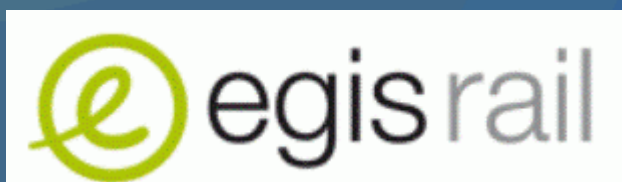

Rapport de stage individuel

5^{ème} année

Ingénieur en exploitation

Egis Rail

170, avenue Thiers, 69006 Lyon



Tuteur entreprise :

François Brousseau

Ingénieur exploitation

Tuteur académique :

Kamal Serrhini

Côme Geoffray

IUT

2021-2022

Table des matières

Présentation de la structure d'accueil	3
Présentation des missions du stage	4
Déroulé des missions.....	5
Première mission : Réalisation d'une fiche méthodologique sur l'exploitation du tramway en site banal	5
Recherche documentaire	5
PTV VISSIM: un logiciel de simulation dynamique à l'échelle microscopique	6
Modélisation d'un site banal réel.....	6
Résultats obtenus	8
Conclusion	11
Seconde mission: Amélioration d'un outil maison.....	12
Présentation de l'outil	12
Les difficultés liées à l'outil GRASIL	13
Conclusion	14
Troisième mission : appui aux équipes du pôle Études Fonctionnelles et Exploitation.	15
NANTES.....	15
NICE	18
Ligne Nouvelle Paris-Normandie	20
Light Rail Transit à Be'er Sheva	21
Le métro du Caire	24
Un début assez lent	26
Un stage très technique	27
Une seconde mission déstabilisante	27
Conclusion	28
Bibliographie.....	29
ANNEXE 1 :	30

Présentation de la structure d'accueil

L'entreprise Egis Rail est une filiale d'Egis, un grand groupe international spécialisé dans l'ingénierie civile, le conseil, l'exploitation ou le montage de projets. Ce gigantesque représente de plus de 17 000 collaborateurs répartis dans une centaine de pays différents et possède plusieurs filiales (Egis Conseil, Egis Ville, Route et Mobilités...). Les diverses sociétés du groupe agissent ainsi sur l'ensemble des domaines de l'ingénierie des transports ainsi que d'autres domaines d'ingénierie civile pour un total actuel de neuf grands domaines d'activités : Aviation, Transport routier, Transport ferroviaire, Transports urbains, Transport maritime et fluvial, Énergie, Eau, Bâtiments et Villes. On retrouve la répartition de ces activités en *figure 1*.

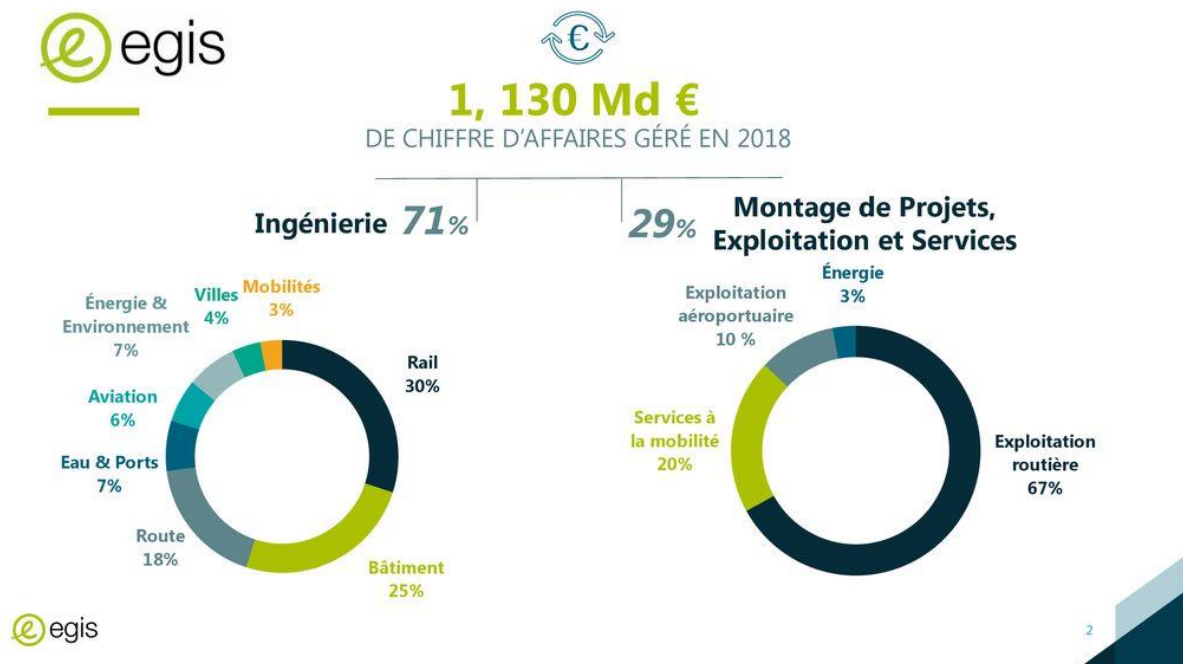


FIGURE 1: REPARTITION DU CHIFFRE D'AFFAIRE D'EGIS

La Business Unit Rail, quant à elle, se focalise uniquement sur l'ingénierie des transports urbains et ferroviaires (tramways, voie ferrées, métros, BHNS, transport par câble...), en intervenant à tous les stades des projets. Le siège social d'Egis rail est situé à Lyon, dans le 6^{ème} arrondissement. La société à l'heure actuelle s'intéresse autant aux marchés intérieurs qu'internationaux, avec des projets en Égypte, en Israël ou même en Serbie. Ainsi, depuis sa création, c'est un total de plus de 350 projets qui ont vu le jour grâce à Egis rail en France et à l'international.

Mon stage a pris place au sein de la Direction Conseil & Études Amont et plus précisément dans les Études Fonctionnelles & Exploitation qui ont pour rôle d'accompagner les projets dans leurs premières phases en fournissant des conseils sur le choix du tracé, les performances envisageables ou encore le budget lié au projet.

Présentation des missions du stage

Le stage ne comportait pas une seule mission directrice mais était divisé en deux grandes parties réparties de la façon suivante : 70% du temps à aider les équipes EFE sur leurs projets en cours pour 30% du temps passé à travailler sur de la recherche et développement. La recherche et développement consacrée à mon stage comportait deux missions.

La première était de produire une fiche méthodologique sur l'exploitation du tramway en site banal. Un site banal est défini comme un site de tramway où ce dernier évolue au sein de la circulation générale. En effet, le sujet du site banal intervient régulièrement dans des situations où l'on envisage de faire passer un tramway dans une ou des rues trop étroite(s) pour installer un site propre (un site propre consiste en un site tramway isolé de la circulation générale). Globalement, le site banal est une alternative peu utilisée en France à la voie unique qui pose de fortes contraintes d'exploitation par nature. Il s'agissait donc ici de démystifier le sujet et d'apporter dans un document synthétique toutes les informations nécessaires à la compréhension des problèmes soulevés par cette option.

La seconde mission proposée au cours de ce stage était d'améliorer l'outil maison "GRASIL" initialement conçu sur Excel VBA. Cet outil permet de créer des graphiques espace/temps au moyen d'entrants simples mais nombreux. C'est un outil Excel très descriptif utilisé principalement pour illustrer les projets. A mon arrivée, on me l'a présenté comme étant trop lent à actualiser et incapable de fournir de grands graphes espace/temps à l'échelle d'une journée entière. Il s'agissait alors de résoudre ces quelques problèmes.

Finalement, la mission la plus importante, elle-même divisée en de nombreuses interventions a été l'appui aux équipes EFE sur leurs projets. Des interventions furent ainsi réalisées sur de nombreux projets en cours comme le métro de Belgrad, le métro du Caire, la nouvelle ligne de tramway Nantaise, les futures lignes T4 et T5 du tramway de Nice, un projet de « Light Rail Transit » dans la ville de Be'er Sheva en Israël, la nouvelle ligne de tramway Lilloise ou encore des aides ponctuelles pour le projet de la Nouvelle Ligne Paris-Normandie.

Déroulé des missions

Première mission : Réalisation d'une fiche méthodologique sur l'exploitation du tramway en site banal.

La réalisation de la fiche a été divisée en quatre grandes étapes réparties tout au cours de ce stage. Après avoir reçu cette première mission, il a d'abord fallu effectuer une lecture documentaire sur le sujet, en particulier d'un dossier du CEREMA produit en 2017¹ sur le sujet et fournissant une première bonne approche de ce qu'on pourrait établir comme "l'état de l'art" en France sur le sujet.

Recherche documentaire

Les documents du CEREMA sont riches en exemples concrets et permettent de saisir les points particuliers à prendre en compte lors de la conception d'un site banal de la sécurité des différents usagers aux diverses configurations de site banal envisageables... Ces documents proposaient de même une première limitation au volume de trafic journalier pour les sites banalisés. Cette question est tout particulièrement importante car elle permet de traiter rapidement les discussions quant à la création éventuelle d'un site banal. On peut ainsi définir le cadre nécessaire au bon fonctionnement de ce genre de sites. Au-delà de ça, ces documents contiennent de nombreux cas détaillés et abondamment documentés sur la configuration des sites, l'insertion ou même l'accidentologie. A ce stade de la recherche, nous commençons déjà à avoir une suffisamment bonne vue d'ensemble pour commencer la rédaction de la note. Le plan de la note et le gros du texte a donc été rédigé très tôt dans la progression de la mission.

Nous avons ensuite passé une phase d'entretiens avec les différents membres de l'équipe, afin de collecter leurs retours d'expérience sur le sujet. Toutefois, il s'est avéré que les expériences disponibles étaient très limitées dans le domaine. Ces entretiens ont – au final - plutôt fourni des pistes de recherches pour la suite. Dans un second temps, une seconde recherche documentaire sur internet a été entamée afin d'aller chercher d'autres documents traitant des tramways en site banal. Peu de documents ² théoriques réellement pertinents ont été dénichés mais certaines simulations

¹ CEREMA Direction territoriale Centre-Est, « Circulation des tramways en site banal PHASE 1 », 26 juin 2014, https://www.cerema.fr/system/files/documents/2017/10/CEREMA_DterCE_DCAP_Tram_Site_Banal_PHASE1_Rapport_VF_26mai2014_opt_cle1aa2c4.pdf; CEREMA Direction territoriale Centre-Est, « Circulation des tramways en site banal, L'exemple d'Angers », décembre 2015, https://www.cerema.fr/system/files/documents/2017/10/Tram_en_site_banal_Angers_cle2881e4.pdf; CEREMA Direction territoriale Centre-Est, « Circulation des tramways en site banal, L'exemple de St Étienne », décembre 2015, <https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/2087/#dr-viewer>; CEREMA Direction territoriale Est, « Circulation des tramways en site banal, L'exemple de Reims », décembre 2015, https://www.cerema.fr/system/files/documents/2017/10/Tram_en_site_banal_Reims_cle5cd42e.pdf; CEREMA Direction territoriale Normandie-Centre, « Circulation des tramways en site banal, L'exemple du Mans », décembre 2015, https://www.cerema.fr/system/files/documents/2017/10/Tram_en_site_banal_LeMans_cle2f2999.pdf; CEREMA Direction territoriale Ouest, « Circulation des tramways en site banal, L'exemple de Nantes », avril 2016, https://doc.cerema.fr/default/digitalCollection/DigitalCollectionInlineDownloadHandler.ashx?parentDocumentId=2089&documentId=2090&_cb=20210720203723.

² UK Tram, « Tramway Principles & Guidance », janvier 2018, <https://uktram.com/wp-content/uploads/2018/07/Tramway-Principles-Guidance-Final-2.pdf>.

dynamiques³ ont permis d'étoffer la quantification du lien entre le volume de trafic journalier et la qualité de l'exploitation. Ces documents ont globalement soutenus les chiffres avancés par le CEREMA. L'un d'entre eux a aussi mis en avant l'importance de séparer les vélos du site banal⁴. Nous avons ainsi pu étoffer la fiche avec ces nouvelles informations. Suite à ça, mon tuteur en entreprise: monsieur François Brousseau a proposé une initiation au logiciel de simulation dynamique VISSIM pour simuler un site banal et ainsi en tirer notre propre quantification. L'objectif était alors de confronter nos résultats avec ceux du CEREMA et des autres sources de la documentation scientifique. Nous avons alors suivi une brève formation sur le logiciel.

PTV VISSIM: un logiciel de simulation dynamique à l'échelle microscopique

PTV VISSIM est un logiciel de simulation microscopique multimodale développé par Planung Transport Verkehr, une entreprise allemande spécialisée dans les services et logiciels pour la gestion du trafic et des transports. Le logiciel date de 1992 et permet de traiter une grande variété de problèmes de trafic urbain (synchronisation des feux, gestion des carrefours, réseau entier...). Le logiciel permet donc de créer un réseau, suivant ses propres règles personnalisables jusque dans les moindres détails. Ensuite, une simulation est paramétrée et il est possible d'observer évoluer les différents objets empruntant le réseau avant de récupérer les informations demandées au préalable dans des exports prenant la forme de tables .csv.

Modélisation d'un site banal réel

Tout d'abord, un bref protocole a été réalisé et proposé à François Brousseau, afin de convenir de ce qui serait fait et de ce qui importait réellement ou non. L'exercice consistait ensuite en la modélisation d'un site propre existant pour pouvoir ensuite mesurer l'impact sur l'exploitation de différents paramètres (principalement le volume de véhicules journalier et la fréquence du tramway). A cette fin, nous avons choisi parmi les sites détaillés par la documentation du CEREMA l'exemple qui semblait le plus complet. Après avoir hésité entre plusieurs sites, nous avons tranché avec François Brousseau pour le site banal de la ligne A du tramway d'Angers, rue de Létanduère. Ce très long site s'étend sur plus d'un kilomètre de long, propose deux stations et plusieurs profils en travers différents, dont un morceau intégralement en site propre. Il est de plus situé dans le centre de la ville d'Angers, près de la gare et accueille actuellement un volume de trafic journalier d'environ 1200véh/j/sens. D'après le CEREMA, le site fonctionne à l'heure actuelle très bien et ne présente pas de problèmes particuliers pour l'exploitation. Nous pouvions donc commencer à modéliser le site sur le logiciel VISSIM. Tout d'abord on a construit l'infrastructure: les routes/rails ainsi que les limitations de vitesse, les priorités et les stops. Ensuite, nous avons créé deux lignes de tramway, respectant une fonction gaussienne classique pour les retards. Ainsi, les tramways n'apparaîtront pas de manière tout à fait régulière aux extrémités du modèle, mais avec un temps d'écart compris entre 120 secondes d'avance et 120 secondes de retard. A ce stade, plusieurs hypothèses ont été prises afin d'orienter la suite et de simplifier le modèle:

- les carrefours seraient simulés par des stations: les carrefours croisés par le tramway étant tous des carrefours à feux, on savait alors que la priorité était donnée au tramway à chacun de ses passages. Dans cette configuration, il arrive toutefois que le tramway manque sa

³ Pell Frischmann, « Edgbaston Metro Extension Operational Microsimulation Modelling », novembre 2021; Duy Q.Nguyen-Phuoc et al., « Modelling the Direct Impact of Tram Operations on Traffic », octobre 2016, https://www.researchgate.net/publication/310020871_Modelling_the_Direct_Impact_of_Tram_Operations_on_Traffic.

⁴ {Citation}

fenêtre de passage. Le tramway doit alors s'arrêter et attendre au feu comme n'importe quel autre véhicule pendant un temps donné. Pour simuler ce comportement, une station ayant une faible probabilité de fonctionner est envisageable et permet d'éviter de paramétrer la signalisation lumineuse de tout le carrefour.

- Les simulations dureraient une heure, considérée comme l'heure de pointe. Qui plus est, seule l'heure de pointe importe réellement, étant donné que c'est durant cette dernière que l'impact sur l'exploitation est maximum. Il faut donc appliquer un coefficient aux volumes de véhicules journaliers pour obtenir celui de l'heure de pointe.



FIGURE 2: METHODE POUR COMPTER LES VEHICULES

- Ensuite, il s'agissait de définir comment le comptage des véhicules serait réalisé. Nous avons donc considéré qu'un véhicule est inclus dans le volume journalier du site banalisé dès lors qu'il parcourt le site entre deux intersections au minimum, selon le schéma de la *figure 2*.
- Les véhicules sont générés à chaque extrémité de voie coupant le site banal. Le volume total de véhicule est réparti entre tous les affluents de la rue de Létanduère.
- Pour ce qui est du comportement des véhicules, il faut comprendre que chaque instance de véhicule (chaque véhicule) possède sa propre "vitesse désirée", qui dépend de la limitation de vitesse (30km/h sur l'intégralité du site) et d'un facteur aléatoire. Ce facteur aléatoire suit une loi uniforme entre 30km/h et 35km/h. Les vélos suivent eux aussi le même type de lois, mais entre 15km/h et 20km/h.
- La composition des véhicules générés pour interagir avec le site banalisé est similaire à celle du site réel, suivant les informations de l'Agence d'Urbanisme locale.
- Enfin, il est décidé de manière tout à fait arbitraire d'effectuer une dizaine de simulations d'une durée d'une heure chacune pour chaque jeu de paramètres étudiés. Les paramètres à faire varier sont: le volume de véhicules généré, la fréquence de passage du tramway ainsi que la présence ou non de vélos dans la composition des véhicules.

Après avoir créé les générateurs de flux de véhicules, des premières simulations furent lancées. Après avoir réajusté quelques paramètres (notamment pour la collecte des données), les simulations finales sont elles aussi effectuées. Des volumes de véhicules journaliers allant de 1200 véh/j à 25000 véh/j furent examinés, pour des intervalles de passage compris entre 3 minutes et 9 minutes (le site réel propose un intervalle minimum de 6 minutes en heure de pointe). Un total de 33 jeux de paramètres est étudié, selon le tableau 1 ci-dessous.

