

Le cybertransport : une clé pour un développement responsable

GLAUS Mathias^{a*}, RIGAL Clément^b, BOURGOIS Jacques^b, HAUSLER Robert^a

^aEcole de Technologie Supérieure

1100, rue Notre-Dame Ouest, Montréal (Qc) – H3C 1K3, Canada

^bEcole Nationale Supérieure des Mines de St-Etienne

158, cours Fauriel, 42023 Saint-Étienne cedex 2, France

Résumé

Les cybertransports sont une avenue pour améliorer la mobilité des marchandises et des personnes. Parmi les technologies disponibles, la Serpentine, en tant que système de transport cybernétique, se distingue par ses propriétés structurelles et sa capacité intrinsèque à répondre collectivement à des besoins individuels. Dès lors, le mode opératoire des véhicules doit être développé afin d'exploiter ces propriétés. L'analogie avec les réseaux électriques ainsi que l'intégration du principe d'entropie permet de définir une règle comportementale du système pour répondre à la demande des usagers. Le scénario synthétique développé pour le centre-ville de Montréal montre que le modèle dynamique permet, lors d'une forte demande, d'assurer la pérennité du service et l'intégrité du système. Par ailleurs, l'intégration de la Serpentine dans un milieu urbain comme Montréal permet, comparativement au tramway, d'améliorer l'offre de service par une mobilité de proximité de type multiples-multiples. De plus, le partage de l'infrastructure pour la livraison des marchandises permet de répartir les charges et ainsi offrir un service disponible à tous.

Mots-clés : cybertransport, mobilité urbaine, marchandises, personnes, développement responsable

1. Introduction

La mobilité des marchandises et des personnes est une condition *sine qua non* au développement de nos sociétés. L'évolution des moyens de transport, du cheval à la voiture en passant par la diligence et le chemin de fer, a favorisé l'accroissement des déplacements des personnes et des échanges de biens. Sachant que 50% de la population mondiale (70% dans les pays industrialisés) sont des citadins (ONU, 2008), la mobilité urbaine des individus mais également des marchandises devient dès lors un enjeu du développement de nos sociétés. La part des émissions de CO₂ associée au transport est en croissance constante (IEA, 2009). Cependant, les développements technologiques permettent d'envisager la minimisation des émissions de CO₂ et autres polluants atmosphériques grâce aux énergies propres (véhicules hybrides et électriques). En revanche, ces développements ne peuvent réduire les autres inconvénients associés aux véhicules routiers individuels tels que : l'engorgement du réseau, la perte d'espace engendrée par les stationnements et un risque accru d'accidents ainsi qu'une augmentation du stress associé à la conduite (Cervero, 1998). Par ailleurs, la dispersion ainsi que l'irrégularité temporelle et l'hétérogénéité spatiale des besoins individuels en déplacement (Ascher, 2002), ne permet plus aux transports en commun conventionnels (horaires préétablis et corridors de déplacement) de rejoindre l'ensemble des citadins et n'est pas adapté à la livraison des marchandises.

L'émergence des cybertransports (route intelligente, informatisation des véhicules, transports automatisés, etc.) résulte de ces constats et visent à faciliter le traitement et la transmission de l'information pour améliorer la mobilité ainsi que la sécurité afin de minimiser les impacts et inconvénients (Meyer et al., 2004). Une des solutions mises de l'avant repose sur la possession de véhicules « intelligents » (Ammoun et al., 2008). Cependant, l'acquisition d'un tel type de véhicule dépend du pouvoir d'achat des usagers. Dans ce contexte, le système de transport cybernétique Serpentine (Saugy et al. 1997) se démarque en permettant une mobilité collective individualisée.

* Auteur/s à qui la correspondance devrait être adressée : mathias.glaus@etsmtl.ca

Basées sur les caractéristiques des systèmes de transport automatisé individuel (ATRA, 2003), les propriétés structurelles de la Serpentine reposent sur une infrastructure de voies en réseau incrustée dans la chaussée permettant, tout en les guidant, d'alimenter sans contact les véhicules en énergie électrique et transmettre l'information (itinéraires, feuilles de route). Les véhicules électriques permettent d'accueillir l'équivalent d'une famille ou une palette de marchandises et leur consommation moyenne est équivalente à 0,3L de carburant au 100km (Saugy, 2001). Chaque véhicule est capable d'emprunter toutes les voies de guidage et stations sur le réseau maillé et se déplacent sur demande de l'utilisateur, de l'origine à la destination sans transfert ou arrêt intermédiaire (gain de temps). De plus, le service est disponible 24 heures sur 24, 7 jours sur 7 plutôt que selon un horaire prédéfini (qualité élevée de service).

