

INRETS LTN
J.L. MAUPU

Arcueil, 14 juin 96

2, av. du Général Malleret-joinville
94114 Arcueil Cedex
tél. : (1) 47 40 73 39
fax : (1) 45 47 56 06

Expertise des Systèmes intermédiaires

(Dans le cadre de la demande faite par la D.T.T. à l'INRETS)

I. Le contexte

2669

I. 1. Objectif site propre

Les transports collectifs urbains rendent la cité accessible à moindre coût, en consommant moins d'espace, de matière et d'énergie que l'automobile, en créant moins de nuisances, de congestion, de pollution, de bruit et d'accidents, moins d'exclusion, et sans doute plus d'emplois¹.

Mais cette frugalité induit trop souvent une réalité bien peu attractive : "s'enfoncer dans le noir, prendre le bus d'assaut, piétiner dans le métro... et le soir le même enthousiasmant voyage"

Lorsqu'ils s'engluent dans les encombrements, les transports de surface sont trop irréguliers et lents. L'usager, lassé de voir les automobilistes le dépasser, retourne sa veste et participe à l'expansion de la congestion qui pénalise l'ensemble des transports, et le bus principalement : toujours plus lent, encore moins de clients.

Sans sites propres économiques et faciles à insérer, leur redonnant qualité et efficacité, les transports collectifs de surface sont menacés.

De cette menace est née la notion de système intermédiaire, basée sur celle de prix intermédiaire, entre bus et tramway traditionnel. Mais pour parvenir à ce prix faut-il concevoir un véhicule bimode, tantôt bus et tantôt tramway, ou réaliser un tramway sur pneus ?

I. 2. Historique

A la même époque où l'ingénieur Loubat introduisait le tramway en France, il y a 150 ans, M. Larmenjat, ne percevant pas l'avantage du rail porteur, construisait un monorail entre Montfermeil et Le Raincy. Un rail central portait la petite roue fer à gorge qui orientait chaque essieu reposant sur la chaussée. Un siècle plus tard le VAL BUS de Matra le réinvente, puis le GLT (Guided Light Transit) de la Brugeoise et Nivelles, maintenant Bombardier Eurorail, et le TRANSLOHR de Lohr. Cette fois les essieux sont à pneus et les différents monorails se situent dans une ornière pour être traversés.

Les systèmes intermédiaires, ou de transport intermédiaire, sont nés et les deux derniers revendiquent la bimodalité : les véhicules quittent leur guidage et deviennent routiers, pour réaliser des économies au niveau des dépôts et des bouts de ligne, pour éviter un véhicule en panne ou des travaux sur les réseaux souterrains qu'il n'est donc plus nécessaire de déplacer.

Les systèmes présentés ici sont, au départ, une réponse au cahier des charges particulier de l'appel d'offre de Caen, lui même inspiré par celui du mégatrolleybus du SYTRAL alors peu orienté vers le guidage. Ils se réfèrent aussi aux réflexions du GLT, dont dérive d'ailleurs le futur TVR de Caen, et au Mégabus de Rouen.

Depuis l'appel d'offre de Caen, les idées ont évolué. La bimodalité de conduite, guidé/routier, présentée à l'origine comme une souplesse d'exploitation source d'économie,

¹ 10 à 100 fois moins d'espace, 10 à 20 fois moins de matière, 2 à 4 fois moins d'énergie, 20 à 30 fois moins de victimes, 2 fois plus d'emplois.

n'est plus leur principale caractéristique. Entre temps les difficultés techniques et réglementaires des changements de mode se sont précisées avec la nécessité, ou l'intérêt, de guider tous les essieux. Des complications sont apparues plus clairement comme celle de l'autonomie avec une forte puissance, et celle du plancher bas intégral avec l'intercirculation.

En réalité à l'ère du bitume et du pneu, le rail de roulement ayant en partie perdu la raison d'être qu'il avait au temps des pavés inégaux et des ornières boueuses, le simple fait de remplacer le bogie ferroviaire par un essieu routier pourrait justifier des développements nouveaux, l'intérêt et la faisabilité des divers guidages ferrés restant à concrétiser.

II. L'image du produit

La représentation, plus ou moins juste, que les divers acteurs concernés se font des systèmes intermédiaires n'est pas unique et stable. Elle peut encore évoluer : des paradoxes et des malentendus lourds de conséquence risquent de s'accumuler si ces acteurs ne négocient pas rapidement une image consensuelle, un objectif commun, au-delà de leurs intérêts divergeants.

II. 1. Les vues des constructeurs

L'approche d'un constructeur dépend de son métier de base.

Les ensembliers du bus ne comprennent pas l'intérêt du guidage² pour le site propre, qui, du reste, ne les avantage pas, en doublant la productivité d'un bus. Et les systèmes intermédiaires ne leur semblent pas correspondre à un marché de volume suffisant. Ils évitent de s'investir dans un domaine technique qui n'est pas le leur, ou ne souhaitent guider que le premier essieu pour réaliser une sorte d'aide à la conduite.

Ceux du ferroviaire ne voient pas tous les avantages du pneu³ pour le transport de surface de capacité moyenne⁴. Ils nient l'intérêt de tel véhicule ou font l'erreur de se limiter dans leurs objectifs aux performances du tramway. Ils hésitent parfois entre une voie de tramway traditionnelle et le monorail de guidage et à transférer toute la charge sur le pneu.

Pour les plus motivés, la bimodalité reste un objectif de conception justifié par la demande des élus, eux mêmes conditionnés par leurs argumentaires commerciaux lorsqu'ils la disent possible. La boucle est bouclée. D'autres conçoivent seulement d'échapper au guidage pour simplifier les dépôts et ateliers.

Les approches de B.N., LOHR et De Dietrich seront plus particulièrement détaillées à travers l'analyse critique de leur traduction technique des principes architecturaux, de roulement, de guidage débrayable et de motorisation⁵.

II. 2. La vive opposition des usagers associés

Les associations d'usagers sont pour l'instant farouchement opposées aux systèmes intermédiaires. Elles militent toutes pour la priorité aux TC, mais ont pour les promouvoir des solutions opposées correspondant à deux tendances principales.

Les plus soucieuses d'équité et de protection de l'environnement souhaitent la multiplication de l'offre, la desserte fine, sans dépenses excessives, avec beaucoup de kilomètres de voies ordinaires, et des véhicules propres. Elles défendent donc le trolleybus.

Leurs préoccupations rejoignent celles d'élus et de certains exploitants habitués au bus.

Sauf les lignes vraiment chargées ou sauf un véritable manque d'espace en centre dense, le trolleybus articulé⁶ en site partiellement protégé est une solution très satisfaisante dans bien des cas.

La charge à l'essieu, qui fatigue les chaussées, 13 t en charge maximale parfois, l'absence de plancher bas, l'autonomie lourde et chère, la laideur des deux fils de contact et le

² Voir § III.1 Intérêts du guidage

³ Voir § III.2. Avantages du pneu

⁴ Plus que pour les métros lourds où la France a voulu imposer le pneu.

⁵ Il y a là un marché aux idées où chacun peut faire ses emplettes pour construire son véhicule imaginaire.