Intervalle de passage \ Volume	0	600 véh	1200 véh	2400 véh	5000 véh	7500 véh	10000 véh	11000 véh	12000 véh	13000 véh	14000 véh	15000 véh	16000 véh	17000 véh	18000 véh	19000 véh	20000 véh	25000 véh
3 minutes					✓	✓	✓		✓		✓							
4 minutes					✓	✓	✓		✓		✓							
6 minutes	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
9 minutes					✓	✓	✓		✓		✓							

TABEAU 1: PARAMETRES DES SIMULATIONS

Résultats obtenus

Nous avons décidé de sortir les chiffres sur Excel, afin d'effectuer leur traitement répétitif simplement et de les mettre facilement en forme. Les retards sont toujours considérés par rapport à un trajet 'optimal' déterminé par simulation en supprimant la circulation régulière. Ce temps optimal s'avère ne pas être le temps minimal en raison des temps d'arrêts aux feux (indépendants de la présence de circulation générale ou non). De plus, les temps moyens proposés par les 10 simulations pour chaque jeu de paramètres semblent aussi ne pas être stabilisés. Après coup, j'estime qu'un bref calcul de foisonnement aurait pu être utile ici afin de déterminer le nombre de simulations à effectuer pour chaque jeu de paramètres. Toutefois, ces simulations étant coûteuses en temps, leur nombre est resté très limité. Nous avons produit les résultats suivants:

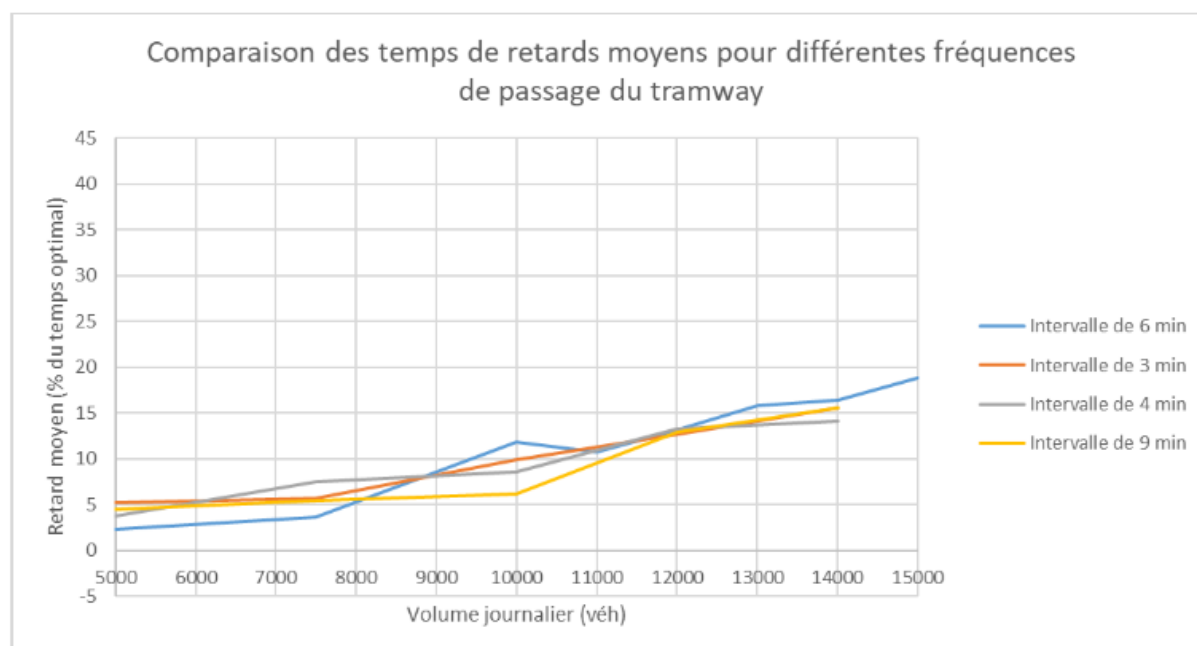


FIGURE 3: TEMPS DE RETARDS EN FONCTION DE LA FREQUENCE ET DU VOLUME

Grâce à la *figure 3* ci-dessus, on peut rapidement éliminer l'impact supposé de la fréquence du tramway sur le retard moyen. En effet, les différentes valeurs testées s'entremêlent sans plus de cohérence. Bien que le trop faible nombre de simulation pourrait expliquer cette irrégularité, on conclut qu'une augmentation de la fréquence des tramways ne correspond qu'à une très légère

augmentation du volume de véhicules. Il paraît donc logique que cela n'impacte pas les retards des tramways. Ces résultats ne sont donc pas surprenants mais ce paramètre méritait d'être étudié.

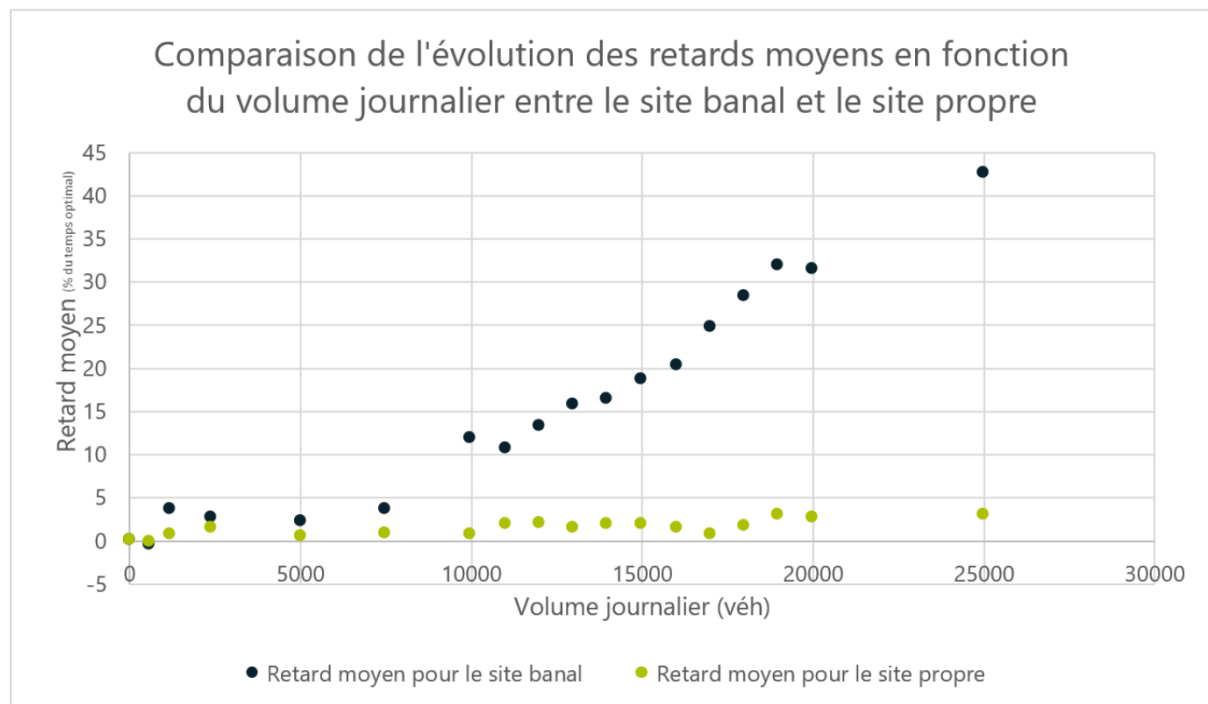


FIGURE 4: RETARDS MOYENS EN FONCTION DU VOLUME

La *figure 4* est de loin la plus intéressante. Tout d'abord, elle nous permet de confirmer et d'attester l'existence de l'impact de la circulation générale sur l'exploitation. Le site propre, bien qu'empruntant les mêmes carrefours et croisant les mêmes voies, garde un retard moyen quasiment stable malgré l'augmentation du volume de véhicules injectés. Le tramway en site banal, lui, subit une forte augmentation des retards dès le passage des 10000 véh/j (en tout cas entre 7500 et 10000 véh/j). Au-delà, le retard moyen augmente de façon quasi linéaire avec le volume de véhicules. La création d'un tel site banalisé pénaliserait donc la vitesse du tramway. Qui plus est, il s'avère que le seuil de 7500 véh/j est proche de celui retenu par le CEREMA (5000 véh/j). Ces résultats ont bienvenus étant donné que l'on cherchait ici à confronter ce seuil empirique du CEREMA à nos propres résultats.

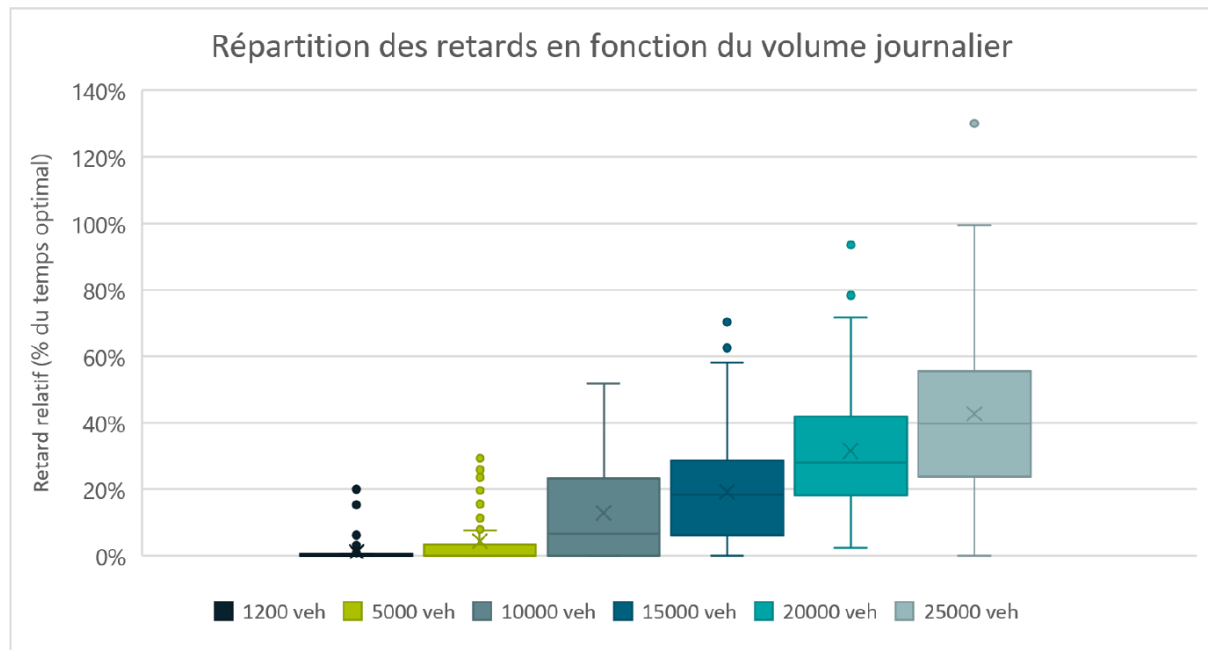


FIGURE 5: GRAPHIQUE EN BOITES

La figure 5 nous permet d'affiner les résultats précédents en présentant les répartitions au moyen de boîtes. On peut ainsi confirmer le choix d'un seuil inférieur à 10 000 véh/j étant donné la forte dispersion des retards constatés pour ce volume particulier. Après coup, je constate que ce graphe souffre du manque d'une boîte représentant un volume de 7500 véh, ce qui aurait pu permettre de mieux trancher entre le seuil de 5000 véh et celui de 7500 véh. Toutefois, cette fiche conserve un aspect indicatif et ne se veut pas injonctive. Les informations qu'elle contient serviront pour les réunions et discussions tenues avec les clients lorsque le sujet du site banal entre en jeu. Nous ne cherchons donc pas ici à donner un seuil fixe mais bien à étoffer les données disponibles sur le sujet.

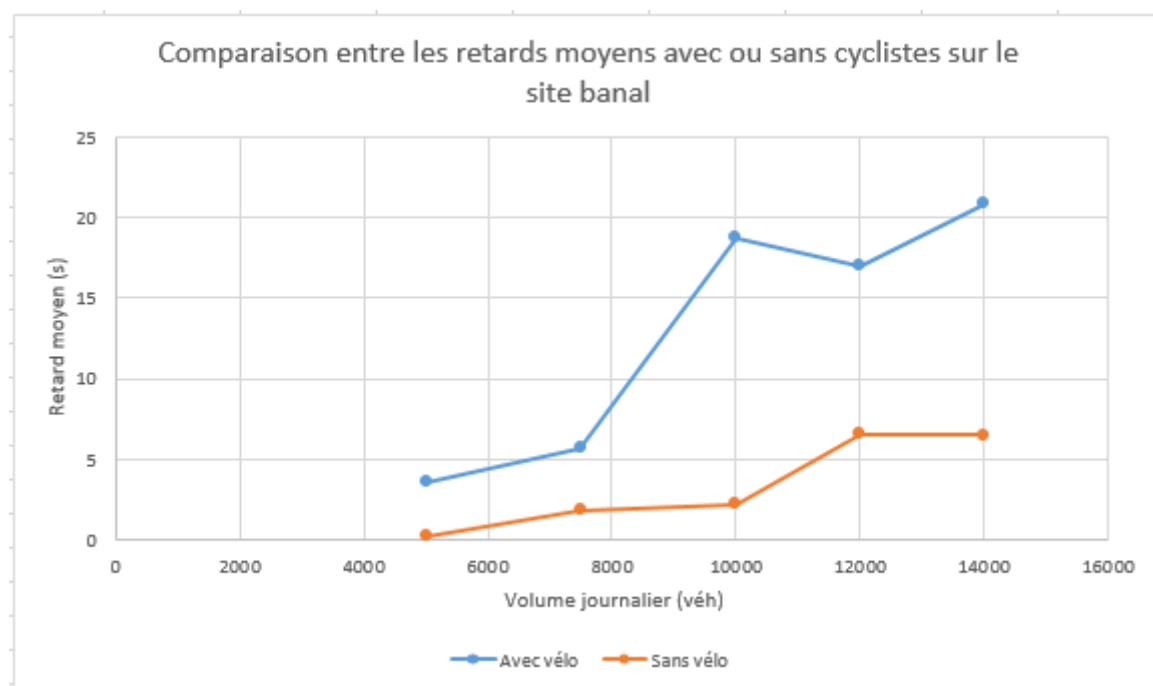


FIGURE 6: COMPARAISON ENTRE UN SITE ACCEPTANT LES VELOS OU NON

La *figure 6*, en page précédente est le dernier graphique tiré de nos simulations. En effet, l'étude de Pell Frischmann semblait pointer du doigt la présence de vélo sur le site banal comme un facteur impactant fortement l'exploitation. C'est pourquoi nous nous sommes intéressé à la question et avons produit la *figure 6*. On voit bien sur cette dernière un écart notable sur les quelques volumes testés entre un site accueillant les vélos et un ne les accueillant pas. Nous pourrions alors fortement recommander de créer une piste cyclable en parallèle des sites banals afin de faciliter l'exploitation. Toutefois, cela touche de près aux limites du modèle de simulation dynamique. En effet, dans la réalité, un vélo qui verrait arriver un tramway derrière lui ou qui le bloquerait dans toute autre situation aurait tendance naturellement à se pénaliser, quitte à monter brièvement sur le trottoir afin de céder la priorité à la rame de tramway. On n'imagine pas un utilisateur de vélo continuer son chemin en pédalant tranquillement devant le tramway qui « piétinerait » derrière. Toutefois, le logiciel VISSIM ne considère pas cette possibilité et considère plus ou moins les vélos comme de simples voitures (si ce n'est qu'il permet d'en faire rouler plusieurs côtes à côtes). C'est la réflexion que nous avons tenue avec François Brousseau en observant le comportement de la simulation et les résultats présentés précédemment. Ainsi, ce graphe n'a pas été retenu pour la fiche méthodologique, bien qu'il soit à première vue marquants.

Conclusion

Pour conclure sur le sujet, cette fiche fournit donc la synthèse d'une recherche documentaire enrichie d'une modélisation "maison" confrontant les autres simulations trouvées dans la littérature. C'est un document synthétique, schématique et rapide à examiner permettant aux ingénieurs en exploitation de s'approprier brièvement un sujet avec lequel ils ne se sont majoritairement pas familiers. Une version - pas la dernière malheureusement - de cette fiche est disponible en ANNEXE 1.

Seconde mission: Amélioration d'un outil maison

Cette seconde mission de recherche et développement m'a été confiée dès le début du stage, peu après la mission précédente. La commande était assez vague car il s'agissait "d'améliorer" ou de "mettre à jour" un outil maison développé il y a une vingtaine d'années déjà. La première action dans le cadre de cette mission fut donc de découvrir cet outil. Cette découverte fut concrète grâce à François Brousseau qui avait besoin d'une production via cet outil pour le projet de ligne T4 à Nice [...].

Présentation de l'outil

L'outil GRASIL est un outil de tracé de graphiques espace/temps en sillons. Il permet de représenter le passage des rames de tramway sur une plage de temps donnée de manière visuelle, et d'identifier d'un simple coup d'œil de potentiels conflits. De plus, il sert naturellement pour les études Amont afin de créer des illustrations de la marche des tramways, décrivant ainsi l'exploitation des voies. Cet outil a été développé sur Excel VBA, un logiciel de macros. Au moyen d'une description intégrale de l'objet à tracer (description de la ligne, de la marche des tramways sur cette ligne, du départ des rames, des stations desservies...) rentrée dans des pages dédiées du classeur Excel, l'outil affiche un graphe précis à la seconde près fortement personnalisable. De plus, un module spécial permet de dessiner un plan de voies décrit dans une page Excel au moyen de caractères spéciaux. Ce plan de voies se dessine alors à côté du graphique espace/temps à la même l'échelle et permet de suivre au mieux le parcours des tramways ou des trains.

