

MICROSCOPIE D'UN MÉTRO: MICRO-SIMULATION EN TOTALEMENT DÉSAGRÉGÉ DÉRIVÉE DES TRANSACTIONS DE CARTES À PUCES

Robert Chapleau, École Polytechnique de Montréal, rchapleau@polymtl.ca

Tim Spurr, Agence métropolitaine de transport, tspurr@amt.qc.ca

RÉSUMÉ

L'émergence presque simultanée de l'utilisation systématique des cartes à puces dans les transports publics, de la production de données normalisées caractérisant le service (GTFS) et de la distribution ouverte de modèles dynamiques discrets (TRANSIMS, MatSim) basés sur les agents ou automates cellulaires, autorise maintenant des démarches plus sophistiquées de modélisation des grands réseaux de transport urbain. Le présent projet de recherche s'inscrit dans un processus d'intégration à la fois de modèles, de données et de procédures. Cela porte, de manière accentuée, sur un raffinement de diverses méthodes tant pour l'estimation de la demande dérivée des transactions de cartes à puces dès lors que la destination n'est pas relevée, que pour l'affectation sur un réseau avec prise en considération de l'horaire planifié des véhicules. En guise de démonstration, le cas de la micro-simulation dynamique du métro de Montréal est présenté, pour lequel plusieurs ensembles de données d'horaire, de transactions et de déplacements dérivés ont été construits et modélisés, permettant ainsi de produire divers indicateurs tant d'occupation que de qualité de service. Le contexte d'analyse ainsi développé, à partir des résultats de micro-simulation obtenus avec le logiciel américain TRANSIMS, est particulièrement fécond en termes de visualisation et d'animation du comportement du système.

ABSTRACT

The nearly simultaneous emergence of smart cards deployed in public transit systems, the production of standardized datasets describing service levels (general transit feed specification or GTFS) and the distribution of open-source dynamic discrete models (TRANSIMS, MatSim) based on agents or cellular automata make possible more sophisticated methods for simulating large urban transport networks. The present research project presents an integration of models, data and procedures that offers both a refinement of various methods for deriving travel demand from smart card transactions when the destination is not observed and a trip assignment that accounts for the planned vehicle schedules. The presentation addresses as a case study the dynamic microsimulation of the Montreal subway, for which several datasets relating to schedules, transactions and derived trips were

constructed and modelled, thereby permitting the production of various indicators of vehicle occupancy and quality of service. The analytical context thus established and based on microsimulation results obtained from the American TRANSIMS software yields an especially fruitful environment for the visualisation and animation of the behaviour of the subway system

INTRODUCTION

La tradition canadienne de conception, de planification et d'évaluation des grands projets de transport s'est longtemps appuyée sur la combinaison de modèles agrégés et désagrégés de transport urbain avec des données de demande provenant de grandes enquêtes dites Origine-Destination. A l'instar de Québec et Toronto, Montréal a réalisé des enquêtes ménages transport régionales à tous les 4-5 ans depuis 1970, selon la méthode d'enquête CATI (Computer-Assisted Telephone Interviews), obtenant ainsi une caractérisation multi-modale des déplacements de personnes à un niveau de 4% des ménages. Ces données ont servi d'input pour les modèles EMME/2 (affectation routière sous congestion – modèle agrégé classique) et MADITUC (modèle totalement désagrégé d'affectation des personnes sur le réseau de transport en commun (Chapleau, 1992)) dans divers contextes d'analyse :

- Appréciation de mesures de mitigation lors de projets de réhabilitation de voies autoroutières;
- Fermeture de ponts;
- Scénarios de prolongement de métro;
- Études de corridors de tramway;
- Partage de recettes de titres tarifaires intégrés;
- Financement du transport en commun dans un contexte géopolitique.

Pour résumer l'essentiel des procédures utilisées, la plupart des simulations sont effectuées en « régime permanent », sur des périodes de pointe a.m. ou p.m., pour un jour moyen de semaine, selon le contexte examiné. Ce choix de design d'analyse est-il suffisant? Les données – collectées à un intervalle de 5 ans, à l'automne, sur quelques 50 « jours de semaines » – sont-elles représentatives? La variabilité de la demande est-elle appréciable? Les phénomènes de pointe sont-ils bien caractérisés? Y a-t-il sous-estimation des déplacements hors domicile dans des enquêtes téléphoniques? Nombre de questions pertinentes se posent pour lesquelles très peu d'expérimentations ont été réalisées.

Malgré ces questionnements actuels, il demeure que le milieu des professionnels de la planification des transports apprécie ces données alors que ce cadre a permis de développer, collatéralement, de multiples bases de données sur les réseaux et autres facilités de transport ainsi que sur les générateurs de déplacements. Cependant, leur limite d'utilisation est rapidement atteinte lorsque l'on découvre des problèmes de représentativité ou de transférabilité des comportements.

Depuis quelques années, l'insertion technologique de nouveaux moyens informationnels (données GPS, cartes à puces) représente une intéressante opportunité pour, à la fois, remettre en question et revivifier notre approche de modélisation. Comme ces nouveaux apports technologiques concernent, en premier lieu, le transport en commun, ce mode de

transport peut voir son mode d'analyse être révolutionné, du moins, en termes de résolution spatio-temporelle.

L'objectif de cette recherche se situe au niveau d'une démonstration du potentiel (ou de la faisabilité) de l'exploitation de données de cartes à puces dans le cadre de la planification opérationnelle du métro de Montréal. Cette opération comporte des hypothèses, des choix instrumentaux ainsi que des représentations qui se voudraient pertinentes en contexte.

Dans un premier temps, il sera question de l'envergure des requis et des défis à entreprendre. Puis, une description sommaire des algorithmes de traitement de la demande et de fiabilité de la caractérisation qui en découle. Ensuite, la démarche de simulation est décrite pour en extirper les multiples bases de données enrichies par la modélisation. Finalement, quelques analyses et leur visualisation sont présentées afin d'illustrer les axes de recherche qui devront faire l'objet de développements futurs.

DÉFIS ET REQUIS D'UNE MODÉLISATION « INFORMATIONNELLE »

Sans reprendre ici une revue de littérature relative tant à la modélisation agrégée qu'à d'autres approches plus ambitieuses (voir à cet égard les références de Spurr et al (2013b) et Trépanier (2010)), il faut d'abord considérer la taille des bases de données maintenant disponibles par l'apport des données archivées. Dans le cas de Montréal, ville d'une taille modeste relativement aux grandes métropoles que sont Tokyo, Londres ou Paris, l'utilisation du transport en commun engage journalièrement près de 2 millions de transactions de validation de titres de transport. Pour le seul cas de la STM (Société de Transport de Montréal), on observe environ 900,000 montées sur les bus et tout autant d'entrées aux stations de métro lors d'un jour moyen de semaine. Le premier défi consiste alors à déterminer les points de descente ou de sortie des DÉPLACEMENTS effectués sur ces modes de transport.

Lorsqu'un système comporte un certain degré de complexité, il devient important de le conceptualiser en termes d'OBJETS. Dans une modélisation fine du transport en commun, on doit s'intéresser à la coïncidence des TRAJECTOIRES tant des USAGERS que des VÉHICULES. La venue des fichiers normalisés GTFS (Google/General Transit Feed Specification) amène une description complète du service commercial du transport en commun. Typiquement, un tel fichier, qui décrit chaque départ de ligne ainsi que chaque passage horaire à chacun des arrêts du réseau, peut comporter quelques 7 millions d'entrées pour une période donnée. Chaque arrêt-ligne correspond finalement à un lien dans un graphe classique (attributs : distance, temps de parcours, montants, charge, descendants). Pour un seul jour moyen de semaine, il est question de près de 800,000 « stop_times » pour les bus et 32,500 passages aux quais pour les rames de métro. Selon la nomenclature propre au système TRANSIMS, lors de l'affectation des voyageurs sur le réseau du métro, 900,000 entrées au métro de Montréal vont générer environ 7,000,000

« legs » - segments de la trajectoire d'un déplacement à l'intérieur du réseau métro (marche d'accès au quai, attente, portion en véhicule, sortie, marche d'excès, puis correspondance si nécessaire, etc...). Pratiquement, une situation dite de « Big Data ». Ainsi, le second défi consiste ici à définir et modéliser géométriquement le réseau selon un S.I.G. adapté où la dynamique des mouvements des véhicules est prise en compte.

Le défi suivant consiste à effectuer l'assemblage des éléments demande et offre afin de réaliser la simulation complète du système. Pour ce faire, à la manière de Mathis (2009) le paradigme-programme TRANSIMS est exploité ici d'une manière particulière. TRANSIMS (<http://code.google.com/p/transims/>) (TRansportation ANalysis SIMulation System) est un ensemble intégré d'outils permettant l'analyse d'un système de transport régional. Un système open-source et multiplateforme doté de nombreux modules pour réaliser divers traitements : synthèse de population, générateur d'activités, création de réseaux, calcul de chemins à impédance minimale, affectation sous congestion, choix modal, micro-simulation multi-agents ou automates cellulaires, production de représentation S.I.G. La plupart des applications connues (comme celles de Chicago ou Sacramento) se sont matérialisées à partir d'une approche synthétique (population et activités). Contrairement à l'approche classique, notre défi consiste plutôt à exploiter des données RÉELLES COMPLÈTES provenant des transactions faites par cartes à puces.

La dernière phase du projet porte sur la visualisation et l'analyse fine des résultats. Comme le format des données suit le standard de ESRI (« shapefile »), il est loisible d'exploiter encore ici un logiciel open-source et multiplateforme, à savoir QGIS (<http://www.qgis.org/>). Toutes les opérations de modélisation s'effectuent maintenant dans un environnement relativement efficace depuis l'existence de l'interface usager TRANSIMS STUDIO (<http://sourceforge.net/projects/transimsstudio/>). Cet environnement permet de consolider toutes les composantes de la procédure de modélisation pour un PROJET donné:

- SCRIPTS python pour l'exécution des MODULES;
- Appel à des fichiers de CONTRÔLE;
- Définition des PARAMÈTRES et des CLÉS pour l'identification des FICHIERS SOURCE et de RÉSULTAT;
- Consultation et édition des éléments procéduraux et de la documentation.

TRAITEMENT DES DONNÉES DE DEMANDE (CARTES À PUCES)

L'expérimentation envisagée demeurant la simulation du métro de Montréal pour un JOUR MOYEN de SEMAINE, il est impérieux de transformer les transactions de validation des cartes à puces OPUS de la STM réalisées de 5 :00 à 25 :00 auprès de 478 tourniquets et portillons des 68 stations en déplacements ENTRÉES/SORTIES. Chacune des validations comporte un support, d'où un inventaire complet de tous les déplacements ainsi qu'une trace spatiale (STATION) et temporelle à la seconde. Pour les fins de la démonstration –

constituer un laboratoire intégral de tous les déplacements et toutes les opérations un jour moyen de semaine—, la journée du jeudi, 21 octobre 2010, a été choisie. Il s'y trouve 883,599 transactions effectuées par 467,944 cartes; les transactions des jours suivants sont aussi prises en considération pour la détermination des stations de sortie. La procédure de conversion des transactions demeure relativement complexe puisque le suivi de la chaîne de déplacements comporte au moins autant d'incertitudes que de cartes. La situation se présente selon le *Tableau 1*.

