



Empa

Materials Science and Technology

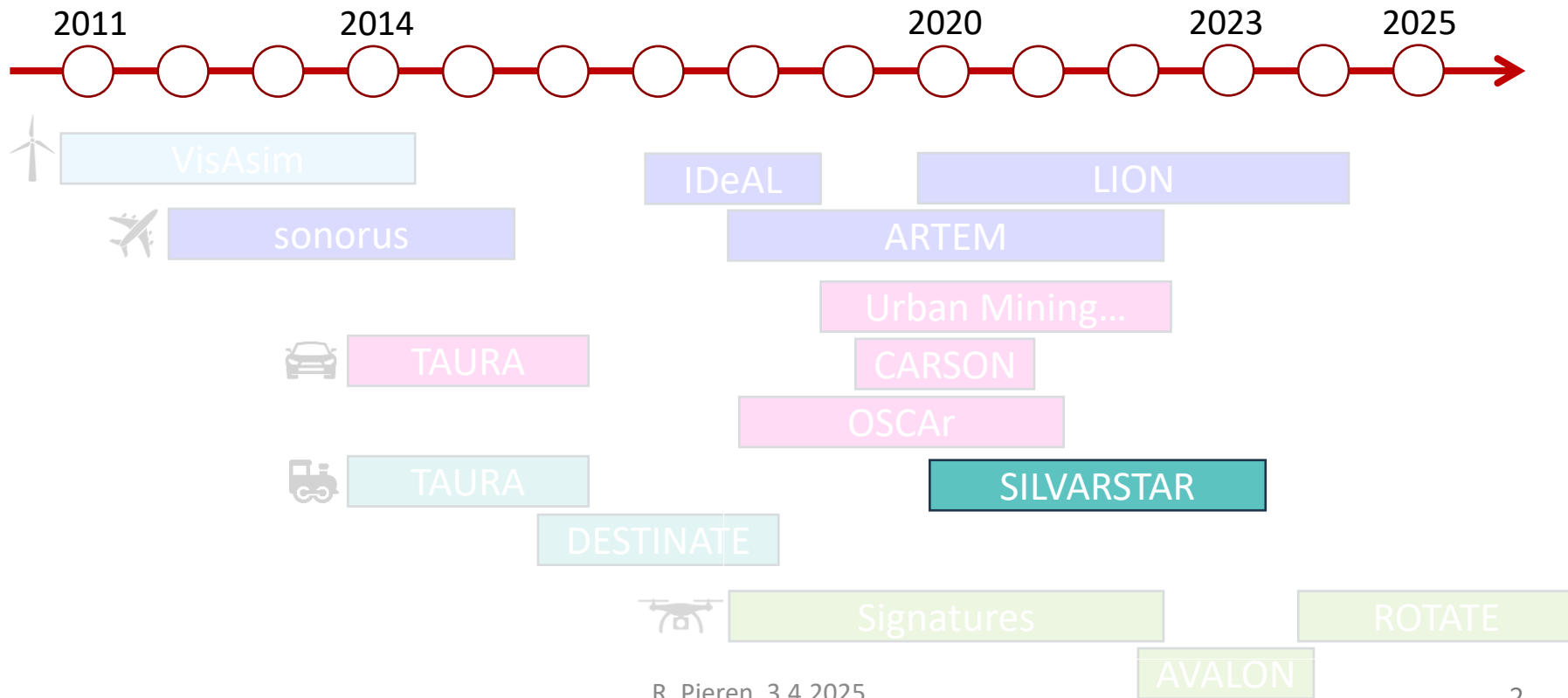


Auralisation physique pour des mesures de protection contre le bruit ferroviaire

Reto Pieren

3. April 2025 – SGA-Tagung, Yverdon-les-Bains

Développement de modèles d'auralisation de l'acoustique environnementale à l'Empa



Le projet de recherche SILVARSTAR



- **Objectif : développer des outils de prévision pour le secteur ferroviaire**
 - **Workstream 1 : Chocs**
 - **Workstream 2 : Auralisation (direction Empa)**
- **Outils logiciels de vibration et d'auralisation du sol pour une application dans les chemins de fer (SILVARSTAR)**
 - **Durée : 2020-2022**
 - **6 institutions de 5 pays**
 - **Financement : Shift2Rail / EU Horizon2020, 1 M€**



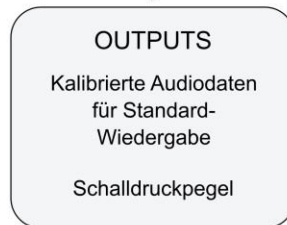
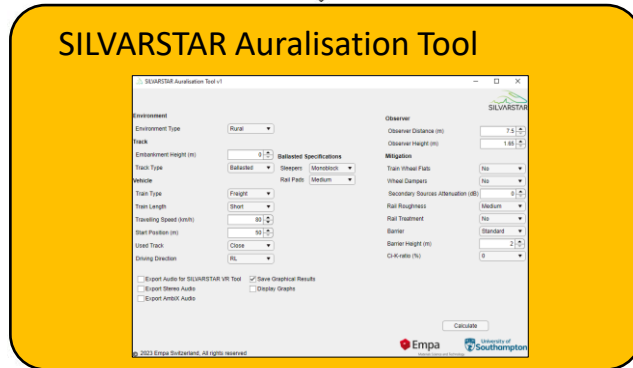
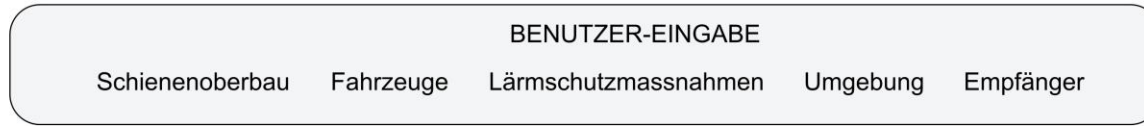
Principales caractéristiques des nouveaux outils d'auralisation



