

Défauts ferroviaires : Vers une détection visuelle embarquée

PFIA/APIA 2025

Saša Radosavljevic, Kevin Hoarau, Alain Rivero, Sergio Rodriguez Florez et Abdelhafid El Ouardi
Université Paris-Saclay, SNCF Réseau

01/06/25

Sommaire

- Contexte
- Aperçu de l'état de l'art et problématique
- Objectifs et Méthodologie
- Défauts recherchés
- Présentation du système
- Méthodologie d'évaluation
- Évaluation de la détection embarquée
- Perspectives

Contexte: Sécurité ferroviaire

Statistiques :

2 déraillements par jour aux USA, dont 27% dus à des défauts d'infrastructure [Arnold & Itkin, 2023].

Enjeu : méthodes de diagnostic et de détection de défauts

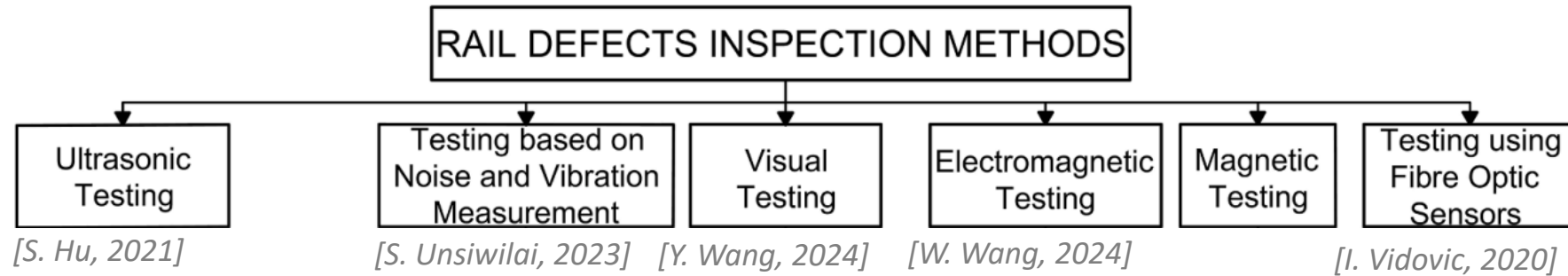
- Amélioration de la détection
- Suivi de l'évolution
- Intégration sur différents types de trains (commerciaux)
- Optimisation de l'occupation temporelle des sillons réservés aux engins d'inspection de l'infrastructure.
- Discussions en cours avec Alstom pour une extension aux systèmes de maintenance sur rames de métro



Accident impliquant un défaut d'éclisse

Aperçu de l'état de l'art

[M. Micic, 2023]



Méthodes non destructives

Problématique :

