

Assistance à maîtrise d'ouvrage pour les études générales de développement et d'amélioration du réseau de transport

Ligne vers Alai

NT22 – Scénario tramway



Identification

	Projet	Numéro	Version	Pages
Identification	AUTFRA1003	RG170531	A	53

	Établi par	Vérifié par	Approuvé par
Nom	David PIERRON Jean-François DELSAUT Jean-Charles FRENNEAUX Guillaume LE LORC'H Pierre ROUCHON	Jérémie SIMON	Jérémie SIMON
Fonction	Ingénieurs Architecte	Chef de projet	Chef de projet
Date	15/12/2017	15/12/2017	15/12/2017

Sommaire

1. OBJET DU DOCUMENT	6
2. TRACE ET GENIE CIVIL	7
2.1 DESCRIPTIF GENERAL DU TRACE	7
2.2 VUE EN PLAN	7
2.3 PROFIL EN LONG	7
2.4 AIRE DE LANCEMENT DU TUNNELIER	8
2.5 OUVRAGES DE GENIE CIVIL	9
2.5.1 Viaduc de franchissement de la Saône	9
2.5.2 Tête de tunnel	12
2.5.3 Tranchée de remontée du tracé en surface	13
3. ELEMENTS SUR L'INSERTION DE LA LIGNE	15
3.1 INSERTION GENERALE	15
3.3 POINTS DURS IDENTIFIES	16
3.4 INSERTION DE LA TREMIE	17
3.5 STATION MENIVAL SUD	18
3.7 INSERTION SUR LA PORTION AVEC VOIE BUS	19
3.9 INSERTION AU CARREFOUR DU CHEMIN DE LA RAUDE	20
3.9.1 Insertion Nord	20
3.9.2 Insertion Sud	21
3.10 INSERTION AU NIVEAU DE L'OUVRAGE DE LA VOIE FERRE	21
3.10.1 Option site mixte	21
3.10.2 Option site propre	21
3.11 INSERTION DE LA STATION TERMINUS GARE D'ALAÏ	23
3.12 ITINERAIRE CYCLABLE	23
4. MATERIEL ROULANT	24
4.1 HYPOTHESES PRISES EN COMPTE	24
4.1.1 Cas étudiés	24
4.1.2 Caractéristiques traction des Citadis 302 et 402	24
4.1.3 Principes de simulation	25
4.2 SIMULATIONS	25
4.2.1 Citadis 302	25
4.2.2 Citadis 402	26
4.2.3 Citadis 402 – 100 % Motorisé	26
4.2.4 Conclusion	27
4.3 PANORAMA DES TRAMWAYS	28
4.4 ELEMENTS DE COUTS	29
5. FREQUENTATION	30
5.1 PRINCIPALES HYPOTHESES	30
5.2 RESULTATS DE FREQUENTATION	31
5.2.1 Charges de trafic TC	32
5.2.2 Différences de charges par rapport au scénario 2030 de Référence	33
6. TEMPS DE PARCOURS	34
6.1 HYPOTHESES ET METHODE	34
6.1.1 Caractéristiques de l'infrastructure	34
6.1.2 Vitesses maximum d'exploitation	34

6.1.3	<i>Performances du matériel roulant</i>	<i>35</i>
6.1.4	<i>Temps additionnels</i>	<i>35</i>
6.2	RESULTATS	36
7.	PARC DE MATERIEL ROULANT	37
7.1	HYPOTHESES.....	37
7.1.1	<i>Temps de rotation de la ligne.....</i>	<i>37</i>
7.1.2	<i>Intervalle d'exploitation en heure de pointe</i>	<i>37</i>
7.1.3	<i>Logique de calcul du parc</i>	<i>38</i>
7.2	RESULTATS	38
8.	EXPLOITATION ET TERMINUS DE LA LIGNE.....	39
8.1	CONTEXTE ET HYPOTHESES	39
8.2	ANALYSE EXPLOITATION AVEC UN TERMINUS A PERRACHE.....	40
8.2.2	<i>Zone de retournement.....</i>	<i>41</i>
8.2.3	<i>Raccordement aux voies T1/T2</i>	<i>42</i>
8.2.4	<i>Fonctionnement du carrefour Suchet Charlemagne.....</i>	<i>42</i>
8.2.5	<i>Exploitation de la station Perrache</i>	<i>42</i>
8.2.6	<i>Synthèse</i>	<i>43</i>
8.3	ANALYSE EXPLOITATION AVEC UN TERMINUS A JEAN MACE	43
8.3.1	<i>Configuration du terminus de la ligne à Jean Macé</i>	<i>44</i>
8.3.2	<i>Capacité du Pont Gallieni</i>	<i>44</i>
8.3.3	<i>Synthèse</i>	<i>45</i>
9.	IMPACT SUR LES TRAFICS ROUTIERS	46
10.	COUTS ET PLANNING.....	49
10.1	COUTS D'INVESTISSEMENT	49
10.2	PLANNING	50
11.	ANALYSE MULTICRITERES	51
	HISTORIQUE DES MODIFICATIONS.....	53

1. Objet du document

La présente note vise à exposer les éléments relatifs au scénario tramway Perrache – Alai. Ce scénario consiste à créer un prolongement de la ligne de tramway T2 existante au niveau du Cours Suchet, puis à desservir les centralités Saint-Irénée, Point du Jour, Ménival Sud et Gare d’Alai. Le tracé démarre au sol au niveau du cours Suchet qu’il suit ensuite vers l’Ouest jusqu’à franchir la Saône sur un viaduc. Après le franchissement de la Saône, le tracé s’effectue en souterrain jusqu’à Ménival Sud puis s’insère en surface entre Ménival et Gare d’Alai. Les stations de Ménival Sud et Gare d’Alai sont au sol. Le type de matériel roulant retenu est de type tramway CITADIS qui devra être sur-motorisé par rapport à celui utilisé actuellement sur la ligne T2.

2. Tracé et génie civil

Les éléments présentés dans ce chapitre sont issus des notes « NS170317A - NT13 - Notice tracé » et « RS170320A - NT12 - Faisabilité Génie Civil ».

2.1 Descriptif général du tracé

Le tableau ci-dessous présente les principales caractéristiques du tracé :

Stations	Distance à la station/ouvrage précédent (m)	Profondeur (m)	Distance cumulée ligne nouvelle (m)
Débranchement			
Suchet Alai	150	au sol	150
Saint Irénée	1 550	69	1 700
Point du Jour	850	21	2 550
Ménival Sud	1 300	au sol	3 850
Gare d'Alai	900	au sol	4 750
Arrière gare Alai	150		4 900

Figure 1 : Tracé scénario tramway - principales informations

2.2 Vue en plan

Le tracé en plan ne présente aucune particularité notable. Dans la section souterraine, le rayon minimal de 300 m peut être respecté et ne génère aucune déviation excessive du tracé. La section souterraine commence rive droite de la Saône après son franchissement par un viaduc et termine sur le plateau du 5^{ème} arrondissement rue Joliot Curie avant son croisement avec l'Avenue du Général Eisenhower dans le quartier de Ménival.

Pour la partie au sol : Cours Charlemagne, Cours Suchet puis rue Joliot Curie, le tracé a été réalisé dans l'axe des rues, une insertion fonctionnelle est présentée au chapitre « 3 - Eléments sur l'insertion de la ligne ».

2.3 Profil en long

Dans un premier temps, le tracé s'effectue au sol avant de franchir la Saône en viaduc et de poursuivre en tunnel en rive droite de la rivière. Le matériel roulant de type tramway limite la pente à 7 %. De ce fait, la station Saint-Irénée se situe à une profondeur de près de 70 m. Le matériel roulant sur cette partie du réseau tramway devra être adapté pour franchir une pente de 7 % sur un linéaire de l'ordre de 600 à 700 m.

Au-delà de Saint-Irénée, le profil est optimal et permet de limiter la profondeur de la station Point du Jour à 21 m. Ensuite, le profil remonte en surface juste avant la station Ménival Sud et le carrefour de la rue Joliot Curie avec l'avenue du Général Eisenhower. Ceci implique une succession de 2 raccordements paraboliques de faible rayon (700 m) reliés par une pente de 6 %. Il convient de noter que la topographie existante au droit de la station Ménival Sud présente une pente longitudinale de 6 %. Afin de limiter la pente de cette station à 4% (ce qui reste élevé par rapport à l'accessibilité de PMR, en particulier les Utilisateurs de Fauteuil Roulant), un remodelage de la rue Joliot Curie sera nécessaire. Cela implique la réalisation d'ouvrages de génie civil pour

soutenir la plateforme rehaussée par rapport à la rue sur environ 100 m malgré une pente à 6% après la station pour recoller au le TN le plus rapidement possible. Si la pente de la station devait être inférieure, l'impact dans la rue Joliot Curie serait augmenté en conséquence.

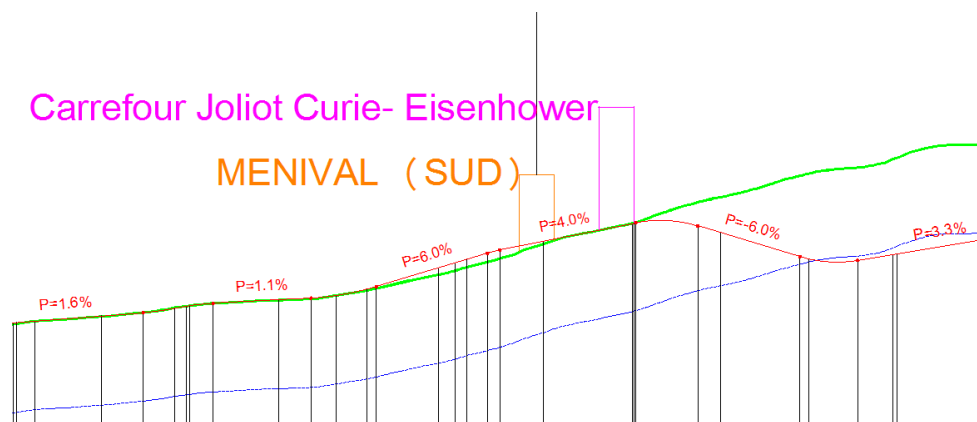


Figure 2 : Tracé scénario tramway – Extrait de profil en long dans la zone Ménival Sud

Par la suite, le tracé poursuit au sol en suivant la voirie jusqu'à son extrémité à Gare d'Alaï.

2.4 Aire de lancement du tunnelier

Ce scénario nécessite de réaliser 2.9 km de tunnel au tunnelier. Le lancement de ce dernier nécessite une surface de l'ordre de 15 000 m². Le lancement pourrait s'effectuer à l'extrémité ouest du tunnel dans la zone de Ménival Sud. Le terrain rectangulaire identifié est bordé au Nord par l'école élémentaire Diderot, à l'Ouest et à l'Est par des propriétés et au Sud par la rue Joliot Curie. D'une longueur de 130 m pour 80 m de largeur, il offre une superficie de plus de 10 000 m². Le terrain présente une pente dans le sens longitudinal de l'ordre de 5 à 6 %. Cette surface de 10 000 m² n'est pas optimale et aura un impact sur les cadences de creusement. Il pourrait être opportun d'étendre cette zone sur le terrain de sport situé au nord-ouest.

Afin d'être compatible avec l'insertion du tramway, le puits de démarrage du tunnelier doit être implanté au droit d'une voirie pour assurer l'émergence en surface du tracé. Ainsi, le puits d'attaque du tunnelier est implanté au droit de la rue Joliot Curie ce qui neutralise cet axe routier le temps des travaux. Ce point risque de poser des contraintes d'accès aux riverains et nécessiterait des études approfondies en phases ultérieures.



Figure 3 – Zone d’installation envisageable – Secteur Ménival – Surface environ 10 000 m²

2.5 Ouvrages de génie civil

Le scénario tramway nécessite la réalisation d’ouvrages singuliers majeurs. Il s’agit des ouvrages suivants :

- Viaduc de franchissement de la Saône ;
- Tête de tunnel en rive droite de la Saône ;
- Tranchée couverte puis ouverte pour la remontée du tracé en surface.

L’objet de ce paragraphe est de décrire brièvement chacun de ces ouvrages. La définition précise des méthodes constructives et les contraintes de chantiers seront approfondies lors des phases d’études ultérieures.

2.5.1 Viaduc de franchissement de la Saône

Description de l’ouvrage

Le franchissement de la Saône pour le scénario tramway se situe au sud du pont SNCF de la Quarantaine. La vue ci-dessous présente son implantation :

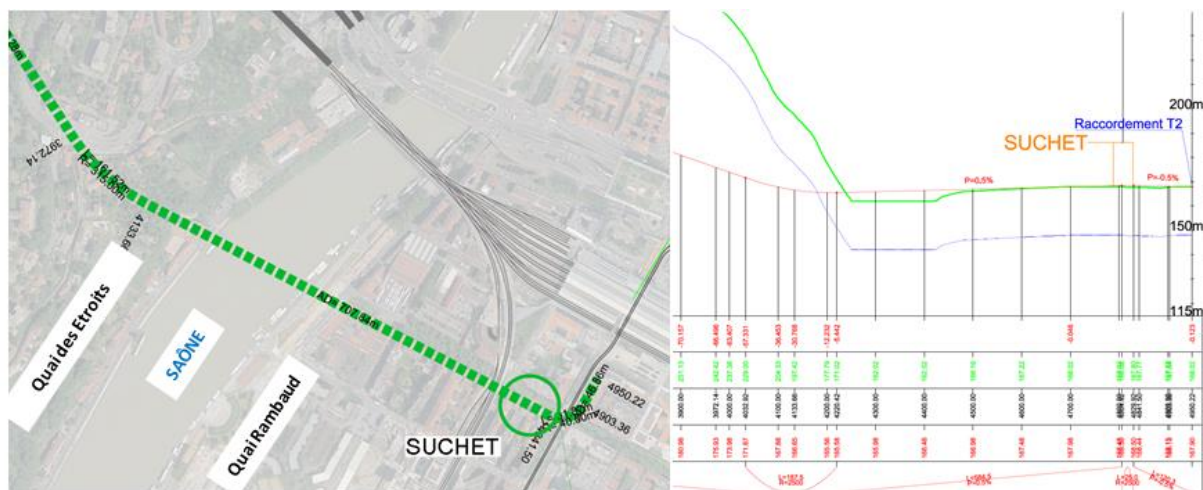


Figure 4 : Implantation Viaduc de franchissement de la Saône

Ce viaduc aura une longueur d'environ 230 ml. A l'est, la voie tramway croisera le Quai Rambaud à niveau. La culée sera donc implantée immédiatement à l'Ouest de la voie circulée.

Le tirant d'air actuel de la Saône est de 5.9 m. Pour respecter cette contrainte, le Z rail au niveau du pont devra être de l'ordre de 171 NGF. Or le Quai Rambaud est à environ 166 NGF. Par conséquent un rehaussement du TN pourrait être nécessaire en complément de la mise en œuvre d'un profil en parabole pour parvenir à construire un viaduc dans cette zone. Les phases d'études ultérieures devront permettre de vérifier si cela est compatible avec le maintien des immeubles existants cours Suchet.

Côté Ouest, il n'est pas possible d'arriver à niveau au droit du quai des Etroits tout en respectant le tirant d'air. Par conséquent, la culée devra être positionnée au droit des immeubles R+3 existant qui devront donc être démolis. A l'arrière de la culée le niveau du TN monte très vite. On passerait donc très rapidement du viaduc à la tête de tunnel.

La vue ci-dessous présente un schéma du viaduc envisagé et de la position de ses appuis. Par similitude avec les ouvrages existants, on peut envisager un ouvrage à 3 travées de 60 m environ.

