

Navettes ferroviaires autonomes



Contraintes	3
Navette sur batteries	4
Sécurité	5
Vitrage	6
Assiette	7
Porte	7
Plafond	7
Pare-chocs	9
Issue de secours	9
Usages diversifiés	9
Relations avec les Poste d'Aiguillage	9
Acceptabilité sociale	9
Annexes	11
Energie	11
Actions de recherche :	11

D'énormes investissements sont réalisés pour les voitures et camions autonomes. Il est étonnant que rien ne soit entrepris pour le transport ferroviaire qui, en dehors des lignes à grandes vitesses et des lignes de banlieue, ne peut que dépérir... Sauf à lui appliquer une rupture technologique majeure, comme on devrait aussi le faire pour le fret ferroviaire et pour les tramways.

Les lignes secondaires irriguent le pays. Une gare qui ferme provoque ou s'ajoute à d'autres fermetures : pôle administratif, trésor public, hôpital de proximité... Le commerce s'étiolle, les emplois se font rares... Nous sommes collectivement responsables de la désertification de régions où pourtant il ferait bon vivre.

Pour qu'une voie ferrée soit utilisée, il faut ranimer la demande en offrant un service attractif : sécurité, fréquence, rapidité, confort, adaptation à la demande. Ce n'est qu'au bout de plusieurs années d'investissement que la fréquentation du service sera acceptable. Il y a urgence à ressusciter les micelines d'antan !



Avec les technologies d'aujourd'hui, la miceline d'antan peut devenir une petite navette autonome, fréquente, rapide et confortable, qui pourrait se substituer progressivement aux trains de voyageurs trop peu fréquents et trop vides (parce que trop peu fréquents) et trop rigides dans leur gestion.

Les nouvelles technologies permettent l'émergence des véhicules autonomes, des mini-bus et mini-trams autonomes, des wagons de fret autonomes. Les voies ferrées sont des infrastructures trop précieuses pour être abandonnées.

Contraintes

Les navettes ferroviaires sont compatibles avec l'infrastructure existante : hauteur de quai, franchissement d'aiguillage, intervalle de sécurité avec les convois existants.

Les Postes d'Aiguillage sont adaptés pour que le suivi automatique de ces navettes soit intégré aux équipements actuels - ou, inversement, que les convois classiques soient intégrés dans un système modernisé (attention aux pannes majeures - y compris le défaut total Edf de plusieurs jours)

Les navettes peuvent être associées en convoi (attelages immatériels) pour l'accueil des groupes ou pour s'adapter à une demande importante.

La navette n'a plus de conducteur ni de poste de conduite. Il n'est plus nécessaire de disposer de navettes de grande capacité pour optimiser la charge salariale et gérer l'organisation compliquée des personnels roulants.

L'accès aux navettes se fait par réservation et paiement par téléphone.

En gare, deux contrôleurs veillent au bon transbordement des voyageurs, ce qui maintient l'humanisation du service et permet la transformation des emplois de conducteurs en emplois de proximité.

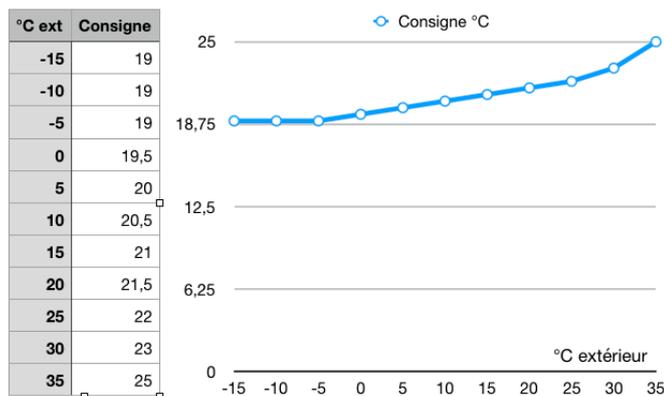
Il vaut mieux de nombreuses petites navettes que quelques grandes navettes. Plusieurs navettes fréquentes sont mieux qu'une maxi-maxi-navette plus rare et plus difficile à adapter à la demande.

