Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC **Office fédéral des transports OFT**



En encourageant la recherche et l'innovation, l'Office fédéral des transports (OFT) veut rendre les transports publics (TP) et le fret ferroviaire encore plus efficaces, plus favorables aux usagères et usagers et plus écologiques. Il place au cœur de ce rapport la recherche sur les infrastructures ferroviaires, le programme «Stratégie énergétique des transports publics 2050» et l'innovation dans le transport régional de voyageurs. La présente publication donne un aperçu de quelques-uns des projets encouragés au cours de l'année écoulée et présente, sous forme d'interviews, trois personnes impliquées.

SOMMAIRE

Éditorial	4	Les personnes derrière les projets	31
Aperçu des projets Vers une alimentation électrique mobile	6	P ^r Olga Fink: Comment l'intelligence artificielle contribue à optimiser l'infrastructure	31
sans carburant fossileÉlectrification des lignes de bus: simuler pour mieux planifier		P ^r Vincent Bourquin: Le système ferroviaire: constamment optimisé, mais pas encore complètement	36
Glyphosate : recherche de substituts Montée ou descente : vitesse constante	10	Daniel Jenzer: Recherche sur les barrières ferroviaires? Et pourquoi pas?	41
La numérisation du transport de marchandises passe par l'attelage Aussi rapide que l'avion, aussi respectueux du climat que le train		Faits et chiffres	44
Quand les bus se garent tout seuls Mesurer la vitesse avec le champ magnétique Protection contre le bruit ou contre les vibrations – le beurre ou l'argent du beurre?	e26	Les trois programmes Soutien de la recherche et de l'innovation par l'OFT. Participation	48

Éditorial

Chère lectrice, cher lecteur,

La Suisse est considérée comme un pays modèle en matière de transports publics (TP). À l'étranger, je reçois beaucoup de messages d'éloge et d'admiration pour la densité, la ponctualité, la sécurité et la qualité des TP suisses. Nous avons le droit d'être fiers de ces acquis. Cependant, nous devons continuer à les entretenir et à les développer, ce qui n'est pas une sinécure à une époque où la technologie et la société évoluent rapidement. L'innovation est la clé: il ne s'agit pas seulement de perfectionner ce qui existe, mais de chercher de nouvelles solutions et de les amener à maturité jusqu'à leur mise en œuvre.

Le développement des chemins de fer depuis le début du XX° siècle est un exemple parlant de la force d'innovation de la Suisse. qui a donné naissance à des secteurs industriels entiers dont la contribution au progrès du pays a été essentielle. Nous profitons encore aujourd'hui de la clairvoyance, de l'expertise et du courage des générations précédentes. Depuis, l'industrie suisse des TP s'est de plus en plus diversifiée et spécialisée. Elle jouit toujours d'une excellente réputation de partenaire fiable et compétent. En témoignent les mandats que les entreprises suisses parviennent à décrocher dans le monde entier face à la concurrence internationale pour de grands projets de TP, par exemple pour la livraison de matériel roulant, la planification et l'équipement de l'infrastructure ou les prestations de services assurant une exploitation sûre et efficace.

Le rôle de l'Office fédéral des transports (OFT) dans la recherche et l'innovation

consiste à soutenir les efforts de la branche. Il encourage à cet effet la mise en œuvre d'innovations prometteuses, par exemple au moyen de conventions de prestations pour l'exploitation et le maintien de la qualité de l'infrastructure ferroviaire, ainsi que par le biais des commandes dans le transport régional de voyageurs (TRV). L'OFT permet aux entreprises qui souhaitent commercialiser des produits à l'étranger d'accéder à son réseau avec les autorités étrangères. Il apporte une contribution tout aussi importante en créant les conditions nécessaires aux tests de nouvelles technologies et de nouveaux systèmes dans la pratique, par exemple sur des tronçons non interopérables, où nous pouvons concevoir nous-mêmes les procédures de vérification.

Enfin, l'OFT soutient la recherche et l'innovation grâce à ses programmes thématiques. J'ai le plaisir de vous présenter dans ce rapport d'activités quelques projets et personnes qui en ont bénéficié. Ils prouvent que la collaboration entre les autorités, l'industrie, la science et les entreprises de transport fonctionne. Ils montrent également que grâce à la recherche et à l'innovation, la Suisse ne progresse pas seulement en tant que pays de TP, mais aussi en tant que site économique et d'enseignement supérieur.

D^r Peter Füglistaler

Directeur de l'Office fédéral des transports (OFT)



"

Il ne s'agit pas seulement de perfectionner ce qui existe, mais de chercher de nouvelles solutions et de les amener à maturité jusqu'à leur mise en œuvre.

"

La collaboration entre les autorités, l'industrie, la science et les entreprises de transport fonctionne.

Vers une alimentation électrique mobile sans carburant fossile

Partout où l'alimentation électrique à partir de la ligne de contact n'est pas assurée en permanence, les moteurs diesel sont aujourd'hui la solution privilégiée: dans les manœuvres, sur les chantiers ferroviaires, pour les groupes frigorifiques des wagons. Rien qu'aux CFF, ils consomment environ 10 millions de litres de diesel par an. L'objectif d'une exploitation ferroviaire entièrement décarbonisée ne saurait être atteint si l'on ne trouve pas de solutions de remplacement. Le programme stratégie énergétique des transports publics 2050 (SETP 2050) a soutenu trois projets dans ce sens.

Les locomotives et les véhicules de manœuvre consomment le plus de diesel. Le secteur a reconnu très tôt l'urgence de développer des substituts à la traction diesel. Entre-temps, les premiers véhicules à propulsion hybride ou à batterie sont utilisés quotidiennement. Avec le remplacement de véhicules plus anciens, leur nombre ne cessera d'augmenter.

Mais pour devenir climatiquement neutres, les entreprises ferroviaires souhaitent aussi décarboniser d'autres utilisations mobiles, comme les générateurs électriques, indispensables sur les chantiers ferroviaires. Ces dispositifs fournissent l'énergie nécessaire au fonctionnement des compresseurs, des appareils, de l'éclairage et de la ventilation. Ils sont utilisables partout, simples à manipuler, et leur fonctionnement fiable est peu coûteux. Les systèmes qui fonctionnent avec d'autres vecteurs d'énergie doivent offrir les mêmes caractéristiques pour pouvoir servir de substituts. Dans ce contexte, les batteries et les piles à combustible à hydrogène sont les premières à entrer en ligne de compte. Jusqu'à présent toutefois, les expériences pratiques qui permettraient de standardiser l'emploi de tels systèmes font défaut.

Les CFF louent donc, à titre expérimental, un générateur à hydrogène avec lequel ils

testent l'alimentation électrique sur un chantier. Il s'agit d'un système de pile à combustible disponible dans le commerce avec des réservoirs d'hydrogène intégrés. Il est fixé dans un cadre et peut donc, en toute flexibilité, servir à différentes applications. L'expérience prévoit d'étudier l'approvisionnement en hydrogène, le stockage et le ravitaillement, et d'élaborer une analyse des risques axée sur les exigences particulières de l'utilisation de l'hydrogène dans l'environnement ferroviaire (Projet P-214).

Dans un deuxième projet, les CFF placent un pack de batteries sur deux châssis-porteurs du service de construction (voir photo en face). Ils utilisent pour cela des batteries au sel, qui non seulement prennent plus de place et de temps de charge que les batteries lithium-ion courantes dans les voitures et les téléphones portables, mais doivent aussi être chauffées en permanence à la température d'exploitation. En revanche, elles sont plus écologiques, moins chères et peuvent être entièrement fabriquées en Suisse. Le système est réalisé sous forme hybride avec un petit générateur diesel afin de disposer d'une solution de repli en cas de problème avec la batterie. Lors de l'essai pilote, les batteries fournissent dans un premier temps l'énergie nécessaire pour éclairer

#SETP 2050 #Chemin de fer #Production/ exploitation

Informations complémentaires P-214:



Informations complémentaires P-154:



Informations complémentaires P-221:



et climatiser le conteneur du personnel sur les chantiers du tunnel. Dans une prochaine phase, le système sera testé avec une charge plus importante, en faisant fonctionner un dérouleur de câble (Projet P-154).

Les Chemins de fer rhétiques (RhB) misent également sur les batteries pour l'équipement de châssis-porteurs pour caisses mobiles. qui transportent entre autres des conteneurs réfrigérés pour les denrées alimentaires ou périssables. Afin de maintenir le froid pendant le transport, les conteneurs sont équipés de groupes frigorifiques fonctionnant au diesel. Ceux-ci consomment chacun environ 300 litres de diesel par mois. Le RhB a installé sur huit châssis-porteurs un power pack (voir photo ci-dessous) avec chargeur intégré disponible sur le marché. Avant l'utilisation, les batteries lithium-ion sont chargées au moyen d'un raccordement stationnaire au secteur sur une voie de garage. Les conteneurs frigorifiques sont chargés sur les châssis-porteurs et reliés par un câble électrique au power pack, qui fournit ensuite l'énergie nécessaire à l'appareil frigorifique pendant le transport. Une commande dans chaque appareil frigorifique garantit qu'en



Alimentation électrique mobile pour le service de construction sur un châssisporteur des CFF. L'unité se compose de cinq batteries au sel, d'un échangeur de chaleur et d'un onduleur.

cas de panne éventuelle de l'alimentation électrique, le générateur prend le relais et que la chaîne du froid n'est pas interrompue (Projet P-221).

Les trois essais pilotes ont en commun le fait qu'ils ne peuvent pas faire appel à des produits autorisés pour l'exploitation ferroviaire. Il est donc nécessaire d'effectuer des tests pratiques pertinents avant une utilisation à grande échelle. Ces tests requièrent une bonne planification et souvent une ingénierie préalable. Les essais pilotes servent également à familiariser le personnel avec les nouvelles technologies et les nouveaux processus, et à intégrer leurs retours d'informations dans la suite du développement. La question du choix entre l'hydrogène et les batteries pour une meilleure adéquation aux applications ferroviaires passe au second plan: il est bien plus important que les solutions respectueuses du climat obtiennent des résultats aussi bons que le diesel en termes de sécurité, de fiabilité, de facilité d'utilisation et de coûts. Ce n'est qu'à cette condition qu'elles s'imposeront rapidement et à grande échelle.

Pour remplacer les générateurs électriques fonctionnant au diesel, les batteries et les piles à combustible à hydrogène sont les premières à entrer en ligne de compte.



Power pack sur un wagon porte-conteneurs des Chemins de fer rhétiques (RhB). Il est chargé via le secteur et fournit le courant nécessaire au refroidissement de la caisse mobile pendant le trajet.

Électrification des lignes de bus : simuler pour mieux planifier

Face au changement climatique, de plus en plus d'entreprises de bus souhaitent remplacer leurs véhicules diesel par des bus électriques. Cette nouvelle technologie requiert toute-fois une planification et une réflexion importantes, allant du choix de l'itinéraire à la construction des stations de chargement, en passant par la détermination de la bonne puissance des batteries. Un outil de simulation offre désormais une aide.



Davide Strepparava, Charitha Buddhika Heendeniya et Marco Belliardi de la SUPSI discutent d'un éventuel passage aux bus électriques.

#SETP 2050#Bus
#Véhicules

Informations complémentaires



D'un point de vue mathématique, pour savoir comment remplacer les bus diesel par des bus électriques sur une ligne donnée, on est en face d'une variante d'un sujet de recherche bien connu en ingénierie des transports, le «problème d'ordonnancement des véhicules» (vehicle scheduling problem). Il s'agit d'adapter de manière optimale l'emploi des véhicules d'un parc de bus ou de trains à l'horaire et aux conditions d'exploitation. La formulation en tant que problème mathématique permet de développer des modèles de calcul et d'effectuer des simulations.

Un groupe de recherche à la Haute École spécialisée de la Suisse italienne SUPSI autour du professeur Vasco Medici a reconnu cette analogie et développé un outil de simulation correspondant. Il peut aider les entreprises de bus à développer et à comparer différentes options en vue de l'utilisation de bus électriques, ainsi qu'à étudier différentes configurations de véhicules et de charge pour une ligne et un horaire donnés¹.

Pour la simulation, l'outil a besoin de données sur les véhicules (notamment la longueur, le poids, la capacité de la batterie, les coûts d'acquisition), de données de l'horaire, sur la longueur et le profil des tronçons, sur les points de recharge ainsi que des données microéconomiques (p. ex. les coûts de l'énergie, les coûts d'acquisition et la durée de vie

¹ L'outil est disponible gratuitement en version simplifiée à l'adresse https://pvxte.isaac.supsi.ch.

des stations de chargement, les frais d'entretien). L'outil calcule ensuite si la configuration de véhicules choisie est réalisable aux niveaux technique et opérationnel et quels en sont les coûts. En adaptant certains paramètres, il est possible de simuler différentes options, comme la taille du bus, la puissance de la batterie ou la disposition des points de recharge sur le tronçon.

Vasco Medici et ses collaborateurs Charitha Buddhika Heendeniya, Davide Strepparava et Marco Belliardi ont testé le modèle avec succès avec la FART (Società per le Ferrovie Autolinee Regionali Ticinesi) et l'AMSA (Autolinea Mendrisiense SA). Ils ont pu constater que les lignes des deux entreprises peuvent en principe passer à une exploitation électrique. Le fait que les tronçons à parcourir soient plutôt courts constitue un avantage. Cela permet d'utiliser des bus électriques malgré la courbe de dénivelé exigeante.

