Entre villes et régions

Convergences pour un matériel tram-train

2702

CLIENTS :

GART
Groupement des Autorités Responsables de Transport
17, rue Jean-Daudin
F-75015 Paris
Tél. : 00 33 1 40 56 30 60
Fax : 00 33 1 45 67 80 39

UTP
Union des Transports Publics
5, rue Aumale
F-75009
Tél. : 00 33 1 48 74 63 51
Fax : 00 33 1 44 63 06 64

SNCF
Direction Déléguée au Périurbain
209-211, rue de Bercy
Tour Paris Lyon
F-75012 Paris
Tél. : 00 33 1 53 25 70 54
Fax : 00 33 1 53 25 80 84

MANDATAIRES :

TransportTechnologie-Consult Karlsruhe GmbH (TTK)
Gerwigstraße 53
D-76131 Karlsruhe
Tel. : 0721/62503-0
Fax : 0721/62503-33

SYSTRA
5, avenue du Coq
F-75009 Paris
Tél. : 00 33 1 40 16 61 00
Fax : 00 33 1 40 16 61 04

PARTICIPANTS À L'ÉTUDE :

Jean-Paul BALENSI
Alain GAUDRY
Marc PEREZ
Karim ZIBAT

Un groupe de travail a été mis en place sous l'égide du GART et de l'UTP et en liaison avec la SNCF afin d'analyser les caractéristiques en terme de matériel des différents projets de tram-trains et la faisabilité de démarches industriellement convergentes.

NOTE DE SYNTHÈSE

NOTE DE SYNTHÈSE

1. Introduction

L'interconnexion physique des réseaux tramways et ferroviaires est basée sur le principe d'augmentation de l'offre ferroviaire entre les zones périurbaines et les centres villes sans rupture de charge, avec des coûts d'investissement et d'exploitation réduits. Cette interconnexion s'obtient grâce à la circulation de rames tramway sur le réseau ferroviaire.

L'expérience de Karlsruhe en Allemagne a mis en évidence les deux avantages clefs de ce type d'exploitation : succès auprès de la clientèle (400 % d'augmentation en un an) et rationalisation des coûts d'exploitation.

Aujourd'hui, à la suite de Karlsruhe et de Sarrebrück, de nombreuses agglomérations européennes réfléchissent aux possibilités de développer des interconnexions physiques entre leur réseau ferroviaire et leur système de tramway existant ou à créer. Plusieurs agglomérations françaises sont ainsi engagées dans l'étude de projets de tramway d'interconnexion (on parlera par la suite de "tram-train") pour des réalisations à l'horizon 2005.

Il existe aussi d'autres projets qui envisagent, en première phase, un renforcement ou une amélioration de l'offre ferroviaire tout en réservant la possibilité d'interconnecter les réseaux ferroviaire et tramway dans une phase ultérieure.

Chacun de ces projets a pour point commun le faible besoin de rames tram-trains, de l'ordre d'une dizaine d'éléments, inférieur aux séries habituelles de tramway ou de matériel ferroviaire. Le redéveloppement d'un matériel roulant spécifique à chaque projet n'est pas une hypothèse d'école vu la diversité des choix techniques opérés sur chaque réseau tramway ; il aurait pour conséquence d'induire des coûts unitaires importants diminuant ainsi la pertinence économique des projets.

Le potentiel de croissance de la pertinence du transport public vis à vis de la voiture particulière que recèle l'interconnexion des réseaux risque alors ne pas être atteint.

2. Diversité des matériels et baisse des prix de production

Jusqu'à récemment, aborder ce sujet aurait signifié implicitement poser la question, d'un matériel standard, choix déjà écarté par les Autorités Organisatrices.

Aujourd'hui, avec **la modularité des matériels,** il n'en va plus de même : on peut imaginer une démarche :

- qui diversifie, selon le souhait des Autorités Organisatrices les éléments qui doivent marquer la spécificité du site auquel le matériel est destiné : design, aménagements intérieurs, confort, dimensionnement physique,
- qui permette de standardiser les équipements de base : structure de caisse, bogies, équipements électriques, chaîne de traction, et donc obtenir une baisse des prix de production.

Conjuguer diversité et baisse des prix de production est donc un objectif aujourd'hui réaliste, confirmé par les progrès récents de l'industrie ferroviaire.

L'économie qui peut en résulter provient de :

- l'amortissement des coûts de développement et des coûts fixes de fabrication sur un nombre plus important de rames,
- la possibilité de faire fonctionner de façon plus continue les chaînes de fabrication.

Une diminution potentielle de 25 % du prix du tram-train par rapport à son prix actuel (de l'ordre de 15 MF sur les premières références), a été considérée comme un ordre de grandeur réaliste.

A condition toutefois :

- de savoir dégager un "plus grand dénominateur" entre les réseaux,
- de mettre en œuvre des procédures permettant vraiment d'aboutir à une réelle continuité de fabrication.

Mais l'enjeu va largement au-delà du prix, c'est la capacité de choix à terme des Autorités Organisatrices, tant en matière de définition des réseaux, que de choix des constructeurs qui est en jeu.

Telle est l'origine du travail d'investigation confié par le GART, l'UTP et la SNCF à SYSTRA et TTK.

3. Vers un dénominateur commun

Après analyse des informations provenant des exploitants et des Autorités Organisatrices des agglomérations de Strasbourg, Mulhouse, Ile-de-France, Lyon, St-Etienne, Grenoble, Nantes, Orléans, Valenciennes, Montpellier, Bordeaux et de la SNCF, ont été

définies les principales caractéristiques communes de base du matériel tram-train.

1) **La modularité** peut jouer à plein sur les éléments suivants :
   - le design à travers notamment le "nez" des rames,
   - le dimensionnement : longueur, largeur, capacité :
   - longueur variable de 29,5 m à 37,5 m en fonction des longueurs de quais des sites concernés,
   - largeur variable de 2,55 à 2,65 m,
   - capacité variable : à partir de 200 places par rame simple sachant que la longueur des trajets périurbains implique une valeur recommandée de 40 % de places assises.
   - l'aménagement intérieur des rames : éléments de confort, couleurs, **design** intérieur, disposition des sièges, aménagements spécifiques.

2) Des **éléments de convergence** peuvent être trouvés au niveau :
   - de la structure de caisse,
   - de la chaîne de traction,
   - des équipements électriques,
   - des bogies,
   - des attelages automatiques,

   qui représentent une part significative du coût d'une rame.

3) Des questions spécifiques se posent pour les **tram-trains** :
   - en ce qui concerne la lacune entre le matériel et les quais ferroviaires, celle-ci peut être comblée avec une palette marchepied amovible,
   - en ce qui concerne la différence de hauteur entre le plancher et les quais, une hauteur de plancher de 350 mm au niveau des pas de porte offre une bonne accessibilité (une solution devant être trouvée pour garantir l'accessibilité aux quais ferroviaires de 550 mm),
   - les performances d'accélération/décélération sont capitales pour ce type de desserte et doivent être élevées,
   - une vitesse maximum de 100 km/h suffit ; elle ne doit pas être dépassée sous peine de dégrader les performances d'accélération/décélération,
   - en matière de capacité, une investigation approfondie sur le cas de Strasbourg a montré l'intérêt à constituer des rames couplables en unités multiples, compte tenu de l'intensité des pointes de trafic en périurbain,
   - une alimentation électrique bicourant (750 V/25 KV, 750 V/1500 V, 1500 V/25 KV) est à prévoir, voire tricourant (750 V/25 KV/15 V) pour les réseaux transfrontaliers,

- les matériels doivent être compatibles avec les rails ferroviaires classiques et les rails à gorge profonde,
- les matériels doivent être compatibles avec les normes de sécurité ferroviaire. Les études techniques en cours et les nouvelles réglementations permettront de construire un matériel léger de type tramway doté des équipements de sécurité active et passive requis.

De telles caractéristiques pourraient ainsi permettre

- à plusieurs projets d'obtenir un prix inférieur à 15 MF la rame,
- de faire converger les constructeurs vers des produits ayant un maximum de caractéristiques communes, y compris au niveau européen. Ceci aurait pour avantage de faciliter l'interopérabilité des réseaux et l'interchangeabilité des rames et éviterait la dépendance à un seul constructeur.

Afin d'amplifier le volume des commandes susceptibles d'être concernées par une telle démarche, on s'est interrogé sur l'utilisation possible de matériels de type "tram-train" pour des utilisations autres que l'interconnexion proprement dite.

Ainsi, ce matériel pourrait également être utilisé dans deux situations :

- celle, évidente, de dessertes régionales interconnectables à terme avec un tramway urbain. Il s'agirait alors d'une anticipation (réalisée notamment à Karlsruhe) visant à la mise en place d'une desserte ferroviaire régionale par tram-trains en première phase,
- l'utilisation de matériels tram-trains pour des dessertes qui n'ont pas vocation à être interconnectées. En effet, ces matériels permettraient à la SNCF de remplacer sur certaines lignes régionales des matériels existants peu adaptés ou d'amortir des séries atteignant leur limite d'utilisation et à profiter de cette opportunité pour y substituer des matériels tram-train.

Ces possibilités ont été prises en compte afin de cerner les volumes de matériels qui pourraient être concernés par une telle démarche.

Compte tenu de ces éléments, le marché potentiel a été estimé entre 110 et 250 rames à l'horizon 2005. Le coût d'une rame d'interconnexion est aujourd'hui estimé entre 15 et 16 MF pour des séries de 10 à 20 unités. Il est probable qu'une commande concernant

100 rames permettrait d'abaisser ce coût unitaire à un prix se rapprochant de 12 MF la rame.

4. Modularité et adaptation à chaque contexte

La définition commune d'une architecture de rame permet donc d'envisager rapidement la mise au point d'un cahier des charges type, suivi d'un appel d'offres groupé ou, appels d'offres coordonnés.

Ces appels d'offres regroupés ou coordonnés consisteraient en un achat simultané par plusieurs Autorités Organisatrices et/ou exploitants d'une série de rames adaptées à plusieurs projets différents. Grâce à la modularité, les Autorités Organisatrices ou exploitants conserveraient la possibilité d'acquérir un matériel adapté à leurs besoins spécifiques tout en bénéficiant d'un prix d'achat réduit et attractif.

5. Conclusion

Ainsi, il paraît possible de dégager des éléments de convergence industrielle entre des matériels destinés à des utilisations différentes, à la fois grâce aux progrès technologiques (modularité, composants électriques, informatique embarquée,...) et à une volonté forte de travail en commun.

Des propositions concrètes ont ainsi été formulées. Ces propositions, laissant la place à une large palette de solutions, doivent ainsi permettre de faciliter l'émergence des projets de tram-train optimisant leur équilibre économique.

Ce type de démarche n'est par ailleurs pas étranger aux réflexions menées au niveau européen dans le cadre du programme MARIE.

Il appartient à chaque acteur et en particulier aux Régions et aux Autorités Organisatrices urbaines de se déterminer dans le contexte qui est le leur.

SOMMAIRE

GRAPHIQUES - TABLEAUX

ABRÉVIATIONS

AO	Autorité(s) Organisatrice(s)
AOU	Autorité(s) Organisatrice(s) urbaine(s)
BOSTRAB	Straßenbahn-Bau-und Betriebsordnung (Normes tramway allemandes)
DDPU	SNCF, Direction Déléguée au Périurbain et au Bassin Parisien
EBO	Eisenbahn-Bau-und Betriebsordnung (Normes ferroviaires allemandes)
GART	Groupement des Autorités Responsables de Transport
HP	Heure de Pointe
KVB	Contrôle de Vitesse par Balise
IDF	Ile-de-France
infra.	Infrastructure
L	Lyon
OD	Origine-Destination
PN	Passage à Niveau
S	Strasbourg
SAE	Système d'Aide à l'Exploitation
Tps.	Temps
US	Unité Simple
UM	Unité Multiple
UTP	Union des Transports Publics
Voy.	Voyages
vmax.	Vitesse maximale

INTRODUCTION

CHAPITRE 1

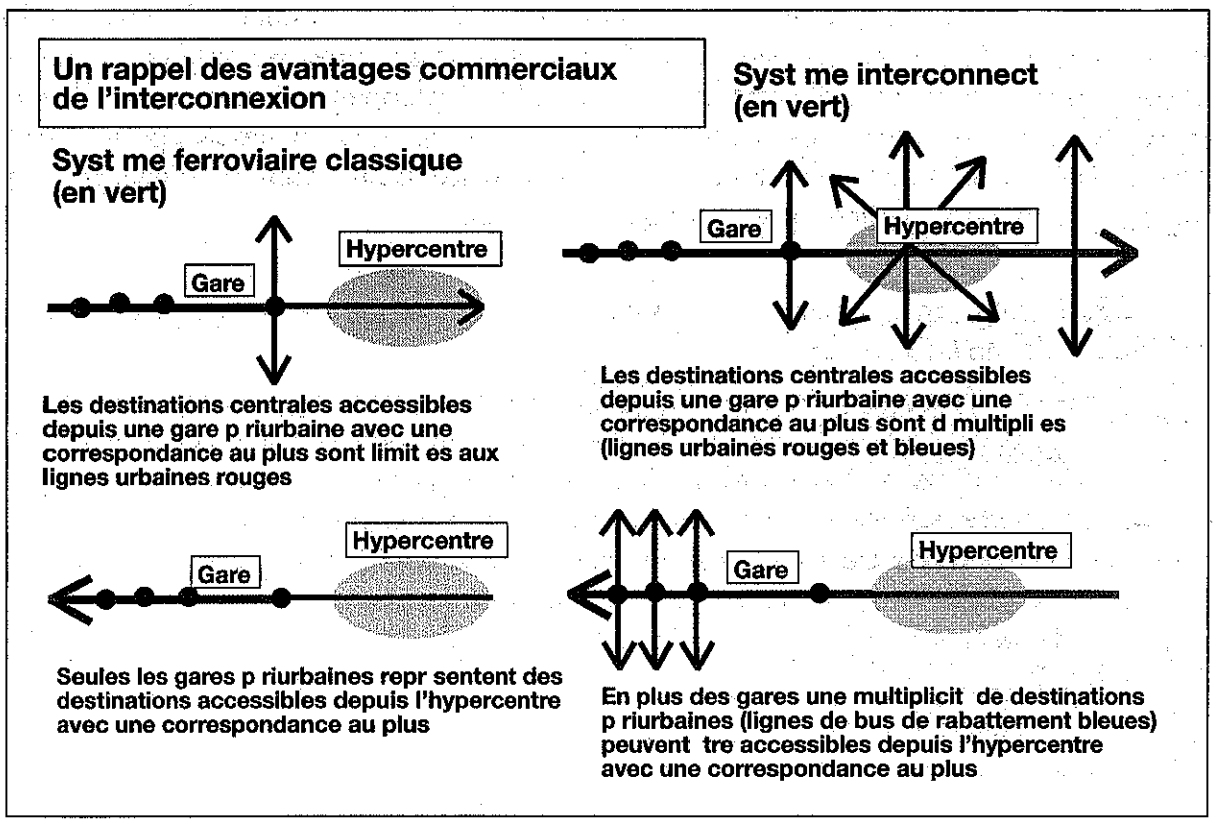
1. INTRODUCTION

1.1. Interconnexion et matériel roulant

L'interconnexion physique des réseaux tramways et ferroviaires est axée sur une augmentation de l'offre ferroviaire entre les zones périurbaines (voire au delà) et les centres villes sans rupture de charge, moyennant des coûts d'investissement et d'exploitation réduits, grâce à la circulation de rames tramway sur le réseau ferroviaire. Développé à titre de projet pilote à Karlsruhe depuis 1987 et concrétisé par l'ouverture de la ligne de Bretten en 1992, ce principe a conduit après un an d'exploitation à une augmentation de la demande ferroviaire de + 400 %. Ce succès, dépassant de loin tout pronostic, a conduit l'agglomération de Karlsruhe à développer le principe de l'interconnexion à la plupart de ses relations ferroviaires périurbaines et régionales de proximité (circulation mixte sur 350 km, 6 lignes DB avec 3 points d'interconnexion Est, Sud, et Ouest). L'expérience de Karlsruhe a mis en évidence les deux avantages clefs de ce type d'exploitation : succès auprès de la clientèle et rationalisation des coûts d'exploitation.

Aujourd'hui, à la suite de Karlsruhe (et de Sarrebrück qui a vu une mise en service partielle de son tramway d'interconnexion en octobre 1997), de nombreuses agglomérations allemandes et européennes réfléchissent aux possibilités de développer des interconnexions physiques entre leur réseau ferroviaire et leur système de tramway existant ou à créer.

Graphique 1 : Rappel des avantages commerciaux de l'interconnexion.



En France, l'intérêt des AO pour le principe de l'interconnexion est croissant. Afin d'améliorer d'une façon significative leur offre de transport périurbaine, plusieurs agglomérations françaises sont ainsi engagées dans l'étude de projets de tramway d'interconnexion pour des réalisations à l'horizon 2005.

Plusieurs études (en particulier celles concernant des projets dans les agglomérations de Rouen et de Nantes) ont permis de montrer qu'il existe en fait deux types de tramways d'interconnexion, classification reprise par l'étude publiée par le GART en 1998 :

- Une première catégorie de projets (type 1), caractérisés par des prolongements limités de lignes urbaines sur des lignes ferroviaires très peu ou pas utilisées par des circulations ferroviaires classiques. Ces lignes pourront être exploitées moyennant des adaptations mineures des rames urbaines existantes ainsi que par des aménagements adéquat de l'infrastructure ferroviaire (ex. : Cologne-Bonn ou Kassel-Baunatal en Allemagne, projet d'Orléans ligne 2) ;
- Toutefois, la plus grande partie des projets potentiels identifiés appartiennent à une deuxième catégorie (type 2) caractérisée par l'exploitation de lignes ferroviaires en mixité avec des circulations ferroviaires classiques (ex. : région de Karlsruhe, Sarrebrück, projet de la région de Kassel en Allemagne, Genève-La Plaine en Suisse). Pour cette seconde catégorie de projets, l'utilisation d'un matériel bimode (que nous appellerons par la suite tram-train) type Karlsruhe, Sarrebrück, adapté à la circulation sur les réseaux ferroviaires et tramway sera obligatoire.

Tous les projets appartenant à cette deuxième catégorie ont pour point commun le besoin d'un nombre de rames tram-train relativement faible (du moins dans leur première phase, environ une dizaine d'éléments par projet). Le développement, pour chacun de ces projets, d'un matériel roulant spécifique répondant au plus près aux contraintes particulières rencontrées, risque fort d'induire des coûts unitaires importants qui pourraient diminuer voire mettre en question la pertinence économique des projets.

Pour cela, on conçoit les avantages d'une convergence des caractéristiques principales du matériel roulant :

- A court terme, pour l'horizon 2003-2005, l'enjeu de la convergence est d'obtenir une (ou deux) première(s) série(s) commune à plusieurs projets à un prix inférieur à 15 MF la rame. Cet enjeu est particulièrement important pour l'amorce de projets institutionnellement complexes, voire fragiles, et qui pourraient être facilités par l'existence concrète d'un matériel tram-train à un coût accessible et adapté aux contraintes françaises (celui-ci pourrait être utilisé en démonstration comme le matériel de Karlsruhe en Suisse en 1993 ou le matériel de Sarrebrück à Kassel en 1998) ;
- A plus long terme, cet enjeu évolue. Il ne s'agit plus alors d'avoir une ou deux série(s) de matériel roulant identique(s) pour tous les projets, avec le risque de dépendance à un seul constructeur, mais de faire converger les constructeurs vers des produits

ayant un maximum de caractéristiques standard communes à tous les projets. Ceci aurait pour avantage de faciliter l'interopérabilité des réseaux et l'interchangeabilité des rames. Les collectivités ayant choisi un type de matériel standardisé seraient ainsi, pour leurs besoins ultérieurs (développements et/ou renouvellement), moins dépendantes d'un seul constructeur que celles ayant choisi un matériel adapté spécifiquement et uniquement pour leurs besoins et contraintes propres.

