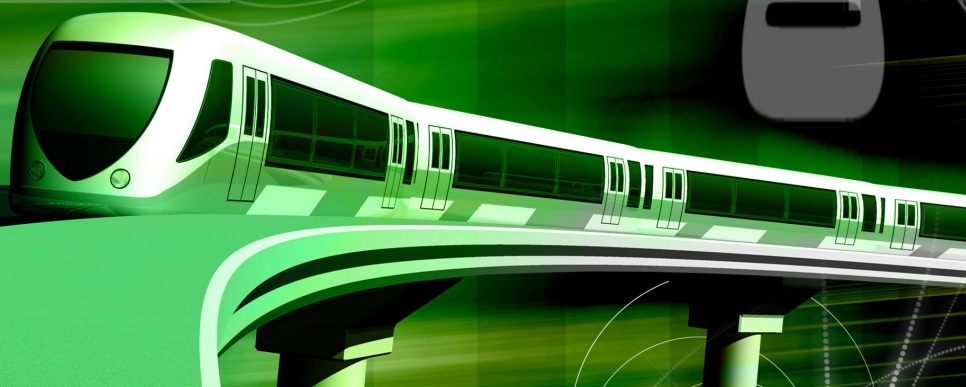


SYNTHÈSE

2 juillet 2033...

Le train autonome 0277
pour Amiens s'apprête à quitter
la gare de Paris-Gare du Nord...



**ATELIER SÉCURITÉ
FERROVIAIRE DU FUTUR**
Du 23 mars 2021

SOMMAIRE

L'atelier en un coup d'œil	3
Les participants	4
Les animateurs	5
LE SCÉNARIO EN BANDE DESSINÉE	6-7
Une fiction réaliste ?	8
Impacts sur la sécurité	8
LES ENJEUX DE LA SÉCURITÉ FERROVIAIRE DE DEMAIN	9
Un monde plus fluide, plus ouvert donc plus vulnérable	9
Fiabilité des données, évolution des méthodes de démonstration de sécurité	9
La « boîte noire » de l'intelligence artificielle : un contrôle et une certification impossibles ?	10
La 5G, un incontournable	11
La cybersécurité	11
Améliorer la sécurité sans verrouiller l'innovation	11
Redistribution des compétences	13
Modélisation et standardisation opérationnelle. Ferroviaire versus véhicule automobile autonome	13
Focus : Le train autonome oui, mais comment ?	14
Trois inflexions nécessaires vers le train autonome	14
Point de rupture sociétale : l'acceptabilité des technologies autonomes	14
Décision stratégique : où place-t-on l'intelligence dans le système ?	15
Transfert de responsabilité : futur probable ou utopie ?	15
QUELLES PISTES POUR L'AVENIR ?	16-17
Glossaire	18

L'ATELIER EN UN COUP D'OEIL

Participants & objectifs

Des experts de haut niveau du monde ferroviaire ont été réunis par la Foncsi pour présenter leur vision du monde ferroviaire français et européen à l'horizon 2030-40 et échanger sur les enjeux de sécurité majeurs auxquels le secteur sera confronté dans ce futur proche :

- **François Davenne**, directeur général, UIC
- **Loïc Dorbec**, président, AGIFI
- **Yann Leriche**, directeur général, Getlink
- **Pierre Messulam**, directeur risques-sécurité-sûreté, SNCF
- **Dominique Riquet**, député européen, commission des transports et du tourisme, Parlement européen

Quelques enjeux clés

- **Numérisation et apparition de nouvelles technologies** associées à de nouveaux risques (cybersécurité)
- **Ouverture et interconnexion** plus grandes du secteur ferroviaire à son environnement (MaaS)
- **Innovation en sécurité** :
 - * mise en adéquation réglementation et innovation
 - * cohabitation nouvelles/anciennes technologies
 - * acceptation sociale
- Montée en puissance de la **conduite autonome, de l'intelligence artificielle (IA)** :
 - * évolution des méthodes de démonstration de sécurité, de la certification
 - * redistribution des compétences, évolution du rôle et des responsabilités des acteurs et organisations

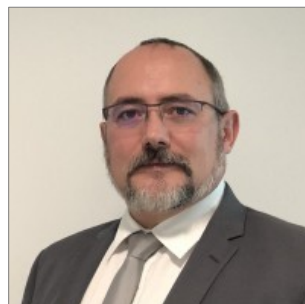
Quelques pistes

- Mettre l'accent sur l'activité de **modélisation du système**.
- Accepter que **le temps de la réglementation soit plus long que celui des avancées technologiques** : se focaliser sur la technologie et faire confiance au législateur qui adaptera le cadre réglementaire.
- Développer des **espaces de conduite autonome isolés physiquement et réglementairement** du reste du système.

LES PARTICIPANTS



François Davenne est directeur général de l'UIC (Union internationale des chemins de fer). Diplômé de l'École nationale supérieure des télécommunications et de l'École nationale d'administration (ENA), il travaille notamment au ministère des Transports sur la sécurité et la réglementation ferroviaires. En 2012, il est élu secrétaire général de l'Otif (organisation intergouvernementale pour les transports internationaux ferroviaires). Il entre début 2019 à l'UIC.



Loïc Dorbec est président de l'AGIFI (Association française des gestionnaires d'infrastructures ferroviaires indépendants). Diplômé de l'École Polytechnique et de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, il débute sa carrière dans le groupe Bouygues en 2000, jusqu'en 2006 où il rejoint le groupe Eiffage. En 2011, il est nommé directeur opérationnel d'Eiffage Rail Express (ERE) pour le projet LGV Bretagne-Pays de la Loire. Il est directeur de l'Asset Management d'Eiffage Concessions depuis 2017.



Yann Leriche est directeur général de Getlink (groupe comprenant les sociétés Eurotunnel, Europorte, ElecLink et CIFFCO). Diplômé de l'École Polytechnique et des Ponts et Chaussées, ainsi que de l'ESCP Business School, il a débuté sa carrière dans le secteur public avant de travailler chez Bombardier Transport. Il intègre ensuite Transdev en 2008 où il occupe de multiples postes de direction à l'international. En 2020, il prend la direction générale de Getlink.



