

Modélisation et simulation des réseaux routiers de grande taille

JAM-FREE : Simulation hybride dynamique

Najia BOUHA
Chef de Service planification et Etudes Economiques
DRETLE Souss Massa-AGADIR
najia.bouha@gmail.com

I. Introduction

Bien avant l'avènement de la mondialisation, les besoins en circulation des biens et des personnes n'ont cessé d'augmenter sur l'ensemble des infrastructures routières urbaines, interurbaines (appelées aussi **VRU: Voie Rapide Urbaine**) et autoroutières. Ce phénomène s'est accentué dans le contexte de l'intensification des échanges des biens et les déplacements quotidiens des personnes de plus en plus croissants, conjugué avec une capacité limitée des infrastructures. Le résultat, par ailleurs prévisible est la formation des congestions dont les impacts négatifs sont nombreux :

- Augmentation des accidents ;
- Accroissement de la consommation ;
- Répercussion négative sur la santé des usagers due au stress conjugué avec la perte de productivité à cause des retards ;
- Effet néfaste sur l'environnement à cause de l'augmentation des particules fines ainsi que les gaz à effet de serre,...

L'ensemble, non exhaustif, de ces effets conduit à une perte économique considérables que la seule solution prônée et qui consiste en la construction des nouvelles infrastructures devient vite non viable. En effet, elle est confrontée à la diminution des espaces dédiés, les coûts énormes ainsi que la réticence des usagers et des responsables. Face à ce problème les exploitants et les chercheurs qu'ils soient industriels ou universitaires se sont orienté vers l'exploitation des **Systèmes de Transport Intelligents (STI)**, encouragé dans cette initiative par le développement rapide des **Technologies de l'Information et de la Communication (TIC)**. L'objectif est de trouver une alternative à la construction des infrastructures par la mise en place d'un ensemble de solutions telles que la gestion dynamique du trafic (incluant entre autres la régulation ou la commande du trafic). Cette solution peut être divisée en deux grandes catégories :

- Gestion en milieu urbain ;
- Gestion interurbaine et autoroutière.

Néanmoins, la mise en place de toute action de commande impose de disposer d'un ensemble de modèles permettant de décrire le comportement du trafic. Dans ce contexte, plusieurs modèles ont vu le jour et peuvent être classé en trois grandes catégories. Les modèles macroscopiques, bien adaptés à la description des réseaux de grande taille (autoroutes, voies rapides urbaines) ; ce type de modèles est fondé sur la similitude avec la théorie de la dynamique des fluides. La seconde catégorie, mieux adaptée aux réseaux urbains, concerne les modèles microscopiques et s'intéresse au comportement des véhicules individuels. Enfin, les modèles mésoscopiques, issus de la théorie des gaz, constituent un compromis entre les deux modèles micro et macro. En effet, ils s'intéressent au comportement

des véhicules individuels groupés en paquet avec des caractéristiques macroscopiques. Dans la partie suivante, nous présenterons en détail la modélisation du réseau routier.

II. Modélisations du trafic routier

Le réseau routier est l'ensemble des voies de circulation routières permettant le transport des automobiles, motos, autocars et poids lourds, Il a été développé pour répondre aux demandes des citoyens pour effectuer leurs déplacements pour aller au travail, voyager pendant les vacances, ...

Le trafic routier est défini donc comme étant un mouvement d'un fluide qui circule, c'est-à-dire c'est la circulation de plusieurs véhicules sur un itinéraire ou un réseau.

Le but principal de la modélisation du trafic routier est d'identifier ce trafic et de décrire son comportement, ceci nous amène à citer les deux types de milieu à analyser :

- ✚ Type n°1 rassemble les réseaux urbains qui comptent les carrefours, les feux de signalisation et les passages piétons. Le trafic sur ses réseaux très maillés est **hétérogène**.
- ✚ Type n°2 comporte les réseaux interurbains comme les autoroutes et les voies rapides. Le trafic sur ses réseaux connaissant peu de changement de structure est peu variable, donc **homogène**

Différentes situations peuvent ensuite être prises en considération, ce qui peut permettre une répartition des modèles en plusieurs groupes selon des critères de comportement individuel ou de comportement global de chaque véhicule.