Cette démarche apparaît en certains points similaire avec la démarche Cavaillé sur le Tramway Français Standard (TFS) initiée dans les années 1970. Avec le recul, la démarche TFS a été beaucoup critiquée pour son ambition trop grande au regard d'une seule application à Nantes et d'un coût unitaire élevé. Pourtant, cette démarche a représenté une étape indispensable à l'amorce du retour du tramway dans des villes françaises (qui n'étaient pas prêtes a investir dans du matériel non national) et le tramway de Grenoble a pu finalement jouer, pour un temps, le rôle de Tramway Français Standard, appliqué à Rouen et en Ile-de-France. La similitude dans l'objectif d'amorcer un nouveau concept par un effort de standardisation trouve sa limite dans une différence déterminante entre la démarche TFS qui était nationale et la démarche ici présente qui vise un (ou deux) appel(s) d'offre ouverts à tous les constructeurs.

1.2. Objet de la mission

La Direction Déléguée au Périurbain de la SNCF (DDPU), qui apporte son expérience d'exploitant, est fortement impliquée dans tous ces projets. Elle a donc initialisé une démarche prospective, dans la continuité des actions déjà engagées précédemment par le GART et l'UTP (cf. document GART "éléments pour une définition du tramway d'interconnexion"), afin de définir les caractéristiques communes aux différents projets et d'évaluer les possibilités de standardisation du matériel tram-train.

Sous l'égide du GART et de l'UTP, la DDPU a mandaté SYSTRA et TTK, choisis pour leur compétence dans ce domaine, pour :

- Engager la démarche par des études et contacts dans les agglomérations concernées ainsi que chez les constructeurs ;
- Animer un groupe de travail dont le rôle est de suivre l'avance de la mission (liste des participants jointe en annexe) ;
- Etablir le rapport final de mission, objet du présent document.

L'objectif de cette mission est limité volontairement à la définition des caractéristiques élémentaires communes d'un matériel d'interconnexion. Plus précisément, il s'agit de voir dans quelle mesure il serait possible de trouver des caractéristiques voisines entre les matériels d'interconnexion nécessaires dans les projets "engagés" ou potentiels à l'horizon 2005. Cette recherche représente ainsi un premier pas vers un effort de standardisation du matériel tramway d'interconnexion. Elle pourra être utilisée comme guide par les différentes AO et/ou exploitants, éventuellement pour réaliser des appels d'offre en commun.

Cette première approche vient en amont et ne doit pas se substituer à l'élaboration

d'un cahier des charges fonctionnel qui précise plus finement les caractéristiques du matériel. Ce cahier des charges fonctionnel s'appuiera toutefois sur les résultats de cette approche avec l'objectif d'une base structurelle commune, déterminante pour les coûts du fait de possibles regroupements des commandes. La mise en œuvre de la fabrication modulaire (chaînes de fabrication adaptables et usage de profilés pour la structure) imposée par les exigences du cahier des charges fonctionnel permettra d'adapter à terme chaque commande au marché local tout en garantissant un impact favorable sur les prix.

1.3. Organisation du rapport

Un rappel sur les spécificités du matériel d'interconnexion nous permet d'expliquer pourquoi ce matériel ne peut pas être réalisé par une adaptation simple du matériel urbain. Ce rappel est suivi d'un recueil des contraintes techniques et géométriques existant sur les réseaux tramway considérés (largeurs d'entraxe en alignement droit et en courbe ? longueur des stations ? possibilités d'allonger les stations ? types de rails empruntés ? rayons de courbure ? pentes maxi ? alimentation électrique ? charge à l'essieu ? vitesse maxi ?). Par la suite sont étudiées les solutions permettant d'y remédier et un principe d'architecture général de rame maximisant les capacités offertes sous contrainte d'adaptabilité aux réseaux existants considérés est présenté. Le chapitre de conclusion traite des scénarios d'appels d'offre en commun envisageable pour l'horizon 2002-2005.

1.4. Avertissement

Pour mener à bien leur mission d'identification des contraintes et des besoins, les bureaux d'études ont été amenés à faire des hypothèses concernant des projets à l'étude qui pourraient potentiellement se concrétiser à l'horizon 2005, mais qui ne sont pas à ce jour validés par les AO. Ces hypothèses n'engagent bien entendu que les bureaux d'étude rédacteurs du rapport.

De même, certaines options techniques ont été considérées pour les besoins de l'étude. Il ne s'agit pas de privilégier telle ou telle solution plutôt qu'une autre, les propositions dans ce domaine devant émaner des constructeurs eux-mêmes au travers de leur réponse aux appels d'offre.

L'ambition est simplement de bien faire comprendre les contraintes techniques résultant de certains choix.

L'ENJEU DE CAPACITÉ DES CIRCULATIONS D'INTERCONNEXION

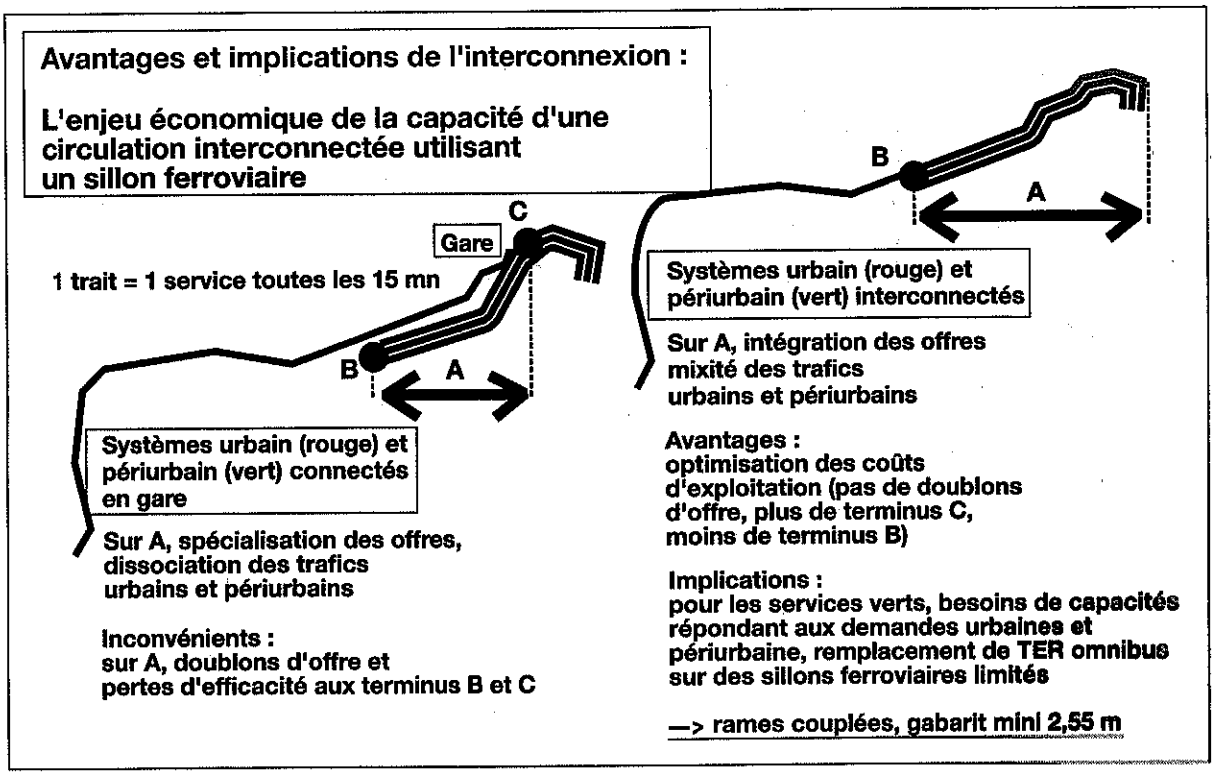
CHAPITRE 2

2. L'ENJEU DE CAPACITÉ DES CIRCULATIONS D'INTERCONNEXION

Tout d'abord, notre analyse se doit de spécifier l'enjeu de la capacité spécifique des rames utilisées pour des services interconnectés. Ceci permettra d'approfondir les éléments techniques et fonctionnels présentés dans le document du GART "éléments pour une définition du tramway d'interconnexion" et de dégager très concrètement des éléments d'architecture de rame.

Effectivement, il existe une différence forte entre l'exploitation des tramways urbains et celle des tramways d'interconnexion. Alors que l'exploitation des tramways urbains répond à la demande d'HP en jouant sur la fréquence des circulations, l'exploitation des tramways interconnectés obéit à un cadre et à des contraintes différentes qui amènent plutôt à répondre à cette demande d'HP par la capacité unitaire des circulations.

Graphique 2 : L'enjeu économique de la capacité d'une circulation interconnectée.



L'enjeu économique de la capacité des circulations interconnectées s'explique par les points suivants :

- La rentabilité des projets d'interconnexion est d'autant plus forte que ces projets permettent, sur une certaine section, de remplacer deux services distincts urbain (tramway) et ferroviaire (TER omnibus) par un seul service répondant aux deux types de besoins sans circulation supplémentaire, voire avec un nombre de circulations réduit. Lorsqu'une seule circulation doit en remplacer deux, on voit bien que l'enjeu de la capacité d'une circulation interconnectée est au cœur de la rentabilité des projets d'interconnexion (cf. graphique 2) ;
- La rentabilité des projets d'interconnexion est d'autant plus forte qu'ils utilisent au maximum des infrastructures ferroviaires bien situées, seuls ou en mixité avec d'autres trafics. Sur ces infrastructures ferroviaires, la possibilité de jouer sur la fréquence comme dans l'exploitation des tramways urbains est physiquement et économiquement contrainte : contraintes d'exploitation sur les voies uniques, contraintes d'insertion de sillons dans le cas de la mixité, contrainte de coût des sillons, d'autant plus élevé que la voie est demandée ;
- L'organisation de "rendez-vous" pour les rabattements des autocars sur les lignes interconnectées, particulièrement importante pour l'attractivité globale du système, n'est accessible que pour des fréquences ferroviaires restant modérées (20 à 30 mn). Pour des fréquences ferroviaires plus élevées, l'offre autocar ne peut plus suivre et l'on arrive à des discontinuités d'offre pénalisant la qualité des correspondances. Indépendamment des problèmes de sillons ou de voie unique, on conçoit là encore l'avantage, cette fois-ci commercial, d'une offre périurbaine capacitaire et cadencée plutôt que fréquente.

L'expérience Karlsruhe-Bretten montre ainsi qu'un résultat d'exploitation de lignes interconnectées équilibré ("petit équilibre d'exploitation") est atteignable. C'est un résultat qui implique toutefois la combinaison de coûts optimisés (exploitation avec des cadencements de 60 mn à 20 mn en fonction du niveau de la demande) avec un succès commercial fort (liaisons directes, cadencées, bons rabattements des lignes d'autocars).

Nous voyons donc qu'outre les problèmes de compatibilité avec le réseau ferroviaire, les enjeux de capacité liés directement à la rentabilité socio-économique de l'interconnexion impliquent une conception spécifique offrant un plus grand confort (temps de parcours plus élevés), un plus grand nombre de places assises (4 sièges de front, donc un gabarit élargi au maximum possible) et réservant la possibilité de coupler 2 (voire 3) rames aux heures de pointe.

Par ailleurs, une analyse effectuée dans le cas de Strasbourg illustre les avantages de rames courtes découplées aux heures creuses par rapport à l'option de rames longues (cf. annexe) :

- l'avantage économique des rames longues, réel pour une première phase de projet à dominante urbaine, s'estompe lorsque les projets se ramifient en région sur des lignes à niveau de trafics moins élevés ;
- autrement dit, l'avantage marginal d'extensions régionales de projets d'interconnexion peut devenir faible, voire nul, lorsqu'il s'agit de remplacer un autorail léger ou un autocar par une rame de 50 ou 60 m de long ;
- en fait, le principe de rames courtes apporte une grande flexibilité d'exploitation permettant de répondre au mieux à la demande tout en réduisant les circulations de masse à vide, d'optimiser le besoin de matériel, de faire des exploitations en fourche (ex. S3 Karlsruhe - Bruchsal – Menzingen / Odenheim), de réduire les coûts marginaux d'extension des services et enfin de limiter la gêne occasionnée en milieu urbain par des trains longs aux seuls moments où ces trains longs sont indispensables.

Ces éléments nous amènent à recommander pour la définition des rames tram-train une ***capacité minimum*** de :

- ***200 places en US avec 80 places assises (40 %) et 120 places debout (60 %)*** 4 personnes/m² (soit un taux de places assises légèrement supérieur à celui d'un tramway urbain où ce taux est de 30 % contre 70 % de places debout) ;
- ***400 places dont 160 assises pour des compositions doubles qui devront pouvoir s'insérer en hypercentre (type ligne C à Strasbourg).***

Dans des cas de tram-trains purement ferroviaires, ou de possibilités d'insertion plus aisées (rames plus longues), les capacités pourront être de :

- Une valeur maximum pour une circulation interconnectée de 600 places dont 240 assises dans le cas de compositions triples (90 m, quais de 80 m) pour des circulations en site urbain moins contraint ;
- 250 places en US avec une répartition de 100 places assises et 150 places debout (rames plus longues) ;
- 500 places dont 200 assises pour des compositions doubles de rames plus longues.

ANALYSE DES CONTRAINTES D'INSERTION SUR LES RÉSEAUX DE TRAMWAY EXISTANT ET IDENTIFICATION DE VALEURS COMMUNES

CHAPITRE 3

3. ANALYSE DES CONTRAINTES D'INSERTION SUR LES RÉSEAUX DE TRAMWAY EXISTANT ET IDENTIFICATION DE VALEURS COMMUNES

3.1. Recueil des informations

Dans un premier temps, notre démarche a consisté à recueillir des informations auprès des exploitants et Autorités Organisatrices en utilisant une grille multicritères. Cette grille reprend les contraintes existantes sur les réseaux tramways considérés pouvant avoir un impact sur le dimensionnement du matériel roulant. Tous les réseaux tramways à écartement normal, existants ou en projet, ont été considérés. St-Etienne, cas de tramway à voie métrique, a été toutefois ajouté à la liste du fait de possibilité de ligne interconnectée avec troisième rail en milieu urbain. L'analyse de projets d'interconnexion potentiels pour l'horizon 2005 a permis en outre de faire une première approximation du potentiel de rame qui pourrait être nécessaire à cette échéance :

Réseaux pouvant potentiellement donner lieu à une commande de matériel à l'horizon 2005 :

- Tramway de Strasbourg, projet Strasbourg-Bruche-Piémont ;
- Tramway de Mulhouse, projet vers Kruth et options de tramway régional ;
- Tramways d'Ile-de-France, projets sur St -Germain-en-Laye, Sénart-Evry, Aulnay-Bondy-Noisy-le-Sec ;
- Tramway de Lyon, options de tramway régional et/ou interconnecté ;
- Tramway de Grenoble, options de tramway régional et/ou interconnecté ;
- Tramway de Nantes, options de tramway régional et/ou interconnecté ;
- Tramway de St-Etienne, option de tramway régional ou interconnecté ;

Réseaux considérés mais a priori non susceptibles de donner lieu à une commande de matériel à l'horizon 2005 :

- Tramway de Rouen ;
- Tramway d'Orléans ;
- Tramway de Montpellier ;
- Tramway de Valenciennes ;
- Tramway de Bordeaux.

3.2. Tableau des contraintes et identification des valeurs communes

Les possibilités de valeurs communes à l'ensemble des réseaux peuvent être identifiées immédiatement au sein du tableau des contraintes pages suivantes.

Les fonctionnalités qui ont été reconnues à l'origine de la démarche comme communes à tous les projets et inhérentes à la définition d'un matériel tram-train (performances d'accélération et freinage, climatisation, éclairage, normes de bruits, charge à l'essieu...) n'apparaissent pas dans le tableau ci-après.

Tableau 1 : Contraintes liées aux infrastructures des réseaux tramway considérés et valeurs possibles

Tableau des contraintes liées aux infrastructures

	SITES					
	Strasbourg	Mulhouse	Aulnay-Bondy-Noisy-le-Sec	Lyon	Grenoble	Nantes
Entraxe mini. des voies en lignes	2,90 m	3,05 m	3,05 m T1, T2 : 3,10 m avec poteaux au milieux de 20 cm, 2,85 m sinon	L1, L2 : 2,85 m	L1, L2 : 2,80 m L3 : 3,05 m à réserver sur infrastructure en projet	3,20 m avec poteaux au milieux de 20 cm
Rayon min	25 m	25 m	25 m	25 m	25 m	25 m (30 m en exploitation)
Entraxe mini. des voies en courbes de 25m	3,40m	3,65m	3,75m	3,40m	3,73m	3,72m sans poteau au milieu
Gabarit maxi. en largeur possible (estimation TTK-SYSTRA)	au niveau des sièges : 2,60 ou 2,65 m des quais : 2,40 m	2,65 ou 2,65 m	2,65 m T1-T2 au niveau des sièges : 2,65 m des quais : 2,30 m	au niveau des sièges : 2,40 m des quais : 2,45 m	au niveau des sièges : L1, L2 : 2,50 m (2,55 m[3]) L3 : 2,65 ou 2,65 m des quais : 2,30 m	au niveau des sièges : 2,60 ou 2,65 m des quais : 2,40 m
Longueur des quais possible (estimation TTK-SYSTRA)	45 m allongements à : 50 m possible	60 à 75 m	60 à 75 m T1-T2 : 20,50 m (1 rampe) 24,70 m (2 rampes)	30m allongements à : 40 m (réservé) 50 m (possible)	L1, L2 : 30 m allongements à : 40 m (réservé) L3 : 80 m (à réserver)	60 m nouvelles stations à 50 m
Longueur maxi. d'une composition possible (estimation TTK-SYSTRA)	45 m en US 60 m en UM (possible)	37,5 m en US 75 ou 60 m en UM	37,5 m en US 75 ou 60 m en UM T1, T2 : 30 m en US	30 m en US 60 m en UM à réserver [4]	L1, L2 : 37m en US 75 ou 60 m en UM (réservé) L3 (à réserver) : 75 m en UM	37 m en US 75 ou 60 m en UM (réservé)
Hauteur des quais (urbain et ferroviaire) par rapport au plan de voie	Tram C : 305 mm Fer : 385 mm	Tram : 350 mm Fer : 385 mm	T1, T2 = 290 mm Fer : 385 mm	Tram : 280 mm Fer : 380 à 550 mm	L1, L2 : 245 mm L3 : 300 mm ? Fer : 380 à 550 mm	Tram : 250 mm Fer : 380 à 550 mm
Haut. de caténaire (en m) Fer (m) Haut. de rame (m)	Tram : 4,20 mini Rame = 3,40	A définir Rame = 3,40	Tram : 3,60 mini Fer : 4,60 à 6,50 Rame = 3,40	Tram : 3,60 mini Rame = 3,40 [5]	Tram : 3,60 mini Rame = 3,40	Tram : 3,60 mini Fer : 4,60 à 6,50 Rame = 3,40
Ecartement et type de rail en urbain	1435 mm 41GP	1435 mm 41GP prévisible	1435 mm 41GP prévisible T1, T2 : 35G	1430 mm L1, L2 : 35GP	1435 mm L1, L2 : 35G L3 : 41GP ?	1435 mm 35G, R=60, 35GP
Appareils de voie	Tan1/6, Tan1/4 Tan1/2, 18				Tan1/6, Tan1/4 Tan1/2, 18 Tan1/3, 26	Tan1/6, Tan1/4 Tan1/2, 18
Infrastructure tramway en	Site propre	Site propre + site banalisé	Site propre	Site propre	Site propre	Site propre + site banalisé
Déclivité maximale sur réseau tramway	4% sur ligne B	6 à 8% estimée	6 à 8% estimé	7% sur 30m	7%	6%
Nbr d'arrêts envisagés	23	20	à l'étude	à l'étude	à l'étude	à l'étude
Vitesse maxi. en exploitation	100/90 km/h	100/90 km/h	100/90 km/h	100/90 km/h	100/90 km/h	100/90 km/h
Présences de PN	oui	oui	oui (11)	oui	oui	oui (2)
Ligne ferroviaire électrifiée à l'origine	en partie	en partie	oui	en partie	en partie	non
Equipements de sécurité et exploitation à prévoir	KVB Radio, SAE CTS + SNCF	KVB Radio, SAE TRAM + SNCF	KVB Radio, SAE SNCF + ?	KVB Radio, SAE TCL + SNCF	KVB Radio, SAE TAG + SNCF	KVB Radio, SAE TAN + SNCF
Alimentation électrique	25KV AC 50 Hz 750 V DC option tricourant : 15 KV 16 2/3 Hz	25KV AC 50 Hz 750 V DC option tricourant : 15 KV 16 2/3 Hz	25KV AC 50 Hz 750 V DC	1500 V DC 750 V DC option tricourant : 25 KV AC 50 Hz	25KV AC 50 Hz 750 V DC	25KV AC 50 Hz 750 V DC
Marge de manoeuvre design	Couleur, tête de rame si possible	Couleur, tête de rame si possible	Couleur, tête de rame si possible, disposition intérieures	Couleur, tête de rame si possible	Couleur, tête de rame si possible	Couleur, tête de rame si possible, éventuellement disposition intérieures

NOTA : les contraintes et valeur(s) commune(s) possible(s) sont soulignés .