Les gares peuvent évoluer dans leurs fonctions. Elles peuvent abriter des services nouveaux, tels que cyber-cafés, point-relai pour les livraisons individuelles, avec centre d'appel. Prise en charge des personnes en "détresse numérique" dans l'organisation de leur voyage, ...

Le type de voyageurs rend nécessaire (au contraire d'un mini-tram) :

- un sanitaire pour des voyages de plusieurs heures, occupant la surface d'au moins 2 sièges et imposant un couloir d'accès,
- des étagères à bagages à main (42cm x 37),
- un casier à valises,
- la WiFi,
- des prises (USB) de recharge de téléphone,
- des pare-soleils,
- une climatisation : plancher, parois, plafond et vitrages à fort coefficient d'isolation thermique ; chauffage/froid des places occupées et rayonnement infra-rouge au plafond et plancher refroidi.

Climatisation



- des sièges inclinables sans gêne vers l'arrière

- une tablette amovible pour chaque place,
- un éclairage individuel (LED),
- un écran tactile (20 cm de base) pour chaque place, pour projection de film et de consignes,
- l'accès aux personnes à mobilité réduite.
- un porte-vélos (2 vélos)

La navette est légère (matériaux composites isolants auto-porteurs). Sur une base de 12 passagers, ce petit wagon pèse moins de 2,5 t et mesure moins de 6 m. Ses dimensions hors tout sont compatibles avec un conteneur de 6m. Les bogies à 4 roues sont inutiles.

A noter qu'un petit module est facilement pivotable sur petit pont tournant, de façon à toujours offrir les sièges dans le sens de la marche (sauf les 3 vis à vis si nécessaire).

Les essais en soufflerie vérifient que la navette résiste à une pression vent $WL3 = 0,80 \text{ kN/m}^2$ dans toutes les directions (190 km/h).

Un très fort vent traversier pourrait renverser la navette. Il faut abaisser son centre de gravité et prévoir un système élévateur pour mettre le plancher aux niveau des quais de gare.

Par vent de face très fort, il est possible de baisser la vitesse de croisière pour limiter la consommation.

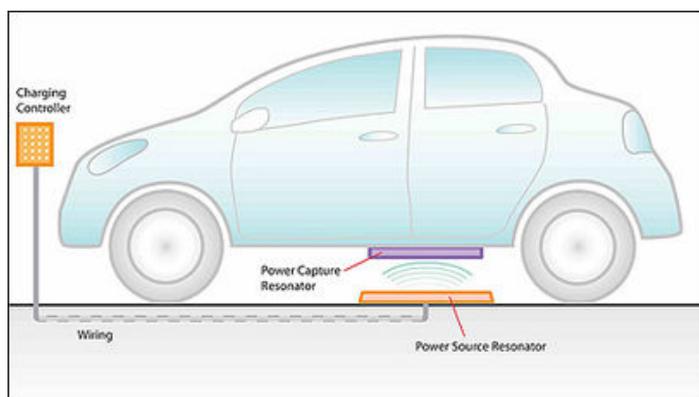
à 120 km/h et un C_x de 0,40 sur 6 m², il faut environ 40 kWh/100km, alors qu'à 150 km/h (soit un vent de face de 30 km/h), il en faut environ 80 kWh/100km.

Navette sur batteries

La navette est électrique sur batteries. Sur rail, les frottements sont faibles ; la carlingue est aérodynamique ; l'énergie est récupérée au freinage (volant d'inertie ou supercondensateurs).

La recharge des batteries se fait par couplages inductifs lors des arrêts. Les temps d'arrêts sont plus courts que ceux des trains classiques, car la distance moyenne entre la place assise et la sortie est courte. La recharge des batteries à l'arrêt peut être accélérée en multipliant les couplages inductifs.

Le couplage inductif est la solution sans contact et sans pièce conductrice à l'air libre. La technologie est déjà opérationnelle pour la recharge des voitures électriques.



Concept du couplage inductif par résonance pour la recharge des véhicules électriques. © DR

La navette dispose d'une autonomie d'au moins 200 km à 120 km/h.

Les batteries de 2018 (lithium-air) annoncent une densité d'énergie de 300 Wh/kg, soit, avec 200kg de batteries une autonomie de plus de 200 km sur terrain plat.