Les différents modèles du trafic routier sont issus le plus souvent du raisonnement basé sur la similarité qui peut être faite entre un flux de véhicules et des phénomènes physiques comme : l'écoulement d'un fluide dans une canalisation, la propagation d'une onde, le déplacement de particules dans un milieu homogène ou hétérogène, etc.

Il existe trois grandes familles de modèles :

- Les Modèles macroscopiques : le flux de trafic est assimilé à un flux dans un tuyau, caractérisé par un débit et une vitesse moyenne à chaque point.

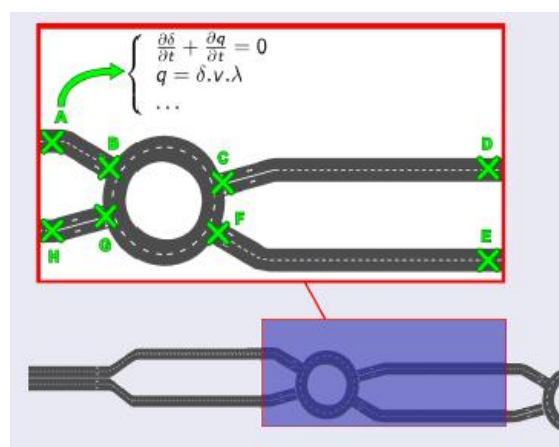


Figure 1: Présentation macroscopique.

- Les Modèles microscopiques : le flux de trafic est le résultat du comportement individuel des véhicules. Ses caractéristiques sont :

- ✚ La position de chaque véhicule.
- ✚ La vitesse de chaque véhicule.
- ✚ L'accélération de chaque véhicule.

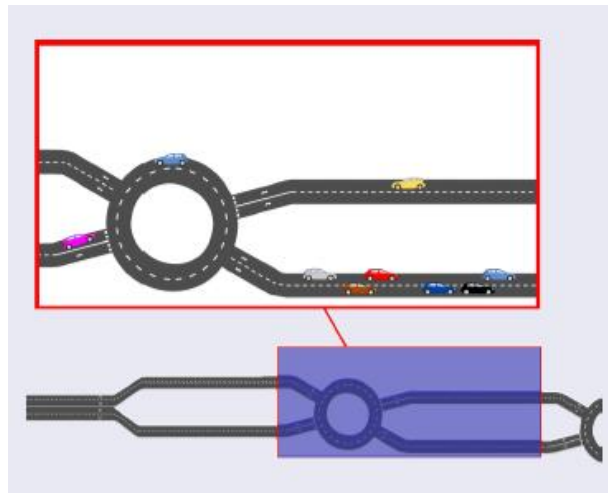


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document. **2: Présentation du modèle microscopique**

- Les Modèles mésoscopiques : le flux de trafic est le résultat du comportement de groupes de véhicules. Ils sont caractérisé par :
 - ✚ La position de chaque paquet de véhicules.
 - ✚ La vitesse de chaque paquet de véhicules.
 - ✚ Et l'accélération.

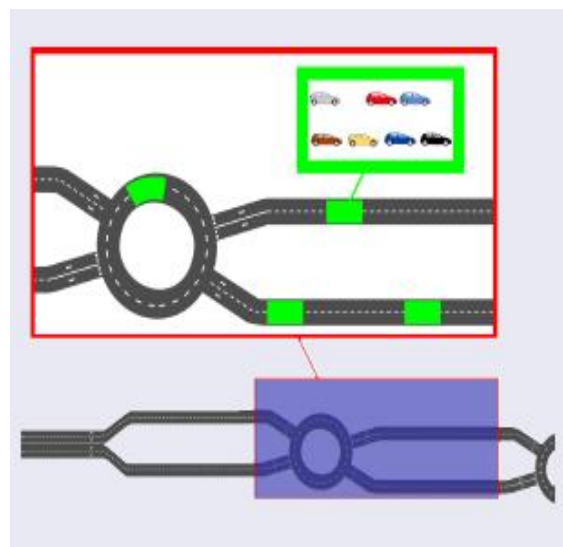


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document. **3: Présentation du modèle mésoscopique**

III. Analyse du trafic et simulation [1]

Les études sur l'identification des phénomènes de la circulation routière et sur la compréhension du comportement individuel et collectif sont poursuivies en utilisant un certain nombre de moyens d'investigation. Des études sont menées sur la route, sur piste et plus récemment dans les laboratoires équipés de simulateurs. Ces études sont réalisées en

observant les comportements "de l'extérieur" (via des équipements dans des capteurs de l'infrastructure) ou "de l'intérieur" du véhicule (mesures embarquées).