(1) L'indication de la valeur commune ne vaut pas recommandation, le 2,65 m x 37 m étant préférable lorsqu'il est possible.

(2) Option de projet de tramway régional St-Etienne-Firminy, interconnectable ultérieurement entre Clapier et Châteaucreux. L'autre option à l'étude, de prolongement du tramway urbain (gabarit 2,20 m) sur voie RFF adapté pour la voie métrique et vraisemblablement dédiée, serait une interconnexion de type 1 non concernée par ce rapport.

(3) Exceptionnellement, pour des tram-trains à cadencement faible (> 20-30 mm) qui pourraient croiser des trams urbains n'importe où, mais qui ne pourraient

Tableau des contraintes liées aux infrastructures

	SITES					
	St Etienne (1)	Rouen	Orléans	Montpellier	Valenciennes	Bordeaux
Entraxe mini. des voies en lignes	23,05 m à réserver sur infrastructure en projet	2,80 m	2,85 m sans poteau 3,15m avec	3,05 m en projet	2,95 m recommandé sur infrastructures en projet	2,95 m recommandé sur infrastructures
Rayon min	25 m sur infrastructures en projet	25 m	25 m	25 m	25 m	25 m
Entraxe mini. des voies en courbes de 25m	3,70 m à réserver sur infrastructure en projet	3,73 m	3,60 m sans poteau 4m avec poteau	3,60 m	3,70 m recommandé sur infrastructure en projet	3,70 m recommandé sur infrastructure en projet
Gabarit maxi. en largeur possible (estimation TTK-SYSTRA)	2,65 ou 2,55 m pour parc commun avec région lyonnaise	au niveau des sièges : 2,50 ou 2,55 m(4) des quais : 2,30 m	au niveau des sièges : 2,55 m des quais : 2,30 m	2,65 ou 2,55 m	au niveau des sièges : 2,65 ou 2,55 m des quais : 2,40 m	au niveau des sièges : 2,65 ou 2,55 m des quais : 2,40 m
Longueur des quais possible (estimation TTK-SYSTRA)	60 m à réserver sur infrastructure en projet	30 m allongements possible	35 m allongements possible	30 m allongements à 65 m envisageables	30 m allongements à 65 m à réserver	32 m à 46 km allongements à 65 m à réserver
Longueur maxi. d'une composition possible (estimation TTK-SYSTRA)	30 m en US 60 m en UM à réserver sur infrastructure en projet	30 à 37 m en US 75 à 60 m en UM possible	30 m en US 90 m en UM à réserver sur infrastructure en projet	30 à 37 m en US 75 à 60 m en UM possible	30 à 37 m en US 75 à 60 m en UM à réserver sur infrastructure en projet	30 à 37 m en US 75 à 60m en UM à réserver sur infrastructure en projet
Hauteur des quais (urbain et ferroviaire) par rapport au plan de voie	Tram : 300 mm sur infrastructure en projet Fer : 380 à 550 mm	245 mm Fer : 380 à 550 mm	Tram : 280 mm Fer : 380 à 550 mm	Tram : 280 mm Fer : 380 à 550 mm	Tram : 300 mm à réserver sur infrastructure en projet Fer : 380 à 550 mm	Tram : 280mm Fer : 380 à 550 mm
Haut. de caténaire (en m) Fer (m) Haut. de rame (m)	A définir Rame = 3,40	Tram : 3,60 mini Fer 4,60 à 6,50 Rame = 3,40	Tram : 3,60 mini Fer 4,60 à 6,50 Rame = 3,40	Tram : > 3,60 Fer 4,60 à 6,50 Rame = 3,40	Tram : > 3,60 Fer 4,60 à 6,50 Rame = 3,40	Tram : 3,60 Fer 4,60 à 6,50 Rame = 3,40
Ecartement et type de rail en urbain	1435 mm (5) 41GP à réserver sur infrastructure en projet	1435 mm 35G	1435 mm 35GP, U50	1435 mm 35G, R160, 35GP	1435 mm 41GP à réserver sur infrastructure en projet	1435 mm 41GP à réserver sur infrastructure en projet
Appareils de voie						
Infrastructure tramway en	Site propre + site banalisé	Site propre + site banalisé	Site propre	Site propre + site banalisé	Site propre + site banalisé	Site propre
Déclivité maximale sur réseau tramway	6 à 8% estimé	-	6%	6 à 8% estimé	6 à 8% estimé	6%
Nbr d'arrêts envisagés	à l'étude	*	15	*	*	*
Vitesse maxi. en exploitation	100/90 Km/h	*	100/90 Km/h	*	*	*
Présences de PN	oui	oui	oui	*	*	*
Ligne ferroviaire électrifiée à l'origine	non		non	*	*	*
Equipements de sécurité et exploitation à prévoir	KVB Radio, SAE STAS + SNCF	KVB Radio, SAE TCAR + SNCF	KVB Radio, SAE SEMT A0+SNCF	* *	* *	* *
Alimentation électrique	1500 V DC 750 V DC	25KV AC 50 Hz 750 V DC	1500 V DC 750 V DC	1500 V DC 750 V DC	25KV AC 50 Hz 750 V DC option tricourant : 3000 V DC	1500 V DC 750 V DC
Marge de manoeuvre design	Couleur, tête de rame si possible, disposition intérieures	Couleur, tête de rame si possible	Couleur, tête de rame si possible	*	*	*

croiser d'autres tram-trains soit en certains points déterminés des lignes (à entraxe > 2,85 m) soit à vitesse réduite.

(4) idem.

(5) 90 m en UM avec projet potentiel d'utilisation du tunnel du métro ligne B par des tramways urbains et interconnectés.

(6) Hauteur compatible avec tunnel du métro ligne B (Hauteur rame métro 3,40 m, Gabarit limite obstacle 3,55 m).

(7) Avec trois fils de rails sur section en projet Place du Peuple-Châteaucreux.

** pas de projet précis à ce jour.*

3.3. Récapitulatif des principales valeurs communes identifiées

Le travail réalisé a consisté à dégager des grandes orientations. Il ne doit pas se substituer à l'élaboration d'un cahier des charges fonctionnel qui devra préciser plus finement les caractéristiques du matériel. Des valeurs communes ont été identifiées en matière de :

- Architecture de rame : largeur, insertion en courbe, longueur totale, hauteurs de plancher et de rame, capacités, couplage, portes ;
- Caractéristiques techniques : vitesse, alimentation électrique, déclivité, rayons de courbure, type de rails.

3.3.1. Architecture de rame

GABARIT STATIQUE ET DYNAMIQUE EN LARGEUR, ESPACES INTÉRIEURS ET FENÊTRES

L'analyse a consisté à définir une valeur standard sous deux contraintes fortes :

- Un besoin de capacité et de confort pour des trajets de 15-30 km (voir 2.) impliquant un nombre de places assises confortables suffisant, et notamment le principe de **rangées de 4 sièges** offrant chacun au minimum une largeur de 480 mm avec un couloir de 620 mm (valeurs rames Karlsruhe) ;
- Une contrainte de circulation sur des infrastructures tramway **d'entraxe minimum de 2,85 m,** sachant que les normes BOSTRAB allemandes utilisées pour la construction des infrastructures autorisent une largeur minimale de 30 cm entre gabarits statiques, soit une largeur minimale de la lame d'air de l'ordre de 10 cm. Les bureaux d'étude ont adopté comme contrainte "dure" d'insertion des rames en milieu urbain l'entraxe entre voie en alignement droit, supposé non modifiable à horizon des projets, et non d'autres contraintes plus légères telles que la présence de panneaux de signalisation supposées pouvoir être aisément levées.

L'analyse des contraintes a conduit à identifier un gabarit minimal pour un matériel tramway d'interconnexion standard en France, respectant un gabarit extérieur de **2,55 m minimum à la hauteur des sièges tout en offrant 2,54 m minimum de largeur intérieure disponible à hauteur des coudes (4 places de 480 mm + couloir de 620 mm) et 2,44 m minimum à hauteur de l'assise (2 parois de 55 mm, 4 sièges de 455 mm + couloir de 620 mm).**

Ces valeurs minimales pourront être obtenues grâces à des mesures d'optimisation de l'utilisation des largeurs disponibles sur les gabarits des infrastructures tramway existantes et de l'architecture intérieure des rames :

- Les rames devront avoir des **parois extérieures arrondies** (principe poussé à son extrême dans le cas des rames RER de Copenhague) et des **tolérances de mouvements latéraux faibles.** Ces principes permettront d'offrir au minimum **un**

gabarit statique au niveau des sièges de 2,55 m, tout en limitant le **gabarit dynamique à une valeur de 2,75 m,** soit 10 cm de part et d'autre des rames. Ce principe permettra de réserver une lame d'air de 10 cm et est conforme aux normes BOSTRAB. Il permet donc d'accueillir des rames de gabarit 2,55 m minimum sur des réseaux existants de tramways au gabarit de 2,40 m ou 2,30 m (voir schéma, **les constructeurs pourront bien entendu proposer un gabarit statique plus large que la valeur minimale de 2,55 m, tant que le gabarit dynamique de 2,75 m est respecté**[1]) ;

➢ Ces rames de 2,55 m de gabarit extérieur minimum pourront offrir une **largeur disponible pour les voyageurs de 2,54 m minimum au niveau des coudes** grâce à des fenêtres de 5 mm d'épaisseur sans joint extérieur (ex. des rames tram-train de Karlsruhe (deuxième génération) et Kassel) ainsi que par de judicieuses mesures d'optimisation développée notamment pour les dernières rames de Kassel (2,39 m disponibles pour un gabarit 2,40 m) :

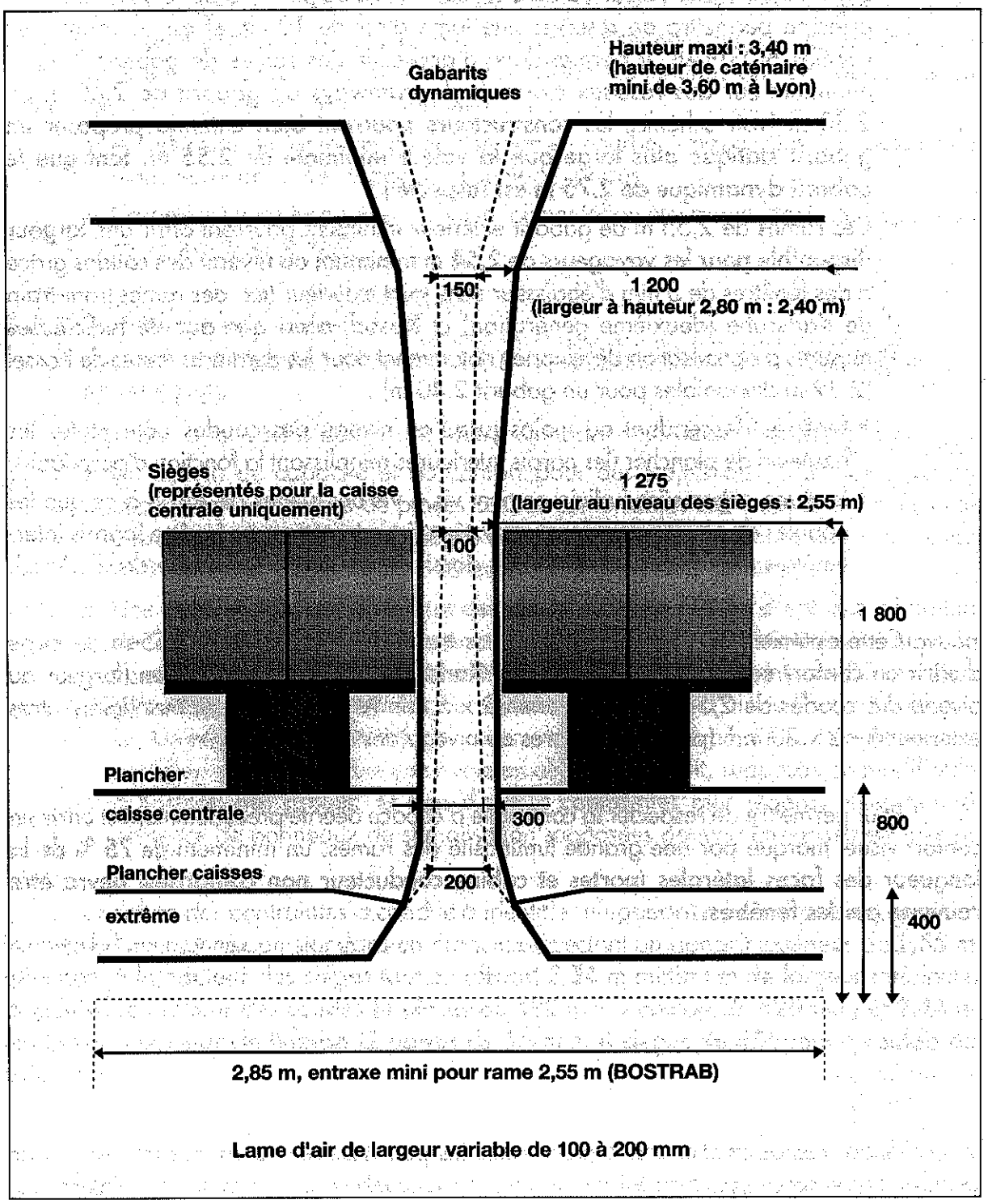
- fenêtres descendant au moins jusqu'au niveau des coudes pour toutes les hauteurs de plancher (les parois intérieures remplissant la fonction d'accoudoir);
- fenêtres organisées judicieusement vis à vis des sièges de façon à ce que les épaules des voyageurs donnent systématiquement sur une fenêtre (parois inter-fenêtres situés soit au niveau des dossiers des sièges, soit entre deux sièges).

Cette optimisation permettra aux rames tram-train standard de 2,55 m de large d'offrir un **confort équivalent aux rames de Karlsruhe première génération** (largeur au niveau des coudes de 2,565 m (2 650 mm-2 x 5 mm (vitres) – 2 x 7,5 mm (joints vitres extérieurs) – 2 x 30 mm (parois intérieures au niveau des coudes).

Pour permettre de respecter la contrainte d'espace décrite précédemment et offrir un confort visuel marqué par une grande luminosité des rames, un minimum de **75 % de la longueur des faces latérales (portes et cabine conducteur non comprises) devra être couverte par les fenêtres.**

(1) Le nouveau tramway de Bruxelles a ainsi un gabarit statique de 2,30 m pour un entraxe de voie de 2,50 m, soit un gabarit dynamique de 2,40 m.

Graphique 3 : Dimensions standard et gabarit en largeur maximal sur réseau tramway.



BESOINS DE CAPACITÉ ET LONGUEUR D'UNE RAME EN US/UM

Notre analyse s'est fondée sur les deux contraintes suivantes :

- La longueur de quai maximale que l'on peut insérer dans les hypercentres des villes françaises se situe autour de 50 m (exemple du projet d'interconnexion Obernai-Strasbourg) ; toutefois, moyennant des rames n'ayant leurs premières portes qu'à 5 m des extrémités de rame (pas de portes aux extrémités, caractéristiques fréquentes sur les rames à plancher bas partiel), cette contrainte permet une longueur maximale de rame de 60 m ;
- La capacité minimale d'une rame en US devra être de 200 places avec une répartition de 80 places assises (40 %) et 120 places debout (60 %), soit pour une composition double à insérer sur des quais de 50 m de long une capacité minimale de 400 places dont 160 assises.

Ces deux constats amènent à recommander comme solution de base le principe de **rame en composition double de 60 m de long, soit une longueur de rame minimum de 29,5 m,** dont l'exploitation est possible dans tous les réseaux tramways considérés. Cette longueur est identique à celle de la plupart des tramways urbains existants et permet une insertion urbaine identique et notamment la possibilité de desservir les quais urbains les plus courts (dans certains cas, l'extension des quais à 50 m ne peut représenter qu'une option de moyen terme, l'offre interconnectée devant au préalable "faire ses preuves" avant de pouvoir être exploitée en UM). Là où des quais et les entraxes en courbe permettront une composition plus longue de 75 m (quais de 65 m de long), des rames simples de 37 m pourraient potentiellement être exploitées (option de rames longues avec 100 places assises et 150 places debout).

Le découplage des rames en exploitation devra être possible, ce qui implique un système de couplage/découplage automatique avec un attelage automatique sous capot. Cette opération de mise sous capot des attelages, qui s'effectue manuellement sur le matériel de la ligne Sarrebrück-Sarreguemines, devra être automatisée dans un matériel futur pour permettre une gestion plus économique des couplages/découplages. Si l'on adopte un attelage automatique de longueur 0,5 m (rames Karlsruhe), le maximum de 30 m pour une rame avec un attelage sorti (60 m de long pour une composition double avec attelages extrémités rangés) impliquera une **longueur de rame hors attelage de 29,5 m (37 m en option longue).**

Les rames devront a priori être réversibles pour faciliter l'exploitation. L'option de rames unidirectionnelles, qui permet de réduire les coûts d'acquisition et de maintenance, ainsi que des gains de place substantiels, pourra toutefois être demandée par certains exploitants et/ou autorités organisatrices.

Les valeurs de base recommandées pour optimiser la capacité des rames sous contrainte d'insertion dans des sites urbains contraints impliquent de limiter **la longueur des cabines de conduite à un maximum de 1,5 m hors attelage, 2 m attelage compris** (longueur courante dans les rames Stadtbahn allemandes et notamment de Karlsruhe et Sarrebrück), soit une **longueur disponible pour les voyageurs de 26,5 m minimum.** La limitation de cette longueur (faible au regard des cabines des rames ferroviaires classique) est en outre nécessaire pour assurer une bonne visibilité à très courte distance (vue jusqu'au pied de la rame), indispensable sur des circulations tramway en zone piétonne (un petit enfant qui s'aventurerait sur la voie au dernier moment doit être immédiatement vu par le conducteur).

TAUX DE PLACES ASSISES, NOMBRE DE PORTES ET TAUX D'ÉCHANGE

Les besoins de capacité identifiés ont conduit à recommander pour les rames tram-train une proportion de places assises supérieure à celle d'un tramway urbain, soit 40 % au lieu de 30 %. Cette recommandation nécessite une architecture de rame réservant relativement plus de place aux espaces voyageurs assis, moins aux espaces portes, soit un nombre de 4 portes pour une rame de 29,5 m (5 portes ne pouvant être insérées en respectant le taux de places assises requis). Par voie de corollaire le besoin d'un minimum de 80 places assises nécessite un taux d'échange (largeur cumulée des portes/longueur de la zone voyageur) réduit par rapport aux tramways urbains (mais plus élevé que pour les rames de Karlsruhe) :

• **Tram-train version de base :**	**4 x 1,5 m / 26,5 m = 0,23**
• ex. : rames longues de Strasbourg :	8 x 1,5 m / 38,6 m = 0,31
• ex. : rames tram-train Karlsruhe :	4 x 1,5 m / 33,5 m = 0,18

Pour compenser un tant soit peu ce taux d'échange réduit et donc en cas d'affluence un temps d'échange en station potentiellement plus élevé, les rames tram-train devront avoir un **système d'ouverture/fermeture des portes très performant** et si possible plus rapide que les systèmes existants sur les rames urbaines. Le cas du projet de tram-train de Strasbourg est en la matière particulièrement intéressant à évoquer : les rames tram-train en composition double remplaceront des services urbains exploités avec des rames longues en offrant le même nombre de portes (soit 8) mais pour une capacité supérieure. Toutefois, du fait d'un temps d'ouverture/fermeture des portes plus élevé sur les rames urbaines, le temps global d'arrêt en station pourra être à peu près égal pour les rames urbaines et pour les rames tram-train.