Pierre Messulam est directeur risques sécurité-sûreté du Groupe SNCF. Ancien élève de l'École normale supérieure, agrégé de Mathématiques, et ingénieur en chef du corps des Mines, il débute sa carrière dans la sûreté nucléaire avant d'entrer en 1989 à la SNCF. Il occupe à partir de 1998 de multiples postes de direction, dont la région de Paris Sud Est, le projet TGV Rhin-Rhône puis la direction de la stratégie de l'innovation de la régulation. En 2014, il rejoint Transilien en tant que directeur général adjoint. Il intègre l'équipe dirigeante du Groupe SNCF en mars 2020.



Dominique Riquet est député européen, chirurgien urologue. Il s'engage en politique en 1989 en devenant adjoint au maire de Valenciennes, avant de devenir maire de la ville de 2002 à 2012. Député européen depuis 2009, il siège au sein du groupe Renew Europe. Il est membre de la commission des transports et du tourisme, et membre suppléant de la commission de l'industrie, de la recherche et de l'énergie au Parlement européen .

LES ANIMATEURS

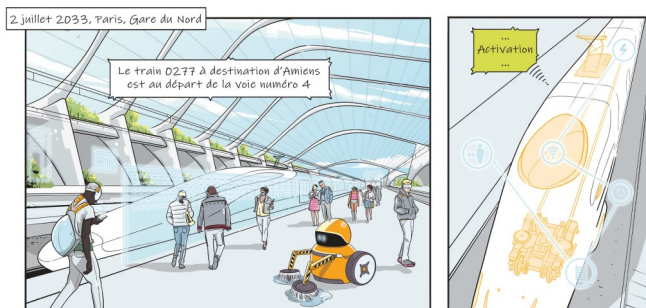


Jean Pariès est directeur scientifique Icsi-Foncsi. Ingénieur des ponts, et des eaux et forêts (IPEF), il a travaillé 15 ans avec la Direction générale de l'aviation civile (DGAC). Il a rejoint ensuite le Bureau d'enquêtes et d'analyses (BEA) pour la sécurité de l'aviation civile. De 2000 à 2004, il a été directeur de recherche associé au CNRS. Il a été président de la société Dédale SAS pendant 25 ans. Enfin, il est directeur scientifique de l'icsi et de la Foncsi depuis début 2020.



Pierre-Franck Chevet est président de IFP Energies nouvelles (Institut français du pétrole et des énergies nouvelles). Ancien élève de l'École Polytechnique et de l'ENSAE, ingénieur général des Mines, il débute sa carrière à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). Il y occupe différents postes de direction jusqu'en 1995. Il dirige ensuite les DRIRE (direction régionale de l'industrie, de la recherche et de l'environnement) Alsace, puis Nord Pas de Calais. En 2005, il est nommé au cabinet du Premier ministre, en tant que responsable du pôle industrie, énergie, environnement et innovation. De 2007 à 2012, il est directeur général de l'énergie et du climat, au sein du ministère chargé de l'énergie. Il est président de l'ASN de 2012 à 2018.

LE SCÉNARIO EN BANDE DESSINÉE



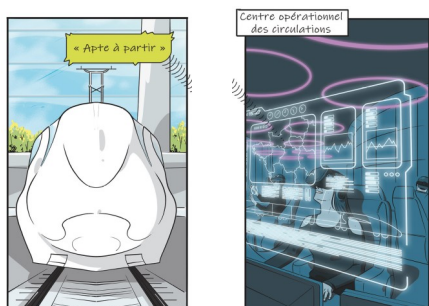
SÉQUENCE 1

2 juillet 2033. Le TER autonome n°0277 entre Paris et Amiens va quitter la gare du Nord. Il s'agit d'un train de dernière génération, sans conducteur et sans personnel de bord. Avant de partir, le train réalise son opération d'autodiagnostic...



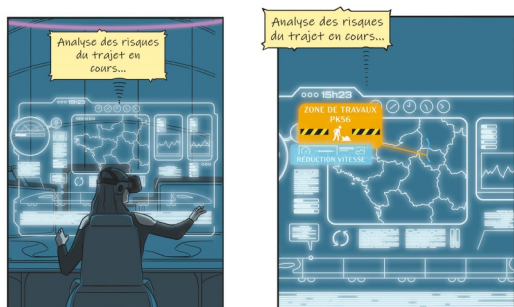
SÉQUENCE 2

Les 200 000 capteurs intégrés remontent en une microseconde l'état des paramètres qu'ils mesurent vers le serveur centralisé de l'opérateur ferroviaire. Ces données sont instantanément traitées par un algorithme qui compare les valeurs par rapport aux gabarits de référence et analyse leur évolution depuis la dernière opération de maintenance. La valeur d'usure de la bande de captage tend vers son maximum : l'algorithme estime que la bande devra être changée dans 3 semaines. L'information est envoyée au centre de maintenance et itère le carnet de suivi virtuel des opérations à venir.



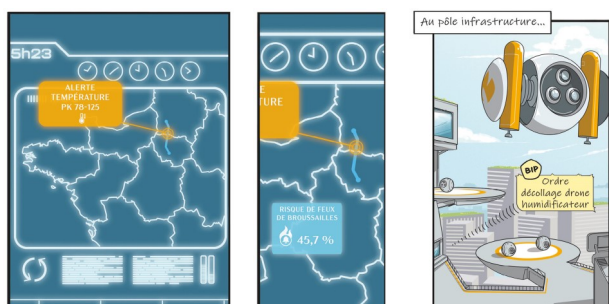
SÉQUENCE 3

Après analyse, quasi-instantanée, le train est considéré apte à partir par l'algorithme, qui transmet l'information cryptée au centre de gestion des circulations national.



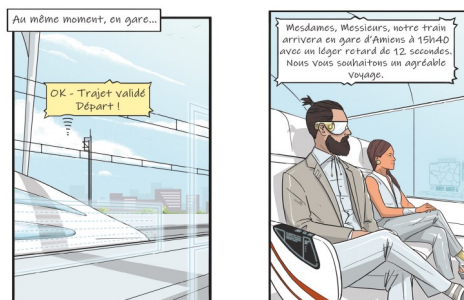
SÉQUENCE 4

Le « GO » reçu et sa réception accusée, l'algorithme de gestion des circulations interroge le parcours : près de 500 000 objets connectés retracent virtuellement le trajet et ses éventuels aléas. Une opération de maintenance est d'ores et déjà planifiée au kilomètre 56 : l'information est transmise au train, qui générera une annonce sonore pour avertir les passagers qu'il arrivera avec 12 secondes de retard à Amiens. Dans un fonctionnement maître-esclave, l'infrastructure imposera au train de réduire sa vitesse à 30 km/h dans la zone de travaux. Le train sera lui-même en capacité de détecter les agents travaillant aux abords des voies à son arrivée sur zone.