Les mesures des comportements «extérieurs» ne décrivent pas les activités spécifiques des conducteurs, mais plutôt les résultats de ces activités dans les interactions avec l'environnement routier. Les mesures de comportement «embarquées» permettent de collecter des indicateurs plus précis relatifs à la dynamique des actions du conducteur par rapport aux évolutions de son environnement. Les mesures «de l'extérieur» sont moins «explicatives» et sont limitées lorsqu'il s'agit d'approfondir les aspects cognitifs de la conduite. Enfin, les études «externes» ont apporté une vision statistique et mathématique du trafic, alors plutôt caractérisée comme un flux. Les études «internes», plus récentes car nécessitant une certaine technologie, ont conduit à une vision dite auto-centrée du trafic, caractérisée par l'interaction des éléments du système: utilisateurs, infrastructures et opérateurs (exemple: gestion des autoroutes). entreprises).

Des modèles de simulation dérivés de ces deux approches de trafic sont ainsi apparus: certains simulent le trafic en utilisant des modèles basés sur des équations mathématiques; les autres simulent le trafic en utilisant des modèles informatiques d'interactions entre entités autonomes.

La circulation routière est un problème dynamique associé à des processus complexes difficiles à décrire analytiquement [2]. Dans une large mesure, ces processus sont caractérisés par l'interaction de plusieurs composants du système, appelés entités. Le nombre de paramètres est important et les interactions sont complexes. Les modèles de simulation mis en œuvre entreprennent d'imiter de manière réaliste le comportement et les interactions des entités réelles (voitures, camions ...) afin de reproduire au plus près le comportement du système: le trafic routier.

La simulation est aujourd'hui un outil efficace pour l'analyse, la reproduction et la prédiction d'une grande variété de problèmes, difficiles à étudier par d'autres moyens trop coûteux ou dangereux. Cet outil est actuellement utilisé; elle a été favorisée par la démocratisation des nouvelles techniques informatiques et l'émergence de nouvelles technologies matérielles (figure suivante).



Figure 3: Exemples d'outils de simulation de trafic (AIMSUN ©, PARAMICS ©)

IV. Le simulateur JAM-FREE

Dans cette section, nous présentons le modèle hybride dynamique de flux de trafic appelé JAM-FREE pour "Java, Agent and Multi-level based Framework for Road-traffic Examination and Enhancement".

a) *Architecture*

JAM-FREE est basé sur une architecture multi-niveaux (voir figure 4):

1. Le niveau d'infrastructure modélise les composants du réseau routier; la dénomination et l'identification des composants de réseau routier suivent la spécification de Setra (<http://www.setra.developpement-durable.gouv.fr>).
2. Le niveau de contrôle est au cœur de l'approche hybride dynamique: il gère la décomposition dynamique du réseau en grappes.
3. Les niveaux dépendants de la simulation modélisent la dynamique du trafic à l'aide d'une représentation dédiée; par défaut, trois niveaux de trafic sont considérés: microscopique, macroscopique et piloté par les données (c'est-à-dire, en utilisant des données réelles).