Tableau 1 - Relation entre CARTES (support de transaction) et transactions (déplacements entre une station d'ENTRÉE et une station de SORTIE du métro); données complètes de la journée du 21 octobre 2010, métro de Montréal.

nb. dépl./carte	nb. cartes	nb. dépl.	% dépl.
1	163 293	163 293	18.5%
2	235 029	470 058	53.2%
3	40 583	121 749	13.8%
4	20 950	83 800	9.5%
5et+	8 089	44 699	5.1%

L'algorithme de traitement procède par une catégorisation des transactions. Par exemple, les supports n'effectuant qu'une seule transaction seront qualifiés d'orphelins (titres unitaires ou déplacements unidirectionnels). Les premières transactions (rang1) de titres effectuant plus d'une transaction auront, par conséquent, une destination bien déterminée par le biais de la transaction suivante à une autre station de métro. Ce type de déplacement est aussi fort intéressant pour la caractérisation d'une activité associée dont la durée sera typique (travail, étude, magasinage, loisir ou autres). La figure 1 illustre la distribution temporelle des diverses catégories lorsque l'on incorpore à la chaîne la transaction du jour subséquent.

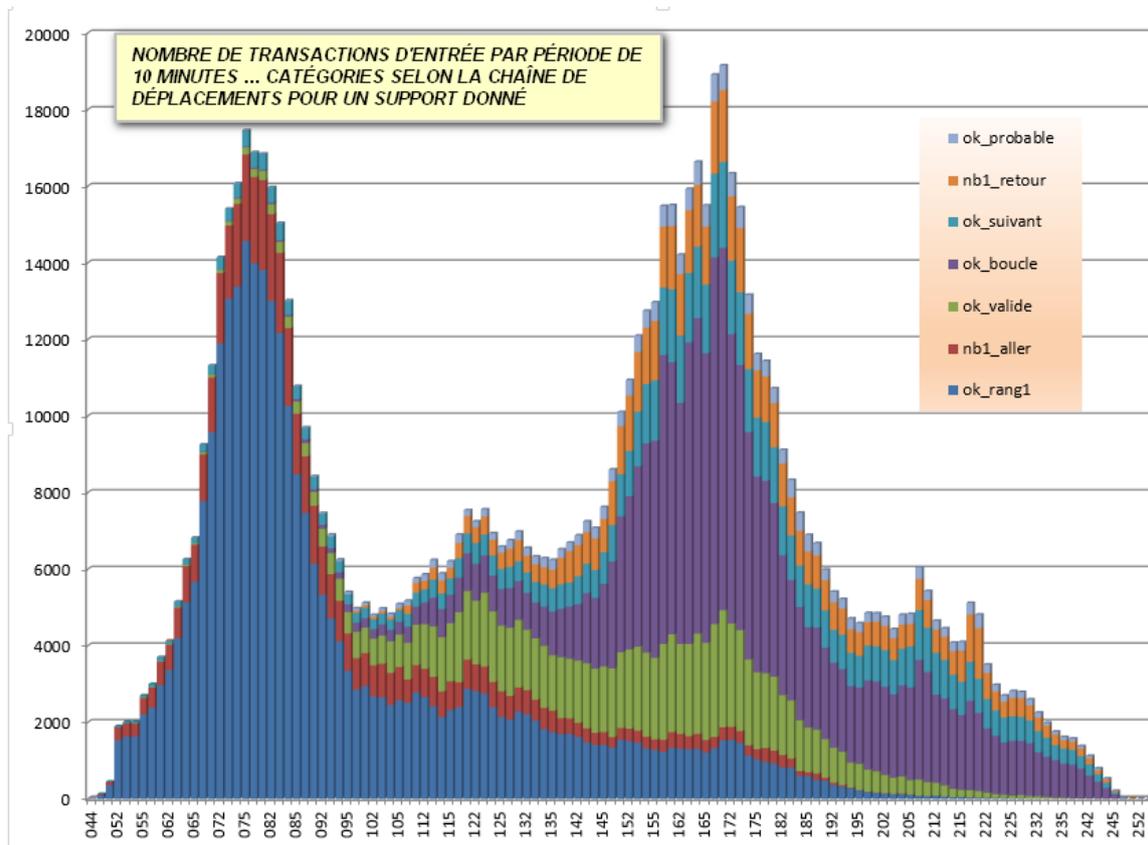


Figure 1 - Distribution temporelle de toutes les ENTRÉES cumulées aux stations de métro de Montréal, un jour de semaine, selon les catégories d'estimation des stations de SORTIE

Plus spécifiquement, le Tableau 2 assure la définition de chaque classe de traitement et montre le nombre de transactions concernées.

Tableau 2- Typologie des transactions pour l'estimation des stations de destination.

type	catégorie	description	déplacements	%
7	nb1_retour	Transactions sans suite appariées (destination d'une transaction aller – même station d'entrée et même tranche de temps) selon la distribution observée dans les transactions reflétant le pattern (rang1 -> boucle+suisvant) (O-D très probables)	65 354	7.4%
6	nb1_aller	Transactions sans suite appariées selon une logique de temps et selon la distribution observée dans les transactions reflétant le pattern (rang1 -> boucle+suisvant) (O-D très probables)	65 354	7.4%

type	catégorie	description	déplacements	%
5	ok_probable	Transaction non appariées dont l'estimation de la destination se fait selon les fréquences de sortie (O-D aléatoires)	23 469	2.7%
4	ok_rang1	Premier déplacement du jour avec destination certaine confirmée par une transaction subséquente le même jour (O-D certains)	304 651	34.5%
3	ok_valide	Déplacements intermédiaires dont les stations de sortie sont confirmées par la chaîne des transactions (O-D certains)	111 004	12.6%
2	ok_suivant	Dernière transaction du jour pour laquelle la transaction du lendemain comporte une station différente (O-D très probables)	85 801	9.7%
1	ok_boucle	Dernière transaction du jour pour laquelle la transaction du lendemain correspond au premier déplacement de la carte (O-D certains)	227 966	25.8%
	Total général	Ensemble des transactions d'un jour dont les déplacements O-D sont déterminés (chaîne ou modèle)	883 599	100.0%

Notamment, les transactions de rang1 semblent bien refléter une classe d'usagers réguliers – en majorité des cartes d'abonnement mensuel – lesquels mettent en relief les stations à caractère « résidentiel d'origine ». La Figure 2 explicite le phénomène.

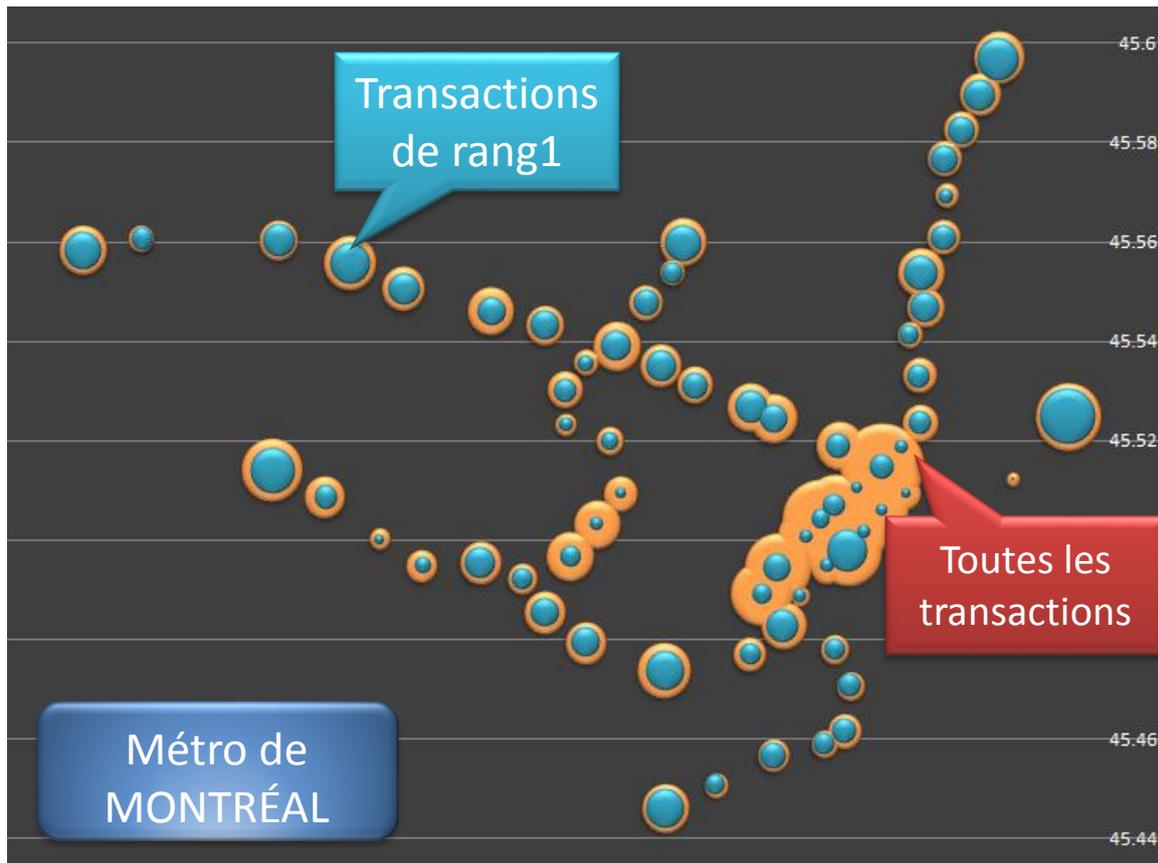


Figure 2 - Illustration, pour chacune des stations de métro, du nombre de transactions de rang1 sur le nombre total de transactions (304 651 entrées –bleu- sur 883 599 entrées totales –orange-)

Au total, tel qu'illustré au tableau 3, la procédure de traitement des transactions selon les chaînes (comportant les transactions du lendemain) détermine avec grande certitude 83% des déplacements. Les titres orphelins (sans chaîne de transactions), donc correspondant souvent à des titres unitaires, sont placés en appariement selon la distribution spatio-temporelle des déplacements connus. Finalement, les déplacements unidirectionnels (répétitions confirmées jour après jour, sans doute utilisation d'un autre mode à l'aller ou au retour) auront une affectation proportionnelle des destinations pour assurer, dans l'ensemble, la symétrie des entrées-sorties. Ainsi, la technique apparaît robuste.

