

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

DESCRIPTION D'UN PROJET DE FIN D'ÉTUDES PROPOSÉ  
AU BAC EN GÉNIE LOGICIEL, GÉNIE DES TI, ET GÉNIE MÉCANIQUE  
PRÉSENTÉ À PROFESSEUR FAUSTO ERRICO

PROJET « TRANSPORT-GRID » : UNE SIMULATION 3D  
INTERACTIVE D'UNE IMPLÉMENTATION PROPOSÉE D'UN  
SYSTÈME DE TRANSPORT PERSONNEL AUTOMATISÉ

PAR  
LOUIS-PIERRE PAGÉ  
MOHAMED NACEREDDINE TOROS  
GRACIA DUFORT JEANTY  
FANELLE MEKAMTO DASSI

MONTREAL, LE 15 NOVEMBRE 2018

# Table des matières

Introduction.....	3
Utilisateurs ciblés.....	3
Avantages majeurs .....	3
Performant.....	3
Écologique .....	4
Sécuritaire .....	4
Accessible .....	4
Problèmes actuels éliminés .....	5
Par rapport au véhicule personnel.....	5
Par rapport au transport collectif.....	5
Désavantages majeurs .....	6
Implantation et faisabilité .....	6
Implémentation .....	7
Simulation informatique .....	7
Logistique .....	8
Mécanique.....	9
Questionnements soulevés .....	9
Projets annexes.....	10
Transport de marchandises .....	10
Ascenseurs d'édifices.....	11
Analyse de métriques du système .....	11
Conclusion .....	12

## Introduction

Le but de ce document est de décrire un projet étudiant au BAC en ingénierie, dans le domaine de la modélisation de systèmes de transport alternatifs. Ce projet a été entamé à l'automne 2017 dans le cadre d'un cours de conception de jeux vidéo à l'Université Laval. Notre équipe souhaite le poursuivre à l'ÉTS, pour un cours de projets spéciaux à l'été 2019, et comme projet de fin d'études à l'automne 2019.

Le projet consiste en une simulation interactive 3D et à large échelle d'une implémentation proposée, qui nous l'espérons apparaîtra avantageuse aux lecteurs, d'un système de transport automatisé. Ce système de transport appartient à la catégorie des « personal rapid transit systems », qui se traduit en français par « taxis intelligents », tels que le PRT de Morgantown, en service depuis 35 ans, et le système ULTra de l'aéroport de Londres Heathrow, qui est présentement en construction.

Nous avons créé un site web où la simulation peut être téléchargée: <http://transport-grid.xyz>

## Utilisateurs ciblés

Le système de transport proposé pourrait être une alternative avantageuse, comme nous espérons que notre simulation pourrait le montrer, pour tous les utilisateurs de moyens de transport terrestres (sauf ceux à très grande vitesse comme les TGV), donc à la fois pour ceux qui possèdent et opèrent des véhicules personnels, tout comme pour ceux qui utilisent des moyens de transport collectifs.

## Avantages majeurs

### Performant

Nous pensons que plusieurs différences radicales, décrites dans le reste de ce document, entre le système de transport proposé et les réseaux de transport terrestres traditionnels, pourraient justifier de s'attendre à ce que les performances de ce premier, tant au niveau de la capacité de gestion efficace d'achalandage élevé, que des performances pour les trajets individuels, dans différentes conditions de trafic, puisse être largement supérieures à celles de ces derniers (surtout à comparer aux transports collectifs), ce que nous tenterions de montrer en réalisant une simulation à large échelle.

## Écologique

Comme pour les métros avec leurs rails électrifiés, alimentés au Québec à l'hydro-électricité, le système de transport proposé serait alimenté exclusivement à l'énergie électrique, provenant idéalement de sources renouvelables. Mais contrairement à la voiture électrique, le système ne stockerait pas cette énergie dans des batteries au lithium, qui ont comme désavantages importants d'être lourdes, dont la fabrication est dispendieuse et polluante, et qui ont une autonomie et une durée de vie limitées.

