



# L'AUTONOMISATION DES TRANSPORTS PUBLICS

PERSPECTIVES, ENJEUX ET TECHNOLOGIES



SYSTRA



## L'autonomisation des transports publics

PERSPECTIVES, ENJEUX ET TECHNOLOGIES

### Sommaire

Les transports publics et les enjeux de la mobilité de demain : les opportunités offertes par les technologies autonomes	— 03
Autonomisation vs automatisation	— 05
Besoins des utilisateurs des systèmes de transport	— 07
Systèmes de transport publics autonomes : quels sont les défis à relever ?	— 08
Quelle autonomisation des transports ferrés ?	— 11
Tramway	12
Métro	14
Ferroviaire	16
Conclusion	— 19

# Les transports publics et les enjeux de la mobilité de demain : les opportunités offertes par les technologies autonomes

Dans des environnements urbains denses, où les besoins portés par la croissance démographique et économique vont croissant, les solutions de transports publics présentent des capacités, des niveaux de performance et de sécurité incomparables. Leur efficacité énergétique est également un immense atout dans un monde où la pression environnementale s'accroît. Enfin, les transports publics favorisent une mobilité inclusive ou à moindre coût pour le voyageur.

Ainsi, chez SYSTRA, nous pensons que la mobilité de demain sera multimodale et intégrée, fondée sur des réseaux de transports publics structurants et de grande capacité : ferroviaire, métro, tramway, BHNS ; associés à des modes secondaires flexibles, individualisés et connectés. Des transports massifiés et des transports diffus cohabiteront de façon fluide et intelligente, autorisant une offre de déplacement porte-à-porte optimisée. Autrement dit, une offre de mobilité durable exploitant au mieux les possibilités offertes par les innovations techniques et sociales.

Ces dernières années, plusieurs phénomènes ont transformé la mobilité et, plus particulièrement, les usages liés au véhicule individuel. L'autonomisation plus ou moins complète des véhicules routiers est rendue possible par l'émergence de nouvelles technologies : « machine learning », analyse d'image, LIDAR... La conduite devient toujours « plus intelligente ». Par ailleurs, l'économie du partage a généré de nouveaux usages, covoiturage et autopartage, qui se sont répandus grâce à l'avènement de plateformes web et mobiles. Enfin, les moteurs électriques se sont perfectionnés, répondant à des exigences de qualité de l'air



Pierre Verzat  
Président  
du Directoire  
SYSTRA

“ Les enjeux de l'urbanisation et de l'accroissement des besoins de déplacement nécessitent une mutation profonde des solutions de mobilité. Cette mutation a déjà commencé et va accélérer l'introduction de nouvelles technologies dans nos transports publics traditionnels. Fort de ses 60 ans d'expérience, SYSTRA est prêt à relever ces défis. ”

et d'efficacité énergétique strictes. Le passage à l'électrique modifie fortement les infrastructures d'approvisionnement en énergie des véhicules individuels. À l'intersection de ces phénomènes, on voit se dessiner une nouvelle solution de mobilité connectée, électrique et partagée, autour des voitures autonomes. L'engouement et les opportunités économiques que suscitent les véhicules autonomes dépassent très largement les frontières de l'industrie automobile. Les grands acteurs du transport collectif se positionnent comme moteurs du changement face à des solutions de mobilité où s'estompe la dichotomie entre transport collectif et véhicule individuel.

Au milieu de cette formidable évolution de la mobilité, nous pensons que les technologies qui permettent d'envisager l'autonomisation complète de véhicules routiers font également naître des opportunités pour les transports publics. Elles ouvrent la voie à une conduite plus flexible, plus sûre et plus écologique, mais également à une utilisation optimale des réseaux et des flottes, rendant possible une augmentation de capacité et une amélioration de la performance des systèmes de transports. Les transports publics présentent cependant des contraintes propres, notamment de sécurité et de maîtrise de l'obsolescence, nécessitant d'effectuer une analyse spécifique des perspectives, des enjeux et des technologies qui se développent. >>

Nous avons mené un travail de recherche – résolution technique – sur l'autonomisation des transports publics. Issue de ces réflexions, la « note blanche sur l'autonomisation des transports publics » a pour ambition d'explorer quatre grandes questions :

- >> En quoi les technologies qui permettent ou permettront l'autonomisation complète ou partielle de véhicules routiers peuvent provoquer des avancées significatives dans le domaine des transports publics traditionnels, en particulier pour les transports ferrés guidés : tramway, métro, ferroviaire ?
- >> Quels bénéfices en attendre et quels intérêts pour ces modes de transport ? Quelle création de valeur ?
- >> Quels défis communs et quelles différences existe-t-il entre les modes ferrés et les modes routiers ? Quels sont les freins ? Les opportunités ? Les mutualisations possibles ?
- >> Quelle vision peut-on en tirer pour les transports publics de demain ?



**Pierre Gosset**  
Chief  
Technical  
Officer,  
SYSTRA

“ Par rapport à tout ce qui a été écrit sur le sujet, notre réflexion est originale en ce sens qu'elle évalue la pertinence d'utiliser les technologies en cours de développement sur les véhicules autonomes sur les modes de transport traditionnels du transport public, notamment le train, le métro et le tramway. ”

▼ Gare ferroviaire, Suède. SYSTRA réalise des modernisations de signalisation ERTMS dans le pays.





# Autonomisation vs Automatisation

Un système de transport automatique n'est pas un système autonome. À la différence du tramway circulant en milieu ouvert, un métro ne sait pas « ce qui marche à côté » de lui et n'a à prendre de décision que par rapport à « ce qu'il voit devant lui ». L'étanchéité du réseau de métro automatique est le premier pilier de la sécurité des circulations. Le tramway, par nature ouvert et non étanche, pose d'autres problèmes vis-à-vis de l'automatisation.

