

Minitram automatique



Beamish Museum

De 1876 à 1915, pas moins de 129 villes françaises se sont équipées de [tramways](#).

Aujourd'hui, 28 villes ont un [tramway moderne](#), dont le coût varie entre 15 et 39 millions d'euros au kilomètre pour un investissement total de 2 à 400 millions d'euros. Quand aux métros, qui enterrent la vie, on en compte 10 dont les coûts sont difficiles à estimer (120 millions/km souterrain ? presque 3 milliard d'euros pour la ligne 3 à Toulouse).

En 2005, on trouvait sur Internet un projet de [tramway écolomique](#) sur pneu, avec alimentation inductive en station et roues motrices indépendantes orientées par logiciel.

Le concept n'a pas pris...

C'est maintenant le véhicule entièrement automatique qui fait son trou. Google et autres compagnies font le pari que chacun pourra se déplacer individuellement dans un taxi sans chauffeur disponible en bas de chez soi.

Faut-il pour autant oublier les transports en commun ? Rien n'est moins sûr.

Les navettes autonomes ont commencé des expériences un peu partout dans le monde mais en faisant oublier le concept du tramway.



Vincennes

Face à cette nouvelle concurrence, le tramway peut avoir sa place, en tant que **transport guidé - donc prioritaire** - sous réserve de fortes évolutions technologiques, en gardant les principes énoncés ci-dessus, pour offrir un service concurrentiel à l'utilisation d'un véhicule personnel : arrêts nombreux, optimisés en durée, grande fréquence, itinéraire dynamique, accueil de poussettes, de fauteuils roulants, voire de vélos, voyages debout (assiette variable, jerk faible),...

Le jerk est la dérivée de l'accélération, concrètement, la brutalité de la mise en mouvement, brutalité de l'accélération, du freinage, de la mise en virage (le rayon de courbure d'un virage est toujours progressif pour éviter que la force centrifuge passe brutalement de zéro à la valeur en milieu de virage).

Le tramway devient lui aussi sans chauffeur. Il peut se réduire à un seul petit wagon pour augmenter la fréquence et être garé facilement pour une meilleure adaptation à la demande.

Il vaut mieux des Mini-Trams fréquents et rapides aux arrêts plutôt que des wagons à grande capacité moins fréquents et perdant du temps aux arrêts

Ce Mini-tram est à la fois un transport public guidé, un mini-bus à la demande, un taxi collectif. Les arrêts sont courts. Les Mini-Trams peuvent se suivre en convoi ou se poursuivre comme des véhicules classiques, jusqu'à l'accostage virtuel.

Les progrès technologiques créent plus d'emplois qu'ils n'en suppriment. Les chauffeurs d'aujourd'hui peuvent être re-qualifiés sur des tâches d'extension du réseau, de maintenance et de relations avec les usagers.

Simplicité et légèreté

Le Mini-Tram n'a pas les contraintes d'un mini-bus qui doit rouler sur autoroute à 130 km/h ou gravir des routes de montagne à bonne vitesse et démarrer en côte sans problème avec 20 passagers, avec des marches d'accès qui ralentissent les montées et les descentes des passagers. Le Mini-Tram en site ouvert n'est pas très rapide du fait d'arrêts assez rapprochés (200m) et d'une vitesse bridée à 36 km/h pour des raisons de sécurité.

Il transporte au plus une douzaine de passagers qui peuvent monter et descendre à niveau et deux par deux.

La durée des arrêts est globalement proportionnelle au nombre de passagers. Les arrêts courts augmentent la vitesse moyenne et limitent les déperditions calorifiques en été comme en hiver.

N'ayant ni poste de conduite (ni chauffeur), ni moteur thermique, ni essieu, ni différentiel, la structure du Mini-Tram en matériaux composites peut être très allégée.

Les coûts liés à un poste de conduite dans un véhicule moderne sont très importants, en conception/fabrication/exploitation/maintenance. Outre le poids du chauffeur et des équipements, les contraintes des câblages liés au poste de conduite sont importantes. L'absence d'un poste de conduite simplifie la conception mécanique, électrique et électronique et libère de la place.