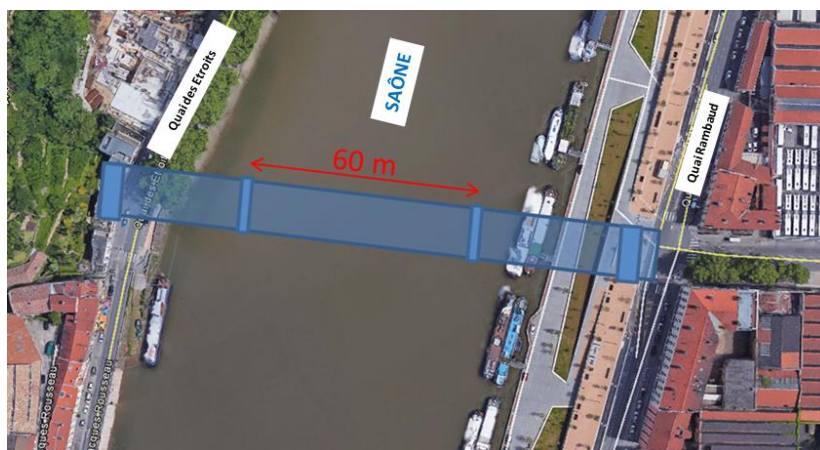


Figure 5 : Représentation schématique du pont sur la Saône

Méthode de réalisation

La réalisation des piles et des culées du viaduc ne présente pas de particularités. Les piles dans la Saône seront réalisées à l'abri d'une enceinte en palplanche.

Concernant le tablier, étant donné les contraintes de site, la mise en œuvre d'un tablier mixte lancé depuis la rive paraît difficilement envisageable car il nécessiterait des installations importantes pour les zones de lancement. A ce stade des études, un tablier réalisé par encorbellement en béton précontraint paraît plus adapté.

2 méthodes sont alors envisageables :

- Mise en œuvre de voussoirs coulés en place : dans ce cas les voussoirs sont ferrailés et coulés en place à l'aide d'un équipement mobile s'appuyant sur les voussoirs précédents. Une fois le voussoir « n » achevé la précontrainte est activée et l'équipage mobile passe au voussoir « n+1 ». La vue ci-dessous présente l'équipage mobile mis en œuvre sur le pont de Roquemaure (TGV Méditerranée).



Figure 6 : Exemple d'équipage mobile pour voussoirs coulés en place

- Mise en œuvre de voussoirs préfabriqués. Cette solution est plus rapide que la précédente mais nécessite des installations plus lourdes pour pouvoir amener les voussoirs préfabriqués et les mettre en place. Plusieurs techniques sont applicables pour le maintien en place des voussoirs avant la mise en place de la précontrainte. Compte tenu du faible linéaire de viaduc à réaliser et de la longueur des travées, une solution par encorbellement avec haubanage provisoire semble adaptée. Cette solution consiste à mettre en place un mât provisoire au droit des piles et à stabiliser les voussoirs via la mise en place de haubans entre le mât et chaque voussoir. Une fois tous les voussoirs assemblés et la précontrainte appliquée, les haubans et le mât sont démontés et évacués.



Figure 7 : Réalisation d'un viaduc à voussoirs préfabriqués par encorbellement avec haubanage provisoire – viaduc de Compiègne

A ce stade des études, il est considéré que le tablier du viaduc serait réalisé par encorbellement en voussoirs précontraints avec haubanage provisoire. Les voussoirs pourraient être acheminés par bateaux au droit de l'ouvrage où ils seraient grutés et mis en place et stabilisé via les haubans. Cette technique permet de déporter une partie des installations de chantier compte tenu des contraintes d'insertion dans le site d'implantation du viaduc.

2.5.2 Tête de tunnel

Dans le prolongement du viaduc sur la Saône, le tracé se prolonge en souterrain en rive droite de la rivière. Il est pour cela nécessaire d'aménager une tête de tunnel.

Cet ouvrage a pour objectif de dégager un tympan vertical pour permettre la pénétration ou la sortie du tunnelier dans le massif avec un front de taille plan et vertical et une couverture suffisante. On vise généralement une couverture de l'ordre de 10 m pour les entrées en terre.

Après la démolition des immeubles R+3 nécessaire à la réalisation du viaduc, le terrassement de la tête du tunnel ne devrait pas présenter de problème particulier. En effet, le niveau du terrain naturel remonte très rapidement dans ce secteur ce qui limitera la longueur à terrasser à ciel ouvert à une cinquantaine de mètres en première approche. Si on extrapole la coupe du tunnel de Saint Irénée, l'ouvrage sera implanté dans les terrains glaciaires qui pourraient être instables. Pour éviter tout risque de glissement de terrain, le tympan et les derniers mètres des talus latéraux seront soutenus à l'aide de parois moulées. Le reste du linéaire pourrait être conforté avec un soutènement de type paroi berlinoise voire paroi clouée si le terrain le permet.



Figure 8 : Schéma de localisation de la tête de tunnel



Figure 9 : Tête de tunnel en paroi clouée (tunnel bitube du Violay)

2.5.3 Tranchée de remontée du tracé en surface

Le tracé de la voie, initialement souterrain, émerge aux abords de la station Ménival Sud pour ensuite poursuivre à niveau jusqu'à Alai. La sortie progressive des voies impose de réaliser des ouvrages particuliers avec une tranchée couverte suivi d'une trémie.

La vue ci-après rappelle les éléments de tracé dans cette zone :

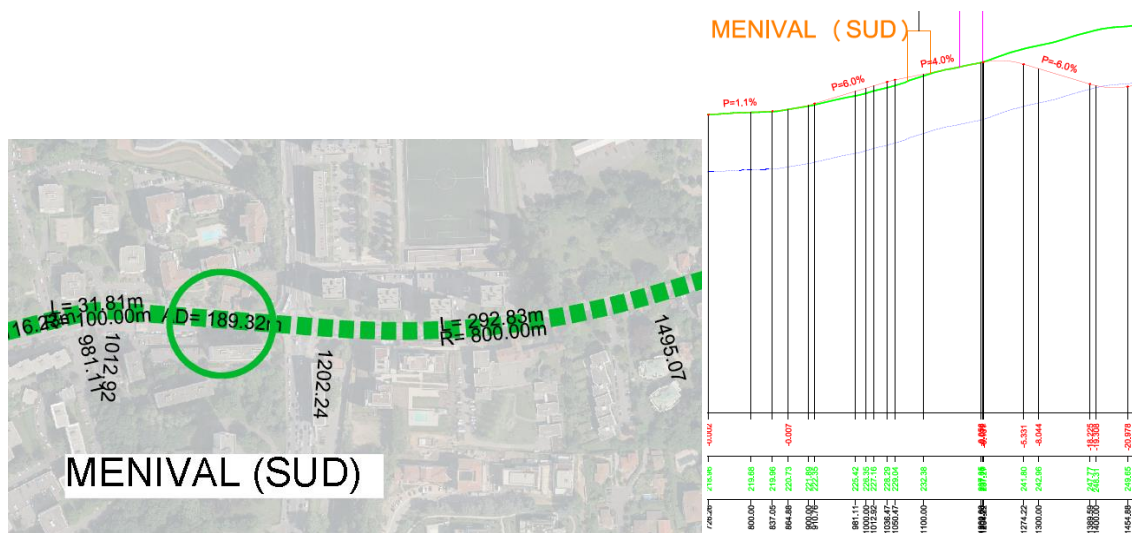


Figure 10 : Eléments de tracé tranchée Ménival

On considère que le passage en tranchée couverte est nécessaire à partir du moment où la couverture en clé du tunnel est inférieure à 8 m c'est-à-dire à Z rail + 16 m environ. Soit, dans notre cas, à partir du PM 1 400. Ensuite, le passage en trémie intervient une fois la couverture inférieure à Z rail + 6 m. Soit, dans notre cas, à partir du PM 1 300 environ. Enfin, le passage au sol se ferait au PM 1 200 environ. Dans ces conditions l'enchaînement des ouvrages peut être représenté schématiquement comme suit :

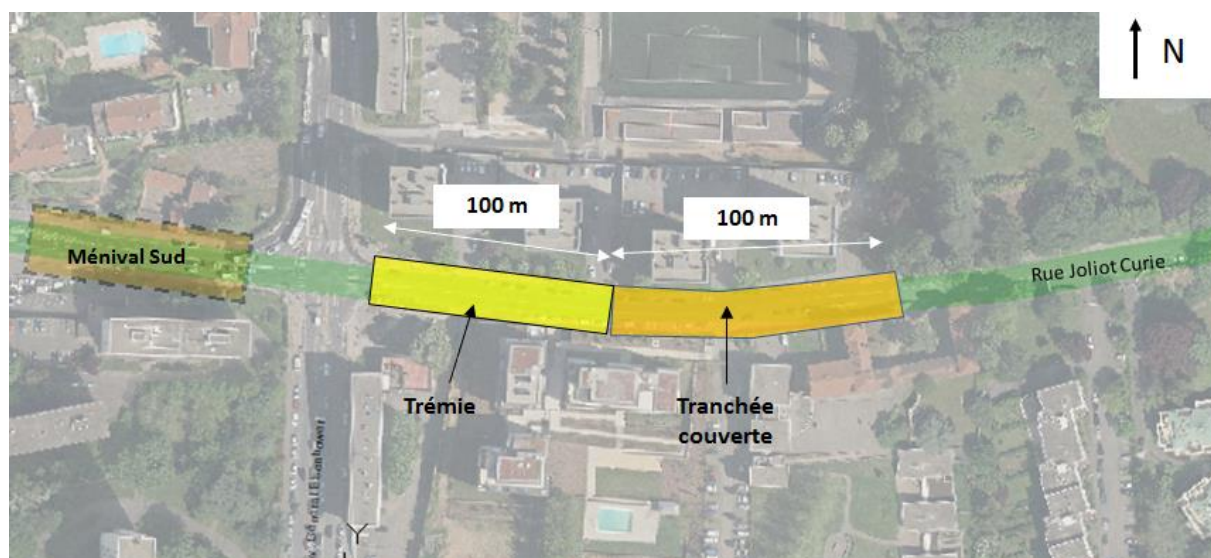


Figure 11 : Position schématique des ouvrages tranchée Ménival

Concernant les méthodes de réalisation de ces ouvrages, elles seront classiques avec la réalisation d'enceintes en paroi moulée pour le soutènement.

3. Eléments sur l'insertion de la ligne

3.1 Insertion générale

Dans ce scénario, le tramway s'insère au sol entre Ménival Sud et Alaï. Il parcourt une portion de la rue Joliot Curie, transversale importante est/ouest du secteur Ouest de Lyon. La rue est en double sens sur l'ensemble du parcours et affiche une largeur homogène de 16 à 20 mètres. Le tissu urbain est disparate et composé pour l'essentiel de deux typologies :

- Quartiers d'habitation denses avec de nombreux immeubles d'habitation ;
- Quartiers pavillonnaires de faible densité.

L'insertion axiale est de mise dans la mesure où elle permet :

- D'éviter les conflits avec les rues connexes ;
- De simplifier la gestion des carrefours ;
- De réutiliser le site propre bus existant ;
- De créer un axe de rue prédominant et d'utiliser le tramway pour permettre à la rue de muter d'un boulevard motorisé en boulevard apaisé ;

Sur cette section au sol, quelques points durs sont néanmoins recensés et décrits dans les chapitres qui suivent.

3.3 Points durs identifiés

Les points durs identifiés sur la carte qui suit doivent pour la plupart être traités par le biais d'acquisitions foncières pour permettre l'insertion du tramway et la conservation d'un double sens de circulation. Les acquisitions devront être plus conséquentes dans le cas d'une insertion de voies cyclables.

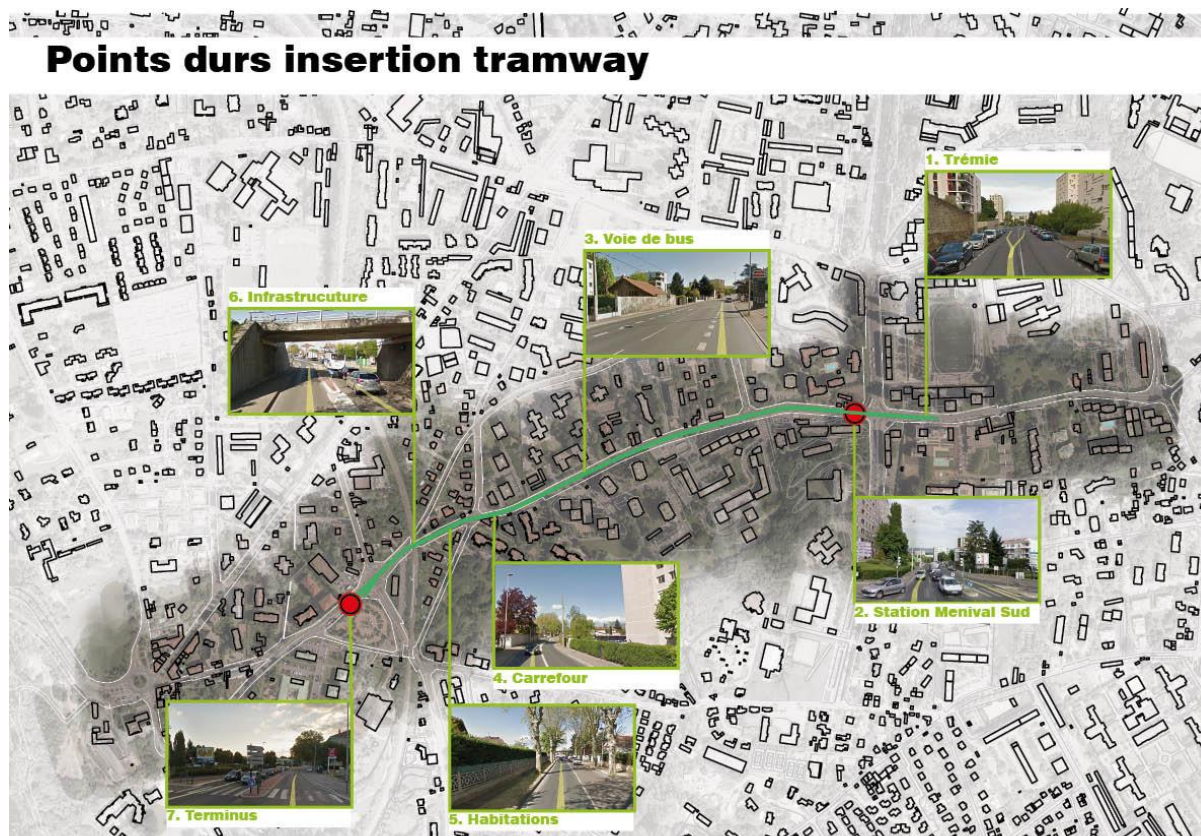


Figure 12 : Points durs d'insertion du tramway sur la section Ménival - Alai

3.4 Insertion de la trémie

La trémie représente au total une largeur totale de 10m : 7m de GLO tramway a minima + 2 x 0.60m de structure + 2 bandes 0.90m nécessaires à l'évacuation d'urgence. La trémie débouche à l'est de la station Ménival Sud, avant le carrefour avec l'Avenue Eisenhower et s'étire sur une centaine de mètres. Son insertion est axiale telle qu'illustrée par la coupe ci-dessous. La largeur limitée (16m) de la rue Joliot Curie contraint l'insertion. L'arrivée du tramway entraîne la suppression des deux bandes de stationnement longitudinales. L'acquisition d'une bande de 4.00m de large sur 100 mètres de long est également nécessaire. La présence de box de garage en enfilade et d'entrées de parkings souterrains côté sud contraint le choix des acquisitions sur les parcelles côté nord, au droit d'immeuble d'habitation R+12. Ces contraintes, amène l'espace public à 1.00 m de la façade de l'immeuble R+12 au Nord. Ce retrait limité, compte tenu du gabarit de l'immeuble, n'est pas idéal mais demeure acceptable.