Les différences entre « autonomie » et « automatisme » sont aujourd'hui source de multiples débats. Afin, de clarifier le propos, nous avons retenu les définitions suivantes :

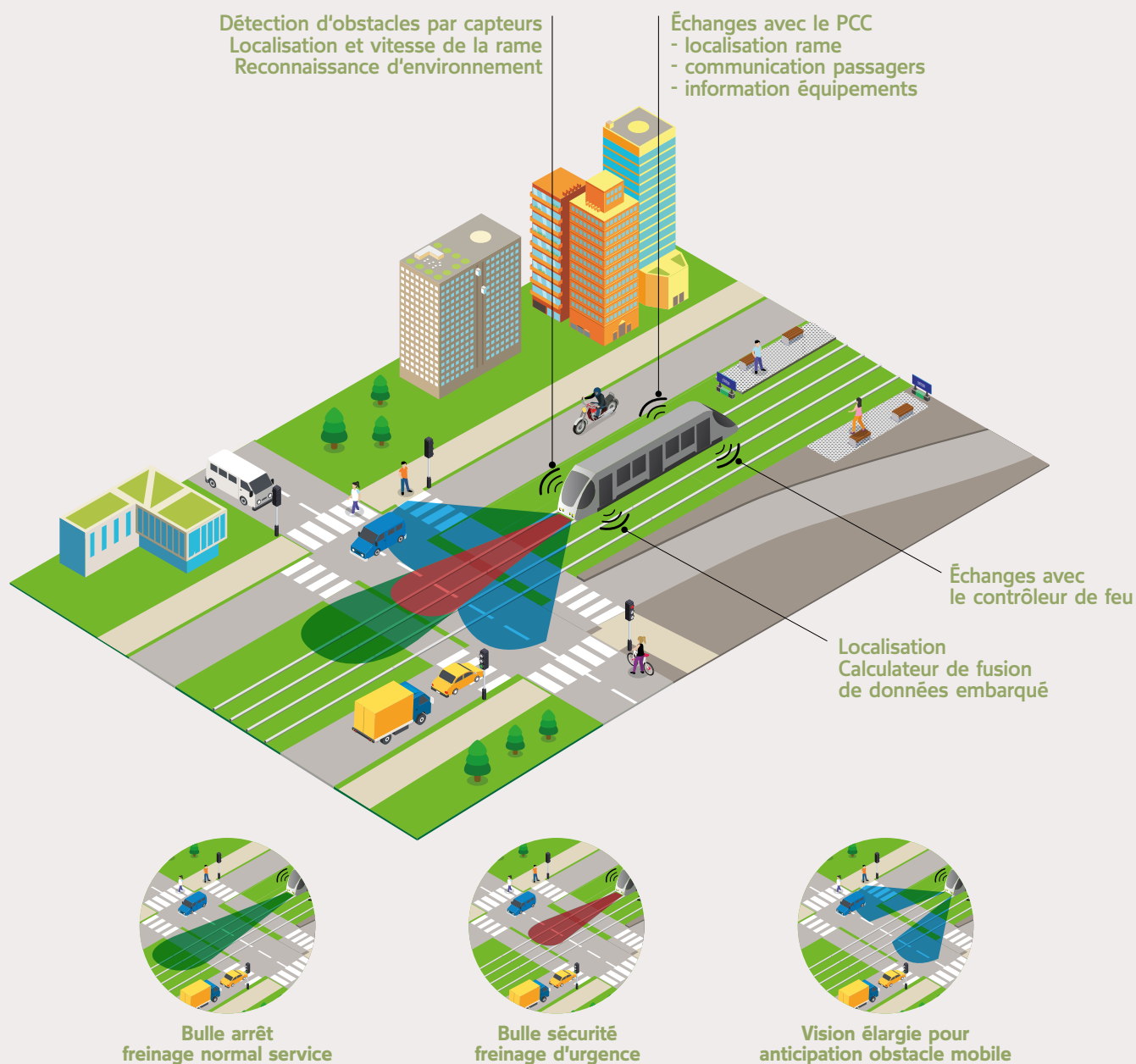
>> **SYSTÈME AUTOMATIQUE :**  
système qui effectue des séquences de tâches en fonction de règles fixées à l'avance ; les informations nécessaires à la compréhension de son environnement lui sont données afin qu'il prenne ses décisions. Il peut être avec ou sans conducteur.

>> **SYSTÈME AUTONOME :**  
système capable de prendre ses propres décisions sans instructions prédéfinies par l'humain pour répondre à tous les cas. Il doit donc prendre en charge des fonctions de compréhension et d'analyse de l'environnement et de décisions jusqu'à présent largement réservées à l'être humain.

# L'autonomie implique l'interaction permanente du véhicule avec son environnement

## L'exemple du tramway autonome

Pour être autonome, le tramway doit être en mesure de capter, percevoir, analyser, planifier, prendre des décisions et agir sans intervention humaine, tout cela en temps réel.



# Besoins des utilisateurs des systèmes de transport

Le parti pris de SYSTRA est d'analyser les attentes des utilisateurs de système de transport vis-à-vis de l'autonomie en analysant les paramètres suivants : sécurité, offre et qualité de service, coût, impact environnemental.

Le tableau multicritères suivant établit le lien entre chacun de ces paramètres et les attentes potentielles de chaque catégorie d'utilisateur du système de transport : l'usager, l'opérateur, le conducteur, la collectivité ou le commanditaire, les tiers en interface.

ACTEUR	BESOINS PRINCIPAUX	Sécurité	Offre de service		Qualité de service			Environnement	Coûts
			Fréquence – capacité	Flexibilité	Temps de parcours	Régularité	Expérience utilisateur		
<b>Usager</b>	Service fiable (prévisibilité et maîtrise du temps de trajet), système sécuritaire, tarification adaptée, performance minimale attendue (temps de parcours), confort, expérience utilisateur...	x	x	x	x	x	x	x	x
<b>Opérateur</b>	Système « simple » à exploiter et à maintenir, maîtrise et optimisation des coûts de fonctionnement (optimisation de la performance économique et opérationnelle des réseaux ; optimisation de la performance des actifs ; réduction du coût du cycle de vie...), souplesse pour l'adaptation de l'offre face à l'évolutivité des besoins au fil du temps, respect des engagements vis-à-vis du niveau de service pour lesquels il est rémunéré par la collectivité, gestion des situations perturbées, sécurité des voyageurs et du personnel de conduite, satisfaction client, réduire le taux de fraude et augmenter les recettes	x	x	x		x	x		x
<b>Conducteur du tram/train/métro</b>	Ergonomie de conduite, visibilité assurée de l'environnement si marche à vue (responsable de la marche du véhicule) ou garantie par les systèmes	x				x			
<b>Collectivité</b>	Coûts d'investissement et de fonctionnement optimisés, niveau de service minimal garanti, obtention autorisations liées à la sûreté de fonctionnement	x	x	x	x	x	x	x	x
<b>Tiers en interface avec le système de transport (surface) : piétons, cycles, voitures...</b>	Des aménagements lisibles permettant de comprendre l'usage et le fonctionnement des espaces en interface (carrefour, passage piéton, passage à niveau...) + des équipements permettant de garantir ces interactions en sécurité.	x							