Tableau 3 - Typologie des transactions pour l'estimation des stations de destination.

	cartes	rang1-OD	valides-OD	boucle-OD	suitant-OD	orphelin	unidirection	TRANSACTIONS
n=1	163293				32383	92890	38020	163293
					20%	57%	23%	100%
n=2	235029	235029		181169	37086	16774		470058
		50%		39%	8%	4%		100%
n>2	69622	69622	111004	46797	16332	6493		250248
		28%	44%	19%	7%	3%		100%
	467944	304651	111004	227966	85801	116157	38020	883599
D/C=	1.89	34%	13%	26%	10%	13%	4%	100%
			73%		10%		154177	
							à estimer	

Un fichier de tous les déplacements individuels est ainsi constitué avec les attributs suivants: station d'origine, station de destination, temps du passage au tourniquet d'entrée (à la seconde), et, si nécessaire pour d'autres analyses, type de titre, rang du déplacement, durée d'activité, accès par la marche ou bus en correspondance.

CARACTÉRISATION DE L'OFFRE DANS UN CONTEXTE DE MICROSIMULATION

Les techniques classiques d'affectation des déplacements sur un réseau s'accommodent d'une modélisation en graphe (nœuds, liens, lignes). La connexité en est ainsi déterminée, et la charge du réseau se fait pour une période convenue d'avance, typiquement une période de pointe. Ici, on se trouve dans un domaine discret et dynamique. Pour ce qui touche le niveau de service, le traitement s'effectue selon les horaires planifiés du système : environnement dit « schedule-based ». Les données nécessaires se trouvent maintenant dans des fichiers normalisés par Google, les fichiers GTFS. Cette spécification, dans le cas du métro de Montréal, définit 30,281 temps de passage de rames de métro aux quais des 68 stations lors de 1581 départs-directions-lignes pour une journée.

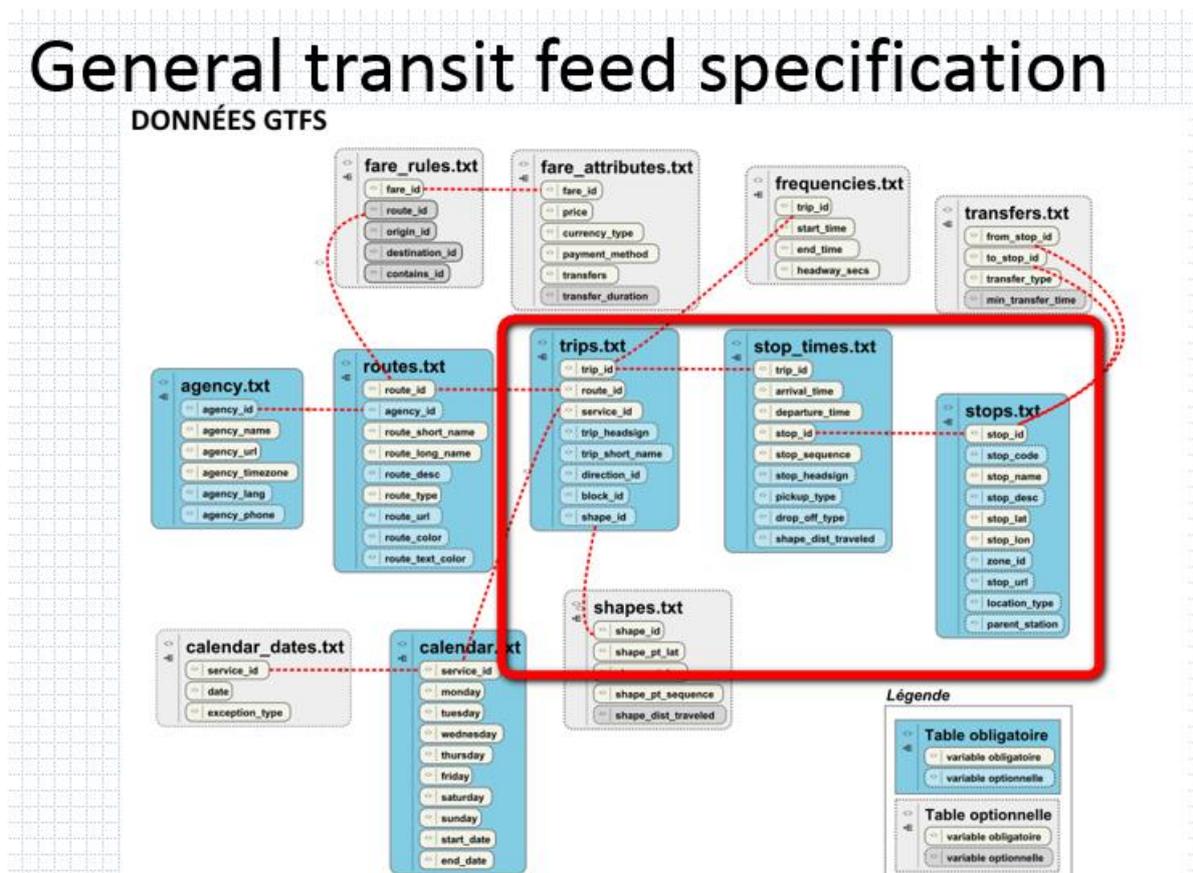


Figure 3 - Objets associés à la définition GTFS d'un réseau TC : agence, lignes, périodes de service, tarification, voyages, horaire complet, arrêts, trajectoires; une spécification spatio-temporelle du service commercial

Dans le cadre d'une micro-simulation, les temps de passage publiés au niveau de la minute doivent être amenés à la résolution de la seconde, la même que les transactions de cartes à puces.

D'autre part, la simulation fait appel au logiciel ouvert TRANSIMS, lequel a été élaboré surtout pour une modélisation de type « basé sur les activités et les automates cellulaires » et, en outre, axé à l'étude de la congestion automobile. Le modèle exige alors des liens routiers qui génèrent automatiquement les lieux d'activité qui servent impérativement comme origine ou destination des déplacements. Pour utiliser ce médium pour la simulation d'un réseau de transport collectif, quelques contorsions s'avèrent nécessaires. La Figure 4 en illustre les principaux éléments :

- Chaque station du métro est représentée par un lien de type local, engendrant ainsi deux lieux d'activité; les extrémités du lien représentent les points d'entrée et de sortie de la station, initiant ainsi les liens d'accès aux quais associés aux lignes;
- Deux paradigmes de codification sont possibles : approche routière où les passagers se déplacent sur des autoroutes (local, rampe d'accès, autoroutes), approche TC où l'on retrouve trottoirs d'accès et sites propres; ici, la focalisation se fait sur les véhicules (rames de métro).

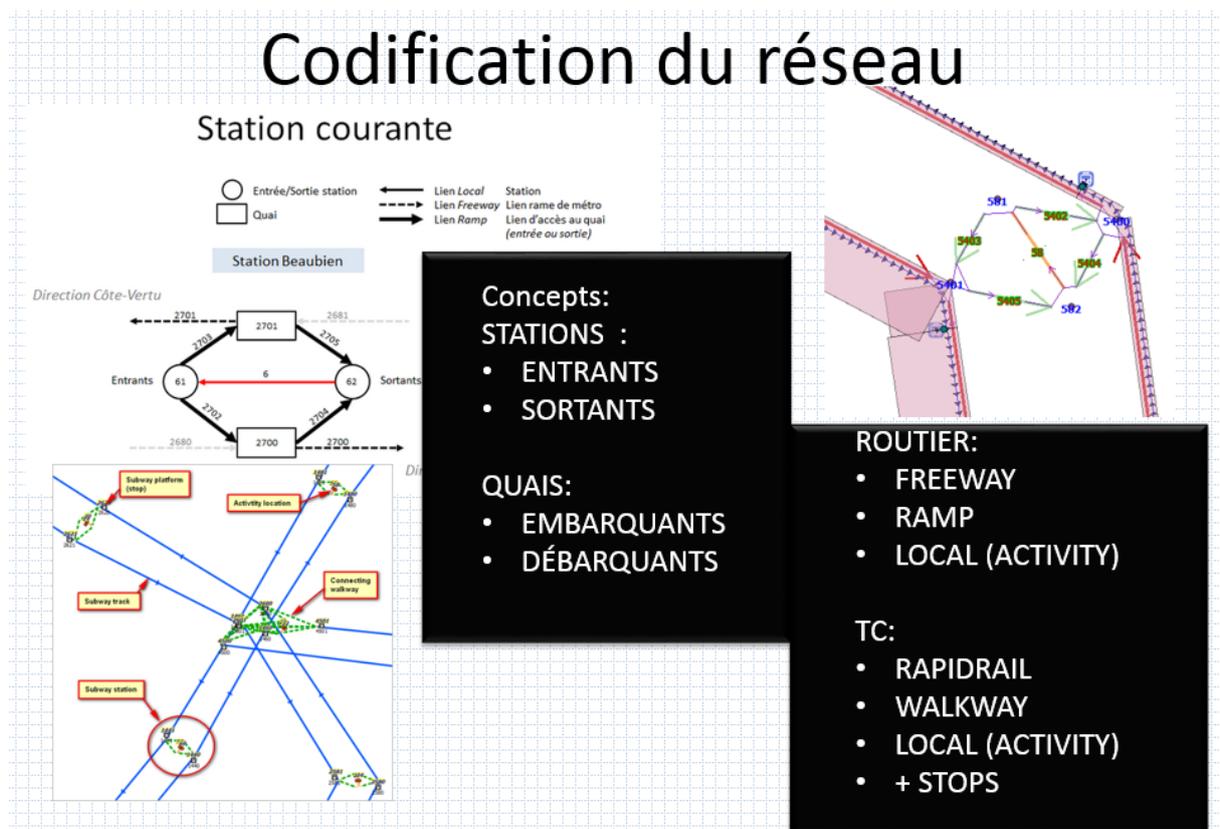


Figure 4 - Concepts relatifs à la codification d'un réseau TC dans le cadre du logiciel TRANSIMS

Un point de détail permet d'apprécier le type de détails pris en considération dans la géométrie du réseau codifié. La Figure 5 fait état d'une des situations les plus simples.