Les chercheurs estiment important de prendre en compte le système dans son ensemble. Pour que l'électrification du parc de bus contribue à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, il faut que l'électricité provienne de sources renouvelables. De plus, les processus de chargement devraient être organisés de manière à maintenir les pics de charge au plus bas possible et à pouvoir utiliser l'électricité produite par les installations photovoltaïques sur le site.

L'électrification des parcs de bus ne se limite pas à l'acquisition de nouveaux véhicules, mais exige d'adapter la planification du parc, l'exploitation et l'infrastructure. (Image générée par l'intelligence artificielle) Mais la simulation ne suffit pas. Elle montre bien si l'électrification est possible et rentable, mais ce n'est que le début de la mise en œuvre. Pour aider les entreprises de transport

«Nous serions ravis si d'autres entreprises de transport utilisaient également cet outil.»

dans cette démarche, l'équipe de la SUPSI a développé un guide en collaboration avec l'entreprise Protoscar. En dix étapes pratiques, il montre comment les exploitants de bus peuvent ensuite procéder pour réussir l'électrification de leur parc de véhicules.

L'AMSA et la FART ont déjà pris les mesures suivantes: l'AMSA a déposé une demande de financement auprès du canton pour une première tranche de douze bus qui devraient être mis en service à partir de 2026. L'électrification du reste du parc devrait suivre ultérieurement. Il est possible que d'ici là, les véhicules proposés sur le marché disposent d'une autonomie suffisante pour qu'il soit possible de renoncer à construire une station de recharge intermédiaire à Chiasso. En outre, l'AMSA prévoit d'installer des panneaux solaires sur ses bâtiments en collaboration avec le fournisseur d'énergie local. La FART vient d'acheter de nouveaux bus diesel. Elle négocie maintenant avec le constructeur pour voir si les véhicules pourraient être remplacés par des bus électriques de même taille.



Glyphosate: recherche de substituts

Pour lutter contre les mauvaises herbes sur les installations ferroviaires, on utilise l'herbicide glyphosate. Les gestionnaires d'infrastructure s'efforcent depuis des années de réduire les quantités appliquées afin de limiter les effets potentiels sur l'environnement. Mais il ne sera pas possible à l'avenir de se passer totalement de produits chimiques. On recherche donc des substances actives qui soient à la fois respectueuses de l'environnement et efficaces.

> Le réseau ferré s'étend sur environ 6900 km, et les entreprises ferroviaires doivent le débarrasser des mauvaises herbes. Si elles ne le faisaient pas, la prêle, le géranium, les ronces et d'autres plantes rendraient la circulation difficile sur les voies ferrées, masqueraient les signaux et déstabiliseraient l'infrastructure des voies. Afin de maintenir l'utilisation d'herbicides au plus bas niveau possible, les entreprises ferroviaires veillent, dès la construction et le renouvellement des voies ferrées, à un mode de construction qui inhibe la couverture végétale. Ils étudient de nouvelles méthodes non chimiques de lutte contre les mauvaises herbes, par exemple au moyen d'eau chaude, de haute tension ou de robots de tonte¹. Et lorsque cela n'est pas absolument nécessaire, ils renoncent parfois à désherber.

> Dans certaines situations, par exemple lors de la lutte contre les plantes problématiques, les entreprises ferroviaires continueront toutefois de recourir à des produits comme le glyphosate. Le grand avantage des herbicides est qu'ils sont peu coûteux par rapport à d'autres méthodes. Utilisés correctement, ils n'impactent que très peu l'environnement. La sécurité du personnel est également garantie si les mesures de protection sont correctement appliquées. L'ob-

#Recherche sur les infrastructures ferroviaires # Chemin de fer # Infrastructure

Informations





Voir l'article sur l'utilisation de robots de tonte dans le rapport d'activités 2022.



Dans certains cas, les herbicides restent la méthode la plus efficace et la moins coûteuse pour contrôler la végétation. La substance active est appliquée directement sur les plantes de manière ciblée et en quantités aussi faibles que possible. La réussite dépend beaucoup du choix du bon moment dans le développement des plantes et d'une application par temps sec.

jectif est de disposer d'une substance active la moins nocive possible pour l'environnement et de l'utiliser en quantité minimale, tout en conservant l'efficacité nécessaire.

Une équipe de la station de recherche Agroscope s'est penchée sur cette question dans le cadre d'une étude subventionnée par l'OFT et cofinancée par les CFF, le BLS, la SOB et l'UTP. Ignaz Bürge et ses deux collègues Roy Kasteel et Thomas Poiger ont examiné des herbicides qui seraient autorisables pour l'utilisation sur des installations ferroviaires sans présenter d'effets secondaires inacceptables pour l'être humain, la faune et l'environnement. Ce faisant, ils ont accordé une attention particulière à la protection des nappes phréatiques.

Les herbicides sont appliqués à l'aide de pulvérisateurs manuels et absorbés en partie par les feuilles ou les racines. Une partie de la substance épandue est lessivée par les précipitations et s'infiltre dans le sous-sol via le gravier. Les herbicides y sont en partie dégradés par les microbes ou liés aux matériaux du sol et immobilisés. Une certaine proportion peut, dans certaines circonstances, se retrouver dans les eaux souterraines. L'équipe d'Agroscope avait pour tâche d'étudier la proportion d'herbicides et de leurs produits de décomposition (métabolites) susceptibles d'être lessivés. Pour ce faire, elle a sélectionné quatre substances actives parmi les quelque 80 qui entrent en ligne de compte et qui pourraient servir de substitut au glyphosate.

Pour l'expérience, l'équipe d'Ignaz Bürge a construit dix lysimètres. Il s'agit de tubes d'acier de 80 cm de diamètre et de 145 cm de profondeur, placés verticalement sur une dalle. Ils en ont d'abord rempli le fond de sable et de gravier pour un bon drainage, puis de déblais provenant de trois installations ferroviaires différentes et enfin d'une couche de ballast. Ils ont ainsi simulé la structure du sol sous une voie ferrée. Sous chaque lysimètre, un tuyau menait à un réservoir collecteur de l'eau de pluie infiltrée à travers les couches de sol. Ils ont régulièrement échantillonné cette eau et analysé les substances qu'elle contenait.

Cette installation leur a permis d'observer quelle proportion des herbicides qu'ils avaient appliqués sur le ballast s'infiltrait vers le bas à travers les lysimètres et dans quelle mesure ils se décomposaient pendant ce temps. Ce processus se produit de manière similaire sur les installations ferroviaires, mais les couches que les herbicides traversent avant de pouvoir atteindre la

nappe phréatique y sont beaucoup plus épaisses.

Les expériences ont montré que les herbicides se comportent différemment au cours de leur migration à travers les lysimètres. Certains sont retenus en grande partie par les couches du sol, d'autres en revanche sont mal intégrés dans le sol. La quantité de substance active qui arrive au bas de la colonne de lysimètre dépend en outre du comportement de décomposition, qui a également été étudié. C'est justement dans l'eau de ruissellement des lysimètres traités au glyphosate que les chercheurs ont trouvé la plus faible quantité du produit de base et de ses métabolites: moins de 0,02% de la guantité appliquée a réussi à traverser les couches du sol.

L'herbicide Quizalofop-P a lui aussi présenté un taux de rétention élevé, tandis que les trois autres produits testés ont obtenu des résultats nettement moins bons. Le Quizalofop-P n'est toutefois efficace que contre les grami-



En laboratoire, l'analyse de l'eau accumulée au fond des colonnes permet de déterminer la proportion d'herbicides qui migre à travers les couches du sol et les produits de transformation qui en résultent.



Les chercheurs d'Agroscope appliquent un herbicide sur le ballast à la surface des lysimètres à l'aide de pulvérisateurs. Les substances actives sont lessivées par la pluie et s'infiltrent dans les matériaux du sol dans les colonnes.

nées et non contre les dicotylédones; il ne peut donc guère servir de substitut du glyphosate, car il faudrait le mélanger à un autre herbicide. Utiliser les trois autres herbicides serait envisageable, mais à condition de prendre des mesures propres à réduire le risque de propagation jusqu'à la nappe phréatique.

Les herbicides doivent le moins possible pouvoir se propager, mais aussi, bien entendu, être efficaces. Agroscope a donc testé en serre, puis sur des voies ferrées, si les substituts potentiels permettaient effectivement de lutter contre la couverture végétale. Une seule combinaison d'herbicides (mélange de flazasulfuron et d'acide pélargonique) s'est avérée aussi efficace que le glyphosate. Elle présente l'avantage d'éliminer également la prêle, contre laquelle le glyphosate n'a pas d'effet et qui devait jusqu'à présent être traitée séparément.

La recherche d'un substitut au glyphosate se poursuit donc. L'étude a toutefois fourni de précieuses informations à cet effet, comme le confirme Ignaz Bürge: «Les lysimètres ont fait leurs preuves. L'installation expérimentale reste utilisable pour fournir, comme dans le cas présent, des bases scientifiques permettant d'évaluer le comportement des différentes substances actives dans le sol.»

Cette installation a permis aux chercheurs d'observer quelle proportion des herbicides qu'ils avaient appliqués sur le ballast s'infiltrait à travers les lysimètres et pouvait potentiellement atteindre les eaux souterraines.

Montée ou descente: vitesse constante

De nombreux chemins de fer de montagne roulent plus lentement en descente qu'en montée sur les tronçons à crémaillère. C'est la seule façon de pouvoir arrêter le train à tout moment en cas de danger et d'éviter les déraillements. Mais du point de vue de l'exploitation et de l'horaire, il serait avantageux de pouvoir circuler à une vitesse similaire dans les deux sens. La Matterhorn-Gotthard-Bahn (MGB) et Stadler développent un véhicule qui le permet.

Un train qui descend une pente doit pouvoir être arrêté immédiatement et à tout moment. Les systèmes de freinage doivent donc répondre à des exigences d'autant plus strictes. En outre, les vitesses maximales sont réglementées par les dispositions d'exécution de l'ordonnance sur les chemins de fer (DE-OCF). Les catégories de vitesses définissent la vitesse maximale qu'un train peut atteindre en descente en fonction de la déclivité et de l'équipement de freinage des véhicules.

Dario Jossen, responsable de l'ingénierie pour le matériel roulant et la traction à la Matterhorn-Gotthard-Bahn (MGB), explique: «Notre objectif est de rouler à la même vitesse en montée et en descente. L'exception est la gorge de Schöllenen qui, en raison de sa déclivité de

La vitesse étant limitée, de nombreux chemins de fer de montagne circulent plus rapidement à la montée qu'à la descente sur des tronçons à crémaillère. Si des vitesses supérieures étaient possibles à la descente, des horaires symétriques seraient possibles, ce qui simplifierait l'exploitation. La réduction du temps de parcours permettrait en outre, dans certaines circonstances, de diminuer le nombre de véhicules nécessaires par roulement. Et bien sûr, des horaires symétriques et des durées de voyage courtes seraient également avantageuses pour la clientèle.

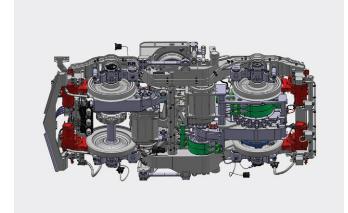


#Innovation TRV
#Chemin de fer
#Véhicules

Informations complémentaires:



Vue de dessous d'un bogie de train automoteur ORION. Le système de freinage 1 est constitué des freins à sabot (en rouge) et du frein à ruban réglable (en vert, juste à côté de la roue dentée). Le système de freinage 2 est formé par un frein à ruban non réglable (vert, en bas) qui agit sur les axes des roues dentées.



181‰, n'autorise qu'une vitesse maximale de 25 km/h au lieu de 35. Mais là, grâce au temps de parcours raccourci, nous pourrions couvrir le roulement de Göschenen à Andermatt toutes les demi-heures avec un seul train automoteur et libérer le deuxième pour d'autres emplois.»

Aussi souhaitable que soit une descente plus rapide, elle représente un défi technique, car la sécurité doit rester garantie. La puissance de freinage doit donc être augmentée. Or, le freinage génère davantage de chaleur lorsque la vitesse est plus élevée. Comme l'explique Dario Jossen, il n'est pas facile d'évacuer cette chaleur en raison du peu de place disponible et donc de la circu-

La rame automotrice ORION est idéale comme support d'essai, car la propulsion présente une puissance et une redondance élevées.

lation d'air limitée dans les bogies modernes. En collaboration avec Stadler, il a néanmoins trouvé une solution.

Pour la comprendre, il faut connaître la structure du système de freinage d'un train à crémaillère. Selon les DE-OCF, les véhicules sont équipés de deux systèmes de freinage mécaniques indépendants l'un de l'autre. Les derniers véhicules moteurs ORION livrés par Stadler pour la MGB ont des unités de freinage à sabot sur chaque essieu ainsi qu'un frein à ruban réglable qui agit sur les essieux de la crémaillère (système de freinage 1). Un autre frein à ruban non réglable, qui agit de la même manière directement sur les essieux de la crémaillère, sert de solution de repli (système de freinage 2). Les deux systèmes permettent d'immobiliser le train à tout moment dans les pentes les plus raides et à vitesse maximale.

