

Avenue de la Gare 1
1003 Lausanne
Suisse
Téléphone +41 21 620 08 08
lausanne@sma-partner.com
www.sma-partner.com

Etude d'exploitation et de robustesse du tramway lausannois



1 Synthèse

Le projet du tramway lausannois s'inscrit dans la stratégie de mobilité de l'agglomération Lausanne-Morges (PALM) et a pour objectif de renforcer le réseau de transports publics lausannois. Il comprend deux étapes : la première relie Lausanne à Renens-Gare, avec une mise en service prévue en 2026 ; la seconde concerne le prolongement jusqu'à Villars-Ste-Croix, programmé pour l'horizon 2030.

SMA a accompagné les Transports publics de la région lausannoise SA (tl) dans l'élaboration de l'horaire du tramway à travers une démarche itérative intégrant l'infrastructure, le matériel roulant et les objectifs de desserte.

La planification horaire représente un défi majeur, puisqu'il s'agit ici de concevoir, ex nihilo, un réseau de tramway à voie normale en Suisse – une première dans le pays. Ce projet se distingue ainsi par son caractère innovant.

Les hypothèses retenues, notamment le choix des marges horaires pour garantir la faisabilité opérationnelle, s'appuient sur l'expertise internationale de SMA et ont été partagées avec les tl. La robustesse de l'horaire a été évaluée au moyen de simulations intégrant des perturbations, à la fois déterministes et aléatoires, dans le logiciel de planification Viriato, utilisé tout au long de l'étude.

Viriato a permis d'analyser le comportement du système face à différents scénarios d'exploitation, assurant ainsi une évaluation complète de la robustesse. Les tests ont montré que les perturbations injectées se résorbent sans générer d'impact significatif sur les autres circulations, ce qui permet de considérer l'horaire comme robuste dans les conditions simulées.

Dans le cadre d'une mise en service en deux étapes, il sera toutefois nécessaire d'ajuster certaines hypothèses initiales en fonction des données réelles recueillies sur le terrain, afin d'optimiser l'horaire définitif.

2 Contexte et objectifs

L'agglomération lausannoise dispose aujourd'hui de deux lignes de métro, d'un vaste réseau de trolleybus et autobus, d'une ligne ferroviaire régionale (LEB) et d'un réseau performant de RER sur le réseau des CFF. Pour renforcer ce réseau de transports publics, la stratégie de mobilité du projet d'agglomération Lausanne-Morges (PALM) prévoit la réalisation de plusieurs « axes forts », dont une 3^e ligne de métro, des BHNS ((bus à haut niveau de service) et une ligne de tramway objet du présent article. Ce projet de tramway se déploie en deux étapes :

- Etape 1 : La liaison entre Lausanne-Flon et Renens-Gare, avec des travaux débutés en 2021 et une mise en service prévue à l'horizon 2026.

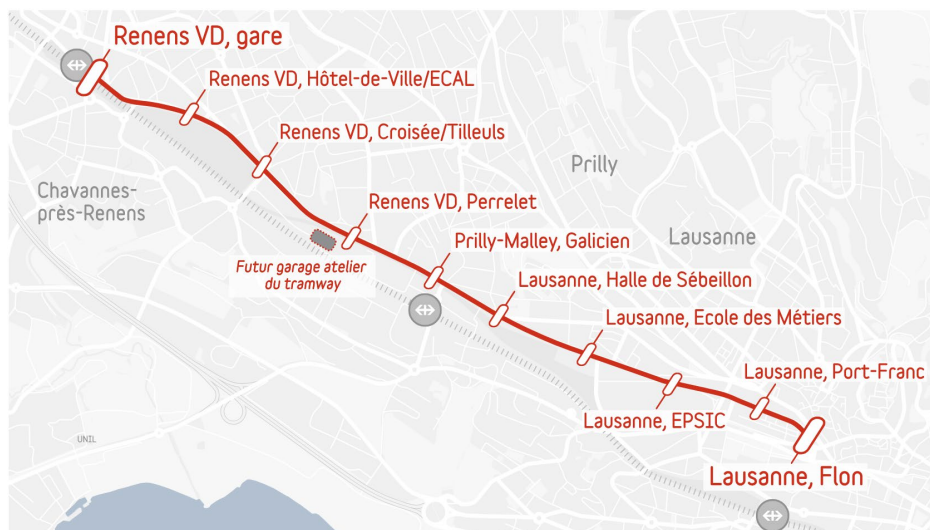


Figure 1: Etape 1 du tramway (source: tramway-lausannois.ch)

- Etape 2 : Le prolongement Renens-Gare – Villars-Ste-Croix, dont la mise en service est programmée pour l'horizon 2030.