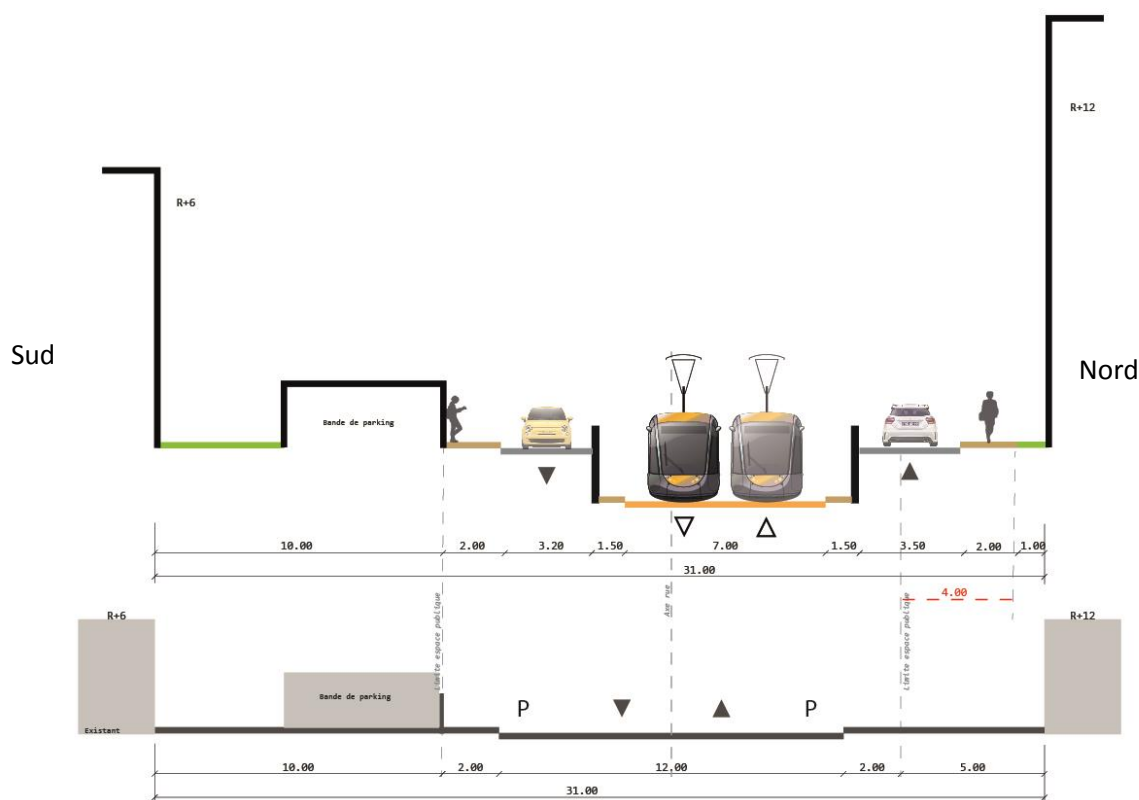


Figure 13 : coupe d'insertion de la trémie rue Joliot Curie

3.5 Station Ménival Sud

La station Ménival Sud est située à l'ouest du carrefour avec l'Avenue Eisenhower. L'insertion de la station entraîne la suppression des deux bandes de stationnement situées de part et d'autre de la rue et du tourne-à-droite sortant (voir coupe ci-dessous). La présence de bâtiments et d'un trottoir étroit au nord nécessite une acquisition d'environ 5m de large sur 50m de long sur la bande végétalisée côté sud.

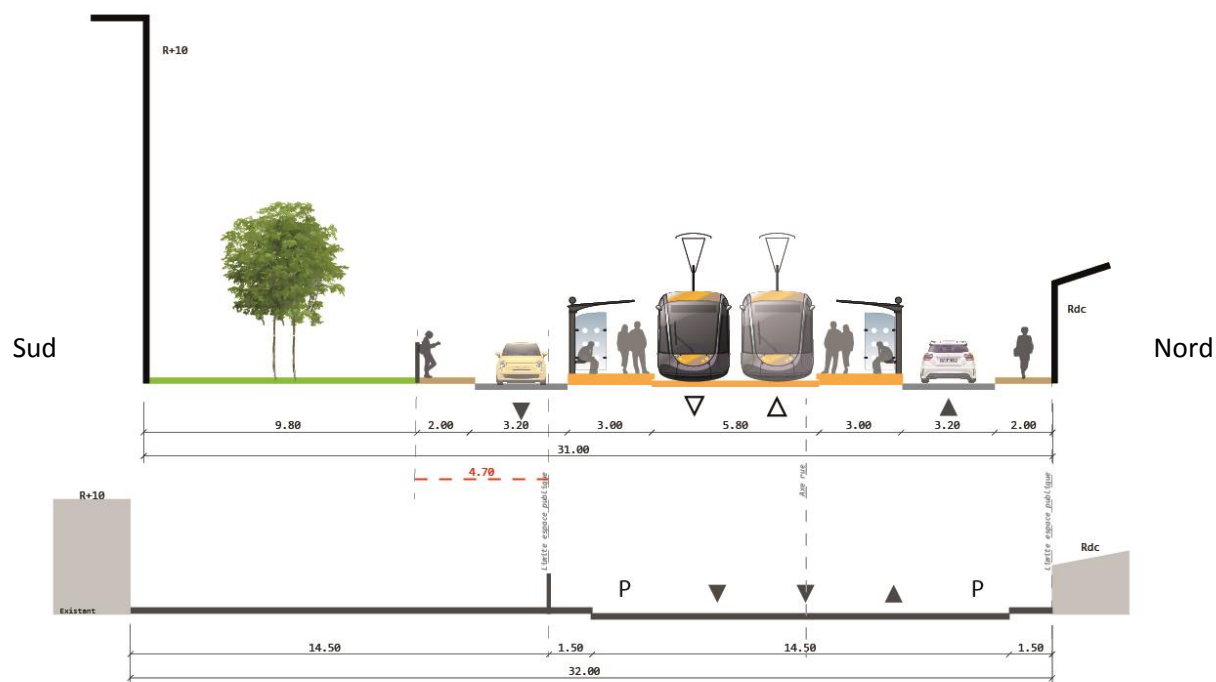


Figure 14 : coupe d'insertion de la station Ménival Sud

3.7 Insertion sur la portion avec voie bus

La plateforme tramway sur la portion de Joliot Curie avec voies bus dédiées s'insère en lieu et place de celles-ci, avec restitution des doubles sens de circulation. Actuellement, de nombreux accès aux immeubles sont réalisés en franchissant le site propre axial. Cette possibilité, accidentogène, devra être supprimée avec la réalisation d'une plateforme tramway.

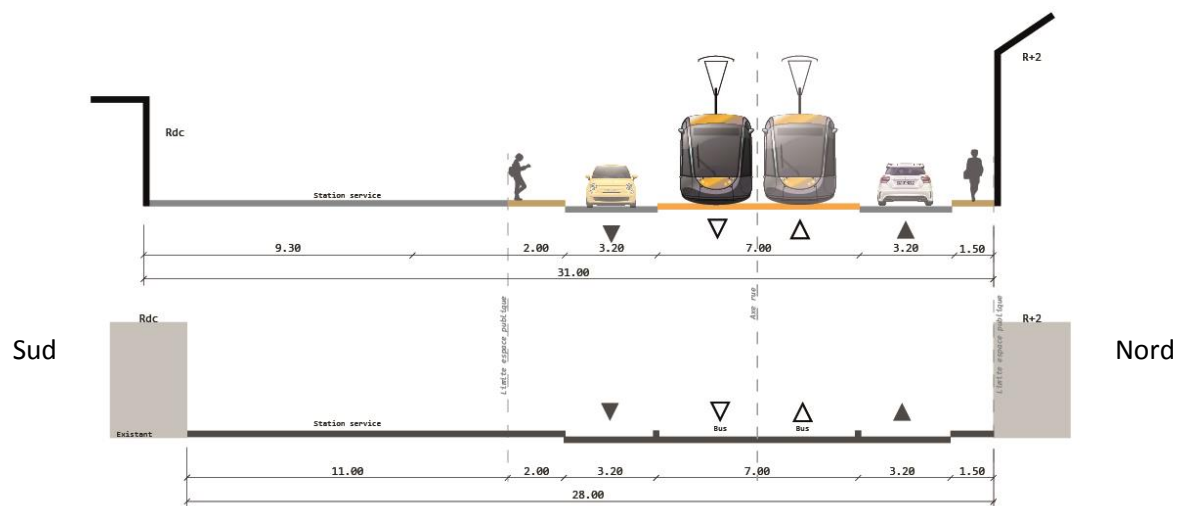


Figure 15 : coupe d'insertion au niveau de la portion avec voie bus

3.9 Insertion au carrefour du chemin de la Raude

Au droit du carrefour de la Raude, la rue Joliot Curie, borde de bâtis de part et d'autre, voie sa largeur rétrécir. A ce niveau, les voies bus dédiées supportent le flux usuel de la voirie, révélant ici un souci d'emprise disponible. Deux solutions sont envisagées : une insertion au Nord ou une insertion au Sud de la voirie, comme illustré ci-dessous.

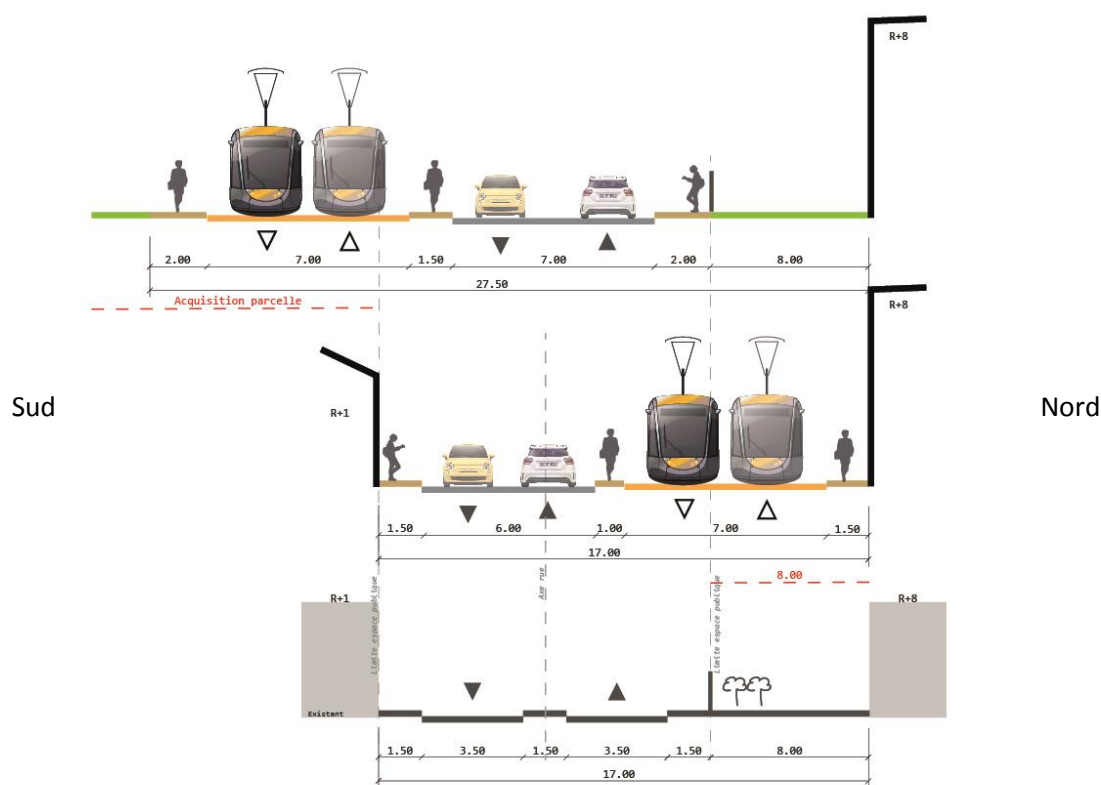


Figure 16 : coupe d'insertion au niveau du carrefour du chemin de la Raude

3.9.1 Insertion Nord

La solution Nord, étriquée sans ajout superfétatoire, s'insère dans une largeur de bâti à bâti de 17 mètres (comptant l'acquisition de 8m de bande végétalisée sur la parcelle Nord) et permet de restituer le double sens de circulation. Les 6 mètres de voirie sont un minimum pour un double sens, tout comme les trottoirs restitués de 1.50m. Le refuge piéton au centre, d'une largeur de 1m, devra faire l'objet d'une dérogation. De plus, l'insertion amène ce trottoir au droit du bâti de huit étages, sans recul possible. Cette solution apparaît non satisfaisante sans réduction de la largeur de voirie.

3.9.2 Insertion Sud

L'insertion Sud implique l'acquisition de la parcelle au sud de la rue et du bâtiment fermant l'angle du carrefour. Cette acquisition permet de prendre place dans le carrefour et de ne pas impacter la parcelle au nord. Cette solution permet de restituer de part et d'autre des trottoirs plus généreux de 2m de large.

3.10 Insertion au niveau de l'ouvrage de la voie ferré

Le passage sous l'ouvrage de la voie ferré voit s'enchaîner deux difficultés consécutives : le passage sous l'ouvrage lui-même et l'insertion dans la rue arborée à l'est du passage. Ces difficultés peuvent être traitées par deux approches.

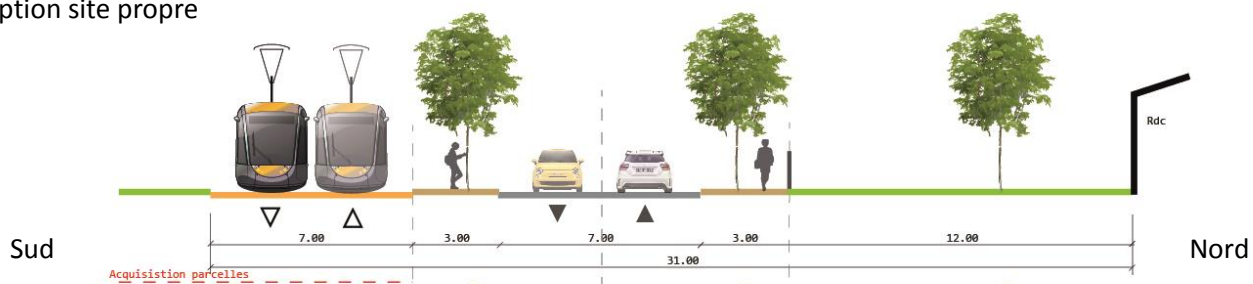
3.10.1 Option site mixte

Cette option prévoit d'insérer le tramway en site mixte au niveau des 2 points durs, c'est-à-dire sur cent cinquante mètres environ. Cela permet une insertion légère du tramway dans ce passage exigu mais expose l'exploitation du tramway aux aléas du trafic routiers. Cette option, qui pénaliserait la régularité de l'ensemble de la ligne, n'est pas recommandée.

3.10.2 Option site propre

Cette option, prévoit l'acquisition de trois parcelles pavillonnaires, permettant ainsi l'insertion latérale sud du tramway. La création d'un ouvrage est nécessaire pour permettre le passage du tramway sous les voies ferrées.

