

CIV6706A

Régulation de la circulation - Introduction



**POLYTECHNIQUE
MONTRÉAL**

LE GÉNIE
EN PREMIÈRE CLASSE

École Polytechnique de Montréal

Département des génies civil, géologique et des mines

Automne 2017

PLAN DE COURS

Chargé de cours :

- Paul St-Aubin, Ph.D., ing. jr, Polytechnique Montréal
- paul.st-aubin@polymtl.ca
- <https://www.paulstaubin.ca>

Responsable :

- Nicolas Saunier

INTRODUCTION

Ce cours introduit et approfondi les systèmes et les modèles utilisés pour le **contrôle de la circulation** afin **d'optimiser son efficacité**.

Le cours est séparé en trois sous-domaines:

- Les carrefours à feux isolés
- Les artères (réseaux de carrefours à feux)
- Les autoroutes

Chaque domaine comporte les éléments suivants:

- Modèles d'**optimisation de la capacité**
- Modèles de **minimisation du temps perdu**
- Systèmes de collecte de données
- Systèmes de contrôle et interface aux usagers
- Systèmes de gestion de contrôle automatique (feux)

INTRODUCTION



CONCEPTS FONDAMENTAUX

La performance est influencée par le bon fonctionnement d'un système: on cherche à maximiser l'**efficacité** des infrastructures routières.



Comme tout système thermodynamique, les réseaux routiers comportent une efficacité d'opération e , soit:

$$e_q = \frac{o}{o_{max}}$$

où: o = mesure de performance

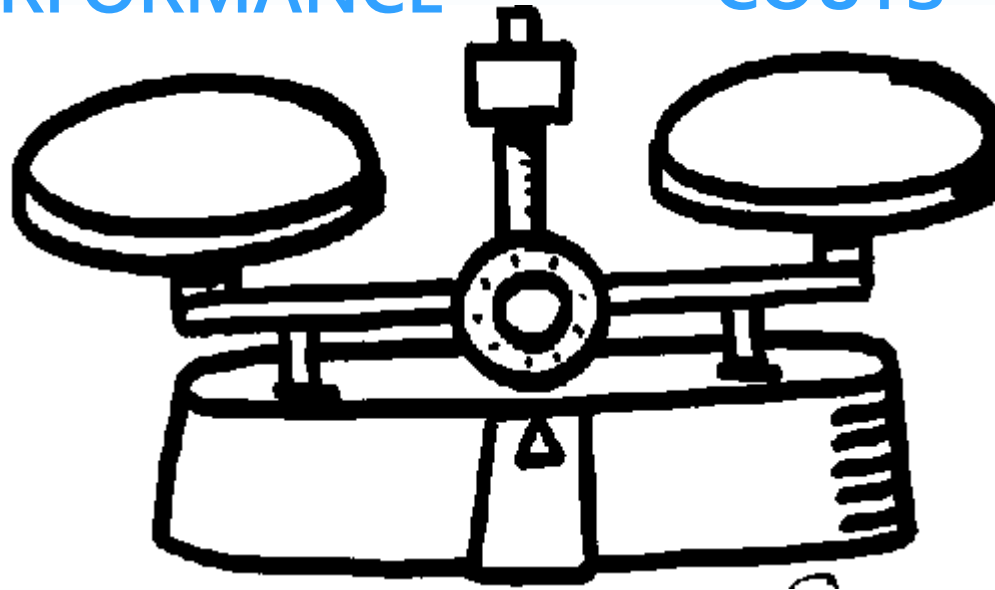
o_{max} = mesure de performance sous conditions idéales

Tout comme avec les machines énergétiques, certaines conceptions routières sont moins efficaces que d'autres, et encore moins sans intervention et gestion continue des aménagements routiers.

La régulation de la circulation tente généralement de balancer le **compromis entre la performance et les coûts**.

PERFORMANCE

COÛTS



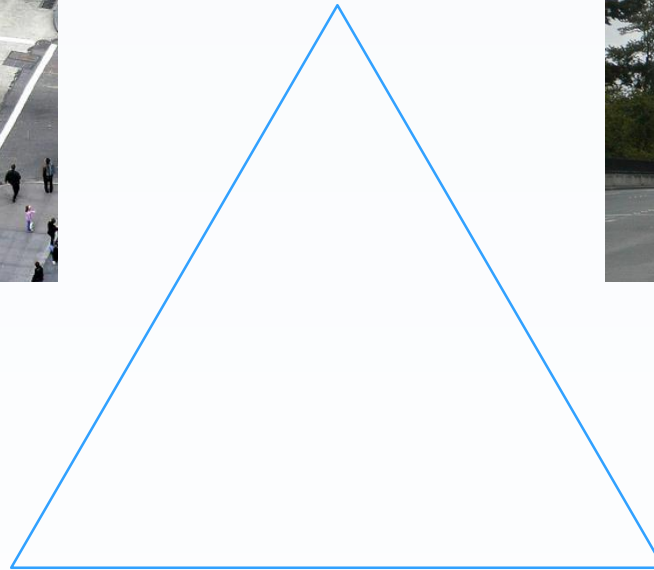
ACCIDENTS ▲



CAPACITÉ ▼



ÉCONOMIE



PERFORMANCE

SÉCURITÉ



COÛTS ▲

Comment est-ce qu'on mesure la performance routière?



Pour ce cours on porte particulièrement attention aux mesures de performances suivantes :

- **Capacité** (veh/h)
- **Congestion/temps perdu** (veh-h)

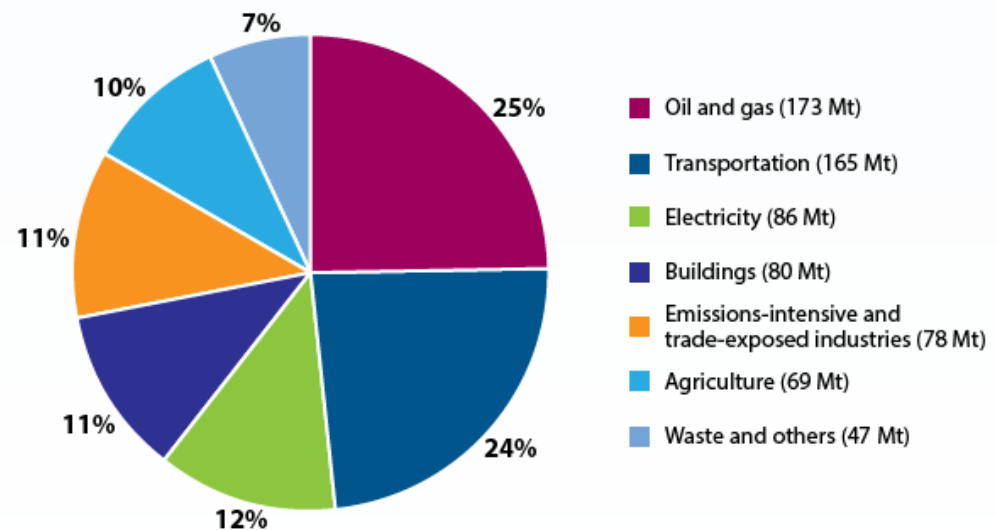
Les couts suivants sont tout aussi importants, mais sont hors de portée pour le cours, du moins quantitativement :

- Sécurité (traité avec objectifs de conception)
- Coûts de construction (traité de manière qualitative)

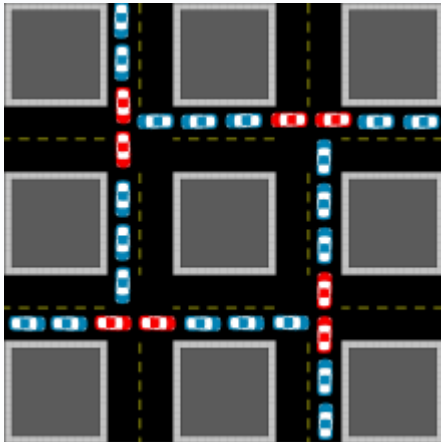
Autres critères de conception :

- Confort des usagers
- Convenance
- Économie et efficacité du transport pour les usagers
- Impact environnemental

Comment est-ce que les décisions en génie de la circulation puissent avoir un impact sur les émissions de gaz à effet de serre?



En particulier, il faut éviter les **embouteillages** (« *gridlock* »).



VARIABLES FONDAMENTALES

Pour ce cours, il faut avoir une assez bonne connaissance des modèles de base de la théorie de la circulation :

- Diagramme espace-temps
- Modèles de capacité et diagramme fondamental
- Files d'attente et temps perdu
- Niveau de service (LOS)

RESSOURCES SUGGÉRÉES

Comprendre le trafic routier : Méthodes et calculs

- Christine Buisson, Jean-Baptiste Lesort
- <http://www.entpe.fr/media/files/comprendreletraficroutier>

Notes de cours CIV4740 – Circulation

Notes de cours CIV6705 – Théorie de la circulation

Notes de cours du Prof. K. Baass (Traduction MTQ du HCM 2000)

Les diagrammes et concepts de ce chapitre seront tirés des ressources ci-dessus

RESSOURCES SUGGÉRÉES

Highway Capacity Manual 2010

Principles of Highway Engineering and Traffic Analysis, 2009, Mannering, F., Washburn, S., Kilareski, W., Wiley.

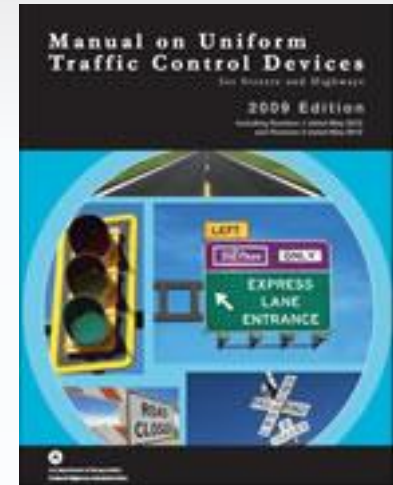
Revised Monograph on Traffic Flow Theory

- <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/operations/tft/>

RESSOURCES SUGGÉRÉES

Manual on Uniform Traffic Control Devices

- FHWA (anglais)
- Gratuit
- <http://mutcd.fhwa.dot.gov/>



Tome V - Signalisation routière

- MTQ (français)
- N'est pas gratuit
- http://www3.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/produits/ouvrage_routier/normes/norme_6.en.html

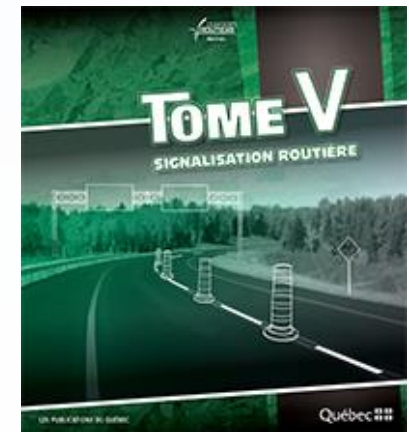
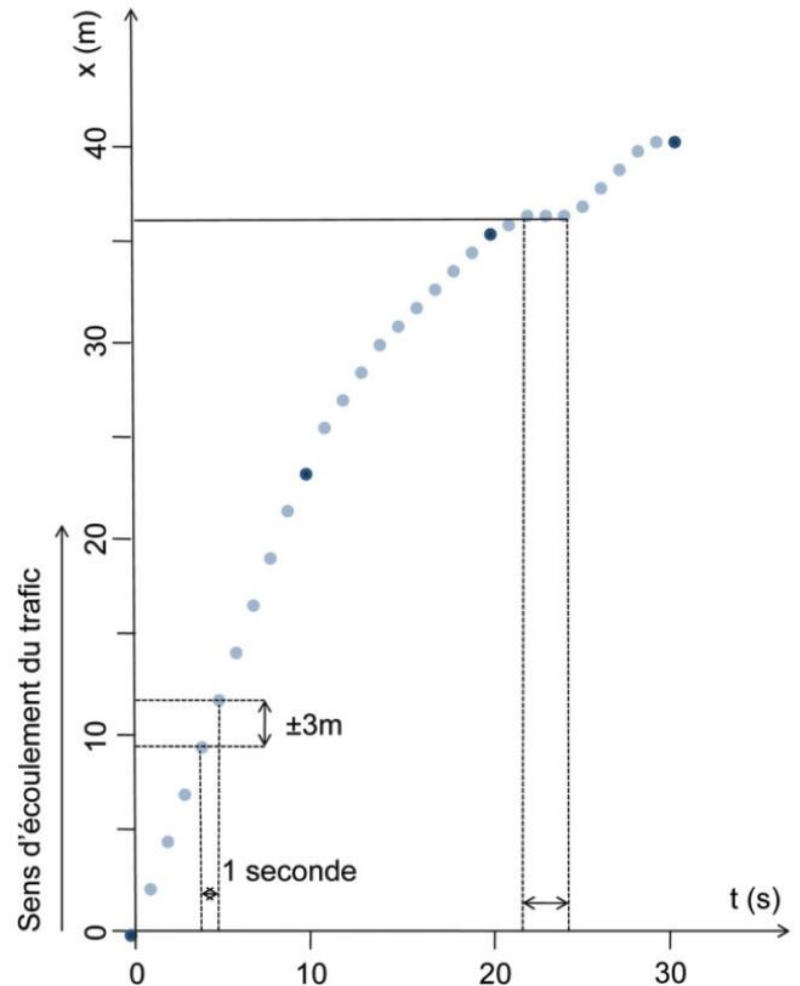


DIAGRAMME ESPACE-TEMPS

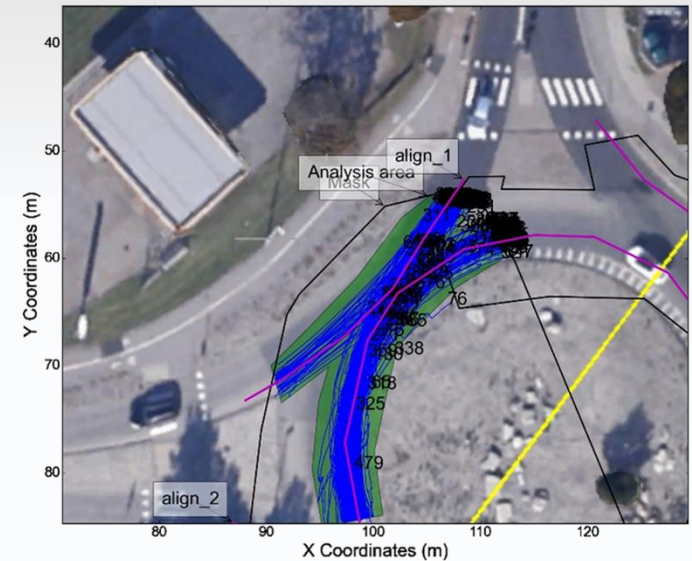
« diagramme X-T »

Trace la **position** des véhicules dans **l'espace** et **le temps**

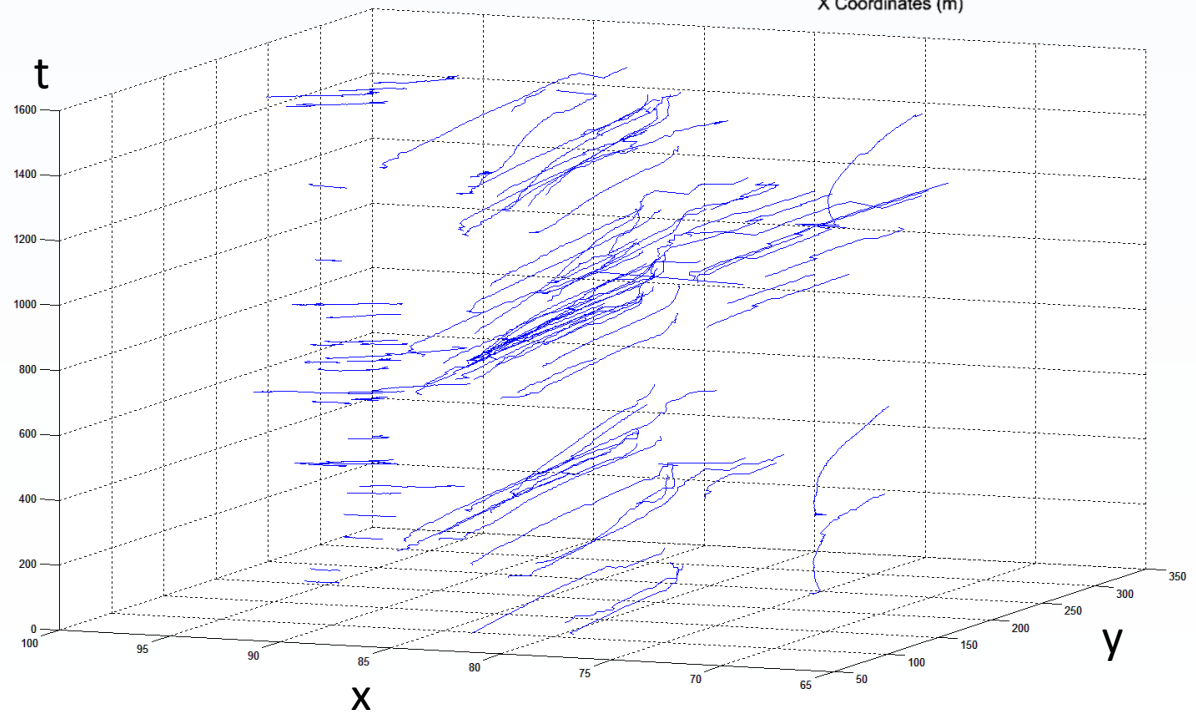
L'espace est généralement limité à la distance de parcours x , soit le tracé curviligne de la route ...