L'automatisation de la conduite permet des solutions modernes pour beaucoup de services : LED pour l'éclairage intérieur et extérieur, commandes/contrôles par liaison sans fil, caméras panoramiques avec logiciel d'anamorphose,...

Plus léger, il est plus facile à construire, moins cher, plus facile à intégrer dans une flotte de [transports urbains gratuits](#) et fréquents.

Plus léger, il consomme moins en rampe et en accélération. Il est tout électrique et se recharge en station par induction et au freinage. Les caténaires ne sont plus nécessaires.

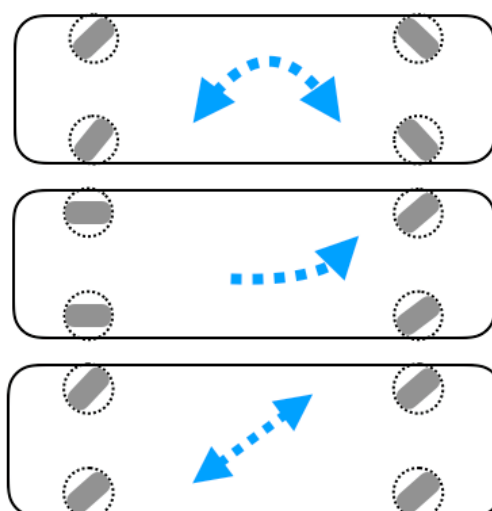
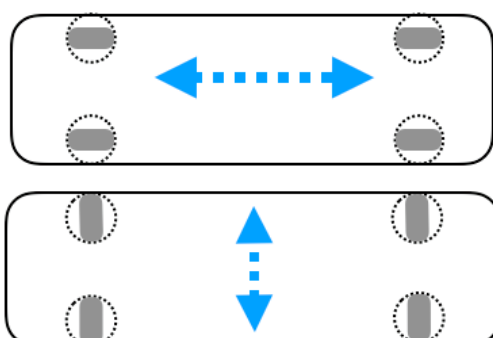
Roues "panoramiques" ou multidirectionnelles

Grâce à ses roues motrices orientables séparément sur 360°, toutes identiques (gains de fabrication et de maintenance), le Mini-Tram est plus maniable et peut passer dans des secteurs étroits et tortueux ou se ranger dans un créneau étroit.

Le concept de roues omnidirectionnelles est appliqué aux méga-plate-formes à roues multiples.



Mouvements utilisant des roues « panoramiques »



Chaque roue supporte une charge maximale d'environ 1 tonne. Un diamètre de 40cm est suffisant, sous réserve d'une bande de roulement très unie.

Usages diversifiés

La structure d'un tel véhicule est adaptable à d'autres usages : livraisons en ville, véhicules de secours, transports de groupe, remorque, tourisme, bistrot mobile, bibliobus, école mobile...

Le Mini-Tram automatique accepte les poussettes et les fauteuils roulants, voire les vélos.

Pilotage

Autonome, mais guidé sur bande de roulement

Le guidage rigide sur rail est dangereux pour les cyclistes et sujet à défaillance aux aiguillages. Le guidage GPS n'est pas suffisamment précis et fiable en ville pour satisfaire un positionnement au centimètre près en section courante et à l'arrêt en face d'éventuelle portes palières. Le guidage visuel/radar/lidar utilisé par les véhicules autonomes nécessiterait des repères fixes pour assurer les précisions demandées. Seules les fonctions d'évitement frontal sont à traiter. L'éventuel et exceptionnel cheminement hors des voies est à traiter dans un autre cadre.

En particulier, il faut affirmer la place et la priorité du transport en commun par un marquage fort montrant clairement aux automobilistes, aux cyclistes et aux piétons que ce cheminement est prioritaire et d'un usage fréquent.

Roulement sur pneus

Comme pour le métro moderne, le Mini-tram peut passer au roulage sur pneu, plus confortable et plus pratique quant aux aiguillages. Plus léger qu'un mini-bus, le Mini-Tram ne remet pas en question la structure de la chaussée. Il suffit de poser deux bandes de roulement à la place des rails.

