



HAL
open science

Tramway Capacitaire. Exploitabilité et aboutissement d'une démarche R&D

Guillemette Bois

► **To cite this version:**

Guillemette Bois. Tramway Capacitaire. Exploitabilité et aboutissement d'une démarche R&D. Gestion et management. 2014. dumas-02924033

HAL Id: dumas-02924033

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02924033v1>

Submitted on 27 Aug 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UNIVERSITÉ
LUMIÈRE
LYON 2
UNIVERSITÉ DE LYON



Travail de fin d'études

Tramway Capacitaire

Exploitabilité et aboutissement d'une démarche R&D



Guillemette BOIS

ENTPE VA Transport – Master TURP

Promotion ENTPE : 59

Promotion TURP : 22

Date de soutenance : 03/09/2014

Lieu : ENTPE

Président du jury : Patrick BONNEL

Maître de TFE : Bruno PLUMEY





Fiche bibliographique

[Intitulé du diplôme] Master Professionnel Transports Urbains et Régionaux de Personnes (TURP)		
[Tutelles] Université Lumière Lyon 2 Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE)		
[Titre] « Tramway Capacitaire »		
[Sous-titre] « Exploitabilité et aboutissement d'une démarche R&D »		
[Auteur] BOIS Guillemette		
[Membres du Jury] BONNEL Patrick, LET, président de jury PLUMEY Bruno, Chef de projet chez EGIS Rail, maitre de stage		
[Nom et adresse du lieu du stage] Egis Rail Le Carat 168-170 avenue Thiers 69455 Lyon cedex 06 France		
[Résumé] Les villes mondiales ne cessent de croître ce qui crée des besoins croissants en transport. Ces villes ont besoin de procurer à leurs habitants une offre en transport performante, cependant elles n'ont pas toujours les moyens de construire des lignes de métro sur leurs corridors à forte demande. C'est pour cela qu'Egis travaille depuis 2012 sur le projet de R&D « Tramway Capacitaire ». Ce projet a pour ambition de développer un mode inspiré du tramway « à la française », véritable réussite en termes de transports et d'aménagement urbain, de grande capacité, entre 10 000 et 15 000 passagers par heure et par sens, pour les villes de plusieurs millions d'habitants. Les principales caractéristiques du tramway capacitaire sont des fréquences élevées, un matériel roulant de grande capacité, et une intégration urbaine forte. La réflexion présentée dans ce rapport aboutit sur la proposition de solutions techniques concernant le matériel roulant, l'aménagement des stations, l'exploitation et la régulation.		
[Mots clés] Capacité ; Énergie ; Exploitation ; Matériel roulant ; R&D ; Régulation ; Station ; Tramway ; Tramway Capacitaire ;		Diffusion : papier : [oui/non]* électronique : [oui/non]* (* : Rayer la mention inutile) Confidentiel jusqu'au : Décembre 2020
[Date de publication] 26/08/2014	[Nombre de pages] 99	[Bibliographie (nombre)] 14



Publication data form

[Entitled of Diploma] Master Degree Diploma in Urban and Regional Passenger Transport Studies		
[Supervision by authorities] Université Lumière Lyon 2 Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE)		
[Title] « Tramway Capacitaire » - High capacity tramway		
[Subtitle] « Operability and culmination of a research and development process »		
[Author] BOIS Guillemette		
[Members of the Jury (name and affiliation)] BONNEL Patrick, LET, chairman of the jury PLUMEY Bruno, Chef de projet chez EGIS Rail, internship supervisor		
[Place of training] Egis Rail Le Carat 168-170 avenue Thiers 69455 Lyon cedex 06 France		
[Summary] Global cities continue to grow creating a growing need of transport. These cities need to provide their inhabitants with a performing public transport solution; however they do not always have the means to build subway lines on their high-demand corridors. That's why, since 2012, Egis Rail is working on the R & D project: "Tramway Capacitaire." (Capacity Tramway). This project aims to develop a mode of transport inspired by the tramway "French style", a real success in terms of transport and urban planning, which provides a high capacity of transport (between 10,000 and 15,000 passengers per hour per direction), for cities of several million people. The main features of "Tramway Capacitaire" are high frequencies, a rolling stock of high capacity and high urban integration. Reflections in this report lead to the proposal of technical solutions for the rolling stock, construction of stations, operation and regulation.		
[Key Words] Capacity ; Energy ; operation ; R&D; Rolling Stock ; Station; Tramway; Tramway Capacitaire		Distribution statement : Paper : [yes-/no]* Electronic : [yes / no]* (* Scratch the useless mention) Declassification date : December 2020
[Publication date] 26/08/2014	[Nb of pages] 99	[Bibliography] 14



Sommaire

Liste des illustrations	7
Glossaire	10
Remerciements	11
Préambule	12
1 Introduction	13
1.1 Enjeux du Tramway Capacitaire	13
1.2 Problématique	14
1.3 Méthodologie	17
2 Matériel roulant et énergie	19
2.1 Matériel roulant	19
2.2 Énergie : tension et alimentation du tramway	22
3 Conception des stations	23
3.1 Rappel des enjeux et de la problématique	23
3.2 Présentation des concepts de stations et du dimensionnement	24
3.2.1 Contraintes de conception et hypothèses retenues lors de la conception des stations	24
3.2.2 Présentation des configurations retenues :	24
3.2.3 Méthodologie de dimensionnement	25
3.2.4 Présentation détaillée des concepts de stations et de leur fonctionnement	27
4 Exploitation	47
4.1 Rappel des enjeux et de la problématique	47
4.1.1 Enjeux	47
4.1.2 Problématique	47
4.2 Méthodologie	47
4.3 Identification des principales causes d'irrégularité sur les réseaux existants	49
4.3.1 Régularité et objectifs de la régulation	49
4.3.2 Retour d'expérience sur les lignes de tramway en circulation	49
4.3.3 Causes d'irrégularité et les pistes d'amélioration de la régularité	57
4.4 Traversée des carrefours	60
4.4.1 Technologie de priorité aux carrefours	60
4.4.2 Modélisation d'un carrefour type	62
4.5 Configuration du terminus	69
4.5.1 Rôle d'un terminus	69
4.5.2 Exemple de configuration du terminus	69
4.5.3 Glissement conducteur en terminus	70
4.6 Exploitation d'une ligne	71



4.6.1	Objectifs.....	71
4.6.2	Méthodologie	71
4.6.3	Principaux résultats	73
4.7	Limites des simulations	74
4.8	Régulation	75
4.8.1	Les principes de régulation en ligne	75
4.8.2	Les outils de régulation en ligne	75
4.8.3	Les actions de régulation :	76
4.8.4	Les limites à la régulation	77
5	Conclusion	79
5.1.1	Conclusions : les mesures préconisées pour le capacitaire.....	79
5.1.2	Limites du travail effectué et Pistes restantes à explorer	80
5.1.3	Enseignements.....	81
	Bibliographie.....	82
	ANNEXE 1 : Matériel roulant sur deux étages.....	83
	ANNEXE 2 : Tension 750 V ou 1500 V	84
	ANNEXE 3 : Méthodologie de dimensionnement des stations capacitaires.....	86
3.1	Hypothèses de dimensionnement générales.....	86
3.2	Méthode de dimensionnement des quais dans le cas de l'exemple	86
3.3	Méthode de dimensionnement des quais dans le cas du calcul de la largeur minimale de quai nécessaire	87
3.4	Quai central	88
3.5	Quai central divisé.....	89
3.6	Quais latéraux	90
3.7	Quais latéraux divisés.....	91
3.8	Trois quais	92
3.9	Quais centraux décalés	93
3.10	Quais sur deux niveaux	94
	ANNEXE 4 : Réseaux tramway avec des troncs communs à forte fréquence	96
	ANNEXE 5 : Mesures de régulation	99
5.1	Mesure de régulation deuxième quai amont.....	99
5.2	Mesure de régulation : deuxième quai aval.....	99



Liste des illustrations

Figure 1 Tramway Alstom Citadis (2x32m).....	20
Figure 2 Siemens Avenio (2 à 8 modules)	20
Figure 3 Tramway Lyon	21
Figure 4 Tramway Angers.....	21
Figure 5 Schéma d'un quai central	27
Figure 6 Quai central: Illustration de l'espace occupé par 300 montants et 300 descendants.....	27
Figure 7 Quai central: Section type	28
Figure 8 Schéma d'un quai central divisé	29
Figure 9 Quai central divisé: Illustration de l'espace occupé par 300 montants et 300 descendants.....	29
Figure 10 Quai central divisé : Section Type	30
Figure 11 Quai central divisé, vues réalisées par Atelier Villes et Paysages	31
Figure 12 Quai central divisé, vues réalisées par Atelier Villes et Paysages	31
Figure 13 Schéma des quais latéraux	32
Figure 14 Quais latéraux: Illustration de l'espace occupé par 300 montants et 300 descendants	32
Figure 15 Quais latéraux : Section Type	33
Figure 16 Schéma des quais latéraux divisés	34
Figure 17 Quais latéraux divisés: Illustration de l'espace occupé par 300 montants et 300 descendants	34
Figure 18 Quais latéraux divisés : Section Type	35
Figure 19 Schéma de la configuration trois quais	36
Figure 20 Trois quais : Illustration de l'espace occupé par 300 montants et 300 descendants	36
Figure 21 Trois quais : Section Type	37
Figure 22 Trois quais, vues réalisées par Atelier Villes et Paysages.....	38
Figure 23 Trois quais, vues réalisées par Atelier Villes et Paysages.....	38
Figure 24 Trois quais : simulation statique des mouvements.....	39
Figure 25 Schéma de la configuration en quais décalés	41
Figure 26 Plan quais centraux décalés	41
Figure 27 Schéma de la configuration des quais sur deux niveaux.....	44
Figure 28 Tronçon Pont de Bezons – La Défense de la ligne T2 à Paris	51
Figure 29 Intervalles du T2 à la station de la défense.....	52
Figure 30 Schéma du terminus à Pont de Bezons	52
Figure 31 Intervalles à l'arrivée et au départ au terminus Pont de Bezons	53
Figure 32 Répartition des temps d'arrêt en station à la station de La Défense.....	54
Figure 33 Répartition des temps d'arrêt en station à La Défense.....	55
Figure 34 Technologie des boucles de détection en carrefour	61
Figure 35 Schéma du carrefour simulé.....	63
Figure 36 Terminus en avant gare.....	69
Figure 37 Terminus en arrière gare.....	70



Figure 38 Relève conducteur.....	70
Figure 39 Schéma de la ligne fictive simulée.....	71
Figure 40 Pupitre SAE sur le tableau de bord du conducteur	75
Figure 41 Matériel roulant sur deux étages.....	83
Figure 42 Schéma d'un quai central.....	88
Figure 43 Schéma d'un quai central divisé.....	89
Figure 44 Schéma d'un quai latéral.....	90
Figure 45 Schéma d'un quai latéral divisé.....	91
Figure 46 Schéma de la station à trois quais.....	92
Figure 47 Schéma du quai sur deux niveaux.....	94
Tableau 1 Matériels roulants capacitaires	19
Tableau 2 Siemens Avenio Capacités	21
Tableau 3 Hypothèses de dimensionnement des stations	26
Tableau 4 Capacité offerte par la configuration en quai central	27
Tableau 5 Capacité offerte par la configuration en quai central divisé	29
Tableau 6 Capacité offerte par la configuration en quais latéraux.....	32
Tableau 7 Capacité offerte par la configuration en quais latéraux divisés	34
Tableau 8 Capacité offerte par la configuration trois quais.....	36
Tableau 9 Capacité offerte par la configuration quais centraux décalés.....	41
Tableau 10 Récapitulatif des caractéristiques des 6 configurations de stations pour un matériel roulant de 85 mètres.....	43
Tableau 11 Flux de la demande et capacité offerte pour les deux niveaux confondus par cette configuration	45
Tableau 12 Caractéristiques de la ligne de tramway T2	50
Tableau 13 Intervalles entre les rames du T2 à la défense.....	51
Tableau 14 Temps de retournement au terminus Pont de Bezons	53
Tableau 15 Temps d'arrêt en station à la défense.....	54
Tableau 16 Temps d'arrêt en station T2 (La Défense), Jérusalem (centre ville)	55
Tableau 17 Avance / Retard par rapport au temps de parcours théorique.....	56
Tableau 18 Intervalle de passage des rames.....	57
Tableau 19 Comparaison des technologies de priorité aux carrefours	60
Tableau 20 Scénarios testés lors de la simulation d'un carrefour	65
Tableau 21 Mesures préconisées pour le tramway capacitaire et quantification de leurs effets.....	67
Tableau 22 Scénarios testés lors de la simulation de la ligne	72
Tableau 23 Actions de régulation.....	76
Tableau 24 Tableau comparatif d'une alimentation du tramway en 750 V et en 1500 V	84
Tableau 25 Hypothèses de dimensionnement générales	86
Tableau 26 Dimensionnement d'un quai central.....	88



Tableau 27 Dimensionnement d'un quai central divisé.....	89
Tableau 28 Dimensionnement d'un quai latéral.....	90
Tableau 29 Dimensionnement des quais latéraux divisés	91
Tableau 30 Dimensionnement des trois quais.....	92
Tableau 31 Dimensionnement des quais centraux décalés.....	93
Tableau 32 Dimensionnement du quai sur deux niveaux.....	94
Tableau 33 Lignes de tramway à forte fréquence.....	96
Tableau 34 Exemple de lignes BRT avec des intervalles très réduits.....	97
Tableau 35 Troncs communs avec des intervalles très réduits.....	97
Tableau 36 Mesure de régulation : deuxième quai amont.....	99
Tableau 37 Mesure de régulation: deuxième quai aval.....	99



Glossaire

AOT : Autorité organisatrice des transports

ARG: Arrière gare

AVG : Avant gare

BRT: Bus Rapid Transit

DEA : Direction des Études Amonts

LAC: Ligne aérienne de contact

PPHPS : Passagers par heure et par sens

TCSP : Transport en commun en site propre



Remerciements

Avant de débiter ce rapport, je souhaiterais remercier tous les membres de la Direction des Études Amonts d'EGIS Rail qui m'ont accueillie et fait partager leurs expériences.

Dans un premier temps je souhaiterais remercier Dominique Hurbin, responsable du pôle Études générales TCSP de la Direction des Études Amonts, qui a été mon premier contact dans l'entreprise et m'a permis d'avoir une première approche de ce sujet passionnant du tramway capacitaire.

Puis je tiens à remercier plus particulièrement, Bruno Plumey, mon maitre de stage, qui m'a accompagnée et associée, pendant ces six mois, au projet de tramway capacitaire et d'autres projets. Les nombreux échanges que nous avons eus ont été très enrichissants.

Je remercie également, Jérémie Simon, Patrick Morbois, Marion Rivoire et Vincent Gascon avec qui j'ai eu le plaisir de travailler sur des projets très intéressants, pour les connaissances qu'ils m'ont apportées et la confiance qu'ils m'ont accordée. Les projets auxquels ils m'ont permis de participer m'ont permis d'acquérir une vision transversale du métier de chargé d'études, qui m'a beaucoup plu.

Je remercie aussi Jean-Maxime Risacher de m'avoir accueillie dans la bonne humeur dans son bureau.

Enfin, je tiens à remercier, Patrick Bonnel mon référent de stage pour sa disponibilité et ses conseils précieux pour l'élaboration de ce rapport.



Préambule

Le Master Transport Urbains et Régionaux de Personnes ainsi que le cycle d'ingénieur à l'ENTPE s'achèvent par un stage professionnel d'une durée minimale de 4 mois. Ce stage nous permet d'avoir une expérience professionnelle en ayant une mission précise à réaliser au sein de l'organisme d'accueil. J'ai eu l'opportunité de réaliser mon stage au sein d'Egis Rail. Egis Rail est une filiale du groupe Egis, qui rassemble toutes les compétences dans les domaines des transports urbains guidés et des transports ferroviaires : systèmes, automatisme, matériel roulant, sécurité, équipements, génie civil, environnement. Ce bureau d'études conduit de nombreux projets en France et à l'international depuis les études amont de conception d'un réseau de transports publics jusqu'à la mise en service. Mon stage s'est déroulé à la direction des Études Amonts à Lyon, cette direction regroupe environ 60 ingénieurs et architectes généralistes du transport qui réalisent en France et à l'étranger des schémas directeurs TCSP, des études de faisabilité technicoéconomiques, des études préliminaires, des expertises techniques et du conseil. La mission de la direction des Études Amonts est de concevoir et faire émerger des projets de transport urbain ou interurbain.

L'objet de mon stage était de travailler sur le concept de « Tramway Capacitaire ». Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche et développement interne, financé par le Groupe Egis et ses filiales (Egis Rail, Egis France et Atelier Villes et paysage). Elle fait donc appel à plusieurs branches d'Egis dont Egis Rail est la plus impliquée.

L'objectif du projet R&D est de développer une compétence au sein du Groupe Egis pour pouvoir accéder à de nouveaux marchés, notamment dans les villes des pays en développement.

Ces six mois de réflexion ont été basés sur une première réflexion menée entre 2012 et 2013. Une étude de marché et une analyse fonctionnelle du produit capacitaire réalisées en 2012 ont permis de cadrer le projet, en 2013 les premières solutions techniques (stations, terminus) ont commencé à émerger.

L'objectif de mon stage était de reprendre et d'approfondir, en collaboration avec mon maître de stage, les réflexions déjà menées sur le tramway et de proposer aux villes de plusieurs millions d'habitants, ne pouvant se doter d'un métro, une alternative au BRT pour les corridors à forte demande (10 000 – 15 000 personnes par heure et par sens)

L'objectif du présent document est de fournir un guide méthodologique présentant la démarche et les principaux résultats du projet de R&D sur le « Tramway Capacitaire ».



1 Introduction

1.1 Enjeux du Tramway Capacitaire

Les transports en commun jouent un rôle déterminant dans la société. Le développement des systèmes de transport contribue au développement socio-économique des villes et des quartiers. La construction d'un réseau de transport public performant permet de réduire la congestion, la pollution de l'air, la consommation d'énergie et limiter les accidents de la route. Les transports en commun apportent un meilleur confort dans les déplacements et facilitent la mobilité des personnes n'ayant pas les moyens d'accéder à la voiture particulière. En plus des avantages directs, ils ont des effets indirects comme l'amélioration de la croissance économique et du développement urbain.

Les villes mondiales ne cessent de croître ce qui crée des besoins croissants en transport. Ces villes ont besoin de procurer à leurs habitants une offre en transport performante, cependant elles n'ont pas toujours les moyens de construire des lignes de métro sur leurs corridors à forte demande.

C'est pour cela qu'Egis Rail et plus particulièrement la direction des Études Amonts travaille depuis 2012 sur le projet du « Tramway Capacitaire ». Ce projet a pour ambition de développer un mode inspiré du tramway « à la française », véritable réussite en termes de transports et d'aménagement urbain, de grande capacité, entre 10 000 et 15 000 passagers par heure et par sens (PPHPS), pour les villes de plusieurs millions d'habitants.

Actuellement, de nombreuses villes, n'ayant pas les moyens de construire un métro, ont essayé de répondre aux besoins forts en transports par l'insertion de ligne de BRT (Bus Rapid Transit), cependant ces systèmes sont parfois poussés à leurs limites ce qui engendre des problèmes d'exploitation, de régularité et de saturation (Ex : TransMilenio à Bogota). De plus, les BRT ne sont pas toujours adaptés à une insertion dans les centres urbains denses.

L'enjeu du projet de recherche sur le tramway capacitaire est donc de proposer une solution de transport innovante, différente du BRT, qui conjugue les avantages du métro, en offrant une forte capacité de transport, comprise entre 10 000 et 15 000 pphps ; et les avantages du tramway en proposant des fréquences élevées, une importante qualité de service et une intégration urbaine de qualité. Un projet de tramway permet souvent d'accompagner des projets urbains de grande envergure et de limiter l'usage de la voiture particulière en prenant de l'espace sur celle-ci, ce qui favorise le report modal.

Les principales caractéristiques du tramway capacitaire sont : des fréquences élevées, un matériel roulant de grande capacité, et une intégration urbaine forte.

Récemment plusieurs agglomérations se sont équipées de lignes de tramway avec des véhicules de grande taille (Rabat, Istanbul, Jérusalem, Casablanca...), qui leur ont permis d'offrir un service de transport de grande capacité ainsi qu'une grande qualité urbaine sur le corridor.



Ces caractéristiques du projet nous amènent à repenser dans ce rapport chaque sous-système d'un tramway classique, à savoir : le matériel roulant, l'alimentation du système en énergie, le dimensionnement des stations, l'exploitation du tramway.

Le produit « Tramway Capacitaire » présenté dans ce rapport reste un concept qui devra être adapté à chaque agglomération.

1.2 Problématique

La capacité de transport envisagée pour le tramway capacitaire est de l'ordre de 10 000 à 15 000 personnes par heure et par sens, ce qui est bien plus élevé que ce qui est offert par les tramways actuels (2 000 à 5 000 PPHS). L'objectif est également de conserver la qualité de service du tramway (régularité et vitesse d'exploitation) et la qualité d'intégration urbaine qui fait le succès du tramway en France (plateforme tramway à niveau et franchissable au niveau des carrefours).

Afin d'atteindre les capacités envisagées, en partant des systèmes de tramways actuels, les deux aspects sur lesquels il était possible de jouer pour augmenter la capacité sont le matériel roulant et l'exploitation (fréquence des tramways, vitesse commerciale...) ainsi, ces deux pistes sont à actionner en parallèle :

- **Augmenter les fréquences** : en augmentant le nombre de tramways passant par heure, on peut augmenter la capacité de la ligne. Des fréquences faibles entre 2 min 30 et 3 min ont été envisagées.
- **Augmenter la capacité du matériel roulant** : la capacité du matériel roulant peut être augmentée en allongeant le véhicule, et en optimisant l'aménagement intérieur (Ex : limiter le nombre de places assises). Au regard des gammes de produits existantes des constructeurs, il est envisageable d'utiliser un matériel roulant de 85 m de long (deux modules de 42 m). Nous avons également envisagé l'utilisation d'un matériel roulant sur deux étages de grande capacité, seulement actuellement aucun produit de ce type n'existe sur le marché.

Cependant, l'insertion et la circulation d'un tramway de 85 mètres à une fréquence de 3 minutes sont un vrai challenge.

Actuellement, certaines lignes de tramways exploitées avec des intervalles très réduits et dans des zones d'habitat dense sont confrontées à des difficultés de respecter l'horaire prévu. Les causes d'avance et retard sont multiples et propres à chaque ligne. Les irrégularités observées sur les réseaux de tramways français et internationaux sont dues :

- **À la traversée des carrefours** : la priorité au tramway n'est pas systématiquement donnée sur toutes les lignes, cependant lorsque la priorité aux carrefours est intégrée au système tramway elle n'est parfois pas fiable à 100 %. Un manquement de la fenêtre de



vert peut être engendré par une mauvaise détection du tramway aux abords du carrefour, ou une détection trop tardive, des véhicules qui restent bloqués sur la plateforme tramway ou qui ne respectent pas la priorité, des traversées de piétons devant la rame.

- **À des aléas en ligne** : un incident technique au niveau du matériel roulant ou des aiguillages, un incident à bord du tramway (agression, vol, colis suspect...), le stationnement d'un véhicule sur la plateforme peuvent engendrer des retards qui ont un impact sur l'ensemble du carrousel.
- **À des aléas en station** : lorsque les stations sont très fréquentées, les usagers ont tendance à vouloir rentrer de force dans le tramway et bloquent les portes, ce qui empêche au tramway de redémarrer.
- **À des problèmes de gestion des terminus** : le temps de battement au terminus est parfois trop faible et ne permet pas au terminus de jouer son rôle de régulation.

Il existe cependant des marges d'amélioration dans la conception et l'exploitation du système. L'enjeu est donc d'envisager les configurations les plus optimales afin d'avoir un système d'exploitation robuste et une qualité de service à la hauteur des attentes des clients, tout en travaillant sur l'insertion urbaine du tramway.

Explorer le projet de tramway capacitaire, c'est réinventer le tramway classique à différents niveaux:

- Le **matériel roulant** est un élément central du système, car il implique directement la capacité de transport, mais aussi le confort, le temps d'échange en station, le temps de parcours, et l'infrastructure.
- **Les stations** vont accueillir des flux très élevés qui vont avoir des conséquences sur les temps d'arrêt en station et la variabilité ; et donc sur la vitesse commerciale du tramway et sa régularité. L'enjeu est donc de concevoir des stations qui optimisent la gestion des flux des montants et des descendants pour limiter le temps d'arrêt en station et leur variabilité, et ceci, en conservant l'intégration urbaine du tramway. Dans les pays des marchés cibles, les autorités organisatrices des transports souhaitent fermer les stations par des contrôles d'accès à l'entrée. Quelle configuration de station est préférable pour un tramway de grande capacité ? Comment limiter les flux entre les montants et les descendants ? est-il possible d'envisager une séparation de ces flux ?
- Le tramway capacitaire va faire appel à un matériel roulant plus long et transporte plus de voyageurs, les conséquences sur **l'exploitation du tramway** vont être importantes : il va être soumis à beaucoup d'aléas en station (temps d'échange voyageur variables et incertains) et en carrefour (manquement de la fenêtre de vert, temps de traversée plus long). Ces aléas ont des conséquences importantes dans le carrousel de véhicules qui se succèdent avec des intervalles très réduits (2 min 30 à 3 min) : création de trains de trams, dégradation des temps de parcours, diminution de la capacité théorique (saturation). Ainsi, il est important de mettre en place des mesures afin de limiter ces aléas.
- L'exploitation est assistée par l'utilisation de **systèmes de priorité aux feux et de régulation** par le PCC. À la vue des problèmes d'irrégularité constatés sur certaines



lignes de tramway, une marge d'amélioration est possible pour ces systèmes. Le tramway capacitaire va être très sensible aux aléas, c'est pour cela que ces systèmes devront être améliorés pour permettre de maximiser la régularité (respect de l'horaire prévu) du tramway.