... mais peut aussi comporter le déplacement latérale y ou verticale z des voitures pour certaines applications spécifiques.



Chaque véhicule suit alors une **trajectoire** spécifique dans l'espace et le temps (x, y, z, t).



À l'exception de certaines caractéristiques individuelles des véhicules, p.ex.:

- la **longueur** L d'un véhicule en particulier
- variations des comportements de conduite entre usagers

tout les variables fondamentales sont dérivés de :

- l'évolution des trajectoires dans l'espace et le temps
- ou la relation entre ces trajectoires.

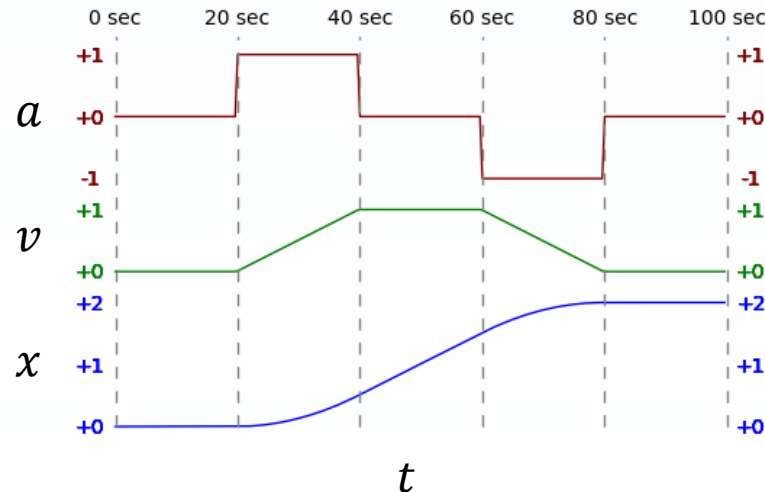
Nous observons donc à partir de x et t :

- la **vitesse** v de chaque trajectoire (instantanée) comme suit :

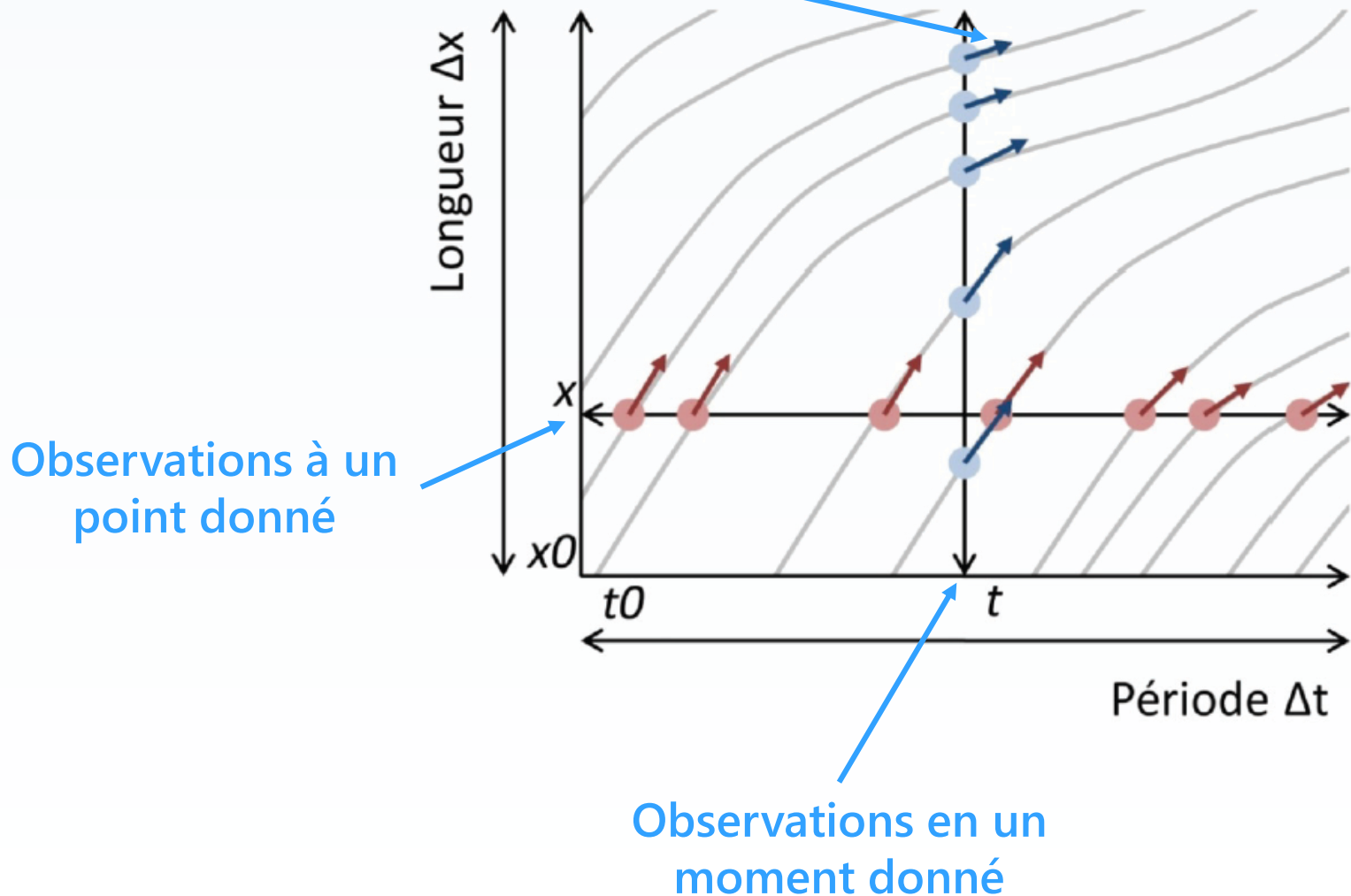
$$v = \frac{dx}{dt}$$

- l'**accélération** a de chaque trajectoire (instantanée) :

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$$



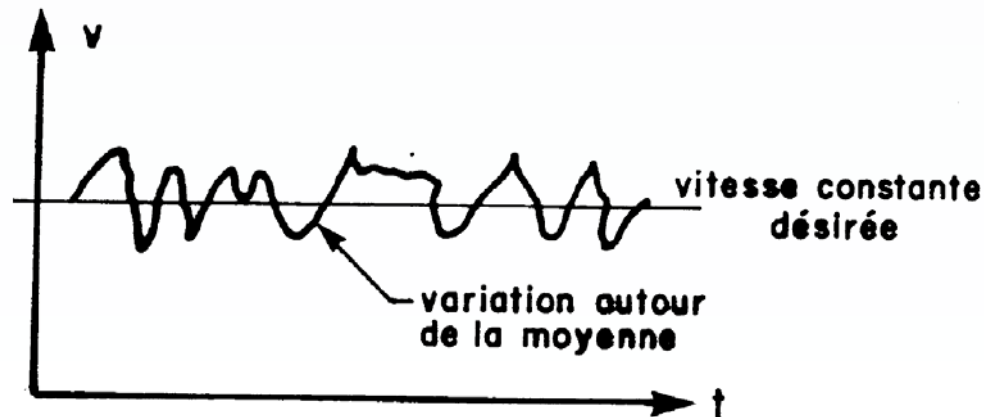
La pente des trajectoires à un certain endroit
donne la vitesse :



PORTÉE DE LA MODÉLISATION

Il est souvent inconvenient de rapporter les mesures de la circulation pour des véhicules/observations individuelles (**modèles microscopiques**).

Nous agrégeons alors les mesures de manière à obtenir des **modèles macroscopiques**.



Approche macroscopique :

- Analyse de la circulation en se basant sur les **comportements de groupe**
- Utilisation de mesures de tendance centrale (moyenne)
- Solutions analytiques
- Simulation agrégé

Approche microscopique :

- Analyse de la circulation en se basant sur le **comportement individuel des usagers**
- Représentation des variations individuelles par des distributions de probabilité
- Simulation de chaque usager (modèle *agent-based*)
- Modélisations des trajectoires à haute résolution dans l'espace et le temps (diagramme fondamental)

VARIABLES MICROSCOPIQUES

Variables dérivés de la pente des trajectoires:

- Vitesse de parcours v_{trip} (*trip speed*)
- Vitesse de marche v_{oper} (*operating speed*)
- Vitesse instantané $v_{instant}$ (*spot speed*)
- Accélération instantané

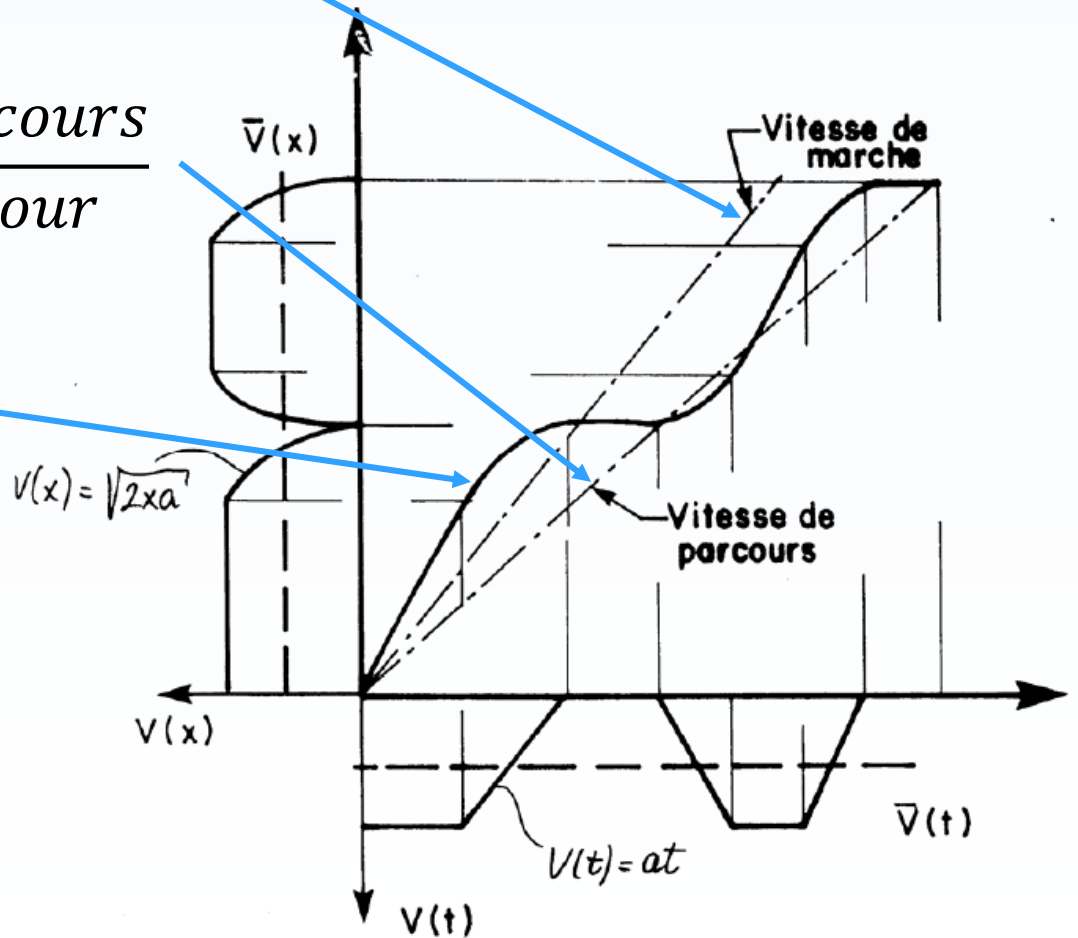
Variables dérivés des relations inter-véhiculaires:

- **Espacement, écart, créneau** : Divers mesures temporelles ou spatiales des positions relatives entre deux véhicules
- **Longueur L_i** : Longueur d'un véhicule particulier

$$v_{oper} = \frac{\text{distance de conduite}}{\text{temps de conduite}}$$

$$v_{trip} = \frac{\text{distance de parcours}}{\text{temps de parcours}}$$

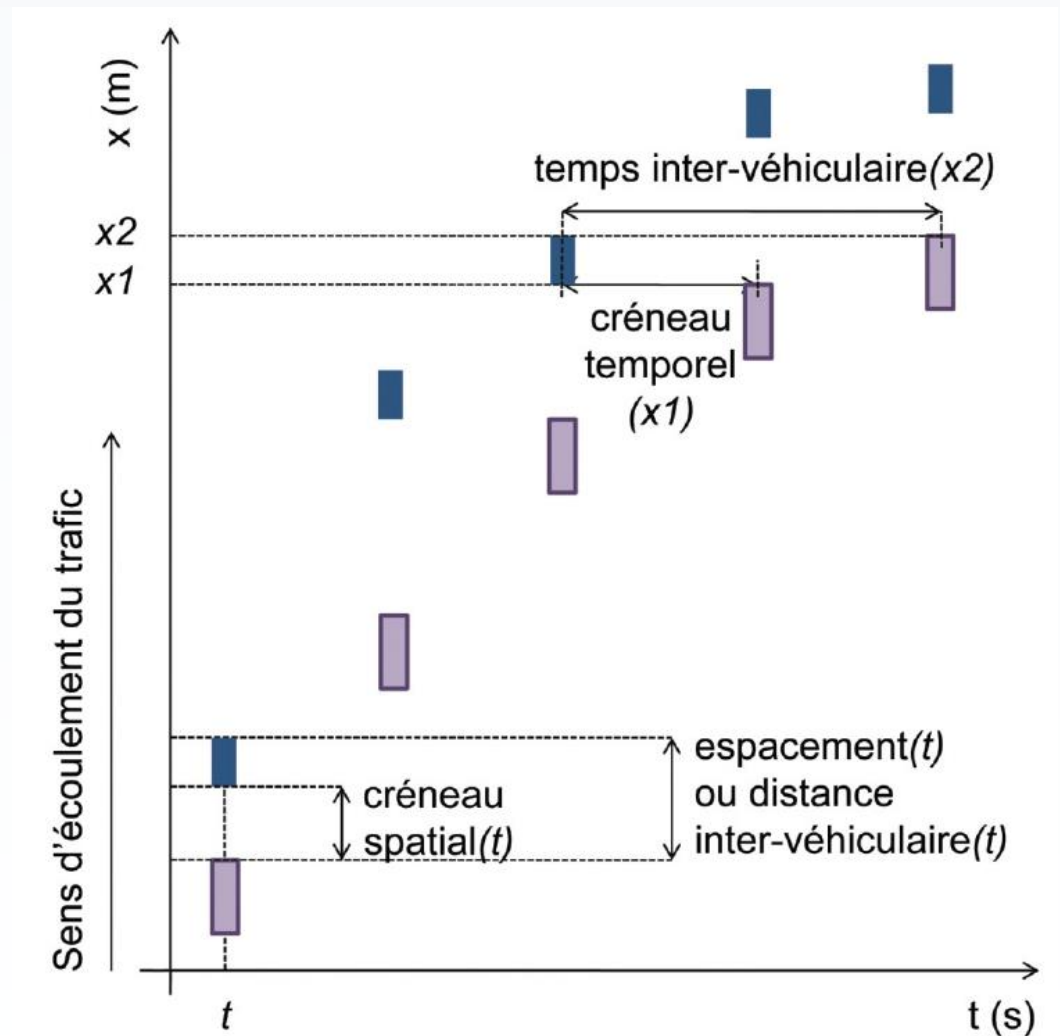
$$v_{instant} = \frac{dx}{dt}$$



Variables dérivées de la relation entre deux véhicules ou plus :