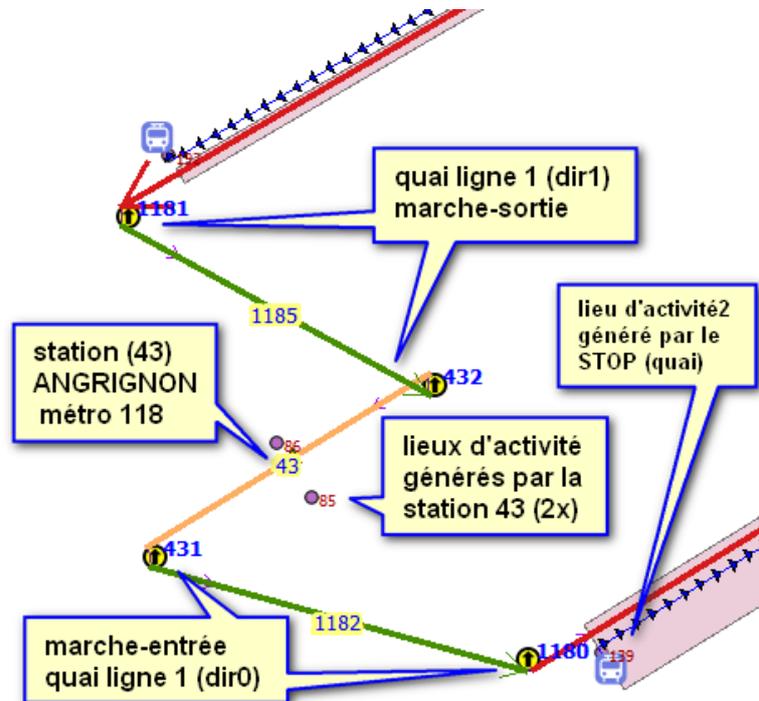
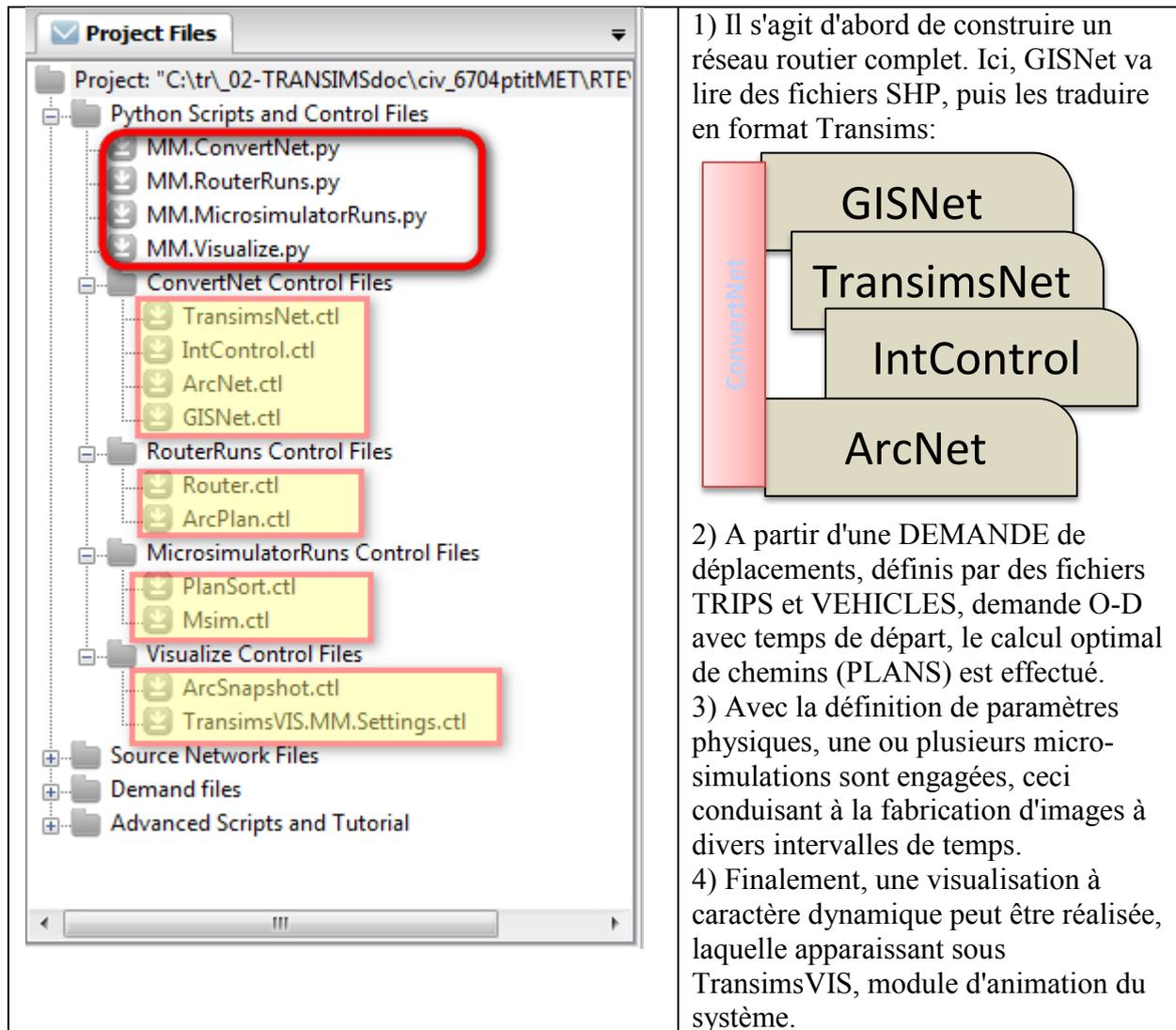
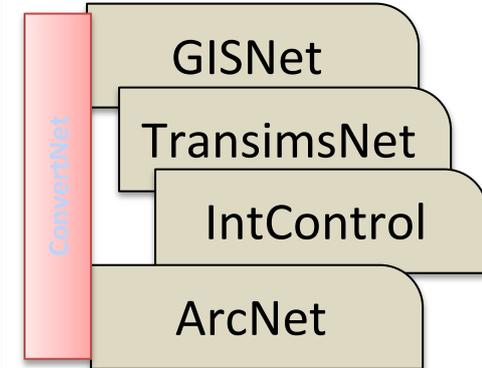


Figure 5 - Détails de la codification d'un terminus simple d'une ligne de métro

Au départ, le modèle TRANSIMS apparaît d'une grande complexité. Ce système comporte plus de 60 modules accompagnés d'autant de fichiers de contrôle et de milliers de paramètres divers. Grâce à la disponibilité plus récente de TRANSIMS Studio, la procédure est structurée selon une série d'étapes claires : création du réseau, calcul des chemins les plus courts, affectation des déplacements, micro-simulation, puis visualisation. La Figure 6 en montre les éléments. L'approche procédurale pour réaliser un projet complet relève de 4 étapes principales, auxquelles sont adjointes des fichiers de contrôle ainsi que des fichiers de données.



1) Il s'agit d'abord de construire un réseau routier complet. Ici, GISNet va lire des fichiers SHP, puis les traduire en format Transims:



2) A partir d'une DEMANDE de déplacements, définis par des fichiers TRIPS et VEHICLES, demande O-D avec temps de départ, le calcul optimal de chemins (PLANS) est effectué.
 3) Avec la définition de paramètres physiques, une ou plusieurs micro-simulations sont engagées, ceci conduisant à la fabrication d'images à divers intervalles de temps.
 4) Finalement, une visualisation à caractère dynamique peut être réalisée, laquelle apparaissant sous TransimsVIS, module d'animation du système.

Figure 6 - Présentation de TRANSIMS Studio : mise en procédure de Scripts, Modules et Fichiers de Contrôle et de Données pour la réalisation d'une micro-simulation avec TRANSIMS

AFFECTATION DYNAMIQUE DES DÉPLACEMENTS

L'exécution réussie des modules évoqués ci-haut construit une panoplie de résultats de toutes sortes, et ce, sur chacun des objets pris en considération : nœuds, lignes, profils de charge, détails sur les segments (marche, attente, et sections de lignes) des déplacements. Les étapes classiques sont réalisées. La Figure 7 en illustre les principales étapes, où les fichiers de NŒUDS, LIENS, LIGNES, ARRÊTS, HORAIRE, VÉHICULES, DÉPLACEMENTS permettent de calculer et de révéler de nouveaux attributs tant sur le réseau que sur les déplacements.

Microsimulation avec TRANSIMS

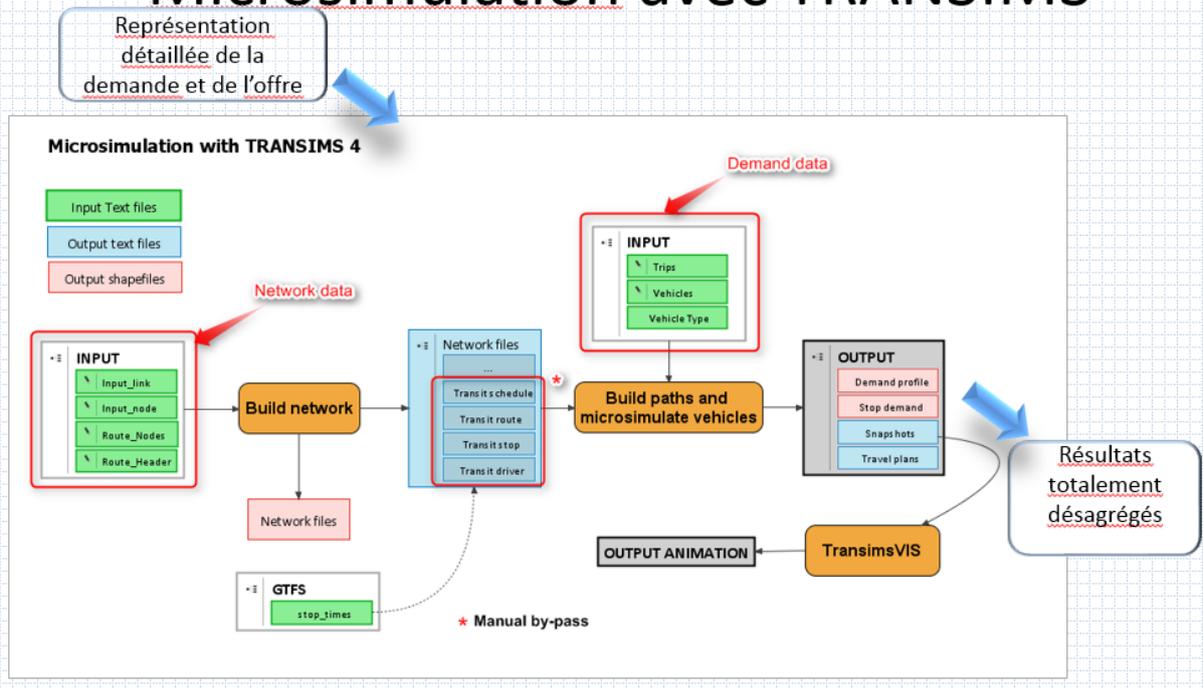


Figure 7 - Diagramme schématisé de l'imbrication des données et des modules lors d'une simulation TRANSIMS.

Le premier résultat obtenu de l'exercice autorise une représentation classique d'un S.I.G. à l'aide de QGIS, tel qu'illustré à la Figure 8.