- Le tramway classique fonctionne avec une tension de 750 V, dans le cas du tramway capacitaire où les consommations sont décuplées une adaptation de la tension d'alimentation à 1500 V est à prévoir. Est-il possible d'avoir un tramway alimenté en 1500 V plutôt qu'en 750 V ? Et quels sont les avantages et inconvénients de ce type d'alimentation ?
- Enfin, les pays ciblés par le projet de tramway capacitaire sont en grande partie des pays en développement dont les moyens sont souvent limités. L'enjeu de limiter les **coûts** est important, sans pour autant pénaliser l'exploitation du système. La problématique des coûts ne sera pas abordée dans ce document qui est consacré à la faisabilité technique et la viabilité d'un système de tramway capacitaire.

Il est important dans un premier temps d'identifier les systèmes qui ont fait leurs preuves sur les tramways en circulation en France et dans le monde, ainsi que les améliorations envisageables sur les systèmes existants. Quelles sont les solutions concernant l'architecture des stations, les systèmes, les terminus, l'exploitation en ligne, la gestion des carrefours, l'énergie qui sont envisageables pour éviter au maximum les aléas en ligne ?

Le projet du tramway capacitaire est multidisciplinaire et chaque système doit être optimisé ou réinventé. La bonne marche du système regroupe plusieurs volets : stations, exploitation, matériel roulant, l'alimentation énergie et systèmes sur lesquels nous irons plus ou moins dans le détail.



1.3 Méthodologie

Le tramway capacitaire est un sujet multidisciplinaire et multidimensionnel assez vaste. Certains aspects seront donc développés en détail, mais tous ne pourront pas être abordés. Dans la méthodologie du projet de recherche et développement du tramway capacitaire, 5 volets de réflexion ont été identifiés :

- Le volet matériel roulant
- Le volet énergie
- Le volet station
- Le volet exploitation et circulation du tramway
- Le volet système
- Le volet coûts d'investissement et d'exploitation

Certains volets nous ont paru plus importants de développer car ils permettent notamment de développer l'expertise du bureau d'études. Nous avons identifié plusieurs volets à étudier en détail. Pour chaque volet, une réflexion approfondie a été menée en faisant notamment appel à des experts dans les différents domaines (en interne ou en externe), qui ont pu apprécier et parfois étoffer les solutions envisagées pour le tramway capacitaire. Les volets ont des problématiques très différentes, ils ont donc été abordés différemment et indépendamment les uns des autres :

- **Volet matériel roulant et énergie:**

Ce volet a été traité en plusieurs étapes. Nous avons dans un premier temps effectué un état des lieux des matériels roulants actuellement disponible chez les constructeurs et leur capacité, pour ensuite mener une réflexion sur les marges d'amélioration des matériels roulants existants et proposer des solutions innovantes. Enfin, la rencontre d'un expert matériel roulant de Egis Rail qui a pu apporter son expertise sur la réflexion à court et long terme sur le matériel roulant et l'énergie

- **Le volet stations :**

La réflexion a été menée dans un premier temps sur la configuration des stations qui pourraient répondre aux enjeux liés aux stations capacitaires, cette réflexion avait été préalablement menée en 2013, des premiers dimensionnements avaient été faits. En repartant de cette première réflexion, nous l'avons approfondie et nous avons repris les dimensionnements en statique de manière plus détaillée. La méthodologie de dimensionnement a été basée sur le document de dimensionnement des gares du grand Paris.

- **Volet exploitation :**

Ce volet est le volet avec le plus grand enjeu pour le Tramway Capacitaire, l'exploitation, la gestion des terminus et la gestion des carrefours sont des points difficiles à traiter du concept.

Afin d'en étudier les différents aspects de la meilleure manière, ce volet a été abordé dans un premier temps en réalisant un retour d'expérience sur les lignes existantes. L'objectif est



de mettre en avant les irrégularités et les méthodes de régulation observées sur les réseaux existants avec des fréquences et des capacités déjà importantes. Pour cela plusieurs experts ont été rencontrés : rencontres avec un ancien exploitant (Véolia Transdev), maintenant expert indépendant, et avec un exploitant du tramway de Montpellier, qui ont pu donner leur avis sur la circulation et la régulation des lignes de tramway actuellement et donner un avis sur le projet de Tramway Capacitaire

Nous avons également fait une visite de terrain et des relevés en ligne, en station et en terminus sur le tramway T2 à Paris : ce tramway exploité avec des rames doubles (2*32m) offre une capacité théorique de 5 400 PPHPS (à 4 personnes / m²), capacité des plus importante connue.

Cela nous a permis d'apporter des solutions à mettre en place afin de fiabiliser l'exploitation et limiter les aléas.

Deux simulations, la simulation d'un carrefour et la simulation d'une ligne fictive, ont été utilisées comme support pour vérifier la viabilité de la circulation de rames longue à une fréquence de 3 min et hiérarchiser l'importance des mesures à mettre en place pour sécuriser l'exploitation.

- **Volet systèmes :**

Une rencontre d'un expert système au sein d'Egis Rail, nous a permis de faire l'état des lieux sur les systèmes de priorité aux carrefours existants. Cet expert (ancien de Kéolis Lyon) et les deux exploitants rencontrés ont pu apporter également leur expertise sur les systèmes et les méthodes de régulation.

La réflexion menée sur le tramway capacitaire fait intervenir de nombreux acteurs au sein d'Egis, mais également des intervenants extérieurs.



2 Matériel roulant et énergie

Pour atteindre les capacités envisagées, les deux marges de manœuvre sont la fréquence et la capacité unitaire du matériel roulant. Nous allons donc voir dans cette partie, quelles sont les capacités offertes par les matériels roulants existants et quelles sont les innovations qui peuvent être apportées pour le Tramway Capacitaire. Le matériel roulant constitue un aspect majeur dans le système tramway, il est l'image de tout le système pour l'utilisateur.

2.1 Matériel roulant

Le matériel roulant a une implication directe sur la capacité du système de transport. Le choix d'un matériel roulant capacitaire avec des fréquences basses, permet d'atteindre des capacités théoriques élevées. Sur les réseaux français, la majorité des tramways ont une longueur inférieure à 45 m, sauf le T2 à Paris qui couple deux rames de 32 m.

Les enjeux pour le matériel roulant sont doubles :

- **Avoir une capacité élevée** : limitation des places assises, utilisation optimale de toute la surface
- **Assurer la fluidité des échanges** : portes larges, limiter les obstacles à l'intérieur du tramway, éviter la validation dans les tramways.

Lorsque l'on s'intéresse aux gammes de matériels roulants des constructeurs (Alstom et Siemens) on peut voir qu'ils proposent des matériels roulants intéressants pour notre concept. Le tableau ci-dessous présente des exemples de matériels capacitaires disponibles.

Tableau 1 Matériels roulants capacitaires

	Capacité (6 p/m)	Freq pour 12 000 pphps	Freq pour 15 000 pphps
Alstom 2x32m	606	3 min	2.4 min
(Alstom 2x42m)	780	3.9 min	3.1 min
Siemens 63m	612	3 min	2.5 min
(Siemens 72m)	700	3.5 min	2.8 min

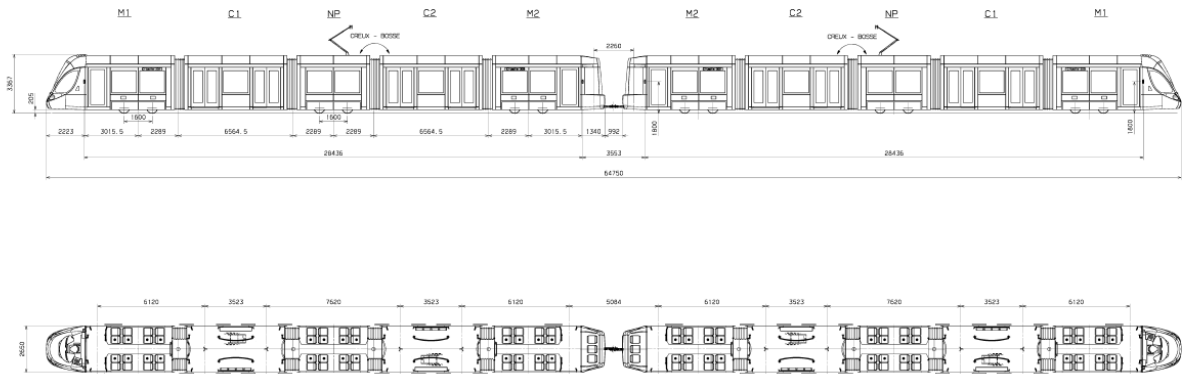


Figure 1 Tramway Alstom Citadis (2x32m)¹

Actuellement, seules les rames d'Alstom 2* 32 m (Ex : T2 Paris, Casablanca, Rabat, Tuni) et de Siemens 63 m (Ex : Jérusalem) sont en exploitation. Les deux autres exemples sont proposés dans les gammes des constructeurs, comme on peut voir sur le diagramme si dessous qui présente la déclinaison de la gamme Avenio de Siemens.



Figure 2 Siemens Avenio (2 à 8 modules)²

Dans le cadre de notre concept et en collaboration avec les constructeurs, une réflexion plus approfondie pourrait être menée pour adapter au mieux les matériels roulants existants dans leurs gammes.

Nous avons émis plusieurs idées de développement, mais qui nécessiterait de la part des constructeurs de réaliser une nouvelle gamme de matériel roulant . Développer une nouvelle gamme coûte très cher aux constructeurs, cela ne pourra être envisageable seulement pour une commande importante de rames :

¹ <http://www.alstom.com/transport/fr/produits-et-services/trains/tramways-citadis/>

² PDF: 2010-09_Avenio-fits-your-city_Siemens; <http://www.mobility.siemens.com/>

- Une solution de **matériel roulant sur deux étages** pourrait être envisagée. Cela permettrait de réduire l’emprise au sol du tramway pour une même capacité. (La réflexion a été approfondie en ANNEXE 1). Cependant, ce type de matériel roulant doit pouvoir s’insérer dans le milieu urbain ce qui pourrait être compliqué du fait de sa hauteur.
- **Augmenter la largeur des rames**, afin d’augmenter la capacité unitaire. Les constructeurs proposent déjà plusieurs largeurs de rames, dans le tableau ci-dessous on peut voir que sur un tramway de 63 m, une augmentation de 35 cm de la largeur de la rame permet d’augmenter la capacité de 100 places. Des augmentations supplémentaires permettraient de limiter la longueur des tramways tout en atteignant les capacités de transport voulues.

Tableau 2 Siemens Avenio Capacités³

Siemens Avenio (6 personnes par m ²)			
Longueur \ Largeur	2.3 m	2.4 m	2.65 m
36 m	333	354	396
45 m	419	444	497
54 m	510	543	606
63 m	594	630	705
72 m	686	729	813

- **Optimiser le diagramme** en supprimant au maximum des places assises : actuellement l’emplacement des bogies ne permet pas d’utiliser les espaces au-dessus autrement qu’en insérant des places assises.



Figure 3 Tramway Lyon⁴



Figure 4 Tramway Angers

³ PDF: 2010-09_Avenio-fits-your-city_Siemens; www.mobility.siemens.com

⁴ www.Alstom.com



- Avoir un matériel roulant avec un **plancher bas intégral** : actuellement impossible à cause de l'emplacement des bogies
- Avoir un matériel roulant avec un **plancher mi-bas intégral** : plancher à hauteur des bogies pour avoir un seul niveau, mais cela peut poser différents problèmes :
 - L'intégration urbaine n'est pas optimale, car la hauteur des quais doit être augmentée
 - Sur élever le plancher a des conséquences sur la hauteur de plafond, le profil du tramway doit être vérifié
- Élargir les portes pour améliorer les flux. Cela demande de la part du constructeur de redimensionner le tramway complètement

Dans le cadre du projet R&D nous ne travaillons pas avec les constructeurs de matériel roulant, nous n'avons donc aucune marge de manœuvre d'optimisation. Actuellement les améliorations possibles et incluses dans les gammes des constructeurs sont :

- La porte avant double
- L'entassement à 6 ou 7 pers/m² : si la charge à l'essieu le permet
- Une alimentation en 1500 V

Dans la suite de notre analyse, nous nous appuyerons sur les gammes de matériel roulant existantes. Nous construirons le Tramway Capacitaire théorique avec **des rames de 85 mètres de long (2 x42)**, qui permettent à une fréquence de 3 minutes d'atteindre la capacité théorique de 15 000 passagers par heure et par sens (avec 6 personnes/m²).

2.2 Énergie : tension et alimentation du tramway

Le tramway classique fonctionne sous 750V, notamment du fait du poids de l'histoire et des gammes existantes sur les chaînes de production des constructeurs de matériel roulant. La logique industrielle et économique n'a jusqu'ici pas encouragé l'adaptation de la tension d'alimentation aux besoins de chaque projet.

Dans le cas du tramway capacitaire où les consommations sont décuplées (rames de longueur augmentée, fréquences de passage augmentées, taux de remplissage extrêmes...), le passage à une tension de 1 500 V devient strictement nécessaire. Les services d'Énergie et Ligne aérienne préconisent depuis un certain temps une augmentation de la tension d'alimentation à 1500V sans que cette préconisation n'ait encore été appliquée pour des projets en milieu urbain. Cette adaptation est disponible sur plusieurs gammes de matériels roulants et ne représentera donc pas une contrainte majeure pour notre projet.

La comparaison des caractéristiques d'alimentation en 750 V et 1 500 V est détaillée en ANNEXE 2.

Mesures Capacitaires : Matériel roulant et Énergie

- La suite de l'analyse va s'appuyer sur un **matériel roulant de 85 mètres d'une capacité de 780 places** (6 pers/m²) qui est possible en couplant deux rames de 42 mètres déjà disponibles sur le marché.
- L'alimentation préconisée doit être une tension de 1500 V au vue de l'énergie nécessaire au transport de masse.

3 Conception des stations

3.1 Rappel des enjeux et de la problématique

Les stations sont des connecteurs entre la ville et le mode de transport. Ce sont des lieux de passage obligé pour les usagers du système. L'attention portée à l'intégration des stations dans le milieu urbain favorise l'image du transport et la qualité paysagère de l'agglomération.

Ainsi, la conception des stations relève de deux aspects : dimensionnement des espaces et des cheminements des stations et des abords, et la conception architecturale pour optimiser l'insertion urbaine. L'architecture des stations doit être propre à chaque environnement urbain, cet aspect ne sera que très peu traité ici, car il sera adapté à chaque projet de transport.

Le tramway capacitaire accueillera en station des flux d'usagers exceptionnellement élevés (9 000 passagers/heure et par sens contre 3 500 personnes/heure pour les plus grandes stations de tramway classique). Des flux importants arriveront à la station avec des fréquences élevées (de l'ordre de 3 minutes) susceptibles de diminuer en cas d'irrégularité de la ligne. De tels flux ont des conséquences majeures sur le temps d'arrêt en station et donc sur la vitesse commerciale et la régularité, c'est la viabilité du concept de tramway capacitaire qui est en jeu dans le développement de nouvelles stations. Il est important de préciser également que le concept de tramway capacitaire a pour objectif de conserver dans la mesure du possible l'intégration urbaine qui a fait le succès de ce mode de transport. Ainsi, les dimensionnements, l'agencement du mobilier seront à optimiser, sans recourir à la construction d'infrastructures lourdes (passerelles, sous terrains, stations dénivelées), dans la mesure du possible.

Les principaux enjeux dans le cas d'une ligne de tramway capacitaire sont les suivants :

- **Diminuer la durée d'arrêt en station** : elle impacte directement la vitesse commerciale et la flotte.
- **Diminuer l'aléa sur le temps d'arrêt en station** : il impacte directement la régularité de la ligne, par un double effet (d'abord par un aléa au sortir de la station, puis par un de manquement du vert au carrefour suivant).
- **Limiter les conflits montants/descendants** au niveau des portes et sur les quais : ils impactent le confort, le temps d'arrêt, la régularité.
- **Éviter les remontées de files/Évacuation** : la fermeture de la station peut créer des remontées de file en entrée et l'espacement entre la sortie du quai et le passage piéton doit être assez long pour pouvoir accueillir toutes les personnes qui attendent pour traverser.
- **Optimiser la consommation d'espace urbain** : au vu de la longueur de matériel roulant nécessaire, l'impact d'une station capacitaire sur l'espace urbain est renforcé.
- **Dissuader la fraude** : dans les pays en voie de développement, le contrôle d'accès en station reste exigé (fait culturel). Les tourniquets doivent alors être en nombre suffisant afin de ne pas ralentir les entrées et les sorties des passagers.

Dans cette partie nous allons présenter différentes configurations de station, leur fonctionnement et leur dimensionnement, nous montrerons comment chaque configuration répond aux enjeux identifiés de la station capacitaire.

3.2 Présentation des concepts de stations et du dimensionnement

3.2.1 Contraintes de conception et hypothèses retenues lors de la conception des stations

Afin de cadrer notre réflexion, nous nous sommes placés dans un cas exemple en fixant un espace disponible pour les stations et des flux de montants et de descendants. Les hypothèses fixées sont :

- **Largeur utile disponible** : 20 m utiles sont considérés disponibles pour le système complet (voies + quais).
- **Matériel roulant** : matériel roulant de 85 m de long à 6 p/m², offrant une capacité nominale de 780 passagers.
- **Longueur des quais** : les quais ont une longueur utile de 80 m. (Nota : une hypothèse de quais de 85 m serait plus favorable à l'insertion en largeur de par les calculs de densité).
- Largeur des voies ferrées : 2x3m.
- **Fréquence du tramway de 3 minutes** résultant en un débit maximum de 15600 pphps.
- **Fréquentation des stations** : dimensionnement des espaces pour 300 montées et 300 descentes à chaque passage, dans chaque sens et en même temps : au vu de la capacité du matériel roulant envisagé, cet échange peut s'illustrer par des rames se vidant de moitié pour se remplir à nouveau complètement. Ces hypothèses poussées permettent d'appréhender la problématique de croisement entre des flux inhabituels d'usagers.
- **Les montants** arrivent dans la station, **régulièrement en 3 minutes** (300 en 3 minutes), ce qui correspond en moyenne à 100 personnes arrivant dans la station par minute et par sens.
- **Les descendants** partent par paquets et doivent évacuer la station en **moins de 2 minutes** afin de laisser une minute de marge en cas d'aléas. Ce qui implique d'évacuer 150 personnes par minutes et par sens.
- **Densité des personnes en attente** : 4 personnes par m (source SGP niveau E)
- **Densité des personnes en mouvement** : 1,5 personne par m (source SGP niveau E).
- Générosité dans le dimensionnement des refuges, espaces d'attente aux passages piétons, zones d'éventuelle remontée de file.
- **Contrôle d'accès sécurisé (CAS)** : nécessaire pour les villes et cultures ciblées. Les tourniquets envisagés ont des dimensions égales à 0,80 x 1,00 m et un débit de 40 personnes par minutes (source SGP), la validation se faisant avec une carte sans contact.
- **Portes palières** : nécessaire pour la robustesse des temps d'arrêt en station, la fiabilité des traversées de carrefours, et pour la lutte contre la fraude. Largeur : 20 cm.

3.2.2 Présentation des configurations retenues :

À l'issue des réflexions, sept configurations de stations ont été retenues (6 + 1). Les six premières stations sont dimensionnées en prenant les hypothèses précédemment énoncées, la septième configuration sera traitée un peu à part, car elle est conçue pour un matériel roulant sur deux étages.

Les six configurations sont les suivantes :

- Quai central
- Quai central divisé
- Quais latéraux
- Quais latéraux divisés
- Trois quais
- Quais centraux décalés

Les configurations en quai central, quais latéraux, quais centraux décalés sont des configurations assez classiques, nous avons trouvé important de rappeler leur fonctionnement et de présenter leur dimensionnement afin de pouvoir comparer avec des concepts de stations plus novateurs comme le quai central divisé et les quais latéraux divisés.

3.2.3 Méthodologie de dimensionnement

Nous avons choisi de décrire les 7 configurations en proposant un dimensionnement théorique de celles-ci afin de pouvoir comparer leur emprise et leur fonctionnement et de déterminer quelles sont les configurations à préconiser dans le cas du tramway capacitaire. Dans un premier temps, nous nous sommes placés dans un cas exemple avec une emprise disponible importante pour l'insertion du tramway et des stations, pour ensuite nous intéresser au dimensionnement minimal des quais nécessaire au regard des flux de passagers attendus.

3.2.3.1 Méthode de dimensionnement des quais dans le cas de l'exemple

Pour l'exercice de R&D, nous avons étudié les configurations de stations sur un même cas exemple, celui d'un corridor de 20 m de largeur disponible pour le système tramway, bordé de 2x2 voies de circulation (soit une largeur de façade à façade d'environ 35 m). Ce type de corridor se retrouve assez fréquemment dans les villes en développement.

La largeur disponible de quai est de 14 m. À cette largeur théorique, il faut retrancher celle des éventuelles barrières, portes palières et tourniquets.

Nous avons cherché à utiliser toute la largeur utile en implantant des tourniquets afin d'avoir des capacités d'entrée et de sortie offertes supérieures à la demande pour éviter les remontées de file et les conflits sur le quai entre les montants et les descendants.

Les fiches à venir mettent au regard la capacité demandée avec la capacité offerte par chaque configuration.

3.2.3.2 Méthode de dimensionnement des quais dans le cas du calcul de la largeur minimale de quai nécessaire

L'emprise disponible de 20 m pour le système tramway ne sera pas disponible dans tous les projets, aussi nous avons déterminé une largeur de quai minimale effective nécessaire pour des flux de 300M/300D pour chaque configuration. Les facteurs pris en compte dans le dimensionnement sont



le nombre de tourniquets en entrée et sortie nécessaire pour absorber la demande, la surface utile sur le quai qui permet d'accueillir 300 personnes en attente et 300 personnes en mouvement par sens, augmentée des largeurs nécessaires aux éventuelles barrières, portes palières et tourniquets, et diminuée pour tenir compte de l'optimisation qui peut être réalisée lors de la mutualisation des surfaces entre les deux sens du tramway.

3.2.3.3 Hypothèses de dimensionnement générales

Les hypothèses de dimensionnement générales sont récapitulées dans le tableau ci-dessous. Le détail des calculs pour chaque configuration est donné en ANNEXE 3.

Tableau 3 Hypothèses de dimensionnement des stations

Hypothèses générales	
Longueur du matériel roulant	85 m
Longueur des quais	80 m utiles
Largeur de voie ferrée	6 m
Largeur des portes palières et barrières	0,2 m
Hypothèses sur la fréquentation de la station	
Nombre de passagers montant par rame	300
Nombre de passagers descendant par rame	300
Temps d'arrivée des montants en station	3 min
Temps d'évacuation des descendants	2 min
Hypothèses pour le CAS	
Dimensions	0,80 x1m
Débit	40 pers/min
Densités maximales des passagers	
Personnes en attente	4 pers/m ²
Personnes en mouvement	1,5 pers/m ²

3.2.4 Présentation détaillée des concepts de stations et de leur fonctionnement

3.2.4.1 Quai central

Le principe de ce modèle de station est de mutualiser l'espace au maximum : une seule surface est mise en commun pour les deux sens de la ligne de tramway, ainsi que pour les montées/descentes. La mutualisation permet d'optimiser l'utilisation de l'espace et de ne pas surdimensionner du fait des déséquilibres de flux (sens 1/sens 2, montées/descente, matin /soir).

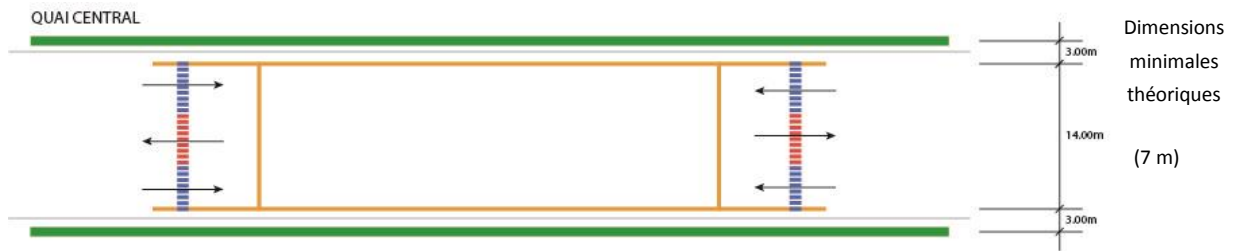


Figure 5 Schéma d'un quai central

Dimensionnement dans le cas de 20 m de largeur

La station est constituée de :

- un quai central de 14 m de largeur
- 17 tourniquets en entrée
- 17 tourniquets en sortie
- 7 m barrières en amont du CAS afin de matérialiser l'espace de non-droit, le débit absorbé par la station est suffisant et ne justifie donc pas plus de barrières pour canaliser les remontés de file.

Flux de la demande et capacité offerte par cette configuration :

Tableau 4 Capacité offerte par la configuration en quai central

Capacité (p/min)	Demandée	Offerte
En entrée	200	680
En sortie	300	680

La capacité offerte par les tourniquets répond très largement à la demande. De plus, le sens des tourniquets est adaptable en fonction des besoins.

Fonctionnement

Les montants s'amassent autour des portes du tramway tandis que les sortants s'avancent naturellement vers la zone centrale du quai, d'où ils créent ensuite un flux parallèle au tramway pour atteindre les extrémités de quai et les sorties.

En accord avec ces mouvements, les tourniquets de sortie se trouvent dans l'espace central et les tourniquets d'entrée se trouvent proches des voies.



Figure 6 Quai central: Illustration de l'espace occupé par 300 montants et 300 descendants

Emprise minimale

Les calculs précédents ont été faits pour une largeur d'emprise de 20 m, mais cette configuration est envisageable dans une emprise moins importante. En prenant en compte la largeur imposée par l'implantation des tourniquets et la surface de mouvement et d'attente des usagers du tramway on estime qu'il est possible d'intégrer ce quai dans **une emprise minimale effective de 11 m**.

