

Avis technique sur le choix du système TCSP de l'agglomération toulonnaise



Ressources, territoires et habitats
Énergie et climat
Prévention des risques
Développement durable
Infrastructures, transports et mer

Présent
pour
l'avenir



Copie du Collectif
Tramway Toulon

Avis technique sur le choix du système TCSP de l'agglomération toulonnaise

Date : Août 2009

Auteur : CERTU – CETE Méditerranée

Responsable de l'étude :

Sébastien RABUEL, spécialiste transports, chargé de projets « organisation et évaluation des TCSP » au CERTU

Participant :

Stéphane PATOULLARD, chargé d'études « accessibilité et sécurité des transports collectifs » au CETE Méditerranée

Relecture :

Thomas VIDAL, chef du groupe « Politiques et services de transports » au CERTU

Jacques LEGAIGNOUX, responsable de la division « Transports, voiries et déplacements urbains » du CETE Méditerranée

François RAMBAUD, chargé de projets au département « Voirie et espace public » du CERTU

Validation :

Patricia VARNAISON-REVOLLE, chef du département « Déplacements Durables » au CERTU

Résumé de l'étude :

La communauté d'agglomération de Toulon Provence Méditerranée a confié une mission d'expertise au Certu et au Cete Méditerranée sur le choix du système TCSP. Ce rapport vise à apporter des éléments de réflexion autour de deux questions posées par les services techniques de l'agglomération : Quel est le système TCSP le plus pertinent pour l'agglomération toulonnaise ? Que répondre à la commande politique (phasage du projet avec mise en service du tramway vers 2020) ? Ce rapport qui permet d'éclairer les techniciens sur des notions techniques ne se substitue pas à la réalisation d'une véritable étude sur le sujet.

Après analyse des différents éléments en leur possession, le Certu et le Cete Méditerranée confirment la pertinence du choix initial du tramway, qu'il soit sur fer, ou sur pneus (Translohr) avec une mise en service la plus rapide possible. Cette conclusion se base notamment sur le besoin d'un système capacitif pour répondre à la demande estimée sur la 1ère ligne de TCSP et sur une analyse économique sommaire sur 30 ans.

Dans une deuxième partie, le Certu et le Cete répondent toutefois à une demande politique de phasage du projet : mise en œuvre d'un BHNS de 2014 jusqu'à la mise en service du tramway vers 2020. Cette demande ne semble pas se justifier, ni techniquement, ni

économiquement. Si elle devait être retenue, les spécialistes proposent toutefois l'utilisation d'un système BHNS éprouvé et économique pour la phase transitoire avec les caractéristiques particulières suivantes : matériel neuf classique avec livrée spécifique dont plusieurs bus bi-articulés pour gérer la demande en heures de pointe, exploitation dégradée en « voie unique » sur la plate-forme du tramway sur les quelques carrefours problématiques et recours éventuels à une aide à l'accostage (galets, guidage optique, bordures biaisées, etc.) pour gérer l'accessibilité depuis les quais dimensionnés pour le tramway.

En conclusion, les spécialistes attirent l'attention du maître d'ouvrage sur les possibles difficultés de mise en œuvre des systèmes liées à l'incompatibilité de certains choix (interface entre les sous-systèmes liés à la DUP tramway) et à la multiplication des innovations non éprouvées et recommandent une mise en place dès 2014 d'une ligne de tramway. Cette recommandation mérite cependant d'être confirmée par des études plus précises sur l'insertion urbaine et les coûts économiques.

Zone géographique : Agglomération Toulonnaise

Nombre de pages : 40

Confidentiel

1. Contexte et objectifs de l'avis

Dans son courrier du 14 avril 2009 la communauté d'agglomération Toulon Provence Méditerranée a sollicité l'avis du Certu sur le choix du système TCSP, afin de l'aider dans le processus de décision. Cette sollicitation s'est traduite par une visite de terrain le 24 avril 2009 et la commande d'une expertise le 16 juillet 2009, objet du présent rapport.

Le potentiel de développement des transports collectifs dans l'agglomération toulonnaise, seule agglomération française de plus de 300 000 habitants sans TCSP avec Aix-en-Provence, a conduit les élus à décider la mise en place d'un tramway à la fin des années 90. La totalité du projet (30,3 km) a été déclarée d'utilité publique en 2000. Une DUP modificative a validé certaines modifications en 2005 (tracé, phasage de l'opération, organisation de la maîtrise d'ouvrage).

Afin de faire face aux difficultés financières, l'agglomération de Toulon Provence Méditerranée réfléchit désormais à un nouveau phasage :

- mise en place d'un BHNS en 2014 sur les 9 km de la tranche 1 du 1^{er} tronçon (Université de Toulon – Université de La Garde)
- mise en service à l'horizon 2020 d'un système plus capacitif sur l'ensemble des 18 km du 1^{er} tronçon (Gare de La Seyne/Mer – Gare de La Garde)

La présente note vise à éclairer les techniciens et décideurs sur les différents systèmes TCSP de surface au regard des enjeux et du contexte toulonnais. Elle prend en compte le niveau de réflexion actuel sur le projet de réseau de TCSP et s'appuie sur les éléments de connaissances contenus dans différents documents communiqués par Toulon Provence Méditerranée :

- dossier d'enquête préalable à la déclaration d'utilité publique – compléments et modifications apportés au projet déclaré d'utilité publique en 2000 (décembre 2003)
- plan de déplacements urbains 2005 – 2015 approuvé par le conseil communautaire du 4 juillet 2006
- dossier « appel à projets transports urbains » (janvier 2009)
- présentation du projet de TCSP (commission transports – 22 janvier 2009)
- bilan de la rencontre APTS/TPM des 16 et 17 mars 2009 – application au projet toulonnais
- synthèse des études d'un système BHNS (Setec, avril 2009)
- cahier des charges « Accessibilité Bus », TPM, version D, 20/10/2005
- Premier tronçon du tramway de l'agglomération Toulonnaise, Revêtements et aménagements Paysagers, Vue en plan 1/500ème, Indice B, 13/10/06
- Premier tronçon du tramway de l'agglomération Toulonnaise, Aménagements urbains, Coupes 1/200ème, Indice B, 28/07/06

La note se base aussi sur la capitalisation des connaissances et les réflexions du Certu et du Cete sur les différents systèmes de TCSP en service ou en développement :

- groupes de travail national et européens sur les BHNS (www.bhns.fr, www.bhls.eu)
- groupe de travail sur l'organisation et l'évaluation des TCSP

- équipe ressource « Insertion urbaine des transports collectifs de surface » du ministère
- réflexions sur la pertinence et le choix des systèmes TCSP de surface
- nombreuses expertises (Amiens, Besançon, Nancy,...)
- jury de l'appel à projets « transports urbains » issu du Grenelle de l'environnement

L'analyse se décompose en 3 parties. Après une présentation des différents systèmes TCSP et des précisions de vocabulaire, le Certu et le Cete chercheront à répondre aux questions suivantes :

- Quel est le système TCSP le plus pertinent pour l'agglomération toulonnaise ?
- Que répondre à la commande politique (phasage du projet avec mise en service du tramway vers 2020) ?

2. Définition et classification des TCSP urbains

2.1 Les TCSP : une famille de systèmes...

On entend par « **transport collectif en site propre** » (TCSP), un système de transport public utilisant majoritairement des emprises affectées à son exploitation. L'approche « système » d'un TCSP repose sur 3 composantes et sur leur articulation :

- l'infrastructure (plate-forme, stations, etc.)
- le matériel roulant
- les conditions d'exploitation (modalités de circulation, systèmes d'aide à l'exploitation, information voyageurs, etc.)

2.2 ... qui repose sur des considérations réglementaires

La classification TCSP urbains proposée par le Certu a été validée dans des groupes de travail impliquant la DGITM, le Gart, l'UTP, l'Inrets et le STRMTG. Elle repose sur la distinction des systèmes selon deux réglementations distinctes :

- le décret n° 2003-425 relatif à la sécurité des transports publics guidés **pour les modes guidés dont le tramway et le métro**
- les articles R. 311-1, R. 312-10 et R. 312-11 du code de la route et l'arrêté du 2 juillet 1982 relatif aux transports en commun de personnes, modifié par l'arrêté du 18 mai 2009, **pour les bus**

Certains systèmes guidés doivent répondre aux deux réglementations dans la mesure où le guidage est immatériel (*TEOR* à Rouen, *Phileas* à Douai) ou matériel mais non permanent (*TVR* de Nancy et Caen). Les matériels roulants, considérés comme des véhicules routiers, sont donc limités en longueur à 24,50m.

En revanche, le *Translohr* de Clermont-Ferrand est guidé de manière permanente par un rail central. Il n'est donc soumis qu'à la réglementation sur les transports publics guidés (TPG), comme le métro et le tramway fer. Sa longueur n'est donc pas limitée.



Illustration 1: TEOR à Rennes (source : Communauté d'agglomération rennaine)



*Illustration 3: Le Translohr de Clermont-Ferrand
(source : Certu)*



Illustration 2: Le TVR de Nancy (source : Certu)

Classification TCSP	Tramway		BHNS guidés				BHNS non guidé
Système	Tramway fer	Translohr	TVR de Bombardier à Caen	TVR de Bombardier à Nancy	Phileas d'APTS à Douai*	Bus à guidage optique	Bus classique
Type de guidage	2 rails porteurs	rail central	rail central	rail central	informatique avec recalage par plots magnétiques	optique	
Classe de guidage	matériel	matériel	matériel	matériel	immatériel	immatériel	
Utilisation du guidage	permanent	permanent	tout le parcours commercial (hors dépôt)	une partie du parcours commercial	permanent (sauf mode dégradé)	permanent (sauf mode dégradé) ou ponctuel	aucun
Soumis à la réglementation TPG	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non
Soumis au code de la route	non	non	oui	oui	oui	oui	oui

* en projet

Illustration 1: classification des transports collectifs en site propre (Certu : BHNS du choix du système à sa mise en œuvre)

2.3 trois classes de TCSP urbains, trois domaines de pertinence

Ces considérations réglementaires et techniques permettent de définir trois classes de TCSP urbain : le métro, le tramway et le BHNS.

Métro

Le métro est un TCSP guidé de manière permanente et caractérisé par un site propre intégral (pas de carrefour, plate-forme inaccessible aux piétons). Il est généralement en souterrain ou en viaduc. Il est exploité à voie libre à l'aide d'un système de cantonnement. Il peut être automatique. On fera la différence entre le métro lourd et le métro léger de type Véhicule Automatique Léger (VAL).

Tramway

Le tramway est un TCSP guidé de manière permanente et caractérisé par un véhicule ferroviaire (roulement fer sur fer) qui circule majoritairement sur la voirie urbaine et est exploité en conduite à vue. On intègre dans cette catégorie le « tramway sur pneus » de Lohr, système guidé sur pneus qui présente la particularité d'avoir un guidage matériel permanent par rail et donc de se soustraire au code de la route, notamment en ce qui concerne la longueur des rames.

Bus à haut niveau de service (BHNS)

Le BHNS est un TCSP caractérisé par un véhicule routier limité à 24,50m en longueur par le code de la route. Par une approche globale (matériel roulant, infrastructure, exploitation), le BHNS assure un niveau de service supérieur aux lignes de bus conventionnelles (fréquence, vitesse, régularité, confort, accessibilité) et continu. Il s'approche du niveau de service des tramways français. Le bus est ici considéré dans sa conception la plus large : il peut être guidé (guidage matériel ou immatériel) ou non guidé, à motorisation thermique, électrique ou hybride.

Cette classification met en évidence une approche différente des questions de sécurité selon la nature du guidage : **permanent et matériel** pour le métro et le tramway, partiel, immatériel ou inexistant pour le BHNS.

Précisions sur les BHNS guidés

Le TVR de Bombardier (Nancy et Caen), qui est soumis aux dispositions du code de la route, est à ce titre considéré comme un BHNS. Il s'agit d'un véhicule routier de 24,50m de long guidé par un rail central. Les difficultés de mise en œuvre du système et son coût plus élevé que prévu n'en font pas un système d'avenir, d'autant plus qu'aucune autre ville au monde ne l'a retenu. Bombardier pourrait arrêter sa commercialisation. Il ne sera pas pris en compte dans l'analyse du cas toulonnais.