Par ailleurs, dans un certain nombre de configurations (périodes intermédiaires d'affluence moyenne), la circulation en composition double n'offrira pas seulement une capacité supplémentaire, mais aussi un niveau de confort supplémentaire, soit une charge de voyageur au m² plus faible : dans de tels cas, la notion de taux d'échange perd de sa pertinence, car les missions interconnectées pourront avoir un temps d'échange en station plus faible malgré un taux d'échange moins élevé !

INSERTION DANS LES COURBES

L'insertion dans les courbes de deux des réseaux présentant le plus d'options d'interconnexion (Strasbourg et Lyon) est délicate du fait d'entraxe en courbe faible (3,40 m). Pour une rame de longueur 29,5 m avec 4 portes par face, 3 configurations dont deux satisfaisantes (option A et B) ont été identifiées comme possibles :

- **OPTION A :** une caisse centrale courte (environ 7,5 m) avec transformateur sous plancher, des bogies aux intersections des caisses et des caisses extrêmes longues (environ 11 m) avec 2 portes chacune et un nez affiné (largeur d'environ 2 m en bout de rame). Cette configuration, qui permet un espacement régulier des bogies, est proche des rames type Karlsruhe (Duewag/Siemens-Adtranz-VBK) ;

- OPTION *A PRIORI* MOINS FAVORABLE : une configuration type Dualis (Alstom) ou Kassel (Bombardier) impliquant un transformateur en toiture, avec une caisse centrale courte (environ 7,5 m) couvrant deux bogies très proches l'un de l'autre (5 m entre axes des bogies centraux) entourée de caisses extrêmes longues (environ 11 m) avec 2 portes chacune et un nez affiné. Cette configuration ne parait pas satisfaisante car elle implique une répartition des bogies déséquilibrée ;

- OPTION B : une configuration type Dualis (Alstom) ou Kassel (Bombardier) impliquant un transformateur en toiture, avec trois caisses de longueur équivalentes (9,8 m), deux bogies sous la caisse centrale entourant deux portes, une porte et un bogie sur chaque caisse d'extrémité ainsi qu'un nez affiné. Cette configuration permet une répartition des caisses et des bogies régulière.

Les configurations suivantes ne sont pas considérées comme possibles :

- ➢ Une rame à deux caisses de 15 m de long et trois bogies (trop grand empattement en courbe) ;
- ➢ Une rame type Stockholm à deux caisses de 13 m de long entourant une bogie-caisse de 4 m de long (empattement encore trop grand) ;
- ➢ Une rame type Sarrebrück avec transformateur sous la caisse centrale (soit la caisse centrale (de 7,5 m) est courte et l'espace entre bogies (< 1 m) ne laisse pas de place pour le transformateur[1], soit la caisse centrale est plus longue et les caisses extrêmes sont trop courtes pour accueillir chacune 2 portes).

Dans le cas de l'option A, un simple allongement des caisses permet d'avoir une rame de 37 m plus capacitaire (100 places assises, architecture type 13,25 m - 10,5 m- 13,25 m) compatible avec les réseaux de Mulhouse, Ile-de-France, Grenoble et Nantes (entraxes en courbes de 25 m de 3,72 m à 3,75 m) et mieux adaptée à des cas d'exploitation purement ferroviaire. La modularité de fabrication des rames devra permettre d'obtenir sans problèmes de telles surlongueurs de caisse.

(1) Sauf si le développement devait permettre une miniaturisation des transformateurs.

PLACE DU TRANSFORMATEUR

Plusieurs constructeurs considèrent que le transformateur bicourant (voire tricourant) doit se situer **sous la caisse centrale** pour les raisons suivantes :

- toit déjà largement occupé par les nombreux équipements électriques nécessaires aux rames tram-train, à insérer dans un espace déjà réduit pour des rames de 29,5 m contre 37 m pour les tram-trains existants ;
- position basse du transformateur indispensable pour une option tricourant apte au 15 000 V 16 Hz 2/3 allemand (option demandée à Strasbourg) ;
- meilleur comportement dynamique avec un centre de gravité de la rame le plus bas possible. Le transformateur des rames de Karlsruhe pèse 8 t. En France, cette masse pourrait peut être réduite à un ordre de 4 t, masse dont la position en toiture reste problématique (problèmes aigu en cas de freinage d'urgence, ou de courbes de 25 m) ;
- l'augmentation du gabarit statique en largeur des rames (au minimum 2,55 m) sans pour autant augmenter leur gabarit dynamique implique des rames stables ayant de faibles mouvements latéraux, donc pas de masse importante en toiture de rame ;
- plus grande facilité pour respecter les normes de résistance à la compression de 600 kN (et encore plus 800 kN) avec des espaces voyageurs comportant de larges baies vitrées (cf. "Gabarit en largeur") et une cabine de conduite courte (cf. "Besoins de capacité et longueur d'une rame en US/UM"). Lorsque le centre de gravité de la rame est proche du niveau du châssis, l'essentiel du travail de compression peut en effet se concentrer au niveau du châssis, ce qui permet une architecture de caisse plus simple (par simplification des structures nécessaires aux parois latérales et aux cabines de conduite).

L'éventualité de positionner le transformateur en toiture ne constituant à ce jour qu'une hypothèse, les bureaux d'étude ont ainsi axé leur développement sur l'option du transformateur sous la caisse centrale (soit l'option A), qui implique de réserver cette caisse pour les voyageurs à plus longue distance (plancher haut, pas de portes, plus de places assises, sièges avec appuis tête, cf. rames de Karlsruhe).

Toutefois, pour ne pas brider toute innovation technologique, les bureaux d'études considèrent qu'un appel d'offre devra laisser libre choix aux constructeurs de proposer une option d'architecture de caisse alternative avec transformateur en toit de rame, tant que sont respectées les contraintes d'insertion identifiées et récapitulées en synthèse (soit une configuration type Option B).

HAUTEUR DE PLANCHER ET LACUNE

Le matériel d'interconnexion devra répondre de façon satisfaisante aux problèmes de double accessibilité sur les quais tramway et ferroviaire, que ceux-ci soient existants ou à construire. La plupart des experts travaillant sur le sujet en France et en Allemagne convergent aujourd'hui sur des matériels à **plancher bas partiel** (pour insérer les bogies ferroviaires) avec une **hauteur de plancher bas de 400 mm et 350 mm au niveau des portes** (soit respectivement 350 mm et 300 mm avec roues usées, matériel en charge, suspensions tassées). Tous les accès au véhicule doivent être situés dans la partie plancher bas du véhicule. Ces valeurs représentent un compromis "idéal" entre les contraintes ferroviaires et urbaines. Cette hauteur permet de réserver le gabarit des appareils de voie ferroviaires, la place nécessaire aux palettes d'accostage aux quais ferroviaires.

Sur le réseau ferroviaire, la valeur de la lacune est pour un matériel large de 2,40 m à hauteur des portes de :

- 350 mm pour les quais ferroviaires de hauteur 385 mm ;
- autour de 405 mm pour les quais ferroviaires de hauteur 550 mm ;

Pour l'accessibilité aux quais ferroviaires de hauteur 385 mm, la lacune devra être comblée par une **palette de 25 cm de large** (plus longue de 5 cm que les palettes de Karlsruhe et Sarrebrück) **qui se positionnera à une hauteur de 380 mm.** Cette palette aura la même position pour l'accessibilité aux quais ferroviaires de hauteur 550 mm (très largement minoritaires sur les sites étudiés) qui nécessitera une marche de "descente dans le tramway" de 170 mm (contre 180 mm dans le cas de la descente des quais de la gare de Karlsruhe (760 mm) dans les rames de la ligne S3 avec position de palette à 580 mm). Cela impliquera sur les rames une **hauteur de porte de 2,3 m au dessus du seuil de porte,** soit 2,1 m au dessus du quais de 550 mm. L'intérêt d'adopter le principe de rames polyvalentes (pouvant desservir des gares à quais 385 mm ou 550 mm) est bien illustré dans le cas de Karlsruhe : grâce à leur polyvalence, les rames ont pu très rapidement étendre leur rayon d'action dans toute la Région (10 rames sur 25 km en 1992, 90 rames sur 370 km en 1999), soit par extensions de lignes interconnectées, soit par exploitation de tramways régionaux en navette en remplacement de TER (en attendant une interconnexion ultérieure).

L'acceptation, de "descente dans les rames" pour les quais de 550 mm (comme à Karlsruhe pour les quais de 760 mm) pourra n'être que transitoire : le principe de polyvalence des rames n'interdit pas de viser à terme une généralisation de l'accessibilité intégrale sur toutes les lignes exploitées. Cette polyvalence permet simplement de phaser cette mise aux normes (aménagement pour les gares à quais de 550 mm de bouts de quai plus bas à 350 mm) sans interdire pour autant l'exploitation de rames tram-train en attendant. Dans une région ayant un certain nombre de gares à quais de 550 mm, une exigence d'accessibilité intégrale immédiate pourrait en effet impliquer des coûts dissuasifs réduisant les opportunités de développement des lignes de tramway interconnecté ou régional.

Sur les réseaux tramway, les quais urbains existants (entre 250 et 305 mm) seront surplombés par le bas des portes des rames interconnectées de 50 à 100 mm. Le gabarit en largeur de la caisse devra être légèrement réduit pour s'insérer sur des quais prévus pour des rames de 2,30 à 2,40 m. Ces éléments permettent une bonne accessibilité sans palette sur les quais urbains existants. Sur les réseaux à quais de 250 mm, des rehaussements de quais de 250 mm à 300 mm pourront être adoptés en avant de quai pour faciliter l'accès des fauteuils roulants par la porte avant des rames (recommandations du COLITRAH, cf. ci-dessous), tel que sur la ligne A à Strasbourg.

La hauteur de 350 mm du seuil de porte avec palette à 380 mm permettra ainsi de répondre aux recommandations du COLITRAH (différence d'altitude maximale de 55 mm entre pas) en toute configuration pour des quais urbains (ou rehaussements localisés de quais urbains) de 295 mm minimum et ferroviaires de 385 mm maximum :

	En configuration neuve et vide	En configuration pleine charge et roues usées
Entre hauteur seuil de porte et palette (mm)	30	30
Entre palette et quais ferroviaire (mm)	5	55
Entre seuil de porte et quais urbains (mm)	55	5

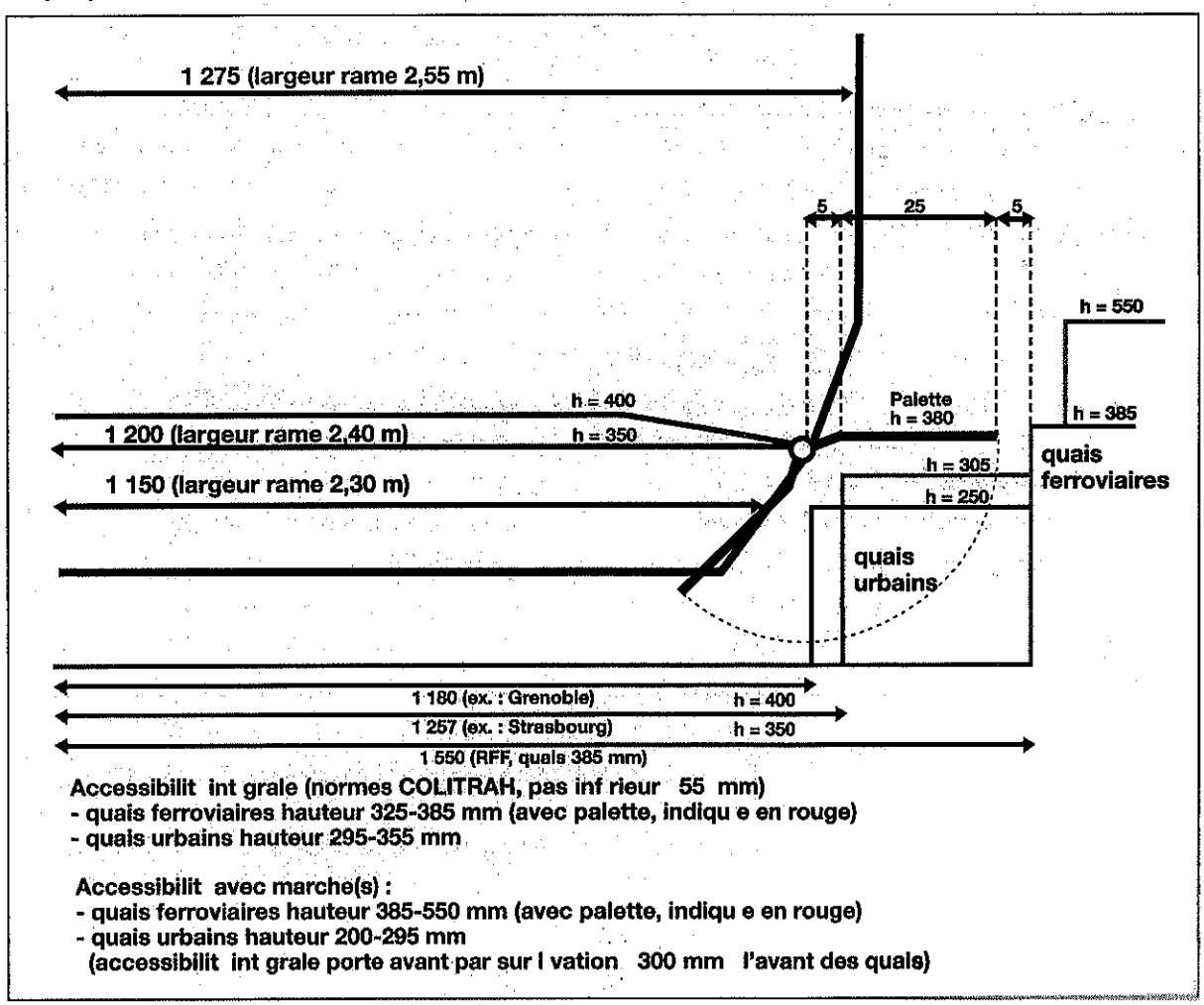
HAUTEUR DE CAPTAGE ET HAUTEUR DES RAMES

La hauteur de captage sera au minimum de 3,60 m en urbain et au maximum de 6,50 m en ferroviaire. La hauteur des rames sera autour de 3,40 m pour pouvoir respecter une distance d'environ 100 mm entre le pantographe rabaissé et la caténaire. Dans l'option A, la réservation d'une hauteur de 50 cm sur le toit pour l'installation des équipements électriques laisse une hauteur disponible sous le toit de 2,90 m, soit des hauteurs disponibles de 2,30 m en extrémité de rame (plancher de 600 mm), 2,5 m au niveau des portes (plancher de 400 mm) et 2,1 m dans la caisse centrale (plancher de 800 mm).

L'option B, consistant à mettre le transformateur en toiture avec plancher de 600 mm en extrémité de rame et 400 mm en parties centrales impliquerait de dégager en toiture un espace supplémentaire de l'ordre de 10 cm sur toute la longueur de la rame, soit 60 cm de hauteur réservée sur le toit pour les installations électriques plus le transformateur, soit des hauteurs disponibles de 2,20 m en extrémité de rame, et 2,4 m ailleurs.

Pour les rames tricourant, le supplément d'installations électriques à installer pourra impliquer une hauteur de 20 cm en plus de la hauteur standard de 3,40 m.

Graphique 4 : Gabarit limite au niveau des quais et principes d'accessibilité avec palette.



SYNTHÈSE

Notre analyse nous amène à synthétiser les caractéristiques fonctionnelles en matière de gabarit et d'habitabilité suivantes (valeurs mini. et options) :

Gabarit extérieur	
• Longueur	29,5 m *(37 m)* attelages rentrés 30,5 m *(38 m)* attelages sortis 60 m *(75 m)* en composition double
• Hauteur	3,40 m (3,60 m pour rames tricourant) (hauteur de captage minimum de 3,60 m) *(hauteur de captage minimum de 3,80 m pour rames tricourant de hauteur 3,60 m)*
• Largeur	2,30 m *(2,65 m)* à hauteur 250 mm 2,40 m *(2,65 m)* à hauteur 350 mm (seuil des portes) 2,55 m minimum *(2,65 m)* à hauteur des sièges
• Contraintes d'insertion	voies d'entraxe 2,85 m minimum avec lame d'air tolérée de 10 cm (soit 2,75 m de gabarit dynamique en alignement droit) *(options avec gabarit dynamique 2,85-2,95 m)* courbes 25 m avec entraxes de 3,40 m minimum avec lame d'air tolérée de 10 cm (soit 3,30 m de gabarit dynamique en courbe 25 m) *(options avec entraxe de 3,72m)*
Espaces voyageurs et accès	
• Nombre mini de places	80 assises/120 debout
• Longueur mini	26,5 m (soit longueur cabine + attelage 2 m maxi.)
• Largeur mini	2,54 m au niveau des coudes 2,44 m au niveau de l'assise 455 mm par siège 620 mm de couloir
• Longueur cumulée	minimum de 75 % de la longueur hors portes et hors cabines de conduite des fenêtres (soit 15 m mini.)
• Largeur mini portes	1,5 m
• Hauteur mini portes	2,3 m
• Nombre mini portes	2 x 4 (soit un taux d'échange de 0,23)
• Largeur palette	25 cm
• Hauteur palette	380 mm
Position du transformateur	
• Variante de base	Sous caisse centrale (Option A, faisabilité validée par bureaux d'études).
• Option	En toit de rame (Option B sous réserve de respect des contraintes de gabarit dynamique (faibles mouvements latéraux), de sécurité sans sacrifier les contraintes de confort et d'habitabilité (largeur et longueur cumulée des fenêtres, longueur de la cabine conducteur), et de faisabilité d'une option tricourant ; faisabilité à démontrer).

Ce cahier des charges fonctionnel nous a amené à développer **à titre d'exemple** une architecture de rame représentée sur le graphique 6. Cette architecture dérive à la fois du matériel de Sarrebrück (en matière de hauteurs de plancher) et de Karlsruhe (principe de bogies axiaux entre les 3 caisses). La réduction de longueur à 29,5 m par rapport à ces matériels (de longueur 37 m) implique toutefois les contraintes suivantes :

- une longueur de bogie réduite à 2,5 m contre 3 m sur les rames Karlsruhe ;
- une longueur de caisse centrale réduite (soit 7,55 m, allongeable à 10,5 m en option), ce qui impliquera de la part du constructeur des efforts importants d'insertion des installations électriques et notamment du transformateur (et impose notamment la solution de bogies axiaux entre les 3 caisses).