- Écart h
(*headway*)
- Créneau temporel
(*gap time*)

- Espacement s
(*spacing*)
- Créneau spatial
(*gap distance*)



VARIABLES MACROSCOPIQUES

Variabes dérivés de la pente des trajectoires:

- **Vitesse spatiale** v_s (*space-mean speed*) : La vitesse de parcours moyenne mesuré en un endroit pendant un temps donné
- **Vitesse temporelle** v_t (*spot-mean speed*) : La vitesse instantanée moyenne qui se mesure à un point donnée

Variabes dérivés du nombre de trajectoires:

- **Débit** q (*flow*) : Pour un endroit particulier sur une période de temps donné
- **Densité** k « concentration » (*density*) : Pour un instant particulier sur une distance donnée
- **Nombre de véhicules** n

Les vitesses spatiales et les vitesses temporelles se distinguent par calcul mathématique de la moyenne:

- v_s , **moyenne harmonique**

$$v_s = \frac{n}{\sum \frac{1}{v_{trip}}}$$

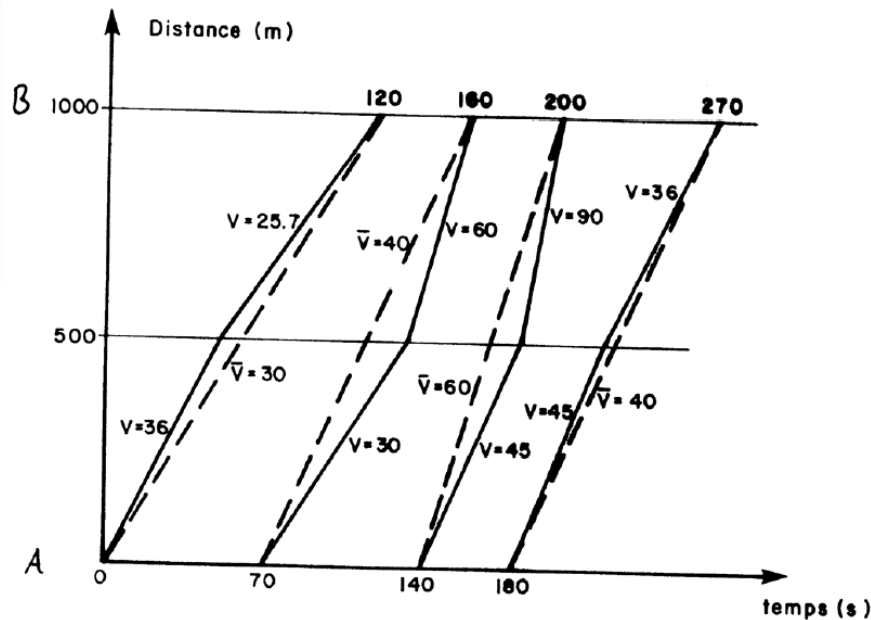
- v_t **moyenne arithmétique**

$$v_t = \frac{\sum v_{instant}}{n}$$

On observe alors que :

$$v_s < v_t$$

Véhicule	Temps de parcours		t_p (sec)	v_i (km/h)
	Tronçon 1	Tronçon 2		
1	50	70	120	30
2	60	30	90	40
3	40	20	60	60
4	40	50	90	40



$$\frac{1000m}{90s} \times 3.6$$

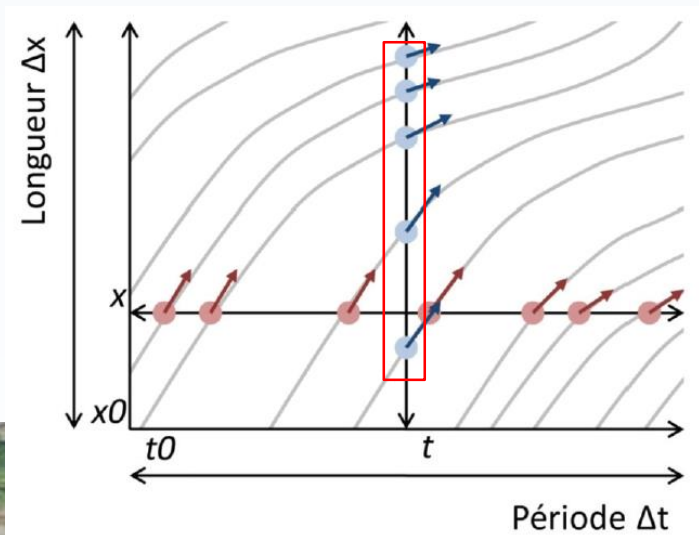
$$v_s = \frac{4}{\frac{1}{30} + \frac{1}{40} + \frac{1}{60} + \frac{1}{40}} = 40 \text{ km/h}$$

$$v_s = \frac{30 + 40 + 60 + 40}{4} = 48 \text{ km/h}$$

La **densité** mesure le nombre de véhicules sur une distance particulière en un moment donné.

$$k = \frac{n}{\text{distance} \times n_{\text{voies}}}$$

$$k = \frac{66 \text{ veh}}{0.4 \text{ km} \times 4 \text{ ln}} = 41.25 \frac{\text{veh}}{\text{km ln}}$$



Période Δt

Ruler

Measure the distance between two points on the ground

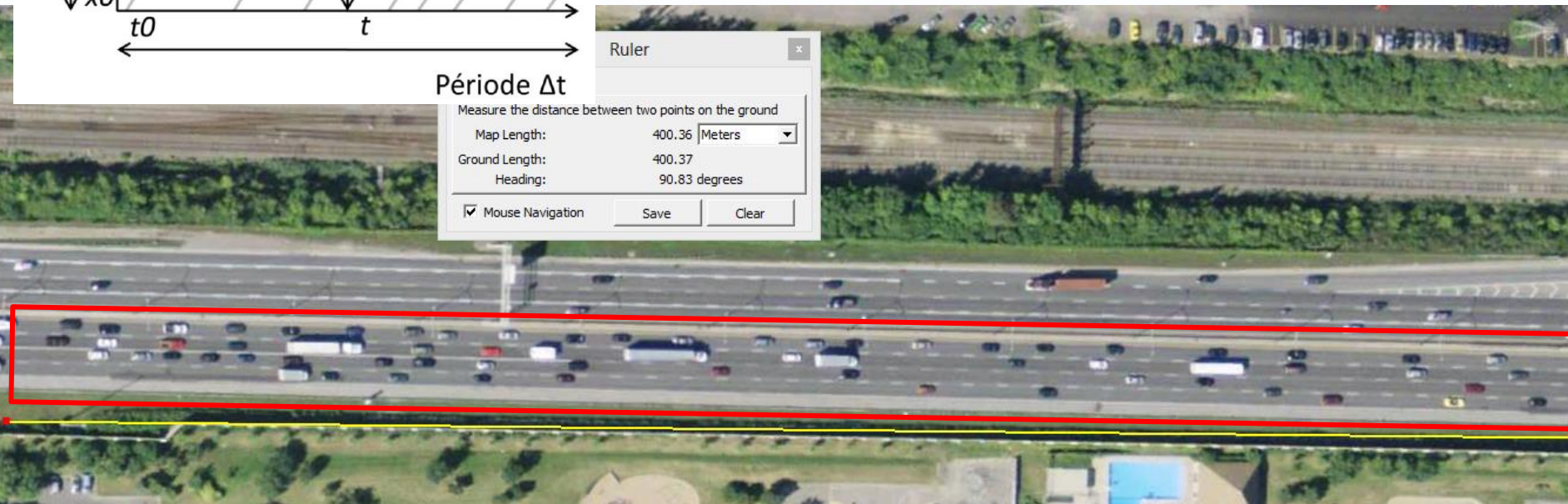
Map Length: 400.36 Meters

Ground Length: 400.37

Heading: 90.83 degrees

Mouse Navigation

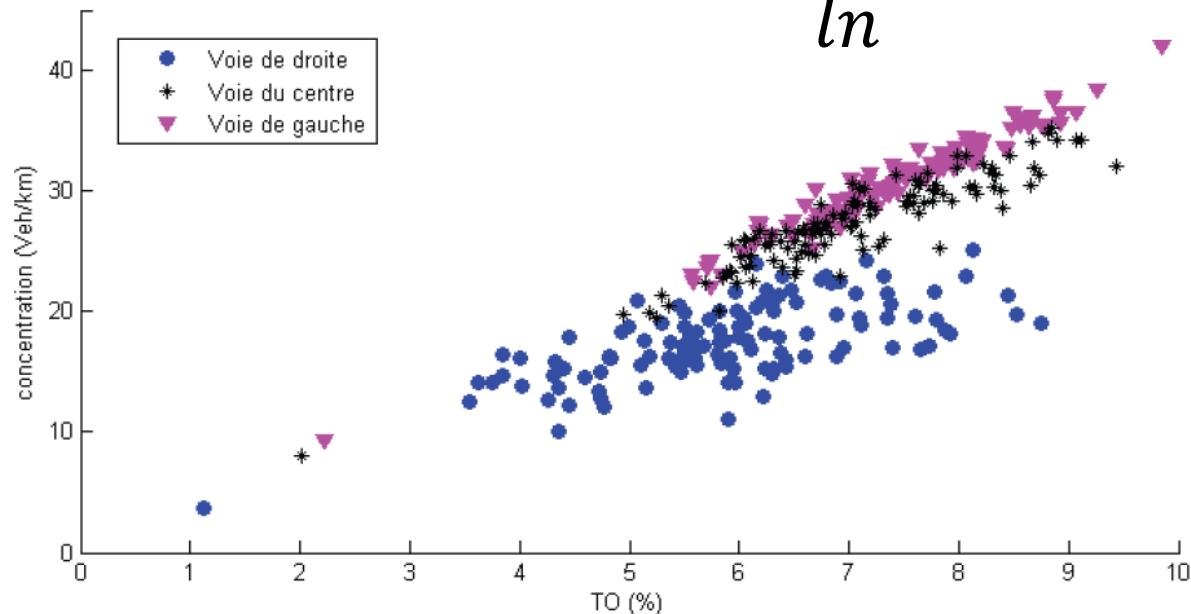
Save Clear



On peut aussi décrire la densité en fonction du **taux d'occupation TO** ce qui représente le pourcentage de la chaussée occupée par l'aire des véhicules.

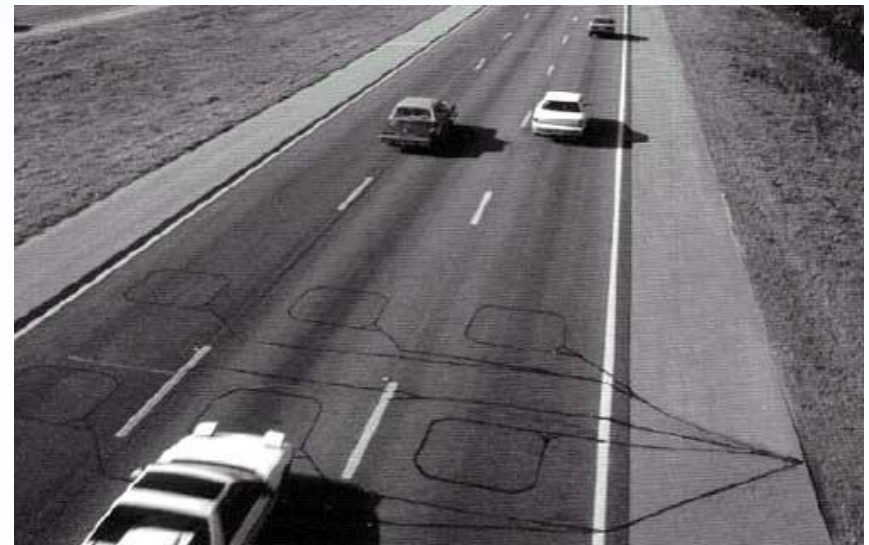
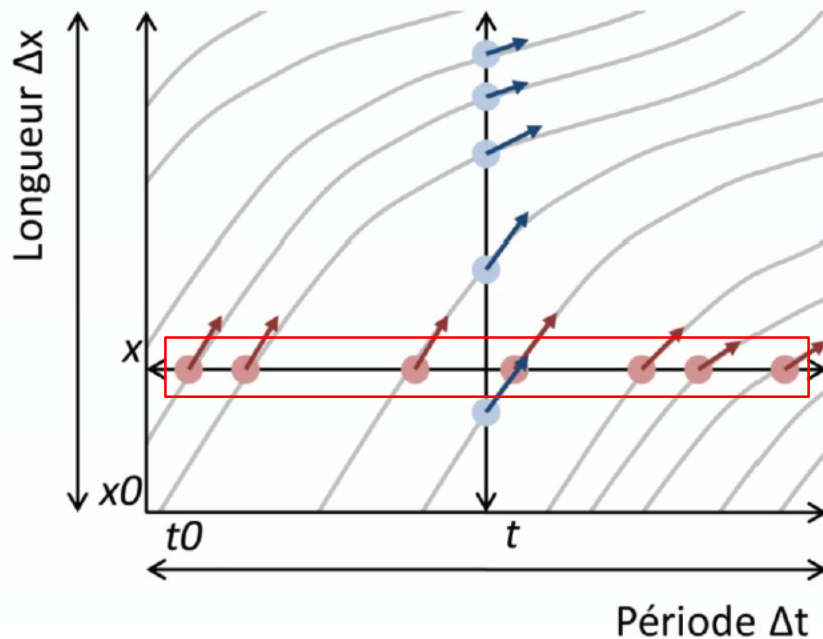
$$\bar{L} = \frac{0.004 \text{ km}}{\text{veh}}, \quad k = 41.25 \frac{\text{veh}}{\text{km ln}}$$

$$TO = k \times \bar{L} = \frac{16.5 \%}{\text{ln}}$$



Le débit mesure le nombre de véhicules s'écoulant durant un laps de temps particulier à un point donné.

$$q = \frac{n}{\text{temps} \times n_{\text{voies}}}$$



Le débit varie constamment et se mesure de manière discret; conséquemment, il y a une multitude de descripteurs:

- **DJMA** (*AADT*)
Débit journalier moyen annuelle
- **Débit horaire** (*hourly flow*)
Débit mesuré sur une période d'une heure donnée
- **Débit de l'heure de pointe** (*peak-hour flow*)
Débit(s) horaire(s) le(s) plus fort(s) durant une journée
- **Intensité** (*flow rate, 15-min flow, etc.*)
Mesures variés du débit instantané, tente de modéliser le taux de changement du débit; typiquement mesuré en pas de 15 minutes
- **Facteurs de pointe instantanée PHF** (*peak-hour factor*)
débit de l'heure de pointe

$$PHF = \frac{\text{débit de l'heure de pointe}}{4 \times \max(\text{intensité 15 min de la même période})}$$

LIEN MICRO-MACRO

On peut relier les variables microscopiques et macroscopique avec une approximation. En générale, cela implique une relation entre la densité et l'espacement moyen des véhicules :

$$\bar{s} = \frac{\textit{distance}}{n} \approx \frac{1}{k}$$

$$\bar{h} = \frac{\textit{temps}}{n} \approx \frac{1}{q}$$

D'autre part, les vitesses macroscopiques sont d'habitude calculés à partir des moyennes des observations de vitesse individuelles.