Avantages de la configuration :

- La répartition des espaces est très flexible grâce au quai unique et mutualisé.
- Configuration adaptée aux stations à flux déséquilibrés (montants/descendants, sens1/sens2, matin/soir) tels que les terminus et les pôles d'échange.
- Le sens des tourniquets peut être adapté suivant l'heure de la journée s'il existe un déséquilibre entre montants et descendants ou bien si on souhaite donner la priorité aux sortants pour désengorger rapidement les quais.
- Si une grande largeur est disponible, cette configuration permet d'aménager des services et des commerces dans la station (dans la culture de certains pays).

Limites de la configuration :

- Les flux des montants et des sortants ne sont pas dirigés :
 - Au niveau des portes du tramway, il existe des conflits montants/descendants
 - Au niveau des flux d'utilisateur, la fluidité des mouvements est entravée.
- Les voies sont éloignées l'une de l'autre, induisant :
 - Soit une courbe/contrecourbe et son inconfort
 - Soit une large bande perdue « à requalifier » entre les voies à travers la ville
- Traversée simultanée des voies et des voiries

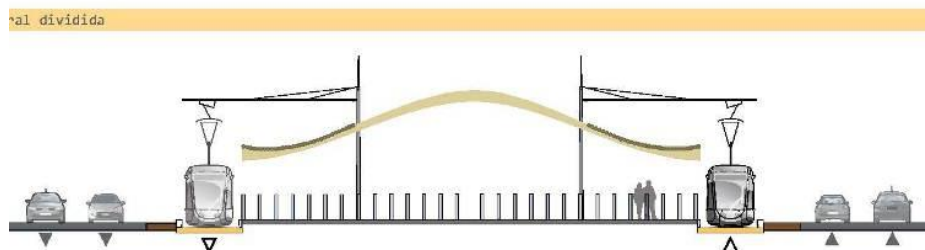


Figure 7 Quai central: Section type

3.2.4.2 Quai central divisé

Le principe est de séparer physiquement les flux d'entrée et de sortie, pour limiter les conflits entre les montants et les descendants d'une part, et fluidifier l'évacuation d'autre part. C'est la formalisation physique du mouvement naturel observé dans les mouvements de foule de grandes stations.

Le couloir central commun permet de garder l'avantage d'une mutualisation entre les deux sens. L'évacuation est favorisée.

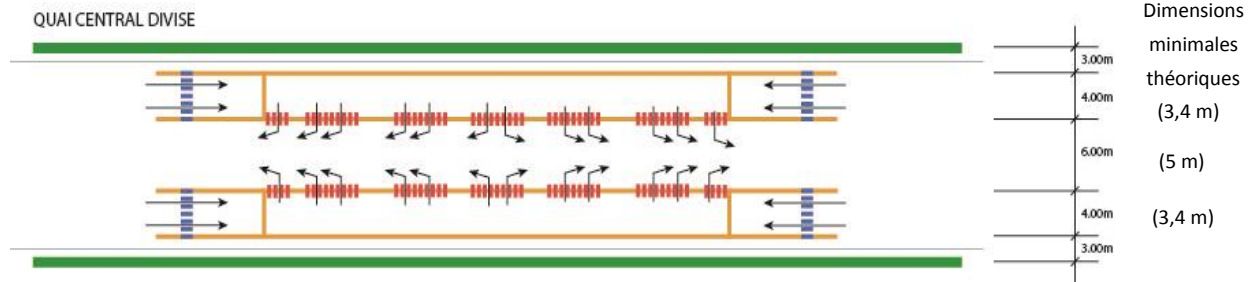


Figure 8 Schéma d'un quai central divisé

Dimensionnement dans le cas de 20 m de largeur

La station est constituée de :

- un quai central de 14 m de largeur divisé en trois espaces :
- deux quais latéraux de 4 m
- un couloir central de 6 m de largeur
- 8 tourniquets en entrée par sens
- 48 tourniquets en sortie par sens
- barrières de 7 m en amont du CAS afin de matérialiser l'espace de non-droit, le débit absorbé par la station est suffisant et ne justifie donc pas plus de barrières pour canaliser les remontés de file.

Flux de la demande et capacité offerte par cette configuration :

Tableau 5 Capacité offerte par la configuration en quai central divisé

Capacité (p/min)	Demandée	Offerte
En entrée	100	320
En sortie	150	1920

La capacité offerte par les tourniquets répond très largement à la demande et l'évacuation est très largement favorisée.

Fonctionnement

Les montants s'amassent autour des portes du tramway tandis que les sortants s'avancent vers la zone centrale du quai, d'où ils créent ensuite un flux parallèle au tramway pour atteindre les extrémités de quai et les sorties.



Figure 9 Quai central divisé: Illustration de l'espace occupé par 300 montants et 300 descendants

Ce mouvement naturel est physiquement matérialisé, le flux de sortants ne rencontre ainsi aucun obstacle.

Les tourniquets sont situés en face des portes du tram : chaque sortant quitte le quai en 5 secondes. Le débit du jeu de tourniquet est nettement supérieur à la porte qui lui fait face, pour éviter tout risque d'engorgement devant les tourniquets de sortie.

Emprise minimale

Les calculs précédents ont été faits pour une largeur d'emprise de 20 m, mais cette configuration est envisageable dans une emprise moins importante. En prenant en compte la largeur imposée par l'implantation des tourniquets et la surface de mouvement et d'attente des usagers du tramway on estime qu'il est possible d'intégrer ce quai dans **une emprise minimale effective de 17 m**.

Avantages de la configuration :

- Séparation physique des flux montants et descendants
- Les sortants atteignent en quelques mètres un couloir central qui leur est réservé, ils sont donc rapidement hors du quai, puis hors du couloir.
- L'espace des montants n'est envahi que brièvement par les descendants.
- Le couloir est réservé aux descendants : évacuation globale de la station plus rapide.
- Possibilité de moduler les espaces à la conception, suivant les prévisions de trafic (ex : sur un quai, donner moins aux montées sans toutefois pénaliser les descentes)

Limites de la configuration :

- Les surfaces sont fixées dès la conception donc une fois la station conçue leur adaptation est difficile en cas de déséquilibre de flux entre les deux sens.
- L'emprise de cette configuration est assez importante.
- La configuration est inhabituelle
- Traversée simultanée des voies et des voiries.

Ajustements :

- Suppression des tourniquets de sortie (à remplacer par deux contrôleurs visuels) pour un gain sur la largeur du couloir (emprise des tourniquets) et une fluidification supplémentaire des sorties.
- Ajout d'une barrière au milieu du couloir de sortie pour interdire tout contre-flux
- Ajout d'une signalétique forte sur le rôle réservé du couloir central, car il n'est pas un espace ouvert aux piétons autres qu'usagers du tramway.

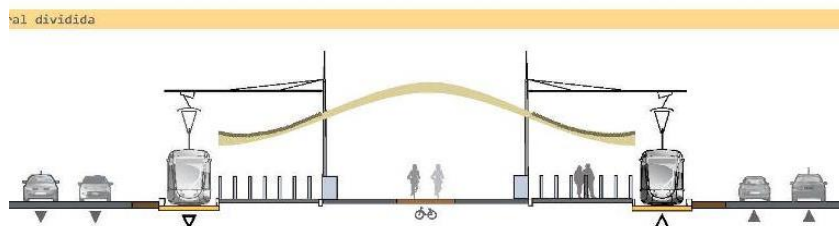


Figure 10 Quai central divisé : Section Type



Figure 11 Quai central divisé, vues réalisées par Atelier Villes et Paysages



Figure 12 Quai central divisé, vues réalisées par Atelier Villes et Paysages

3.2.4.3 Quais latéraux

Ce modèle de station est classique, historiquement issu du métro et du bus.



Figure 13 Schéma des quais latéraux

Dimensionnement dans le cas de 20 m de largeur

La station est constituée de :

- Deux quais latéraux de 7 m chacun
- 8 tourniquets en entrée par sens
- 8 tourniquets en sortie par sens
- barrières de 7 m en amont du CAS afin de matérialiser l'espace de non-droit, le débit absorbé par la station est suffisant et ne justifie donc pas plus de barrières pour canaliser les remontés de file.

Flux de la demande et capacité offerte par cette configuration :

Tableau 6 Capacité offerte par la configuration en quais latéraux

Capacité (p/min)	Demandée	Offerte
En entrée	100	320
En sortie	150	320

La capacité offerte par les tourniquets répond très largement à la demande. De plus, le sens des tourniquets est adaptable en fonction des besoins.

Fonctionnement

Classique. Les entrants et sortants se côtoient sur un même quai, chaque quai associé à un sens.

Emprise minimale

Les calculs précédents ont été faits pour une largeur d'emprise de 20 m, mais cette configuration est envisageable dans une emprise moins importante. En prenant en compte la largeur imposée par l'implantation des tourniquets et la surface de mouvement et d'attente des usagers du tramway on estime qu'il est possible

d'intégrer ce quai dans **une emprise minimale effective de 14 m.**



Figure 14 Quais latéraux: Illustration de l'espace occupé par 300 montants et 300 descendants

Avantages de la configuration :

- Configuration intéressante si plateforme en insertion latérale : la station peut dans ce cas être intégrée au trottoir ou à la placette et permettre ainsi une bonne diffusion des passagers dans l'espace public.
- La traversée des voies et voiries se fait de manière dissociée.

Limites de la configuration :

- Les surfaces ne sont pas mutualisées entre les deux quais : suivant les périodes de la journée un des deux quais peut être surpeuplé et l'autre presque vide.
- L'emprise nécessaire est plus grande à confort égal et de la surface perdue suivant les périodes de la journée.

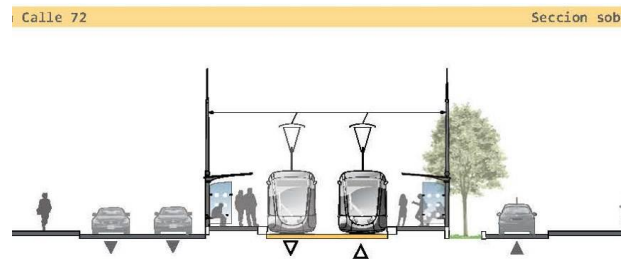


Figure 15 Quais latéraux : Section Type

3.2.4.4 Quais latéraux divisés

Le principe est de séparer physiquement les flux d'entrée et de sortie, pour limiter les conflits entre les montants et les descendants d'une part, et fluidifier l'évacuation d'autre part.

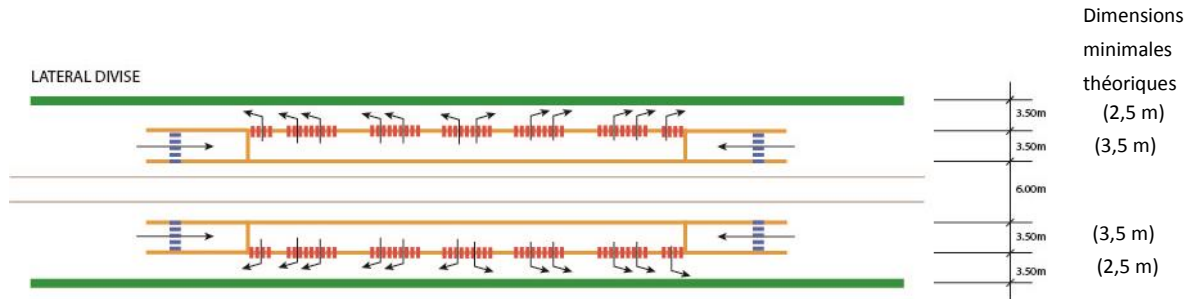


Figure 16 Schéma des quais latéraux divisés

Dimensionnement dans le cas de 20 m de largeur

La station est constituée de :

- Deux quais latéraux de 7 m chacun divisés :
- Deux quais latéraux de 3,5 m
- Deux couloirs de sortie de 3,5 m
- 8 tourniquets en entrée par sens
- 48 tourniquets en sortie par sens
- barrières de 7 m en amont du CAS afin de matérialiser l'espace de non-droit, le débit absorbé par la station est suffisant et ne justifie donc pas plus de barrières pour canaliser les remontés de file.

Flux de la demande et capacité offerte par cette configuration :

Tableau 7 Capacité offerte par la configuration en quais latéraux divisés

Capacité (p/min)	Demandée	Offerte
En entrée	100	320
En sortie	150	1920

La capacité offerte par les tourniquets répond très largement à la demande et l'évacuation est très largement favorisée.

Fonctionnement

Les passagers descendants du tramway sont dirigés vers les tourniquets qui se situent en face des portes du tramway. Afin d'optimiser la descente, des aménagements peuvent être inclus pour diriger les sortants plus rapidement dans le couloir, tels que des marquages au sol ou bien de la signalisation statique.

Pendant ce temps les personnes qui souhaitent monter à bord du tram sont



Figure 17 Quais latéraux divisés: Illustration de l'espace occupé par 300 montants et 300 descendants

canalisées sur les quais, en veillant à ce qu'ils laissent un couloir pour la sortie des passagers.

Emprise minimale

Les calculs précédents ont été faits pour une largeur d'emprise de 20 m, mais cette configuration est envisageable dans une emprise moins importante. En prenant en compte la largeur imposée par l'implantation des tourniquets et la surface de mouvement et d'attente des usagers du tramway on estime qu'il est possible d'intégrer ce quai dans **une emprise minimale effective de 21 m**.

Avantages de la configuration :

- Séparation rapide des montants et des descendants ce qui limite les conflits sur les quais.
- Les avantages sont les mêmes que dans la configuration d'un quai central divisé, sauf que l'espace de sortie n'est pas mutualisé.
- Cette configuration permet une bonne diffusion des passagers si la station est implantée latéralement ou en placette et que les sorties se font sur la placette.
- La traversée du tramway et de la voie de circulation VP se fait de manière dissociée.

Limites de la configuration :

- Cette configuration nécessite une emprise importante (séparation en quatre zones : sans mutualisation + quatre épaisseurs de barrières). À la différence du quai central divisé, le couloir de sortie n'est pas mutualisé
- Cette configuration est inhabituelle

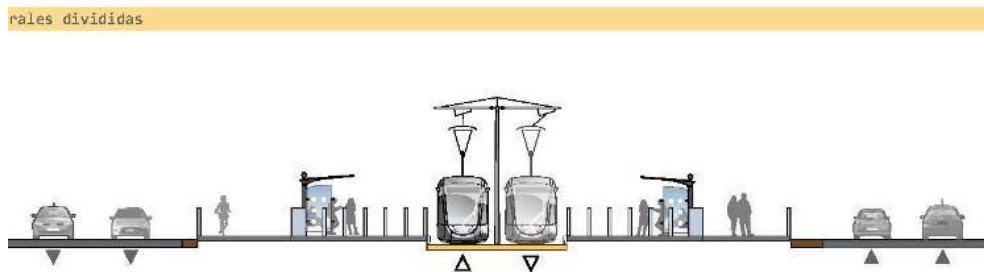


Figure 18 Quais latéraux divisés : Section Type

3.2.4.5 Trois Quais

Le principe de cette configuration est de séparer complètement les montants des descendants, en dédiant le quai central à la montée et les quais latéraux à la descente.

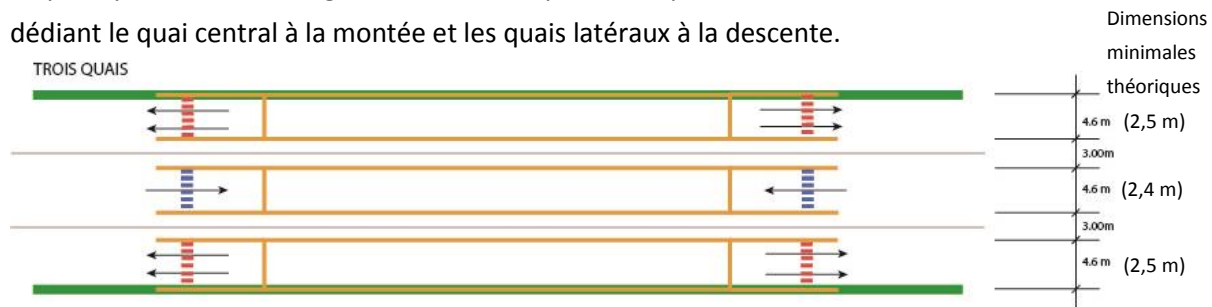


Figure 19 Schéma de la configuration trois quais

Dimensionnement dans le cas de 20 m de largeur

La station est constituée de :

- un quai central de 4,6 m
- 2 quais latéraux de 4,6 m chacun
- 10 tourniquets en entrée pour les deux sens
- 10 tourniquets en sortie par sens
- Barrières de 7 m en amont du CAS afin de matérialiser l'espace de non-droit, le débit absorbé par la station est suffisant et ne justifie donc pas plus de barrières pour canaliser les remontées de file.

Flux de la demande et capacité offerte par cette configuration :

Tableau 8 Capacité offerte par la configuration trois quais

Capacité (p/min)	Demandée	Offerte
En entrée	200	400
En sortie	150	400

La capacité offerte par les tourniquets répond à la demande et la priorité est donnée au sens de la descente qui est libre.

Fonctionnement

Les flux de montants et descendants sont complètement séparés. Les passagers descendent sur les quais latéraux. Ils montent par le quai central. Le quai central présente l'avantage de mutualiser la surface pour les deux sens de circulation du tram. Les passagers sont informés à l'intérieur du tramway du côté de descente, de plus l'ouverture des portes pour les sortants se fait quelques secondes avant les montants afin d'initier le mouvement et de faciliter les circulations à l'intérieur du tramway.

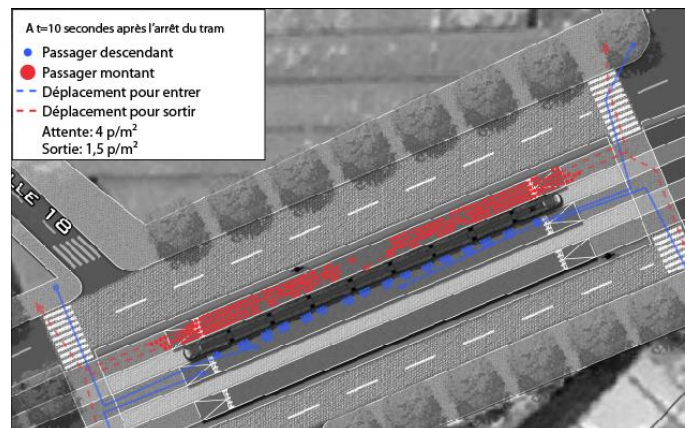


Figure 20 Trois quais : Illustration de l'espace occupé par 300 montants et 300 descendants

Emprise minimale

Les calculs précédents ont été faits pour une largeur d'emprise de 20 m, mais cette configuration est envisageable dans une emprise moins importante. En prenant en compte la largeur imposée par l'implantation des tourniquets et la surface de mouvement et d'attente des usagers du tramway on estime qu'il est possible d'intégrer ce quai dans **une emprise minimale effective de 13,5 m**.

Avantages de la configuration :

- Les montants et les descendants sont complètement séparés. Il n'y a donc aucun conflit entre eux sur les quais.
- Le temps d'échange est minimisé
- La fluidité des cheminements sur les quais est assurée, le temps d'évacuation est minimisé.
- La configuration est très favorable à la mesure de régulation en ligne « décharge voyageur sans montée voyageurs » (qui permet à une rame en retard de distancer la rame suiveuse).
- Cette configuration permet une bonne diffusion des passagers si la station est implantée latéralement, le long de trottoirs ou d'une placette, pour une diffusion rapide des descendants vers l'espace public.
- La traversée du tramway et de la voie de circulation VP se font de manière dissociée.
- La traversée de la voie tramway elle-même se fait en deux fois (cf. volet carrefour : 45 % des arrêts du tram sont dus aux usagers qui ne trouvent pas leur place en zone tampon alors qu'ils traversent les voies du tram).

Limites de la configuration :

- La configuration est inhabituelle, la signalétique devra donc être compréhensible par tous les usagers.

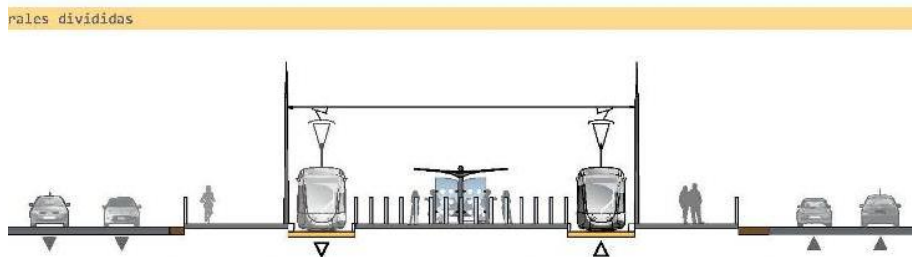


Figure 21 Trois quais : Section Type



Figure 22 Trois quais, vues réalisées par Atelier Villes et Paysages

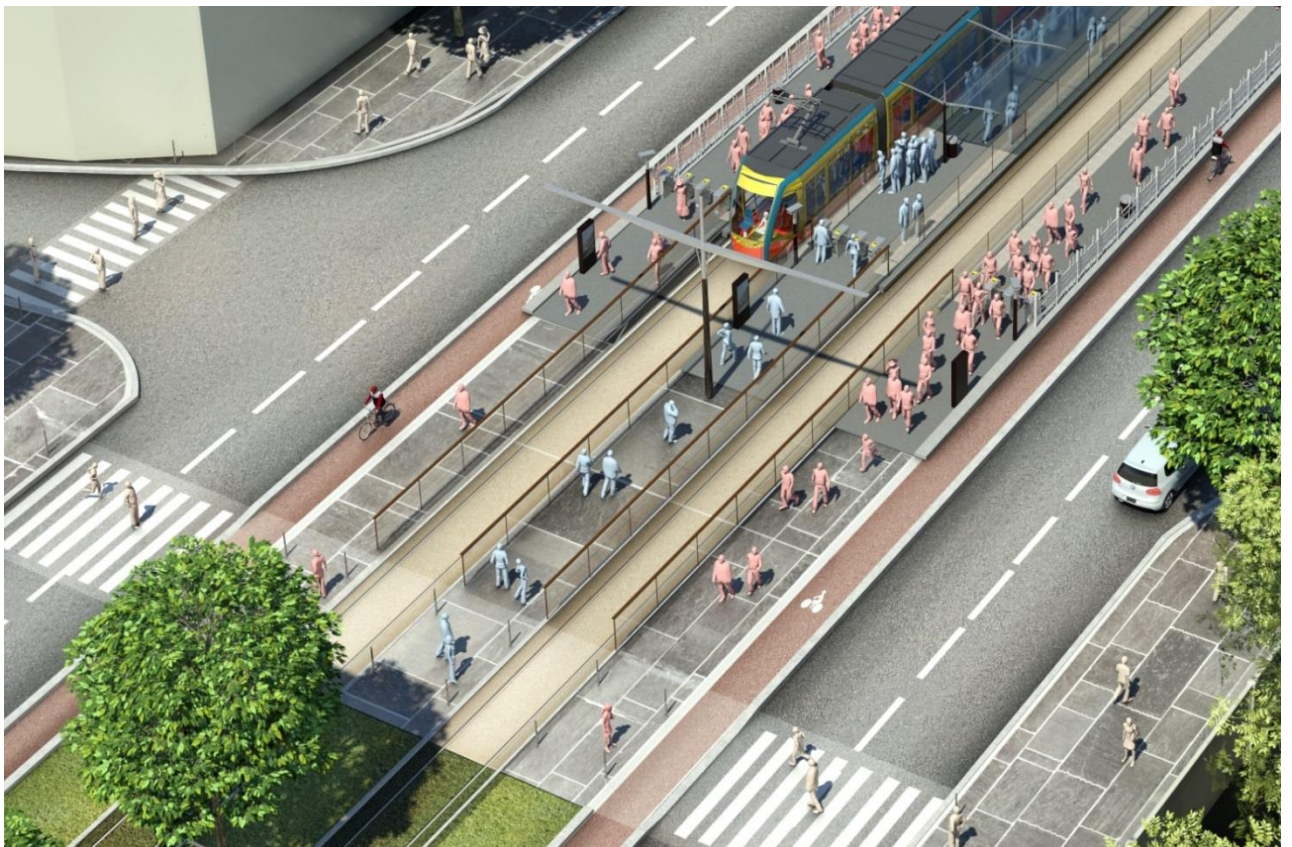


Figure 23 Trois quais, vues réalisées par Atelier Villes et Paysages

Simulation statique des mouvements

Les illustrations simulent la position des voyageurs dans cette configuration (quais de 3,4 m chacun pour une emprise totale de 16,2 m entre deux pistes cyclables), pour des échanges passagers (flux de 300M/300D) à quatre instants différents : à T0 (arrivée du tramway), puis T0 +10'', T0 +30'' et T0 +50''. La simulation inclut l'arrivée d'un deuxième tramway à T0 +45''. Elle permet donc de se rendre compte de l'occupation de l'espace au moment le plus critique d'une situation perturbée.

À T0, le tram est à quai : les 300 montants et 300 descendants attendent l'ouverture des portes. Les portes pour les montants sont ouvertes 5 secondes après les descendants.

À T0 +10'', 90 % des passagers sont descendus et 50 % des passagers en attente sont montés dans le tramway.

Au bout de 17 secondes (14 portes x 2 up) tous les passagers en attente sont montés et tous les passagers sont descendus. Les sortants n'ont pas été gênés par les montants. Ils cheminent maintenant sans obstacle le long des quais vers les sorties. Les portes palières garantissent la fermeture.