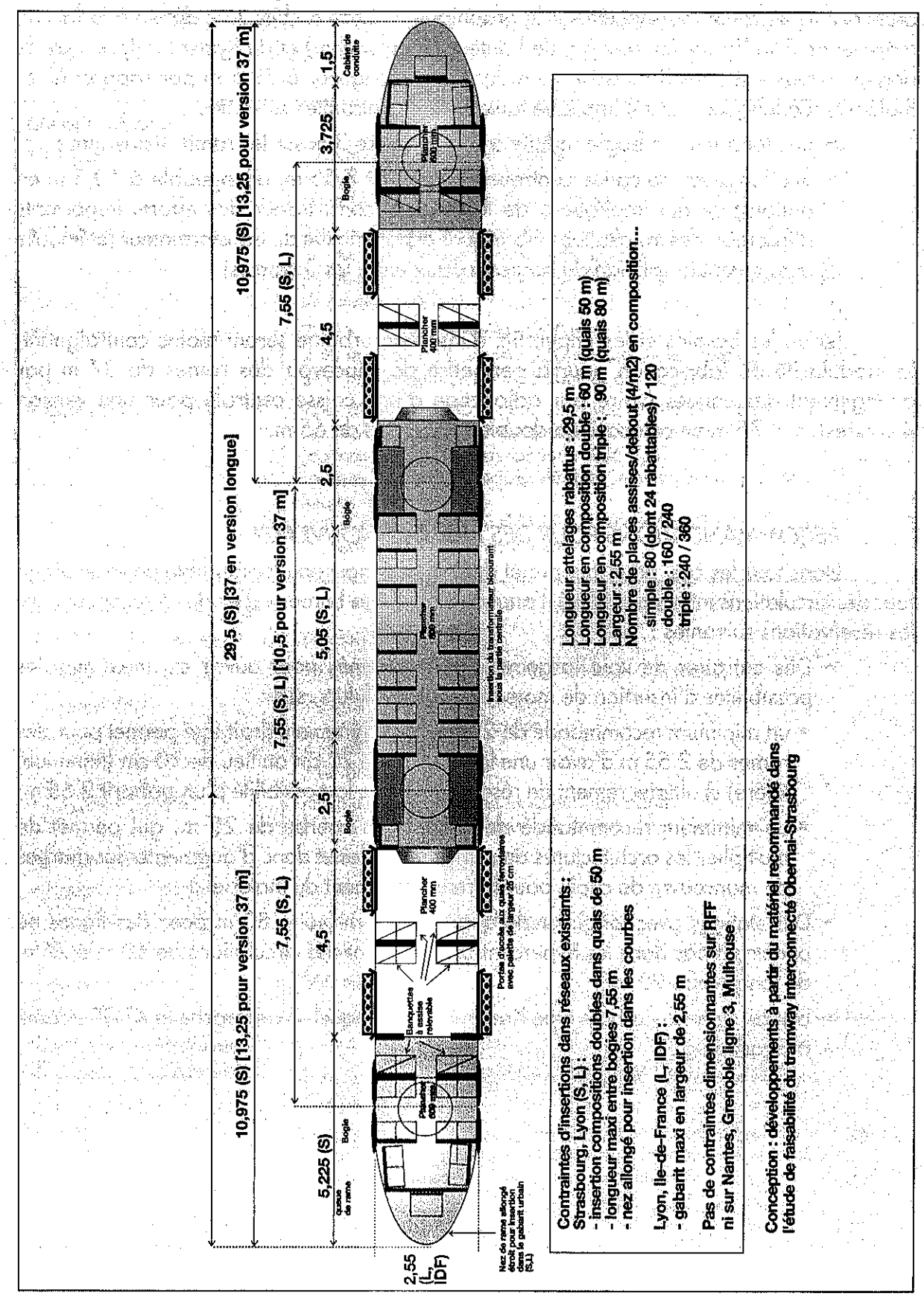
Là où les besoins et les impératifs d'insertion urbaine seront moins contraignant, la modularité de fabrication pourra permettre de concevoir des rames de 37 m par allongement des caisses (voire par adjonction d'une caisse centrale pour une version 4 caisses), soit 75 m en composition double avec quais de 65 m.

RECOMMANDATIONS POUR DES RÉSEAUX NOUVEAUX

Dans tous les cas, pour tout projet de tramway nouveau (susceptible de recevoir un jour des circulations interconnectées), l'analyse conduit les bureaux d'études à recommander les réservations suivantes :

- Des entraxes de voie largement dimensionnés pour ouvrir au maximum les possibilités d'insertion de matériels roulants futurs, soit :
  - un minimum recommandé de 2,95 m en alignement droit, qui permet pour des rames de 2,55 m d'avoir une lame d'air de 20 cm au lieu de 10 cm (minimum toléré) et ultérieurement de réserver à terme la possibilité d'un gabarit 2,65 m;
  - un minimum recommandé de 3,70 m en courbe de 25 m, qui permet de multiplier les architectures de rames possibles et donc d'augmenter les marges de manœuvre de choix pour le renouvellement du matériel ;
- Des stations avec longueur de quais de 65 m (voire 80 m pour des lignes ne pénétrant pas dans les hypercentres) réservant des circulations de 60 m à 75 m de long (voire 90 m) ;
- Un rail tramway urbain type Karlsruhe (vers lequel se rapproche le 41GP adopté à Strasbourg).

Graphique 5 : Dimensions standard d'une rame, vue de dessus (Option A, transformateur sous la caisse centrale).



Pour des réseaux en planification ou ayant déjà intégré dans leur conception un gabarit de 2,65 m et une longueur de rame plus longue (gabarit type de Karlsruhe et Sarrebrück adopté à Montpellier et envisagé à Mulhouse) trois options peuvent se présenter:

- choix du matériel standard 2,55 m pour profiter des avantages de la standardisation (possibilité de marché avec plusieurs constructeurs) et de l'interopérabilité des rames tram-train (ex : avantages de rames interopérables sur l'ensemble de l'Ile-de-France ou de l'Alsace) ;
- choix du matériel standard avec option + 5 cm ou + 10 cm de large si un ou plusieurs constructeurs propose ce type d'option à un coût acceptable (au détriment de l'interopérabilité des rames dans certains cas) ;
- choix d'un matériel type Sarrebrück, adapté aux contraintes spécifiques du réseau RFF, indépendamment de la démarche de standardisation ici présente (au détriment de l'interopérabilité des rames dans certains cas).

3.3.2. Caractéristiques techniques diverses

VITESSE MAXIMUM

En ce qui concerne la vitesse maximale souhaitable, les caractéristiques des réseaux ferroviaires des villes considérées, ainsi que la recherche de qualités d'accélération plutôt que de vitesse amènent à recommander un matériel de vitesse maximale de 100 km/h.

ALIMENTATION ÉLECTRIQUE

La majorité du matériel sera bicourant 750 V CC/25 000 V CA. Seule la région lyonnaise (ainsi que St-Etienne) nécessiterait un matériel bitension 750 V CC/1500 V CC.

En ce qui concerne l'acquisition de rames destinées à ne circuler que sur le réseau ferroviaire (cf. 4.2), elle nécessiterait un parc de rames bicourant 25 000 V CA/1500 V CC.

Ultérieurement des options de rames tricourant :

- 750 V CC/25 000 V CA/15000 V 16 2/3 Hz pourraient être nécessaires en région Alsace ;
- 750 V CC/25 000 V CA/3000 V CC pourraient être nécessaires pour une liaison Valenciennes-Mons et pour des liaisons transfrontalières vers le Luxembourg (le projet luxembourgeois étant aujourd'hui toutefois en sommeil).

Quelques constructeurs affirment pouvoir produire dans la même série des variantes de matériel bicourant sans influence sur le prix global de la série.

DESIGN

La majorité des autorités organisatrices souhaitent avoir la liberté du design de la face avant, de la couleur de la rame et des aménagements intérieurs. En ce qui concerne la face avant, la liberté de design dépendra de l'importance des contraintes imposées pour la circulation sur le réseau ferroviaire. Plus ces contraintes seront fortes (par exemple en cas d'adoption d'une norme de résistance à la compression de 800 kN au lieu de 600 kN en Allemagne), plus les marges de manœuvre de design des faces avant seront faibles. En ce qui concerne les aménagements intérieurs, il appartiendra aux AO et/ou aux exploitants d'arbitrer entre les économies d'un aménagement standard et les coûts d'une personnalisation.

DÉCLIVITÉ MAXIMUM

Les rames devront être aptes à des déclivités de 6 % et exceptionnellement 8 % sur une distance de 100 mètres.

COURBES

Le rayon minimum en exploitation urbaine sera de 25 mètres.

3.3.3. Type d'exploitation et sites

Le matériel tram-train sera apte à une circulation à la fois sur des sites urbains dédiés et sur des sites banalisés. Il sera aussi exploité en mixité avec les circulations ferroviaires classiques.

3.3.4. Type de rails et écartement des voies

Les rails urbains du type 35GP ou 41GP (gorge profonde) acceptent un profil de roue bimode type Karlsruhe, sachant que le 35GP induira par rapport au 41GP des coûts de maintenance des rails et des roues supérieurs (usure plus forte principalement en courbe). Ces rails sont présents sur les réseaux en cours de construction.

Pour les rails urbains du type 35G ou Ri60, présents sur les lignes T1 et T2 parisiennes, L1 et L2 de Grenoble et Nantes, un profil de roue nouveau devra être développé. Là encore, le 35G ou Ri60 implique non pas une incompatibilité totale avec le réseau ferroviaire, mais un profil de roue bimode à concevoir qui risque d'impliquer des coûts de maintenance plus élevés.

L'écartement standard des voies est de 1 435 mm avec certaines sections à 1 430 mm (l'impact sur les coûts de maintenance roue/rail de cette exception est difficile à évaluer : il se révélera à l'usage).

3.3.5. Compatibilité avec les normes de sécurité ferroviaire

PROBLÉMATIQUE

La sécurité du "système tramway d'interconnexion" est un sujet difficile qui fait l'objet d'études et d'analyses en France depuis 1995. Divers organismes se sont intéressés à cette question ; on citera en particulier le Ministère des Transports (DTT), la SNCF et le GART. SYSTRA a contribué à l'ensemble de ces réflexions, auxquelles les autorités organisatrices, les exploitants urbains et d'autres ingénieries ont été généralement associées.

Deux documents de référence ont été rédigés sur ce sujet et apportent des éléments à la réflexion :

- Une étude réalisée pour la DTT et la SNCF en 1995 ;
- La publication "Quand le tramway sort de la ville" réalisée pour le GART en 1998.

La difficulté consiste à définir de manière suffisamment précise mais sans imposer de contraintes excessives, les conditions dans lesquelles les tramways d'interconnexion pourront être admis à circuler sur le réseau ferré national.

On trouvera dans les paragraphes suivants les différentes approches concernant ces questions tant en France qu'en Allemagne où ce type de système est exploité depuis 1992.

APPROCHE UTILISÉE EN ALLEMAGNE

Lorsque la question s'est posée à Karlsruhe en 1991, une certaine expérience a pu être utilisée puisque la circulation de tramways sur des voies ferrées avait déjà lieu sur certaines portions de lignes mais sans cohabitation des deux types de trafic. Ainsi, les problèmes techniques tels ceux liés au contact rail/roue avaient déjà été résolus, de même que les aspects relatifs à la signalisation à mettre en place.

Pour permettre la "mixité" des circulations entre trains et tramways, une étude a été réalisée en prenant en compte l'analyse de certains incidents s'étant produits sur le domaine ferroviaire et en étudiant les conséquences qui auraient résulté de l'utilisation d'un matériel de type tramway au lieu d'un matériel ferroviaire classique. Il a été conclu que les caractéristiques propres du tramway d'interconnexion, avec une résistance à la compression de 600 kN, auraient évité 80 % des accidents étudiés, en particulier du fait des performances de freinage.

Selon un principe de renforcement de la "sécurité active", un ensemble de contraintes a été imposé pour admettre la circulation de matériels " légers " sur les lignes ferroviaires en mixité avec les trains :

- résistance à la compression supérieure ou égale à 600 kN,
- décélération en freinage d'urgence d'au moins 2,8 m/s²,
- vitesse maximum 100 km/h,
- vitesse des trains inférieure ou égale à 160 km/h,
- équipement des cabines de conduite en radio sol-train et système de contrôle de vitesse "Indusi".

Cet ensemble de contraintes est intégré aux normes "EBO" et constitue les conditions d'acceptabilité de matériels de type tramway sur le réseau ferré national allemand.

C'est dans ce cadre réglementaire que circulent sur la partie ferroviaire les tramways d'interconnexion de Karlsruhe et de Sarrebrück, l'exploitation des tronçons urbains répondant aux normes classiques "BOStrab" applicables aux tramways urbains en Allemagne.

On notera que le tramway "régional" qui roule en Suisse entre Genève et La Plaine ("Rhône Express Régional"/RER) s'inspire des mêmes principes.

ETAT DE LA RÉFLEXION EN FRANCE

En France, une difficulté réside en l'absence de normes applicables aux tramways, qui plus est en ce qui concerne les tramways d'interconnexion. De plus, à l'heure actuelle, les normes de l'Union Internationale des Chemins de Fer (UIC) sont les normes a minima appliquées par la SNCF ; or celles-ci exigent une résistance des caisses aux chocs frontaux de 1500 kN au minimum (600 kN pour les normes EBO).

L'approche française relative à la sécurité dans les transports collectifs pour les nouveaux systèmes, ressort du principe de la garantie d'un niveau de sécurité "au moins équivalent" à ceux qui existaient auparavant. Cette garantie ne peut être obtenue qu'à l'issue d'une étude de sécurité prenant en compte tous les paramètres du nouveau système. C'est l'approche qui a été utilisée pour autoriser la pénétration sur le territoire français du tramway d'interconnexion de Sarrebrück, soumis aux normes allemandes EBO.

Malgré l'absence de référence et un certain attentisme résultant de l'horizon des projets, les organismes et experts concernés par ce type de projets ne sont pas restés inactifs et de nombreuses réflexions et documents sont maintenant à disposition pour aborder ce sujet et lui trouver des solutions.

En premier lieu, un travail réalisé dès 1995, permet de disposer de la plupart des éléments concernant le contact rail/roue et le franchissement des aiguillages. Par ailleurs, il recommande une augmentation de la sécurité active du système compte tenu de la relative légèreté de ce type de matériel. Parallèlement, des études effectuées sur d'autres projets et en particulier celui de Mulhouse, dont la configuration ressort clairement du type 2, ont permis de poursuivre la réflexion sur deux points : la manière de renforcer la sécurité active du système d'une part, le traitement des traversées routières d'autre part. Même si ces travaux ne font pas office de normes et nécessitent des approfondissements importants, ils permettent d'alimenter la réflexion et de partir d'une base concrète pour effectuer l'analyse fine de ces questions.

Deux autres types de démarches sont en cours et méritent d'être mieux connues. D'une part la SNCF (et notamment ses Directions de l'Infrastructure et du Matériel et Traction) travaille sur un certain nombre d'approfondissements concernant à la fois le système dans son ensemble et la définition du matériel roulant. Par ailleurs, des démarches sont en cours au niveau des Directions Régionales concernées par de tels projets, pour analyser spécifiquement les spécificités locales, notamment en ce qui concerne les passages à niveau.

Enfin, on évoquera la démarche la plus "officielle", menée par la Direction des Transports Terrestres (DTT) du Ministère des Transports. En effet, cet organisme responsable de par la loi de la sécurité des transports, a constitué un groupe de travail qui a pour objectif de proposer des recommandations voire des normes applicables aux tramways et, en particulier, aux tramways d'interconnexion. Deux sous-groupes réfléchissent spécifiquement aux aspects sécurité du système et traversées routières. On peut donc estimer qu'un cadre réglementaire sera maintenant rapidement fixé pour déterminer le périmètre d'évolution des projets concernant ces systèmes.

En tout état de cause, si l'objectif est de développer non pas un certain nombre de projets limités, mais bien une nouvelle philosophie d'exploitation axée sur des matériels ferroviaires plus légers, les démarches actuelles devront éviter un certain nombre d'écueils précisés ci-dessous.

UN CERTAIN NOMBRE D'ÉCUEIL À ÉVITER

➢ ***Les risques d'une démarche sécurité limitée à des autorisations exceptionnelles sur sites précis***

Face au problème de la sécurité des rames tram-train, deux options sont possibles:

- une gestion au cas par cas, en fonction des données spécifiques d'un projet. Des autorisations exceptionnelles sont ainsi données sur des sites précis pour des matériels ne répondant plus aux normes UIC (ex. Sarreguemines). Cette option sera en tous les cas indispensable pour les interconnexions de type 1 ;
- la définition d'une nouvelle norme générale pour les matériel léger valable sur tout ou une partie du réseau (par ex. en Allemagne, sur tout le réseau à vitesse maxi. inférieure ou égale à 160 km/h).

L'exemple de Karlsruhe en particulier, et de l'Allemagne en général a montré l'intérêt puissant de la deuxième option :

- à Karlsruhe, l'extension très rapide des lignes interconnectées (25 km en 1992, 370 km en 1999) en remplacement de trains classique a été rendue possible, entre autres, par le fait que chaque extension n'a pas nécessité une étude sécurité spécifique, le matériel étant habilité pour circuler de manière polyvalente sur tout le réseau de la région de Karlsruhe (à l'exception de la ligne de Mannheim circulable à 200 km/h) ;

- en Allemagne, la généralisation de la norme d'exception adoptée pour Karlsruhe-Bretten a permis l'émergence d'une nouvelle gamme d'autorails légers purement ferroviaires, dont l'exploitation permet aujourd'hui des gains de productivité forts sur tout le territoire, sans chaque fois nécessiter une étude sécurité pour chaque ligne concernée.

En France, la volonté de développer un matériel le plus polyvalent possible pour des types d'exploitation aussi bien purement ferroviaires que d'interconnexion, pour des champs d'opérabilité ouverts au maximum, implique l'adoption d'une nouvelle norme généralisée et non pas une approche au cas par cas (à l'exception des interconnexions de type 1 qui relèvent d'une autre logique). Bien évidemment, cette norme générale devra être tirée d'études d'abord menée sur des cas particuliers. Compte tenu des données capitalisées jusqu'alors et du travail actuellement en cours au plus haut niveau, on peut estimer que la fixation d'une nouvelle norme est possible. Même s'il est trop tôt aujourd'hui pour disposer d'une vision claire des options qui pourront être retenues, il apparaît vraisemblable que l'on s'orientera pour les projets du type 2 vers une sécurité active renforcée, notamment au niveau des interfaces tram/sol et vers une sécurité passive demandant une résistance des caisses aux chocs frontaux soit de 600 kN, soit se situant plutôt aux alentours de 800 kN.

➢ ***Les risques sécuritaires d'une résistance à la compression trop élevée***

Un "tram-train" d'une masse de 100 t en unité double lancé à 100 km/h, a une énergie cinétique faible au regard de l'énergie cinétique d'un train lourd : elle représente 5 % de l'énergie cinétique d'un train corail de 15 voitures tractées qui a une masse d'environ 750 t et peut rouler à 160 km/h. En cas de choc frontal, le problème pour un "tram-train" à faible énergie cinétique n'est pas seulement le risque d'enfoncement de l'avant de la rame, mais aussi celui d'une forte décélération jusqu'à l'arrêt (exemple du couvercle d'une boîte à chaussures en carton lancé à pleine vitesse contre un mur : il n'y a pas de déformation, mais l'arrêt est quasi net).

Si l'on veut protéger les voyageurs contre cette décélération, l'enjeu est d'avoir une structure de caisse déformable qui emmagasine progressivement de l'énergie ; celle-ci doit donc admettre une certaine compression. On a de nombreux exemples issus des progrès en la matière, en particulier dans l'industrie automobile. Ainsi, si la résistance à la compression est trop élevée sur un matériel léger, c'est-à-dire très supérieure à 600 kN, le risque pourrait s'avérer supérieur, car la caisse, faute de se déformer, pourrait soit s'arrêter net, soit sortir des rails et partir en travers, augmentant le nombre des victimes.

On comprend bien que ces problèmes techniques complexes ne peuvent s'appuyer sur une norme UIC ancienne et inadaptée, mais nécessitent des études approfondies, s'appuyant sur des situations d'accidents identifiées.

➢ *Les risques économiques d'une résistance à la compression trop élevée*

La rentabilité des exploitations de tramways régionaux ou de projets d'interconnexion dépend bien évidemment du coût unitaire des rames. Nous avons précisé en première partie dans quelle mesure cette rentabilité est aussi liée à la maximisation des capacités offertes sous contrainte d'insertion dans les hypercentres où se concentre la demande de transport. Les expériences Suisse et Allemande montrent que les solutions adoptées vis-à-vis du problème de la sécurité n'ont pas handicapé les capacités et le confort des matériels en circulation (longueur des cabines de conduite limitées à 1,5 m, baies vitrées sur 75 % des parois latérales), ceci pour un coût unitaire des rames de l'ordre de 15 MF. En France, il sera essentiel de savoir si les solutions retenues seront ou non sans incidence :

- sur le coût des rames (coût de l'adoption de normes différentes de deux pays voisins très ferroviaires représentant un marché au moins double du marché français ?) ;
- sur la capacité en longueur des rames (respect de la longueur maxi. des cabines de conduite ?) ;
- sur la capacité en largeur et le confort visuel des rames (respect du pourcentage minima de baies vitrées ?).