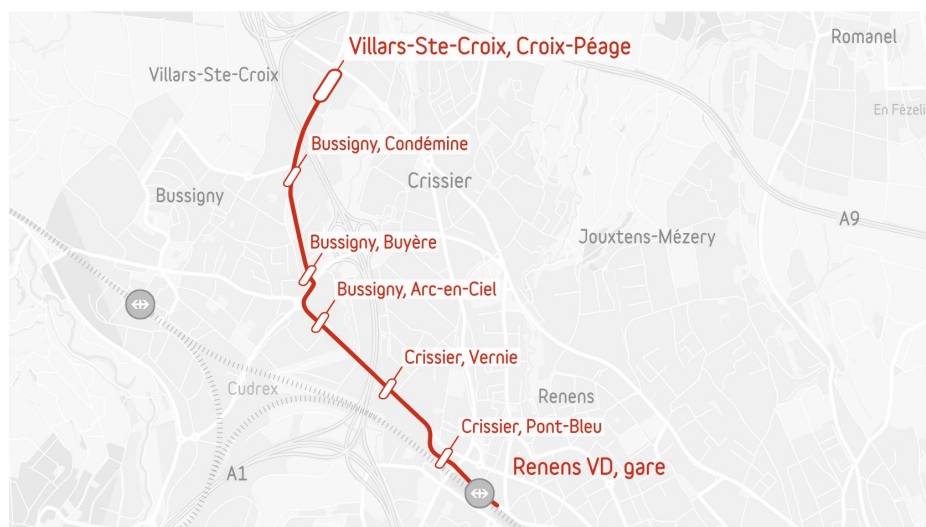


Figure 2: Etape 2 du tramway (source: tramway-lausannois.ch)

Le matériel roulant nécessaire a été commandé, avec une première livraison attendue pour 2026, afin de permettre la mise en exploitation de l'étape 1. Des rames supplémentaires seront livrées pour l'étape 2. Les objectifs de desserte sont définis avec une cadence de 6 minutes en journée et 10 minutes en extrémité de journée.

Les évolutions du tracé intervenues depuis le lancement du projet, la meilleure connaissance des caractéristiques du matériel roulant, les nouvelles exigences liées à la circulation en particulier aux carrefours, ainsi que de l'accès au garage-atelier (GAT) ont conduit à lancer une analyse approfondie des conditions d'exploitation du futur tramway.

Dans ce contexte, les tl ont mandaté SMA pour réaliser une étude visant à analyser l'exploitation de la future ligne de tram et à tester la robustesse de l'horaire prévu. L'ensemble des analyses a été réalisé en utilisant l'outil de planification Viriato sur l'ensemble de la ligne y compris le raccordement vers le GAT. Les circulations de lignes de bus, et en particulier le BHNS vers le dépôt de Perrelet, ont été prises en compte, afin de considérer les interactions avec le tram dans ce secteur spécifique. L'horizon de l'étude a été fixé à 2030.

3 Construction et optimisation de l'horaire

L'élaboration de l'horaire a constitué la première étape essentielle de l'étude. Ce processus repose sur une approche itérative prenant en compte l'infrastructure, le matériel roulant et la desserte visée.

3.1 Etablissement du profil de vitesse

Afin de construire l'horaire, la première étape a été de définir le profil de vitesses pour pouvoir calculer les temps de parcours. Ce profil a été déterminé sur la base des éléments suivants :

- Le type de site (site propre, site protégé, site banalisé) ;
- La géométrie du tracé : courbure, déclivité et dévers;
- Les aiguilles prévues sur le réseau ;
- Les règles de circulation spécifiques applicables.

