

CIV6706A

Régulation de la circulation – Autoroutes partie 1



**POLYTECHNIQUE
MONTREAL**

LE GÉNIE
EN PREMIÈRE CLASSE

École Polytechnique de Montréal

Département des génies civil, géologique et des mines

Automne 2017

AUTOROUTES

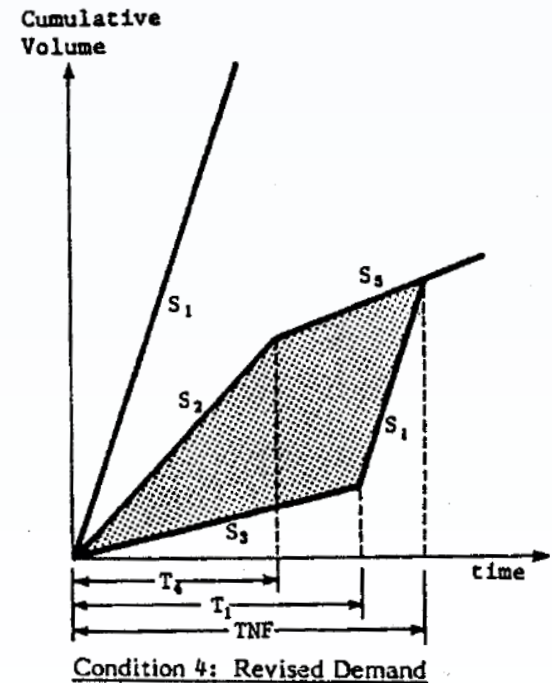
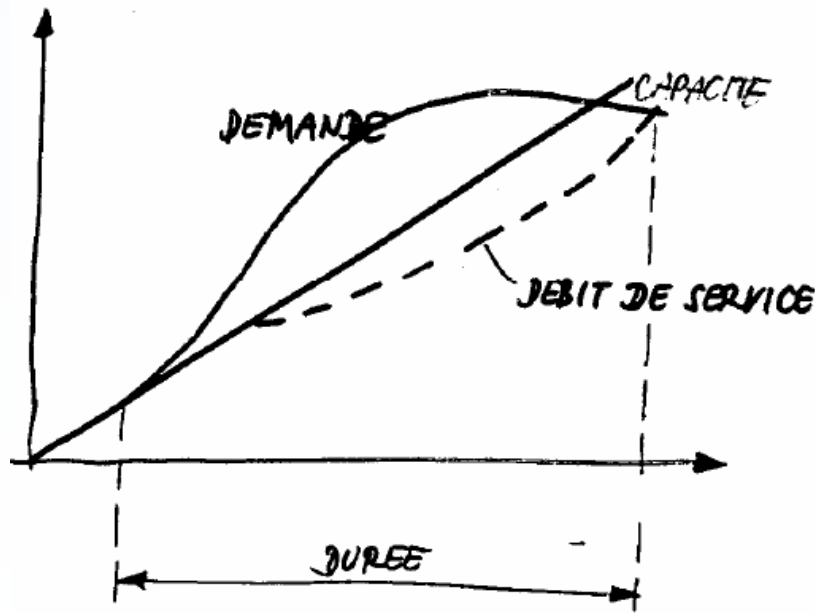
Les **autoroutes** (*freeway*) sont des installations de voies rapides caractérisées par :

- Circulation ininterrompu (chaussés séparées)
- Sans feux
- Haute capacité
- Haute vitesse
- **Accès limité**
 - Bretelles d'entrée et de sortie



OBJECTIF

En premier temps, notre objectif est de maximiser le débit de service (veh/hr), et en deuxième temps, de minimiser le délais (veh-hr) total.



$$D = \frac{T_1^2 (s_1 - s_3)(s_5 - s_3) - T_4^2 (s_1 - s_2)(s_2 - s_3) + 2T_1 T_4 (s_1 - s_3)(s_2 - s_3)}{2(s_1 - s_3)}$$

CAPACITÉ MAXIMALE

Se situe généralement aux alentours de 2000~2400 pc/hr/ln, mais peut être diminué selon certains facteurs géométriques (voir HCM Ch.10-15) :

- Frottement dû aux changements de voies
 - Bretelles (entrées, sorties)
 - Courbes (déviation de la trajectoire)
 - Jonctions de la route (perte de voie, conflit pour manœuvres de convergence)
 - Nombre de voies adjacentes
- Déclivités (p.ex. rampes dans les tunnel)
- Rétrécissement de la chaussée et dégagement latérale

DÉBIT DE SERVICE

Le **débit de service** est généralement le résultat d'effets dynamiques ou est lié à la régulation de la circulation :

- Rapport entre la demande et la capacité, ou saturation x
 - La sursaturation peut diminuer le débit de service en dessous de la capacité, même si la demande est supérieure.
- Débordement de files d'attente sur les bretelles
- Conditions météorologiques
- Turbulence dû à
 - Grand écart dans la vitesse de conduite
 - Composition du trafic (p.ex. pourcentage de camions)
- Incidents, entretien

VITESSE À ÉCOULEMENT LIBRE

La **vitesse à écoulement libre** v_f (*Free-flow speed, FFS*) est la vitesse de conduite moyenne d'un courant de circulation à **état stationnaire** sans congestion.

$$v_f = v_{fb} - f_{LW} - f_{LC} - 4.8(TRD)^{0.84}$$

où v_{fb} = vitesse à écoulement libre de base, supposé 110 km/h pour les autoroute urbain et 120 km/h pour les autoroutes rurales.

