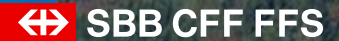


La maintenance prédictive dans la réalité

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




Wilfried Bürzle
Anciennement CFF, actuellement ZHAW
ZHAW, Institut für mechanische Systeme

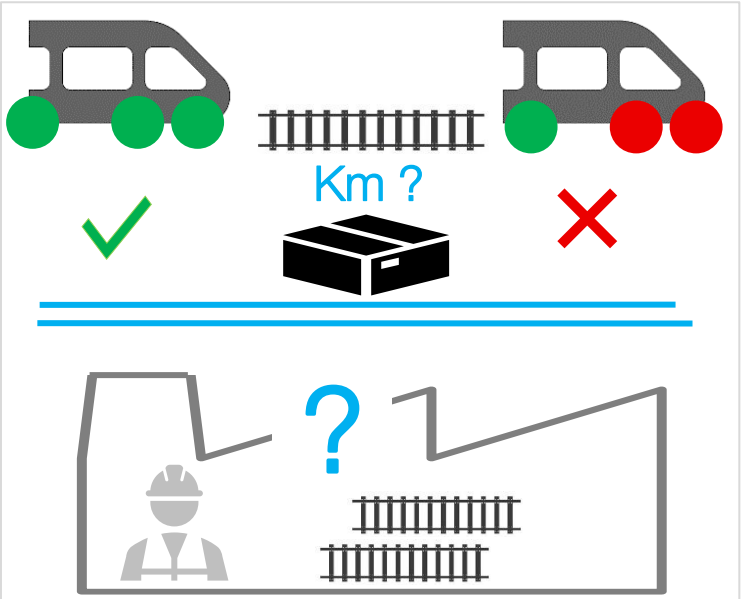


Objectif: maîtriser la chaîne logistique des essieux. À l'aide de données, de nouvelles stratégies de maintenance et d'un contrôle ciblé.


Autrefois

Black Box

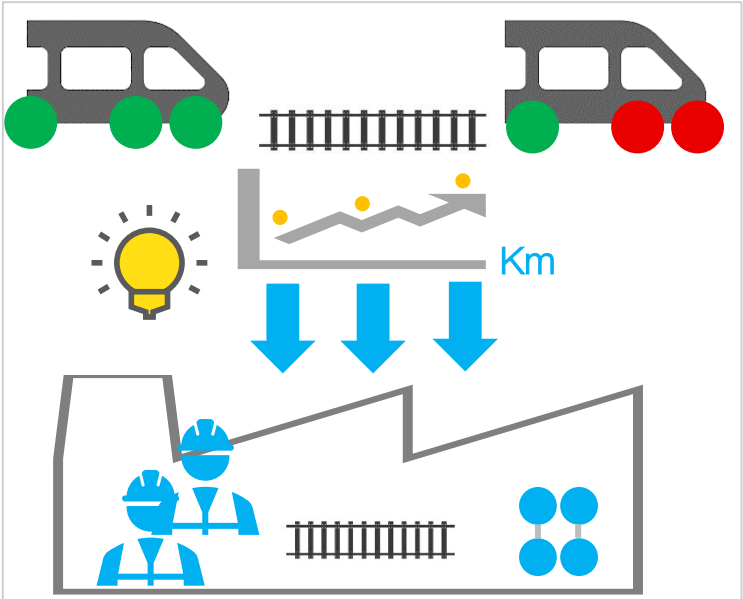
- Date de maintenance et ressources nécessaires inconnues à l'avance.
- Peaks. La chaîne logistique ralentit.