Le Phileas est en cours de développement par la société APTS. Il devrait aussi intégrer la catégorie « BHNS guidé » sous réserve de son homologation en France comme véhicule routier par les services compétents. Il s'agit d'un véhicule sur pneus guidé par recalage d'une position préenregistrée à l'aide de capteurs magnétiques disposés dans la chaussée. Eindhoven a été la première ville au monde à mettre en œuvre ce système, non sans difficultés. Après des problèmes de moteurs hybrides et d'arbres de transmission (semble-t-il résolu), et plusieurs arrêts d'exploitation, le mode de guidage automatique a été définitivement abandonné en 2008. Le système opéré à Eindhoven est seulement guidé en station pour assurer une bonne accessibilité. C'est cette formule qui pourrait être finalement retenue à Douai où les travaux d'infrastructures sont terminés depuis début 2008. Toutefois, la mise œuvre sans guidage pourrait poser quelques problèmes d'insertion en courbe. Le constructeur APTS propose plusieurs longueurs de véhicules (standard de 12m, articulé de 18m ou bi-articulés de 24,50m), une motorisation hybride et des innovations complexes telles que l'orientation de toutes les roues. Le Phileas présente la particularité d'être « monotrace » et de disposer de portes du côté gauche. Ces caractéristiques lui garantissent une meilleure insertion urbaine qu'un bus non guidé. Nous ne disposons pas de retour d'expériences sur les coûts d'exploitation.

Notons enfin que sur le modèle du système TEOR à Rouen, Siemens propose d'équiper les bus de caméras afin d'assurer un guidage, notamment en station pour améliorer l'accessibilité. Ce système est proposé en collaboration avec Irisbus sur les modèles Citélis, Créalis ou Civis. Il est désormais possible de le coupler avec d'autres marques. D'autres constructeurs sont intéressés par la technologie (Hess, Mercedes, etc.). Outre Rouen, c'est la solution retenue pour les BHNS de Castellón (Espagne - 2008), Nîmes (2011), Metz (2013), et peut-être Nancy (2012) et Valenciennes (2012).

Chaque système de TCSP possède donc son propre domaine de pertinence, en particulier au niveau de l'**insertion urbaine** et de la **capacité** :

- Le site propre intégral du métro ouvre des horizons sans limite en terme de capacité (ex : 225 m de long pour le RER A à Paris !)
- A un degré moindre, les tramways sur fer ou sur pneus doivent leurs grandes capacités à leur longueur permise par le guidage permanent et matériel¹. En revanche, la capacité reste bornée par les conditions d'exploitation, notamment la gestion des carrefours et la vitesse. L'éventail des solutions proposées par les constructeurs (de 2m20 à 2m65 de largeur en général, roulement sur fer ou sur pneus) offre de nombreuses possibilités en terme d'insertion.
- Les vitesses et fréquences du BHNS peuvent être identiques à celles d'un tramway. En revanche, sa longueur et donc sa capacité sont limitées par le code de la route (24m50). De même les gabarits proposés par les constructeurs sont plus imposants (2m50 ou 2m55 de large + rétroviseurs obligatoires imposés par le code de la route).

¹Au sens du décret n° 2003-425 relatif à la sécurité des transports publics guidés

3. Quel est le système de TCSP le plus pertinent pour l'agglomération toulonnaise ?

Le processus qui conduit au choix d'un TCSP doit prendre en compte plusieurs éléments. C'est une démarche qui peut-être itérative (selon l'avancement des études) et qui peut nécessiter un temps important.

Les éléments suivants seront analysés :

- ✓ vision à long terme du développement de l'agglomération et des réseaux de TC/TCSP
- ✓ objectifs de niveau de service
- ✓ demande de déplacements et capacité des systèmes
- ✓ insertion urbaine
- ✓ coûts globaux des systèmes
- ✓ évolutions technologiques et industrialisation

3.1 Vision à long terme du développement de l'agglomération et des réseaux de TC /TCSP

Nous n'analyserons pas ici les grands principes de développement du réseau de transports collectifs étudiés dans le cadre du PDU de l'agglomération toulonnaise approuvé en 2006. Au regard du contexte géographique, social, économique et démographique, le choix de principe du réseau à deux lignes de TCSP paraît pertinent.

Dans les phases de choix des systèmes et de mise en oeuvre, nous attirons toutefois l'attention sur les points suivants :

- le choix du système de la ligne 1 peut conditionner celui de la ligne 2, les systèmes n'étant pas toujours compatibles entre eux. Nous recommandons donc aux services de Toulon Provence Méditerranée de mener de concert les études de faisabilité de la ligne 2 (dont le choix du système) avec la réflexion en cours sur le choix du système de la ligne 1.
- les retours d'expériences des réseaux de TCSP anciens comme Nantes ou Strasbourg montrent qu'il est important d'anticiper la demande sur le long terme en évitant la congestion au niveau des nœuds des réseaux. Faute d'avoir pu prévoir les problèmes de capacité (station « Homme de Fer » pour Strasbourg, « Commerces » pour Nantes), les AOTU doivent désormais prévoir un maillage du réseau visant à décharger ces nœuds centraux. A l'inverse, le réseau de tramway dijonnais prévoit dès les 1^{ère} lignes une organisation en centre-ville autour de 3 points de correspondances équilibrés. A terme, les lignes de bus structurantes (appelées Lianes) pourront être transformées en TCSP (tramway ou BHNS). Les choix réalisés s'inscrivent donc dans une vision à long terme (30-40 ans) du réseau de transports urbains.

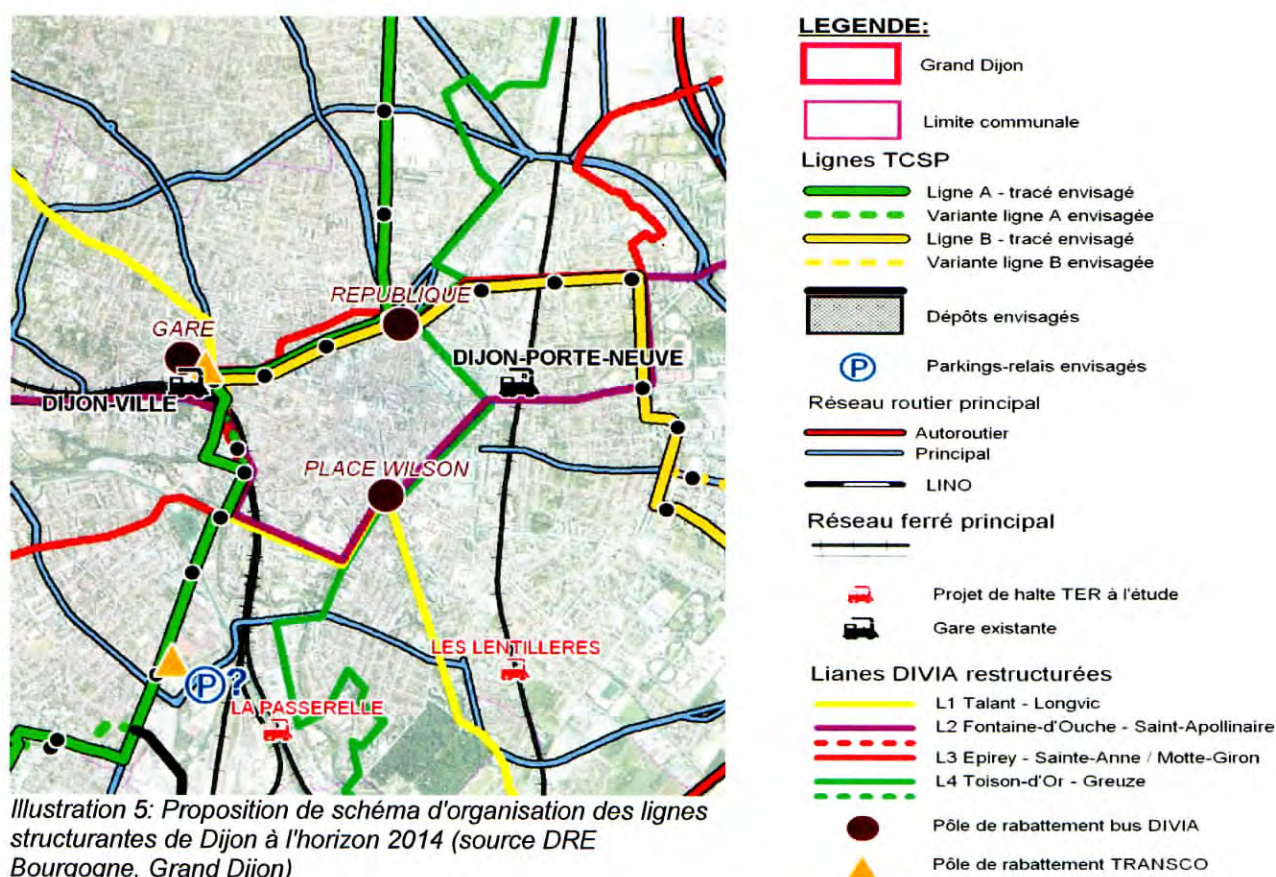


Illustration 5: Proposition de schéma d'organisation des lignes structurantes de Dijon à l'horizon 2014 (source DRE Bourgogne, Grand Dijon)

- les retours d'expériences (Orléans, Nancy, etc.) montrent que l' « effet TCSP » sur le report modal n'est en général obtenu que si le réseau de bus complémentaire est performant et les rabattements non systématiques ou organisés avec une fréquence proche de celle du TCSP.
- alors qu'il est difficile de prévoir la demande de transports à 30 ans, il est important que les choix proposés laissent quelques marges de manœuvre, notamment au niveau de la capacité, afin d'optimiser les investissements sur les 20-30 prochaines années et répondre au mieux aux besoins des usagers.
- Le contexte actuel, favorable au développement des TC (crise économique et financière, croissance structurelle du prix du pétrole, prise de conscience environnementale) invite les décideurs à anticiper un changement de comportements. La croissance de 6 % de la fréquentation des TCU en province entre 2007 et 2008² (2,5 % pour l'offre) montre que des évolutions plus fortes que les prévisions sont possibles. Ces évolutions récentes ne sont toutefois pas encore stabilisées, ce qui rend difficile les prévisions de déplacements.

² enquête annuelle TCU – Certu – DGITM – Gart - UTP

3.2 Objectifs de niveau de service

Le niveau de service fait référence aux notions de fréquence, d'amplitude horaire, de régularité, de vitesse, de confort, d'accessibilité, d'image et de lisibilité. Le « haut » niveau de service renvoie à des niveaux de performances élevés qui dépendent des objectifs et des contextes locaux mais sont toujours largement supérieurs à ceux de lignes de bus classiques.

Tramway et BHNS peuvent apporter les mêmes performances en ce qui concerne les fréquences, l'amplitude horaire, la vitesse et la régularité. Tout dépend en fait des conditions de circulation. La différence porte sur les niveaux de confort, de capacité, d'accessibilité, d'image et de lisibilité qui sont supérieurs avec le tramway, même si les évolutions autour du bus (design, guidage) ont permis de nombreuses améliorations.

Confort : le roulement fer sur fer et le guidage apportent un meilleur confort de roulement (moins de balancements pour les usagers debout). Les tramways sur fer sont globalement plus silencieux mis à part les crissements dans les courbes trop serrées. A cet égard, les véhicules sur pneus présentent un avantage mais, de manière générale, les courbes de faibles rayons sont à éviter pour des questions de vitesses.

Accessibilité : les systèmes guidés monotraces (tramway sur fer, Translohr) proposent des niveaux d'accessibilité optimaux tant dans l'interface quai/véhicule qu'à l'intérieur du véhicule. Les lacunes horizontales et verticales sont inférieures à 3 cm sur toutes les portes. Pour le Translohr de Clermont-Ferrand, une marge de 2 cm a été ajoutée à la lacune horizontale pour éviter un contact avec le quai, dans l'hypothétique cas d'éclatement d'un pneu. Il n'existe pas encore de retour d'expérience sur le BHNS Phileas qui est aussi un système monotrace. Les systèmes guidés optiquement (non monotrace) offrent également une bonne accessibilité (lacunes horizontales et verticales inférieures à 5cm sur la porte la plus accessible sur TEOR à Rouen).

Image et lisibilité : les tramways sur fer permettent plus de liberté en terme de choix de matériaux (pavés, gazon, etc.) afin de renforcer l'image moderne et de qualité du système. Les rails participent à la lisibilité du système. Toutefois, les retours d'expériences sur le Busway de Nantes ou sur TEOR à Rouen montrent que le BHNS dispose d'un potentiel intéressant en terme d'image, de requalification urbaine et de lisibilité. Les systèmes d'alimentation par le sol (14 km à Bordeaux) et de batteries embarquées (traversée de la place Masséna à Nice) participent désormais à la qualité esthétique de l'insertion des tramways. Dans un avenir plus ou moins proche, le bus pourrait aussi disposer de ce type de techniques (voir chapitre 3.6).