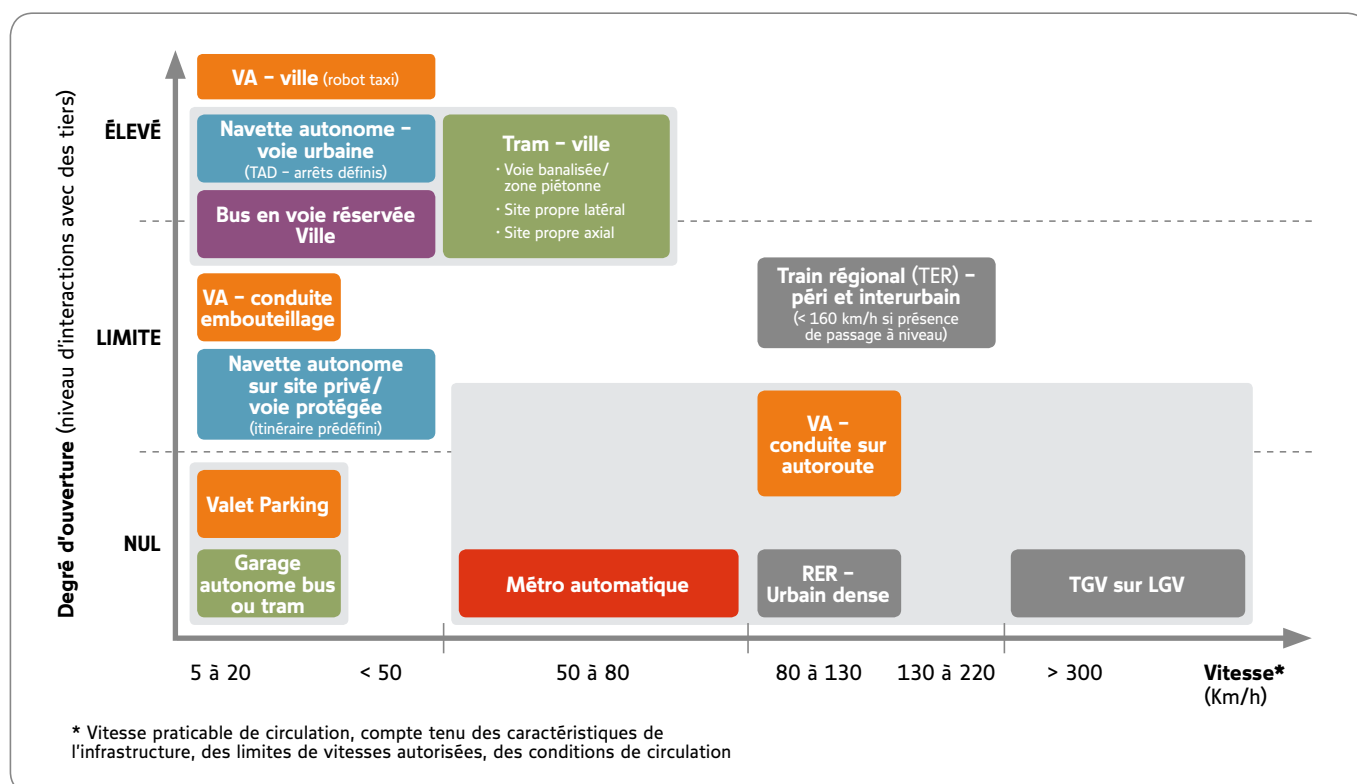
# Systemes de transport publics autonomes : quels sont les défis à relever ?

Outre les débats qu'elle peut soulever (emploi et reconversion des métiers, acceptabilité sociale, responsabilités et règles éthiques), l'« autonomisation » d'un système de transport présente d'importants défis.

Que ce soit pour la voiture autonome, ou les transports autonomes, tous ces mobiles ont des besoins communs : évitement de collision, haut niveau d'intégrité des communications (entre véhicules ou avec l'infrastructure), auto surveillance de l'état du véhicule, management des modes dégradés, capacité à gérer toutes les situations, un certain niveau d'intelligence embarquée pour couvrir toute perte de communication... Les solutions technologiques à déployer seront toutes confrontées au besoin d'homologation, de certification, de standardisation, d'évolution de la réglementation, être assurables. Le vide juridique et le manque de référentiels sécuritaires sur ce type de solutions ouvrent de nombreuses questions.

Les spécificités des modes amènent des défis propres et des besoins de réponses différents, qu'il faut systématiquement croiser avec les usages envisagés (milieu ouvert ou fermé ; transport public ou privé qu'il soit ou non partagé ; parcours sur autoroute ou en milieu urbain, etc.). Les défis peuvent être d'ordre techniques, sécuritaires, réglementaires, sociaux ou sociétaux... Toutefois, certains défis liés à l'autonomisation d'un système de transport peuvent aussi être communs et dans ce cas particulier même si la complexité n'est pas équivalente, il existe une réelle opportunité de création de passerelles technologiques inter-mode (bus, tramway, métro, train) et avec le véhicule autonome (voiture ou navette).

Le schéma ci-après propose un positionnement des différents modes de transport suivant leur niveau d'interaction avec l'environnement et leur vitesse « souhaitable » de circulation.





## Des défis partagés avec la voiture autonome

### ABSENCE DE RÉFÉRENTIEL / STANDARD SÉCURITAIRE

Que ce soit pour les voitures autonomes, les navettes autonomes ou les systèmes guidés autonomes, les enjeux en termes de démonstration de la sécurité constituent le défi N°1. Avant la circulation de tels véhicules sur les routes ou autorisation d'exploitation en conditions réelles, des étapes sérieuses de validation et de mise en sécurité du véhicule seront nécessaires.