À T0 +30'', le tramway repart ; 50 % des passagers ont passé les CAS et sont sortis du quai. Les espaces tampons sont dimensionnés pour accueillir l'ensemble des descendants en cas de feu rouge piéton (10 m). Le tram atteint le passage piéton en 5 secondes, à une vitesse entre 0,81 et 1 m/s seuls les passagers sortant des deux portes les plus proches du CAS ont pu atteindre le passage piéton, le tramway passe donc

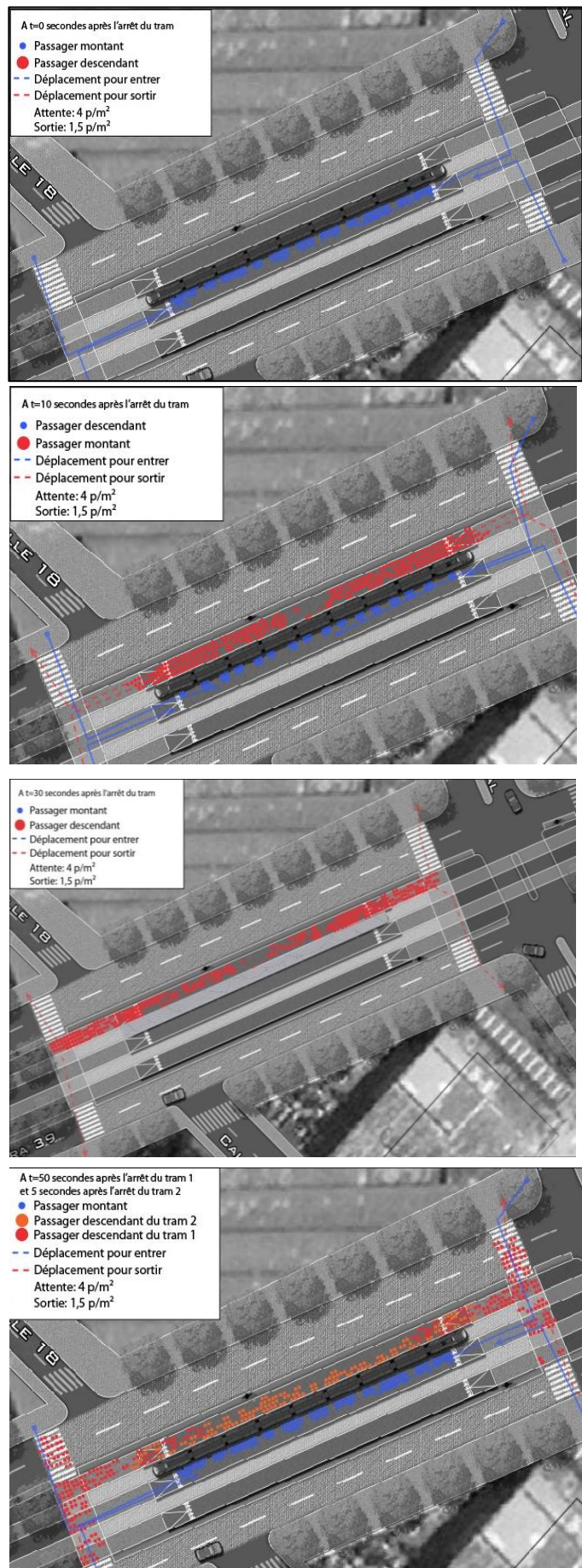


Figure 24 Trois quais : simulation statique des mouvements



devant les premiers passagers et n'est pas gêné par les traversées

A T0 +45'', un second tramway arrive à quai (l'intervalle est donc perturbé), il ouvre les portes pour les descendants et 5 secondes plus tard pour les montants.

À T0 +50'' sur le quai central les montants voient les portes s'ouvrir devant eux. Sur le quai latéral 10 % des passagers du premier tramway n'ont pas encore quitté le quai et 35 % des passagers du second tramway sont descendus, certains d'entre eux ont déjà franchi les CAS.

Conclusion

Il faut avec cette configuration, le temps d'échange est minimal et l'évacuation très fluide. Ainsi, même en cas de tramways très rapprochés (45 secondes) il y a peu d'interaction entre les usagers du premier et du second tramway.

3.2.4.6 Quais décalés

Le principe est de gagner sur la largeur d'emprise de la station, en concédant une augmentation de sa longueur. Pour ce faire, on place les quais l'un après l'autre, chacun étant consacré à un sens.

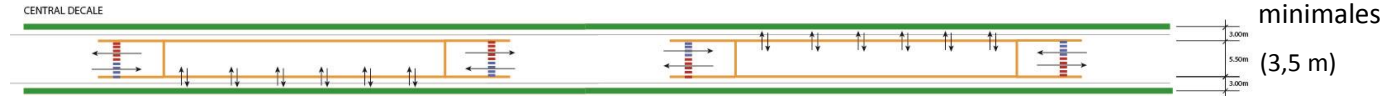


Figure 25 Schéma de la configuration en quais décalés

Emprise minimale

En prenant en compte la largeur imposée par l'implantation des tourniquets et la surface de mouvement et d'attente des usagers du tramway on estime qu'il est possible d'intégrer ce quai dans **une emprise minimale effective de 10 m.**

Dimensionnement dans le cas de 10 m de largeur

La station est constituée de :

- 2 quais centraux de 3,5 m chacun
- tourniquets en entrée par sens
- tourniquets en sortie par sens
- barrières de 7 m en amont du CAS afin de matérialiser l'espace de non-droit, le débit absorbé par la station est suffisant et ne justifie donc pas plus de barrières pour canaliser les remontés de file.

Flux de la demande et capacité offerte par cette configuration :

Tableau 9 Capacité offerte par la configuration quais centraux décalés

Capacité (p/min)	Demandée	Offerte
En entrée	100	160
En sortie	150	160

La capacité offerte par les tourniquets répond largement à la demande. De plus, le sens des tourniquets est adaptable en fonction des besoins.

Fonctionnement



Figure 26 Plan quais centraux décalés



Le tramway s'arrête au premier quai et fait son échange voyageur. Il franchit ensuite le second quai à vitesse réduite. Les entrants et sortants se côtoient sur un même quai, chaque quai est réservé pour un sens.

Avantages de la configuration :

Cette configuration permet de minimiser la largeur utilisée pour les quais et la plateforme entre les voies. Elle rend possible l'implantation d'une station dans une avenue où toute autre configuration ne pourrait loger.

Limites de la configuration :

- L'impact sur l'exploitation non négligeable, car les tramways doivent franchir les quais à une vitesse réduite : la station doit être franchie à 5 km/h ce qui fait perdre 60 s par rapport à une situation où la station n'est pas positionnée en décalé
- Le domaine consacré à la station très étendue (3x90m), ce qui entraîne une dilution importante de la station et un manque de lisibilité pour les usagers
- L'alignement droit est difficile à trouver sur une telle longueur
- Le carrefour entre les quais est impacté, et les carrefours encadrants aussi

3.2.4.7 Conclusions

Les stations du tramway capacitaire doivent permettre les échanges passagers avec des flux de personnes très importants. La réflexion menée nous a conduit à retenir 6 configurations pour un matériel roulant de 85 m. L'enjeu majeur est de limiter au maximum les conflits entre les montants et les descendants, afin de limiter le temps d'échange passager en station. Les deux configurations très classiques de quai en position centrale et latérale ont été repensées : quais central divisé et latéraux divisés. Ces deux configurations nouvelles permettent de diriger les flux et de diminuer le temps d'évacuation de la station. L'emprise de ces configurations est un peu plus importante que dans le cas des configurations classiques.

La solution qui permet de limiter au maximum le temps d'arrêt en station et les aléas en station est la configuration « trois quais ». Les flux des montants et des descendants sont complètement divisés. On pourrait croire qu'avoir trois quais multiplie la surface nécessaire de 1/3, mais en réalité on observe que l'emprise de la station trois quais est légèrement supérieure au quai central. Cette solution semble optimiser à la fois le temps d'arrêt en station et la consommation d'espace urbain. La solution trois quais est donc préférée.

Tableau 10 Récapitulatif des caractéristiques des 6 configurations de stations pour un matériel roulant de 85 mètres

	Quai central	Quai central divisé	Quais latéraux	Quais latéraux divisés	Trois quais	Quais centraux décalés
Principe	Surfaces flexibles	Diriger les flux	—	Diriger les flux	Séparer les montants et descendants	Largeur minimale
Surface utile	+++	+	—	—	+	+
Fluidité	+	+++	—	+++	+++	—
Impact sur l'exploitation (traversées des voies du tramway)	--	--	+	+	—	--
Emprise minimale théorique (300M/300D)	11 m	17 m	14 m	21 m	13,5 m	10 m
Emprise minimale effective (150M/150D)	8 m	12 m	10 m	15 m	10 m	8 m
Cas adapté	En terminus		Insertion latérale en placette	Insertion latérale en placette		typologie peu urbaine

3.2.4.8 Quais sur deux niveaux

Le quai sur deux niveaux a été traité à part car le matériel roulant sur deux étages nécessite de traiter des accès inférieurs et supérieurs.

Le principe est de diminuer la longueur prise par la station, en utilisant un deuxième niveau. Cette configuration nécessite le développement d'un matériel roulant à deux étages.

On considère qu'une rame de 45 m doublée en hauteur aura à peu près la même capacité qu'une rame doublée en longueur (la perte de place due aux escaliers est compensée par un étage sans aucune place assise).

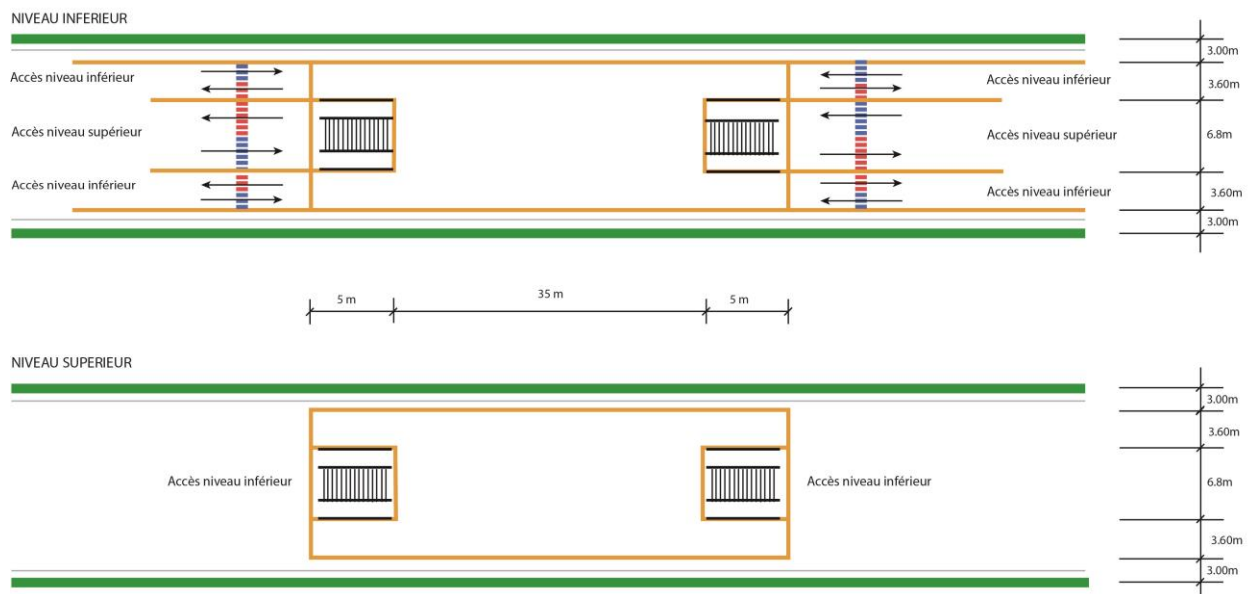


Figure 27 Schéma de la configuration des quais sur deux niveaux

Dimensionnement dans le cas de 20 m de largeur

La station est constituée de :

- Deux quais centraux de 14 m de large superposés
- Pour le niveau inférieur :
 - accès latéraux aux quais inférieurs d'une largeur de 3.4 m chacun
 - 8 tourniquets en entrée
 - 8 tourniquets en sortie
- Pour le niveau supérieur :
 - Deux accès au niveau supérieur de 6,80 m de large et 4,5 m de long, avec pour chacun 1 escalier fixe au centre encadré de deux escaliers mécaniques, réservés respectivement à la montée et à la descente.
 - 8 tourniquets en entrée
 - 8 tourniquets en sortie
- Barrières de 7 m en amont du CAS afin de matérialiser l'espace de non-droit, le débit absorbé par la station est suffisant et ne justifie donc pas plus de barrières pour canaliser les remontées de file.

Tableau 11 Flux de la demande et capacité offerte pour les deux niveaux confondus par cette configuration

Capacité (p/min)	Demandée	Offerte
En entrée	200	640
En sortie	300	640

La capacité offerte par les tourniquets répond largement à la demande. De plus, le sens des tourniquets est adaptable en fonction des besoins.

Emprise minimale

Les calculs précédents ont été faits pour une largeur d'emprise de 20 m, mais cette configuration est envisageable dans une emprise moins importante. En prenant en compte la largeur imposée par l'implantation des tourniquets et la surface de mouvement et d'attente des usagers du tramway on estime qu'il est possible d'intégrer ce quai dans **une emprise minimale effective de 14,5 m.**

Avantages de la configuration :

- Permet d'utiliser un matériel roulant plus court pour une même capacité
- Economie de 20 à 30 m par rapport aux quais « classiques », car l'accès au niveau supérieur peut être situé sur l'emprise des 50 m réservée au quai

Inconvénients de la configuration :

- Impact visuel fort des stations sur deux étages
- Matériel roulant avec une perte importante de place causée par les escaliers intérieurs, mais possibilité lors de la conception du matériel roulant de limiter les places assises sur la partie supérieure pour gagner de la capacité sans avoir besoin d'allonger le matériel roulant.
- Ligne aérienne très haute : problématique de franchissements d'ouvrages (environ 5,8 m de hauteur du matériel roulant hors pantographe, la hauteur minimale de contact est donc 6,2 m pour le tramway, le gabarit autoroutier minimal est de 4,20 m)

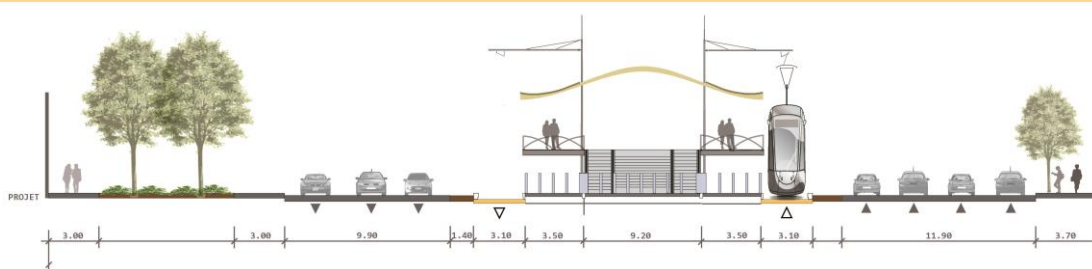


Figure 28 Quai sur deux niveaux: Section type

Conclusion

La station sur deux étages est moins consommatrice d'espace au sol, mais impacte beaucoup le paysage urbain en hauteur. Les LAC doivent être implantées très hautes et en cas de franchissement existant au-dessus de la plateforme tramway leur gabarit ne permettra probablement pas de faire passer un tramway à deux étages en dessous.



Cette configuration ne sera pas plus étudiée dans cette étude, car actuellement aucun constructeur n'étudie un matériel roulant de ce type et les contraintes d'insertion urbaine semblent complexifier le système.

Mesures Capacitaires : Configuration des stations

Les configuration **3 quais, quais central divisé et quais latéraux divisés** sont à prioriser car elles permettent de limiter les conflits entre les montants et les descendants et ainsi limiter les aléas de temps d'arrêt en station

4 Exploitation

4.1 Rappel des enjeux et de la problématique

4.1.1 Enjeux

Pour atteindre la capacité d'offre de 10 000 à 15 000 pphps, nous avons envisagé un matériel roulant de grande capacité, qui doit être associé à des intervalles de passage faible de l'ordre de trois minutes.

La réduction de l'intervalle permet un fort niveau d'offre, mais si l'exploitation n'est pas assez robuste la qualité de service peut ne pas être atteinte : retard, perte de courses, trains de tramways, qui impactent fortement les usagers et l'exploitant et font diminuer la capacité réelle de la ligne.

L'objectif de cette section est de présenter et qualifier les solutions à mettre en place pour rendre l'exploitation plus robuste afin d'assurer la qualité de service du Tramway Capacitaire.

4.1.2 Problématique

Un système capacitaire est soumis à beaucoup plus d'aléas sur son temps de parcours que le tramway classique :

- **Aléas en Station** : temps d'échange variable et incertain du fait des flux attendus
- **Aléas en carrefour** : manquement de la fenêtre de vert au feu
- **Aléas en ligne** : piétons, incidents

Or dans un carrousel de véhicules qui se succèdent à des intervalles très réduits, les conséquences de tout aléa sont amplifiées et peuvent se répercuter sur tout le carrousel :

- Rattrapage d'une rame par une autre : trains de rames en entrée de station
- Ralentissement de tout le carrousel et donc dégradation des temps de parcours
- Diminution de la capacité théorique et donc usagers laissés à quai : saturation
- Effet en cascade de ces perturbations en ligne et en station : écroulement du système

La sensibilité du système aux variations de temps de parcours est donc extrême et la viabilité même du concept de tramway capacitaire est liée aux solutions d'exploitation. Quelles sont les solutions à envisager pour éviter les trains de tramway ? Comment assurer une régularité quasi parfaite ?

4.2 Méthodologie

Nous avons tout d'abord fait des ateliers avec des exploitants et des experts afin de faire un état des lieux sur les méthodes de régulation (en ligne et en terminus), sur la nature des aléas observés, leur ordre de grandeur d'occurrence et leurs conséquences sur l'exploitation :

- Rencontre avec un exploitant de Bordeaux
- Rencontre avec un exploitant de Montpellier
- Rencontre avec un expert systèmes d'EGIS Rail



Nous avons également fait un benchmark sur les lignes supportant des intervalles réduits ou des matériels longs, pour avoir un retour d'expérience sur l'exploitation. Ensuite, nous avons pu observer le fonctionnement en station et en terminus de la ligne de tramway T2 à Paris (rames de 2*32m et fréquence de 4 minutes), qui est une ligne avec une capacité connue des plus forte (5 400 pphps) .

Cela nous a permis d'identifier les points sur lesquels se concentrer et les leviers d'action possible.

Ensuite nous nous sommes intéressés à la traversée des carrefours, à la gestion des terminus et à l'exploitation d'une ligne fictive. Il est difficile de prétendre trouver une réponse absolue à la problématique d'une ligne, les configurations de lignes (nombre de stations, carrefours, devers, courbes...) et de carrefours (géométrie, nombre de voies, flux...) étant très variables. De plus, l'acceptabilité des mesures est différente suivant les politiques, les quartiers, et les cultures des villes ciblées. Cependant, nous étudions, dans la suite de ce rapport, les conséquences du passage du Tramway Capacitaire sur une configuration de carrefour « type » des villes des pays ciblés. Pour cela nous nous sommes inspirés d'une étude réalisée sur un corridor à Bogota (Colombie), ce corridor est un corridor avec une largeur de façade à façade importante permettant d'insérer le tramway et de conserver deux voies de circulation dans chaque sens ; ces voies sont traversées par des carrefours avec des trafics importants, mais moins nombreux que dans le cas d'un centre-ville dense.

Une simulation d'un carrefour type a donc été réalisée afin de vérifier la faisabilité d'une telle configuration et de produire un exemple pédagogique à destination des AOT et villes ciblées. La simulation a été réalisée avec le logiciel VISSIM, la méthodologie est décrite plus précisément dans le paragraphe 6.4.2.2.

Les résultats de cette simulation ont permis de simuler une ligne fictive toujours sous VISSIM, afin de tester les conséquences des variations des aléas (en station, en carrefour, en ligne). Il aurait été également intéressant de tester la variabilité de la régulation envisagée (en ligne et en terminus) cependant cela complexifiait la simulation. Nous apporterons cependant des propositions sur la régulation. La méthodologie et les résultats de cette simulation sont présentés au paragraphe 6.6.

Une réflexion sur la configuration des terminus avait été menée au début du projet « Tramway Capacitaire », les principales conclusions seront reprises dans un item, afin d'avoir un aperçu complet sur tous les aspects de l'exploitation du Tramway Capacitaire.

La section qui suit sur l'exploitation du tramway capacitaire va être divisée en 5 grands items :

- Identification des principales causes d'irrégularité sur les réseaux existants
- Traversée des carrefours
- Configuration des terminus
- Exploitation d'une ligne fictive
- Régulation en ligne

4.3 Identification des principales causes d'irrégularité sur les réseaux existants

4.3.1 Régularité et objectifs de la régulation

La régularité est un des critères majeurs d'appréciation de la qualité du service rendu par une ligne de transport. Elle mesure le pourcentage de rames qui ne sont pas supprimées et dont le retard est d'au plus x minutes (fonction de l'exploitant), dans les périodes dites « heures de pointe », le retard étant mesuré au terminus.

En Ile de France, l'indicateur de régularité compare l'intervalle réellement observé à l'intervalle théorique dans une plage de conformité de 2 minutes pour les lignes à la fréquence et 5 minutes pour les lignes à l'horaire.

Afin d'éviter les retards et la succession de tramways (trains de tramways) et d'assurer le niveau de service, des systèmes et mesures de régulation sont mis en place.

4.3.2 Retour d'expérience sur les lignes de tramway en circulation

Afin d'identifier les causes d'irrégularité principales, nous sommes partis d'un retour d'expérience sur les lignes de tramway existantes, en France et à l'international.

4.3.2.1 Identification des tramways à forte fréquence

En France et à l'international, plusieurs lignes de tramway affichent actuellement des intervalles réduits de l'ordre de 3-4 min (Montpellier, Grenoble, Nantes, Paris...). Certaines agglomérations ont par ailleurs fait le choix de réseaux maillés où plusieurs lignes peuvent emprunter les mêmes infrastructures sur une distance donnée (tronc commun). Sur ces troncs communs, l'intervalle peut être réduit à 2 min, à l'heure de pointe. En ANNEXE 4, un tableau présente ces lignes et troncs communs à fortes fréquences. Enfin, certaines lignes peuvent bénéficier de services renforcés lors d'événement exceptionnel (manifestation, match...). Dans tous les cas, ces intervalles réduits sont des intervalles théoriques, affichés par l'exploitant, sur les fiches horaires notamment. Mais ces intervalles ne sont que des moyennes qui cachent parfois de fortes disparités.

La régularité d'une ligne de transport est estimée, par l'exploitant, sur la base des données du SAE. Certains exploitants ou autorités organisatrices communiquent largement sur cette caractéristique de l'offre (notamment le STIF), mais globalement ces données sont difficiles à obtenir.

Plusieurs indicateurs permettant d'évaluer la régularité d'une ligne, à l'heure de pointe :

- La variation des temps de parcours par rapport aux horaires théoriques
- La variation de l'intervalle de passage par rapport à l'intervalle théorique indiqué dans les fiches horaires
- La variation des temps d'arrêt en station.

Grâce aux observations terrains et aux données du STIF la fiche la plus complète est celle du tramway T2 à Paris, elle est détaillée par la suite, car apporte des enseignements intéressants sur la régularité et la régulation.

4.3.2.2 Un exemple parlant : la ligne de tramway T2 Porte de Versailles – Pont de Bezons

Les données fournies par le STIF et les visites de terrain effectuées sur le T2 à Paris nous ont permis de mieux appréhender la régularité et le rôle de régulation du terminus. Cet exemple est très intéressant pour notre étude sur le Tramway Capacitaire, car deux rames longues de 2x32 mètres circulent à une fréquence de 4 minutes en heure de pointe.

Cette ligne a une configuration un peu particulière, car entre Porte de Versailles et la station de la Défense (13.8 km) elle circule sur une ancienne voie ferrée. Sur cette section il n'y a pas d'interface avec les autres modes et donc très peu d'aléas en ligne et de carrefours à traverser. La ligne est en section urbaine sur seulement 4.1 km entre La Défense et Pont de Bezons, cette section est donc particulièrement intéressante puisqu'elle est soumise aux aléas liés aux autres modes en circulation.

Tableau 12 Caractéristiques de la ligne de tramway T2

⁵ Informations générales	
Longueur de la ligne	17,9 km
Interstation moyenne	780 m
Site propre/site mixte	100 %
Longueur du MR	64 m (2x32)
Nb de carrefours régulés traversés	20
Intervalle à l'heure de pointe	4 min
Fréquentation (2014)	130 000 voy /j ⁶
Indice de régularité	96.6 % (2013) ⁷
	96.6 % des rames arrivent au terminus avec un retard \pm 2 min



Les visites terrains se sont déroulées sur deux matinées d'observation à l'heure de pointe le 13/03/2014 et le 11/06/2014.

- **Variation des temps de parcours par rapport aux horaires théoriques :**

Les temps de parcours ont été mesurés sur la section urbaine entre La Défense et Pont de Bezons (4.1 km, 8 stations et 14 carrefours régulés). Sur cette section l'insertion du tramway est axiale et le tramway a la priorité à l'ensemble des carrefours.