Dans les zones montagneuses, la récupération d'énergie en descente est au mieux de 1/3 de la dépense d'énergie en montée. L'autonomie est plus faible, mais les gares sont plus rapprochées, permettant des moments de recharge plus fréquents. La motorisation/freinage est répartie sur les quatre roues.

Chaque roue intègre un moteur électrique fonctionnant en moteur ou en générateur (freinage) dans les deux sens (réductance variable). Il n'y a plus d'essieux, mais le régulateur ralentit la roue intérieure dans les virage pour une action différentielle. Les quatre moteurs-freins assurent la redondance suffisante pour le freinage. Un système type ABS évite les glissades. Un sabot assure le frein de parking (attention au gel).

Les 4 roues sont identiques, faciles à fabriquer et à monter.

L'indépendance des roues permet de monter celles-ci librement sur un pivot pour des débattements de 1 ou 2 degrés utilisé dans les courbes, avec un angle de chasse anti-vibratoire.

En montagne, les voies sont sinueuses et imposent une vitesse de croisière plus faible, sans nécessiter d'augmenter la puissance des moteurs-roues.

On peut réfléchir à l'opportunité d'un roulement pneu-rail à l'instar des premières michelines, qui permettrait l'accès aux centre-ville ou la continuité en cas de voie ferrée détruite.

Sécurité

La navette peut s'affranchir du système de cantonnement de sécurité pour se mettre en convoi (attelage immatériel).

Cependant, à 120 km/h et avec un freinage non glissant (contact fer/fer) qui limite la décélération à 2 m/s², il faut environ 20 s et 400 m pour l'arrêt. La sécurité anti-collision est délicate à obtenir avec des équipements embarqués. Même si chaque navette peut émettre en permanence sa position (GPS corrigé) sur canal radio dédié et peut recevoir la position des autres navettes par ce canal ou en téléphonie, ces éléments peuvent être brouillés. De même un radar d'approche est en défaut dans certaines courbes.

On peut imaginer un système qui assurant un suivi permanent de toutes les navettes d'une même ligne dont le défaut, analysé par chaque navette (l'absence d'information sur la navette précédente ou la non-conformité de sa propre position avec sa trace de marche (aiguillages)), déclenche le ralentissement de celle-ci, jusqu'à une vitesse compatible avec son radar de poursuite et avec son système d'attelage immatériel (avec une vitesse de 10 m/s, il faut 5 s et 25 m pour s'arrêter). Si cette procédure de mise en oeuvre d'une marche de secours s'avère non sécuritaire, la navette doit être équipée du système de respect des cantonnements - à l'heure où l'on explore la planète Mars, il est peut-être temps de ranger ce vénérable système.

On peut imaginer un jeton de transmission tournant en boucle sur un média téléphonique puis sur le média satellitaire. La perte du jeton déclenche la marche de secours et éventuellement la marche télé-manuelle.

La vitesse de la navette est asservie à sa position GPS complétée par un odomètre, pour connaître sa position au mètre près en croisière y compris dans les tunnels et dans les zones d'ombre satellitaires, et pour respecter la signalisation classique. Le diagramme de

marche est actualisable en temps réel depuis les postes d'aiguillage. L'arrêt au but se fait au centimètre près (alignement des couplages inductifs).

L'avant de la navette est profilé pour chasser la neige à ras des rails.

Lors des chutes de neige, il convient de maintenir une fréquence des navettes en fonction des hauteurs de précipitations. Une navette spéciale peut être équipée d'une turbine pour souffler la congère latérale créée par les navettes à 2m vers l'extérieur.

Attelage virtuel

La navette ne remet pas en cause les convois, qui restent nécessaires pour la continuité technologique. Pour constituer un convoi, le crochetage/décrochetage mécanique, les connexions/déconnexions du réseau électrique et du réseau pneumatique de freinage, sous contraintes de gel et d'humidité et en toute fiabilité conduisent à des dispositifs complexes. L'idée est de supprimer l'attelage classique au profit d'un attelage virtuel.