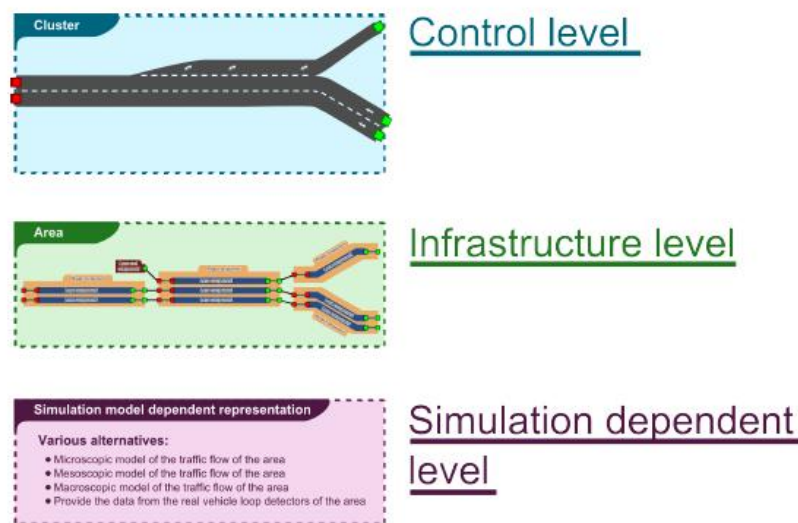


Figure 4 : Architecture multi-niveaux de JAM-FREE

b) Modèles utilisés dans JAM-FREE

Structure du réseau routier: Nous considérons que le réseau routier peut être divisé dynamiquement en sous-ensembles appelés grappes. Le trafic est simulé sur chaque grappe en utilisant différents modèles hétérogènes en fonction de la situation: soit un modèle microscopique, soit un modèle macroscopique.

Pour des raisons d'efficacité du temps de calcul, nous choisissons de ne pas modéliser le réseau routier au niveau physique. En effet, un tel modèle oblige les véhicules à interpréter une grande zone continue d'asphalte avec des lignes vides en tant que voies séparées. De tels calculs sont inutiles, car dans notre cas d'utilisation (France), les conducteurs rationnels ne roulent généralement pas sur les lignes vides qui séparent les voies si elles ne dépassent pas. Pour garder le modèle simple, le réseau routier n'est modélisé qu'à un niveau sémantique.

Le réseau routier est modélisé comme un ensemble de routes interconnectées. Chaque route contient un ensemble de voies (généralement de 1 à 5). Les routes contiennent également des panneaux verticaux (par exemple, un panneau d'arrêt, un panneau de limitation de vitesse) qui sont reliés à toutes les voies ou à des voies spécifiques (par exemple voie d'extraction dans l'autoroute, voie des véhicules lents). Dans notre

modèle, nous soutenons un sous-ensemble spécifique des signes verticaux français. Les points de connexion des routes sont appelés nœuds. Nous distinguons différents types de nœuds:

- Nœuds carrefours
- Nœud d'insertion d'autoroute
- Nœud d'extraction d'autoroute

Régulation de la circulation

Les défis de la gestion du trafic Limiter les possibilités d'extension du réseau routier aujourd'hui nécessite d'optimiser l'utilisation des réseaux existants. De plus, le trafic routier génère un ensemble important de nuisances de tous types qui doivent être atténuées:

Perte de temps liée aux phases de congestion.

- ✓ L'insécurité routière.
- ✓ Impacts environnementaux: pollution sonore, émissions de gaz à effet de serre, pollution de l'air locale.

Des outils dynamiques de gestion du trafic peuvent aider à optimiser les réseaux et à réduire le bruit de la route :

- ✓ Maximiser le débit et limiter la congestion.
- ✓ Retarder ou constituer une alternative aux extensions / extensions du réseau.
- ✓ Promouvoir un meilleur partage des routes actuelles, en particulier pour promouvoir les transports publics.

Observation sur nos réseaux routiers:

- ✚ Le réseau n'est pas en mesure de vendre les volumes de trafic de pointe, comme le montre la figure ci-dessus: en mode non-règlement, nous remarquons que la demande de trafic dépasse la capacité du réseau routier.
- ✚ Besoin de réduire les volumes de congestion...
- ✚ ... et le coût de leurs externalités

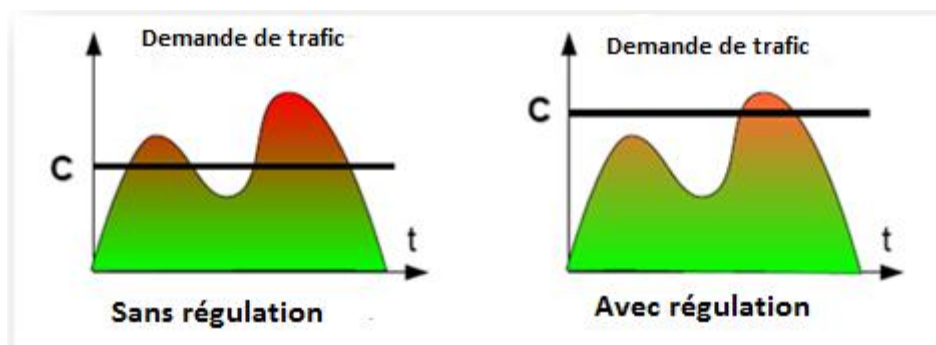


Figure 5: Demande de trafic, avec et sans régulation

L'objectif majeur de la régulation est donc d'augmenter la capacité des réseaux existants en utilisant des stratégies de régulation dynamiques, telles que la régulation de la vitesse, le contrôle d'accès, la gestion dynamique des canaux, etc.