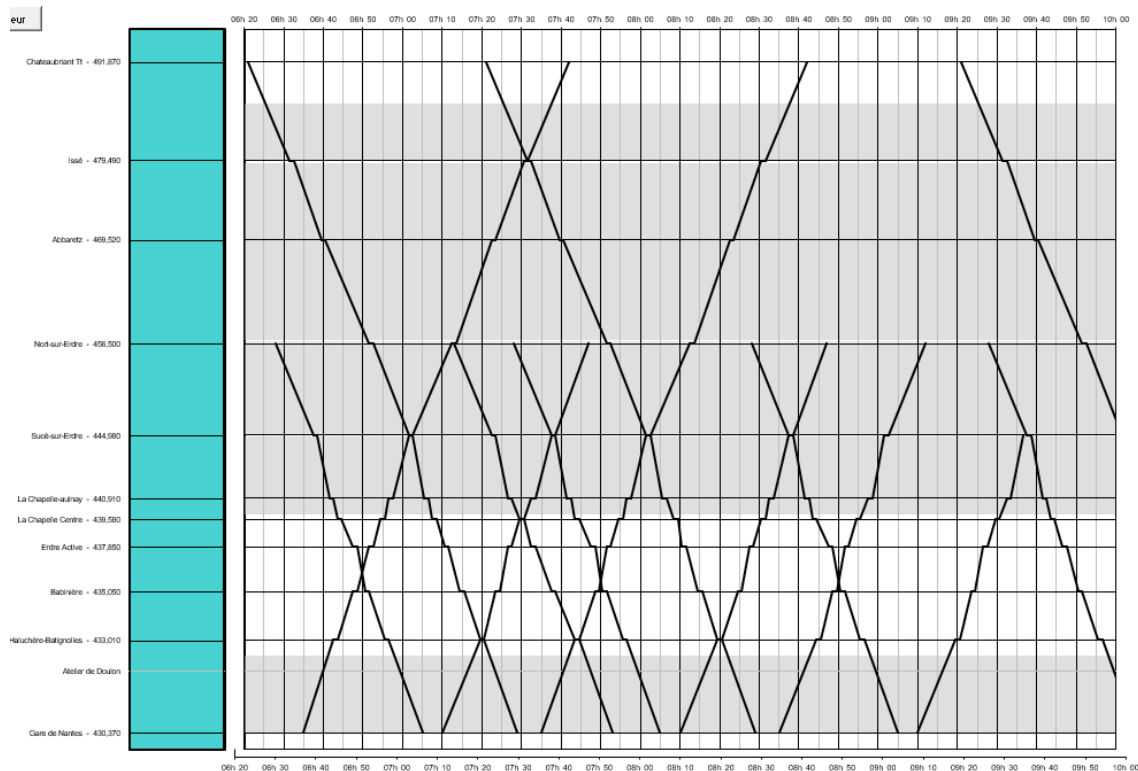


FIGURE 7: EXEMPLE DE GRAPHE ESPACE/TEMPS PRODUIT SUR GRASIL

Sur la *figure 7* ci-dessus produite avec GRASIL, (dans le cadre d'un appel d'Offre visant à réduire les temps de parcours en train entre la gare de Nantes et Châteaubriant.) on voit les sillons de passage des trains entre 6h20 et 10h en semaine. Aucun plan de voie n'est dessiné ici.

Dans le cas contraire, il se serait situé dans le rectangle bleu situé à gauche du graphique. Pour conclure sur la présentation de l'outil, on peut dire que c'est un outil tout à fait fonctionnel en l'état.

Les difficultés liées à l'outil GRASIL

Lors de la première réunion avec le concepteur originel de l'outil : monsieur Ian Wilson (en effet GRASIL a depuis été retravaillé plusieurs fois par des stagiaires notamment), deux problèmes principaux sont apparus : la lenteur de l'outil ainsi que l'impossibilité de réaliser de grands graphes couvrant une journée entière. Ces problèmes étaient en réalité liés en ça que la seconde problématique découlait directement de la première : la lenteur de l'outil.

GRASIL est un outil qui rencontre de nombreux freins à son évolution. En effet, en parcourant les pages de classeur ainsi que le code de l'outil, il m'est apparu de nombreux points durs : tout d'abord, une partie non négligeable de l'outil a été conçue grâce à l'outil macro d'excel, et non directement sous VBA. Ce point pose problème étant donné que cet outil bien que fonctionnel, code de manière irrégulière les actions et y ajoute tout un tas de lignes de "bruit" inutiles au bon fonctionnement du programme. De plus, cette façon de faire emploie des méthodes inutilement complexes rendant la compréhension du code difficile (pour simple exemple, attribuer à une case la valeur d'une autre case nécessitera l'utilisation de fonction de sélection, fera appel au presse papier et finalement utilisera une fonction de désélection. Ici, une simple attribution de valeur tenant sur une ligne est en réalité suffisante...). Ensuite, il est bon de noter que plusieurs personnes ont eu l'occasion de travailler sur l'outil entre 2002 et aujourd'hui (le dernier datant d'il y a environ 6 ans). Ainsi, les logiques et pratiques changent selon les personnes et l'on retrouve ainsi de nombreuses redondances, bouts de codes identiques situés à différents endroits, fonctions non terminées et non employées ou encore des objets Excel obsolètes (un formulaire utilisateur faisant appel à un autre formulaire fantôme, inaccessible par l'utilisateur et utilisé que partiellement...). Enfin, aucune documentation concernant l'outil n'existe : ni dans le code, ni dans un fichier à part. Bref, il est très difficile de se représenter l'outil dans son intégralité, même schématiquement. Pour ce qui est des problèmes rencontrés en utilisant l'outil, il apparaît que ce dernier met beaucoup de temps à créer le graphe en raison des limites d'Excel en général. Excel n'est - selon moi - pas adapté à une telle utilisation et l'outil donne déjà tout ce qu'il peut.

Après ce premier diagnostic, on propose de refondre l'outil sur python par exemple, afin d'éviter les latences et de permettre la création de vastes graphiques sans le moindre problème. Deux versions du cœur du programme sont codées utilisant des entrées différentes (l'une employant exactement les mêmes entrées que précédemment et l'autre, plus parcimonieuse n'emploie que "le minimum nécessaire"). Un de ces programmes a ainsi été présenté à l'équipe lors d'une réunion du département. Toutefois, lors de cette réunion, de nombreuses informations sont venues démotiver la création d'un nouvel outil GRASIL : premièrement, l'outil partage ses fonctions avec un autre outil plus complexe nommé "Viriato", visiblement apprécié et utilisé par l'équipe des Études Fonctionnelles et Exploitation. Ensuite, il apparaît que GRASIL n'est utilisé que rarement et pas nécessairement dans son intégralité. Par exemple, la fonctionnalité permettant de dessiner un plan de voies n'est utilisé que par 3 membres de l'équipe qui la juge indispensable.

Cette réunion confirme ainsi que si l'outil venait à être repris dans son intégralité, toutes ses fonctionnalités devraient être portées, même si ces dernières ne sont que très peu utilisées. Une réflexion avec l'équipe est donc entamée sur l'avenir de l'outil et le développement est laissé de côté. Plusieurs voies sont envisagées : l'abandon du développement du logiciel, la poursuite sur VBA grâce à une personne compétente dans le sujet ou encore la refonte de l'outil sur python. Après avoir proposé un sondage à tous les membres de l'équipe sur leur utilisation des outils GRASIL et Viriato, le choix concernant l'avenir demeure à l'heure actuelle encore incertain.

Conclusion

Pour conclure sur cette mission, aucun code fini n'a été délivré et seulement peu de temps a été investi au total pour cette seconde mission sur l'outil GRASIL. Le sondage auprès de l'équipe a révélé que tous les membres de l'équipe ayant répondu se considèrent comme débutants sur Excel VBA, que les trois quarts de l'équipe utilisent GRASIL et que ces derniers l'utilisent en majorité pour des lignes de tramways et de métros. Il montre aussi que deux tiers de l'équipe utilise Viriato, plutôt pour des lignes de train. Bien que rien n'ait encore été tranché concernant l'avenir de GRASIL, nous avons tout de même mis en lumière au cours de cette mission les différentes options pour l'avenir de l'outil et recueilli le ressenti de l'équipe sur le sujet. Dans ces conditions, les décisions qui seront prises par la suite ne seront que meilleures.

Troisième mission : appui aux équipes du pôle Études Fonctionnelles et Exploitation.

Cette dernière mission a occupé la majorité du temps de ce stage. Les ingénieurs des Études Fonctionnelles et Exploitation travaillent constamment sur plusieurs projets en même temps. Ces projets pouvant s'établir sur plusieurs années ne sont pas suivis tout du long par les ingénieurs mais requièrent leur intervention régulière dans le cadre de productions représentant entre quelques semaines à quelques mois de travail tout au plus. La charge de travail est alors souvent irrégulière et c'est dans ce cadre-là que s'inscrit cette mission. Nous avons donc produit des tâches techniques tout au long de ce stage pour les différentes études en cours. Quelques-unes de ces tâches seront décrites dans ce rapport bien qu'il ne s'agisse pas ici de tenir une liste de courses.

NANTES

La ville de Nantes projette la création de deux nouvelles lignes de transports en Commun desservant l'Île de Nantes, l'une la traversant de long en large et l'autre suivant un axe Nord-Sud, coupant l'Île à l'Ouest de la ligne 2 actuelle. Les dernières évolutions du projet ont conduit au choix du mode: Bus à Haut Niveau de Service (BHNS) pour traverser l'Île de Nantes de part en part et un tramway pour l'axe Nord-Sud. Le tramway rejoindra ainsi l'infrastructure existante entre les stations « Chantiers Navals » et « Memorial ». On intervient dans le cadre de cette mission sur la nouvelle ligne de tramway qui nécessite donc la création d'une nouvelle infrastructure entre les stations Mémorial (cette station existe déjà) et Hôtel de Ville de Rezé. Grâce aux tracés fournis par les architectes, nous avons pu dimensionner la flotte de véhicules nécessaires pour cette nouvelle ligne. La flotte de véhicules dépend directement du temps de parcours de la ligne ainsi que de la fréquence de passage du tramway en heure de pointe. Elle se décompose en deux parties: flotte en ligne (le nombre de rames circulant sur la ligne à l'heure de pointe) et réserve (la réserve est constituée d'une réserve de maintenance et d'une réserve d'exploitation). Il fallait donc calculer le temps de parcours de la ligne. Pour cela, l'équipe des Études Fonctionnelles et Exploitation dispose d'un logiciel développé en interne nommé "SimOne" simulant la marche d'un tramway ou de n'importe quel autre matériel roulant. Ce logiciel est très précis et nécessite donc de nombreux entrants :

- Description de la ligne:
 - positionnement des stations
 - positionnement et description des courbes
 - positionnement et description des déclivités
 - positionnement de tout élément pouvant limiter la vitesse (traversées piétonnes, appareils de voies, carrefours...)
- Description du matériel roulant
- Description des trajets à simuler

Le tramway circulant dans les rues dans un environnement non protégé, il faut encore ensuite proposer des hypothèses de limitation de vitesse. Ces limitations de vitesses sont liées à l'environnement urbain rencontré par le tramway. Une illustration de ces hypothèses en page suivante (*figure 8*) permet de communiquer simplement avec le client et de vérifier si les hypothèses prises sont réalistes.

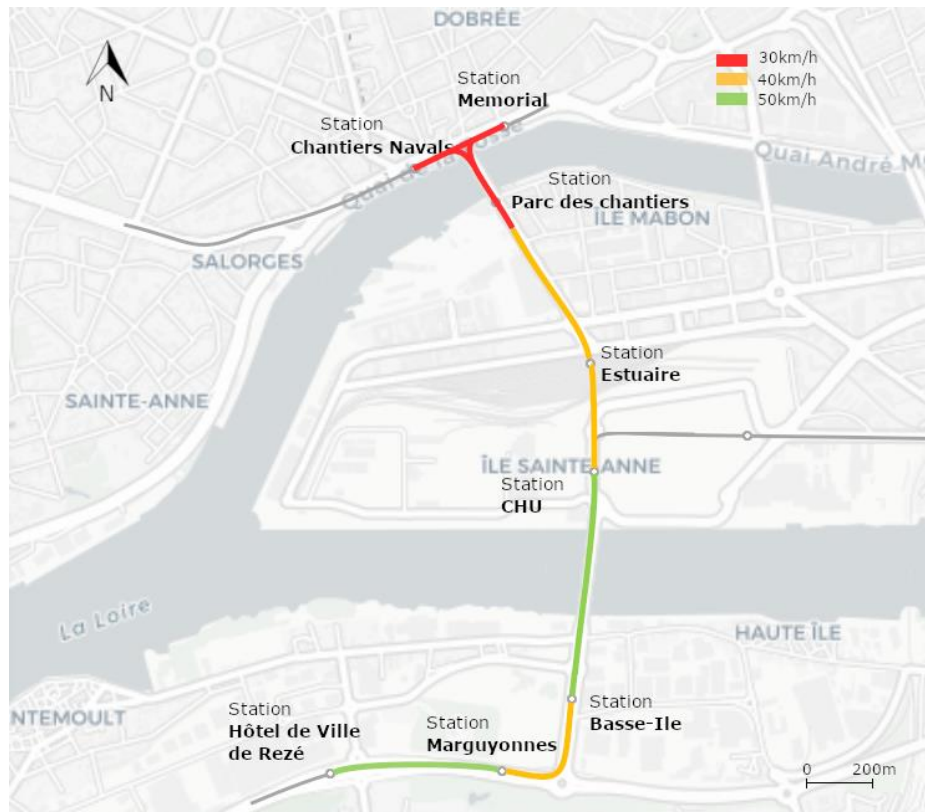


FIGURE 8: CARTE DES HYPOTHESES DE VITESSES LIEES A L'ENVIRONNEMENT

Après avoir posé nos hypothèses et collecté auprès des différents interlocuteurs toutes les données nécessaires, on peut les mettre en forme et simuler la marche de notre tramway. Cela se traduit par un graphique de la vitesse en fonction du temps ou de la position sur la ligne. Suite à ça, les hypothèses de vitesses sont revues et lissées afin de maintenir des paliers de vitesses conséquents et agréables pour les passagers. On obtient enfin une simulation de marche permettant de mettre en évidence les points durs du tracé comme en *figure 9* ci-dessous.

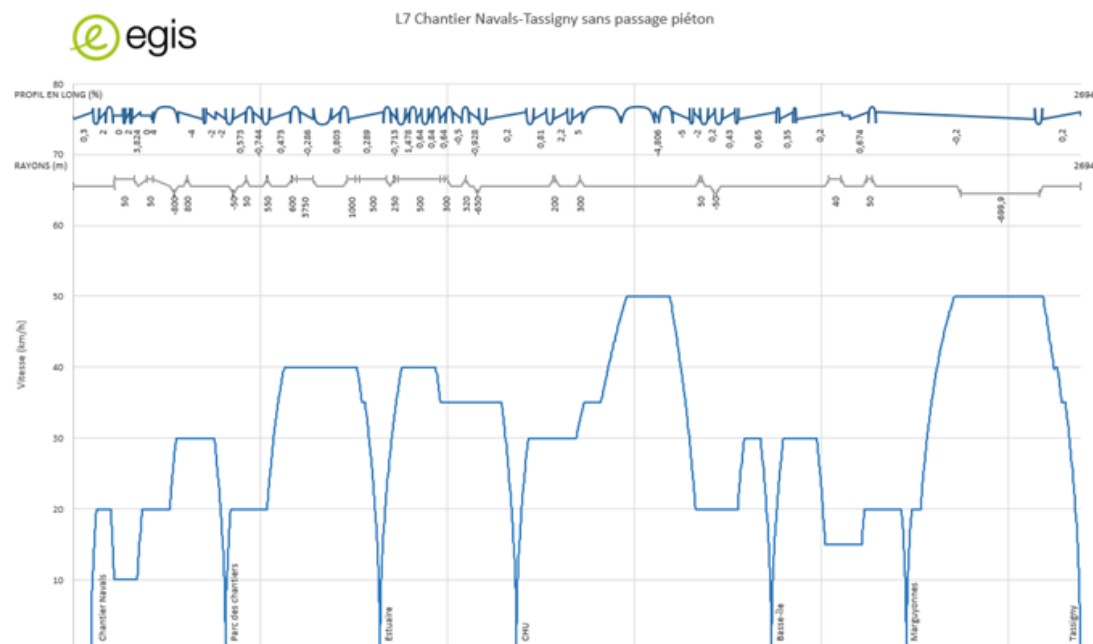


FIGURE 9: SIMULATION DE MARCHÉ SOUS SIMONE

On retrouve sur ce type de graphiques -produit sous Excel avec les données issues de SimOne- la vitesse du matériel roulant tout au long de son parcours ainsi qu'un suivi des caractéristiques géométriques de la ligne permettant de comprendre au mieux le trajet du tram et d'expliquer les limitations de vitesses au client. Dans cette même optique, on peut rajouter des éléments ponctuels sur le graphique afin d'expliquer encore plus précisément les résultats obtenus. Les résultats de la simulation sont recueillis en parallèle dans un tableau synthétique afin d'y ajouter les dernières modifications. Plusieurs éléments ne sont pas encore pris en compte à ce stade comme le temps perdu aux carrefours.