Des questions se posent telles que : le système qui remplace le conducteur devra-t-il être de niveau SIL4, à savoir le niveau le plus élevé de sécurité ? L'approche GAME est-elle transposable à ce type de système ? En cas de recours au Deep Learning, la validation de la sécurité sera plus complexe (opacité des algorithmes, taux d'erreurs, non complétude des données, instabilité). Il n'existera pas de référence (au sens, « un système déjà en exploitation ») pour la 1<sup>ère</sup> ligne de tramway/train qui se lancera vers ce choix technologique, et la démonstration de sécurité devra être complète. Dans le cas où le système n'a pas été homologué ou fait l'objet d'une certification du niveau d'intégrité de la sécurité par un fabricant, la temporalité du projet devra intégrer la réalisation d'une part du dossier générique de sécurité (en France, auprès de l'ISA) et d'autre part des dossiers de sécurité.

### ÉVOLUTION DE LA RÉGLEMENTATION

Qu'il s'agisse de la voiture autonome ou des autres modes de transports autonomes, des évolutions de la réglementation et de la législation seront à prévoir pour permettre d'une part, de mener les expérimentations nécessaires à la mise au point et à la fiabilisation de ces technologies, et d'autre part, leur autorisation en condition réelle d'exploitation. Pour les voitures autonomes, c'est le code de la route (propre à chaque pays) qui s'applique. En France, par exemple, un tramway autonome sera concerné à la fois par la réglementation STPG (Sécurité des Transports Publics Guidés) et par la réglementation routière.

### RESPONSABILITÉ EN CAS D'ACCIDENT

Comme pour les voitures autonomes, la question de la responsabilité en cas d'accident sera à déterminer (le constructeur ? l'exploitant ? l'Autorité Organisatrice de Mobilité ?). Par ailleurs,



▲ Navette autonome, La Défense, France

la tolérance vis-à-vis d'un risque d'accident impliquant un transport public pourrait être plus faible par rapport à un accident impliquant un véhicule routier à usage privé. Ce niveau de sécurité implique en outre, à la fois les passagers du service de transport, mais aussi les autres usagers de la route. Quel sera le niveau d'acceptation du risque ? Qui le qualifiera ?

### LUTTE CONTRE LA CYBERCRIMINALITÉ

Même si les technologies ne sont pas encore définies pour un tramway ou un train plus autonome, ces modes seront très probablement confrontés à la problématique de la cybercriminalité, dès lors qu'il existera des communications entre le véhicule et son environnement impliquant une prise de décision du mobile en vue d'une action, ou bien si celui-ci est « télécommandé » à distance. De façon plus globale, ces nouvelles menaces numériques générées par l'augmentation de la connectivité (intrusion dans les systèmes, vol de données, cybercriminalité, etc.) pourront impacter la sûreté de fonctionnement.

### PÉRIODE DE COHABITATION ENTRE DES VÉHICULES AUTONOMES ET DES VÉHICULES CONDUITS PAR DES HUMAINS

Cette période de transition soulève de nombreuses questions en termes de « pratiques de conduite » et de partage des responsabilités. L'apprentissage par la machine devra être capable de trouver des stratégies d'adaptation dans toutes les situations de conduite. Une période de 10 à 20 ans est évoquée pour cette période de transition.

## Des défis propres aux systèmes de transport guidés

---

Cette problématique est directement transposable pour le train, dont les caractéristiques du réseau, la multiplicité des opérateurs et l'hétérogénéité du matériel roulant viennent complexifier le développement technique d'une solution autonome. Au final, on peut souligner que le déploiement de véhicules autonomes dans nos rues, même progressif, ne pourra qu'être bénéfique pour le tramway et pour le train, considérant que l'accidentologie de ces modes est principalement liée à des mauvais comportements des tiers, et en particulier des tiers motorisés.

### LE COÛT DE LA TECHNOLOGIE ET SON ROI

À capacité équivalente (débit à assurer par le système pour « écouler la demande »), le critère du coût d'un système de transport est un argument de poids pour les collectivités, se devant d'intégrer investissement, exploitation, maintenance et renouvellement sur un cycle de vie complet. Dès lors, l'ajout de nouvelles technologies doit pouvoir justifier l'investissement consenti. Une analyse de la valeur est ainsi à mener au cas par cas, selon le contexte (ligne existante ou retrofit, niveau d'accidentologie, coût de la main d'œuvre, etc.) et les besoins de l'opérateur. Par ailleurs, le volume des investissements nécessaires pour mettre au point les technologies autonomes est à mettre en regard avec le volume du marché considéré.

### SÉCURITÉ VERSUS DISPONIBILITÉ DU SERVICE

Cette problématique existe également pour les voitures et navettes autonomes. Cependant, pour les transports publics capacitaires, l'objectif de performance est primordial pour garantir l'attrait et la pérennité du système, surtout si l'on parle d'un mode à haut niveau de service.

### PRISE EN COMPTE DES MODES DÉGRADÉS

En situation d'exploitation, les tramways et les trains sont amenés à gérer des situations particulières appelées modes dégradés. Il peut s'agir de défaillance d'un élément du système qui concoure en temps normal à l'exécution du service (externes ou internes au système tramway/train). Ces défaillances peuvent nécessiter une intervention humaine sur place (sur ordre du PCC) voire une suppression du fait générateur du mode dégradé (stratégie d'évitement). Ces situations, aujourd'hui gérées par le conducteur, doivent être répertoriées et identifiées.

### ANTICIPATION DU DANGER POUR ÉVITER LES FREINAGES D'URGENCE

Toute manœuvre d'urgence impacte la sécurité des passagers qui peuvent être victimes de chutes (car ils ne sont pas ceinturés comme dans une voiture), ainsi que la disponibilité du système de transport (vitesse commerciale, dommages sur le matériel roulant). Toute manœuvre d'urgence doit donc rester exceptionnelle.

Une capacité d'anticipation du danger au moins équivalente à celle du conducteur sera demandée à « l'intelligence embarquée ». Il s'agira d'éviter les freinages d'urgence qui pourront occasionner d'autres accidents avec un niveau de gravité élevé. Les caractéristiques cinématiques d'un tramway par exemple (freinage, trajectoire) lui sont spécifiques et doivent être prises en compte pour l'évaluation de la distance de freinage. Dès lors, la question est posée du champ de visibilité que devra assurer cette intelligence système : quelle distance ? Quel périmètre (longueur, largeur) ?