En place

Transparence

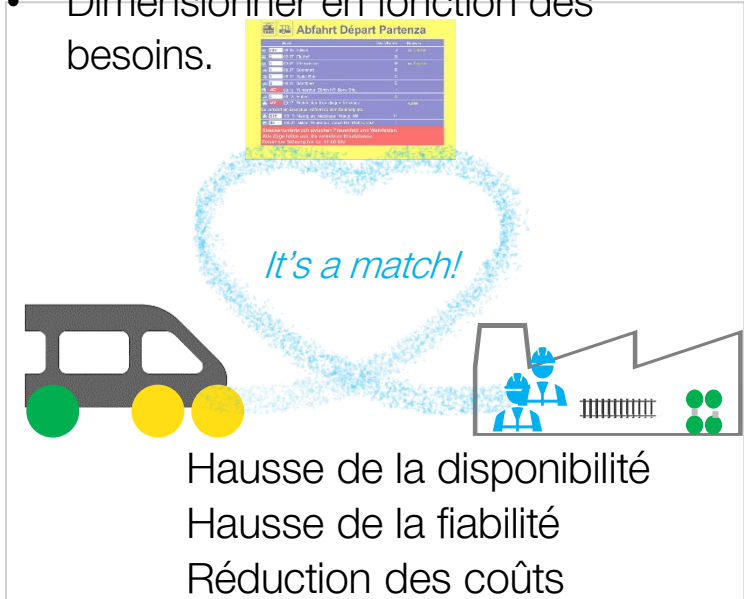
- Connaître l'évolution des dommages et les besoins en ressources.
- Être capable d'agir. Prévisibilité.



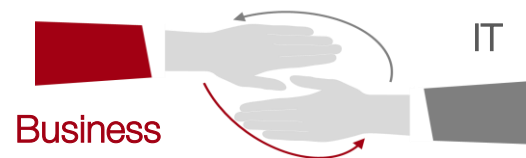
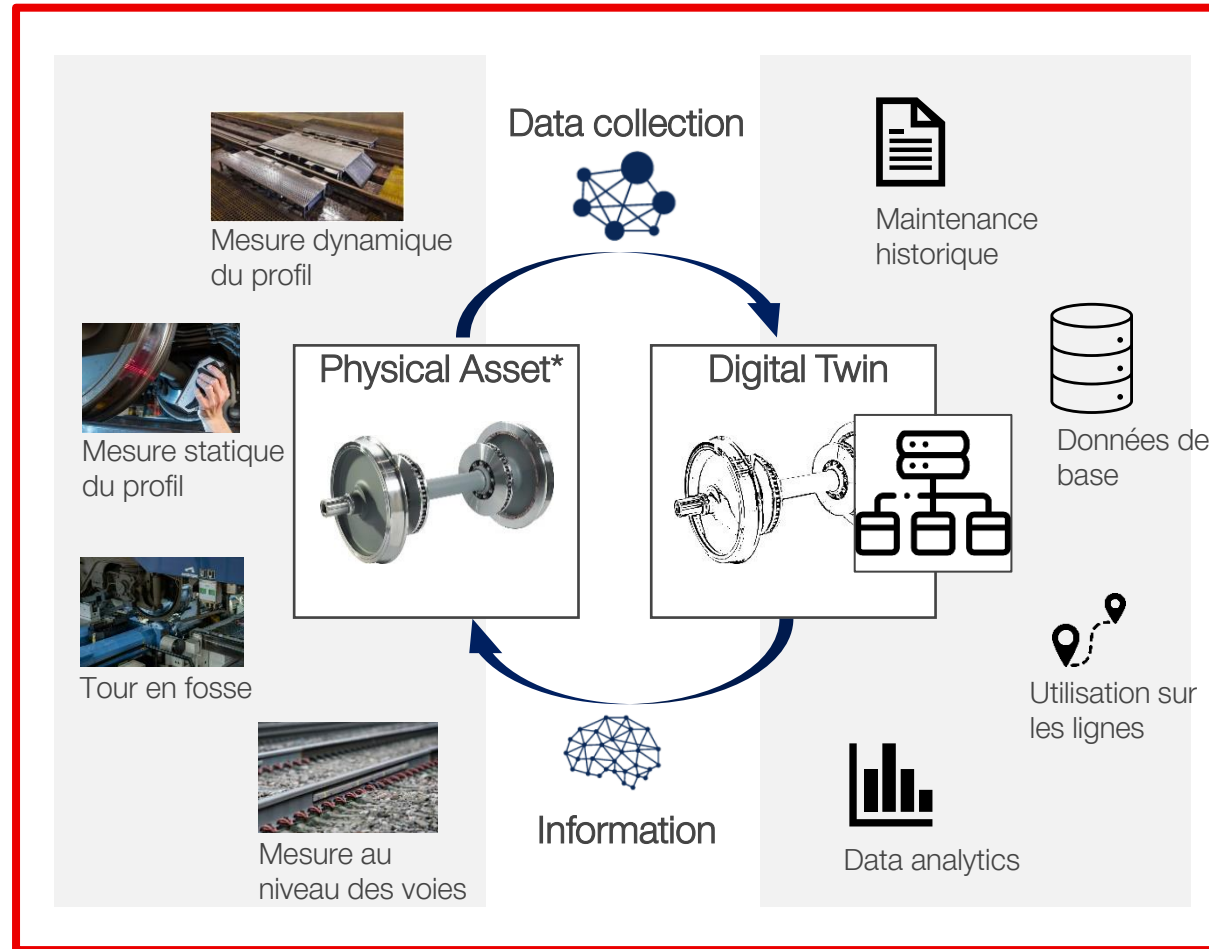
En transition