Le concept d'équivalence en **unités véhicule passager** (*passenger car unit equivalent*) est parfois aussi utilisé au lieu de l'unité de véhicules (*veh*), afin d'éliminer l'ambiguïté de la longueur des véhicules présent.

Plus de détails : HCM 2000, chapitre 12
On dénote l'unité par **pc** ou **uvp**.

$$n_{veh.pas.} = 200 \text{ veh}$$

$$n_{camions} = 30 \text{ veh}$$

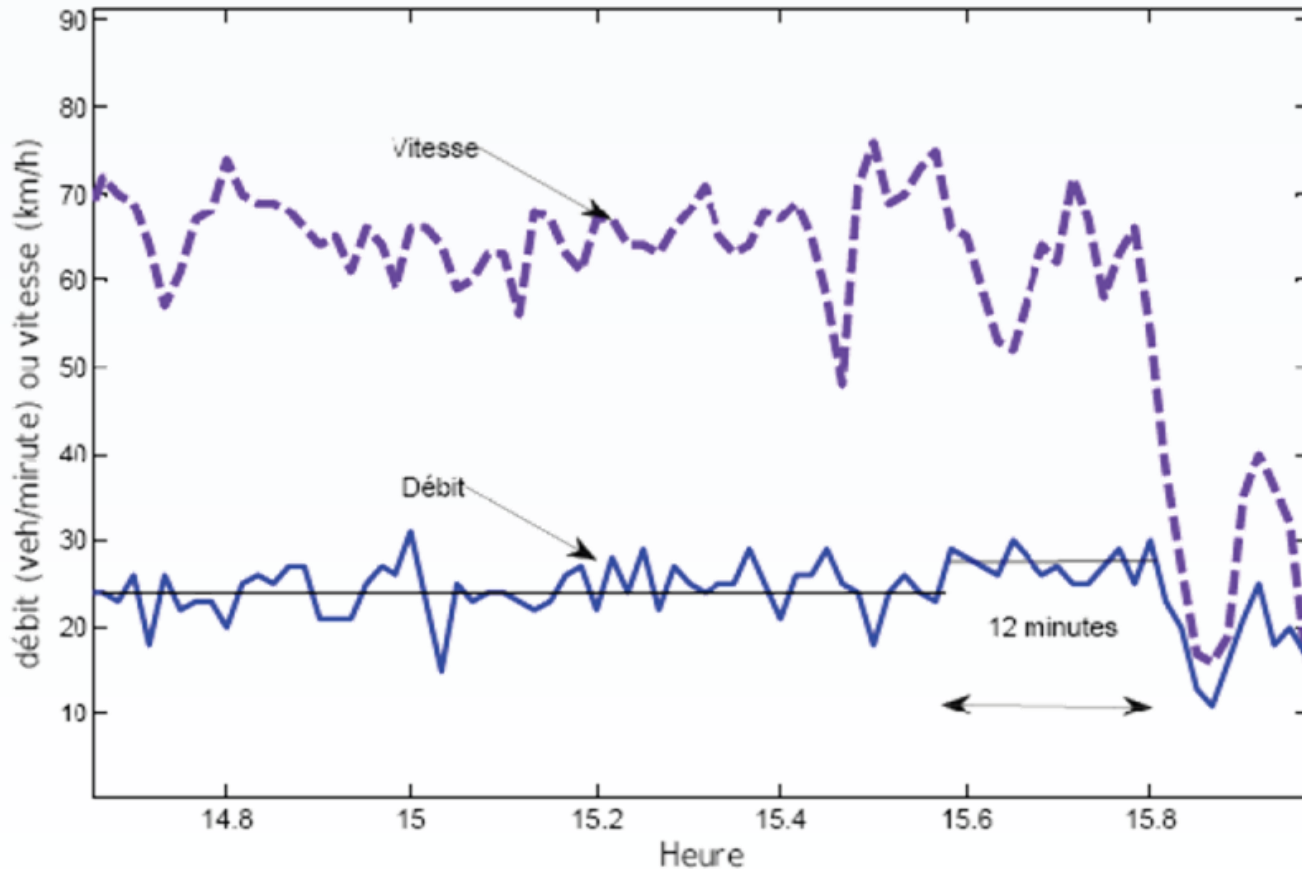
$$n_{uvp} = \sum(n_{type} \times UVP_{type})$$

$$n_{uvp} = 200 \times 1 + 30 \times 3.5$$

$$n_{uvp} = 305 \text{ uvp}$$

Type de Véhicule	Équivalents uvp
Véhicule passagers	1
Motocyclette	0.5
Bicycle	0.2
Véhicule lourd	3.5

Afin d'évaluer la capacité des routes, nous tentons de modéliser les débits en fonction des vitesses et des densités observées.



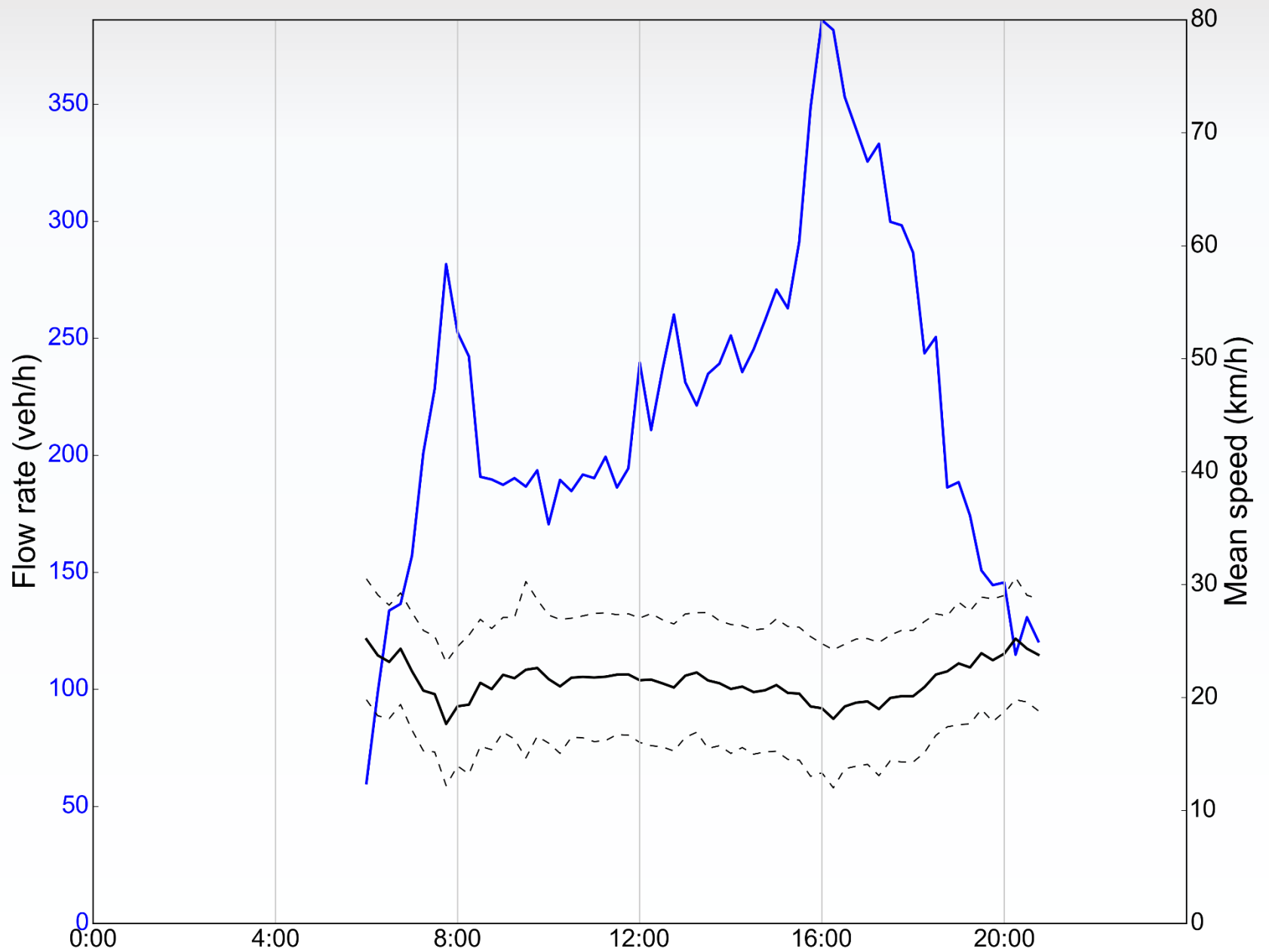


DIAGRAMME FONDAMENTAL

Le **diagramme fondamental** illustre un fait important :

- Il existe un débit optimal
- En gérant la densité et/ou la vitesse, il serait possible d'optimiser le débit

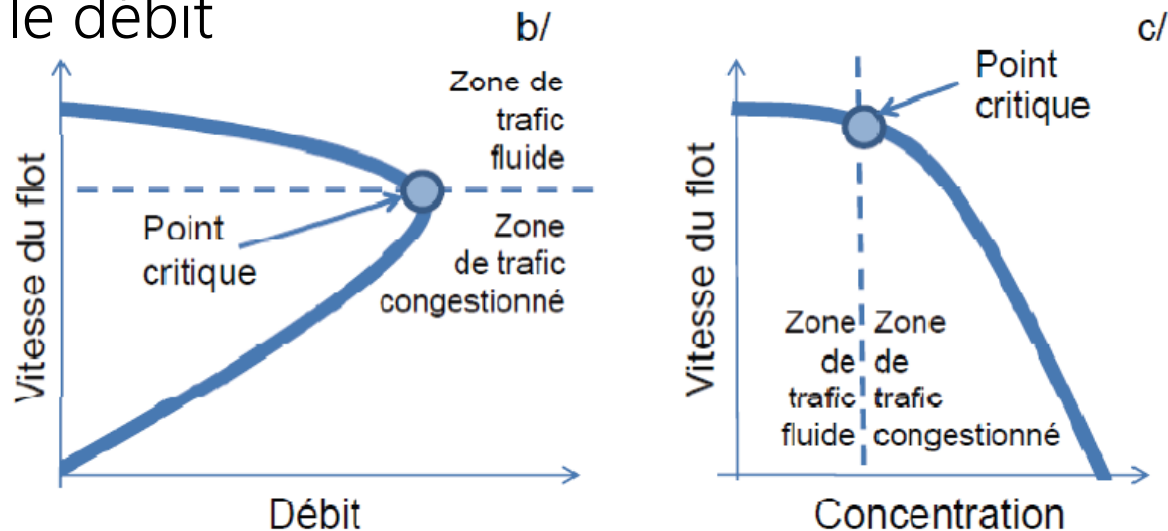
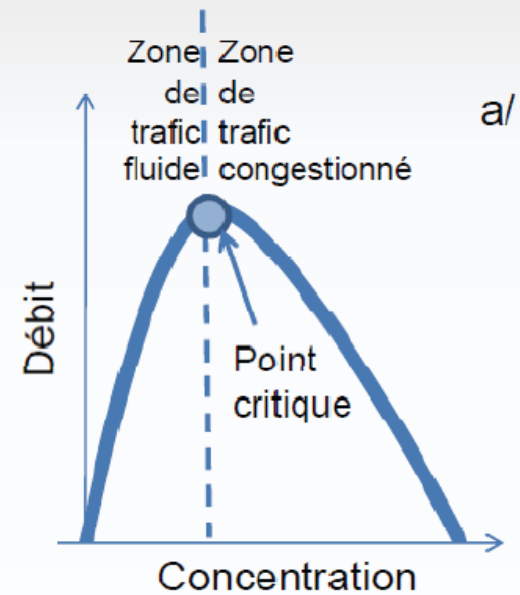
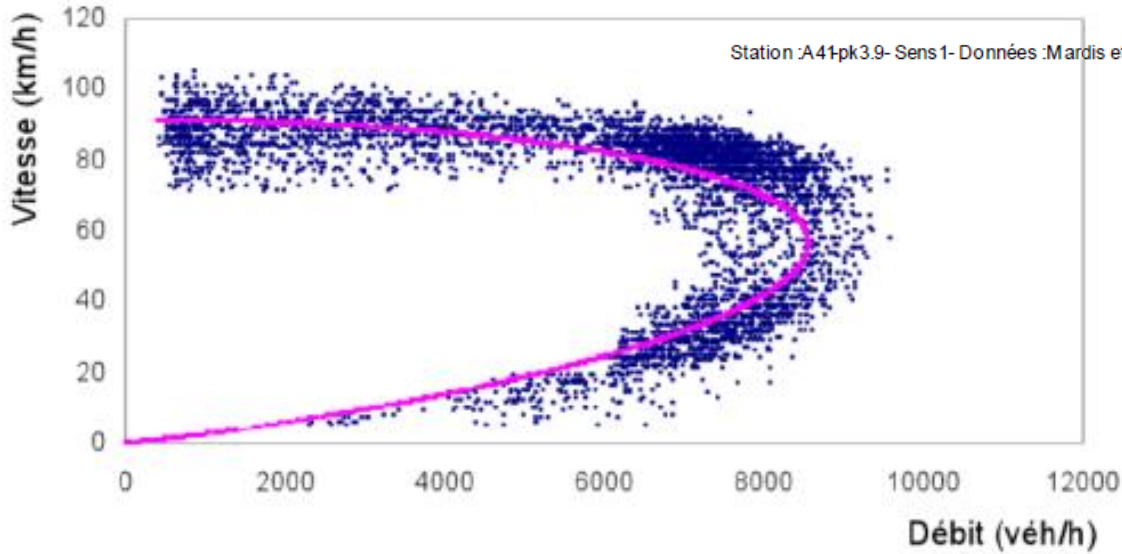
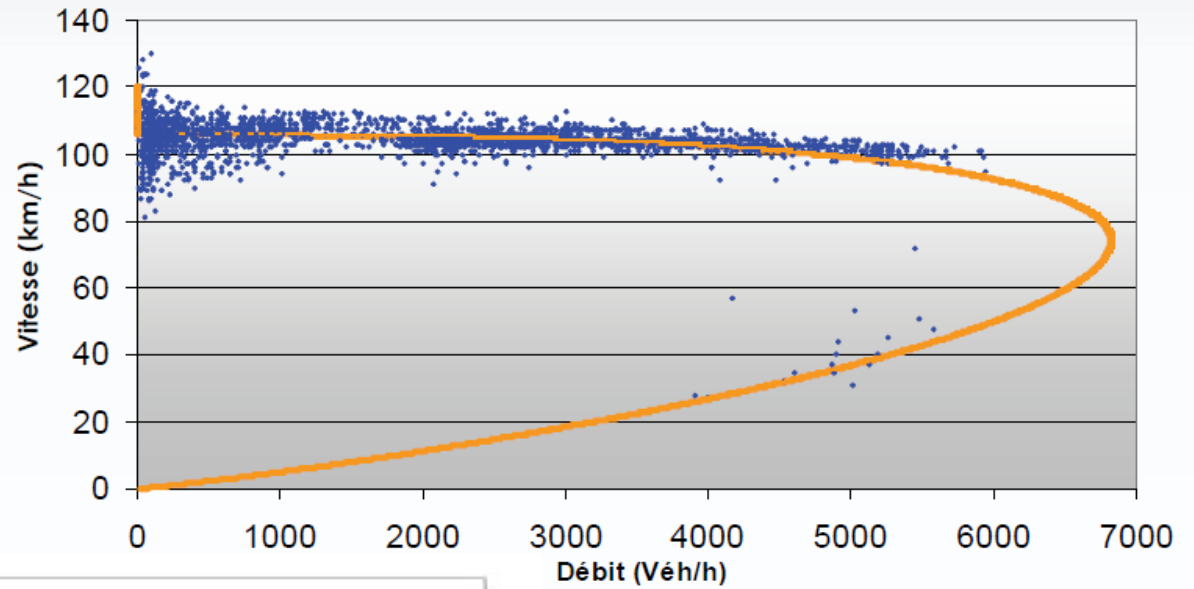