La navette dispose de son propre système de freinage qui évite les connexions/déconnexions sur le réseau pneumatique.

La navette dispose de son propre système de régulation de vitesse qui lui permet d'accoster et de suivre de très près (à moins de 10cm) la navette précédente et qui rend inutile le crochetage mécanique. Le gain aérodynamique est important.

La navette régule sa motorisation pour exécuter un arrêt au but¹. Le but peut être fixe ou mobile. En particulier, le wagon peut s'atteler à une autre navette, elle-même pourvue de la même fonction. La vitesse relative d'accostage est fonction de la distance de la cible.

L'attelage virtuel, sans contact est en soi une révolution technologique. Pour les trains classiques, l'attelage mécanique est nécessaire car c'est la motrice qui tire les wagons. Dans le cas d'une navette avec attelage immatériel, la motorisation électrique assure la propulsion et réagit à la milliseconde pour se rapprocher ou s'éloigner de la navette précédente (ou du but), rendant inutile l'attelage mécanique : suppression des tampons, des crochets et du mécanisme mécanique soumis aux contraintes du gel et de la dilatation. L'intervalle entre navettes peut se réduire au minimum nécessaire pour qu'elles ne se touchent pas dans les courbes et contre-courbes, particulièrement dans les zones d'aiguillages.

Vitrage

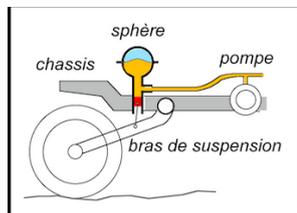
Le vitrage fixe est isolant thermique dans les deux sens. Il filtre aussi les UV et assombrit les fortes luminosités extérieures. Sinon les rideaux assurent la fonction de pare-soleil. Il résiste aux rayures, aux impacts et aux tags (normes ?). Le vitrage peut être à grands carreaux (mais montants étroits pour ne pas gêner la vision du paysage), 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.

¹ Depuis le VAL à Lille, métro-automatique construit dans les années 1970, les métros s'arrêtent au centimètre près en face des porte-palières, quelque soit leur charge de passagers

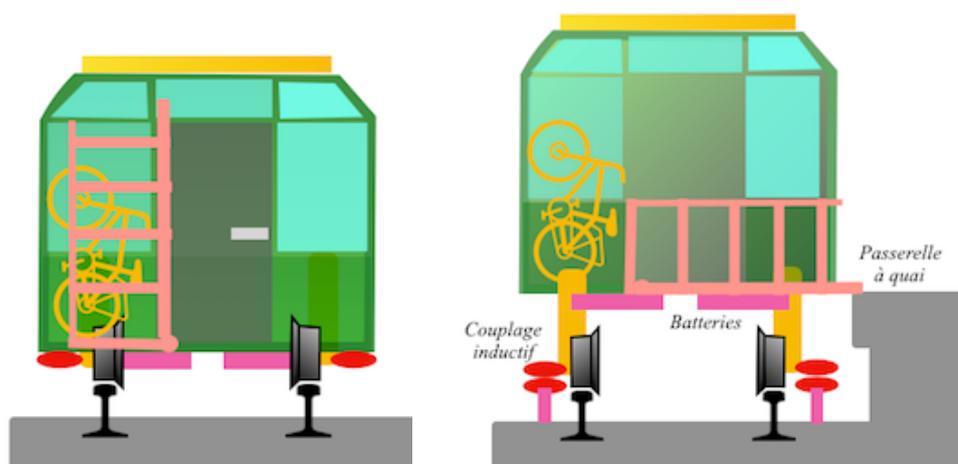
Assiette

La navette dispose d'un correcteur d'assiette agissant dans les accélérations/freinages et les virages, assurant aussi la suspension et la mise à niveau du plancher au quai lors des arrêts (la hauteur de 550 mm au dessus de la voie n'est pas standard dans toutes les gares) et la bonne position du couplage inductif. En croisière, la carlingue abaissée assure une meilleure résistance au vent.



Pour mémoire, la DS19 Citroen disposait dès 1995 d'un tel système hydro-pneumatique, assurant la suspension et la hauteur d'assiette, sans doute réactualisable sur une navette légère.

