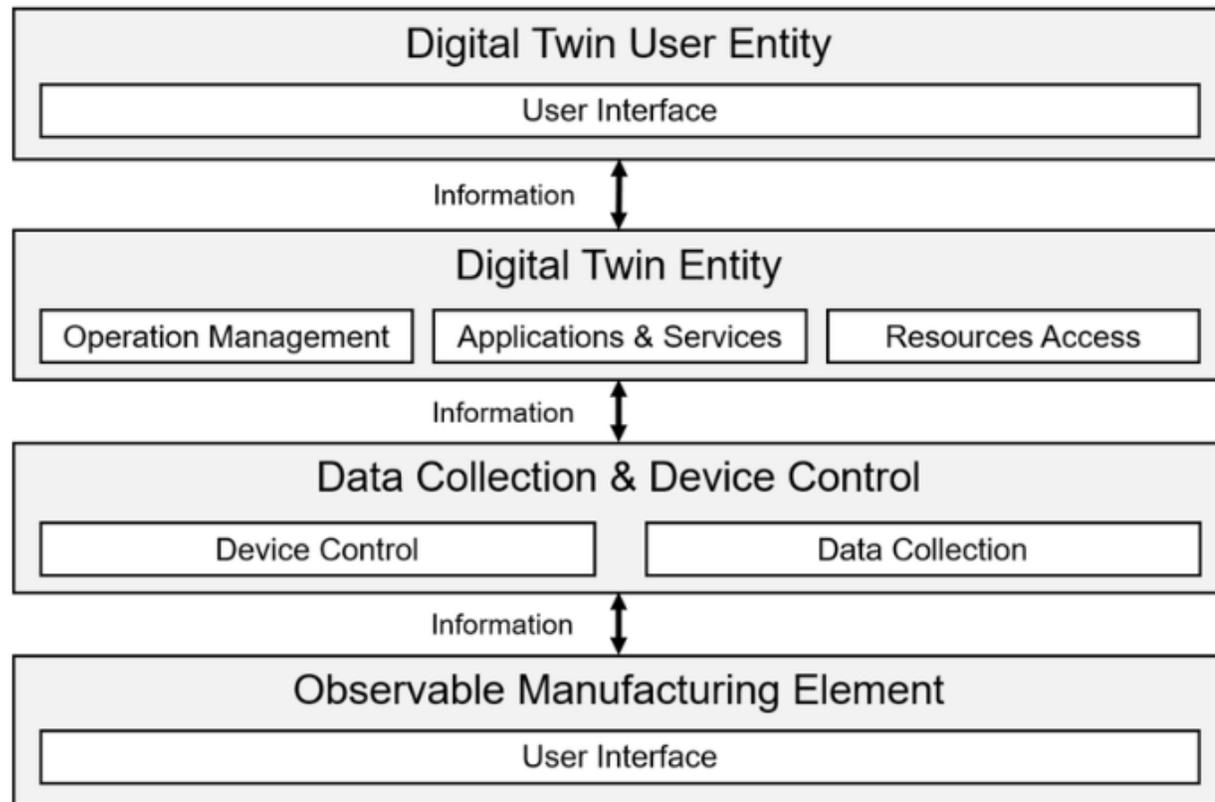
- Architecture

Résumé et commentaires

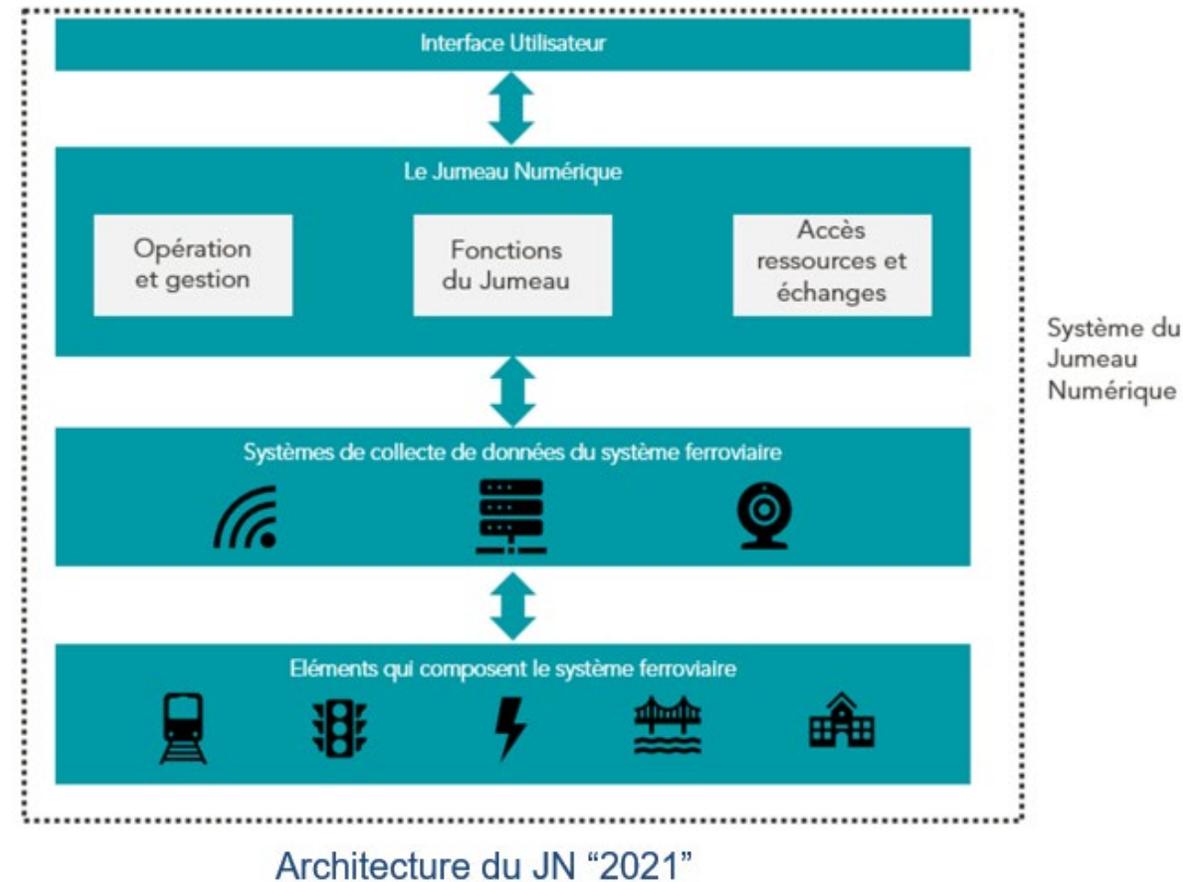


État de l'art

Le Jumeau Numérique comme solution, Architecture



[ISO. 2020. "ISO \(DIS\) 23247-2: Automation Systems and Integration - Digital Twin Framework for Manufacturing - Part 2: Reference Architecture". ISO/TC 184/SC4/WG15.](#)

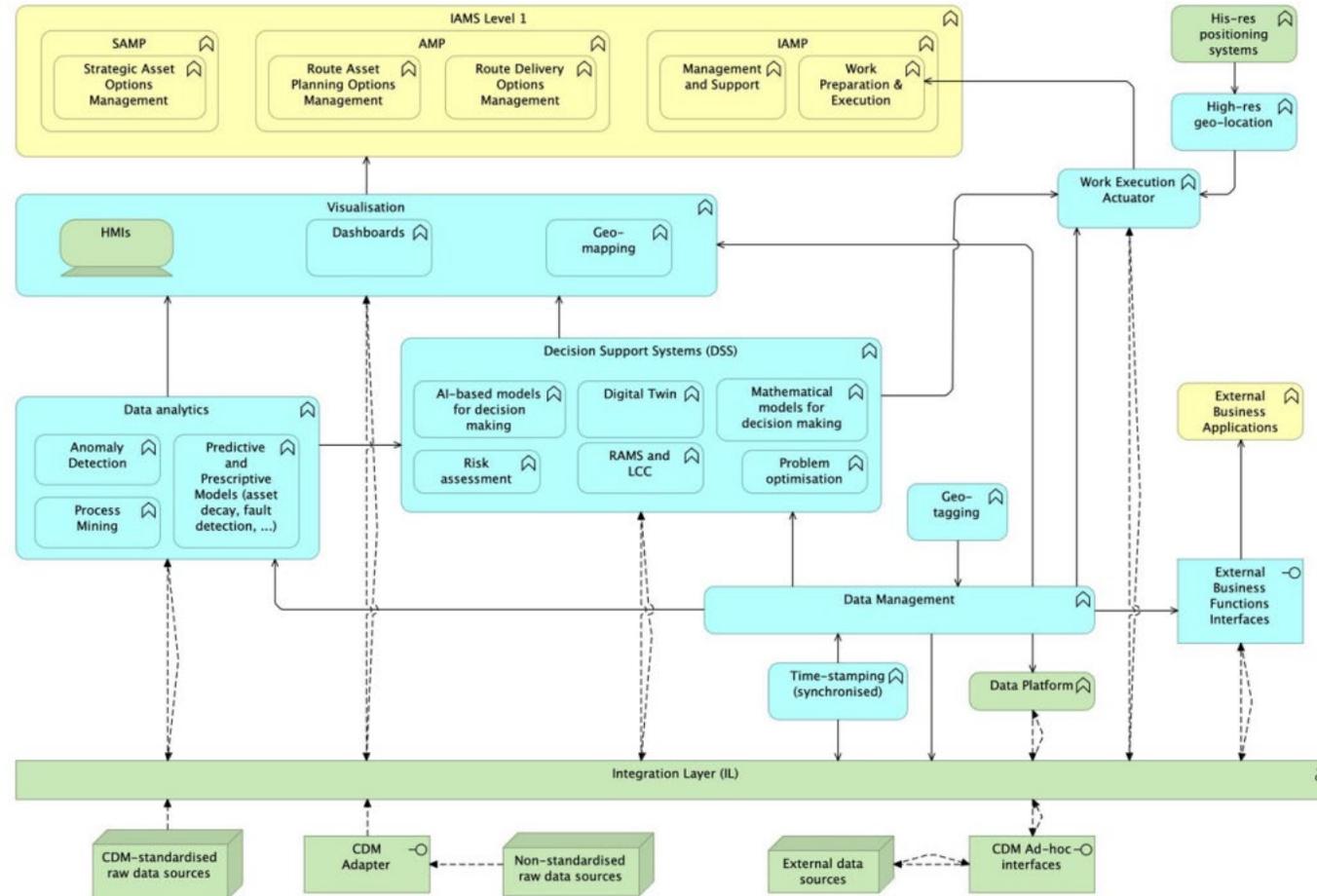


État de l'art

Le Jumeau Numérique comme solution, Architecture

Intelligent Innovative Smart Maintenance of Assets by integRated Technologies (2019-2023)

ArchiMate
"OpenGroup"