- Certaines méthodes nécessitent un environnement contraint

Ultrasons, EMT (ElectroMagnetic Testing), Fibre optique, vitesse < 160 km/h

- Peu de mentions d'architectures embarquées

Objectifs d'amélioration de précision

- Vision seule

Efficace (CNNs Yolo > 92% mAP), mais sensible aux aléas environnementaux

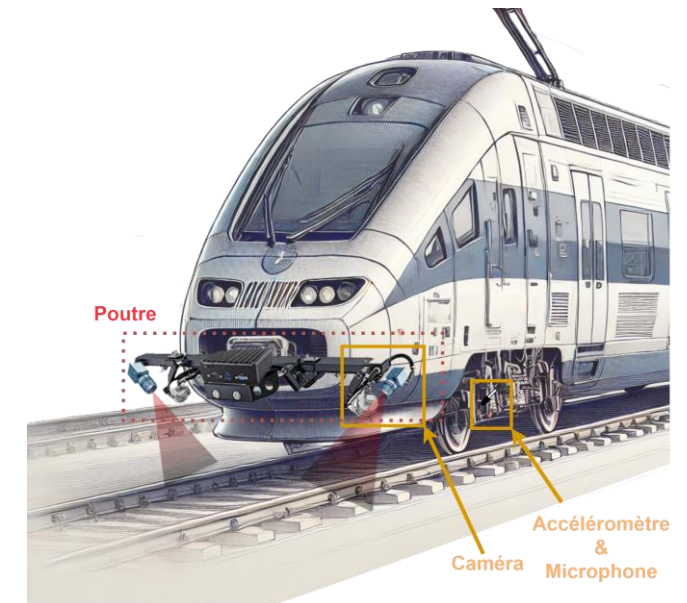
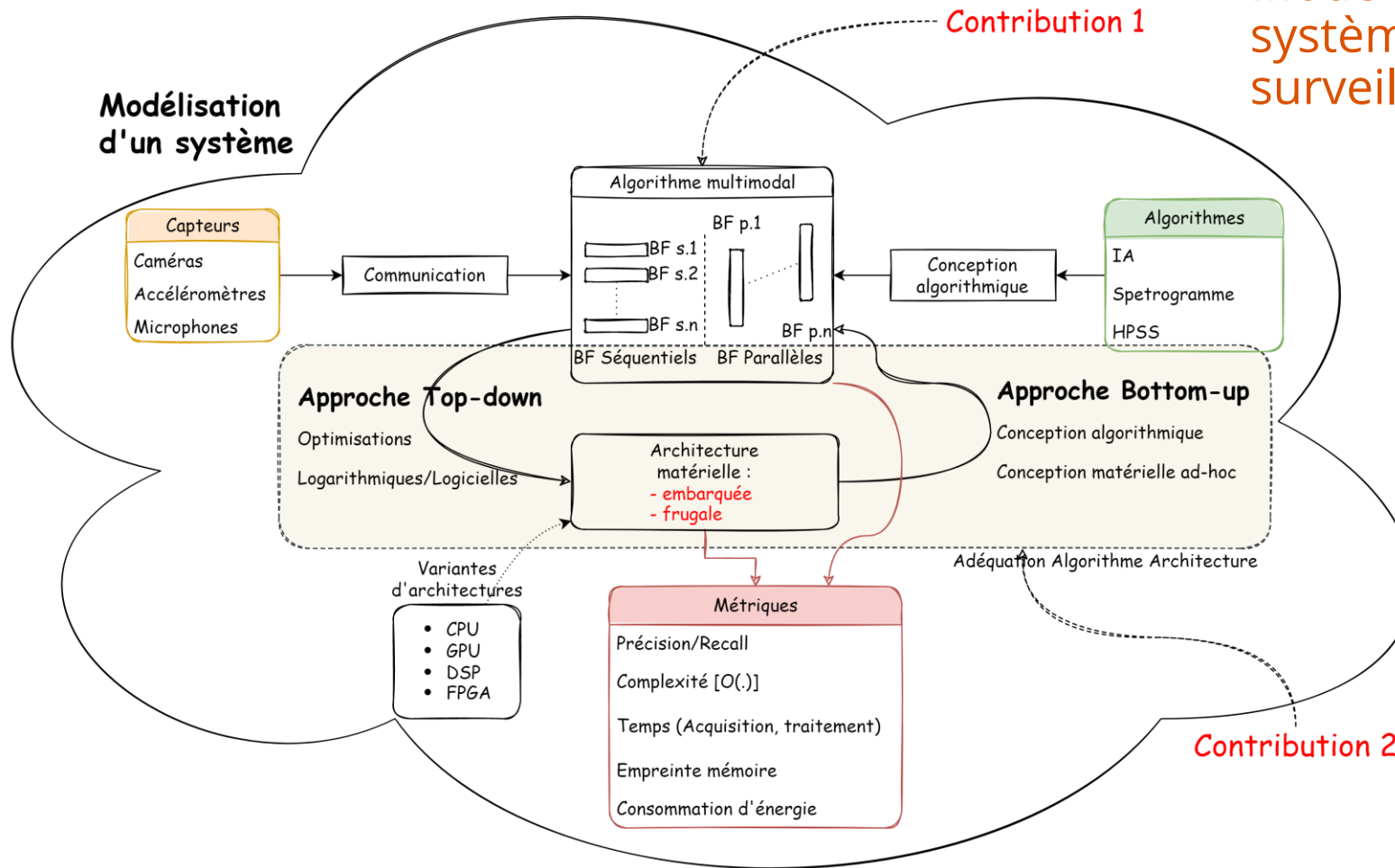
- Vibrations/Audio

Complémentaires mais limitées seules

Problème d'encombrement pour un système polyvalent,
de traitement temps-réel, de précision et de multiplicité

Objectifs et méthodologie

Modélisation d'une architecture d'un système multimodal embarqué pour la surveillance de l'infrastructure ferroviaire



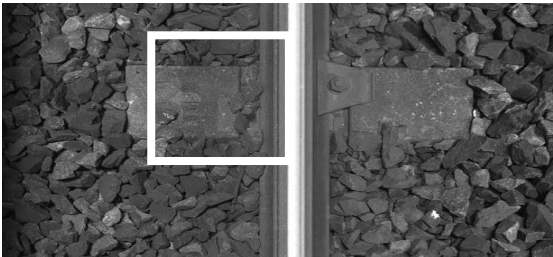
Vue du concept

→ **Contribution 1 :** Méthode de fusion de données multimodale pour la détection de défauts.

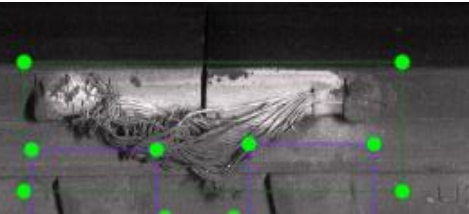
→ **Contribution 2 :** Modèle d'architecture de calcul dédié pour l'embarqué.