Le facteur d'ajustement pour la largeur de la voie f_{LW} :

- Ajustement pour le fait que les véhicules circulant dans des voies plus étroites se sentent en moins sécurité et sont sujet à plus de risques de conflit.

Tab. 11-8, HCM 2010

Largeur des voies moyenne (m)	Facteur d'ajustement f_{LW} (km/h)
≥ 3.6	0.0
3.3-3.6	3.0
3.0-3.3	10.5

Le facteur d'ajustement pour le dégagement de l'accotement droit f_{LC} :

- Ajustement pour la présence d'obstructions ou de barrières sur l'accotement droit.

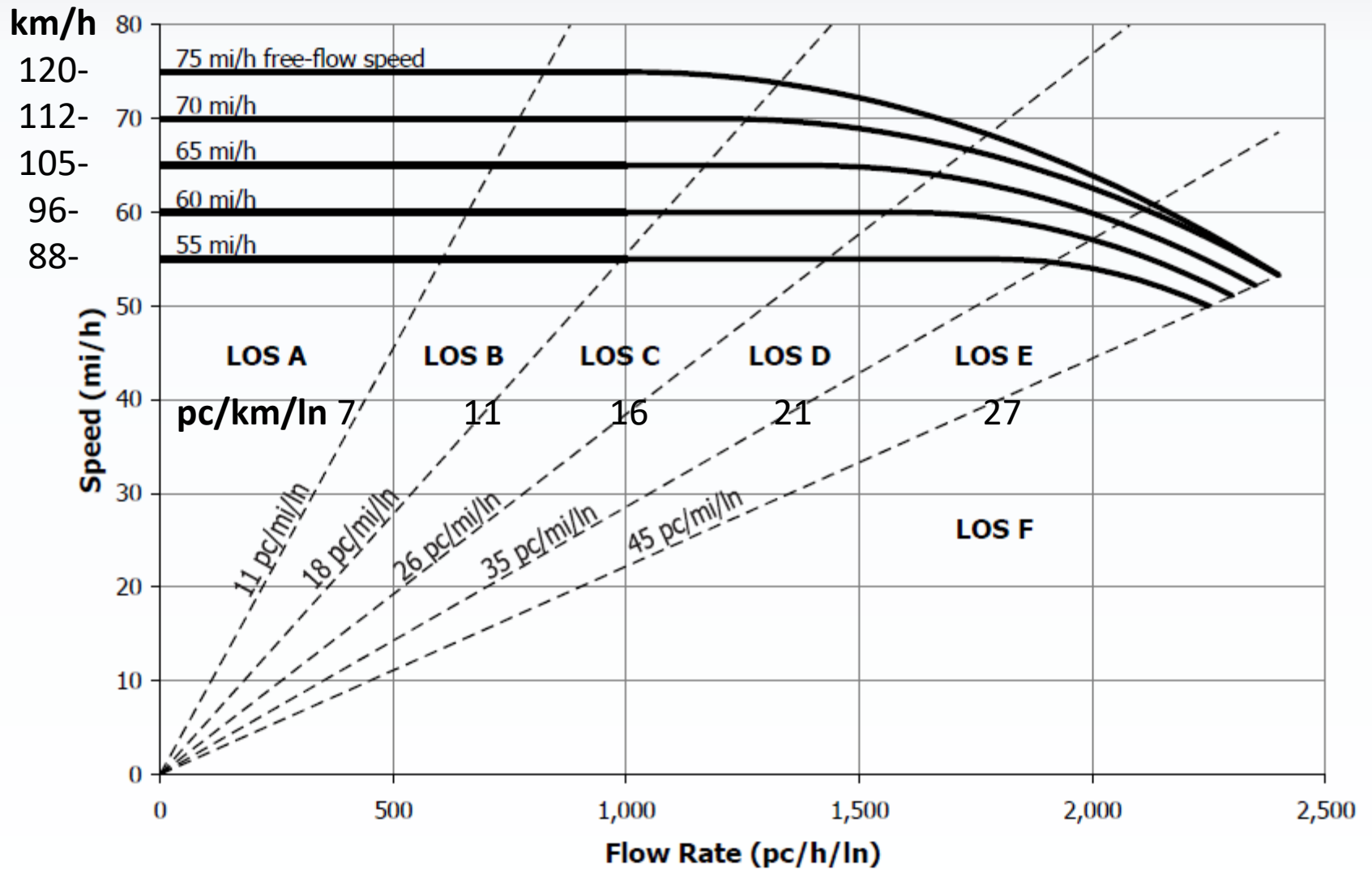
Tab. 11-9, HCM 2010

Largeur de l'accotement droit (m)	Facteur d'ajustement f_{LC} (km/h)			
	2 voies	3 voies	4 voies	≥5 voies
≥1.83	0.00	0.00	0.00	0.00
1.52	0.97	0.64	0.32	0.16
1.22	1.93	1.29	0.64	0.32
0.91	2.90	1.93	0.97	0.48
0.61	3.86	2.57	1.29	0.64
0.30	4.83	3.22	1.61	0.80
0.00	5.79	3.86	1.93	0.97

La densité des bretelles d'accès TRD (*total ramp density*):

- Le nombre de bretelles d'entrée et de sortie sur une distance de 4.8 km en amont et en aval du point de calcul divisé par 9.6 km.
- Les bretelles de sortie peuvent subir des débordement sur l'autoroute.
- En plus, les bretelles de sortie subissent des manœuvres de rabattement de dernière minute ce qui entraîne de la friction.
- Les bretelles d'entrée peuvent aussi entraîner de la friction quand les véhicules entrant n'ont pas atteint la vitesse à l'état stationnaire leur de leurs manœuvre d'insertion.