⁶ S'il suffit d'être propre, il ne faut pas oublier la propulsion au gaz, voire rapport C. Soulas.

prix prohibitif du matériel restent des obstacles problématiques pour lesquels ces associations aimeraient que l'on consacre des moyens de recherche et développement plutôt que pour les systèmes intermédiaires. Les constructeurs devraient les satisfaire indirectement à travers les développements de transmission électrique.

Les autres, plus sensibles à la qualité de l'offre, à son intensité et au confort, quitte à dépenser plus, optent pour le tramway et son effet structurant. Cette conception ne déplaît pas aux exploitants inquiets de leur équilibre financier : seule une ligne rapide, fréquente et régulière peut être "rentable"⁷.

Les usagers interrogés préfèrent d'ailleurs marcher 5 à 10 mn vers une telle ligne, que d'attendre, sans trop savoir combien de temps, sur celle qui traîne en tours et détours pour prendre chacun au pied de son logis.

Les premières associations voient dans les systèmes intermédiaires des monstres compliqués et inutilement chers puisque plus chers que le trolleybus. Le guidage n'a pour elles aucun intérêt. Les secondes y voient des sous tramways, puisque moins chers, qui ne seront jamais autant respectés que les vrais, puisque capables avec leurs pneus d'abandonner leur guidage pour éviter un véhicule mal garé, et qui ne seront jamais aussi confortables, puisque capables avec leurs pneus d'accélérer et de freiner brutalement.

II. 3. Les voies des élus

Les différentes autorités responsables de transport disent voir plus loin que la seule utilité de transport des TCSP et parlent de l'importance de leur dimension urbaine. Les élus n'ont pas tous les mêmes rêves.

Les uns suivent des réflexions très intéressantes sur le réseau intermédiaire⁸, sorte d'axes prioritaires de TC organisés de façon cohérente, mais ils n'attachent aucune importance aux solutions techniques des véhicules.

C'est pourtant nier les contraintes physiques et le fait que les caractéristiques et les performances des véhicules (gabarits, plancher bas, charge à l'essieu, aptitudes en courbe, en côte et au freinage, la modularité...) conditionnent très fortement le coût d'un projet. Elles exigent certaines dimensions et caractéristiques de la voie et influent donc sur le coût de la matérialisation durable du site, elles conditionnent surtout le tracé et l'emprise et donc le coût essentiel de l'insertion du site dans le tissu urbain saturé : peut-il passer en voie double, monter sans tunnel ni détour, virer court ou passer localement en viaduc, quel est le volume des passages en dénivelé pour des carrefours importants, peut-on optimiser la position des stations, le cheminement des piétons et la qualité des correspondances⁹ ? La crédibilité du raisonnement réseau dépend bien du coût kilométrique des lignes et de la qualité de ses noeuds.

D'autres voient dans le guidage le moyen de réaliser un site propre respectable avec de beaux engins "vendables" aux électeurs, et dans la bimodalité des économies de site réservé limité à deux ou trois kilomètres en centre ville. "Faîtes nous des véhicules avec un beau design". Le guidage n'a pas d'autre fonction que de faire accepter le site propre central¹⁰. Les communes voisines risquent de ne pas admettre un mode dégradé sans négociations acharnées capables de faire capoter le projet.

Certains élus souhaitent un tronçon central guidé avec des branches en mode routier, afin de supprimer de façon économique les ruptures de charge, qui constituent un critère réputé très important pour les non captifs dans le choix de leur mode de déplacement. Ce sont souvent des surcoûts importants et des complications d'exploitation pour supprimer un seul

⁷ Confère P.H. Emengard, Efficacité des transports publics et structuration urbaine

⁸ Cohérences internes au réseau et intermodales, cohérences sur le plan de l'urbanisme et cohérences temporelles, c'est-à-dire tenant compte des évolutions du réseau et de la ville. Lire le rapport INRETS n° 193 décembre 1994 Évaluation des projets de transport en commun en site propre.

⁹ Les négociations difficiles avec la SNCF ont été difficiles à Strasbourg et Rouen, en Val de seine.

¹⁰ Certains veulent même un guidage pour "faire moderne".

changement ne gênant qu'un petit pourcentage du nombre déjà limité des usagers d'une seule des branches d'une fourche, d'autant que la fréquence y est divisée par deux.

Ou bien une fourche se justifie par un débit suffisant sur les deux branches, et il faut alors guider chacune d'elle. Ou bien le tronçon central est la convergence¹¹ de plusieurs lignes de bus et il n'est alors pas intéressant de guider, à moins d'imaginer des rendez-vous d'unités routières pour former une rame, ce qui est probablement peu exploitable.

D'autres élus enfin, se rapprochant des associations d'usagers, ne comprennent pas comment ils pourront défendre auprès de leurs concitoyens une image floue, un concept hybride, un véhicule bâtard, un projet bimode sans vraiment l'être, compliqué à présenter.

II. 4. Les volontés des exploitants

Les exploitants sont les premiers à invoquer le site réservé comme seul moyen de survie des TC, mais curieusement ils semblent ne pas percevoir l'intérêt d'une emprise réduite, comme si finalement tout l'espace leur était dû, tant ils redoutent la concurrence de la voiture particulière. Ils conçoivent des sites propres pour bus comme de véritables autoroutes, qui coupent brutalement le tissu urbain et exaspèrent les automobilistes et les camionneurs frustrés ; des murets gênent les cyclistes et les piétons.

Leurs jugements vis-à-vis de certains systèmes intermédiaires sont assez sévères : un matériel à trois caisses qui ne peut reculer en toute circonstance n'est pas exploitable ; un projet coûteux de transport guidé en site propre qui ne prévoit pas de répondre à une augmentation de trafic grâce à une marche en rame¹² (unités multiples) n'est pas crédible. Ces arguments sont à prendre en considération. Ils ne militent pas pour la bimodalité telle qu'elle est présentée, pourtant les exploitants savent les rigidités d'un transport guidé et attendent une souplesse d'exploitation d'un véhicule sur pneus "jamais" prisonnier de ses rails. Le "jamais" est évidemment irréaliste et le "seulement quelque fois" un ersatz de souplesse.

Les exploitants gérants de flottes de bus, repliés jusque là sur leur domaine de compétences, s'impliquent un peu plus aujourd'hui dans les nouveaux projets de tramway. Si les uns ne veulent pas essayer les plâtres avec un nouveau mode, d'autres pourraient y voir l'occasion de dépasser leurs rivaux empêtrés dans la mise au point difficile des tramways ferroviaires modernes à plancher bas intégral.

Ceux qui gèrent déjà des lignes de tramway craignent que la réduction des coûts d'investissement, qui ne les concerne pas, se traduise à terme par une augmentation des coûts d'exploitation, qui les interpelle : une moindre productivité des conducteurs avec des véhicules de capacité plus faible, un poste énergie en hausse avec le roulement pneu, une perte de fiabilité ruinante avec une conception routière¹³... En réalité une meilleure vitesse commerciale, une capacité identique avec quatre caisses, un poids moindre, et une usure plus faible du roulement (voie et roues) avec le pneu laissent supposer l'inverse.

