



# La maintenance prédictive dans la réalité

*De la mise en œuvre aux CFF à la recherche à la ZHAW*

 SBB CFF FFS

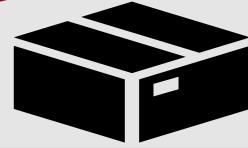
Wilfried Bürzle

Anciennement CFF, actuellement ZHAW  
ZHAW, Institut für mechanische Systeme



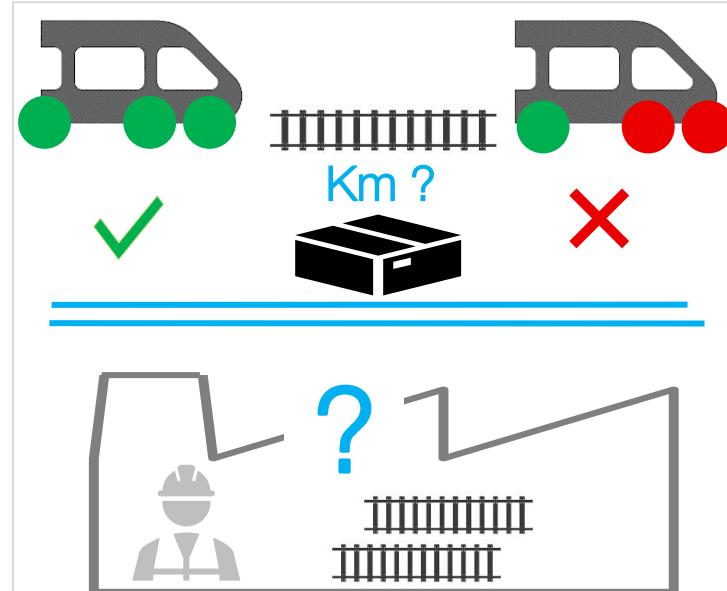
Objectif: maîtriser la chaîne logistique des essieux. À l'aide de données, de nouvelles stratégies de maintenance et d'un contrôle ciblé.

Autrefois



Black Box

- Date de maintenance et ressources nécessaires inconnues à l'avance.
- Peaks. La chaîne logistique ralentit.

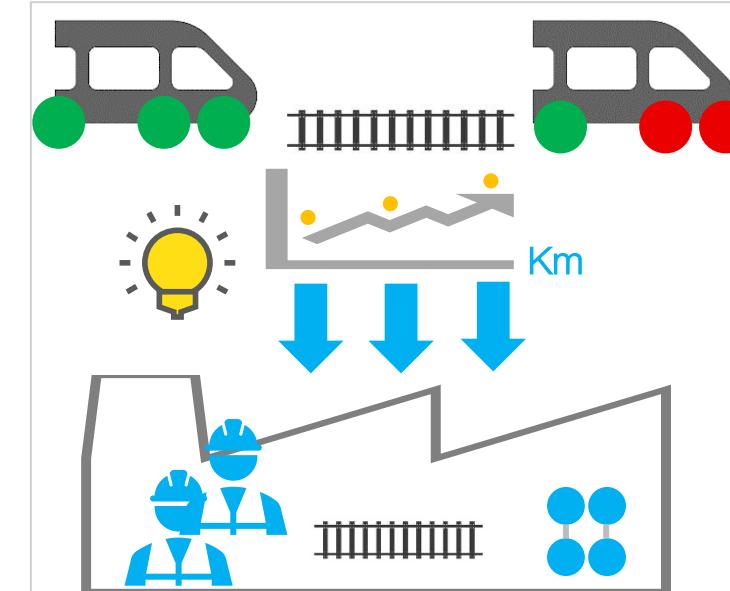


En place



Transparence

- Connaître l'évolution des dommages et les besoins en ressources.
- Être capable d'agir. Prévisibilité.