Fig 11-6, HCM 2010



LIMITATIONS

L'efficacité du débit de service est limitée par la congestion :

- **Congestion récurrente** (et donc prévisible) dû à une demande excessive, ~43%
- **Congestion non-récurrente** ou de nature temporaire (incident, entretien, etc.), ~57%

On remarque notamment que la capacité maximale théorique de l'autoroute à 100km/hr est typiquement de 2000~2400 pc/hr/ln; une route artérielle à 50km/hr peut servir 1900 pc/hr/ln sans feux.

FACTEURS LIÉS À LA CONGESTION

Facteurs non-programmables:

- Incidents
- Météorologie
 - Conditions de visibilité
 - Condition de route
- Éblouissement soleil
- Effets aléatoires microscopiques
 - Manœuvres d'entrecroisement
 - « stop-and-go »



Facteurs programmables:

- Géométrie
- Construction
- Heures de pointe



NIVEAU DE SERVICE

Classement classique de l'état de la congestion.

Tab. 11-5, HCM 2010

LOS	Densité (pc/km/ln)
A	<7
B	7-11
C	11-16
D	16-22
E	22-28
F	>28



LOS A



LOS B



LOS C



LOS D



LOS E



LOS F

DEMANDE EXCESSIVE

On observe une sursaturation de la circulation sur toute la chaussée.

- Évènements programmables
- Ondes de choc
- Aspects microscopiques aléatoires
- Processus stable