II. 5. Les craintes des bureaux d'étude

Des sociétés d'ingénierie des transports insistent sur le marché de la bimodalité des systèmes intermédiaires, et refusent de voir l'intérêt du pneu pour un tramway pur.

Elles voient parfois dans la bimodalité un moyen d'optimiser planification d'un projet, la réalisation des passages difficiles du site propre étant reportée à plus tard. La bimodalité recherchée n'est que provisoire.

Elles concluent le plus souvent leur études comparatives entre tramway et TVR par l'éloge des qualités du premier, malgré un coût un peu moindre du second. Or ces études se

¹¹ Il y a sans doute des incohérences, à analyser, dans la trop forte convergence d'un réseau.

¹² L'attelage constitue un point noir du cahier des charges, il conditionne la résistance à la compression alourdit les caisses. Il y a là une grosse différence entre le routier et le guidé, mais avec le pneu il semble possible de mieux maîtriser l'accostage.

¹³ En 94 le coût de fonctionnement du tramway était d'environ 30 f/km, 16 F de frais de personnel d'exploitation et de maintenance; 2,5 F d'énergie ; 8 F d'entretien.

basent sur un matériel particulier, certes plus avancé que les autres dans sa définition et sa son développement, mais probablement pas le plus économique, compte tenu de ses caractéristiques et de son cahier des charges initial, ni le mieux placé côté guidage, gabarit dynamique, performances, agressivité du roulement, prix du matériel roulant et du rail de guidage... toutes choses conditionnant le coût d'un projet.

Elles redoutent un recul des projets avec tramway classique pour lequel elles ont acquis toute compétence, ou craignent des retards dans les décisions avec des suppléments d'études comparatives.

Elles peuvent craindre des difficultés techniques pour les nouveaux guidages sur monorail ou le calcul de la chaussée, craindre aussi un surcroît de travail avec de nouveaux métrages, de nouvelles normes à intégrer, de nouvelles procédures d'évaluation et de réception à imaginer, en particulier de nouvelles certifications concernant la sécurité des changements de mode de guidage... toutes choses qu'il faudra bien considérer comme critères de comparaison.

II. 6. Les vœux de l'État

A travers ses représentants, l'État s'intéresse au TCSP¹⁴ de surface "parce qu'ils sont moins coûteux que le métro et qu'ils obligent à faire des choix cohérents de systèmes de déplacements et à en assumer les conséquences dans la gestion de l'espace et de la voirie et relèvent d'une certaine conception de la société et de la vie urbaine¹⁵".

Comme la demande de financements publics risque d'être très forte après le bel exemple du tramway de Strasbourg, un nouveau système est attendu pour les villes moyennes et la banlieue, avec un objectif de 50 MF du kilomètre. Les systèmes intermédiaires font l'objet d'un axe de recherche inscrit au nouveau PREDITT¹⁶.

Pour ne pas gaspiller ses aides au développement, l'État souhaite favoriser la définition de cahiers des charges fonctionnels, cohérents, susceptibles d'engendrer des marchés importants, autrement dit satisfaisant le plus grand nombre.

Dans cette optique le STP et la DTT ont commandé une pré-consultation pour un nouveau système de transport électrique sur pneu, le STEP. Il s'agit de valider le cahier des charges fonctionnel d'un véhicule guidé (non bimode), de petit gabarit pour une insertion facile de son site, de faible charge à l'essieu acceptable par une chaussée ordinaire, et d'architecture sobre pour un développement rapide.

III. Un nouveau mode de transport

S'il est intéressant de mettre au point un nouveau système, pourquoi définir une nouvelle famille de systèmes ? Bus, tramway, métro et trains régionaux ne suffisent-ils pas à couvrir les besoins sémantiques ?

III. 1. Les familles existantes

Un système de transport, ou sa traduction en projet, comprend classiquement le matériel roulant, les infrastructures, ou plutôt le site, et le mode d'exploitation. On y ajoute maintenant l'interface avec l'environnement : la ville et les voyageurs quelquefois oubliés.

Il existe une relation logique de proportionnalité entre trafic d'une ligne et niveau des investissements, dépendante du contexte économique et social et qui conduit à des combinaisons naturelles, cohérentes, que sont les quatre familles citées :

- le bus est un véhicule routier court sur voie banalisée, pour ligne de capacité limitée chez nous, de fréquence plutôt faible, de vitesse commerciale (10 à 20 km/h) et confort mal maîtrisés, souvent médiocres ; un trafic faible permet une exploitation souple, mais ne peut

¹⁴ Transport Collectif en Site Propre.

¹⁵ Intervention de H. du Mesnil à la réunion du comité de développement des TCSP de surface du 26-9-95

¹⁶ La lettre du GART d'avril 96.

justifier des aménagements lourds¹⁷, la ligne se fond trop discrètement dans le paysage urbain¹⁸ (1000 à 3000 p/h et sens ici et 10 000 à Curitiba, 28 000 à Sao Paulo !);

- le tramway est un véhicule de longueur moyenne et modulable donc guidé circulant en site propre traversable, donc de vitesse commerciale (20 à 25 km/h) et confort théoriquement mieux maîtrisés, un trafic moyen, une exploitation déjà rigide et des équipements déjà lourds avec des risques de dérive dans les aménagements, l'interface complexe avec la voirie et le bâti en fait un projet de dimension fortement urbaine (3000 à 10 000 p/h et sens);

- le métro est un véhicule guidé de grande longueur en site propre intégral non traversable et non partagé, il est donc très performant en termes de fréquence de débit et vitesse commerciale (30 à 35 km/h), souvent améliorés par des automatismes, les infrastructures sont très souvent souterraines, les investissements très lourds, l'exploitation rigide, l'interface avec la ville souvent limitée aux entrées des stations (10 000¹⁹ à 30 000 p/h sens, et même 60 000);

- le train régional est un véhicule de longueur variable sur site propre en général long, traversable parfois, surtout économique parce que partagé avec d'autres trains de grandes lignes, voyageur ou fret, avec des risques de perturbation de l'exploitation. La gare devient parfois un véritable centre ville (jusqu'à 100 000 p/h sens).

III. 2. La pertinence de la bimodalité

Il est sans doute préférable pour des raisons autant techniques que commerciales de renoncer aux projets bimodes ou hybride et de respecter les familles existantes. Il est préférable d'éviter de parler de métro léger quand il s'agit de tramway, de tramway hybride quand il s'agit avant tout d'un train régional, certes léger... Une solution bâtarde n'est pas une fin en soi mais seulement une étape qui peut être astucieuse dans un contexte particulier, quand elle ne nécessite pas le développement coûteux d'un matériel trop spécifique alourdi de fonctions provisoires.

Il reste donc à identifier le besoin de "**bimodalité transitoire**" et à imaginer des solutions économiques d'exploitation dégradée acceptable sur une courte durée. Les véhicules peuvent avoir deux motorisations inégales puisqu'ils ne rouleront qu'à vitesse réduite en mode autonome. Ils peuvent ne pas respecter le code de la route, leur exploitation en non guidé sur voie banalisée faisant alors l'objet de dérogations accompagnées de règles particulières et d'une signalisation adaptée, tout comme un convoi exceptionnel.