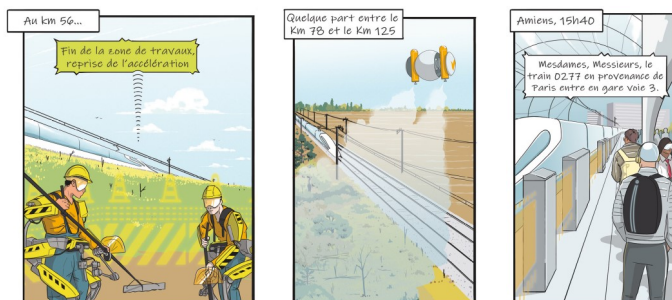
SÉQUENCE 5

L'algorithme du gestionnaire d'infrastructure indique également une température extérieure élevée entre le kilomètre 78 et le kilomètre 125, température croisée avec celle des rails, mais aussi avec le modèle de la végétation aux abords, développé par thermographie satellitaire. L'algorithme est formel : si le train génère une étincelle à cet endroit, il y a une probabilité de 45,7 % de générer un feu de broussailles. Le pôle infrastructure est immédiatement saisi pour humidifier les abords, un drone décolle et sera sur place en moins de 15 minutes.



SÉQUENCE 6

Train OK, trajet validé, le train peut partir. Le parcours se déroule conformément à la planification. Le train arrive en gare d'Amiens à 15h40, avec 12 secondes de retard, comme prévu.



UNE FICTION RÉALISTE ?

La bande dessinée est une entrée en matière intéressante. Elle met en scène un train autonome, réalité vers laquelle la France et l'Europe se dirigent, et qui existe déjà en Chine. Elle se base sur des hypothèses sous-jacentes telles la disparition du personnel de bord, des billets, des portiques. Elle est aussi très révélatrice des fantasmes, des espoirs et du non-dit du monde ferroviaire par rapport à l'avenir. Si l'essor des nouvelles technologies fait qu'à travers cette bande dessinée, on n'est pas vraiment dans la science-fiction¹, certains éléments relèvent en revanche de la régulation-fiction et du financement-fiction... pour l'instant.

IMPACTS SUR LA SÉCURITÉ

La projection dans cette petite histoire futuriste où tout se déroule parfaitement questionne bien des dimensions de la sécurité ferroviaire, parfois entrelacées. Comment allons-nous passer du monde actuel à un monde qui ressemble à celui de la bande dessinée ? Quels sont les perturbateurs qu'on risque de rencontrer, les facilitateurs ou leviers qui permettent de limiter le risque de perte de contrôle, les composantes de la réalité qui permettront d'y arriver ?

“ Si l'essor des nouvelles technologies fait qu'à travers cette bande dessinée, on n'est pas vraiment dans la science-fiction, certains éléments relèvent en revanche de la régulation-fiction et du financement-fiction... pour l'instant. ”



¹ Voir :
UNIFE (2019). [Vision Paper on Digitalisation / Digital Trends in the Rail Sector](#)
AIE (2019). [The Future of Rail : Opportunities for energy and the environment](#), AIE, Paris

LES ENJEUX DE LA SÉCURITÉ FERROVIAIRE DE DEMAIN

Cette courte bande dessinée et ses implications en termes de sécurité de l'exploitation ont servi de base à une discussion nourrie sur l'évolution du système ferroviaire dans ses structures, ses interfaces, la distribution des rôles entre ses acteurs à l'horizon 2030-40. Certains points ont fait consensus, d'autres l'objet de positionnements plus contrastés, voire divergents. C'est ce que cette synthèse vise à restituer. Enfin, s'il s'agit bien d'échanges spécifiquement axés sur l'avenir de la sécurité ferroviaire, une approche comparative a parfois été adoptée et certains éléments plus transverses peuvent entrer dans le cadre d'une réflexion intersectorielle.

UN MONDE PLUS FLUIDE, PLUS OUVERT DONC PLUS VULNÉRABLE

Historiquement le système ferroviaire était un monde assez clos, avec son régime juridique d'exception, sa propre police. Ce temps est révolu. Le système est en train de basculer vers l'ouverture ; et, tout en devenant plus fluide et plus connecté au reste du monde, il devient aussi plus vulnérable à son environnement, plus exposé aux cyber risques (comme cela sera évoqué plus bas), mais aussi aux risques incendie, climatique, économiques, politiques...

Par exemple, même sans attaque cyber physique, c'est-à-dire sans intrusion dans les systèmes informatiques, on pourra tromper le système en fournissant aux capteurs de fausses données extérieures (lidar jamming par exemple). Le composant continuera à fonctionner comme prévu, mais avec des données d'entrée erronées et des réponses en conséquence. Les nouvelles technologies étant essentiellement fournies par des entreprises implantées en dehors de l'Europe, on peut aisément imaginer qu'en cas de relations diplomatiques tendues, celles-ci puissent leurrer le système pour provoquer un arrêt des trains par exemple.

FIABILITÉ DES DONNÉES, ÉVOLUTION DES MÉTHODES DE DÉMONSTRATION DE SÉCURITÉ

De nos jours, on est principalement dans des démarches de maintenance préventive² systématique pour tous les composants techniques : on les remplace pour s'assurer que leur fiabilité ne se dégrade pas de façon inacceptable. Cette maintenance entraîne des surcoûts significatifs puisque l'on remplace des matériels qui fonctionnent encore. La connectique de ces équipements telle que la décrit la bande dessinée permettra de sortir de ce système préventif coûteux au profit d'une maintenance prédictive³. Cependant, un grand enjeu réside dans la pertinence, la fiabilité des données transmises et dans la façon d'utiliser intelligemment ces systèmes de retour d'information afin d'éviter des démarches de maintenance ou de renouvellement décalées ou erronées.