- démonstration immersive, interactive et intuitive du bruit ferroviaire
- comparaison directe de scénarios
- simulation de systèmes combinés de mesures de protection contre le bruit
- synthèse basée sur la physique (pas d'enregistrement)
- facile à utiliser et disponible



Architecture logicielle





Synthèse des passages de trains

Caractéristiques acoustiques du passage d'un train



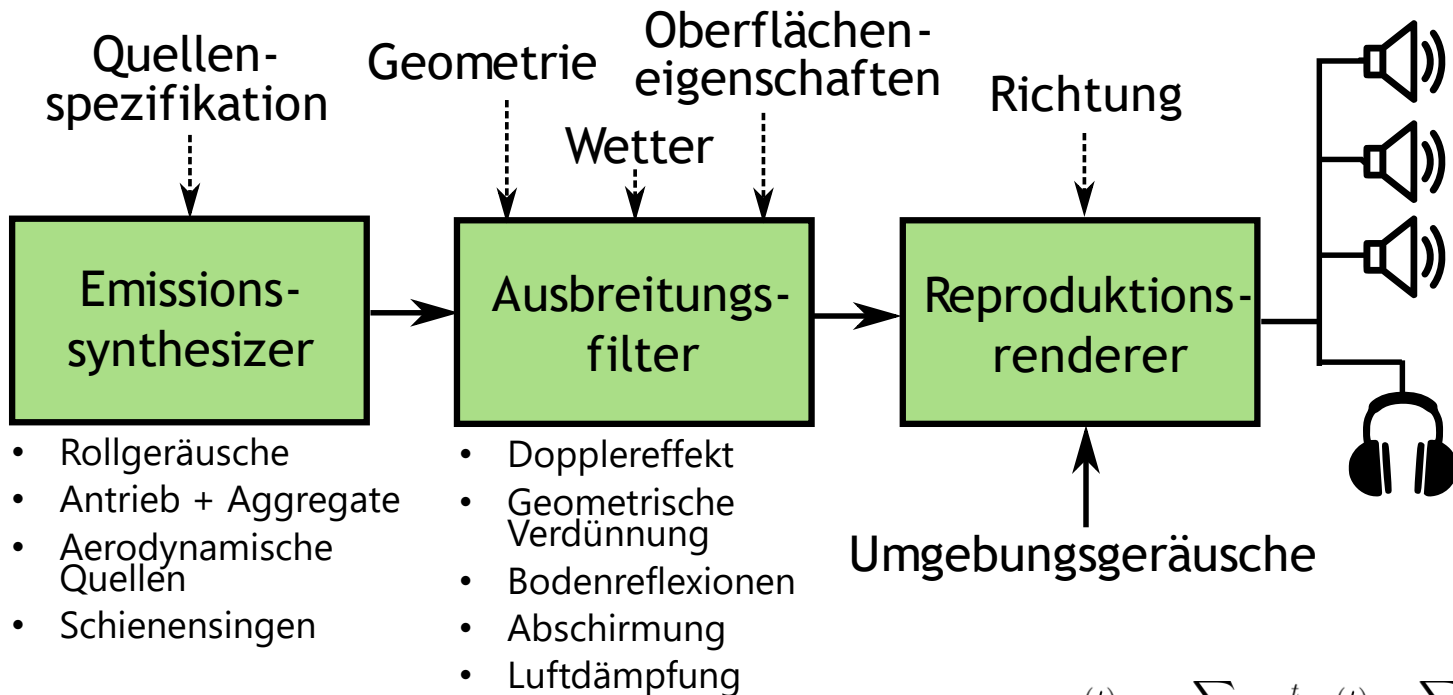
- Une multitude de sources différentes
- Source étendue : latérale et verticale
- Caractéristiques sonores spéciales (cliquetis, son métallique...)
- Principales sources : bruit de roulement émis par les roues et les rails