Les concepteurs peuvent aussi proposer des rails de guidage mobiles, légers, en surface, mais malgré tout traversables, suivis à vitesse lente, avec, là encore, des dérogations et une signalisation à préciser.

Certains efforts de conception veulent faire du véhicule intermédiaire un ensemble modulaire capable, non pas de bimodalité, mais pour tel projet d'être routier pur, par exemple un beau trolleybus articulé à deux caisses, et pour tel autre d'être guidé pur, un tramway sur pneus performant et économique, à trois ou quatre caisses.

Ceci est censé générer des séries suffisantes afin de réduire les coûts de développement. L'exercice n'est cependant pas évident et il serait préférable dans un premier temps de bien concevoir ce qui n'existe pas encore : un tramway sur pneus.

En effet les différents constructeurs de bus et leur fournisseurs développent actuellement, pour le bus à plancher bas intégral, des chaînes de transmission électriques complètes, avec moto réducteurs roues, onduleurs et alternateur, qui devraient favoriser le renouveau du trolleybus, avec bientôt des engins au prix du bus thermique, en standard ou en l'articulé : un trolley, un hacheur et un filtre remplaçant le diesel et l'alternateur. Le marché du

¹⁷ L'exploitant n'ose même pas réclamer la réfection des chaussées que ses bus détruisent.

¹⁸ La ligne est discrète mais pas ses bus considérés trop bruyants ou polluants. Le trolleybus est moins discret avec ses fils de contact, il est silencieux et propre mais seulement localement, durable mais trop cher.

¹⁹ Le VAL est une tentative d'élargissement du créneau du métro au faible débit, son coût initial très élevé rapporté au km passager est justifié par une montée progressive du trafic vers les 20 000 p/h sens.

trolleybus deviendra alors difficile d'accès. Ces mêmes chaînes de traction pourront d'ailleurs équiper les tramways standard, en particulier ceux sur pneus (mêmes performances et sollicitations).

D'autre part, dès que l'on abandonne la bimodalité, le véhicule se simplifie, s'allège s'affine, s'insère à moindre coût, et s'allonger, les "systèmes intermédiaires", ne sont plus alors des systèmes de "transport intermédiaire", à trafic intermédiaire, mais bel et bien des tramways, avec des capacités et une exploitation correspondant à cette famille. Leur créneau, initialement mal défini, devient celui du tramway, mais élargi aux lignes à débit plus faible grâce à une réduction du coût kilométrique. Et le marché du tramway s'élargit aux communes moins argentées dont certaines lignes justifient depuis longtemps cette famille.

III. 3. Le tramway ferroviaire

Contrairement au bus en site propre, le beau tramway, prisonnier de ses rails, inspire respect et fierté. Moins encombrant, plus propre, plus accessible, il est mieux accepté.

Mais il coûte cher par rapport au routier parce qu'il hérite de techniques, d'habitudes et de normes coûteuses, justifiées dans le contexte des grands réseaux de chemin de fer (fiabilité, durée de vie, longue distance, grande vitesse, fortes charges, accostage, ou tamponnement pour la formation de train long...), mais si peu en transport urbain de surface²⁰.

Le côté ferroviaire du tramway induit beaucoup de surcoûts divers :

- les travaux préparatoires, dont les déviations de réseaux aux coûts aléatoires ;
- le dépôt, avec ses nombreux aiguillages ;
- l'atelier avec ses fosses pour les bogies, ses échafaudages pour les équipements en toiture, et son tour en fosse pour profiler souvent les roues ;
- les beaux habillages entre les rails, difficiles d'entretien.

Le bogie ferroviaire n'est pas bien adapté à la ville :

- aux tracés sinueux, il faut graisser en courbe pour ne point crisser ni trop user ; meulages et graisses salissent les pavements ;
- à l'exploitation saccadée de l'urbain, il faut sabler pour mieux adhérer, et s'équiper de patins magnétiques pour les freinages d'urgence ;
- aux pentes prononcées, avec 5 ou 6 % il faut déjà envisager des adaptations particulières du tramway standard français.

Il n'est pas plus adapté à la mode du plancher bas et de la rame articulée. Le plancher bas conduit à des architectures particulières²¹ à roues indépendantes qui n'ont plus rien à voir avec le ferroviaire classique. Les bogies d'extrémité de rame articulée à plancher bas sont peu chargés et s'inscrivent mal en courbe.

La grande raideur du contact roue rail crée des problèmes, coûteux à résoudre, de bruit et vibration, de freinage, de déformation et d'usure des roues et rails. La pose des rails doit être précise pour le confort du guidage. Des phénomènes de pompage et de dilatation différentielle des rails déstabilisent les habillages de la voie dont l'entretien se montre coûteux.

Avec le rail à gorge le guidage ne dépasse pas du plan de roulement et la voie peut être traversée. Comme une très grande partie des inconvénients du ferroviaire sont liés au "roulement" fer sur fer, c'est-à-dire au fait de vouloir porter le véhicule, l'idée vient de conserver le contact ferré en ornière uniquement pour le guidage, à réinventer.

²⁰ Il serait souhaitable de procéder à une analyse fonctionnelle des systèmes et d'oublier le découpage classique (matériel, infrastructures, exploitation, puis environnement) qui correspond à un partage en lots d'un projet, puis à une organisation des services, mais avec les systèmes guidés il engendre des problèmes d'interfaces, d'interopérabilité, de coût de sécurité, de coûts de maintenance, de surcoût d'insertion... En effet en ferroviaire l'interface entre le véhicule et l'infrastructure, et plus particulièrement celle entre le bogie et la voie, et plus encore celle entre la roue et le rail est gigantesque et très rigide, mais elle est utile, fonctionnelle...

²¹ Confère expertise du STUL

IV. Principe de guidage et roulement

Les principales qualités et difficultés de ces nouveaux matériels tournent finalement autour de l'interface véhicule voie, le pneu sur la chaussée et le galet de guidage sur le rail.

Une roue avec ou sans rail, grâce à la gravité et à l'adhérence, sait fournir tous les efforts pour suivre une trajectoire, accélérer et freiner. Faut-il la faire rouler sur rail porteur, ou seulement la guider par rail ?

IV. 1. L'intérêt du guidage par rail

Comme certains ne voient dans le guidage qu'un ensemble de contraintes, un manque de souplesse, il est nécessaire d'insister une fois de plus sur sa richesse fonctionnelle.