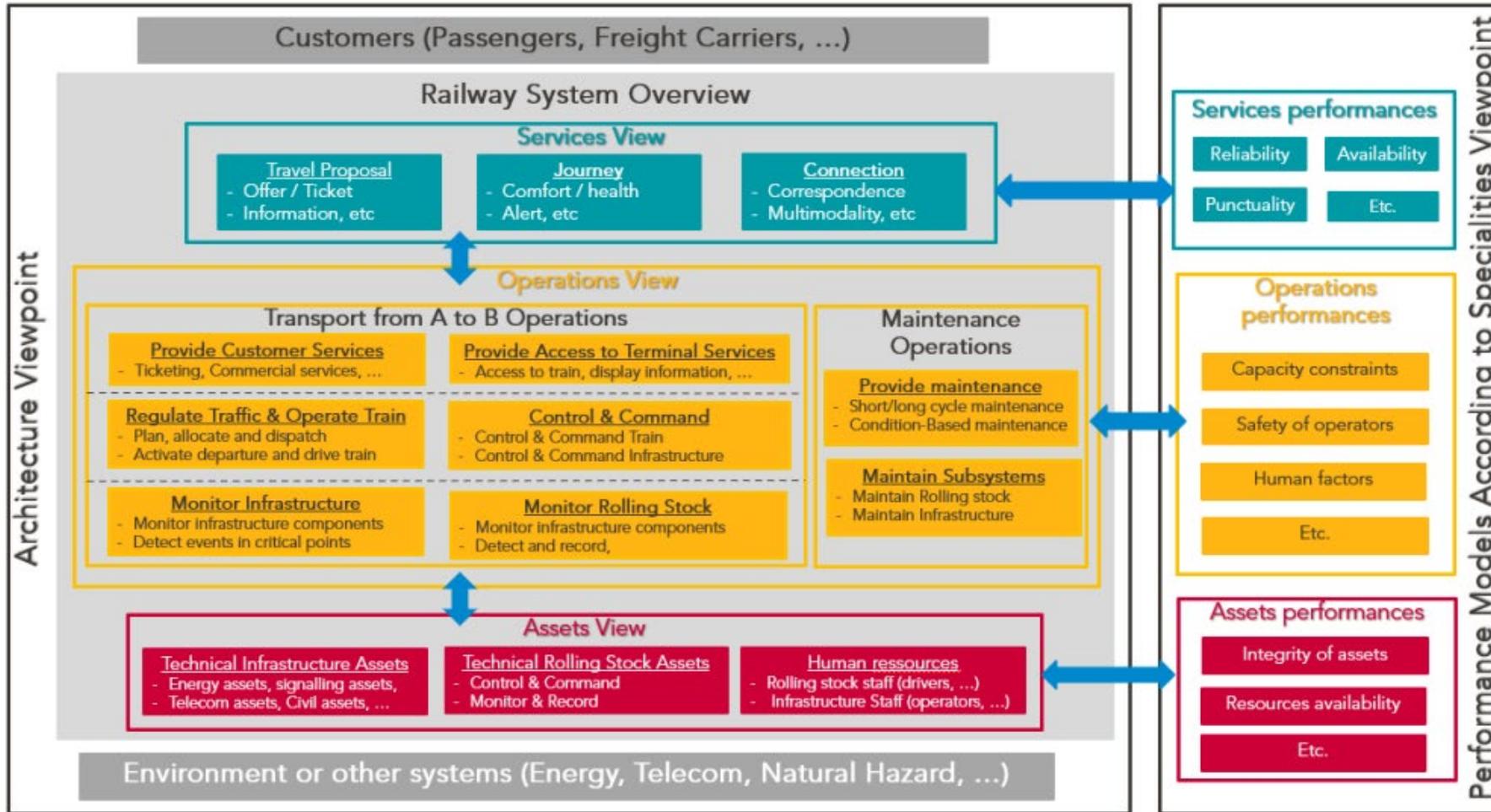


Intelligent Innovative Smart Maintenance of Assets by integRated Technologies (2019-2023)

État de l'art

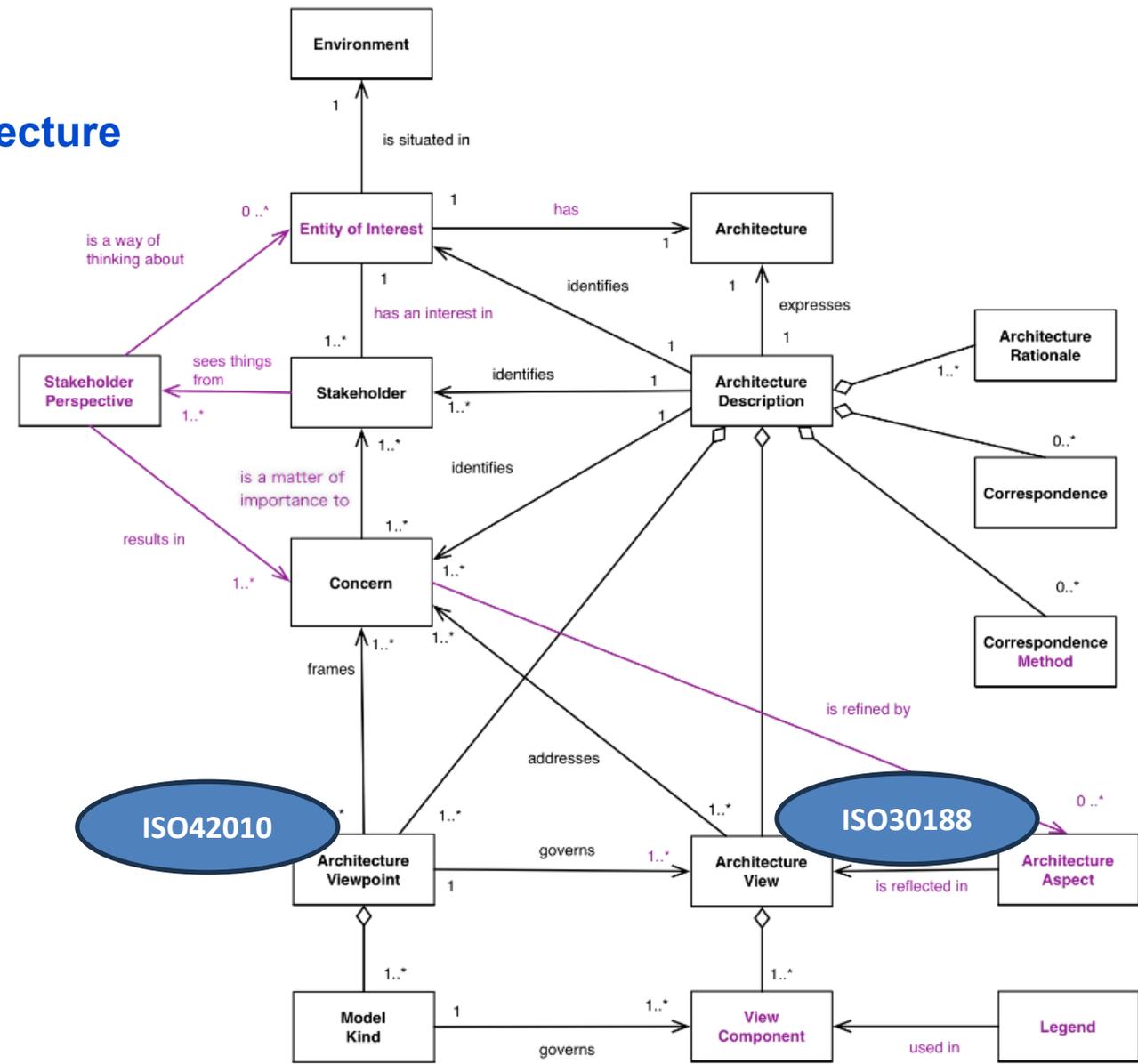
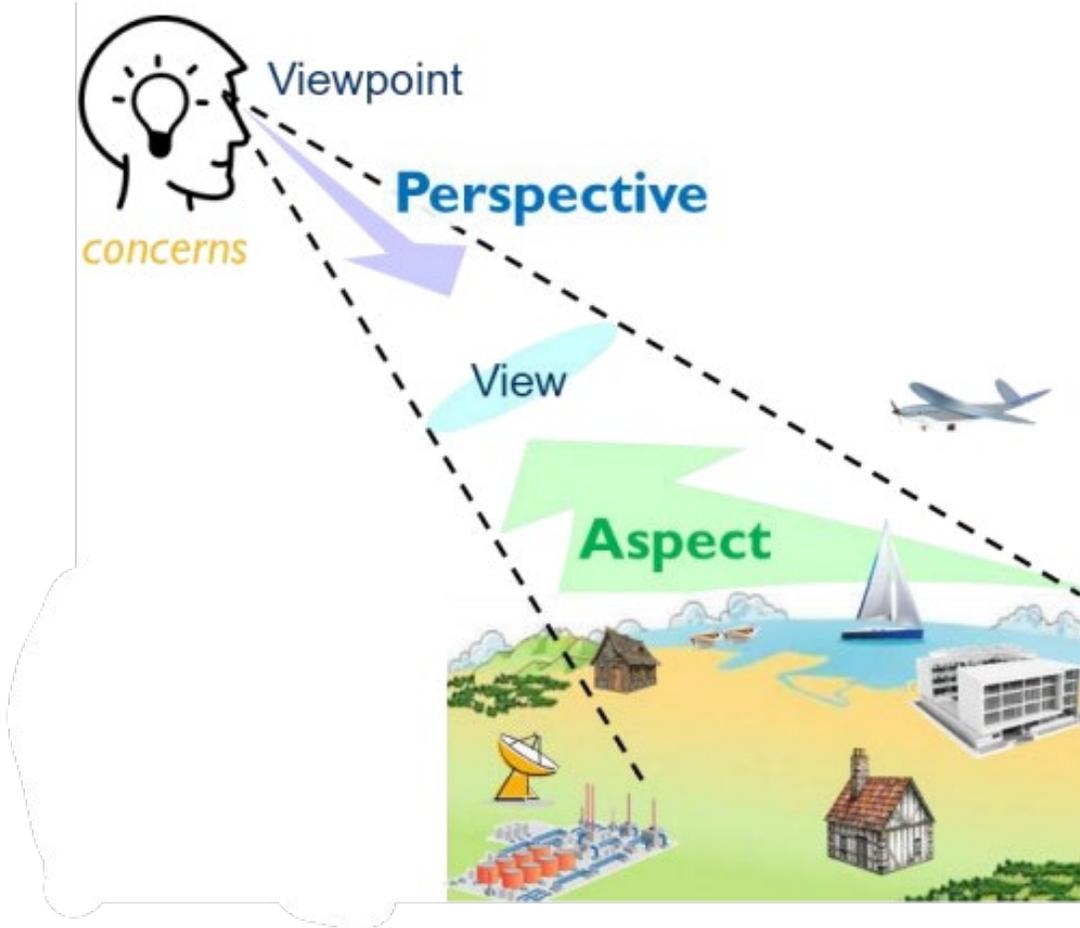
Le Jumeau Numérique comme solution, Architecture

System architecture and Conceptual Data Model for railway, common data dictionary and global system modelling specifications (2019-2022)



État de l'art

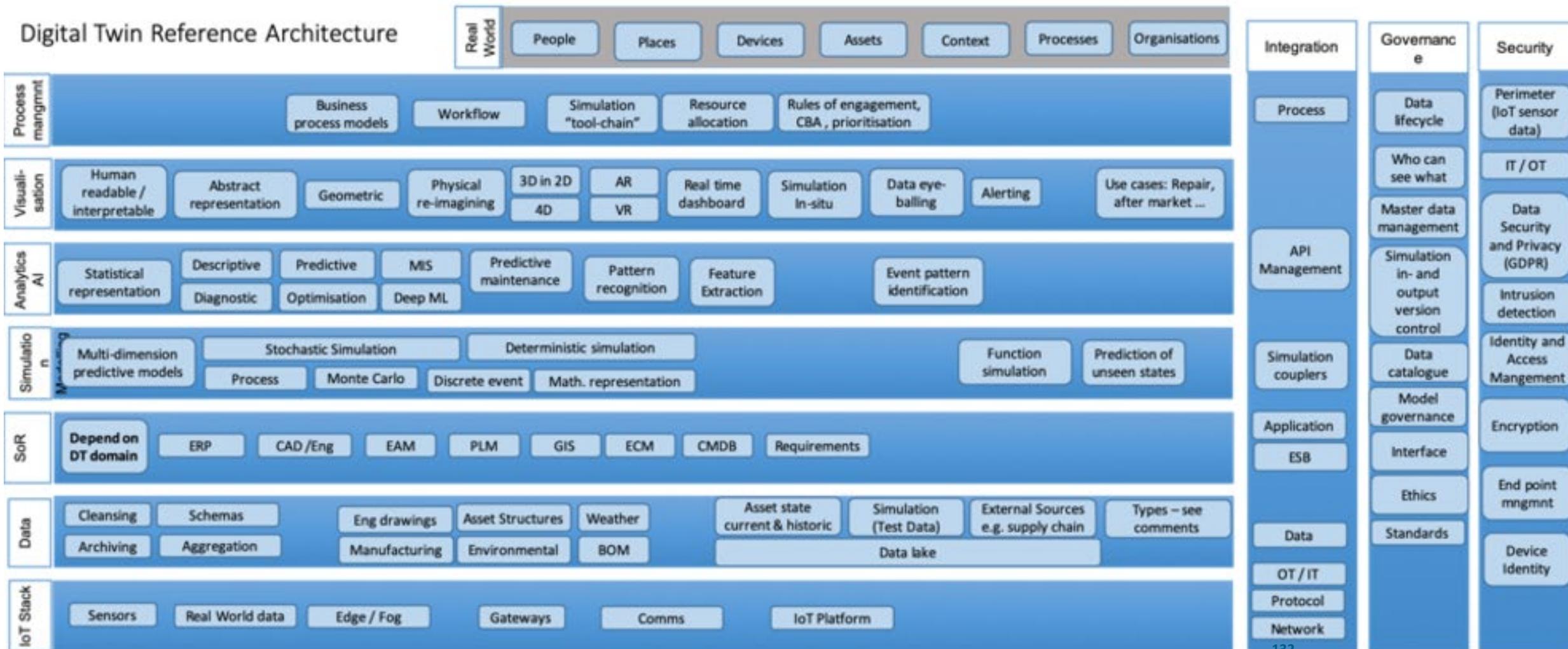
Le Jumeau Numérique comme solution, Architecture