En transition



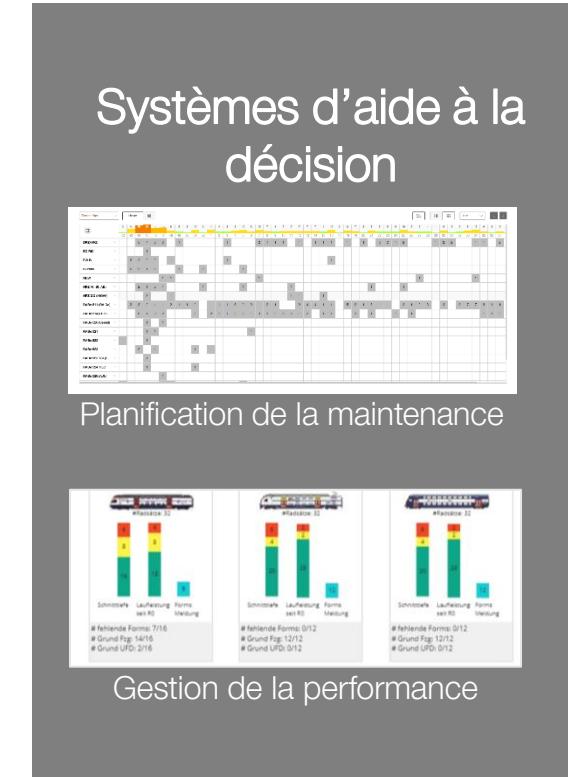
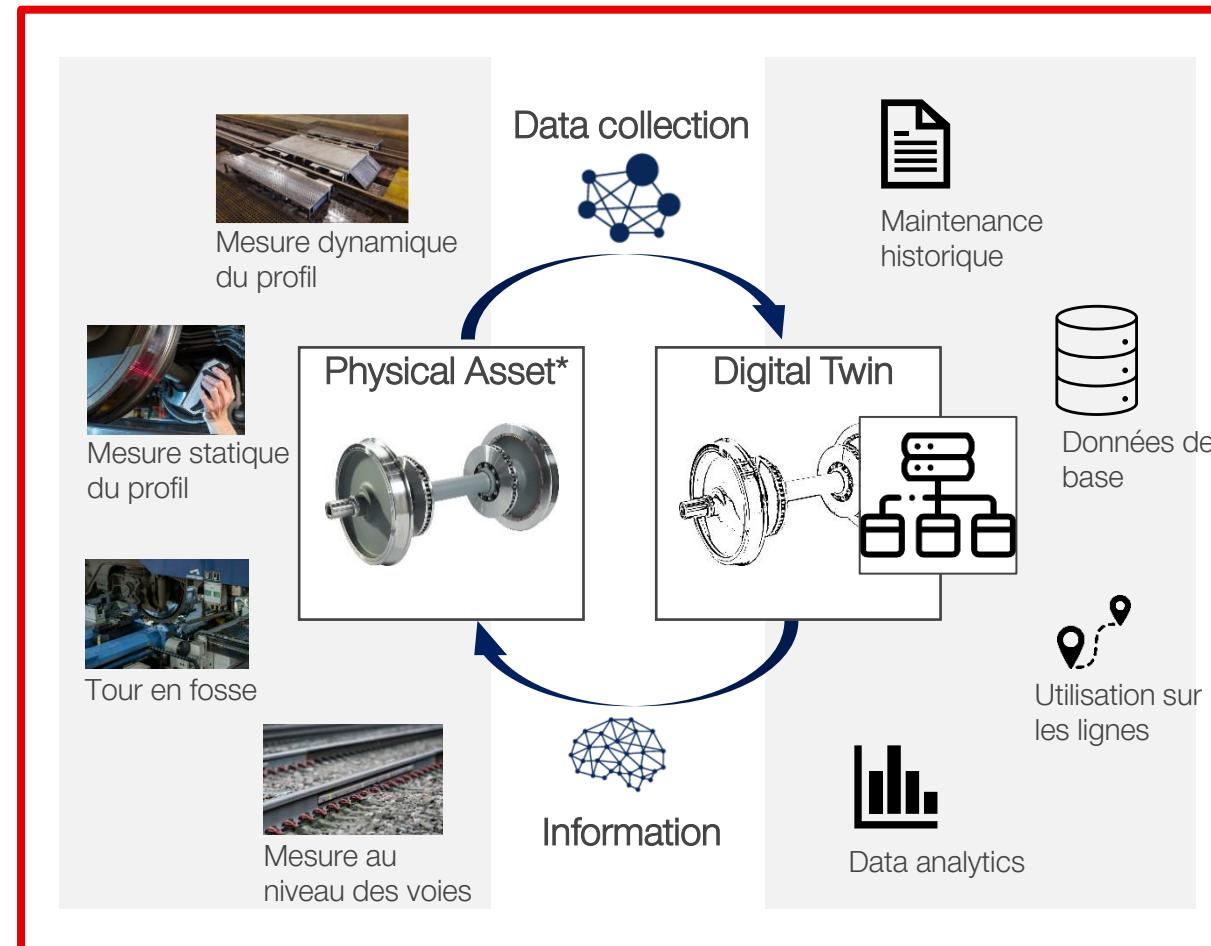
Matcher et en tirer des enseignements