En résumé, le guidage par rail permet, quelque soit le type de roulement :

- d'assurer une trajectoire précise, confortable en courbe, prévisible par les autres usagers de la voirie dont les piétons ;
- la faible lacune (environ 50 mm) entre le plancher et le quai à niveau, si indispensable pour l'accessibilité aux personnes handicapées et valoriser le plancher bas ;
- de réduire l'emprise du système (par exemple 6 m en voie double) ;
- de libérer l'opérateur d'une tâche de conduite délicate avec les gros engins ;
- de rendre aisée la marche arrière de véhicules articulés.
- de matérialiser une ligne, de la pérenniser, de la rendre plus lisible, plus fiable, plus structurante ;
- de dissuader de la violation du site réservé ;
- d'opter plus favorablement pour l'électrification, puisqu'elle est plus simple et plus esthétique avec la captation par fil de contact aérien unique et retour du courant par le rail de guidage ;

Et sans l'objectif de bimodalité des véhicules, le guidage permet surtout :

- les véhicules (ou rames) sans limite de longueur, plusieurs fois articulés avec :
 - plus de surface offerte et beaucoup de places assises ;
 - des caisses plus étroites, à surface égale, pour réduire encore l'emprise du système (5 m en voie double) et donc envisager encore plus facilement le site propre avec en corollaire l'atteinte des vrais objectifs : des gains substantiels en régularité et vitesse commerciale et coûts d'exploitation ;
- le plancher encore plus surbaissé (200 à 250 mm pour 350 à 400²² mm en routier) ;
- l'absence économique de passage entre caisses, sans dérogation ;
- la marche en rame pour les heures de forte affluence ;
- la réversibilité (exploitation sans retournement) ;

Et avec le roulement sur pneus :

- les essieux faiblement chargés, en plus grand nombre, peu agressifs vis-à-vis des chaussées, même celles de structure ordinaire, avec pour conséquence les économies :
 - d'un renforcement de la chaussée de la ligne, au moins en interstation et hors carrefour ;
 - d'un accès d'atelier, économies qui ne se font plus sur le guidage lui même mais sur la piste de roulement et éventuellement la ligne de contact avec une source autonome et légère de faible puissance pour une marche à vide et à faible vitesse ;
 - d'un remaniement des réseaux souterrains, puisqu'avec la pose provisoire d'un rail de guidage amovible (appareil de voie mobile) la rame contourne les éventuels travaux sous une voie, ou qu'avec l'étalement possible d'une voie peu chargée l'exploitation peut continuer (plate forme conçue comme un viaduc au sol) ;

²² TVR en mode routier

Difficile de refuser cette richesse pour les extrémités de ligne dès lors qu'un gros effort d'investissement a été consenti sur l'ensemble des véhicules et la partie centrale de la ligne.

La réduction de l'emprise et l'augmentation de capacité des rames par la longueur sont certainement les fonctions les plus importantes du guidage.

Il ne faut pas oublier dans les réservations d'emprise la largeur des quais, d'autant que les stations se situent de préférence près des carrefours où les tourne à gauche prennent déjà beaucoup de place.

Si la réduction d'emprise n'est pas une nécessité, il reste pour justifier le guidage l'accessibilité et surtout la marche en rame (incompatible avec la bimodalité) aux heures de forte affluence ou toute la journée lorsque la ligne montera en puissance²³.

IV. 2. Les avantages du pneu

Le pneu permet d'éviter certains inconvénients du fer et doit induire, sous certaines conditions, des économies substantielles :

- avec sa faible rigidité de dérive, trente fois plus faible que celle de la roue fer sur fer, il tolère des défauts de parallélisme beaucoup plus importants ;

- sur un bon enrobé il a une bien meilleure adhérence que le fer sur fer, mais attention aux conditions dégradées, au verglas par exemple ;

- avec ses différentes flexibilités (verticale, longitudinale et transversale) :
 - il gomme les défauts de la piste de roulement et accepte à sa façon qu'elle soit polluée ;

- il atténue les jerks, ce qui augmente l'adhérence moyenne ;

- en filtrant les variations d'effort, il rend plus efficace les ABS ;

- il ne crée pas autant de nuisances vibratoires et sonores que le fer ;

- globalement la mécanique du véhicule (transmission mécanique, suspension, direction, frein, caisse) peut rester d'origine routière moins lourde, moins coûteuse et plus facile à entretenir que la mécanique ferroviaire.

- il est plus adapté qu'un bogie aux extrémités de rame généralement moins chargées en plancher bas sans porte-à-faux ;

- il s'adapte bien aux différentes architectures de rame articulée ;

- il accepte l'essieu pivotant ou celui à roues pivotantes plus difficiles à motoriser mais de moindre inertie, moindre moment parasite et donc moins d'efforts sur le guidage ;

- s'il est bien piloté en orientation, le pneu peut guider et virer naturellement en courbe serrée, sans trop d'usure ;

- s'il est peu chargé, il peut rouler sur une chaussée de structure ordinaire ;

- S'il est peu gonflé, il roule sans orniérage, même sur des mousses de bitume dont les qualités acoustiques, drainantes et d'absorption de la pollution sont très appréciables en milieu urbain pollué.

Le TLP n'est pas bimode par choix délibéré, mais il ne profite pas suffisamment de ce choix pour réaliser un vrai tramway sur pneu (pas de marche en rame) vraiment économique avec un monorail non porteur et une faible charge à l'essieu.

Le GLT n'est pas non plus totalement bimode à cause de difficultés techniques :

- la double motorisation de forte puissance est lourde, une solution consiste à installer deux diesels, le TVR de Caen n'est pas autonome en exploitation avec voyageurs ;

- en mode routier, pour que les galets de guidage trouvent leur place sous le plancher, le véhicule doit se lever, le plancher, et donc la première marche passe à 400 mm, l'accostage à quai n'existant plus ;

- en mode routier, galets relevés, l'essieu routier à roue simple doit porter 1,6 t de plus alors qu'en mode guidé il est déjà trop chargé (environ 10 bars) ;

²³ Principal reproche fait au O BAHN (trolleybus guidé) en Allemagne.

- les liaisons cinématiques d'orientation des essieux arrière sont débrayables et donc en contradiction avec le code de la route, qui condamne la remorque avec décrochage pour le transport des voyageurs, une dérogation sera nécessaire pour une exploitation en mode routier avec voyageurs.

Le TLP et le GLT peuvent quitter le rail en l'absence de voyageurs, le TLP uniquement en dépôt, le GLT théoriquement sur voirie banalisée jusqu'au dépôt. .

V. Les trois solutions de roulement

Les trois conceptions, GLT, TLP, TRANSLOHR, peinent devant l'objectif du plancher bas intégral, 350 mm, au niveau des articulations entre caisse et des essieux. Le guidage avec débrayage n'arrange pas les choses.

V. 1. GLT et TLP

Le GLT et le TLP se présentent comme des mégabus à trois caisses, de gabarit routier, d'emprise donc large, à quatre essieux trop chargés et trop gonflés : les avantages du pneu et l'intérêt du guidage ne nous semblent pas suffisamment mis en valeur en vue d'un projet économique.

Tous les essieux du GLT et du TLP possèdent des roues pivotantes (directrices).

Les essieux extrêmes, bien qu'étant les moins chargés, sont les seuls motorisés. Ceci limite les performances sur piste humide, la récupération d'énergie au freinage et supprime surtout la possibilité d'allonger un jour le véhicule en version guidé pur.

Les essieux médians du GLT, porteurs et très chargés, sont fixés à l'arrière de leur caisse, devant l'articulation entre caisses. Une longueur importante du véhicule est donc peu habitable ou confortable.