La Serpentine offre les caractéristiques d'un système apte à s'adapter dans le temps et dans l'espace à la variation de la demande des usagers qui peut être appréhendée comme un phénomène chaotique (Glaus, 2007). Cependant, la planification de la mise en œuvre et l'opération du système doivent être organisées de façon à exploiter ses propriétés non seulement pour satisfaire au mieux les besoins individuels en mobilité, soit offrir aux utilisateurs la possibilité de se déplacer d'une origine à une destination avec la plus grande satisfaction, mais également assurer l'intégrité de l'équilibre du système, soit minimiser les risques d'engorgement ou d'absence localisée de véhicules.

2. Méthodologie

Le principe de Wardrop définit un coût généralisé pour un déplacement. Ce coût peut être considéré comme l'intégration des critères de satisfaction du besoin en mobilité. Ainsi, le choix de l'itinéraire est celui qui a le coût « C » le plus faible qui peut se définir comme une fonction du flux de véhicules (Selten, 2007)

$$C_{transport} = f(q) \quad (1)$$

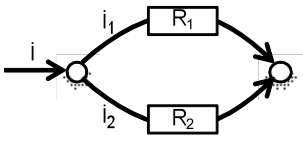
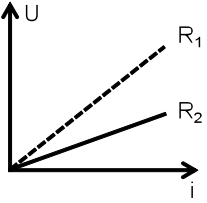
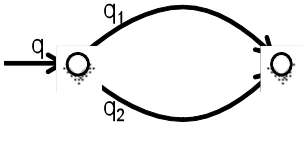
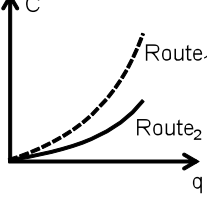
Où C représente le coût généralisé (satisfaction) pour un déplacement et q le flux de véhicules sur l'itinéraire.

Par analogie avec un réseau électrique, où le courant se répartit dans les différents brins, les véhicules empruntant les voies d'un même réseau de transports s'influencent naturellement et se répartissent au sein du réseau. Wang et Zhang (2005) définissent l'analogie entre les grandeurs du transport et les grandeurs électriques :

- le courant électrique i , qui représente un flot de charges dans un fil conducteur, correspond au trafic urbain q qui représente un flot d'individus (ou de véhicules) sur une route;
- la tension U , liée à l'intensité i à travers la caractéristique des composants électroniques, correspond à la relation entre le coût généralisé C du transport et le trafic q .

La table 1 présente les relations associées à l'analogie entre un réseau électrique et un réseau de transport.

Table 1 Analogie entre un réseau électrique et un réseau de transport (Wang et al., 2005)

| | Configuration | Caractéristiques | Relations |
|---------------------|---|---|---|
| Réseau électrique |  |  | Loi des nœuds : $i = i_1 + i_2$ Loi des mailles : $U_1(i_1) = U_2(i_2)$ |
| Réseau de transport |  |  | Loi des nœuds : $q = q_1 + q_2$ 1 ^{er} principe de Wardrop : $C_1(q_1) = C_2(q_2)$ |

Tel qu'exprimé par Zang et Whang (2005), l'énergie dépensée par les usagers dans le transport est analogue à l'effet Joule en électricité. Or tout système physique minimise son énergie pour se rapprocher de l'état d'équilibre. Ainsi, pour un réseau de transport, la minimisation des énergies de déplacement pour un meilleur service aux usagers peut s'exprimer comme suit :

$$\text{Min } E = \text{Min} \sum_{i=1}^n (C(i) \times q(i)) \tag{2}$$

où E correspond à l'énergie de déplacement, C(i) le coût généralisé pour le déplacement i et q(i) le flux de véhicules sur le tronçon i.