Diagramme $V=f(Q)$

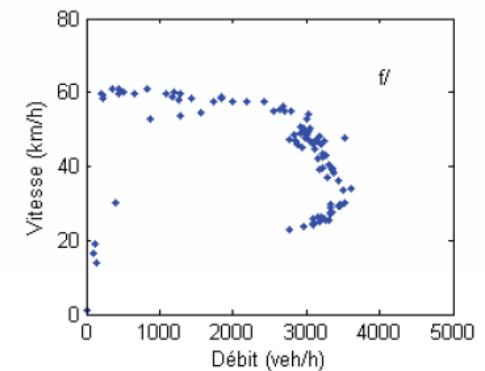
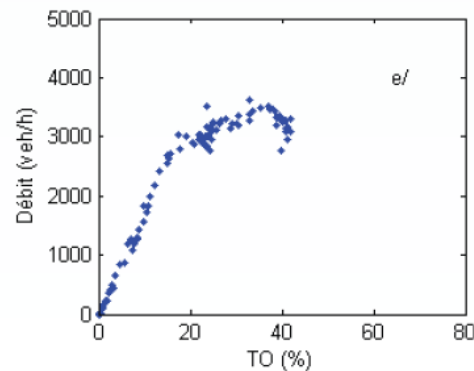
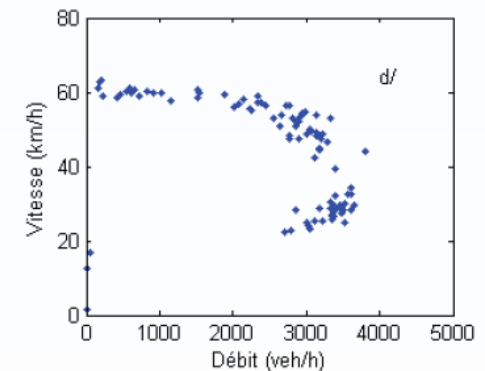
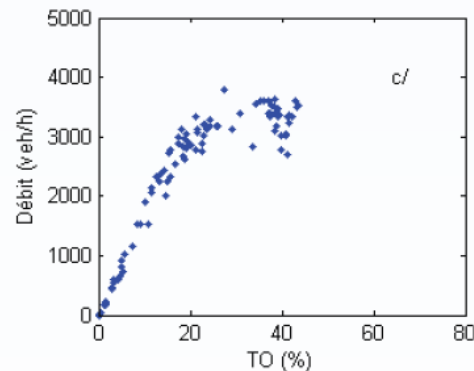
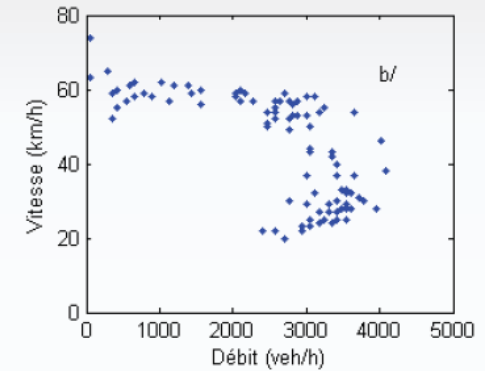
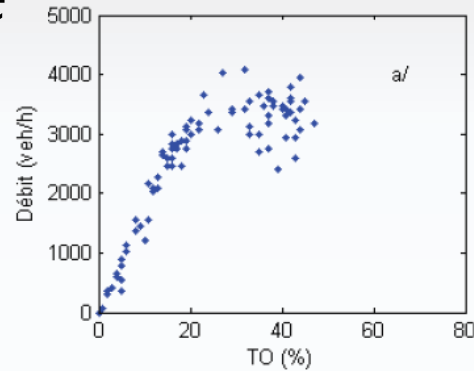


Station : A41-pk3.9- Sens 1- Données : Mardis et jeudis du 20/05/09 au 25/06/09 (hors vacances scolaires zone A)

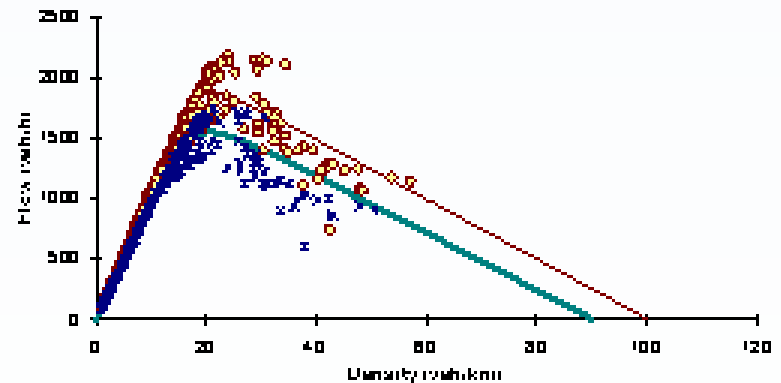
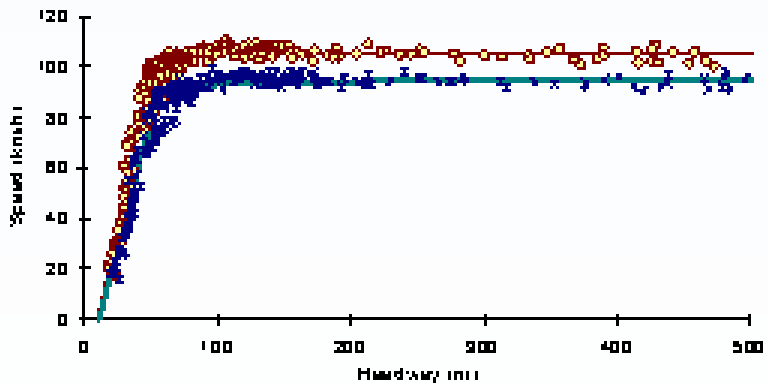
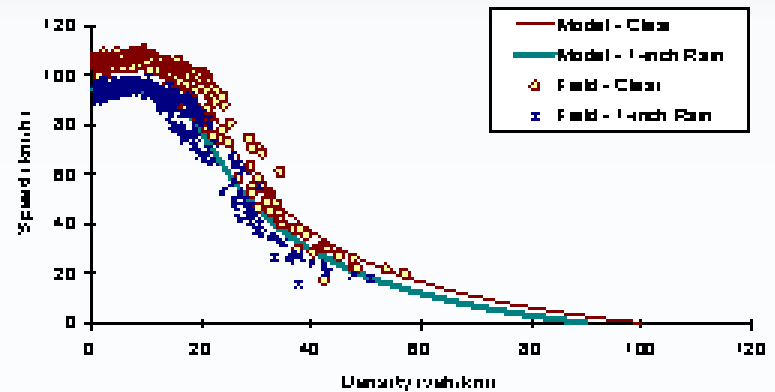
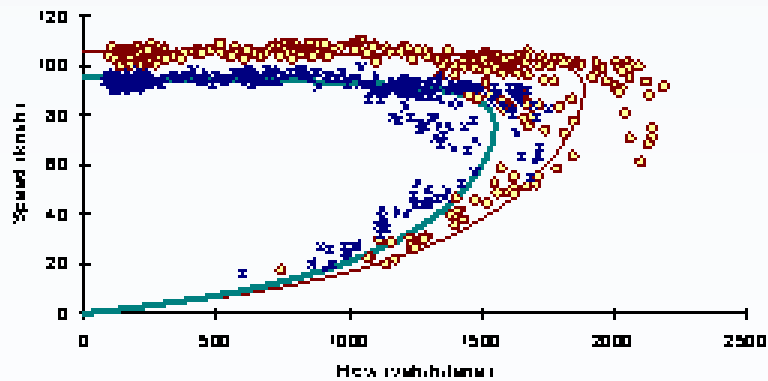
La fiabilité du diagramme fondamental augmente lorsqu'on augmente la période d'agrégation :

- Chaque point correspond à une période de mesure de:

- a, b) 1 min
- c, d) 6 min
- e, f) 60 min



Effet empirique de la pluie sur le diagramme:

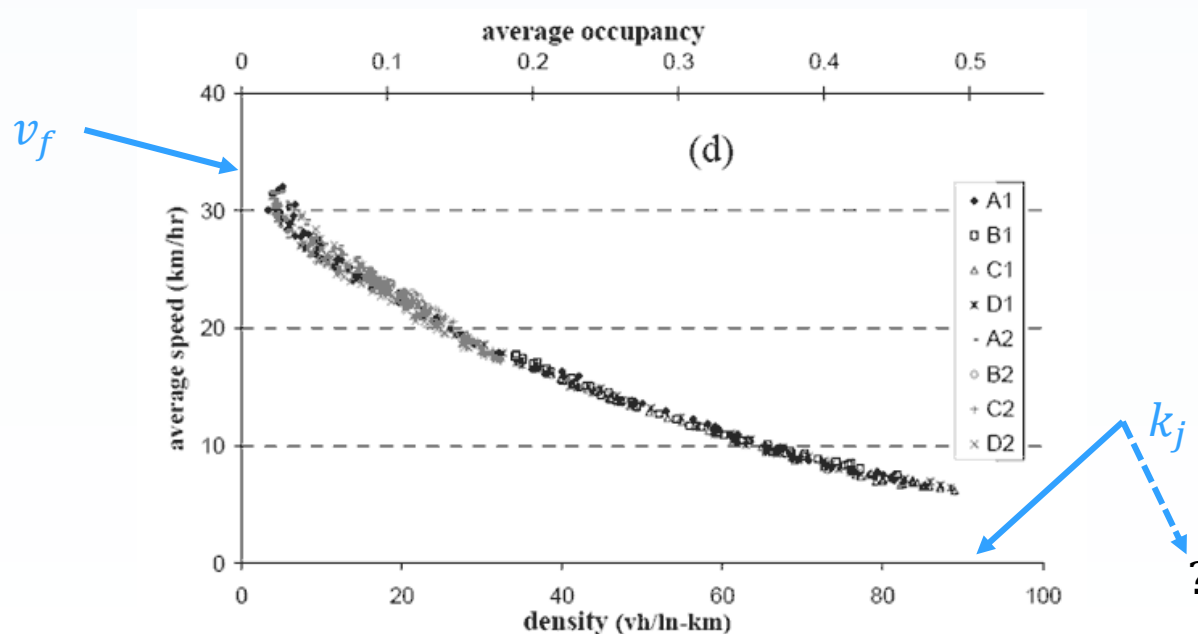


Parameter	Normal	Inclement	F
Free-Speed (km/h)	100	95	0.90
Capacity (veh/h)	1800	1550	0.82
Speed-at-Capacity (km/h)	90	75	0.89
Jam Density (veh/km)	100	90	0.90
Wave Speed (w) (km/h)	-25.0	-24.9	0.97

<http://www.ops.fhwa.dot.gov/publications/weatherempirical/sect3.htm>

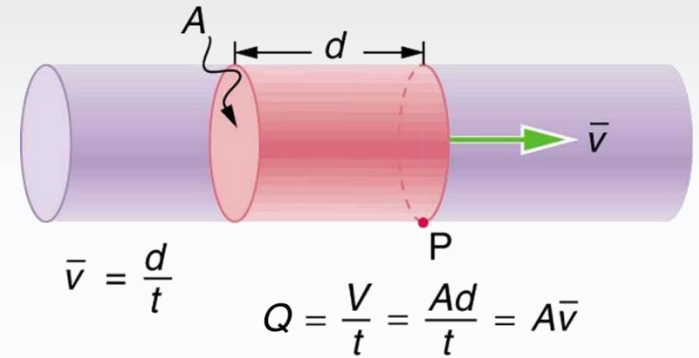
MODÉLISATION DE LA RELATION q, k, v

- On dénote la **vitesse à écoulement libre v_f** (*free-flow speed*, aussi *FFS*), la vitesse moyenne maximale, où $k = 0$
- On dénote la **densité de congestion k_j** (*jam density*), la densité maximale, où $v = 0$



<http://luts.epfl.ch/cms/lang/en/pid/17029>

Mécanique des fluides:

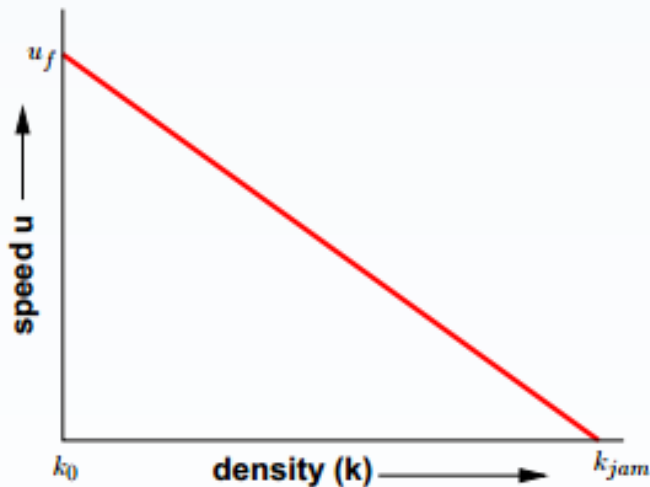


$$q = vk$$

(on note cependant que la ressemblance avec un liquide s'arrête ici; d'ailleurs on aura plutôt tendance à comparer les modèles de circulation avec un gaz car ces deux sont compressibles)

Hypothèse:

- Linéarité entre k et v (modèle de Greenshields)



$$v = v_f \left(1 - \frac{k}{k_j}\right), \quad q = vk$$

$$q = v_f k - \frac{v_f}{k_j} k^2$$

$$q = k_j v - \frac{k_j}{v_f} v^2$$

$$\text{Débit maximum : } \frac{dq}{dk} = 0 = v_f - \frac{2v_f}{k_j} k_o \rightarrow k_o = \frac{1}{2} k_j$$

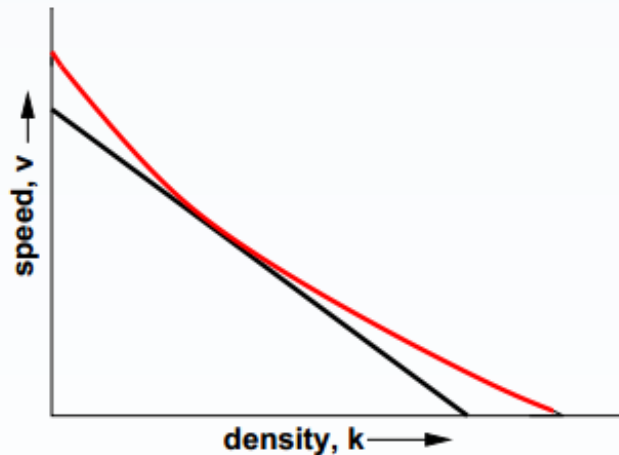
$$q = v_f k_o - \frac{v_f}{k_j} k_o^2 \rightarrow q_{max} = \frac{1}{4} k_j v_f$$

$$(v_o = \frac{1}{2} v_f)$$

http://www.cdeep.iitb.ac.in/nptel/Civil%20Engineering/Transportation%20Engg%201/33-Ltexhtml/nptel_ceTEI_L33.pdf

Hypothèse:

- Relation logarithmique entre k et v (**modèle de Greenberg**)



$$v = v_0 \ln \left(\frac{kj}{k} \right), \quad q = vk$$

$$q = v_0 k \ln \left(\frac{kj}{k} \right)$$

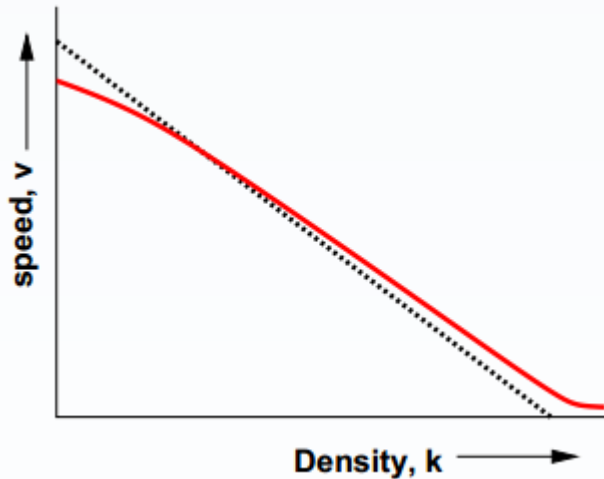
$$\lim_{k \rightarrow 0} v(k) = \infty$$

Pas de v_f !