Ceux du TLP sont dans une petite structure d'intercirculation maintenue bissectrice entre les deux grandes caisses adjacentes sur lesquelles elle s'articule assez loin devant et derrière l'essieu. Cette solution est plus compliquée que celle du GLT mais elle présente plusieurs avantages :

- elle réduit la place perdue par les logements de roues ;
- divise par deux les angles de rotation des articulations ;
- réduit le gabarit en courbe ;
- limite beaucoup les débattements angulaires des roues par rapport à sa petite caisse ;
- elle donne une architecture de véhicule symétrique et donc réversible.

Les essieux à roues pivotantes ne peuvent accepter des pneus en monte jumelée. Il en résulte une pression trop élevée qui sollicite la chaussée avec des risques d'orniérage rapide sur des enrobés trop souples. Les pneus sont issus du métro.

Le GLT pourrait choisir une piste béton, par exemple en béton armé et coulé en continu, dite méthode BAC, mais on ignore encore la faisabilité de sa mise en oeuvre en milieu urbain et celle des réparations après travaux sur les réseaux non déplacés ou autres.

Chacun des deux galets de guidage d'un essieu supporte 800 kg et soulage ainsi l'essieu sauf en mode routier.

Le TLP décharge ses essieux sur le guidage, ceux moteurs seulement de 10 %, pour éviter de patiner, et ceux médians de 35 % pour réduire la charge sur les pneus. Le guidage est constitué d'un vrai bogie à quatre petites roues indépendantes, posé sur une voie de tramway classique, ou presque. Le poids adhérent étant ainsi réduit, les performances dynamiques et l'aptitude en côte deviennent trop dépendantes de l'adhérence.

A cause de l'intercirculation à plancher bas, l'essieu médian du TLP possède des roues à suspension indépendante, dont le manque de rigidité, lié à des difficultés d'ancrage sur la structure de caisse, peut poser des problèmes de micro braquage et de micro roulis des roues.

V. 2. Le TRANSLOHR

Le TRANSLOHR dans sa version de base est lui aussi proche du Mégabus, mais, avec son origine routière, il montre une démarche plus intéressante.

Ses roues sont moins chargées et il se démarque de ses concurrents en proposant une variante à deux caisses pour réaliser un trolleybus, et une autre à quatre caisses pour répondre à une augmentation de capacité des lignes.

La variante deux caisses, certes coûteuse, possède un design attrayant et la recherche d'une monotrace donne une inscription en courbe plus facile qu'un articulé classique.

Les essieux extrêmes sont à roues pivotantes et non motrices.

Les essieux médians, plus chargés, sont motorisés et pivotants. Les petites caisses d'intercirculation pivotent avec eux, avec suspension et motorisation indépendantes par coté. Ceci permet de gagner sur trois tableaux. Ils ont chacun quatre roues :

- les performances dynamiques et l'aptitude en pente meilleures avec un poids adhérent plus important que ces concurrents ;
- la modularité, trois caisses à deux essieux moteurs ou quatre avec trois essieux moteurs ;
- et surtout la pression au sol, compatible avec la chaussée bitume, mais il faudrait encore réduire la charge par roue.

La réalisation se heurte cependant à des difficultés. En effet, l'inertie de l'ensemble pivotant, plus importante que celle du GLT, sollicite plus le guidage surtout en mode dégradé. Des risques d'instabilités simulées, et déjà observées sur le GLT, ont conduit à des modifications récentes.

D'autre part une paire de roues bloquées²⁴ exerce sur l'essieu pivotant un moment de lacet important que le dispositif de guidage doit reprendre sans dérailler. Les efforts induits ne sont cependant pas supérieurs à ceux que provoqueraient une marche arrière intempestive conduisant à un contre braquage des roues, or ce phénomène existe sur les trois systèmes.

L'ensemble de la chaîne de traction d'un TRANSLOHR à trois caisses comprend quatre moteurs et un onduleur par moteur ou coté compte tenu de la différence de vitesse droite gauche en courbe. Elle coûte plus cher que celle du GLT ou du TLP, réalisée avec à chaque extrémité un moteur, un arbre de transmission et un pont équipé d'un différentiel.

Le TRANSLOHR poursuit encore l'objectif de la bimodalité, guidé/routier, aux dépens malheureusement des véritables avantages du pneu guidé sur monorail.

Les contradictions avec le code de la route tombent avec la réalisation d'une sorte d'aide à la conduite, en ne guidant que le premier essieu dont l'orientation des roues reste en permanence liée à la colonne de direction.

Une solution économique, fiable et facile à guider consisterait en des essieux extrêmes et médians identiques, moins larges, moins chargés, pivotants, à jantes larges ou roues jumelées, moins gonflées, avec un pont et son différentiel, un seul moteur, éventuellement un frein en amont du différentiel... mais l'intercirculation nous l'interdit.

²⁴ Phénomène plutôt rare en routier, mais à ne pas négliger avec un moteur par coté.

VI. Les trois solutions de guidage

Le pneu possède donc beaucoup de qualité mais il faut le piloter soit manuellement soit par un asservissement complexe de type filoguidage ou avec caméra et analyse d'image, ou bien encore avec un rail de guidage. Ce guidage mécanique est choisi pour des raisons de sécurité.

VI. 1. Le contact galet rail

Les galets de guidage des systèmes intermédiaires, d'inspiration ferroviaire, sont théoriquement limité en charge puisqu'ils n'ont plus que la fonction d'orientation des pneus porteurs. Il ne faut pas oublier cependant leur fonction de guidage de secours en cas de dérapage des pneus.

Le GLT joue la simplicité avec un galet central vertical, de petit diamètre, devant et derrière l'essieu, chaque galet se trouve assez fortement chargé à cause du retour de courant et du guidage de secours. Cet excès de chargement réduit la durée de vie des galets et le poids adhérent des roues porteuses.

Il reste encore à démontrer la stabilité du guidage ainsi que la sécurité au déraillement sur les défauts de rail les plus courants (défaut d'alignement, marche arrière intempestive, ornière bouchée, verglas...). La stabilité est menacé par le jeu de guidage entre les mentonnets du galet et ceux du rail. Ce jeu est nécessaire pour passer les imperfections du rail et apparaîtra de toute façon avec l'usure. Il est probable que stabilité puisse s'obtenir avec des frottements secs ou visqueux au niveau des articulations entre guidage et essieu, mais ces amortissements pourraient induire une surcharge latérale des galets, qui accentuera leur usure ou aggraver les problèmes de déraillement.

Le TLP a choisi le bogie à roues indépendantes fortement chargées avec profil de roue de tramway. L'ensemble est lourd et l'intérêt du monorail perdu.

Les pistes de roulement bordant de trop près les rails, leur tenue n'est pas certaine, la monte jumelée est impossible, le gabarit réduit compromis. Les aiguillages restent compliqués.

L'argument d'une récupération d'emprise ferroviaire ne tient pas : les roues porteuses demande une piste de roulement sérieuse. Cogifer propose de poser sur les traverses de l'ancienne voie des pistes métalliques qu'il semble difficile d'accepter en milieu urbain. Les traverses tiendront-elles ?

Le TRANSLHOR, en inclinant deux galets en V d'un angle proche des 45° , réduit la charge nécessaire ainsi que l'usure, et renforce la sécurité au déraillement lors des dérapages ou sur défaut de rail. Les efforts horizontaux de guidage n'induisent pas des puissances de glissement au contact galet rail aussi importantes que celles des galets verticaux des concurrents.