Dans les deux modes de fonctionnement (adhérence et crémaillère), on utilise en outre le frein à récupération, dans lequel le moteur électrique génère la puissance de freinage. Selon les DE-OCF, il n'est toutefois pas considéré comme un système de freinage à part entière, car sa technique de commande n'atteint pas le même niveau de sécurité qu'un frein mécanique. Or il est autorisé dans l'exploitation quotidienne comme complément aux systèmes mécaniques. Comme il génère de l'énergie électrique lors du freinage qui peut être réinjectée dans le réseau (récupération), son utilisation est même particulièrement judicieuse.

L'approche de la MGB et de Stadler consiste à utiliser une combinaison de freins mécaniques et électriques pour le freinage à action rapide. Il est ainsi possible, même





à vitesse élevée, de maintenir dans la plage admissible l'apport de chaleur dans le frein à ruban et de garantir que le véhicule s'arrête à tout moment de manière fiable. Ce nouveau regroupement des moyens de freinage requiert une analyse des risques approfondie, dans laquelle des défaillances des systèmes ont également été considérées. Le dispositif antidéraillement n'est pas affecté par ce changement de système, et la sécurité reste assurée.

Le projet de la MGB et de Stadler comprend non seulement la conception du nouveau procédé de freinage et la construction d'un véhicule équipé en conséquence, mais aussi les homologations nécessaires pour les courses d'essai et l'exploitation régulière. Pour ce faire, ils collaborent étroitement avec les spécialistes des homologations de l'OFT. «En tout cas», estime Dario Jossen, «le projet n'aurait probablement pas vu le jour sans la Confédération. Le risque inhérent au projet aurait été trop important pour notre entreprise, vu les coûts de développement, d'essai et de postéquipement de 4,8 millions de francs. Mais grâce au soutien financier de la Confédération, une innovation a vu le jour: elle sera également utile à d'autres chemins de fer à crémaillère.»

La MGB prévoit d'équiper un jour de cette technique les douze véhicules de la première étape d'acquisition d'ORION et de demander pour eux une admission à l'exploitation. Elle a anticipé en commandant les véhicules en 2020 afin que les conduites pneumatiques et élec-

triques nécessaires ainsi que la commande des freins soient déjà préparées dans la mesure où les connaissances de l'époque le permettaient. Si les courses d'essai et d'homologation du prototype se déroulent avec succès, les onze véhicules restants doivent être transformés rapidement. Une deuxième série de 25 unités devrait suivre d'ici à 2029. La MGB disposera ainsi de suffisamment de rames automotrices ORION équipées du nouveau système de freinage pour pouvoir utiliser exclusivement des trains «rapides» sur certains tronçons et procéder ainsi à des adaptations ponctuelles de l'horaire. Dès la première série, la stabilité de l'horaire sera améliorée grâce à la vitesse plus élevée en descente. Et avec la prochaine révision des DE-OCF, la nouvelle série de vitesses «v+» sera probablement intégrée dans la réglementation.

Grâce au soutien financier de la Confédération, une innovation a vu le jour: elle sera également utile à d'autres chemins de fer à crémaillère.

La numérisation du transport de marchandises passe par l'attelage

Se contorsionner sous les tampons, accrocher le crochet de traction, serrer le cancelage, raccorder les conduites de frein, se contorsionner à nouveau sous les tampons, marcher jusqu'au prochain attelage: le travail du personnel de manœuvre pour former un train de marchandises est pénible, prend du temps et n'est pas sans danger. L'attelage automatique numérique fait tout cela par simple pression sur un bouton.

Où trouve-t-on encore des conditions de travail qui n'ont pas changé depuis cent ans, comme celles du personnel de manœuvre qui forme et défait les rames? Par tous les temps, de jour comme de nuit, ces travailleuses et travailleurs se déplacent à pied sur les voies. Se courber sous les tampons, soulever les crochets d'attelage d'une vingtaine de kilos et fixer les cancelages massifs est une lourde tâche physique. Elle est monotone, mais ne permet aucun moment d'inattention: rester sur les voies est toujours aussi dangereux.

Il est donc d'autant plus surprenant que la technologie d'attelage automatique des wagons existe depuis plus de cent ans. En 1903, Karl Scharfenberg a déposé un brevet pour un attelage central automatique. Il porte encore son nom aujourd'hui et s'utilise sur pratiquement tous les véhicules ferroviaires voyageurs récents. L'attelage Schwab, qui fonctionne de manière similaire, est plus courant sur les tramways.

L'une des principales raisons pour lesquelles l'attelage automatique ne s'est pas encore imposé dans le transport de marchandises est l'énorme effort nécessaire pour changer de système. Les wagons peuvent, pour autant qu'ils soient autorisés à le faire, circuler à travers toute l'Europe. Cela n'est possible que parce que l'attelage à vis est identique

sur tous les wagons. Si l'on voulait passer à l'attelage automatique, il faudrait transformer ou même renouveler une grande partie du parc de wagons, qui compte environ un demi-million de wagons. À cela s'ajouterait la

L'idée que le fret ferroviaire doit devenir numérique s'il veut rester compétitif s'est imposée dans le secteur.

transformation et l'équipement des locomotives de ligne et de manœuvre, ainsi que d'autres véhicules utilisés pour les manœuvres. Comme les wagons ont une très longue durée de vie, le taux de renouvellement est faible: seuls 7000 à 15 000 wagons de marchandises sont remplacés chaque année. Le passage à l'attelage automatique implique donc un vaste programme d'adaptation.

Il s'agit non seulement d'un défi logistique, mais aussi d'un tour de force financier pour le secteur, qui souffre déjà de faibles marges. C'est pourquoi, le 10 janvier 2024, le Conseil fédéral a proposé au Parlement, dans son message relatif à la loi sur le transport de marchandises, des mesures visant à promouvoir le transport ferroviaire de marchandises

#Innovations techniques fret ferroviaire #Chemin de fer #Véhicules

Rapport conceptuel



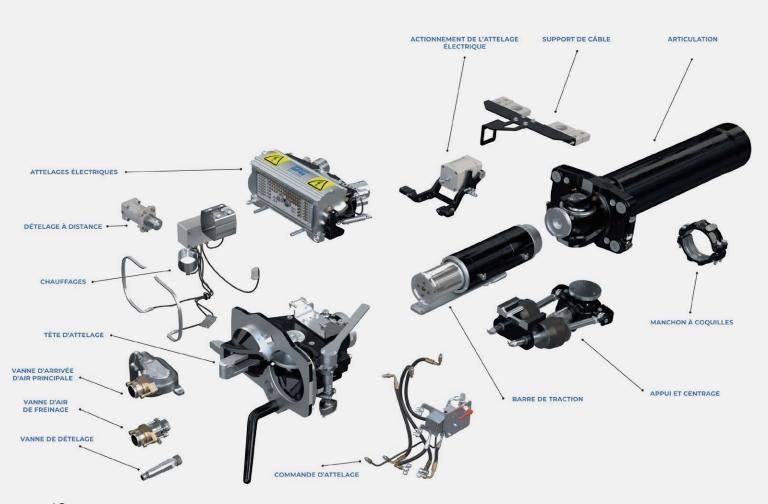
sur l'ensemble du territoire. Ce projet comprend également un montant de 180 millions de francs pour l'introduction de l'attelage automatique numérique (DAC, de l'anglais digital automatic coupling).

La version numérique de l'attelage automatique s'appuie sur un projet antérieur qui a démontré la faisabilité pratique de l'attelage automatique dans le transport de marchandises. Depuis, environ 200 wagons de marchandises, 19 locomotives de ligne et 16 locomotives de manœuvre sont équipés d'un attelage automatique. Ils circulent en transport combiné en exploitation régulière

depuis 2019. Dans le projet suivant, également soutenu par la Confédération, un attelage automatique dit numérique a été testé. Avec celui-ci, les wagons sont reliés – en plus de la liaison mécanique et pneumatique – par une conduite électrique et une conduite de données. Il s'agit d'une condition préalable pour les wagons intelligents, qui peuvent être équipés de capteurs et de techniques de commande et de régulation, nécessaires par exemple pour la localisation et la saisie de l'état.

Outre l'attelage automatique numérique, la numérisation du fret ferroviaire doit encore

Éléments de l'attelage automatique. La connexion pour les conduites électriques et de données en haut de la tête d'attelage est une condition préalable à la numérisation du transport de marchandises.



se doter d'autres éléments. L'essai automatique des freins, pour lequel CFF Cargo a obtenu l'autorisation en automne 2023, a déjà été réalisé. Jusqu'à présent, le personnel de manœuvre doit vérifier manuellement le fonctionnement des freins de chaque essieu de chaque wagon et donc la sécurité du train. À l'avenir, des capteurs pourront détecter la capacité de fonctionnement du frein et envoyer un message correspondant directement au système informatique des exploitants ferroviaires. Ici aussi, le long chemin menant à l'homologation a été soutenu financièrement par l'OFT.

D'autres projets seraient envisageables. Par exemple, la détection automatique de l'état a encore du potentiel. Aujourd'hui, le personnel de manœuvre vérifie que chaque wagon est correctement chargé et qu'il n'est pas endommagé. Cette tâche pourrait à l'avenir être assurée par des caméras et un logiciel basé sur l'intelligence artificielle. Un ordinateur évalue ainsi l'état du véhicule ainsi que le respect du profil d'espace libre et communique les résultats à la surveillance de l'exploitation. À l'avenir, toutes les informations concernant le wagon et son chargement seront disponibles sous forme numérique et en temps réel. Les clients, les détenteurs de wagons et les exploitants ferroviaires en profiteront tous.

L'idée que le fret ferroviaire doit devenir numérique s'il veut rester compétitif et prendre sa part des flux croissants de marchandises s'est imposée dans le secteur. La numérisation est la clé d'une production plus rapide et moins chère. Avec son engagement pionnier pour l'introduction de l'attelage automatique et de l'essai automatique du frein, CFF Cargo a donné une impulsion importante pour que cette thématique prenne de l'élan au niveau européen. Ainsi, les essais pratiques ont été déterminants pour qu'un type d'attelage s'impose désormais comme standard au niveau international. La course entre les attelages Schwab et Scharfenberg a longtemps été très serrée: les deux types se sont révélés adaptés à l'exploitation et à la technique. Mais en fin de compte, c'est l'original qui s'est imposé pour les essais, tant en raison des avantages commerciaux que de la



Ouvrier de manœuvre en train de desserrer et de décrocher la liaison vissée du crochet de traction. Les tuyaux servent à l'alimentation en air comprimé des freins.

La technologie permettant d'atteler automatiquement les wagons existe depuis plus d'un siècle.

plus grande disposition du fournisseur à innover. Entre-temps, les grands opérateurs ferroviaires et l'Union européenne ont également opté pour ce système.

120 ans après son brevet, l'invention de Karl Scharfenberg pourrait se révéler décisive pour faire entrer le fret européen dans l'avenir numérique. Mais il reste encore de nombreux obstacles techniques, financiers, opérationnels et politiques à surmonter avant que la manœuvre et l'expédition entièrement automatisées fonctionnent à partir du centre de gestion du trafic. D'ici là, il faudra continuer à mettre les mains dans le cambouis.

Aussi rapide que l'avion, aussi respectueux du climat que le train

Seul le train est capable d'offrir un voyage confortable et respectueux du climat à travers l'Europe. Mais sur les longues distances, l'avion reste l'alternative la plus appréciée car la plus rapide. Le transport sous vide promet de combiner les avantages des deux moyens de transport, et la Suisse est en première ligne pour faire de cette vision une réalité.

Si les trains voulaient concurrencer les avions sur les longues distances, ils devraient être nettement plus rapides: aujourd'hui, leur vitesse maximale est d'environ 320 km/h. Au-delà, la résistance de l'air devient un défi: elle augmente en proportion du carré de la vitesse. Si le train pouvait circuler sous vide, la résistance de l'air pourrait être considérablement réduite, ce qui permettrait d'augmenter la vitesse sans que la consommation d'énergie n'augmente d'autant.

Le concept des systèmes sous vide a été esquissé dans ses grandes lignes dès 1812 par l'ingénieur anglais George Medhurst. Une centaine d'années plus tard, le chercheur en fusées Robert Goodard a continué à élaborer le principe du transport dans un tube sous vide, pour lequel il a même obtenu un brevet après sa mort. En Suisse, l'ingénieur lausannois Rodolphe Nieth a repris le concept et a proposé en 1974 la construction de Swissmetro. Ce train à sustentation magnétique devait relier Saint-Gall à Genève et Bâle à Chiasso dans un tube sous vide souterrain.

Bien que des études en aient confirmé la faisabilité et la rentabilité, Swissmetro n'a jusqu'à présent pas dépassé la phase de conception. Pour Julian Ehwald, architecte de projet en recherche et développement à l'EuroTube Foundation, Swissmetro était probablement en avance sur son temps. Sa mise en veilleuse s'explique par plusieurs raisons, dont l'une est peut-être que, dans la concurrence au financement par la Confédération, il a été supplanté par l'aménagement des transversales alpines, nettement plus tangibles.

L'idée d'un voyage ultrarapide dans un tube poursuit toutefois son chemin. Aux États-Unis, Elon Musk a lancé un concours de recherche pour développer, sous le nom d'Hyperloop, un système qui devait permettre de relier Los Angeles à San Francisco à grande vitesse. Le projet a depuis été abandonné, mais en Chine, en Corée du Sud, en Inde ou aux Pays-Bas, des équipes de recherche travaillent toujours à rendre la technologie praticable. Et au cœur de ces projets, des groupes suisses portent vers l'avenir les idées de leurs prédécesseurs et les expériences acquises lors des légendaires concours de recherche Hyperloop d'Elon Musk: l'équipe d'étudiantes et d'étudiants Swissloop de l'EPFZ, la start-up Swisspod et le centre de recherche EuroTube.