Aussi, notre système serait, comme les transports collectifs, plus écologique que les véhicules personnels, qui peuvent être en fonction aussi peu que 5% de la journée. En effet, les cabines du système proposé seraient partagées par un très grand bassin d'utilisateurs, et transporteraient des passagers pendant une partie bien plus significative de la journée, rentabilisant ainsi, économiquement et écologiquement, leur fabrication à grande échelle.

## Sécuritaire

Les accidents de la route sont, pour les passagers et les piétons, une grande cause de blessures graves et de mortalités dans les sociétés modernes. Ces risques pourraient être largement réduits avec le système de transport proposé. Celui-ci pourrait présenter un niveau de sécurité qui se rapprocherait des technologies d'ascenseurs et de métros: D'abord, le système ne serait pas vulnérable aux erreurs humaines de pilotage. Ensuite, son fonctionnement serait plus déterministe que celui de la voiture intelligente, par le fait qu'il est sur rail et serait contrôlé par des systèmes informatisés simples, à comparer à l'IA et la vision artificielle. De plus, le système ne présenterait pas les risques inhérents à l'altitude élevée et aux très grandes vitesses, comme pour les transports aériens et les TGV. Finalement, dans les quartiers résidentiels, comme les voies seraient inaccessibles aux piétons, une circulation à pleine vitesse serait sécuritaire. Notons aussi que la pollution sonore causée par la plus grande vitesse en quartier résidentiel devrait demeurer raisonnable, car les voies seraient dans des structures vitrées fermées.

## Accessible

Le système de transport proposé, vu qu'il ne nécessite pas de chauffeurs (rémunérés dans le cas des transports collectifs et de marchandises), pourrait être opérationnel 24 heures sur 24. De plus, du fait que l'embarquement dans le système se ferait, dans tous les cas, au niveau du sol, ce qui faciliterait l'accès

à tous, et que le permis de conduire et la possession d'un véhicule ne seraient plus nécessaires, une plus large proportion de la population (sauf les enfants en très bas âge, par exemple) pourrait utiliser le système de manière autonome. Enfin, notons que certaines stations seraient intégrées aux bâtiments de grandes dimensions, pour éviter aux utilisateurs d'être exposés aux conditions climatiques extérieures.

## Problèmes actuels éliminés

### Par rapport au véhicule personnel

Contrairement aux véhicules du système routier, les cabines et chariots du système de transport proposé n'auraient pas à attendre systématiquement aux intersections, à un arrêt ou un feu rouge, étant donné que les voies, surélevées ou dans des tranchées, se croiseraient toujours à des niveaux différents.

Aussi, il n'y aurait pas de concept de hiérarchie de voies routières, tel que les rues, boulevards et autoroutes, qui constituent des goulots d'étranglement en périodes de fort achalandage, et imposent de nombreux détours par rapport à un chemin qui serait plus direct. Toutes les voies permettraient la circulation à vitesse élevée, ce qui répartirait le trafic uniformément sur tout le réseau, et à l'intérieur de la grille essentiellement uniforme d'une ville, souvent un seul virage (plus coûteux en termes de délais ajoutés) et deux déplacements rectilignes seraient suffisants à un trajet complet.

Enfin, contrairement aux voies routières rapides, comme les grands boulevards et les autoroutes, qui sont difficiles pour les piétons à traverser, les voies surélevées ou dans des tranchées du système proposé libéreraient, dans toutes les directions au niveau du sol, le passage aux piétons. Aussi, étant donné que le niveau du sol serait dégagé avec notre système, la coexistence avec le système routier traditionnel, dans les mêmes quartiers, devrait être assez facilement réalisable.

### Par rapport au transport collectif

Les utilisateurs actuels des transports collectifs verraient de manière encore plus drastique leurs performances de déplacements s'améliorer. Ceux-ci n'auraient plus à subir les délais supplémentaires, venant parfois doubler ou tripler la durée des trajets, en devant marcher plus (dépendamment de la distance des arrêts), se conformer à un horaire de passage (avec des retards possibles), attendre longtemps à un arrêt, et prendre une ou plusieurs correspondances.