- Gérer la chaîne logistique de manière proactive.
- Déterminer les mesures préventives.
- Dimensionner en fonction des besoins.



Hausse de la disponibilité  
Hausse de la fiabilité  
Réduction des coûts

# Réalisation de la vision grâce à trois éléments essentiels



# Le calendrier du véhicule révèle les besoins d'entretien futurs



Fahrzeugkalender

Filter Heute Fahrzeuge Flotten 120 Tage < >

	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	23	14	27	28	33	24	29	31	33	31
	KW 23	KW 24	KW 25	KW 26	KW 27	KW 28	KW 29	KW 30	KW 31	KW 32	KW 33	KW 34	KW 35	KW 36	KW 37	KW 38	KW 39	KW 37	KW 38	KW 39	
DPZ (Einzelfahrze...												1 Total									
DPZ (Komp)	1 Geplant	2 Total		1 Total	2 Total	2 Total	2 Total	1 Total				3 Total	3 Total	1 Total	4 Total	2 Total					
DPZ/HVZ	1 Total	1 Geplant			1 Total							1 Total	1 Total	2 Fällig		1 Total					
DTZ	2 Total	1 Total	1 Geplant	1 Total	1 Fällig			1 Total				1 Total		1 Total	1 Total	2 Total	2 Total	1 Total	3 Total		
ETR 610												1 Total		1 T901							
EWIV	2 Total	1 Fällig	1 Total	3 Total	1 Total	3 Total		1 Total				1 Total		1 T913	1 T914		1 Total				
IC2000	5 Geplant	1 Fällig	1 Geplant	2 Total	1 Total	1 Total	2 Total	1 Total				1 T914			3 Total	1 Total					
ICN	3 Geplant	1 Geplant	2 Fällig									1 TDG				1 Total	1 Total	1 Total			
NPZ	3 Total	1 Total	2 Total	2 Total	4 Total	2 Total	1 Total	1 Total	1 Total			1 Total	2 Total	1 Total	2 Total	2 Total	5 Total	3 Total	4 Total		
RABe/RABe 502	2 Geplant	1 Fällig	1 Total	1 Total	1 Total		1 Total	4 Total				4 Total	3 Total	2 Total	2 Total	1 TDG	2 Total	2 Total	1 Total		
RABe 501	1 Geplant																				
RABe 503	1 Geplant				1 Total	1 T901	1 T913	1 T914			1 T901	1 T913	1 T914		1 Total	1 T901	1 T913	1 T914			
RABe 511	3 Geplant	1 Total	1 TDG	1 Fällig	3 Total	2 Total	1 Total	3 Total	2 Total	2 Total	2 Total	1 Total	3 Total	2 Total	1 Total	1 T913	1 T914	1 Total	1 Total	3 Total	

Le calendrier du véhicule révèle les besoins d'entretien futurs



## Fahrzeugkalender



# Vue avec toutes les informations pertinentes pour la prise de décision



94 85 0514061-6 (RABe 514 (DTZ)/ At1 514)



Sicht R0 andere Instandhaltung



R0 Planen

R0 löschen

Details

## S1-R0 Meldungen

✉ 2024-04-18  
+Radsatz WE1R Nebengeräusche

Drehgestellpos.