ISO/IEC/IEEE 42010: Modèle conceptuel

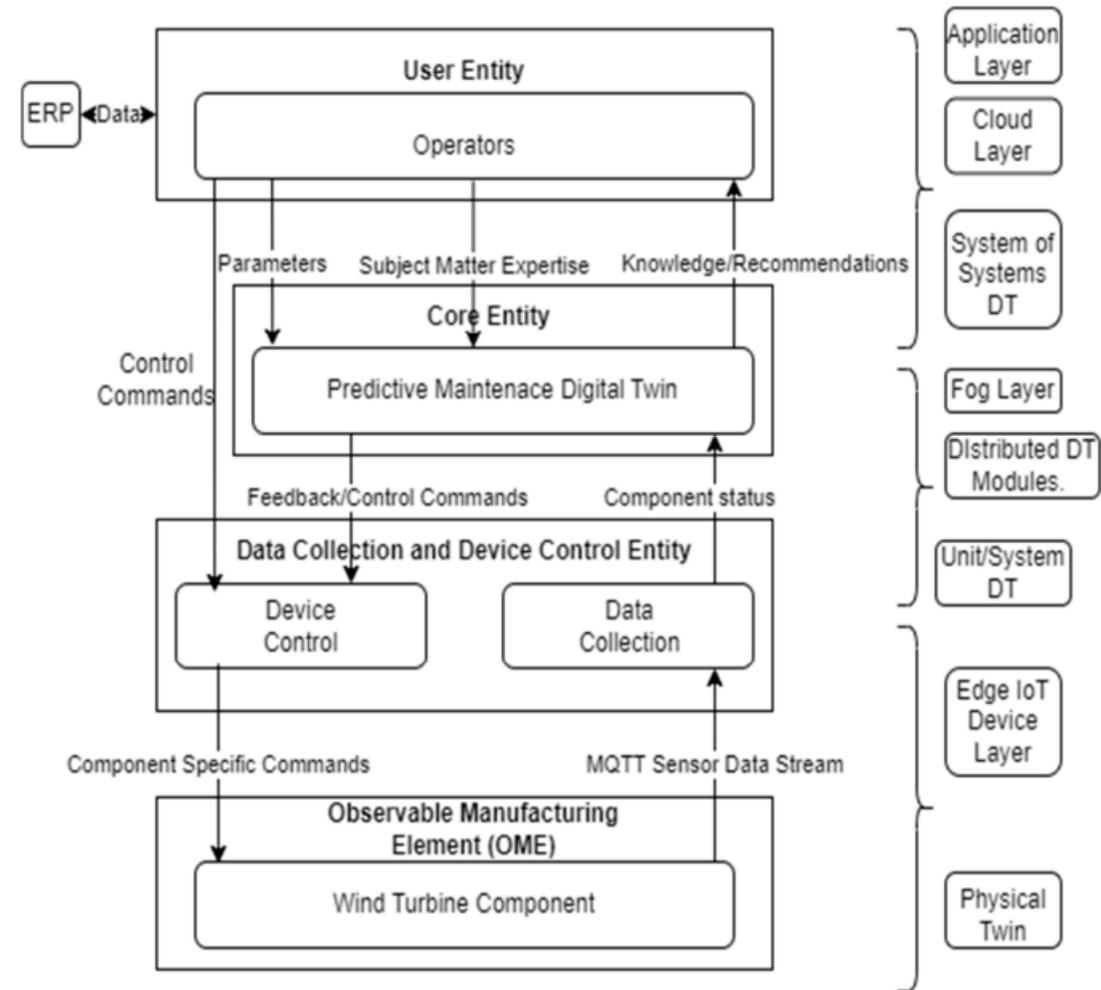
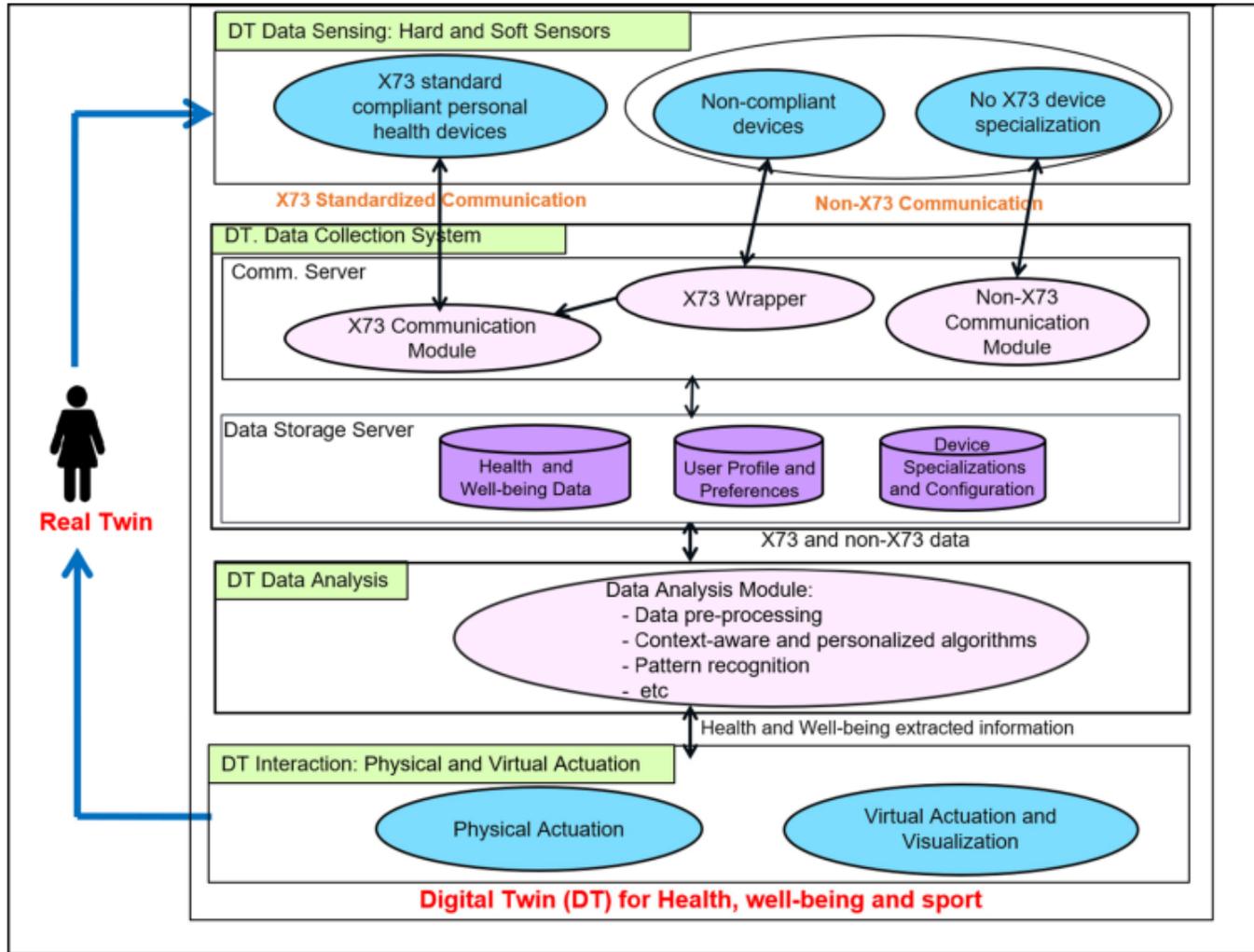
État de l'art

Le Jumeau Numérique comme solution, Architecture



État de l'art

Le Jumeau Numérique comme solution, Architecture



ABDULLAHI, Ibrahim, LONGO, Stefano, et SAMIE, Mohammad. Towards A Distributed Digital Twin Framework for Predictive Maintenance in Manufacturing Systems. 2024.

LAAMARTI, Fedwa, BADAWI, Hawazin Faiz, DING, Yezhe, et al. An ISO/IEEE 11073 standardized digital twin framework for health and well-being in smart cities. *Ieee Access*, 2020, vol. 8, p. 105950-105961.

État de l'art

Résumé et commentaires

1- Quels critères permettent de différencier les architectures et d'identifier la plus adaptée ?

2- Quelles sont les couches communes et indispensables aux différentes architectures, qui doivent également être intégrées dans la nôtre ?

3- Comment ces critères peuvent-ils être utilisés pour détailler les sous-couches ?

Connexion lecture « Intégration des Systèmes et Données » :

Comment intégrer efficacement les différentes données et schémas de données dans cette architecture ?

Quels défis d'interopérabilité et de standardisation doivent être surmontés ?

Quelle est la fréquence de mise à jour des données ? La fiabilité des données ?

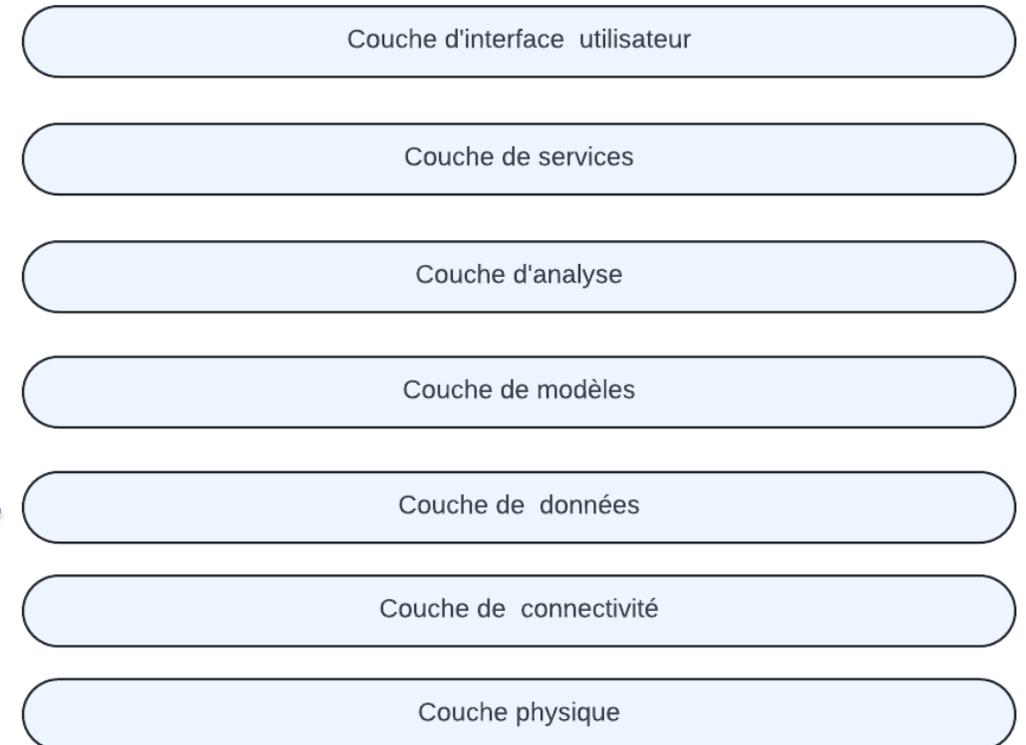
Évaluation et Validation :

Quels sont les indicateurs de performance et les cas d'usage pertinents pour évaluer l'efficacité d'une instance d'architecture



Connexion écriture « Connexion Feedback » :

Quels mécanismes pour assurer une communication bidirectionnelle fiable entre le jumeau numérique et l'entité physique ? Feedback ?