De plus, le fait que les trajets entre deux points seraient quasi optimaux, en terme de distance de Manhattan, au lieu d'être planifiés pour satisfaire une majorité de passagers; et le fait que tous les passagers n'auraient plus à s'immobiliser quelques dizaines de secondes à chaque arrêt, où d'autres voyageurs veulent embarquer ou débarquer; feraient que les utilisateurs du système proposé se déplaceraient, nous espérons que notre simulation le montrerait, plus rapidement que les utilisateurs de véhicules personnels, tout en continuant à bénéficier de divers avantages généralement associés aux transports collectifs exclusivement.

## Désavantages majeurs

Un désavantage majeur du système de transport proposé est cependant que, avant qu'un tout premier passager puisse voyager à bord d'une cabine, le système nécessiterait l'investissement massif, de collectifs plutôt que d'individus, dans des infrastructures complexes. C'est d'ailleurs le plus grand reproche communément formulé par rapport à la faisabilité des systèmes PRT en général. Nous aborderons cette difficulté majeure dans la prochaine section.

Ensuite, l'intégration du système proposé au tracé de certaines banlieues existantes, dont la topologie des rues pourrait être éloignée de celle d'une grille, serait rendue plus difficile. Par exemple, les pâtés de maisons en triangle ne pourraient pas être couverts, car les segments dans les tranchées et ceux surélevés ne pourraient pas être parallèles entre eux. Aussi, à moins d'être dans un nouveau quartier en développement, il faudra réorganiser les systèmes souterrains d'égouts et de gaz naturel, pour libérer la voie aux tranchées devant être creusées.

## Implantation et faisabilité

Il nous semble qu'un premier type de milieu où le système de transport proposé pourrait réalistement, à petite échelle, être implanté, serait un campus de grande taille, tel que celui de l'Université Laval. Celui-ci comporte d'ailleurs déjà un vaste réseau de tunnels piétonniers souterrains, pour permettre aux étudiants de se déplacer entre les différents bâtiments, tels que les facultés, la cafétéria, les résidences étudiantes, le complexe sportif, et de nombreux autres emplacements.

D'autres exemples de sites d'implantation propices à petite échelle seraient des centres-villes achalandés, où la circulation routière est parfois interdite, et de grands centres commerciaux extérieurs, comme le quartier DIX30 à Brossard.

Dans tous ces exemples, des stationnements, similaires à ceux des gares de trains, accueilleraient les véhicules, pendant que leurs occupants utiliseraient le système de transport proposé pour une partie de la journée. Ce système pourrait coexister avec les voies routières conventionnelles : Par exemple, au campus de l'Université Laval, une grille de 4 voies surélevées, par 3 voies dans des tranchées, pourrait relier les pavillons, et ces voies seraient adjacentes aux voies routières et aux trottoirs piétonniers.

Un tel projet pilote pourrait être financé par l'université, le centre d'achats ou les arrondissements de type centre-ville qui les implanteraient en premier, et pourrait recevoir des subventions des villes et des gouvernements provinciaux et fédéraux, par exemple des ministères des Transports, comme projet de recherche prometteur en transport. Si plus tard implanté à large échelle, on pourrait envisager de financer le système en percevant des droits de passage, ou si les avantages majeurs du système étaient confirmés, et qu'il venait à remplacer majoritairement le système routier, on pourrait envisager de le financer à même les taxes publiques, comme la construction des routes actuelles et d'autres services publics.

Les coûts en infrastructure seraient colossaux, mais, avec ses avantages majeurs espérés, en éliminant les coûts de fabrication et de maintenance automobile, du pétrole que l'on éviterait de transformer et de consommer, des assurances et soins de santé (privés et publics) pour les victimes d'accidents, des chauffeurs rémunérés de transport collectif, des camionneurs (si l'on réalise le projet annexe décrit vers la fin de ce document), de la formation des conducteurs, des contrôles policiers, et de construction, maintenance et déneigement des voies routières, ces coûts pourraient possiblement être comparables, ou même en dessous, des coûts des systèmes de transport terrestres remplacés.