Une particularité du projet réside dans le fait qu'il s'agit de la première ligne de tramway à voie normale de Suisse et que les spécifications des Dispositions d'exécution de l'ordonnance sur les chemins de fer (DE-OCF) n'étaient donc pas toujours suffisamment détaillées pour cette situation nouvelle. Ainsi, les tl, qui n'exploitent pas encore de ligne de tramway, ont dû définir des standards adaptés en respectant les normes existantes, sous la supervision de l'Office fédéral des transports (OFT).

Ainsi, deux jeux de paramètres ont été testés : les **valeurs recommandées** et les **valeurs exceptionnelles**, définies à partir des spécifications générales du système de transport, élaborées par les tl en collaboration avec les mandataires spécialisés en technique ferroviaire, installations de sécurité et génie civil, et validées par l'OFT.

3.2 Calcul de marche

Les caractéristiques du matériel roulant, essentielles pour le calcul de marche, ont été fournies par les tl. Le cahier des charges transmis aux constructeurs a permis de fixer les hypothèses de calcul, notamment en matière de capacité d'occupation. Une hypothèse de remplissage à 4 passagers par m² a été retenue pour garantir une approche réaliste au niveau de la charge utile à prendre en compte.

Sur la base de ces éléments, un calcul de marche a été effectué dans Viriato afin d'évaluer le temps de parcours théorique. Ce temps a ensuite été ajusté en

intégrant les temps d'arrêt aux stations ainsi que des marges indispensables pour absorber les aléas d'exploitation. La prise en compte de marges supplémentaires a également été nécessaire pour respecter les normes de planification (cf. ci-après).

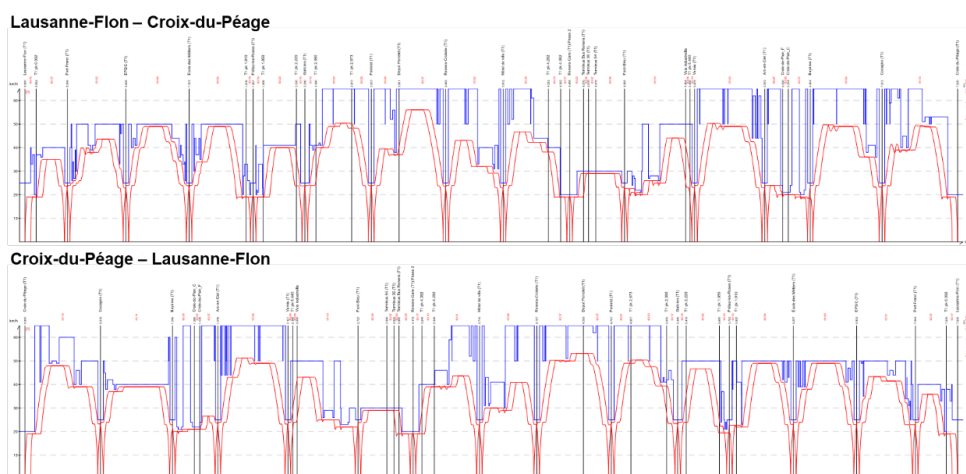


Figure 3: Calcul de marche (sorties de Viriato)

Etant donné que Lausanne ne dispose pas encore de ligne de tram en service, certaines règles de planification ont été définies en s'appuyant sur les pratiques d'autres réseaux suisses. Ainsi, la marge a été fixée en fonction du type de site traversé : site propre, site avec des circulations mixtes... Plus le risque d'aléas ou d'interférences avec d'autres modes de transport est élevé, plus la marge retenue est importante. Cette marge est exprimée sous forme d'un pourcentage linéaire, proportionnel au temps de parcours technique. Les temps d'arrêt ont également été évalués station par station, sur la base de l'analyse des flux de passagers estimés dans le futur et fournis par les tl.

Un enjeu spécifique a été identifié au niveau du croisement de Croix-de-Plan, un point névralgique du tracé. Il a été fixé comme objectif de prévoir le croisement des trams au niveau du carrefour afin d'optimiser la gestion des feux de signalisation et de limiter l'impact sur le trafic individuel motorisé. Cette optimisation est particulièrement cruciale en heure de pointe, tandis qu'elle est jugée non nécessaire en heures creuses.