D'un point de vue global, la minimisation du coût généralisé pour un déplacement (1^{er} principe de Wardrop) ne garantit pas la minimisation du coût pour l'ensemble des déplacements sur le réseau (2^e principe de Wardrop). Dans ce cas, l'application du maximum d'entropie (2^e principe thermodynamique) permet d'assurer l'état le plus stable du réseau (Schuffenecker et al., 1999).

$$\text{Max } S = \text{Max} - \sum_{i=1}^n (N_i \times \ln[N_i]) \tag{3}$$

Où S correspond à l'entropie du réseau, n est le nombre de tronçons qui composent le réseau et N le nombre de véhicules sur chaque tronçon i.

Dès lors, un réseau de transports qui tend vers un état d'équilibre stable doit à la fois minimiser le coût généralisé des déplacements (équation 2) et maximiser l'entropie du système (équation 3).

$$\text{Objectif} = \text{Min} (a \times \text{Energie} - b \times \text{Entropie}) \tag{4}$$

Afin de tenir compte de la variation temporelle du besoin individuel en déplacement, le modèle basé sur l'atteinte de l'objectif (relation 4) pour un réseau de Serpentine a été appliqué par itération sur un pas de temps Δt de 30 secondes, soit une segmentation des tronçons d'une longueur de 250 mètres. À chaque Δt s'applique la loi des nœuds en considérant les segments « rattachés » aux nœuds.

A chaque pas de temps, le modèle optimise la relation 4 tout en tenant compte des contraintes des origines et destination des usagers afin d'identifier la nouvelle répartition des véhicules dans le réseau afin de répondre aux besoins des usagers. Cela permet d'estimer l'état du réseau au temps t+Δt. Le modèle permet de prendre en considération la variation, à chaque Δt, de la demande (entrée et sortie de nouveaux usagers) et des véhicules entrant et sortant du réseau.

Le modèle a été développé sur Microsoft Excel en utilisant les fonctions macros et le solveur afin de construire les scénarios de déplacement en Serpentine.

3. Résultats

Les résultats présentent deux aspects associés à la Serpentine comme solution pour satisfaire la mobilité individuelle. Le premier repose sur l'analyse du modèle développé à travers la construction d'un scénario synthétique. Le second aborde, à travers une étude de cas, l'implantation d'un réseau de Serpentine en milieu urbain.

3.1 Comportement dynamique du système Serpentine

Afin de simuler le comportement du système de Serpentine, un réseau simplifié comportant deux mailles et 6 nœuds a été considéré. La demande en déplacement a été considérée par la construction d'une matrice OD (origine-destination) dynamique, entre les différents nœuds du réseau.

Différents scénarios ont été testés pour le centre-ville de Montréal et parmi ceux-ci, le plus contraignant résulte de la simulation de la sortie du travail. Dans ce cas, environ 100 000 personnes quittent leur travail entre 16h et 18h (Lamalice & Morency, 2009), soit une moyenne d'environ 400 personnes toutes les 30 secondes (valeur choisie pour Δt). Pour le scénario, en moyenne 130 employés sortent des bureaux de la zone étudiée à chaque Δt . À ceux-ci s'ajoutent environ 170 usagers du réseau en provenance de l'extérieur. La figure 1 présente les résultats pour l'ensemble du réseau considéré, de la phase de transition (pas de temps 0 à 30) vers une période de forte demande (pas de temps 30 à 60).