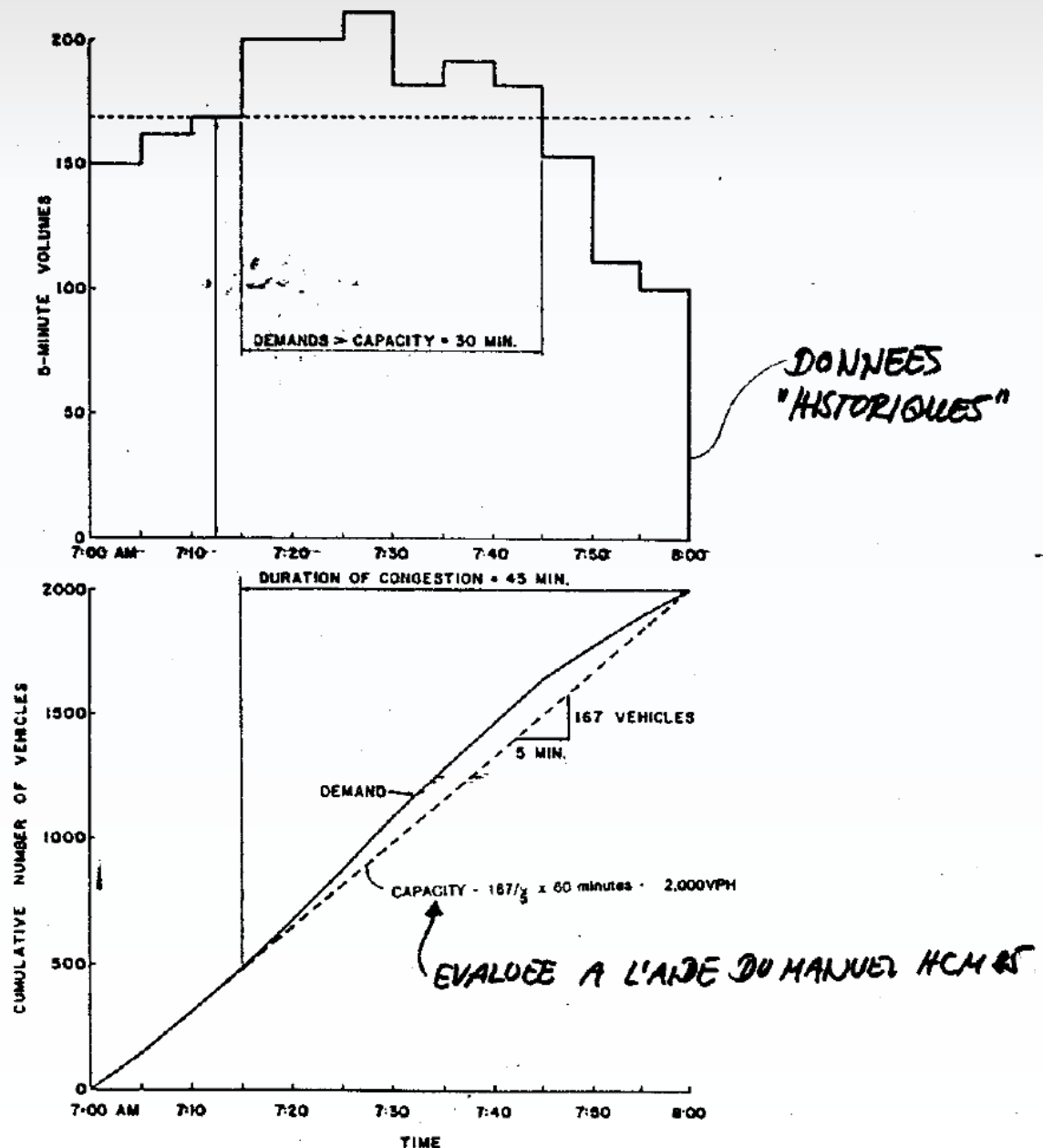
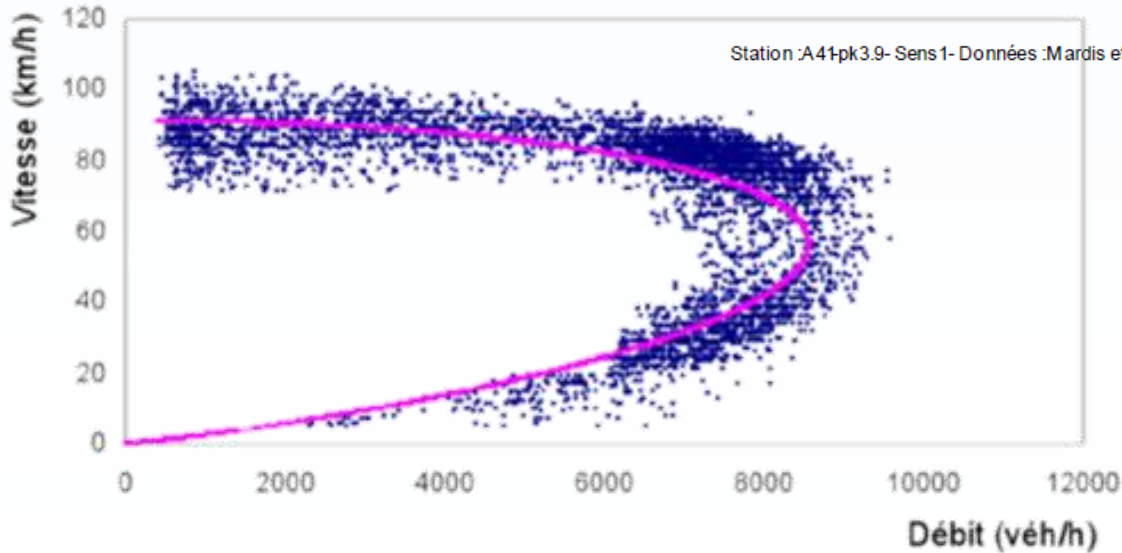
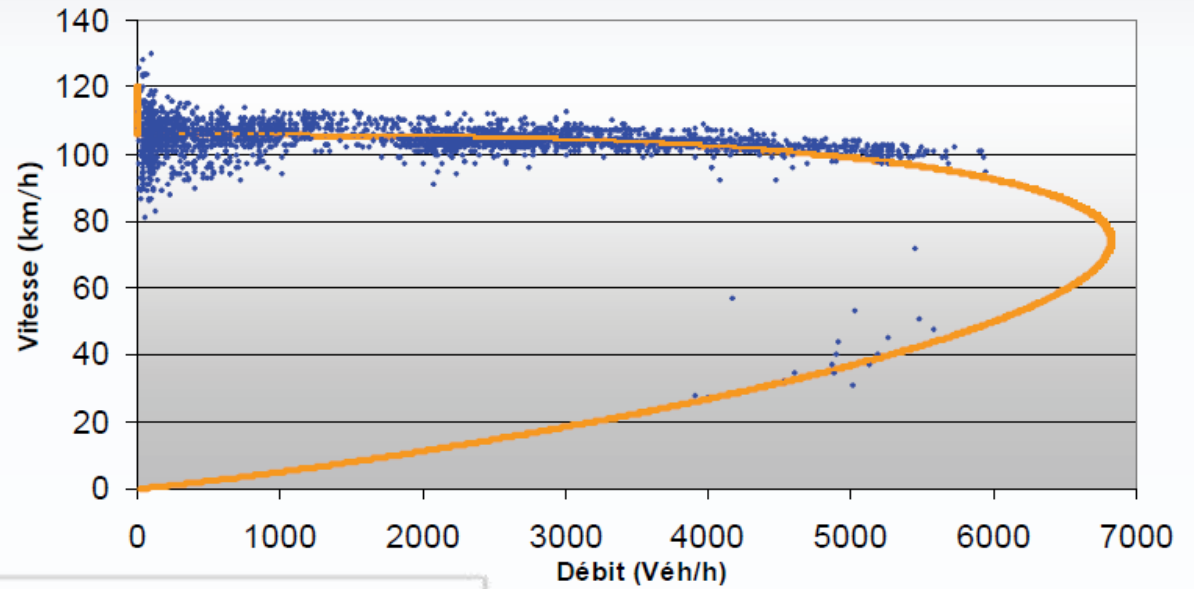
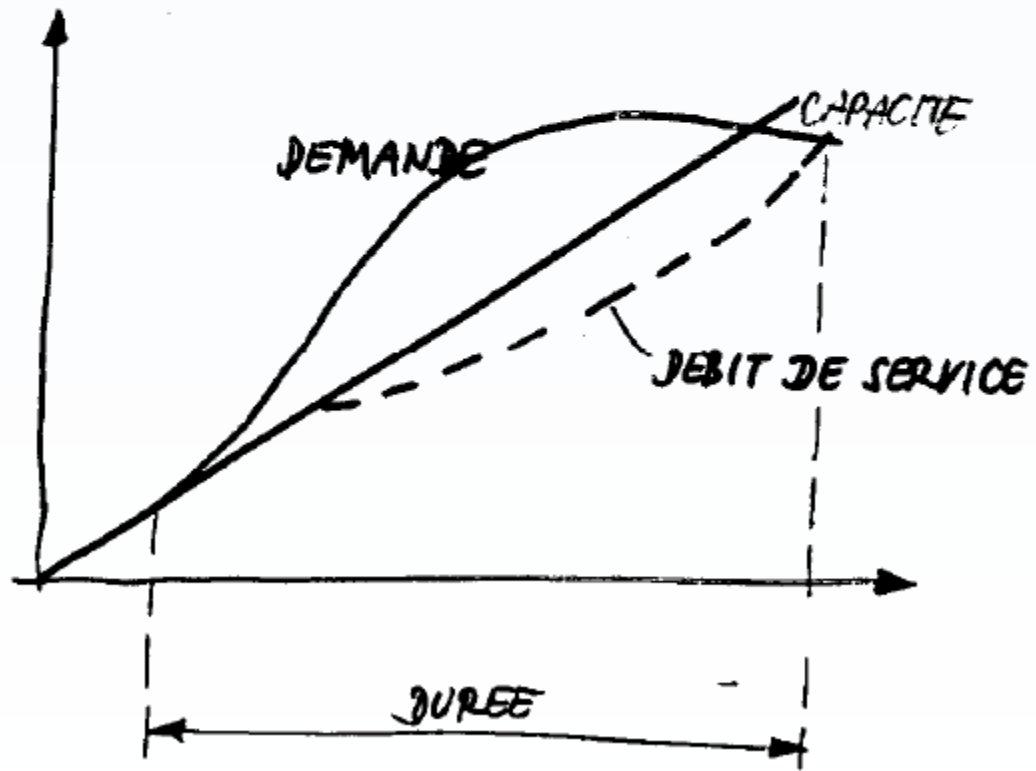
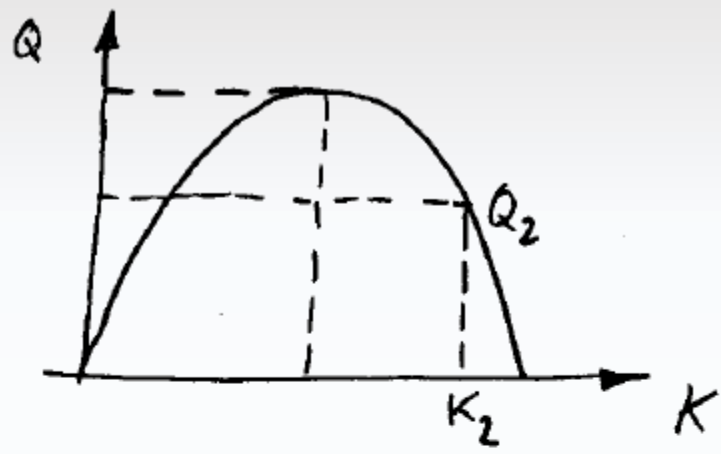