Il serait en tout état de cause dangereux de fixer une norme avant de bien connaître ses implications techniques et économiques, sauf à accepter la possibilité de conclure qu'en France, le tram-train serait trop cher pour pouvoir concurrencer le bus et la VP. La contrainte économique, qui conditionne le développement du tram-train – et donc d'une baisse de la dépendance à la VP dans le périurbain –, n'est en effet pas à oublier.

SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS

En matière de compatibilité avec les normes de sécurité ferroviaire, les recommandations suivantes peuvent être formulées :

- les interconnexions de type 1, dont le nombre reste limité, sont à traiter au cas par cas ;
- une approche commune à tous les autres cas doit être recherchée en s'appuyant sur un système global (infrastructure, matériel, procédures, hommes) qui combine et si possible optimise la sécurité active et la sécurité passive (en ne négligeant pas certains aspects comme l'énergie cinétique et la résorption d'énergie) ;
- en ce qui concerne la sécurité active, le niveau d'équipement doit être défini au terme d'un processus d'études défini par décret sur la sécurité du réseau ferré national ;
- en ce qui concerne la sécurité passive, les exigences requises pour le matériel roulant devront être exprimées en termes fonctionnels, comportant :
  - les accidents de référence, dont la liste sera arrêtée en fonction de leur probabilité ;
  - des situations de référence, avec un matériel défini dont le comportement lors d'accidents de référence est réputé satisfaisant ;
  - des calculs de décélération et de déformation permettant de se livrer à toutes comparaisons utiles et d'apprécier la gravité de l'accident ;
- à terme, les approches au cas par cas devront viser la définition d'une norme générale pour l'exploitation de matériel léger sur voie ferroviaire.

Par le biais du ou des cahiers des charges d'appel d'offres du matériel roulant, il appartiendra aux industriels de proposer les solutions techniques répondant à ces exigences.

PROJETS CONSIDÉRÉS DANS L'ÉVALUATION DU NOMBRE DE RAMES CONCERNÉES

CHAPITRE 4

4. PROJETS CONSIDÉRÉS DANS L'ÉVALUATION DU NOMBRE DE RAMES CONCERNÉES

4.1. Projets liés aux villes étudiées

Dans cette analyse, ont été considérés des projets pouvant nécessiter des commandes de matériel entre 2003 et 2006. Parmi ces projets, certains peuvent être considérés comme "engagés" : Strasbourg et Mulhouse. Les autres représentent des options identifiées par les bureaux d'étude comme commercialement intéressantes et techniquement faisables pour l'horizon 2005 (elles s'appuient essentiellement sur l'interconnexion de projets tramway d'une part, d'électrification ferroviaire d'autre part, décidées pour cette échéance). Ces options, qui n'engagent que les bureaux d'étude, sont en cours d'analyse au sein de la SNCF et ne sont pas, à ce jour, validées par les AO concernées.

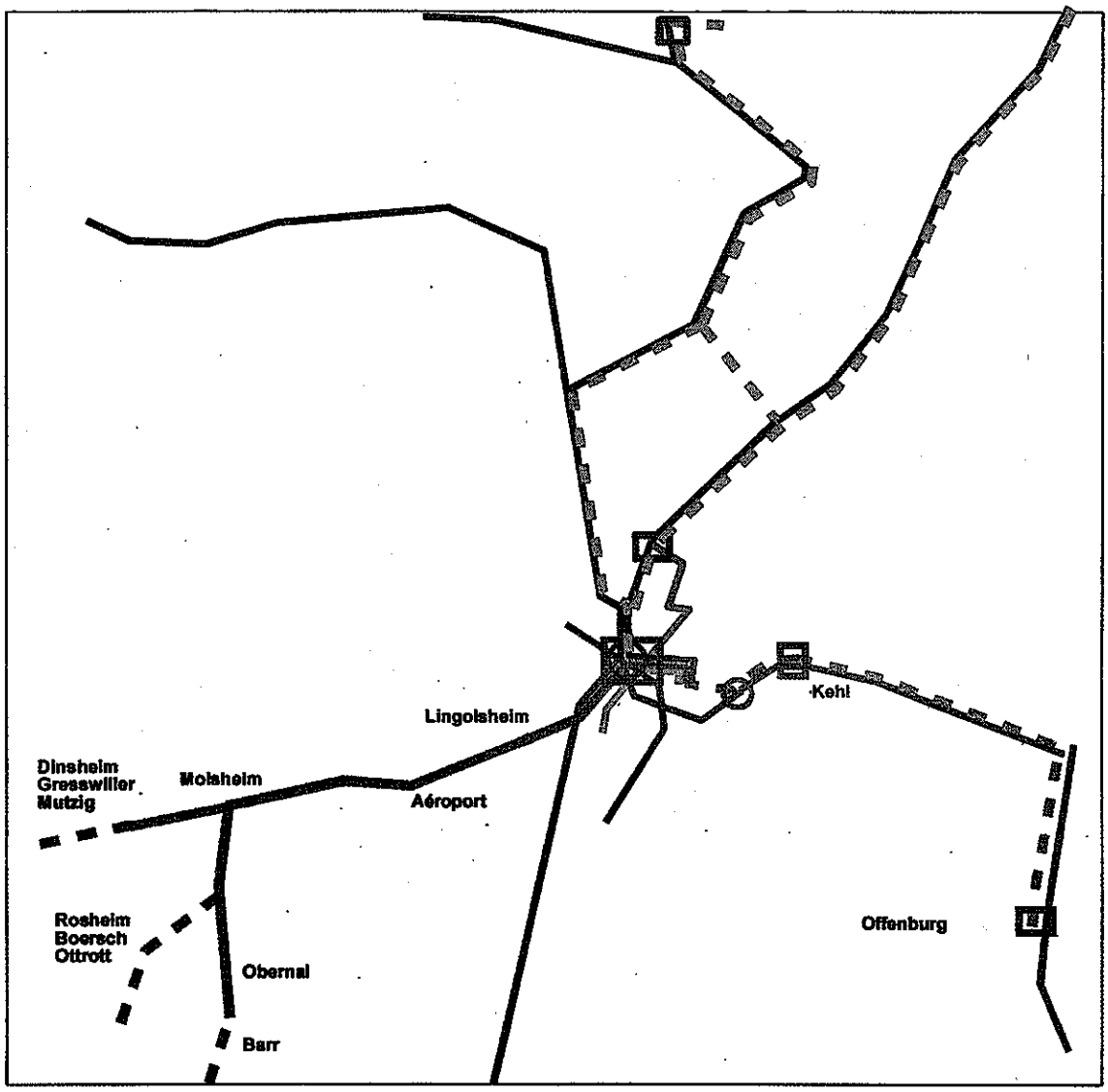
Les projets étudiés sont les suivants :

- Strasbourg, projet d'interconnexion vers Barr et Gresswiller via l'aéroport et la gare centrale, option d'extension du projet sur Kehl.
- Mulhouse, projet d'interconnexion Kruth-Gare Centrale, options de navettes Gare-Altkirch et Guebwiller-Bollwiller. Le projet, *a priori* sans contraintes car le réseau tramway est en cours de planification, est aujourd'hui basé sur l'acquisition de rames type Sarrebrück. Toutefois, l'acquisition de rames similaires aux rames Strasbourgeoises représente une autre option de choix à considérer.
- Ile-de-France, projets sur St-Germain-en-Laye, Melun-Sénart - Evry, Aulnay-Bondy-Noisy-le-Sec sur la ligne des Coquetiers (une interconnexion du projet avec T1, jugée très intéressante par les bureaux d'étude, peut être mentionnée comme option éventuelle méritant d'être réservée). D'autres possibilités d'exploitation de rames tram-train existent sur un certain nombre de lignes (Grande Ceinture Ouest par exemple).
- Lyon, option de tramway régional sur l'Ouest Lyonnais (l'Arbresle, Lozanne, Brignais, Tassin), avec éventuelle interconnexion ultérieure à St -Paul avec la future ligne forte St-Paul-Vaulx-en-Velin, possible prolongement sur Satolas sur le CFEL, option de tramway régional Perrache-Givors.
- St-Etienne, option de tramway régional Firminy-Châteaucreux, avec interconnexion ultérieure via une pénétration urbaine Clapier-Châteaucreux moyennant trois fils de rails entre Place du Peuple et Châteaucreux (l'autre option actuellement à l'étude, qui consisterait à prolonger le tramway urbain à voie métrique sur l'une des 2 voies ferrées St-Etienne-Firminy, est en fait une interconnexion de type 1 non concernée par ce rapport).

- Grenoble, option d'interconnexion avec la future ligne C du réseau super lazer (projet PDU), option de tramway régional interconnectable Gare - Vizille-Vif.
- Nantes, option de ligne interconnectée Nantes-Sucé, option de ligne interconnectable Nantes-Vertou, option de ligne interconnectée Sucé-Vertou.

Les autres villes considérées (Rouen, Orléans, Montpellier, Valenciennes, Bordeaux) ne présentent pas de potentiel de commandes de rames tram-train à l'horizon 2005, soit du fait de réalisations d'interconnexions type 1 (tramways urbains sur voies ferrées mixtes équipées des systèmes ferroviaire et tramway, avec séparation temporelle des trafics, cas de Orléans ou Rouen), soit du fait d'horizons d'interconnexion type 2 à plus long terme (par ex. Blois-Orléans, étoiles ferroviaires de Valenciennes et Bordeaux). La vérification de la compatibilité des caractéristiques standard du tram-train avec ces 5 derniers réseaux consiste ainsi à assurer la réservation de potentialité de long terme.

Graphique 6 : Cas de Strasbourg, projets potentiels à l'horizon 2005.



Cas de Strasbourg projets potentiels à l'horizon 2005

Lignes existantes ou décidées

- Lignes ferroviaires
- Tram lignes A et D
- Tram lignes B et C
- Tramway interconnecté Obernai - Strasbourg (exploitation avec tramway ferroviaire standard 2,55m*30m en composition double)

Options avec tram-train standard 2,55m*30m (ou 2,65m*30m) (qui n'engagent que les bureaux d'étude)

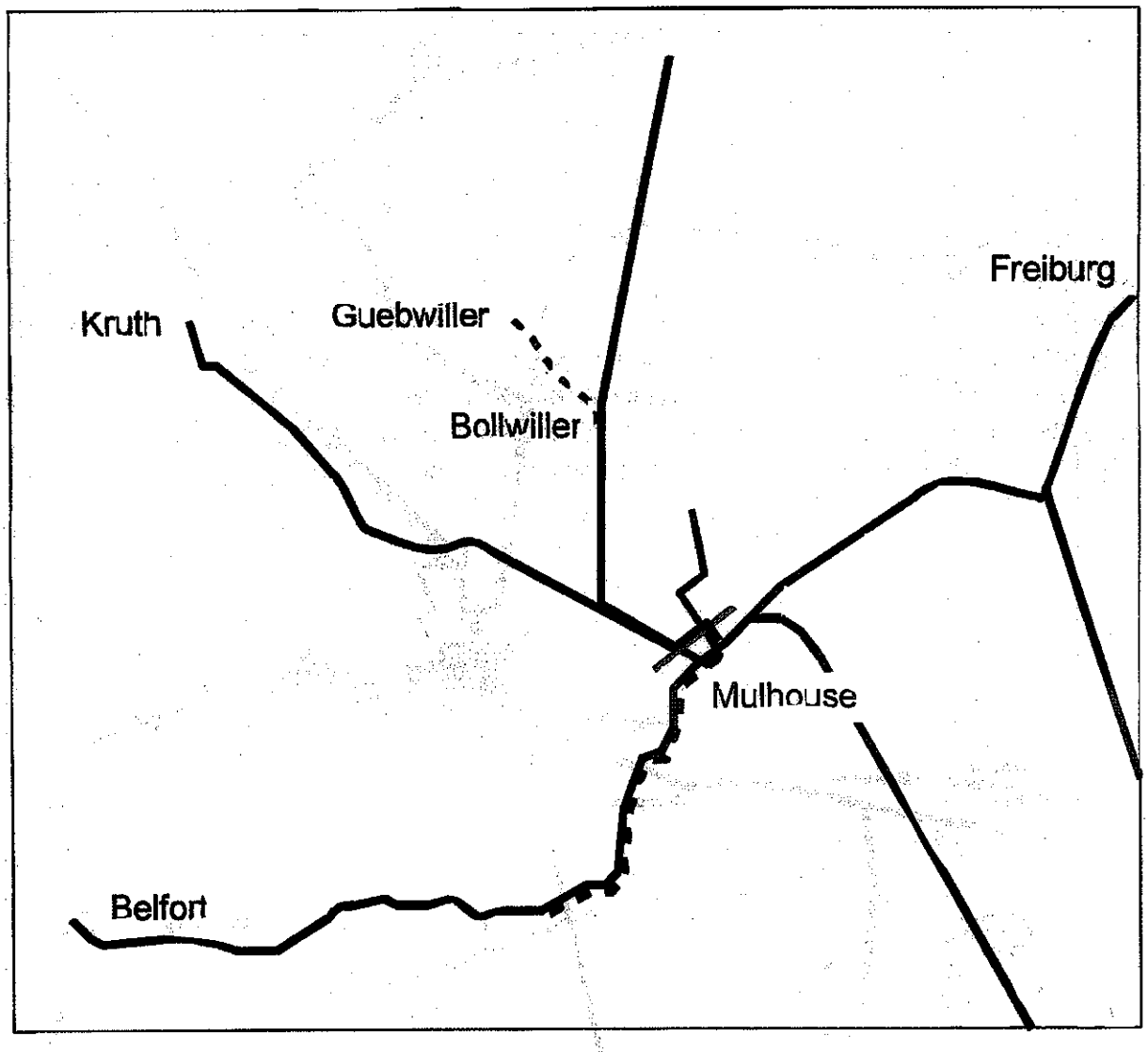
- Prolongement ligne interconnectée vers Kehl
- Prolongements ultérieurs (2010) nécessitant une nouvelle génération de matériel roulant (tricourant, diesel-électrique ou gaz-électrique) vers Offenburg
- vers Haguenau, Wörth et Rastatt

TTK SYSTRA

N 0 2 4km

06.08.99, © TTK GmbH
Fichier: u:...\grafik\karten\stra0499.cdr

Graphique 7 : Cas de Mulhouse, projets potentiels à l'horizon 2005.



Cas de Mulhouse, projets potentiels à l'horizon 2005

Projets existants ou décidés

- Lignes ferroviaires
- Tram ligne nord - sud
- Tram ligne est - ouest
- Tramway interconnecté Mulhouse - Kruth (matériel Sarrebrück 2,65m ou tramway ferroviaire standard 2,55m*30m)

Options avec tram-train (qui n'engagent que les bureaux d'étude)

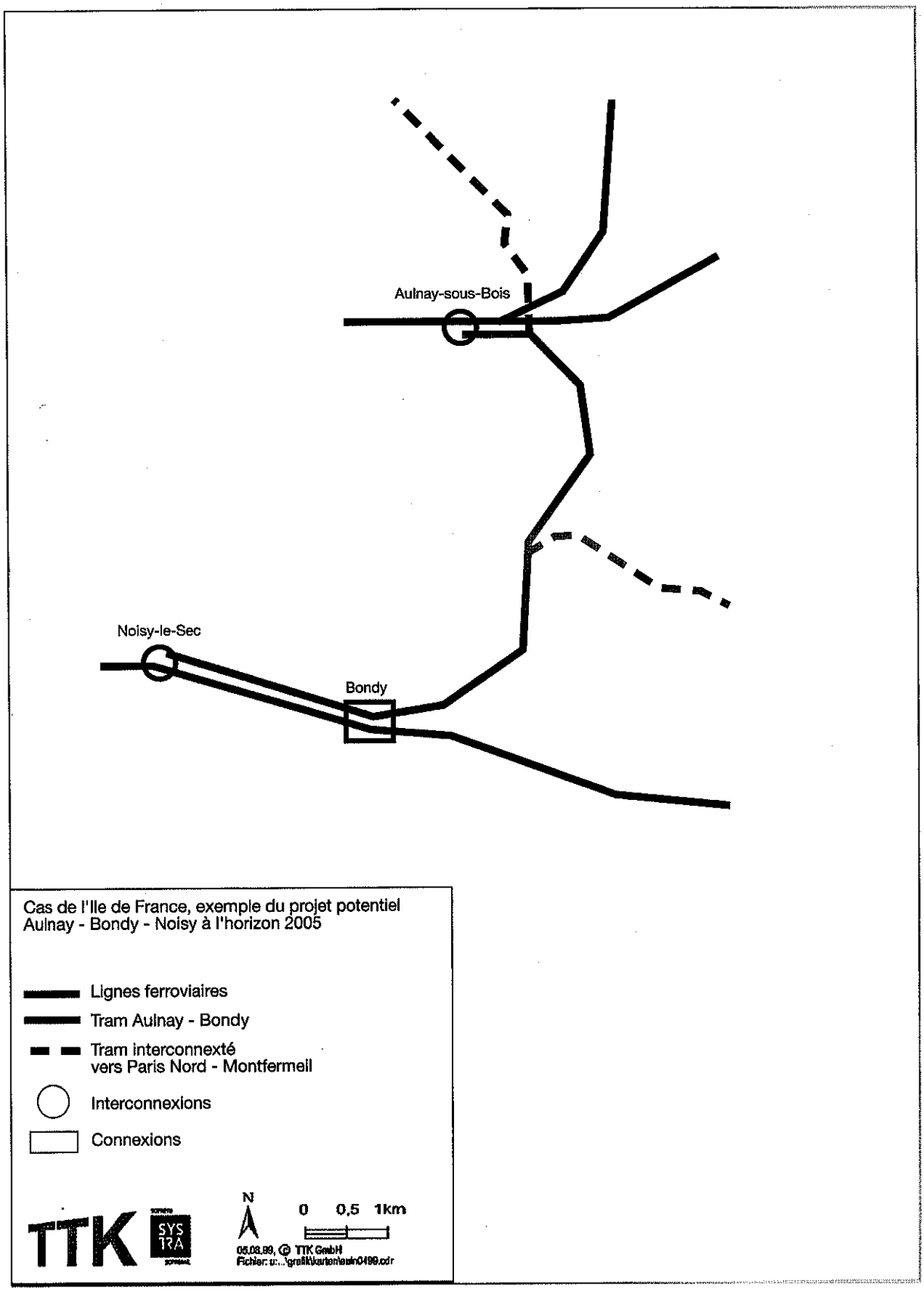
- Navette Guebwiller - Bollwiller (prolongée ultérieurement sur Mulhouse)
- Tramway régional Altkirch - Mulhouse (interconnexion ultérieure)