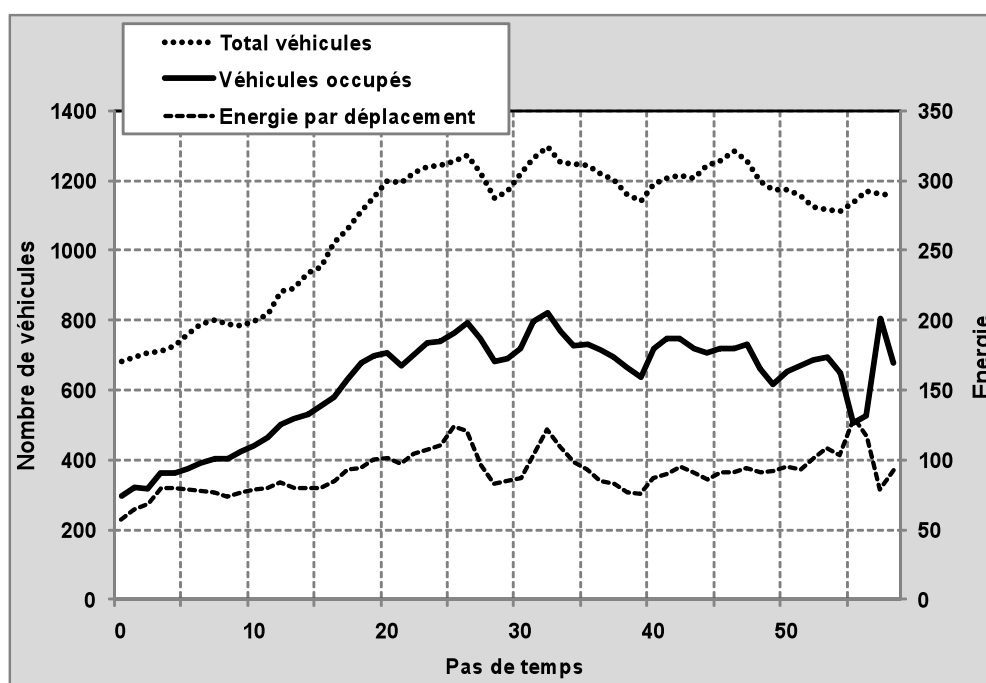


Figure 1 Évolution du nombre de capsules nécessaires et l'énergie (coût généralisé) par déplacement pour satisfaire en tout temps la demande individuelle en mobilité

Durant les 30 premières périodes, le sous-réseau accepte plus de capsules de l'extérieur qu'il n'en renvoie pour satisfaire l'accroissement de la demande. Par la suite, alors que les capsules continuent d'entrer dans le sous-réseau (plus d'une centaine selon la matrice OD du scénario), le système en ressort un nombre équivalent. Ce phénomène traduit qu'une augmentation du nombre de véhicules au début facilite la mobilité des usagers, tandis que par la suite, en ajouter engendre plus de désavantages liés à la circulation que de bénéfices (coût généralisé). Dès lors, le mode opératoire des véhicules permet de conserver un état d'équilibre dynamique du système entre satisfaction de la demande et nombre de véhicules sur le réseau. La différence entre les deux courbes (total véhicules et véhicules occupés) indique le nombre de véhicules vides qui se déplacent sur le réseau pour répondre à de futures demandes. Par ailleurs, si l'énergie de déplacement présente des variations dans le temps (courbe en trait discontinu), la courbe est relativement stable à partir de la période 30 en oscillant autour de 100 (axe vertical secondaire).

D'un point de vue planification, cette énergie de déplacement permet de comparer des configurations d'implantation de réseau (configuration des tracés), voire d'analyser des modes de déplacement

différents (à pied, vélo, etc.). Dans ce dernier cas, l'enjeu réside sur la définition et l'évaluation des termes qui définissent l'énergie de déplacement (coût généralisé associé au principe de Wardrop) et entropie (2e principe de thermodynamique) ainsi que les termes a et b de l'équation 4 qui reflètent le rapport entre les deux grandeurs : coût généralisé et entropie. La définition des différents termes qui définissent l'énergie de déplacement doit refléter de façon cohérente la qualité de service pour les usagers qui désirent se déplacer. Par ailleurs, d'un point de vue opérationnalité du système, le principe exprimé permet de faciliter l'identification dynamique des itinéraires de chaque véhicule afin de minimiser les coûts d'un déplacement tout en s'assurant de la cohérence du système (entropie). Cette approche prend tout son sens dans le cas de la Serpentine. En effet, par opposition à la voiture où le choix final de l'itinéraire est pris par chaque conducteur, le système de gestion permet de gérer globalement la flotte de véhicules et d'identifier le « meilleur » trajet pour satisfaire l'utilisateur sans compromettre l'intégrité du système.

Au-delà de la dynamique de la mobilité des usagers le long des tronçons du réseau en fonction de la demande Origine-Destination, l'intérêt de la Serpentine comme moyen pour assurer le déplacement en milieu urbain réside dans sa flexibilité. En effet, l'approche en réseau maillé offre d'une part, une configuration évolutive du système et, d'autre part, facilite la planification d'une mise en œuvre étape par étape en fonction des moyens financiers.