Matcher et en tirer des enseignements

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



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	19	25	22	28	32	25	14	27	28	33	25	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
DPZ (Einzelfahrze...											1 Total 1 LDG						
DPZ (Komp)	1 Geplant	2 Total 2 Geplant 2 TDG 1 Fällig		1 Total 1 TDG 1 Fällig	2 Total 2 TDG 2 Fällig	2 Total 2 TDG 1 Fällig	2 Total 2 TDG	1 Total 1 TDG			3 Total 3 TDG	3 Total 3 TDG	1 Total 1 TDG	4 Total 1 LDG 3 TDG	2 Total 1 TDG 1 T914	2 Total 2 TDG	2 Total 2 TDG
DPZ/HVZ	1 Total 1 TDG	1 Geplant			1 Total 1 LDG							1 Total 2 Fällig	1 Total 1 TDG		1 Total 1 TDG	1 Total 1 TDG	1 Total 1 LDG
DTZ	2 Total 1 Geplant 1 TDG 1 Fällig	1 Total 2 Geplant 1 TDG 1 Fällig	1 Geplant	1 Total 1 Geplant 2 Fällig	1 Fällig		1 Total 1 TDG			1 Total 1 TDG		1 Total 1 TDG		1 Total 1 LDG 1 TDG	2 Total 1 LDG 1 TDG	1 Total 1 LDG	3 Total 2 LDG 1 TDG
ETR 610								1 Total 1 T913 1 T914		1 T901							
EWIV	2 Total 3 Geplant 1 LDG 2 Fällig	1 Fällig	1 Total 2 Fällig	3 Total 4 Fällig	1 Total 1 Fällig	3 Total 3 Fällig				1 Total 1 T913 1 T914						1 Total 1 T913 1 T914	1 Total 1 T913 1 T914
IC2000	3 Geplant 1 Fällig	1 Geplant	2 Total 1 T913 1 T914 4 Fällig	1 Total 2 Fällig	1 Total 1 LDG	2 Total 2 Fällig	1 Total 1 T913 1 T914				1 T914		3 Total 4 T913 3 T914	1 Total 1 T914	1 Total 1 LDG	1 Total 1 T913	1 Total 1 LDG 1 T913 1 T914
ICN	3 Geplant	1 Geplant 2 Fällig							1 TDG					1 Total 2 T913 2 T914	1 Total 1 TDG		
NPZ	3 Total 1 Geplant 2 LDG 1 TDG	1 Total 1 TDG 1 Fällig	2 Total 1 TDG 1 Fällig	2 Total 2 TDG	4 Total 1 LDG 3 TDG	2 Total 1 LDG 1 TDG	1 Total 1 LDG	1 Total 1 LDG	2 Total 2 TDG	1 Total 1 LDG 1 TDG	3 Total 1 LDG 2 TDG		2 Total 1 LDG 1 TDG	2 Total 1 LDG 1 TDG	3 Total 1 LDG 4 TDG	3 Total 3 TDG	4 Total 4 TDG
RABDe/RABe 502	2 Geplant 1 Fällig	1 Total 4 Geplant 1 TDG 3 Fällig	1 Total 1 Fällig	1 Total 1 LDG 2 TDG		1 Total 1 LDG	4 Total 4 TDG		1 Total 1 TDG		4 Total 4 TDG	3 Total 3 TDG 1 T914	2 Total 2 TDG	2 Total 1 LDG 1 TDG 1 T913	1 TDG	2 Total 2 LDG	1 Total 1 LDG
RABe 501	1 Geplant																
RABe 503	1 Geplant			1 Total 1 T913 1 T914					1 T901 1 T913 1 T914		1 Total 1 T901 1 T913 1 T914		1 T901 1 T913 1 T914				
RABe 511	3 Geplant	1 Total 4 Geplant 4 Fällig	1 TDG 1 Fällig	3 Total 2 TDG 2 Fällig	2 Total 2 TDG	1 Total 1 LDG 1 TDG	3 Total 3 TDG	2 Total 2 TDG	2 Total 2 TDG		1 Total 1 TDG	3 Total 1 LDG 3 TDG	2 Total 1 LDG 1 TDG	1 T913 1 T914	1 Total 1 TDG	1 Total 1 LDG 1 TDG	3 Total 4 TDG