Lorsqu'un tramway rencontre un carrefour, l'objectif est toujours de lui donner la priorité. Pour ce faire, la très grande majorité des carrefours traversés par un tramway sont équipés de feux de circulation tricolores sensibles au passage du tramway, ce qui lui permet donc de prendre la priorité systématiquement et de ne pas perdre de temps. Toutefois, ce système n'est pas infallible et il arrive que le tramway rencontre un feu rouge en arrivant sur une intersection. Ce temps perdu est comptabilisé par un forfait ajouté pour chaque carrefour à feu traversé.

La simulation via le logiciel SimOne produit des résultats dits de "marche tendue" car les limitations de vitesses, accélérations et décélérations sont prises au pied de la lettre par le véhicule simulé. Toutefois, dans le monde réel, les tramways ne sont pas automatisés et fonctionnent en "conduite à vue". L'être humain n'étant pas aussi régulier et précis que notre description du trajet, un "temps de détente" compris entre 5% et 15% de la marche tendue est donc ajouté aux résultats précédents. Enfin, les temps d'arrêts aux stations, fixés en fonction de la fréquentation des arrêts sont ajoutés pour compléter le calcul de temps de parcours. On obtient alors le tableau 2.

N°	Station	PK tête de train (m)	Distance interstation (m)	Nombre de carrefour à feux	Marche tendue (s)	Détente (s)	Temps perdu aux carrefours à feux (s)	Temps de Parcours Interstation Total (s)	Vitesse Interstation (km/h)	Temps d'arrêt en station (s)	Arrivée (hh:mm:ss)	Départ (hh:mm:ss)
1	Chantier Navals	48	-	-	-	-	-	-	-	30	-	00:00:00
2	Parc des chantiers	407	359	1	75	3,7	3	81	15,9	20	00:01:21	00:01:41
3	Estuaire	820	413	1	59	3,0	2	64	23,1	20	00:02:46	00:03:06
4	CHU	1185	365	2	46	2,3	5	53	24,7	30	00:03:59	00:04:29
5	Basse-île	1867	682	2	86	4,3	5	96	25,6	30	00:06:05	00:06:35
6	Marguyonnes	2228	361	2	70	3,5	5	78	16,6	20	00:07:53	00:08:13
7	Tassigny	2691	463	1	49	2,4	3	54	30,7	20	00:09:07	-

TABLEAU 2: TABLE DE CALCUL DES TEMPS DE PARCOURS

C'est seulement à partir de ce dernier document que l'on peut ensuite dimensionner la flotte de véhicules nécessaires à l'exploitation de la nouvelle ligne de tramway. Pour conclure sur cette tâche, on constate ici que le dimensionnement de flotte est un point clé pour tous les projets de transports en commun et bien qu'étant techniquement simple à calculer, il nécessite une grande rigueur.

Pour conclure, ces résultats ainsi que les nombreuses hypothèses de calculs retenues sont consignées dans un document retourné au client. Ces documents s'adressant à des personnes externes au métier sont explicités aux mieux et illustrés de schémas de principes à des fins pédagogiques et afin de favoriser la confiance en nos résultats.

NICE

La ville de Nice planifie la mise en service de deux nouvelles lignes : la ligne 4 et la ligne 5. La ligne 4 desservira l'Ouest de la ville tout en empruntant l'infrastructure de la ligne 3 entre les arrêts CADAM et Grand Arénas (voir figure 10). Selon l'exploitant, cette partie du réseau est déjà un point dur pour l'exploitation.

Dans ce cadre-là, nous avons produit un graphique espace/temps grâce à l'outil GRASIL décrit plus haut afin d'estimer les fréquences envisageables pour la nouvelle ligne 4 et la compatibilité avec le passage des tramways de la ligne 3. Il s'agissait de montrer ici au client la faisabilité du projet.

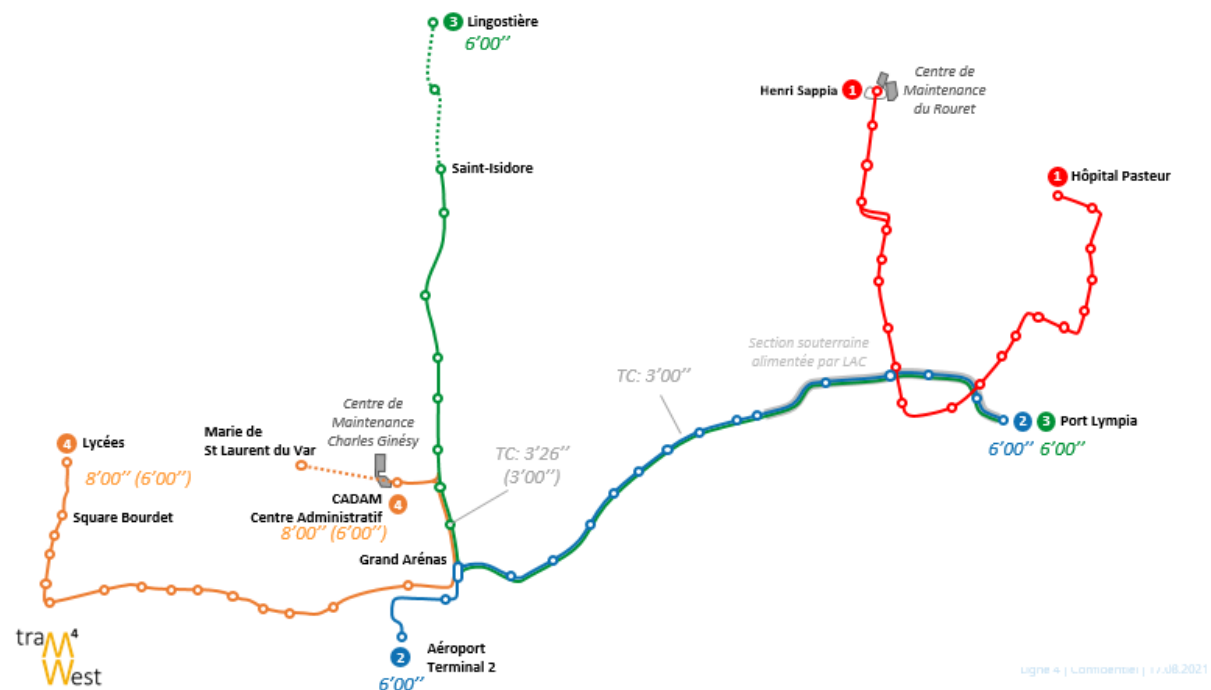


FIGURE 10: REPRÉSENTATION DU RESEAU NIÇOIS ET DE LA FUTURE LIGNE 4

Dans un second temps, une analyse statistique sur les données exploitantes à la station Paul Montel a été réalisée. Cette station clé actuellement située au croisement des lignes 2 et 3 du tramway de Nice nécessite une attention toute particulière pour le bon fonctionnement du réseau étant donné qu'il est aussi prévu d'y croiser par la suite la ligne 4. Étant donné que l'exploitant se plaint déjà régulièrement de ce point dur, une analyse des retards et de l'impact de l'ajout d'une troisième ligne sur le carrefour est nécessaire. Une première analyse faite rapidement par Quentin Decachelieu a mis en évidence ce qui s'apparente à un retard systématique d'une minute environ. Il s'agit alors de préciser la situation en dissociant notamment les enregistrements des deux lignes de tramway. Ensuite, nous avons essayé d'isoler le retard en vérifiant s'il n'était propre qu'à certains horaires de passage. Toutefois, après analyse via de nombreuses illustrations et mises en évidence, nous avons conclu que ce retard d'une minute est réellement systématique et se retrouve partout, quoi qu'il en soit. Il est donc probable que ce décalage soit dû à une erreur dans les données de l'exploitant (peut-être dans la prise de données ?). Ces résultats sont donc transmis à l'exploitant.

Enfin, une troisième tâche a été effectuée pour Nice, cette fois sur le projet de ligne 5. La future ligne 5 du tramway de Nice desservira les rives du Paillon (une rivière à l'Ouest de la ville suivant un chemin sinueux) entre le Palais des Arts et de la Culture de Nice et La Trinité. Le projet est divisé en plusieurs phases: tout d'abord la ligne serait construite et mise en service entre les arrêts Palais des Arts et de

la Culture et Pont Anatole France. La station du Pont serait durant cette phase installée avant le pont de manière provisoire. Ce n'est que dans une seconde phase que la station serait déplacée sur le pont Anatole France et la ligne serait alors prolongée jusqu'à La Trinité (se référer à la *figure 11* pour une meilleure compréhension). Notre tâche ici était de mettre à jour un rapport datant de début 2022 avec les nouveaux tracés disponibles.

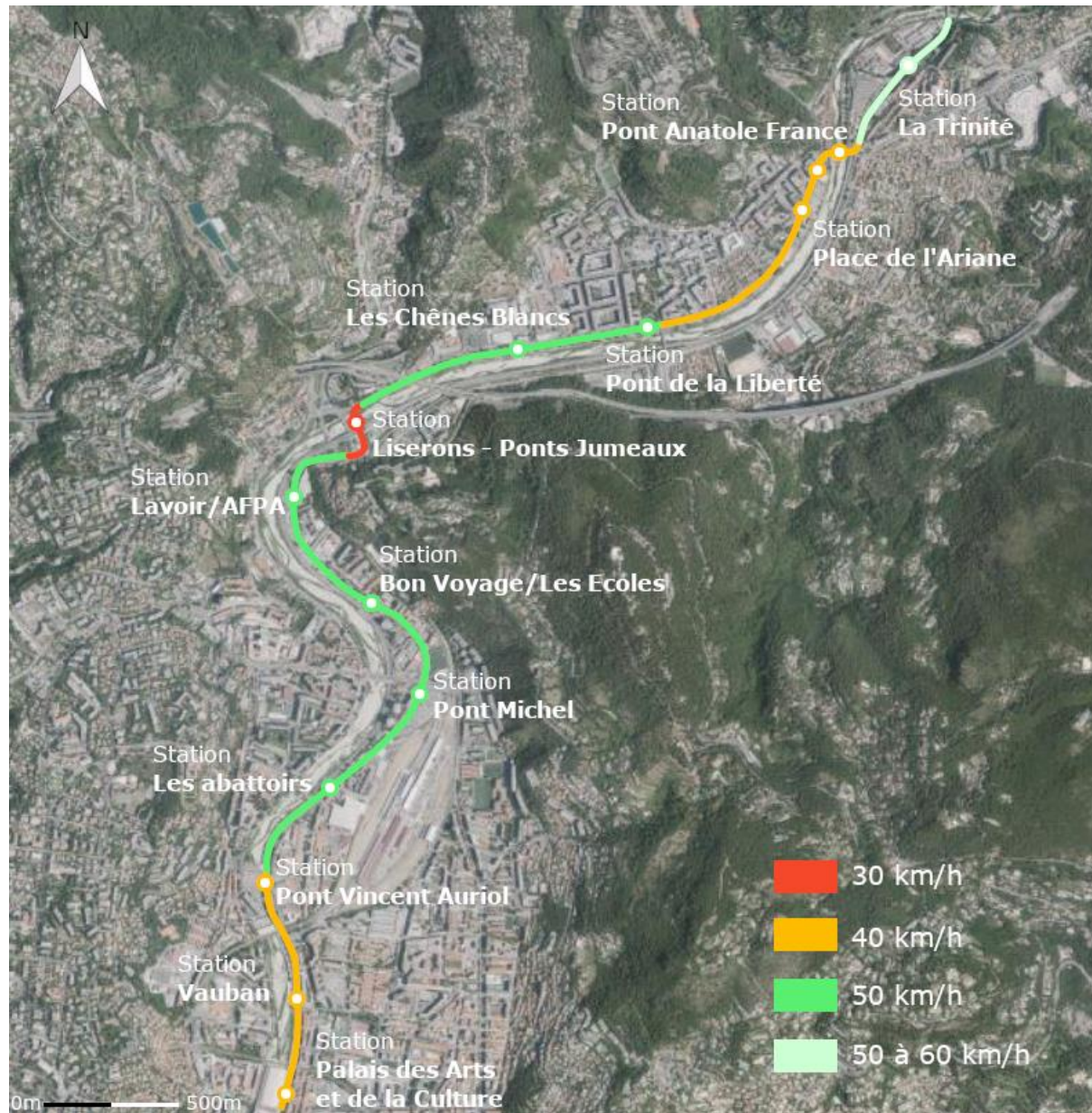


FIGURE 11: CARTE DES HYPOTHESES DE VITESSES LIEES A L'ENVIRONNEMENT

Nous avons donc collecté les informations nécessaires à la simulation du parcours de la ligne sur le logiciel SimOne. Ensuite, une étude de l'environnement et de l'insertion du tramway dans les rues nous a permis de produire les hypothèses de vitesses liées à l'environnement représentées dans la carte en *figure 11*. Après avoir appliqué par ailleurs les mêmes hypothèses que lors du précédent rapport, nous avons donc pu en tirer les temps de parcours de la même façon que pour Nantes. Nous avons aussi effectué un calcul du temps de retournement en terminus à la station Palais des Arts et de la Culture. Ce temps est lui aussi important car il est un facteur pouvant limiter la fréquence de passage

du tramway, d'autant plus que ce terminus est situé en sortie de voie unique. Le terminus envisagé est un terminus en arrière gare avec une seule voie de stockage. Le temps de retournement est constitué des temps suivants: deux fois le temps d'arrêt au terminus, le temps de parcours jusqu'à la position de retournement, le temps minimum de changement de cabine (ce forfait de temps contient la pause du conducteur et le temps nécessaire à s'installer dans la nouvelle cabine) et le temps de parcours entre la position d'arrêt et le quai de la première station. Grâce à toutes ces informations, nous avons pu donner un nouveau dimensionnement de la flotte nécessaire à l'exploitation de la ligne 5 pour chacune des phases évoquées.

Pour conclure, trois interventions sur les projets en cours de la ville de Nice ont été réalisées au cours de ce stage. Ces trois tâches différentes m'ont permis de saisir le déroulé d'un projet de cet envergure ainsi que les nombreuses études discrètes nécessaires pour éclairer les choix des élus et favoriser le bon déroulement de leurs projets.

Ligne Nouvelle Paris-Normandie

Le projet de ligne nouvelle Paris-Normandie a été évoqué pour la première fois en 2011. La Ligne Nouvelle Paris-Normandie a pour objectif de résoudre les problèmes de saturation et de retards sur le réseau ferroviaire entre Paris-Saint-Lazare et la Normandie qui est utilisé majoritairement pour le travail ou pour les études. Cette nouvelle ligne devrait apporter aux voyageurs une amélioration significative de la qualité du service ferroviaire qui leur est proposé. La future ligne proposera des trains circulant plus vite que les trains classiques (jusqu'à 250km/h contre 200km/h). Actuellement, le projet est dans une phase avancée durant laquelle les tracés sont peu à peu précisés. Dans ce cadre-là, la gare Saint-Lazare devrait être réaménagée pour accueillir de nouvelles voies. De nombreuses options de plan de voies ont ainsi été réalisées afin de fournir les supports visuels nécessaires aux présentations et discussions avec les clients. Un exemple de ces productions de plans de voies est donné ci-dessous en *figure 12*.

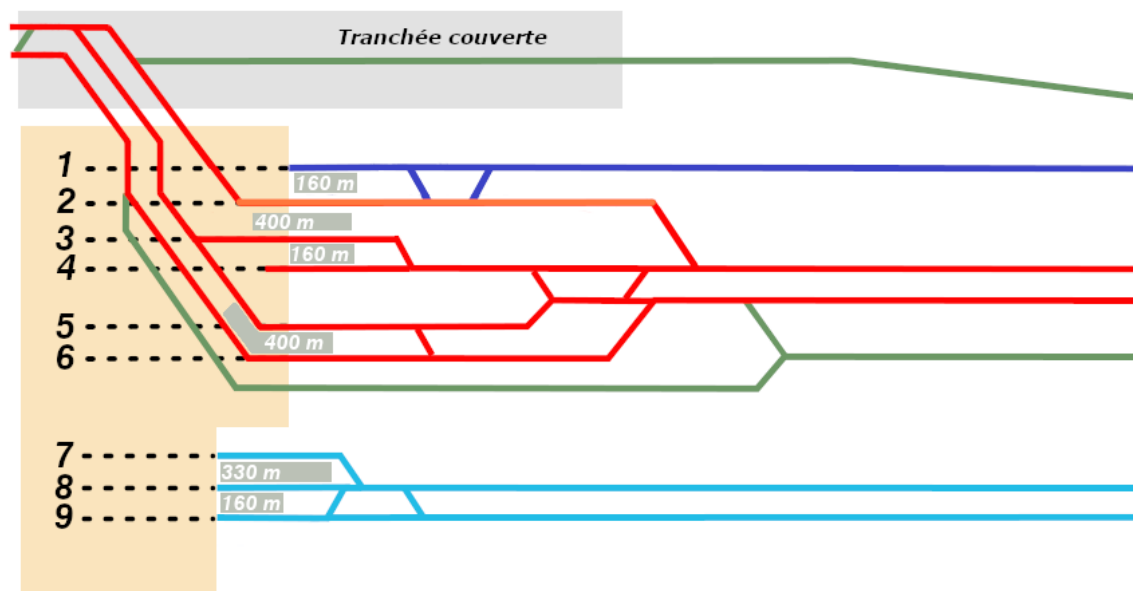


FIGURE 12: EXEMPLE DE PLAN DE VOIES EN GARE

Light Rail Transit à Be'er Sheva

Le projet de LRT à Be'er Sheva a débuté pendant mon stage. Sur ce projet, Egis Rail jouait le rôle d'un prestataire pour l'entreprise locale retenue par les Autorités Organisatrices des Transports de la ville de Be'er Sheva. Le projet est d'envergure et s'inscrit dans le cadre des migrations pendulaires, avec pour objectif principal de créer une liaison rapide entre une base militaire proche (un peu moins de 10km de distance) et la ville, lieu de résidence de la majorité des employés du complexe. Il s'agit de fournir une liaison rapide au lieu de travail de nombreux habitants. Egis Rail intervient sur un projet encore très peu avancé et a pour but de donner son avis côté exploitation sur les différents tracés envisagés par les Autorités Organisatrices des Transports locales.