3.2 Implantation d'un réseau de Serpentine : étude de cas

Une des approches privilégiées actuellement dans de nombreuses villes repose sur l'implantation de lignes de tramway. Dans le cas de Montréal, la première phase proposée est une boucle de 6 kilomètres qui encercle le centre-ville qui croise localement une des deux lignes de métro (ligne 2) à une seule de ses stations (figure 2). En termes de mobilité, en considérant les zones de desserte des stations de métro de la ligne 2 et des stations estimées de la future ligne de tramway (rayon de 250 mètres pour un service à la satisfaction de l'utilisateur), il apparaît que l'ajout du tramway ne permet de rejoindre que 40 % de la superficie ceinturée par le tramway. Par ailleurs, le tramway, comme tout système de transport en corridor, ne permet pas de répondre aux besoins en déplacement de proximité, soit à l'intérieur d'une même zone d'activité, soit lorsque l'origine et la destination ne sont pas le long de la ligne. Ce type de déplacement est caractéristique d'une mobilité de type multiples-multiples : multiples points d'origine vers multiples points de destination réparti sur le territoire.

La planification d'un réseau maillé Serpentine repose sur une approche par surface plutôt que par longueur. Dans le cas de la zone d'étude montréalaise, la superficie urbaine ceinturée par la ligne projetée de tramway est de 1,8 km². Cette superficie peut être subdivisée en maille unitaire de 250 mètres par 250 mètres (0,0625 km²) afin d'offrir le service à moins de 125 mètres sur tout le territoire à l'étude. Dans ce cas, la superficie peut être couverte par 30 mailles unitaires. Sur le plan économique, les infrastructures du tramway peuvent être estimées à 20 M\$ le kilomètre pour un total de 120 M\$ pour les 6 kilomètres projeté. Dans le cas de la Serpentine, la base de calcul est de 300 K\$ pour 150 mètres de piste (véhicule compris), ce qui correspond à 2,1 M\$ par maille et 63 M\$ pour le territoire considéré.

4. Discussion

L'automatisation du système et les dimensions des véhicules permettent d'envisager la Serpentine comme véhicule pour la mobilité des marchandises. L'intérêt réside dans un service personnalisé pour les commerces et les institutions répartis sur le territoire qui se font livrer leurs commandes par palette. Dans ce cas, le réseau de Serpentine peut être densifié afin de desservir chaque entrée de bâtiment. Dans ces conditions, cela correspond approximativement à doubler les mailles et offrir, au même coût que le transport par tramway un système multiservice. La retombée immédiate est le retrait des camions du réseau qui, de par leur taille, sont mal adaptés pour un service de livraison en zone urbaine et engendrent tant des effets néfastes sur la qualité de l'air que des nuisances sonores et visuelles. Un des intérêts de l'intégration de la Serpentine pour la mobilité des marchandises réside dans la synergie entre deux sous-systèmes de flux. Cette synergie offre la possibilité de partager les coûts d'immobilisation et d'exploitation des infrastructures. Ainsi, dans une perspective d'équité, il est possible de rentabiliser le système sur la base du transport des marchandises et d'offrir un système de mobilité disponible aux plus démunis. Dès lors, la mise en commun d'infrastructures (voies de

guidage et véhicules multi-segments), couplée à une faible consommation énergétique électrique (250 Wh) et un taux élevé d'occupation (service à la demande), permet de minimiser les impacts environnementaux. Dans le même ordre d'idée, le système de transport Serpentine peut être étendu à la collecte des déchets. Au-delà du remplacement de véhicules lourds pour la collecte, l'intérêt est de favoriser un service personnalisable propice à supporter une collecte sélective et la mise en place de différentes filières de recyclage et de valorisation (diminution de la valeur de rentabilité au kilomètre).