La mise en oeuvre d'une chaussée pour rails de tramway est d'un coût prohibitif pour une réalisation qui rigidifie la ville.

Les bandes de roulement, de la largeur d'un pneu (environ 20cm), résistantes au passage des Poids Lourds de 44t (10t par roue pour tenir compte des chargements dissymétriques et des surcharges), peuvent être des enduits granuleux ou des polymères adaptés encastrés de quelques centimètres dans la couche de surface, affleurant à 0,5cm au-dessus de la surface générale (évacuation des eaux).

Si les 4 roues sont directrices, la roue arrière suit la piste de la roue avant. Il n'est pas nécessaire de l'élargir dans les virages.

Pour évacuer la neige ou autres objets, les Mini-Trams sont équipés de pare-chocs semi-rigides en léger biais. Lors de chutes de neige, ou d'obstruction, les engins municipaux assurent le déneigement général ou le déplacement de l'obstruction.

Le mauvais calcul serait de se prémunir contre l'incident annuel très coûteux à éviter. Il convient seulement d'éviter au mieux les accidents corporels et de prévoir des itinéraires de substitution et la compatibilité avec les dépanneuses classiques.

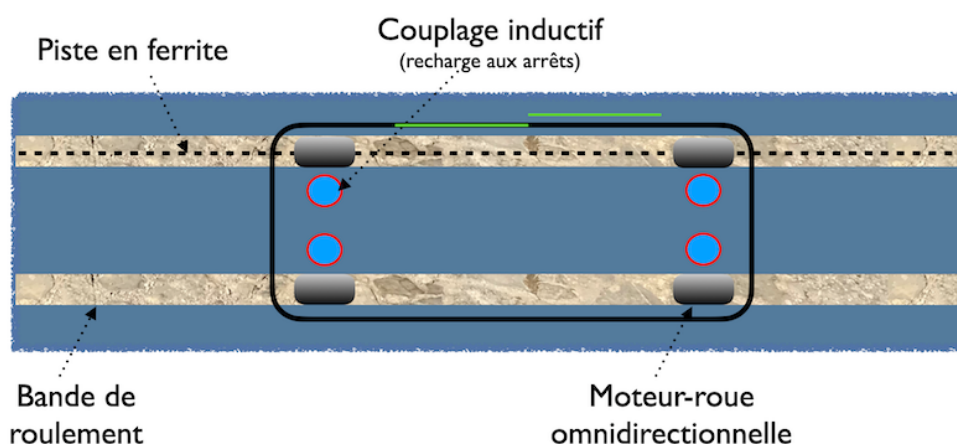
Piste en matériau magnétiquement perméable

La technologie proposée pour le guidage est l'asservissement à une piste en ferrite magnétique encastrée dans la chaussée ne nécessitant ni continuité mécanique ni transport de courant.

La technologie assure une détection sélective de la piste (le détecteur fait la différence entre le fer et la ferrite magnétique). La ferrite peut être sous forme de poudre noyée dans un liant bitumineux ou sous forme de plots. L'avantage de cette technologie est d'être passive : aucune continuité mécanique ni transport de courant ne sont nécessaires.

Le guidage par ferrite magnétique a été démontré pour le guidage des aveugles (Lille, MTM Leader vers 1984, brevet européen déposé le 19-03-1987, publié le 21-07-93) et pour le guidage des chasse-neige au Col du Lautaret, la ferrite étant coulée dans une saignée de quelques millimètres de large et de quelques centimètres de profondeur (MTM Leader - CETE Méditerranée - DDE05, vers 1987) et par l'expérimentation d'une autoroute automatique sur 12 km (NAHSC - Août 1997 - Interstate 15, près de San Diego), basée sur quelques milliers de plots magnétiques encastrés.

La piste en ferrite est encastrée au milieu d'une des bandes de roulement. Le calculateur embarqué maintient automatiquement les roues sur les bandes de roulement et pratique l'arrêt au but au centimètres près (porte-palières).