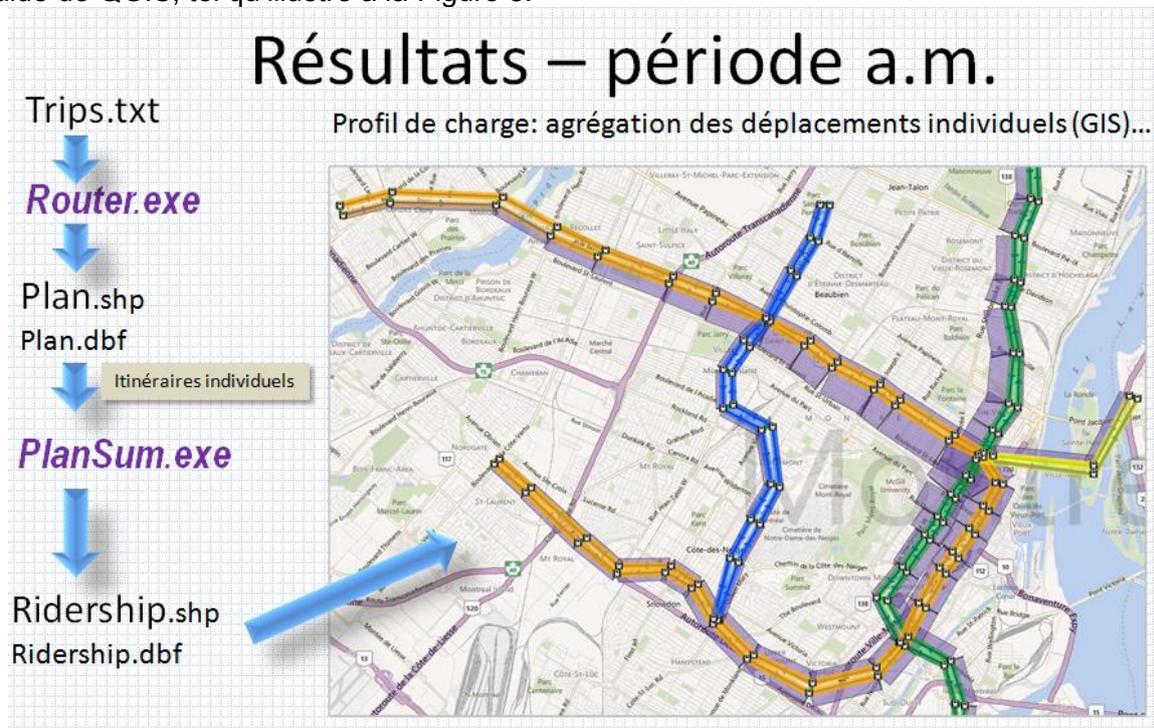


Figure 8 - Profil de charge classique pour une période de pointe, obtenu suite à l'exécution des modules TRANSIMS : déplacements, calculateur des chemins, assemblage, achalandage des lignes.

VISUALISATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

L'affectation dynamique des déplacements dont le choix d'itinéraire dépend des horaires planifiés amène une foule diversifiée de résultats. Au-delà des représentations usuelles, il est loisible d'exploiter les données avec quelques manipulations propres à un chiffrier. Pour fins de démonstration, les figures 9 et 10 montrent l'étude d'une série de départs consécutifs en période critique de la pointe du matin, avec prise en compte de la capacité. La charge (nombre de voyageurs à bord de chaque rame) est calculée pour des départs dont l'intervalle est de 3 minutes pour le tronç de la ligne. Le premier tableau est réalisé avec MS Excel, tandis que la représentation 3D s'effectue avec le logiciel Surge (Dressler, 2009). Cette dernière représentation ne correspond pas à la surface de la demande, mais demeure une évocation intéressante des niveaux critiques de charge dans l'espace temps-distance d'une ligne.

Suite à la simulation qui détermine la trace de chaque voyageur sur le réseau, la base de données des déplacements peut être scrutée sous diverses perspectives. Lorsque la focalisation s'opère sur les moments et endroits les plus critiques du système, il est possible de décomposer et dénombrer l'importance de chaque mouvement piétonnier à l'intérieur du réseau. Les figures 11 et 12 font le bilan des mouvements de correspondance à la station la plus chargée du métro de Montréal, Berri-UQÀM : 6 quais en plus des entrées/sorties. D'une part, la Figure 11 fait état des matrices O-D des flots aux périodes de pointe du matin et de l'après-midi, alors que la Figure 12 montre simultanément l'évolution temporelle (niveau de résolution du 10 minutes) de ces quantités en indiquant les quais de destination des entrants à la station ainsi que les quais de provenance des montants/descendants à chaque quai (ligne-direction).

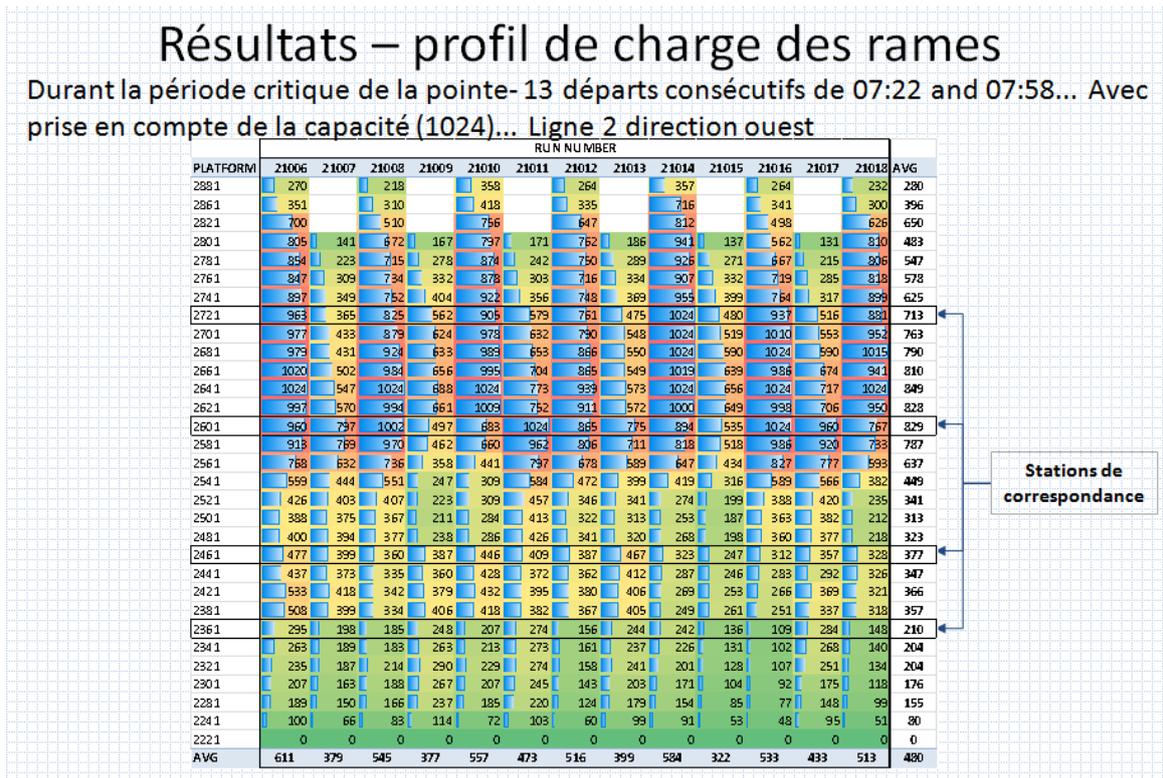


Figure 9 - Profil de charge de la ligne 2 ouest alors que des départs sont injectés de deux terminus; l'intervalle moyen est de 3 minutes; la capacité est fixée à 1024 passagers.

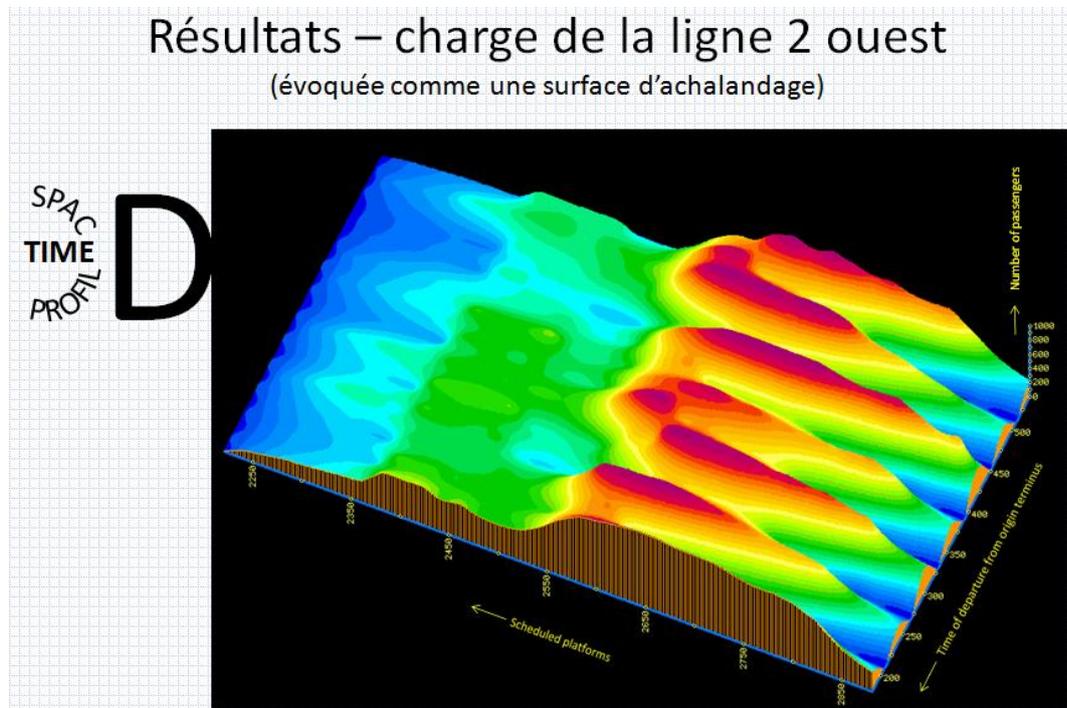


Figure 10 - Profil de charge de la ligne 2 ouest; 13 départs consécutifs; représentation en surface 3D à l'aide du logiciel Surge.