TDG1 TDG2

1 2 3 4

TRS1 TRS2 TRS2 TRS1

LDG1 LDG2

1 2 3 4

LRS1 LRS2 LRS2 LRS1

LDG2 LDG1

4 3 2 1

LRS1 LRS2 LRS2 LRS1

TDG2 TDG1

4 3 2 1

TRS1 TRS2 TRS2 TRS1

Plandatum R0

-

Fälligkeit R0

25. Juni 24 25. Juni 24

Prognose R0

31. Aug. 25 28. Aug. 25

Restlauf km R0

12'014

12'014

-5'023

255'265

475'207

22'593

252'071

248'486

Druchm. (mm)

918 918

906 907

879 876

915 915

895 895

882 878

896 896

917 917

R0/RS

R0 R0

R0 R0

R0 R0

R0 R0

T913/14 (km IVOG)

367'975 367'975

242'583 242'583

242'583 242'583

367'975 551'835

T911/12 (km IVOG)

78'141 78'141

210'302 210'302

210'302 210'302

78'141 78'141

T910 (km IVOG)

n. V.

n. V.

n. V.

n. V.

T920 (gew. Ende)

-

-

-

-

Mass&Spiel

-

-

-

-

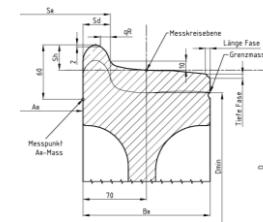
Bandagen

# Modèles de prévision: des statistiques classiques au «machine learning»

## Usure du profil

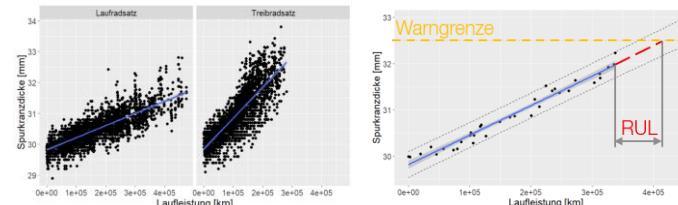
Objectif: prévision de la durée de vie restante (RUL) jusqu'au niveau d'alerte

Données: Mesure du profil des essieux



### Modèle de prévision:

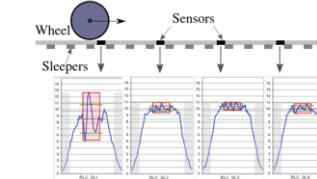
- Régression multivariée
- Prise en compte de cinq dimensions de profil, kilométrage, type d'essieu



→ Simple, robuste, facile à interpréter

## Défauts de la surface de roulement

Objectif: détection des dommages sur la surface de roulement et prévision de la durée de vie restante



### Modèle de prévision:

- Ingénierie manuelle des fonctionnalités via une fenêtre coulissante

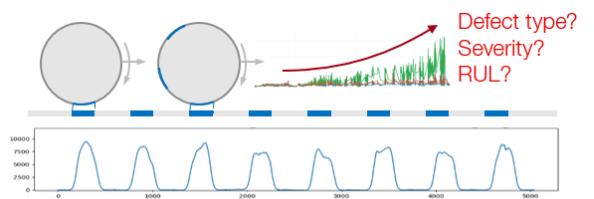


→ Complexé, nécessite beaucoup de calculs

## Diagnostic et prévision des dommages ETH zürich

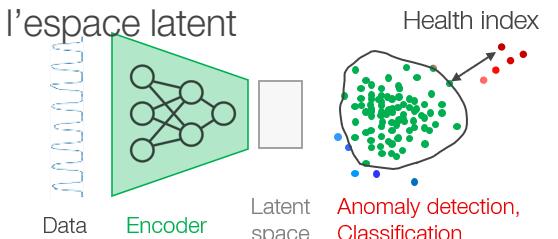
Objectif: Détection, classification, évaluation et prévision des dommages

Données: GED, accélération



### Modèle de prévision:

- Ingénierie des caractéristiques via auto-encodeurs
- Détection et classification des anomalies dans l'espace latent