Défauts recherchés

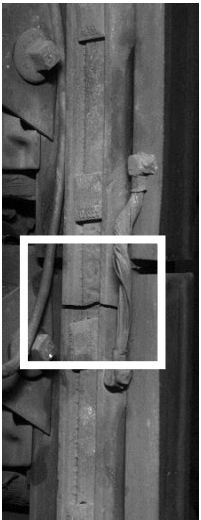
Caractérisation des défauts



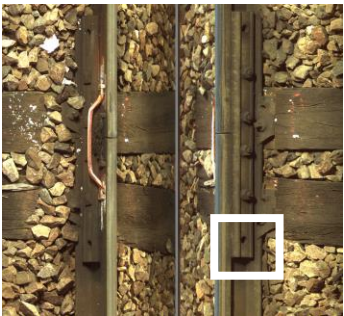
Attache défectueuse



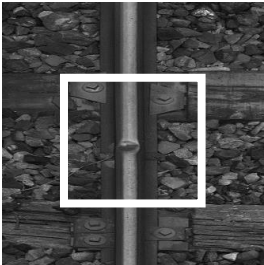
Défaut de tresse



Rupture d'éclisse



Ecrou manquant



Défaut de surface



Rupture de rail

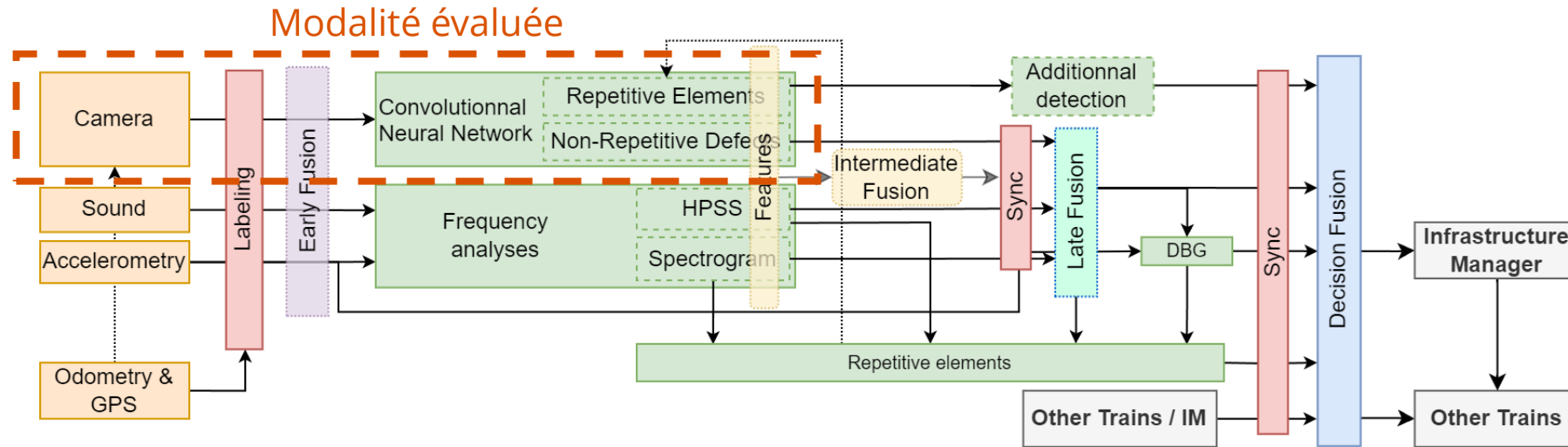
Classification des défauts ferroviaires ciblés

Catégorie	Type de défaut	Description	Taille (mm)
Défauts de surface	Fissures	Microfissures ou fissures sur le rail	2 - 50
	Usure excessive	Érosion anormale du champignon du rail	> 10
	Corrugation	Ondulations périodiques sur le rail	10 - 1000
Défauts structurels	Rupture de rail	Fracture complète ou partielle du rail	50 - 12 000
	Boulons manquants	Fixations absentes	-
	Rupture d'éclisse	Défaillance aux joints de rails	50 - 150
Défauts contextuels*	Objets sur la voie	Corps étrangers pouvant perturber le trafic	Variable
	Niveau de ballast	Déformation sous les traverses	-
Interaction rail-roue*	Défauts de contact	Anomalies dans l'interface rail-roue	-
	Vibrations excessives	Dégradations mécaniques révélées par l'accéléromètre	-
	Bruits anormaux	Indicateur d'un problème de freinage ou bogie	-

*Pas encore étudiés

- Grande diversité des défauts ciblés
- Variabilité de forme, taille et occurrence
- Complexité de représentation

Présentation du système



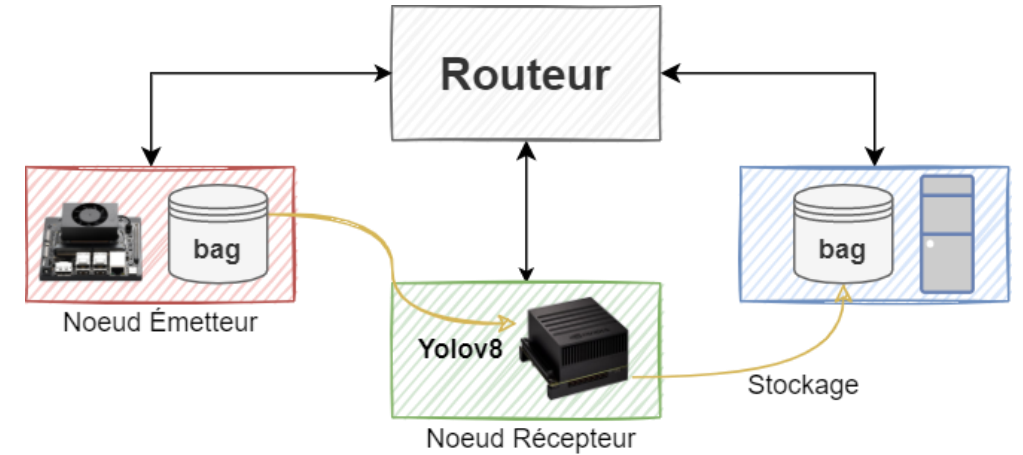
Système multimodal proposé avec différents niveaux de fusions possibles