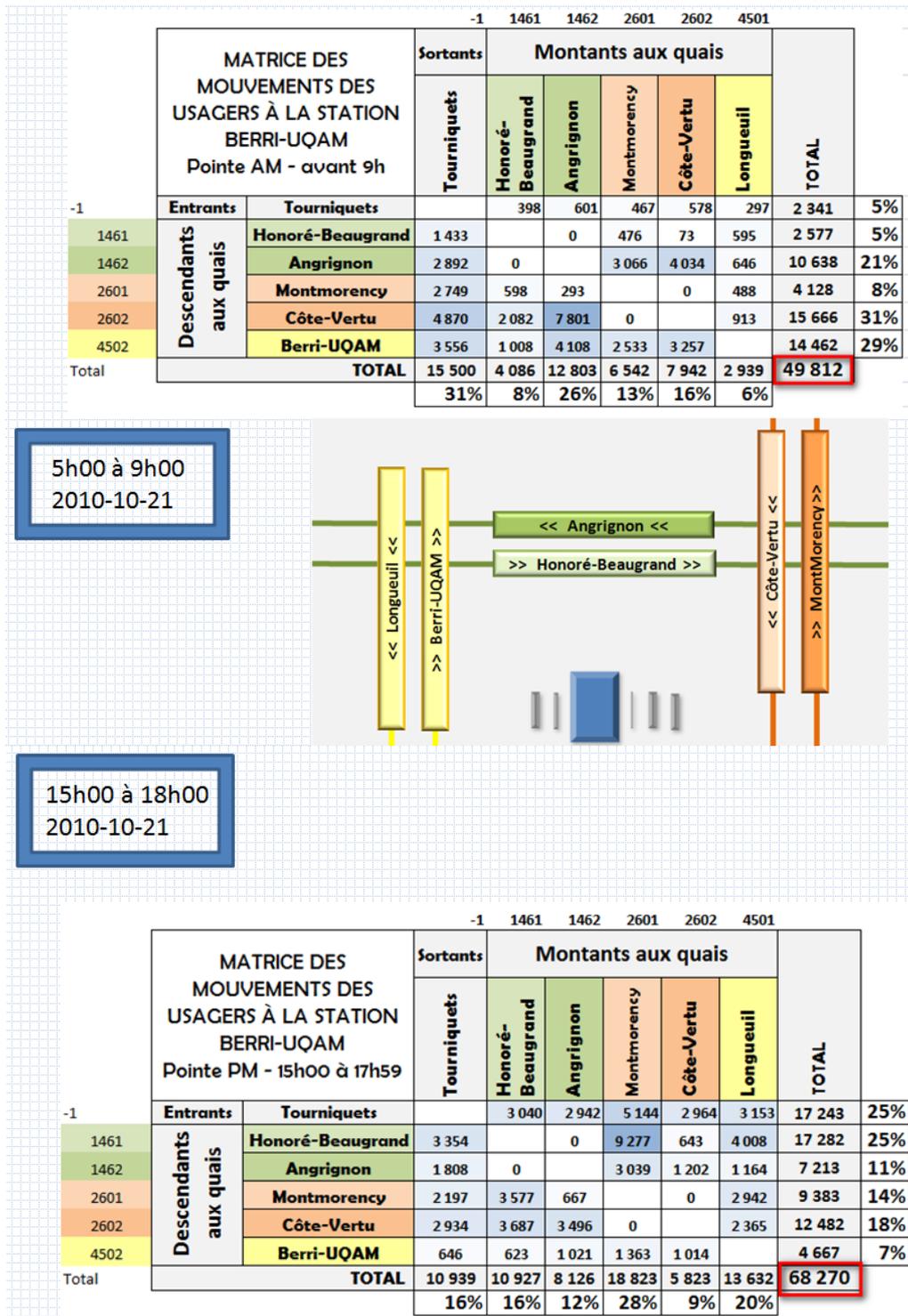


Figure 11 - Analyse détaillée de tous les mouvements de voyageurs à la station de correspondance Berri-UQAM lors des périodes de pointe du matin et de l'après-midi; les données détaillées sont là pour évoquer le niveau de précision obtenue d'une simulation désagrégée.

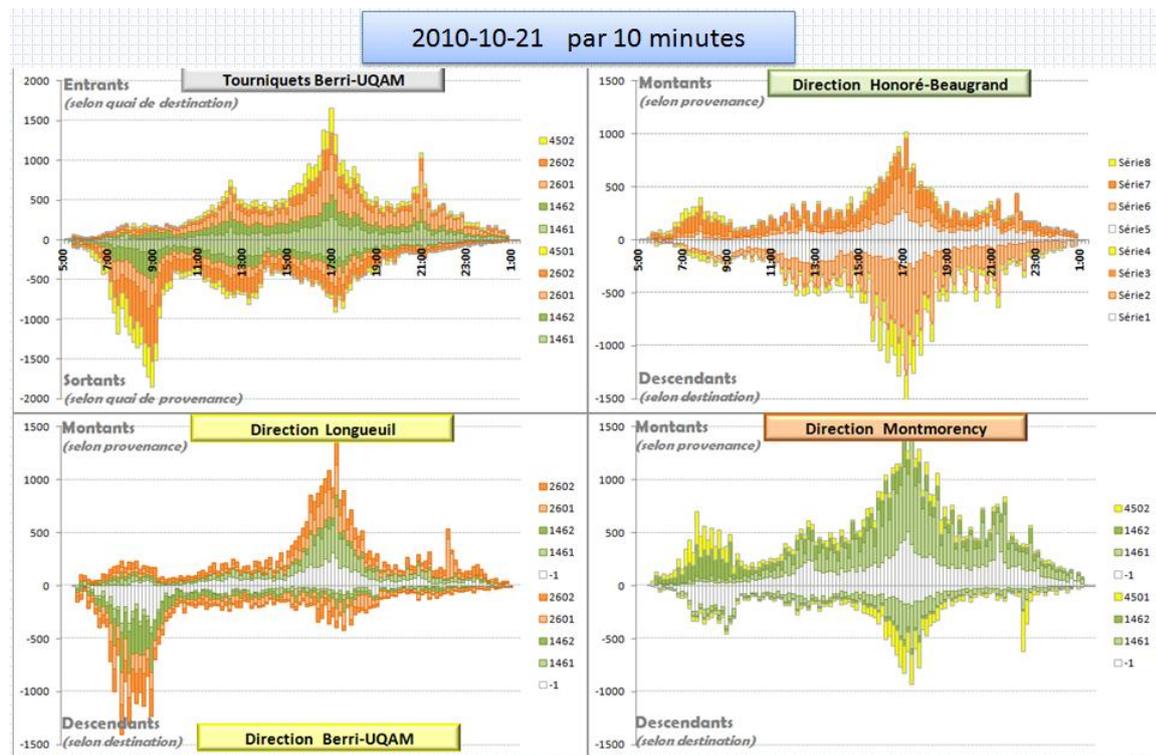


Figure 12 - Évolution temporelle (périodes de 10 minutes) des mouvements à la station de correspondance Berri-UQAM, selon la ligne-direction de provenance (Orange, Verte, Jaune).

Ces représentations obtenues de données réelles et complètes, archivées et enrichies par le processus de modélisation, deviennent pertinentes pour l'appréciation de mesures d'urgence ou de surveillance dans le contexte de pannes de métro ou de plans d'évacuation.

La modélisation discrète et événementielle conduit aussi à la micro-simulation animée. La Figure 13 évoque le résultat obtenu du module TransimsVIS. Une animation est constituée d'un maximum de 10,000 frames, autorisant des niveaux de résolution d'une à 5 secondes selon la période choisie. Le potentiel d'exploitation des résultats demeure considérable et, particulièrement, permet d'investiguer diverses questions de planification opérationnelle. Les figures suivantes, prises sur l'ensemble de la journée, sont réalisées sur des logiciels SIG et présentent, respectivement, une représentation du profil de charge d'une ligne – plus de 220 départs par direction (Figure 14) – puis une analyse de caractérisation de chacune des stations selon la distribution temporelle des mouvements d'origine et de destination.

Une autre représentation produite en « shapefile » (format ESRI) permet enfin de catégoriser chacune des stations. La Figure 15 fait état de quelques stations du Centre-Ville de Montréal desservi par deux lignes; les signatures temporelles d'entrée discriminent bien les activités tantôt d'études universitaires (Guy-Concordia, McGill) des stations typiques de destination d'emploi (Square Victoria, Place d'Armes). Par ailleurs, on distingue bien un événement : la figure souligne très précisément le patron d'arrivée (17 :00 à 19 :00) et de sortie concentrée (22 :00) d'un match de hockey au centre Bell (la foule s'étant dispersée à deux stations : Lucien-l'Allier et Bonaventure).

Résultats – animation

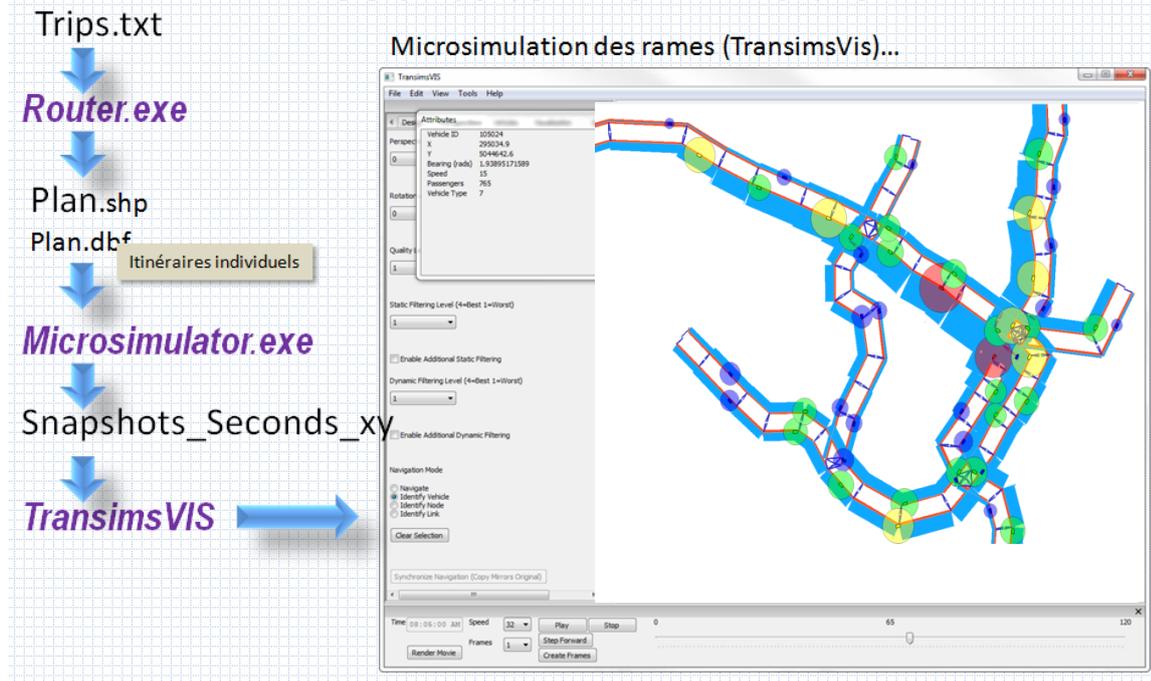


Figure 13 - Micro-simulation animée à la seconde illustrant le déplacement des rames de métro, ainsi que leur charge de passagers (taille et couleur aux niveaux 0, 300, 600, 900); les modules de TRANSIMS produisent un fichier « Snapshots_Seconds_xy » qui est interprété par le module visualisateur TransimsVIS.