Option site propre



Option site mixte

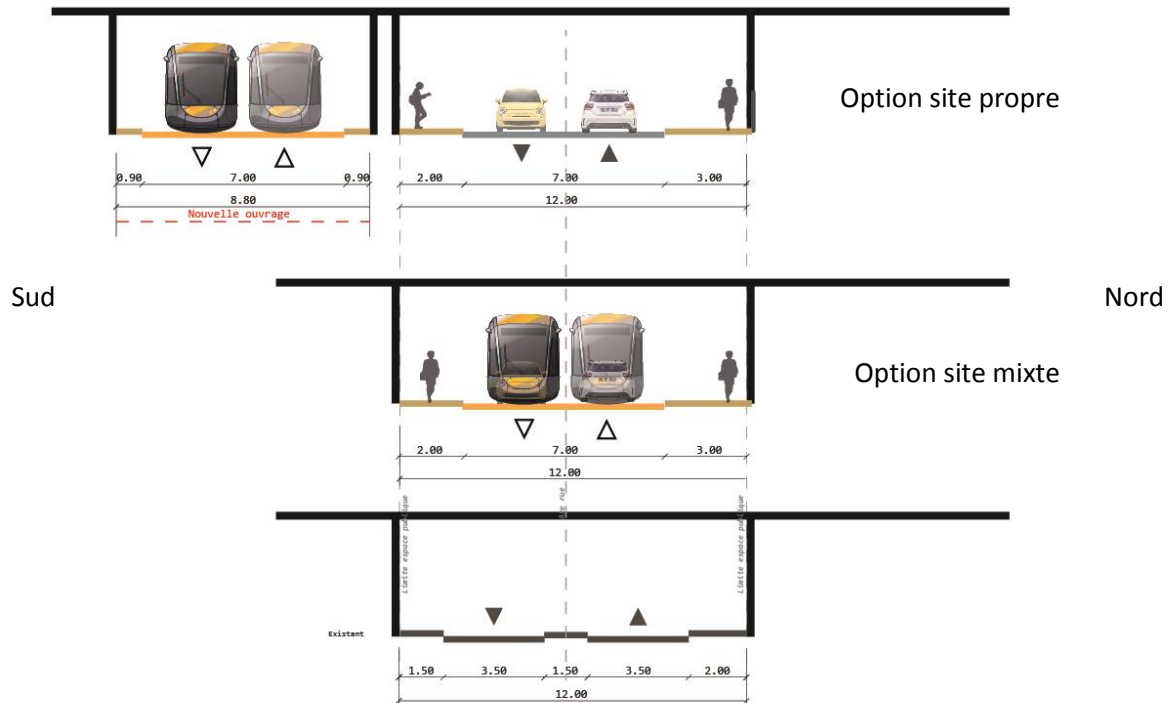
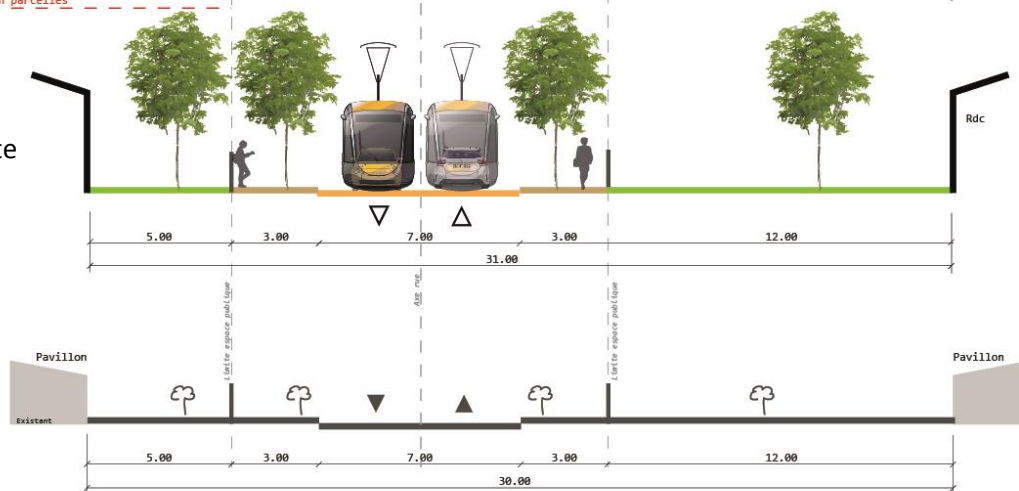


Figure 17 : coupe d'insertion au niveau de l'ouvrage de la voie ferrée

3.11 Insertion de la station terminus Gare d'Alai

Le terminus se situe au droit du carrefour avec la route des Brignais. Son insertion latérale permet de créer une continuité avec l'actuel parking ; ce dernier pouvant être requalifié en P+R. Cette insertion permet une requalification importante de l'espace urbain.

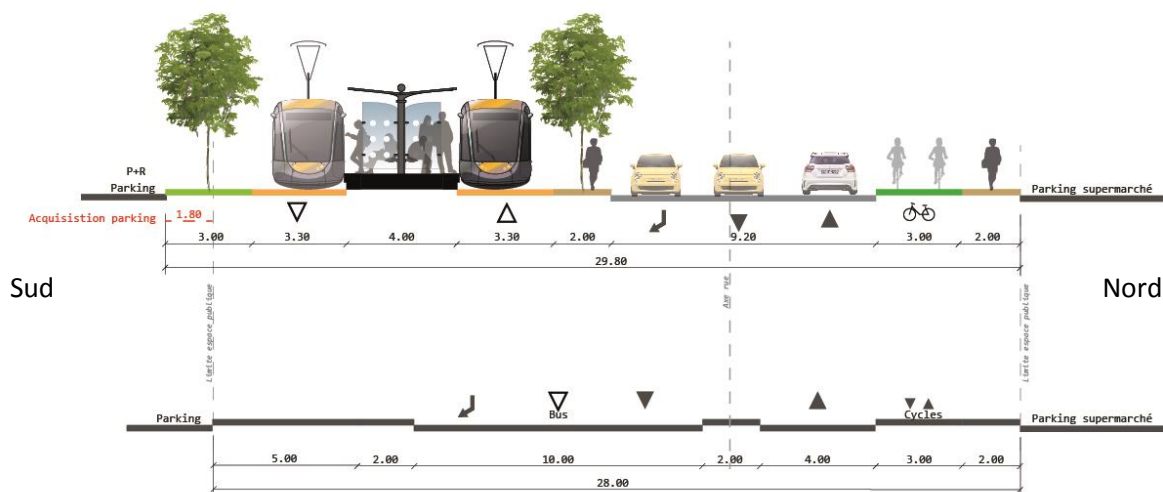


Figure 18 : coupe d'insertion de la station Gare d'Alai

3.12 Itinéraire cyclable

L'insertion présentée ci-dessus a été faite sans l'insertion de voies cyclables et apparaît cependant assez contrainte. L'application de la loi LAURE, en l'absence d'itinéraires de report cycles crédibles, contraindra à des acquisitions plus amples d'environ trois mètres sur l'ensemble du linéaire. Dans les parties les plus étroites, l'acquisition et la démolition de bâtis additionnels sera nécessaires.

Les plans et coupes relatives à ces points durs sont disponibles dans le document « RG170531A - NT22 - Scénario tramway – annexes ».

4. Matériel roulant

Compte-tenu des pentes importantes que présentent le profil du scénario tramway pour accéder au plateau du 5^{ème} arrondissement, des tests spécifiques ont été menés sur le matériel roulant pour évaluer si les tramways actuellement utilisés sur le réseau étaient aptes au franchissement de ces pentes. Les simulations menées consistent à tester l'adhérence sollicitée et l'accélération au démarrage en mode nominal et mode dégradé.

4.1 Hypothèses prises en compte

4.1.1 Cas étudiés

Les simulations ont été réalisées pour les cas suivants :

- Citadis 302 et Citadis 402 avec 100 % de motorisation correspondant à $\frac{2}{3}$ de motorisation pour le Citadis 302 et $\frac{1}{4}$ de motorisation pour le Citadis 402 (gamme constructeur).
- Citadis 402 100% motorisé correspondant à 100 % des essieux motorisés (hors de la gamme du constructeur).

Pour chaque simulation, le mode nominal est testé ainsi que les cas suivants :

- Mode dégradé correspondant à la perte d'un essieu motorisé dans le cas d'une indépendance de la traction par essieu et à la perte d'un bogie motorisé dans le cas d'une indépendance de la traction par bogie.
- Remorquage poussage 1 correspondant au cas où une rame EL6 (charge maximum avec 6 voy/m²) doit être secourue par une rame à vide.
- Remorquage-poussage 2 correspondant au cas où une rame à vide doit être secourue par une autre rame à vide.

4.1.2 Caractéristiques traction des Citadis 302 et 402

Citadis 302

- Puissance maximale : 175 kW par moteur
- Effort maximal : 16 kN par moteur
- Capacité : 272 passagers en EL6 (70 kg par passager)
- Masse à vide : 38 t

Citadis 402

- Puissance maximale : 175 kW par moteur
- Effort maximal : 16 kN par moteur
- Capacité : 395 passagers en EL6 (70 kg par passager)
- Masse à vide : 54,9 t

4.1.3 Principes de simulation

Les simulations effectuées permettent de déterminer, par le calcul à partir des hypothèses définies au § 4.1.2, l'accélération au démarrage des tramways dans les modes nominaux et dégradés en palier et en pente de 7%.

L'adhérence sollicitée prise en considération pour le dimensionnement des matériels roulants équipés de bogies fer est de l'ordre de 16% - 18%. Au-delà de ces valeurs, il est difficile de garantir que le matériel roulant sera capable de démarrer dans tous les cas.

Afin d'observer le comportement du matériel roulant à roulement fer, nous limitons, pour chaque cas, l'effort des moteurs de manière à ce que l'adhérence sollicitée ne dépasse pas 18%.

Le code couleur suivant est utilisé pour qualifier la performance offerte par l'accélération au démarrage :

	Accélération satisfaisante
	Accélération acceptable avec impacts limités sur les performances
	Accélération non suffisante pour assurer les performances minimum

4.2 Simulations

4.2.1 Citadis 302

			Accélération au démarrage en EL6	
Modes	Adhérence sollicitée	Effort moteur	Palier	Pente de 7%
Mode nominal	17,1 %	Effort max	1.03 m/s²	0,38 m/s²
Mode dégradé (indépendance par essieu)	17,1 %	Effort max	0,77 m/s²	0,12 m/s²
Mode dégradé (indépendance par bogie)	17,1 %	Effort max	0,50 m/s²	
Remorquage-poussage 1	18 %	11,3 kN	0.42 m/s²	
Remorquage-poussage 2	18 %	11,3 kN	0.52 m/s²	

Par ailleurs, en utilisant l'effort maximum dans les cas de remorquage / poussage, l'adhérence sollicitée atteindrait 25,5 %.

4.2.2 Citadis 402

			Accélération au démarrage en EL6	
Modes	Adhérence sollicitée	Effort moteur	Palier	Pente de 7%
Mode nominal	15,8 %	Effort max	1,07 m/s ²	0,43 m/s ²
Mode dégradé (indépendance par essieu)	15,8 %	Effort max	0,89 m/s ²	0,25 m/s ²
Mode dégradé (indépendance par bogie)	15,8 %	Effort max	0,71 m/s ²	
Remorquage-poussage 1	18 %	12,1 kN	0,47 m/s ²	
Remorquage-poussage 2	18 %	12,1 kN	0,59 m/s ²	

En utilisant l'effort maximum dans les cas de remorquage / poussage, l'adhérence sollicitée atteindrait 23,8 %.

4.2.3 Citadis 402 – 100 % Motorisé

			Accélération au démarrage en EL6	
Modes	Adhérence sollicitée	Effort moteur	Palier	Pente de 7%
Mode nominal	15,8 %	Effort max	1,44 m/s ²	0,79 m/s ²
Mode nominal (limitation à 1,15 m/s ²)	12,8 %	13 kN	1,16 m/s ²	NA
Mode dégradé (indépendance par essieu)	15,8 %	Effort max	1,26 m/s ²	0,61 m/s ²
Mode dégradé (indépendance par essieu) (limitation à 1,15 m/s ²)	14,3 %	14,5 kN	1,14 m/s ²	0,49 m/s ²
Mode dégradé (indépendance par bogie)	15,8 %	Effort max	1,07 m/s ²	0,43 m/s ²
Remorquage-poussage 1	18 %	12,1 kN	0,63 m/s ²	
Remorquage-poussage 2	18 %	12,1 kN	0,79 m/s ²	0,16 m/s ²

En utilisant l'effort maximum dans les cas de remorquage / poussage, l'adhérence sollicitée atteindrait 23,8 %.

Pour atteindre l'accélération minimale ($0,16 \text{ m/s}^2$) pour démarrer le convoi dans le cas du remorquage-poussage 1 en pente de 7%, il faudrait appliquer un effort moteur de 15 kN. Dans ce cas l'adhérence sollicitée serait de 22,3%.

4.2.4 Conclusion

Les simulations montrent que la solution tramway pour l'exploitation de la ligne vers Alaï nécessiterait l'utilisation de rames 100% motorisées. Cependant, même entièrement motorisée, une telle rame de tramway ne permettrait pas d'assurer le cas de secours d'une rame chargée en EL6 par une rame à vide dans une pente à 7%.

4.3 Panorama des tramways

Le tableau qui suit donne les principales caractéristiques des rames 302 et 402 utilisées sur le réseau lyonnais et les compare à quelques exemples de tramway circulant sur des lignes avec fortes pentes.

Lignes	Lyon	Lyon	Marseille	Jérusalem Ligne Rouge	Tenerife Ligne 1
Photo					
Constructeur	Alstom	Alstom	Bombardier	Alstom	Alstom
Gamme	Citadis TGA 302	Citadis 402	Flexity Outlook	Hors gamme	Hors gamme
Composition	M-CS-NP-CS-M	M-CS-NP-CS-NM-CS-M	M-CS-NP-CS-M	M-CS-NM-CS-M = M-CS-NM-CS-M	M-CS-NM-CS-M
Longueur	32,416 m	43,76 m	32,50 m	65,70 m	32,15 m
Largeur	2,40 m	2,40 m	2,40 m	2,65 m	2,40 m
Vitesse maximale	70 km/h	70 km/h	70 km/h	70 km/h	70 km/h
Pente maximale	7,5 %	7,5 %	8%	9 %	8,5 %
Rayon de courbure mini	25 m	25 m	18 m	25 m	
Capacité théorique (EL4/EL6)	201 / 272	287 / 395	200 / -	456 / 620	200 / -

4.4 Eléments de coûts

Le tableau ci-dessous fournit les estimations des coûts d'acquisition des gammes Citadis 302 et 402 ainsi que l'estimation du coût d'acquisition des rames de tramway de 30 m de la ligne rouge de Jérusalem.

	Gamme Citadis 302	Gamme Citadis 402	Citadis Jérusalem Ligne Rouge
Prix de base	2 300 000 € (1)	3 300 000 € (1)	Environ 4 000 000 € (2) (3)

(1) Sur la base de projets existants récents.

(2) Estimation Egis Rail : Le marché d'acquisition de matériel roulant n'est, à ce jour, pas passé.

(3) Le marché de Jérusalem Ligne Rouge est un marché d'une centaine de rame. Il s'agit de rames de 30m exploitées en unité multiples de 2 éléments.

Estimation du coût d'acquisition d'un Citadis 402 100 % motorisé			
Postes	Coûts	Commentaires	Sources
Prix de base Citadis 402	3 300 000 €	Gamme Citadis 402	Projets existants récents
Equipements complémentaires pour une version 100 % motorisée	260 000 €	• 2 moteurs • 2 réducteurs • 1 coffre traction • 1 rhéostat	Estimation sur la base de listes de pièces de rechange de projets existants récents.
Frais fixes (développement)	215 000 €	Les frais liés au développement d'une solution 100 % motorisée représentent environ 6 % du prix des rames	Estimation Egis Rail
Total	3 775 000 €		

Le coût d'acquisition d'une rame Citadis 402 motorisée à 100% représente donc une augmentation d'environ 15% par rapport à la gamme Citadis 402.