- Complémentarité des capteurs : compense les limites de chacun et meilleure gestion énergétique
- Robustesse face à l'environnement : plusieurs modes dégradés possibles
- Fusion de données : amélioration de la fiabilité des décisions et réduction des incertitudes
- Modularité du système : réduction de la charge de calcul par localité et intégrations futures simplifiées

Méthodologie d'évaluation

Montage Hardware in the Loop (HiL)

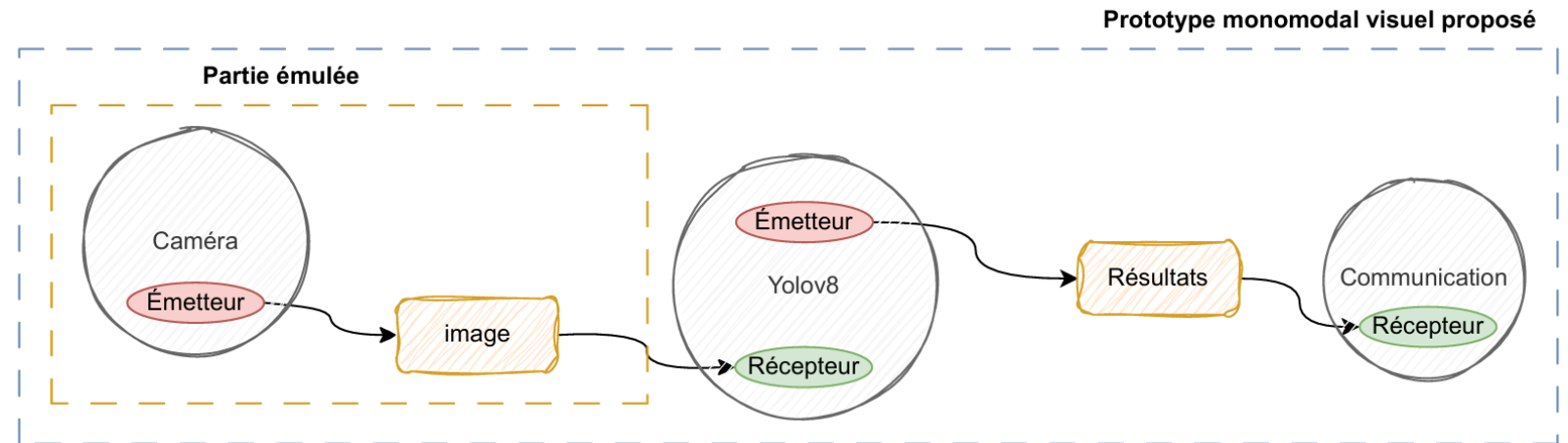
- Émulation du flux de données provenant d'un train à grande vitesse (jusqu'à 160 km/h)
- Intégration d'une cible embarquée dans la boucle



Montage de la chaîne d'évaluation

Évaluations

- Temps de transferts
- Temps d'inférences
- Comportement inter-éléments



Chaîne de traitement de l'architecture logicielle du prototype monomodal

Évaluation de la détection embarquée

Résultats en détection pour le modèle YOLOv8 nano

- Entraînements issus de deux bases de données de 10 000 images chacune

- mAP@0.5 > 0,97 sauf pour les défauts de surface
- mAP@0.5 > 0,93 sauf pour les joints

→ Détection améliorable par les autres capteurs

Optimisations

- Peu de perte par quantification (moins de 1%)
- D'autres optimisations à explorer (Pruning, NAS etc...)

Classe	FP32		FP16	
	mAP@0.5	mAP@0.5-0.95	mAP@0.5	mAP@0.5-0.95
Attache défectueuse	0.975	0.667	0.972	0.661
Défaut de surface	0.715	0.4	0.723	0.341
Boulon manquant	0.971	0.449	0.952	0.439
Toutes classes	0.887	0.487	0.882	0.480

Évaluation de la détection des défauts

Classe	FP32		FP16	
	mAP@0.5	mAP@0.5-0.95	mAP@0.5	mAP@0.5-0.95
Tresse	0.962	0.557	0.962	0.552
Cés de serrage	0.991	0.570	0.994	0.554
Éclisse	0.992	0.676	0.994	0.673
Joint	0.866	0.360	0.864	0.352
Soudure	0.953	0.501	0.950	0.499
Marque	0.937	0.528	0.938	0.523
Toutes classes	0.950	0.532	0.950	0.526