Diagramme $V=f(Q)$



Station :A41pk3.9- Sens 1- Données :Mardis et jeudis du 20/05/09 au 25/06/09 (hors vacances scolaires zone A)



DÉBIT DE CONCEPTION

Le débit de conception (**demande ajustée Q_p**) normalise les éléments de la demande de circulation.

$$Q_p = \frac{Q_D}{PHF \times N \times f_{HV} \times f_p}$$

où N = nombre de voies

f_{HV} = facteur d'ajustement pour véhicules lourds

f_p = facteur d'ajustement pour conducteurs peu familier

Le **facteur d'ajustement pour véhicules lourds** f_{HV} se calcul similairement qu'avec les carrefours :

$$f_{hv} = \frac{100}{100 + P_T(E_T - 1) + P_R(E_R - 1)}$$

- où
- P_T = proportion de camions et autobus (%)
 - P_R = proportion de véhicules récréatifs (%)
 - E_T = Équivalence uvp de camions et autobus
 - E_R = Équivalence uvp de véhicules récréatifs

Tab. 11-10, HCM 2010

Type de véhicule	Equivalence par type de terrain (pc)		
	Terrain plat	Collines vallonnées	Montagnes
Camions et autobus	1.5	2.5	4.5
Véhicules récréatifs	1.2	2.0	4.0

Tab. 11-11, HCM 2010

Upgrade (%)	Length (mi)	Proportion of Trucks and Buses								
		2%	4%	5%	6%	8%	10%	15%	20%	≥25%
≤2	All	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
>2-3	0.00-0.25	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	>0.25-0.50	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	>0.50-0.75	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	>0.75-1.00	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	>1.00-1.50	2.5	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
>3-4	0.00-0.25	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	>0.25-0.50	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5
	>0.50-0.75	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	>0.75-1.00	3.0	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0
	>1.00-1.50	3.5	3.5	3.0	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.5
>4-5	0.00-0.25	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	>0.25-0.50	3.0	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	>0.50-0.75	3.5	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
	>0.75-1.00	4.0	3.5	3.5	3.5	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	>1.00	5.0	4.0	4.0	4.0	3.5	3.5	3.0	3.0	3.0
>5-6	0.00-0.25	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	>0.25-0.30	4.0	3.0	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	>0.30-0.50	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
	>0.50-0.75	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	>0.75-1.00	5.5	5.0	4.5	4.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
>6	0.00-0.25	4.0	3.0	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	1.0
	>0.25-0.30	4.5	4.0	3.5	3.5	3.5	3.0	2.5	2.5	2.5
	>0.30-0.50	5.0	4.5	4.0	4.0	3.5	3.0	2.5	2.5	2.5
	>0.50-0.75	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0	3.0	3.0
	>0.75-1.00	6.0	5.5	5.0	5.0	4.5	4.0	3.5	3.5	3.5
	>1.00	7.0	6.0	5.5	5.5	5.0	4.5	4.0	4.0	4.0

Note: Interpolation for percentage of trucks and buses is recommended to the nearest 0.1.