### ÉCHANGES VOYAGEURS EN STATION

Outre la fermeture des portes et du temps d'arrêt en station, une problématique à gérer sera le départ des rames en station avec la présence de nombreux piétons. Aussi, il sera important de réfléchir à une évolution de l'aménagement des stations pour limiter les comportements déviants en l'absence de conducteur et dissuader les traversées de voyageur devant la rame. Cela pourrait également se traduire par un système d'alerte vis-à-vis de piétons (avertissement sonore extérieur ?) pour attirer leur attention.

### BESOIN DE RÉGULATION À L'ÉCHELLE GLOBALE DE LA LIGNE

Pour une ligne de tramway circulant en milieu urbain, l'enjeu pour l'exploitation consiste généralement à bien répartir les « mobiles » sur la ligne (fonctionnement à l'intervalle plutôt qu'à l'horaire), pour équilibrer le remplissage des rames et garantir des temps de stationnement limités en station. Cette exigence se traduit par un besoin de régulation, dont le rôle est de veiller à la meilleure répartition des rames sur la ligne avec une vision globale. Des consignes sont ainsi transmises aux conducteurs pour adapter leur marche par rapport à des événements sur les rames encadrantes (avance, retard). Il s'agit d'un paramètre à intégrer dans la définition d'un « automatisme » qui devra gérer en temps réel la meilleure courbe de vitesse (traction - consommation énergie) combinée à la détection d'obstacles devant la rame (gestion de l'aléa).



# Quelle autonomisation des transports ferrés ?



TRAMWAY



MÉTRO



FERROVIAIRE



## TRAMWAY

# Vers un renforcement de l'aide à la conduite embarquée et l'autonomisation dans les dépôts

## Définitions, caractéristiques du mode de transport tramway

- >> Capacité (PPHPD) : jusqu'à 10000
- >> Coût (M€/km) : 15 à 30
- >> Intégré dans un milieu urbain ouvert, en interaction forte avec tous les usagers de la voirie et de l'espace public (piétons, cycles, voitures...)
- >> Différents types d'insertion de la plateforme vis-à-vis de la circulation routière : site propre infranchissable, site protégé partiellement franchissable, site partagé
- >> Des stations ouvertes et insérées dans l'espace urbain, avec des traversées de voie aménagées à niveau pour passer d'un quai à l'autre
- >> En milieu urbain :
  - vitesse commerciale de 18-20 km/h, avec politique d'arrêt tous les 400 m, site propre, niveau priorité aux feux
  - Non soumis au code de la route, avec des pointes de vitesse pouvant aller jusqu'à 60-70 km/h quand l'infrastructure et l'environnement le permettent
- >> Principe de la conduite à vue : le conducteur est responsable de l'espacement entre les rames et de la marche de son véhicule à tout instant
- >> Le conducteur est l'autorité sécurité ; en cas de danger, le freinage est le seul recours
- >> Type de conduite à adopter : anticipative (surveillance générale de l'environnement), relationnelle (échanges regard avec piétons), défensive (s'imposer pour ne pas prendre de retard)
- >> Matériel roulant généralement homogène sur une même ligne
- >> Traction électrique
- >> Pas de besoin d'interopérabilité contrairement au train



## Intérêts et gains spécifiques de l'autonomisation du tramway

- >> Gain en sécurité ? Dépend du niveau d'accidentologie constaté et du niveau de professionnalisation des conducteurs. En France, faible accidentologie : ~ 1 victime (blessé + tué) par million de voyage - principalement liée à des collisions avec les tiers (60 % des événements, mais 80 % des victimes graves) n'ayant pas respecté la signalisation routière
- >> Gain en fréquence et en capacité ? L'intervalle du tram est limité par la traversée des carrefours (laisser du temps de vert aux autres usagers)
- >> Gain en temps de parcours ? L'enjeu est ici d'éviter de dégrader la vitesse commerciale. Besoin d'une technologie très aboutie pour éviter des arrêts intempestifs. Des aménagements en station pour canaliser les flux de voyageurs et gérer les échanges en sécurité (fermeture des portes, traversée des passagers devant la rame) seront nécessaires
- >> Gain en régularité ? La gestion des aléas propres à la route ouverte restera une réalité. Selon le contexte : moins d'accident, ce sera moins de retard
- >> Gain en flexibilité ? Si sans conducteur : une évolution en temps réel de l'offre en cas d'évolution de la demande ou d'événements particuliers, pas de limitation d'amplitude, augmentation du niveau de service à coût marginal
- >> Amélioration de l'expérience utilisateur ? Du pour (cabine panoramique) et du contre (sentiment potentiel d'insécurité si le tramway est sans personnel à bord)
- >> Économies d'énergie ? Un gain possible sur la consommation individuelle d'une rame de 5 à 15 %, avec un compromis à réaliser entre le temps de parcours et la consommation énergétique (éco-conduite) qui sera plus difficile que pour le métro du fait des aléas de la route ouverte. Des gains limités sur la récupération d'énergie au freinage (facteur aléas)
- >> Un enjeu fort en termes d'économies d'exploitation si le tramway autonome peut réellement fonctionner sans conducteur (part du poste conduite dans les coûts d'exploitation : jusqu'à 50 %)

## Défis de l'autonomisation du tramway

- >> Complexité supplémentaire dans la validation de la sécurité si recours au Deep Learning (opacité des algorithmes, taux d'erreur, non complétude des données, instabilité)
- >> Taille du marché limitée vs. coûts de R&D pour l'adaptation des technologies du véhicule autonome
- >> Sécurité vs. disponibilité du service/performance globale du système : un impératif pour le tramway qui ne pourra pas quitter ses rails pour compenser une perte de vitesse ou régularité par de la souplesse d'itinéraire comme pourront le faire les navettes autonomes
- >> Distance d'arrêt bien supérieure aux véhicules routiers (contact rail roue et passagers non ceinturés) :
  - 50 km/h, distance d'arrêt : 100 m
  - 3 fois plus que pour une voiture
- >> Départ de la rame en station avec la présence de nombreux piétons devant la rame

## Initiatives recensées

- >> **Issue du monde métro :**  
Tramway de Al Safuh à Dubaï, premier tramway équipé d'un système dérivé des technologies CBCT, avec une conduite humaine contrôlée de façon permanente par un ATP. Un système fiable et sécuritaire, mais qui n'a pas amélioré la vitesse commerciale
- >> **Issue du monde automobile :**
  - Systèmes d'aide à la conduite simples avec des limitations actuelles importantes et bloquantes pour l'autonomie.
  - Expérimentation en cours garage autonome Alstom - RATP



## Notre vision

### Deux axes de développement à privilégier à court-moyen terme :

- >> Autonomie totale dans l'enceinte du dépôt (du simple remisage automatique à un périmètre englobant d'autres fonctions : sablage, machine à laver, préparation et dé-préparation des rames) ; Autonomie sur les zones de manœuvre terminales en ligne en plus d'une autonomie en dépôt
- >> Aide à la conduite donnée au conducteur du tramway pour une conduite plus économe et plus sûre. Comme pour la voiture autonome, montée progressive des technologies d'aide à la conduite adressant les préoccupations des opérateurs (éviter de collisions, élimination de la survitesse, conduite avec faible visibilité, problème de formation ou de turn-over du personnel d'exploitation...)