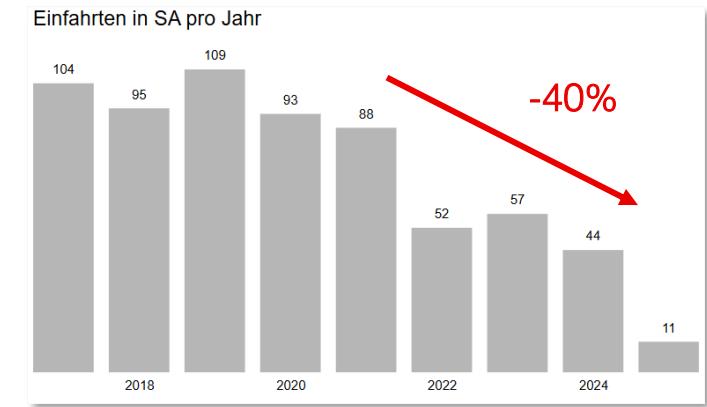
→ Prometteur, très complexe

# Les modèles de prévision et les jumeaux numériques sont des moyens pour atteindre un but

Succès: réduction maximale des interventions en atelier!

La digitalisation nécessite des processus commerciaux adaptés

- Valeur ajoutée grâce à une gestion active des processus
- Implémentation très interdisciplinaire

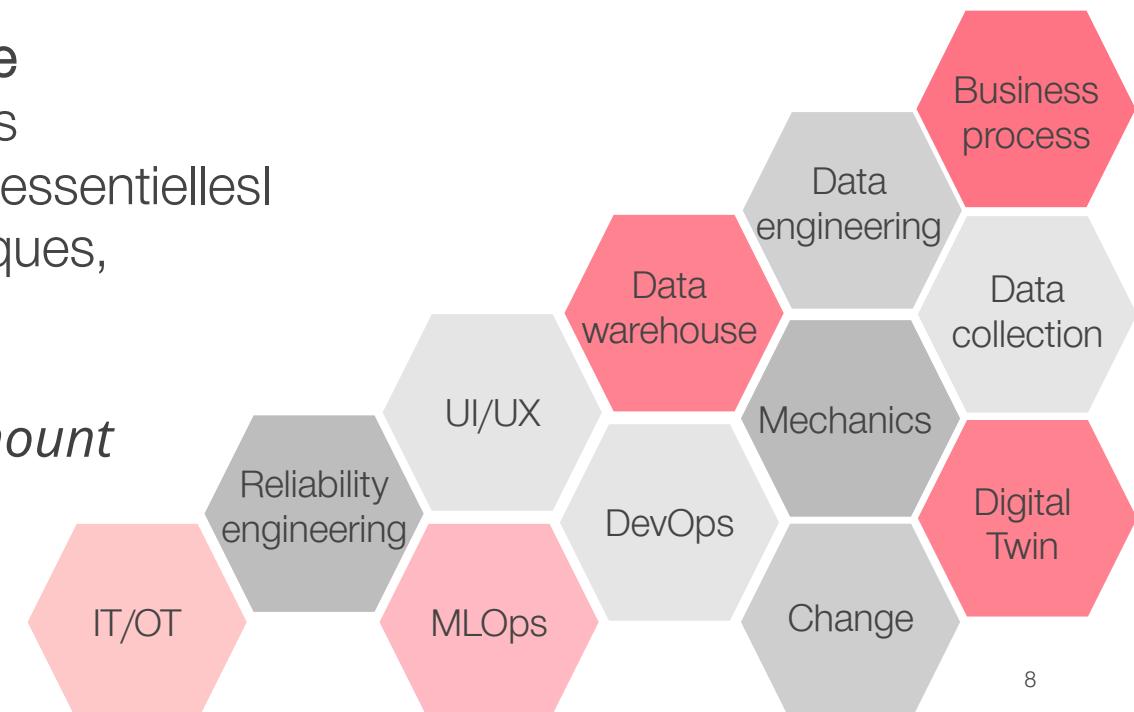


Les modèles prévisionnels génèrent une valeur ajoutée

- Permettent une planification et un contrôle proactifs
- La simplicité, la robustesse et l'interprétabilité sont essentielles!
- ... mais les modèles statistiques sont phénoménologiques, basés sur des données et non sur la causalité

*“All the impressive achievements of deep learning amount to just curve fitting.”*