Plan

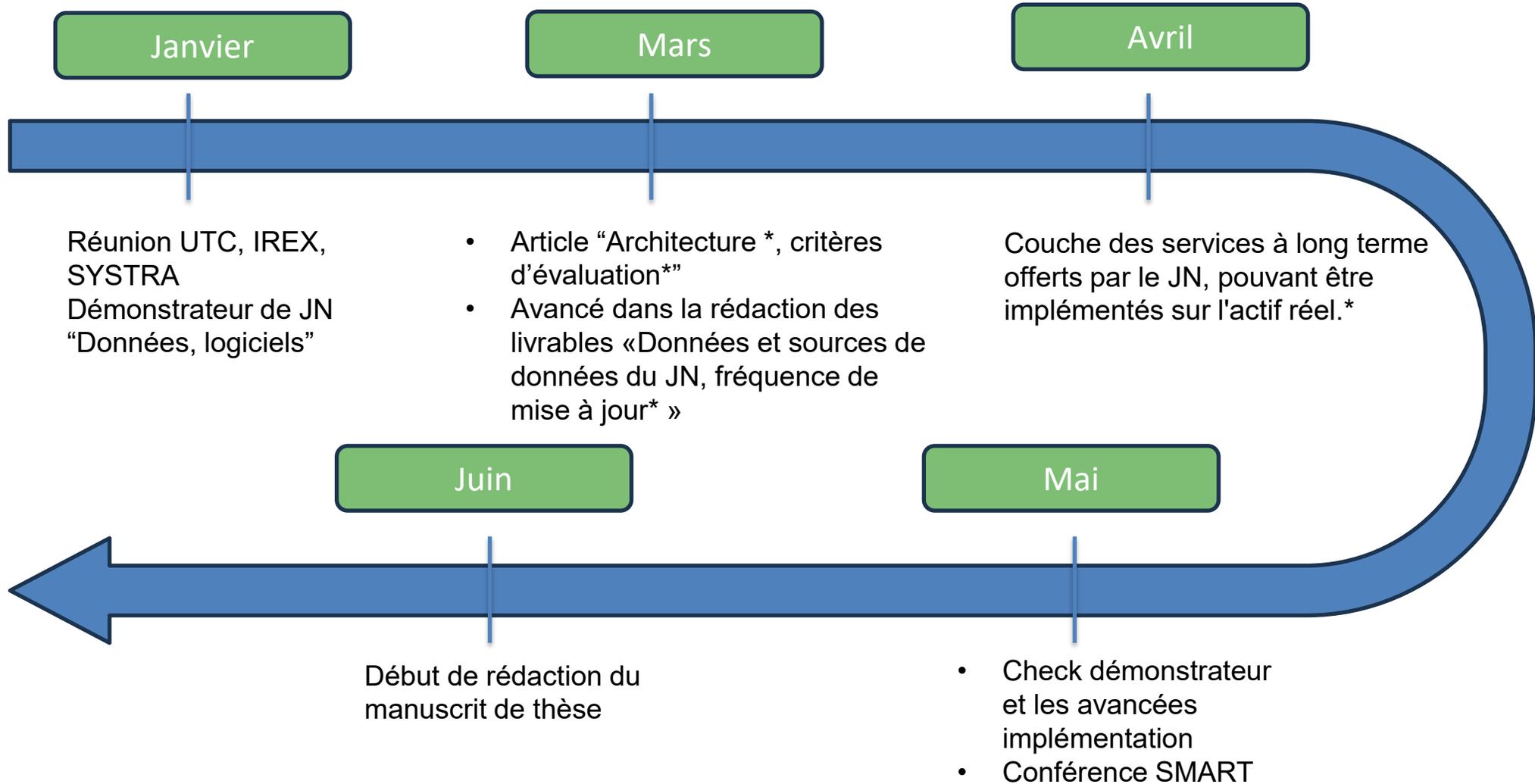
- 3 Projections
- Travaux à venir



Projections

Travaux à venir

3ème semestre



Plan

4

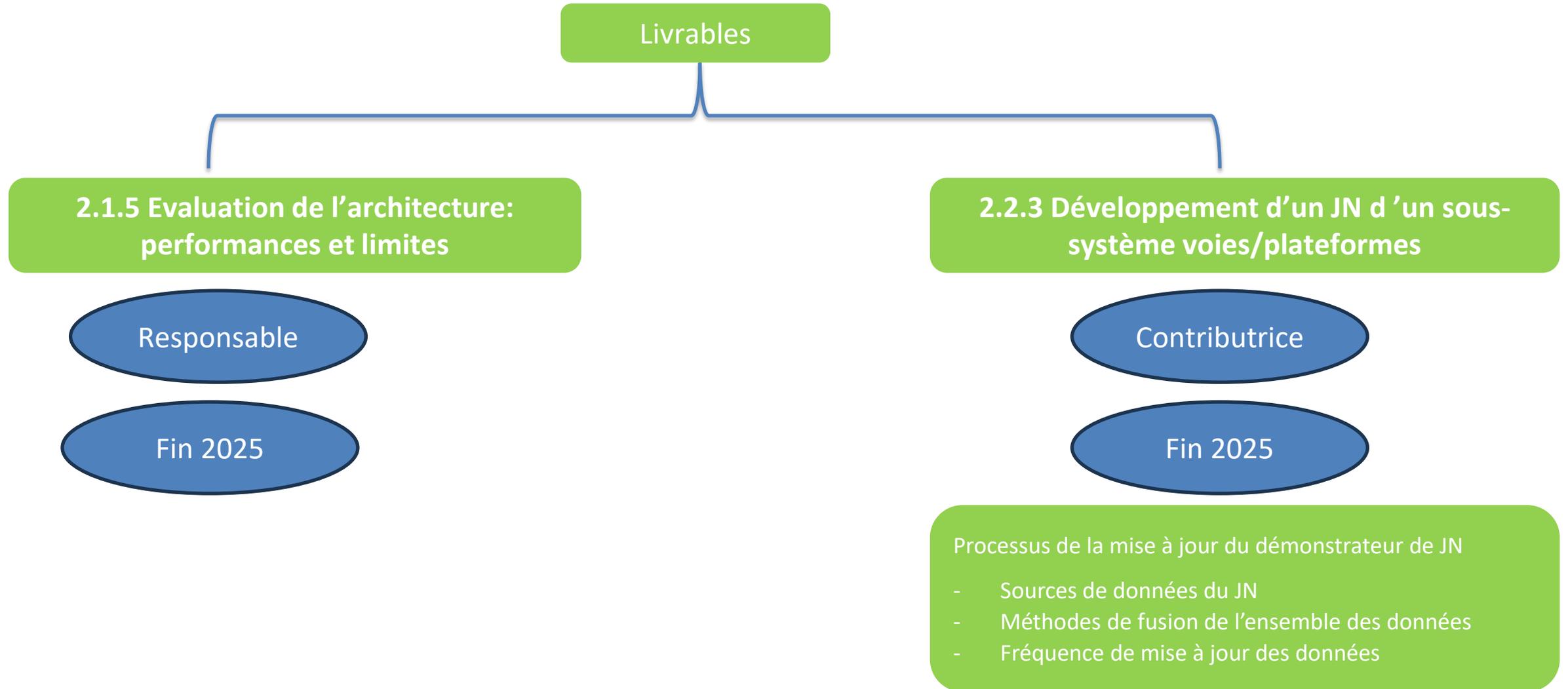
Livrables

Niveaux de contribution



Livrables

Niveaux de contribution



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

"Libérer le potentiel ferroviaire : transformer la réalité grâce à l'innovation du jumeau numérique dans les infrastructures existantes - surmonter les défis, adopter le changement et aller de l'avant avec l'adaptabilité."

Hibat Allah BABTY

ext.irex.hababty@systra.com

hibat-allah.babty@utc.fr

UTC

Benoît EYNARD

Matthieu BRICOGNE

IREX

Philippe GOTTELAND

SYSTRA

Etienne PANSART



MERCI

8

PRÉSENTATION 7

TRAITEMENT DES DONNÉES DE LA LGVBPL DANS LE CADRE DU
PROJET MINERVE

Johann Priou ¹,

Juliette Blanc¹

2024/2025

¹Université Gustave Eiffel Bouguenais

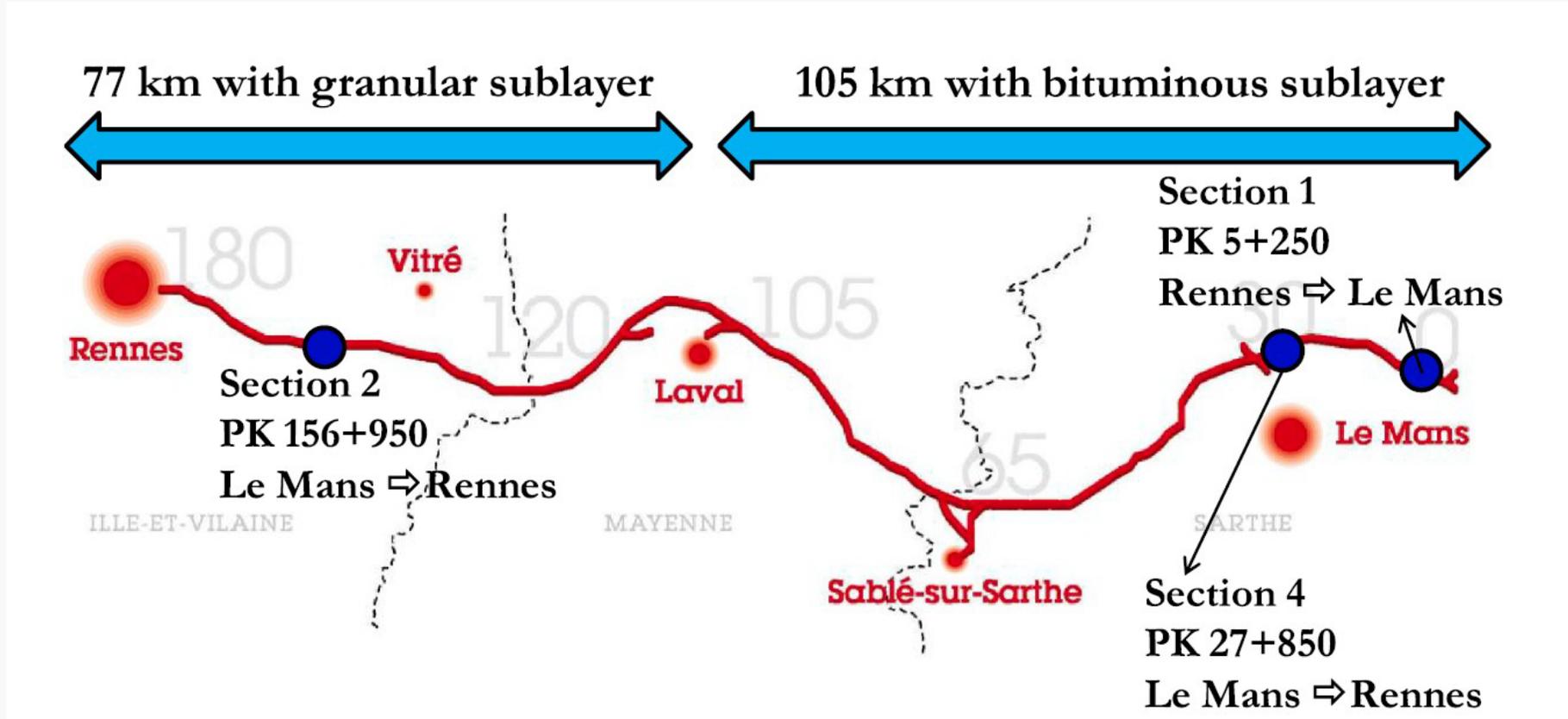


TRAITEMENT DES DONNÉES DE LA LGVBPL DANS LE CADRE DU PROJET MINERVE

Déposer le ballast sur une couche de grave bitume reste une méthode peu documentée en France, c'est pour combler ce manque que le projet LGVBPL a instrumenté la ligne grande vitesse entre Le Mans et Rennes. Ainsi plusieurs dizaines de capteurs ont été positionnés sur la voie et mesurent l'influence du passage des trains depuis 8 ans. Ces données représentent une quantité considérable d'information non traitée. Avec le projet MINERVE le traitement de ces données devient possible c'est ce traitement qui sera présenté. L'accent sera mis sur le traitement des données vibratoires d'accélération, des filtres, des problèmes de robustesses liés aux différentes conditions environnementales ainsi que des indicateurs permettant de décrire correctement un passage de train.