Conclusion : A Toulon, les objectifs de haute performance affichés par l'agglomération dans le PDU prônent pour le choix dès le court terme d'un tramway, ou alors d'un BHNS qui s'approche le plus possible du niveau de service de ce dernier (priorité aux feux, site réservé, plate-forme de qualité, guidage au minimum en station, matériel roulant spécifique,...)

3.3 Demande de déplacements et capacités des systèmes

Comme le montrent l'illustration 6 et le tableau 1, tramway et BHNS présentent des niveaux de capacité différents du fait des réglementations. Le BHNS est en effet limité en longueur à 24m50 par le code de la route³. Les longueurs des tramways (sur fer ou Translohr) peuvent en revanche aller au-delà de cette limite. Ils disposent ainsi de réserves de capacité importantes d'autant plus que des rames peuvent éventuellement être couplées (2 fois 33m de long par exemple en Île-de-France) avec toutefois des contraintes fortes de coupures urbaines en hyper-centre.

Les calculs de capacité maximale des systèmes sont généralement réalisés sur la base :

- D'une fréquence de 3 minutes qui correspond à la limite d'exploitation du système, sans dégradation. A Toulon, la plate-forme a été dimensionnée sur la base d'un projet de tramway sur fer. Dans l'hypothèse où l'insertion d'un BHNS nécessite l'utilisation ponctuelle de voie unique, cette fréquence maximale peut être portée à 4 minutes ou 5 minutes.
- D'une norme de confort de 4 pers/m², limite maximale acceptable en hyperpointe ou en situation dégradée

Capacité des systèmes et demande maximale à l'heure de pointe à Toulon

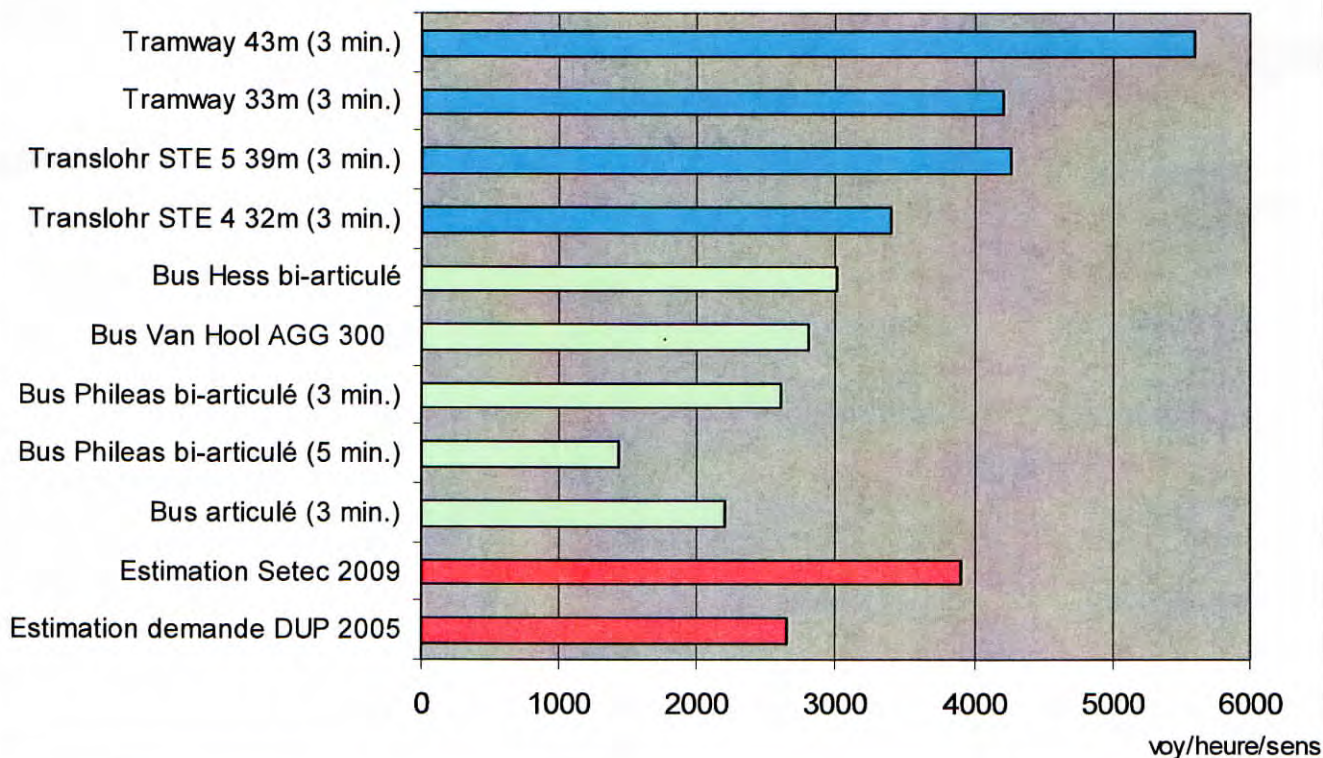


Illustration 6: Capacité maximale des systèmes (Certu : BHNS, du choix du système à sa mise en œuvre, 2009) et demande maximale à l'heure de pointe à Toulon

³ Art. R. 311-1, R. 312-10 et R. 312-11 du code de la route

Matériel roulant	Capacité maximale du matériel roulant en nombre de personnes (norme de 4 pers./m ²)	Capacité maximale du système en nombre de voyageurs par heure et par sens
Bus articulé (18,5m de long et 2m55 de large) - f = 3 min.	110	2 200
Bus bi-articulé Phileas ⁴ (24,5m de long et 2m55 de large) - f = 5 min.	130	1 430
Bus bi-articulé Phileas ⁵ (24,5m de long et 2m55 de large) - f = 3 min.	130	2 600
Bus bi-articulé Van Hool AGG 300 (24,5m de long et 2m55 de large) - f = 3 min.	140	2 800
Bus bi-articulé Hess (24,5m de long et 2m55 de large) - f = 3 min.	150	3 000
Tramway sur pneus Translohr STE 4 (32m de long et 2m20 de large) – f = 3 min.	170	3 400
Tramway Alstom Citadis (33m de long et 2m40 de large) – f = 3 min.	210	4 200
Tramway sur pneus Translohr STE 5 (39m de long et 2m20 de large) – f = 3 min.	213	4 260
Tramway Alstom Citadis (43m de long et 2m65 de large) – f = 3 min.	280	5 600

Tableau 1: capacité maximale de différents matériels roulants (source : Certu)

Sur le TCSP de Toulon, la demande maximale en heure de pointe a été estimée dans la DUP de 2005 à **2 640 voyageurs/heure/sens** (plus ou moins 30%) en 2010, sur l'ensemble du tracé de 18 km entre les gares de La Garde et La Seyne. En 2009, avec un contexte modifié (forte augmentation de l'usage des TC en France, baisse du pouvoir d'achat), Setec a estimé le trafic à **3 900 voyageurs/**

⁴ Sous réserve d'homologation

⁵ Sous réserve d'homologation

heur/sens à l'heure de pointe, trois ans après la mise en service du TCSP. L'incertitude sur le trafic attendu est grande dans la mesure où les tendances récentes ne sont pas stabilisées et la mise en place du TCSP constitue une modification significative de l'offre TC. Toutefois, on peut raisonnablement penser que l'estimation de 2005 constitue la valeur basse de la fourchette dans laquelle pourrait se situer le trafic du TCSP. **Il est donc fort probable que la capacité maximale d'un BHNS bi-articulé (y compris Phileas) soit atteinte dès la mise en service du TCSP ou peu de temps après.** En effet, même si le trafic a été estimé sur la base d'un projet de tramway, on peut raisonnablement penser que le haut niveau de service du BHNS (proche du tramway), et son image, ne remettront pas en cause l'attractivité du projet de TCSP.

Cette situation de sous-capacité du système pourrait avoir des effets néfastes sur son fonctionnement et son attractivité (temps de montée/descente importants, phénomènes de « montée impossible », irrégularités, baisse des vitesses commerciales,...), comme le montre les problèmes actuellement rencontrés sur le tramway de Bordeaux. Il en résulterait des surcoûts et une image négative vis-à-vis de la population.

Une comparaison avec d'autres réseaux permet d'ajouter quelques commentaires :

- Une étude réalisée par le CERTU⁶ en 2000 sur les réseaux de Nantes, Rouen, Lille, Toulouse et Lyon montre que le nombre de déplacements sur l'ensemble du réseau augmente toujours à la mise en service d'un TCSP. Cette augmentation est généralement forte pour une première ligne, elle s'atténue pour les suivantes. Cette augmentation est d'autant plus importante que l'offre de transports publics avant la mise en service du TCSP était médiocre ce qui est le cas pour Toulon.
- Les chiffres observés sur des réseaux à TCSP dans des agglomérations plus petites comme St Étienne ou Rouen, permettent de mettre en avant le potentiel d'un tramway dans une agglomération comme celle de Toulon.

	Population unité urbaine (RGP 99)	Population ville-centre (RGP 999)	Population PTU 2007 (RGP 999)	Offre 2007 (millions de km)	Usage 2007 (millions de voyages)
Nantes	545 000	282 000	569 000	23,3	110
Toulon	520 000	167 000	404 000	11,3	23,8
Strasbourg	427 000	273 000	457 000	15,8	89
Grenoble	419 000	157 000	396 000	16,2	74
Rouen	390 000	110 000	400 000	13,7	41,3
St Etienne	292 000	176 000	390 000	9,1	37,3
Montpellier	288 000	244 000	372 000	10,8	61,2

⁶ Certu, *Évaluation des transports en commun en site propre – Analyse des restructurations de réseaux de transport public liées à la mise en service d'un transport en commun en site propre sur cinq agglomérations françaises*, rapport d'étude CERTU, Mai 2000.

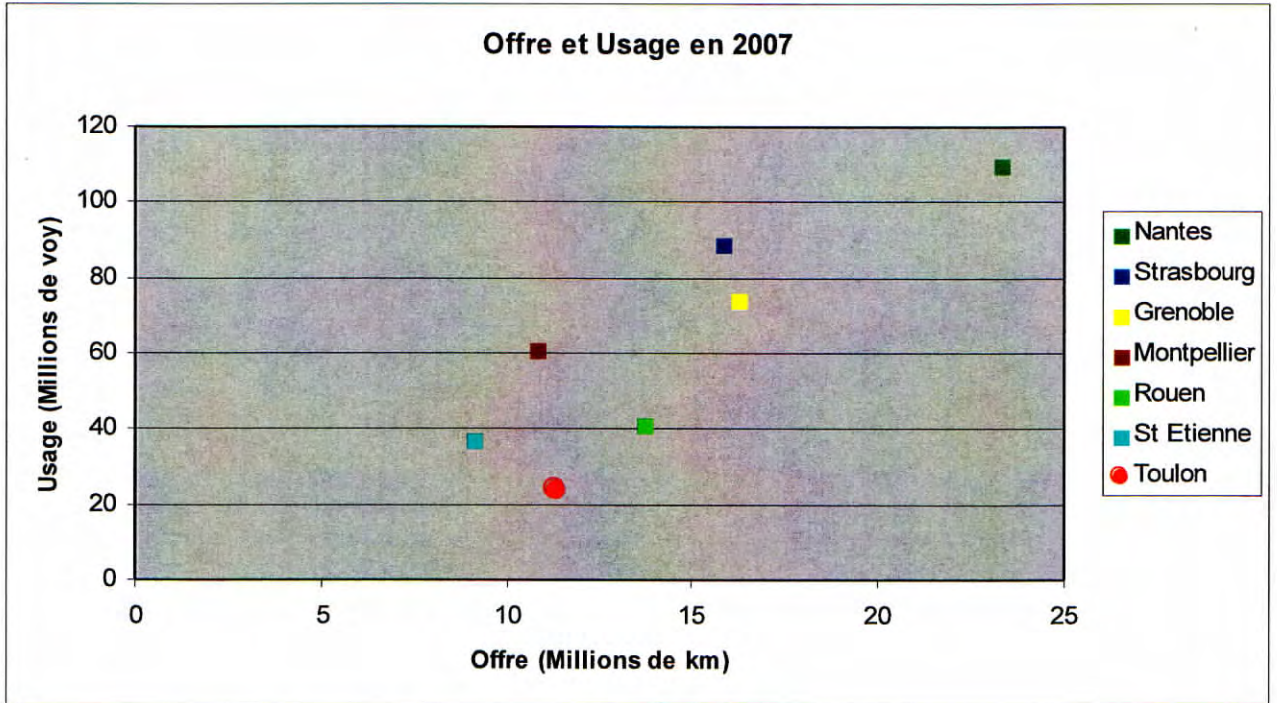


Illustration 7: Offre et Usage de différents réseaux de taille équivalente (source : enquête annuelle TCU - Certu/DGITM/Gart/UTP - données 2007)

Cet effet TCSP peut être approché quantitativement par une comparaison avec d'autres réseaux. Regardons de plus près les évolutions de clientèle des réseaux d'Orléans, Montpellier et Caen après la mise en service de la 1^{ère} ligne de tramway (année n). Ces réseaux n'étaient pas réputés, avant la mise en service de TCSP, pour avoir une bonne offre et un bon usage des TC (voir Certu, Panorama des villes à TCSP, situation 1998).