Débit maximum quand : $\frac{dq}{dk} = 0$

Hypothèse:

- Relation exponentiel entre k et v (**modèle de Underwood**)



$$v = v_f e^{-\frac{k}{k_0}}, \quad q = vk$$

$$q = kv_f e^{-\frac{k}{k_0}}$$

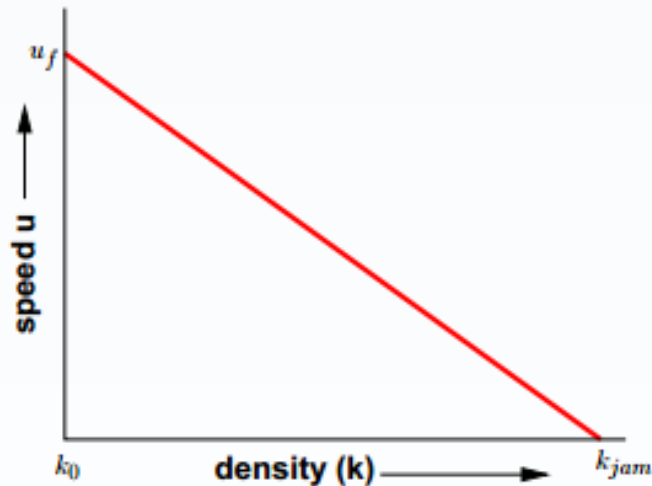
$$\lim_{k \rightarrow \infty} v(k) = 0$$

Pas de k_j !

Débit maximum quand : $\frac{dq}{dk} = 0$

Hypothèse:

- Modèle généralisé (**modèle de Pipe**)



$$v = v_f \left[1 - \left(\frac{k}{k_j} \right)^n \right], q = vk$$

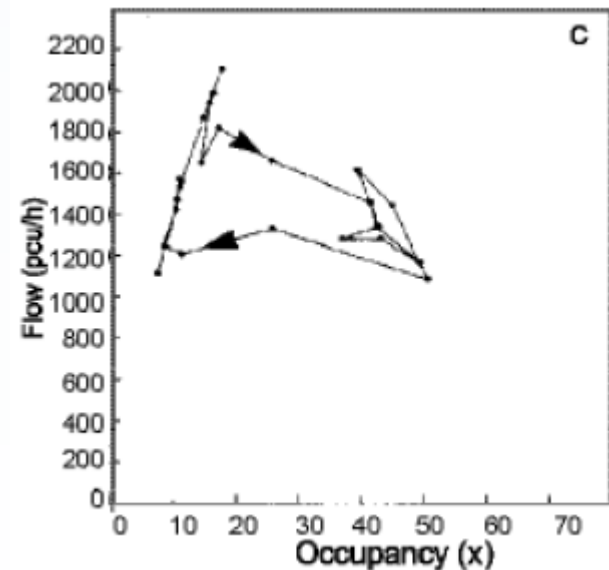
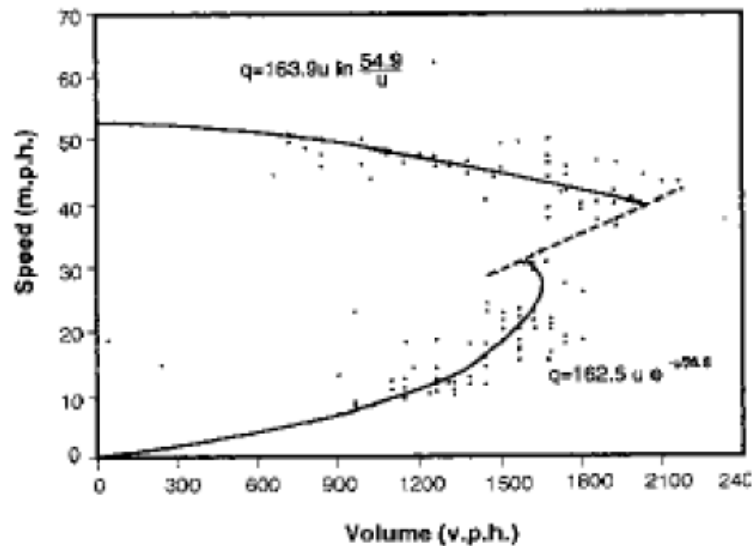
$$q = v_f k \left[1 - \left(\frac{k}{k_j} \right)^n \right]$$

On remarque que quand $n = 1$, le modèle correspond au modèle de Greenshields

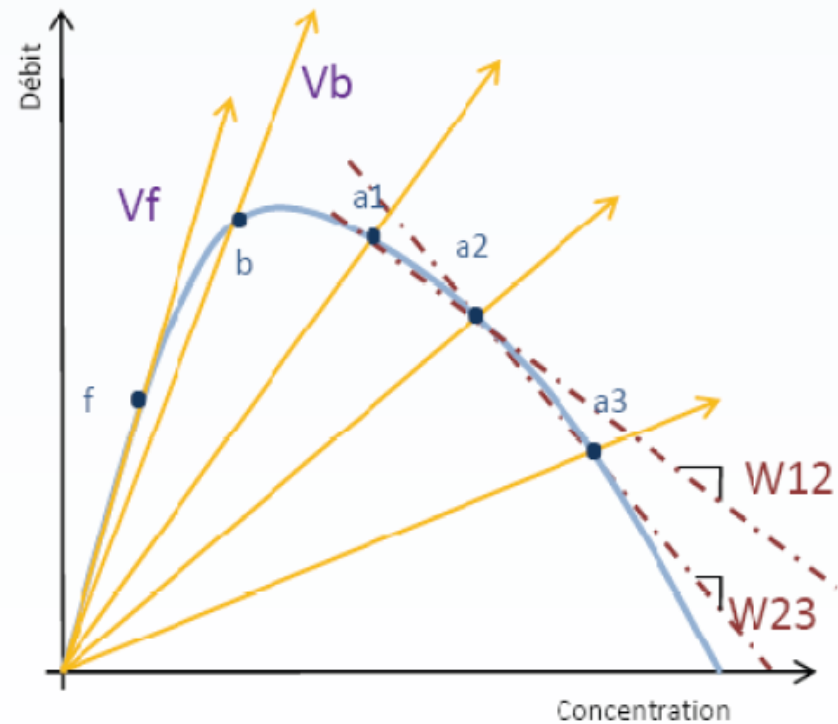
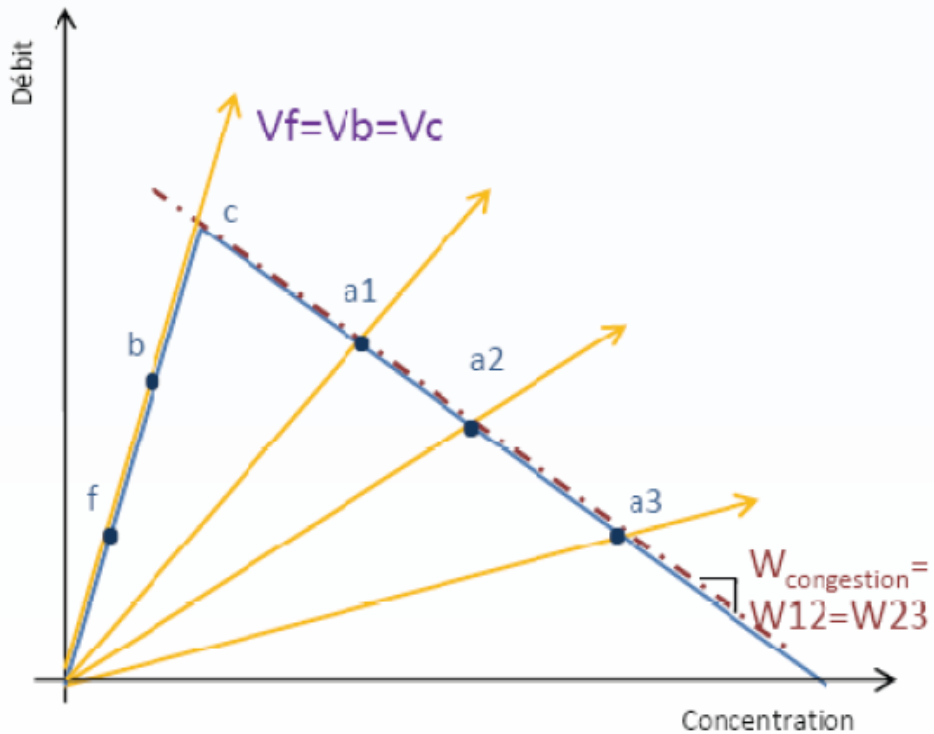
Débit maximum quand : $\frac{dq}{dk} = 0$

Un recueil avancé des modèles se trouve dans le Chapitre 2 du *Revised Monograph on Traffic Flow Theory : Traffic Stream Characteristics* (FHWA)

<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/operations/tft/chap2.pdf>

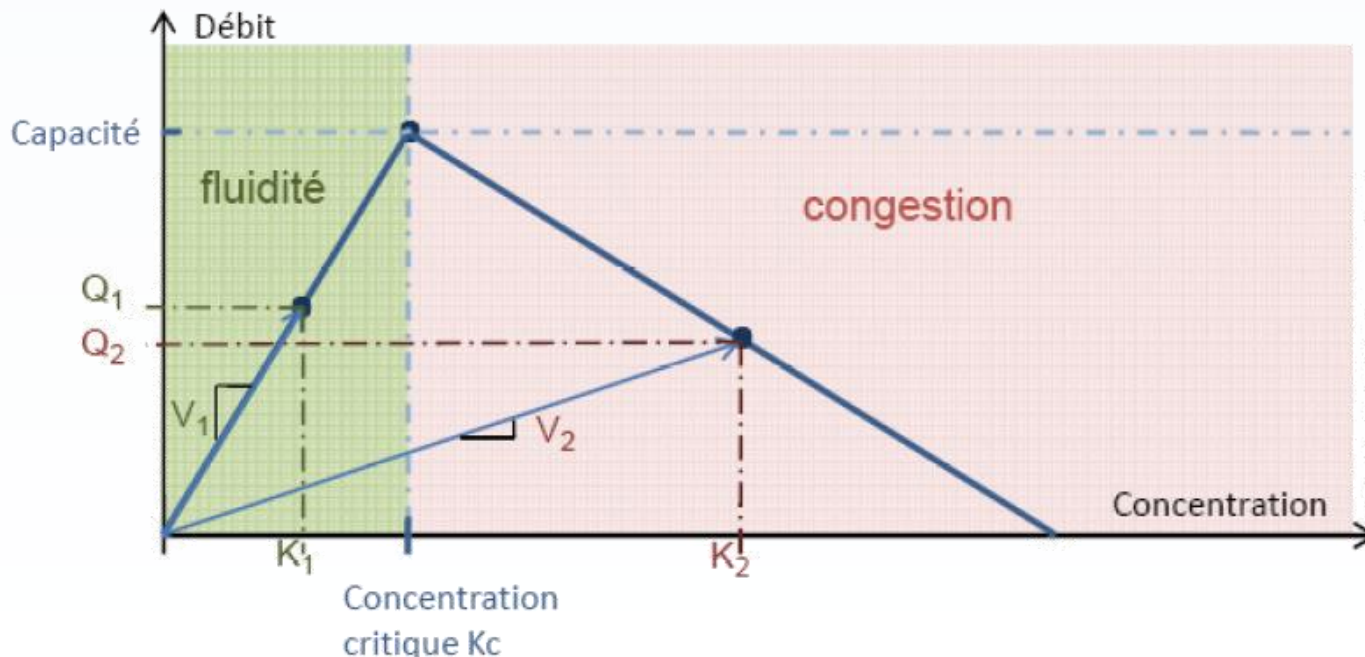


SIMPLIFICATION DU DIAGRAMME



- « Utiliser un diagramme non triangulaire complique considérablement la résolution de la dissipation de la file d'attente sans modifier significativement le principe général et sans intérêt pédagogique particulier. »
- « Le diagramme non triangulaire implique des éventails (zone de décroissance progressive de la concentration sur la partie aval de la congestion) au moment de la dissipation de la file d'attente qui n'ont jamais été observés dans la réalité. »
- « Sur autoroute et route sans feu, les vitesses pratiquées en régime fluide sont sensiblement constantes tant que l'on n'a pas atteint un régime très proche de la capacité de la voie. La pente constante pour tous les régimes fluides ne semble donc pas être une approximation trop grossière. »

- « Des publications récentes ont démontré que dans un régime fortement congestionné (i.e. pour lequel la vitesse moyenne est inférieure à 45 km/h), la vitesse des ondes de sur-congestion est toujours la même et vaut 18 km/h environ, ce qui accrédite l'idée que le diagramme est linéairement décroissant en situation congestionnée. Jointe à la précédente, cette remarque conduit à un diagramme globalement triangulaire. »



OFFRE, DEMANDE, CONGESTION

Tandis que la planification se contente de planifier et gérer la **demande** (surtout globale) de circulation, la régulation se contente de

- gérer et fournir l'**offre**, en particulier au niveau microscopique
- gérer la demande à l'aval des infrastructures, surtout pour les parcours au travers de ceux-ci, p.ex. :
 - les feux synchronisés
 - la **régulation des accès aux autoroutes**, *ramp metering*

Les deux concepts, demande et offre, sont entre-reliés comme tout système économique traditionnel.

SCÉNARIO

Une voie est ajoutée à l'autoroute Décarie (A-15) dans chaque direction de manière à augmenter la capacité.

- Les parcours sur ce tronçon se font maintenant à vitesse à écoulement libre.

Cependant, le reste de la ville est embouteillé comme d'habitude.

Que ce produit-il?

Alors, à court terme, on remarque:

- Une diminution du temps perdu et de la pollution causé par les usagers de l'A-15!

Cependant, les autres conducteurs à Montréal décident eux aussi d'emprunter maintenant l'autoroute Décarie.

- La demande augmente jusqu'à ce que la congestion est de retour sur l'autoroute Décarie.