Évaluation de la détection des éléments de contexte

Évaluation des performances sur cible embarquée

Format	Désérialisation (ms)	Prétraitement (ms)	Inférence (ms)	Post-traitement (ms)	Temps total (ms)	Fréquence (FPS)
FP32						
Moyenne	1.25	4.07	9.06	3.12	17.50	57.1
Écart-type	0.23	0.75	0.06	0.10	1.14	3.56
Médiane	1.16	3.80	9.06	3.12	17.14	58.34
Minimum	1.07	3.64	9.01	1.73	15.45	64.72
Maximum	2.05	7.65	9.16	3.59	22.45	44.54
FP16						
Moyenne	1.22	4.01	5.36	3.10	13.69	73.0
Écart-type	0.21	0.05	0.76	0.10	1.12	5.48
Médiane	1.15	3.75	5.36	3.09	13.35	74.9
Minimum	1.05	3.58	5.31	2.85	12.79	78.18
Maximum	2.01	7.50	5.46	3.79	18.76	53.3

Performances de la chaîne HiL sur Nvidia Jetson Xavier (512 cœurs CUDA, 1377 MHz, 16 GB)

- Utilisation d'une tournée sur voie parisienne composée de 4416 images
- Évaluation du SDK TensorRT (2x plus rapide que PyTorch)
- Permet de traiter le flux d'une caméra seule (160 km/h = 30 FPS)
- Gain de 16 FPS entre FP32 et FP16

Perspectives

Multimodalité du système

- Création d'une base de données multimodales (Vision + Accélérométrie)
- Intégration des algorithmes des autres modalités : améliorer la détection des défauts de surface
- Étude des différents types de fusion de l'état de l'art (Fusion précoce, intermédiaire et tardive)

→ Besoin d'analyse fine de chaque modalité, données, synchronisation des capteurs

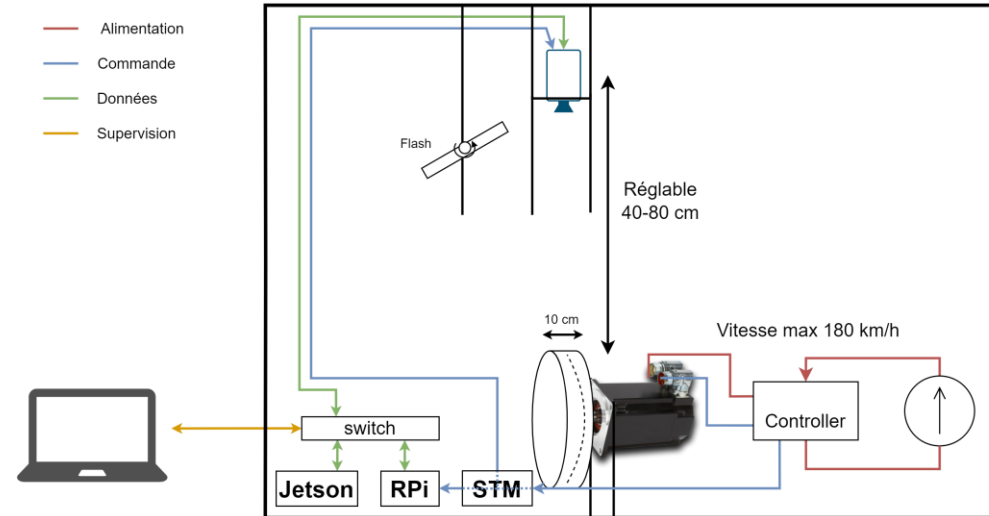
Adéquation algorithme-architecture

- Étude de la complexité calculatoire du modèle multimodal
- Découpage de la chaîne de traitement sous forme de blocs fonctionnels et étude de la charge de calcul
- Analyse des méthodes d'accélération des traitements (logicielles ou matérielles)/Réécriture algorithmique
- Implémentation et évaluation du modèle sur cibles hétérogènes (GPU, FPGA)

Conception d'un banc de validation HiL

Banc HIL : multimodalité incrémentale

- Problématique d'instrumentation
 - Caméra (Calibration)
 - Éclairage (Dimensionnement)
 - Unité de calcul (Puissance, consommation)
- Hardware in the loop
 - Contrainte de vitesse d'exposition des défauts
 - Gestion de données pour le traitement
- Validation de la chaîne d'acquisition/traitement (Du capteur au calculateur)
- Multimodalité incrémentale
 - Accélérométrie
 - Son



Banc SATIE

Caméra :
DALSA LINEA LA-GM-02K05A
Freq ligne : 50 kHz, capteur 14 μ m

Accéléromètre :
ASC RAIL-x15LN 2kHz

Roue bonus
accéléromètre



The diagram shows a large circle representing a wheel. A small circle, representing an accelerometer, is attached to the right side of the wheel. An arrow points from the text 'Accéléromètre' to this small circle. The wheel is positioned on a horizontal line representing the ground. A tripod-like structure is shown to the right of the wheel, with one leg touching the ground and another leg touching the accelerometer.