	Orléans	Montpellier	Caen
Évolution des voyages sur le réseau (n+1/n-1)	+16%	+37%	+ 13%
Fréquentation réseau TC (année n+1)	18,9 millions voy.	39,2 millions de voy.	24,3 millions de voy.
Part des voyages effectués sur le tramway (année n+1)	43%	47%	45%
Fréquentation journalière tramway (jour moyen d'automne de l'année n+1)	30 000 voy.	82 000 voy.	45 000 voy. ⁷
Fréquentation annuelle tramway (année n+1)	8,1 millions voy.	18,4 millions voy.	10,9 millions voy.
Coefficient de passage fréquentation annuelle / fréquentation journalière sur le tramway	270	225	242

Tableau 2: Évolution des fréquentations des réseaux de Montpellier, Caen et Orléans (source : enquête annuelle TCU - Certu/DGITM/Gart/UTP)

A partir des données ci-dessous, on peut réaliser une estimation du trafic attendu sur un tramway qui aurait été mis en service en 2008 à Toulon :

	Toulon	Hypothèse de calcul
Fréquentation réseau TC en 2007	23,8 millions voy./an	
Fourchette probable de fréquentation du réseau TC en 2009 avec TCSP	27,4 à 30,9 millions voy./an	La croissance de la fréquentation du réseau de Montpellier est assez exceptionnelle. On retient donc une évolution entre 15% et 30% sur le réseau TCU toulonnais
Fourchette probable de fréquentation du tramway en 2009	11 à 15,5 millions de voy./an	On retient une part de l'usage du tramway sur l'ensemble du réseau entre 40% et 50%
Fourchette probable de fréquentation un jour moyen d'automne 2009	40 000 à 69 000 voy./jour	On retient un coefficient de passage entre 225 et 270

En première approximation, cette fourchette reste compatible avec les trafics observés sur certaines premières lignes de tramway avec des demandes aux heures de pointe dépassant les capacités d'un BHNS.

⁷ Donnée 2004

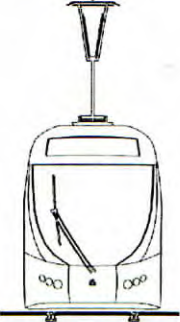

Conclusion : Au regard des prévisions de trafic même les plus pessimistes, le tramway sur fer et le tramway sur pneus (Translohr) semblent les seuls systèmes qui permettent de répondre efficacement à la demande à court et moyen terme sur la 1ère ligne de TCSP de l'agglomération toulonnaise qui devrait avoir un effet sensible sur l'usage du réseau. L'expérience française et européenne montre que qu'il n'est pas judicieux de choisir un système qui atteint sa limite de capacité dès sa mise en service ou peu de temps après. Ce choix peut engendrer des difficultés d'exploitation qui génèrent des surcoûts et diffusent une image très négative auprès de la population.

3.4. Insertion urbaine

3.4.1 Les différentes notions de gabarit

Dans le cas des systèmes guidés, la trajectoire des véhicules est imposée si bien qu'il est possible de déterminer une enveloppe à l'intérieur de laquelle le véhicule va se déplacer et qui devra être exempte de tout obstacle.

Pour déterminer cette enveloppe, plusieurs notions interviennent :

- **Gabarit statique (GS)** : il correspond à l'espace occupé par le véhicule au repos
- 
- **Gabarit dynamique (GD)** : il correspond à l'espace occupé par le véhicule en déplacement. Il prend donc en compte les effets dynamiques liés aux mouvements du matériel roulant sur la voie et les effets d'usure de certains organes du matériel. Il est donc spécifique à chaque matériel roulant.
- 
- **Gabarit limite d'obstacle (GLO)** : Étant donné qu'il existe toujours des incertitudes « extérieures » (comme la pose de voies), une lame d'air de sécurité vient majorer le gabarit dynamique. La valeur de cette lame d'air dépend donc du réseau sur lequel circule le matériel roulant et en particulier, pour les systèmes « classiques » de tramway, du type de pose de voie et de sa précision.

A la différence des systèmes guidés de façon permanente par un ou des rails matériels, les systèmes à guidage immatériel sont soumis aux dispositions du code de la route, même lorsqu'ils circulent en mode guidé. Ainsi, le GS doit prendre en compte les rétroviseurs en position dépliée.

Pour ce qui est des deux autres notions, des précisions doivent être apportées :

- GD : il correspond à l'espace occupé par le véhicule en déplacement, il doit donc prendre en compte, les « dérives autorisées » ou les marges du système de guidage (par exemple pour le Philéas, ± 15 cm).
- GLO : il correspond à l'enveloppe maximale dans laquelle le véhicule est susceptible de se situer même en cas de situation dégradée ou de défaillance. Ainsi la largeur de la lame d'air devra permettre aux véhicules sortant du GD (suite à un défaut de guidage par exemple) de s'arrêter avant de sortir du GLO.

3.4.2 Le GLO des différents systèmes

a) le tramway sur fer (exemple Citadis d'Alstom)

Ce genre de matériel est personnalisable, si bien que la largeur et les portes-à-faux peuvent varier d'un réseau à l'autre. Ce qui a comme conséquence de modifier le GLO.

De plus la présence et la position des poteaux supportant le système de ligne aérienne de contact ont également des conséquences sur les largeurs.

Pour un matériel roulant ayant une largeur de 2,40 m, le GLO est de l'ordre 5,6 / 5,8 m en alignement droit et de 7 / 7,5 m pour le rayon de courbure minimum acceptable (25m).

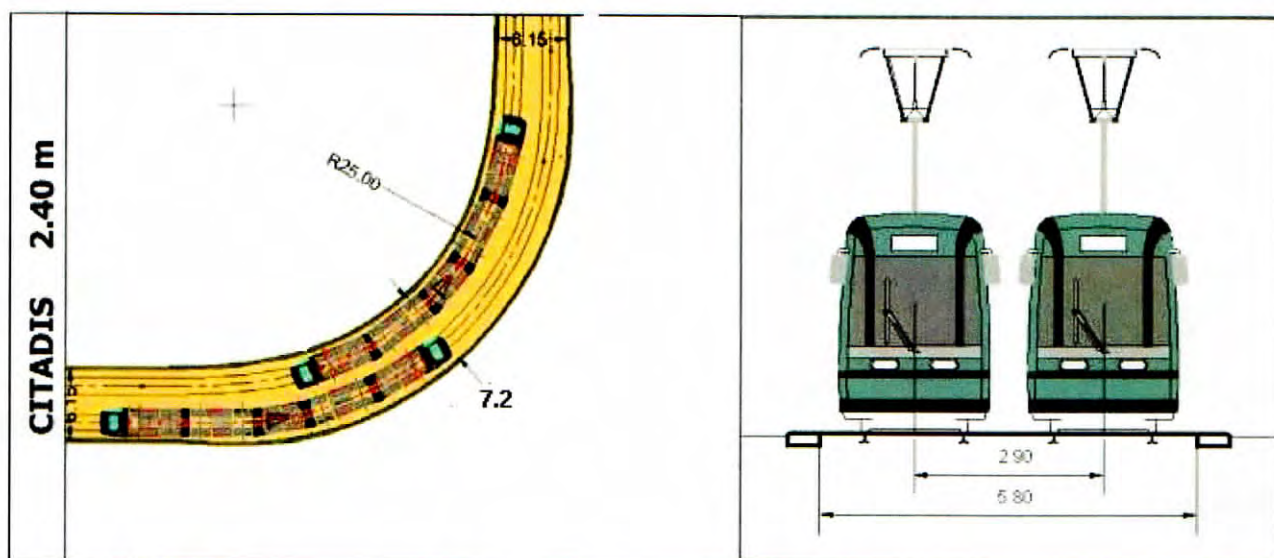


Illustration 8: GLO en courbe et en alignement droit à Bordeaux (Source : SYSTRA)

b) le tramway sur pneu (Translohr)

Ce genre de matériel permet une insertion plus facile dans la ville grâce à des rayons de courbure minimums plus faibles que pour les tramways sur fer (10,5m pour le Translohr contre 25m pour les tramways sur fer). Le GLO est globalement plus faible que pour un tramway sur fer du fait d'une largeur plus faible (2,20m) : 5,4m en alignement droit et moins de 7m pour le rayon de courbure minimum acceptable (10,5m).

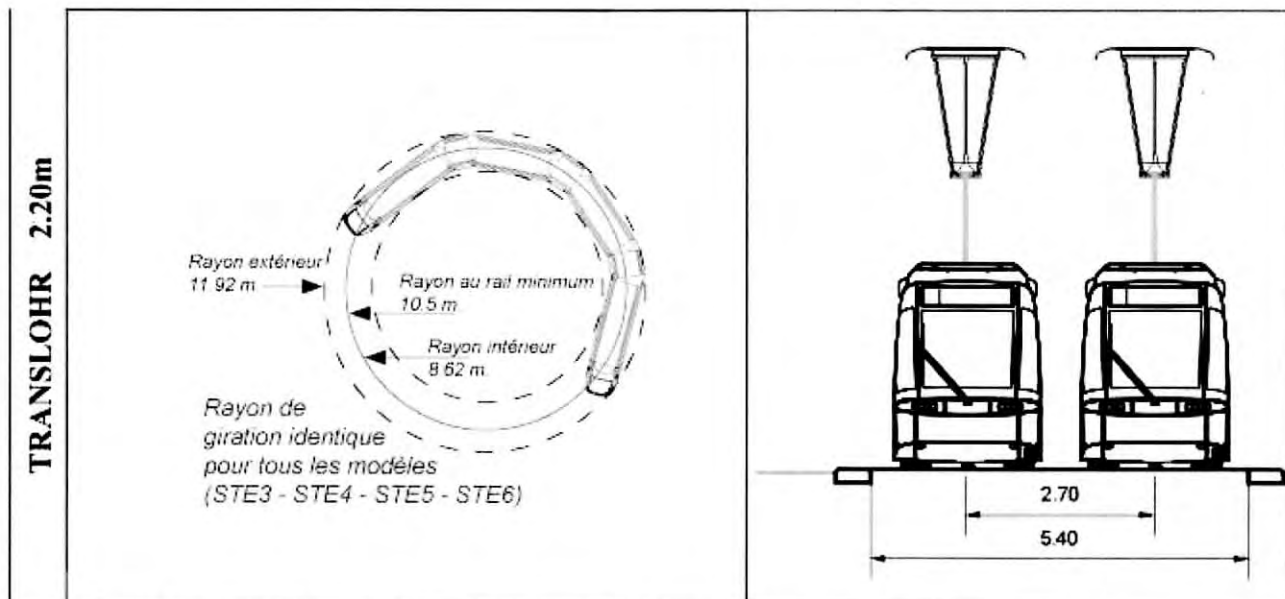
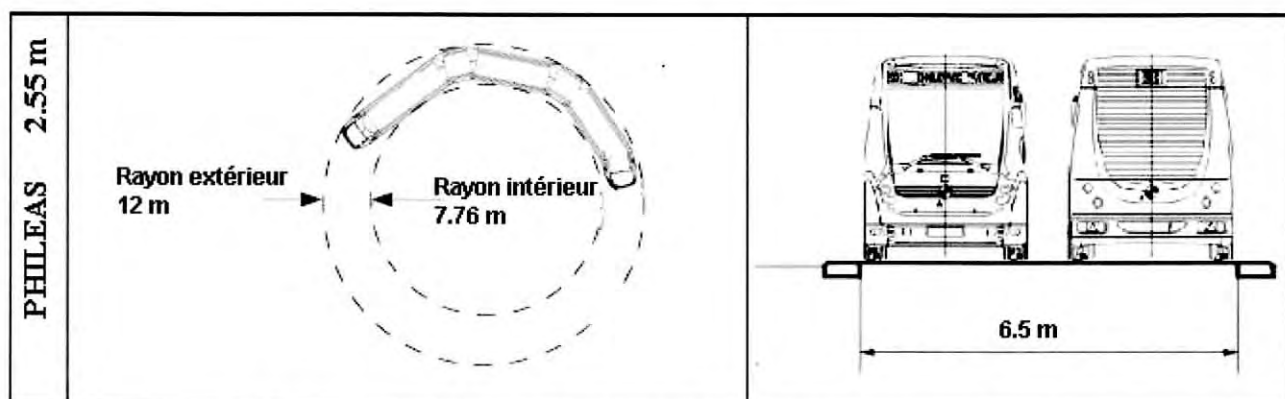


Illustration 9: GLO en courbe et en alignement droit du Translohr (Source : Lohr Industrie)

c) le Phileas d'APTS

Ce nouveau système développé par la société APTS est basé sur un système électronique (via des ordinateurs) qui contrôle la trajectoire du véhicule et qui se recalcule à l'aide de plots magnétiques positionnés tous les 4,5 mètres (± 1 m). Ce principe est déjà utilisé dans d'autres domaines industriels. Après de nombreuses difficultés et un arrêt d'exploitation, le Phileas circule de nouveau depuis février 2009 à Eindhoven, sans la fonction de guidage automatique (utilisation du guidage uniquement en station).