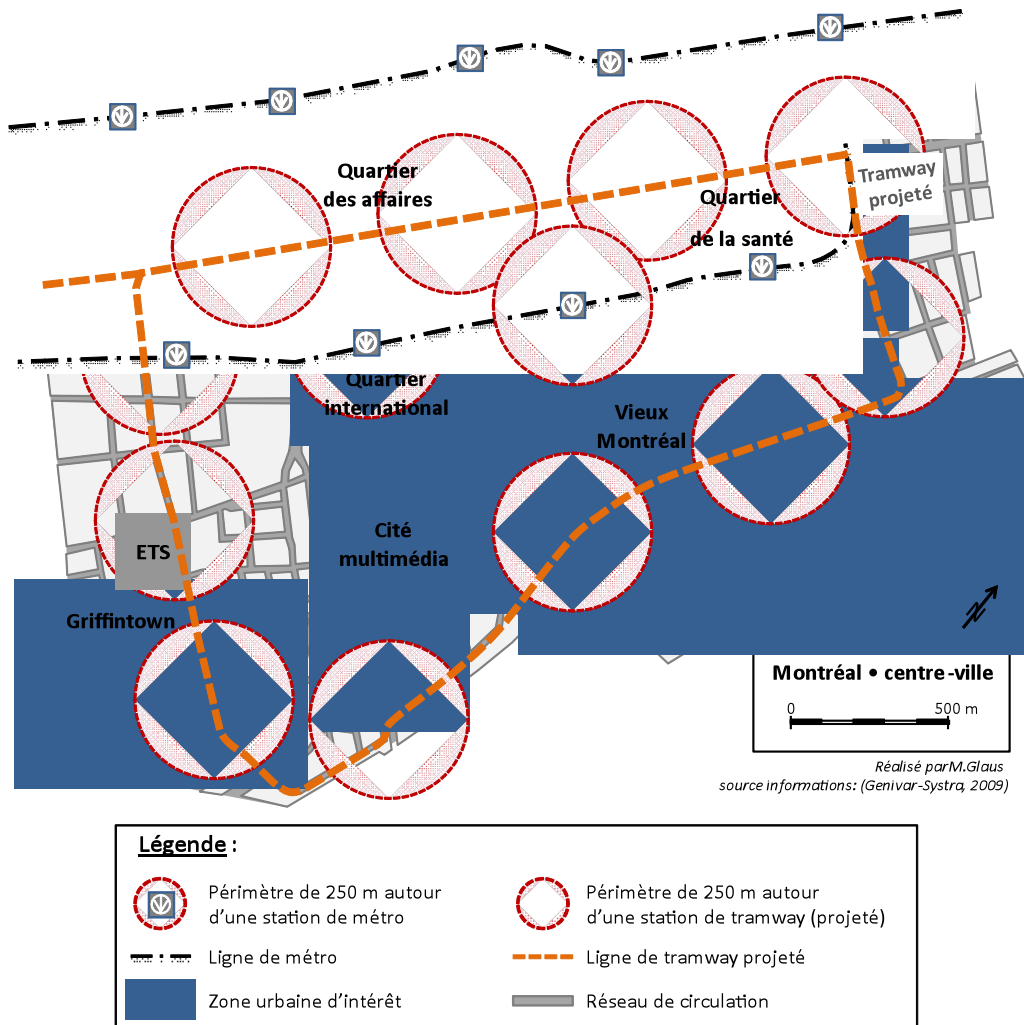


Figure 2 Configuration de la desserte en transport du centre-ville de Montréal.

Dans une perspective de développement et d'évolution des systèmes de mobilité urbaine, la Serpentine permet une intégration du réseau et du service étape par étape. Cette intégration évolutive doit se faire en fonction des moyens financiers et des besoins en déplacement de proximité identifiés au sein des différentes zones urbaines. Ainsi, à partir d'un réseau initial de Serpentine (composé de quelques mailles), développé pour chaque zone urbaine, il est possible de répondre rapidement aux besoins en mobilité spécifiques à chacune des zones. Par la suite, l'extension des réseaux spécifiques permet d'envisager leur interconnexion permettant d'étendre le service et de diversifier l'offre en mobilité. À titre d'exemple, le développement du réseau initial peut être implanté autour d'une gare ferroviaire afin d'améliorer le service de mobilité de la zone urbaine desservie par le train. Dans ce contexte, la Serpentine, par sa flexibilité et son adaptabilité, s'intègre en complémentarité de mode aux systèmes de transport linéaire rapide tel que les trains. Cette approche multimodale offre une alternative à une planification d'un service de transport urbain basé sur des infrastructures lourdes et inadaptées à une mobilité de proximité.

Finalement, la capacité à offrir une infrastructure en réseau unique pour la mobilité des personnes, des marchandises et des déchets permet d'envisager des quartiers sans voiture ni camion. Par ailleurs, au-delà des milieux urbains, la Serpentine se révèle être également un outil de développement des parcs industriels écologiques.