Pour une stratégie de maintenance favorisant un meilleur équilibre entre maintenance préventive et prédictive, mais aussi pour adapter la certification et le contrôle, il faut faire évoluer les méthodes de démonstration de la sécurité des systèmes. Le ferroviaire a actuellement beaucoup recours au GAME, c'est-à-dire que l'on démontre que le niveau de sécurité du nouveau système est au moins équivalent au niveau de sécurité du système précédent. Ces analyses reposent sur des données de fiabilité établies pendant des années de fonctionnement en service. Le GAME est un frein considérable à l'innovation car ce critère est difficile à utiliser pour établir une analyse de risque de bout en bout lorsqu'il s'agit d'une modification systémique. Avec le GAME, on tend à se rapporter en permanence au passé pour montrer qu'aujourd'hui on n'est pas moins sûr qu'hier. Il faut dépasser cette logique comparative basée sur l'expérience passée, utiliser des méthodes d'évaluation du taux de panne plus modernes. Et ceci d'autant plus qu'avec le changement climatique, une partie des technologies

² C'est-à-dire s'appuyant sur un calendrier de maintenance préétabli à la conception.

³ C'est-à-dire en gros que l'on va venir changer une ampoule si son état le nécessite.

habituellement utilisées et éprouvées vont de plus en plus se trouver sollicitées dans des conditions extrêmes (froid, canicule, tempête), ce qui change considérablement les analyses statistiques de fiabilité sur lesquelles nous nous appuyons depuis 50 ans. De plus, étant donnés les niveaux de sécurité ciblés très élevés, il n'est pas envisageable de collecter des données de REX correspondant à des centaines d'années de mise en service. Il faut inventer des méthodes de calcul et de modélisation permettant de démontrer la fiabilité intrinsèque des nouveaux systèmes sans avoir à les tester pendant des siècles.

“ Pour une stratégie de maintenance favorisant un meilleur équilibre entre maintenance préventive et prédictive [...], il faut faire évoluer les méthodes de démonstration de la sécurité des systèmes. ”

LA « BOÎTE NOIRE » DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE : UN CONTRÔLE ET UNE CERTIFICATION IMPOSSIBLES ?

De nombreuses technologies, et en particulier celles de conduite autonome, sont basées sur des algorithmes de *machine learning* comme les réseaux de neurones. Ces algorithmes fonctionnent différemment des algorithmes classiques, dits *rule-based*, qui sont déterministes : on a une donnée d'entrée, on fixe une règle et on obtient une donnée de sortie. Il s'agit désormais de l'apprentissage d'une machine à qui l'on fournit des données et un état de sortie, et qui va se créer ses propres règles. Sans que l'on comprenne ni ces règles, ni comment elle les crée. On sait aussi que ces algorithmes peuvent être très sensibles à de petites perturbations de leurs entrées, et par exemple mal classifier les objets identifiés dans une image lorsque quelques pixels sont modifiés. À ce jour, personne ne sait qualifier le niveau de performance de ces types d'algorithmes en dehors du domaine d'entrée exactement équivalent à celui des données utilisées pour fabriquer le modèle. Ne plus pouvoir qualifier la performance dès que l'on sort du domaine de fonctionnement prévu à la conception représente un sérieux problème de sécurité⁴.

Si on ne peut certifier l'IA, il existe tout de même des méthodes indirectes pour la contrôler. On peut utiliser d'autres systèmes qui fonctionnent sans IA pour la contraindre à son domaine de conception. Ainsi, sans comprendre comment fonctionne l'IA on peut, à l'aide de logiciels *rule-based*, détecter qu'elle sort de son domaine et la bloquer.

Cette problématique n'est bien sûr pas spécifique au monde ferroviaire.

⁴ Voir :

Delseny, H., Gabreau, C., Gauffriau, A., Beaudouin, B., Ponsolle, L., Alecu, L., ... & Albore, A. (2021). [White Paper Machine Learning in Certified Systems](#).

Jenn, E., Albore, A., Mamalet, F., Flandin, G., Gabreau, C., Delseny, H., ... & Pagetti, C. (2020, January). [Identifying challenges to the certification of machine learning for safety critical systems](#). In *Proceedings of the 10th European Congress on Embedded Real Time Systems (ERTS)*, Toulouse, France (pp. 29-31).

“ Si on ne peut certifier l'IA, il existe tout de même des méthodes indirectes pour la contrôler. ”

LA 5G, UN INCONTOURNABLE

Le train de la bande dessinée est autonome et connecté. Les échanges de données sont massifs et ultra-rapides, ce qui suppose une bande passante considérable au niveau de la voie. Ce très haut-débit n'est pas encore une réalité et nécessite un véritable saut technologique. Dans cette optique, l'UIC travaille à l'adaptation de la 5G au monde ferroviaire, le FRMCS, qui succédera au GSM-R (2G) dans le cadre de la nouvelle version de ERTMS qui devrait arriver en 2022⁵.

LA CYBERSÉCURITÉ

L'arrivée de la 5G augmentera massivement le volume de données échangées - donc la surface d'attaque -, accélérera la remontée et la transmission des informations, la bande dessinée le montre bien. Les données constructeur, les données opérateur (entreprises ferroviaires et gestionnaires d'infrastructure), seront d'origines de plus en plus diverses avec l'ouverture du monde ferroviaire à la concurrence et l'interopérabilité. Ainsi, beaucoup d'informations sensibles circuleront sur les réseaux de communication et la cybersécurité sera un enjeu primordial. Les risques existent sur plusieurs plans : piratage de données, intrusion dans des systèmes du gestionnaire d'infrastructure pour induire des pannes dormantes, côté sol ou côté bord, extrêmement difficiles à détecter, etc.

AMÉLIORER LA SÉCURITÉ SANS VERROUILLER L'INNOVATION

Innovation incrémentale/de rupture

L'innovation incrémentale consiste à améliorer un élément existant par petites touches, en remplaçant ou en ajoutant de nouvelles briques.

L'innovation de rupture vise elle à répondre à un nouveau besoin pour compléter l'existant, ou le remplacer.

Source : Innovation commando, [Incrémental VS Rupture : L'abécédaire de l'innovation #3 - YouTube](#)

La filière ferroviaire européenne doit relever le challenge de l'innovation dans les nouvelles technologies et notamment dans celles de la conduite autonome, avec comme arguments principaux des objectifs de fiabilité et de sécurité. Cependant, on constate de nombreux obstacles à cette innovation. Des freins sociaux d'une part, qui seront levés avec l'évolution de la société vers l'acceptabilité des technologies autonomes, des freins économiques d'autre part. Mais il existe également un débat entre innovation et réglementation, débat lié à « l'impossible » certification de l'IA, au temps du droit plus long que celui de l'innovation d'où la difficulté et la lenteur à établir un cadre législatif et éthique pour les nouvelles technologies⁶.