## Implémentation

### Simulation informatique

Une première phase du projet, réalisé dans un cours de conception de jeux vidéo à l'Université Laval, a permis de produire une simulation 3D interactive fonctionnelle, à petite échelle et sans gestion de trafic pour le moment, avec un système de transport à bord duquel on peut embarquer. Elle est

programmée dans l'environnement Unreal Engine 4, en langages C++ et Blueprint. La simulation peut aussi être exécutée en mode non interactif, avec un affichage console seulement, pour simuler de beaucoup plus grands réseaux routiers, et éventuellement de grandes villes fictives interconnectées.

L'application est réalisée en couches, avec un modèle du système de transport qui est indépendant de son affichage, permettant donc, après quelques développements supplémentaires, d'afficher en 3D de plus grandes villes, en chargeant dynamiquement seulement les éléments visuels environnants, mais en continuant à simuler l'entièreté du système de transport représenté par le modèle.

Des personnages non-joueur peupleraient la simulation, et utiliseraient le système de transport proposé pour aller réaliser leurs activités hebdomadaires, selon un emploi du temps et des destinations réalistes pour un citoyen typique. L'utilisateur de la simulation pourra communiquer, via un affichage 2D, avec l'ordinateur des cabines de transport, pour choisir sa destination, soit par recherche d'adresse ou de nom de commerce ou de lieu public, soit parmi une liste de destinations prédéfinies pour l'utilisateur.

## Logistique

Le système utilise, à la base, des algorithmes de planification d'itinéraires simples, tels que A\*, pour naviguer à travers la grille, en s'adaptant aux trajectoires des chariots et des ascenseurs de cabines environnants. Les décisions sur les trajectoires sont prises de manière distribuée, entre les cabines, les chariots et les échangeurs, qui sont tous des acteurs intelligents, et qui communiquent entre eux. Après avoir rendu fonctionnelle une gestion de la navigation de base pour les cabines, dans un temps ultérieur, des efforts pourront être investis pour développer un système de coordination des parcours, optimisé en fonction du trafic. Celui-ci permettra vraisemblablement de mieux gérer de forts achalandages, qui ne sont pas uniformes sur toute la grille, par exemple en adoptant des trajets alternatifs moins achalandés.

Un autre système, qui devra aussi être optimisé, sera le balancement automatique du nombre de cabines à chaque station. Celui-ci se fera en envoyant des cabines vides, qui seraient surnuméraires à certaines stations, vers d'autres stations qui n'en ont plus, ou qui en ont un trop petit nombre par rapport au nombre de quais d'embarquement qu'elles comportent. Ce mécanisme assurera, la grande majorité du temps, un nombre minimal de cabines par station, dans lesquelles on peut embarquer, mais aussi des quais d'embarquement vides pour permettre d'accueillir les autres cabines arrivantes.



## Mécanique

Les composantes mécaniques principales, tels que présentées dans la simulation, et qui pourront être décrites ailleurs, ne seront pas détaillées dans ce document, mais seront énumérées. Elles consistent d'abord en des rails à sens unique et à deux niveaux, un à l'allée et un au retour, supportant des chariots motorisés. Les chariots peuvent passer d'un niveau à l'autre par un aiguilleur, et supportent des cabines cubiques. Ces cabines sont munies de 4 sièges sur 2 côtés de la cabine, et de portes automatiques sur les 2 autres côtés. Des stations au niveau du sol comportent un nombre variable de quais d'embarquement. Des échangeurs situés aux intersections, sortes d'ascenseurs à cabines, permettent le transfert de cabines entre les voies surélevées et les voies dans les tranchées.

Notre équipe de 4 étudiants de l'ÉTS au BAC, en génie logiciel et des TI, cherche présentement à recruter un 5<sup>e</sup> membre, en génie mécanique, pour réaliser le design préliminaire d'une composante mécanique critique du système de transport proposé, soit l'échangeur. Nous croyons qu'il serait intéressant d'inclure dans notre projet une ébauche du système d'arrimage avec les chariots et les ascenseurs à cabines, dans un logiciel de type CAD. Il serait impératif que les cabines s'arriment de manière sécuritaire à ces types de supports mobiles. L'étudiant en génie mécanique pourra envisager des mécanismes d'ancrage compacts et fiables, tels que le mécanisme d'arrimage entre les conteneurs de marchandise et les grues spécialisées dans les ports commerciaux.