Au fil des traitements, de nombreuses statistiques peuvent être accumulées. Le Tableau 4 fait foi de quelques données globales, qui ont l'utilité d'agir comme instrument de contrôle de la simulation.

Tableau 4 - Statistiques de contrôle d'une simulation pour l'ensemble de la journée

LeMétro STATISTIQUES "PROBABLES" Affectation directe....

Ligne-dir	embarquants	passages	emb/sta	chargeMOY	chargeMAX	départs
11	231284	5616	41.2	246	1186	208
12	229009	5617	40.8	245	1185	208
21	288137	6757	42.6	252	1230	220
22	286957	6733	42.6	253	1372	223
41	31237	522	59.8	117	537	174
42	31598	522	60.5	118	537	174
51	79389	2244	35.4	157	596	187
52	79537	2244	35.4	159	1006	187
Total général	1257148	30255	41.6	231	1372	1581
ENTRANTS	883599					

1.42

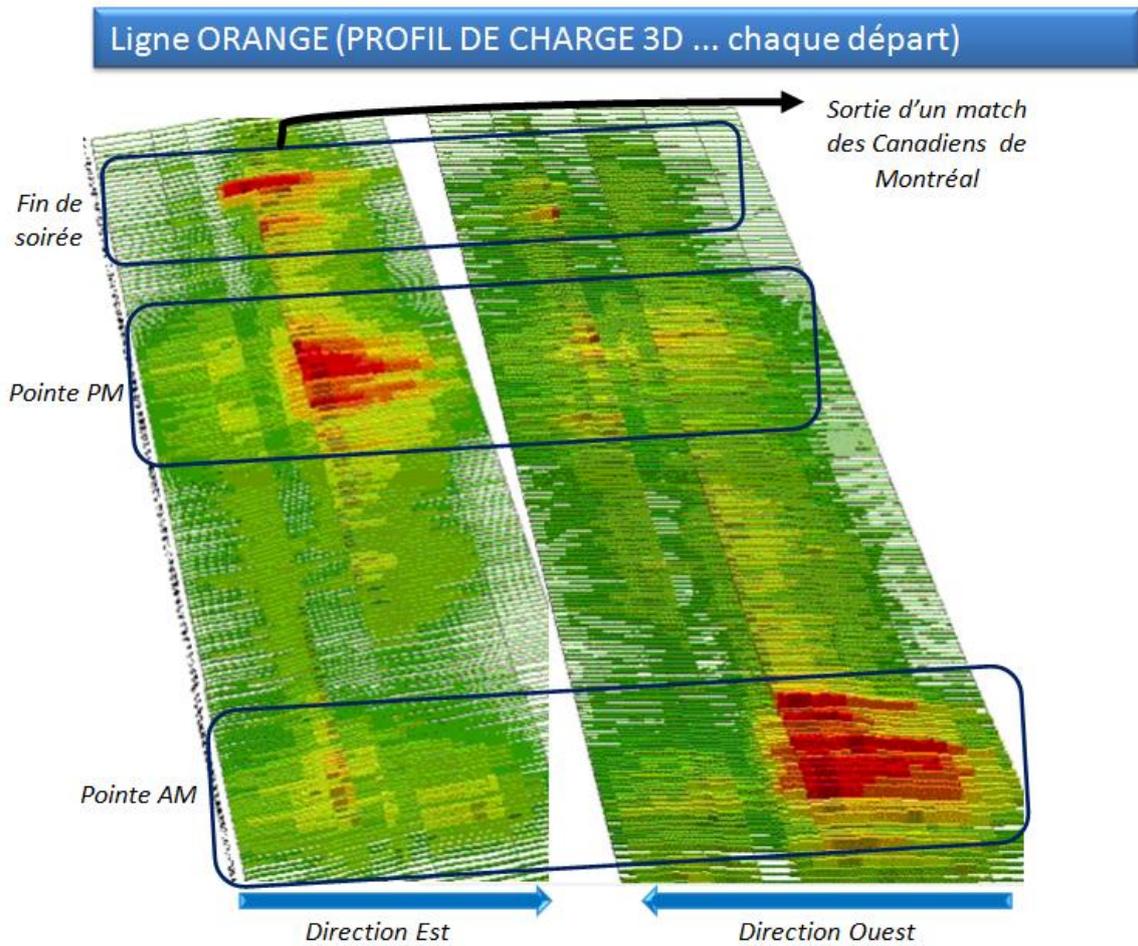


Figure 14 - profil de charge de chacun des départs de la ligne Orange du métro de Montréal, suite à la simulation des données de cartes à puces.

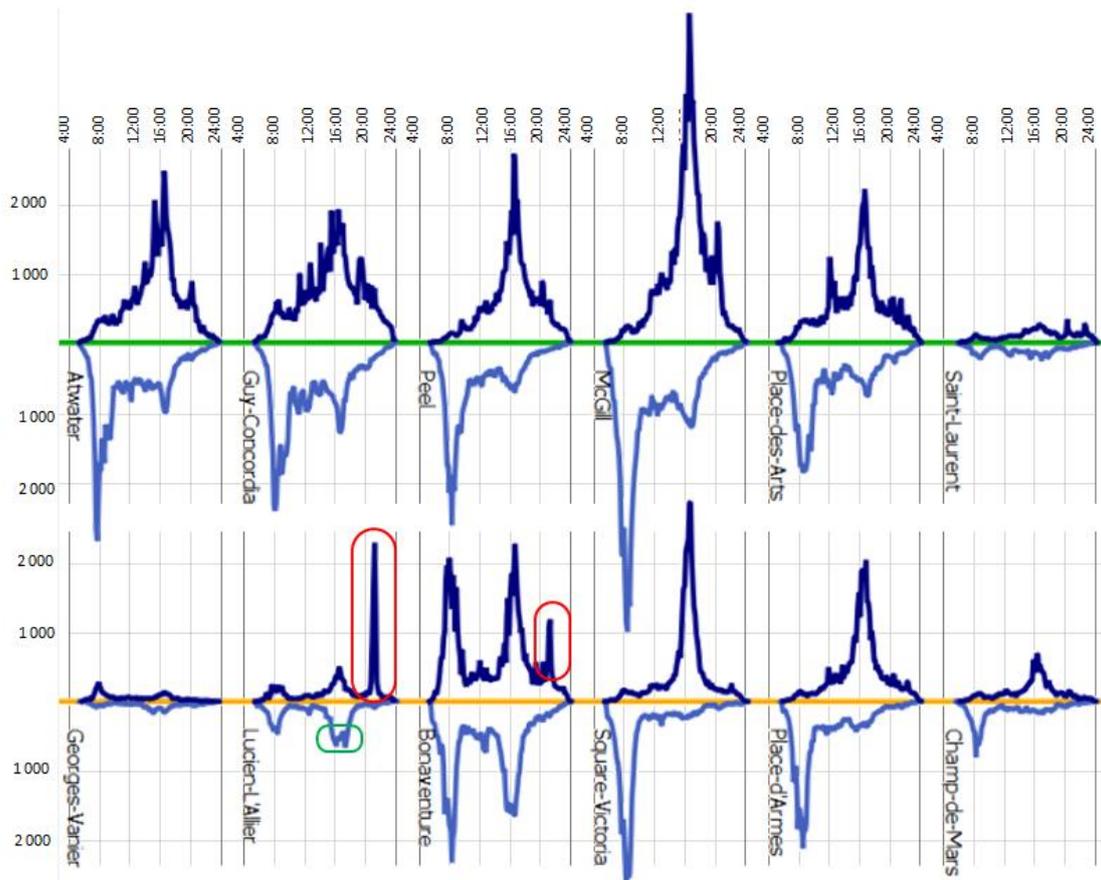


Figure 15 - Signature des distributions temporelles (périodes de 10 minutes) des stations du Centre-Ville de Montréal; Haut : origines; Bas : destinations. Distinction nette entre lieux d'emploi, d'étude et gare intermodale.

EN GUISE DE CONCLUSION

Le présent projet agit comme démonstration du potentiel de l'exploitation des données archivées de cartes à puces pour la constitution d'un laboratoire-maquette de l'exploitation d'un système de métro. L'enrichissement des données de demande s'opère par une conversion des transactions d'entrée en déplacements O-D grâce à un traitement systématique de la chaîne des transactions des titres réguliers. La définition fine de l'offre de transport est assurée par les fichiers ouvertement disponibles GTFS qui permettent de décrire à la fois la géométrie et le niveau de service (horaire) des lignes de transport. Les modules du logiciels TRANSIMS, bien articulés, rendent le service de calcul de trajets les plus courts, de leur assemblage ainsi que de l'affectation dynamique du réseau, réalisant finalement une micro-simulation animée. L'exploitation finale des résultats est soutenue par des représentations de tous types (animations, SIG, chiffrier) dont la Figure 16 montre un exemple d'application (Spurr et al, 2013a). La Figure 17 montre l'enchevêtrement des tâches de modélisation.