GLO du Phileas sans rétroviseur (Source : site internet APTS)

Concernant le projet de Douai, le système est encore en « cours de validation » par les autorités tant vis à vis du code de la route (CNRV) que vis à vis de la réglementation « sécurité des transports guidés » (STRMTG). Ainsi les informations que l'on possède sont à utiliser avec prudence, étant entendu que les études de sécurité en cours pourraient imposer de nouvelles contraintes en ce qui concerne la largeur de la plate-forme.

La plate forme a été dimensionnée à 6,60 m, bordure GLO comprise. Les dernières études de GLO

de Douai en alignement droit donnaient une valeur de 6,54 m pour le Philéas articulé avec des rétroviseurs en position repliée à 50 km/h (6,38m à 30 km/h). Cette valeur est considérée comme une entrée pour l'ensemble du projet mais n'est pas validée par l'EOQA⁸ « matériel roulant ». Nous ne possédons pas les valeurs actualisées de GLO en courbe et nous n'avons pas les valeurs pour le véhicule de 24m.

d) le bus guidé optiquement (exemple Civis, Cristalis) et les systèmes non guidés

Dans le cas des systèmes optiques actuellement en service, seul l'essieu avant est « guidé » si bien que le véhicule n'est pas monotrace et qu'il a besoin d'une emprise presque aussi importante qu'un bus non guidé en courbe. A Rouen, cela ne pose pas de problème particulier puisque le guidage est utilisé essentiellement pour l'accostage en station.

Dans ce cas là, l'emprise nécessaire est de 6,50 à 7 m en alignement droit et dépasse les 10 m pour le rayon de courbure minimum acceptable (11m à 12m).

Pour les bus bi-articulés, l'emprise nécessaire semble être légèrement supérieure mais l'utilisation d'essieux directionnels permet de revenir dans des enveloppes du même ordre que pour les bus classiques.

Le surcout du guidage optique est de l'ordre de 90 k€ par véhicule.

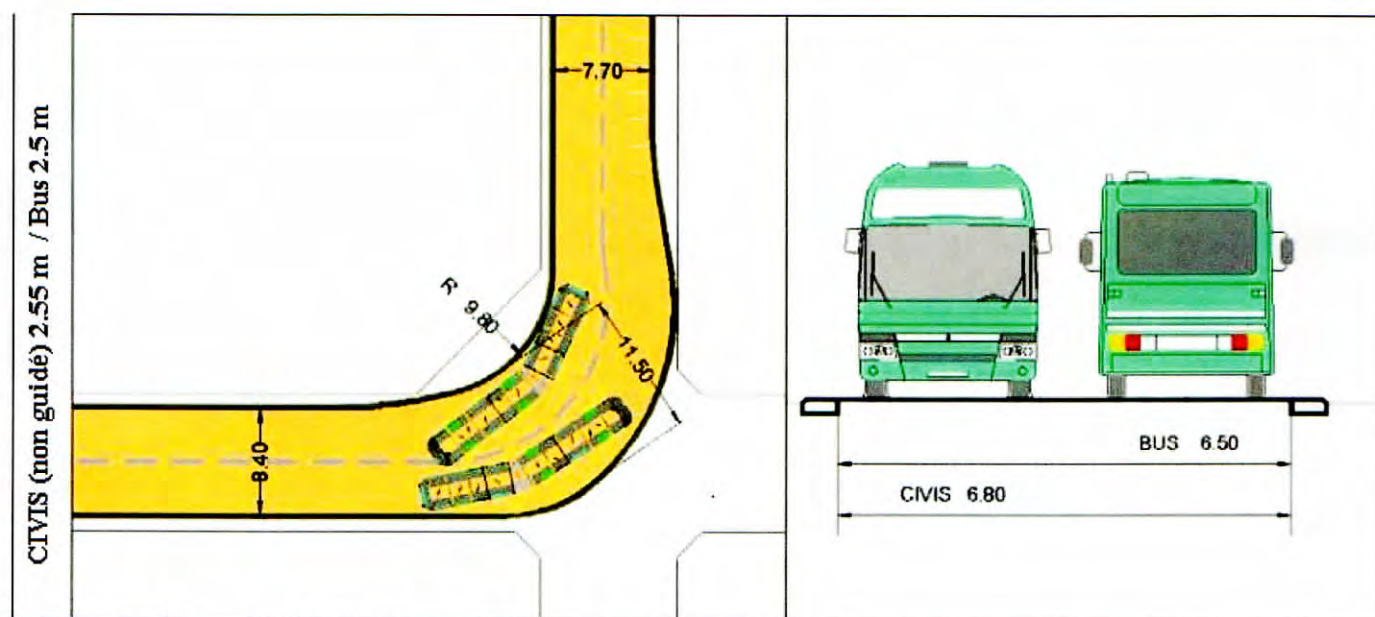


Illustration 10: Emprise en courbe et en alignement droit (Source : Systra)

⁸ Expert ou Organisme Qualifié Agréé

Système	Tramway fer 2m40	Translohr	TVR	Phileas (1)	TEOR	Bus classique (2)
Type de guidage	2 rails porteurs	rail central	rail central	informatique avec recalage par plots magnétiques	optique	pas de guidage
Monotrace	oui	oui	oui	oui	non	non
Emprise en alignement droit (voie double)	5,6m à 5,8m	5,4 m	6,2 m	6,5 à 7m	6,7 à 7,3 m	6,5 à 7 m
Rayon minimum acceptable	25 m	10,5 m (au rail)	12 m (au rail) (3)	12 m	12 m (non guidé) 25 m (guidé)	11 à 12 m
Emprise en courbe	7 à 7,5 m	6,7 à 7 m	7 à 7,6 m	8,2 à 8,5 m	9 à 11 m	10 à 12 m

(1) au 01/06/09, le système Phileas n'est pas encore homologué en France. Les emprises pourraient donc évoluer

(2) sans cyclistes

(3) les retours d'expériences de Nancy et Caen montrent qu'il est préférable de ne pas descendre en dessous de 15m

Illustration 11: Emprises de quelques systèmes TCSP (Certu : BHNS, du choix du système à sa mise en oeuvre, 2009)

3.4.3 L'insertion sur l'itinéraire de la DUP

Le paragraphe précédent montre qu'en alignement droit, l'espace nécessaire varie de 7,3m pour un bus à guidage optique à 5,4m pour le Translohr. Par ailleurs, les problèmes se rencontrent plutôt en courbe.

Globalement, avec une reprise des études actuelles et une modification du partage de la voirie et du type de site (propre, mixte, banal, voie unique...) , il devrait être possible de faire circuler tous ces systèmes sur ce linéaire, mais avec des conditions d'exploitation parfois dégradées. A la marge, l'itinéraire pourrait devoir se déplacer sur des voiries connexes.

Conclusion : Si le tramway présente les meilleures conditions d'insertion sur le tracé retenu, les systèmes BHNS doivent pouvoir emprunter les mêmes axes, à condition de revoir le partage de la voirie par rapport au projet DUP et d'intégrer des éventuelles contraintes d'exploitation (voie unique, site banal). Ces dernières engendreraient des problèmes de surcharge importants sur un système déjà à la limite de capacité en fonctionnement optimal.

3.5 Coûts globaux des systèmes

Afin d'être pertinente, l'analyse des coûts doit :

- ✓ prendre en compte les coûts d'investissements mais aussi les coûts d'exploitation et les coûts de régénération sur le long terme (couche de roulement à cause de l'orniérage pour les systèmes sur pneus, aiguillages pour les tramways, rénovation des matériels roulants à mi-vie etc.)
- ✓ intégrer la durée de vie des matériels roulants (environ 15-20 ans pour un bus, 30-40 ans pour un tramway⁹)
- ✓ isoler la partie « transports » des TCSP des réaménagements urbains de façade à façade qui sont indépendants du choix du système TCSP

Sur ces bases, 2 scénarios peuvent être analysés sommairement¹⁰ pour donner des ordres de grandeur et sensibiliser l'agglomération sur le besoins de menez des études approfondies sur ce point. Les prévisions de demande sur le TCSP orientent nécessairement le choix sur des matériels capacitifs de type BHNS bi-articulé ou tramways. Le scénario BHNS se base sur le Phileas d'APTS, système BHNS qui présente les meilleures performances en terme d'insertion¹¹ et qui intéresse les services de l'agglomérations toulonnaise.

Dans les 2 scénarios on retient une longueur de 18 km correspondant au 1^{er} tronçon, une vitesse commerciale de 18 km/h, et un fonctionnement de 5h à 1h du matin. En première approximation, on ne prend pas en compte les temps de battement.

On retient une fréquence de 3 min. en heure de pointe pour le BHNS bi-articulé afin d'obtenir sa capacité maximale (2600 voy/heure/sens). Pour le tramway, une fréquence de 5 min. en heures de pointe permet d'atteindre la même capacité (2640 voy/heure/sens) avec une réserve importante qui peut être utilisée en augmentant la fréquence. En heures creuses, on retient une fréquence de 6 min. pour les deux systèmes afin d'offrir un haut niveau de service continu sur la journée. Les plages horaires considérées en fréquence « heures de pointe » sont 7h – 9h le matin et 16h – 19h le soir.

Les coûts d'infrastructures et de matériels roulants sont donnés à partir des renseignements disponibles sur les projets de Douai (Phileas) et Dijon (tramway sur fer). On intégrera aussi la version « pile à combustible » du Phileas, disponible sur catalogue mais non exploitée, moyennant un surcout sur le matériel roulant d'environ 500 k€ par véhicule roulant. Les coûts résiduels des matériels roulants sont très sommairement estimés au prorata du temps restant.

Les coûts d'exploitation kilométrique du tramway sont ceux pris en compte dans le projet de tramway de Dijon. En revanche, ne disposant d'aucun retour d'expérience sur le Phileas, nous faisons l'hypothèse de coûts d'exploitation intermédiaires entre un BHNS classique (4,7 €/km à Toulouse, 4,6 €/km à Rouen) et un tramway sur fer. De même, dans la mesure où le Phileas est un véhicule routier, nous faisons l'hypothèse d'une durée de vie de 15-20 ans.

Les couts globaux (investissement et exploitation) sont calculés sur une durée de 30 ans.