Défis à relever



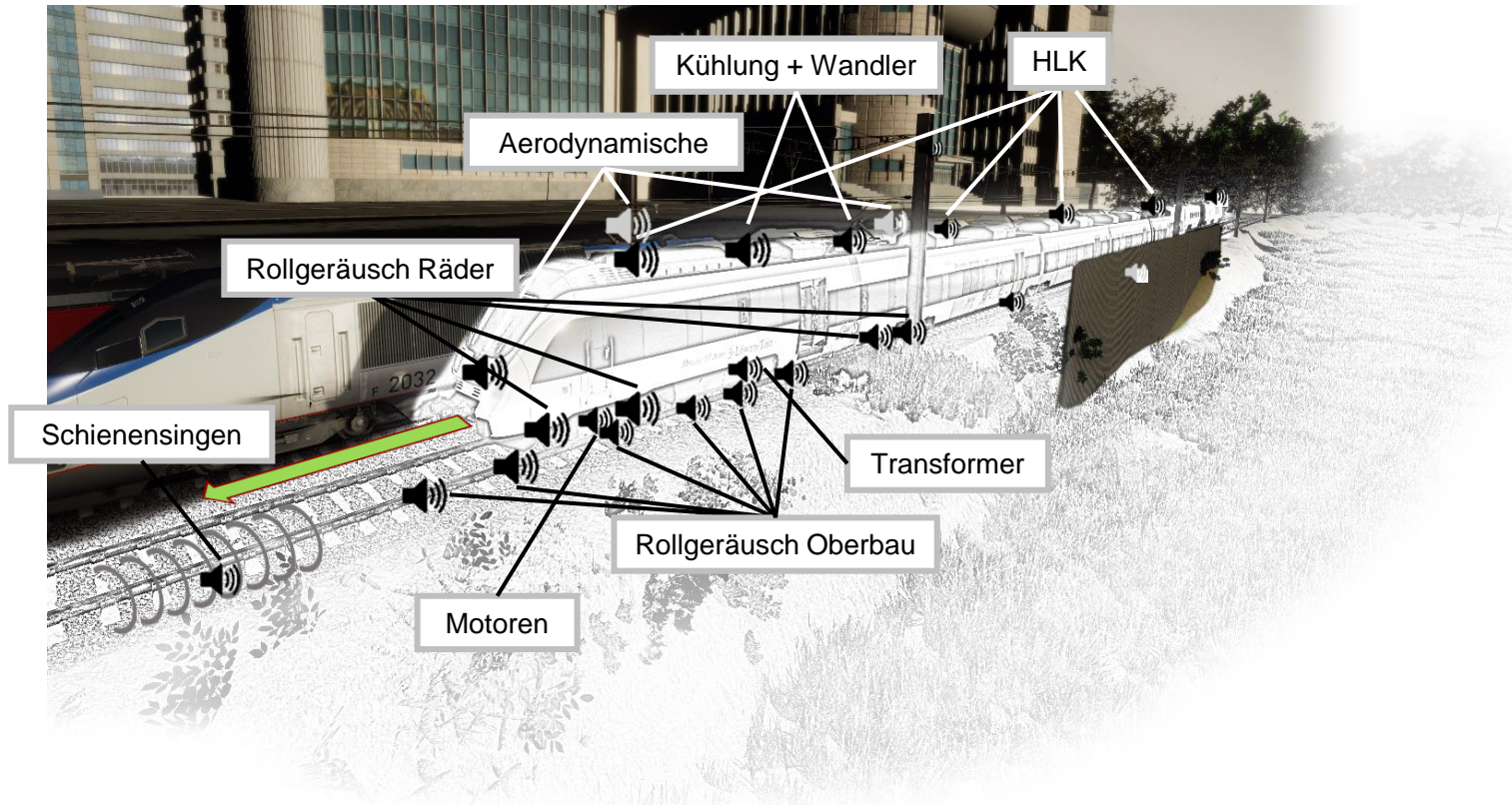
- Simulation basée sur la physique : l'interaction des mesures n'est pas triviale
- Synthèse de bruits réalistes
- Calcul efficace : calcul intensif, car nombreuses sources