«Actuellement, l'activité dans ce domaine est en pleine effervescence», estime Julian Ehwald. Il est en contact étroit avec d'autres chercheuses et chercheurs, notamment aux

#SETP 2050 #Métro #Système des TP

Informations complémentaires:



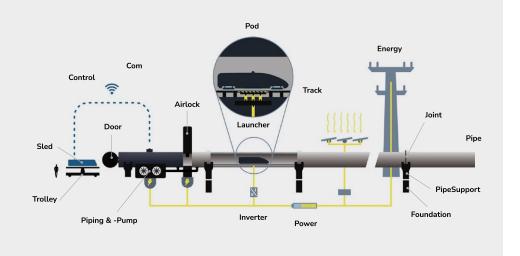


Pays-Bas. «Le gouvernement néerlandais a donné une forte impulsion à toute l'Europe avec la création du Hyperloop Development Program. Mais la Suisse est également très active dans ce domaine. Elle se concentre sur les sous-systèmes pour lesquels nous pouvons prétendre à une position de pointe.»

En ces temps de changement climatique, il est clair qu'un nouveau système de transport doit être au moins aussi performant en termes d'émissions de gaz à effet de serre que les précédents. Dans leur étude soutenue par le programme SETP 2050, Julian Ehwald et son équipe ont donc calculé le bilan climatique d'un système de transport sous vide par rapport aux moyens de transport conventionnels sur l'ensemble de son cycle de vie. Leur constat: par rapport à un vol intérieur, les émissions sont environ dix fois inférieures. Même si l'avion était ravitaillé en carburant durable, le train sous vide serait encore deux fois et demie plus écologique. Si l'on tient compte des incertitudes des calculs, l'Hyperloop peut présenter un bilan aussi favorable que le train.

La plus grande quantité d'émissions de gaz à effet de serre provient de l'infrastructure, c'est-à-dire du système de tunnels et de gares souterraines. La production des matériaux nécessaires (béton, acier) se répercute nettement sur le bilan global. C'est pourquoi Eurotube mène des recherches sur des constructions moins gourmandes en béton et en acier. Les émissions dues à la construction des véhicules et à leur exploitation viennent en deuxième position. Dans ce domaine, la solution pour réduire les émissions réside dans une construction légère des capsules, dans le dimensionnement de leurs batteries et dans le taux d'utilisation des véhicules.

> Les coûts de construction et d'exploitation devraient se situer entre 15 et 20 ct./vkm, soit dans la fourchette des coûts du transport aérien.



Le système de vide est constitué d'un tube en béton ou en acier. De grands ventilateurs créent un vide partiel qui réduit la résistance de l'air pour les véhicules (capsules ou « pods »). Ils flottent sur un champ magnétique et sont maintenus sur leur trajectoire par des rails. Aux deux extrémités du tube se trouve un sas qui isole le système de son environnement et maintient la différence de pression.

La consommation d'énergie est largement déterminée par la vitesse. Pour une vitesse de croisière de 600 km/h, les autrices et auteurs estiment la consommation spécifique à environ 0,08 kWh par voyageurkilomètre (kWh/vkm), et à 900 km/h, elle passe à environ 0,1 kWh/vkm, contre environ 0,07 kWh/vkm pour le transport ferroviaire conventionnel. Le besoin accru s'explique par la création du vide et du champ magnétique, les installations d'accélération pour les capsules, le refroidissement et la ventilation des installations et des véhicules, ainsi que par la résistance de l'air, qui n'est pas négligeable en raison de la vitesse élevée malgré la faible pression.

Les chercheuses et chercheurs ont également calculé les coûts du système. Pour la construction de la ligne entre Genève et Zurich, ils estiment les investissements à hauteur de 15 à 25 milliards de francs. Ils ont toutefois dû faire de nombreuses hypothèses, car il n'existe pas encore de valeurs empiriques. Les coûts de développement ne sont pas non plus inclus dans ces estimations. On peut tout de même affirmer que les investissements se situent dans un cadre usuel pour les grands projets d'infrastructure.

Les coûts de construction et d'exploitation devraient se situer entre 15 et 20 ct./vkm, soit dans la fourchette des coûts du transport aérien. Ils sont environ trois fois inférieurs à ceux du transport ferroviaire conventionnel (grandes lignes et lignes régionales). L'estimation se base sur un temps de trajet de moins d'une heure entre Genève et Zurich et sur la demande attendue selon les prévisions de la Confédération. Elle ne

tient pas compte du trafic induit, c'est-à-dire de la demande supplémentaire qui pourrait être générée par la nouvelle offre.

Les atouts du système résident dans les longues distances en Europe plutôt qu'en Suisse. Julian Ehwald estime donc que «pour la Suisse en tant que site de recherche et de technologie, il vaut la peine de garder un pied dans la porte, surtout maintenant que l'idée a le vent en poupe en Europe. Du point de vue de la politique des transports, nous devrions nous assurer d'obtenir une connexion au réseau européen. Et du point de vue du climat, je pense qu'Hyperloop peut être une solution pour réduire les vols en Europe.»

Mais nous sommes encore loin du premier trajet en train futuriste. Jusqu'à présent, il n'existe que des prototypes sur des tronçons relativement courts ou à l'échelle de la maquette. De nombreux composants nécessaires doivent encore être développés,

«Du point de vue du climat, Hyperloop peut être une solution pour réduire les vols en Europe.» par exemple les sas qui séparent les tubes sous vide des zones où règne une pression atmosphérique normale, comme les gares. D'autres domaines de recherche portent sur la construction d'un tube de tunnel étanche à l'air, la propulsion du train magnétique, l'alimentation en air dans les véhicules ou le refroidissement des moteurs de traction.

La recherche se poursuit intensivement, en grande partie dans l'indifférence générale. L'année dernière, l'équipe Swissloop a ainsi reçu cinq prix sensationnels pour son prototype de capsule («pod» en jargon) lors de la semaine européenne de l'Hyperloop à Edimbourg. À Dübendorf, l'EuroTube Foundation construit un tronçon d'essai de 120 m de long, et dans le Bas-Valais, elle prévoit un tunnel d'essai de 3 km – ce serait le plus long au monde. Nous pouvons donc nous réjouir de découvrir bientôt d'autres innovations «made in Switzerland».

Comment modéliser un système qui n'existe pas encore?

Pour pouvoir effectuer leurs calculs, les chercheuses et chercheurs ont défini une ligne reliant Genève, Lausanne, Berne et Zurich et formant un système composé d'un tunnel de 4,6 mètres de diamètre revêtu de béton sous une pression de 10 mbar. Les véhicules («pods») ont un diamètre extérieur de 3,4 mètres et peuvent transporter 70 personnes (sur de longues distances) ou 200 personnes sur de courtes distances. On suppose un taux d'utilisation de 80% (analogue au transport aérien) et un report modal de près de 20 %. Les pods flottent sur un coussin magnétique au-dessus de rails de guidage et peuvent accélérer et freiner par leurs propres moyens. Une variante envisagée est un système d'accélération au sol, qui a l'avantage d'alléger les véhicules et de consommer moins d'énergie. Deux vitesses d'exploitation de 600 et 900 km/h sont comparées. Le mix électrique est identique au courant ferroviaire actuel des CFF.



Les tubes de tunnel en béton et en acier contribuent pour une part importante aux émissions de gaz à effet de serre du transport sous vide. Julian Ehwald et son équipe cherchent donc des moyens de réduire l'empreinte carbone de l'infrastructure grâce à des constructions améliorées et à des matériaux respectueux du climat.

Quand les bus se garent tout seuls

Michèle Moser immobilise son bus dans la cour du dépôt et en descend. Sa tournée d'aujourd'hui sur la ligne 2 est terminée. Elle avance tranquillement vers la sortie et observe comment son bus se dirige entre les autres véhicules garés jusqu'à l'aire de lavage. À côté, le bus électrique de la ligne 8 est en train de se garer à la borne de recharge. Il est vide, la conductrice n'y fait même pas attention.

De telles scènes relèvent encore de l'utopie. Mais l'étape du dépôt automatique de bus n'est peut-être pas si éloignée. Les essais de minibus autonomes à Sion, Berne, Zurich, Zoug ou Schaffhouse ont déjà montré que la technologie des véhicules est prête. Celle de l'infrastructure aussi: des applications pilotes ont confirmé que l'automatisation est en principe possible. L'installation expérimentale de BMW à Munich, où les voitures sont guidées par des caméras et des capteurs à travers l'atelier et circulent sans conducteur d'une station à l'autre, en est un exemple.

Ce qui est possible pour les voitures devrait aussi fonctionner pour les bus, ont estimé les membres du consortium AutoDepot. Sous la direction des transports publics fribourgeois (TPF), des entreprises de transport, des associations, des hautes écoles et des partenaires industriels se sont réunis pour développer la vision d'un dépôt de bus automatisé en Suisse. Avec le soutien du programme d'innovation dans le transport régional de voyageurs, ils étudient les conditions dans lesquelles cette vision peut devenir réalité.

Les premières recherches effectuées auprès de l'industrie, des entreprises de transport et des hautes écoles ont rapidement montré qu'un dépôt de bus automatisé était en principe réalisable. Deux variantes de système sont envisageables: soit le dépôt est exploité avec des véhicules autonomes, soit la commande des véhicules est assurée

Dépôt de bus de Bernmobil. Avec les progrès technologiques, on peut imaginer que dans quelques années, les véhicules y manœuvreront de manière autonome.

#Innovation TRV#Bus
#Véhicules

Informations complémentaires:





Même s'ils se déplacent de manière autonome, les bus du dépôt automatisé sont surveillés en permanence. En cas de besoin, le personnel du centre de contrôle peut même les commander à distance.



par des capteurs fixes installés dans le dépôt. La première est plus simple dans la mesure où le dépôt n'a pas besoin d'être transformé; il suffit d'une centrale de commande qui donne aux bus l'ordre de se rendre à leur place. Mais cela présuppose que tout le parc de bus soit automatisé.

Un dépôt automatisé serait peut-être plus rapidement réalisable si la commande et la surveillance se faisaient à un endroit précis. L'infrastructure nécessaire (capteurs, caméras et ordinateurs) est déjà disponible aujourd'hui, il ne manque plus que des systèmes qui ont fait leurs preuves.

L'équipement côté infrastructure aurait en outre l'avantage de permettre une exploitation mixte avec des véhicules non automatisés. La condition préalable serait toutefois que les bus permettent le «drive by wire», c'est-à-dire que la direction, les freins et le groupe motopropulseur de chaque véhicule puissent être commandés à distance depuis le poste de commande. De nombreuses voitures sont aujourd'hui équipées de ces technologies, mais en règle générale, les bus ne le sont pas encore.

En plus des conditions techniques, le consortium a également étudié la rentabilité. Ses premières estimations l'amènent à conclure que l'exploitation d'un dépôt automatisé pourrait être économiquement intéressante. Les activités effectuées aujourd'hui par le personnel, telles que le lavage, le ravitaillement en carburant ou la recharge, l'entretien et le stationnement des véhicules, représentent un nombre d'heures considérable. Le consortium estime que la suppression de ces coûts compenserait largement les investissements et l'exploitation d'un dépôt automatisé.

Les premières recherches ont rapidement montré qu'un dépôt de bus automatisé était en principe réalisable.

L'étude est désormais terminée. Au vu des résultats positifs, le consortium souhaite à présent réaliser un test sur le terrain le plus rapidement possible afin d'acquérir de l'expérience dans la pratique. Les premières discussions pour assurer le financement sont en cours. Malgré tout, il faudra encore un certain temps avant que la scène décrite ci-dessus ne devienne le quotidien du personnel de conduite. Toujours est-il que si tout se passe bien, un prototype devrait donner une idée du dépôt de bus du futur dès 2028.

Mesurer la vitesse avec le champ magnétique

Mesurer la vitesse d'un train à l'aide du champ magnétique de la terre et de l'environnement ferroviaire, il fallait y penser. En effet, le tachymètre, le radar et le GPS existent déjà. Pourquoi alors un quatrième système? Un examen plus approfondi montre cependant que le champ magnétique pourrait s'avérer meilleur en cas de mauvaises conditions météorologiques et dans les tunnels.



L'un des deux boîtiers situés sur la face inférieure du train. Il contient des capteurs qui mesurent le champ magnétique dans les sens longitudinal, transversal et vertical par rapport au rail. À l'intérieur du tube passent les câbles pour l'alimentation électrique et la connexion des données à l'ordinateur dans le compartiment à bagages.

#Innovation TRV
#Chemin de fer
#Véhicules

Informations complémentaires



Tarek Vennemann est en route entre Brigue et Saint-Gingolph, non pas confortablement assis dans un compartiment, mais debout dans le compartiment à bagages d'un train automoteur Domino, où il a installé son dispositif de mesure. Quelques jours auparavant, en collaboration avec des techniciens de RegionAlps, il a placé sept capteurs sous l'automotrice et les a câblés à son ordinateur. Il suit maintenant avec attention l'évolution des données de mesure que les capteurs envoient en permanence sur son écran.