3.3 Normes de planification

Des normes de planification spécifiques ont été définies afin de structurer les différentes situations de circulation. Des temps standardisés ont ainsi été établis pour les principales configurations d'exploitation, facilitant la modélisation et

l'élaboration de l'horaire. Ces normes sont basées sur l'expérience de SMA dans des études similaires menées en Suisse.

Des temps minimaux à respecter ont été définis pour les cisaillements et les successions en ligne et aux stations. Les interactions avec les lignes de bus ont également été prises en compte, notamment dans les zones de quai partagé, comme à Galicien et Pont-Bleu, où bus et trams cohabitent. Par ailleurs, une attention particulière a été portée aux stations terminus pour estimer les temps de séparation et de rebroussement afin de garantir une exploitation fluide.

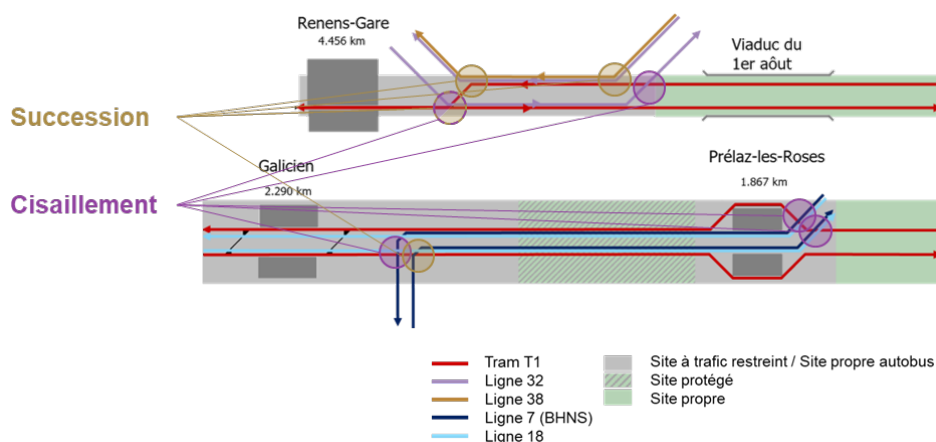


Figure 4: Exemples d'interactions bus et tram lors de l'étape 1

Un cas spécifique, plus complexe, a également été étudié : celui du GAT¹ de Perrelet. Celui-ci est relié à la ligne par une voie unique, utilisée pour accéder aux différentes voies de remisage. Les temps de séparation nécessaires entre les différents mouvements d'entrée et de sortie ont été analysés, puis définis. Une matrice de compatibilité entre circulations a été élaborée afin de détailler l'ensemble des configurations possibles et les contraintes associées.

¹ GAT : Garage atelier

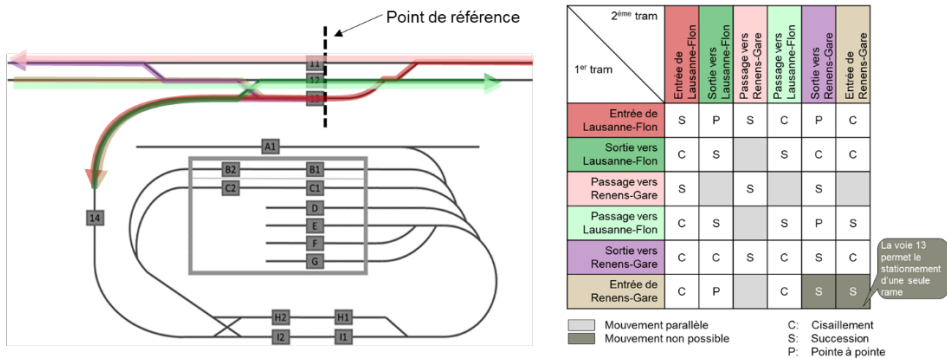


Figure 5: Matrice de compatibilité entre circulations au garage-atelier de Perrelet

3.4 Etablissement de l'horaire

Deux situations d'exploitation ont été étudiées : l'une pour les heures de pointe, l'autre pour les heures hyper creuses en début et fin de service. Chacune a été déclinée selon deux jeux de paramètres distincts, tout en respectant normes établies ainsi que les exigences des tl en matière de temps minimal de retournement au terminus. Elles ont mis en évidence les enseignements suivants :