La charge limitée du guidage permettra théoriquement d'éviter les défauts du ferroviaire classique cités précédemment.

Les simulations montrent toutefois qu'il est préférable de charger suffisamment la paire de galets pour qu'il existe un effort de guidage sans jeu, mais qui sature. Au-delà d'un certain effort la paire de galet glisse, un des galets décolle, et quand le jeu sous effort de rappel constant est consommé, le mentonnet du galet resté en contact vient en butée sur le rail, comme le boudin d'une roue ferroviaire classique, et l'effort de guidage peut augmenter à nouveau pour guider dans les cas exceptionnels du dérapage ou d'une roue bloquée.

Le jeu avec effort de rappel est utile pour passer sans contraintes mécaniques excessives les défauts de rail maximaux tolérés (joint de rail, aiguillage, écarts d'épaisseur...). Il finirait de toute façon par apparaître et grandira avec l'usure des galets et du rail.

Le guidage en V du TRANSLOHR constitue un point original et très prometteur qui à lui seul mérite le financement d'actions de recherche.

VI. 2. Sécurité au dérapage et déraillement

Il est nécessaire d'éviter que les pneus dérapent et de les retenir lorsqu'ils partent. C'est là toute la science et les limites de la conduite manuelle. On admet de bien maîtriser deux essieux (ou bogie) voire trois, avec quatre à la vitesse maximale de 70 km/h la chance est déjà de la partie, dès qu'il faut freiner en courbe et par temps de pluie.

C'est la raison essentielle pour laquelle le guidage mécanique est préféré aux asservissements de position par rapport à une trace captée, appelés faussement guidages immatériels puisque les roues porteuses sont bien matérielles, et les pertes d'adhérence bien réelles.

Le rail est lui aussi la matérialisation d'un tracé de consigne que palpent les galets de guidage, le timon est un comparateur entre position réelle de l'essieu et les galets palpeurs sur le rail, le roulement des roues porteuses constitue un véritable amplificateur mécanique avec pour gains la longueur du timon et la rigidité de dérive des pneus. Le galet ou la paire de galets avant n'a pour effort que ceux d'orientation des roues porteuses puisque ce sont elles qui fournissent l'effort de guidage du véhicule.

Cet ampli sature en force, l'essieu dérape, il faut donc une butée prenant appui sur le rail.

Il y a autant de manière de concevoir cette butée contre le dérapage que de véhicules conçus.

Chaque essieu du **TVR**, ou du GLT dernière génération, possède un bras arrière, articulé sur le bras avant, avec un galet qui en situation normale ne reprend aucun effort. Ce galet est le symétrique du galet avant. Le débattement angulaire de ce bras dépend de l'écart de position de l'essieu par rapport à celle correspondant à un lacet relatif nul des roues. L'articulation entre bras possède des butées ; lorsqu'elles sont atteintes le galet arrière est sollicité et retient l'essieu avec l'aide du galet avant.

La ligne longitudinale de contact du mentonnet sur l'arrête du rail oriente le galet annule l'angle d'attaque et donc l'effort de dérive susceptible de favoriser le déraillement. La charge importante sur le galet reporté sur un mentonnet étroit et de petit diamètre est sensée donner des pressions capables casser ou laminier les objets tombés dans l'ornière, par ailleurs assez mal dessinée vis à vis du coincement de cet objet.

Le **TRANSLOHR** a connu plusieurs étapes : au départ le véhicule n'est pas guidé (appel d'offre de Lyon), ensuite seul l'essieu avant et guidé avec un bras avant comme le bras avant du GLT, les autres essieux dérapent.

Puis tous les essieux deviennent guidés avec un bras ou un timon avec galet, à l'avant seulement, dont la rotation est surveillée par un capteur et sera bloquée par un vérin en cas de détection du dérapage.

Cette solution simple ne présentant pas de garanties ni une précision suffisantes, elle est remplacée par un principe équivalent au TVR : une paire de galets débat transversalement entre deux butées sur un bras ou timon arrière. Une marche arrière devient possible en supprimant ce débattement, et une véritable réversibilité en introduisant une possibilité de débattre sur l'autre bras ou timon.

Le guidage en V nécessite un effort vertical d'arrachement qui protège du déraillement. Mais il faudra bien dessiner les ornières pour éviter un coincement d'objet dur sur lequel bloquerait la paire de galet ou son chasse pierre.

Le principe de retenue en dérapage du **TLP** est plus simple et plus sain. Le déplacement relatif entre l'essieu et le bogie de guidage (à quatre roues) induit un braquage des roues porteuses grâce à une bielle de direction. Ce déplacement est limité par des butées. Le jeu est réglé pour avoir un braquage maximal optimal. Cette solution est très satisfaisante du point de vue de la tenue au choc et du lacet des roues de guidage arrière.

Le châssis de bogie est solidaire en vertical de l'essieu, une suspension indépendante et très souple charge uniformément chacune des quatre roues ce qui limite les risques de déraillement observé classiquement sur un bogie lorsqu'en courbe la roue d'attaque se décharge sur un défaut de voie et se fait pousser à l'extérieur par l'autre roue.

Mais attention, le bogie d'un essieu extrême, proportionnellement trois fois moins chargé que celui d'un essieu médian, peut être poussé dehors par ses pneus, par exemple quand les roues contre braquent en marche arrière imprévue.

Les deux principaux intérêts du bogie à quatre roues sur deux rails écartés de plus d'un mètre sont les suivants :

- les roues verticales peuvent être suffisamment grandes sans empêcher la réalisation du couloir central à plancher bas, ni gêner le relevage pour quitter le guidage ;
- si une roue monte sur le champignon de son rail ou sur un objet dur coincé dans l'ornière, le bogie a moins de chance de dérailler que le galet du GLT, car la roue de l'autre coté continue de guider, en effet son mentonnet est conçu pour frotter sur le bord de l'ornière formant contre rail.

Mais les bogies médians du TLP sont assez chargés, ils risquent de s'user rapidement, et d'être aussi bruyants qu'un bogie portant totalement le véhicule.

La solution TLP se nourrit de paradoxes :

- après avoir accompli l'effort d'une pose complexe de voie de tramway pourquoi ne pas en profiter pour porter totalement le véhicule.
- comment démontrer que la voie de tramway ferroviaire repensée est plus chère que celle du TLP qui ajoute à cette voie allégée deux pistes de roulement très sollicitées.

Quelque soit le produit, les changements de sens de marche compliquent beaucoup la liaison entre le dispositif de guidage et l'essieu puisque les roues (ou l'essieu) doivent toujours tourner autour de points situés devant eux. Il faut verrouiller et déverrouiller des liaisons dont dépend la sécurité.

Toutefois on peut imaginer une marche arrière occasionnelle simplifiée, c'est à dire qui ne profite pas du pouvoir directeur des pneus. Par exemple, pour le TLP, si le bogie ne débat plus par rapport à l'essieu, les pneus restent "radiaux", le bogie prend alors la totalité de l'effort de guidage. Il n'y a plus de déverrouillage dangereux.