Contexte

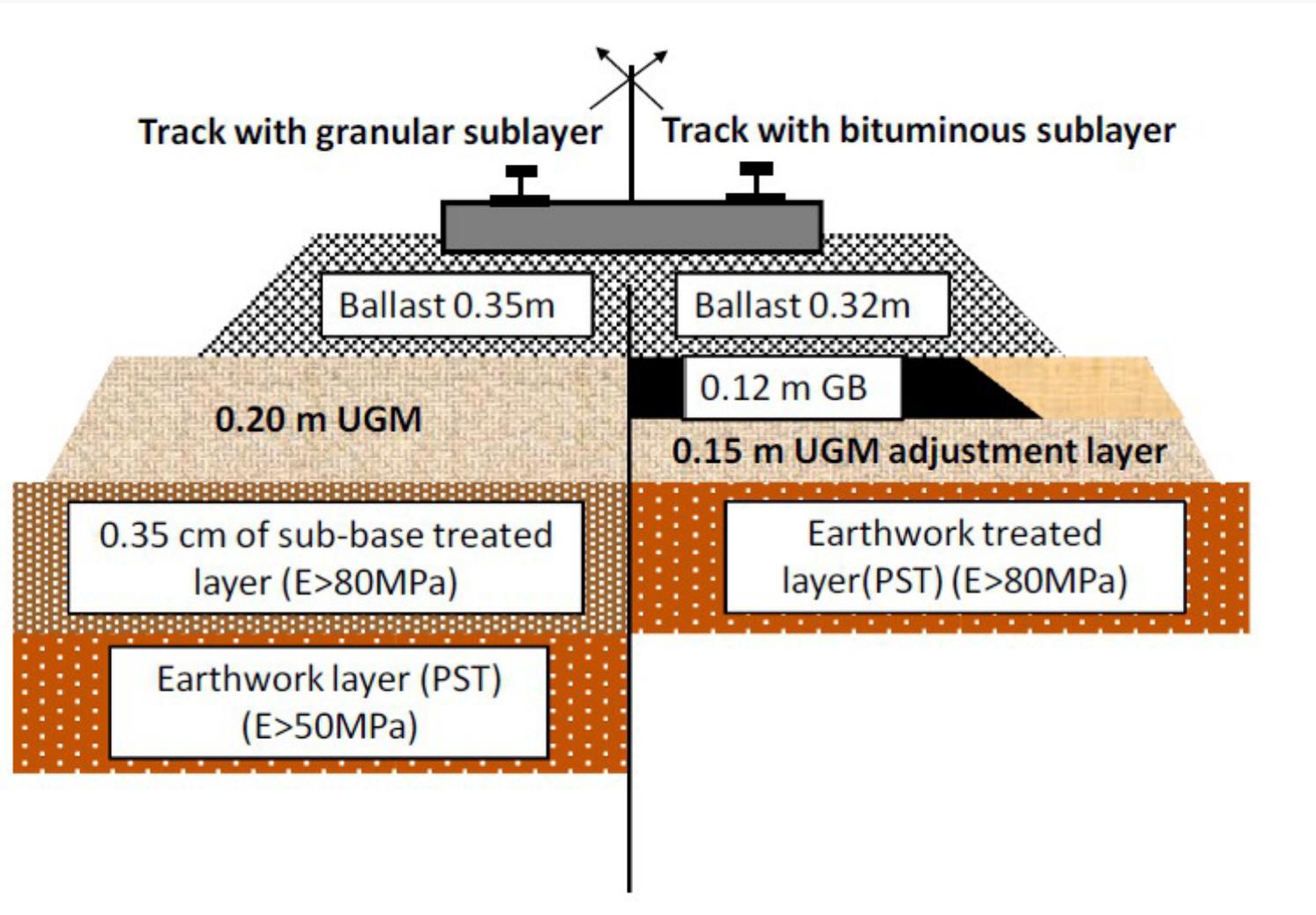
Instrumentation de la LGVBPL



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

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

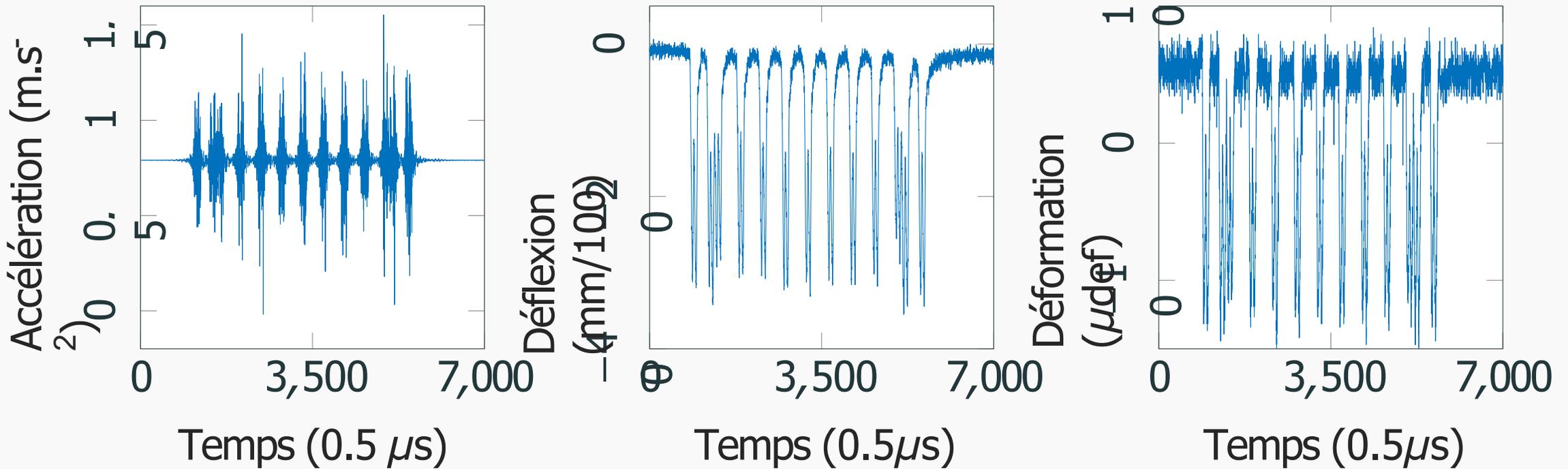
Post-doctorat exploratoire :

- 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.

Paramètre d'entrée

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



Mesures : l'accélération, la déflexion et la déformation

Paramètre d'entrée = mesures ?

Quantité de données :

- 197 capteurs en continue
- 80 capteurs en "seuil" (déclencher par passage de train à 2000 Hz pendant 10 sec)
- 7 ans de mesures

Problèmes :

⇒ plus de 3 To de données

⇒ plusieurs centaines de Go de RAM nécessaire pour 1 capteur sur 1 mois

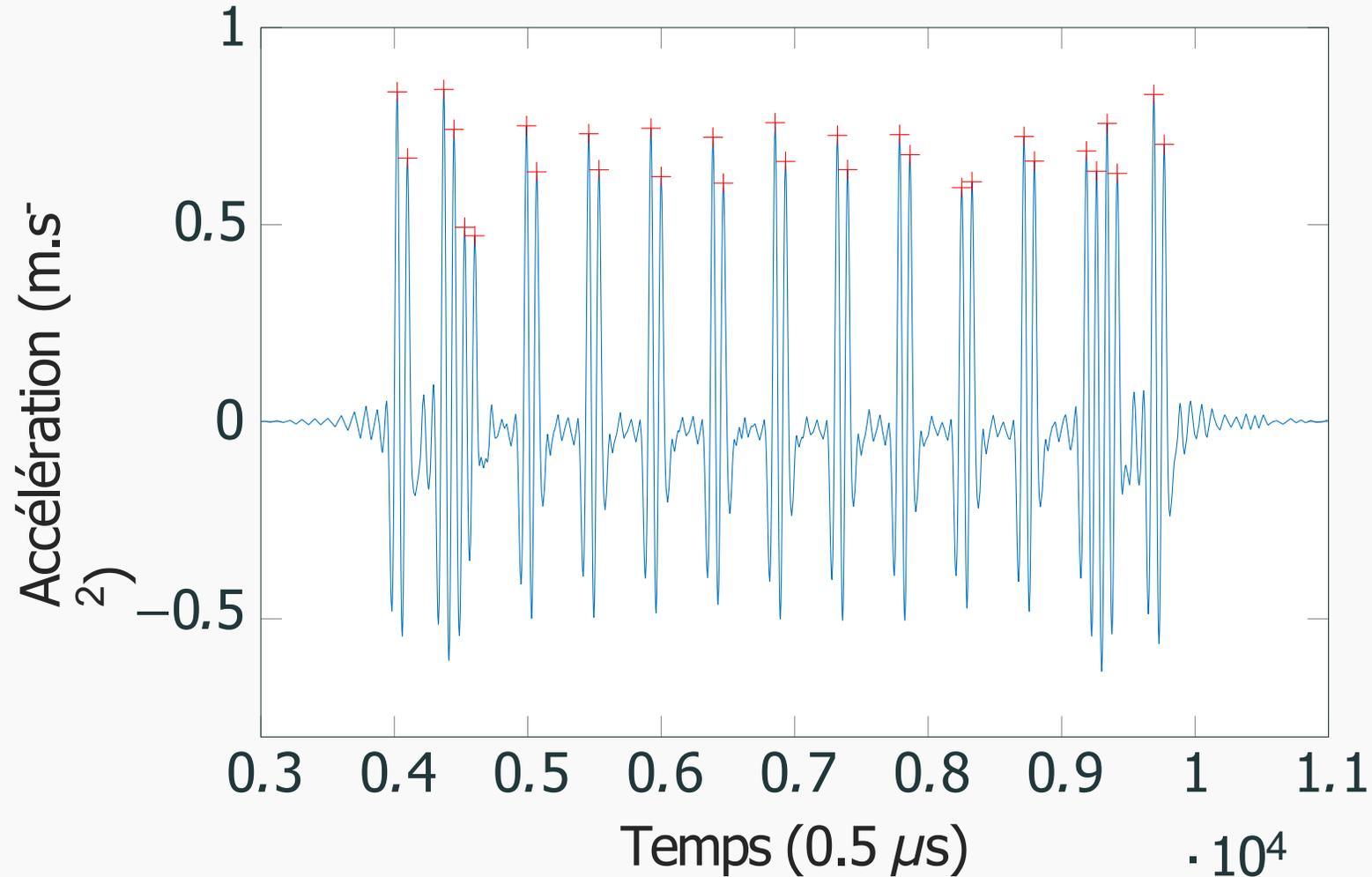
Comment réduire la quantité de donnée et quels paramètres d'entrée définir ?