Le calendrier du véhicule révèle les besoins d'entretien futurs



Fahrzeugkalender



Filter

Heute



Fahrzeuge

Flotten

120 Tage



	12	14	19	25	22	28	32	25	14	27	28	33	25	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
DPZ (Einzelfahrze...											1 Total 1 LDG						
DPZ (Komp)	1 Geplant	2 Total 2 Geplant 2 TDG 1 Fällig		1 Total 1 TDG 1 Fällig	2 Total 2 TDG 2 Fällig	2 Total 1 TDG 1 Fällig	2 Total 2 TDG	1 Total 1 TDG			3 Total 3 TDG	3 Total 3 TDG	1 Total 1 TDG	4 Total 1 LDG 3 TDG	2 Total 1 TDG 1 T914	2 Total 2 TDG	2 Total 2 TDG
DPZ/HVZ	1 Total 1 TDG	1 Geplant			1 Total 1 LDG							1 Total 2 Fällig	1 Total 1 TDG		1 Total 1 TDG	1 Total 1 TDG	1 Total 1 LDG
DTZ	2 Total 1 Geplant 1 TDG 1 Fällig	1 Total 2 Geplant 1 LDG 1 Fällig	1 Geplant	1 Total 1 Geplant 2 Fällig	1 Fällig		1 Total 1 TDG			1 Total 1 TDG		1 Total 1 TDG		1 Total 1 LDG 1 TDG	2 Total 1 LDG 1 TDG	1 Total 1 LDG	3 Total 2 LDG 1 TDG
94 85 0514061-6 DTZ / At1 514 LDG: 25.5.24 TDG: 28.8.25 RSL: 17.1.26 RST: 18.11.28 R0: 25.6.24 T913: 01.1.26 T914: 01.1.26				R0 Fällig													
94 85 0514007-9 DTZ / At1 514 TDG: 27.9.24 RST: 05.1.28 R0: 05.6.24 T913: 16.2.25 T914: 16.2.25	R0 Fällig																R0 TDG
94 85 0514004-6 DTZ / Bt4 514 TDG: 08.6.24 RST: 27.6.29 T913: 03.6.25 T914: 03.6.25	R0 TDG																
94 85 0514048-3 DTZ / B2 514 LDG: 12.6.24 RSL: 30.1.31 T913: 05.2.28 T914: 05.2.28		R0 LDG															
94 85 0514016-0 DTZ / At1 514 TDG: 16.7.24 RST: 30.7.28 T913: 20.12.25 T914: 20.12.25							R0 TDG										
94 85 0514057-4 DTZ / B3 514 LDG: 29.9.24 TDG: 09.8.24 RSL: 30.4.26 RST: 10.5.29 T913: 20.7.26 T914: 20.7.26										R0 TDG							R0 LDG

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

LDG1

LDG2

LDG2

LDG1

TDG2

TDG1

Radsatzpos. Fz.