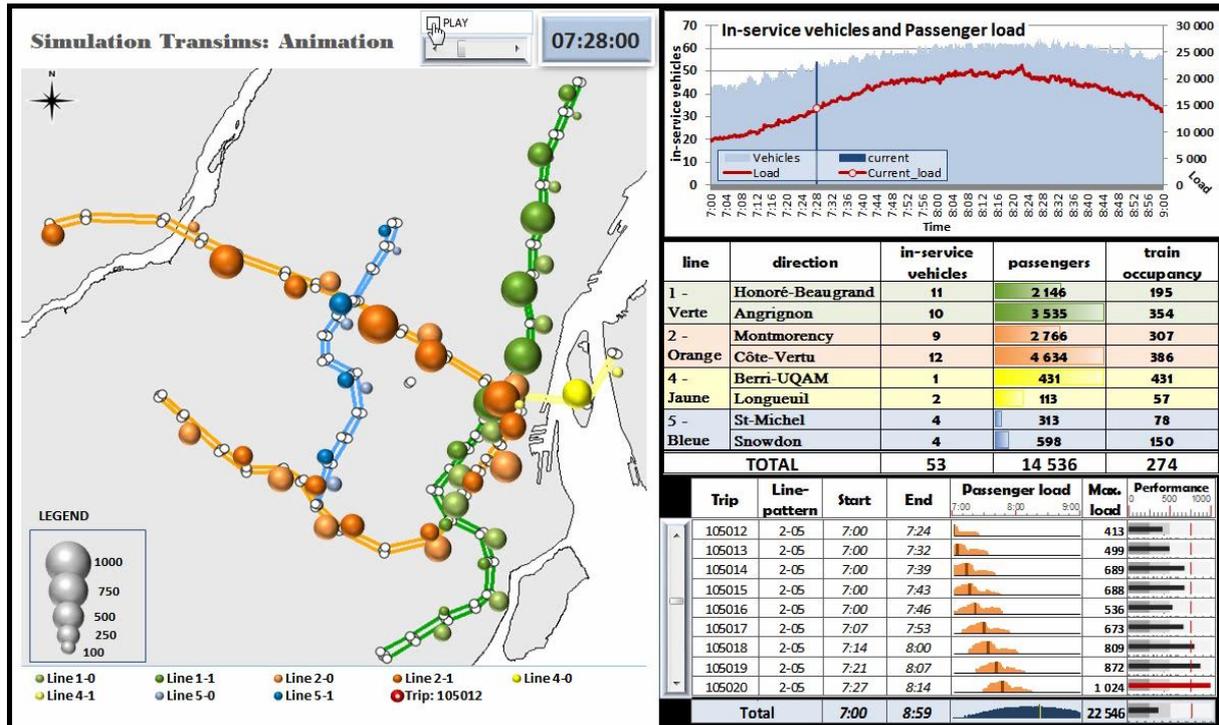


Figure 16 – Dashboard animé synthésisant les résultats de l'affectation

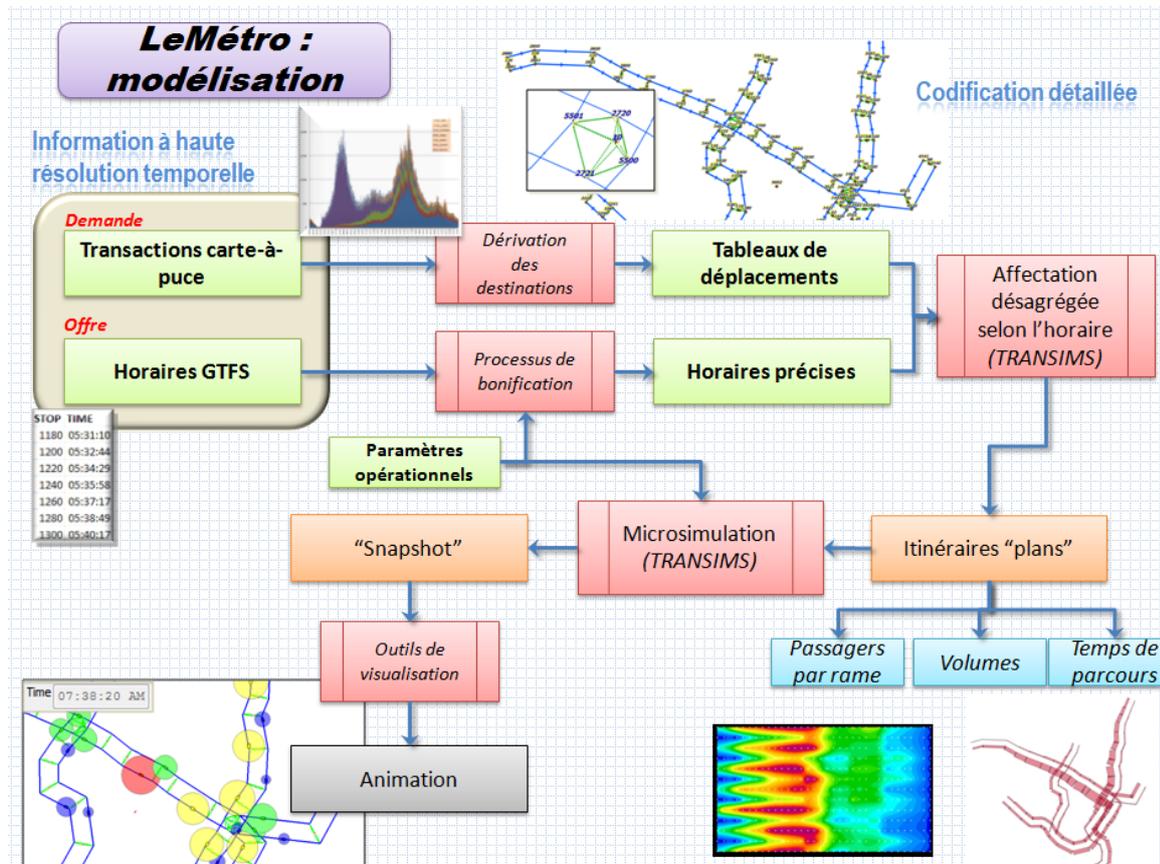


Figure 17 - Tableau de bord synthétique de l'ensemble de la procédure de modélisation

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient fortement l'Agence métropolitaine de transport (AMT) ainsi que la Société de Transport de Montréal pour leur collaboration substantielle. Ils tiennent à souligner aussi la contribution technique des assistants du Groupe MADITUC de l'École Polytechnique : Guillaume Bisailon, Daniel Piché et Bruno Allard.

NOTE

Tous les opinions, faits et commentaires sont de la seule responsabilité des auteurs-chercheurs et n'engagent en rien les institutions impliquées. Tous les chiffres produits n'ont d'intérêt que pour démontrer le niveau de résolution de la méthodologie utilisée.

REFERENCES

- Chapleau, Robert (1992). La modélisation de la demande de transport urbain avec une approche totalement désagrégée, *World Conference on Transportation Research Proceedings*, Lyon, volume II : 937-948.
- Dressler, M. (2009) The Art of Surface Interpolation. SURGE: gridding and mapping software. <http://surgeweb.sweb.cz/>
- Mathis, P. (2009) Une micro simulation dynamique urbaine base sur le programme d'activités : utilisation du graphe cellulaire pour une simulation multi-agents. *Recherche Transports Sécurité* **102** : 23-45.
- Spurr, T., Chapleau, C., Piché, D. (2013a) *Animation tools for the microsimulation of a public transport network*. 13th World Conference on Transportation Research, Rio de Janeiro, Brésil.
- Spurr, T., Chapleau, C., Bisailon, G. (2013b) *Direct schedule-based assignment of smart-card trips to a GTFS transit network*. 13th World Conference on Transportation Research, Rio de Janeiro, Brésil.
- Trépanier, M. (2010). *L'exploitation des données de cartes à puce à des fins de planification des réseaux de transport collectif urbains*. 12th World Conference on Transportation Research, Lisbonne, Portugal.

Autres références pertinentes mentionnées dans (Spurr et al, 2013b) » :

- Bhat, C. R. and J. Y. Guo (2007). Population synthesis for microsimulating travel behavior. *Transportation Research Record* **2014**: 92-101.
- Blais, S. (2007). *Modélisation espace-temps du métro de Montréal*. M.Sc.A., École Polytechnique de Montréal.
- Bradley, M., J. L. Bowman and B. Griesenbeck (2010). SACSIM: An applied activity-based model system with fine-level spatial and temporal resolution *Journal of Choice Modelling* **3**(1): 5-31.

- Chapleau, R. (2002). *A Method for Measuring Impacts on Customers of a Subway Breakdown*. 4th Transportation Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering. Montreal, Canada, Canadian Society for Civil Engineering.
- Chapleau, R., M. Trépanier and K. K. A. Chu (2008). *The ultimate survey for transit planning: Complete information with smart card data and GIS*. 8th International Conference on Survey Methods in Transport: Harmonisation and Data Comparability. Annecy, France.
- Chu, K. K. A. and R. Chapleau (2008). Enriching Archived Smart Card Transaction Data for Transit Demand Modeling. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* **2063**: 63-72.
- Eom, J. K., M. H. Choi and J. Lee (2012). *Evaluation of Metro Service Quality using Transit Smart Card Data*. 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, DC.
- Erath, A., P. Fourie and M. van Eggermond (2012). *Large-scale agent-based transport travel demand model for Singapore*. 13th International Conference on Travel Behaviour Research. Toronto.
- Farzin, J. M. (2008). Constructing an Automated Bus Origin-Destination Matrix Using Farecard and Global Positioning System Data in São Paulo, Brazil. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* **2072**: 30-37.
- Google Developers. (2012). "General transit feed specification reference." Retrieved April 1, 2012, from <https://developers.google.com/transit/gtfs/reference>.
- Moeckel, R., B. Schwarze, K. Spiekermann and M. Wegener (2007). *Simulating interactions between land use, transport and environment*. World Conference on Transport Research. Berkeley, CA.
- Müller, K. and K. W. Axhausen (2011). *Population synthesis for microsimulation: State of the art*. 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, DC.
- Munizaga, M. and C. Palma (2012). Estimation of a disaggregate multimodal public transport Origin-Destination matrix from passive smartcard data from Santiago, Chile. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* **24**: 9-18.
- Pendyala, R. M., K. C. Konduri, Y.-C. Chiu, M. Hickman, N. Hyunsoo, P. A. Waddell, L. Wang, D. You and B. Gardner (2012). *An integrated land use - transport model system with dynamic time-dependent activity-travel microsimulation*. 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, DC.
- Pritchard, D. R. (2008). *Synthesizing agents and relationships for land use / transportation modelling*. MaSC, University of Toronto.
- Salvini, P. and E. Miller (2003). *ILUTE: An Operational Prototype of a Comprehensive Microsimulation Model of Urban Systems*. 10th International Conference on Travel Behaviour Research. Lucerne, Switzerland.
- Scherr, W., G. Burton and C. Puchalsky (2011). *A Paradigm Shift in Travel Forecasting: Let Web 2.0 Feed the Network Model* 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington DC.
- Sokolov, V. (2010). *The Schedule-Based transit model of the Chicago Metropolitan Area*. TRANSIMS: Applications and Development Workshop, TRACC-Argonne, Argonne National Laboratory.
- Trépanier, M., N. Tranchant and R. Chapleau (2007). Individual Trip Destination Estimation in a Transit Smart Card Automated Fare Collection System. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations* **11**(7): 1-14.
- Volosin, S. E., S. Paul, R. M. Pendyala, B. Grady and B. Gardner (2012). *The application of microsimulation model system to the analysis of a light rail corridor: insights from a TRANSIMS deployment*. 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington DC.
- Wolfson, O. and B. Xu (2010). Spatio-temporal databases in urban transportation. *IEEE Data Engineering Bulletin* **33**(2): 18-25.

- Zhao, J., A. Rahbee and N. H. Wilson (2007). Estimating a Rail Passenger Trip Origin-Destination Matrix Using Automatic Data Collection Systems. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* **22**(5): 376-387.
- Zorn, L., E. Sall and D. Wu (2012). *Incorporating crowding into San Francisco activity-based travel model*. 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington DC.