La piste en ferrite contient les consignes cinématiques comme peut le faire la "grecque"¹ pour le métro : vitesse, accélération, décélération, arrêt au but,... peuvent être définis par des espaces entre barreaux proportionnels à la vitesse de consigne. En site propre la vitesse est maximale, compatible avec les accélérations et décélérations maximale (selon la charge) pour l'arrêt au but de chaque arrêt. En site partagé, la vitesse tient compte du comportement des autres usagers de la voirie. Les caméras et radars déterminent la cinématique de tous les objets environnants. Le calculateur peut déclencher un freinage préventif ou d'urgence.

Le GPS n'est pas un outil de guidage. Il permet des fonctions particulières au niveau de la gestion de la flotte, des consignes cinématiques particulières pour une marche à vitesse lente (pluie, neige, ...), une translation latérale pour s'insérer dans un créneau, faire un demi-tour sur place, ou utiliser des itinéraires d'évitement, ou préparer un accostage,... Il permet le repérage horodaté des incidents (intérieurs ou extérieurs), et permet de déclencher des affichages en réalité augmentée....

Un logiciel d'accostage (lié au logiciel d'évitement) permet au Mini-Tram un couplage immatériel automatique au Mini-Tram précédent, chacun connaissant en permanence la position de l'autre, permettant d'une part la mise en convoi et d'autre part l'optimisation de la cadence de passage aux arrêts. La phase finale d'accostage sur les 20 derniers

¹ La grecque tire son nom de la frise crénelée. Il s'agit d'un fil disposé au milieu de la voie, horizontalement et en créneaux successifs, parcouru par un courant vu par le capteur embarqué alternativement dans un sens et dans l'autre. La vitesse de consigne est proportionnelle à la distance entre les segments transversaux.

mètres se fait en stéréométrie. La notion de cantonnement devient inutile, sauf en cas de voie unique en alternat où le canton est virtuel.

Les arrêts sont marqués par des trottoirs à niveau du plancher surbaissé du MiniTram. A noter l'absence d'essieux, qui permet de revoir l'ossature du véhicule (à voir si le pneu, orienté à 90 degrés, dépasse ou non du flanc du véhicule).

Recharge par induction

Chaque arrêt permet la recharge des batteries par [couplage inductif](#). Au sol une bobine primaire d'induction fixe est raccordée au réseau EdF. Le Minitram se positionne pour que sa bobine secondaire inductive soit centrée sur le primaire, permettant une connexion électrique sécurisée sans contact pour la recharge des batteries. Au milieu de la bobine au sol, un capteur permet le guidage précis de la bobine embarquée dans sa descente, afin que les deux bobines soient alignées au millimètre près.

Moteur-roues

Le Mini-Tram est propulsé par 4 moteur-roues indépendantes, sans essieux, pivotantes à 360°, intégrant la direction (gérée en cohérence avec les autres roues par le calculateur de bord) l'amortisseur, le freinage (moteur), l'assiette et le stockage d'énergie court. Avec 4 moteurs-roues, la puissance de propulsion/freinage est divisée par 4 (impact sur les coûts de fabrication). Les 4 moteurs-roues (5 kW environ) sont identiques et facilement interchangeables, facilitant la fabrication et la maintenance.

Dans une rampe à 10%, à 5m/s (18km/h), le Mini-Tram de 3000 kg (transportant environ 15 personnes) s'élève de 0,5 m chaque seconde, soit environ 16 kW à répartir sur 4 roues, soit 4 kW.

Pour accélérer 3000 kg à 1,5m/s², il faut une puissance inférieure 4 kW, à répartir sur 4 roues, soit 1 kW par roue.

Ces puissances sont largement inférieures celles d'un minibus qui doit monter 6000 kg à 50 km/h sur des pentes de 15%.

Il faut 7 secondes pour accélérer de zéro à 36 km/h, soit 7 kWh par roue pour le stockage court

L'alimentation du moteur-roue se fait par couplage inductif qui résout le passage du courant du bâti fixe au pivot en rotation illimitée.

Les transmissions avec le calculateur embarqué se font par courant porteur.