⇒ calcul de descripteurs

Algorithme de calcul des descripteurs

- Objectif
- Fonctionnement de l'algorithme
- Classification des trains
- Résultats recherche adaptative
- Résultats

Passage de train



- Trouver le filtre adéquat
- Identifier tout les piques
- Reconnaître le train
- Calculer les descripteurs

Fonctionnement général de l'algorithme

Pre-processing :

Calculer la fréquence cible de coupure pour le filtre (lié à la vitesse du train)

- Estimer la vitesse du train

Processing :

Filtrage des données adapté au signal

- Algorithme de recherche de piques adaptatifs
- Validation et calcul des descripteurs

Calcul de vitesse approximé :

- Calcul de la cwt (Continuous Wavelet Transform) du signal
- Localisation du pique autour de 25 Hz
- Filtre lowpass IIR de type Butterworth à la fréquence localisée
- Localisation des piques par loi σ :
 - conservation des piques tel que : $f > \mu + a\sigma$ avec adaptation de a
- Calcul de l'écart temporel entre les piques
- Clustering de ces écarts : deux clusters, bogie (courte) et voiture (long)
- Sur les écarts courts, calcul de la vitesse moyenne

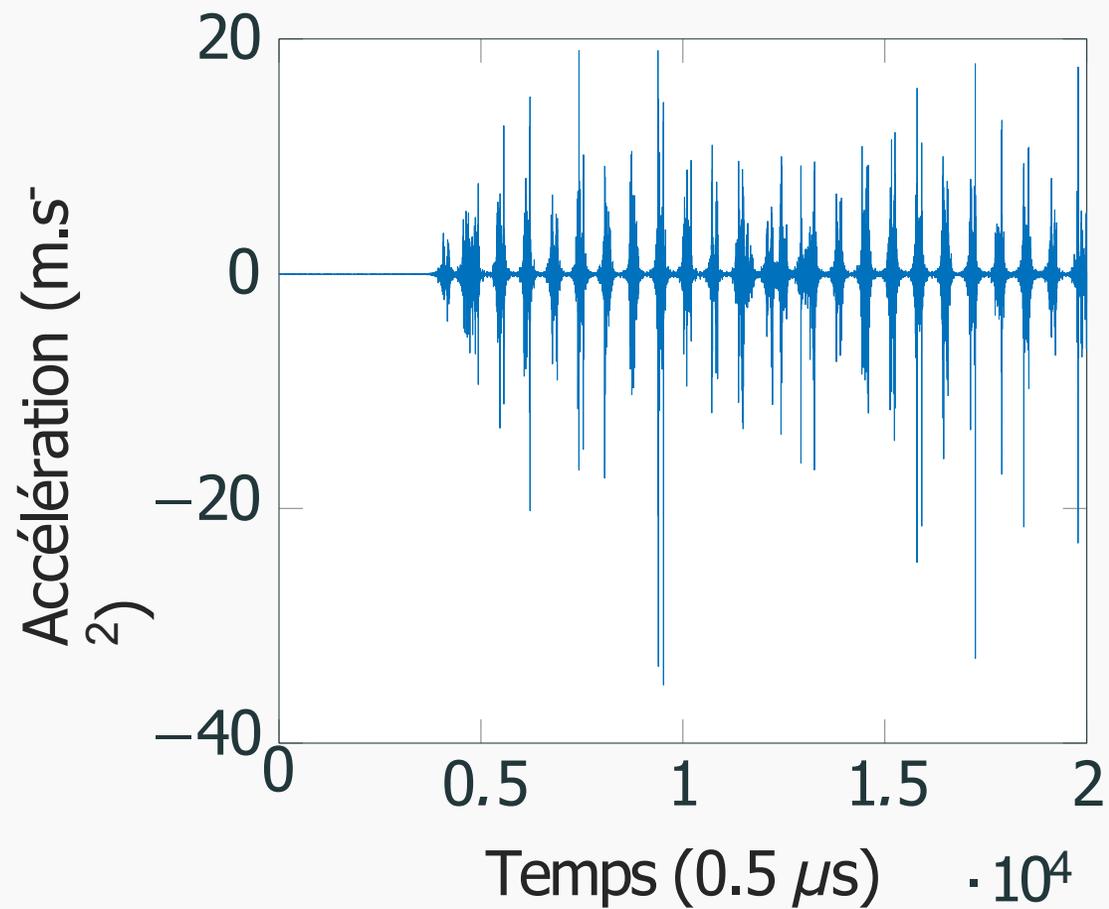
Processing

- Filtre lowpass IIR de type Butterworth d'ordre 4 basé sur la vitesse calculé avant
- Classification du type de signal
- Méthode de recherche des piques adaptée au type de signal
- Lorsque profil proche : recherche personnalisé (reconnaissance simple bogie, double bogie, train simple, train double, etc)
- Nouveau calcul de vitesse (beaucoup plus précise)
- Validation du train par rapport au format connu
- Calcul des descripteurs