- Cadence de 6 minutes (heures de pointe) : L'application des paramètres recommandés, combinée à une optimisation du croisement au carrefour de Croix-de-Plan, nécessite la mobilisation de 11 véhicules.
- Cadence de 10 minutes (heures hyper creuses) : En l'absence d'optimisation du croisement de Croix-de-Plan, l'exploitation requiert 6 véhicules. Ce dispositif assure le respect des conditions d'exploitation minimales. Une variante à 7 véhicules est également envisageable, offrant un temps de retournement plus confortable à Lausanne-Flon.

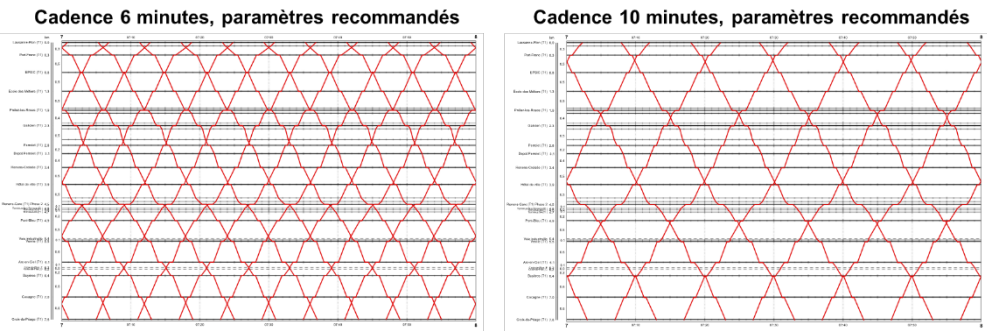


Figure 6: Exemple horaire cadence 6 et 10 minutes

Le temps de parcours moyen sur l'ensemble de la ligne s'établit à 26 minutes en heure de pointe.

Cette première phase d'étude a permis de poser les bases d'un horaire robuste, intégrant à la fois les contraintes infrastructurelles, les performances du matériel roulant et les exigences d'exploitation. Les résultats obtenus ont permis d'avoir une vision claire des besoins en matériel roulant et des ajustements nécessaires pour assurer une cadence optimale.

L'optimisation du croisement au carrefour de Croix-de-Plan s'est imposée comme un levier essentiel pour fluidifier le trafic et minimiser l'impact du tram sur la circulation automobile.

Les horaires obtenus pour chacune des situations d'exploitation ont été par la suite évalués en termes de robustesse.

4 Analyse de la robustesse

4.1 Définitions

La robustesse d'un horaire se définit comme sa capacité à résorber les aléas d'exploitation en maintenant un niveau de service fiable. Un horaire robuste limite l'impact des perturbations et permet un retour à la situation nominale dans un délai raisonnable.

Dans le cadre de cette étude, la robustesse a été évaluée en simulant dans Viriato l'exploitation suite à l'injection soit d'une perturbation déterministe, soit d'une série de perturbations aléatoires déterminées selon la méthode de Monte-Carlo.

Les tests de robustesse ont permis d'évaluer plusieurs situations de perturbation type telles que l'occupation d'un quai par un bus empêchant le départ du tram ou des retards aléatoires en ligne et en station.

La simulation de l'exploitation et de la résorption des perturbations repose sur la consommation de marges disponibles en ligne, aux arrêts et lors des retournements. Ces marges sont définies selon des hypothèses réalistes spécifiques à la configuration de la ligne, et réparties de manière différenciée sur les temps de parcours, d'arrêt et de retournement.

Des règles de priorité entre les bus et le tram ont été établies en concertation avec les tl. Les simulations tiennent également compte des normes de planification utilisées lors de la conception de l'horaire. L'ensemble des analyses a été réalisé à l'aide du logiciel Viriato.

Deux niveaux de retard ont été testés :

- Niveau de retard de base : retard réaliste et assez conséquent pour perturber l'exploitation
- Niveau de retard supérieur : 150% du niveau de retard de base

4.2 Perturbations déterministes

Il s'agit de l'injection de perturbations ponctuelles sur la ligne. Lors de ces tests de robustesse, les circulations de bus dans les zones de circulations mixtes sont prises en compte dans la simulation.