⁹ Instruction fiscale du 21 janvier 1985 et retours d'expériences

¹⁰ Actualisation, inflation et frais financiers non pris en compte. Pour plus de précisions méthodologiques, voir les p.48 et 49 de l'ouvrage Certu, *Recommandation pour l'évaluation socio-économique des projets de TCSP*, 2002

¹¹ Sous réserve d'homogation en mode guidé sur l'ensemble du tracé

Système	Fréq. HP/HC	Capacité d'un veh.	Coûts invest. (infra « transport »)	Coût unitaire MR	Durée de vie MR	Coûts exploitation en 2014
BHNS bi-articulé Phileas hybride	3 min./6 min.	130 places	7,5 M€HT/km d'infra.	1,5 à 2 M€HT	15-20 ans	5 à 7€HT/km
Tramway sur fer (33m de long, 2m40 de large)	5 min./6min.	220 places	15 M€HT/km d'infra.	2,5 M€HT	30-40 ans	6 à 8€HT/km

Avec un calcul sur 30 ans, on obtient des valeurs de coûts qui oscillent entre 730 M€ et 1000 M€ pour le Phileas, et 820M€ et 1000 M€ pour le tramway. On retiendra donc que **les ordres de grandeurs des coûts sont proches.**

Toutefois les tests montrent une grande sensibilité aux coûts d'exploitation (+ 100M€ pour 1€/km supplémentaire). Or il est aujourd'hui impossible d'avoir un retour sur le système BHNS Phileas de ce point de vue. En particulier, une attention particulière doit être apportée aux réductions de consommation annoncées par les constructeurs. A titre indicatif, la RATP teste actuellement plusieurs bus hybrides et note que les valeurs annoncées par les fabricants sont rarement atteintes (-30% affiché, - 20% observé).

L'expérience du TVR de Bombardier montre qu'il faut rester prudent sur les coûts affichés par un constructeur sur un matériel qui n'a pas encore fait ses preuves, notamment en ce qui concerne les coûts d'exploitation. Le TVR n'a en effet pas tenu ses promesses¹². Les coûts de maintenance sont de 25% à 27% plus élevés que ceux initialement prévus dans la transaction conclue avec Bombardier. Caen affichait en 2003 un coût d'exploitation du TVR à 6,5 €/km soit du niveau d'un tramway sur fer.

De plus nous disposons de peu de retours d'expériences sur les coûts de régénération, y compris de certains tramways.

Le développement d'un système et d'un marché permettent aussi de diminuer et de garantir des coûts de maintenance. C'est le cas pour le tramway sur fer, cela ne l'est pas pour le Translohr, le Phileas ou le TVR.

Conclusion : Étant donnée la forte demande, le choix d'un BHNS bi-articulé nécessiterait de porter le système à sa limite de capacité (fréquence de 3 min. en heures de pointe) dès sa mise en service et sans réserve pour l'avenir. Dans le cas du choix du Phileas - le BHNS bi-articulé répondant le mieux aux contraintes d'insertion urbaine - cette configuration engendrerait des coûts d'investissement en matériel roulant et des coûts d'exploitation de l'ordre de ceux d'un tramway.

¹² Rapport d'expertise d'Henri Frey pour le Tribunal Administratif de Nancy selon l'ordonnance du 8 mars 2005, octobre 2008

3.6. Évolutions technologiques et industrielles

Le tramway sur fer

Le tramway sur fer est une technologie largement éprouvée. Plusieurs constructeurs se partagent un marché mondial conséquent. Notons toutefois que certaines spécificités peuvent conduire à des « isolements » (largeur particulière, etc.) et que la concurrence n'est pas toujours au rendez-vous (cas de la France avec Alstom). Cependant celle-ci pourrait être relancée avec l'arrivée de tramways plus économique depuis la Suisse, l'Allemagne ou l'Europe de l'Est afin de répondre aux contraintes financières d'agglomération plus petites qui se lancent dans le tramway (Besançon, Dijon, Brest,...). Le Gart pilote d'ailleurs un groupe de travail visant à étudier les potentiels de développement d'un « tramway low-cost ».

Le développement par Alstom de l'alimentation par le sol (**APS**) à Bordeaux et des **batteries embarquées NiMH** à Nice, solutions éprouvées, permettent aujourd'hui de s'affranchir des lignes aériennes de contact sur des portions plus ou moins longues¹³ selon la technologie, mais moyennant un surcout important aussi bien sur l'infrastructure (3M€/km de voie double pour l'APS à Reims) que sur le matériel roulant (environ 20 K€/rame).

Cette question d'affranchissement des lignes aériennes de contact fait partie des sujets de recherche des constructeurs :

- Bombardier devrait bientôt lancer la commercialisation d'un système d'alimentation par le sol basé sur la technologie de transmission d'énergie par induction avec un système de récupération d'énergie par super condensateurs (Système **PRIMOVE**). La partie au sol de PRIMOVE est noyée dans la voie ce qui la rend insensible à la présence d'eau, de neige ou de glace sur la chaussée.
- Ansaldo a présenté au dernier congrès UITP de Vienne un prototype de son système **TRAMWAVE** qui s'apparente à l'APS d'Alstom
- Siemens propose une nouvelle technologie « hybride » **SITRAS HES**, avec batteries de traction permettant de parcourir 2,5 km en autonomie. Cette technologie, également orientée vers les économies d'énergie peut être mise en œuvre sur du matériel existant. Elle combine un module de condensateurs et des batteries nickel-métal qui se montent sur les parties encore libres de la toiture. L'accumulateur se charge lors des séquences de freinage mais aussi sur les parcours. Ce système est expérimenté en exploitation commerciale à Almada au Portugal.
- Enfin Alstom testera sur la ligne T3 à Paris, en partenariat avec l'Inrets et pendant un an, un tramway Citadis équipé de supercondensateurs (projet **STEEM**). Le stockage de l'énergie à bord est composé de 48 modules de supercondensateurs fournis par Batscap (groupe Bolloré), soit une tonne de plus. Ils permettent une autonomie d'environ 400m. Cette recherche labellisée par le PREDIT doit aussi permettre des économies d'énergie. Le projet STEEM doit aussi apporter une meilleure capacité que les batteries utilisées sur le tramway de Nice.

Ces technologies apportent, outre un gain esthétique, un gain en terme d'insertion par la suppression des poteaux support de LAC. En revanche, elles présentent l'inconvénient de lier la collectivité à un constructeur.

¹³ Quelques centaines de mètres pour les batteries, plusieurs kilomètres pour l'APS (14 km à Bordeaux)

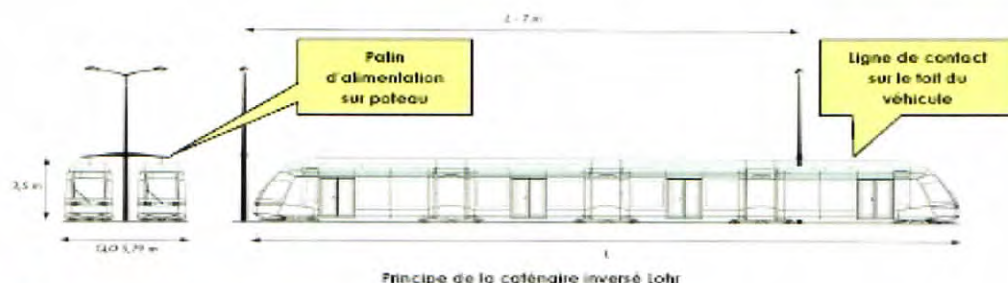
Le tramway sur pneus Translohr

Le Translohr est aujourd'hui développé par un seul constructeur (Lorh Industrie) qui a toutefois réussi à décrocher d'autres marchés après celui de Clermont-Ferrand :

- Italie (Padoue en 2007, Venise-Mestre, L'Aquila et Latina en 2010)
- Chine (Tianjin en 2007, Shanghai en 2009)
- Ile-de-France (St Denis-Sarcelles en 2011 et Châtillon-Velizy-Viroflay en 2013)

Par ailleurs, le développement du nouveau VAL de Siemens (le Neoval) qui utilise le même système de guidage que le Translohr devrait permettre d'ouvrir un marché. Mais aucun autre constructeur ne s'est lancé dans une technologie compatible.

Comme pour le tramway sur fer, il est aujourd'hui possible de s'affranchir de lignes aériennes de contact sur de courtes distances avec un **fonctionnement sur batteries** (Translohr de Padoue). Pour des autonomies plus importantes, Lorh étudie un système de caténaires inversés qui suppose toutefois l'installation de poteaux en grand nombre (distance inter-poteau inférieure à la longueur du tramway).



Translohr alimenté par caténaire inversée



Poteau d'alimentation

Bus à Haut Niveau de Service

En ce qui concerne les BHNS, les situations sont très variables.

La plupart des BHNS utilisent des bus fabriqués à partir de séries déjà développées par les constructeurs (Citaro de Mercedes sur le Busway à Nantes, CitéLis d'Irisbus sur TEOR à Rouen, Créalis d'Irisbus pour le BHNS de Maubeuge et le futur BHNS de Nîmes). Le marché étant très développé, les risques liés à la technologie sont quasi nuls sauf lorsque le matériel s'accompagne d'innovations importantes (guidage, motorisation).

A l'heure actuelle, trois constructeurs proposent des bus de 24 mètres : Hess (trolleybus), APTS Phileas (hybride), Van Hool AGG 300 (diesel). Solaris et Iribus pensent pouvoir, dans un futur plus ou moins proche, en proposer également.

En terme de motorisation, on assiste à un développement des trolleybus qui présentent plusieurs avantages (coûts plus faibles sur le long terme, meilleures performances dans les itinéraires en pente, confort). A l'image des batteries embarquées sur les tramways, il est aussi possible de « dépercher » sur de petites distances et à faible allure avec les nouveaux matériels (matériel proposé par Solaris-Ganz à Rome, projet à Nîmes,...).

Concernant les véhicules hybrides, seul le Phileas d'APTS est aujourd'hui disponible sur le marché avec une version 24m. Il a connu de nombreux problèmes à Eindhoven et la nouvelle version présentée pour le projet de Douai n'est toujours pas homologuée. Il n'est donc pas possible d'obtenir des retours d'expérience (consommation, entretien,...). Si l'avantage de l'hybride en terme de réduction de consommation semble se confirmer (La RATP est en cours de test en « exploitation simulée » d'un bus hybride MAN non articulé permettant une réduction de consommation de l'ordre de 20 à 25 %), le coût élevé du matériel roulant reste encore un handicap. Mercedes annonce un surcoût d'un tiers dans le cas d'une production en série.

Enfin d'autres motorisations sont encore au stade expérimental. Hyundai prévoit le développement de bus à « pile à combustible » en Corée du Sud et des recherches sont en cours sur le « biberonnage » en station qui permettrait à des véhicules électriques de s'affranchir de caténaires grâce à des batteries embarquées et rechargées à chaque arrêt.

Pour l'instant, des doutes planent sur les coûts et les gains environnementaux réels globaux de ces nouvelles technologies

Le guidage est l'autre principal sujet de développement du BHNS

Quel est l'intérêt du guidage ?

L'étude de systèmes guidés est souvent techniquement motivée par des difficultés d'insertion. La réalité est beaucoup plus complexe. Le choix de guidages matériels comme le rail central du TVR permet effectivement de limiter l'emprise du véhicule. En revanche, la conclusion n'est pas toujours valable pour les véhicules à guidage immatériel (voir chapitre 3.4 sur l'insertion urbaine). La réglementation sur les transports publics guidés impose des marges de sécurité qui, en section courante, peuvent annuler le gain lié au guidage (cas du système *Phileas* d'APTS à Douai) voire augmenter l'emprise (cas de *TEOR* à Rouen). En courbe, si l'emprise peut être plus faible dans le cas de systèmes monotraces, le dispositif de guidage n'est pas toujours adapté à des rayons de courbures faibles (cas du guidage optique à Rouen).

Finalement, après les difficultés rencontrées par les systèmes à guidages matériels (coûts plus élevés que prévu, fonctionnement) et avec les limites en terme d'insertion pour les systèmes à guidage immatériel, le guidage semble désormais surtout intéresser les collectivités pour **son apport en terme d'accessibilité en stations** (cas des projets de Metz, Nîmes et Nancy).

Le guidage optique présente la particularité d'être considéré comme une « option » ce qui limite les risques. Aujourd'hui, seul Siemens développe cette technologie, mais celle-ci n'est plus liée à un matériel roulant particulier. Ainsi, l'agglomération nimoise qui a retenu le Créalis articulé d'Iribus avec un guidage optique pour sa 1ère ligne de TCSP, souhaite équiper des trolleybus bi-articulés du même dispositif de guidage pour sa 2ème ligne. Le constructeur suisse Hess s'est montré particulièrement intéressé. Par ailleurs, Mercedes étudierait la mise en œuvre de son propre système de guidage optique, concurrent.

Pour le Phileas d'APTS, le problème se pose de la même manière que le TVR de Bombardier. Le système de guidage est unique et est vendu avec le matériel roulant. Par ailleurs, ce dernier n'a toujours pas été homologué en France. Quant à la version trolleybus ou « pile à combustible », elle n'existe que sur catalogue. La sagesse et les expériences passées (métro automatique de Lyon, TVR de Nancy, alimentation par le sol à Bordeaux) prônent d'attendre quelques années de fonctionnement pour obtenir un retour d'expérience suffisant sur ce matériel qui présente l'inconvénient d'innover sur plusieurs technologies en même temps (guidage en crabe, ouverture de portes à gauche, motorisation hybride).