Les consignes et attentes des clients étaient très floues au départ. Nous avons alors travaillé à décrire tous les segments de tracés fournis par les clients dans des fichiers .dwg. Ces derniers ont été décrits et stockés dans un outil maison nommé « Expert TC » développé avec Excel VBA et permettant d'obtenir des simulations de marche au même titre que SimOne. Toutefois, à la différence de ce dernier, Expert TC demande moins d'entrants et fournit donc des résultats moins précis. Ainsi, il convient à ce genre de projets encore dans leurs premières phases, pour lesquels la précision de SimOne n'aurait aucun intérêt. Concrètement, les principales différences dans les hypothèses de calculs sont les suivantes : dans Expert TC, le matériel roulant est considéré comme un point, contrairement à SimOne qui le considère en son intégralité. Ensuite, ce même matériel roulant n'est décrit dans Expert TC que par son accélération de service et son freinage de service. Enfin, les déclivités du tracé ne sont pas prises en compte dans Expert TC. Toutefois, ce dernier possède quelques avantages. On peut en effet y décrire très facilement les tronçons empruntés et ainsi construire un modèle prêt à l'emploi bien plus rapidement que sur SimOne. De plus, les tronçons sont décrits par des lignes simples comprenant une distance et une vitesse maximale comme en *figure 13* ci-dessous. Il est donc très facile de faire évoluer le modèle, petit bout par petit bout, suivant l'évolution des hypothèses.

N°	Type	Nom	Interdistance (m)	Vitesse max (km/h)	Nb courbes <50m	Nb carref. régulés	Temps d'arrêt stat. (s)	Temps intersd. (s)	Distance cumulée (m)	Temps cumulé (s)
1	S	Unknown				5				
-	T	AD	258,9	40				30	259	30
-	T	R150	60,86	35				7	320	36
-	T	AD	455,99	40				45	776	82
-	T	R40	60,82	15				15	837	97
-	T	AD	465,35	40				46	1 302	143
-	T	R250	58,97	50				5	1 361	148
-	T	AD	214,3	50				19	1 575	167
-	T	R34	43,05	15				11	1 618	178
-	T	AD	72,32	15				18	1 691	196
-	T	R40	63,08	15				16	1 754	212
-	T	AD	72,32	15				18	1 826	230
-	T	R40	62,86	15				16	1 889	246
-	T	AD	115,68	15				29	2 005	275
-	T	R40	37,19	15				9	2 042	285
-	T	AD	71	40				14	2 113	299
2	S	Unknown								

FIGURE 13: DESCRIPTION D'UN SEGMENT SUR EXPERT TC

L'intégralité des segments ont donc été codés ainsi (une trentaine de segments étaient proposés par le client), les vitesses retenues dépendant dans un premier temps de la présence ou non de courbe et, le cas échéant, du rayon de courbure de ces dernières. Le travail était complexe car les données fournies n'étaient pas nécessairement complètes et parfois incohérentes entre les différents fichiers.

Ensuite, afin de donner de meilleures estimations sur les vitesses, l'insertion du tramway a été étudiée. Il s'agit ici de connaître l'environnement autour du tramway et comment ce dernier serait inséré dans les rues. La tâche fut encore une fois particulière étant donné que les rues de Be'er Sheva empruntées par le tramway sont extrêmement large selon nos interlocuteurs *cf. figure 14*.



FIGURE 14: LARGES RUES DE BE'ER SHEVA

Finalement toutes ces vitesses furent consignées à quelques détails près dans une carte à destination du client faite sur Google Earth afin que ces derniers puissent interagir facilement et déplacer des points à volonté. Cette possibilité était importante car le positionnement des stations, qui nous est nécessaire afin d'établir des calculs de temps de parcours était extrêmement flou. Les stations étaient juste renseignées par le client par un nom comme par exemple « Hôpital de Soroka », information insuffisante pour placer correctement une station.

Nous avons présenté ces premières hypothèses au client lors d'une réunion Zoom, tenue en anglais. Cette réunion nous a permis d'en apprendre plus sur notre tâche. En effet, les clients nous ont expliqués qu'ils avaient besoin des résultats du dimensionnement de la flotte de véhicules au plus vite, afin de dimensionner un dépôt situé à priori près de la gare ferroviaire de Be'er Sheva. De plus, un certain nombre de tronçons, employant des itinéraires surprenants avaient été proposés par les Autorités Organisatrice des Transports mais n'intéressaient pas nos clients qui souhaitaient globalement que nous les disqualifions très largement, sans plus se prendre la tête. Cette remarque expliqua en partie pourquoi certains tracés manquaient dans les fichiers et ne figuraient que sur certains plans très généraux. Enfin, le trajet le plus important était de relier la gare de Be'er Sheva à la Base. Nous avons pu au cours de cette réunion leur délivrer notre carte des vitesses et des positions supposées des stations afin qu'ils puissent nous les retourner plus précisément positionnées. Ce n'est en effet pas notre rôle que de choisir ce genre de détails. Qui plus est, l'impact sur notre travail est potentiellement important donc nous ne voulions pas nous risquer à les positionner nous-même « au doigt mouillé ».

Suite à cette réunion, nous attendons toujours le retour des clients. Durant cette attente, nous avons proposé toute une série de « routes » regroupant les tronçons de manière à proposer par la suite des comparaisons cohérentes entre des tracés remplissant les mêmes fonctions. Ainsi, certains tronçons sont assimilés entre eux. Un calcul de temps de parcours permettra de n'en garder qu'un, plutôt que de tester toutes les combinaisons possibles de routes.

En conclusion, ce projet est un de ceux dans lesquels j'ai été le plus impliqué, remplissant globalement le rôle de chargé d'études aux côtés de mes collègues qui géraient la communication avec le client d'une part, et la réalisation du projet de l'autre. Je reste curieux de connaître les prochaines étapes et discussions qui se tiendront en mon absence et regrette ne pas avoir eu le temps de mener le projet à son terme.

Le métro du Caire

Le Caire, capitale de l'Égypte, possède déjà un réseau souterrain de métro. En raison d'une densité élevée de population et d'un trafic concentré tout au long du Nil, le développement des systèmes de transports collectifs est un point clé de la croissance et du développement urbain de la ville. Ainsi, l'accent est mis sur le développement de métros, tramways et bus en site propre afin d'offrir un haut niveau de service comparable à la voiture personnelle. Dans ce contexte de réseau en plein essor, plusieurs nouvelles lignes de métro sont à l'étude actuellement. Nous avons ainsi pu travailler sur la ligne 6 du métro du Caire cf. figure 15 avec l'experte en exploitation Isabel Brufau sur le calcul de temps de parcours de cette ligne et les différentes variantes envisagées.

THE CAIRO LINE 6 TRACK PLAN

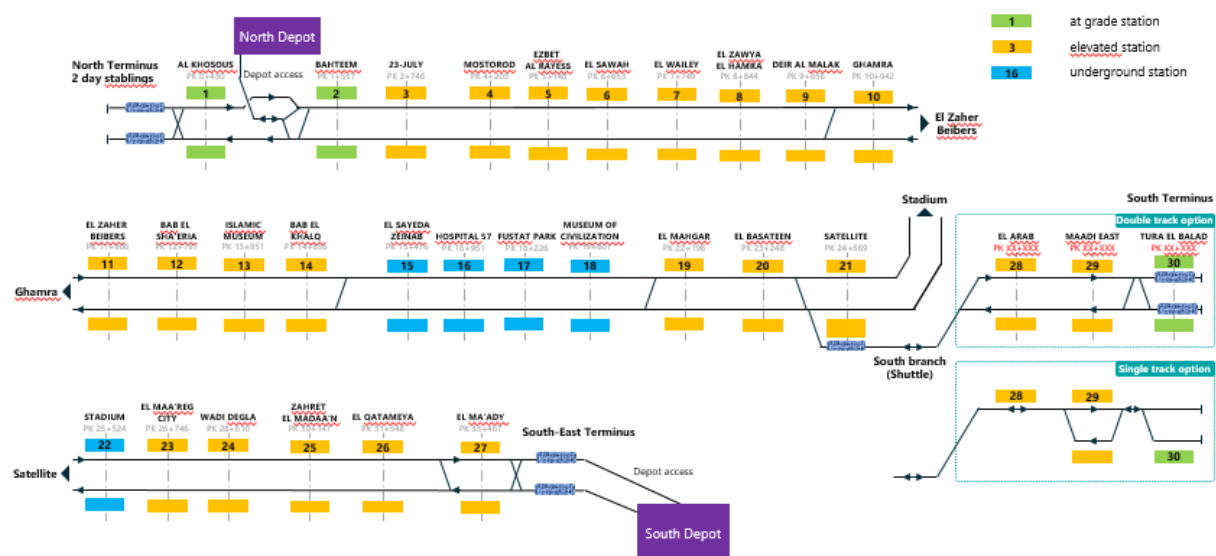


FIGURE 15: PLAN DE VOIE DE LA LIGNE 6 DU METRO DE LE CAIRE

La tâche devant être réalisée très précisément, le calcul a été effectué sur SimOne. Les entrants étaient eux aussi de très bonne qualité et très précis : des profils en long. Le travail fut long et minutieux, car c'est plus de 30 kilomètres de réseau qui ont été décrits par ces profils en longs. Les résultats alors obtenus sont consignés dans le tableau 3 en page suivante.

Après avoir effectué et vérifié les calculs, un retour sur le projet a été effectué, plusieurs mois après, en raison de nouvelles précisions et modifications du projet. En effet, il avait tout d'abord été envisagé plusieurs tailles de rames différentes, ce qui avait valu précédemment de nombreuses simulations différentes, bien qu'assez similaires. Finalement, après avoir envisagé des rames de 6 et 9 voitures, il a été décidé de trancher pour des rames de 8 voitures. Ensuite, toute une partie du tracé précédemment situé en extérieur a été revu en souterrain. Cela a permis de grandement lisser les vitesses et d'obtenir ainsi une vitesse commerciale meilleure qu'auparavant. La vitesse commerciale correspond à la vitesse effective pour parcourir d'un bout à l'autre une ligne de transport en commun. C'est cette vitesse qui est perçue par le voyageur et qu'il prend en compte dans le choix du mode de transport. Elle prend donc en compte les temps d'arrêts en station notamment et toutes les éventuelles pertes de temps rencontrées. Cette vitesse est donc très importante pour les Autorités Organisatrices des Transports, car elle joue un rôle central dans l'attractivité d'une ligne de transport en commun. En guise d'exemple, les bus en milieu urbain proposent une vitesse commerciale comprise entre 12km/h et 16km/h, les tramways proposent une vitesse commerciale située entre 16km/h et 25km/h et le métro de Paris, propose des vitesses commerciales entre 21km/h et 40km/h environ.

Pour conclure, ce projet a demandé une grande rigueur dans l'utilisation des outils et beaucoup de patience pour coder la ligne sur SimOne au moyen des profils en longs. Ce projet d'envergure est un sujet récurrent et demande des interventions régulières de la part de l'équipe EFE pour suivre les décisions prises et adapter à tout moment les études aux nouvelles hypothèses prises par le client.

Station	Distance between stations	Chainage	Optimum Run Time	Coasting and recovery marging	Total Run Time	Dwell Time	Cumulated Time
	(m)	(m)	(s)	(s)	(s)	(s)	(s)
Station27							
Station26	1991	1991	112	6	118	30	148
Station25	1401	3392	88	4	93	30	270
Station24	1537	4929	92	5	96	30	396
Station23	1864	6793	113	6	119	30	545
Station22	1222	8015	88	4	92	30	667
Station21	955	8970	89	4	93	25	785
Station20	1321	10291	82	4	86	35	906
Station19	1052	11343	70	3	73	35	1 015
Station18	2396	13739	140	7	147	40	1 201
Station17	1574	15313	106	5	111	40	1 353
Station16	1275	16588	84	4	88	35	1 475
Station15	1473	18061	105	5	111	35	1 621
Station14	640	18701	53	3	55	35	1 711
Station13	885	19586	70	3	73	35	1 820
Station12	1154	20740	87	4	91	40	1 951
Station11	891	21631	63	3	66	35	2 051
Station10	966	22597	72	4	76	40	2 167
Station9	1286	23883	80	4	84	35	2 287
Station8	812	24695	59	3	62	35	2 384
Station7	1095	25790	72	4	75	35	2 494
Station6	1096	26886	72	4	75	35	2 604
Station5	1505	28391	90	5	95	35	2 734
Station4	945	29336	65	3	68	35	2 838
Station3	1457	30793	88	4	93	25	2 955
Station2	1189	31982	76	4	80	25	3 060
Station1	1127	33109	73	4	77		3 137
Total	33 109		2 187	109	2 297	840	00:52:17

TABEAU 3: MARCHE DE LA FUTURE LIGNE 6 DU METRO DE LE CAIRE

Retour réflexif sur l'expérience

C'est finalement un stage extrêmement concret qui m'a été proposé ici chez Egis Rail. J'ai été intégré à l'équipe des Études Fonctionnelles et Exploitation tout au cours du stage et ai aidé mes collègues sur de nombreuses tâches techniques. Mon implication dans les projets a elle aussi évolué tout au cours de ce stage. Après de nombreuses tâches ponctuelles techniques, j'ai eu l'occasion de participer à la rédaction de documents destinés aux clients et finalement, pour le projet de Light Rail Transit à Be'er Sheva, j'ai pu agir comme un chargé d'études sous la tutelle de Ian Wilson et participer à une réunion avec les clients en leur présentant mon travail.

Un début assez lent

Après un départ rapide sur la première mission de recherche et développement, il avait été prévu de me lancer sur un projet de tramway dans le centre de la ville de Leeds, en Angleterre, dans le but de relier les différentes lignes périphériques déjà planifiées. Sur ce projet, Egis était encore une fois prestataire d'une entreprise d'ingénierie : Jacobs. Toutefois, la commande n'est finalement jamais arrivée et il s'est passé quelque temps avant que je n'intervienne sur d'autres projets, à défaut d'être impliqué pleinement sur celui-ci. J'ai donc eu pendant un moment une charge de travail très faible qui m'a permis de me former sur python, dans l'optique de l'utiliser potentiellement pour ce stage. J'ai donc suivi un premier MOOC ayant pour objectif d'apprendre à écrire un code maintenable. J'y ai appris par ce moyen la PEP8, une convention de syntaxe python et de mise en forme ayant pour but d'uniformiser les codes et de les rendre le plus lisible et compréhensible possible. J'ai aussi appris les principes de code SOLID : Single Responsibility Principle, Open/Closed Principle, Liskov's Substitution Principle, Interface Segregation Principle et Dependency Inversion Principle. Ces quelques principes que je ne développerai pas ici permettent de limiter le nombre de bugs, de faciliter la compréhension du code et de le rendre plus maintenable, testable ou encore extensible. Finalement, j'ai appris quelques patrons de code de base comme le patron Modèle Vue Contrôleur, classique pour l'architecture d'une application. Ce dernier consiste à construire le programme autour de trois grandes classes (modèle, vue et contrôleur) pouvant être changées et modifier indépendamment les unes des autres sans altérer le fonctionnement du programme. Ainsi, on peut imaginer un même modèle physique qui pourrait être représenté de différentes façons (animation, graphiques ou schéma) en utilisant toujours le même modèle sous-jacent et les mêmes entrées utilisateur...

Après avoir fini ce premier MOOC, j'en ai suivi un second concernant la programmation orientée objet (POO) en python afin de perfectionner mes compétences dans le domaine. Après avoir assimilé les notions de ces deux unités d'enseignement, j'ai décidé d'appliquer toutes ces nouveautés à un court projet pédagogique en développant une petite application de bureau sous python de A à Z, orientée objet et construite selon le pattern MVC.

Ces deux MOOC et la réalisation de l'application m'ont ainsi permis d'optimiser mon temps passé au bureau et de développer des compétences utiles pour l'entreprise et pour mon futur travail.

Un stage très technique

Ce stage chez Egis fut particulier en ça qu'il fut très technique. En effet, loin de représenter ce qu'est le métier d'ingénieur comme on – je – peut l'imaginer, l'appui aux équipes a été marqué par la récurrence de petites tâches techniques, utilisant tel logiciel ou telle compétence. Bien que les projets aient toujours été introduits dans leur contexte et dans toute leur complexité par François Brousseau, il est arrivé parfois que l'on me demande une tâche technique toute bête sans y ajouter beaucoup d'explications, comme pour le projet de la ligne nouvelle Paris-Normandie. Bien que les tâches techniques ne soient pas désagréables et forment une partie intégrante du métier d'ingénieur, enchaîner ce genre de missions ne permet pas de se projeter au mieux dans un futur métier. Pour nuancer mes propos, certains projets auxquels j'ai participé m'ont permis de suivre quasiment de A à Z le travail effectué par mes collègues, en les aidant tout du long, que ce soit sur les calculs, la rédaction ou les illustrations. J'ai même pu participer à une réunion avec les clients étrangers pour le projet de Be'er Sheva.

Mon stage fut globalement assez surprenant, d'autant plus que les autres stagiaires de l'entreprise ont globalement été bien plus mis à l'épreuve pour des tâches de recherche et développement, sur des sujets plus ou moins complexes mais toujours très intéressants autour du développement d'outils algorithmiques sur python, sujet qui m'intéresse particulièrement. Pour conclure sur ce paragraphe, je pense avoir été bien formé pendant ce stage à la technique sous-jacente au métier d'ingénieur en exploitation mais assez peu aux autres aspects du métier, rendant la projection dans ce métier d'ingénieur en exploitation assez difficile.