Judea Pearl



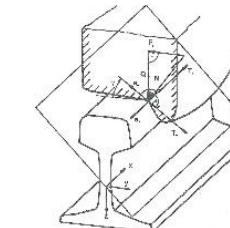
# Compréhension causale nécessaire pour résoudre les problèmes à la source

La **fatigue du contact de roulement (RCF)** est un **défi** pour certaines flottes

- Ne concerne «que» 5% des essieux, mais représente 90% des traitements d'essieux
- Les défauts sont difficiles à prévoir → Maintenance réactive
- Il est nécessaire de bien connaître le matériel roulant, l'infrastructure et les conditions d'utilisation → Évaluation globale dans des conditions spécifiques



## Matériel roulant



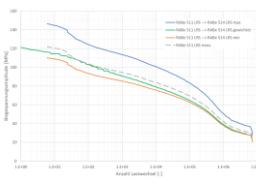
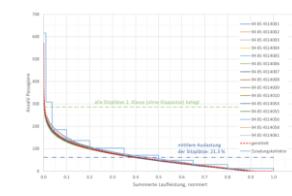
## Infrastructure



## **RCF Assessment**

- Dynamique des systèmes à plusieurs éléments
- Mécanisme de contact avec couplage roue-rail représentatif
- Modèles de fatigue (début de fissure) pour l'évaluation