Les 4 moteur-roues agissent dans les deux sens et assurent 4 freinages efficaces et redondants, rendant inutile le freinage mécanique. Le frein de parking est un simple galet à friction appuyé sur le pneu à l'arrêt.

Stockage électrique

La recharge au freinage provient du moteur-roue (réductance variable) agissant en générateur chargé par des [super-condensateurs](#) ou des [volants d'inertie](#) qui acceptent des puissances de charges/décharges sur des durée courtes plus importantes que les batteries, et un nombre de cycles charge/décharge très grand. Le stockage court sert à la phase d'accélération et éventuellement dans les rampes. Chaque moteur-roue possède son propre stockage court, ce qui divise les intensités de charge/décharge par 4 et simplifie l'électronique de puissance.

Les batteries assurent la propulsion générale (ainsi que le chauffage) et sont dimensionnées pour assurer la propulsion en vitesse de croisière à 15m/s (54km/h) sur voie horizontale sur le kilométrage effectué en une journée (environ 150km).

Les batteries sont intégrées le long des poutres longitudinales.

Les batteries se rechargent la nuit au terminus et en exploitation aux arrêts lorsque les supercondensateurs ou les volants d'inertie sont à pleine charge.

Le volant d'inertie peut faire partie du moteur-roue (montage vertical - projet intéressant de recherche-développement).

Assiette dynamique

Le réglage de l'assiette se fait en temps réel, en fonction de la charge de chaque roue et de la cinématique du Mini-Tram. En accélération l'arrière se soulève, inversement au freinage. En virage, l'extérieur se soulève. Le capteur de charge à la roue permet aussi de calculer la charge transportée (et d'obtenir des statistiques fines d'exploitation). Cette assiette dynamique, couplée à une cinétique progressive (jerk limité) permet le voyage debout et des accélérations/freinages plus importants, y compris pour les freinages d'urgence. Le système de réglage de l'assiette peut être oléo-pneumatique de façon à bénéficier des compensations avant/arrière et babord/tribord. Le système sert aussi aux amortisseurs - A priori les bandes de roulement ont un "[uni](#)" de bonne qualité - en cas de dégradation de la bande de roulement, la consigne de vitesse peut être abaissée. A noter que l'ouverture de porte et les absorbeurs de choc des pare-chocs peuvent aussi être oléo-pneumatique.

En plus du capteur de charge, chaque roue est munie d'un capteur de pression du pneu, d'une mesure de vitesse de rotation (ABS), d'une mesure de vibration (balourd), d'une mesure de température, d'une mesure d'angle de direction. Ces capteurs sont reliés par courant porteur (alarme en moins de 10 ms) à la centrale de pilotage.

Ossature

La taille standard pourrait être telle que ce véhicule entre dans un conteneur de 20 pieds (intérieur : 5,90 x 2,30 x 2,30), transportable sur un train.

Les pneus peuvent être remplacés/doublés par des roues de chemin de fer (écartement 1,435 m) ou de tramway, pour que le Mini-Tram devienne un [wagon automoteur](#).

Le Mini-Tram est dimensionné et organisé intérieurement pour optimiser les temps de montée et de descente des passagers, y compris les poussettes d'enfant, les poussettes à marché, les fauteuils roulants et les vélos. Ces Mini-Trams peuvent être adaptés pour les déplacements scolaires qui ont des exigences de nombre d'élèves par accompagnateur, ou pour des déplacements d'un groupe avec des vélos.

La hauteur libre sous plafond est de 2m (comme le chambranle des portes), en considérant que les passagers de plus de 2m ont la possibilité de s'asseoir.