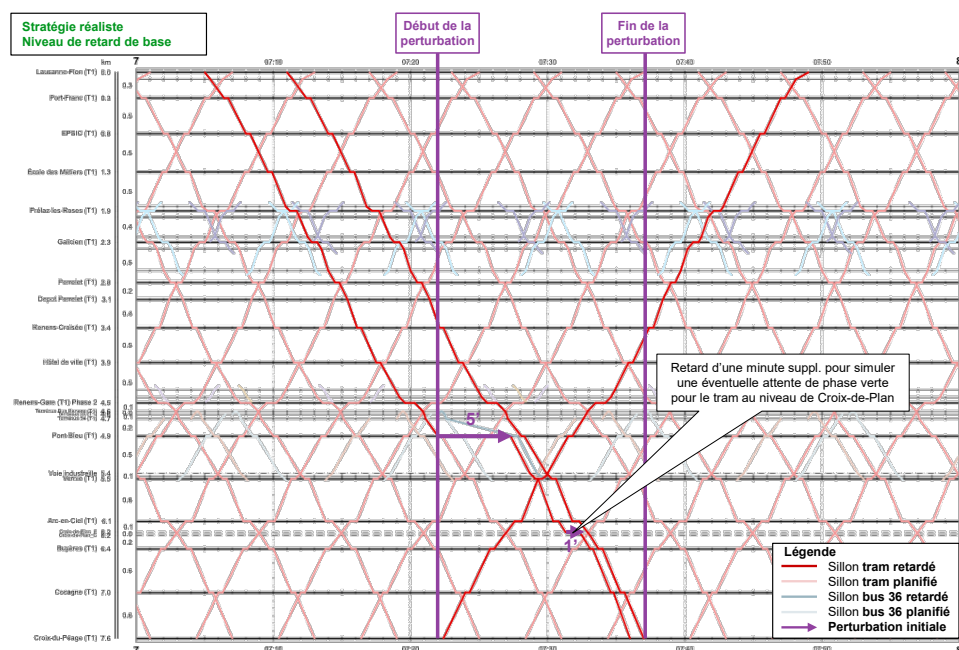


Figure 7: Exemple de test de robustesse déterministe

Un exemple de test déterministe est présenté ci-dessus. Un cas de retard de 5 minutes au départ de Pont-Bleu, causé par un bus, a été simulé. Un seul bus est touché, mais trois trams sont impactés, dont un dans le sens opposé à la perturbation. Le temps de retournement disponible à Croix-du-Péage permet au tram concerné de rattraper son retard et de repartir à l'heure vers Lausanne-Flon. L'impact de ce type de retard est jugé maîtrisable, et le temps de résorption acceptable. L'horaire est donc considéré comme robuste dans cette configuration.

Au final, les tests de robustesse déterministes ont démontré que, pour les deux jeux de paramètres testés et selon les hypothèses définies avec les tl, les perturbations injectées sur un tram se résorbent sans générer d'impact majeur sur les autres circulations.

4.3 Perturbations aléatoires

Il s'agit de l'injection aléatoire de perturbations sur la ligne selon la démarche illustrée et détaillée ci-après.