### Ce à quoi nous croyons également :

- >> Plus de connectivité entre la rame et son infrastructure, pour une perception augmentée
- >> Matérialisation de la bulle de sécurité du tramway (zone de danger dans laquelle le tramway n'est plus en mesure de s'arrêter)

### DE NOUVEAUX RÉFÉRENTIELS POUR QUALIFIER LES NIVEAUX D'AUTOMATISATION ?

Pour lancer la réflexion sur un possible référentiel, nous avons défini 6 niveaux d'automatisation pour le tramway (LoA : level of automation) :

**LoA0** : pas d'automatisme

**LoA0+** : le système contrôle la vitesse (avec un mode de sanction doux et progressif)

**LoA1** : le système aide le conducteur à mieux conduire (consigne de vitesse, aides à la conduite passives)

**LoA2** : le conducteur aide le système à conduire (commande et contrôle de vitesse par le système, aides à la conduite actives pour éviter de collision ; freinage initié soit par le conducteur soit par le système...)

**LoA3** : le conducteur devient agent de bord et intervient en cas de nécessité

**LoA4** : le tramway se conduit tout seul, sans présence d'agent à bord

▲ Tramway de Dubaï, UAE



# Le métro automatique est la solution de référence pour toutes les lignes nouvelles

## Définitions, caractéristiques du mode de transport métro

- >> Terminologies diverses : lourd, léger, dérivés type monorail
- >> Capacité (PPHPD) : jusqu'à 70 000
- >> Vitesse commerciale moyenne : 30 à 60 km/h
- >> Coût : 30 à 130 M€/km
- >> Infrastructure dédiée, généralement en souterrain ou en viaduc, et parfois au niveau de la surface
- >> Infrastructure « étanche » sans aucune interaction avec l'environnement extérieur (circulation routière, piétons, cycles..)
- >> Traversée des voies interdites
- >> Avec ou sans conducteur
- >> Avec ou sans personnel d'exploitation à bord
- >> Avec ou sans porte palières en station
- >> Conduite manuelle ou automatique. En manuel, le conducteur doit respecter la signalisation latérale prévue pour protéger les cantons (fixes) et l'espacement entre les rames
- >> Automatisme : technologie de type CBTC, permettant des cantons mobiles et déformables
- >> Traction électrique
- >> Cas général : desserte homogène, matériel roulant homogène, 1 opérateur

**Référentiel existant (EN 62290) définissant 5 niveaux d'automatisme**

Niveaux d'Automatisation	Non Automatisé Conducteur + ATP (Automatic Train Protection)	Semi-automatique ATO (Automatic Train Operation) + actions et supervision humaine	Automatique Automatisation Intégrale, aucune action humaine requise à bord	
Conducteur en cabine	GoA1	GoA2		Lignes conventionnelles
Personnel dans la rame mais pas de conducteur		GoA3	GoA4 avec agent à bord	
Aucun personnel à bord			UTO ou GoA4	

- >> Pas de besoin d'interopérabilité contrairement au train
- >> Un métro « aveugle » sur sa voie, incapable d'interpréter son environnement (pas de besoin)
- >> Aux niveaux les plus élevés d'automatisation (GoA3 et 4), la « supervision de la voie » (prévenir la collision du train avec d'éventuels obstacles/des personnes sur la voie) n'est plus de la responsabilité du conducteur. La détection d'obstacles situés sur la voie n'est pas gérée depuis la rame mais par des équipements externes et l'application de règles pour la sécurité des trains



▲ Métro automatique de Turin, Italie. SYSTRA a signé la première ligne automatique de la ville et conçoit à présent la seconde.

## Intérêts et gains spécifiques de l'automatisation du métro

Métro automatique, une technologie mature et vieille de plus de 50 ans, qui a permis :

- >> Augmentation de la capacité globale du système via :
  - Diminution espacement entre les rames (intervalle min. avec technos actuelles : 85 s)
  - Suppression cabine conduite (+ 6 % capacité/rame)
- >> Haut niveau de sécurité
- >> Haut niveau de régularité et fiabilité
  - baisse de 33 % des retards de 5 mn entre GoA1 et GoA4
  - disponibilité GoA4 : 99,99 %
- >> Optimisation de la vitesse d'exploitation et du parc de matériel roulant
- >> Réduction de la consommation énergétique de 15 % grâce à ATO (meilleure courbe de vitesse) et ATS (synchronisation des trains en accélération avec ceux en décélération)
- >> Gain en flexibilité pour l'exploitation avec simplification de la gestion du personnel (extension amplitude horaire avec coût marginal ; adaptation de l'offre rapide en cas d'événementiel...)
- >> Réduction de la masse du personnel et des coûts d'exploitation, selon les stratégies déployées par les opérateurs :
  - Enquête réalisée sur 23 lignes UTO : réduction 30 à 70 % du personnel ; réduction des coûts salariaux selon le niveau de salaire du personnel travaillant sur la ligne UTO
  - RATP, métro parisien : coûts d'exploitation -30 % entre UTO et ligne classique
  - Rapport Wavestone 2017 : coûts opérationnels -40 % entre métro automatique et classique incluant les postes énergie/personnel/maintenance
- >> Gains de productivité
- >> UTO : coût d'investissement plus élevé mais rentabilisé sur une dizaine d'années
- >> Opportunité de reconversion du personnel vers nouveaux métiers
- >> Diminution absentéisme du personnel, attribué à une diversité plus importante des tâches comparées à la conduite