1

2

3

4

1

2

3

4

4

3

2

1

4

3

2

1

Radsatzpos.

TRS1

TRS2

TRS2

TRS1

LRS1

LRS2

LRS2

LRS1

LRS1

LRS2

LRS2

LRS1

TRS1

TRS2

TRS2

TRS1

Plandatum R0

-

-

-

-

Fälligkeit R0

25. Juni 24

25. Juni 24

-

-

-

-

-

-

Prognose R0

31. Aug. 25

28. Aug. 25

25. Mai 24

10. Sept. 25

15. Okt. 26

14. Juli 24

4. Sept. 25

29. 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

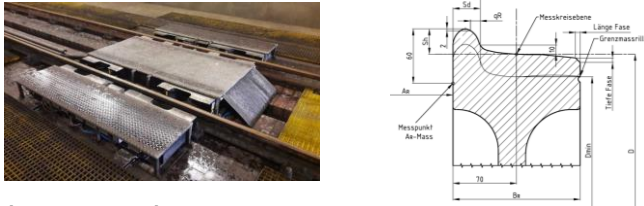


Modèles de prévision: des statistiques classiques au «machine learning»

Usure du profil

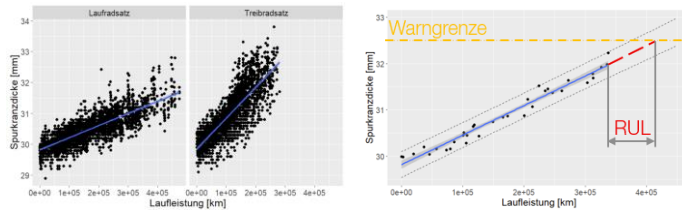
Objectif: prévision de la durée de vie restante (RUL) jusqu'au niveau d'alerte

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

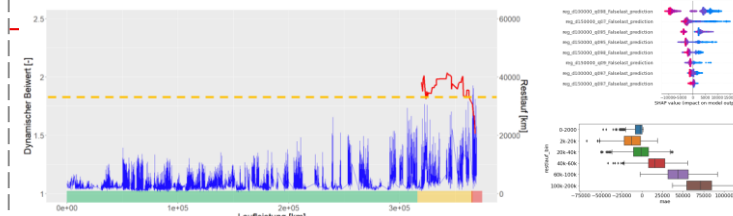
Défauts de la surface de roulement

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

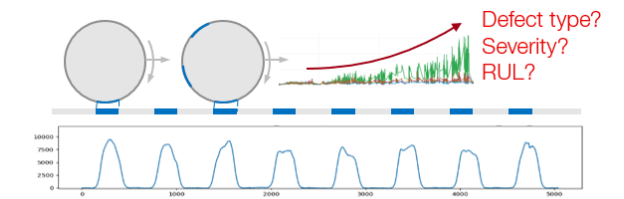


→ Complexe, nécessite beaucoup de calculs

Diagnostic et prévision des dommages **ETH** zürich

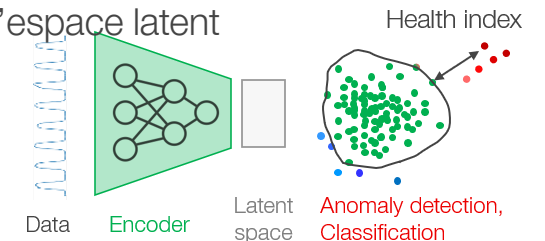
Objectif: Détection, classification, évaluation et prévision des dommages

Données: GED, accélération



Modèle de prévision:

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



→ Prometteur, très complexe

Rombach, K et al. Contrastive Learning for Fault Detection and Diagnostics in the Context of Changing Operating Conditions and Novel Fault Types. *Sensors* 2021, 21, 3550.