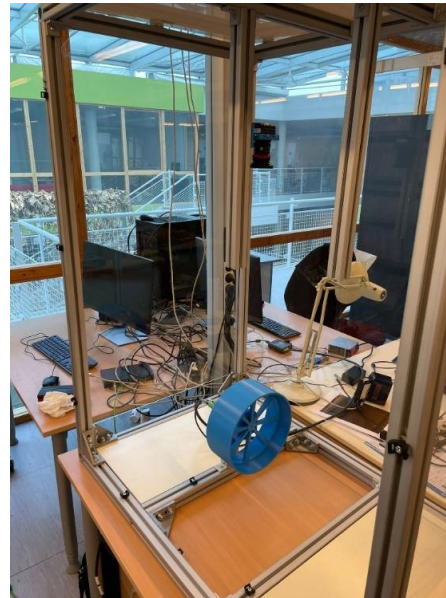


Schéma du banc d'essai proposé

Banc en cours de montage

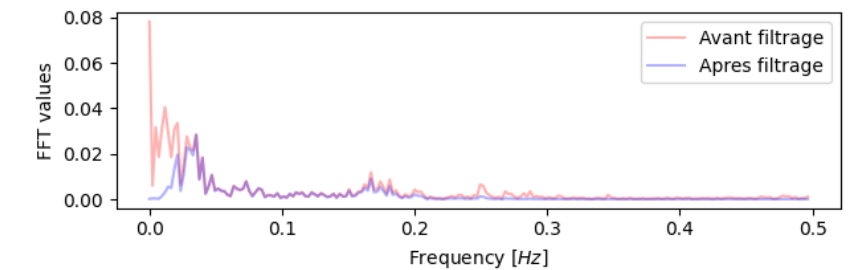
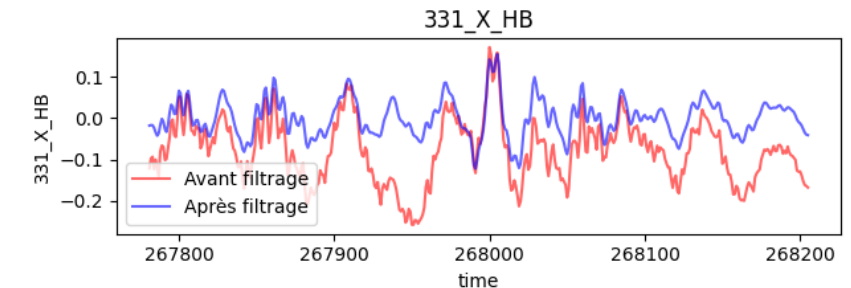
- Structure mécanique en place
- Validation de la caméra
- Automate de contrôle en cours de développement

→ Preuve de concept de la modélisation HIL d'une architecture embarquée

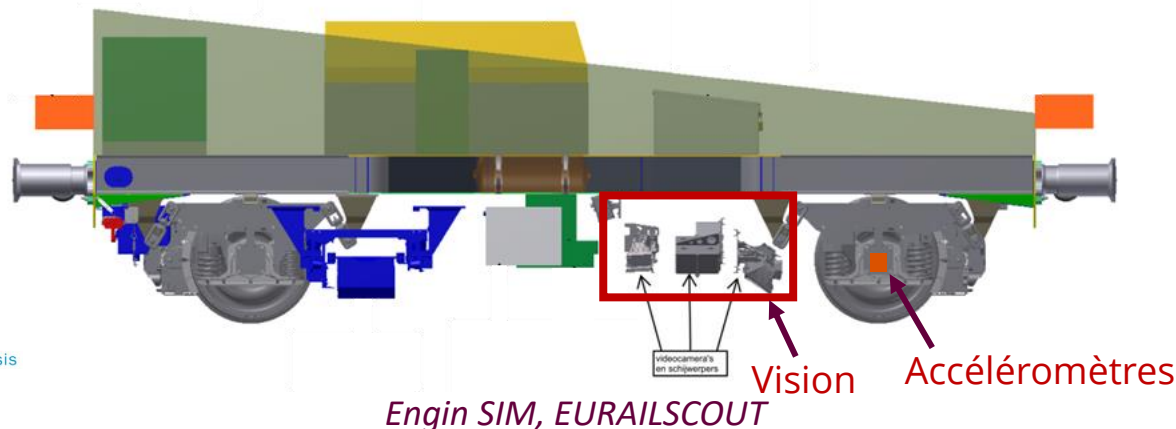
Acquisition de données multimodales

Création d'une base de données pour l'évaluation

- Représentation des défauts pour deux modalités
(Vision et accélérométrie)
 - Complémentarité/redondance des informations
 - Equilibre des données (Apprentissage ciblé)
- Définition d'une base de données de validation de détection des défauts (vers validation HIL)
- Corrélation des données multimodales en cours