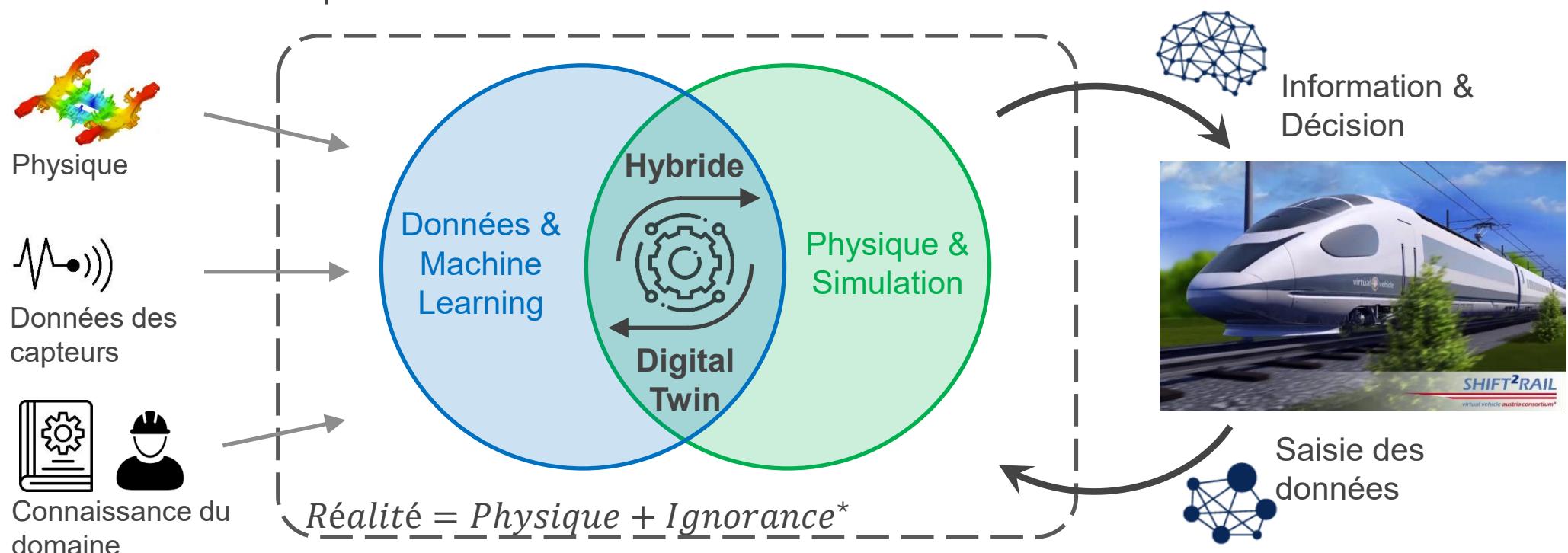
## Condition d'utilisation



# Jumeaux numériques hybrides pour une maintenance prédictive et basée sur l'état avec plus de causalité

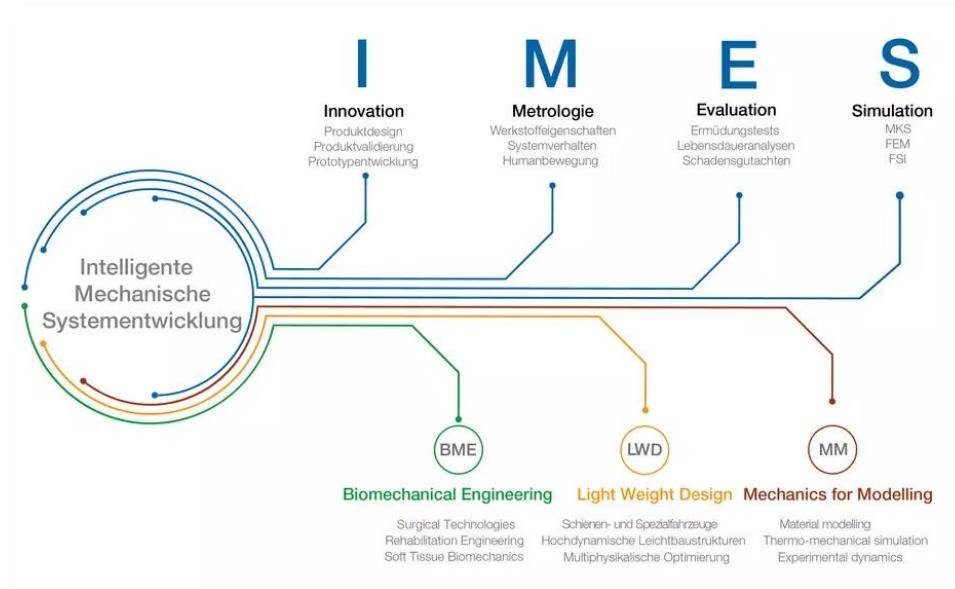
## Jumeaux numériques hybrides pour la description de l'état, le diagnostic, le pronostic et l'optimisation

- Les jumeaux numériques hybrides associent physique et «Machine Learning»
- En réalité:
  - Peu de capteurs, peu de données
  - Peu de dommages bien documentés
  - États de fonctionnement manquants dans les données



## 3 domaines, 35 collaborateurs

- Mécanique des structures, Simulation & Optimisation
- Technique ferroviaire



<https://www.zhaw.ch/de/engineering/institute-zentren/imes>

## Domaines de prestations & collaboration

- 1) Bachelor en génie mécanique
  - Formation: mécanique technique, FEM, construction légère
  - Spécialisation: technique mécanique des véhicules ferroviaires
- 2) Formation continue
  - CAS sur la technique mécanique des véhicules ferroviaires, avec la branche ferroviaire suisse
- 3) Projets financés par des tiers
  - Prestations:
    - Expertise sur la rigidité
    - Analyses des dommages
    - Mesure de la charge opérationnelle
    - Recherche appliquée & développement
      - En collaboration avec des partenaires industriels
      - Soutien de Innosuisse, Eureka, etc.
- 4) Travaux d'étude
  - Env. 20 travaux d'étude (Bachelor, Master) par an

# CAS sur la technique mécanique des véhicules ferroviaires

## Formation continue en quatre modules

- Développée en étroite collaboration avec l'Union des transports publics (UTP)
- Possibilité de suivre les modules individuellement