## Défis de l'automatisation/autonomisation du métro

- >> Automatisation : défis maîtrisés, technologie mature et taux de retour sur investissement 10 à 15 % pour une ligne UTO
- >> Autonomisation : abaisser les coûts (CAPEX et OPEX) liés aux automatismes CBTC avec moins d'équipement sol... tout en garantissant le même niveau de sécurité/fiabilité/disponibilité/performance... Avec une solution à certifier/homologuer

## Initiatives recensées

- >> **Métros automatiques (techno CBTC) :**  
en 2013, ~ 50 lignes dans le monde (700 km), 1800 km attendus en 2025
- >> **Métro « autonome » :**  
quelques réflexions chez certains industriels

## Notre vision

Trois axes de développement à explorer à moyen-terme :

- >> **Avoir un système centré sur le train**
  - Suppression des équipements sol
  - Transfert de la responsabilité aux équipements à bord
- >> **Avoir un train qui voit ce qui se passe devant et autour de lui**
  - Ajouter au train les fonctionnalités du véhicule autonome (capteurs et chaîne de traitement de l'information), une piste possible pour se passer des façades de quai ? (à mesurer par rapport au gain en régularité apporté par les façades qui empêchent physiquement les intrusions)
- >> **« Robotiser » entièrement le PCC et avoir un système 100 % autonome,**  
notamment sur la gestion des modes dégradés



## FERROVIAIRE

# Vers un train plus autonome sur les réseaux de grande capacité

## Définitions, caractéristiques du mode de transport train suburbain & TGV

- >> Capacité (PPHPD) :  
**Train** : jusqu'à 25 000,  
**RER** : jusqu'à 70 000 (intervalle 90 sec. avec jusqu'à 1 700 voyageurs pour 2 rames couplées)  
**LGV** : 20 000 (16 trains/h avec base 1 200 voyageurs par train)
- >> Vitesse (km/h) :  
**Train** : 80 à 220  
**LGV** : France : 320  
**Chine** : jusqu'à 350
- >> Réglementation française :  
vitesse < 160 km/h si passages à niveau
- >> Coût (M€/km) : LGV de 10 à 25 M€
- >> Variabilité importante :
  - Technologique
  - Desserte (intra-urbaine, régionale, nationale, interfrontalière)
  - Environnements traversés
- >> Système interopérable :
  - Suburbains : plusieurs matériels roulants et/ou opérateurs sur un même réseau
  - TGV : ERTMS et/ou plusieurs systèmes de signalisation
- >> Matériels roulants TGV pouvant circuler en-dehors de lignes LGV mais sans atteindre la grande vitesse
- >> Circulation mixte fret voyageur également sur voie LGV (Contournement Nîmes-Montpellier)
- >> Étanchéité forte, voire intégrale (hors station) pour TGV et train en milieu urbain

## Intérêts et gains spécifiques de l'autonomisation du train

### Train suburbain

- >> Sécurité : gain peu significatif de façon générale. La problématique des passages à niveau reste toutefois singulière, plus portée par l'infrastructure et la relation V2i (connectivité) que par l'autonomie du train. La prévention des risques d'intrusion dans les emprises ferroviaires et le respect des passages à niveau restent l'enjeu n°1 pour diminuer les accidents
- >> Fréquence : les gains en fréquence seront surtout liés à des gains en robustesse, notamment grâce à l'homogénéisation des pratiques de conduites (courbes de traction, freinage, etc.)
- >> Temps de parcours : gain non significatif
- >> Flexibilité et évolution rapide de l'offre en cas d'évolution de la demande, si sans personnel à bord
- >> Économies d'énergie : oui, avec une marche économique optimisée et la récupération d'énergie pour le matériel électrique
- >> Coût : OPEX, gain limité, le coût du poste « conduite » étant non significatif, CAPEX : gain existant, moins « sol » vs. plus « embarqué » / Revenu : +++, directement lié au gain en capacité

### TGV

- >> Sécurité : gain peu significatif, notamment avec l'absence de passages à niveau. La prévention des risques d'intrusion dans les emprises ferroviaires reste l'enjeu n°1 pour diminuer les accidents
- >> Fréquence : les fréquences dépendent des infrastructures, de la mixité des circulations. Le système de signalisation et de cantonnement joue un rôle majeur dans la détermination de l'intervalle de temps minimal entre les trains. L'autonomisation ira dans le sens d'une diminution des équipements au sol qui coûtent chers, et peuvent constituer un frein à l'amélioration du cantonnement
- >> Temps de parcours : gain non significatif
- >> Flexibilité : avantage majeur si et seulement si mode entièrement autonome, sans personnel de bord
- >> Régularité : plus de robustesse, moins de retard (impact significatif)
- >> Économies d'énergie : marche économique optimisée, gains réels mais pas les plus significatifs (5 à 10 %)
- >> Coût : OPEX, gain limité, la part du poste « conduite » dans les coûts étant encore plus diluée, CAPEX : gain réel en privilégiant l'« embarqué » au « sol » / Revenu : Peu significatif, les gains en capacité n'étant pas offerts par la seule technologie « autonome »



## Défis de l'autonomisation du train

### Train suburbain

Gestion en sécurité de la fermeture des portes en station sans pénaliser l'exploitation : la forte capacité de ce type de transport génère un risque spécifique en station lié à l'échange voyageur, pouvant impacter la sécurité mais aussi l'efficacité de toute la ligne

### Partagés suburbains / TGV

- >> La mixité du matériel roulant pouvant limiter les gains de performances, l'analyse de l'efficacité se faisant sur le système de transport dans son ensemble
- >> La distance d'arrêt bien supérieure aux véhicules routiers (contact rail-roue et passagers non ceinturés) :
  - TGV 300 km/h, distance d'arrêt : 3000 m en FU et 9000 m en FS
  - RER 80 km/h – 300 m en FU et 500 m en FS