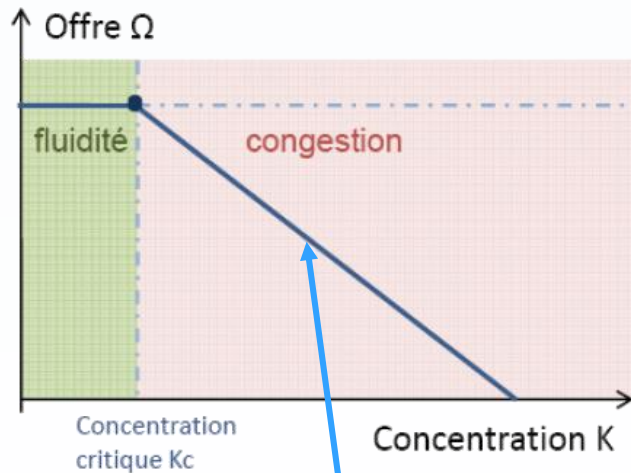
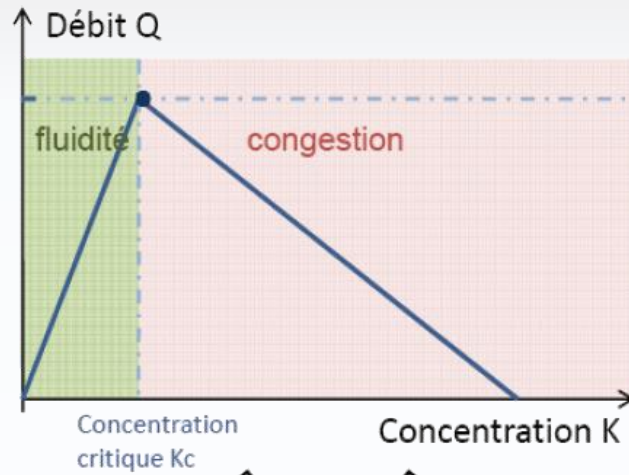
Mais de ce fait, le reste de la ville est gagnante. **Oui ou non?**

Pour ce cours, le terme *capacité* est synonyme avec *offre*, mais peut aussi signifier *offre maximale (conditions idéales)* q_{max} dans certains contextes.

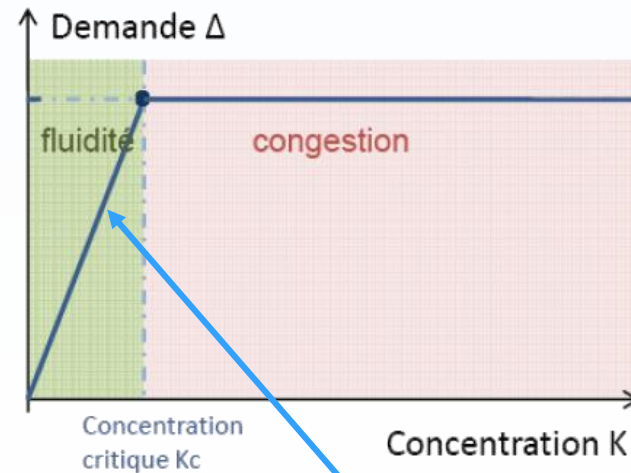
On peut, à partir du diagramme fondamental qui relie le débit à la densité, construire une courbe demande/densité et une courbe offre/densité.

La *demande* et l'*offre* sont des mesures de *débits* q .

- Ces débits (mesurés) sont soit la demande (sous un régime de fluidité) soit l'offre (sous un régime de saturation).



régime de saturation



régime de fluidité

CONSERVATION DU DÉBIT

La loi de conservation du débit s'applique aussi.

$$V = \sum q_{in} - \sum q_{out}$$

où: q_{in} = véhicules entrant le réseau (généralement la demande)
 q_{out} = véhicules sortant le réseau (généralement la capacité)
 V = véhicules existantes dans le réseau et/ou surplus

Puisque la circulation est **compressible**, V est souvent non-nulle (positif) jusqu'à équilibre du réseau.

Dans ce sens, une accumulation de véhicules V représente :

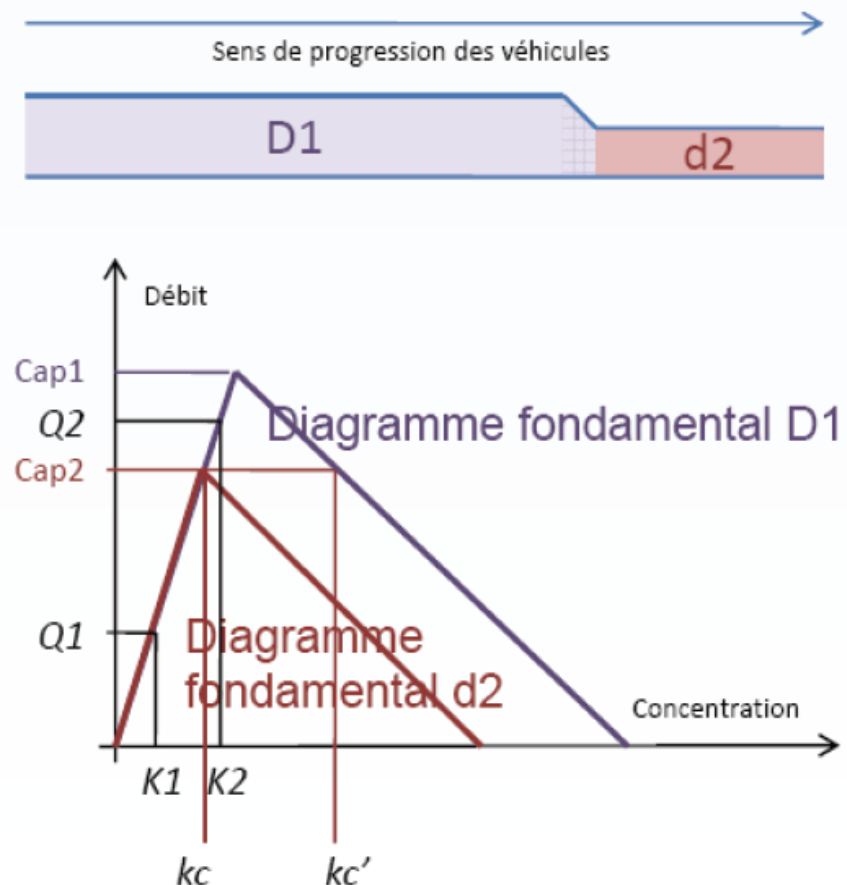
- dans un premier temps, les véhicules existantes dans un réseau sous-saturé
- dans un deuxième temps, un surplus de véhicules dans un réseau sursaturé, causant des accumulations et des files d'attente jusqu'au bords du réseau



Supposons une route de capacité $Cap1$, dont une section possède une sous-section à capacité inférieure $Cap2$, selon les deux diagrammes fondamentaux D1 et D2

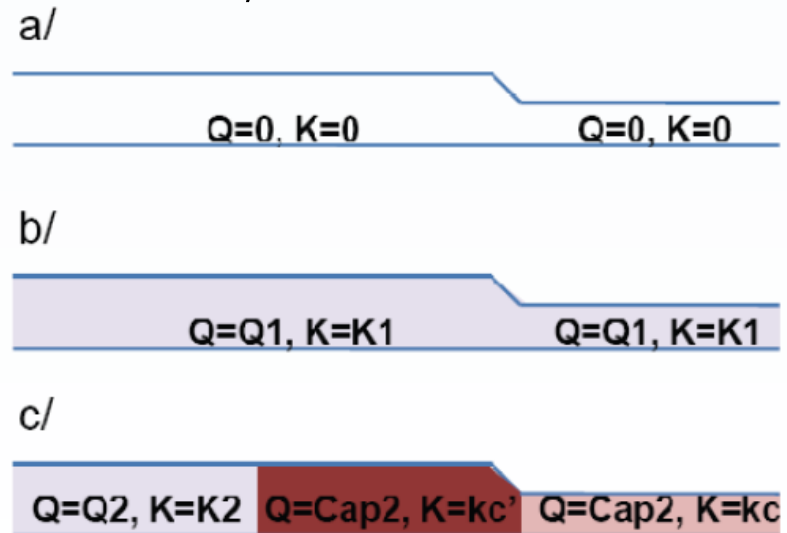
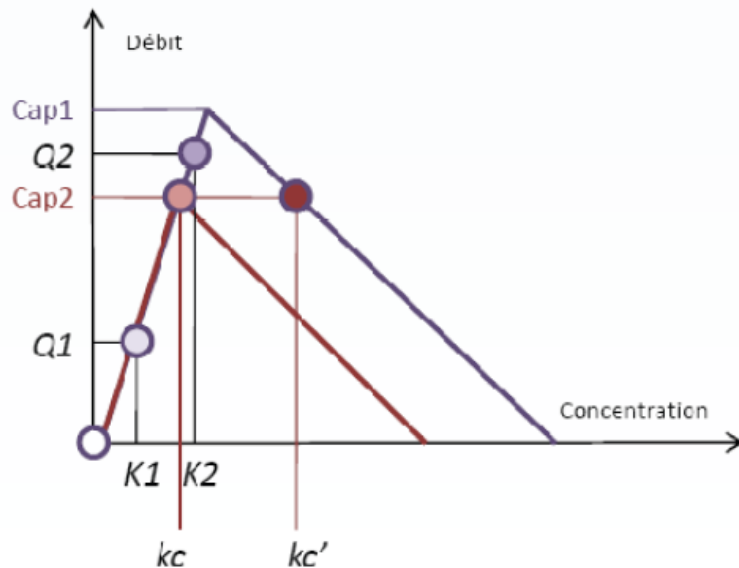
- (on suppose que la vitesse maximale est identique sur les deux sections).

La capacité de D1 diminuera à celle de D2, jusqu'à ce que la demande à D2 sera satisfaite (**goulot d'étranglement**)

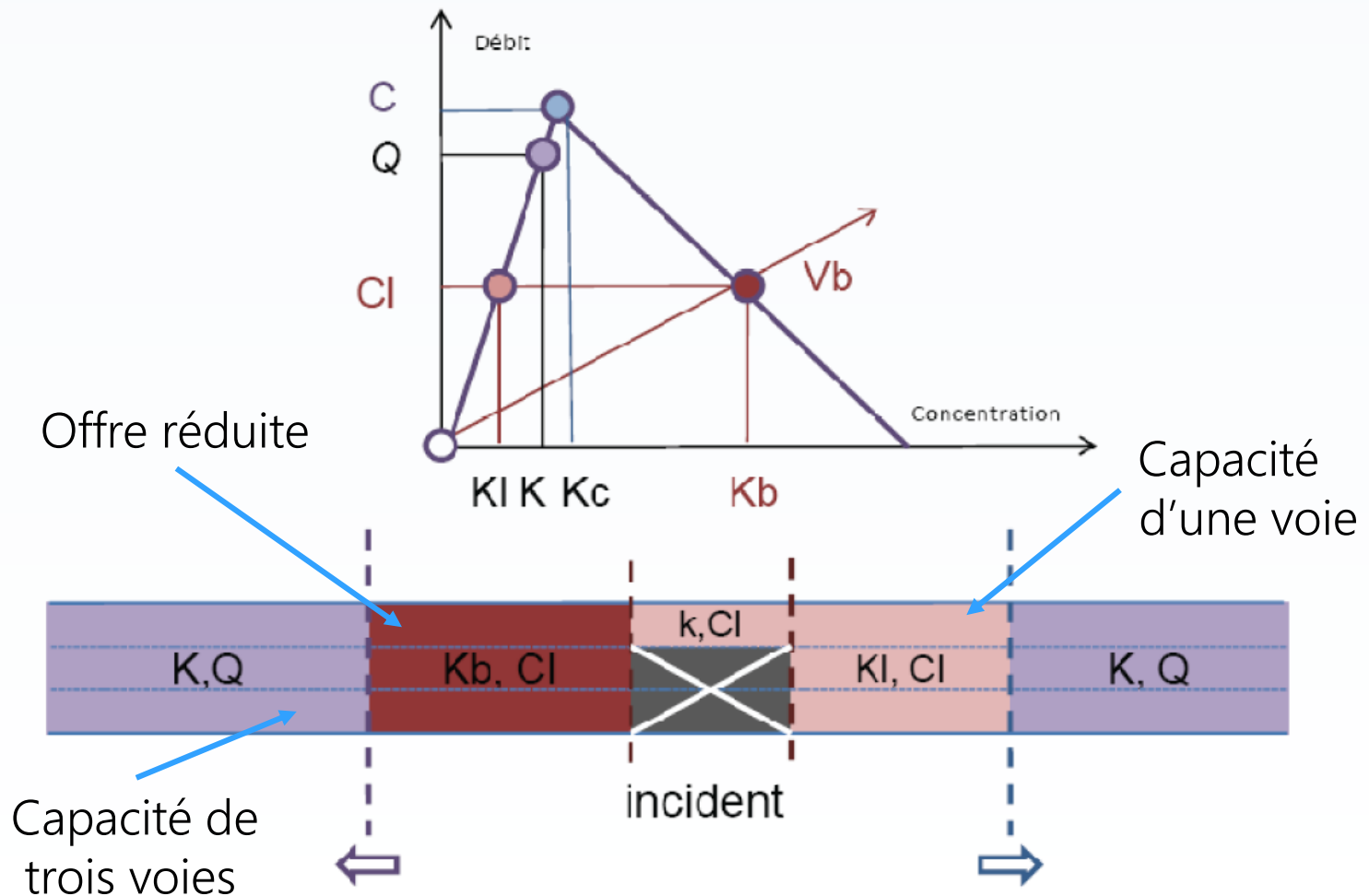


Les états de densité et de débit des deux zones de la route avec rétrécissement correspondants aux trois situations décrites ci-dessus :

- a) régime où la demande est nulle partout ;
- b) demande $Q1 \leq Cap2$ (la capacité du rétrécissement) : pas de congestion ;
- c) régime où la demande $Q2 > Cap2$: congestion et goulot d'étranglement. Dans ce cas, $kc' > K2$.

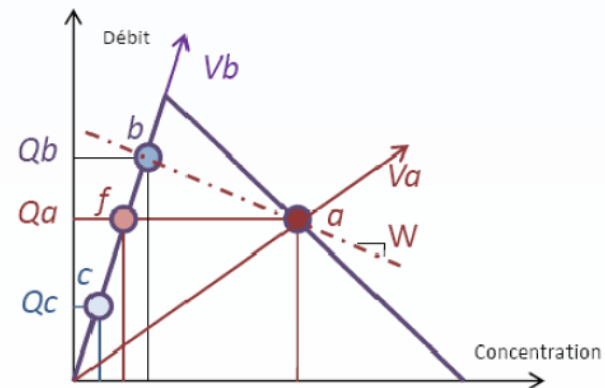
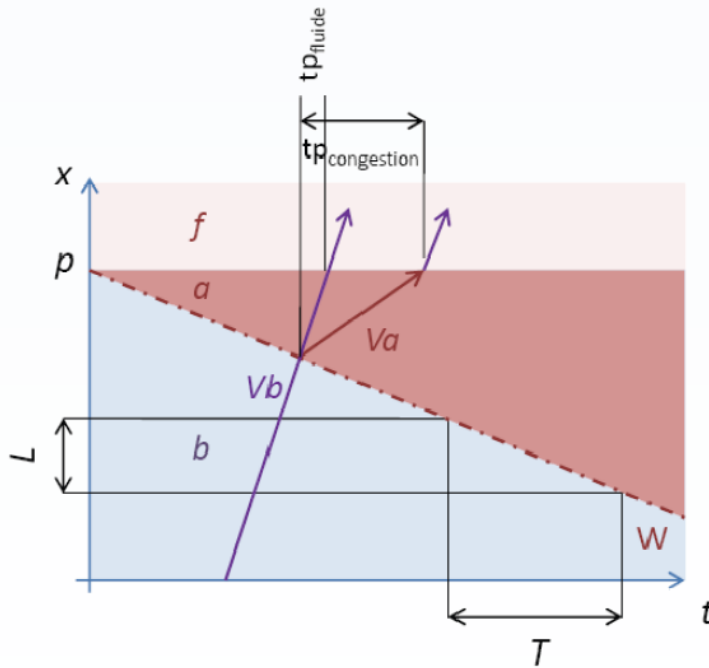