Modèle d'auralisation

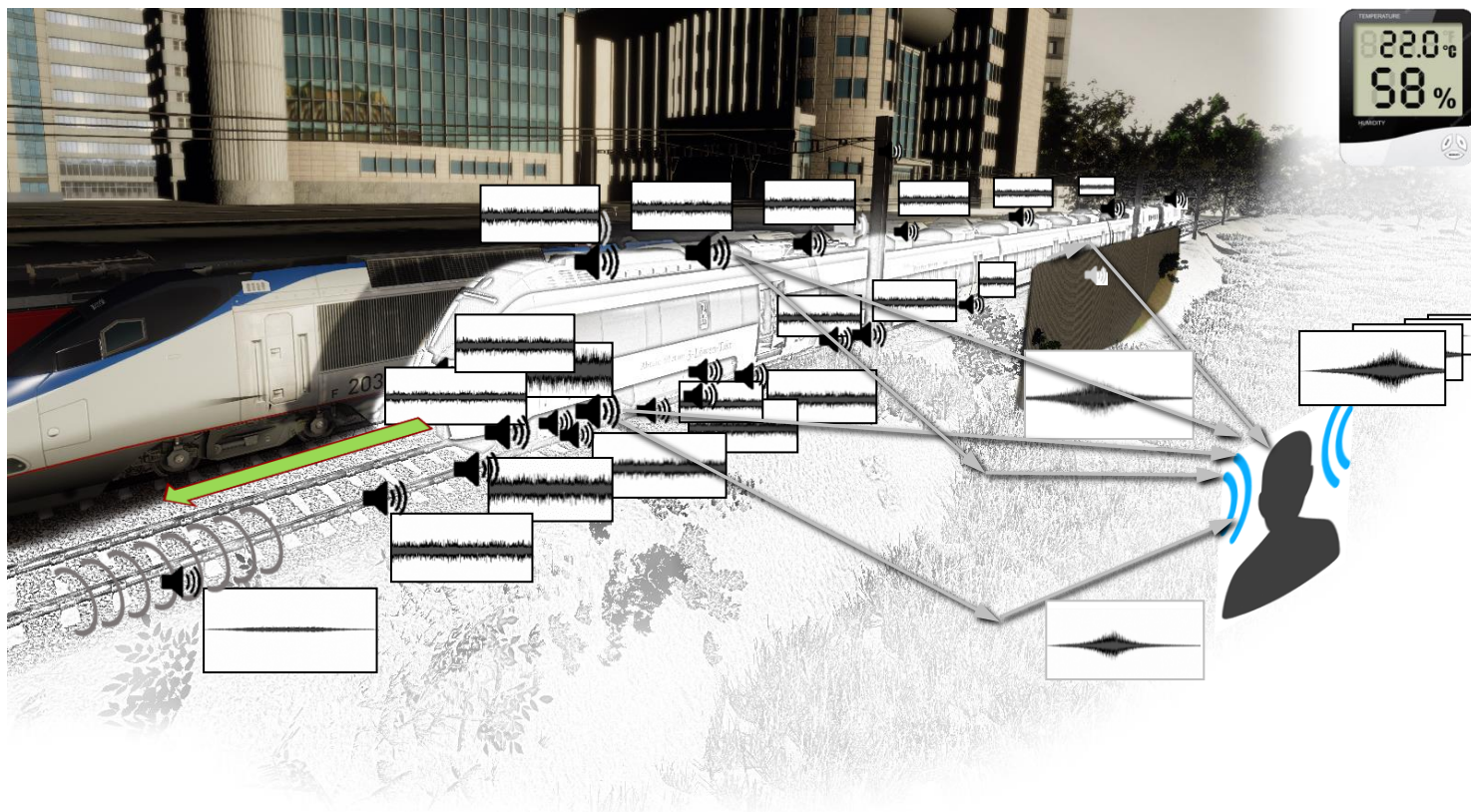


$$p_u(t) = \sum_{m \text{ Quellen}} g_{u,m}^t(t) * \sum_{n \text{ Pfade}} s_m(t) * h_{m,n}^t(t)$$