5. Conclusion

Basée sur les propriétés fonctionnelles de la Serpentine, l'analogie entre transport et électricité permet d'appréhender la mobilité selon des lois de comportement des réseaux. Ainsi, la notion énergétique associée à l'électricité permet de satisfaire la demande individuelle des usagers grâce au premier principe de Wardrop (coût généralisé). Par ailleurs, l'intégration du deuxième principe thermodynamique (entropique) favorise la répartition des véhicules sur le réseau afin d'augmenter la flexibilité du système et d'anticiper les demandes futures en déplacement. Dès lors, la prise en compte de ces deux principes comme mode opératoire offre une approche dynamique afin d'assurer l'équilibre du système au bénéfice de la satisfaction des usagers.

L'approche en réseau maillé offre d'une part, une configuration évolutive du système et, d'autre part, facilite la planification d'une mise en œuvre étape par étape en fonction des moyens financiers. Elle assure une mobilité sans transbordement dans la zone équipée. Par ailleurs, l'intégration des composantes physiques et les caractéristiques spécifiques du système Serpentine permettent d'implanter un système de mobilité tant des personnes que des marchandises. L'approche systémique et multifonctionnelle permet d'introduire un système de transport accessible à tous et complémentaire aux développements de véhicules routiers non polluants dont les coûts limitent une diffusion à l'ensemble des sociétés et de leurs populations. Dès lors, la Serpentine s'inscrit comme une mesure structurante et flexible pour supporter un développement responsable des milieux urbains.

Références

- Ammoun, S., F. Nashashibi et A. de La Fortelle, 2008, Informative and decision-making systems in cooperative driving: application on crossroads passing, 2nd Middle East Conference & Exhibition on Intelligent Transport Systems, Manama, Bahrain.
- Ascher, F., 2002, Le transport à la demande : Individualisation des mobilités urbaines et personnalisation des services publics, *Annales des Télécommunications*, 57:3-4.
- ATRA, 2003, Personal Automated Transportation: Status and Potential of Personal Rapid Transit. Main Report of the Advanced Transit Association. Palo Alto, CA.
- Cervero, R., 1998, *The transit metropolis: a global inquiry*, Island Press, Washington D.C.
- Genivar-Systra, 2009, Tramway de Montréal : Phase 1 Analyse du réseau initial de tramway, Ville de Montréal.
- Glaus, M., 2007, Approche multimodale de la mobilité en milieu urbain : développement d'un outil d'aide à la prise de décision, Université du Québec à Montréal, Montréal.
- IEA, 2009, CO₂ emissions from fuel combustion : Highlights, International Energy Agency, Paris
- Lamalice, C. et C. Morency, 2009, Définition et mesure de la mobilité durable à l'aide d'indicateurs statiques et dynamiques, 44^e Congrès de l'AQTR, Montréal, 6-8 avril.
- Meyer, E et I. Ahmed, 2004, Benefit-Cost Assessment of Automatic Vehicle Location (AVL) in Highway Maintenance, 83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, UCLA, Californie, 11-15 janvier.
- ONU, 2008, *World Urbanization Prospects - The 2007 Revision : Higlights*, United Nations, New-York.
- Saugy, B., F. Drayer, B. Cardis, M. Glaus, P.Y. Saugy, 1997, The Serpentine : Automated Individual Urban Public Transport, 6th International Conference on Automated People Movers, Las Vegas, Nevada, 9-13 avril.
- Saugy, B., 2001, The Serpentine – sustainable urban mobility. The tenth international conference on management of technology, Lausanne, Suisse, 19 mars.
- Schuffenecker, L., J.N. Jaubert et R. Solimando, 1999, Formalisme et principes de la thermodynamique, *Techniques de l'ingénieur. Sciences fondamentales*, vol. AF5, AF4040.1-24.
- Selten, R., T. Chmura, T. Pitz, S. Kube et M. Schreckenberg, 2006, Commuters route choice behaviour, *Games and economic behaviour*, 58 , 2.
- Wang, D.H. et H.X. Zhang, 2005, New traffic assignment method on circuit theory for urban planning, *Journal of urban planning and development*, 131, 1.