5. Fréquentation

L'estimation de la fréquentation attendue sur le scénario tramway a été réalisée via le modèle multimodal des déplacements de l'Aire Urbaine Lyonnaise, MODELy, suivant la même méthodologie que celles développées pour les autres scénarios étudiés en phase 2. La méthodologie et les résultats détaillés de cette modélisation sont présentés dans la note « NT14 – fréquentation attendue et intérêt commercial ». Les principaux résultats et hypothèses propres au scénario tramway sont présentés dans ce chapitre.

5.1 Principales hypothèses

Situation de référence MODELy 2030

Les tests ont été réalisés à l'horizon 2030 sur le scénario « SCoT » de MODELy qui comprends les projets structurants présentés dans le SCoT de Lyon (projets routiers et projets TC).

Concernant les hypothèses socioéconomiques, la Métropole de Lyon et l'Agence d'urbanisme de l'aire métropolitaine lyonnaise ont transmis des hypothèses de populations et d'emplois à retenir à l'horizon 2030. Deux scénarii ont été ainsi définis :

- S1 : « PLU-H arrêté »
- S2 : « Densités bonifiées »

Globalement, les nouvelles hypothèses 2030 transmises par l'Agence d'urbanisme (S1 & S2) sont plus ambitieuses que celles du scénario 2030 SCoT de base de MODELy, et plus particulièrement sur la population totale (de +15% à +30% sur le périmètre étudié). Ces hypothèses ont des conséquences importantes sur les charges routières et en transports collectifs.

Description du scénario tramway modélisé

Le scénario consiste en un projet de tramway reliant Perrache à Alaï Gare. Il dessert les arrêts Suchet, Saint-Irénée, Point-du-Jour et Ménival (cf. carte ci-dessous).

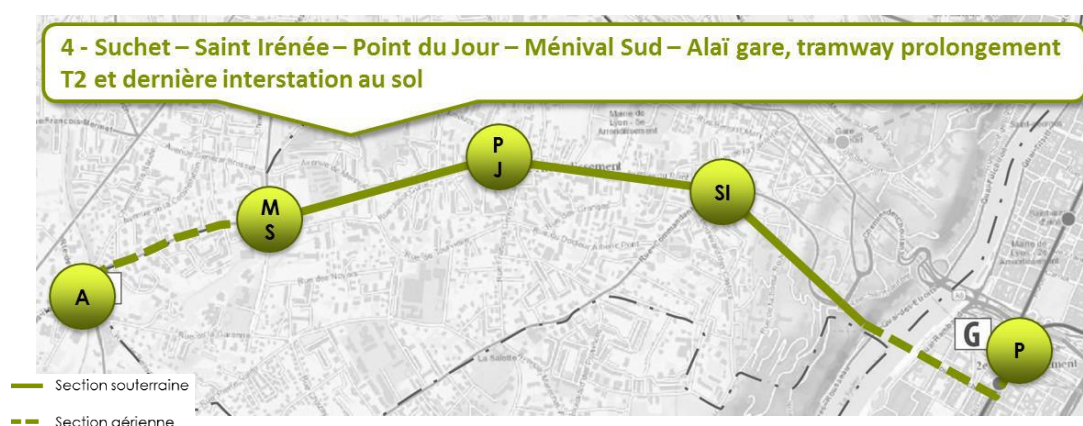


Figure 19 : Détail de l'itinéraire du scénario Tramway

La fréquence modélisée est de 4 minutes par sens.

Le scénario a été modélisé dans un premier temps avec son terminus Ouest à Jean Macé (reprise de l'infrastructure du T2 entre Perrache et Jean Macé). Une variante avec terminus à Perrache a également été testé (variante correspondant au schéma d'exploitation de référence envisagé pour le scénario tramway). Les temps de parcours pris en compte sont les suivants :

Sens 1	Temps inter arrêt	Temps cumulé	Sens 2	Temps inter arrêt	Temps cumulé
Jean Macé	/	/	Alai Gare	/	/
Berthelot	01min 50s	01 min 50s	Ménival Sud	02 min 30s	02 min 30s
Perrache	02 min 00s	03 min 50s	Point-du-Jour	02 min 55s	05 min 25s
Suchet	02 min 00s	05 min 50s	Saint-Irénée	01 min 45s	07 min 10s
Saint-Irénée	03 min 35s	09 min 25s	Suchet	02 min 50s	10 min 00s
Point-du-Jour	01 min 45s	11 min 10s	Perrache	02 min 00s	12 min 00s
Ménival Sud	02 min 25s	13 min 35s	Berthelot	02 min 00s	14 min 00s
Alai Gare	02 min 30s	16 min 05s	Jean Macé	01 min 50s	15 min 50s

Une partie du tracé est située en surface (sections Perrache-Saône et Ménival Sud-Alai). Sur ces sections, on considérera une insertion de la plateforme tramway permettant le maintien de 2 voies routières. En conséquence, les capacités et vitesses de ces voies ont été réduites afin de tenir compte de cette contrainte (voies moins larges, priorité tramway aux feux...).

Ce scénario s'accompagne de la création d'un P+R à l'arrêt Alai Gare et de restructurations des TC afin d'éviter les doublons avec la ligne nouvelle :

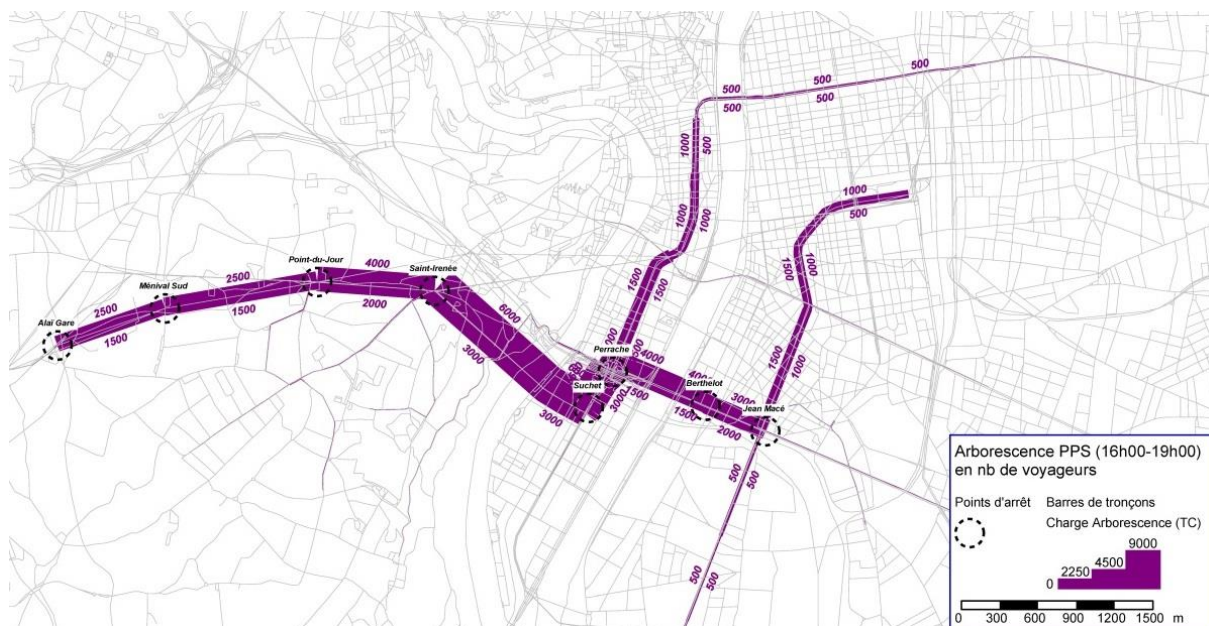
- Ligne C20 réduite à la section Saint-Irénée – Taffignon ;
- Ligne 49 réduite à la section Saint-Irénée – Saint-Foy-Châtelain ;
- Ligne C21 supprimée ;
- Lignes C24, C24 Express, 73 et 73 Express déviées sur l'Avenue Charles de Gaulle.

5.2 Résultats de fréquentation

La modélisation des différents scénarii de ligne vers Alai a été réalisée à la Période de Pointe du Soir (PPS), soit 16h00-19h00 dans MODEL. Les charges de trafics voyageurs attendues par lignes sont toutefois présentées dans le présent rapport à la journée. Pour cela, un coefficient de passage PPS/Jour de 3,5 a été utilisé. De manière générale, les charges de lignes journalières sont présentées sous forme de fourchettes :

- fourchette basse = résultats avec scénario de demande S1 « PLU-H arrêté » ;
- fourchette haute = résultats avec scénario de demande S2 « densités bonifiées ».

5.2.1 Charges de trafic TC



NB : Modely représente les charges TC selon le même sens de circulation que les charges routières. Il faut donc lire que 2000 voyageurs/PPS sont attendus entre Point-du-Jour et Saint-Irénée

Figure 20 : Arborescence de la nouvelle ligne Jean Macé – Perrache – Alai

La ligne de tramway entre Alai et Jean Macé enregistre une fréquentation journalière comprise entre 45 000 et 60 000 voyageurs. Cette fréquentation est légèrement moindre que le scénario métro Alpha 1 et globalement similaires aux scénarios métro Alpha 2 et Beta comme le montre le tableau ci-dessous. Ce chiffre doit toutefois être traité avec prudence : telle que testée dans le modèle, la ligne tramway va jusqu'à Jean Macé et permet ainsi de desservir les arrêts Berthelot et Jean Macé en Rive Gauche, lorsque les autres scénarios ont pour terminus un des pôles de la Presqu'île : Bellecour ou Hôtel de Ville. Un test avec une desserte limitée à la section Alai/Perrache a également été conduit et aboutit à des volumes de voyageurs plus modestes, de l'ordre de 30 000 à 45 000 voyageurs/jour (environ la moitié de la fréquentation du scénario Alpha 1).

	Alpha 1	Alpha 2	Béta	Tramway
Parcours	Métro Bellecour, Saint Irénée, Point du Jour, Constellation, Alai gare	Métro Bellecour, Trion, Point du Jour, Ménival Nord, Libération, Alai gare	Métro Hôtel de Ville, Saint-Paul, Trion, Point du Jour, Constellation, Alai étoile	Tramway Jean-Macé, Berthelot, Perrache, Suchet, Saint-Irénée, Point du Jour, Ménival Sud, Alai gare
Fréquentation journalière	55 000 à 75 000	40 000 à 55 000	45 000 à 60 000	45 000 à 60 000 35 000 à 45 000 si terminus à Perrache

Pour les deux tests modélisés (terminus à Jean Macé ou terminus à Perrache), le tronçon dimensionnant de la ligne se situe entre Perrache et Saint Irénée à la PPS.

Ainsi la modélisation du scénario tramway montre un intérêt commercial à poursuivre l'exploitation de la ligne vers Alai jusqu'à Jean Macé. Les impacts en termes d'exploitation de cette extension jusqu'à Jean Macé sont abordés au chapitre 8 de cette note.

5.2.2 Différences de charges par rapport au scénario 2030 de Référence

Différences de voyageurs TC à la PPS

Les différences de charge de voyageurs entre le scénario Tramway et le scénario de Référence sont présentées sur la carte ci-dessous.

L'aménagement de la nouvelle ligne de tram concentre les flux depuis le 5^{ème} arrondissement de Lyon vers la Presqu'Île via le pôle de Perrache : baisse des charges sur la ligne D et de manière générale sur le secteur Choulans/Kitchener. On observe également l'impact des modifications de lignes 73 et C24, déviées par l'Avenue Charles de Gaulle, et la ligne C20 dont le terminus a été positionné à Saint-Irénée.

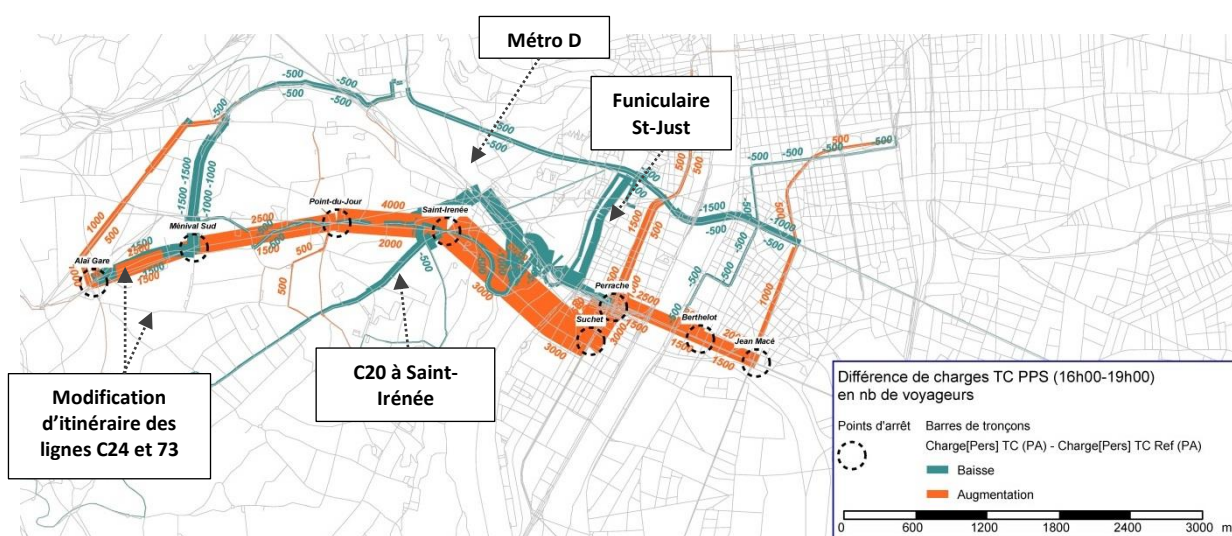


Figure 21 : Différences de charges de voyageurs TC à la PPS : Scénario Tramway – Scénario de Référence

L'impact sur le réseau routier par rapport au scénario de référence 2030 est détaillé au chapitre 9.

6. Temps de parcours

6.1 Hypothèses et méthode

L'estimation des temps de parcours du scénario tramway est effectuée grâce à Expert TC, outil développé par Egis et adapté à ce niveau d'étude. Le calcul repose d'une part sur une description simplifiée des caractéristiques de l'infrastructure et des vitesses maximum autorisées, d'autre part sur les paramètres relatifs aux performances du matériel roulant. Enfin des temps additionnels sont intégrés dans le calcul pour tenir compte des arrêts en station, de l'impact du franchissement des carrefours et des marges de détente et régulation prises en compte par rapport à la marche tendue simulée par l'outil.

6.1.1 Caractéristiques de l'infrastructure

Les temps de parcours s'appuient sur les caractéristiques de l'infrastructure du scénario tramway décrites dans la note « NT13 – Notice tracé – phase 2 ». Les éléments pris en compte dans le calcul sont :

- La position des stations (arrêt du matériel roulant dans chaque station) ;
- Les caractéristiques des tronçons entre stations, chaque tronçon étant défini par une longueur, une vitesse maximum et un nombre de carrefours régulés par feux ;

Seules les courbes de rayon inférieur ou égal à 50m sont prises en compte. L'impact sur le temps de parcours des courbes de rayon plus élevé est considéré négligeable dans cette méthode. Les pentes ne sont pas directement prises en compte dans les caractéristiques de l'infrastructure. Cependant, compte-tenu de la présence de rampes importantes pour l'accès au plateau du 5^{ème}, la vitesse maximum applicable sur ces sections tient compte de l'impact de la pente.