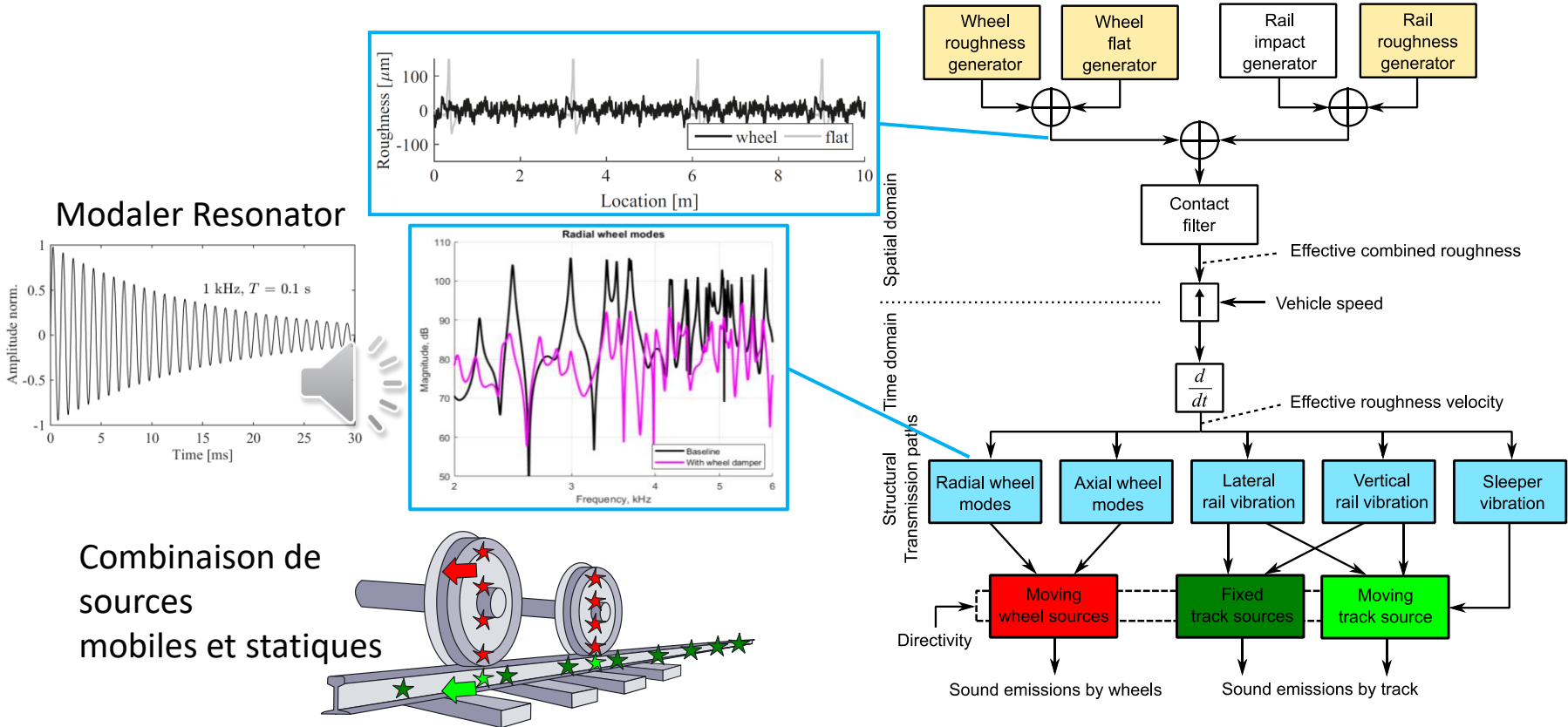
Modèle d'auralisation



Modèle d'auralisation



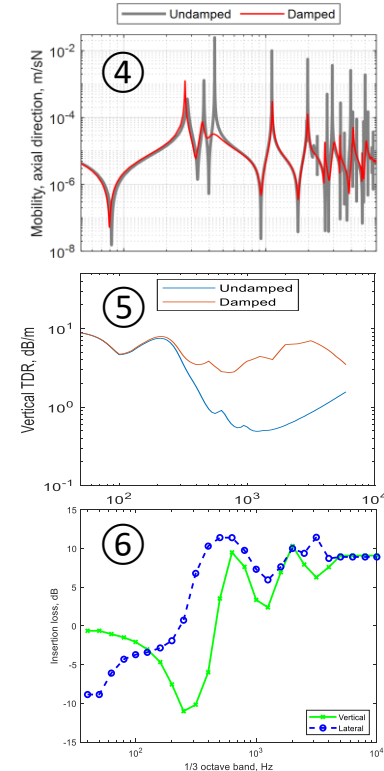
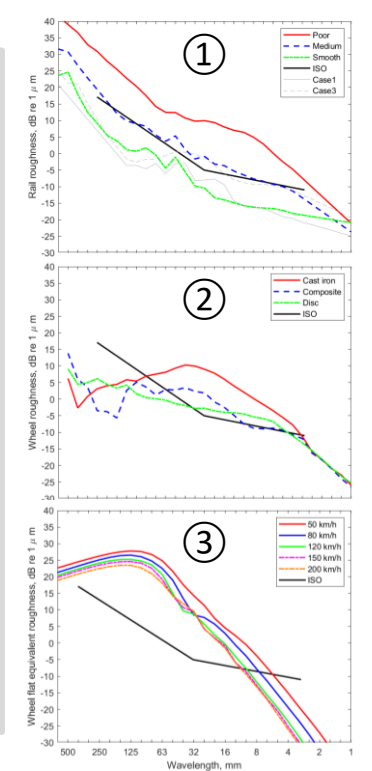
Synthèse des bruits de roulement basée sur la physique



Simulation de mesures de protection contre le bruit



- ① Schienenschleifen
- ② K-Bremsen
- ③ Vermeidung von Flachstellen
- ④ Raddämpfer
- ⑤ Schienendämpfer
- ⑥ Schienenschirme
- ⑦ Mini LSW
- ⑧ Lärmschutzwände (LSW)
- ⑨ Reduktion Sekundärquellen



Exemples sonores : jeu de roues simple avec mesures combinées



- ① Schienenschleifen
- ② K-Bremsen
- ③ Vermeidung von Flachstellen
- ④ Raddämpfer
- ⑤ Schienendämpfer
- ⑥ Schienenschirme
- ⑦ Mini LSW
- ⑧ Lärmschutzwände (LSW)
- ⑨ Reduktion Sekundärquellen

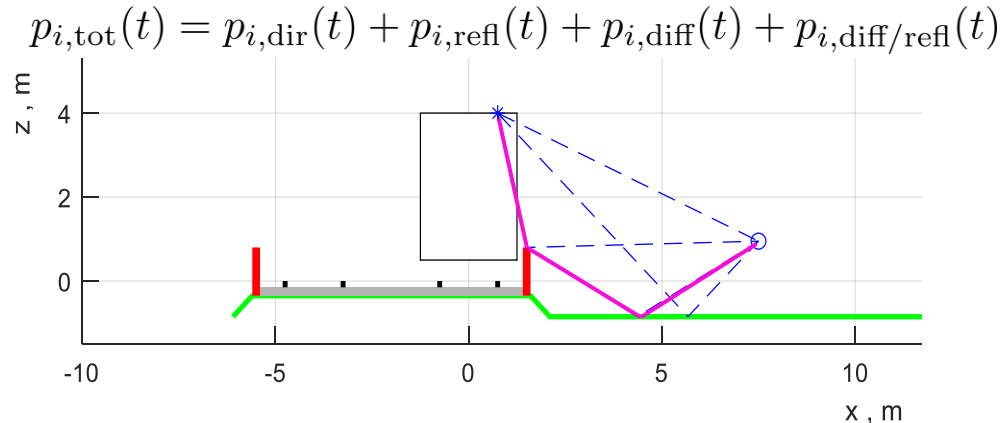
Referenz	
①	
① + ④	
① + ④ + ⑤	
Referenz - ③	

Radsatz mit Scheibenbremsen
120 km/h
Monoblock, harte Pads
10 m Distanz

Aspects de la simulation de la propagation



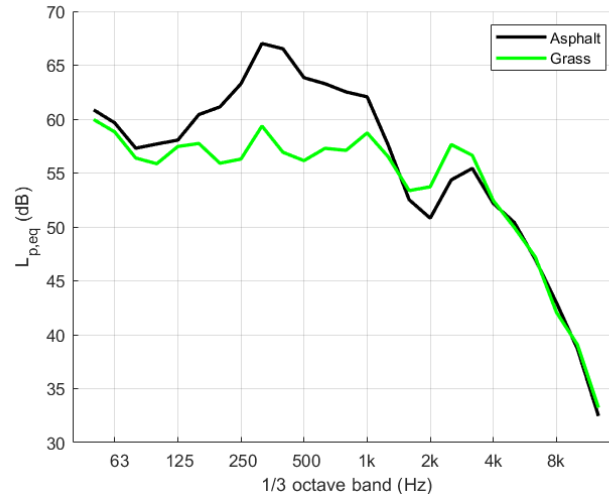
- Voie en remblai -> influence sur l'effet de sol
- Mini-écrans acoustiques -> protection partielle des roues
- Superposition cohérente des composantes de pression acoustique diffractées, réfléchies par le sol et combinées