L'élévation de la carlingue consomme de l'énergie. On peut imaginer un système avec récupération d'énergie à la descente. A noter que cette manoeuvre se fait en gare et peut bénéficier d'une alimentation électrique par les couplages inductifs.



Porte

La montée et la descente se font par l'arrière pour ne pas perdre en places assises, à charge d'avancer automatiquement une passerelle derrière la navette arrêtée. La porte s'ouvre vers l'extérieur pour ne pas engager le volume habitable. 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.

Comme décrit plus haut, deux contrôleurs, essentiels pour l'humanisation du service, assistent les transbordements.

Plafond

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

- ♦ le calculateur embarqué et sa redondance (basculement manuel ou automatique)
- ♦ la boîte noire,
- ♦ 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 à 45° à l'arrière sur 5 m de largeur, et à 15° à l'avant sur un cône de 15° d'ouverture.
- ♦ la WiFi publique,

- ♦ les 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.

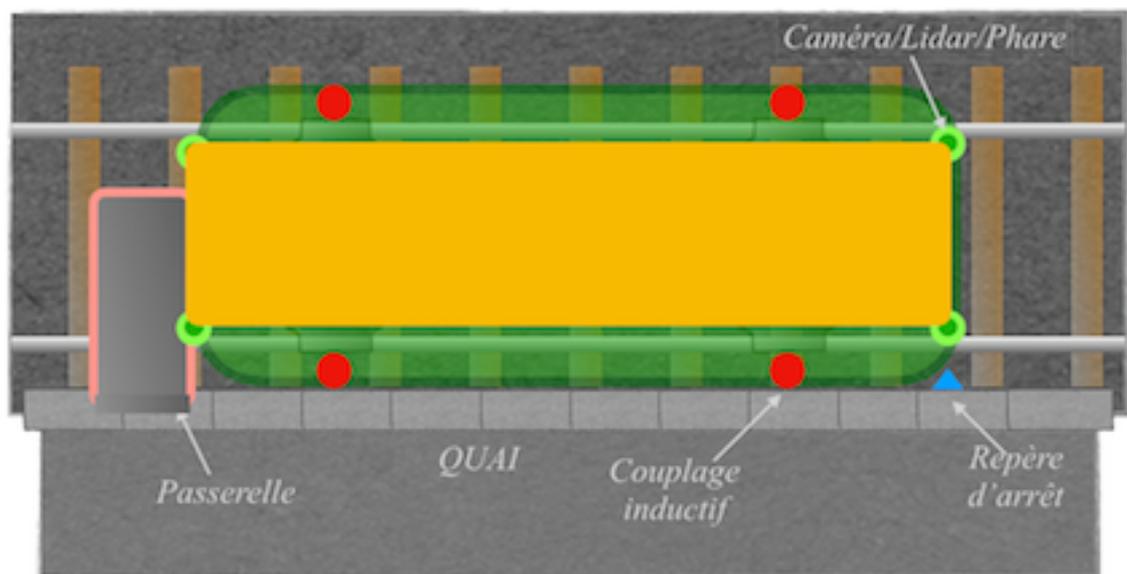
A noter que deux caméras visualisant le même point produisent des images stéréoscopiques. Il devient possible de construire (ou reconstruire) une scène virtuelle complète en 3D, intérieur et extérieur, pour reconstituer les accidents, les incidents, les vandalismes ou le trajet virtuel.

La surveillance télévisuelle devrait être automatique. Le logiciel embarqué permet d'identifier les situations anormales (comportements brusques,...) afin d'émettre une alarme vers le Poste d'Aiguillage pour une analyse précise.

Les caméras panoramiques intérieures assurent la surveillance du comportement des passagers (mouvements brusques). Pour limiter la charge de transmission, les images sont transmises en basse définition, mémorisées en haute définition dans le navette et transmissibles à la demande.

Les caméras extérieures et les radars/lidars 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). Elles peuvent aussi servir pour l'arrêt au but (alignement des 2 caméras sur un repère en bord de quai).