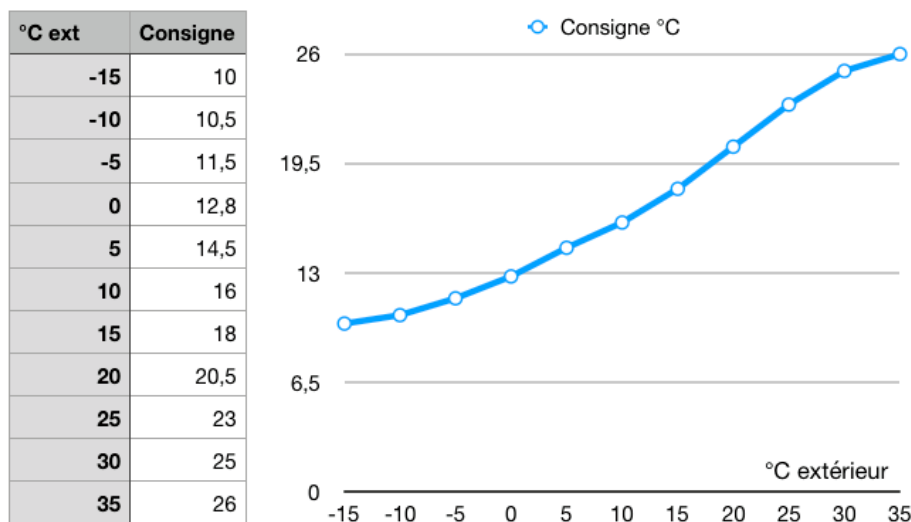
Sièges

Les sièges sont sur un pied. Il peuvent être rabattables. L'emplacement des pieds est facilement modifiable en maintenance, avec un pas de 5 cm en largeur et en longueur, avec un revêtement mosaïque isolant interchangeable.

Climatisation

Les exigences correspondent à des trajets courts avec des passagers assis ou debout. La station debout est favorisée par l'assiette dynamique du véhicule

La climatisation est progressive : à 35°C en extérieur, la consigne est de 25°C ; à -15°, la consigne est de 10°C ; à 20°C, la consigne est de 20°C.



L'air conditionné est soufflé depuis le bas des parois.

Vitrage

Le vitrage fixe est isolant thermique dans les deux sens, à grande ouverture verticale (le passager peut voir les façades d'immeubles et les enfants sur les trottoirs d'arrêt). Il filtre aussi les UV et assombrit les fortes luminosités extérieures. Il résiste aux rayures, aux impacts et aux tags (normes ?). Le vitrage peut être à carreaux, plus pratiques à construire, à traiter et à changer.

Les essuie-glaces ne sont plus essentiels. Un revêtement hydrofuge peut assurer la visibilité nécessaire en cas de pluie. En terminus, un poste de lavage de vitre manuel ou automatique est envisageable.

Porte

L'ouverture, vers l'extérieur pour ne pas engager le volume habitable, permet à deux adultes de se croiser. L'espace devant la porte permet à un fauteuil roulant de faire demi-tour (cercle de 1,50m). Un siège de 90 cm de large (pour personne de forte corpulence ou pour passager avec un gros sac) peut s'escamoter pour installer un fauteuil roulant.

Flans

Les flancs et la partie centrale du toit sont isolants thermiquement et phoniquement et facilement interchangeables. Les zones publicitaires sont facilement amovibles.

Les flancs comportent des plaques inductives murales pour la recharge des portables.

Les trajets sont suffisamment courts pour que ce service reste en option. Néanmoins la possibilité de recharger son téléphone et de disposer d'un WiFi public sont des arguments qui peuvent attirer de nouveaux usagers. Les plaques inductives sont à préférer aux prises qui peuvent être vandalisées et qui obligent à disposer de 220V à bord

Plafond

La partie centrale du plafond loge l'"intelligence" du véhicule et comporte :

- ♦ le calculateur embarqué et sa redondance (basculement manuel ou automatique),
- ♦ deux rampes de diodes d'éclairage, et un éclairage spécifique à la zone de montée/descente,
- ♦ une rampe à LED à l'avant et une rampe à LED à l'arrière, pour un éclairage plongeant sur 5 m de largeur,
- ♦ une WiFi publique,
- ♦ 2 caméras panoramiques (360°) intérieures, microphones et haut-parleurs, reliées en temps réel au centre d'exploitation du réseau,
- ♦ 4 caméras panoramiques (360°) extérieures, aux 4 coins.
- ♦ 1 caméras panoramique (360°) de toit permettant de voir vers le haut (sécurité et tourisme)

Les logiciels d'anamorphoses permettent de rétablir l'image droite. L'image panoramique présente l'avantage sur l'image d'une caméra télé-orientable de zoomer précisément sans perdre le reste de l'image. Les cellules actuelles proposent 16 millions de pixels.