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

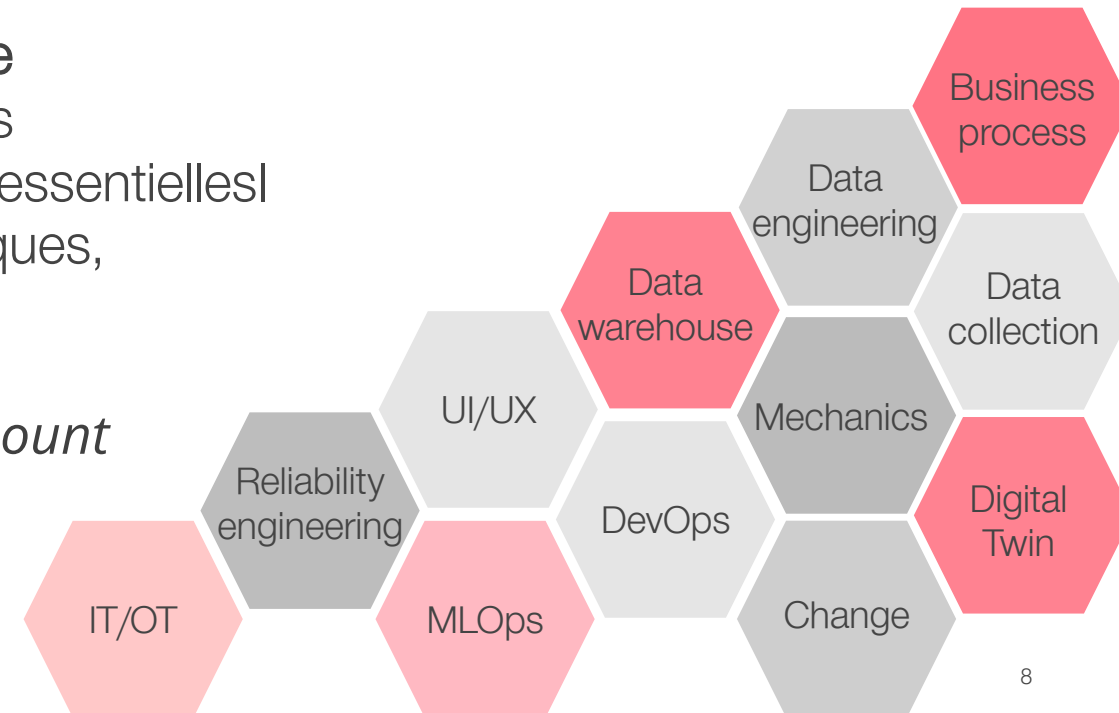
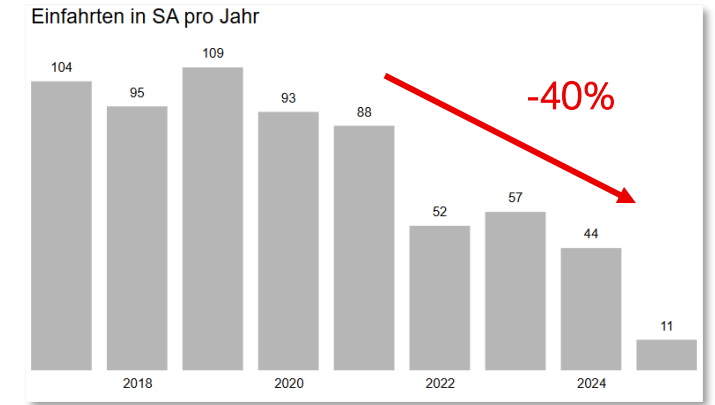
- Valeur ajoutée grâce à une gestion active des processus
- Implémentation très interdisciplinaire

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

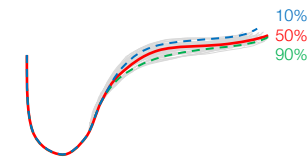
- Ne concerne «que» 5% des essieux, mais représente 90% des traitements d'essieux
- Les défauts sont difficiles à prévoir → Maintenance réactive
- Il est nécessaire de bien connaître le matériel roulant, l'infrastructure et les conditions d'utilisation → Évaluation globale dans des conditions spécifiques



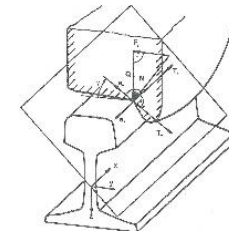
Matériel roulant



Mesure du profil



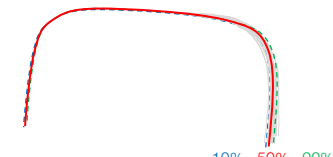
Usure des profils et statistiques des dommages