TTK SYSTRA

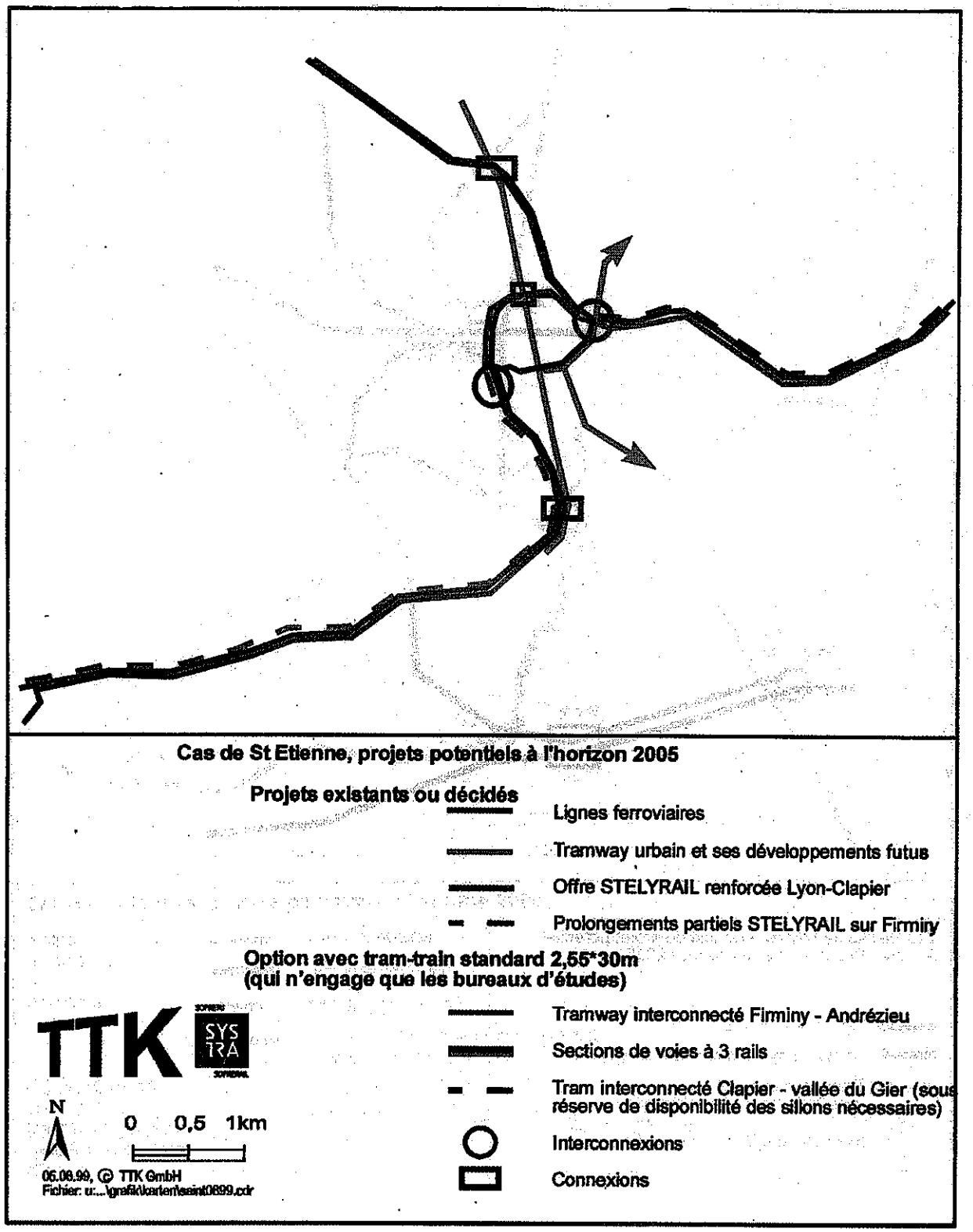
N 0 5 10km

05.06.99, © TTK GmbH
Fichier: u:...\grafik\karten\mulh0499.cdr

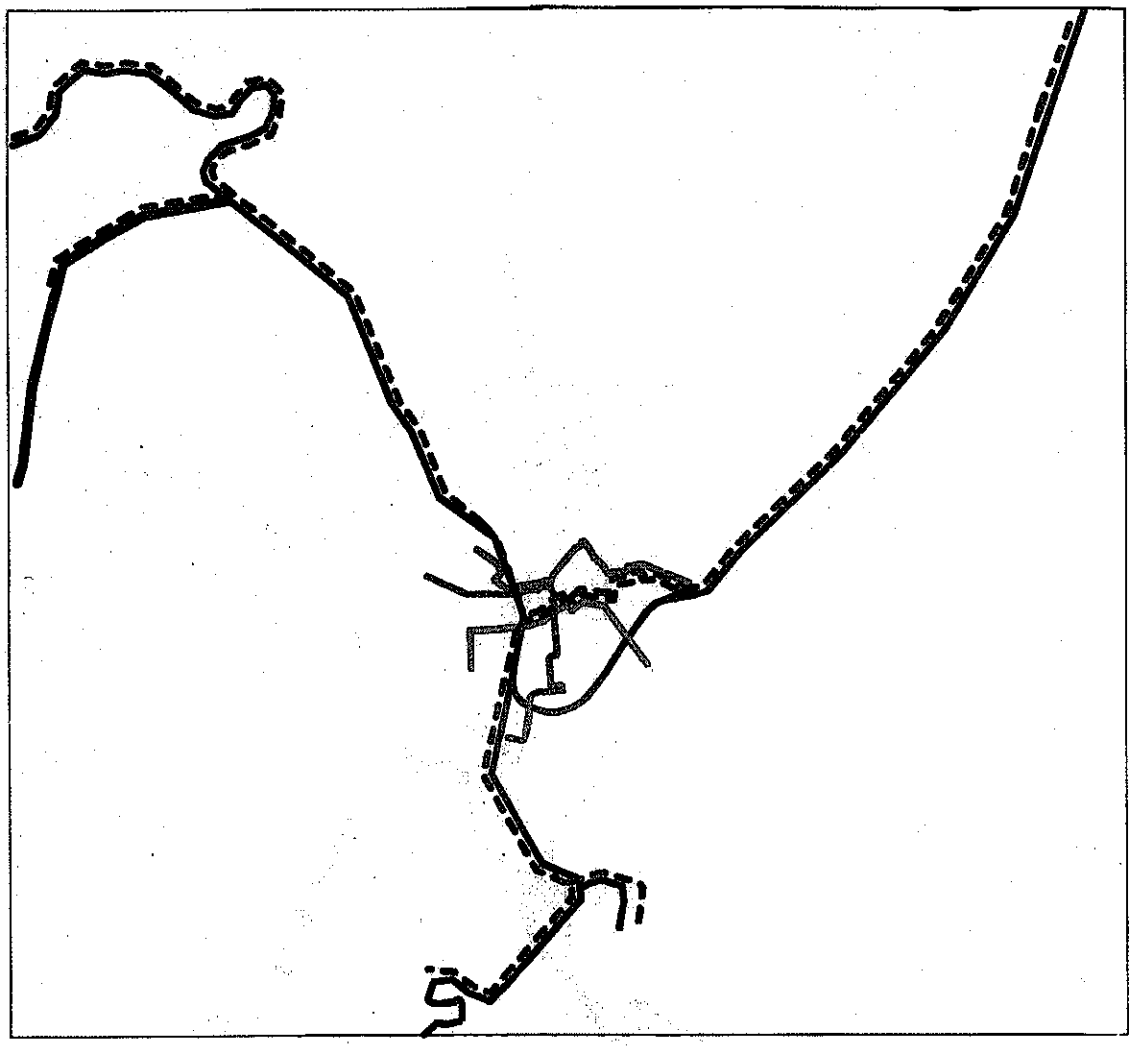
Graphique 8 : Cas de l'Ile-de-France, exemple du projet potentiel Aulnay-Bondy-Noisy-le-Sec à l'horizon 2005.



Graphique 9 : Cas de St-Etienne, projets potentiels à l'horizon 2005.



Graphique 10 : Cas de Grenoble, projets potentiels à l'horizon 2005.



Cas de Grenoble projets potentiels à l'horizon 2005

Lignes existantes ou décidées

- Lignes ferroviaires
- Tram ligne A
- Tram ligne B
- Ligne Seyssins - St Martin d'Hères (ligne C)

Options avec tram-train standard 2,65m*37m (qui n'engagent que les bureaux d'étude)

- "Superlazer" interconnecté Gières - ligne C - Rives /Tullins (exploitation possible à 15 ou 20mn en composition double à l'HP, 1500 à 2000 pl./sens/HP)
- "Superlazer" interconnecté Chambéry - Grésivaudan - ligne C - Vif / Vizille (exploitation possible à 30 ou 20mn en composition double soit 1000 à 1500pl./sens/HP)

TTK SOFRETU SYSTRA SOFRERAIL

N

0 2 4km

06.08.99, © TTK GmbH
Fichier: u:...\grafik\karten\gren0499.cdr

Graphique 11 : Cas de Nantes, projets potentiels à l'horizon 2005.

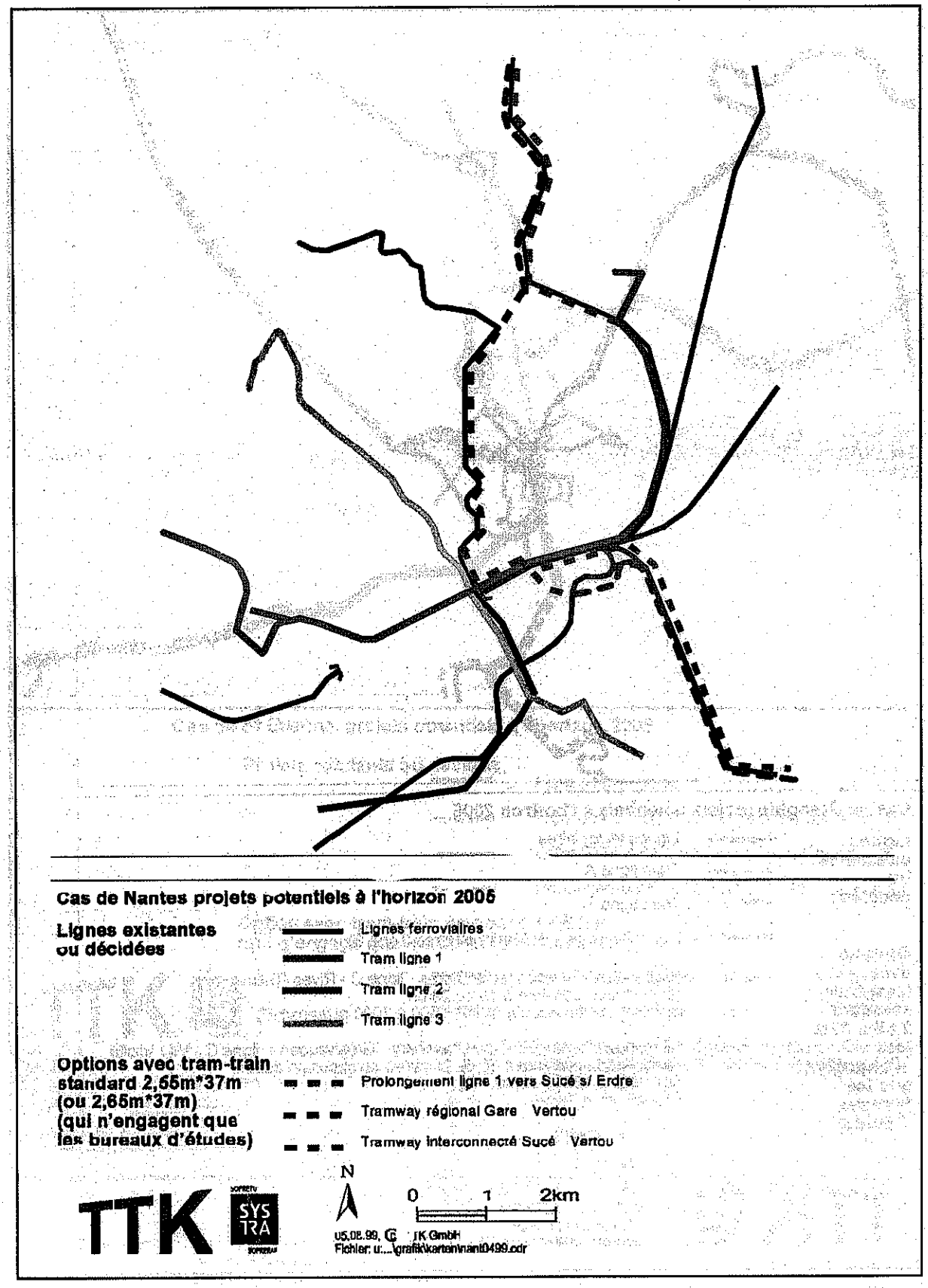


Tableau 2 : Contraintes liées à l'exploitation et nombre de rames nécessaires.

Tableau des caractéristiques liées à l'exploitation et nombre de rames nécessaires

	SITES					
	Strasbourg	Mulhouse	Aulnay-Bondy-Noisy-le-Sec	Lyon	Grenoble	Nantes
Composition des rames (unité simple, unité multiple)	UM	US (réservation UM)	US ou UM	US, UM possible à terme	UM	US ou UM
Couplage UM en exploitation	envisageable	envisageable	envisageable	envisageable	envisageable	envisageable
Capacité globale d'une rame simple (a: assise, d: debout)	a: 80 / d:120	a: 100 / d:150 ou a: 80 / d:120	200 à 250 places US ou UM a: 100 / d: 150 ou a: 80 / d: 120	Ouest lyonnais première phase a: 80 / d: 120	a: 100 / d: 150 ou a: 80 / d: 120	a: 100 / d: 150 ou a: 80 / d: 120
Rames bidirectionnelles	oui a priori	oui a priori	oui a priori	oui a priori	oui a priori	oui a priori
Longueur de ligne ferroviaire exploitable par le matériel roulant (ordre de grandeur)	35 km (Obernai) 15 à 19 rames	40 km (Kruth) 10 rames	25 km 12 longues ou 24 rames en UM	20 km (St-Paul-Saint-Bel) 10-15 rames		
et Parc envisagé Horizon 2005 Total : 60-70 rames Options : +100 rames (approximations TTK-SYSTRA pour les projets à l'étude ou potentiels; les options correspondent à des projets potentiels non validés par les AO)	Option : +3 rames + 5 km, 2-3 rames Kehl	Options : +4 rames + 5 km, 1 rame (Bollwiller-Guebwiller) + 20 km, 2-3 rames (Mulhouse gare Altkirch)		Options : +35 rames + 35 rames	Options : +30 rames + 20 à 50 km, + 15-20 rames (Voiron-Gresivoudan) + 20 km (Vif-Vizille), + 5 rames	Options : +20 rames 10 km, +3 rames (Vertou)

	St-Etienne (1)	Rouen	Orléans	Montpellier	Valenciennes	Bordeaux
Composition des rames (unité simple, unité multiples)	UM	*	UM	*	*	*
Couplage UM en exploitation	envisageable	*	envisageable	*	*	*
Capacité globale d'une rame simple (a: assise, d: debout)	a: 100 / d: 150 ou a: 80 / d: 120		a: 100 / d: 150 ou a: 80 / d: 120	a: 100 / d: 150 ou a: 80 / d: 120	a: 100 / d: 150 ou a: 80 / d: 120	a: 100 / d: 150 ou a: 80 / d: 120
Rames bidirectionnelles	oui a priori	oui a priori	oui a priori	oui a priori	oui a priori	oui a priori
Longueur de ligne ferroviaire exploitable par le matériel roulant (ordre de grandeur)	15 km (St-Etienne-Firminy) 10 rames	*	*	*	*	*
et Parc envisagé Horizon 2005 Total : 60-70 rames Options : +100 rames (approximations TTK-SYSTRA pour les projets à l'étude ou potentiels; les options correspondent à des projets potentiels non validés par les AO)		*	23 km (St Orléans-Châteauneuf non exploité par rames urbaines) 15 rames	*	*	*

NOTA : les contraintes et valeu(s) commune(s) possible(s) sont soulignés

* pas de projet précis à ce jour

(1) L'indication de la valeur commune ne vaut par recommandation, le 2,65 m x 37 m étant préférable lorsqu'il est possible.

(2) Option de tramway régional St-Etienne-Firminy, interconnectable ultérieurement entre Clapier et Châteaucreux.
L'autre option à l'étude, de prolongement du tramway urbain (gabarit 2,30 m) sur voie RFF adaptée pour la voie métrique et vraisemblablement dédiée, serait une interconnexion de type 1 non concernée par ce rapport

Grâce à une conception en rame courte de 29,5 m (ou 37 m) couplable en unité double ou triple en fonction des différents projets, le matériel identifié a une grande polyvalence d'application. Le parc moyen potentiel par agglomération est de 15 éléments. En fonction des décisions d'investissement des AO, un parc de 60 à 170 rames pourrait ainsi être commandé pour l'horizon 2005. Il semble en tout cas imaginable et souhaitable que le matériel d'interconnexion identifié puisse être utilisé comme tramway régional potentiellement interconnectable. Effectivement, le phasage des projets proposera bien souvent, dans un premier temps, une amélioration de l'offre classique ferroviaire évoluant par la suite vers un développement ultérieur en interconnexion.

4.2. Autres options d'acquisition du matériel identifié pour des relations régionales intégralement ferroviaires

L'objectif de cette évaluation a été d'estimer le nombre de rames du type identifié pour les projets d'interconnexion qui pourraient être utilisées en remplacement de matériel ferroviaire classique à l'horizon 2005 sur des relations intégralement ferroviaires (moyennant soit un parc de rames bicourant avec option d'équipement électrique 25 000 V CA / 1500 V CC, soit deux parcs de rames distincts 25 000 V CA et 1500 V CC). L'intérêt d'une telle option est bien sûr de profiter des économies d'échelle qui seraient dégagées par une commande de rames d'interconnexion pour l'horizon 2005 et réciproquement de faire profiter les projets d'interconnexion d'économies d'échelle encore plus importantes. La pertinence de cette option, qui est liée à un coût de l'ordre de 10 MF par rame, dépend elle-même de ces économies d'échelle.

A terme, beaucoup de lignes de la SNCF sont susceptibles d'accueillir un matériel électrique léger type tramway régional électrique (ordre de grandeur de 200 rames d'après la SNCF). Toutefois l'objet de cette évaluation était de s'intéresser aux cas non seulement pertinents, mais qui seraient aussi relativement simples à mettre en pratique. Dans ce cadre, nous avons fixé les critères de choix suivants :

- Nombre précis de TER assurant une desserte toutes gares et ce, en navette. L'arrivée du tramway régional permettrait de libérer du matériel TER affecté à ces services. Ce dernier est davantage conçu pour des dessertes régionales ou parfois mal dimensionné pour ce type de prestation. Dès lors, d'autres lignes du réseau TER pourraient bénéficier des retombées de l'arrivée du tramway régional ;

- Type d'électrification. Les lignes sélectionnées sont ou seront toutes électrifiées à l'horizon 2005 mis à part la section Trouville-Deauville/Dives-Cabourg où une incertitude demeure ;

- Capacité de la ligne ferroviaire à recevoir des trains légers offrant une desserte à arrêts fréquents (tramways régionaux). Toutes les lignes où circulent des trains possédant une vitesse limite de 200 ou 220 km/h sont, par exemple, écartées ;

- Temps de parcours. Le seuil critique correspond à un temps de trajet d'une heure environ. Mais cette limite peut fort bien à l'avenir être relevée.

Dans ce contexte, l'évaluation conduit à identifier un potentiel de 50 à 80 rames pour trois types d'exploitation :

- Un tramway appelé à circuler sur des lignes rurales et notamment sur celles dites d'embranchement (antennes pyrénéennes, bretonne ou normande) ou sur des lignes électrifiées principalement pour le trafic fret (Saumur-Thouars, Thionville-Bouzonville et Thionville-Apach) ;
- Le tramway régional dit TER aura pour fonction de circuler sur des lignes possédant un certain niveau de trafic et d'assurer des navettes entre deux pôles tout en offrant des correspondances avec le réseau Grandes Lignes de la SNCF. Dans le cas de la section Valence-Romans-Bourg-de-Péage, il s'agit d'une mesure d'accompagnement de la mise en service de la LGV Méditerranée et de la gare TGV de St-Marcel-les-Valence ;
- Le tramway régional périurbain devrait être mis en service autour de certaines agglomérations où l'interconnexion n'est pas envisageable (du moins à court terme) pour des raisons techniques, comme à Rennes (réseau VAL), Nancy (réseau TVR), Dijon (réseau bus) et Lille (réseau VAL et tramway à voie métrique).

D'un point de vue technique, la possibilité d'utilisation de rames bicourant sur quelques axes conduit à s'interroger sur l'opportunité d'uniformiser l'ensemble du parc de matériel roulant avec un équipement électrique identique (option 1500 V CC / 25 000 V CA 50 Hz).

Tableau 3 : Liste indicative des lignes ferroviaires susceptibles d'être exploitées en tram-train.