## Questionnements soulevés

Tout d'abord, des questions nous ont été posées sur des cas où la gestion du trafic du système de transport proposé pourrait être efficace, ou ne pas l'être. D'abord, pour les lieux publics fréquemment très achalandés, de nombreux quais d'embarquement aux stations devraient permettre d'accommoder de forts débits d'arrivées et de départs de cabines, de jusqu'à plusieurs cabines par seconde, comme nous espérons pouvoir le confirmer dans des scénarios de simulations de lieux à fort achalandage.

Aussi, dans le cas de trains de, disons, 10 cabines se suivant, et devant descendre à 10 stations consécutives sur une voie, les performances devraient être semblables à celle de 10 voitures devant se garer dans 10 entrées de stationnement sur une rue : Dans le cas optimiste, l'ordre des voitures sera le même que l'ordre des entrées de stationnement visées, et aucun ralentissement ne sera nécessaire, pour le système routier comme pour le système proposé. Dans le cas pessimiste, l'ordre des voitures sera l'inverse

de l'ordre des entrées de stationnements visés, alors pour le système routier comme pour le système proposé, le train de véhicules devra ralentir à chaque entrée de stationnement, pour laisser le véhicule en tête faire un virage et entrer dans le stationnement, ou dans le cas du système proposé être élevé ou descendu vers un quai d'embarquement d'une station.

Ensuite, le balancement automatique des cabines entre stations fera en sorte que certaines cabines effectueront des trajets sans transporter de passagers. Cela peut sembler inacceptable, mais nous croyons que, comme pour les technologies d'ascenseurs et de télécabines des stations de ski, où il est acceptable que de 25% à 50% des cabines effectuent des trajets sans passagers, cette contrainte serait également inévitable et selon nous acceptable dans le cas du système de transport proposé.

Un dernier questionnement est par rapport au nombre de 4 passagers par cabine. Nous pensons qu'avoir des cabines à plus grande capacité serait désavantageux pour plusieurs raisons : Premièrement, les passagers plus nombreux auraient probablement des origines et des destinations différentes, alors que notre système ne supporte pas, pour des raisons de performance, des trajets avec des arrêts multiples. Deuxièmement, les cabines devraient alors être plus volumineuses, et nécessiteraient des infrastructures plus lourdes et plus coûteuses (piliers, largeur et hauteur des voies, moteurs puissants...), pour les supporter. Troisièmement, avec 4 passagers plutôt qu'un seul, on facilite, dans une cabine de la taille de celle d'un ascenseur, les déplacements en famille et avec des marchandises.

## Projets annexes

### Transport de marchandises

Un deuxième type de cabines, différent des cabines passagères, pourraient circuler dans le système de transport proposé. Il s'agirait de conteneurs de marchandises, industrielles ou commerciales, qui pourraient contenir l'équivalent, dans le domaine de la manutention, d'une palette de marchandise. Au lieu de circuler entre des stations de passagers, ces cabines de marchandises circuleraient entre des quais d'embarquement privés, de bâtiments industriels, d'entrepôts, ou commerciaux, tels que des centres d'achat, et les grandes épiceries et autres types de magasins à grande surface.

Les transports de marchandises vers de plus petits commerces pourraient se faire aux stations ordinaires qui sont situées sur chaque rue. De petits chariots électriques pourraient alors permettre, à un

employé du commerce, de transporter la marchandise de la station jusqu'au commerce (dont le volume d'opérations ne justifierait pas l'utilisation d'un quai privé directement connecté au système), qui serait situé à proximité. On économiserait ainsi sur les frais de camionnage normalement engendrés. De plus, les manufactures pourraient automatiser l'expédition des biens produits à partir de leurs quais privés, tout comme les entrepôts et grands commerces pourraient automatiser la réception, à des fins de stockage.