Infrastructure

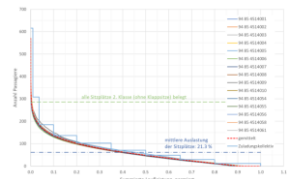
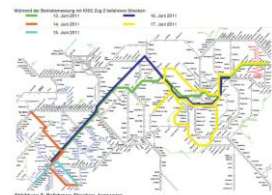


Véhicule de diagnostic

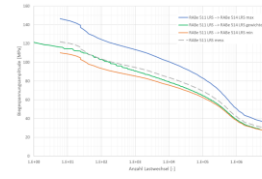


Statistiques des voies

Condition d'utilisation



Charge



Sollicitations

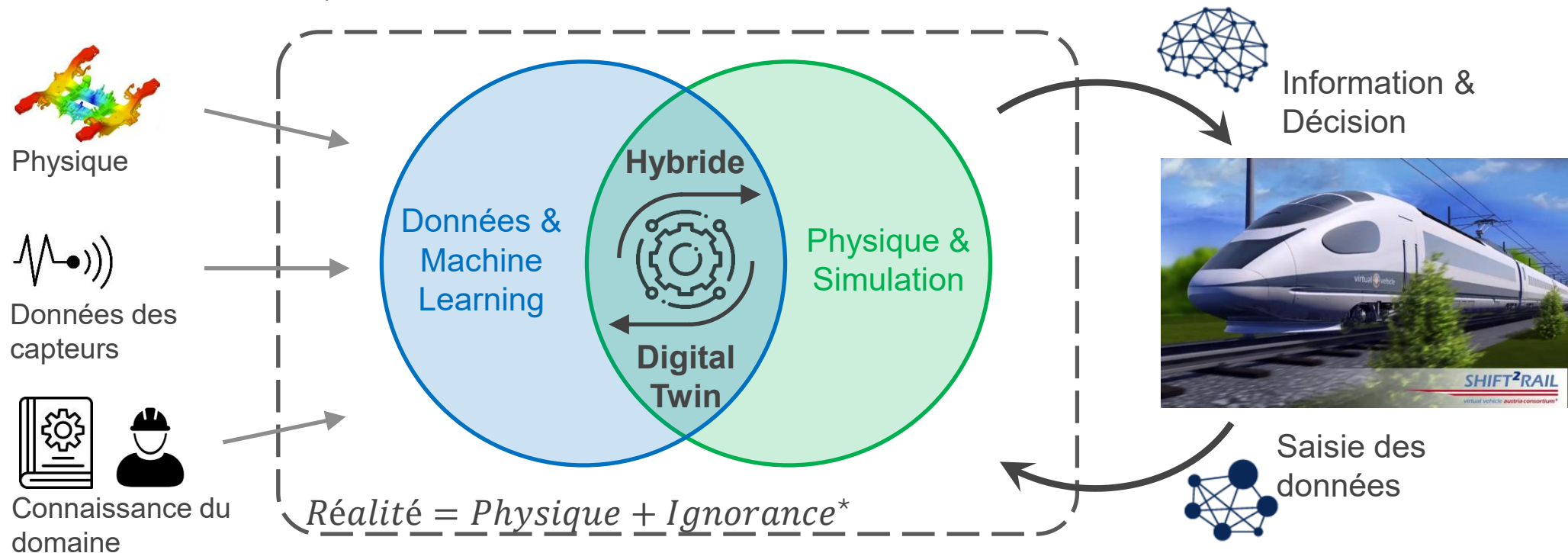
RCF Assessment

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

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

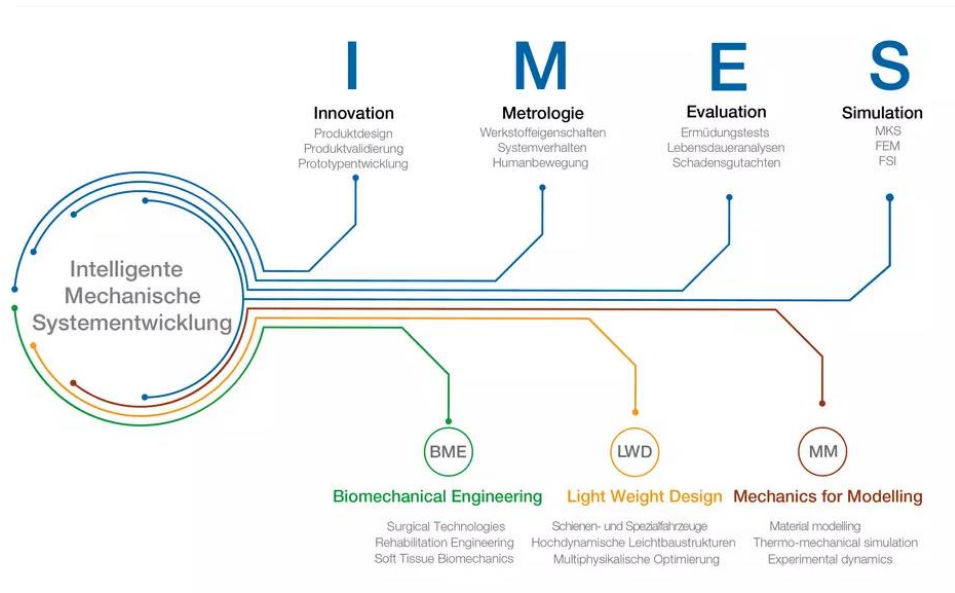
Jumeaux numériques hybrides pour la description de l'état, le diagnostic, le pronostic et l'optimisation

- 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