Une autre difficulté réside dans la cohabitation et l'interopérabilité entre nouvelles technologies et technologies plus anciennes. Il faut à ce titre garder en tête deux enjeux considérables pour le secteur ferroviaire européen. Le premier est un enjeu de sécurité : l'obsolescence des systèmes de signalisation, dont le remplacement demande un investissement énorme. Doit-on les remplacer à l'identique ? En mieux mais dans la continuité (ERTMS) ? C'est ce que l'on fera avec le TGV car, étant donné le trafic, le retour sur investissement sera bon. Les nouvelles technologies permettent de faire de la sécurité ferroviaire sur des lignes moyennes et petites de façon plus souple et moins coûteuse que les mécanismes actuellement en place. Le second enjeu crucial est le remplacement du

⁶ Voir :

GEHN IA (2019). [Lignes directrices en matière d'éthique pour une IA digne de confiance](#). Commission européenne + [infographie](#) liée ; RTBF Info (17 mars 2021). [L'éthique dans l'IA : les lois européennes, un frein à l'innovation ?](#)

Villani, C. (2018). *Donner un sens à l'intelligence artificielle - pour une stratégie nationale et européenne*.

Nevejsans, N. (2017). *Traité de droit et d'éthique de la robotique civile*. LEH éditions.

⁵ Voir le site de l'UIC sur ce sujet : <https://uic.org/rail-system/frmcs/>

parc de wagons. Là où le secteur aérien remplace ses avions en moyenne tous les 10-15 ans et l'automobile tous les 10 ans, l'industrie ferroviaire remplace son matériel roulant tous les 30-40 ans. Et elle rencontre aujourd'hui une opportunité historique de les renouveler. Remplacer dans la continuité implique de bien choisir la technologie car l'amortissement durera 40 ans. Cependant, une rupture technologique pourrait entraîner une réduction du cycle de renouvellement.

“ Être proactif, se concentrer sur la technologie, regarder ce qui se fait ailleurs dans le monde et dans d'autres secteurs, et innover en dépit des lenteurs réglementaires. La réglementation, curative, suivra.”

faut être proactif, se concentrer sur la technologie, regarder ce qui se fait ailleurs dans le monde et dans d'autres secteurs, et innover en dépit des lenteurs réglementaires. La réglementation, curative, suivra. Ce sont ceux qui se lancent qui gagneront sur le plan économique et qui, de plus, arriveront à des niveaux de sécurité plus élevés.

Des pistes sont proposées pour contourner ces obstacles. Introduire de l'innovation de rupture avec du train autonome par endroits, là où c'est pertinent en capacité ou en fréquence. Tout en renonçant - tout au moins pour l'instant - à l'interopérabilité, en isolant physiquement le système afin d'éviter des événements redoutés, des intrusions (à l'image des lignes de métro automatiques) et en ouvrant une réglementation transitoire distincte pour autoriser l'innovation. Et, en parallèle, faire des investissements massifs en R&D sur la sécurité du reste du réseau y compris pour le fret, qui constitue une armature essentielle de la vie sociale et économique du pays.

Sur l'intégration des nouvelles technologies, l'innovation, plusieurs postures ont été exprimées au cours de l'atelier, pas nécessairement contradictoires. Une première se base sur la nécessité de parangonner (*benchmarker*) les nouvelles technologies - malgré des niveaux de sécurité dont il est actuellement impossible de démontrer s'ils sont atteints ou pas -, de standardiser, de définir un cadre réglementaire. Une seconde place la contrainte économique au centre : peut-on à la fois investir dans les nouvelles technologies et entretenir le réseau historique ? Quelles sont les priorités ? N'y a-t-il pas un risque pour l'Europe à financer des projets désirables mais très chers et trop complexes pour répondre aux besoins sociétaux (notamment de report modal) ? Enfin une autre considère l'urgence qu'il y a à innover notamment pour ne pas prendre de retard sur les pays qui le font, ne pas être dépassés sur le marché. Pour cela il ne faut pas trop se focaliser sur les contraintes de complexité, les freins sociétaux, techniques (liés aux technologies plus anciennes et à l'interopérabilité), réglementaires et économiques. Attendre que la réglementation ad hoc soit disponible serait particulièrement bloquant, il

REDISTRIBUTION DES COMPÉTENCES

Disparition des compétences traditionnelles, acquisition de compétences en lien avec les nouvelles technologies, transition et cohabitation entre les deux, perte de maîtrise des acteurs sur telle ou telle partie du système... Les évolutions possibles et probables du secteur ferroviaire posent inévitablement la question des compétences, celles des opérateurs, celles des organisations.

Le train autonome peut signifier qu'il n'y aura plus aucun humain en conditions normales (pas de conducteur, pas de personnel de bord...), mais qu'en est-il des situations qui sortent du cadre ? En cas d'incident ou d'accident faudra-t-il avoir des équipes d'opérateurs susceptibles de gérer la situation dégradée, évacuer la rame, reprendre le contrôle en mode manuel si le train est désemparé ? Le cas échéant, cela signifie une formation à des situations extrêmes rencontrées rarement au cours d'une carrière. Comment former des personnels à de telles situations et comment les maintenir à un niveau de compétences satisfaisant⁷ ?

Un autre problème fondamental réside dans la perte de maîtrise des constructeurs sur les logiciels qu'on leur fournit. Ainsi, là où historiquement on a des constructeurs généralistes, on voit s'opérer une séparation entre ceux qui tâchent de devenir fournisseurs de logiciels de sécurité pour les trains autonomes, et ceux qui fournissent caisses et bogies. Les opérateurs, quant à eux, vont être en grande difficulté au niveau compétences pour assurer l'intégration et faire le recettage des logiciels qu'on leur fournit. Ils vont se tourner vers les organismes en charge de la certification des logiciels, de leur intégration dans le train et de l'intégration du train avec l'infrastructure sol, réputés sachants, mais également en déficit de compétences sur ces dimensions.

“Comment former des personnels à de telles situations et comment les maintenir à un niveau de compétences satisfaisant ?”