Une seconde mission déstabilisante

Il convient ici d'évoquer la seconde mission, à savoir celle sur l'outil GRASIL. Cette mission fut particulièrement déstabilisante dans son déroulé. En effet, dès le début, les attentes m'ont paru extrêmement floues sur ce que l'on attendait de moi. Mon CV ne mentionne nullement "Excel VBA" et cet outil étant de nos jours très largement dépassé, je n'avais que peu d'intérêt à investir mon énergie là-dedans. J'ai donc essayé de reporter cette tâche vers une compétence que je possède et que je considère utile à développer: python. Toutefois, là encore je me suis heurté à un exercice qui ne demandait pas spécialement de réflexion, mais seulement du temps. En effet, bien que le cœur du programme soit intéressant à construire, ce n'était qu'une infime partie du problème. Pour rendre le tout utilisable simplement par l'équipe, il aurait fallu concevoir une interface utilisateur agréable et intuitive, ce qui est une tâche laborieuse et gourmande en temps, d'autant plus que l'outil GRASIL prend un grand nombre d'entrants. Finalement, pour éviter le problème, j'ai essayé d'utiliser directement l'interface Excel de GRASIL en y récupérant les informations sous python. Là encore toutefois, la tâche était laborieuse car il s'agissait de retranscrire une myriade de règles de personnalisation graphique, ce qui n'est guère intéressant et particulièrement fastidieux qui plus est (table de correspondance de couleurs, mises à l'échelle, décalage des titres...). Enfin, retranscrire sous python un module de dessin de plan de voies m'a paru être encore une fois un exercice ne relevant pas de mes fonctions: je ne suis pas développeur logiciel. Cette mission, en me déstabilisant, m'a aussi permis de mieux appréhender mes limites quant à la programmation. Je n'ai donc finalement pas produit grand-chose dans le cadre de cette mission. Les codes que j'ai produits sont utilisables par un utilisateur aguerri mais ne sont ni ergonomiques ni agréables à prendre en main.

Pour conclure sur cette mission, elle m'aura permis de découvrir l'existence d'une très grande inertie en entreprise sur les outils. En effet, ces derniers sont très souvent développés par des stagiaires et peu mis à jour. Les collaborateurs s'accommodent donc des imperfections de ces derniers, chacun utilisant ses petites astuces pour rendre la tâche plus simple. Ce phénomène conduit à l'utilisation d'outils technologiquement dépassés et seulement compris dans leur complexité par une minorité de personnes dans l'équipe, voire aucun membre. Cela permet d'économiser de l'énergie pour la recherche et développement, mais crée en parallèle une perte de temps régulière pour tous les projets concernés par l'outil. Je ne saurais toutefois pas trancher actuellement sur le bien-fondé de cette façon de faire et ne peut donc ici que simplement soulever la question.

Conclusion

Pour conclure sur ce stage, j'ai développé au cours de ces 6 derniers mois des compétences techniques nouvelles ainsi qu'une culture du milieu des transports urbains utile pour la suite. J'ai aussi développé mes compétences en code. Pour ce qui est des savoir-être, j'ai su améliorer ma rigueur durant ce stage grâce à la supervision de mon tuteur côté entreprise François Brousseau que je tiens à remercier tout particulièrement ici pour sa disponibilité et son suivi de qualité tout au long de ces mois de stage. J'ai aussi pu développer mes compétences en matière de dialogue et de communication au sein de l'entreprise. C'est chose que je n'avais pas pu faire précédemment en raison de la pandémie frappant lors de mon précédent stage, effaçant fortement le côté humain du travail en entreprise. J'ai ainsi pu découvrir un métier et un aspect des transports que je n'avais pas du tout connu à l'école et peut maintenant envisager de signer un contrat avec Egis Rail, si les conditions le permettent.

Bibliographie

- CEREMA Direction territoriale Centre-Est. « Circulation des tramways en site banal, L'exemple d'Angers », décembre 2015.
https://www.cerema.fr/system/files/documents/2017/10/Tram_en_site_banal_Angers_cle2881e4.pdf.
- . « Circulation des tramways en site banal, L'exemple de St Étienne », décembre 2015.
<https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/2087/#dr-viewer>.
- . « Circulation des tramways en site banal PHASE 1 », 26 juin 2014.
https://www.cerema.fr/system/files/documents/2017/10/CEREMA_DterCE_DCAP_Tram_Site_Banal_PHASE1_Rapport_VF_26mai2014_opt_cle1aa2c4.pdf.
- CEREMA Direction territoriale Est. « Circulation des tramways en site banal, L'exemple de Reims », décembre 2015.
https://www.cerema.fr/system/files/documents/2017/10/Tram_en_site_banal_Reims_cle5cd42e.pdf.
- CEREMA Direction territoriale Normandie-Centre. « Circulation des tramways en site banal, L'exemple du Mans », décembre 2015.
https://www.cerema.fr/system/files/documents/2017/10/Tram_en_site_banal_LeMans_cle2f2999.pdf.
- CEREMA Direction territoriale Ouest. « Circulation des tramways en site banal, L'exemple de Nantes », avril 2016.
https://doc.cerema.fr/default/digitalCollection/DigitalCollectionInlineDownloadHandler.ashx?parentDocumentId=2089&documentId=2090&_cb=20210720203723.
- Duy Q.Nguyen-Phuoc, Graham Currie, William Young, et Chris de Gruyter. « Modelling the Direct Impact of Tram Operations on Traffic », octobre 2016.
https://www.researchgate.net/publication/310020871_Modelling_the_Direct_Impact_of_Tram_Operations_on_Traffic.
- Pell Frischmann. « Edgbaston Metro Extension Operational Microsimulation Modelling », novembre 2021.
- UK Tram. « Tramway Principles & Guidance », janvier 2018. <https://uktram.com/wp-content/uploads/2018/07/Tramway-Principles-Guidance-Final-2.pdf>.

ANNEXE 1 :



EXPLOITATION DU TRAMWAY EN SITE BANAL

5 août 2022

Informations relatives au document

INFORMATIONS GENERALES

Auteur(s)	Geoffray Côme
Entité	BL Rail
Version	V1
Référence	xx

HISTORIQUE DES MODIFICATIONS

Version	Date	Rédigé par	Visé par	Modifications
V1	05-Août-2022	Geoffray	Brousseau	Premier jet

DESTINATAIRES

Nom	Entité
	Département Etudes Fonctionnelles et Exploitation

SOMMAIRE

1 - Description du principe de site banal	32
1.1 - Définition	32
1.2 - Pourquoi choisir le site banal ?	32
1.3 - Configurations possibles	34
2 - . Principes d'exploitation	35
2.1 - Points particuliers et signalisation	35
2.1.1 - Entrées et sorties d'un site banal	35
A. Entrée en site banal	35
B. Sortie d'un site banal	36
2.1.2 - Carrefours, intersections	37
2.1.3 - Mouvements de « tourne à gauche »	37
2.2 - Fonctionnement en section courante	38
2.2.1 - Traversées piétonnes	38
2.2.2 - Interaction avec les cyclistes et les autres TC	38
2.2.3 - Stationnement	39
2.2.4 - Interaction avec les riverains	39
2.2.5 - Stations	39
2.3 - Contraintes liées à l'exploitation	41
2.3.1 - Impact sur le trafic routier	41

1 - Description du principe de site banal

1.1 - Définition

Un site banal est une section du réseau où le tramway circule au sein de la circulation générale. Le tramway reste prioritaire lorsqu'il traverse un site banal mais il doit s'accommoder de la circulation générale. Un site banal peut être divisé en plusieurs tronçons. Chaque tronçon se distingue par l'homogénéité de ses caractéristiques géométriques (principalement profil en travers). Les différents tronçons d'un même site peuvent donc fonctionner de différentes manières.

1.2 - Pourquoi choisir le site banal ?

Les raisons principales pour la mise en place d'un site banal sont les suivantes :

- L'insertion d'une voie double en site propre se révèle impossible en raison d'une emprise étroite
- L'AOT souhaite conserver l'intégralité des fonctions urbaines de cet axe routier
- L'axe routier est soumis à un trafic inférieur ou égal à 5000 véh/j environ dans les deux sens confondus (recommandation du CEREMA pouvant être dépassée dans certains cas).
- Site soumis à une limitation de vitesse inférieure ou égale à 50km/h.
- Site de faible longueur : 500m environ pour ne pas affecter trop l'exploitation

De manière plus générale, le choix de la conception d'un site banal nécessite d'observer les points suivants :

- Les contraintes physiques
- Le niveau de trafic routier
- La fréquence ciblée
- Les fonctions de la zone traversée (commerces, résidences...)
- Les accès riverains
- Le stationnement
- Les intersections

Intérêt du site banal :

Tout d'abord, le site banal permet d'insérer une ligne de tramway dans une rue à faible emprise au sol. C'est l'atout majeur de ce type de site. Pour un axe peu fréquenté et/ou de faible longueur, les voies banales semblent ne pas détériorer l'exploitation. Enfin, dans certains cas, un site banal peut favoriser une circulation modérée et augmenter l'attention que se portent mutuellement les différents usagers du site.

Inconvénients du site banal :

Le site banal pénalise l'exploitation du tramway en ça qu'il ne permet pas de circuler aussi vite que souhaité sur certains tronçons. Des simulations Vissim sur le projet d'extension d'Edgbaston du réseau de tramway à Birmingham (2021) montrent l'influence du trafic général sur la vitesse du tramway. Le site étudié est long d'environ 1300m et la simulation estime qu'en site propre, le temps de voyage serait de 330 secondes dans une direction et 323 dans l'autre. En heure de pointe, le tramway circule à un intervalle d'environ 10 minutes. Seul les deux pics de fréquentation journaliers sont étudiés et le trafic y est limité à 30 ou 50 km/h. On constate alors une perte allant de 23 à 45 secondes pour la traversée du site (ici le temps varie selon la direction et le moment de la journée). Une vitesse moyenne est ensuite calculée (~vitesse commerciale sur le site) avec ou sans circulation générale et l'on constate une diminution d'environ 1km/h entre site propre et site banalisé (bus, taxis, trafic et deux roues). Bien que cette diminution reste faible, cela montre clairement l'impact négatif sur la vitesse commerciale pour de longs sites. Nos propres simulations en annexe montrent aussi une perte de moins de 5% du temps de parcours optimal pour un site présentant un trafic d'environ 5000veh/j. De plus, les sites banals favorisent nécessairement les interactions avec la circulation générale qui peuvent souvent conduire à des irrégularités. Finalement, il apparaît que la conception de ce type d'aménagements est particulièrement complexe pour un fonctionnement optimal.

1.3 - Configurations possibles

On distingue ici plusieurs configurations de voies banalisées en fonction de leur typologie en travers (CEREMA). Les trois configurations les plus courantes en France sont présentées ci-dessous.

Toutefois, le profil en travers est choisi selon la particularité de chaque tronçon et peut donc différer de ces trois types. Par exemple, il existe deux tronçons proposant une voie en site banal et une voie partagée avec les bus...

TYPE 16: 1 VOIE SITE BANAL + 1 VOIE SITE PROPRE



des tronçons en France).

Cette configuration est celle rencontrée le plus fréquemment en France. Elle permet de faire passer les tramways dans une rue étroite tout en conservant un accès riverains par exemple (40%

Source : CEREMA

TYPE 17: 1 VOIE SITE BANAL + 1 VOIE SITE PROPRE



Cette configuration est possible pour un axe à l'emprise plus importante (20% des tronçons en France).

Source : CEREMA

Type 5 : 2 voie en site banal

TYPE 5 : 2 VOIE EN SITE BANAL



Cette dernière configuration est une variante de la 1^{ère} permettant de conserver toutes les fonctions d'un axe routier (35% des tronçons en France).

Source : CEREMA

2 - . Principes d'exploitation

2.1 - Points particuliers et signalisation

En France, bien que l'on n'observe pas plus d'accidents sur les sites banals que sur les sites propres, on constate que la majorité des accidents liés aux sites banals (60%) ont lieu en intersection, en entrée ou en sortie (les accès riverains sont ici comptabilisés comme intersections). Il convient donc de détailler ici les dangers et les méthodes efficaces associées à ces points particuliers.

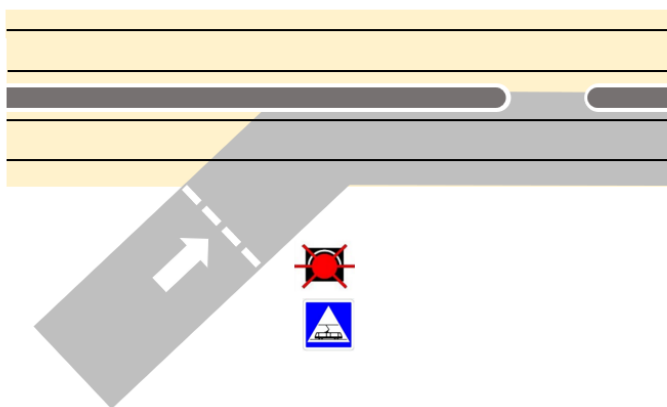
2.1.1 - Entrées et sorties d'un site banal

Le tram est prioritaire sur tous les autres véhicules et cette priorité doit être appliquée correctement afin de préserver la qualité de l'exploitation et éviter les accidents. L'objectif ici est donc d'éviter toute file de véhicules à l'arrivée du tramway. Lorsqu'un tramway circule sur une voie banalisée, les véhicules réguliers doivent donc se situer derrière lui. Pour ce faire, il est nécessaire dans la plupart des cas d'utiliser de la signalisation lumineuse qui peut donc être déclenchée automatiquement. On constate plusieurs cas classiques :

A. Entrée en site banal

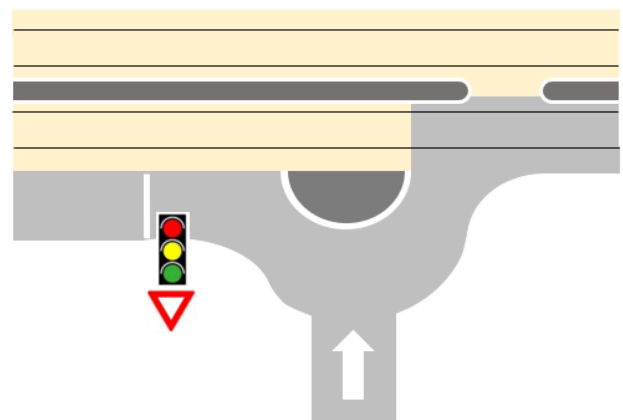
On peut gérer ces entrées avec une simple signalisation R24 ou R11v. Les voitures pourront donc s'insérer s'il n'y a ni tramway en approche ni en train de passer. Il est toutefois possible d'utiliser simplement un stop pour ce genre d'entrées mais ces derniers ont tendance à être moins respectés que la signalisation lumineuse (ne serait-ce que par manque de visibilité dans certains cas, cf. Le

FIGURE 1:ENTREE EN SITE BANAL SANS INTERSECTION



plupart des cas.

FIGURE 2: ENTREE EN SITE BANAL AVEC CARREFOUR ET MINI-GIRATOIRE (NANTES)



Mans) qui restera donc à privilégier dans la

En carrefour, l'entrée est dans la majeure partie traitée comme par des feux R11v ou R24. Plusieurs exemples utilisent aussi des mini-giratoires pour l'insertion en carrefour (cf. Angers ou Nantes). Ces entrées sont gérées par des feux R11v ou R24. Toutefois, ces feux ne sont pas un absolu et la signalisation à utiliser dépend grandement du contexte du site.

B. Sortie d'un site banal

La sortie s'effectue sans plus de signalisation. Les voies divergent et c'est la voie routière qui est déviée le plus souvent afin d'éviter les contraintes de rayons de courbures plus importantes pour les tramways que pour la circulation générale.

2.1.2 - Carrefours, intersections

Les carrefours et intersections sont globalement traités de la même façon qu'une entrée en site banal. Le tout est de conserver la priorité du tram avec la signalisation la plus appropriée au site (M9c, AB4, R11v ou R24). On notera tout de même que les feux doivent être programmés différemment que pour un site propre car les potentiels véhicules placés devant le tramway sur la voie banalisée devront être évacués avant que le tram ne puisse passer.

2.1.3 - Mouvements de « tourne à gauche »

La question des mouvements de « tourne à gauche » est toutefois plus complexe. En effet, les données accidentologiques recueillies par le CEREMA bien qu'incomplètes, placent les configurations dites de « tourne à » en première place des configurations de franchissement de la plateforme du tramway dangereuses. Concrètement, les « tourne à » représentent 30% des accidents de franchissement sur la période 2004-2012 en France.

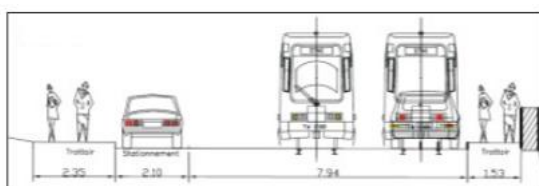
De nombreux sites interdisent ces mouvements en même temps que les tentatives de dépassement grâce à un séparateur physique entre les voies. Toutefois, ces séparateurs ne peuvent pas couvrir toute la longueur des sites banalisés, c'est pourquoi certaines communes (Le Mans par exemple) ont interdit le « tourne à gauche » par arrêté municipal dès la mise en service de leurs sites.

Tandis que certaines communes cherchent directement à empêcher ce mouvement, la commune de Saint-Étienne propose un site possédant un stationnement à gauche au-delà de la voie en site propre. Cette configuration force donc les véhicules à traverser cette voie pour se garer. Cela paraît fortement accidentogène. Toutefois -probablement en raison de la faible fréquentation de cet axe

(aucun chiffre
malheureusement), aucun
accident particulier n'a été

FIGURE 3: SITE 54 A SAINT-ETIENNE : CONFIGURATION A ÉVITER

recensé sur le site.