Aspects de la simulation de la propagation



- Prise en compte des propriétés du sol (impédance de surface)
 - Exemple d'un passage de train entier : sol dure vs. herbe

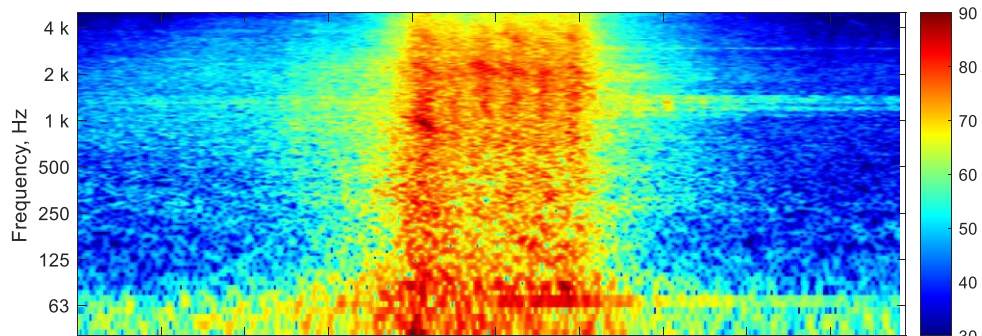


flacher Boden
Empfänger auf 1.65 m in 34 m Distanz

Validation : comparaison avec des enregistrements

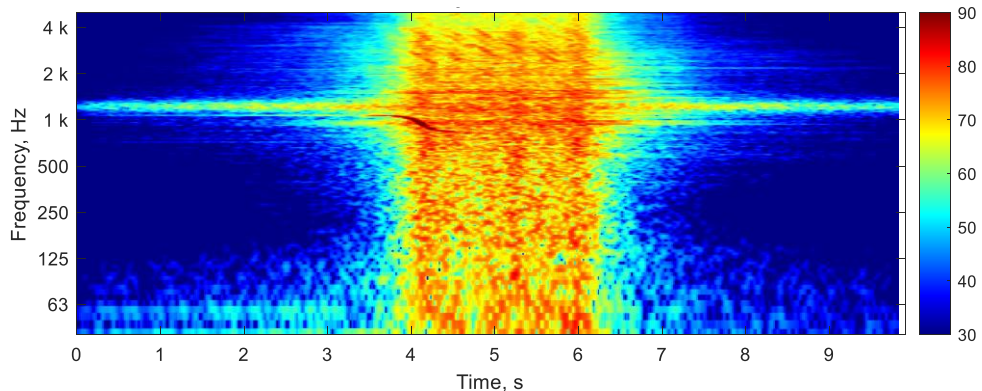


Enregistrement



Regionalzug
160 km/h
7.5 m Abstand

Synthese

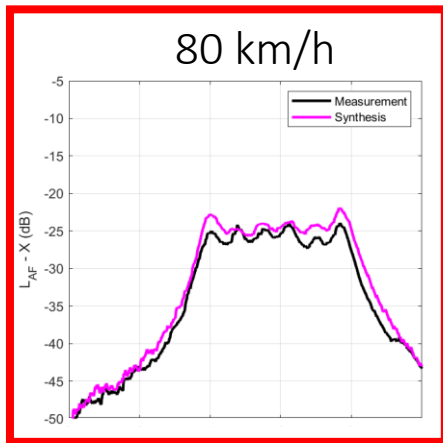


Validation : comparaison avec des enregistrements

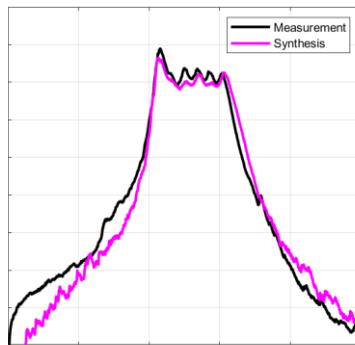


Train régional

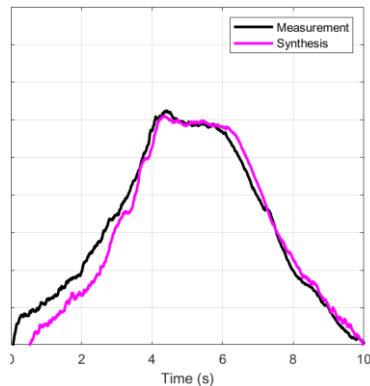
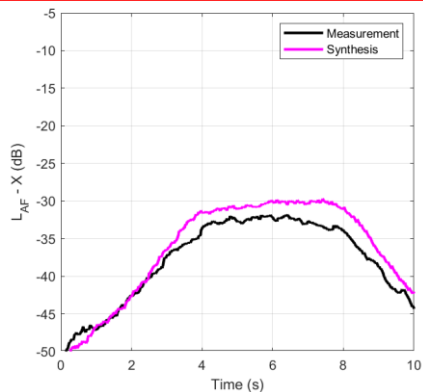
$D = 7.5 \text{ m}$