Freinage

Par exemple aujourd'hui, c'est le constructeur qui est intégrateur de la partie freinage et résistance mécanique en cas de choc du train. Mais demain qui fera ce rôle d'intégration ? Le constructeur ? L'opérateur qui fait le cahier des charges du matériel ? Le fournisseur du logiciel ?

MODÉLISATION ET STANDARDISATION OPÉRATIONNELLE. FERROVIAIRE VS VÉHICULE AUTOMOBILE AUTONOME

Le degré d'homogénéité/hétérogénéité du système ferroviaire, qui détermine la facilité/difficulté à le modéliser, est sujet à débat parmi les participants. Le secteur du véhicule autonome automobile est évoqué, à titre comparatif. D'un côté le système ferroviaire, avec ses différences de signalisation, entre voies grande vitesse et trains du quotidien... est considéré historiquement à plus fort niveau d'hétérogénéité que le système de circulation routière plus normé dans ses interfaces, rendant la modélisation difficile et extrêmement coûteuse. De l'autre, le mode ferroviaire apparaît plus guidé que le mode routier dont le domaine d'opérations est bien plus sujet à perturbations et incertitudes : si on arrive à modéliser demain dans le secteur routier, on y arrivera dans le ferroviaire ! D'ailleurs, si ça n'est pas encore le cas en grande vitesse, on y arrive déjà avec les métros autonomes.

De plus, concernant la complexité logicielle, les avis divergent aussi. D'une part il peut apparaître difficile de contrôler des logiciels avec des millions de lignes de codes, de s'assurer de la bonne synchronisation des données alors qu'on est déjà en difficulté avec des technologies bien moins complexes que le train autonome. D'autre part, le système ferroviaire semble assez simple par rapport à l'automobile autonome dont certains logiciels ont bien plus encore de lignes de code.

⁷ L'aviation, avec l'automatisation, a connu des ruptures technologiques qui ont sans doute été sous-estimées à l'époque. Ceci a conduit à des difficultés d'apprentissage des nouvelles configurations du système, et à un certain nombre d'accidents. Pour autant, forme-t-on aux situations exceptionnelles ?

FOCUS : LE TRAIN AUTONOME OUI, MAIS COMMENT ?

La philosophie sous-tendant l'adoption de systèmes de conduite autonome est l'augmentation de la performance, avec comme argument principal celui de la performance sécurité. À plus long terme, le train autonome vise aussi à être moins coûteux, plus durable, les performances économique et environnementale ne sont ainsi pas en reste.

Les raisons d'aller vers les technologies de conduite autonome sont donc fortes. Aussi, la grande question n'est pas « pourquoi » le train autonome mais bien « comment ». Quelle est la meilleure façon pour y arriver, et quelles évolutions importantes pouvons-nous anticiper pour différents acteurs du monde ferroviaire (fournisseurs de composants, opérateurs, autorités de contrôle, législateurs) ?

Trois inflexions nécessaires vers le train autonome

Inflexion voire rupture sociétale nécessaire	Nécessaire acceptabilité sociale de la technologie.
Décision stratégique à prendre par les acteurs du monde ferroviaire	Où place-t-on l'intelligence du système ? Dans un conducteur artificiel conçu pour remplacer un conducteur humain ? Dans l'environnement du conducteur artificiel qui ne fait qu'exécuter les consignes qui lui arrivent ? On fait une répartition de l'intelligence ? Le choix qui sera fait aura des conséquences considérables sur plusieurs plans (changement de paradigme, compétences ...)
Inflexion juridique	Selon la décision stratégique de distribution de l'intelligence et le déplacement des frontières entre acteurs qui y est lié, potentiels redistribution et ou transfert de responsabilité.

⁸ Dans certains pays, la valeur d'une vie statistique est monétarisée et intégrée à la valeur socio-économique des investissements sur les infrastructures. Un mort en transport public « coûte » plus qu'un mort en véhicule particulier.

Point de rupture sociétale : l'acceptabilité des technologies autonomes

Les technologies de conduite autonome, dans le ferroviaire comme dans d'autres secteurs, se heurtent à des freins sociaux et éthiques. Une condition sine *qua non* à la mise en place des technologies de conduite autonome par le ferroviaire est un degré d'acceptabilité suffisant par la société.

Les voyageurs sont-ils prêts à monter dans un train sans personnel de bord ? S'il y a un problème, auront-ils besoin de se tourner vers quelqu'un pour être aidés ? Faudra-t-il réintégrer de l'humain en situation dégradée pour pallier ce manque, pour rassurer les passagers ? Quelles en seront les conséquences, notamment en matière de formation des personnels ?

Sur le plan éthique, la question se pose déjà avec le véhicule automobile autonome pour lequel le [dilemme du trolley](#) n'est plus du tout théorique... Dans une situation où de toute façon la machine ne pourra pas éviter d'avoir un accident, entre tuer trois retraités à gauche et deux enfants à droite, comment fait-on le choix ? Comment le programme-t-on ? Quelles sont les responsabilités ? Il y a là un sujet majeur de réglementation pour la communauté européenne.

Quel niveau de sécurité socialement acceptable doit-on atteindre pour le train autonome ? La réponse n'est pas simple. Il est démontré dans le secteur automobile que ce niveau attendu n'est pas le même pour un véhicule conduit par un humain que pour un véhicule autonome (les défaillances de ce dernier étant moins bien acceptées par la société). De la même manière, le niveau de sécurité exigé dans les transports publics dépasse celui des véhicules particuliers. En quelque sorte, quand on monte dans un transport public, on fait confiance à un système et il est moins tolérable d'avoir un accident que lorsque l'on conduit soi-même un véhicule et que la part de risque que l'on accepte est plus grande⁸. Enfin, les victimes tolèrent moins les accidents lorsqu'ils sont provoqués par un automatisme plutôt que par l'erreur d'un opérateur humain. L'acceptabilité des technologies de conduite autonome est conditionnée par une rupture dans la perception humaine de ces systèmes⁹.