## Ascenseurs d'édifices

Un dernier projet annexe, dont on pourrait considérer plus tard la faisabilité et le rapport coût-bénéfice, et (comme si notre projet ne l'était pas déjà suffisamment) plus hypothétique, et totalement optionnel, serait que les ascenseurs de cabines, déjà utilisés pour les échangeurs et aux quais d'embarquement, puissent desservir non seulement deux niveaux, celui des tranchées et celui surélevé, mais aussi des 2<sup>èmes</sup>, 3<sup>èmes</sup> et N<sup>èmes</sup> niveaux, de manière à remplacer, dans certains grands édifices voulant se connecter au réseau terrestre, certaines cages d'ascenseurs conventionnelles. Ainsi, on pourrait réaliser des trajets plus complets, par exemple d'un certain étage d'un centre commercial, avec des paquets, vers l'étage où l'on réside dans un bâtiment résidentiel, puis, après être arrivé à la maison avec ses paquets qu'on y laisse, partir du même endroit avec son sac à dos, mais sans son manteau d'hiver, pour se rendre assister à son cours du soir, directement au bon étage, du bon pavillon, de son université. Ce mécanisme optionnel, dans les grands édifices souhaitant le supporter seulement, et devant être financé par ceux-ci, pourrait accélérer et faciliter davantage certains trajets, mais pas ceux entre les plus petits bâtiments, qui demeureraient tout de même facilement accessibles par les stations ceinturant chaque quadrilatère.

## Analyse de métriques du système

Tel que mentionné précédemment, en plus d'être utilisable comme une simulation interactive 3D permettant d'explorer des villes de taille moyenne, la même solution logicielle permet déjà de simuler de beaucoup plus grandes grilles de transport, rectangulaires pour le moment. Nous souhaitons continuer le développement en simulant quelques grandes villes interconnectées, générées selon des tracés aléatoires, avec un affichage console seulement au lieu d'un affichage 3D. Ce mode de simulation permettrait de collecter des statistiques sur des métriques de performances des itinéraires individuels, et des capacités de gestion de différents volumes de trafic. Nous voudrions comparer celles-ci à des systèmes routiers dans des villes réelles comparables, par une méthode de calcul qu'il reste à définir. Nous pourrions ainsi, en

plus de donner un aperçu du système de transport proposé aux utilisateurs de la simulation 3D interactive, faire une première estimation de ses performances espérées à grande échelle.

## Conclusion

Nos objectifs sont donc les suivants: Premièrement, nous voulons permettre à l'utilisateur de s'immerger dans une simulation 3D, dans laquelle il peut embarquer à bord du système de transport proposé, pour se faire une opinion sur le niveau d'intérêt qu'il aurait à utiliser celui-ci, au lieu d'un véhicule personnel ou d'un moyen de transport collectif conventionnel, dans des villes de taille moyenne. Deuxièmement, nous voulons estimer les performances d'un tel système, à l'échelle de quelques grandes villes interconnectées, et comparer celles-ci aux métriques de villes réelles comparables.

Dans ce document, nous avons précisé des points clés sur l'implémentation du système de transport proposé, abordé quelques questionnements soulevés, et présenté deux projets annexes optionnels. De plus, nous avons décrit des caractéristiques du système qui pourraient le faire se distinguer, au niveau de ses performances, de son empreinte écologique, des risques de sécurité évités, et de son accessibilité. Cependant, un obstacle à la réalisation physique du système proposé serait l'investissement massif nécessaire en infrastructures, mais celui-ci demeurerait raisonnable à l'échelle d'un projet pilote.

Nous espérons que le projet proposé apparaisse, à ceux qui viennent de lire ce document, viable, prometteur et pertinent dans le cadre d'un projet étudiant multidisciplinaire de niveau BAC en génie.

En plus d'un dernier coéquipier en génie mécanique, nous sommes à la recherche d'un professeur de l'ÉTS qui accepterait de nous fournir un encadrement, que nous apprécierions grandement, pour un cours de projets spéciaux à l'été 2019, et pour un projet de fin d'études à l'automne 2019. Une expertise, soit en modélisation de systèmes de transport, soit en conception de jeux vidéo 3D, nous apparaîtrait idéale, pour nous aider à définir et exécuter le projet, et enfin analyser et présenter ses résultats.

L'obtention de résultats positifs pourrait, ultérieurement, mener à d'autres développements, tels que l'optimisation des heuristiques de gestion de forts volumes de trafic, ou à l'assemblage d'un prototype électromécanique à échelle réduite d'un échangeur de cabines qui serait fonctionnel.