De retour dans son bureau d'Enotrac à Lausanne, Tarek Vennemann analysera ensuite les données. L'ingénieur veut savoir si le champ magnétique terrestre peut servir à mesurer la vitesse d'un train et à déterminer sa position. Cela serait par exemple utile pour une application ETCS, où le tronçon est exploité sans signaux extérieurs. Afin de guider les trains en toute sécurité, il est essentiel de pouvoir les localiser et mesurer leur vitesse de manière précise et fiable.

Aujourd'hui, on obtient ces données grâce à des systèmes de localisation par satellite (GPS) et par calcul à l'aide de la vitesse de circulation. Toutefois, le GPS n'est autorisé qu'à titre d'auxiliaire de localisation et ne fonctionne pas dans les tunnels. La localisation par calcul est donc déterminante. Pour des raisons de sécurité et de disponibilité, les trains sont équipés d'au moins deux dispositifs indépendants de mesure de la vitesse, le plus souvent un tachymètre et un radar. Le premier, comme pour les voitures, mesure le nombre de tours d'essieu et détermine la vitesse à partir de ce nombre via le périmètre des roues. Le deuxième émet des ondes radar et calcule la vitesse à partir du décalage de fréquence du signal réfléchi par l'environnement (effet Doppler).

Les deux systèmes présentent un inconvénient majeur: ils manquent de précision lorsque les conditions météorologiques sont mauvaises. Le tachymètre fournit des valeurs inexactes lorsque l'adhérence est réduite et que les roues patinent, par exemple à cause de l'humidité ou de la neige. Quant au radar, c'est la neige soufflée ou le givre qui perturbent la mesure. Or si la mesure de la vitesse ne fonctionne pas correctement, le train doit ralentir pour des raisons de sécurité, voire être complètement retiré de la circulation afin de remédier à l'anomalie. Cela entraîne des perturbations de l'exploitation et des coûts inutiles.

Le champ magnétique terrestre pourrait offrir une solution à ce problème. Il est légèrement différent à chaque endroit de la surface de la Terre, en fonction de la situation géographique, du sous-sol et de l'environnement. Il peut être mesuré à l'aide de capteurs placés par exemple le long d'un train. Si le train se déplace, le décalage temporel entre les mesures de deux capteurs permet de déterminer la vitesse. Le système est indépendant des conditions météorologiques et fonctionne également dans les tunnels.

L'idée de mesurer la vitesse à l'aide du champ magnétique existait depuis longtemps chez les collaboratrices et collaborateurs d'Enotrac. Mais l'impulsion initiale a été donnée lorsque le directeur de RegionAlps, Yves Maclay, leur a parlé de ses problèmes d'exploitation dus aux mauvaises conditions météorologiques. La possibilité de bénéficier du programme «Innovation dans le transport régional de voyageurs» est alors arrivée à point nommé, et il n'a pas fallu longtemps pour que la demande commune soit déposée.

Mais le procédé n'est pas aussi simple qu'il n'y paraît. Les capteurs détectent notamment d'autres signaux que le champ magnétique terrestre, par exemple les champs induits par les moteurs de traction ou par les installations électriques sur la voie. Ce «bruit de fond» doit être filtré par calcul. Il s'avère également que la mesure est influencée différemment par les signaux parasites selon la direction. La mesure de la composante verticale s'est avérée être la plus appropriée.

Entre-temps, Tarek Vennemann et ses collègues ont pu confirmer par leurs mesures que la méthode fonctionne de manière fiable. Il manque encore le financement de la prochaine phase, mais Andreas Bleiker, membre de la direction d'Enotrac, se dit confiant quant à la possibilité de le trouver. Si les autres essais se déroulent bien, il estime qu'un lancement sur le marché dans les deux ans est à portée de main.

«Si les autres essais se passent bien, un lancement sur le marché dans les deux ans est à notre portée.»

Chez RegionAlps, on se réjouit déjà des améliorations que le nouveau système pourrait apporter à l'exploitation. Néanmoins, il ne va pas de soi qu'une entreprise de transport prenne en charge le surcroît de travail que de tels projets impliquent. Christian Nellen, responsable du matériel roulant et de la planification, justifie ainsi son engagement: «Grâce à notre petite taille, nous sommes rapides et flexibles dans la mise en place de tests. C'est pourquoi il est intéressant pour les développeurs de collaborer avec de petites entreprises ferroviaires comme la nôtre. Bien sûr, ce type de projets nous met au défi, car nos ressources en personnel sont limitées. Mais même en tant que petite entreprise de transport ferroviaire, nous voulons assumer notre responsabilité en matière d'innovations qui font avancer le secteur.»



Vue extérieure de la composition utilisée comme train d'essai. Les sept capteurs se trouvent dans deux boîtes entre les deux bogies.

Protection contre le bruit ou contre les vibrations – le beurre ou l'argent du beurre?

Rails, traverses, ballast – la structure d'une voie ferrée peut sembler simple. Mais lorsqu'il s'agit des phénomènes physiques dus au passage d'un train, les choses se compliquent rapidement. Un modèle de calcul permet désormais de calculer le bruit et les vibrations de manière globale. La recherche de mesures contre ces nuisances devient ainsi plus simple.

«Le bruit et les vibrations ont toujours été le talon d'Achille du chemin de fer.» Fredy Fischer le dit en connaissance de cause: c'est son métier depuis plus de vingt ans. Le chef de section à l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) était présent lorsqu'un grand programme d'assainissement phonique des chemins de fer a été développé, approuvé par le Parlement et mis en œuvre sous la direction des CFF. Le crédit d'assainissement de 1,854 milliard de francs (prix de 1998) a permis d'assainir le matériel roulant suisse du transport de voyageurs et de marchandises jusqu'en 2016. En complément, quelque 276 kilomètres de parois antibruit ont été construits et plus de 70 000 fenêtres antibruit ont été posées.

L'objectif initial de protéger 80 % de la population contre le bruit des chemins de fer n'étant pas encore atteint, le Parlement a exigé des mesures supplémentaires dans la limite du crédit alloué. Depuis lors, des aides financières ont notamment été accordées pour l'acquisition de wagons particulièrement silencieux et la recherche du secteur public dans le domaine du bruit ferroviaire a été financée.

Depuis 2020, les wagons de marchandises bruyants sont interdits en Suisse. Néanmoins, en raison de l'augmen-

#Bruit ferroviaire

#Chemin de fer #Infrastructure

Rapport final (en anglais):



tation du trafic et de la densification des constructions, d'autres mesures sont recherchées pour rendre le chemin de fer moins bruyant. Selon la loi sur la protection de l'environnement, ces mesures doivent être prises en premier lieu à la source du bruit, c'est-à-dire au niveau du véhicule et de la voie.

C'est là qu'intervient l'étude que le professeur Joël Cugnoni et son équipe de la Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG) à Yverdon ont achevée l'année dernière. Elle a cherché une méthode visant à trouver la combinaison optimale des différents éléments de la voie. L'objectif est de réduire non seulement le bruit, mais aussi l'usure de la voie et les vibrations provoquées par le passage des véhicules.

Les secousses peuvent provoquer des vibrations ou des bruits de structure gênants dans les bâtiments voisins. Elles peuvent également provoquer des phénomènes de fatigue dans le matériau de superstructure et des tassements dans le corps de la voie, ce qui accroît le besoin d'entretien de la voie et augmente donc les coûts. C'est pourquoi des éléments absorbant les vibrations sont installés aux endroits exposés, par exemple entre le rail et la traverse («intercalaires») ou sous les traverses (semelles sous traverses).

La Confédération, les gestionnaires d'infrastructure et les hautes écoles collaborent depuis des années dans le cadre de la recherche du secteur public sur le bruit ferroviaire. Du côté de la Confédération, l'OFEV assure le suivi du projet et la communication, l'OFT le financement. Dans le cadre du projet avec la HEIG, diverses combinaisons de voies, de traverses, de superstructures et d'éléments amortisseurs ont été évaluées, testées

Masque de saisie du modèle utilisé. Les propriétés physiques caractéristiques des éléments de construction (rail, intercalaire, traverse, pinces, etc.) peuvent être définies individuellement. Il est en outre possible de sélectionner des traverses de différentes géométries ainsi que deux types de rails.

dans un dispositif expérimental et modélisées par calcul. Selon Fredy Fischer, tout l'art consiste à combiner les différents composants de la superstructure de manière à optimiser l'ensemble du système. Il faut éviter qu'une mesure contre le bruit n'entraîne davantage de vibrations et d'usure, ou inversement.

Par le passé, la recherche de combinaisons permettant de réduire à la fois le bruit et les vibrations s'est avérée laborieuse, longue et coûteuse. Il fallait à chaque fois installer des composants sur la voie, les observer pendant une longue période et effectuer des mesures. Le modèle développé par la HEIG constitue désormais un raccourci qui permet de simuler les différents éléments. Les spécialistes peuvent utiliser cet outil expert, librement accessible sur Internet, pour tester n'importe quelle combinaison et son effet sur le bruit et les vibrations. En introduisant leurs propriétés physiques telles que la dimension et l'élasticité, il est également possible d'étudier de nouveaux matériaux.

Les chercheuses et chercheurs ont fait l'épreuve de résistance et testé différentes combinaisons: deux profils de voie, deux types de traverses (béton et bois), une semelle sous traverse et trois intercalaires différents. Les calculs ont montré une bonne concordance avec les résultats d'essais sur le terrain, confirmant ainsi que le modèle fournit des informations correctes.

Pour Fredy Fischer, un grand pas a ainsi été franchi. «C'est comme chez le médecin: il faut d'abord faire un diagnostic clair avant de prescrire un médicament. L'outil nous aide à comprendre le problème à l'origine du bruit





«Cet outil nous aide à comprendre le problème à l'origine du bruit et des vibrations.»

et des ébranlements. Ensuite, on peut choisir la mesure la plus prometteuse.»

Le modèle ouvre également la possibilité d'évaluer de nouvelles approches de réduction du bruit. Ainsi, il serait possible à l'avenir de modifier la forme, le matériau et l'espacement des traverses, d'utiliser d'autres fixations ou de tester d'autres élastomères pour les intercalaires et les semelles sous traverses.

Fredy Fischer est surtout heureux que le modèle confirme ce qu'un essai sur le terrain a récemment révélé: une combinaison d'intercalaires hautement amortissants et de tapis sous ballast permet de réduire à la fois le bruit et les ébranlements. Il semble donc qu'il y ait un moyen d'obtenir le beurre et l'argent du beurre.

Dispositif expérimental dans le projet de la HEIG. Un «shaker» placé dans le cube blanc produit une vibration sur la voie, qui se propage dans les traverses. Le son émis est mesuré par des microphones qui se déplacent sur un support au-dessus de l'installation expérimentale. Les vibrations sont enregistrées par des capteurs d'accélération. Les mesures servent à valider le modèle de calcul.



Pr Olga Fink, EPFL

Comment l'intelligence artificielle contribue à optimiser l'infrastructure

L'intelligence artificielle (IA) a fait son entrée depuis longtemps dans les applications et les produits de Google, Meta, Amazon et autres. Elle aide à identifier des motifs dans les données et à en déduire des décisions. Cette faculté peut également servir à optimiser l'exploitation et la maintenance d'infrastructures complexes. Olga Fink, professeure à l'EPFL, tente de tirer davantage des centrales électriques et des réseaux électriques grâce à l'intelligence artificielle.

L'IA est sur toutes les lèvres – et dans tous les smartphones. Fait-elle vraiment partie de notre quotidien?

On peut tout à fait le dire. L'IA existe déjà dans de très nombreuses applications. Par exemple, Google Maps utilise des réseaux de neurones basés sur des graphes pour des prévisions de trafic plus précises et pour calculer les heures d'arrivée. Cela permet ensuite de trouver l'itinéraire le plus rapide. Les recommandations personnelles de films de Netflix ou les bannières publicitaires dans nos navigateurs proviennent également de l'IA, tout comme les boutiques en ligne qui proposent des offres personnalisées. Les IA

analysent le comportement des utilisatrices et utilisateurs et d'autres données pertinentes, y recherchent des motifs et font des prévisions sur les contenus ou les produits les plus susceptibles de les intéresser.

Vous ne vous occupez pas de films ni de boutiques en ligne, mais d'infrastructures. Comment décririez-vous votre sujet de recherche?

Nous développons des algorithmes intelligents qui améliorent les performances et la fiabilité des infrastructures complexes. Nos recherches peuvent par exemple être appliquées aux centrales hydroélectriques, aux #Recherche sur les
infrastructures ferroviaires
#Chemin de fer
#Production d'énergie
#Production/
exploitation

Informations complémentaires:



infrastructures ferroviaires et aux réseaux de distribution d'électricité. Nous avons également étudié des éoliennes, des turbines à gaz et des moteurs d'avion. De manière générale, nous nous intéressons aux systèmes complexes dans lesquels les décisions sont prises sur la base d'une multitude de données.

Et comment utilisez-vous l'IA dans ces cas-là?

En règle générale, nous utilisons les données des capteurs des installations. Ceux-ci surveillent par exemple l'état de l'installation et de son fonctionnement et déclenchent une alarme en cas de dépassement de valeursseuils prédéfinies, par exemple lorsqu'un palier de moteur risque de surchauffer. Nous développons des algorithmes que nous entraînons sur des bases des données afin de reconnaître des motifs dans ces informations et d'en tirer des conclusions. Nous sommes ainsi en mesure de donner des indications anticipées aux exploitants d'installations. Ils peuvent par exemple détecter à temps les écarts par rapport aux valeurscibles, estimer la durée de vie restante du palier de moteur en question ou optimiser le fonctionnement de l'installation.