	Kilométrage approximatif (km)	Nombre de gares ou stations à desservir	Meilleur temps de parcours actuel (mn)	Type d'électrification	Matériels TER actuellement utilisés
Tramway régional rural					
Bayonne - St-Jean-Pied-de-Port	48	9	63'	1500 V continu	Z 2
Pau - Oloron-Ste-Marie	32	5	35'	1500 V continu	Z 2
Montréjeau - Luchon	30	4	39'	1500 V continu	RRR
Perpignan - Villefranche-Vernet-les-Bains	45	8	45'	1500 V continu	Z 2
Saumur - Thouars	38	2	30'	25 000 V 50 Hz	Z 2
Moncaret - Lannion	17	1	16'	25 000 V 50 Hz	X 2100
Lisieux - Trouville-Deauville	29	3	21'	25 000 V 50 Hz	RRR / X 4630
Trouville-Deauville - Dives-Cabourg	20	4	33'	(25 000 V 50 Hz)	X 4900 / X 4630
Thionville - Bouzonville	35	10	43'	25 000 V 50 Hz	Z 2 / Z 6300
Thionville - Apach	21	5	22'	25 000 V 50 Hz	Z 2 / Z 6300
Tramway régional TER					
Vierzon - Bourges	31	5	25'	1500 V continu	Z 2 / Z 5300
Epernay - Reims	30	7	36'	25 000 V 50 Hz	RIO / Z 6300
Sedan - Charleville-Mézières	21	6	25'	25 000 V 50 Hz	Z2 / Z 6300
Valence - Romans-Bourg-de-Péage	20	2	14'	(1500 / 25 000 V)	X 2700
Tramway régional périurbain					
Rennes - Montreuil-sur-Ille	29	6	30'	(25 000 V 50 Hz)	X 2100
Rennes - Vitré	38	6	30'	25 000 V 50 Hz	RRR / X 2100
Rennes - Messac-Guipry	38	8	38'	25 000 V 50 Hz	Z 2 / X 2100
Rennes - La Brohinière	37	5	28'	25 000 V 50 Hz	Z 2 / X 2100
Nancy - Lunéville	31	8	32'	25 000 V 50 Hz	Z 2 / Z 6300
Dijon - Is-sur-Tille	30	6	30'	1 500 / 25 000 V	RRR
Lille - Tournai	25	8	28'	3 000 / 25 000 V	RIO / RRR
Lille - Mouscron	17	6	21'	3 000 / 25 000 V	RIO / RRR

Tableau 4 : Evaluation du nombre de rames tram-trains utilisables pour des exploitations intégralement ferroviaires à l'horizon 2005.

	Desserte ferroviaire (service 97 / 98)			TER remplaçable par des tramway				Nbe de rames de tramway nécessaire	
	Nbre total D'AR trains voyageurs	Nbe de liaisons en correspondance	Nbe d'AR en desserte omnibus	Dessertes en autocar		Dessertes en train		à service constant	à service amélioré
				Nbe d'AR en navette	Véhicules nécessaires	Nbe d'AR en navette	Véhicules nécessaires		
Tramway régional rural									
Bayonne - St-Jean-Pied-de-Port	4	32 à Bayonne	4	-	-	3,5	1	1	(2)(3) 3
Pau - Oloron-Ste-Marie	6	29 à Pau	6	-	-	6	2	1	(1) 2
Montréjeau - Luchon	2	23 à Montréjeau	2	5,5	2	0	1	2	(2) 2
Perpignan - Villefranche-Vernet-les-Bains	6	36 à Perpignan	6	-	-	5,5	2	2	(1)(3) 4
Saumur - Thouars	2	30 à Saumur	2	4,5	2	0	1	2	(2) 2
Plouaret - Lannion	9	15 à Plouaret	9	0,5	1	5	1	2	(2)(3) 3
Lisieux - Trouville-Deauville	9	33 à Lisieux	7	0,5	1	7	1	2*	(2)(3) 4
Trouville-Deauville - Dives-Cabourg	(en saison)	10 à Deauville	(en saison)	-	-	(en saison)	1	1	(2) 2
Thionville - Bouzonville	1,5	60 à Thionville	1,5	4	2	0,5	2	2	(2)(3) 3
Thionville - Apach	3	60 à Thionville	3	1	2	2,5	1	1	(2) 2
Tramway régional TER									
Vierzon - Bourges	26,5	56 aux 2 gares	14	-	-	7,5	2	4*	(2)(3) 5
Epernay - Reims	21	56 aux 2 gares	11	-	-	9,5	3	4*	(2)(3) 5
Sedan - Charleville-Mezières	16,5	36 à Charleville	11	-	-	10	2	3	(1)(3) 4
Valence - Romans-Bourg-de-Péage	13	107 à Valence	1	1	1	1	1	4*	(1)(3) 6
Tramway régional périurbain									
Rennes - Montreuil-sur-Ille	20,5	76 à Rennes	13	-	-	13	3	3	(1)(3) 4
Rennes - Vitré	10	76 à Rennes	7,5	-	-	3	1	3	(1)(3) 4
Rennes - Messac-Guipry	10	81 à Rennes	5	-	-	0,5	1	2	(1) 3
Rennes - La Brohinière	7	86 à Rennes	7	-	-	2,5	2	2	(1) 3
Nancy - Lunéville	27	119 à Nancy	11	-	-	10	4	4	(1)(3) 6
Dijon - Is-sur-Tille	9	93 à Dijon	7	-	-	7	2	3	(1)(3) 4
Lille - Tourcoing	22,5	211 à Lille	12,5	-	-	8,5	2	3	(1)(3) 4
Lille - Mouscron	28,5	205 à Lille	21,5	-	-	7,5	2	3	(1)(3) 4
						Total de rames :		54	79

* en composition double

(1) en cadencement horaire

(2) en renforcement de correspondance

(3) en renforcement de capacité (couplage en unité multiple)

CONCLUSIONS

5.1 Une solution de base de rame interopérable et qui répond aux besoins

5.2 Un marché potentiel d'au-moins 100 rames à l'horizon 2005

5.3 Des possibilités d'appels d'offre coordonnés

CHAPITRE 5

5. CONCLUSIONS

5.1. Une solution de base de rame interopérable et qui répond aux besoins

Notre analyse nous a conduit à identifier une architecture de rame type (2,55 x 29,5 m) et des grandes caractéristiques techniques répondant aux besoins d'une part, et d'autre part opérables aussi bien sur l'ensemble des réseaux tramway considérés qu'à des fins d'exploitation intégralement ferroviaire. Cette architecture de rame type peut être déclinée site par site avec des variantes.

Le "plus grand dénominateur commun" sur tous les sites est constitué des organes suivants :

- architecture de la rame (fenêtres, planchers, structure de caisse, y compris résistance à la compression) ;
- bogies ;
- moteurs ;
- dispositifs de freinage ;
- cabines de conduites ;
- portes ;
- palettes ;
- attelages automatiques.

La standardisation de ces éléments représente un élément fort de recherche du moindre coût pour le périurbain. Par contre, trois types d'équipement électrique seront nécessaires dans les différents sites :

Equipements électriques	Sites	Nombre de rames concernées
Bicourant 1500 V / 25 kV	Tramway régional	50 à 80
Bicourant 750 V / 25 kV	Strasbourg, Mulhouse, Aulnay-Bondy-Noisy-le-Sec, Grenoble, Nantes	55 à 115
Bicourant 750 V / 1500 V	Lyon, St-Etienne	10 à 55

Tableau 5 : Trois types d'équipement électrique.

En outre, les 50 à 100 rames exploitées en site ferroviaire pur pourront être dispensées des équipements nécessaires à la circulation tramway.

En matière de gabarit, nous avons précisé que les rames 2,55 m x 29,5 m peuvent être interopérables sur tous les sites étudiés. Toutefois, des variantes d'augmentation de gabarit peuvent être intéressantes à retenir sur tel ou tel site : leur adoption pourra dépendre des surcoûts qu'elles impliquent dans les propositions des constructeurs. Ces variantes sont synthétisées dans le tableau ci-dessous.

Variantes	**Sites**	**Nombre de rames concernées**
Longueur des caisses de la rame		
29,5 m (A : 11 m - 7,5 m - 11 m) Option de base	Strasbourg, Lyon, St-Etienne	30 à 75
37 m (A : 13,25 m - 10,5 m - 13,25 m)	*Mulhouse, Ile-de-France, Grenoble, Nantes, exploitations ferroviaires pures*	*85 à 170*
Largeur de la rame, maxi / au niveau du plancher des portes		
2,55 m /2,40 m Option de base	Aulnay-Bondy-Noisy, Lyon, St-Etienne, Grenoble[1]	35 à 110
2,60 m/2,40 m[2]	*Strasbourg, Nantes*	*20 à 40*
2,65 m/2,40 m	*Grenoble[3]*	*30*
2,65m/2,65 m	*Tramway régional, Mulhouse*	*60 à 95*

(1) Options d'interconnexion avec lignes A ou B.
(2) Si l'on conçoit bien l'intérêt d'une option 2,65 m, qui concernera 60 à 95 rames, la pertinence de l'option 2,60 m pour Strasbourg et Nantes est plus fragile (20 à 40 rames) ; ces réseaux pourront préférer adopter soit le 2,55 m, soit le 2,65 m moyennant vérifications de gabarit complémentaires. Pour Strasbourg, une étude de gabarit fine du tunnel de la ligne A devra notamment préciser si le réseau s'oriente à terme vers un gabarit général de 2,55 m, 2,60 m ou 2,65 m.
(3) Options d'interconnexion avec ligne C uniquement.

Tableau 6 : Récapitulatif des variantes de gabarit sur les différents sites étudiés.

En matière de gabarit, ce tableau permet de dégager deux grandes catégories de séries :

- Les séries "à gabarit optimisé" concernant les projets Strasbourg, Lyon, St-Etienne (2,55 m x 29,5 m) ;
- Les séries "longues et larges" concernant les projets de tramway régional et de Mulhouse (2,65 m x 37 m) ; à noter que ces séries pourront avoir une palette réduite à 20 cm contre 25 cm pour les séries à "gabarit optimisé".

Les séries exploitables à Aulnay-Bondy-Noisy-le-Sec, Nantes et Grenoble sont intermédiaires puisqu'elles auront un gabarit optimisé en largeur, mais pourront avoir une longueur de 37 m.

5.2. Un marché potentiel d'au moins 100 rames à l'horizon 2005

Pour des besoins urbains estimés entre 60 et 170 rames et des besoins purement ferroviaires estimés prudemment entre 50 et 80 rames, nous arrivons à un marché total à l'horizon 2003-2005 de 110 à 250 rames. Ces valeurs représentent des ordres de grandeur pouvant permettre aux constructeurs de répondre au marché à des coûts d'autant plus compétitifs que les commandes seront groupées.

Nous avions annoncé en introduction que l'enjeu de la convergence des rames d'interconnexion est d'obtenir une (ou deux) première(s) série(s) commune à plusieurs projets à l'horizon 2003-2005 à un prix inférieur à 15 MF la rame, enjeu particulièrement important pour l'amorce de projets institutionnellement complexes, voire fragiles, et qui pourraient être facilités par l'existence concrète d'un matériel bimode à un coût accessible et accepté sur le réseau ferroviaire. On estime aujourd'hui le coût d'une rame d'interconnexion à 15/16 MF la rame pour des séries de 10-20 unités (projets Mulhouse et Strasbourg). Un appel d'offre sur 100 rames pourrait conduire à abaisser ce coût unitaire vers un ordre de 12 MF la rame de 30/37 m si les options demandées par chaque AO ne sont pas trop spécialisées.

A titre d'exemple, un modèle de société "d'acquisition déléguée" a été adopté en Allemagne pour l'acquisition à la suite d'un appel d'offre en commun de 60 remorques tramway à plancher bas : 38 pour le réseaux de Leipzig et 22 pour celui de Rostock. Cet appel d'offre lancé en août 1998 a conduit au choix de Bombardier (DWA) pour des remorques de 14 m de long à un prix unitaire de 2,7 millions de FF ; sans cette démarche en commun, il est certain que les coûts de développement d'un produit n'existant pas sur le marché eurent été sensiblement plus élevés.

5.3. Des possibilités d'appels d'offre coordonnés

La possibilité de définir une architecture de rame commune nous permet donc d'entrevoir la possibilité de mettre au point un cahier des charges type sur la base des premiers éléments identifiés, voire de lancer un ou plusieurs appels d'offre coordonnés pour deux projets ou plus (achat simultané par plusieurs AO et/ou exploitants d'une série de rames adaptées à plusieurs projets différents).

Les tramways d'interconnexion étant aussi des trains, leur mise en service sur le réseau ferroviaire peut en effet être dissociée de la mise en service des infrastructures d'interconnexion (ainsi, à Karlsruhe, les premières rames bimodes ont remplacé des TER vers Pforzheim un an avant la mise en service du projet d'interconnexion vers Bretten). En France, on peut ainsi tout à fait imaginer qu'une série de rames commandée par différentes collectivités pour trois projets A, B et C d'horizon de mise en service X, X+2, X+3, puisse être mise en service à l'année X comme tramway d'interconnexion pour A, mais comme TER en attendant les années X+2 et X+3 de mise en service des projets B et C.

Très concrètement, des appels d'offres coordonnés voire en commun pourront concerner les besoins de rames suivants :

- Tramway régional + Aulnay-Bondy-Noisy-le-Sec (75 rames 37m x 2,55/2,65 m) ;
- Mulhouse, rames tram-train (37 m) et urbaines[1] (29,5 m) (35 rames 2,65 m) ;
- Tramway régional + Mulhouse (85 rames 37 m/29,5 m x 2,65 m) ;
- Strasbourg (20 rames 29,5 m x 2,55 m[2]) ;
- Mulhouse + Strasbourg (55 rames 29,5/37 m x 2,55/2,65 m) ;
- Tramway régional + Aulnay-Bondy-Noisy-le-Sec + Mulhouse + Strasbourg (130 rames 29,5/37 m x 2,55/2,65 m) ;

et toutes les combinaisons possibles incluant aussi :

- Nantes (10 à 20 rames 37 m x 2,55 m[3]) ;
- Lyon (20 à 35 rames 29,5 m x 2,55 m) ;
- Grenoble (20 à 30 rames 37 m x 2,55 m ou 2,6 m) ;
- Lyon + Grenoble (40 à 65 rames 29,5/37 m x 2,55 m).

(1) Rames urbaines qui, bien que non considérées dans ce rapport, pourraient être identiques, aux équipements près, aux rames d'interconnexion.

(2) ou 2,60 m ou 2,65 m.

(3) Idem.

ANNEXES

6.1 Liste des participants au groupe de travail

6.2 Rames courtes en composition double ou rames longues ?
Evaluation économique dans le cas du projet Strasbourg-Barr-Gresswiller (-Ottrott)

CHAPITRE 6

6. ANNEXES

6.1. Liste des participants au groupe de travail

Bureaux d'étude animateurs	
SYSTRA	Jean-Paul BALENSI
	Alain GAUDRY
TTK	Marc PEREZ

Exploitants	
SNCF	Patrice LEROY
	Jean-Claude DEGAND
	Guy CHIRONNIER
	Michel AVART
	Robert BALDOCCHI
TRANSDEV	Pierre MOISE
CGEA	Jean-Paul LERIVEREND
CTS	Georges MULLER
RATP	Philippe VENTEJOL
SLTC	Annick TRAVARD
SEMITAG	Luis GARRO
	André MAGNON-PUJO
	Jean TERRIER
SEMITAN	Olivier DELERUE
UTP	Henri SZTANKE
SEMTAO	Bernard SARAZIN

Autorités Organisatrices	
GART	Pascale PECHEUR
	Ronan GOLIAS
Ville de Nantes	Jacques TRIBOUT
Région Rhône-Alpes	Denis GAMARD
STP	Jean-Pierre LOUDIERE
	Denis REMOND
	Bernard JACOB
C.U. de Strasbourg	Yves LAURIN
SITRAM	Robert THOMANN
Région Alsace	Vincent GEORJON

Bureaux d'études et institutions invités	
INRETS	Claude SOULAS
SEMALY	Edmond LUCA

6.2. Rames courtes en composition double ou rames longues ? Evaluation économique dans le cas du projet Strasbourg - Barr/Gresswiller (/Ottrott)

Nous avons effectué une analyse comparative de différents scénarios de desserte de la ligne de Molsheim (vers Barr et Gresswiller et à plus long terme vers Ottrott) avec des roulements prenant en compte une fréquence de 10 ou de 15 mn vers l'aéroport. Deux hypothèses sont prises en compte : rames longues ou rames courtes exploitées en US ou UM en fonction des sections et/ou périodes d'exploitation avec possibilités de couplage de rames courtes en gare de Molsheim ou à l'aéroport. Les hypothèses de l'évaluation sont les suivantes :

Coût unitaire rame courte (MF)	16	Coût exploitation conduite (F/h)	200
Coût unitaire rame longue (MF)	28	Coût entretien, énergie RC (F/km)	6
Besoin en réserve (rame courte)	2	Coût entretien, énergie RL (F/km)	10
Besoin en réserve (rame longue)	1	Péage RFF (F/km)	10
Amortissement matériel roulant (%)	7,3	Coût d'un agent en station (F/h)	180
Taux d'utilisation en UM des rames courtes avant l'aéroport (%)	70	Utilisation en UM des rames courtes sur la ligne de Barr (oui/non)	oui

Tableau 7 : Données sélectionnées dans les différentes hypothèses.

Les résultats, présentés dans les 3 tableaux suivants, montrent que la solution la plus économique est celle qui fait appel aux rames courtes couplables en unité multiple dans la plupart des cas de figures.

	1re phase (sans Ottrott)		2e phase (avec Ottrott)	
	10′ aéroport	15′ aéroport	10′ aéroport	15′ aéroport
Coût rames courtes MF/an	46,56	37,48	60,37	51,28
Coût rames longues MF/an	51,79	43,00	64,06	–
Différence de coûts MF/an	– 5,23	– 5,52	– 3,69	–

Tableau 8 : Coûts pour des roulements axés sur une hypothèse de couplage / découplage des rames courtes en gare de Molsheim.

	1re phase (sans Ottrott)		2e phase (avec Ottrott)	
	10′ aéroport	15′ aéroport	10′ aéroport	15′ aéroport
Coût rames courtes MF/an	48,30	39,22	62,11	53,02
Coût rames longues MF/an	51,79	43,00	64,06	–
Différence de coûts MF/an	– 3,49	– 3,78	– 1,95	–

Tableau 9 : Coûts pour des roulements axés sur une hypothèse de couplage / découplage des rames courtes à l'aéroport.

	2e phase (avec Ottrott)	
	10′ aéroport	15′ aéroport
Coût rames courtes MF/an	60,37	51,28
Coût rames longues MF/an	64,06	–
Différence de coûts MF/an	– 3,69	–

Tableau 10 : Coûts pour des roulements axés sur une hypothèse de couplage / découplage tantôt à Molsheim, tantôt à l'aéroport.

Ces résultats s'expliquent par la configuration d'une desserte à trois branches où les rames longues perdent en productivité sur les parcours terminaux au point d'alourdir les coûts d'exploitation de la desserte. Effectivement, l'avantage économique des rames longues, réel pour une première phase de projet à dominante urbaine, s'estompe lorsque les projets se ramifient en région sur des lignes à niveau de trafic moins élevé. Autrement dit, l'avantage marginal d'extensions régionales de projets d'interconnexion peut devenir faible, voire nul, lorsqu'il s'agit de remplacer un autorail léger ou un autocar par une rame de 50 ou 60 m de long.

Au contraire, la possibilité de découpler les rames apporte une grande flexibilité d'exploitation permettant de répondre au mieux à la demande tout en réduisant les circulations de masse à vide et d'optimiser le besoin de matériel roulant. Elle permet d'induire des économies importantes d'exploitation dans 3 cas de figure :

- Possibilité de limiter la circulation de rames couplées sur les seules sections où ces trains longs sont indispensables (optimisation des coûts d'investissement en matériel roulant) ;
- Possibilité de limiter la circulation de rames couplées aux seuls moments où ces trains longs sont indispensables (optimisation des coûts d'exploitation, postes énergie et entretien) ;
- Possibilité d'assurer deux dessertes en fourche en petites unités couplées pour n'utiliser qu'un seul sillon sur le tronc commun (optimisation des coûts d'investissement et d'exploitation) ;

Concernant l'exploitation, plusieurs points méritent d'être précisés. Tout d'abord, les opérations de couplage et de découplage sont assez simples sur le principe mais le moindre retard dans le sens aller a des répercussions sur le sens retour : d'où la nécessité d'une réserve dite "commerciale" à l'aéroport et d'un agent en station pour la sécurité des opérations pris en considération dans l'évaluation. A noter que des manœuvres de couplage/découplage se déroulent quotidiennement sur des lignes à fort trafic de la Région Parisienne.