ONDES DE CHOC

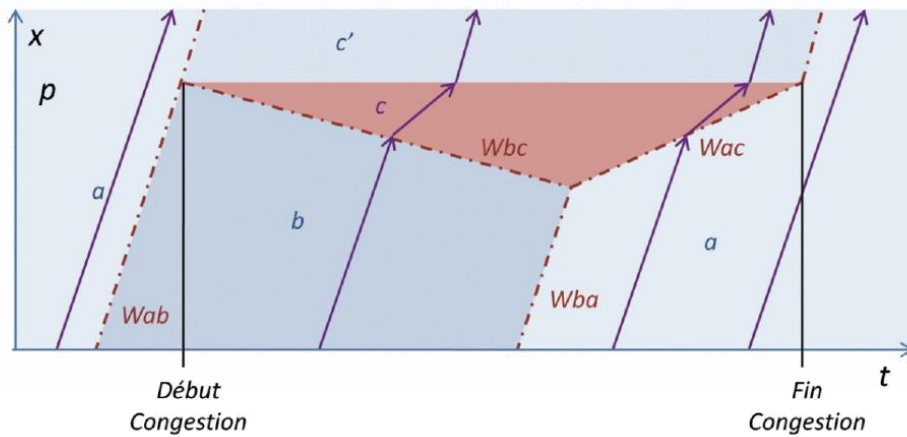
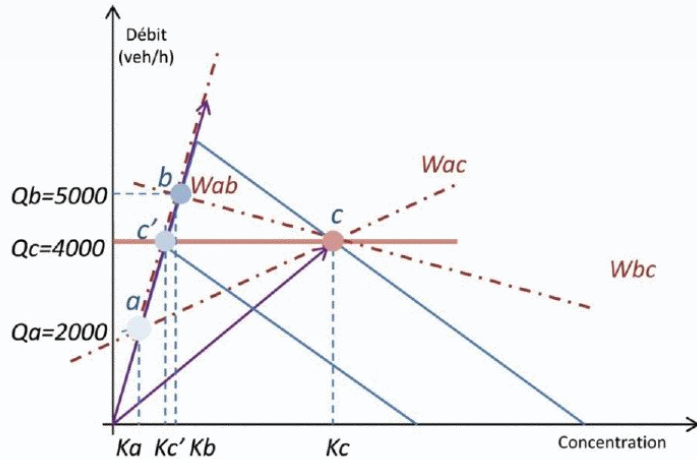


Vitesse de propagation de la file d'attente ω_{ab} délimitant la transition entre les états de circulation a et b :

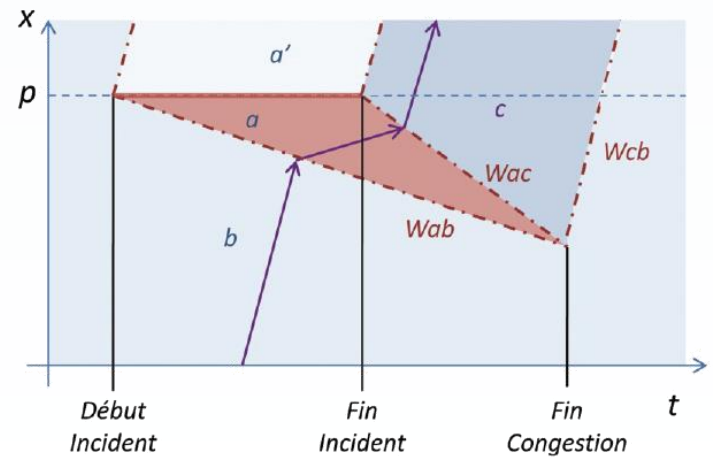
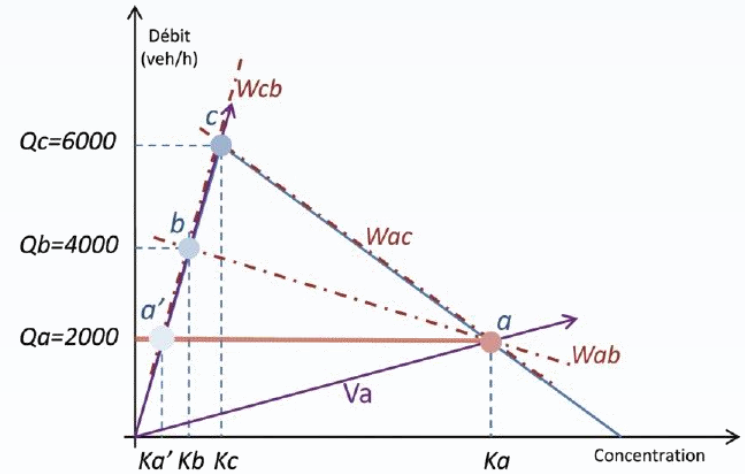
$$\omega_{ab} = \frac{-L}{T} = \frac{Q_a - Q_b}{K_a - K_b}$$



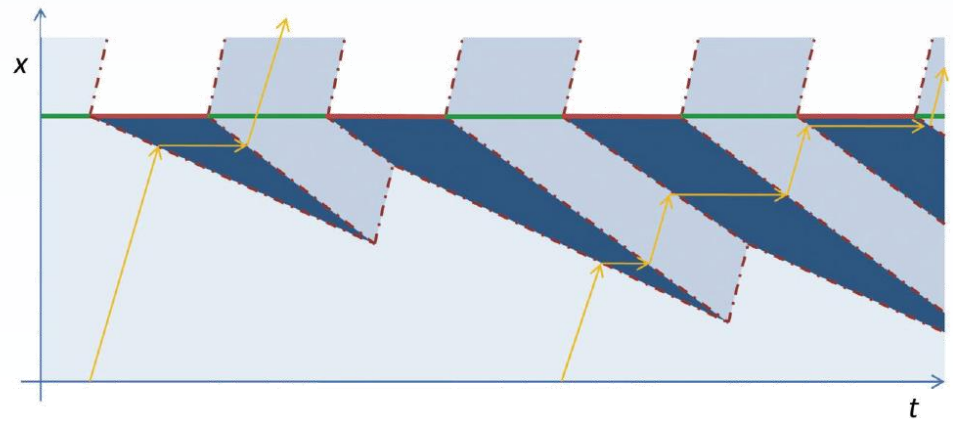
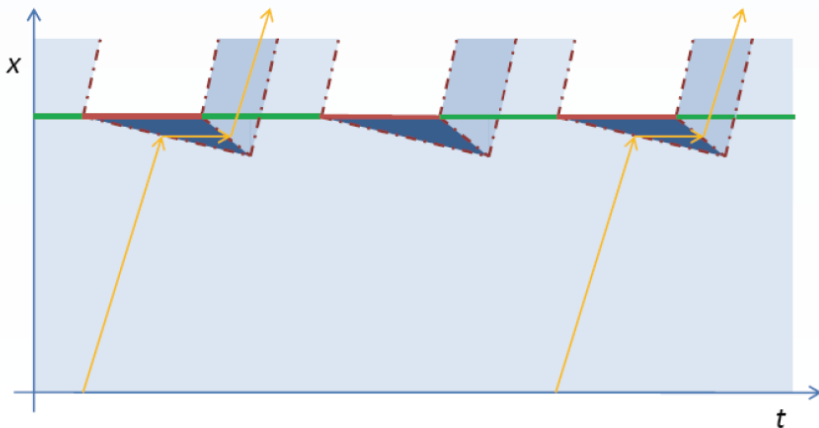
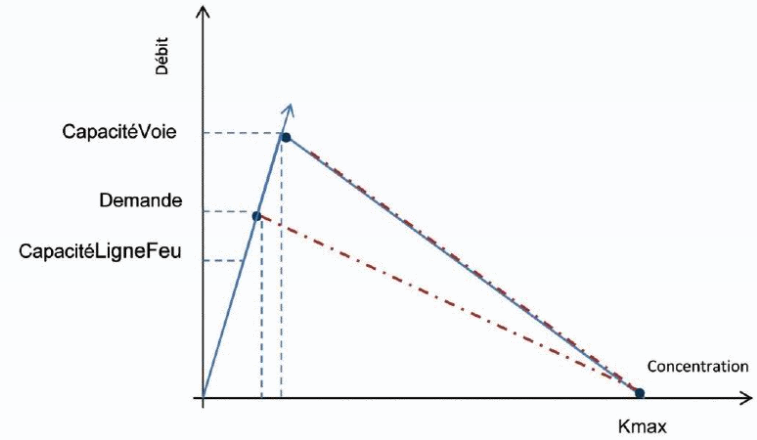
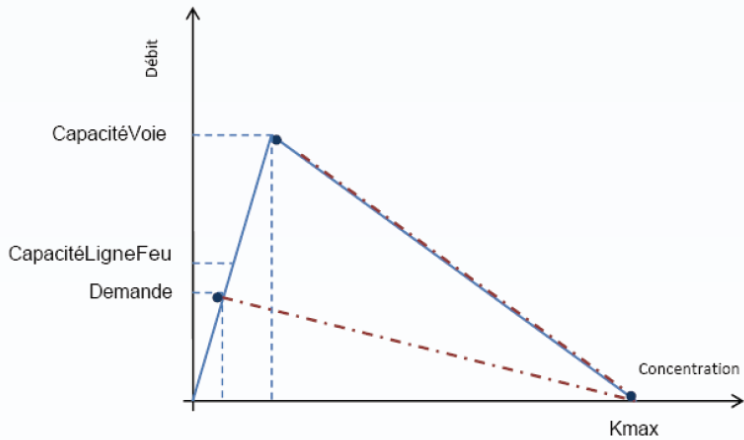
Réduction de la demande (*b*)

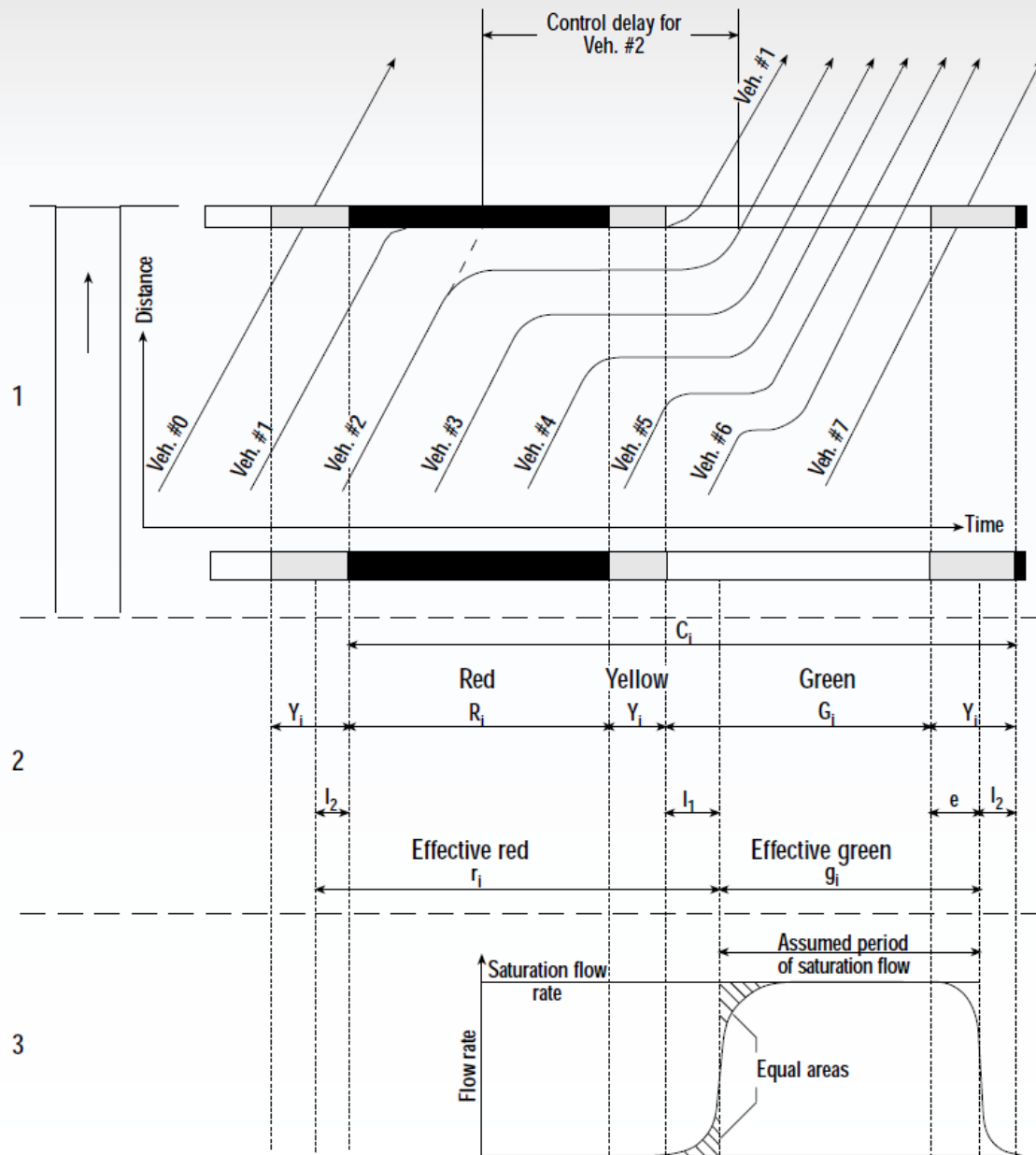


Augmentation de l'offre (*c*)



$$q_{feu} = \frac{\text{durée vert}}{\text{cycle}} \times q_{\text{saturation de la voie}}$$





NIVEAU DE SERVICE (NS)

Généralement définie par le HCM (*Level of Service, LOS*).

Mesure arbitraire de A à F de la fluidité d'une installation routière.

« Équivalents » régionaux :

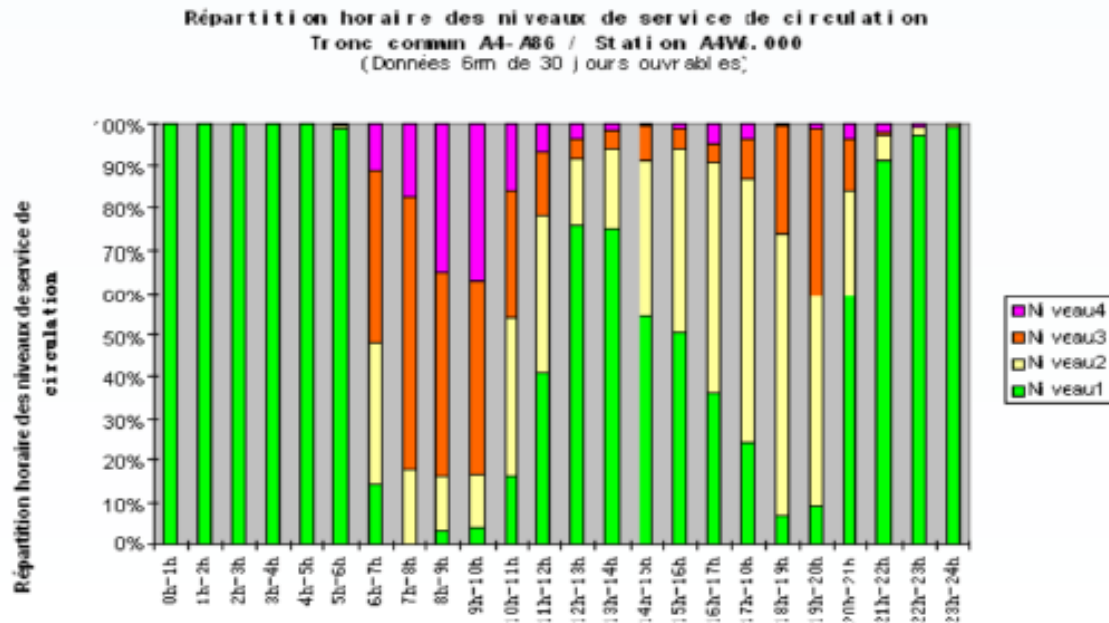
- Canadian Capacity Guide évalue le ratio demande/capacité sur une échelle de A à F (LOS)
- France utilise le Niveau de Service (NS) 1-4

Autoroutes :

- Niveau de service principalement défini selon la densité des voies

Carrefours :

- Niveau de service principalement défini selon le temps d'attente moyen



C'est tout pour aujourd'hui!