a) Les objectifs de la mesure de la rampe

Avant de définir les principaux objectifs de la mesure de la rampe, nous définissons d'abord la congestion, et pour ce faire, nous devons définir la relation entre la demande et la capacité d'une voie. Nous avons vu dans la première partie qu'une partie du chemin peut être présentée par un diagramme fondamental qui illustre le taux d'occupation en fonction du flux, comme le montre la figure suivante.

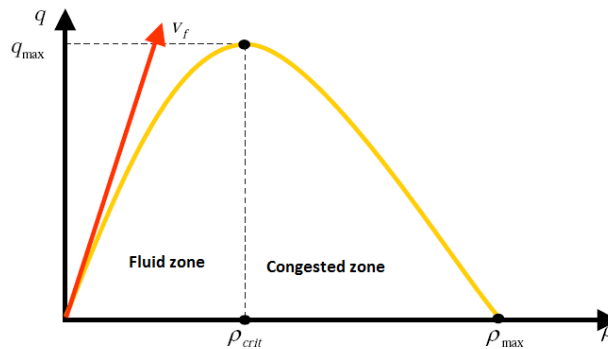


Figure 6: Diagramme fondamental

Le diagramme fondamental montre qu'avant d'atteindre le débit maximum, qui correspond au taux d'occupation critique, nous avons un flux de véhicules fluide. Au-delà de ce point critique, nous avons un état saturé: c'est la congestion.

b) Méthodes de régulation d'un accès

Nous pouvons restreindre le flux des véhicules entrants sur une ligne principale en:

- Modifiant le chemin d'accès pour diminuer sa capacité.
- Disposant l'accès par des dispositifs permettant de canaliser les véhicules entrants tels que le marquage au sol ...
- Mettant en place des feux qui interrompent périodiquement le flux des véhicules entrants.
- La mise en place de ses feux manuelle et contrôlée par une horloge locale adaptée aux conditions de circulation.
- la mise en place de feux s'adaptant en temps réel aux conditions de trafic, corrélés à un dispositif de contrôle des files d'attente d'accès.

La dernière solution réglementaire semble être la solution la plus optimale. Cependant, d'autres solutions peuvent également avoir des effets bénéfiques. Seule l'analyse des cas, des conditions de circulation, des équipements existants et des conditions économiques déterminera la solution la plus optimale.

L'objectif du contrôle d'accès est de réguler les flux de rampe par des feux de circulation afin de préserver la capacité de l'autoroute, limitant ainsi l'apparition de feux de circulation. Congestions dans le voisinage des accès. Les stratégies existantes se répartissent en deux types: les stratégies de feux fixes où la valeur du cycle de feu est calculée hors ligne à l'aide de données historiques [3] et les stratégies adaptatives où le cycle de feu est calculé en temps réel [4].

Pour les stratégies adaptatives, il existe deux types: isolé et coordonné. Les stratégies isolées n'utilisent les mesures en temps réel qu'à proximité de l'accès contrôlé [5], alors que la commande générée par les stratégies coordonnées prend en compte toutes les conditions de trafic sur l'axe ou le réseau, régulée en utilisant toutes les mesures en temps réel de la zone réglementée.

c) Réguler une rampe sur une autoroute

Afin de maintenir la capacité et la fluidité de l'autoroute représentée sur la figure ci-dessous, le principe du contrôle d'accès est de maintenir la densité ρ_s (en nombre de véhicules / km / voie) sur la section principale proche de la densité critique ρ_{cr} , correspondant à une utilisation optimale de la capacité offerte par l'autoroute.

Cette commande agit au moyen des feux de circulation, sur le flux d'entrée de la rampe q_r (en nombre de véhicules / h). En d'autres termes, on agit sur le flux des rampes afin de stabiliser la densité du trafic sur la voie principale.