⁵Photo : source : <http://public-transport.net>

⁶Source : <http://www.leparisien.fr/espace-premium/val-d-oise-95/le-tramway-victime-de-son-succes-17-01-2014-3501691.php>

⁷ Bulletin d'information sur la qualité de service des transports en Île-de-France, de janvier à décembre 2013 ; N°15 Mars 2014

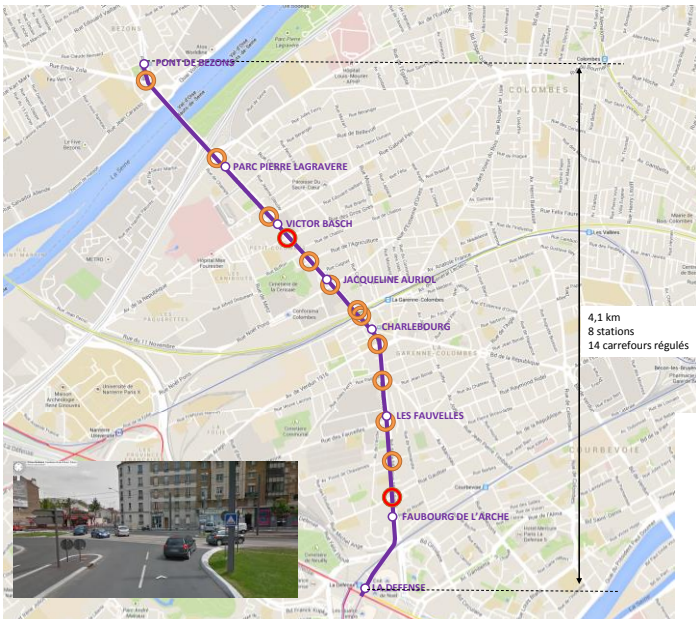


Figure 29 Tronçon Pont de Bezons – La Défense de la ligne T2 à Paris

Lors des deux matinées d'observation, trois enregistrements ont été effectués sur cette section. Ces mesures ne sont pas statistiquement représentatives, mais elles permettent de mieux appréhender la problématique.

Sur les trois enregistrements effectués, on a observé une occurrence par enregistrement de perte de priorité aux carrefours (soit 7 % de perte de priorité aux carrefours) avec un temps moyen perdu par carrefour de 20 secondes. Ces pertes de priorité observées ont été causées par la présence de véhicule sur la plateforme malgré la priorité.

Les temps de parcours observés sont supérieurs d'environ 2 minutes par rapport aux temps de parcours théorique, les pertes de temps sont liées à une marche détendue par rapport aux horaires théoriques ainsi qu'à une priorité aux carrefours non optimale qui créent des d'accélération et décélération supplémentaire et donc une perte de temps.

- **La variation de l'intervalle de passage par rapport à l'intervalle théorique indiqué dans les fiches horaires**
 - Mesure de la régularité à la station de la Défense

L'intervalle de passage a été mesuré à la station de la Défense. Cette station est la station intermédiaire entre la section urbaine et la section non urbaine. Sur les deux matinées d'observation au total 27 relevés par sens ont été effectués à l'heure de pointe (7 h 50 -9 h10).

Les observations de terrain montrent qu'à l'heure de pointe seules 28 % (sens Pont de Bezons – La Défense) et 20 % (sens La Défense – Pont de Bezons) arrivent dans l'intervalle théorique de 4 min.

À l'heure de pointe on trouve une régularité plus faible par rapport aux données du STIF (96.6 % des rames arrivent dans l'intervalle 4 ± 2 min) : 88 % des rames dans le sens Pont de Bezons – La Défense et 65 % des rames dans le sens La Défense – Pont de Bezons arrivent dans l'intervalle $[4 \pm 2$ min]. Ceci montre une régularité assez médiocre et qui contrairement à ce qu'on pourrait penser la régularité du tronçon non urbain est plus mauvaise que celle du tronçon non urbain.

Tableau 13 Intervalles entre les rames du T2 à la défense

Intervalle	Sens Pont de Bezons > La Défense	Sens La Défense > Pont de Bezons
1 min	—	10 %
2 min	36 %	30 %
3 min	24 %	20 %
4 min	28 %	20 %
5 min	12 %	15 %
6 min		5 %

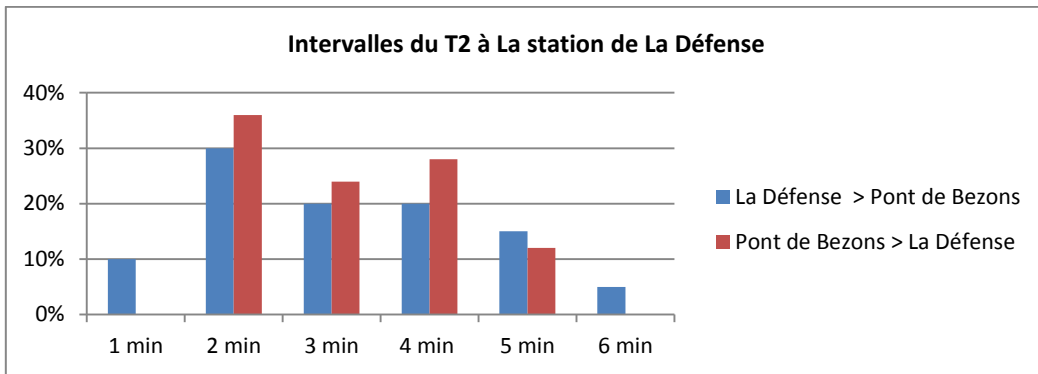


Figure 30 Intervalles du T2 à la station de la défense

– Mesure de la régularité à l'arrivée au terminus et son pouvoir de régulation

Les observations ont été réalisées sur le terminus de Pont de Bezons après la section urbaine de la ligne.

Fonctionnement du terminus

Le terminus est constitué de 4 positions, deux en avant gare (échanges passagers) et deux en arrière gare (régulation, stockage). Le schéma ci-dessous représente la configuration du terminus.

La relève conducteur est systématique au terminus elle permet au conducteur de faire sa pause syndicale dans un local situé à proximité immédiate du terminus. Le conducteur qui arrive au terminus effectue la manœuvre :

- Arrière Gare (ARG) : la relève se fait au niveau des positions d'arrière gare
- Avant Gare (AVG) : la relève se fait à quai

La régulation s'effectue au niveau de la position 3 (à quais) et non au niveau de la position 2.

De manière globale les manœuvres d'arrière gare sont privilégiées.

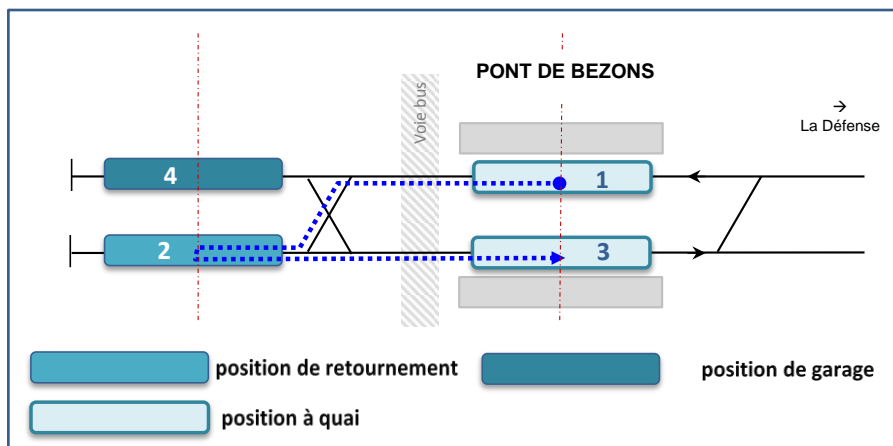


Figure 31 Schéma du terminus à Pont de Bezons

La position 4 est utilisée comme position de garage qui permet d'injecter une rame en cas de retard important d'une rame en ligne ou d'augmentation de l'intervalle

Le temps de retournement est à prévoir dans l'exploitation d'une ligne. Dans ce cas de figure, le temps de retournement se décompose de la manière suivante :

- 5 occurrences (dépôt des voyageurs en station, arrivée au terminus, relève conducteur, départ du terminus, charge des voyageurs en station)
- Temps de manœuvre ARG entre 3 et 5 minutes (hors temps d'arrêt en station)
- Une manœuvre d'AVG permet d'« économiser » ce temps

Tableau 14 Décomposition du temps de retournement au terminus Pont de Bezons

Départ station	
Arrivée terminus	00:01:03
Sortie conducteur	00:00:20
MàP conducteur	00:00:41
Départ terminus	00:00:15
Arret releve conducteur	00:00:21
Départ	00:00:12
Arrivée station	00:00:21
Manœuvre ARG	0:03:13

Pouvoir régulateur du terminus

Le terminus est conçu pour pouvoir appliquer la retombe. La retombe est une méthode de régulation qui consiste à réinjecter les rames en réduisant peu à peu le retard accumulé à l'arrivée au terminus (Cette mesure de régulation est détaillée au paragraphe 6.8.3.

La mesure des intervalles à l'arrivée et au départ du terminus permet d'évaluer le pouvoir régulateur de celui-ci.

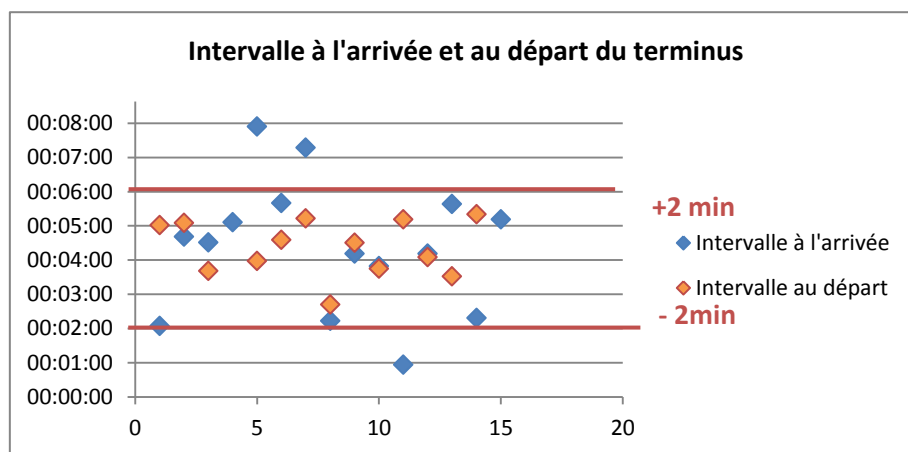


Figure 32 Intervalle à l'arrivée et au départ au terminus Pont de Bezons

Le pouvoir régulateur du terminus est assez fort :

- 73 % des rames arrivent dans l'intervalle $[4 \pm 2 \text{ min}]$
- 100 % des rames partent dans l'intervalle $[4 \pm 2 \text{ min}]$

Ces observations montrent l'importance du dimensionnement du terminus.

- **Variation des temps d'arrêt en station**

La station de la Défense est la station la plus fréquentée à l'heure de pointe. Elle est au cœur d'un nœud d'échange important, et subit une forte rupture de charge (le tramway se vide et se remplit à cette station), ce qui pose des conflits importants dans les échanges passagers. À l'heure de pointe du matin entre 8 h et 10 h une équipe d'agents de la RATP (6 personnes) est présente sur le quai pour fluidifier les flux piétons et veiller à la fermeture des portes du tramway. L'aléa principal en station est le blocage des portes par les passagers qui forcent la montée. La configuration des quais est centrale décalée, ce qui permet de limiter les conflits entre les passagers à l'arrivée de deux tramways simultanément.

Lors des matinées d'observation, 47 mesures ont été effectuées à l'heure de pointe entre 7 h 50 et 9 h 10, dans les deux sens de la ligne. Les temps d'arrêt en station sont très variables.

Tableau 15 Temps d'arrêt en station à la défense

min	36 s
max	1 min 48 s
moyenne	1 min 9 s
médiane	1 min 8 s

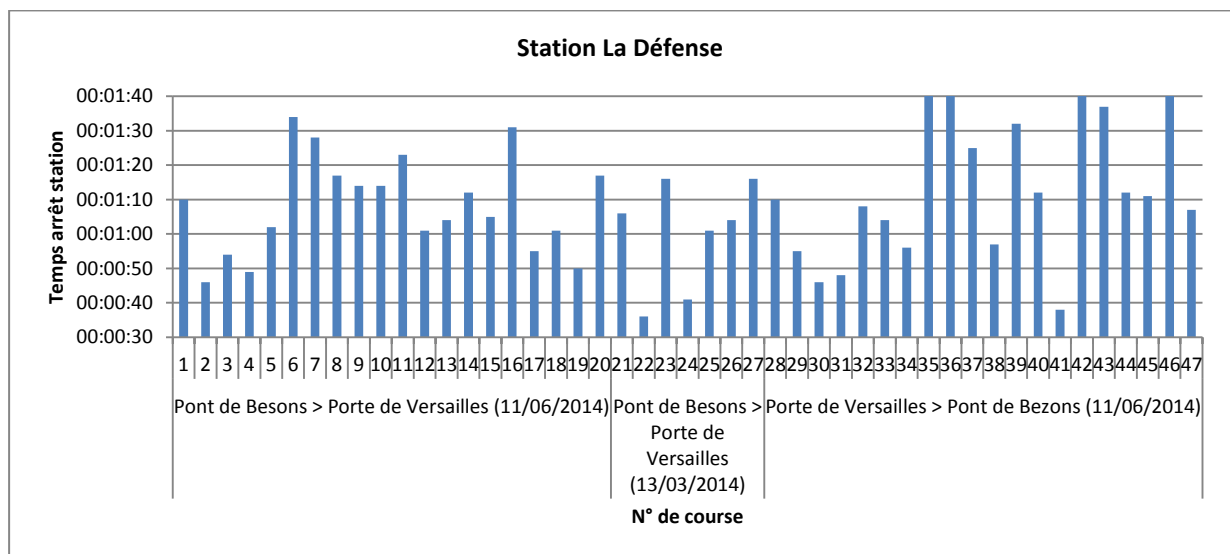


Figure 33 Répartition des temps d'arrêt en station à la station de La Défense

On observe une répartition gaussienne des temps d'arrêt en station : 83 % des rames s'arrêtent 70 ± 20 secondes.

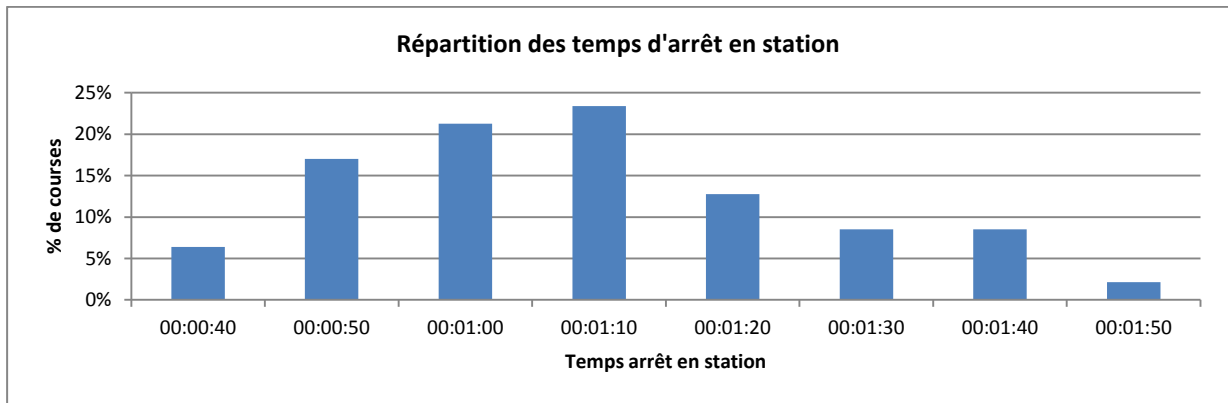


Figure 34 Répartition des temps d'arrêt en station à La Défense

Cette répartition pourra être réutilisée sous forme de courbe de gauss dans la simulation des carrefours après la station.

Mesures Capacitaires : Exploitation

En station : éviter le blocage de la fermeture des portes

En ligne : porter une attention particulière aux traversées piétonnes

En traversée de carrefours : porter une attention particulière aux remontés de files de voitures sur la plateforme tramway et aux traversées piétonnes devant le tramway

4.3.2.3 Autres enseignements à tirer des retours d'expérience sur les lignes existantes et synthèse

Les données disponibles sur internet et la rencontre avec les exploitants et l'expert nous ont permis d'identifier des problématiques sur d'autres réseaux.

Variation des temps d'arrêt en station

Sur ce thème, les données disponibles concernent :

- T2 : station La Défense ;
- Jérusalem Red Line : stations du centre-ville.

Tableau 16 Temps d'arrêt en station T2 (La Défense), Jérusalem (centre ville)

Ligne	Station	Temps d'arrêt en station		
		Moy	Min	max
T2	La Défense	60 s	36 s	76 s
Jérusalem	Centre-ville	60 s	—	240 s

Les temps d'arrêt en station, notamment dans les stations très fortement fréquentées sont très fluctuants allant du simple à 1.5 fois plus (voire à 4 fois plus dans le cas où le conducteur ne force pas la fermeture des portes).

Ces aléas en station sont principalement liés au temps d'échanges voyageurs et aux incivilités des voyageurs qui ont tendance à bloquer la fermeture des portes.

Pour assurer un service fiable et des temps de parcours homogène, ces aléas en station doivent être maîtrisés.

Une attention particulière doit ainsi être portée à la gestion des flux en station pour limiter le blocage intempestif des portes par les voyageurs et l'afflux de voyageurs dans la rame lorsque le signal de fermeture des portes retenti.

Des portes palières en station permettraient de limiter ces blocages intempestifs des portes et d'assurer un service fiable.

Variation des temps de parcours

Sur ce thème, les données disponibles concernent :

- T2 : Section La Défense – Pont de Bezons ;
- Montpellier T1 ;

Tableau 17 Avance / Retard par rapport au temps de parcours théorique

	Avance/retard par rapport au temps de parcours théorique					
	>2 min d'avance	1-2 min d'avance	À l'heure	1-2 min de retard	2-4 min de retard	>4 min de retard
T2 : La Défense – Pont de Bezons (STIF)			97 %			
Montpellier T1	—	—	78 %	13 %	3 %	1 %

Globalement, les lignes de tramway à la française étudiée ont des temps de parcours théoriques fiables et réguliers. Ainsi, usuellement, une avance/retard de -1/+2 min est régulièrement observée.

Ceci démontre que les principes retenus et mis en place sur les tramways à la française sont efficaces pour le type de matériel (tram de 30-40m) et l'offre (4-5 min) usuellement considéré.

Ces principes devront donc être reconduits dans le cadre d'un tramway capacitaire et être consolidés et adaptés à la spécificité du produit tramway capacitaire (cf paragraphe 4).

Variation de l'intervalle de passage

Sur ce thème, les données disponibles concernent :

- T2 : station La Défense ;
- Bordeaux – lignes A, B et C ;
- Grenoble — lignes A et B ;
- Lyon T1, T2.

Tableau 18 Intervalle de passage des rames

	Réduction/allongement de l'intervalle de passage ⁸				
	<-2 min	-0 à -2 min	Intervalle théorique	+0 à +2 min	>2 min
T2 (terrain)	5 %	55 %	24 %	16 %	—
Bx – lignes A, B et C	—	39 %	56 %	5 %	—
Grenoble – ligne A	—	—	80 %	20 %	—
Grenoble – ligne B	—	—	88 %	12 %	—
Lyon – T1	4 %	21 %	60 %	8 %	7 %
Lyon – T2	14 %	9 %	56 %	15 %	6 %

Alors que les temps de parcours sont globalement bien respectés (cf paragraphe ci-avant), l'intervalle entre rames ne l'est pas. Ceci génère des déséquilibres de charges voyageurs entre les rames et créent un sentiment d'attente supplémentaire auprès des voyageurs qui perçoivent alors une offre peu fiable.

Ceci est principalement dû au fait qu'insérées en milieu urbain non protégé, les rames sont soumises à des aléas de circulation qui ne sont pas répartis de manière homogène et systématique sur la ligne.

Dans le cas d'un tramway capacitaires avec des intervalles réduits entre rames, il est indispensable que les intervalles de passage soient bien respectés de manière à éviter la formation de trains de tram. De nouvelles dispositions innovantes doivent donc être imaginées pour favoriser le respect de l'intervalle entre rames (régulation en ligne,...) et donc limiter au maximum les aléas généralement observés sur une ligne de tramway.

4.3.3 Causes d'irrégularité et les pistes d'amélioration de la régularité

Le tableau ci-dessous présente les causes des irrégularités que l'on retrouve en station, en ligne aux carrefours et au terminus et leurs effets sur l'exploitation. Grâce aux entretiens avec les exploitants, nous avons pu globalement quantifier dans la dernière colonne l'occurrence de ces aléas. Pour chaque cause d'irrégularité, des mesures sont proposées, ces solutions découlent principalement des solutions déjà mises en place sur les réseaux de tramway, mais qui ne sont pas toujours bien utilisées ou mises en place sur les réseaux.

Le tramway Capacitaire repose sur un ensemble de mesures qui ne peuvent pas être dissociées les unes des autres, au risque de mettre en péril le système. Dans la dernière colonne du tableau, l'importance des mesures est donnée. Par la suite les simulations viendront préciser ces mesures.

⁸ Nota : sur chacune de ces lignes, l'intervalle théorique donné par l'exploitant sur les fiches horaires est déjà un intervalle d'intervalle de passage, généralement de l'ordre de 2 min. par exemple, 5 à 7 min pour Lyon T1, 4 à 6 min pour T2 Porte de Versailles – Pont de Bezons.



Lieu	Origine	Effet	Occurrence		Solutions	Famille de solutions	Pris en compte
			Pays développés	Pays en développement			
En station	Incivilités	Blocage de la fermeture des portes	+	++	Mettre en place des portes palières en station	Systèmes	
					Prévoir du personnel sur les quais les plus fréquentés en heure de pointe pour veiller à la fermeture des portes et au départ du tramway	Exploitation	
	Très forte fréquentation de station	Échanges voyageurs plus lents	++	+++	Limiter la montée des voyageurs Créer des SAS entrée station/valideurs et valideurs/quais	Systèmes	
					Adapter en temps réel la durée d'arrêt en station via des comptages montées/descentes	Systèmes	
	Dysfonctionnement d'une porte	Échanges voyageurs plus lents	+	+	Maintenance préventive	Maintenance	
	Mauvaise accessibilité				Concevoir un projet 100 % accessible	Infrastructure	
	Validation à bord				Prévoir des valideurs en station	Systèmes	
	Traversée des piétons descendant devant la rame	Ralentissement de la rame	+	+	Sensibiliser le personnel à forcer le passage/utilisation de la sonnette	Exploitation	
Traversée des piétons descendants de la rame en sens opposé devant la rame	Feu de traversée de voie pour piétons (hors carrefour)				Systèmes		
En ligne	Incidents techniques (MR, aiguillages défectueux,...)	Arrêt de la rame en ligne			Maintenance préventive	Maintenance	
	Aléas de conduite/personnalisation de la conduite	Ralentissement de la rame	+	+	Sensibiliser le personnel à forcer le passage	Exploitation	
					Conduite automatique	Systèmes	
					Ajouter des marges dans les horaires pour pouvoir rouler marche tendue en cas de retard	Exploitation	
					Imposer des vitesses de conduite au conducteur en temps réel	Exploitation	
	Problèmes causés par les usagers (agressions, vols, colis suspects, voyageur malade,...)	Arrêt de la rame en ligne	+	++			
	Traversées de piétons	Ralentissement de la rame	+	+++	Séparateurs de site propre	Infrastructure	
Rame en panne	Arrêt de la rame en ligne	+	+	Prévoir des positions de garage au milieu de la ligne pour éviter d'avoir à tracter la rame jusqu'au terminus	Exploitation		
				Implanter des Com intermédiaires régulièrement	Exploitation		
Véhicule routier sur plateforme	Arrêt de la rame en ligne	NC	++	Favoriser les revêtements non roulants Séparateurs de plateforme d'hauteur min	Infrastructure		



Lieu	Origine	Effet	Occurrence		Solutions	Famille de solutions	Pris en compte
			Pays développés	Pays en développement			
En traversée de carrefours	Détection tardive	Perte de priorité aux carrefours	+	+	au départ d'une station, demande de priorité aux feux avant d'avoir confirmation de la bonne fermeture des portes	Systèmes	
	Véhicule routier sur plateforme/non-respect des priorités	Ralentissement de la rame	++	+++	barrière Autoriser les mouvements tournants uniquement au niveau des carrefours situés à proximité des stations pour anticiper le départ des rames	Infrastructure	
	Traversées de piétons devant la rame	Ralentissement de la rame	+++	+++	aménagement spécifique	Infrastructure	
	Temps de vert minimum de la phase VP non atteint	Perte de priorité aux carrefours	+	+	limiter le nombre de traversées de carrefours	Systèmes	
					permettre le passage simultané des rames aux carrefours	Exploitation	
Complexité du carrefour	Priorité difficile à donner	++	++	limiter le nombre de mouvements VP	Infrastructure		
Terminus	Temps de battement trop faibles (temps de pause insuffisant pour le conducteur...)	Départ en retard du terminus	+	+	Introduire des temps de battements suffisants pour garantir un fort % de départs à l'heure Glissement de conducteur	Exploitation	

Obligatoires		Apportent une sécurité d'exploitation		Peu utiles	
--------------	--	---------------------------------------	--	------------	--

4.4 Traversée des carrefours

Dans la mesure du possible, afin de faciliter l'insertion urbaine, le tramway capacitair va traverser les carrefours à niveau, avec une gestion des carrefours avec des feux tricolores. Afin, d'assurer la régularité du tramway la priorité aux carrefours lui sera donnée. Cela nécessite l'installation d'un système de détection du tramway et une programmation des feux. L'arrivée du tramway va ajouter une phase supplémentaire au carrefour et perturber le trafic routier qui ne bénéficiera pas de la priorité.

Ces systèmes de priorité fonctionnement bien sûr du tramway classique en France avec à Lyon un taux de priorité de 96.6 %. Ce taux de priorité varie en fonction de la configuration des lignes. Un environnement dense en carrefour verra sa priorité aux carrefours diminuer à cause de la complexité de gestion. Le système de détection peut aussi jouer, les technologies existantes seront présentées dans un premier paragraphe. Afin de tester les mesures envisagées pour fiabiliser la traversée des carrefours à savoir : la vitesse de passage en carrefour, l'intervalle réduit, la mise en place de portes palières, la limitation des mouvements tournants pour les voitures, la gestion des piétons avec des feux et de grandes surfaces d'attente ; une simulation a été réalisée au sein d'EGIS, sur le logiciel VISSIM.