Source : CEREMA

Pour conclure, le CEREMA rappelle que la présence de véhicules bloqués sur la plateforme banalisée et souhaitant effectuer un mouvement de tourne à gauche amplifie l'incidence du site banalisé sur le niveau de service. Il s'agit donc de limiter au maximum ce mouvement ou de le réserver à des zones très peu fréquentées. Par ailleurs, la ville de Melbourne aurait adopté la pratique du « Hook turn » qui permettrait d'éviter les désagréments du « tourne à gauche » sur les carrefours franchis par le tramway (il s'agit du « tourne à droite » en réalité en Australie mais cela paraît transposable).

2.2 - Fonctionnement en section courante

En section courante, le site banalisé est soumis à de nombreuses particularités qui nécessitent une attention particulière lors de la conception.

Pour ce qui est de la vitesse d'exploitation, le CEREMA recommande une limitation inférieure ou égale à 50 km/h pour le tramway comme pour la circulation générale. Il convient en effet de faire circuler le tramway à la même vitesse que la circulation générale afin d'éviter des tentatives de dépassement qui peuvent facilement conduire à un accident (collision frontale avec un tramway engagé sur l'autre voie). Un interviewé par le CEREMA propose une limitation à 50 km/h descendue à 30 km/h lorsque la ligne est fréquentée. Cette vitesse pourrait alors augmenter à 35-40 km/h de nuit, lorsque le site serait moins fréquenté.

Pour ce qui est du revêtement du site, le CEREMA recommande l'utilisation d'un enrobé classique en site banal car la présence de rails suffit à la lisibilité du site.

En section courante, l'utilisation de séparateurs physique entre les voies n'est pas nécessaire tout du long mais peut permettre d'éviter des tentatives de dépassement d'un tramway dans les zones d'arrêt.

2.2.1 - Traversées piétonnes

La plupart des sites banals en France identifient les zones de traversées piétonnes par des tiretés ou des clous afin de différencier ces traversées particulières des passages pour piétons classiques. D'autres sites ne le font pas et proposent de poser des BEV tout le long de la voie comme à Nantes par exemple sur une longueur d'environ 260m. Comme aucune réglementation particulière ne s'applique aux sites banals, il convient de respecter les règles classiques de signalisation sur ces voies.

2.2.2 - Interaction avec les cyclistes et les autres TC

Il n'existe aucune contre-indication au fait que d'autres transports en commun (bus par exemple) empruntent les voies banalisées. Toutefois, afin de préserver l'exploitation du tramway, il est recommandé (CEREMA) de ne pas positionner de station sur la voie banalisée. Si toutefois des stations de bus devaient être positionnées en voie banalisée, un des interviewés du CEREMA propose de les positionner en aval des stations de tramway afin de ne pas ralentir ce dernier.

Dans la majorité des cas, les cyclistes ne font pas l'objet de traitement particulier en voie banalisée en raison de la contrainte sur l'emprise. Toutefois, ces derniers sont un problème pour les tramways car ces derniers peuvent chuter en coinçant leur roue dans les rails du tramway. La gravité de ces incidents récurrents est proportionnelle à la fréquence de passage du tramway. Pour ces raisons, le cycliste est considéré par beaucoup de concepteurs comme l'utilisateur le plus complexe à prendre en compte sur les sites banals.

Enfin, la simulation évoquée précédemment sur l'extension du réseau de tramway de Birmingham montre bien que l'ajout des vélos et scooters au trafic général produit une perte de performance significative. En effet, tous les plus hauts temps de voyage sont enregistrés avec l'introduction des cycles et l'écart avec un site banal n'accueillant pas les cycles peut aller jusqu'à 29 secondes !

2.2.3 - Stationnement

Le stationnement latéral des véhicules le long du site banal provoque des réactions diverses parmi les experts. Il s'agit donc de bien gérer le stationnement si ce dernier est nécessaire (commerces, riverains ...). Bien qu'il soit plus facile à priori de ne pas permettre du tout le stationnement, le manque de places peut engendrer des stationnements non autorisés sur les trottoirs qui gêneront les piétons ou la circulation.

De plus, il est important d'aménager les voies banalisées en prenant en compte les livraisons régulières des commerces ainsi que les possibles interventions des secours (comment garer un camion de pompier et déployer une échelle avec les Lignes Aériennes de Contact ?)

2.2.4 - Interaction avec les riverains

Afin que les riverains puissent accéder à leurs logements, il est nécessaire de supprimer les séparateurs physiques en face de leurs accès. Dans l'optique de minimiser le temps passé à se garer et de fluidifier l'exploitation, plusieurs AOT (celles d'Angers ou de Reims) ont financé l'installation de portails automatiques pour les riverains de sites banals.

De plus, il est nécessaire que ces derniers aient une bonne visibilité au sortir de chez eux pour pouvoir s'insérer sans danger sur le site banal. Des trottoirs larges peuvent permettre d'améliorer cette visibilité et d'éviter des accidents.

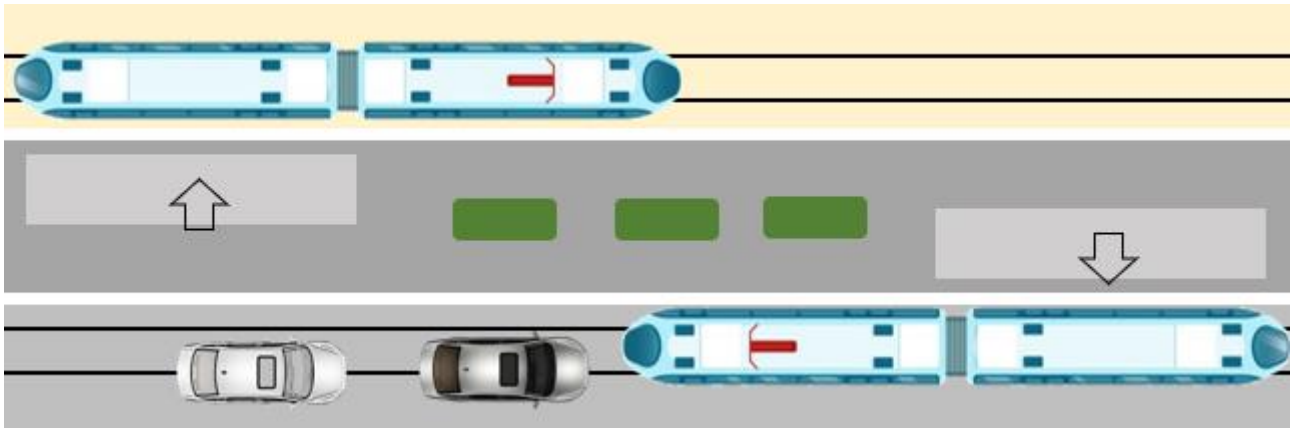
2.2.5 - Stations

Certains concepteurs et experts en insertion urbaine du tramway recommandent de ne pas positionner du tout de stations en site banal. Toutefois, cette pratique existe en de nombreux endroits et ne semble pas particulièrement problématique si elle est bien gérée. Le CEREMA recommande toutefois de ne pas placer de station à l'aval proche de l'entrée du site pour éviter que les automobilistes ne respectent pas la signalisation à l'entrée.

Quoi qu'il en soit, afin d'éviter les collisions, le CEREMA stipule que « tout dépassement du tramway en station doit être matériellement impossible ». Les stations doivent donc être équipées d'un séparateur de voies jugé « infranchissable » selon le CEREMA, à moins que la station ne possède un quai axial. Ces séparateurs peuvent être placés sur tout le long de la station ou avant cette dernière.

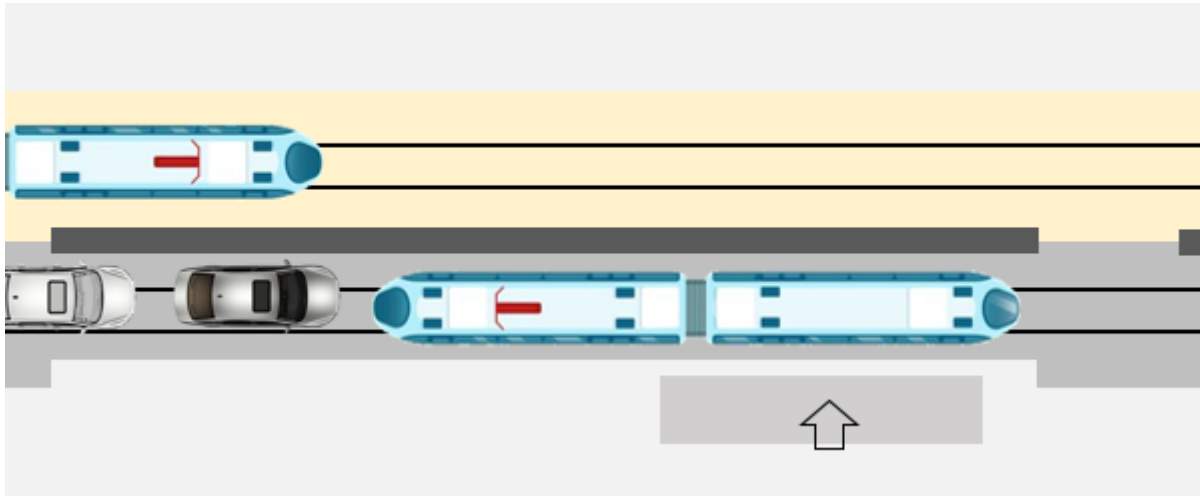
Le CEREMA préconise aussi de prévoir un itinéraire de contournement au cas où un tramway resterait bloqué en station. Un itinéraire de ce type est aussi recommandé pour permettre aux cyclistes de dépasser le tramway à l'arrêt.

FIGURE 4: STATION A QUAI AXIAL DECALE (ANGERS, PLACE LAFAYETTE)



Ici, la présence du quai axial empêche toute tentative de dépassement du tram à l'arrêt. Des traversées piétonnes sont situées en amont et en aval des stations qui permettent de mettre le quai au niveau de la route.

FIGURE 5: DEMI STATION A QUAI LATERAL (SAINT-ETIENNE, ANATOLE FRANCE)



Ici, le site banal accueille une demi station isolée de la voie en site propre par un séparateur facilement franchissable présent sur tout le site mais offrant des interruptions pour les accès riverains. Les piétons traversent n'importe où sur ce site étant donné qu'il se trouve dans une zone caractérisée par une forte animation urbaine en raison de commerces ou d'établissements scolaires.

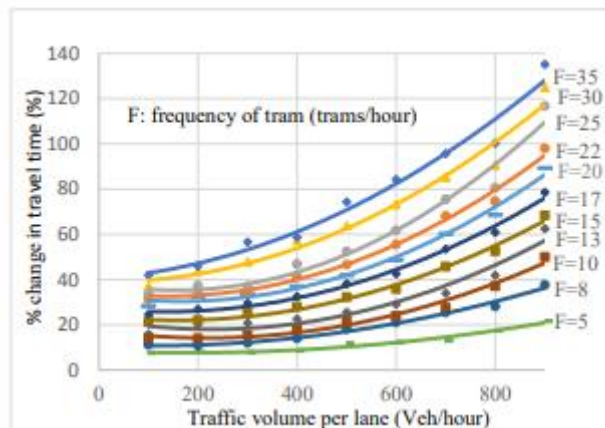
2.3 - Contraintes liées à l'exploitation

2.3.1 - Impact sur le trafic routier

À l'évidence, de la même manière que le trafic a un impact négatif sur la circulation du tramway en site banal, le tramway a lui aussi un impact négatif sur la circulation générale empruntant ce site. Nous nous baserons ici sur l'étude de Nguyen Phuoc and all. qui proposent dans un article datant de 2016 de modéliser et de quantifier l'impact du tramway sur la circulation générale à Melbourne ainsi

que sur notre propre simulation détaillée en annexe. Melbourne possède à ce jour le plus grand réseau de tramway au monde. Grâce à leur modèle, ils ont pu estimer la diminution du trafic ainsi que l'augmentation du temps de voyage des véhicules en fonction de la fréquence du tramway et du type de voie (site propre ou site banal, simple ou double). Leurs résultats sont résumés dans les figures suivantes :

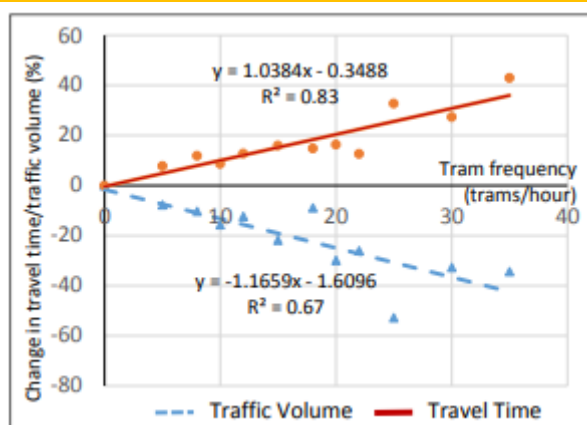
FIGURE 6: POURCENTAGE DE CHANGEMENT DES TEMPS DE TRAJET CAUSE PAR UN SITE BANAL (EN VOIE DOUBLE)



Source : Modelling the Direct Impact of Tram Operations on Traffic, Nguyen Phuoc and all.

On voit sur ce graphique qu'au-delà d'un débit de 400vph et pour des fréquences supérieures à 20trams/h (intervalle de 6 minutes), l'augmentation du temps de trajet en fonction du débit croît plus vite. Pour des intervalles supérieurs, l'impact du tramway reste très important même pour des débits de véhicules modérés ou faibles. Afin de comparer ces résultats avec ceux du CEREMA et ceux de notre propre modélisation, on peut effectuer la conversion suivante : En considérant ce volume de trafic comme celui de l'heure de pointe, un débit de 400vph correspondrait à environ 7500veh/j. Ce chiffre de 7500veh/j est confirmé par notre propre simulation. En effet, au-delà de ce volume le retard moyen dépasse largement les 5% du temps de parcours optimal du site banal et la distribution de ses derniers s'étale largement.

FIGURE 7: CHANGEMENTS DU TEMPS DE TRAJET ET DU VOLUME DE TRAFIC CAUSE PAR UN SITE BANAL (EN VOIE DOUBLE)



Source : Modelling the Direct Impact of Tram Operations on Traffic, Nguyen Phuoc and all.

Ce second graphe montre la diminution de la capacité de la voie considérée. On voit ici que la perte de capacité est proportionnelle à la fréquence du tramway ce qui est plutôt intuitif. Toutefois, les résultats de nos propres simulations n'ont pas pu mettre en évidence l'impact de l'augmentation de la fréquence du tramway sur l'exploitation de ce dernier.

Pour conclure sur cette étude, bien que cette modélisation n'est pas parfaite (coefficients de détermination pas particulièrement élevés), elle donne une première estimation de l'impact d'une voie banale sur la circulation générale.

SOURCES | BIBLIOGRAPHIE

[Circulation des tramways en site banal Phase 1 – CEREMA – 2014/05/26](#)

[Circulation des tramways en site banal L'exemple de St Étienne – CEREMA - 2015/12](#)

[Circulation des tramways en site banal L'exemple d'Angers – CEREMA – 2015/12](#)

[Circulation des tramways en site banal L'exemple du Mans – CEREMA – 2015/12](#)

[Circulation des tramways en site banal L'exemple de Reims – CEREMA – 2015/12](#)

[Tramway dans la circulation générale – CEREMA & STRMTG – 2018/09](#)

[Tramways Principles & Guidance – UK Tram – 2018/01](#)

[Edgbaston Metro Extension Operational Microsimulation Modelling – Pell Frischmann – 2021/11](#)

[Modelling the Direct Impact of Tram Operations on Traffic – Duy Q.Nguyen-Phuoc, Graham Currie, William Young, Chris de Gruyter – 2016/10](#)

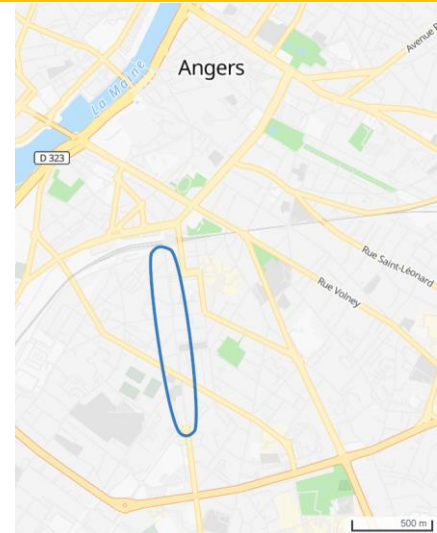
3 - Annexe 1 : Modélisation d'un site banal

Afin d'étoffer les informations présentées précédemment, une simulation dynamique sur VISSIM a été effectuée pour modéliser un site banal du territoire français. En raison de ses caractéristiques intéressantes, nous avons choisi le site banal de la rue de Létanduère, à Angers.

3.1 - Présentation du site

FIGURE 1 : LE SITE

Le site banal parcourt la rue de Létanduère à Angers, une rue alignée Nord-Sud proche de la gare Angers Saint-Laud. Il prend son point de départ juste après la station « Les gares » située au-dessus des voies. D'une longueur de **1 065 m**, le site est constitué de **5 tronçons** aux profil en travers variables. C'est un long site comportant **2 stations** en zone urbaine dense avec commerces. Le site présente une assez faible fréquentation depuis l'arrivée du tramway d'environ **1200veh/j/sens** environ.