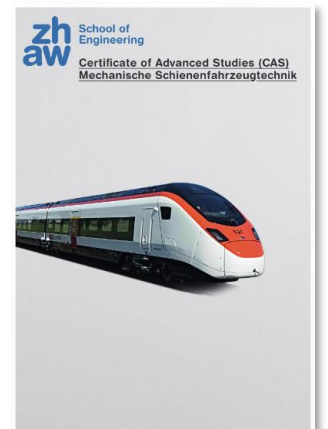
Modul	Inhalt
A: Grundlagen Schienenfahrzeuge und Betrieb	<ul style="list-style-type: none">• Einführung und Allgemeines, rechtliche Grundlagen• Bewegungswiderstände von Schienenfahrzeugen• Zugförderung, Z-v-Diagramm, Antriebscharakteristika• Antriebstechnologien (Diesel und elektrisch)• Bahnproduktion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

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)

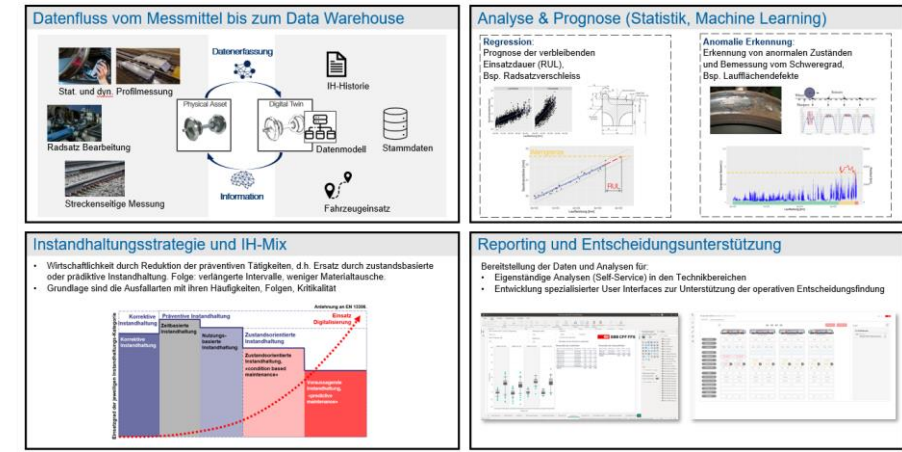
Coût et durée

- 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
www.zhaw.ch/imes