4.4.1 Technologie de priorité aux carrefours

Actuellement, il existe deux technologies pour la gestion de la priorité des TCSP aux carrefours : le système de boucles magnétiques au sol et le système de signal radio. Les boucles au sol sont utilisées en France depuis la réapparition du tramway dans les années 80, ce système a fait ses preuves et se retrouve dans la majorité des réseaux français. La technologie du signal radio est devenue fonctionnelle avec la mise au point du GPS, à la fin des années 90, et elle largement utilisée par les véhicules de type Bus. Le tableau ci-dessous décrit le fonctionnement de ces deux systèmes.

Tableau 19 Comparaison des technologies de priorité aux carrefours

Système	Boucle de détection	Signal radio
Matériel	3 à 4 boucles magnétiques (appel lointain/recalage/pied de feu/acquittement) (cf. schéma ci-dessous) sont placées pour préparer le carrefour à l'arrivée du tramway. Ces boucles sont noyées dans la plateforme. Elles sont alimentées électriquement, et reliées par voie filaire au contrôleur de feux.	<p>Une communication radio directe est établie entre le tram et le contrôleur de feux.</p> <p>Utilisation du GPS (éventuellement couplé à la distance odométrique) pour connaître la position précise du tramway</p> <p>Dialogue direct entre l'équipement embarqué et le contrôleur de feux.</p> <p>En complément, utilisation d'antennes relais (ou de câbles en multi) si des éléments urbains font obstacles à la télécommunication (virages, arbres...) tram-feu.</p>

Système	Boucle de détection	Signal radio
		Il existe fréquences radio qui traversent mieux les obstacles L'acquiescement en fin de carrefour peut se faire par le GPS ou bien les boucles de pied de feu et d'acquiescement peuvent être conservées
Détections	Détection en deux-points (les 2 premières boucles) puis distance traduite en temps moyen d'approche	Simulation de points d'approche virtuels, facilement reparamétrables Ou détection toutes les x secondes, et actualisation de la distance au carrefour et du temps à chaque détection Variante : le tram peut envoyer son heure prédictive d'arrivée au feu
Lien avec le SAE	Aucun, communication uniquement entre la boucle et le feu	Le système de communication radio doit être indépendant du TETRA (technologie utilisée pour le SAE), car ce système ne sait pas gérer la communication entre le tram et le PPC en même temps que celle du tram et des feux
Exemples d'utilisation	Technologie la plus utilisée en France pour les tramways modernes, et de façon moins systématique à l'international	Très largement utilisé pour les bus et sur le tramway de Mulhouse
Coûts	Plus cher en raison des coûts de génie civil	Moins cher

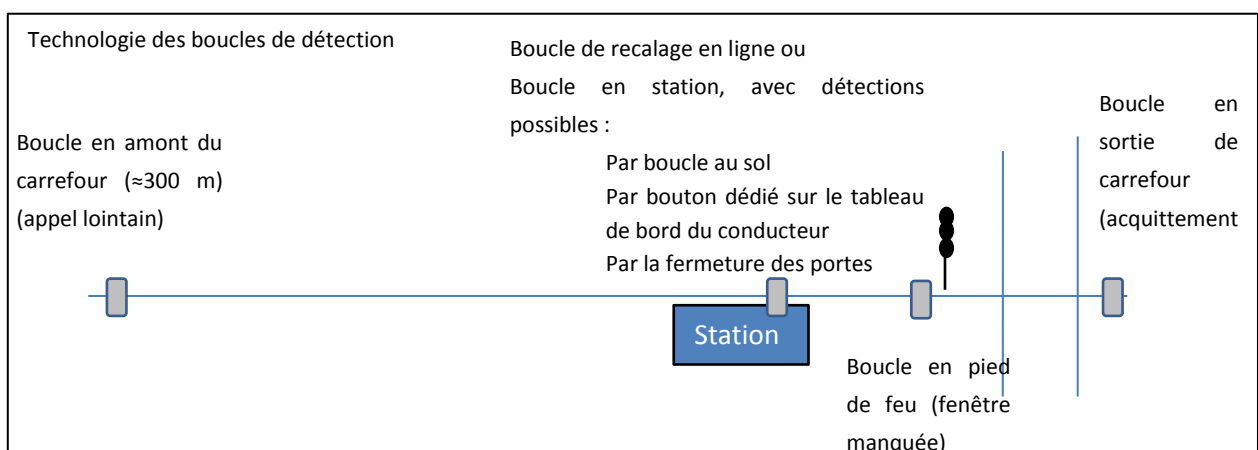


Figure 35 Technologie des boucles de détection en carrefour

Mesures Capacitaires : Priorité aux carrefours

Les réticences vis-à-vis de la technologie GPS+radio viennent en grande partie d'une habitude historique d'utilisation du système des boucles intégrées dans la plateforme (technologie plus ancienne, existante dès les premiers tramways modernes).

Cependant, avec les boucles l'approche du tramway n'est détectée qu'en deux points ; les aléas entre ces boucles et le feu lui-même sont causes du manquement de la fenêtre de vert.

Avec la détection GPS et la communication radio tramway-feu, la position est connue continuellement et le temps d'approche affiné, avec pour résultat :

- L'obtention du vert confortée (dans la limite d'un aléa survenant au dernier moment).
- Le temps de vert optimisé.

La fiabilité de la technologie radio, jusqu'ici invoquée comme étant son point faible, est aujourd'hui complète : les antennes relais (ou câbles relais) permettent de s'affranchir des obstacles urbains aux communications rame-feu. De plus, l'arrivée du système européen Galiléo permet si on le souhaite de s'affranchir d'une dépendance du système US.

La technologie GPS+radio est donc conseillée pour le tramway capacitaire.

4.4.2 Modélisation d'un carrefour type

4.4.2.1 Objectifs

La traversée des carrefours est un enjeu important pour le tramway capacitaire. Les carrefours vont être traversés par des rames longues toutes les 1 minute 30 (fréquence de 3 minutes dans chaque sens).

Cette simulation a pour objectif de quantifier et qualifier l'impact d'un carrefour type sur le tramway et réciproquement. Et ainsi de conclure sur la faisabilité de carrefours à niveau et les mesures qui seront nécessaires pour la gestion de la traversée en carrefour pour limiter les impacts sur la circulation du tramway, mais également sur le trafic routier.

Cette simulation a également pour objectif d'identifier et de hiérarchiser les différentes causes d'aléas, ainsi que d'estimer le niveau de trafic et la densité du carrefour envisageable pour la viabilité du tramway capacitaire.

La quantification et la qualification de l'impact du carrefour sur la circulation du tramway se font avec les indicateurs suivants :

- **Temps perdus** : permet d'identifier le nombre de tramways perdant du temps, le temps d'arrêt et la position des arrêts ;
- **Temps de déplacement** : permet d'évaluer la régularité du tramway entre l'entrée et la sortie du modèle ;
- **Congestion** : permet d'évaluer les files moyennes aux feux (tous modes) et les longueurs de remontées de fil maximum ;
- **Postes de mesures** : permet de quantifier le débit aux feux et ainsi évaluer la capacité/saturation par branche

Le logiciel VISSIM (logiciel qui permet de réaliser des simulations de trafic) permet d'obtenir tous ces résultats en sortie de simulation. Cette simulation va permettre nourrir le volet « Exploitation d'une ligne » en quantifiant l'aléa subit par un tramway traversant un gros carrefour. On rappelle que cette simulation complète permettra de vérifier la viabilité du produit tramway capacitaire sur le cas simulé.

4.4.2.2 Méthodologie de la simulation

Hypothèses

Les trafics simulés représentent une situation moyenne d'un carrefour important le long d'un axe structurant. Ces trafics ont été basés sur une étude réalisée par EGIS sur la ville de Bogota. Le carrefour simulé est en limite de saturation, avant même l'arrivée du tramway à l'heure de pointe.

La simulation a été réalisée par un ingénieur d'étude d'Egis Rail avec le logiciel VISSIM. La simulation Vissim a duré 4 heures avec des trafics horaires de 75 %, 90 %, 100 % et 75 % du trafic de l'heure de pointe. Le schéma ci-compte représente la répartition du trafic sur le carrefour à l'heure de pointe.

Les hypothèses majeures prises pour la simulation sont les suivantes :

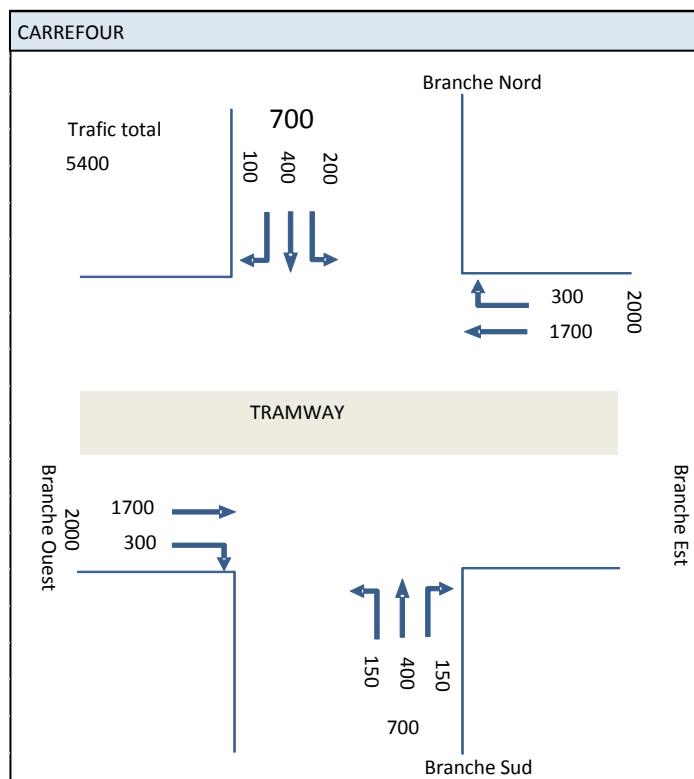


Figure 36 Schéma du carrefour simulé

- Le carrefour est situé à proximité d'une station
- Mouvement de tourne-à-gauche interdit pour les véhicules circulant sur l'axe longitudinal au tramway
- Mouvement de tourne-à-gauche autorisé sur l'axe perpendiculaire au tramway
- Les traversées piétonnes du carrefour sont gérées par feux ;



- Les traversées piétonnes situées à l'extrémité opposée de la station tramway sont également gérées pas feux.
- Intervalle en début de ligne : 3 min théoriques, très peu d'aléa ;
- Intervalle en fin de ligne : 3 min théoriques avec aléa (distribution gaussienne avec 98 % des rames dans l'intervalle [-2 min ; + 2 min])
- Tramway capacitaire : longueur 85 m
- Temps d'arrêt en station : 50 secondes (+ — 0 seconde, car porte palière)
- Usagers du tram dans chaque sens : 50 montants + 250 descendants, également répartis dans les 4 directions possibles. C'est une configuration extrême et défavorable, car on y observe de gros paquets de descendants simultanés.

Méthode

Étape 1 : l'observation de la situation de référence Tramway capacitaire

La situation de référence est celle du produit tramway capacitaire avec les mesures d'aménagement qui lui incombent (portes palières, gestion des piétons par des feux, utilisation de la sonnette, simplification du carrefour...). La situation de référence est calée par itération avec l'étape 2 « tests de sensibilité ». Les résultats seront comparés avec une situation de tramway classique (42 m, fréquence 6 min et montant/descendants divisés par 2)

Cette étape permet de :

- vérifier la viabilité du produit tramway capacitaire sur le cas simulé.
- Observer où ont lieu les principales pertes de temps et de les hiérarchiser.
- Nourrir le volet « simulation de l'exploitation d'une ligne complète » en quantifiant l'aléa subi par un tramway traversant un gros carrefour.

Étape 2 : Tests de sensibilité

Ils nous permettent de quantifier et d'illustrer l'importance des différentes mesures imaginées. Plusieurs scénarios sont modélisés en fonction de paramètres à faire évoluer pour en mesurer les conséquences (**situation de référence**/situation modifiée) :

- Vitesse tram de passage en carrefour : **20 km/h/30 km/h** ;
- Fréquence : **3'/2'** ;
- Aléa de temps d'arrêt en station : **sans/avec** (98 % des arrêts de tram sont compris dans l'intervalle [-20 s ; + 20 s], soit un écart-type de 7 s) ;
- TAG de l'axe transversal : **avec/sans** ;
- Aléa traversée de piéton devant le tram démarrant : **faible/fort** (désorganisation du stockage dans les refuges) ;
- Aléa de comportement des automobilistes : **courtois/agressifs** (notamment lorsque des véhicules sont stockés sur la plateforme tramway).

Tableau 20 Scénarios testés lors de la simulation d'un carrefour

Scénario	Vitesse de passage en carrefour	Intervalle	Aléa de temps d'arrêt en station	TAG autorisé sur l'axe transversal	Aléa piéton	Aléa comportement voitures
1 (référence)	20 km/h	3'	Non	Oui	Faible	Courtois
2	30 km/h	3'	Non	Oui	Faible	Courtois
3	20 km/h	2'	Non	Oui	Faible	Courtois
4	20 km/h	3'	Oui	Oui	Faible	Courtois
5	20 km/h	3'	Non	Non	Faible	Courtois
6	20 km/h	3'	Non	Oui	Fort	Courtois
7	20 km/h	3'	Non	Oui	Faible	Agressif

4.4.2.3 Résultats de la simulation et conclusions pour le tramway capacitaire

Viabilité du Tramway capacitaire

Par rapport à un système de tramway « classique », la simulation montre que le passage d'un carrefour important en mode « capacitaire » **reste viable et acceptable** malgré ses rames 2 fois plus longues, ses fréquences 2 fois plus élevées, et son nombre d'usagers 4 fois supérieur, **car il génère peu de perturbations supplémentaires** sur le tramway :

Le taux de priorité au feu n'est dégradé que de 0,4 % et reste excellent à **99.4 %**. L'irrégularité d'exploitation engendrée passe de « 6 % des rames perdent 27'' » à « 10 % des rames perdent 29'' »

Les causes de pertes de temps au carrefour sont identifiées et hiérarchisées comme suit :

- **Conflit avec les voitures** (~50 %) : principalement dus au reliquat effectuant un TAG sur l'axe transversal.
- **Conflit avec les piétons** (~45 %) : principalement lorsque coïncident les arrivées dans les deux sens.
- **Pertes de vert** (~5 %) : dues aux fenêtres manquées (plafonnement du temps de prolongement du vert en cas de croisement de rame).

Par rapport à un système de tramway « classique », la simulation montre que le passage d'un carrefour important en mode « capacitaire » **reste viable et acceptable. Il génère les perturbations supplémentaires sur la circulation suivantes :**



- Les remontées de file sur l'axe longitudinal sont diminuées (-20 %) : par ses hautes fréquences, il est favorable à l'écoulement du trafic de cet axe (compatibilité de la phase tram avec la phase voiture).
- Les remontées de file sur l'axe transversal sont augmentées (+45 %)
- La capacité globale du carrefour est peu affectée sur une période de 4 heures (la quasi-totalité de la demande est aussi écoulée)
- La capacité globale du carrefour est par contre affectée sur l'heure de pointe (les remontées de file qui atteignent les carrefours en amont sont plus fréquentes)
- Le flux considéré dans la simulation (2000x2/700x2) provoque des remontées de file dépassant les 300 m (susceptible d'impacter les carrefours voisins). 75 % de ce flux ne les provoque plus.

Ces conclusions s'entendent sur un tramway pourvu des mesures « capacitaires » et sur une configuration favorable (densité carrefour > 300 m et phase tramway compatible).

Tests de sensibilité

Les tests de sensibilité ont permis de hiérarchiser les effets des mesures prises dans le cas du tramway capacitaire et d'évaluer les limites du système. Le tableau ci-dessous récapitule les résultats de la simulation pour les tests de sensibilité.



Mesures préconisées et quantification de leurs effets

Tableau 21 Mesures préconisées pour le tramway capacitaire et quantification de leurs effets

Scénario	Vitesse de passage en carrefour	Intervalle	Aléa de temps d'arrêt en station	TAG autorisé sur l'axe transversal	Aléa piéton	Aléa comportement voitures	Effet sur la régularité
Mesure testée		Limites de la très haute fréquence	Effet portes palières	Effet interdiction des TAG	Effet utilisation active de la sonnette	Effet communication éducative et amendes	
1 (référence)	20 km/h	3'	Non	Oui	Faible	Courtois	—
2	30 km/h	3'	Non	Oui	Faible	Courtois	Pas d'effet significatif
3	20 km/h	2'	Non	Oui	Faible	Courtois	Très fort impact (3 fois plus d'arrêts, 5 fois plus de temps perdu)
4	20 km/h	3'	Oui	Oui	Faible	Courtois	+ 16 % d'arrêts du sens 1. Dégradation de la priorité au feu (99 %>97 %)
5	20 km/h	3'	Non	Non	Faible	Courtois	50 % d'arrêts en moins, 50 % de temps perdu en moins
6	20 km/h	3'	Non	Oui	Fort	Courtois	50 % d'arrêts en plus, 50 % de temps perdu en plus
7	20 km/h	3'	Non	Oui	Faible	Agressif	80 % d'arrêts en plus, 100 % de temps perdu en plus

Mesures Capacitaires : Traversée des carrefours

Mesure « portes palières » : elle apparaît comme indispensable et à très fort pouvoir régulateur, par triple effet :

- Elles évitent l'aléa sur le temps d'arrêt en station (+/ - 20 s),
- Elles confortent directement le taux de priorité au feu (99 % contre 94 %),
- Elles permettent au tram de doubler ses passagers descendus, de façon à libérer le vert de traversée de voie à leur arrivée en bout de zone tampon. Il limite ainsi un aléa piéton.

Mesure « utilisation active de la sonnette » : utilisée avec parcimonie sur les réseaux exploités, elle a un effet immédiat, et sur le long terme avec l'habitude prise par les usagers de céder le passage au tramway.

Mesure « station proche carrefour » : la zone d'approche dans le sens 1 est ainsi fiabilisée.

Mesure « fiabiliser la zone d'approche » : la zone d'approche dans le sens 2 (300 m, 25'') ne doit contenir ni passage piéton ni carrefour.

Mesure « suppression des TAG de l'axe longitudinal » : ces TAG sont incompatibles avec la phase tramway. Pour les gros carrefours, il est nécessaire de les supprimer (faisabilité à vérifier par simulation). Cette suppression est courante en métropole émergente : configuration « en oreille ».

Mesure « suppression des TAG de l'axe transversal » : les TAG sont la cause la plus importante de temps perdu au feu (50 % des arrêts). Cette suppression n'est pas toujours acceptable par le plan de circulation. À essayer au cas par cas.

Mesure « communication préventive et répressive » : les voitures s'étant engagées dans le carrefour sans certitude d'en sortir sont verbalisées (ex Rabat ou Jérusalem).

Mesure « aménagement dissymétrique du pp » ou « station de type 3Q » : le jeu de barrière tend à séparer les espaces d'attentes, pour éviter le blocage des usagers sur les voies lors de l'arrivée simultanée sens 1 + sens 2 et du feu rouge piéton. C'est la deuxième cause de perte de temps (45 % des arrêts).

Mesure « acquittement par la tête de rame » : la longueur de rame n'est plus impactante. C'est le dégagement piéton qui est dimensionnant, ou bien c'est le vert qui survient quand la queue de rame est encore en carrefour (pas de problème de sécurité).

Mesure « aménagement d'un îlot face aux TAG » : pour diminuer ce temps de dégagement piétons et ainsi favoriser les mouvements de tourne-à-droite des voitures de l'axe longitudinal. Cela améliore légèrement la capacité du carrefour.

4.5 Configuration du terminus

La configuration du terminus n'a été que très peu abordée dans le cadre de mon stage. Des analyses ont été faites lors des premières réflexions sur le tramway capacitair. Dans ce paragraphe nous nous intéresserons aux enjeux liés au terminus et présenterons un exemple de configuration type.

4.5.1 Rôle d'un terminus

Le terminus permet de retourner les rames en bout de ligne. Le matériel roulant peut être unidirectionnel ou bidirectionnel. Le matériel roulant unidirectionnel nécessite un terminus en boucle, qui est très consommateur d'espace surtout dans le cas d'un tramway de 85 mètres. Nous préconisons donc un matériel roulant bidirectionnel, qui permet d'économiser de l'espace lors de la conception du terminus.

La configuration d'un terminus peut influencer le fonctionnement de la ligne de tramway dans les coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance. Par conséquent, il est indispensable de définir les paramètres appropriés et adaptés pour le système de transport.

Les fonctionnalités d'un terminus sont :

- Retourner les véhicules
- Faire la relève conducteur
- Réguler (récupérer le retard en réinjectant les rames à l'heure)
- Stocker des rames : pour réinjecter une rame sur la ligne en cas de panne ou pour renforcer l'exploitation en cas de besoin

Un terminus est dimensionné en fonction :

- Fréquence de fonctionnement: 3 minutes
- Insertion en milieu urbain
- Connexion avec les autres modes de transport
- Accessibilité pour les utilisateurs
- Niveau de fiabilité du Système d'exploitation attendue

Le terminus est un point de régulation nécessaire pour le tramway capacitair. Une rame arrivant au terminus avec un retard « raisonnable » doit pouvoir repartir du terminus à l'heure. La capacité du terminus doit donc être suffisante pour permettre d'absorber le retard des rames à l'arrivée au terminus.

4.5.2 Exemple de configuration du terminus

Les deux configurations préconisées pour le Tramway Capacitaire sont les suivantes :

- **La configuration en manœuvre d'avant gare :**

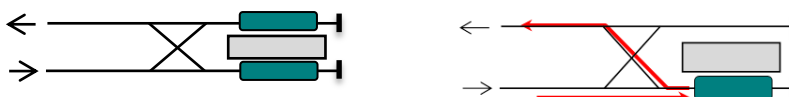


Figure 37 Terminus en avant gare

Pour cette configuration les manœuvres se font en avant-gare (avant la station) et les deux positions de stationnement se situent en station. Cela permet d'optimiser le temps de retournement et l'espace consommé dans l'environnement urbain. La station se situant en bout de terminus la correspondance avec les autres modes peut être optimisée. Cependant, elle ne laisse pas beaucoup de souplesse de fonctionnement. En effet, seulement deux rames peuvent être en même temps au terminus ce qui peut créer des files d'attente en ligne en cas d'arrivée d'un train de tram au terminus, les passagers sont donc bloqués dans le tramway juste avant la station, ce qui peut donner une mauvaise perception du mode de transport. La régulation en terminus est donc envisageable mais pas dans une situation très dégradée (train de plusieurs tramways).

- **La configuration avec deux positions d'arrière gare**



Figure 38 Terminus en arrière gare

Cette configuration permet de faire à la fois des manœuvres d'avant gare et d'arrière gare. Le plus souvent les manœuvres d'arrière gare sont préférées par les conducteurs car ils n'ont pas besoin lors du changement de cabine de remonter le quai et de se mêler aux passagers. La manœuvre en avant gare est utilisée en cas de retard car elle permet de gagner du temps lors du retournement.

La capacité de ce terminus est plus importante car il dispose de deux positions de garage en station et deux positions de garage en aval de la station. La capacité du terminus peut être augmentée en ajoutant des positions de garage, cela permet de sécuriser la régulation mais avec des rames de 85 m l'ajout d'une position supplémentaire est très consommateur d'espace.

Cette configuration est préconisée par l'expert, ancien exploitant, Pierre Dincki.

4.5.3 Glissement conducteur en terminus

Le glissement conducteur consiste à effectuer une relève conducteur au moment du retournement de chaque rame.

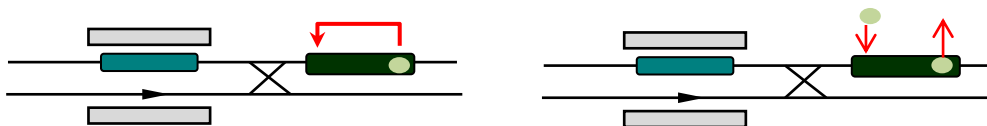


Figure 39 Relève conducteur

Le glissement conducteur en terminus est une mesure importante à mettre en place au terminus pour le Tramway Capacitaire. Le gain de temps apporté par cette mesure est double, le temps de pause du conducteur n'a pas besoin d'être pris en compte et le temps de changement de cabine conducteur est également économisé si le conducteur de relève se tient prêt au point de relève.

4.6 Exploitation d'une ligne

4.6.1 Objectifs

L'objectif de la modélisation dynamique est d'évaluer les impacts des irrégularités cumulées par les tramways tout au long de leur parcours sur le fonctionnement global de la ligne. La simulation est réalisée sur le cas pratique théorique d'une ligne de tramway à forte capacité.

4.6.2 Méthodologie

Cette simulation a été réalisée par un ingénieur de la DEA, avec le logiciel VISSIM.

4.6.2.1 Hypothèses

La ligne fictive modélisée s'étend sur 12 km et compte 16 stations soit une interstation moyenne de 800 m. Seul un sens de circulation des tramways est modélisé (pas de modélisation du terminus et du sens de circulation opposé). Le tramway circule 100 % en site propre. Les interstations comptent en moyenne 2 carrefours routiers. Chaque station est implanté à proximité directe d'un (et un seul) carrefour routier. Le synoptique ci-dessous représente ces caractéristiques.