Exemple de corrélation de données entre image et vibrations



Conclusion

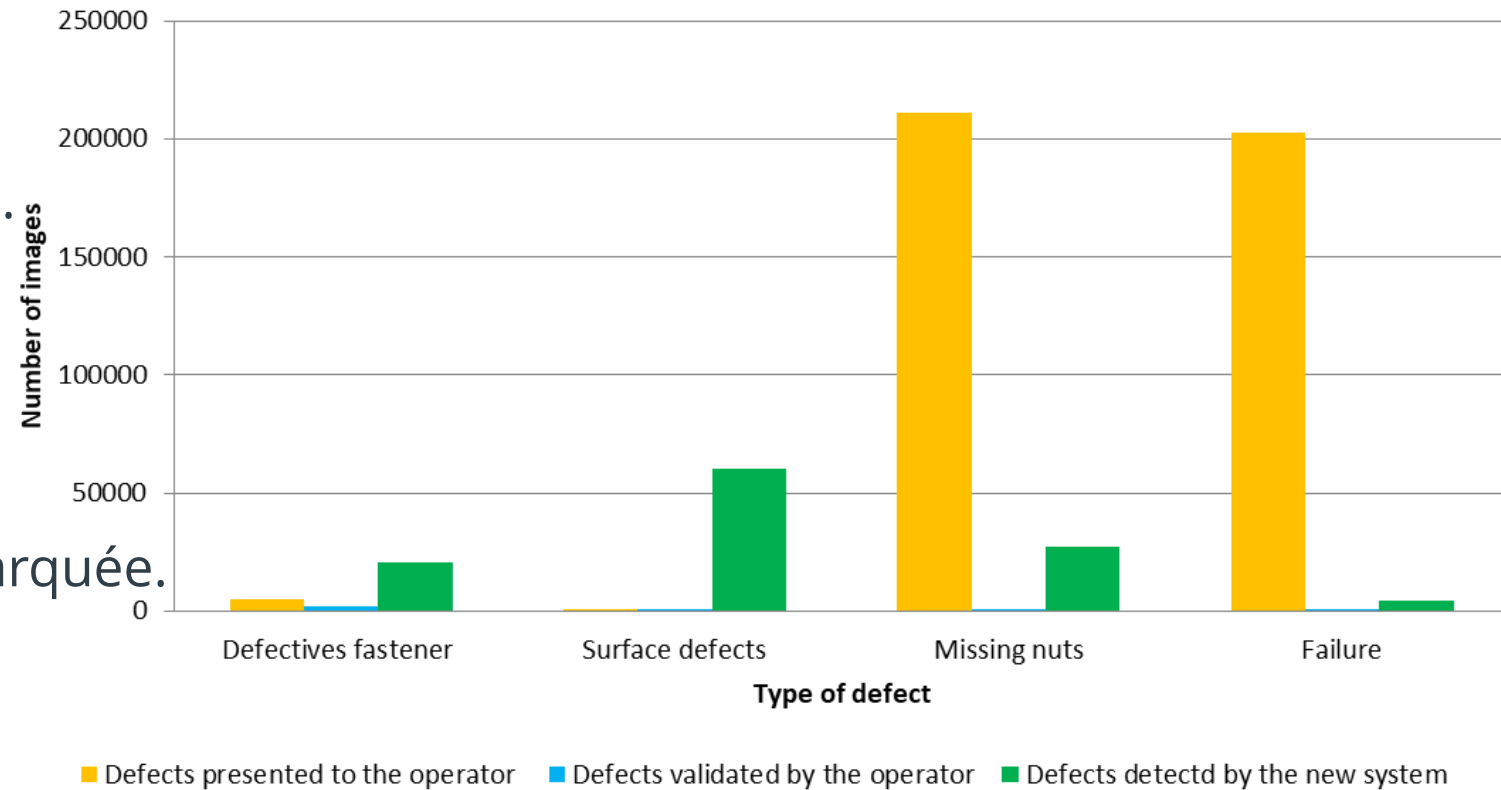
- Nécessité de plus et de meilleures données
- Multimodalité avec accéléromètres en cours de développement

Perspectives :

- Économique : Réduction des coûts.
- Sociétal : Sécurité renforcée.
- Environnemental : Durabilité.
- Scientifique : Avancées en IA embarquée.

Industriel :

- Potentiel d'application à l'échelle mondiale



Défauts ferroviaires : Vers une détection visuelle embarquée

Merci pour votre attention !