L'IA est donc un logiciel qui apprend?

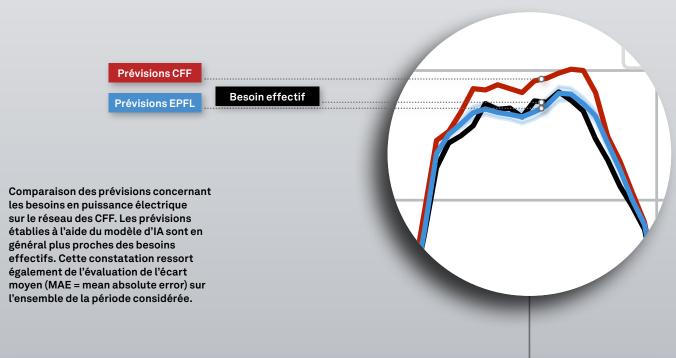
Pour ainsi dire. Prenons un autre exemple pour illustrer mon propos: nous avons étudié le fonctionnement des drones, dont l'utilisation est déterminée en grande partie par la puissance de la batterie. Comme la batterie vieillit, sa puissance et donc le rayon d'action du drone diminuent avec le temps. Nous avons développé un algorithme qui, à partir des données du drone, apprend son comportement en vol et peut estimer l'état de la batterie. Sur cette base, il permet au drone de décider s'il peut encore effectuer une mission et de déterminer la trajectoire la plus économe en énergie.

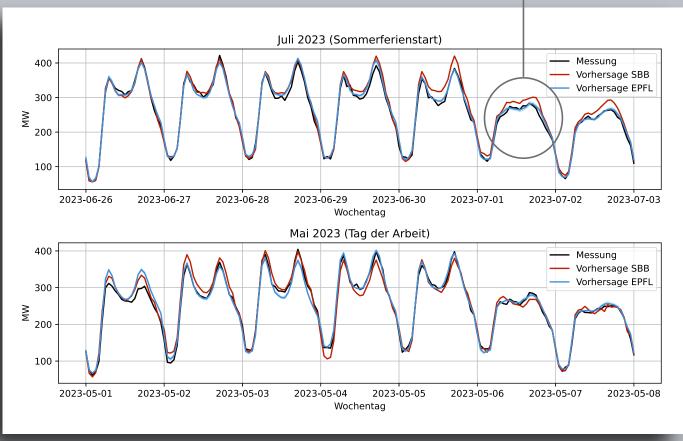
Avec le soutien de l'OFT, vous avez réalisé trois études de cas pour CFF Infrastructure. De quoi s'agissait-il?

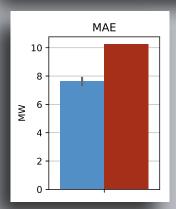
Nous travaillons ici en collaboration avec les CFF afin de pouvoir détecter et prédire les états critiques des installations et des réseaux énergétiques. La première étude de cas a porté sur l'état des capteurs dans les centrales électriques et dans les sousstations. Cela nous permet d'une part d'évaluer le fonctionnement des capteurs euxmêmes et la qualité des informations qu'ils fournissent, et d'autre part de donner des conseils d'exploitation et de maintenance du système.



Intelligence collective: Olga Fink en échange avec ses doctorants Raffael Theiler et Mengjie Zhao.







Et pour les deux autres études de cas?

Dans la deuxième étude, il s'agissait de déterminer l'efficience d'une centrale hydroélectrique à partir de données de capteurs et d'en déduire des recommandations afin d'optimiser son fonctionnement. Actuellement, nous travaillons sur la troisième étude de cas, dans laquelle nous prédisons le taux de charge de l'alimentation en courant de traction. Les CFF disposent bien sûr déjà de leurs modèles en la matière, mais ceux-ci ne sont pas capables d'apprendre. Nous entraînons l'algorithme en lui fournissant, outre les données des périodes précédentes, des informations de planification pour le lendemain, par exemple des prévisions météorologiques ou l'horaire des trains de voyageurs et de marchandises. Grâce à l'IA, nous avons déjà pu augmenter considérablement la fiabilité et la précision des prévisions.

En quoi est-ce une innovation?

Du côté de la recherche scientifique, l'innovation réside dans le fait que nous développons des méthodes qui associent les interactions temporelles et spatiales, au moyen de calculs complexes et de modèles spécifiques. En outre, pour les modèles, nous avons non seulement utilisé les données de l'installation, mais aussi intégré des relations physiques. L'IA utilise ensuite la physique comme source d'information complémentaire, ou bien nous entraînons l'IA à l'aide des lois de la physique. Cela rend les résultats des algorithmes plus solides et plus fiables.

Qu'est-ce qui vous fascine dans les projets sur lesquels vous travaillez?

On peut résoudre de très nombreux problèmes avec l'IA. La nouvelle s'est répandue entre-temps. Par le passé, il fallait souvent convaincre les gens de nous fournir des données. Aujourd'hui, les données nous sont souvent proposées parce que l'on voit qu'elles permettent de résoudre des problèmes. Ce qui me passionne, c'est le dynamisme du domaine de recherche: il est en constante évolution, avec des impulsions continues pour développer des nouveautés. En même temps, suivre cette évolution rapide et rester toujours à la pointe des connaissances malgré les progrès constants peut aussi être un défi.



Comment utiliserons-nous l'IA dans les transports publics dans dix ans?

Je pense qu'avec l'IA, nous verrons une interconnexion sans faille des systèmes de transport grâce à des chaînes de transport personnalisées. Les voyages en deviendront encore plus faciles. Dans ce développement, les véhicules autonomes joueront un rôle important, en particulier sur le premier et le dernier kilomètre. Au niveau des systèmes, l'IA contribuera à une utilisation plus efficace des ressources pour l'exploitation et l'entretien des infrastructures. Les exemples tirés de nos projets de recherche indiquent déjà l'ampleur du potentiel dans ce domaine.

L'IA va-t-elle nous mettre au chômage?

Je ne pense pas. Mon pronostic est plutôt qu'il y aura une symbiose entre l'humain et les algorithmes. L'être humain n'est pas très doué pour traiter de grandes quantités de données et en déduire des décisions. L'IA peut aider dans ce domaine en proposant différentes options. Elle pourrait également jouer un rôle d'«avocat du diable» en indiquant aux gens, lorsqu'ils prennent des décisions, ce qu'ils devraient prendre en consi-



La charge des réseaux peut varier fortement au cours de la journée. Des modèles basés sur l'IA aident à prévoir les besoins avec plus de précision.

dération et quelles seraient les alternatives. Pour les expertes et experts, il pourrait être intéressant et passionnant de vérifier leurs décisions à l'aide de ces indications. Plus fondamentalement, je pense que de nombreux emplois deviendront plus intéressants grâce à l'IA, car elle libère les gens des tâches routinières et leur permet de se consacrer davantage à la part créative du travail.

"

Grâce à l'IA, nous avons déjà pu augmenter considérablement la fiabilité et la précision des prévisions.

Comment faire entrer la physique dans un modèle d'IA?

L'intelligence artificielle (IA) désigne la capacité des logiciels ou des machines d'effectuer des tâches qui requièrent typiquement l'intelligence humaine. Ces systèmes sont capables d'apprendre, de s'adapter et de prendre des décisions sur la base des données disponibles. L'apprentissage automatique (machine learning) se produit lorsque les systèmes analysent de vastes ensembles de données et y reconnaissent des motifs. Récemment, une large gamme de puissants algorithmes d'apprentissage automatique, utilisables pour diverses tâches, a été développée.

Les modèles utilisés par Olga Fink et d'autres chercheuses et chercheurs sont basés sur des réseaux de neurones dont la structure est inspirée de celle du cerveau humain. Ils sont entraînés sur des données saisies, de sorte qu'ils puissent reproduire le plus précisément possible le comportement d'un système observé dans la réalité. Ainsi, les modèles peuvent également servir à produire des prévisions, à condition que les données disponibles se comportent de manière similaire à celles qui ont été utilisées pour entraîner le modèle.

La précision des prévisions par ces modèles peut être améliorée en les entraînant non seulement avec des données collectées, mais aussi en tenant compte des lois physiques qui s'appliquent au système en question. En implémentant les formules physiques correspondantes dans l'architecture d'apprentissage, les modèles sont en mesure de faire des prévisions exactes même là où il n'y a pas de données d'entraînement. Ces modèles sont appelés Physics-Informed Neural Networks (PINN). L'équipe d'Olga Fink les a par exemple utilisés pour améliorer l'efficience d'une centrale hydroélectrique (étude de cas 2).

Les modèles dits Transformer sont un autre type de réseaux de neurones. Ils sont capables de traduire une séquence de symboles en une autre séquence de symboles. Ils sont par exemple utilisés pour la traduction automatique de texte assistée par l'IA. Dans le cadre de ses recherches, l'équipe d'Olga Fink a utilisé des modèles Transformer pour prévoir le taux de charge du réseau électrique, afin de rendre les données météorologiques ou d'horaires utilisables pour la simulation (étude de cas 3).

Pr Vincent Bourquin, Uni FR

Le système ferroviaire: constamment optimisé, mais pas encore complètement

Le système ferroviaire est sans aucun doute très complexe. Le fait qu'il remplisse sa mission jour après jour pratiquement sans problème résulte d'une longue expérience, patiemment équilibrée, de l'interaction entre l'humain et la technique. Le professeur Vincent Bourquin, expert pour le programme stratégie énergétique des transports publics 2050 (SETP 2050), mène des recherches sur la manière de perfectionner des systèmes complexes tels que le chemin de fer.

Vous êtes expert pour le programme SETP 2050. Comment décririez-vous votre mission?

Je considère que ma contribution consiste à donner des indications pour améliorer les projets. Une idée de recherche est vite formulée, mais mener le projet à bien est une tâche exigeante. Ce qui m'intéresse, c'est de mettre en évidence les avantages du projet et d'identifier les risques éventuels. J'essaie ainsi d'aider les participantes et participants au projet et de leur fournir des informations pour un démarrage réussi.

#SETP 2050





Les projets sur lesquels nous ne sommes pas d'accord en tant qu'experts sont particulièrement passionnants, car cela nous permet de discuter et d'apprendre ensemble.



Quelles compétences spécifiques apportez-vous au groupe d'experts?

Tout au long de ma carrière, j'ai travaillé dans le développement de systèmes de transport, qu'il s'agisse de la route, du rail ou de l'air. J'ai donc une large vue d'ensemble des différentes technologies et stratégies de résolution des problèmes. De plus, j'ai acquis de l'expérience dans le développement de projets dans l'industrie. Ces deux éléments m'aident à comprendre les idées de projets et à les évaluer avec une distance critique.

Quels sont les projets qui vous plaisent particulièrement?

Il y en a beaucoup. Les projets sur lesquels nous ne sommes pas d'accord en tant qu'experts sont particulièrement passionnants, car cela nous permet de discuter et d'apprendre ensemble. Je me réjouis également que le programme permette à de petites entreprises de développer des idées innovantes et de mettre en œuvre des projets de plus grande envergure. L'électrification d'un bateau sur le lac de Lugano est un exemple, où une alternative durable à la propulsion diesel traditionnelle a été réalisée malgré les défis techniques.

Pensez-vous qu'il existe encore un potentiel pour rendre les transports plus durables, même après dix ans de soutien aux projets?

Absolument. Nous avons investi beaucoup d'énergie pour optimiser les sous-systèmes. Mais cela ne signifie pas pour autant que le système dans son ensemble est optimal. Prenons comme exemple un camion: la construction du châssis est restée pratiquement la même depuis 100 ans. Ce n'est que maintenant, depuis que les camions sont électrifiés et deviennent plus lourds à cause des batteries, que l'on commence à construire des châssis plus légers. Pourtant, on aurait déjà pu construire plus tôt des véhicules plus légers et ainsi économiser beaucoup d'énergie.

Qu'est-ce que cela signifie pour le système ferroviaire?

Nous avons aujourd'hui des trains efficients, à deux étages, qui peuvent transporter beaucoup de personnes

à la fois. Le système ferroviaire est très bien organisé, mais les capacités sont épuisées. Pour répondre à la demande accrue, il faudrait procéder à une extension massive, mais cela coûterait extrêmement cher et occuperait encore plus notre espace limité. L'innovation du système global est passée à la trappe, car on n'a optimisé que les sous-systèmes.

Quelle approche proposeriez-vous pour résoudre ce problème?

Au Massachusetts Institute of Technology, un Suisse célèbre, Olivier de Weck, fait des recherches sur les méthodes utilisées pour faire avancer les développements. Il prône le *backcasting*, c'est-à-dire la réflexion à partir de l'avenir (voir encadré). C'est une vision radicalement différente de notre approche habituelle, qui consiste à optimiser en permanence une technologie existante. Dans le système de transport, il faut en outre tenir compte du fait que de nombreuses personnes interagissent. Il est donc nécessaire d'adopter une approche centrée sur la personne; une approche purement technique n'est pas suffisante.

Voyez-vous des développements dans cette direction?