Les simulations ont été menées entre la station Suchet T2 actuelle et la station Alaï. Le temps de parcours entre les stations Suchet et Perrache est directement issu du temps de parcours actuel du T1 sur ce trajet.

6.1.2 Vitesses maximum d'exploitation

Les vitesses maximum prises en compte tiennent compte des performances du matériel roulant et des éventuelles contraintes de l'infrastructure (franchissement d'une communication en voie déviée, forte pente) ou de l'environnement ayant un impact sur la vitesse. Les vitesses maximum prises en compte dans le scénario tramway sont les suivantes :

- Section souterraine sans contrainte forte de pente : 60 km/h ;
- Section en surface sans contrainte forte de pente : 40 km/h ;
- Section souterraine avec pente > 6% : 40 km/h ;
- Franchissement communication en voie déviée : 15 km/h ;

6.1.3 Performances du matériel roulant

Les performances du matériel roulant prises en compte sont celles habituellement considérées pour un tramway (type Citadis 402) :

- Coefficient d'accélération = 1.05 m/s^2 ;
- Coefficient de freinage = 1.1 m/s^2 ;

6.1.4 Temps additionnels

Temps d'arrêt en station

Un temps d'arrêt moyen de 25s a été pris en compte pour l'ensemble des stations.

Temps perdus aux carrefours

Pour les sections en surface, un temps additionnel est pris en compte pour le franchissement de chaque carrefour régulé par feux en considérant un taux de priorité du tramway de 80% et une perte de temps de 25s en cas de non priorité du tramway.

Temps de détente

Les temps de parcours simulés correspondent à la marche tendue du véhicule. Une marge de 15% est prise en compte pour tenir compte des conditions réelles d'exploitation (détente) et de l'incertitude sur les différents entrants (tracé, matériel roulant) liée à ce niveau d'études.

Temps en terminus

Les temps passés en terminus ne rentrent pas dans le temps de parcours commercial de la ligne (temps entre le départ du terminus A et l'arrivée au terminus B), en revanche ces temps font partie du temps de rotation de la ligne utilisé pour le calcul du parc de matériel roulant.

A ce niveau d'étude, la configuration des terminus n'a pas été étudiée en détail. L'estimation prend pour chaque terminus de la ligne, l'hypothèse d'un retournement en arrière-gare. Il s'agit de l'hypothèse la plus dimensionnante en termes de temps passés en terminus et donc de parc de matériel roulant (pour un terminus d'avant gare, le temps passés en terminus est réduit).

Le temps en terminus pour un retournement d'arrière gare se compose des temps suivants :

- Temps de manœuvre : $2 \times 30\text{s}$;
- Temps de changement de loge du conducteur : 90s ;
- Temps de régulation : 10% du temps de parcours commercial avec un temps minimum de 2 minutes par terminus ;
- Temps d'échange voyageurs : 30s sur le quai de descentes et 30s sur le quai de montées ;

6.2 Résultats

Le temps de parcours commercial entre Gare d'Alaï et Perrache est estimé à 11min35s, soit une vitesse commerciale moyenne de 26.7 km/h.

Station	distance entre les stations (m)	Temps de parcours total	Temps d'arrêt	Arivée (h:m:s)	Sortie (h:m:s)
Gare d'Alaï					00:00:00
Ménival Sud	923	122	25	00:02:02	00:02:27
Point du Jour	1286	117	25	00:04:24	00:04:49
St Irénée	864	77	25	00:06:06	00:06:31
Suchet	1566	169	25	00:09:20	00:09:45
Perrache	507	110		00:11:35	

Dans le sens opposé, moins favorable en termes de pentes, le temps de parcours est estimé à 12min10s, soit une vitesse commerciale de 25.4 km/h.

Station	distance entre les stations (m)	Temps de parcours total	Temps d'arrêt	Arivée (h:m:s)	Sortie (h:m:s)
Perrache					00:00:00
Suchet	507	110	25	00:01:50	00:02:15
St Irénée	1625	195	25	00:05:30	00:05:55
Point du Jour	864	86	25	00:07:21	00:07:46
Ménival Sud	1286	117	25	00:09:43	00:10:08
Gare d'Alaï	923	122		00:12:10	

7. Parc de matériel roulant

7.1 Hypothèses

L'estimation du parc de matériel roulant nécessaire pour l'exploitation la ligne repose sur deux paramètres principaux : le temps de rotation de la ligne et l'intervalle d'exploitation en heure de pointe.

7.1.1 Temps de rotation de la ligne

Le temps de rotation de la ligne est la somme des temps de parcours dans le sens aller et le sens retour et du temps passé dans chacun des terminus.

7.1.2 Intervalle d'exploitation en heure de pointe

L'intervalle d'exploitation de la ligne en heure de pointe repose sur la capacité du matériel roulant et la charge dimensionnante à l'heure de pointe issue des prévisions de trafic réalisées sous MODEL Y.

$$\text{Intervalle (s)} = \text{Capacité MR} \times \frac{3600}{\text{Charge dimensionnante}}$$

La charge dimensionnante considérée pour le calcul du parc correspond à la charge moyenne des deux interstations consécutives les plus chargées du sens le plus chargé à l'heure d'hyperpointe (1/4 d'heure d'hyperpointe ramené sur une heure). La charge à la période de pointe du soir (3h) issues de MODEL Y sont ramenées à l'heure d'hyperpointe en les multipliant par 0,4 (coefficient issu de l'analyse des enquêtes OD métro).

Les estimations de trafic réalisées sous MODEL Y à l'horizon 2030 de mise en service de la ligne donnent une charge maximum de 2 000 voyageurs avec le jeu de données socio-économiques : S1 « PLU-H arrêté » pour le scénario avec terminus ouest de la ligne à Perrache.

Le parc MR à l'horizon 2030 a été calculé en prenant l'hypothèse d'un matériel roulant de type CITADIS 402 dont la capacité « constructeur » associée est de 287 voyageurs. Une pondération de 15% est appliquée à ce chiffre pour tenir compte du remplissage réel des rames, soit une capacité réelle de 244 voyageurs.

L'intervalle d'exploitation retenu à l'heure de pointe tient par ailleurs compte des contraintes suivantes :

- L'intervalle retenu doit donner un taux de remplissage entre 80% et 100% pour disposer d'une réserve de capacité par rapport à l'évolution du trafic ;
- L'intervalle obtenu par calcul est arrondi par palier de 30s pour assurer une meilleure lisibilité de l'offre ;
- Un intervalle maximum de 300s (5min) a été fixé comme plafond à ne pas dépasser pour garantir l'attractivité de la ligne ;

7.1.3 Logique de calcul du parc

Le parc de matériel roulant en ligne à l'heure de pointe est donné par le rapport entre le temps de rotation et l'intervalle d'exploitation. Le nombre de rames en ligne étant nécessairement un nombre entier, le chiffre obtenu est arrondi à l'entier supérieur.

L'exploitation de la ligne nécessite de disposer de rames en réserve d'exploitation et en réserve de maintenance. Cette réserve correspond habituellement à 15% du parc en ligne avec un minimum de 2 rames en réserve (1 rame en réserve de maintenance et 1 rame en réserve d'exploitation).

7.2 Résultats

	TRAMWAY Gare d'Alaï - Perrache
Hypothèses socio-éco	S1
Charge dimensionnante 2030	2 000
Configuration MR	Citadis 402
Capacité MR	244
Intervalle heure de pointe	300
Temps de rotation	2 070
Parc en ligne	7
Parc de réserve	2
Parc total	9

Le trafic sur la ligne nécessite théoriquement un intervalle supérieur à 5 minutes mais celui-ci a été plafonné pour maintenir l'attractivité de la ligne.

8. Exploitation et terminus de la ligne

Ce chapitre traite spécifiquement de l'exploitation de la portion de la ligne en tronc commun avec les lignes T1 et T2, c'est-à-dire entre le terminus Est de la ligne vers Alaï et la station Suchet. L'exploitation de la section entre Suchet et Gare d'Alaï n'est pas développée ici. Elle ne présente pas de problématique spécifique mise à part la nécessité de mettre en place un cantonnement de la ligne dans sa partie souterraine pour garantir la sécurité des circulations des tramways.

8.1 Contexte et hypothèses

A l'horizon de mise en service de la ligne vers Alaï, les conditions d'exploitation considérées pour les lignes de tramway T1 et T2 sont les suivantes :

- T1 : en heure de pointe, exploitation de la ligne à 4 minutes avec des véhicules de 43m de long entre IUT Feyssine et Debourg. Cette hypothèse suppose en particulier que, préalablement à la mise en service de la ligne vers Alaï, les quais de la station Perrache et les installations de signalisation de la zone Perrache auront fait l'objet de modifications pour permettre l'exploitation avec des véhicules de 43m. Pour mémoire, la longueur des quais actuels de la station Perrache est de 30m environ. L'allongement des quais constitue une opération complexe en raison de « l'intégration » de la station dans la structure du PEM Perrache.
- T2 : en heure de pointe, exploitation de la ligne à 4 minutes avec des véhicules de 43m de long. La ligne T2 fait actuellement l'objet d'un projet de prolongement jusqu'à la station Suchet au sud de Perrache. Une option de prolongement jusqu'à « Hôtel de Région Montrochet » a également été étudiée par le SYTRAL. L'extension du T2 à Suchet nécessite l'aménagement d'une zone de retournement. La solution envisagée à ce jour par le SYTRAL consiste en la création de 2 tiroirs d'arrière gare parallèles aux voies du T1, situés sur le cours Charlemagne entre les carrefours Suchet et Bichat (voir schéma ci-dessous). Une communication croisée est créée au sud du Cours Suchet et l'écartement des voies du T1 est repris ponctuellement à ce niveau.

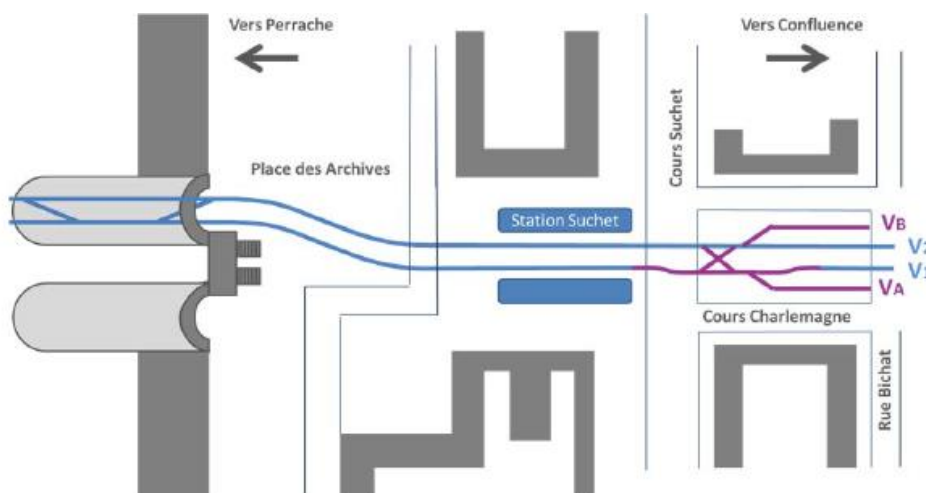


Figure 22 : configuration envisagée du terminus T2 à Suchet

Les principales caractéristiques d'exploitation retenue pour la ligne vers Alaï sont rappelées ici :

- En heure de pointe, exploitation de la ligne à 5 minutes avec des véhicules de 43m de long ;
- Le plan de voie envisagé au niveau de la connexion avec les lignes T1 et T2 serait le suivant (voir Figure 23) :
 - Création d'une station « Suchet – Ligne vers Alaï » sur le Cours Suchet à proximité du carrefour avec le Cours Charlemagne et de la station Suchet actuelle ;
 - Raccordement de la ligne vers Alaï aux voies actuelles du T1 au niveau du carrefour Suchet/Charlemagne ;
- Les rames ligne vers Alaï passeraient devant les quais de la station actuelle Suchet sans s'arrêter mais à vitesse à réduite.
- Le terminus de la ligne vers Alaï est en premier lieu considéré à Perrache, tel que le prévoit le tracé de base du scénario tramway. Toutefois, les prévisions de trafic montrent qu'un terminus à Jean Macé serait intéressant en termes de clientèle, cette option a par conséquent également été analysée.

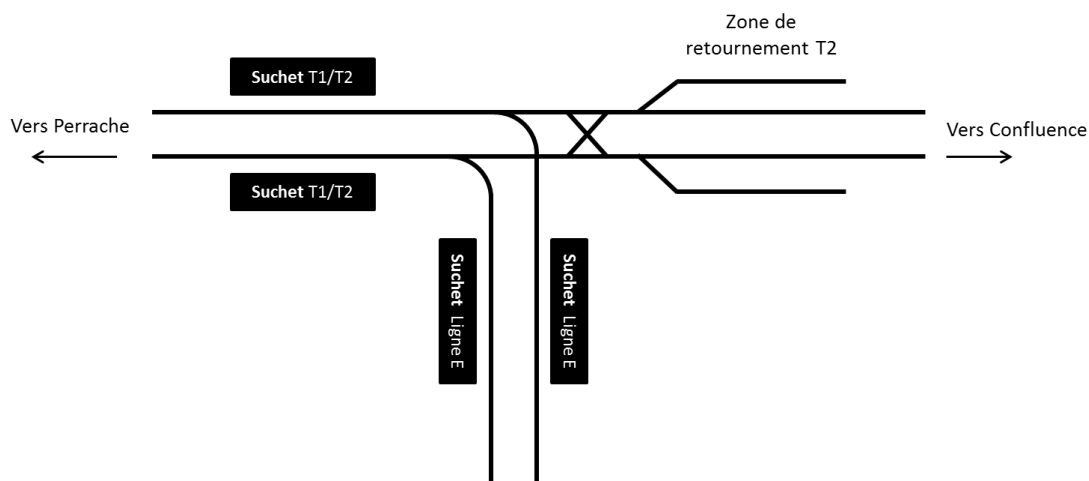


Figure 23 : principe de plan de voie envisagé au niveau de la connexion ligne vers Alaï - lignes T1/T2

8.2 Analyse exploitation avec un terminus à Perrache

Dans le cas d'un terminus à Perrache, plusieurs points durs sont identifiés pour l'exploitation et méritent d'être examinés :

- Emplacement de la zone de retournement des rames ;
- Zone de raccordement avec l'infrastructure T1/T2 ;
- Fonctionnement du carrefour Suchet / Charlemagne ;
- Exploitation de la station Perrache ;

8.2.2 Zone de retournement

Avec un terminus à Perrache, un retournement des rames en avant-gare est exclu compte-tenu du niveau de circulation extrêmement élevé sur le tronc commun (en moyenne 1 rame toute les 85 secondes dans chaque sens quand on cumule les lignes T1, T2 et Alaï). En effet, un retournement d'avant-gare impliquerait :

- une occupation prolongée du quai Perrache par les rames Alaï (montée et descentes des voyageurs + changement de loge du conducteur) ;
- la réalisation d'un court parcours à contre-sens lors de la manœuvre de changement de voies en avant-gare.