Il reste à évoquer une incertitude liée à l'idée de dépôt sans guidage qui nécessite la mise au point d'un relevage automatisé des roues de guidage. Une commande accidentelle de ce relevage n'est-elle pas à craindre en exploitation avec voyageurs ?

La légèreté du monorail et de son aiguillage à grand nombre de voies permet de guider économiquement en dépôt.

Que donnerait une synthèse de ces différentes solutions ? Un bogie sur monorail avec galets en V moyennement chargés, avec marche arrière simplifiée ?

VII. Divers

VII. 1. Caisses

Les deux nouveaux projets ne sont pas encore assez définis pour porter un jugement pertinent.

Les principales difficultés de réalisation découlent du plancher bas intégral.

Il conduit à loger les équipements en toiture, et donc à prévoir des échafaudages en atelier et à dessiner des véhicules d'une hauteur importante, ne facilitant pas le design²⁵.

Il impose également à la toiture un rôle porteur peu fréquent en routier.

Il ne laisse pas beaucoup de place au niveau des essieux et des articulations entre caisses pour réaliser les liaisons mécaniques les plus contraintes, parce qu'elles transmettent les charges : les suspensions, les pivots ou rotules entre caisses, les pivots entre essieu et caisse.

Il laisse trop peu d'espace aux liaisons complexes entre essieu et guidage : les vérins ou ressorts de chargement des galets de guidage, leur anti-roulis, la timonerie d'orientation des roues avec une mécanique d'inversion du sens de marche, le dispositif de relevage des galets, les verrouillages divers et leur test...

L'intercirculation du GLT représente une perte d'habitabilité importante avec l'un derrière l'autre les logements des grosses roues de l'essieu et l'articulation, pourtant très bien réalisée. Celle du TLP se rapproche d'un passage de tramway moderne comme celui de Strasbourg et une variante récente du TRANSLOHR s'apparente à l'articulation du BREDA de Lille sans les colonnes techniques limitant la vue.

Les caisses du GLT ont une structure alu de conception modulaire issue du tramway. Le TLP, après des recherches sur les caisses en composite avec le constructeur de bus Néoplan, revient à des solutions ferroviaires (alu). La caisse du TRANSLOHR se distingue par une conception proche des bus standard avec une structure inox, comme celle des autocars de Lohr. Elle n'est pas encore totalement définie.

Les modules d'habillage font éventuellement appel aux composites. Les portes sont louvoyantes et d'origine tramway standard (1,30 m).

VII. 2. Coûts du matériel

Les prix d'achat des matériels roulants actuellement développés sont très proches pour trois caisses :

TVR :	9,5 MF ;
TRANSLOHR :	9 MF ;
TLP :	9,5 MF.

Celui du CITADIS en version plancher mixte, issue du TFS de Grenoble (30 m) devrait être de cet ordre.

Le matériel roulant revient à environ 15 à 30 MF par km de ligne, suivant la vitesse commerciale et la capacité prévue. Il représente à peine le tiers d'un projet complet de tramway classique (100 à 200 MF/km). La voie courante proprement dite représente 10 MF/km. Les principaux gains se feront donc, avec ce type de matériel, sur les coûts d'insertion (acquisitions foncières, voirie induite, déviation de réseau, ouvrages d'art, courbes, aiguillages, stations, revêtements du site, etc....) et ceux du dépôt atelier.

Certains exploitants craignaient que le coût de possession des systèmes intermédiaires sur moins de trente ans soit équivalent à celui du tramway standard, malgré un investissement initial plus faible de 30 %. Leurs évaluations récentes, se référant plus aux habitudes routières, présentent maintenant des coûts d'exploitation inférieurs à ceux du tramway.

²⁵ Souvent le designer pour compenser abuse sur la hauteur des baies vitrées et du pare-brise transformant le véhicule en serre.

VIII. Résumé

Un des objectifs principaux des systèmes de transport collectif de surface est d'augmenter leur efficacité et pour y parvenir d'acquérir leur site propre.

Les systèmes intermédiaires, entre bus et tramway, veulent offrir le site propre à prix réduit.

Il n'existe pas encore d'image consensuelle de ces systèmes, mais un objectif précis : ne pas dépasser 50 MF du kilomètre.

Le GLT, futur TVR de Caen, a eu le grand mérite de dévoiler l'intérêt de ces systèmes sur pneus et de faire naître un ensemble de réflexions sur les coûts d'insertion, mais il ne faut pas le considérer comme la seule traduction possible.

Il est préférable d'abandonner la bimodalité de conduite pour des raisons techniques, réglementaires, commerciales et de sécurité, pour que le véhicule se simplifie, s'allège, s'affine, s'allonge, s'insère à moindre coût, et devienne un tramway sur pneus plus performant et moins cher que son homologue ferroviaire.

Cependant, pour une programmation réaliste des travaux ou une intervention exceptionnelle sur le site, il ne faut pas ignorer la possibilité de dérogations autorisant une exploitation transitoire, dégradée et bimode, accompagnées de règles de sécurité et d'une signalisation adaptées.

Il est plus facile (moins coûteux) d'insérer et de protéger le site d'un système s'il montre une faible largeur d'emprise, monte et vire aisément, il est plus facile de l'enterrer ponctuellement, s'il est de faible hauteur, de le percher en aérien²⁶, s'il est silencieux, de partager ou traverser sa voie, s'il freine bien, de soigner son accès, s'il possède un plancher très bas, de réaliser sa piste de roulement, s'il possède des essieux faiblement chargés, d'augmenter sa capacité, de l'aiguiller et de le garer, s'il suit un monorail, de le dire propre s'il est électrique... d'imaginer toutes ces conditions s'il est sur pneus et toujours guidé.

Les systèmes GLT de Bombardier Eurorail, TLP de De Dietrich et TRANSLOHR de Lohr, ne répondent pas à toutes ces conditions.

Mais, sans proposer le gabarit réduit, ni totalement abandonner la bimodalité, le TRANSLOHR se montre le plus prometteur et le plus proche de l'objectif des 50 MF du kilomètre.

Il présente un meilleur poids adhérent des essieux moteurs que ses concurrents. Il propose une modularité en longueur avec trois caisses en version standard bimode, deux caisses en version trolleybus articulé et quatre caisses en variante tramway sur pneu ; il est ainsi capable de répondre à une augmentation de trafic d'une ligne.

Il possède une charge à la roue plus faible, des pneus moins gonflés, un guidage moins chargé. Il accepte une voie avec chaussée bitume, simple à mettre en oeuvre et à entretenir. Le véhicule est moins coûteux (8,5 MF sans le guidage) malgré une motorisation plus complexe (la partie électrique est actuellement évaluée à 2,4 MF).

Le TLP a choisi d'être un tramway sur pneu et présente des réflexions intéressantes sur l'architecture articulée et les parades au dérapage et au déraillement. Mais il ne profite pas pleinement des possibilités du pneu : il s'alourdit de bogies de guidage roulant sur voie allégée de tramway classique. Ce guidage limite ses performances. La faisabilité des pistes de roulement au ras des rails n'est pas encore démontrée.

²⁶ Et donc d'éviter les points noirs qui pourraient justifier la bimodalité provisoire évoquée précédemment.