Il se passe actuellement beaucoup de choses, notamment dans le domaine du transport ferroviaire, par exemple dans le développement des trains à sustentation magnétique (Maglev) ou du transport sous vide. Comme je le constate en tant que membre de l'Observatoire des politiques et stratégies de transport en Europe, il manque toutefois une vision en Europe. Le développement des trains à grande vitesse pour concurrencer

l'avion en était une, mais aujourd'hui, nous aurions besoin d'une nouvelle idée pour la mobilité du futur. Peut-être que l'industrie, qui vit du système existant, est tout simplement devenue trop paresseuse et préfère optimiser ce qui existe déjà plutôt que de s'aventurer sur un nouveau terrain.

Quel est le rôle de la Suisse dans ce contexte?

Notre pays se caractérise par ses PME. Celles-ci travaillent souvent de manière efficiente, interdisciplinaire et avec les technologies les plus récentes. Mais en raison de leur taille, elles doivent généralement se concentrer sur les composants et ne peuvent pas proposer de systèmes complets. Nous ne disposons pas non plus des énormes budgets d'investissement que des pays comme la Chine et les États-Unis peuvent mettre à disposition. Mais nous avons des entrepreneuses et entrepreneurs qui ont la clairvoyance et le courage de repousser les limites du système. Le succès de Stadler en est un bon exemple.

Dans l'éditorial (page 4), le directeur de l'OFT, Peter Füglistaler, fait l'éloge de la capacité d'innovation de la Suisse. Quel rôle la Suisse peut-elle jouer dans le développement des futurs systèmes de transport?

Il y a effectivement un grand potentiel. En Suisse, nous avons les entreprises capables de contribuer à ces nouveaux systèmes. La question est de savoir comment orienter la force d'innovation vers la mobilité. Pour cela, il faut donner les bons objectifs aux personnes qui travaillent sur les technologies. Un nouveau système de transport, comme le transport sous vide, n'a pas besoin d'un grand nombre de véhicules au départ, il est donc



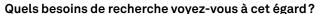
Les propositions de projets du programme SETP 2050 sont discutées lors de réunions semestrielles de l'équipe d'experts. Les critères centraux sont le caractère innovant et l'utilité énergétique des projets.

Vincent Bourquin a longtemps travaillé dans le développement de systèmes de transport les plus divers. Cette expérience pratique est également une base importante dans son activité actuelle d'enseignant et de chercheur.



L'équipe d'experts SETP 2050, à partir de la gauche: le professeur Denis Gillet (EPFL), Stephan Husen (OFT), Stany Rochat (OFT), le docteur Andreas Hutter (CSEM) et le professeur Vincent Bourquin (Uni FR).

possible de commencer à petite échelle. Il est bien plus important de ne pas attendre que d'autres commencent à le réaliser.



Je ne pense pas qu'il faille réinventer la roue. Nous devrions plutôt recombiner les technologies existantes pour développer de nouveaux systèmes. Par exemple, nous pourrions mieux utiliser l'infrastructure routière grâce à la technologie des capteurs et des commandes. Ou nous pourrions poser des tubes de tunnel préfabriqués dans des lacs et nous épargner l'excavation coûteuse de roches.

N'est-ce pas un peu utopique?

L'idée peut-être, mais les technologies nécessaires existent déjà. Je vous donne un autre exemple: les moteurs à deux temps des scooters et des petites motos polluent beaucoup. Ils pourraient être alimentés de manière plus écologique par de l'hydrogène. Celui-ci pourrait à son tour être produit à partir de lactosérum, un déchet issu de la fabrication du fromage, avec de l'électricité produite par des installations photovoltaïques et stockée temporairement dans des batteries. Cet exemple existe effectivement dans le cadre d'un projet de recherche au sein de notre université. Bien sûr, nous ne résolvons pas tous les problèmes du monde grâce à ces approches, mais nous générons de nouvelles idées – et nous en avons un besoin urgent en ce moment.



Backcasting

Les processus stratégiques classiques commencent par l'analyse des tendances actuelles et les projettent dans l'avenir (forecasting) afin d'en déduire les étapes de la mise en œuvre. Le backcasting fonctionne exactement à l'inverse: on essaie de se projeter mentalement dans l'avenir et on fait ensuite le processus à rebours. Pour ce faire, on élabore d'abord un ou plusieurs scénarios d'avenir. Ensuite, on considère un jalon proche de la vision d'avenir et on examine quelles conditions devraient être réunies pour que le scénario cible se réalise. À partir de ce jalon, on remonte pas à pas jusqu'au présent. À la fin du processus, on peut déduire les premières actions concrètes à entreprendre pour atteindre l'image cible.

La méthode date des années 1990 et a été développée dans le secteur de l'énergie. Elle a ensuite été appliquée au secteur des transports et au développement technologique. Depuis, le *backcasting* est devenu une méthode bien établie dans les études prospectives, la planification stratégique et les processus de participation.



Daniel Jenzer, responsable des passages à niveau, OFT

Recherche sur les barrières ferroviaires? Et pourquoi pas?

Les passages à niveau existent depuis les débuts du chemin de fer. Bien sûr, ils fonctionnent depuis longtemps de manière automatique et sont surveillés à distance, mais le principe de la barrière ferroviaire est toujours le même qu'à l'époque de la locomotive à vapeur. On pourrait donc penser qu'il n'y a pas de recherche à faire dans ce domaine. Ce n'est pas l'avis de Daniel Jenzer, responsable technique à l'OFT.

Monsieur Jenzer, quels sont les besoins actuels en matière de recherche sur les passages à niveau?

Même si, comme moi, on s'occupe de ce sujet depuis vingt ans, il y a toujours des questions auxquelles il faut chercher des réponses. Par exemple, on constate une augmentation du nombre d'accidents et d'accidents évités de justesse aux installations de barrières, c'est-à-dire précisément sur la solution considérée comme sûre. Nous aimerions en comprendre la raison et savoir quelles mesures peuvent être prises pour réduire le nombre de ces événements. Mais de manière générale, le nombre d'événements, notamment ceux qui ont des conséquences graves, est en baisse aux passages à niveau. Le programme d'assainissement a déployé son effet, c'est un constat réjouissant.

De quelles mesures dispose-t-on pour rendre les passages à niveau plus sûrs?

Dans le cas le plus simple, les passages sont supprimés. Dans les régions agricoles, certains passages à niveau sont peu utilisés et donc sécurisés de manière simple. Au lieu d'investir dans une installation de sécurité coûteuse, il est peut-être possible de supprimer le passage à niveau en question et de prévoir un détour par un autre passage sécurisé situé à proximité. Lorsque cela n'est pas possible, les passages doivent être équipés de feux clignotants et souvent de barrières supplémentaires. La solution la plus coûteuse, mais optimale en cas de trafic important, est de construire un passage supérieur ou inférieur, c'est-à-dire de séparer les différents modes de transport.

#Recherche sur les
infrastructures ferroviaires
#Chemin de fer
#Tramway
#Infrastructure

Informations complémentaires:





Passage à niveau protégé par une simple installation de signaux lumineux dans une zone agricole.

Vous avez accompagné en tant qu'expert le projet «Sécurité aux passages à niveau» soutenu par l'OFT. Quel était le but de cette étude de l'Union des transports publics (UTP)?

De nombreux passages à niveau ont été rénovés avec des barrières. Nous constatons à présent une conséquence indésirable: une augmentation des incidents impliquant des voitures bloquées entre les barrières. Certes, dans la plupart des cas, il n'y a heureusement eu que des dégâts matériels. Le secteur cherche néanmoins d'urgence des mesures pour éviter ces situations. Le projet visait à déterminer comment ces accidents se produisent, afin de pouvoir définir les mesures appropriées.

Quels en sont les principaux enseignements?

Dans les cas étudiés, l'événement est dû à un mauvais comportement des automobilistes. Ils s'engagent sur le passage à niveau lors d'embouteillages ou ignorent le plus souvent délibérément les signaux d'avertissement optiques et acoustiques et continuent de s'engager sur le passage à niveau alors que la barrière commence déjà à s'abaisser, sans doute dans l'espoir de réussir à passer malgré tout.

La recherche montre donc que les automobilistes ont tendance à adopter un comportement risqué aux passages à niveau et à enfreindre délibérément les règles de circulation?

Le fait que des usagères et usagers de la route tentent encore de franchir le passage au début des signaux d'avertissement est en effet un comportement fréquemment observé. Il s'agit souvent de personnes qui connaissent les lieux et pensent connaître le fonctionnement de l'installation. Toutefois, dans les régions touristiques, il arrive aussi que des personnes ne connaissent pas les règles aux passages à niveau et évaluent mal le

danger. Interlaken est un exemple connu pour cela, où plusieurs fois, des véhicules transportant des visiteuses et visiteurs de l'étranger ont déjà été pris au piège entre les barrières.

Quelles sont les mesures qui en découlent?

D'une part, on peut agir au niveau technique. Par exemple, les feux clignotants pourraient être remplacés par des feux de signalisation. L'idée est que les feux de signalisation présentent un déroulement mieux connu de la séquence de signaux et sont donc mieux respectés. De plus, les personnes qui contreviennent pourraient ainsi être plus facilement identifiées et sanctionnées. D'autre part, la branche mise sur la transmission des connaissances: la documentation de base sur les passages à niveau a été élaborée pour les spécialistes en ingénierie des transports ainsi que pour des responsables de projet, et les règles de comportement doivent être davantage intégrées dans la formation des monitrices et moniteurs de conduite. Enfin, lors de l'approbation des projets d'assainissement, l'OFT veille à ce que leur réalisation soit conforme au droit et donne des indications pour un aménagement optimal.

Parmi les passages à niveau qui n'ont pas encore été assainis, la plupart concernent de petites entreprises de chemin de fer. Quelle en est la raison?

Les ressources jouent certainement un rôle. Dans les petites entreprises, beaucoup de responsables de projet ont encore de nombreuses autres tâches, ne sont pas des spécialistes et essaient plutôt de trouver des solutions locales, voire individuelles. Et ces chemins de fer, souvent ruraux, ont plus de passages à niveau par kilomètre.

Quelle est l'importance de la coopération dans ce secteur?

Les petites entreprises ferroviaires ne peuvent pas assumer ce type de projet. Les moyens nécessaires ont pu



Passage à niveau protégé par une barrière associée à un système de régulation du trafic.



Barrière équipée de signaux lumineux clignotants et d'un signal acoustique. Près de la moitié des passages à niveau sont sécurisés de cette manière.

être mis à disposition grâce au soutien du fonds de recherche et de développement de l'UTP¹ et à la recherche sur l'infrastructure ferroviaire de la Confédération. Les groupes spécialisés de l'UTP ont également fourni un apport précieux. D'une part, ils ont permis d'intégrer les expériences pratiques de différentes entreprises ferroviaires et, d'autre part, ils servent de canal pour la diffusion et l'application des connaissances dans la branche.

Comment voyez-vous la suite des événements?

Nous avons beaucoup progressé au cours des vingt dernières années. Mais il reste encore du potentiel au niveau de chaque installation. Toutes les parties concernées – UTP, entreprises de transport, cantons et communes – sont appelées à chercher ensemble la meilleure solution à chaque fois et à éviter autant que possible les croisements à niveau. Nous devons continuer à tout mettre en œuvre pour éviter les dommages matériels et corporels. Et accessoirement, nous gagnons ainsi en sécurité et en ponctualité dans l'exploitation.

Faits et chiffres

Le réseau des chemins de fer à voie normale et à voie métrique compte aujourd'hui 4340 passages à niveau. Dans le cadre d'un programme à long terme, quelque 2600 passages à niveau ont été adaptés aux exigences légales depuis 2009. Dans de nombreux cas, un assainissement a été effectué au moyen de barrières. Un peu plus de 1000 passages à niveau ont été remplacés par des passages supérieurs ou inférieurs ou ont été entièrement supprimés. Il reste actuellement 124 passages à niveau à moderniser.

Chaque année, environ 60 événements sont enregistrés à des passages à niveau. La grande majorité concerne des passages avec des barrières de chemin de fer, et dans 98 % de ces cas, des automobilistes sont impliqués.

L'UTP octroie, via le Fonds de recherche et de développement, des contributions à des projets dans le domaine des transports publics afin de les financer entièrement ou partiellement, si aucun autre financement ne peut être trouvé.

Faits et chiffres

Dans trois programmes, «Recherche sur les infrastructures ferroviaires», «Stratégie énergétique dans les transports publics 2050» et «Innovation dans le transport régional de voyageurs», l'OFT a soutenu l'année dernière la recherche et l'innovation dans les transports publics à hauteur de 7,0 millions de francs. Les graphiques suivants donnent un aperçu des flux financiers, des thèmes traités et des moyens de transport étudiés dans les projets soutenus. Des informations plus détaillées sont disponibles dans la section de chaque projet sur la page d'accueil internet.



Fonds versés

L'année dernière, les trois programmes ont alloué un total de 6,0 millions de francs (cercles intérieurs), dont une grande partie au programme «Stratégie énergétique 2050 des transports publics». Au total, les trois programmes ont investi jusqu'ici 31,9 millions de francs dans la recherche et l'innovation (cercles extérieurs).