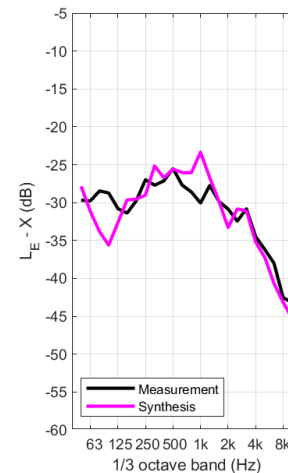
160 km/h



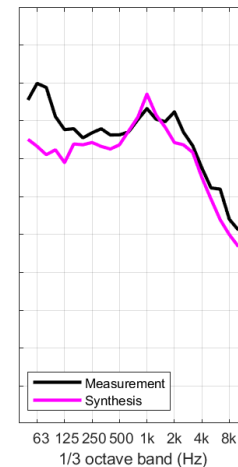
$D = 25 \text{ m}$



80 km/h



160 km/h



Exemples d'écoute : proportion des sources sonores partielles



Aufnahme



vs.

Synthese



= \sum

Schienen



Schwellen



Räder



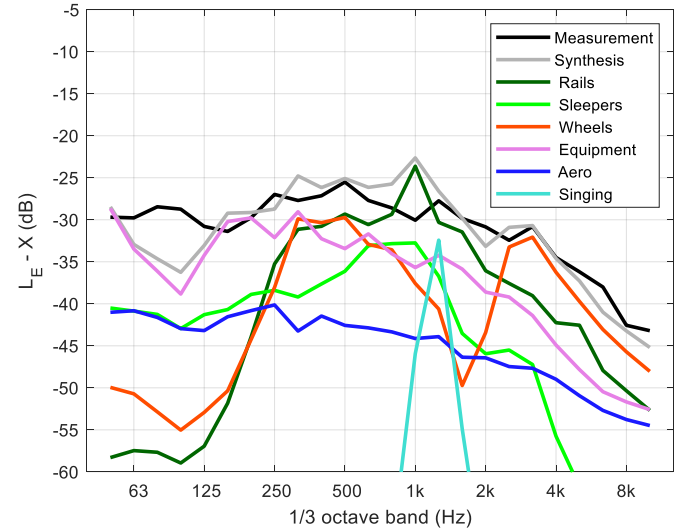
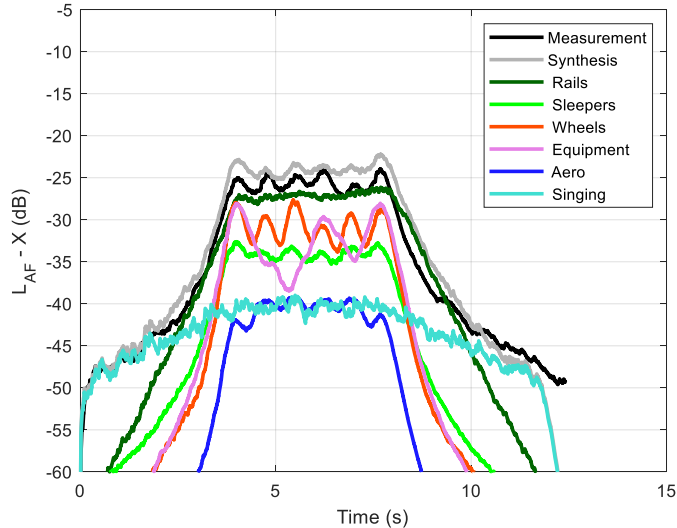
Aggregate



Aero



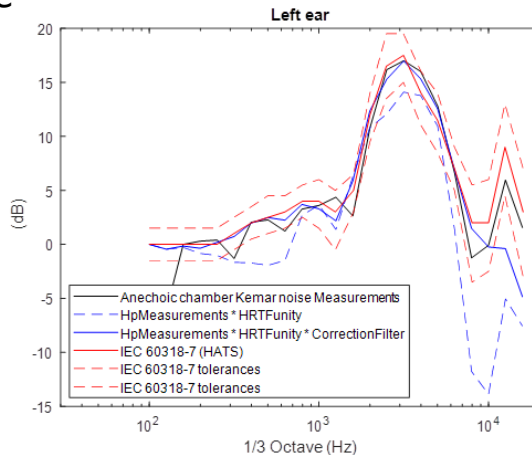
Schienen-singen



Reproduction dans un environnement VR



- Calibrage de la réponse du casque avec des mesures de laboratoire
 - Égalisation du casque en champ libre
 - Égalisation en champ libre des fonctions de transfert de têtes génériques
 - pression sonore correcte à l'oreille
- > reproduction immersive et précise