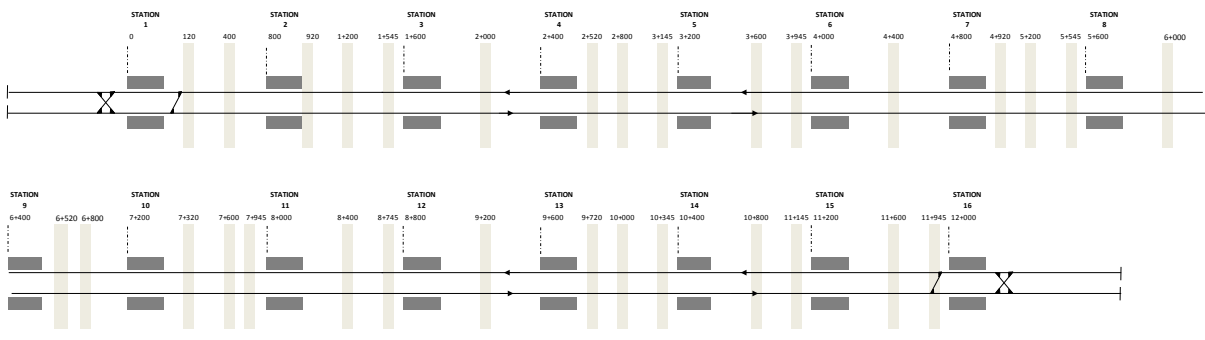


Figure 40 Schéma de la ligne fictive simulée

Ensuite, les hypothèses sont les mêmes que pour la simulation des carrefours ;

- Matériel roulant : 85 m
- Intervalle théorique : 3 min (aléas faibles lors de l'injection des tramways en début de ligne)
- Vitesse moyenne en ligne : 50 km/h
- Vitesse de traversée de carrefour : 20 km/h (d'après les résultats de la simulation des carrefours)
- Temps d'arrêt en station : 50 secondes, du fait de la présence de portes palières aucun aléa n'est appliqué sur le temps d'arrêt
- La configuration des carrefours est identique à celle de la modélisation d'un carrefour type

- Les carrefours en début de lignes sont soumis à un « faible aléa pour l'injection des tramways en amont du carrefour », les carrefours en fin de ligne sont soumis à un « aléa fort pour l'injection de tramways en amont du carrefour ». Ces données découlent de la modélisation d'un carrefour type. L'objectif est d'introduire une notion d'accumulation de l'aléa au fur et à mesure du parcours sur la ligne.
- Aucune règle de régulation n'est appliquée dans les simulations, car les mesures sont difficilement modélisables sous VISSIM. Ainsi, les résultats obtenus sont relativement pessimistes.

4.6.2.2 Scénarios et mesures testées

Un scénario de référence (scénario 0) et 4 scénarios ont été testés lors des simulations :

Tableau 22 Scénarios testés lors de la simulation de la ligne

Scénario	Aléa de temps d'arrêt en station	Aléa piétons fort	Aléa sur vitesse en ligne (séparateur de site propre)	TAG autorisé sur l'axe transversal
0 (référence)	Non	Non	Sans	Tous les carrefours
1	Oui	Non	Sans	Tous les carrefours
2	Non	Oui	Sans	Tous les carrefours
3	Non	Non	Avec	Tous les carrefours
4	Non	Non	Sans	Interdit pour les carrefours avec station

Mesures testées pour chaque scénario :

- **Scénario 0** : Le scénario de référence consiste à simuler la situation de référence avec toutes les mesures d'aménagement qui lui incombent (portes palières, gestion des piétons par feu, utilisation de la sonnette, séparateur de site propre) L'objectif est de vérifier la viabilité du produit Tramway Capacitaire sur le cas simulé et d'observer les effets des irrégularités sur l'ensemble de la ligne.
- **Scénario 1** : Ajoute un aléa sur le temps d'arrêt en station (temps d'arrêt de 50 s ± 20s suivant une distribution gaussienne d'écart type 7s). L'objectif est d'évaluer l'impact de la mesure « portes palières ».



- **Scénario 2** : Ce scénario ajoute un aléa lié aux piétons descendants du tram ce qui augmente l'aléa sur la priorité au carrefour des tramways. Cette mesure peut être assimilée au fait que les conducteurs ne sont pas formés à forcer le passage en sortie de station, ou que les feux piétons ne sont pas respectés.
- **Scénario 3** : L'aléa sur la vitesse en ligne est augmenté, afin de tester l'absence de séparateurs de sites propres le long du tracé.
- **Scénario 4** : Dans ce scénario les Tourne à gauche (TAG) sont interdits sur les voies transversales. Contrairement aux trois premiers scénarios, cette mesure est une amélioration par rapport à la situation de référence.

4.6.3 Principaux résultats

Le logiciel Vissim permet d'évaluer différents paramètres. Pour évaluer et comparer les scénarios, nous utiliserons :

- **Les temps de déplacement** : ils permettent d'évaluer la régularité du tramway entre 2 points de mesures (notamment l'entrée et la sortie du modèle). Les temps de déplacement permettent également de déterminer indirectement le nombre de pertes de priorité et les temps perdus au niveau de la traversée des carrefours ;
- **Temps perdus (hors carrefours, hors station)** : ils permettent d'identifier le nombre de tramways perdant du temps par rattrapage du train précédent (formation d'un train de tram).

Ainsi, les temps perdus par les tramways relèvent de deux types de pertes de temps :

- les pertes de temps liées à la perte de priorité au niveau d'un carrefour ;
- les pertes de temps liées au rattrapage du train précédent (train de tram).

4.6.3.1 Scénario 0 : Scénario de référence

La simulation du scénario de référence tramway capacitaire révèle les analyses suivantes :

- Les temps perdus liés aux pertes de priorité du tramway pour la traversée d'un carrefour restent acceptables au regard du temps de parcours global : en moyenne 2 minutes perdues par tram pour un temps de parcours total de 38 minutes environ.
- Le **cumul des aléas sur les traversées de carrefours** sur l'ensemble de la ligne **perturbe fortement** l'écart de 3 minutes théorique entre chaque tram et entraîne la formation de trains de trams impliquant en moyenne une perte de temps de 61 s sur le parcours total pour les véhicules victime d'un ou plusieurs rattrapages (25 % des trams sont victimes de rattrapage).
- Le temps de parcours global du scénario de référence est dégradé de 160s environ par rapport à un scénario théorique idéal où la priorité aux carrefours est absolue, soit une perte de 1,5 km/h sur la vitesse commerciale (20 km/h contre 21.5 km/h)



Ces phénomènes entraînent une dégradation relativement importante de la régularité en fin de ligne. La distribution des intervalles en fin de ligne est très dispersée (un écart type en début de ligne de 1sec et de 94 sec en fin de ligne). Des mesures de régulation en ligne, non modélisées ici, permettraient certainement de réduire les impacts des temps perdus en ligne sur la régularité.

4.6.3.2 Résultats des tests de sensibilité

Les trois premiers tests de sensibilité réalisés par rapport au scénario de référence permettent de hiérarchiser les apports des mesures supplémentaires du « tramway capacitaire » par rapport au tramway classique :

- **la maîtrise de l'aléa piéton** par le biais de la formation des conducteurs à « forcer » le passage lors du démarrage en station apparaît donc comme un **enjeu particulièrement important** pour assurer la bonne régularité de la ligne ;
- la mise en place d'un **site propre protégé** sur l'ensemble du tracé apporte un gain limité en termes de temps de parcours global, mais **fiabilise la régularité du tramway**
- la mise en place de portes-palières pour limiter les aléas sur les temps d'arrêt en station apporte un gain limité dans cette simulation

Le quatrième test de sensibilité permet de tester une mesure supplémentaire pour le « tramway capacitaire » :

- la suppression des tourne-à-gauche sur les voies transversales sur les carrefours à proximité des stations apporte un gain considérable aux performances du tramway tant en termes de limitation des temps perdus que pour la fiabilisation de la régularité du tramway.

4.7 Limites des simulations

Les résultats de ces simulations apportent des résultats intéressants et permettent d'établir une hiérarchie sur l'effet des mesures prises. Cependant, ces simulations ont été menées dans des cas très théoriques et les mesures ne pourront être réellement testées que sur des cas de figure concrets.

4.8 Régulation

La robustesse de l'exploitation et le respect de l'intervalle reposent sur les mesures décrites précédemment, mais également sur une bonne gestion de l'exploitation en temps réel et donc de la régulation.

4.8.1 Les principes de régulation en ligne

Une ligne peut être exploitée et régulée de suivant plusieurs principes :

- **À l'horaire** : Cette exploitation est basée sur un horaire de référence pour chaque service. Une analyse très fine de la réalité des temps de parcours (par tranche horaire, par jour et par période de l'année) permet d'avoir des horaires théoriques plus justes et d'optimiser la régularité. Pourtant, les réseaux aujourd'hui ne distinguent que les horaires de semaine et de week-end.
- **À l'intervalle** : Cette exploitation est basée sur un intervalle fixé entre les véhicules. L'exploitation à l'intervalle pur pose des problèmes de gestion du personnel, les prises et fins de service des conducteurs nécessitant un horaire défini. Ce mode d'exploitation peut entraîner au fur et à mesure une prise de retard importante et donc la perte de courses, car on a tendance à faire ralentir les rames pour respecter l'intervalle (plus facile que de rattraper un retard en ligne).
L'exploitation à l'intervalle est utilisée essentiellement en cas de coupure d'une ligne et d'exploitation en tronçon réduit.
- **Mixte** : Sur certaines lignes, l'exploitation peut se faire à l'intervalle sur un tronçon commun et à l'horaire sur le reste de la ligne. Cependant, on observe une prise de retard importante sur le tronçon commun, qui est difficile à rattraper sur le reste de la ligne.

4.8.2 Les outils de régulation en ligne

La régulation en ligne est effectuée grâce au SAE (Système d'aide à l'exploitation) qui communique des informations au conducteur par l'intermédiaire d'un pupitre sur le tableau de bord. Ce pupitre peut donner :

- La position du conducteur par rapport à l'horaire : avance ou retard (généralement donné à la minute près, mais peut être plus précise)
- l'intervalle par rapport au tramway précédant et suivant, mais il n'affiche pas la position du tramway au sein du carrousel.



Figure 41 Pupitre SAE sur le tableau de bord du conducteur

4.8.3 Les actions de régulation :

Le régulateur du PCC doit donner les consignes aux conducteurs pour réguler en ligne, lorsque l'horaire n'est pas respecté. Il existe plusieurs mesures de régulation, décrites dans le tableau ci-dessous.

Tableau 23 Actions de régulation

Action de régulation	Principe	Mise en œuvre
Demi-tour	Lors de la formation de train de tram, le véhicule le moins chargé dépose tous ses voyageurs et effectue un demi-tour en ligne pour venir combler un manque à un autre endroit de la ligne	Prévoir une infrastructure pour les retournements en ligne (avec troisième voie dans le cas de fréquences élevées) Évaluation de la charge de la rame : à l'œil par le conducteur ou à l'aide de systèmes de comptage Difficulté d'acceptation de faire descendre tous les voyageurs, perte de temps probable, et limites de capacité d'accueil de la station.
Station sans montée	Interdire la montée dans le tramway à une station pour gagner du temps lors de l'échange voyageur dans les stations et rattraper son retard	En station classique, cette mesure est difficile : seule l'information voyageurs incite les voyageurs à ne pas monter. Ou bien prévoir un quai de descente avec des traversées piétonnes, mais sans mobilier caractéristique d'une station. En station de configuration « trois quais », la mesure est simple et efficace.
Retombe	Régulation en terminus	Utilisation du temps de battement pour le lissage du retard au départ des rames (Ex : +4, +3, +1 min par rapport à l'horaire prévu)
Station de régulation	Réserve de temps prévue en station pour rattraper un retard. Dans le cas d'une ligne longue, il permet de réguler par tronçons. Possibilité d'y effectuer une retombe.	à un point de forte rupture de charge (Ex. : pôle d'échange) nécessité d'avoir une voie de stockage en cas d'arrivée d'un second véhicule avant la fin de la régulation Exemple de La Défense sur T2
Marche margée	Réserve de temps prévue en ligne pour rattraper un retard	Diminution de la vitesse commerciale globale
HLP en ligne	Le conducteur évacue tous ses voyageurs, qui prennent le véhicule	Difficulté d'acceptation de faire descendre tous les voyageurs, perte de temps probable, et



Action de régulation	Principe	Mise en œuvre
	suivant et il rattrape son retard en HLP	limites de capacité d'accueil de la station.
Raccourci	La rame quitte son itinéraire habituel pour prendre un raccourci.	Configuration rare. Existante à Montpellier. Annonce voyageur informant certaines stations ne seront pas desservies.
Deuxième quai amont (illustré en ANNEXE 5.1)	Deux positions d'arrêts se succèdent pour un même quai : si une rame est déjà à quai, la suivante peut s'arrêter.	Utilisée sur le tronç commun à Montpellier (gain de 3'' au sacrifice de X stations). La rame suiveuse s'arrête tour à tour sur les deux positions : Pour ne pas que les voyageurs en tête de quai soient laissés sur le quai. Pour se laisser distancer par la rame précédente.
Deuxième quai aval (illustré en ANNEXE 5.2)	Idem, mais c'est la rame rattrapée qui s'avance dans une position d'arrêt en aval.	La rame rattrapée s'avance à la seconde position, en aval, discrète et sans mobilier : Pour ne servir qu'à la descente (pas de voyageur attendant sur le quai) Pour ne marquer qu'un seul arrêt Pour rattraper son retard sur la rame suivante
Prévention d'entrée de tronç commun	Éviter que deux rames se suivent dès leur entrée sur le tronç commun.	Par radio, le régulateur demande à l'une des deux rames de ralentir. Information possible également sur le pupitre SAE.

4.8.4 Les limites à la régulation

Les entretiens menés nous enseignent que si la plupart de ces mesures sont connues des exploitants, elles sont généralement peu appliquées. Pour exemples, d'après les exploitants et experts réseaux consultés :

- Les statistiques remontées des SAE montrent que très peu de commandes de régulation sont réalisées par les régulateurs au cours d'une journée d'exploitation
- Les conducteurs ne respectent pas la mesure « double arrêt en station » (Montpellier)
- les conducteurs contestent les améliorations de temps de parcours, car le gain de temps en ligne permet d'augmenter le temps de repos en terminus
- Discipline des conducteurs en avance, rôle négligé du régulateur qui doit rappeler à l'ordre un conducteur trop en avance
- Les régulateurs n'utilisent pas la mesure « prévention d'entrée en tronç commun » (Montpellier)
- les régulateurs n'interviennent pour la plupart que lorsqu'il y a un incident d'ordre physique (panne matérielle, de rame ou de l'infrastructure).



La simple application effective du panel des mesures de régulation existantes améliorerait grandement la régularité des réseaux existants. Il semblerait que les innovations à apporter sur le sujet soient plus d'ordre social que fonctionnel ou technologique. Les entretiens menés avec les exploitants des différents réseaux confirment par plusieurs sources les réticences existantes aujourd'hui chez le personnel (régulateur et conducteur).



5 Conclusion

5.1.1 Conclusions : les mesures préconisées pour le capacitaire

5.1.1.1 La culture d'entreprise

Au sein d'un réseau classique s'étant développé petit à petit sans grande problématique de régularité, des habitudes ont pu être prises au sein des différentes catégories de personnel. On connaît le pouvoir revendicateur dans le secteur des transports et l'immobilisme pouvant en résulter. Il devient difficile d'envisager l'adaptation a posteriori des méthodes de travail pour placer la régularité comme objectif prioritaire.

Dans le cas d'un projet de tramway capacitaire, la création d'une structure nouvelle peut être l'opportunité d'inculquer des méthodes de travail et une culture d'entreprise d'emblée tournées vers une valeur spécifique : l'objectif de régularité doit être mis au premier rang dès le recrutement du personnel. À l'exemple de la culture d'entreprise promue à la création de RhonExpress à Lyon, cela passe par une forte communication au personnel, ainsi que par de la formation, des outils adaptés (le SAE et son interface) et une politique salariale spécifique.

5.1.1.2 Les mesures de régulation

Régulation en terminus

Les études d'exploitation du terminus ont démontré la nécessité technique du **glissement conducteur** pour l'amélioration du pouvoir régulateur. Cette mesure est confirmée d'un point de vue organisationnel pour permettre aux conducteurs un temps de pause garanti, et pour une souplesse de l'exploitation.

Régulation en ligne

- **Une meilleure utilisation du SAE et du graphicage**

Le SAE et le graphicage doivent être optimisés pour le tramway capacitaire :

- Être plus précis dans le graphicage (distinguer Jours/fêtes/WE/vacances pour les marches théoriques)
- Nourrir le graphicage des remontées statistiques du SAE au fur et à mesure des années d'expérience
- L'interface offerte au conducteur doit être claire et cibler les informations importantes : avance/retard plus détaillé, voyant explicite déclenchant la mesure de régulation au lieu d'appel vocal du régulateur.

- **Une meilleure utilisation des mesures de régulation**

Les mesures listées dans le tableau 23 sont à retenir. La gestion du carrousel de tramway en temps réelle est très importante pour respecter l'intervalle souhaité.



5.1.1.3 Les infrastructures

À noter que bon nombre de ces mesures sont rendues possibles ou facilitées par la configuration « station à 3 quais », dissociant les portes des montants et celles des descendants.

Les portes palières apparaissent comme indispensables et à très fort pouvoir régulateur.

Des zones de manœuvre et/ou troisième voie sont nécessaires pour certaines d'entre elles.

Des terminus finaux de bonne configuration sont indispensables à une bonne régulation en terminus (cf. volet terminus).

Un terminus partiel (voie Z préconisée) permet d'alléger un terminus final en divisant les fréquences et le nombre de véhicules en retournement.

5.1.1.4 Autres mesures

Les mesures présentées dans les autres volets (configurations de stations, aménagements de carrefours, technologie de détection et priorité carrefour, configurations de terminus... etc) ont aussi leur effet sur la régularité, mais ne sont pas rappelées ici.

Ainsi, nous avons pu montrer que dans un cas théorique l'exploitation du tramway capacitaire est viable, mais cela n'est possible qu'en appliquant un panel important de mesures lors de la conception de la ligne, lors de la formation des conducteurs et lors de l'exploitation (mesures de régulation).

5.1.2 Limites du travail effectué et Pistes restantes à explorer

L'analyse poursuivie dans ce rapport était axée sur la conception des stations, des terminus et des carrefours ainsi que l'exploitation de la ligne. Nous n'arrivons pas au bout de cette analyse avec un concept que l'on pourra vendre tel quel. En effet, cette réflexion nous permet d'être confiant sur la mise en service d'un tramway de grande capacité, dans un premier temps sans atteindre forcément la capacité envisagée de 15 000 pphps mais en restant autour de 10 000 pphps, car nous avons identifié des marges d'optimisation importante par rapport au tramway classique. Cependant, les résultats sur l'exploitabilité du tramway sont basés sur des simulations qui font appel à de nombreuses hypothèses et n'apportent que des indications à traiter précautionneusement.

La réalisation et l'exploitation d'un tramway n'est pas une science exacte, des facteurs sociologiques et humains entrent en considération dans le système. Il est donc difficile d'évaluer complètement l'exploitabilité d'une ligne.

Cependant, les résultats de cette analyse étant concluants le projet peut continuer les réflexions vont se poursuivre sur les autres volets que sont la prévision des coûts et l'insertion urbaine du tramway.

Les pays ciblés sont des pays en développement qui n'ont pas toujours une capacité de financement très importante pour de tels projets de transport. Une réflexion est à mener pour optimiser les coûts de conception, d'exploitation et de maintenance sans mettre en péril la fiabilité d'exploitation de la ligne. Pour ces pays l'intégration urbaine n'est pas forcément la priorité, cependant il ne faut pas



oublier qu'une ligne de tramway peut s'accompagner d'un renouvellement urbain et apporter une réelle plus-value à la ville.

5.1.3 Enseignements

Ce travail de R&D sur le tramway capacitaire m'a permis de suivre la démarche de recherche et développement au sein d'une ingénierie et d'approfondir mes connaissances sur la conception et l'exploitation d'un système tramway. L'approche globale m'a beaucoup plu car elle est le fruit du travail de beaucoup d'intervenants. L'expérience de chacun, exploitant, ingénieur transport, ingénieur système a pu faire avancer le projet et conforter sa faisabilité.

Le concept de tramway capacitaire ne fera ses preuves que sur un projet concret. J'aimerais pouvoir voir se concrétiser et voir fonctionner un projet de tramway capacitaire dans le monde dans quelques années.



Bibliographie

- Alstom** . Brochure - Matériel roulant - Tramways Citadis - Français. [En ligne]
<http://www.alstom.com/transport/fr/produits-et-services/trains/tramways-citadis/>.
- CERTU. Avril 2013.** *Choisir un mode de transport capacitaire, L'exemple de villes méditerranéennes.*
Avril 2013.
- EGIS Rail, Agnès DAUBERT. Juin 2014.** *RG140419_Régulation et carrefours.* Lyon : s.n., Juin 2014.
- EGIS Rail, Bruno PLUMEY. Décembre 2013.** *RG131053A - ID2M Tramway Capacitaire - Rapport d'avancement DevNet.* Lyon : s.n., Décembre 2013.
- EGIS Rail, Emmanuel LE COZ. 2014.** *RG140474A_Volet circulation.* Lyon : s.n., 2014.
- EGIS Rail, Guillemette BOIS, Bruno PLUMEY. 2014.** *Fiche de synthèse quais types Mise en forme.*
Lyon : s.n., 2014.
- EGIS Rail, Guillemette Bois, Bruno Plumey. Juillet 2014.** *Fiche Entretien avec les Exploitants.* Juillet 2014.
- EGIS Rail, Guillemette BOIS, Bruno PLUMEY. Juillet 2014.** *Fiche Exploitation et Régulation.* Lyon : s.n., Juillet 2014.
- **Juillet 2014.** *Fiche Système de priorité.* Lyon : s.n., Juillet 2014.
- EGIS Rail, Isabelle BRUFAU. 2013.** *ID2M Tramway Capacitaire - Simulation terminus.* Lyon : s.n., 2013.
- EGIS Rail, Jean-Charles FRENNEAUX. 2014.** *RG140616A_Volet exploitation.* Lyon : s.n., 2014.
- EGIS Rail, Jose CARLOS. 2013.** *ID2M Tram Capa - Volet Stations et MR - Mémoire de Stage.* Lyon : s.n., 2013.
- Pierre MARX, Jérémie SIMON. Octobre 2012.** *Mise en Oeuvre d'un réseau structurant et hiérarchisé dans une agglomération émergente.* s.l. : CODATU, Octobre 2012.
- Siemens. 2010.** *Avenio-fits-your-city.* [En ligne] Septembre 2010. <http://www.siemens.com/>.

ANNEXE 1 : Matériel roulant sur deux étages

Dans cette configuration, le matériel roulant utilisé est un tramway sur deux étages avec des portes d'accès aux deux niveaux.

Nous nous sommes inspirés du projet scandinave « Autonomus Tram ». Il s'agit d'un projet parrainé par Alstom pour concevoir un futur tramway autonome pour la ville de Stockholm, à l'horizon 2025. Ce tramway en duplex peut transporter environ 227 passagers (6p/m²) sur une emprise plus réduite. Un matériel roulant plus court permet d'avoir une fréquence plus élevée tout en réduisant les problèmes d'exploitation et notamment le franchissement des carrefours.



Figure 42 Matériel roulant sur deux étages⁹.

Dans le cas du tramway capacitaire, une capacité d'environ 600 personnes par rame est nécessaire. Ce qui correspondrait à un tramway de 50m sur deux niveaux. L'espace intérieur de ce tramway doit être bien conçu afin de limiter les pertes d'espace dues aux escaliers notamment.

⁹ Auteur : Patrik Pettersson

Source des données : <http://www.coroflot.com/patrikdesign/autonomous-tram>



ANNEXE 2 : Tension 750 V ou 1500 V

Tableau 24 Tableau comparatif d'une alimentation du tramway en 750 V et en 1500 V

	750 V	1500 V	
Tension minimale admissible au pantographe	500 V	1000 V	
Chute de tension autorisée	250 V	500 V	
Infrastructure			
Distance entre 2 SST	1,5 km		
Portée maximale d'une sous station avec une seule rame	2,1 km	11,6 km	
Sous-stations		2 fois moins	
Cable feeder	oui	Non	
coffret de mis en parallèle	oui	Non	
emprise foncière (surface d'une sous station)	60 à 80 m ²	70 à 90 m ²	
Coût d'investissement			
SST	équipements	500 k€	600 - 650 k€ (*)
	Génie Civil	150 k€	180 -195 k€ (*)
	économie par SST		260 - 227,5 k€
Feeder	60 k€/km	-	
coffret de mise en parallèle	30 k€/km	-	
Coût MR		Surcoût faible	
coût d'exploitation		Economie de maintenance	

(*) Une sous station coûte 20 à 30 % plus cher mais 2 fois moins de sous stations sont nécessaires par rapport à une alimentation en 750 V

- Aspects électriques pures :

Pour une même puissance (P), plus la tension (V) est importante, plus l'intensité du courant (I) sera faible : $P=VI$. Le courant d'un système fonctionnant avec une tension de 1500 V est deux fois moins important que le système actuel en 750 V.

Pour une même résistance R, les pertes (Pjoules) d'un système d'alimentation électrique fonctionnant en 1500V sont quatre fois plus faibles que la perte d'un même système fonctionnant en 750V ($P=RI^2$) : de moins de pertes résulte une consommation plus faible.

Pour une même perte (P), la résistance du circuit peut être supérieure à une tension de 1500 V ($P=RI^2$). Pour les mêmes pertes, il peut alors y avoir une grande distance possible entre les sous-stations électriques, qui se traduit par une plus grande souplesse dans la localisation de la sous-station et les acquisitions.



- Câblage en ligne :

Dans le cas d'une alimentation en 1500 V, la chute de tension autorisée est deux fois plus importante et la densité de courant plus faible. Ainsi pour une tension d'alimentation de 1500 V, il n'y a pas besoin de « feeder » et de coffrets de mise en parallèle disposés tous les 500 m dans le cas d'une alimentation en 750 V.