Les caméras fonctionnent dans le domaine du visible. A priori, il est inutile d'y associer des projecteurs infra-rouges, puisque la nuit, l'environnement est éclairé par les phares et par l'éclairage des gares. La navigation en brouillard suit les mêmes règles que les trains actuels. A noter qu'il est possible d'augmenter la distance de visibilité par hâchage de la lumière des phares à une fréquence de quelques kHz.



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 deux vélos avec anti-vol à clé.

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

Issue de secours

Le flanc babord dispose d'un panneau 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.

Usages diversifiés

La structure d'un tel véhicule est adaptable à d'autres usages : livraisons de petits conteneurs, transport mixte (moins de voyageurs et plus de bagages), véhicules de secours, transports de groupe (convoi), remorque à bagages, tourisme, bistrot mobile, bibliobus, école/cinéma mobile, couchettes...

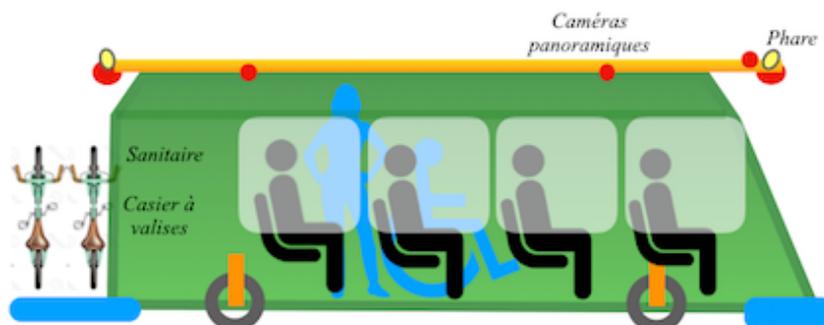
Relations avec les Poste d'Aiguillage

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).

Acceptabilité sociale

La rupture technologique proposée conduit à un accroissement du nombre de voyageurs. Les métiers actuels sont conservés pour gérer les trains classiques. D'autres métiers sont à créer : contrôleur de ligne, à l'instar du contrôleur aérien, planificateur de convoi, gestionnaire des postes fixes (aiguillages fortement sollicités, quais de transbordement,...), gestion locale de la nouvelle clientèle, des taxis et Transports en commun, gestion commerciale, maintenance des nouveaux matériels,... Ces nouveaux métiers sont à faible pénibilité.

Le découpage des trains de voyageurs en wagons-navette accroît la prégnance du trafic et modifie le rôle fonctionnel du personnel en gare. L'augmentation de la fréquence des navettes est un facteur d'animation constante de la gare, qui devient attractive pour de nouveaux services (cyber-café, pressing, station-service avec location de voitures, consigne à vélo, entretien des 2Roues, hôtellerie, fleuriste, papéterie, pôle administratif de proximité, salle de réunion,, crèche, laboratoire médical,...)



Conclusion

Le concept de navette ferroviaire autonome propose des évolutions conceptuelles et technologiques importantes :

- Petits véhicules compatibles avec un conteneur de 6m
- Couplage immatériel entre navettes successives
- 4 Moteur-roues indépendantes
- Super-condensateurs 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

Commentaires sur les coûts

On peut imaginer des navettes de 24 passagers, compatibles avec un conteneur de 12m, mais les contraintes de fabrication, de gestion et de maintenance et les coûts augmentent exponentiellement avec la taille (jusqu'à 30 millions d'euros pour une rame de TGV, 15 millions pour une rame de métro, 12 millions pour une rame Coradia Liner Alstom de 6 caisses et 269 places sur 110m de long, soit 2 millions d'euros par wagon et 45 k€ la place assise).

Par ailleurs, 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.

Au total, le coût de fabrication en série importante d'une navette électrique de 12 places devraient être inférieur à celui de la fabrication d'un mini-bus.

Les contraintes de sécurité ferroviaire et routière ne sont pas les mêmes. La conception d'une navette est plus simple mécaniquement et la fabrication moins chère.

Les navettes légères sont beaucoup moins agressives pour l'infrastructure que les trains classiques. Les coûts d'entretien au passager transporté deviennent faibles.

Le personnel en gare est conservé et peut élargir son domaine d'activité à différents services payants (à l'instar des stations-service routière).