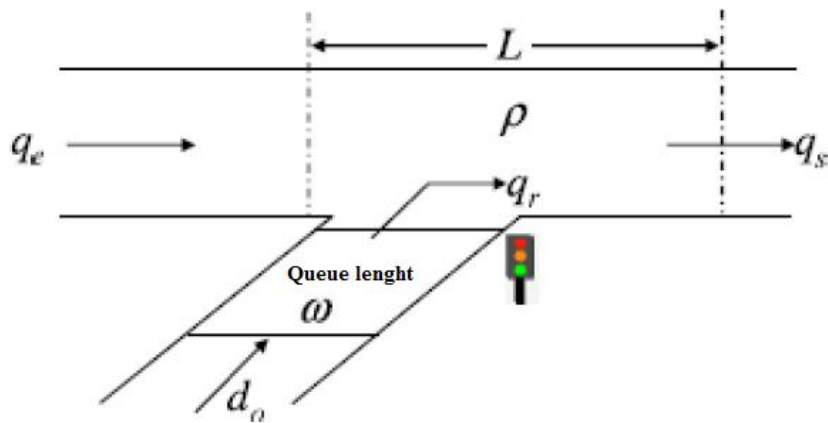


Figure 7: Section d'autoroute avec rampe

V. Conclusion

Le but de cet article était de présenter l'importance de la modélisation du trafic routier afin de comprendre son comportement. Aussi il existe un ensemble d'outils de simulation pour la gestion du trafic routier, et principalement nous avons abordé la régulation du trafic. Dans ce contexte, nous avons brièvement défini les stratégies de contrôle d'accès. Il existe un ensemble de commande de contrôle d'accès, notamment ALINEA.

Dans [6], et à partir d'un site étudié (L'autoroute A25 :Lille France), nous avons présenté et discuté les résultats obtenus de l'application d'ALINEA sur une rampe d'une autoroute.

D'autres travaux en cours concernent le contrôle avec Commande Sans modèle (CSM). L'intérêt était de comparer les résultats des deux stratégies, plusieurs expériences ont montré que la CSM est plus performante qu'ALINEA.

La CSM a de nombreux avantages et c'est probablement ce qui explique les succès industriels d'aujourd'hui :

- 1) Sa simplicité, quelques lignes suffisent à exposer les principes.

- 2) Le nombre de paramètres de synthèse est très petit. Le correcteur est synthétisé une fois pour toutes les régulations ce qui porte à 2 le nombre de ces paramètres.
- 3) Il présente un découplage intrinsèque de la dynamique de suivi (imposée par la trajectoire de référence) de la dynamique de régulation (imposée par le correcteur).
- 4) Tout système linéaire, ou non, est réduit à un système intégrateur pur dont les propriétés sympathiques sont bien connues dans la commande.
- 5) Les erreurs de modèle, les perturbations, les défauts ... sont rejetés en "bloc", c'est-à-dire que nous n'essayons pas de distinguer leurs effets à travers des modèles.

Références

- [1] N.Bouha, G. Morvan, H. Abouaissa, and Y. Kubera, "A first step towards dynamic hybrid traffic modeling," Proc. of 29th European Conf. on modelling and simulation (ECMS), pp. 64-70, mai 2015.
- [2] Lieberman E. et Rathi A.K., Traffic simulation. in Traffic flow theory. chapitre 10, Oak Ridge National Laboratory (Eds.), 1997.
- [3] J. A. Wattleworth. « Peak-period analysis and control of a freeway system / with discussion ». Highway Research Board, Washington, DC, Highway Research Record, 57:1-21, 1967.
- [4] M. Boukhni, H. Haj-Salem, « Evaluation opérationnelle de la régulation d'accès sur les autoroutes de l'IDF basée sur la stratégie ALINEA », 6e Conf. Internat. Francoph. Automat., Nancy, 2010.
- [5] D. P. Masher, D. W. Ross, P. J. Wong, H. M. Tuan, P. L. Zeidler, et S. Peracek. « Guidelines for Design and Operating of Ramp Control Systems ». Stanford research institute report, NCHRP 3-22, SRI Project 3340. SRI, Menid Park, California, 1975.
- [6] N.Bouha, Z.Mahani, " Simulation and Dynamic management of Highway Traffic Flow: Application to Ramp Metering", The International Journal of Engineering And Science (IJES), Volume || 7 || Issue || 4 Ver. I || Pages || PP 52-60 || 2018 || ISSN (e): 2319 – 1813 ISSN (p): 23-19 – 1805