⁹ Voir :

Orfeuill, J. P., & Leriche, Y. (2019). *Piloter le véhicule autonome: au service de la ville*. Descartes & Cie

Othman, K. (2021). Public acceptance and perception of autonomous vehicles: a comprehensive review. *AI Ethics*

Parlement européen (2019). [Véhicules autonomes dans l'UE : de la science-fiction à la réalité](#)

Awad, Edmond & Levine, Sydney & Kleiman-Weiner, Max & Dsouza, Sohan & Tenenbaum, Josh & Shariff, Azim & Bonnefon, Jean-François & Rahwan, Iyad. (2020). Blaming humans in autonomous vehicle accidents: Shared responsibility across levels of automation. *Nature Human Behaviour*.

“ Les victimes tolèrent moins les accidents lorsqu'ils sont provoqués par un automatisme plutôt que par l'erreur d'un opérateur humain. ”

Décision stratégique : où place-t-on l'intelligence dans le système ?

Derrière le train autonome se cachent des options de conception répondant à des logiques différentes :

- **Logique conducteur** : est-ce que l'on automatise la conduite du train, c'est-à-dire est-ce que l'on remplace le conducteur humain par un conducteur automatique le plus performant possible ? Est-ce que, à l'instar de Waymo (groupe Google) qui, avec son véhicule autonome ne cherche pas à créer un système de transport autonome, mais bien le parfait conducteur, on remplace l'humain dans la cabine du train et on garde le reste du système équivalent, notamment la signalisation ?
- **Logique système** : ou bien est-ce que l'on repense la façon dont on fait évoluer ce train ? Est-ce que l'on répartit l'intelligence entre le matériel roulant et l'infrastructure, ce qui conduit à repenser la sécurité du système tout entier, obligeant à une nouvelle forme de coordination et de réintégration par la technologie ? Certaines entreprises chinoises poussent ce choix à l'extrême en plaçant toute l'intelligence du système dans l'environnement du véhicule, qui n'est plus qu'un robot qui suit « bêtement » les instructions qui lui parviennent de l'extérieur en temps réel.

Aujourd'hui, Google est l'entreprise la plus avancée en matière de conduite autonome. La filière ferroviaire européenne est partagée : elle se dirige a priori plus vers la deuxième option, avec une intelligence répartie dans le système, mais la question de cette répartition entre les différentes entités (constructeur, opérateur, gestionnaire d'infrastructure...) n'est pas tranchée. Les conséquences en matière de rôle, de compétence et de responsabilité des acteurs du ferroviaire seront drastiquement différentes selon le choix fait. On le voit déjà avec les lignes automatisées à la RATP : la frontière entre l'entreprise ferroviaire et le gestionnaire d'infrastructures s'est déplacée.

Potentiellement, à l'heure du train autonome, une entreprise ferroviaire peut devenir un fournisseur de matériel roulant, sans conducteurs, sans personnel embarqué... La décision d'aller vers l'une ou l'autre des options et jusqu'à quel point est donc stratégique.

Transfert de responsabilité : futur probable ou utopie ?

La marche vers le train autonome entrainera a priori un déplacement des frontières entre acteurs et organisations du ferroviaire, lequel pourrait s'accompagner d'une redistribution des responsabilités. Qui va endosser la responsabilité civile et pénale s'il y a un problème dans le logiciel que personne n'a su voir ? Le juge va s'attacher à ce qui était humainement vérifiable. Cette rupture dans l'attribution des responsabilités s'est effectuée dans le secteur aérien, qui a connu dans les années 1990 des évolutions technologiques à fort pouvoir disruptif probablement comparables à ce qui se passe dans ferroviaire de nos jours. Si ce transfert de responsabilité n'est pas clairement spécifié dans le droit, il se fait jour clairement dans le jugement des accidents aériens : d'une investigation de la responsabilité du pilote, de la compagnie aérienne, on est passé à une investigation de la responsabilité du constructeur, l'affaire du Boeing 737 Max en est représentative¹⁰. Pour autant, la possibilité qu'un tel transfert de responsabilité s'opère dans le ferroviaire ne fait pas du tout l'unanimité parmi les experts participant à l'atelier. Il est même considéré comme utopique. La directive européenne concernant le secteur ferroviaire est très claire : la responsabilité pèse sur l'exploitant et il semble politiquement difficile d'envisager un changement de cadre législatif tout au moins à l'horizon 2030-40.

¹⁰ Cette affaire est aussi représentative des difficultés que l'on a très vite si l'on n'est pas capable de garder un système cohérent de certification et de vérification, de surveillance par une autorité indépendante du constructeur.

QUELLES PISTES POUR L'AVENIR ?

La discussion sur l'évolution du système ferroviaire dans ses structures, ses interfaces, dans la distribution des rôles de ses grands acteurs à l'horizon 2030-40 soulève de nombreuses questions, directes ou annexes à cette thématique, spécifiques ou non au secteur ferroviaire.

Les évolutions technologiques, et c'est bien un de leurs objectifs, sont souvent gages de gains considérables en fiabilité et en sécurité. Cette amélioration substantielle se fait au prix d'une complexification systémique, juridique et réglementaire ainsi que d'une redistribution des rôles et responsabilités qui génèrent d'autres vulnérabilités, des incertitudes et des débats passionnants. Une conséquence très importante de la complexification systémique, c'est que des systèmes de plus en plus sûrs dans des conditions normales deviendront complètement imprévisibles dans des conditions exceptionnelles, ce qui peut conduire à des catastrophes.

“ Cette amélioration substantielle se fait au prix d'une complexification systémique, juridique et réglementaire ainsi que d'une redistribution des rôles et responsabilités qui génèrent d'autres vulnérabilités, des incertitudes. ”

Se posent les questions du trafic massif de données, qui implique inexorablement du très haut débit (5G), de la qualité des données, de la qualification et la certificabilité de l'intelligence artificielle. Quelle démonstration de sécurité pour ces systèmes ? Nous ne sommes pas en capacité de comprendre leur fonctionnement, de démontrer leur sécurité et il n'y a ni

référentiel, ni réglementation spécifique. Si l'aviation a lancé des travaux d'établissement de normes sur l'intelligence artificielle¹¹, dans le secteur ferroviaire, plus fragmenté, c'est difficile. Il faut toutefois souligner la standardisation opérationnelle que fait l'UIC à travers les *International railway solution*, projet important lancé en 2020¹². Un travail considérable de standardisation, de normalisation reste à faire, sans toutefois verrouiller l'innovation. Un gros effort doit être mis sur l'activité de modélisation du système, de son architecture et de son fonctionnement pour obtenir une idée relativement claire de ce que les logiciels basés sur l'intelligence artificielle peuvent faire. Et il est indispensable que l'autorité de contrôle et le législateur soient associés aux débats du secteur ferroviaire pour avancer ensemble et définir le meilleur cadre possible pour les nouvelles technologies.