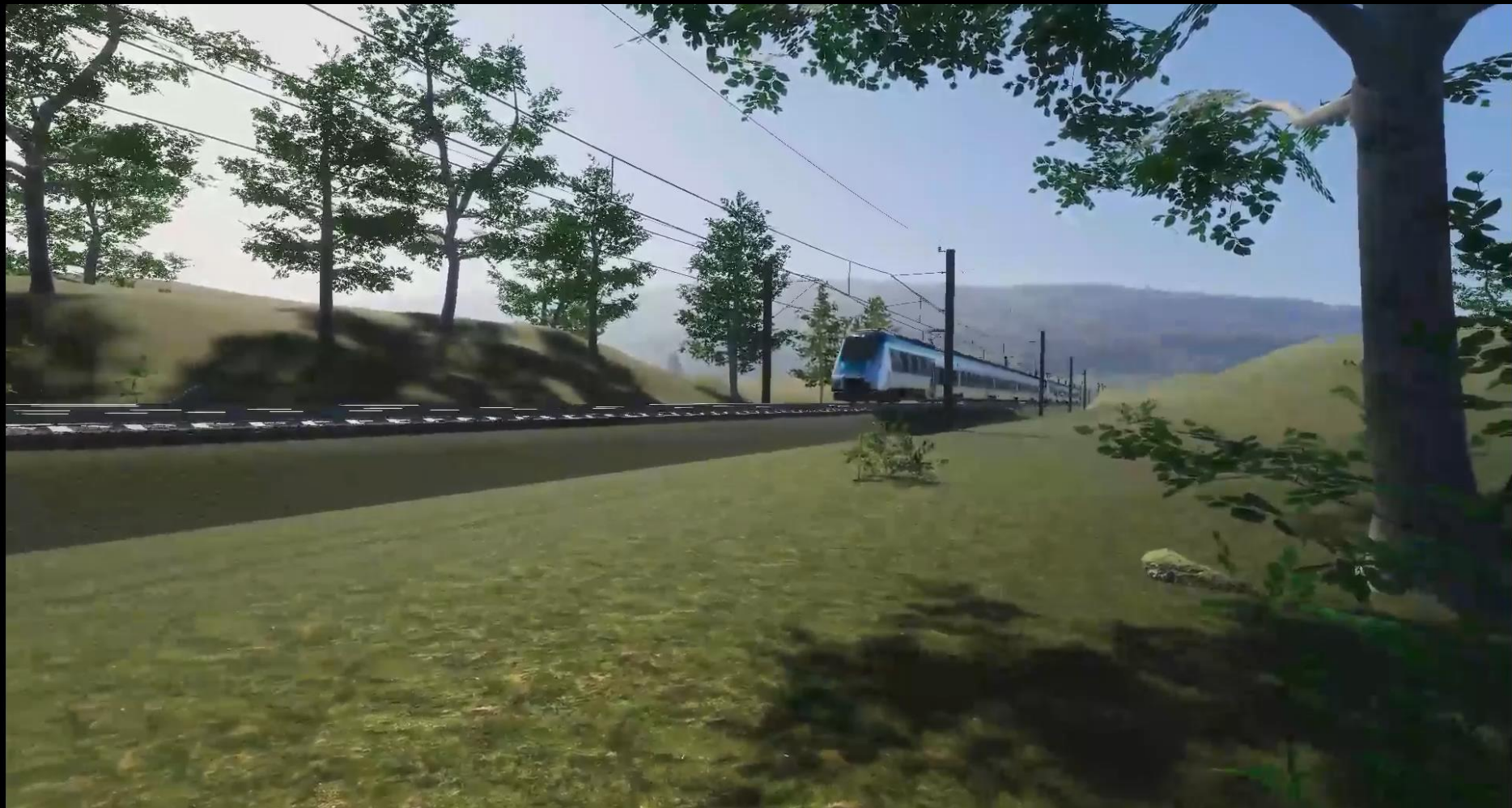


Interaction en VR



- passage immédiat d'un scénario à l'autre avec des boutons virtuels





Applications précédentes des nouveaux outils



- Démonstrations VR lors de salons professionnels internationaux
 - par exemple InnoTrans à Berlin, Transport Research Arena à Lisbonne,
 - Symposium sur les sons urbains, Empa, 28-30 avril
- Dans des projets de recherche européens sur les effets perturbateurs
- Réunions d'information pour les riverains (par ex. Deutsche Bahn)
- Outils logiciels disponibles sur

www.empa.ch/web/silverstar



VR-Demonstration für EU Generaldirektor für Mobilität und Transport (Foto von Europe's Rail).



29.11.2024

Exemples sonores et démos en ligne



Virtual Acoustics Empa X



www.empa.ch/web/silvarstar



- Nouveaux modèles d'auralisation développés pour le bruit ferroviaire
 - synthèse basée sur la physique
 - avec passages de trains proches de la réalité
 - actuellement le modèle le plus puissant au monde

- Nouveaux outils logiciels disponibles gratuitement à des fins non commerciales

- Avantages
 - nouvelles possibilités en communication et en psychoacoustique
 - les premières applications fonctionnent

Remerciement



Merci à

- Co-auteurs :
 - Fotis Georgiou und Kurt Heutschi (Empa)
 - David Thompson und Giacomo Squicciarini (ISVR)
 - Daniel Gremlı und Dario Sala (Bandara VR)
- Partner der EU-Projekte SILVARSTAR und FINE-2



Horizon 2020
European Union Funding
for Research & Innovation

This work has received funding from the Shift2Rail Joint Undertaking under the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation Programme under Grant Agreement 101015442.



Auralisation physique pour des mesures de protection contre le bruit ferroviaire

Reto Pieren

3. April 2025 – SGA-Tagung, Yverdon-les-Bains