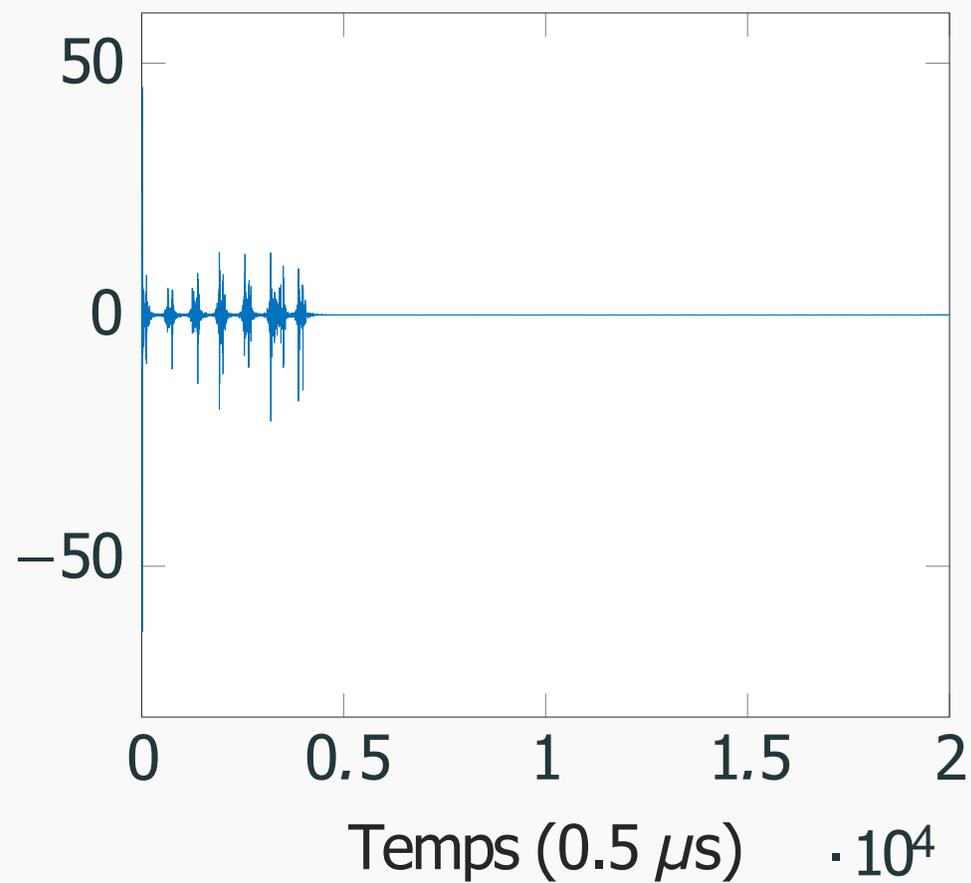
Classification : cas problématique

Cas problématique - Signal incomplet

Train trop lent

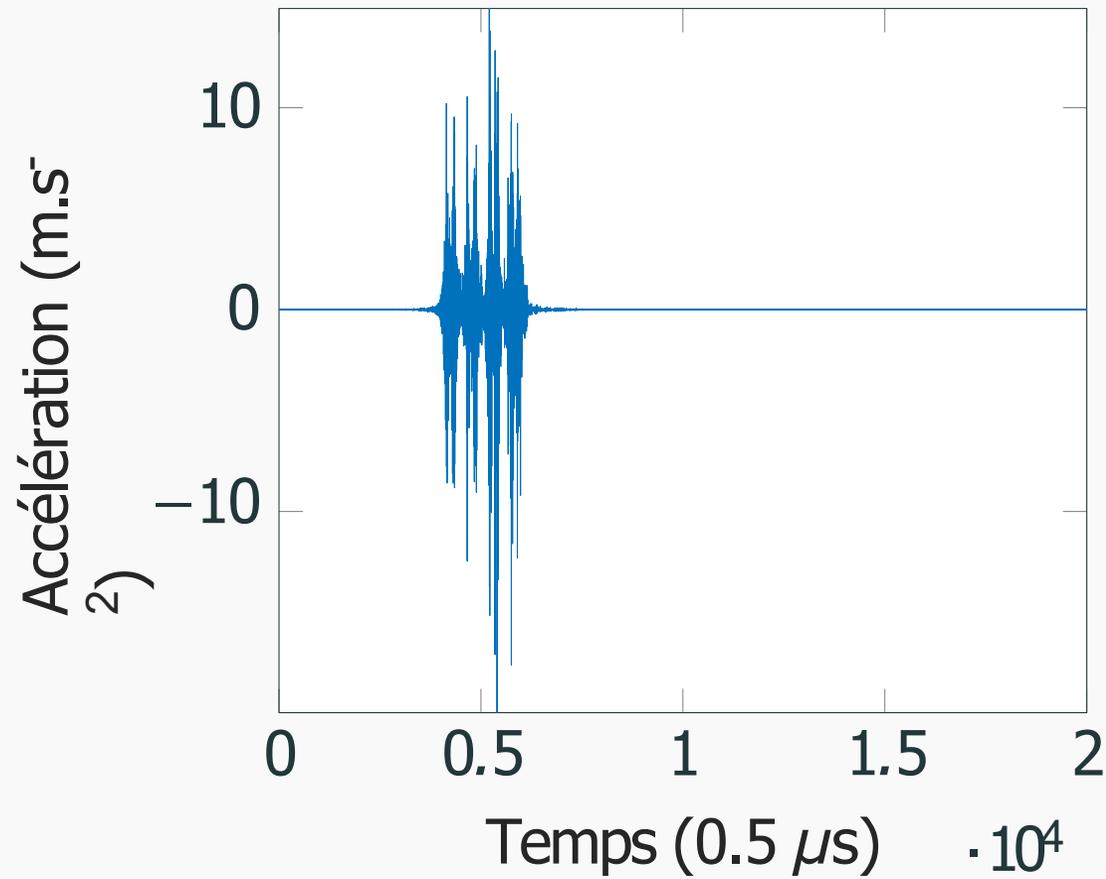


Signal incomplet

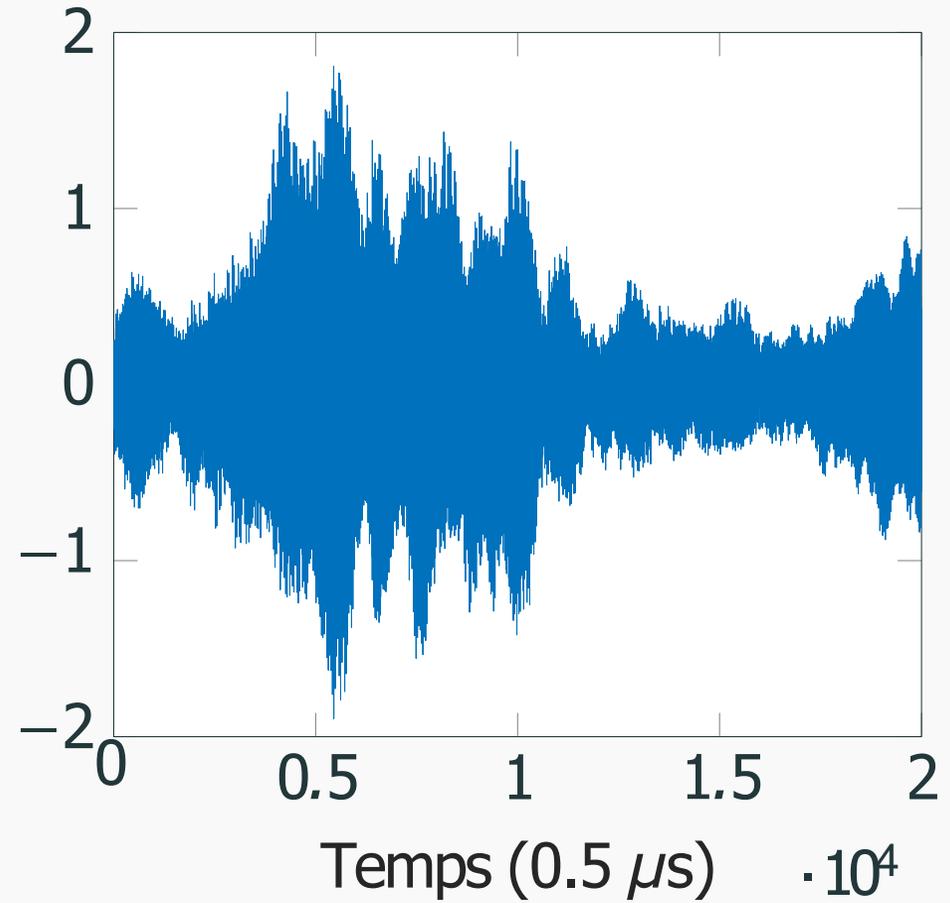


Cas problématique - Signal non reconnu

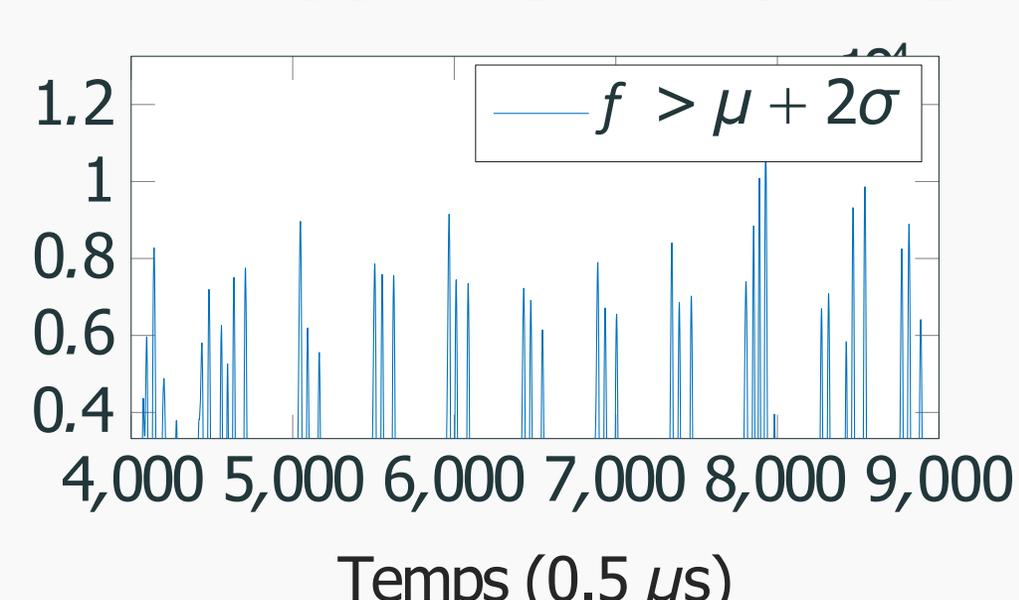
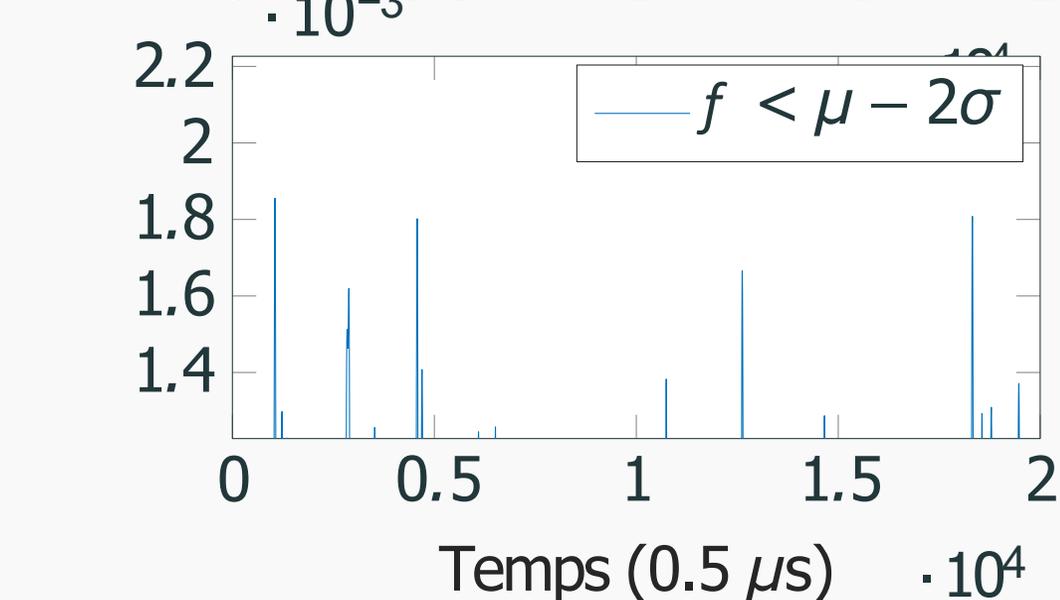
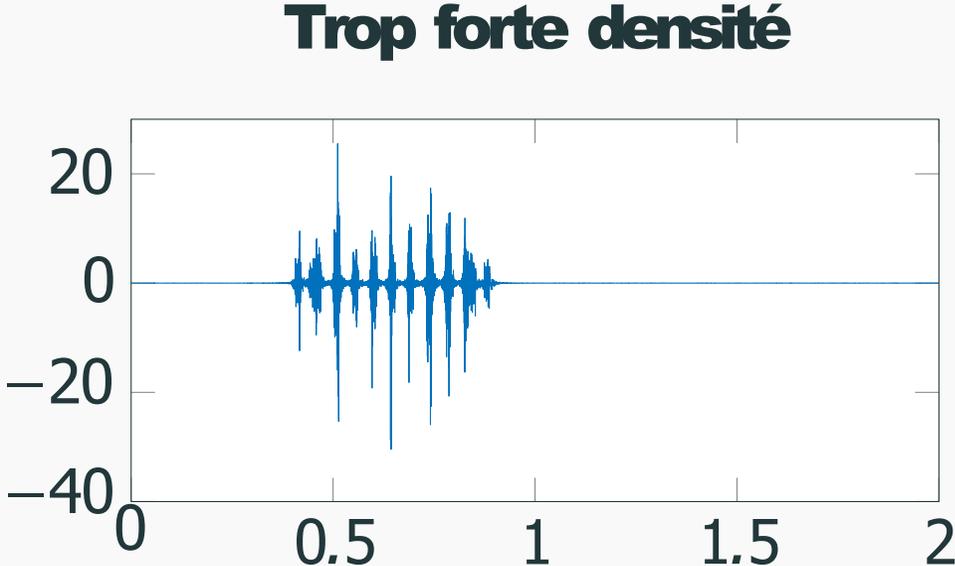
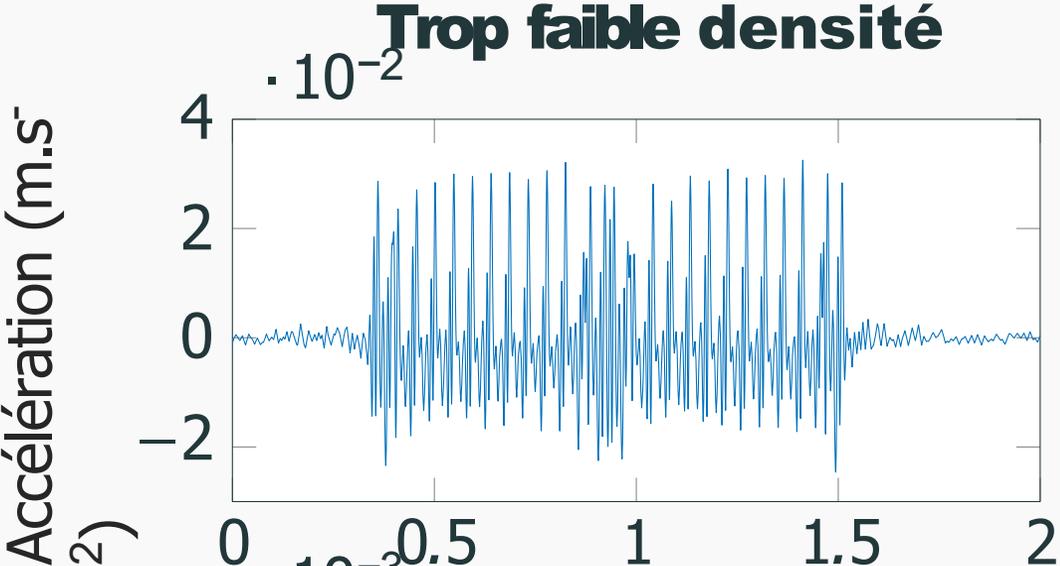
Signal trop court