“ Un gros effort doit être mis sur l'activité de modélisation du système, de son architecture et de son fonctionnement. ”

La transformation et le maintien des compétences est aussi un enjeu clé pour l'avenir proche. Le déficit de compétences numériques est une réalité, également chez l'autorité de contrôle. Comment certifier, contrôler un logiciel qu'on ne comprend pas ? D'un autre côté, les personnels qui manipulent les données et les algorithmes n'ont pas de vision claire ni de connaissance fine de la réalité du terrain et/ou des objets dont ils parlent. Il peut être important, même s'ils sont aidés par des capteurs et des bases de données, de garder des opérateurs formés à l'observation et capables de diagnostic même en dehors de leur périmètre strict de tâches. Comment maintenir ces

¹¹ Voir les travaux de l'ANITI ainsi que la [feuille de route de l'EASA](#).

¹² Voir le site de l'UIC sur ce sujet : <https://uic.org/standardisation/irs>

compétences utiles si l'on repasse en mode manuel, comment développer des compétences qui ne seront sollicitées que dans des situations exceptionnelles ? L'équilibre à maintenir entre compétences numériques et compétences plus traditionnelles est un véritable défi.

Quelle logique sera adoptée en termes de technologies de conduite autonome ? Va-t-on opérer une substitution des opérateurs à temps réel et à système constant par une intelligence artificielle ou bien va-t-on repenser le système, le reconcevoir pour l'optimiser pour l'intelligence artificielle ? Le choix stratégique qui sera fait aura des impacts forts sur une thématique annexe, mais cruciale, celle de la responsabilité. Le législateur bien sûr essaie de définir un cadre mais, en fonction de l'option prise entre un conducteur automatique intelligent comme le conçoit Google et une intelligence répartie dans le système, le cadre n'est pas le même ! Une atomisation des responsabilités se fait jour, entre celui qui conçoit l'algorithme, celui qui le recette et qui l'intègre à un train, celui qui l'exploite et assure l'interface avec le gestionnaire d'infrastructures... Le législateur aura un travail important pour défragmenter les responsabilités. Et, au bout du compte en cas d'accident, il y a le juge. Juge qui a un cadre de réflexion qui doit s'adapter au problème posé, au cadre législatif, à ce que disent les experts, la société et les usagers.

“Créer des ‘bulles’ d'innovation physiques et réglementaires transitoires est une piste.”

Afin de concilier innovation, réglementation et sécurité, créer des « bulles » d'innovation physiques et réglementaires transitoires est une piste qui a été proposée. Il s'agit d'une part d'ouvrir à certains endroits, où cela se justifie, des espaces pour développer le train autonome, espaces à la fois isolés de l'environnement extérieur pour limiter les aléas, et au moins temporairement séparés de l'ancien réseau, en renonçant à l'interopérabilité immédiate avec les technologies classiques. Il convient également et en parallèle d'ouvrir des zones réglementaires provisoires

distinctes dédiées pour s'affranchir des délais longs du droit. La technologie peut avancer, la régulation suivra de manière curative et l'accompagnera¹³. Avec l'état de l'art scientifique et l'état de la régulation, cela reste un problème d'usage avec une jurisprudence qui avancera par petits pas successifs. Une solution réside donc peut-être dans la simplification, en cantonnant la technologie autonome à des espaces physiques et réglementaires circonscrits et à part du reste du réseau et de la réglementation générale pour permettre à la fois l'innovation, en sécurité, et l'allocation de ressources importantes sur le réseau historique pour le moderniser.

“Permettre à la fois l'innovation, en sécurité, et l'allocation de ressources importantes sur le réseau historique pour le moderniser.”

¹³ Voir à ce propos : New York Times (2021, avril). [Why Europe is hard on big tech](#)

GLOSSAIRE

- ERTMS** (European rail traffic management system) Système européen de gestion du trafic ferroviaire.
- FRMCS** (Future railway mobile communication system) Réseau commun à toutes les transmissions radio ferroviaires destiné à remplacer le GSM-R.
- GAME** (Globalement au moins équivalent) Critère d'acceptabilité du risque utilisé dans les transports ferroviaires et guidés, postulant que tout nouveau système de transport public, ou toute modification d'un système existant, doit être conçu et réalisé de telle sorte que le niveau global de sécurité à l'égard des usagers, des personnels d'exploitation et des tiers soit au moins équivalent au niveau de sécurité existant ou à celui des systèmes existants assurant des services comparables.
- GSM-R** (Global System for Mobiles - Railway) Système de communication basé sur le standard de la téléphonie mobile GSM et utilisant des fréquences spécifiques pour le ferroviaire.
- Maas** *Mobility as a service.*
- STI** (Spécification technique d'interopérabilité) Spécifications dont chaque sous-système ou partie de sous-système fait l'objet en vue de satisfaire aux exigences essentielles et assurer l'interopérabilité du système ferroviaire européen.
- TVM** (Transmission voie-machine) Système de signalisation ferroviaire en cabine utilisé pour des vitesses au-delà de 220 km/h.

LA FONCSI

LA FONCSI, FONDATION POUR UNE CULTURE DE SÉCURITÉ INDUSTRIELLE, EST UNE FONDATION DE RECHERCHE RECONNUE D'UTILITÉ PUBLIQUE.

La Foncsi a pour vocation de soutenir, de financer et de coordonner des projets de recherche interdisciplinaires sur les risques et les facteurs humains et organisationnels de la sécurité, et d'assurer leur transfert vers les parties prenantes de la sécurité industrielle.

Grâce aux nouvelles connaissances issues de ses travaux et grâce au transfert de ses résultats vers l'industrie, la Foncsi souhaite faire progresser la sécurité industrielle au bénéfice de l'ensemble des parties prenantes : entreprises, administrations, associations, collectivités, chercheurs, organisations syndicales, etc.

www.foncsi.org

SOUTIEN DE L'EPSF ET DE LA SNCF

La Foncsi a pu organiser cet atelier et produire la bande dessinée grâce au soutien de l'EPSF et de la SNCF, qui ont été à l'initiative de ces projets.