Il faut tenir compte du fait que volume généré par ces programmes est nettement plus important que les sommes versées. En effet, en règle générale, le montant de la subvention représente 40% du

budget du projet; les requérants fournissent le reste eux-mêmes par le biais de prestations propres et de mandats de tiers. Si nécessaire, l'OFT lance des appels d'offres pour des mandats de recherche et les finance intégralement. C'est le cas pour la «Recherche sur les infrastructures ferroviaires».



onio CHE Total depuis 2013

Montants versés par le programme en 20<u>23</u>

Montants versés depuis le début du programme. Les montants versés pour la «Recherche sur les infrastructures ferroviaires» comprennent également des contributions à des projets isolés approuvés avant 2017.

La surface des cercles correspond aux montants respectifs.





394 250

100 300 CHF



mio CHF



CHF

Recherche sur

les infrastructures ferroviaires

mio CHF

36 000

CHF

Étendue des contributions accordées

Dans les trois programmes, les contributions aux demandes et aux mandats de recherche couvrent une large fourchette. Cela reflète la conviction de l'OFT que même les petits projets peuvent apporter de précieuses contributions à la recherche et à l'innovation. À l'inverse, l'OFT veut permettre la réalisation de projets de grande envergure grâce à des contributions appropriées, lorsque

Dans tous les cas, l'OFT place la qualité de la requête et du projet soumis au centre de ses préoccupations. C'est pourquoi il fait appel de manière ciblée à des expertes et experts reconnus pour l'examen des demandes.

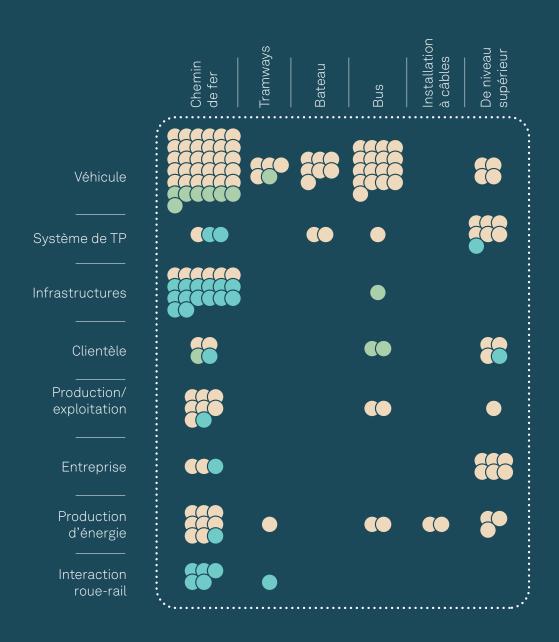
Moyens de transport et domaines thématiques

Au total, 142 projets ont été soutenus jusqu'à présent par un des trois programmes. Parmi eux, 114 concernent le programme «Stratégie énergétique des transports publics 2050», qui est le plus ancien des trois, tandis que 19 projets ont été soutenus dans le cadre de la «Recherche sur les infrastructures ferroviaires» et 9 par le biais de l'«Innovation dans le transport régional de voyageurs».

Les projets dans le domaine ferroviaire constituent une priorité, car il s'agit du secteur le plus important des transports publics, tant en termes de prestations de transport que de dépenses des pouvoirs publics. Ces dernières années, le segment des bus a toutefois rattrapé son retard, poussé par le passage des transports publics routiers à des tractions non fossiles. Dans le domaine des remontées mécaniques, seulement deux activités ont pu être soutenues

bien qu'il soit possible d'y demander un soutien aussi bien au titre de l'innovation dans le transport régional de voyageurs que des mesures énergétiques.

Les projets couvrent une large palette de thèmes. Le domaine des véhicules constitue un point fort, car dès le début, des demandes de soutien sur les véhicules ferroviaires et routiers ont été régulièrement déposées dans le cadre du programme «Stratégie énergétique des transports publics 2050». De plus en plus de projets innovants dans le domaine du transport régional de voyageurs s'y ajoutent. La recherche en matière d'infrastructure se concentre sur les effets environnementaux de la voie ferrée, mais des domaines plus larges sont également soutenus s'ils sont liés à l'infrastructure.



- Projets dans le programme «Recherche sur les infrastructures ferroviaires»
- Projets dans le programme «Stratégie énergétique dans les transports publics 2050 »
- Projets dans le programme «Innovation dans le trafic régional de voyageurs»

Soutien de la recherche et de l'innovation par l'OFT

Avec ses trois programmes, l'OFT met l'accent sur l'infrastructure ferroviaire, le transport régional de voyageurs et l'énergie. Mais son engagement en faveur de la recherche et de l'innovation ne s'arrête pas là. La recherche sur le bruit ferroviaire et l'innovation technique dans le fret ferroviaire sont également encouragées par des canaux spécifiques. Dans le domaine de l'infrastructure ferroviaire, les innovations des gestionnaires peuvent être soutenues par le biais des conventions de prestations.

Plus d'informations sur le programme sous ce lien:



Plus d'informations sur le programme sous ce lien :



Recherche dans les infrastructures ferroviaires

Afin de financer durablement l'exploitation et l'entretien, la modernisation et le développement de l'infrastructure ferroviaire, le fonds d'infrastructure ferroviaire (FIF) a été créé par décision populaire. Il peut également être utilisé par l'OFT pour encourager des projets de recherche dans ce domaine. La priorité est donnée aux projets qui permettent d'espérer un bénéfice pour le maintien de la valeur de l'infrastructure ainsi que pour son exploitation efficace et sûre.

Innovation dans les infrastructures ferroviaires

Dans le cadre des conventions de prestations conclues avec les gestionnaires d'infrastructure, la Confédération peut encourager les innovations dans la mesure où celles-ci servent à l'exploitation ou au maintien de la qualité des infrastructures ferroviaires. Cela inclut l'adaptation à l'état de la technique et aux exigences du trafic. Le financement porte sur la mise en œuvre de nouvelles solutions basées sur la recherche et non sur la recherche elle-même. En ce sens, le financement vise à encourager des projets innovants basés sur les résultats de la recherche.

Plus d'informations sur le programme sous ce lien:



Stratégie énergétique dans les transports publics 2050

Malgré leurs avantages par rapport au transport individuel motorisé (TIM) et au fret routier, les transports publics doivent également contribuer aux objectifs énergétiques et climatiques de la Suisse. C'est pourquoi, sur la base d'un arrêté fédéral, le programme encourage les mesures innovantes de la branche et les projets de recherche visant à améliorer le rendement énergétique, à produire des énergies renouvelables et à réduire les émissions de CO_2 de tous les moyens de transport public.

Plus d'informations sur le programme sous ce lien :



Innovation dans le transport régional de voyageurs

Le programme a pour objectif d'encourager des solutions innovantes dans le transport régional de voyageurs et de soutenir ainsi les entreprises de transport face aux défis à venir. En vertu de la loi du 20 mars 2009 sur le transport de voyageurs (LTV; RS 745.1), la Confédération peut mettre chaque année 5 millions de francs à la disposition de la branche par le biais de ce programme. Les priorités thématiques portent sur la technique des véhicules, la production et la maintenance, la conception de l'offre, la billetterie et l'expérience client.

Plus d'informations sur le programme sous ce lien:



Recherche sur le bruit des chemins de fer

La recherche sur le bruit ferroviaire complète l'assainissement phonique du réseau. En vertu de la loi fédérale du 24 mars 2000 sur la réduction du bruit émis par les chemins de fer (LBCF; RS 742.144) révisée en 2013, la Confédération finance à hauteur de 20 millions de francs des projets de recherche permettant de réduire les émissions sonores via des mesures appliquées sur les véhicules ferroviaires ou sur l'infrastructure. Le programme est géré par l'OFEV en étroite coordination avec l'OFT.

Plus d'informations sur le programme sous ce lien :



Innovations techniques en fret ferroviaire

Des innovations de grande envergure sont nécessaires afin de perfectionner le fret ferroviaire suisse. L'OFT soutient les innovations techniques en allouant des contributions d'investissement aux entreprises de transport de marchandises, notamment en matière d'attelage automatique, d'essai automatique d'efficacité du frein et d'automatisation du fret de proximité.

Participation

Qui peut participer?

Les programmes «Recherche sur les infrastructures ferroviaires», «Innovation dans le transport régional de voyageurs» et «Stratégie énergétique des transports publics 2050» s'adressent aux entreprises de transport (ET), aux hautes écoles et à l'industrie. Les projets portés en partenariat sont les bienvenus. Les partenariats dans lesquels les entreprises de transport collaborent et utilisent les résultats présentent un intérêt particulier. Des dispositions spécifiques s'appliquent au soutien dans le domaine de la recherche sur le bruit des chemins de fer et des innovations techniques dans le fret ferroviaire (pour plus d'informations, voir les liens sur la page précédente).

Quel est le montant de l'encouragement?

En règle générale, l'OFT participe jusqu'à 40% (SETP 2050:50%) aux coûts avérés du projet. Selon la situation, des contributions plus faibles ou plus élevées sont également possibles, jusqu'à un financement complet. Dans tous les cas, les directives de la loi sur les subventions doivent être respectées. Les prestations propres des partenaires du projet peuvent être prises en compte.

Quelles conditions matérielles les projets doivent-ils respecter?

Recherche sur les infrastructures ferroviaires: les projets soumis doivent être suffisamment en phase avec les objectifs du fonds d'infrastructure ferroviaire et pouvoir être rattachés à au moins un des thèmes prioritaires du programme actuel de recherche sur les infrastructures ferroviaires (voir site web).

Stratégie énergétique des transports publics 2050: en principe, il est possible de soumettre des projets qui apportent une contribution innovante à l'amélioration du rendement énergétique ou à l'utilisation d'énergies renouvelables dans les transports publics.

Innovation dans le transport régional de voyageurs: les projets doivent remplir cumulativement quatre critères: (1) La solution ne doit pas déjà être disponible ou avoir été testée dans les transports publics suisses. (2) Le projet concerne en grande partie le transport régional de voyageurs. (3) Les risques sont maîtrisables. (4) La solution offre des avantages considérables aux usagères et usagers et/ou aux ET du transport régional de voyageurs.

Quels sont les projets qui ne conviennent pas?

Recherche sur les infrastructures ferroviaires: il n'est pas possible de prendre en compte des projets qui n'ont pas de rapport direct avec l'infrastructure ferroviaire. Stratégie énergétique des transports publics 2050: les projets dans le domaine de la recherche fondamentale ainsi que les équipements en série ne sont pas soutenus.

Innovation dans le transport régional de voyageurs: le programme d'innovation soutient principalement des projets pilotes et de démonstration, des tests sur le terrain et des analyses. Au cas par cas, il est également possible de soutenir des projets dans le domaine du développement expérimental. Les projets qui n'entrent pas dans ces catégories ne reçoivent pas d'encouragement.

Comment et quand soumettre une demande?

Recherche sur les infrastructures ferroviaires: les demandes peuvent être soumises en ligne à tout moment au moyen du formulaire de demande de financement de la recherche sur les infrastructures ferroviaires.

Stratégie énergétique des transports publics 2050: faites parvenir une déclaration d'intérêt pour votre projet. Les dates limites de dépôt sont le 31 janvier et le 30 juin.

Innovation dans le transport régional de voyageurs: les demandes peuvent être adressées en ligne à tout moment au moyen du formulaire de demande pour l'innovation dans le transport régional de voyageurs.

Quels sont les autres points à prendre en compte?

Afin d'utiliser les moyens financiers des programmes avec un maximum d'efficience, l'OFT encourage les projets en partenariat qui peuvent prendre les formes suivantes:

- Communautés de travail (p. ex. sous forme de coopération entre plusieurs ET ou entre des ET, l'industrie et/ou des hautes écoles)
- Études complémentaires (p. ex. approfondissement de problématiques qui n'ont pas pu être examinées de manière définitive au cours d'un projet précédent)
- Études en partenariat (traitement de différents aspects du même thème dans différents projets)
- Métaétudes (p. ex. évaluation des travaux antérieurs sur un sujet donné)

Où trouver plus d'informations?

Vous trouverez les dossiers de candidature et d'autres informations concernant l'appel d'offres sur le site www.bav.admin.ch/recherches, en cliquant sur le programme respectif. Pour un accès facile, utilisez les codes QR sur les pages précédentes.

IMPRESSUM

Éditeur

Office fédéral des transports (OFT) CH-3003 Berne Mai 2024 forschung@bav.admin.ch www.bav.admin.ch/recherches

Groupe de pilotage

Mélanie Attinger, OFT Christophe Le Borgne, OFT Stephan Husen, OFT Philipp Mosca, OFT Stany Rochat, OFT

Direction de projet et rédaction

Rémy Chrétien, Federas Beratung AG

Conception et mise en page

moxi ltd, Biel/Bienne

Crédit photos

Portraits des personnes: Nils Sandmeier Photos des projets mises à disposition par Agroscope, OFT, Bernmobil, Dellner Service, Enotrac, EPFL, EuroTube Foundation, HEIG-VD, HES-SO//FR Robust and Safe Systems Center Fribourg (ROSAS), Innolutions, McKayla Crump (Unsplash), MGB, RhB, CFF, CFF Cargo, Stadler Rail, SUPSI Page de garde: Basler Verkehrs-Betriebe

Page de garde: Basler Verkehrs-Betriebe

Des exemplaires supplémentaires de cette brochure peuvent être commandés gratuitement auprès de l'éditeur.

Versions linguistiques

Cette publication est également disponible en allemand.

Office fédéral des transports (OFT) CH-3003 Berne

forschung@bav.admin.ch www.bav.admin.ch/recherches