## Initiatives recensées

- >> Projet « train autonome » SNCF (2017) : réfléchir à 3 cas d'usages (TGV, TER, train de fret), avec une approche progressive sur le niveau d'autonomie du train, l'autonomie complète GoA4 étant visée d'ici 2025. Il vise à développer un ATO de niveau GoA4 avec une étape intermédiaire GoA2, fonctionnant avec l'ERTMS ou de la signalisation statique, et normalisé au standard européen
- >> TAS, avril 2017 (SNCF/ALSTOM/SYSTRAS/SYSTEMX), Transport terrestre autonome en sécurité dans son environnement. Ce projet a deux objectifs principaux :
  - Automatiser la mission d'observation du conducteur de l'environnement
  - Virtualiser la validation du bon fonctionnement de l'automatisation / démontrer la sécurité
- >> Projet Prorail aux Pays-Bas, avril 2017
- >> Expérience pilote de rame automatique sur un tronçon de 20 km dans le Toggenburg Saint-Gallois, Juin 2017 (compagnie Suisse orientale Sudostbahn (SOB), démarrage projet pilote 2020)
- >> Train fret minier en Australie parcours de 100 km sans conducteur réalisé en octobre 2017 Wombat/Paraburdoo

## Notre vision

Une mise en service à l'horizon 5 ans pour des cas d'usage spécifiques, avec un niveau GOA2, pour obtenir des gains en capacité et une régulation optimisée, cela sans s'affranchir totalement du conducteur :

- >> Tronçons suburbains proches du métro en termes d'exploitation
- >> LGV (plateforme protégée, un seul type de circulation)

Des expérimentations sans passagers à bord permettant de tester différents cas d'usage et de mettre au point les briques technologiques nécessaires à la mise au point à terme de trains passagers et fret entièrement autonomes sur la majorité des voies (hors LGV) :

- >> Pilotage à distance qui pourra contribuer par la suite à la gestion des modes dégradés
- >> Autonomie en ligne (fret et passagers) et autonomie depuis et vers les centres de maintenance

### DE NOUVEAUX RÉFÉRENTIELS POUR QUALIFIER LES NIVEAUX D'AUTOMATISATION ?

Pour lancer la réflexion sur un possible référentiel, nous avons défini 6 niveaux d'automatisation pour le train (LoA : level of automation) :

**LoA0** : pas d'automatisme.

**LoA0+** : le système contrôle la vitesse.

**LoA1** : le système permet la définition d'une autorisation de mouvement et d'un profil de vitesse demandé. Des systèmes extérieurs sont capables de détecter des risques non ferroviaires (vents latéraux) et la modification de la vitesse est communiquée par ces systèmes au conducteur.

**LoA2** : Système d'opération est interfacé avec les équipements bord et ATP/observateur. La modification de vitesse est communiquée par les systèmes de détection de risques non ferroviaire à l'ATO.

**LoA3** : le conducteur devient agent de bord et intervient en cas de nécessité.

**LoA4** : le train se conduit tout seul, sans présence d'agent à bord.



# Conclusion

SYSTRA est un groupe de conseil et d'ingénierie, leader mondial dans le domaine des infrastructures de transport public. Nos solutions de mobilité répondent aux enjeux de transformation des villes et des territoires. Ligne grande vitesse, ferroviaire classique, métro, tramway... nos infrastructures de transport dessinent, jour après jour, la mobilité de demain, toujours plus fluide, plus sûre, plus accessible et plus durable. Nos ingénieurs sont fiers de collaborer avec nos clients et de permettre aux populations du monde entier de se déplacer plus librement, ils sont convaincus que la confiance transporte le monde.

En janvier 2018, les directions Conseil et Innovation de SYSTRA publient un document de recherche de 160 pages qui explore la question de l'autonomisation des modes de transports guidés collectifs. La présente note en constitue une synthèse. Les recherches effectuées par les ingénieurs de SYSTRA sur l'autonomisation et l'automatisation apportent un début de réponse aux enjeux et questions de ses clients à ce sujet, que ces derniers soient acteur public, gestionnaire de réseau, grand constructeur ou industriel.

Fort de ses connaissances et de son expertise, SYSTRA est prêt à relever les challenges spécifiques de chacun de ses clients et à répondre, avec eux, aux défis des transports autonomes de demain. Forcée par l'évaluation de la maturité des technologies actuelles, la vision de SYSTRA identifie ce qui est atteignable aujourd'hui, avec de premières pistes à explorer et des gains rapides. Les progrès potentiels à venir dans le secteur de l'automobile ou de l'intelligence artificielle pourraient toutefois changer la donne d'ici quelques années et ouvrir de nouveaux horizons. Ce qui est atteignable aujourd'hui est différent de ce qui le sera demain. Chez SYSTRA, nous restons attentifs aux évolutions technologiques pour accompagner l'innovation sur les projets.

## Pour en savoir plus

Vos contacts :

### Maud BERNARD

Responsable développement tramway autonome  
Direction du conseil, SYSTRA  
[mbernard@systra.com](mailto:mbernard@systra.com)  
+33140166382

### Tristan VANDEPUTTE

Responsable programme Transports Innovants  
Direction de l'innovation, SYSTRA  
[tvandeputte@systra.com](mailto:tvandeputte@systra.com)  
+33173442169

Le rapport complet de l'étude :

« Note Blanche sur l'autonomisation des transports ferrés guidés » réalisée par SYSTRA est disponible sur simple demande.

## Glossaire

**ATO** : Automatic Train Operation  
(le « contrôle de vitesse »)

**ATP** : Automatic Train Protection  
(le « pilote automatique »)

**ATS** : Automatic Train Supervision  
(le « superviseur »)

**CBTC** : Communication Based  
Train Control

**Deep Learning** : technique  
d'apprentissage permettant à  
un programme, par exemple, de  
reconnaître le contenu d'une image  
ou de comprendre le langage parlé

**FU** : Freinage d'urgence

**FS** : Freinage de service

**GAME** : Globalement Au Moins  
Équivalent

**PCC** : Poste de Commande  
Centralisé

**PPHPD** : Passengers Per Hour  
Per Direction

**SIL** : Safety Integrity Level

**UTO** : Unattended Train operation

## Remerciements

Nous remercions en particulier : RATP, SNCF, Alstom, Bombardier, Bosch, IFSTTAR, Metro Tenerife, STRMTG, SystemX, Valeo, VGF (opérateur réseau transport de Frankfurt).

Nous remercions aussi tous les collaborateurs et experts de SYSTRA qui ont contribué activement à l'écriture et à la publication de ce document.

# SYSTRA

72-76 rue Henry-Farman

75015 Paris · France

+33 (0)1 40 16 61 00

[contact@systra.com](mailto:contact@systra.com)

[www.systra.com](http://www.systra.com)



LA CONFIANCE TRANSPORTE LE MONDE