Pour limiter la charge de transmission, les images sont transmises en basse définition, mémorisées en haute définition dans le Mini-Tram et transmissibles à la demande.

A noter que deux caméras visualisant le même point produisent des images stéréoscopiques. Il devient possible de construire (ou reconstruire) une scène virtuelle complète en 3D, intérieur et extérieur, pour reconstituer les accidents, les incidents, les vandalismes ou le trajet virtuel.

- ♦ des panneaux d'information : cartographie du trajet, prochain arrêt, informations de sécurité (on peut imaginer un écran de réalité augmentée sur la porte et sur le pare-brise),
- ♦ la boîte noire, en partie supérieure.

Les caméras panoramiques intérieures assurent la surveillance du comportement des passagers (mouvements brusques).

Les caméras extérieures assurent que la voie est libre. En approche pour couplage virtuel ou lors de circulation en convoi, les caméras calculent la distance restante (elles se servent mutuellement de cible).

Pare-chocs

Les pare-chocs peuvent assurer le contact souple lors d'un couplage virtuel et sont conçus pour l'absorption molle des obstacles et pour y faire facilement glisser un vélo avec anti-vol à clé.

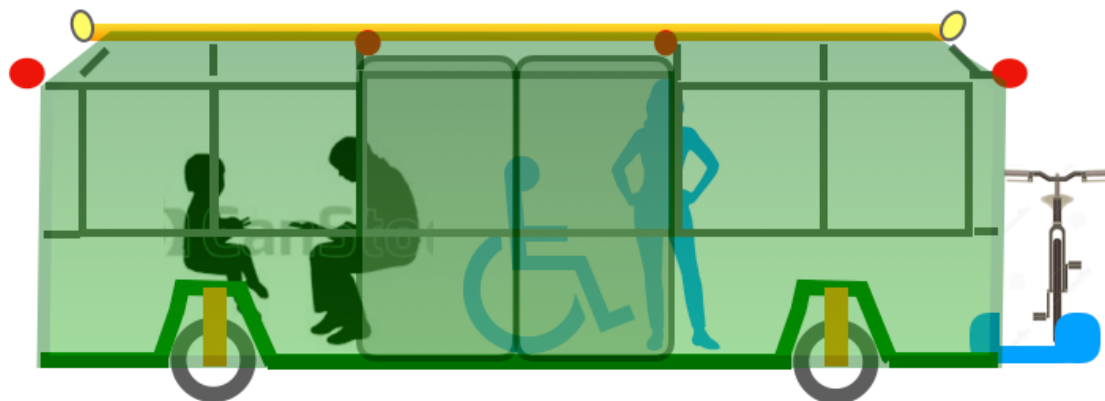
Les pare-chocs intègrent les feux de position, les clignotants et les feux stops.

Issue de secours

Le flanc opposé à la porte est articulé en partie inférieure. Il peut basculer pour devenir plan incliné. Sa libération entraîne la libération du carreau vitré vitrage qui peut s'ouvrir. L'ouverture est manuelle et est rendue possible automatiquement sur choc.

Relations avec le Centre d'Exploitation

Les contrôles/commandes sont transmis en temps réel, doublés par une boîte noire. Images et sons sont transmis en faible définition, avec haute définition sur demande. Le logiciel du régulateur central permet de reconstituer en temps réel la situation en 3 dimensions (avec récupération de la boîte noire et re-jeu).



Conclusion

Le concept de Mini-Tram, à différencier des mini-bus autonomes, propose des évolutions technologiques importantes :

- Rails sous forme de bandes de roulements avec piste de guidage
- Couplage virtuel entre Mini-Trams successifs
- Moteur-roues omnidirectionnelles
- Supercondensateurs ou volant d'inertie pour les charges/décharges courtes
- Recharge par induction aux arrêts et aux terminus
- Assiette dynamique
- Caméras panoramiques - anamorphose
- Pare-choc support de vélo