Annexes

Energie

Chaque roue possède son moteur et son système de charge et de stockage de l'énergie :

- ✦ Tiroir des batteries
- ✦ Tiroir pour super-condensateur ou volant d'inertie
- ✦ Bobine de couplage inductif
- ✦ Chargeur des batteries
- ✦ Régulateur moteur
- ✦ Capteurs (état des batteries, température et vibrations de la roue, détection du couplage inductif au sol, compteur de tours de roue, détection de courbe pour différentiel...)
- ✦ Couplage au bus de données vers le calculateur embarqué. (simplification du câblage, optimisation de la connectique)
- ✦ Connectiques

Les feux, les phares, les éclairages, les écrans individuels, les portes,... sont alimentés par un bus d'énergie unique supportant aussi les télécommandes et télé-contrôles par courant porteur.

La climatisation est indépendante. Elle peut être coupée en cas de problème d'autonomie.

Actions de recherche :

La fabrication d'une navette ferroviaire est une action de recherche/développement qui peut être confiée à un consortium automobile/train. Une recherche à horizon plus lointain peut porter sur les points suivants :

- ✦ Intégration dans le moteur-roue d'un volant d'inertie, soit par échange électrique, soit par échange mécanique à l'aide d'un embrayage entre la roue et le disque
- ✦ Panneaux solaires, équipés d'un récupérateur de chaleur, placés sur le toit complètent les apports d'énergie. Une surface horizontale de 12 m² produit chaque jour en moyenne 5kWh électrique et 4 kWh thermique par jour.
- ✦ Vitrages régulateurs de la luminosité intérieure et isolants thermiques et phoniques.
- ✦ Climatisation des sièges et radiateurs infra-rouges (renouvellement de l'air !)
- ✦ Sécurité du calculateur embarqué : protection contre les orages magnétiques, contre les attaques cybernétiques. Système de secours permettant de télé-piloter à vue la navette à vitesse lente depuis le Poste d'aiguillage.

Planning

La mise en route du projet n'est pas forcément complexe. Elle dépendra de la qualité (et de l'audace) des équipes de conception. Plusieurs chantiers peuvent être lancés en parallèle :

- ◆ Analyse de la valeur du projet général et des composants principaux : Dimensionnements, attelage virtuel, stockage électrique, distribution électrique, gestion de l'énergie, moteurs-roues/freinage, informatique embarquée, informatique d'hypervision, gares, sécurités (anti-vandalisme, piratages,...)
- ◆ Etudes logistiques : en lien avec l'analyse de la valeur, pour que la logistique suive lors des phases de maquettage et de déploiement
- ◆ Réalisation informatique d'un réseau de voies ferrées virtuel, type OpenStreet, visualisable sur écran, afin de vérifier la cohabitation entre les navettes et les trains classiques. Ce réseau servira aux tests du logiciel d'hypervision et aux tests d'intégration au Poste d'Aiguillage.
- ◆ Intégration du réseau complet sur OpenRail, avec couche des mobiles en GPS
- ◆ Réalisation de maquettes au 1/20 pour essais sur réseau privé (1km en boucle, avec aiguillages et gares).
- ◆ Réalisation de plusieurs prototypes de moteurs-roues de différentes technologies (reluctance variable,...) pour tester la réponse aux commandes (différentiel), le freinage, la récupération d'énergie,...) et équipements associés (interfaces mécaniques, amortisseurs, capteurs,...)
- ◆ Réalisation du système d'attelage (couplage inductif, capteurs, GPS, informatique, transmissions sur courant porteur et sans fil...)
- ◆ Réalisation de plusieurs navettes prototypes, avec logement des batteries, des moteurs-roues, de la distribution électrique, du régulateur, des capteurs et des courants faibles.
- ◆ Réalisation du logiciel embarqué et du logiciel de test afférent
- ◆ Réalisation du logiciel d'hypervision et du logiciel de test afférent
- ◆ Recherche de partenariats pour les phases de développement, de pré-série et de déploiement
- ◆ Etudes juridiques, relations avec les syndicats et les associations d'usagers
- ◆ Etudes commerciales et relations avec les médias et les institutions



Source : http://zingo.typepad.com/popote_papote/les-trains/