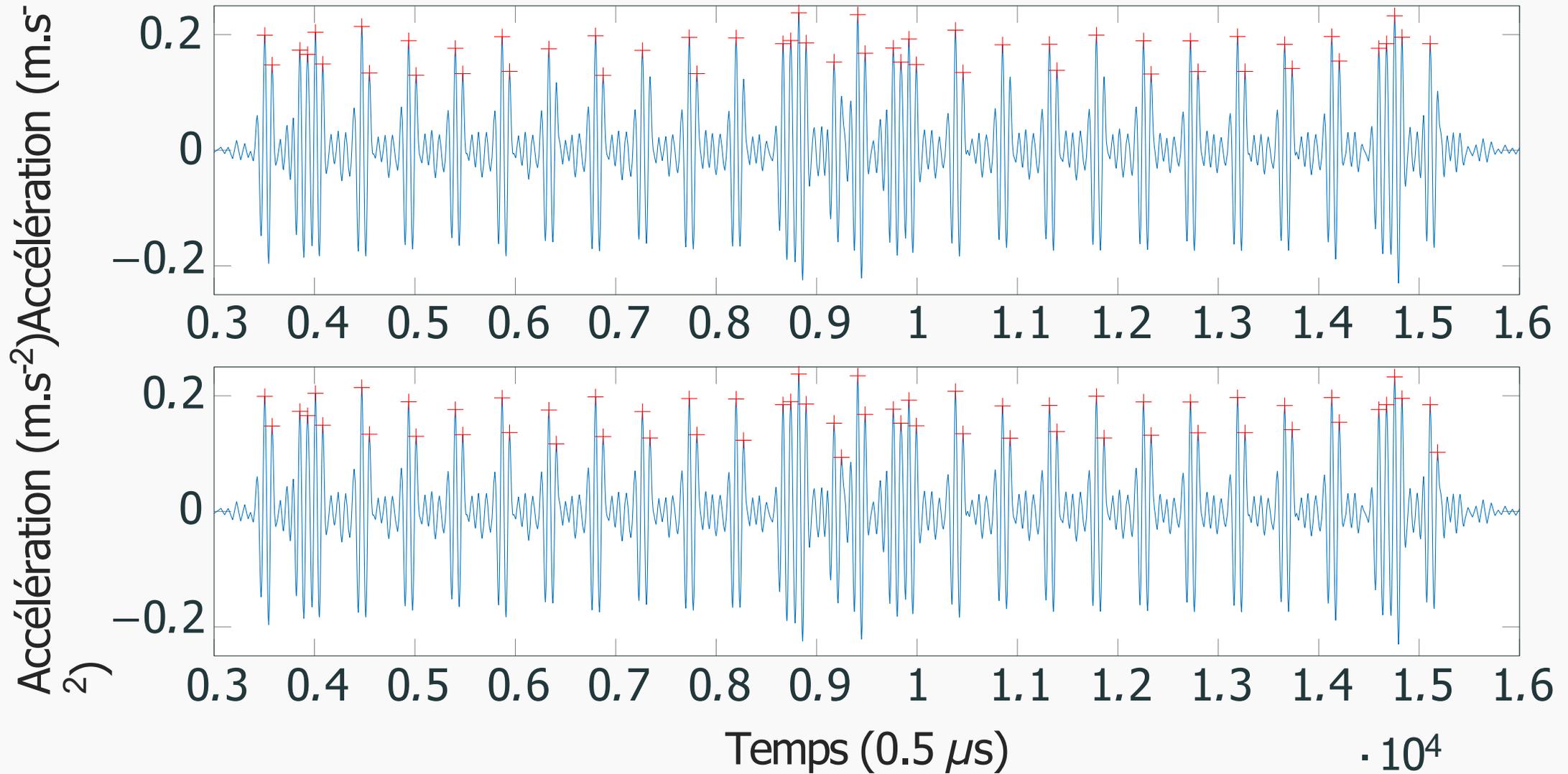
Non signal



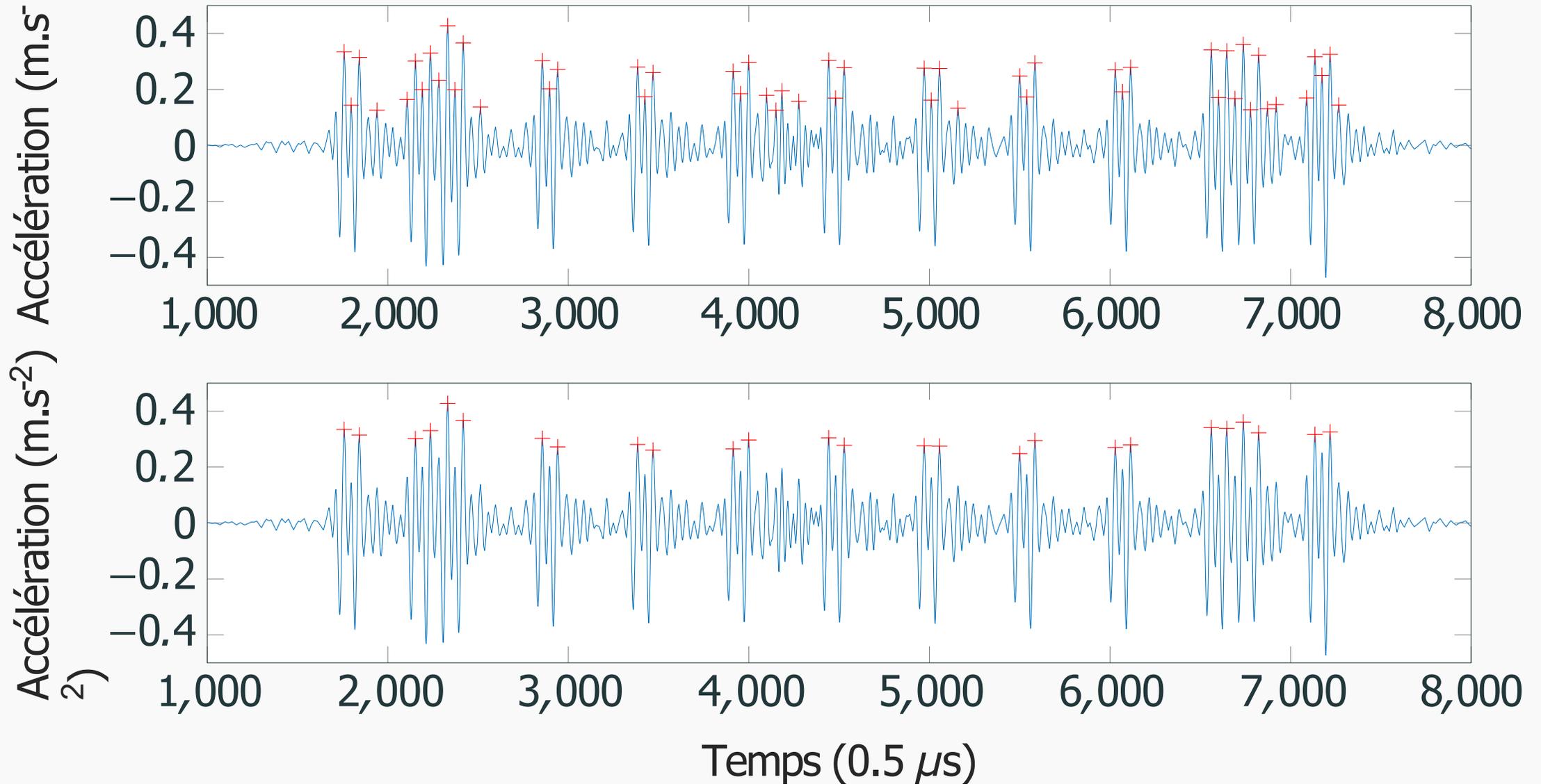
Cas problématique - Problème de filtre non valide



Recherche des piques adaptatives - cas 1



Recherche des piques adaptatives - cas 2

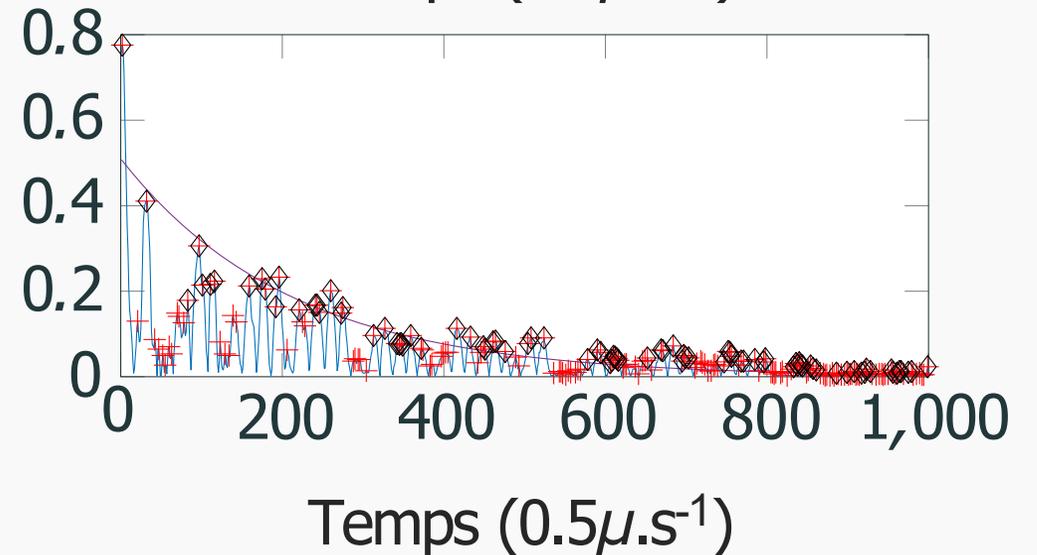
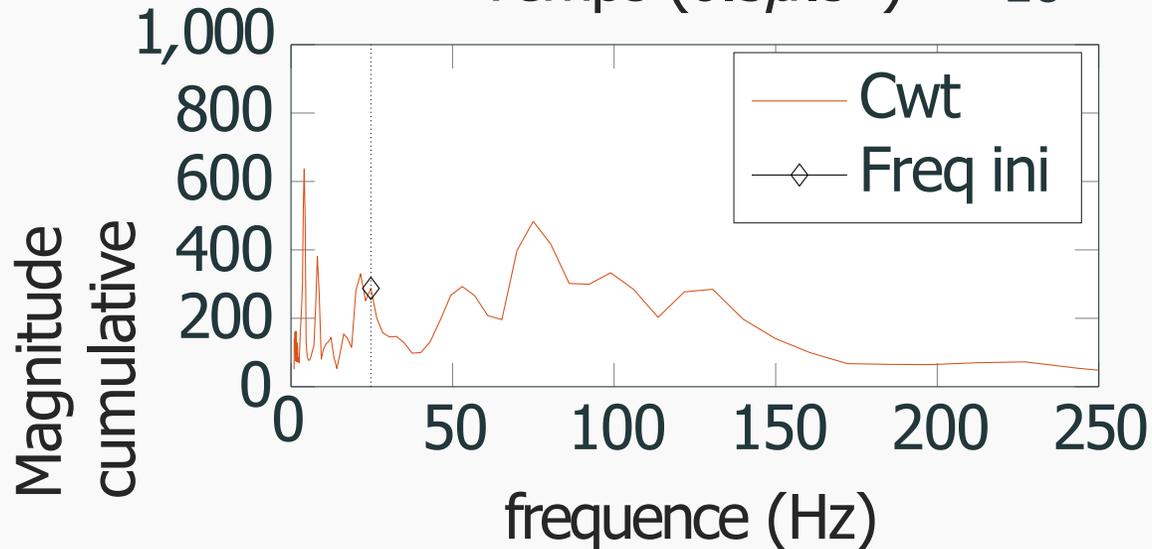
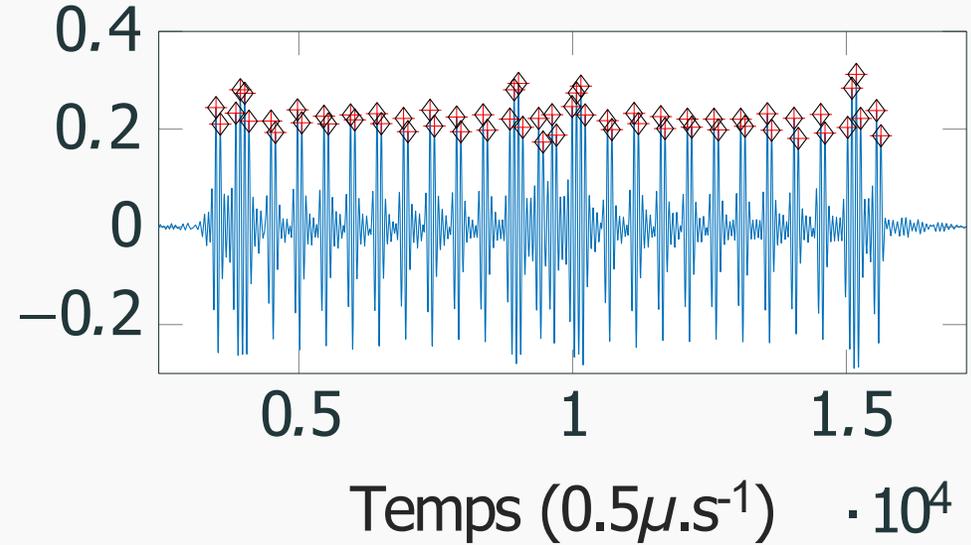
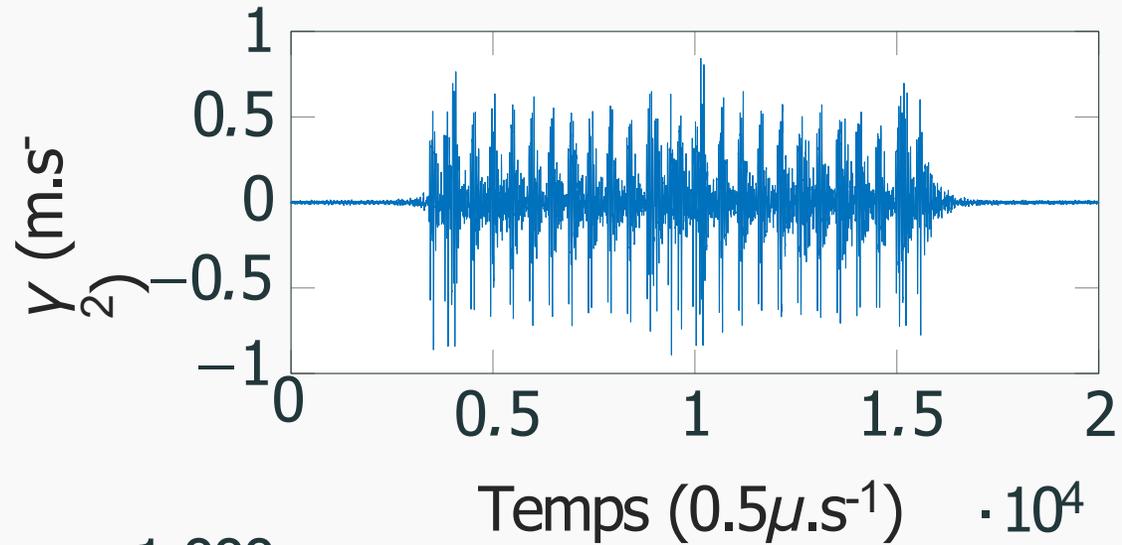


Résultats

Cas problématique - forte énergie

Ext = 0.84 ; -0.89; Skw=-0.35

Vitesse : 273.95 ± 2.71 (km/h)



Conclusion

Conclusion

- Algorithme robuste et automatique testé sur plus de 50000 passage de trains
⇒ lancer les calculs sur la totalité des mesures
- Coût de calcul réaliste sans nécessité de serveur
- Système de classification pour tirer le maximum d'information de chaque passage de train tout en indiquant la confiance des résultats

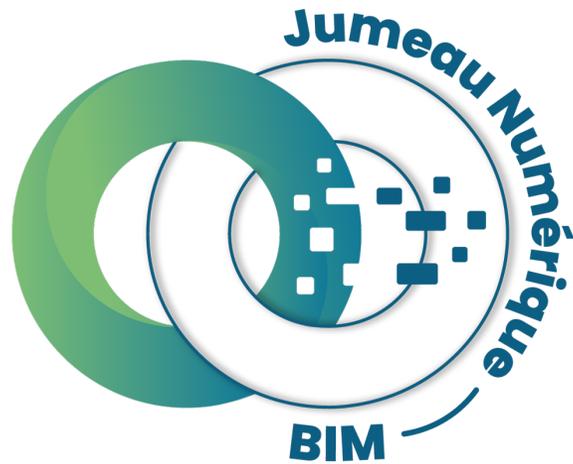
9

CONCLUSION





MERCI



MINERVE
avec la filière ferroviaire