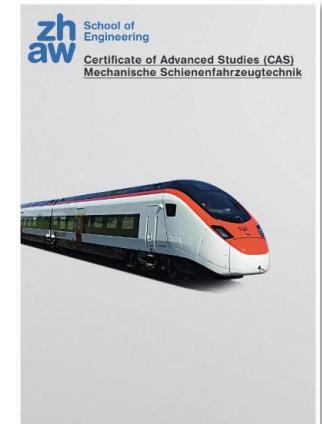
Modul	Inhalt
A: Grundlagen Schienenfahrzeuge und Betrieb	<ul style="list-style-type: none"><li>• Einführung und Allgemeines, rechtliche Grundlagen</li><li>• Bewegungswiderstände von Schienenfahrzeugen</li><li>• Zugförderung, Z-v-Diagramm, Antriebscharakteristika</li><li>• Antriebstechnologien (Diesel und elektrisch)</li><li>• Bahnproduktion und Rollmaterial-Management</li></ul>
B: Mechanische Hauptkomponenten	<ul style="list-style-type: none"><li>• Zug- und Stosseinrichtungen</li><li>• Drehgestelle und Radsätze</li><li>• Klimatisierung von Innenräumen</li><li>• Korrosionsschutz, Beschichtung, Aussenreinigung</li><li>• Wagenkasten und Festigkeit nach EN 12663 bzw. EN 15227</li><li>• Schweißen im Schienenfahrzeugbau EN 15085</li></ul>
C: Interaktion Rad-Schiene	<ul style="list-style-type: none"><li>• Lichtraumprofil und Fahrzeugbegrenzungslinie</li><li>• Kräfte zwischen Schiene und Rad, Rad-Schiene-Kontakt</li><li>• Sinuslauf, Laufstabilität und Laufdynamik</li><li>• Bogenlauf und Gleisüberhöhung</li><li>• Entgleisen durch Aufklettern, Heumannscher Einser</li></ul>
D: Spezialsysteme	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bremseinrichtungen</li><li>• Einstiegssysteme</li></ul>

## Méthodologie

- Forte orientation pratique grâce à des conférences, des excursions et des travaux de groupe
- 50% à l'IMES
- 50% par des intervenants externes issus du secteur ferroviaire (RhB, SBB, zb, Stadler, BAV)

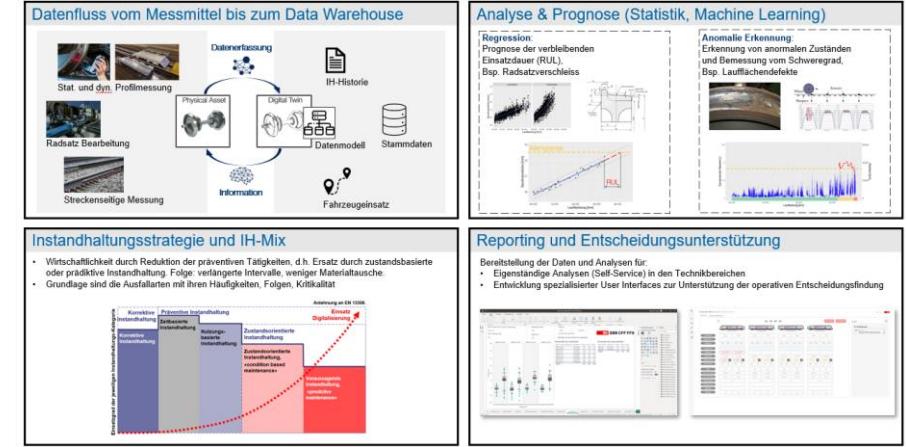
## Coût et durée

- Durée: 6 mois
- Volume: 12 ETCS, soit 8 leçons par semaine
- Coût: CHF 6'900.-



# La maintenance prédictive dans la pratique

- 1) La maintenance prédictive est bien plus qu'un simple modèle de prévision
  - Stratégie de maintenance intégrée dans un ensemble de mesures
  - Les types de défaillance, leur fréquence et leurs conséquences sont déterminants
  - Il faut une méthode (RCM, Reliability Engineering) pour définir les mesures de maintenance
- 2) La gestion des données est très complexe et coûteuse
- 3) Conception des processus et culture du changement
  - Confiance dans les données et les modèles
  - Développement de logiciels basé sur le commerce et l'IT
  - Une volonté de changement et un leadership sont nécessaires



Danke, merci & grazie.



Zürcher Hochschule für  
Angewandte Wissenschaften

**School of Engineering**  
IMES Institut für Mechanische Systeme

Dr. Wilfried Bürzle

Technikumstrasse 9  
Postfach  
CH-8401 Winterthur

Tel: +41 58 934 48 32

E-Mail: [wilfried.buerzle@zhaw.ch](mailto:wilfried.buerzle@zhaw.ch)  
[www.zhaw.ch/imes](http://www.zhaw.ch/imes)