Enfin, le guidage par galets mériterait d'être étudié dans les projets de BHNS. Il peut souvent se résumer à sa plus simple expression, pour un guidage uniquement en station. Né en Allemagne dans les années 80 (Essen puis Manheim), ce système s'est surtout développé au Royaume-Uni (Birmingham, Ipswich, Leeds, Bradford, Crawley, Cambridge et Edinburgh) et intéresse les américains (Cleveland, Eugene). Il est aujourd'hui largement éprouvé mais aucun projet français n'a étudié cette solution technique.



Illustration 12: galet de guidage pour accostage en station à Cleveland (source : www.nbrti.org)

Conclusion : Tous les systèmes TCSP ne présentent pas les même « garanties constructeurs » sur le long terme. Le tramway sur fer et les BHNS basés sur des modèles de bus relativement classiques sont des solutions éprouvées et largement diffusées en France et en Europe. Il en résulte une concurrence et des économies d'échelle favorables à sa diffusion. Les nouveaux systèmes guidés sur pneus complets « clef en main » reposent souvent sur un unique constructeur (Lohr, Bombardier, APTS). Alors que le TVR est quasiment abandonné par Bombardier, Translohr poursuit lentement son développement dans quelques pays cibles. En ce qui concerne le Phileas, il n'est pas à ce jour homologué en France et il éprouve des difficultés de mise en œuvre aux Pays-Bas et en Turquie. Plus simple et moins coûteux, la solution guidage optique « en option » intéresse les constructeurs et pourrait poursuivre son développement.

Quel que soit le matériel (tramway ou bus), les recherches mettent aujourd'hui largement en avant les questions de motorisation et de suppression des lignes électriques de contact, pour lequel le tramway sur fer possède un temps d'avance, notamment avec les systèmes d'alimentation par le sol. En ce qui concerne le tramway sur pneu (Translohr) ou le bus, leur circulation complète « sans fil » renvoie sans doute à un horizon plus lointain que les projets toulonnais.

3.7 Conclusions sur le choix du système TCSP à Toulon

L'expertise confirme la pertinence du choix initial du tramway, qu'il soit sur fer, ou sur pneus (Translohr) avec une mise en service la plus rapide possible. Cette conclusion se base notamment sur le besoin d'un système capacitif pour répondre à la demande estimée sur la 1ère ligne de TCSP et sur une analyse économique sommaire sur 30 ans. La mise en place d'un BHNS en lieu et place d'un tramway pourrait créer des problèmes d'exploitation qui engendreraient des surcoûts et une insatisfaction des usagers.

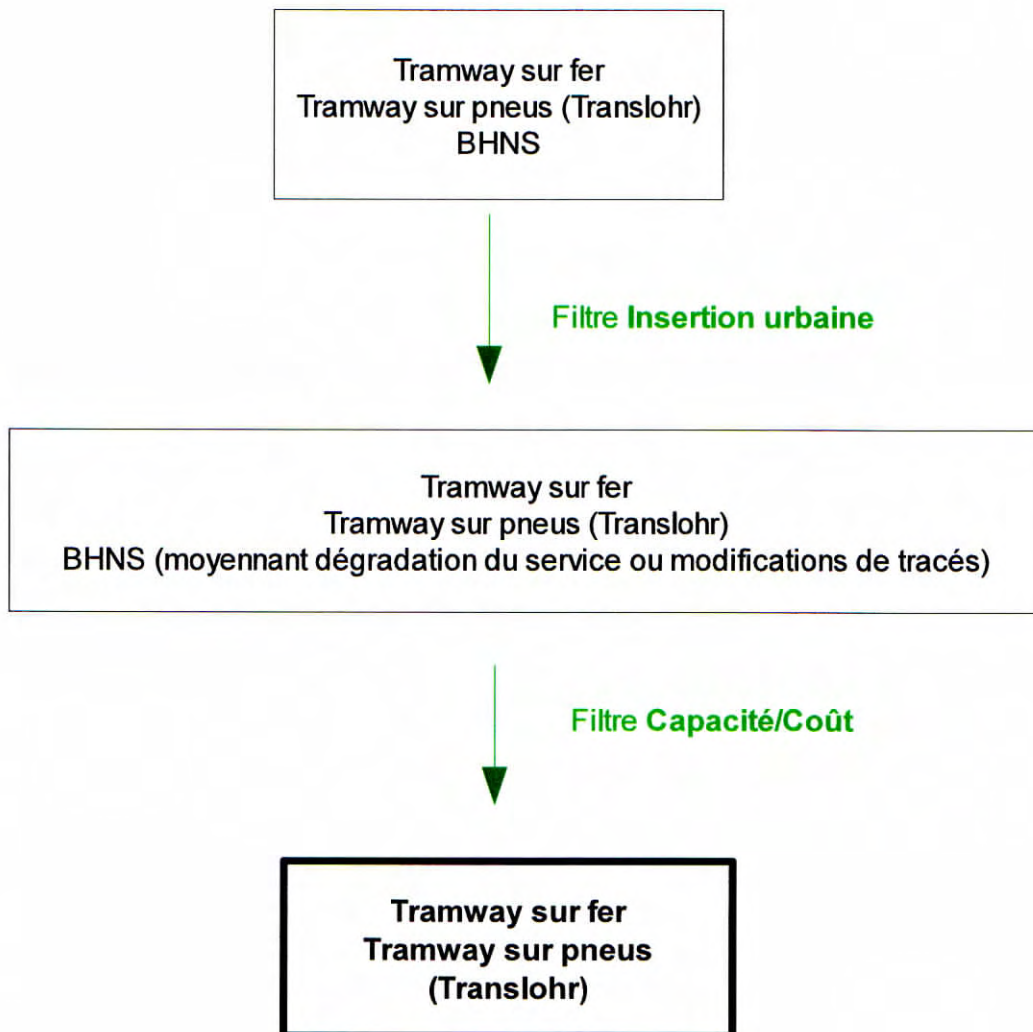
Cette analyse qui permet d'éclairer les techniciens sur des notions techniques ne se substitue pas à la réalisation d'une véritable étude sur le sujet. Pour confirmer leurs conclusions, les auteurs recommandent notamment la réalisation d'une étude d'insertion approfondie et une analyse économique sur 30 ans plus poussée, pour comparer les différents scénarios.

Si le choix du tramway était confirmé, le choix fer/pneu (Translohr) reposerait ensuite sur des questions liées :

- à l'insertion urbaine (plus aisée avec le Translohr),
- aux pentes (limité à 8 % pour le tramway sur fer¹⁴)
- au confort (roulement fer sur fer plus confortable)
- aux choix des matériaux de surface (possibilité d'engazonnage total ou d'utilisation de pavés avec le tramway sur fer – problème d'orniérage avec le Translohr)
- à la viabilité industrielle (un seul constructeur pour le Translohr : aucune concurrence pour le renouvellement de matériel ou pour la maintenance)

Les retours d'expérience sur le projet de Clermont-Ferrand semblent confirmer que les coûts d'investissement et d'exploitation du Translohr se situent au même niveau que ceux d'un tramway sur fer.

¹⁴ Il existe des tramways capables de gravir des pentes supérieures mais nécessitant la motorisation des $\frac{3}{4}$, voire de la totalité des essieux (faibles séries, surcoûts importants,...)



4. Que répondre à la commande politique (phasage du projet avec mise en service du tramway vers 2020) ?

L'expertise technique des pages précédentes met en évidence la pertinence du choix du tramway (sur fer ou sur pneus). Le report de sa mise en service au-delà de 2014 ne semble pas se justifier, tant techniquement qu'économiquement. En effet, Le passage par le BHNS avant la mise en place d'un tramway pourrait se révéler délicat.

Toutefois, à la demande des techniciens de Toulon Provence Méditerranée, le Certu et le Cete proposent leur avis sur une commande politique qui comprend les caractéristiques suivantes :

- phasage du projet avec mise en service d'un BHNS (éventuellement guidé) de 2014 à 2020
- passage à un mode tramway sur pneus, sans rupture de service (modification et mise en place du système de nuit).

4.1 Des contraintes liées à l'insertion du matériel bus qui remettent en cause le haut niveau de service attendu

4.1.1 En stations

Il est important de souligner que la réglementation relative à l'accessibilité est différente suivant si le système de transport est guidé (lacunes horizontales et verticales inférieures à 5 cm) ou non (rampe avec une pente inférieure à 12 %).

Les stations seront réalisées en respectant le cahier des charges « accessibilité Bus » de l'agglomération toulonnaise et la hauteur des quais sera donc de 23 cm, ce qui reste compatible avec le Translohr (hauteur du plancher : 25 cm) mais pas avec les tramways sur fer actuellement en service (hauteur du plancher d'environ 30 cm).

Pour ce qui est de la largeur des stations, ce même cahier des charges préconise une largeur de 2.5 m ce qui est insuffisant pour un mode de type tramway ou BHNS. Les coupes des stations du projet prévoient des largeurs de quais utilisables généralement de l'ordre de 2.7 m ce qui est également insuffisant (3m préconisé).

La distance entre les quais, dans les stations « classiques » (c'est à dire hors station en site banal) est de l'ordre de 5.5 m ce qui est insuffisant pour une utilisation en bus (besoin de plus de 6 m).

Il serait donc souhaitable d'élargir aussi bien les quais (ou revoir l'aménagement de la station) et l'espace entre ceux ci. En effet, l'utilisation des stations de façon alternative (jamais deux véhicules en stations en même temps) semble irréaliste, peu optimale notamment du point de vue de la capacité, voire dangereuse.

4.1.2 En section courante

Pour ce qui est de l'espace disponible, il devrait être possible sur pratiquement 90 % du linéaire de faire circuler un bus articulé sur la plate-forme tramway en utilisant une partie du trottoir¹⁵ jouxtant celle-ci et en revoyant dans certains cas la position des poteaux supports de ligne aérienne de courant. En ce qui concerne l'insertion du bus bi-articulé, il est nécessaire d'avoir plus d'informations sur ses caractéristiques cinématiques pour pouvoir conclure.

Certaines zones devraient être plus problématiques notamment au niveau des courbes de faible

¹⁵ D'après les plans, les trottoirs ont une hauteur équivalente à la plate-forme du tramway

rayon. Après une première analyse rapide, les planches 04.12, 05-12--> 06.02 et 08.11 nécessiteraient la mise en place d'un alternat dont la longueur maximale serait de l'ordre de 500 à 600 m ce qui limiterait « physiquement » la fréquence à 1 bus toutes les 2-3 min. Le guidage pourrait éventuellement améliorer l'insertion dans certaines courbes mais il serait quand même nécessaire de mettre en place des section de voie unique.

4.2 Des contraintes réglementaires qui laissent entrevoir des difficultés techniques et administratives

De la même façon que pour la réglementation sur l'accessibilité des PMR, la réglementation relative à la mise en place d'une ligne de bus classique et d'une ligne de transport guidé n'est pas la même. Ainsi, il est nécessaire, pour pouvoir passer d'un système bus à un système lourd sans rupture de service, avec des travaux de nuit (donc assez légers) d'avoir anticipé cette réglementation. Ceci est notamment le cas pour la procédure d'autorisation de travaux avec un dossier préliminaire de sécurité accompagné d'avis d'experts qui doit être approuvé par les service de l'État. En l'état actuel et suite à l'analyse rapide des plans, un certain nombre de remarques devraient être formulées par les experts notamment pour ce qui est de l'aménagement urbain, ce qui pourrait exiger des modifications non négligeable des aménagements.

Voici une liste non exhaustive de points qui pourraient poser problème :

- Le carrefour de la planche 04.13 est peu lisible et devrait être amélioré ;
- Sur le secteur 5, la géométrie des raccords des voies coupant la plate-forme est a revoir ;
- L'ensemble des giratoires du projet devra être conforme au guide de conception du STRMTG « Franchissement d'un carrefour giratoire par une ligne de tramway » et leur pertinence analysée (voir notamment planches 7.06 et 7.08) ;
- L'aménagement de la planche 7.11 est à revoir (intersection trop proche du giratoire qui implique des risques importants de remonteée de file sur le plate-forme ;
- La position de la plate-forme sur le secteur 8 (espace de 5 mètres entre la voirie et la plate-forme) n'est pas optimale et pose des problèmes dans certaines intersections notamment sur les planches 08.05 (aménagement à revoir entièrement), 08.06 et 08.07.