Une zone de retournement d'arrière-gare doit plutôt être envisagée. A ce niveau d'étude, la réalisation d'une arrière-gare à deux positions de retournement est préconisée pour permettre de réaliser les opérations en terminus avec une certaine souplesse (changement de cabine du conducteur, repos, temps de régulation). A Perrache, les opportunités pour implanter cette zone de retournement sont très réduites. Le Cours de Verdun Récamier n'offre a priori pas d'emprises exploitables pour insérer deux tiroirs de retournement. La seule option envisageable serait alors la création de cette zone sur la place Carnot directement à la sortie du tunnel sous le PEM Perrache. Un exemple de configuration envisageable est proposé ci-dessous. La faisabilité technique de cette zone de retournement reste à vérifier et s'avère dans tous les cas complexe en raison des problématiques suivantes :

- le débranchement est directement à proximité de la courbe qui emmène les voies principales du tram sur le Cours de Verdun Récamier, une reprise des voies existantes n'est pas à exclure ;
- la zone de retournement se trouve dans les remblais au sud de la Place Carnot et à proximité directe du tunnel du métro.

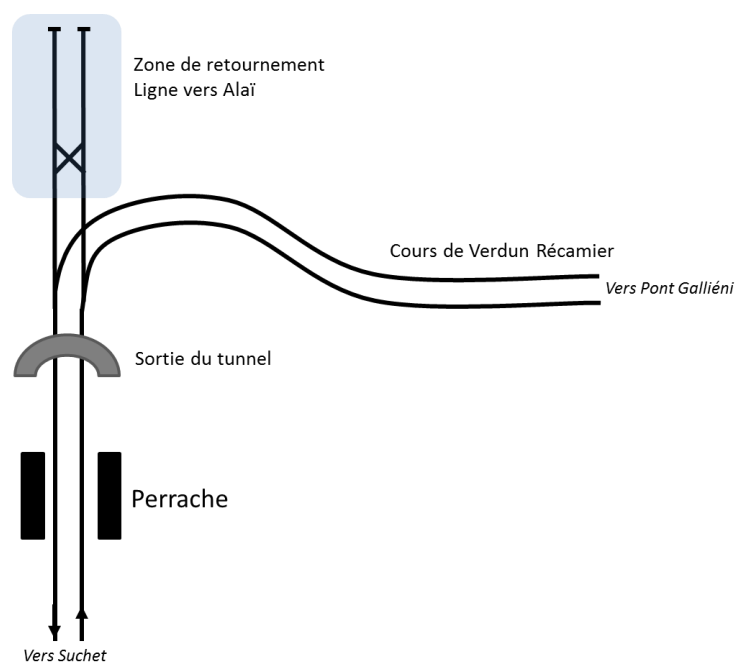


Figure 24 : Exemple de configuration de la zone de retournement au terminus Perrache

8.2.3 Raccordement aux voies T1/T2

Au niveau du carrefour Suchet / Charlemagne, le raccordement de la ligne vers Alaï sur les voies du T1 et du T2 constitue un point dur en termes de tracé (zone en rouge sur la figure ci-dessous). Deux éléments viennent contraindre la réalisation du raccordement :

- La distance entre les quais Suchet actuels et la communication croisée permettant de retourner les rames T2 est très limitée ;
- Une section d'alignement droit est nécessaire pour réaliser le raccordement. Or, les voies actuelles du T1 devront être écartées pour créer les deux tiroirs de retournement du T2 ce qui implique la présence de courbes en « S » dans la zone de raccordement visée pour connecter la ligne vers Alaï.

→ Une reprise des voies T1 et T2, voire le décalage de la station Suchet actuelle pourrait être nécessaire pour réaliser le raccordement.

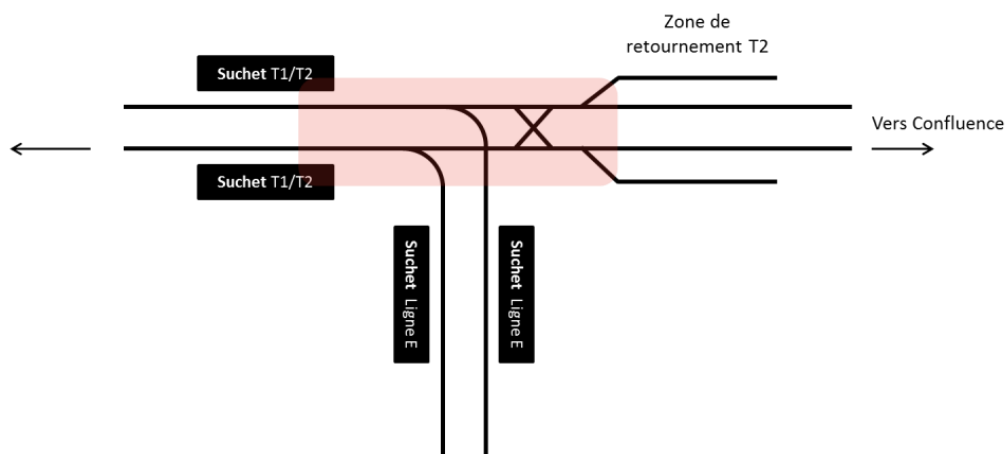


Figure 25 : zone de raccordement sur les voies T1/T2 à Suchet

8.2.4 Fonctionnement du carrefour Suchet Charlemagne

Avec 3 lignes de tramway (1 tramway toutes les 85 secondes dans chaque sens en moyenne) et un trafic routier relativement conséquent, la capacité du carrefour Suchet / Charlemagne devra être vérifiée. Par rapport à la configuration du carrefour avec prolongement du T2 à Suchet, l'ajout de la ligne vers Alaï vient complexifier les mouvements tramways à gérer avec notamment un mouvement de cisaillement entre la voie T1/T2 en direction de Confluence et la voie d'Alaï vers Perrache.

8.2.5 Exploitation de la station Perrache

La station Perrache sera desservie par 3 lignes de tramway, toutes exploitées avec des véhicules de 43m, et avec en moyenne un train toutes les 85s en période de pointe. Perrache étant une station de correspondance majeure du réseau (correspondance tramway, métro, bus et trains), le temps d'arrêt en station des rames est assez élevé (30s voire davantage).

Ainsi, il est très probable que certaines rames arrivent de manière rapprochée à la station Perrache et soient obligées d'attendre la libération du quai par la rame précédente. La possibilité de créer un quai double pour cette station sera à étudier afin de permettre l'arrêt simultané de 2 rames en station et fluidifier ainsi l'exploitation. L'environnement très contraint de la station rend toutefois cette opération complexe à première vue.

8.2.6 Synthèse

L'exploitation du tronc commun des lignes T1, T2 et Alaï entre Suchet et Perrache soulève plusieurs difficultés et apparaît comme un point dur majeur d'exploitation pour la ligne vers Alaï, mais également pour les lignes T1 et T2 dont la robustesse pourrait être pénalisée. Si le scénario tramway est maintenu dans la suite des études, l'exploitabilité du tronc commun, la faisabilité du raccordement et de la création du terminus devra être analysée finement.

8.3 Analyse exploitation avec un terminus à Jean Macé

Les estimations de fréquentation réalisées sous MODEL Y montrent l'intérêt en termes de clientèle d'un terminus de la ligne vers Alaï à Jean Macé. Dans ce cas, on peut s'interroger si le terminus Ouest de la ligne T2 doit demeurer à Suchet ou s'il est déplacé à Jean Macé pour éviter un doublon des lignes T2 et Alaï entre Suchet et Jean Macé.

L'analyse de la dernière enquête OD de la ligne T2 (2015) nous éclaire sur les impacts d'un déplacement du terminus du T2 à Jean Macé. Sur les 97 000 voyages journaliers que compte la ligne, environ 20 000 voyages seraient pénalisés par une rupture de charge à Jean Macé en cas de déplacement du terminus, soit une part significative des usagers de la ligne (20% des voyages). Notons par ailleurs que la charge dimensionnante de la ligne T2 ne se situe pas entre Jean Macé et Perrache. Compte tenu de l'impact non négligeable sur la clientèle, il est proposé de considérer que le terminus du T2 est maintenu à Suchet pour la suite de l'analyse.

Avec un terminus de la ligne vers Alaï à Jean Macé, deux nouveaux points durs méritent d'être examinés par rapport au cas précédent (terminus à Perrache) :

- Configuration du terminus de la ligne à Jean Macé ;
- Capacité du Pont Gallieni à supporter le passage des rames Alaï en plus des rames T1 et T2 ;

Les points durs identifiés dans le chapitre précédent (zone de raccordement avec l'infrastructure T1/T2, fonctionnement du carrefour Suchet / Charlemagne et exploitation de la station Perrache) demeurent identiques.

8.3.1 Configuration du terminus de la ligne à Jean Macé

Le secteur Jean Macé offre davantage d'opportunités pour insérer un terminus pour la ligne vers Alaï. Diverses options existent et pourront être étudiées si ce scénario est retenu. La figure ci-dessous présente une configuration envisageable pour le terminus : un débranchement est créé à l'ouest de la station Jean Macé T2 en direction de la Place Jean Macé pour constituer un terminus d'avant-gare pour la ligne vers Alaï. Une communication croisée permet le retournement des rames. Cette localisation présente l'avantage d'être directement à proximité de l'entrée de la station de métro Ligne B. Un impact du terminus sur l'entrée de la station n'est d'ailleurs pas exclu.

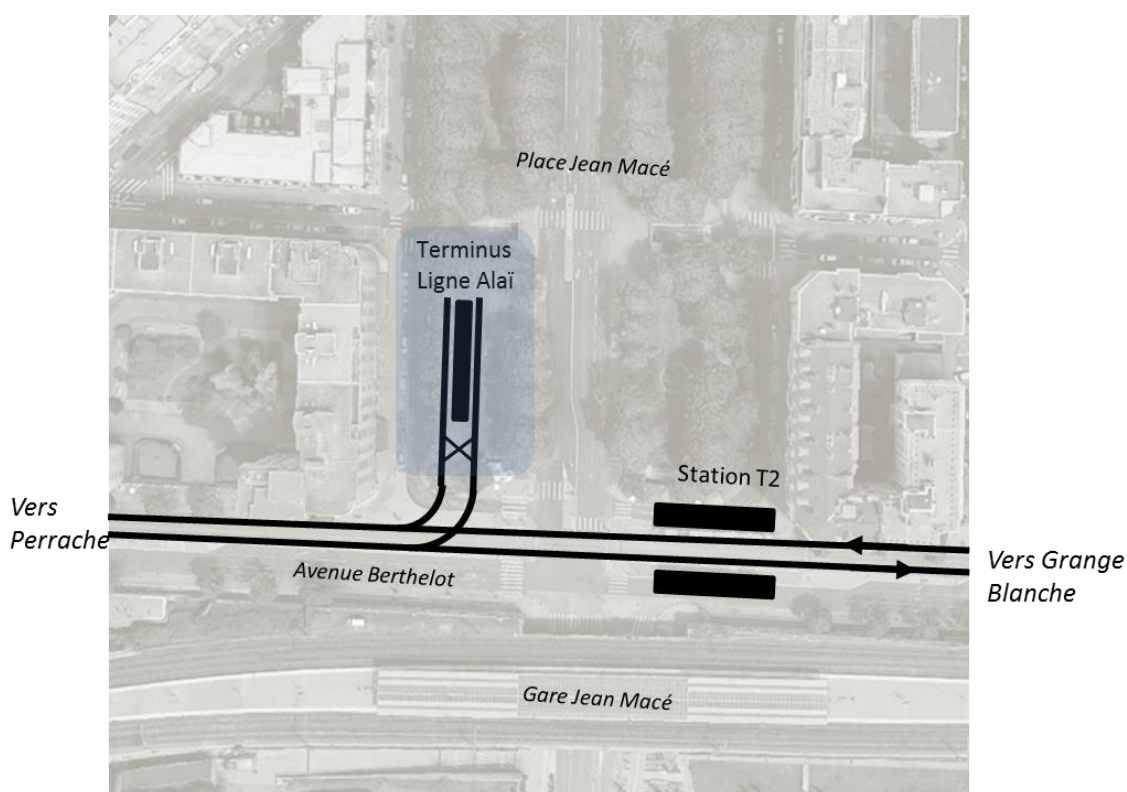


Figure 26 : exemple de configuration envisageable pour le terminus de la ligne vers Alaï à Jean Macé

8.3.2 Capacité du Pont Gallieni

Les éléments dont nous disposons concernant le dimensionnement du pont Gallieni (« *Annexe des conditions d'usage des voies tramway prises en compte pour le calcul des renforts du pont Gallieni* ») sont partiels et ne permettent pas de conclure sur la capacité du pont à supporter l'exploitation des lignes T1 et T2 à 4 minutes avec des véhicules de 43m. Qui plus est, il n'est pas possible de conclure sur le cas où la ligne vers Alaï viendrait s'ajouter aux circulations du T1 et du T2.

La lecture du document met toutefois en exergue un point dur : le cas où deux convois de 43m en charge circulent sur la même voie n'est pas mentionné. Ainsi, on peut supposer que ce cas de chargement n'est pas supportable par la structure actuelle du pont. Dès l'exploitation des lignes T1 et T2 à 4 minutes chacune avec des véhicules de 43m, une mesure de sécurité devrait par conséquent être mise en place : soit l'instauration d'un

système de signalisation permettant d'éviter que ce cas ne se produise, soit le renforcement de la structure du pont.

Si un système de signalisation était mis en place, l'exploitation des lignes empruntant le pont serait pénalisée car dans le cas où deux tramways consécutifs se trouvent simultanément sur le pont, le second sera arrêté le temps que le véhicule précédent libère le pont. Plus les passages des trains sont rapprochés, plus l'occurrence de cette situation est probable. En moyenne, un tramway toutes les 2 minutes se présentera à l'entrée du point avec T1 et T2 en tronc commun et un train toutes les 85 secondes si on ajoute la ligne vers Alaï. En tenant compte d'un temps de franchissement du pont de 30 à 40 secondes et d'une faible synchronisation entre les lignes compte tenu de leur longueur respective, il apparaît que la situation où une rame est bloquée par la précédente est assez probable.

8.3.3 Synthèse

Jean Macé offre davantage d'opportunités que Perrache pour réaliser le terminus de la ligne vers Alaï. En revanche, l'exploitation du tronc commun entre Suchet et Jean Macé reste tout aussi complexe. Aux difficultés mentionnées précédemment entre Suchet et Perrache, s'ajoute la limite de capacité du Pont Gallieni à supporter autant de circulations tramway. Une autre alternative consisterait à déplacer le terminus de la ligne T2 à Jean Macé. Cette option permettrait de limiter le nombre de circulations tramway sur le Point Gallieni mais pénaliserait une part significative des voyageurs de la ligne T2 actuelle : 20% des usagers de la ligne traverse aujourd'hui la station Jean Macé et subirait dans ce cas une rupture de charge à Jean Macé.

9. Impact sur les trafics routiers

L'impact de la réalisation du scénario tramway a été évalué dans le cadre des simulations réalisées sous MODEL Y à l'horizon 2030 de mise en service de la ligne (voir également les principales hypothèses de modélisation dans le chapitre 5.1 de ce rapport).

Les différences de charge d'UVP¹ entre le scénario Tramway et le scénario de Référence sont présentées sur les cartes en fin de chapitre. Le scénario tramway présente davantage d'impacts que les scénarios métros étudiés en phase 2 dans la mesure où certaines sections du tramway sont situées en surface, impliquant de fait une réduction de l'offre routière (priorité feu, réduction de gabarit de certaines voies...).

Dans MODEL Y, ces impacts ont été modélisés sous forme de baisse de capacité et de vitesses sur les sections où le tramway circule en surface. Cela se traduit notamment par des baisses de trafic d'UVP sur :

- La rue Joliot-Curie dans le 5^{ème} arrondissement, avec des baisses significatives (de 900 à 300 uvp/HPS deux sens confondus). Ces flux se reportent sur d'autres axes du secteur : Anneau des Sciences en partie + Avenue Charles de Gaulle ;
- Le cours Suchet dans le 2^{ème} arrondissement, avec des baisses également fortes (de 1 000 à 400 uvp/HPS deux sens confondus). Ces flux se reportent également sur d'autres axes du secteur : rue Gilibert et Quai Rambaud, ainsi que sur le Boulevard urbain (ex-A6/A7).