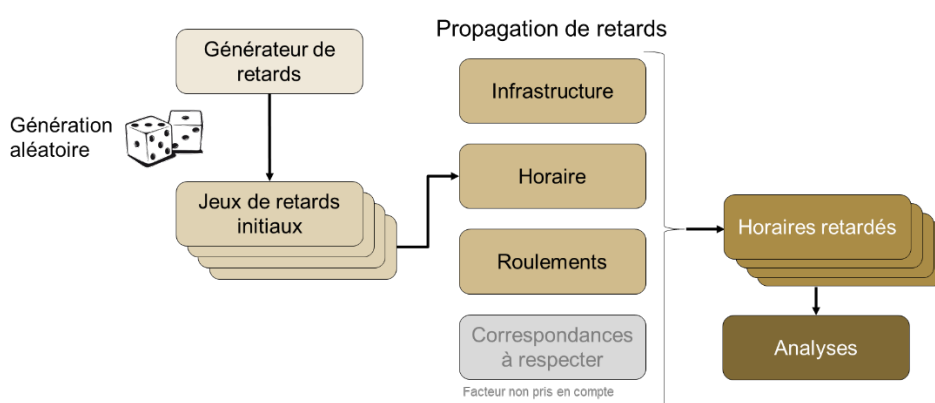


Figure 8: Principe de perturbations aléatoires

Les perturbations aléatoires sont introduites selon une probabilité p . Lorsqu'un tram est affecté, le niveau de retard suit une loi géométrique de moyenne μ (entre 0.3 et 0.8 minute de retard moyen pour chaque arrêt selon la fréquentation), bornée par une valeur maximale de retard (5 minutes). Le nombre de points d'apparition des retards est également défini selon une loi géométrique, et la valeur des retards suit une distribution homogène. Dans ce cas, la circulation des bus dans les zones mixtes n'est pas explicitement simulée, car elle est réputée suffisamment représentée par les retards aléatoires appliqués.

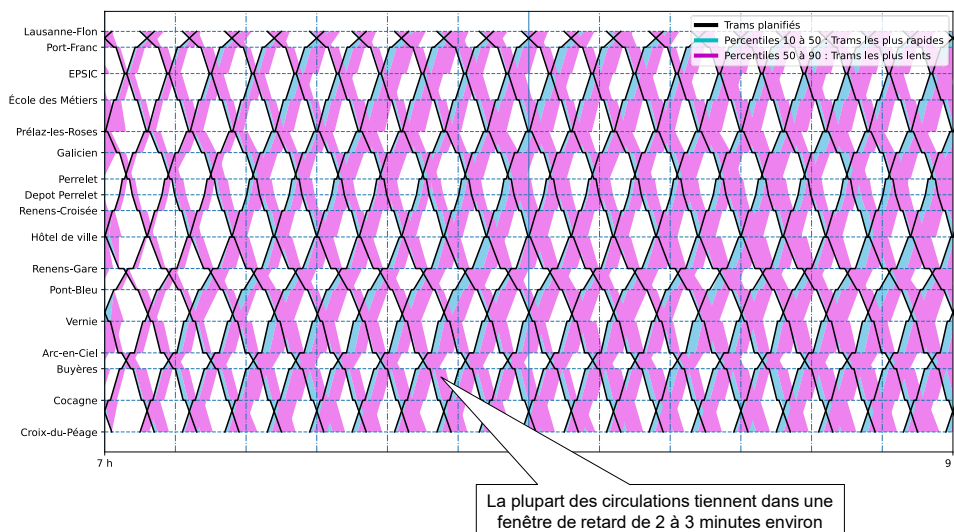


Figure 9: Exemple de test de robustesse avec perturbations aléatoires

Pour analyser les simulations de perturbations aléatoires, les résultats sont regroupés par percentiles.

Un percentile est une mesure statistique qui indique la position d'une donnée par rapport à l'ensemble des valeurs observées. Il divise une distribution en 100 parts égales, chacune représentant 1 % des données. Le percentile 50 correspond à la médiane.

Pour l'analyse des simulations, les percentiles extrêmes (les 10 % les plus rapides et les 10 % les plus lents) sont exclus afin d'éviter les biais d'interprétation. Cette méthode permet d'identifier que 50% des trams sont souvent à l'heure (partie bleue moins visible sur la Figure 9 et superposé aux trams planifiés représentés en noir). Le niveau d'irrégularité de base peut être absorbé sans provoquer de dysfonctionnements majeurs. L'exploitation reste stable et maîtrisée.