4.3 Quelles solutions envisageables ?

Le projet déclaré d'utilité publique n'a pas été envisagé avec une circulation de bus en phase intermédiaire. Une première analyse montre que la mise en œuvre d'un BHNS en 1ère phase serait possible (mais non recommandée), moyennant des évolutions des infrastructures non négligeables et une diminution du niveau de service (régularité, confort et image) qui engendreront des problèmes d'exploitation sur un système à la limite de capacité et véhiculeront une mauvaise image.

En tenant compte de ces difficultés, l'éventuelle « phase 1 BHNS » pourrait être réalisée avec des bus articulés classiques récents (avec une livrée spécifique), auxquels seraient ajoutés des bus bi-articulés aux heures de pointe. Cette configuration permettrait de limiter les investissements et les dépenses d'exploitation¹⁶ et les risques liés à la mise en service de technologies complexes (Phileas notamment), pour une phase qui restera perçue et ressentie par la population comme « insuffisante ». Par ailleurs, cette solution serait largement compatible avec les choix qui seraient effectués pour la 2ème ligne en gardant la possibilité de réaffecter les bus du BHNS sur le reste du réseau (ligne 2 de TCSP ou autre si choix d'un système TCSP différent). Une aide à l'accostage en station optionnelle de type « guidage optique » ou « galets » pourrait être envisagée moyennant

¹⁶ Les coûts d'exploitation du Busway de Nantes (système non guidé) s'élèvent à moins de 4€/km

toutefois un surcoût qu'il faudrait rentabiliser dans le temps, et une mise en œuvre plus complexe notamment du point de vue de la réglementation.

Si la solution présentée est envisageable, elle n'est cependant pas recommandée. Le passage par le BHNS avant la mise en place d'un tramway ne semble pas pertinent :

- Il ne présente pas nécessairement d'intérêt économique sur le long terme, notamment dans le cas d'une solution coûteuse et sans garantie de type Phileas (voir partie 3.5)
- Il aurait un impact négatif sur l'image de l'agglomération et le service aux usagers, avec un système surchargé rapidement (voir partie 3.3), sans compter les risques technologiques possibles (voir partie 3.6).
- La multiplication des travaux aurait un impact plus fort sur la qualité de service et la perception par la population

5. Références bibliographiques

Publications

Rabuel, S., *Bus à haut niveau de service, du choix du système à sa mise en oeuvre*, Ouvrage collectif, Certu, Gart, Inrets, Cete, UTP, Certu, France, publication prévue pour novembre 2009

Gouin, T., Rabuel, S., Varnaison-Revolle, P., *Planification urbaine et tramway en France, Mobilité et Transports : Le Point sur*, No9, Certu, France, 2009.

Frey, H., *Expertise selon l'ordonnance du 8 mars 2005*, Tribunal Administratif de Nancy, 30 octobre 2008

Certu, Cete de Lille, *Transports collectifs urbains, évolutions sur la décennie 1995-2006*, Lyon, Certu, 70 p., 2008.

Deloitte, *Efficacité énergétique, émissions de CO2 et autres émissions gazeuses spécifiques des modes de transports*, Ademe, 150 p., 2008

Faire d'Arcier, B., *Prospective pour un financement durable des transports publics urbains*, Let, CNRS, Meddat, Predit, septembre 2008

Certu, Cete de Lyon, *Panorama des villes à transports publics guidés hors Ile-de-France, situation 2005*, Lyon, Certu, 53 p., 2007 (en téléchargement sur le site web du Certu).

Babilotte, C., Rambaud, F. (editors), *Bus à haut niveau de service, Concept et recommandations*, Ouvrage collectif, Certu, Gart, Inrets, UTP, Certu, Lyon, France, 111 p., 2005.

Certu, *Les modes de transports collectifs urbains, Éléments de choix par une approche globale des systèmes*, Lyon, Certu, 196 p., 2004.

Certu, *Evaluation des transports en commun en site propre, Recommandation pour l'évaluation socio-économique des projets de TCSP*, Lyon, Certu, 144 p., 2002.

Certu, *Guide d'aménagement de voirie pour les transports collectifs*, Lyon, Certu, 268 p., 2000.

Certu, *Évaluation des transports en commun en site propre – Analyse des restructurations de réseaux de transport public liées à la mise en service d'un transport en commun en site propre sur cinq agglomérations françaises*, rapport d'étude CERTU, Mai 2000.

Soulas, C., Bimodalité énergie appliquée aux transports collectifs urbains : captation / énergie embarquée, In *Revue Générale de l'Electricité*, 2000.

Certu, *Panorama des villes à TCSP hors Ile-de-France, situation 1998*, Lyon, Certu, 1999.

Textes législatifs et réglementaires

Code de la route : Art. R. 311-1, R. 312-10 et R. 312-11

Loi n°82-1153 du 30 décembre 1982 d'orientation des transports intérieurs (Loti)

Décret n° 2003-425 relatif à la sécurité des transports publics guidés

Arrêté du 2 juillet 1982 relatif aux transports en commun de personnes

Arrêté du 24 novembre 1967 relatif à la signalisation des routes et des autoroutes, version consolidée prenant notamment en compte les modifications apportées par l'arrêté du 10 avril 2009



Villes à TCSP urbains en service

Données au 01 janvier 2009 (source : CERTU)



- | | |
|---|---|
| ● Métro lourd : 49 km province + 212 km IdF | ● Métro léger (VAL) : 81 km province + 7 km IdF |
| ● Tramway : 361 km province + 32 km IdF | ● "Tramway sur pneus" : 14 km province |
| ● BHNS guidé : 39 km province | ● BHNS non-guidé : 32 km province + 20 km IdF |

Note :

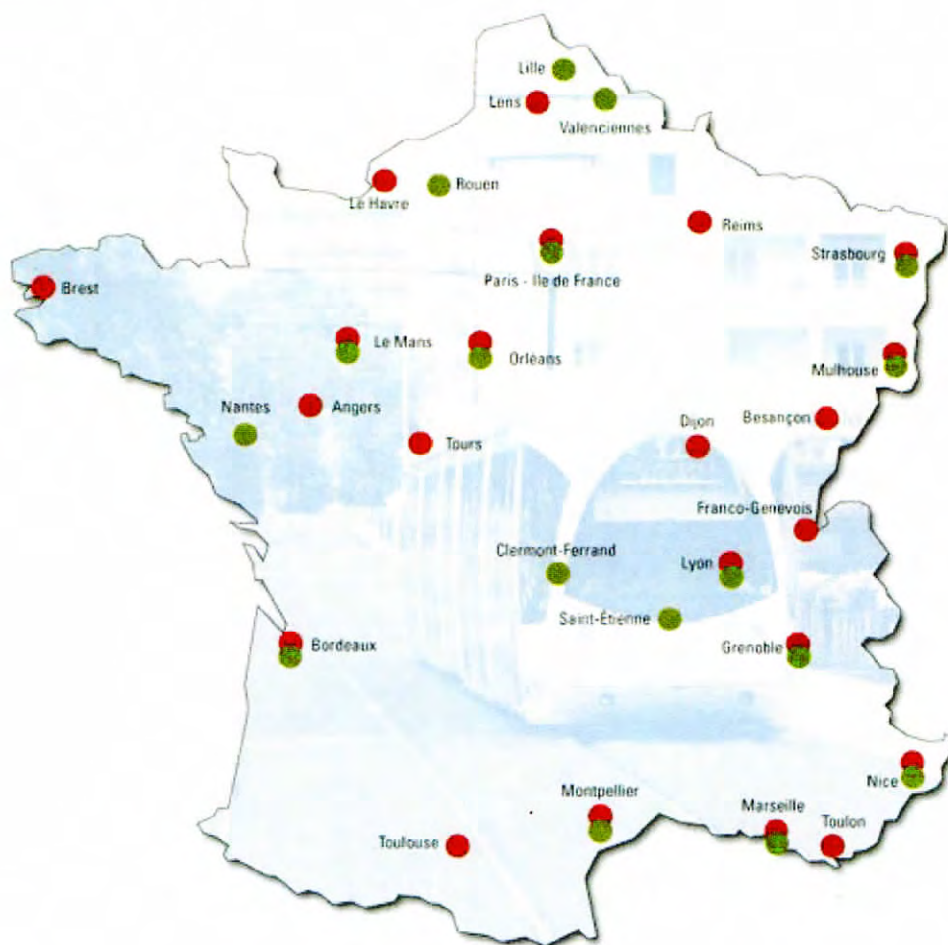
- Les longueurs mentionnées correspondent aux longueurs des infrastructures en site propre
- Les ferries de Caen, Le Havre et Lyon ne sont pas intégrés sur la carte





Villes à Tramway

Données au 01 mai 2009 (source : CERTU)



● Tramway en service : 375 km province + 32 km IdF

● Tramway en projet : 278 km province + 74 km IdF

Nota

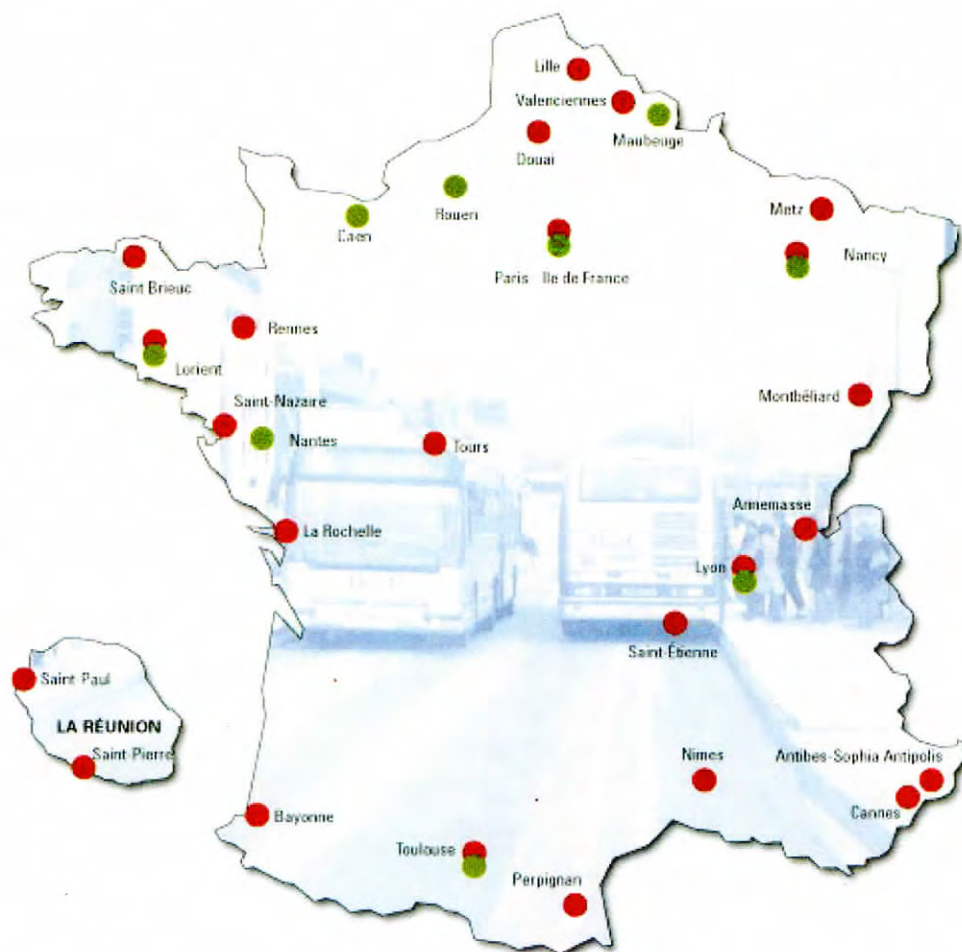
- Les longueurs mentionnées correspondent aux longueurs des infrastructures en site propre
- La liste des projets a été arrêtée à partir des dossiers présentés dans le cadre de l'appel à projets "transports urbains" issu du Grenelle de l'environnement.





Villes à BHNS

Données au 01 mai 2009 (source : CERTU)



● BHNS en service : 71 km province + 20 km IdF ● BHNS en projet : 203 km province + 31 km IdF

Note :

- Les longueurs mentionnées correspondent aux longueurs des infrastructures en site propre.
- La liste des projets a été arrêtée à partir des dossiers présentés dans le cadre de l'appel à projets "transports urbains" issu du Grenelle de l'environnement.