3.2 - Hypothèses

3.2.1 - Comptabilisation du volume journalier

FIGURE 2 : COMPTABILISATION DES VÉHICULES

- On considère qu'un véhicule est inclus dans le volume journalier du site banal dès lors qu'il parcourt le site entre deux intersections au minimum.
- Le volume total de véhicule générés est réparti équitablement entre tous les affluents de la rue de Létanduère (notre site banal) en l'absence d'informations précises.
- Lorsqu'un véhicule rencontre une intersection, il a la même chance de prendre n'importe laquelle des voies qui s'offrent à lui.
- On se place à l'heure de pointe afin d'observer l'impact maximal que peut avoir la voie banalisée sur la circulation du tramway.
- Dans l'optique d'obtenir des résultats comparables à ceux du CEREMA par exemple, on essaye de traduire le volume journalier (véh/j/sens) en volume à l'heure de pointe du soir (véh/h/sens) ; unité utilisée pour la simulation VISSIM. Le dossier d'appel à projet pour la ligne B du tramway d'Angers donne le coefficient suivant :



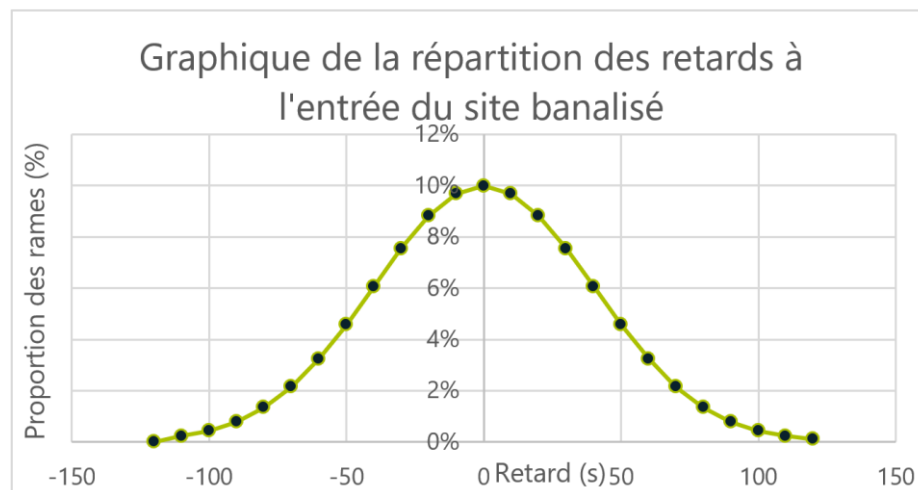
$$\frac{\text{Volume journalier}}{\text{Volume heure de pointe}} = 9,42$$

3.2.2 - Les véhicules

3.2.2.1 - Les tramways

Les tramways sont longs de **37,65m** et ont une vitesse maximale de **70km/h**. Lors de leur « génération » aux extrémités de notre site, les tramways peuvent avoir du retard selon la loi suivante :

FIGURE 3 : REPARTITION DES RETARDS A L'ENTREE DU SITE



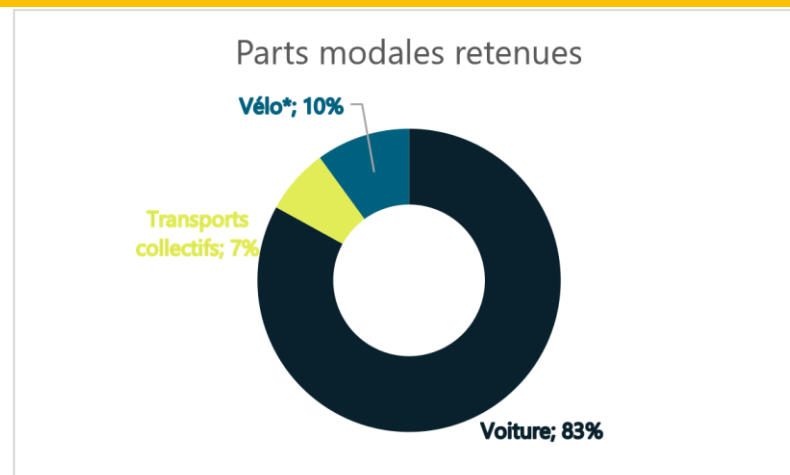
Avec une espérance $\mu = 0$ et un écart type $\sigma = 40$

3.2.2.2 - Circulation

régulière

L'apparition des véhicules est basée sur les parts modales fournies par la dernière étude de L'Agence d'Urbanisme de la Région Angevine (Aura) : « Observatoire des mobilités, enquête longitudinale Février 2022 ». Il est bon de noter toutefois que leurs résultats sont effectués sur un échantillon de faible taille et que les dernières données issues de l'INSEE sur le même sujet (2013) donnent une moindre part au vélo. Dans le doute, cette part est revue à la baisse, ce qui permet aussi de rapprocher cette part de celle constatée sur l'ensemble du territoire (2%). De plus, la vitesse maximale autorisée étant de 30km/h sur tout le site, la vitesse désirée des voitures suit une loi uniforme entre 30km/h et 35km/h.

FIGURE 4 : PARTS MODALES



Les « transports collectifs » sont modélisés par des bus.

3.2.3 - Carrefours

Les carrefours (tous à feux tricolores) sont modélisés par une priorité pour le tramway et un arrêt facultatif sur les deux voies de tramway. Dans 95% des cas le tramway passe sans s'arrêter et dans les 5% restants, il doit s'arrêter 30 secondes au feu. Le carrefour entre la rue de Létanduère et le Boulevard de Strasbourg pose problème quant à l'afflux de vélos lié à la piste cyclable. Il est choisi ici de ne pas conserver cette voie.

3.3 - Paramètres des simulations

Chaque simulation est effectuée sur une durée d'une heure et 5 minutes. Les données ne sont recueillies qu'après 5 minutes d'initialisation laissées au début de la simulation afin de permettre aux flux de s'établir. Pour chaque scénario (jeu de paramètres) **10 simulations** sont effectuées.

FIGURE 5 : SCÉNARIOS RETENUS POUR LES SIMULATIONS

Intervalle de passage\Volume	0	600 véh	1200 véh	2400 véh	5000 véh	7500 véh	10000 véh	11000 véh	12000 véh	13000 véh	14000 véh	15000 véh	16000 véh	17000 véh	18000 véh	19000 véh	20000 véh	25000 véh
3 minutes					✓	✓	✓		✓		✓							
4 minutes					✓	✓	✓		✓		✓							
6 minutes	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
9 minutes					✓	✓	✓		✓		✓							

3.4 - Résultats

Les résultats attestent tous de l'impact négatif du site banal sur l'exploitation.

Toutefois, il apparaît que ces résultats ne sont pas stabilisés en raison d'irrégularités enregistrées notamment sur le site propre. Ceci dit, nos résultats confirment que la limite de 5000veh/j garantit un impact faible voir inexistant sur l'exploitation. En effet, jusqu'à 5000veh/j, la différence de retard moyen avec le site propre demeure inférieure à 5% *cf. figure 6*. On peut donc exploiter un tel site sans enregistrer d'impact sur l'exploitation. Il serait peut-être toutefois utile d'ajouter aux calculs de temps de parcours du site une pénalité relative à sa taille si ce dernier est particulièrement long. De même, les diagrammes en boîtes montrent une dispersion faible des retards hormis quelques anomalies pour des volumes de 1200veh/j et 5000veh/j.

De plus, nos résultats semblent montrer que la limite du CEREMA pourrait être repoussée jusqu'à 7500 véhicules, pour de courts sites ce qui n'augmenterait que très sensiblement cette différence de retard moyen avec le site propre, sans dépasser 5% d'écart. Il faudra alors noter exploiter le site en prenant en compte une potentielle plus forte dispersion des retards *cf. figure 7*.

Un volume supérieur de trafic allant au-delà d'au moins 10000véhicules/jour semble en revanche marquer une perte significative de vitesse d'après tous les indicateurs. Un site situé dans une rue accueillant 9000veh/j/sens comme celui de Brest semble donc devoir nécessairement présenter une réelle pénalité pour l'exploitation. En effet d'après notre simulation, pour 10000veh/j, un quart des rames auraient un retard supérieur à 20% du temps de parcours du site *cf. figure 7 et 8*.

FIGURE 6 :

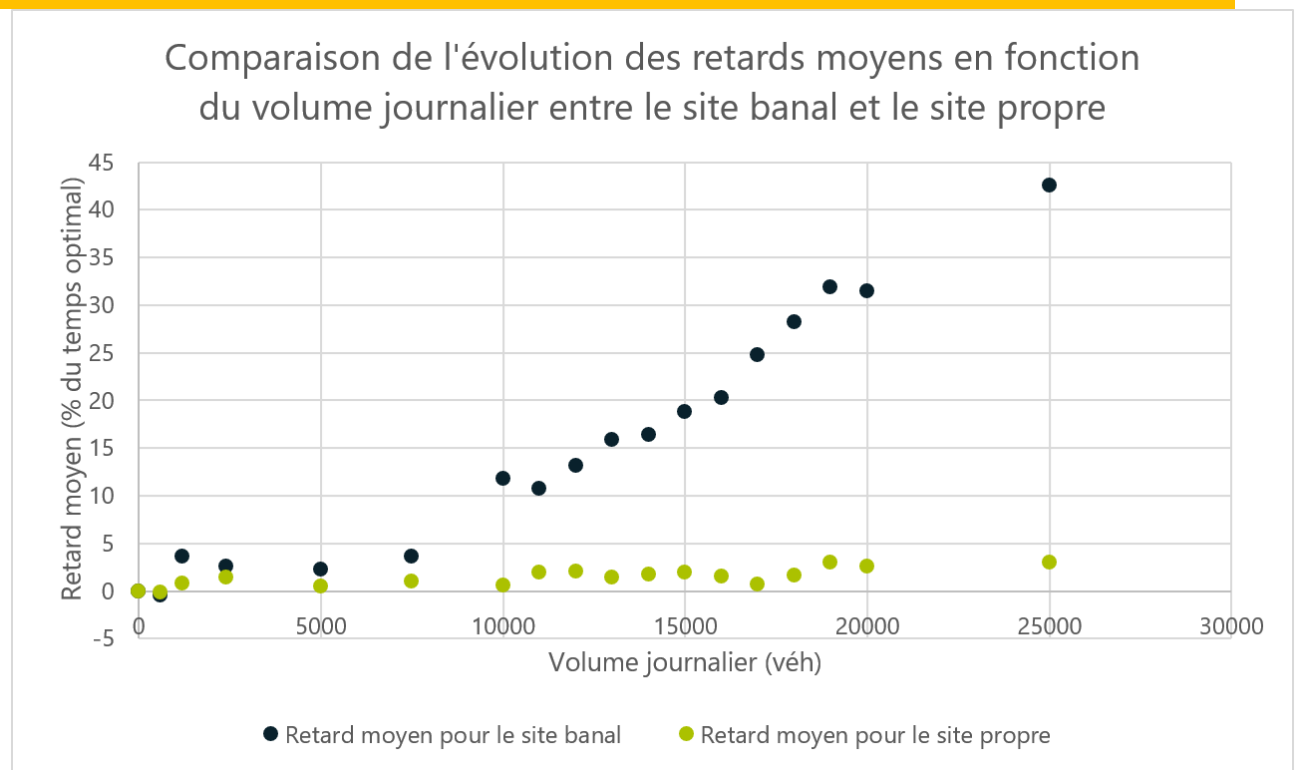


FIGURE 7 :

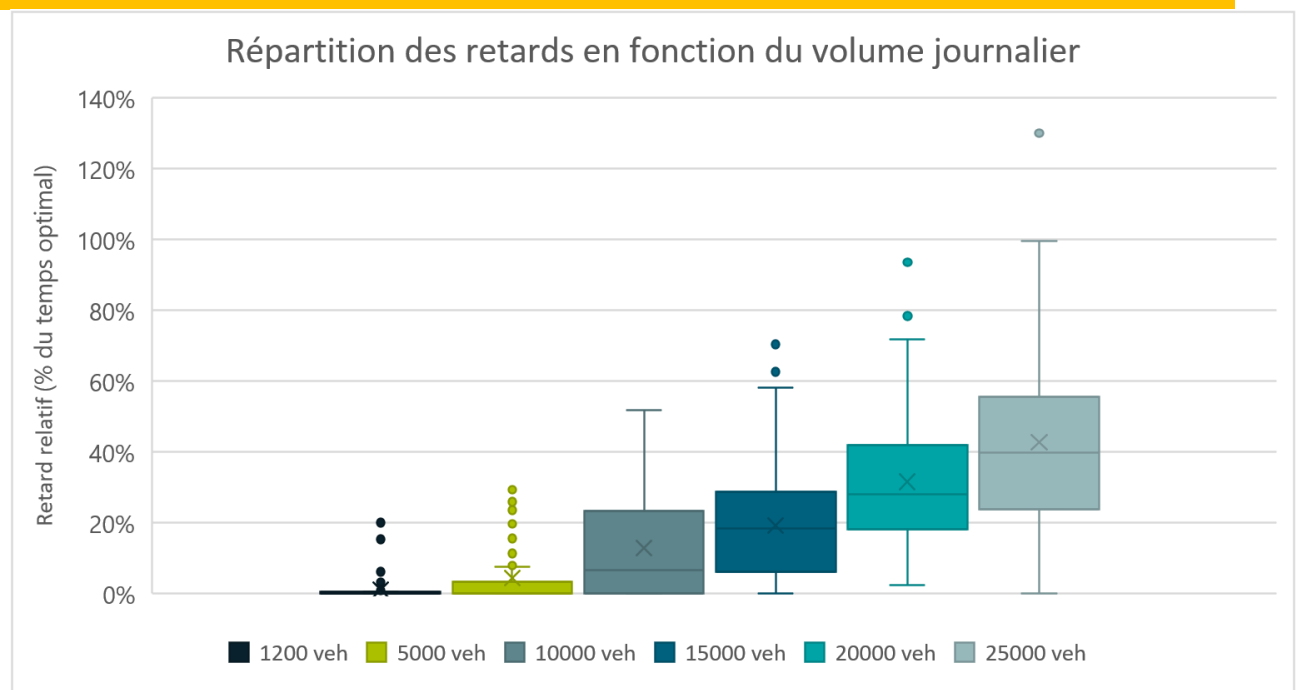
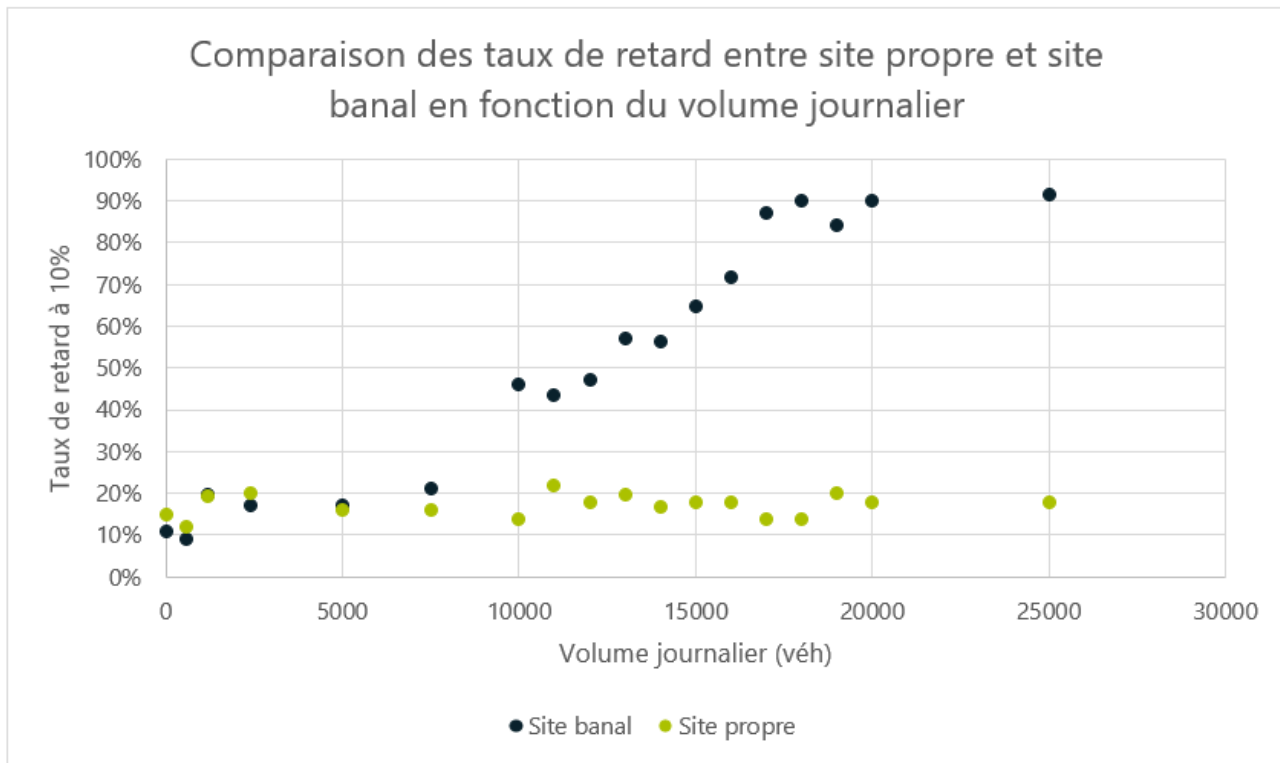


FIGURE 8 :



Département EFE

www.egis-group.com





Côme Geoffray

2021-2022

Ingénieur exploitation : découverte du métier

Résumé : Au cours de ce stage, des missions de recherche et développement ont été proposées par l'entreprise ainsi qu'un appui technique aux équipes des Études Fonctionnelles et Exploitation. Une intervention sur de nombreux projets de transports en site propre a été réalisée. Calculs de temps de parcours, prise d'hypothèses sur l'exploitation future, cartes illustrant les rapports sont les principales tâches techniques rapportées par ce rapport.

Mots Clés : Transports en commun, tramway, exploitation, métro, mobilité, transports.

[Entreprise] :

A170, avenue Thiers

Tuteur entreprise :

François Brousseau

Ingénieur exploitation

Tuteur académique :

Kamal Serrhini