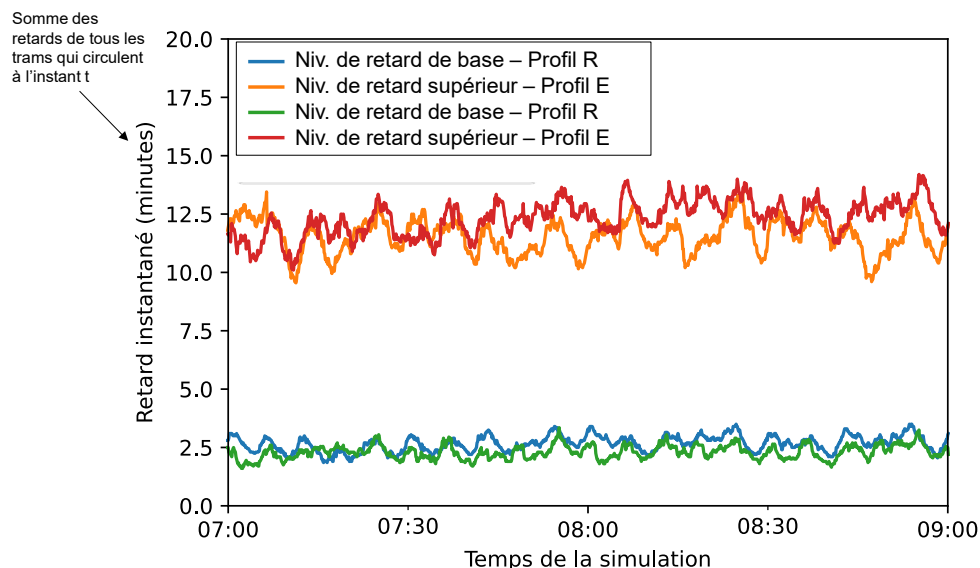


Figure 10: Propagation des retards dans le temps pour deux profils de vitesse et deux niveaux de retard

Le graphique ci-dessus représente le cumul des retards instantanés à chaque instant t de la simulation. Quatre situations ont été testées, en combinant deux niveaux de retard (retard de base et supérieur, voir paragraphe 4.1) avec deux profils de vitesse (profil recommandé et exceptionnel, voir paragraphe 3.1).

Cette représentation montre qu'aucune des simulations ne diverge même avec un niveau de retard majoré. Les retards, qu'ils soient de niveau de base ou supérieur, sont gérés sans dérive (sans augmentation de la quantité de retard instantané dans le temps), et ce pour les deux profils de vitesse testés.

Au final, les tests de robustesse aléatoires confirment que la ponctualité globale reste similaire entre les deux jeux de paramètres. Malgré l'injection de multiples retards, les niveaux de perturbation injectées — de base comme majoré — sont absorbés efficacement. L'horaire peut donc être considéré comme robuste dans les conditions d'exploitation simulées.

5 Conclusion et perspectives

L'établissement de l'horaire de cette ligne a représenté un défi majeur, car il s'agit d'un projet de création ex nihilo d'un réseau de tram nouveau en Suisse et pour les tl : c'est la première ligne de tram à voie normale en Suisse, exploitée

avec un matériel roulant inédit, et les tl, historiquement spécialisés dans l'exploitation du trolleybus, du bus, et du métro abordent ici pour la première fois l'exploitation d'une ligne de tramway.

Dans ce contexte, de nombreuses hypothèses ont dû être formulées, et des marges ont été intégrées de manière prudente afin d'assurer la faisabilité de l'exploitation dès la mise en service. Le calcul du temps de parcours a représenté un enjeu central, puisqu'il conditionne directement l'horaire et donc le dimensionnement du parc de véhicules nécessaires.

La ligne étant construite en deux étapes, il sera essentiel de confronter les hypothèses théoriques retenues lors de cette première étape à la réalité du terrain. Cette confrontation permettra, le cas échéant, d'ajuster et d'optimiser l'horaire pour la seconde étape du projet.

L'horaire établi présente une structure robuste. Les marges intégrées dans les temps de parcours devraient permettre d'absorber les aléas liés à l'exploitation, en assurant un service régulier. Il est toutefois probable que la ligne connaisse une période de rodage, nécessaire pour affiner progressivement les réglages et confirmer les choix effectués lors de la planification.

La démarche, les méthodes et outils appliqués dans cette étude montrent l'importance de la planification en amont de l'horaire sur la base de données et paramètres solides et de la vérification de la robustesse de l'horaire pour des perturbations variées couvrant un large spectre de situations envisageables afin d'assurer la faisabilité de l'exploitation et la qualité du service offert. En ce sens, malgré les spécificités de ce projet, cette étude montre l'intérêt de la démarche pour tout type de projet de développement de réseau de tramway.