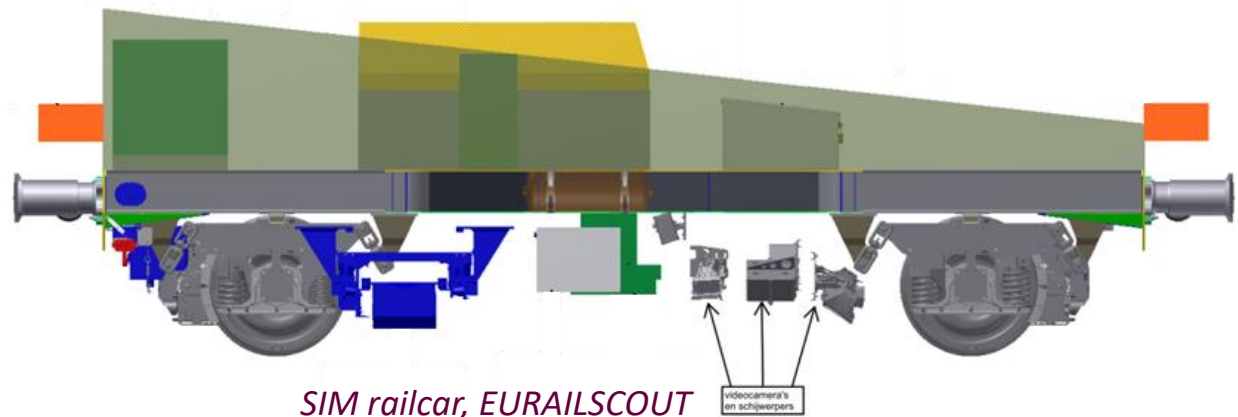
Des questions ?

Contact: sasa.radosavljevic@ens-paris-saclay.fr

Annexe – Evaluation CNN (640 px)

Model	AP@0.5 (%)									mAP All	Param (M) / FLOPs (G)
	<i>fastener</i>	<i>surface</i>	<i>nut</i>	<i>braid</i>	<i>clamp</i>	<i>fishplate</i>	<i>seal</i>	<i>weld</i>	<i>mark</i>		
Yolov5nu D	97.1	67.1	95.2	-	-	-	-	-	-	86.4	2.6 / 7.8
Yolov5nu C	-	-	-	97.3	94.0	98.9	87.5	95.0	93.8	94.4	
Yolov5nu D+C	87.4	60.1	35.6	90.5	57.4	93.2	81.3	91.1	88.1	76.1	
Yolov8n D	97.0	66.6	94.7	-	-	-	-	-	-	86.1	3.1 / 8.9
Yolov8n C	-	-	-	97.4	94.8	98.8	89.3	94.7	93.7	94.8	
Yolov8n D+C	87.2	56.1	33.2	90.6	56.5	93.3	82.9	91.9	89.6	76.3	
Yolov9t D	96.9	68.2	94.7	-	-	-	-	-	-	86.6	2.1 / 8.5
Yolov9t C	-	-	-	97.4	97.1	99.1	89.0	95.4	93.5	95.3	
Yolov9t D+C	88.6	56.9	33.0	91.2	64.7	93.4	82.8	90.8	88.0	76.6	
Yolov10n D	97.4	68.3	94.5	-	-	-	-	-	-	86.7	2.7 / 8.7
Yolov10n C	-	-	-	95.0	91.3	98.6	83.0	93.9	93.7	92.6	
Yolov10n D+C	86.9	58.5	40.2	89.1	54.5	92.6	79.5	91.3	86.8	75.5	
Yolov11n D	97.1	69.9	95.5	-	-	-	-	-	-	87.5	2.6 / 6.6
Yolov11n C	-	-	-	96.7	96.2	98.8	89.2	94.3	93.8	94.8	
Yolov11n D+C	87.9	59.8	34.6	90.1	60.3	93.1	81.7	91.3	88.7	76.4	
SSD-MobileNet-V2-FPNlite D	96.99	59.22	92.24	-	-	-	-	-	-	82.8	4.3 / 6.82
SSD-MobileNet-V2-FPNlite C	-	-	-	92.25	89.53	96.07	81.79	89.92	84.72	89.0	
SSD-MobileNet-V2-FPNlite D+C	84.26	47.07	27.51	84.04	45.31	88.57	63.02	87.02	79.81	67.40	
EfficientDet-D1 D	70.78	47.52	22.73	-	-	-	-	-	-	47.01	6.6 / 14.91
EfficientDet-D1 C	-	-	-	75.2	48.33	71.84	47.2	73.38	53.98	61.65	
EfficientDet-D1 D+C	67.87	41.99	9.67	64.76	17.80	59.79	33.16	37.00	48.65	42.30	
Yolov5nu P	-	72.9	-	-	-	-	97.6	-	-	85.7	2.5 / 7.1
Yolov8n P	-	72.8	-	-	-	-	99.5	-	-	86.2	3.0 / 8.1
Yolov9t P	-	73.4	-	-	-	-	99.5	-	-	86.5	1.9 / 7.6
Yolov10n P	-	68.8	-	-	-	-	97.4	-	-	83.1	2.7 / 8.2
Yolov11n P	-	69.5	-	-	-	-	99.5	-	-	84.5	2.6 / 6.3
EfficientDet-D1	-	46.77	-	-	-	-	100	-	-	67.01	6.6 / 14.91
SSD-MobileNet-V2-FPNlite	-	50.87	-	-	-	-	99.29	-	-	62.5	4.3 / 6.82

Annexe – Data acquisition



SIM railcar, EURAILSCOUT



Instrumented trolley, Railenium



Wheel-rail contact test bench, University of Huddersfield



Annexe – Stats

Breakdown of causes of derailments on one side of main track (MT) and on the other side of service track (ST)