On notera toutefois que les résultats fournis par Model y présentent des reports d'itinéraires dont la faisabilité n'est pas garantie, notamment dans le secteur du cours Suchet. Les axes qui supporteront les reports, notamment le Quai Rambaud devraient enregistrer une saturation importante en situation 2030, dès la situation de Référence. Une répartition différente des reports est donc à prévoir.

On notera donc que dans le scénario tramway, la demande VP dans le périmètre d'étude (5^{ème}) est réduite par rapport aux autres scénarii du fait des contraintes de circulation liées aux sections aériennes du tramway. Ce constat milite donc pour la mise en place de mesures d'accompagnement visant à réduire les flux VP dans le corridor de la future ligne, quel que soit le type de TC lourd retenu (métro/tram).

¹ NB : UVP = Unité de Véhicules Particulier. Dans MODEL Y, 1 voiture = 1 UVP, 1 poids lourd = 2 UVP et 1 vélo = 0.01 UVP

Remarque importante : comme dans la majorité des modèles multimodaux d'agglomération, les affectations TC sont réalisées sur une période de plusieurs heures, appelée Période de Pointe. Les extraits Modely présentés sont issus d'affectation TC à la Période de Pointe du Soir sur 3 heures, soit entre 16h00 et 19h00. Les affectations routières sont en revanche réalisées sur une heure de pointe. Modely réalise l'affectation des trafics routiers à l'HPS entre 17h00 et 18h00.

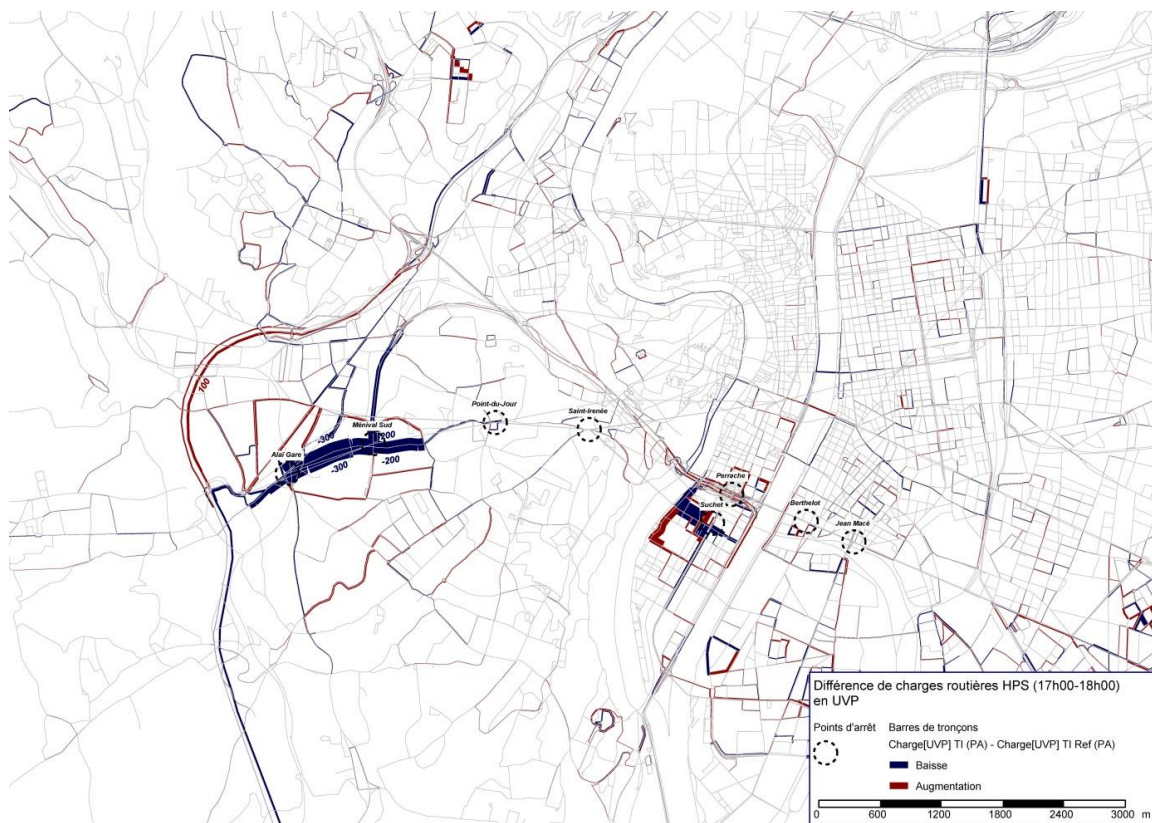


Figure 27 : Différences d'UVP à l'HPS : Scenario Tramway – Scenario de Référence



Figure 28 : Différences d'UVP à l'HPS : Scenario Tramway – Scenario de Référence

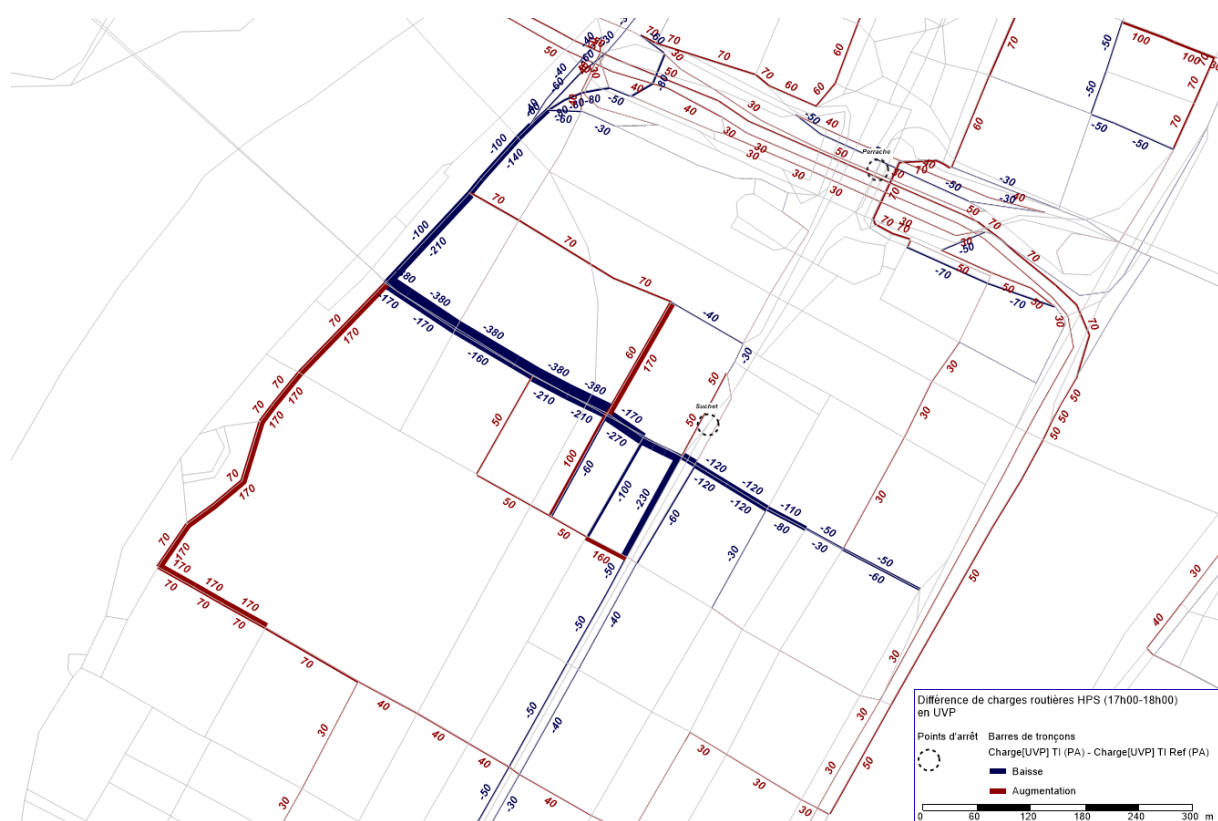


Figure 29 : Différences d'UVP à l'HPS : Scenario Tramway – Scenario de Référence

10. Coûts et planning

10.1 Coûts d'investissement

Le détail des hypothèses de chiffrage est donné dans la note « RG170582A - NT23 - Estimation des coûts ». Les principaux éléments relatifs au scénario tramway sont repris ici.

Les différents postes de chiffrage intègrent le génie civil, gros œuvre, second œuvre, les lots techniques et les équipements non liés au système de transport. Ils incluent également les travaux préparatoires, les déviations de réseau et les réaménagements de surface à l'issue des travaux. Les frais d'études et d'installations de chantier sont également comptés dans les différents postes. A ce stade, les montants de chaque poste (hors MOE/MOA) tiennent compte d'un taux de quantités à valoir (QAV) de 10%.

Le chiffrage s'effectue hors coût du foncier.

En termes d'ouvrages, le chiffrage du scénario tramway tient compte :

- D'un tunnel au tunnelier de 2 700 m
- D'une trémie de 200 m
- D'un viaduc sur la Saône de 250 m
- De deux stations souterraine de 55 x 25 m, de profondeurs respectives de -20 et -69 m
- De trois puits de secours et de ventilation, de profondeurs respectives de -25, -25 et -80 m.

La section tramway au sol représente 1 800 m.

La flotte de matériel roulant est constituée de 9 rames de 43m surmotorisées. Le chiffrage tient compte de la création d'un nouveau dépôt dans le secteur d'Alai.

Une provision de 10 M€ a été prise pour les problématiques de raccordement / terminus Est (cf. chapitre 8).

Les frais de MOA / MOE sont chiffrés en retenant un taux de 12% sur l'ensemble des dépenses pour les travaux et l'acquisition du matériel roulant.

Afin d'assurer que le coût de la réalisation du projet ne dépassera pas l'enveloppe globale à programme constant, un montant financier est associé aux aléas et incertitudes. A ce stade, un taux d'aléas et d'incertitudes de 15% est appliqué forfaitairement sur le total du scénario (tous les postes, y compris MOA/MOE).

Sous ces hypothèses, le coût d'opération du scénario tramway est estimé à environ 600 M€. Pour mémoire, les scénarios métro se situent plutôt autour de 1 000 M€.

	Tramway Perrache
Section linéaire (tunnel, TC, viaduc...)	175
<i>dont tunnel ou tunnelier</i>	110
Stations souterraines	109
Ouvrages annexes	28
Ouvrages particuliers (lancement tunnelier, tête de tunnel, P+R)	34
Dépôt	16
Matériel roulant	34
Equipements liés au système de transport	44
Raccordement / terminus	10
Total	450
Frais de MOA / MOE	54
Aléas et incertitudes	76
Estimation nette M€ HT	580

Figure 30 : Chiffrage du scénario tramway

10.2 Planning

Le planning des travaux a été bâti dans l'hypothèse d'un début des déviations de réseaux en 2022. Les travaux lourds (tunnel, stations, plateforme) démarrent en 2023. Ce planning permet une mise en service dans le courant de l'année 2028.

11. Analyse multicritères

Le tableau multicritère qui suit synthétise les analyses menées en phase 2 sur le scénario tramway. Les critères sont ceux qui ont servi à l'analyse des différents scénarios métro. La méthodologie détaillée ainsi que les résultats concernant les autres scénarios sont présentés dans le rapport de phase 2 (document RG170642A).

Famille	Critère	Mode d'évaluation	Scénario tramway
Desserte et cohérence avec le développement urbain			
1.1	P+E moyens desservis autour des stations (2012)	Total P+E dans un polygone de 800m en marche à pied (2012) / nombre de stations	11 495
1.2	Variation du potentiel de desserte à 2030 dans le cadre du PLU-H arrêté	Indicateur (=,+,++) basé sur le scénario de pop/emploi S1	+++
1.3	Potentiel de densification additionnel	Indicateur (=,+,++) basé sur le différentiel entre S1 et S2	+
1.4	Principaux équipements desservis	Liste des principaux équipements	Mairie 5 ^{ème} CNFPT Centre Scolaire La Favorite Hôpital Les Massues
1.5	Desserte des polarités	Polarités: Trion/St Irénée - PDJ - Libération/Constellation/Ménival	St Irénée - PDJ - Ménival Sud - Alaï Gare
1.6	Desserte des quartiers d'habitat social	Liste des quartiers politique de la ville et veille active desservis	Quartier Sœur Janin Quartier Ménival
Evolutivité			
2.1	Pertinence d'évolutivité de la ligne	Vert : Evolutivité intéressante, Orange : évolutivité complexe	Evolutivité intéressante vers l'Est / possible vers l'Ouest
2.2	Reserve de capacité de la ligne	Indicateur qualitatif (noir si capacité non adaptée)	Intervalle tramway plus limité
Fréquentation			
3.1	Nombre de voyages sur la ligne	Valeur issue du modèle	30 000 à 45 000
3.2	voyages supplémentaires jour sur le réseau	Valeur issue du modèle	10 000
Eléments socio-économiques			
4.1	VAN-SE		++
Attractivité et exploitabilité			
5.1	Temps de parcours et nombre de correspondances pour accès à la Part Dieu depuis Alaï	Temps de parcours dont temps de correspondance	32min 2 corresp (E-T2-B)
5.2	Temps de parcours et nombre de correspondances pour accès à la Confluence depuis Alaï	Temps de parcours dont temps de correspondance	21min 1 corresp (E-T1)
5.3	Profondeur des stations	Seuil > 30m et > 50m	> 50 m

Famille	Critère	Mode d'évaluation	Scénario tramway
5.4	Qualité de la correspondance avec le réseau lourd	Indicateur qualitatif	Bonne correspondance à Perrache
Risques et impacts potentiels			
6.1	Risques techniques	Indicateur qualitatif	- Viaduc sur Saône - Tête de tunnel en milieu très contraint - Trémie à construire en milieu très contraint
6.2	Impacts de l'infrastructure en phase chantier	Principaux impacts + Indicateur qualitatif. Ex: démolition de bâtiments, travaux dans zones fréquentées...	- Insertion des sections aériennes et tête de tunnel (démolition) - Nombreuses acquisitions à effectuer dans le secteur d'Alaï - Fort impact circulation des installations de chantier tunnelier
6.3	Impacts sur réseau TCL lourd en phase chantier	Arrêt d'exploitation sur lignes existantes	Coupure de courte durée de T2 et T1
6.4	Impact en phase définitive	Indicateur qualitatif. Ex: présence de viaducs, zones au sol, carrefours...	- Viaduc sur la Saône - Trémie dans le secteur de Ménival - Impact carrefours sur la partie au sol
Coûts			
7.1	Coût d'investissement	M€	<600
7.2	Coût d'exploitation annuel	M€ / an	3-4
7.3	Coût d'un voyage TC	[Investissement + Exploitation x 30 ans] / [Passagers annuels sur ligne x 30 ans]	2.0 - 2.5
7.4	Coût d'un nouveau voyage TC	[Investissement + Exploitation x 30 ans] / [Nouveaux passagers annuels sur ligne x 30 ans]	8.0 - 9.0
Délais			
8.1	Date de mise en service envisageable		2028
8.2	Aléas planning		Installations du tunnelier en milieu urbain contraint : risque sur les cadences Risque archéologique

Historique des modifications

Version	Date	Rédacteur	Objet
A	15/12/2017	David PIERRON Jean-François DELSAUT Jean-Charles FRENNEAUX Guillaume LE LORC'H Pierre ROUCHON	Création du document