Tab. 11-12, HCM 2010

Upgrade (%)	Length (mi)	Proportion of RVs								
		2%	4%	5%	6%	8%	10%	15%	20%	≥25%
≤2	All	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
>2-3	0.00-0.50	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
	>0.50	3.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.2	1.2	1.2
>3-4	0.00-0.25	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
	>0.25-0.50	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5
	>0.50	3.0	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5
>4-5	0.00-0.25	2.5	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	>0.25-0.50	4.0	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0
	>0.50	4.5	3.5	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.0	2.0
>5	0.00-0.25	4.0	3.0	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	1.5
	>0.25-0.50	6.0	4.0	4.0	3.5	3.0	3.0	2.5	2.5	2.0
	>0.50	6.0	4.5	4.0	4.0	3.5	3.0	3.0	2.5	2.0

Note: Interpolation for percentage of RVs is recommended to the nearest 0.1.

Tab. 11-13, HCM 2010

Downgrade (%)	Length of Grade (mi)	Proportion of Trucks and Buses			
		5%	10%	15%	≥20%
<4	All	1.5	1.5	1.5	1.5
4-5	≤4	1.5	1.5	1.5	1.5
	>4	2.0	2.0	2.0	1.5
>5-6	≤4	1.5	1.5	1.5	1.5
	>4	5.5	4.0	4.0	3.0
>6	≤4	1.5	1.5	1.5	1.5
	>4	7.5	6.0	5.5	4.5

$E_R = 1.2$ pour pentes négatives

Le facteur d'ajustement pour conducteurs peu familier

f_p :

- Prend en compte les pertes d'efficacité de la capacité entraînées par des conducteurs peu familier avec la route ou la conduite d'un automobile en général
- Varie entre 0.85 et 1.00
- 1.00 pour conditions par défaut, ou s'il y a absence de données
- Tend à être significatif principalement sur les routes récréatifs.

EXEMPLE

Concevoir une section d'autoroute (une seule direction) pour les données suivantes:

- Demande de 4000 veh/h
- Montagnes
- 15% camions, 3% véhicules récréatifs
- Voies de largeur 3.65 m
- Accotement de largeur ≥ 1.7 m
- 85% de déplacements pendulaires
- PHF = 0.85
- ~2 bretelles/km
- Niveau de service de conception LOS D (heure de pointe)

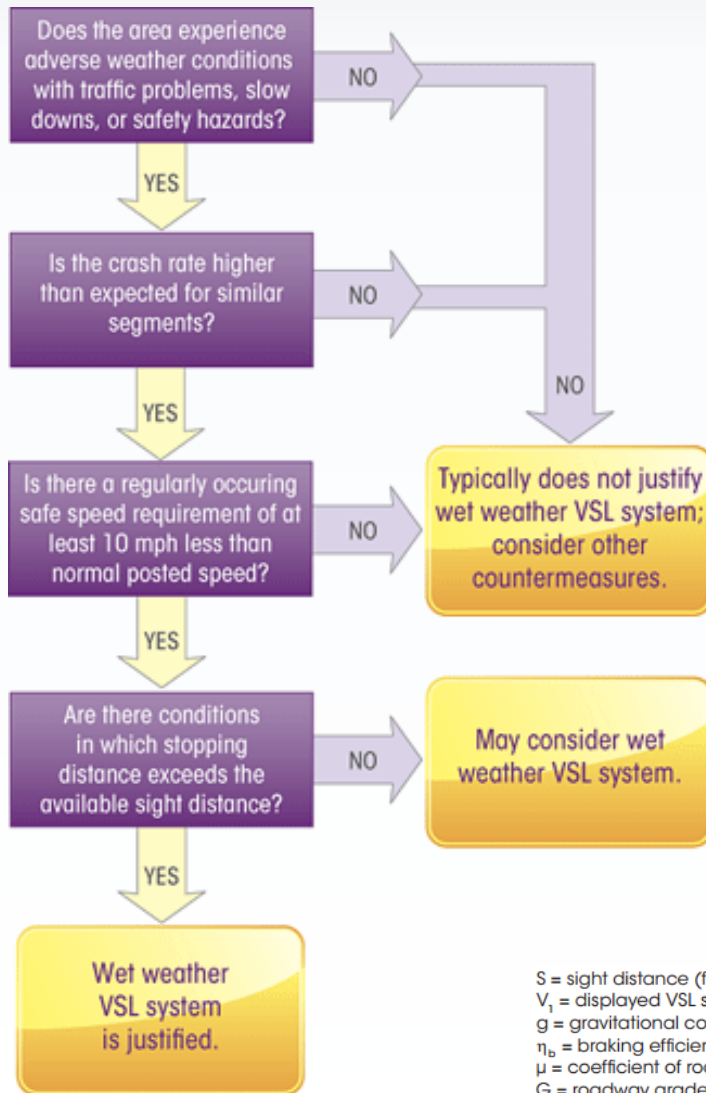
LIMITES DE VITESSE VARIABLE

Effet « stop-and-go » pour des conditions congestionnées. Limite des effets microscopiques.