- Génie Civil, infrastructure, mobilier de station :

Surface des sous-stations : 750 V de 60 à 80 m² ; 1500 V de 70 à 90 m²

Pour un système en 1500 V, distance plus importante entre les SST ce qui implique une plus grande flexibilité d'implantation : là où les contraintes foncières sont les moins fortes, là où le coût de raccordement au réseau HT est le plus faible.

- Économies sur les installations fixes

Presque deux fois moins de sous stations mais SST plus chères de 20 à 30 %

- Économies du « feeder »

Économie pour les socles et les coffrets de mise en parallèle tous les 500 m.

- Moins de maintenance
- Coût du Matériel roulant

Le surcoût est faible. Actuellement la tension en 1500 V ne se trouve pas en circulation mais est inclus dans les gammes de matériel roulant des industriels.

- Aspects réglementaires :

Réglementation différente pour les habilitations du personnel, pour les autres aspects il n'y a aucune différence.

ANNEXE 3 : Méthodologie de dimensionnement des stations capacitaires

Dans le cadre de l'étude des stations du tramway capacitaire, deux dimensionnements différents ont été effectués. Le premier dimensionnement se base sur un exemple concret en prenant une largeur disponible de 20m entre les voies de circulations VP destinées à l'implantation de la plateforme tramway et des quais. Cette emprise de 20m disponible entre les voies est très généreuse, nous nous sommes ensuite interrogés sur l'emprise minimale dans laquelle il serait possible d'implanter les stations du tramway capacitaire. Ces stations doivent être fermées par des contrôles d'accès sécurisé et doivent pouvoir accueillir 300 montants et 300 descendants dans les deux sens de circulation.

3.1 Hypothèses de dimensionnement générales

Tableau 25 Hypothèses de dimensionnement générales

Hypothèses générales	
Longueur du matériel roulant	85 m
Longueur des quais	80 m utile
Largeur de voie ferrée	6 m
Largeur des portes palières et barrières	0,2 m
Hypothèses sur la fréquentation de la station	
Nombre de passagers montant par rame	300
Nombre de passagers descendant par rame	300
Temps d'arrivée des montants en station	3 min
Temps d'évacuation des descendants	2 min
Hypothèses pour le CAS	
Dimensions	0,80x1m
Débit	40 pers/min
Densités maximales des passagers	
Personnes en attente	4 pers/m ²
Personnes en mouvement	1,5 pers/m ²

3.2 Méthode de dimensionnement des quais dans le cas de l'exemple

Dans ce cas exemple, on dispose de 20m utiles disponibles entre les voies VP. Le but de ce dimensionnement est pour chaque configuration, de bien répartir les espaces afin de fluidifier au maximum les cheminements piétons des montants et descendants.

D'après les hypothèses, la largeur théorique de quai dans l'exemple est de 14m. A cette largeur il faut retirer la largeur des barrières et des portes palières ainsi que des tourniquets lorsqu'ils sont implantés dans la longueur du quai (configuration en quai central divisé et en quais latéraux divisés).

Ensuite, nous avons cherché à utiliser toute la largeur utile en implantant des tourniquets afin d'avoir des capacités d'entrée et de sortie offertes supérieures à la demande et d'éviter au maximum les



remontés de file et les conflits sur le quai entre les montants et les descendants. Les hypothèses retenues sur la capacité demandée et la capacité offerte sont détaillées plus loin pour chaque configuration.

3.3 Méthode de dimensionnement des quais dans le cas du calcul de la largeur minimale de quai nécessaire

L'emprise disponible de 20m entre 2x2 voies ne sera pas disponible dans tous les projets, c'est pour cela que nous avons déterminé une largeur de quai minimale effective nécessaire pour des flux de 300M/300D pour chaque configuration. Les facteurs pris en compte dans le dimensionnement sont le nombre de tourniquets en entrée et sortie nécessaires pour absorber la demande, la surface sur le quai qui permet d'accueillir 300 personnes en attente et 300 personnes en mouvement par sens, ainsi que l'optimisation qui peut être réalisée lors de la mutualisation des surfaces entre les deux sens du tramway.

3.4 Quai central



Figure 43 Schéma d'un quai central

Tableau 26 Dimensionnement d'un quai central

	Cas exemple	Emprise minimale théorique
Emprise de la station	20 m	13,4 m
Largeur de voie	6 m	6 m
Largeur dues aux PSD ou barrières	0,4 m	0,4 m
Largeur du quai	13,6 m	7 m
Flux de la demande		
En entrée pour les deux sens	200 p/min	200 p/min
En sortie pour les deux sens	300 p/min	300 p/min
Largeur imposée par la surface de mouvement et d'attente nécessaire	7 m	7 m
Capacité d'entrée et de sortie		
Nombre de tourniquets en entrée	14	6(*)
Nombre de tourniquets en sortie	20	8
Largeur imposée par les tourniquets	13,6 m	6 m
Capacité en entrée	560 p/min	240 p/min
Capacité en sortie	800 p/min	320 p/min
Temps d'évacuation de la station des descendants	45 sec	2 min

(*) 5 tourniquets sont nécessaires en faisant le calcul, on en ajoute 1 pour avoir un nombre pair de tourniquets

Dans cette configuration la largeur imposée par la surface nécessaire d'attente et de mouvement fixe la largeur du quai à 7m alors que si on s'intéresse seulement au nombre de tourniquets nécessaires la largeur minimale imposée par ceux-ci est de 6m.

Dans cette configuration l'espace central est mutualisé entre la montée et la descente dans les deux sens de circulation du tramway, on fait l'hypothèse que l'on peut gagner deux mètres par mutualisation. **La largeur minimale effective du quai central est donc de 11m.**

3.5 Quai central divisé

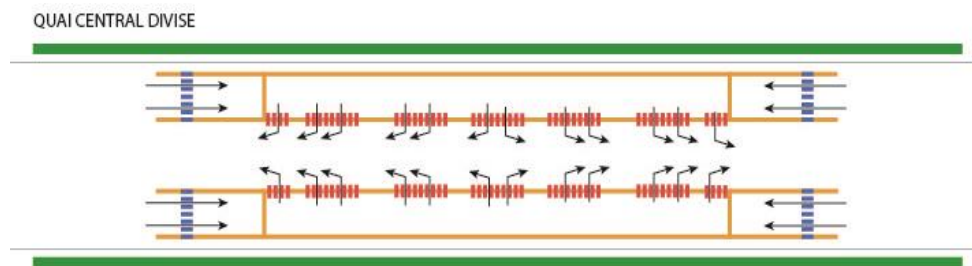


Figure 44 Schéma d'un quai central divisé

Tableau 27 Dimensionnement d'un quai central divisé

	Cas exemple		Emprise minimale théorique	
Emprise de la station	20 m		20 m	
Largeur de voie	6 m		6 m	
Largeur dues aux PSD ou barrières	0,4 m		0,4 m	
Largeur dues aux lignes de tourniquets	2 m		2 m	
Largeur utile du quai	11,6 m		11,8 m	
	Quai (M)	Couloir (D)	Quai (M)	Couloir (D)
Largeur	3,4 m	4,8 m	3,4 m	5 m
Flux de la demande				
En entrée pour un sens	100 p/min		100 p/min	
En sortie pour un sens	150 p/min		150 p/min	
Largeur imposée par la surface de mouvement et d'attente nécessaire	3,4 m	5 m	3,4 m	5 m
Capacité d'entrée et de sortie				
Nombre de tourniquets en entrée pour un sens	8		4(*)	
Nombre de tourniquets en sortie pour un sens	48		48	
Largeur imposée par les tourniquets (par quai)	3,2 m		1,2 m	
Capacité en entrée pour un sens	320 p/min		160 p/min	
Capacité en sortie pour un sens	1920 p/min		1920 p/min	
Temps d'évacuation de la station des descendants	10 sec		10 sec	

(*) 3 tourniquets sont nécessaires en faisant le calcul, on en ajoute 1 pour avoir un nombre pair de tourniquets

La surface nécessaire pour l'attente et le cheminement des 300 montants et des 300 descendants est le facteur dimensionnant dans cette configuration.

Dans cette configuration l'espace central est mutualisé à la descente dans les deux sens de circulation du tramway, on fait l'hypothèse que l'on peut gagner un mètre de largeur de quai par mutualisation. **La largeur minimale effective du quai central divisé est donc de 19m.**

3.6 Quais latéraux



Figure 45 Schéma d'un quai latéral

Tableau 28 Dimensionnement d'un quai latéral

	Cas exemple	Emprise minimale théorique
Emprise de la station	20 m	13,8 m
Largeur de voie	6 m	6 m
Largeur dues aux PSD ou barrières	0,8 m	0,8 m
Largeur utile d'un quai	6,20 m	3,5 m
Flux de la demande		
En entrée pour un sens	100 p/min	100 p/min
En sortie pour un sens	150 p/min	150 p/min
Largeur imposée par la surface de mouvement et d'attente nécessaire	3,5 m	3,5 m
Capacité d'entrée et de sortie par quai		
Nombre de tourniquets en entrée	6	4(*)
Nombre de tourniquets en sortie	10	4
Largeur imposée par les tourniquets	6,4 m	3,2 m
Capacité en entrée	240 p/min	160 p/min
Capacité en sortie	400 p/min	160 p/min
Temps d'évacuation de la station des descendants	45 sec	1 min 50

(*) 3 tourniquets sont nécessaires en faisant le calcul, on en ajoute 1 pour avoir un nombre pair de tourniquets

La surface nécessaire pour l'attente et le cheminement des 300 montants et des 300 descendants est le facteur dimensionnant dans cette configuration.

3.7 Quais latéraux divisés

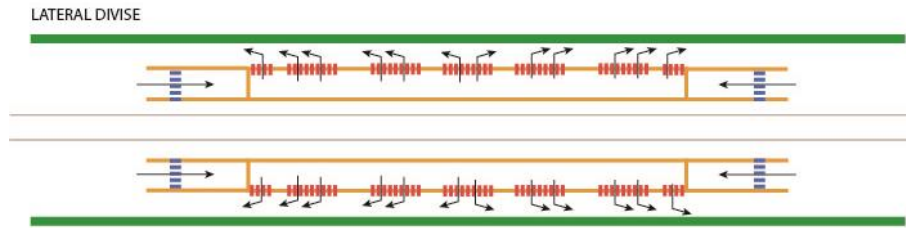


Figure 46 Schéma d'un quai latéral divisé

Tableau 29 Dimensionnement des quais latéraux divisés

	Cas exemple		Emprise minimale théorique	
Emprise de la station	20 m		21 m	
Largeur de voie	6 m		6 m	
Largeur dues aux PSD ou barrières	0,8 m		0,8 m	
Largeur dues aux lignes de tourniquets	2 m		2 m	
Largeur utile du quai	5,6 m		9,4 m	
	Quai (M)	Couloir (D)	Quai (M)	Couloir (D)
Largeur	3,1 m	2,5 m	3,4 m	2,5 m
Flux de la demande				
En entrée pour un sens	100 p/min		100 p/min	
En sortie pour un sens	150 p/min		150 p/min	
Largeur imposée par la surface de mouvement et d'attente nécessaire	3,4 m	2,5 m	3,4 m	2,5 m
Capacité d'entrée et de sortie				
Nombre de tourniquets en entrée pour un sens	8		4(*)	
Nombre de tourniquets en sortie pour un sens	48		48	
Largeur imposée par les tourniquets (par quai)	3,2 m		1,2 m	
Capacité en entrée pour un sens	320 p/min		160 p/min	
Capacité en sortie pour un sens	1920 p/min		1920 p/min	
Temps d'évacuation de la station des descendants	10 sec		10 sec	

(*) 3 tourniquets sont nécessaires en faisant le calcul, on en ajoute 1 pour avoir un nombre pair de tourniquets

La surface nécessaire pour l'attente et le cheminement des 300 montants et des 300 descendants est le facteur dimensionnant dans cette configuration.

3.8 Trois quais



Figure 47 Schéma de la station à trois quais

Tableau 30 Dimensionnement des trois quais

	Cas exemple		Emprise minimale théorique	
Emprise de la station	20 m		14,2 m	
Largeur de voie	6 m		6 m	
Largeur dues aux PSD ou barrières	0,8 m		0,8 m	
Largeur utile du quai	13,2 m		7,4 m	
	Zone centrale (M)	Zone latérale (D)	Zone centrale (M)	Zone latérale (D)
Largeur	4,4 m	4,4 m	2,4 m	2,5 m
Flux de la demande				
En entrée pour deux sens	200 p/min		200 p/min	
En sortie pour un sens	150 p/min		150 p/min	
Largeur imposée par la surface de mouvement et d'attente nécessaire	1,9 m	2,5 m	1,9 m	2,5 m
Capacité d'entrée et de sortie				
Nombre de tourniquets en entrée pour deux sens	10		6(*)	
Nombre de tourniquets en sortie pour un sens		10		4
Largeur imposée par les tourniquets (par quai)	4,0 m		2,4 m	
Capacité en entrée pour deux sens	400 p/min		240 p/min	
Capacité en sortie pour un sens	400 p/min		160 p/min	



Temps d'évacuation de la station des descendants	45 sec	1 min 50
--	--------	----------

(*) 5 tourniquets sont nécessaires en faisant le calcul, on en ajoute 1 pour avoir un nombre pair de tourniquets

Pour les zones latérales (destinées à la descente), la surface nécessaire pour le cheminement des 300 descendants est le facteur dimensionnant. Pour la zone centrale (destinée à la montée) la largeur imposée par les tourniquets est le facteur dimensionnant.

Dans cette configuration l'espace central est mutualisé à la montée dans les deux sens de circulation du tramway, on fait l'hypothèse que l'on peut gagner un mètre de largeur de quai par mutualisation.

La largeur minimale effective du quai central divisé est donc de 13,2m.

3.9 Quais centraux décalés

Tableau 31 Dimensionnement des quais centraux décalés

	Emprise minimale théorique
Emprise de la station	10 m
Largeur de voie	6 m
Largeur dues aux PSD ou barrières	0,4 m
Largeur utile d'un quai	3,5 m
Flux de la demande	
En entrée pour un sens	100 p/min
En sortie pour un sens	150 p/min
Largeur imposée par la surface de mouvement et d'attente nécessaire	3,5 m
Capacité d'entrée et de sortie	
Nombre de tourniquets en entrée	4(*)
Nombre de tourniquets en sortie	4
Largeur imposée par les tourniquets	3,2 m
Capacité en entrée	160 p/min
Capacité en sortie	160 p/min
Temps d'évacuation de la station des descendants	1 min 50

(*) 3 tourniquets sont nécessaires en faisant le calcul, on en ajoute 1 pour avoir un nombre pair de tourniquets

La surface nécessaire pour l'attente et le cheminement des 300 montants et des 300 descendants est le facteur dimensionnant dans cette configuration.

3.10 Quais sur deux niveaux

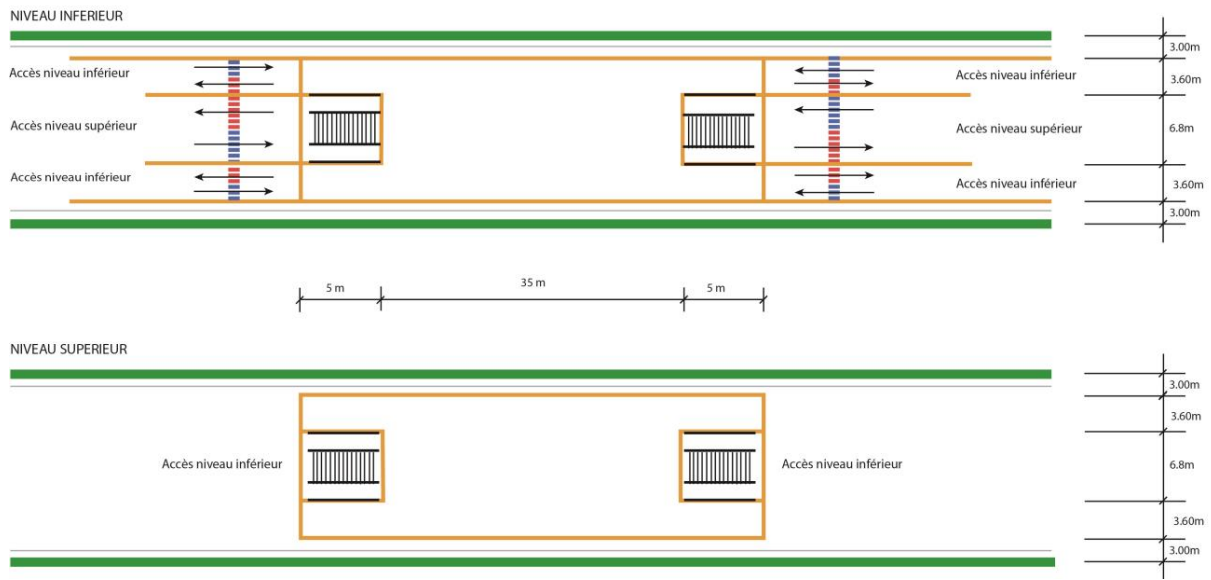


Figure 48 Schéma du quai sur deux niveaux

Tableau 32 Dimensionnement du quai sur deux niveaux

	Cas exemple	Emprise minimale théorique
Emprise de la station	20 m	14,2 m
Largeur de voie	6 m	6 m
Largeur dues aux PSD ou barrières	0,4 m	0,8 m
Largeur utile du quai	13,6 m	7,4 m
Flux de la demande		
En entrée pour deux sens	200 p/min	200 p/min
En sortie pour un sens	150 p/min	150 p/min
Largeur imposée par la surface de mouvement et d'attente nécessaire	3 m	3 m
Zone inférieure		
Largeur d'accès à la zone inférieure	6,8 m	3
Nombre de tourniquets en entrée pour les deux sens	8	4
Nombre de tourniquets en sortie pour les deux sens	8	4
Capacité en entrée pour deux sens	320 p/min	160 p/min
Capacité en sortie pour un sens	320 p/min	160 p/min
Zone supérieure		
Largeur d'accès à la zone supérieure	6,8 m	4,6 m



Nombre de tourniquets en entrée pour les deux sens	8	4
Nombre de tourniquets en sortie pour les deux sens	8	4
Capacité en entrée pour deux sens	320 p/min	160 p/min
Capacité en sortie pour un sens	320 p/min	160 p/min
Emprise des escaliers fixes	3,2 m	2
Capacité des escaliers fixes à la montée	80 p/min	50 p/min
Capacité des escaliers fixes à la descente	96 p/min	60 p/min
Escaliers mécaniques montant	2	2
Escaliers mécaniques descendant	2	2
Emprise des escaliers mécaniques	3,6 m	7,2 m
Capacité des escaliers mécaniques à la montée	200 p/min	200 p/min
Capacité des escaliers mécaniques à la descente	200 p/min	200 p/min
Capacité d'accès au quai supérieur	280 p/min	250 p/min
Capacité de sortie du quai supérieur	296 p/min	260 p/min

La station sur deux niveaux est dimensionnée par les accès au niveau supérieur. Dans le cas d'une minimisation de l'emprise de la station, on conserve un escalier mécanique montant et un escalier mécanique descendant de chaque côté de la station et un escalier fixe de 2 mètres de large pour la montée et la descente de chaque côté de la station.

L'accès au niveau inférieur est dimensionné par le nombre de tourniquets nécessaires, pour absorber environ la moitié de la demande.



ANNEXE 4 : Réseaux tramway avec des troncs communs à forte fréquence

En France et à l'international, plusieurs lignes de tramway affichent actuellement des intervalles réduits de l'ordre de 3-4 min.

Le tableau ci-dessous indique les intervalles de passage de différentes lignes.

Tableau 33 Lignes de tramway à forte fréquence

Réseau	Ligne	Mode	Longueur du MR	Intervalle heure de pointe
Bordeaux	Ligne A	Tramway	42 m	5 min
	Ligne B	Tramway	42 m	5 min
	Ligne C	Tramway	42 m	5 min
Grenoble	Ligne A	Tramway	29 m et 42 m	3 min
	Ligne B	Tramway	42 m	3 min
	Ligne C	Tramway	29,4 m et 42 m	4 min
Nantes	Ligne 1	Tramway	39 m ; 36 m ; 24 m	4 min
	Ligne 2	Tramway	39 m	4 min
Paris	T2	Tramway	64 m	4 à 6 min
Montpellier	Ligne 1	Tramway	32 m	3 à 5 min
Jérusalem		Tramway	70 m	5-6 min
Rabat	Ligne 1 Ligne 2	Tramway	60 m	8 min
Shangāi	Zhangjiang	tramway	25 m	3 min
Alger		tramway	30 m	4 min
Istanbul		tramway	59 m	2.5 min

À titre de comparaison, les lignes de BRT actuellement en service affichent des intervalles plus réduits mais la régularité et la fiabilité n'est pas assurée.

Tableau 34 Exemple de lignes BRT avec des intervalles très réduits


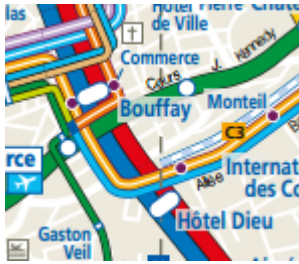

Réseau	Ligne	Mode	Longueur du MR	Intervalle heure de pointe
Bogota	Transmilenio	BRT	18 m ; 25 m	
Nagoya	Nagoya City Transport Bureau	BRT	12 m	1.5 min
Curitiba		BRT	25 m	2 min
Vancouver		BRT	18 m	4 min

Certaines agglomérations ont par ailleurs fait le choix de réseaux maillés où plusieurs lignes peuvent emprunter les mêmes infrastructures sur une distance donnée (tronc commun). Sur ces troncs communs, l'intervalle peut être réduit à 2 min, à l'heure de pointe.

Tableau 35 Troncs communs avec des intervalles très réduits

Réseau	Section	Nb de lignes	Mode	Longueur du MR	Intervalle heure de pointe sur le tronc commun
Strasbourg	Homme de Fer - République	3 (B, C, F)	Tramway	33m ; 43m ; 45m	2,1 min à 3 min
Strasbourg	République - Observatoire	3 (C, E, F)	Tramway	33m ; 43m ; 45m	2 min à 3,1 min
Montpellier	Nouveau St Roch – Gare de St Roch	2 (4, 2)	Tramway	42 m	2,2 min à 3,2 min



Montpellier	Gare de St Roch - Corum	2 (1, 2)	Tramway	42 m	1,9 à 3,9 min	
Nantes	Hôtel Dieu - Commerce	2 (2, 3)	Tramway	39 m ; 36 m	2 à 2.3 min	
Rabat	Bab Lamrissa - Place El Joulane	2 (1,2)	Tramway	60 m	4 min	

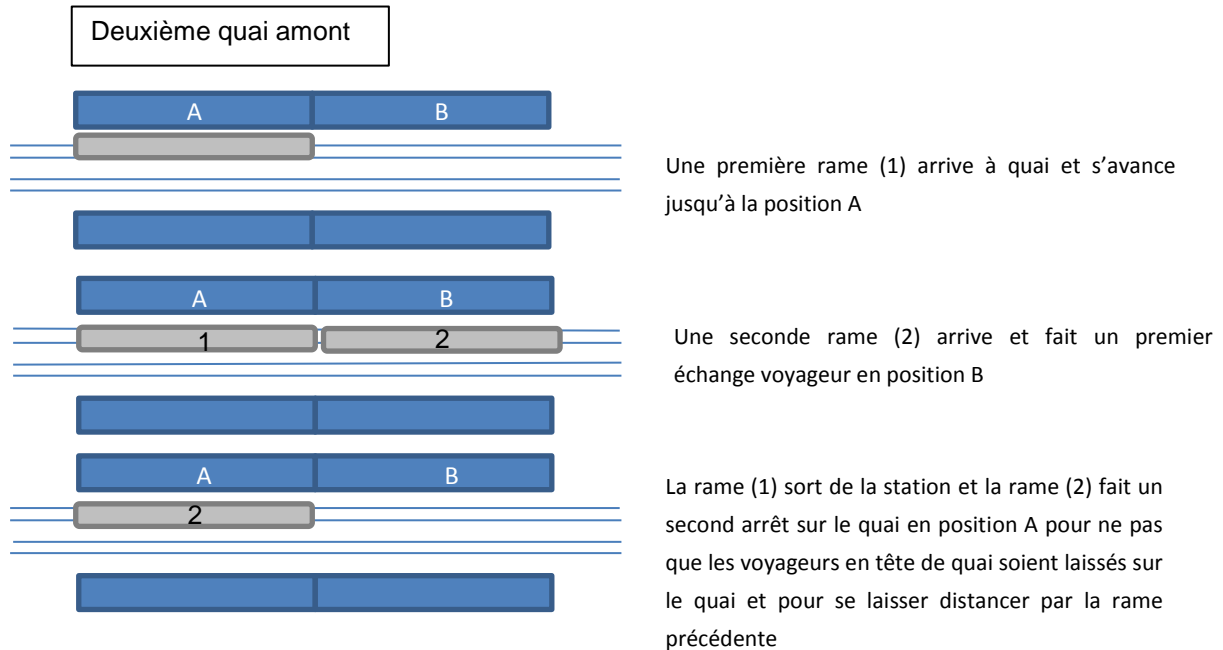
Enfin, certaines lignes peuvent bénéficier de services renforcés lors d'événement exceptionnel (manifestation, match,...).

Dans tous les cas, ces intervalles réduits sont des intervalles théoriques, affichés par l'exploitation, sur les fiches horaires notamment. Mais ces intervalles ne sont que des moyennes qui cachent parfois de fortes disparités.

ANNEXE 5 : Mesures de régulation

5.1 Mesure de régulation deuxième quai amont

Tableau 36 Mesure de régulation : deuxième quai amont



5.2 Mesure de régulation : deuxième quai aval

Tableau 37 Mesure de régulation: deuxième quai aval