- Friction entre véhicules: espacements trop grands et trop petits
 - Perte d'efficacité de la capacité
 - Pas de solution analytique/ macroscopique
- Sécurité
- Consommation essence



Justification :

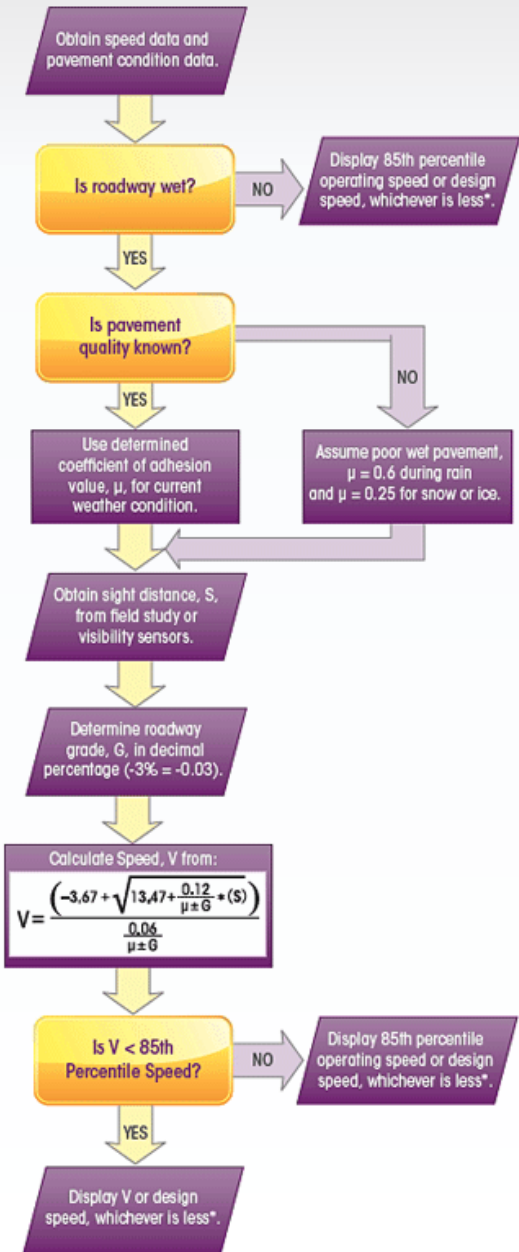


S = sight distance (ft),
 V_s = displayed VSL speed (ft/s),
 g = gravitational constant (32.2 ft/s²),
 η_b = braking efficiency (decimal percentage),
 μ = coefficient of road adhesion (unitless),
 G = roadway grade (percent expressed as a decimal).

Vitesse à afficher :

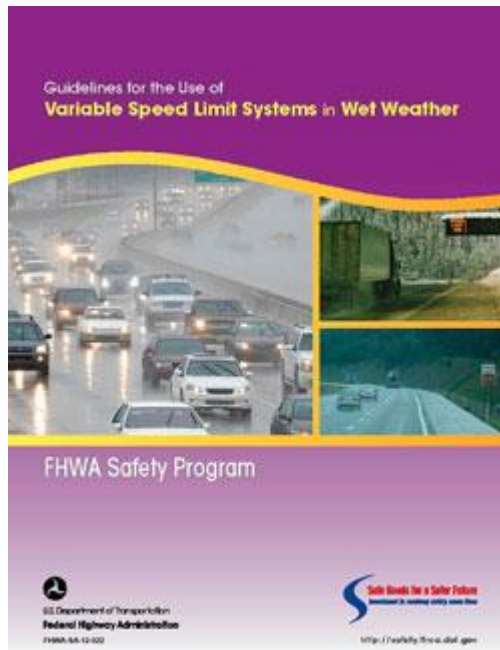
Idéal: 1.0

Pluie: 0.6
Neige: 0.25



Guide de conception:

- FHWA-SA-12-022
- http://safety.fhwa.dot.gov/speedmgt/ref_mats/fhwasa12022/



Regulatory VSL Sign



Advisory VSL Sign

EXEMPLE

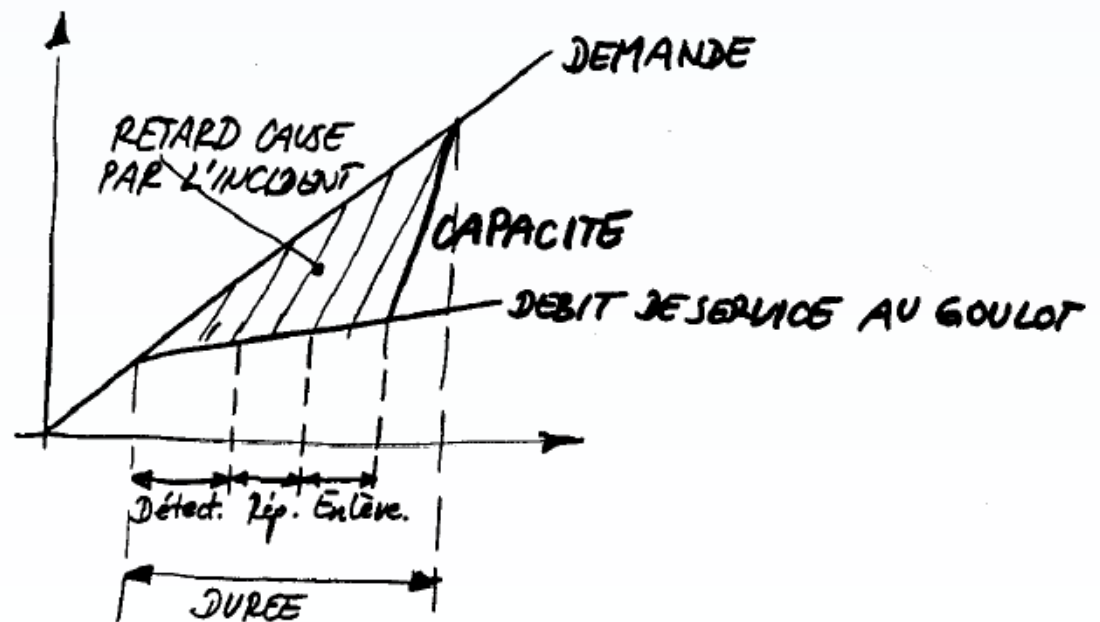
Un détecteur de conditions de visibilité détermine que la distance de visibilité près d'un tronçon de route est de 130'. Déterminez la limite de vitesse variable à afficher:

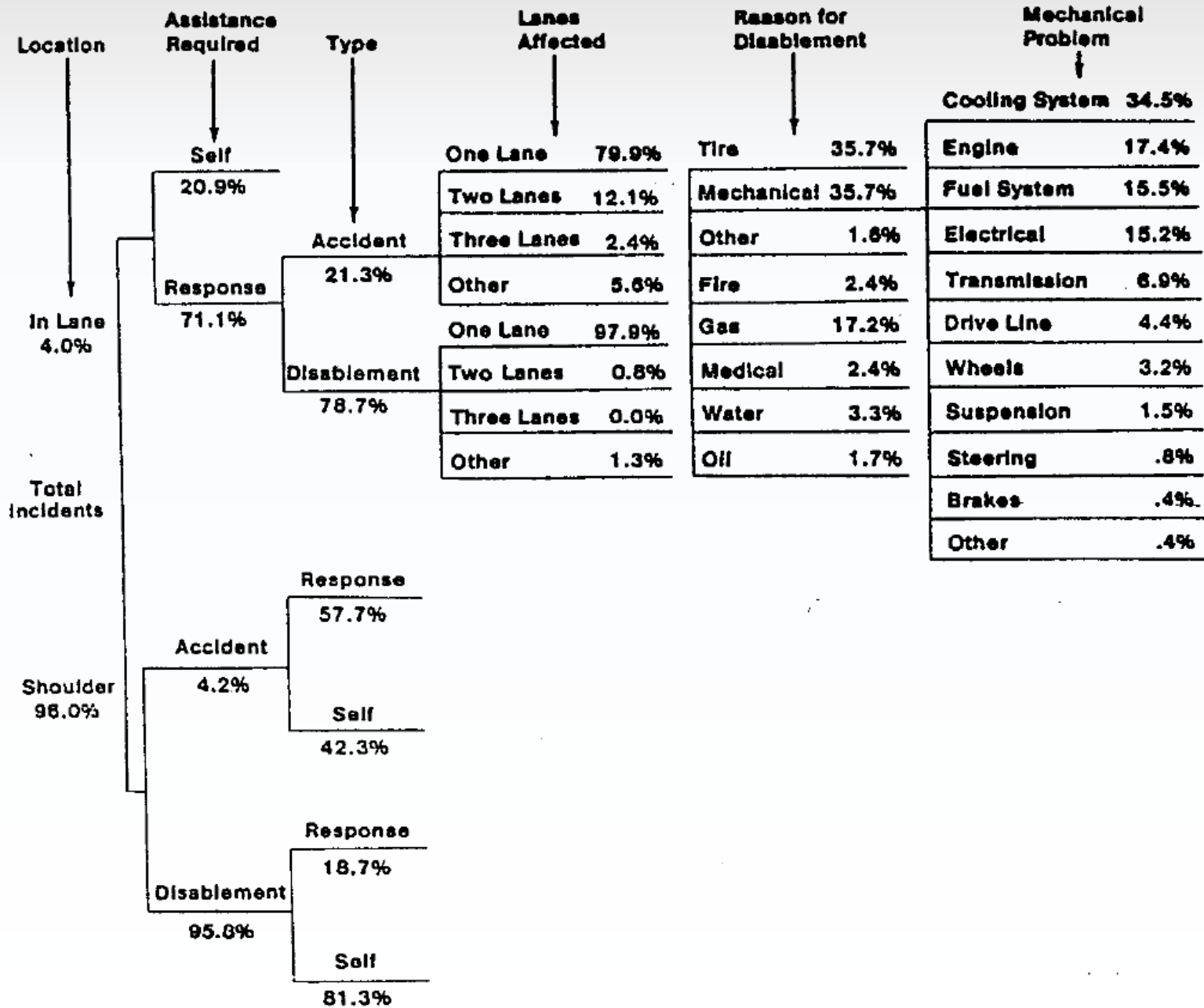
- Pente descendante de 6' sur 100'
- Conditions de pluie
- Supposons un efficacité de freinage de 1.0
- V_{85} de 45 km/h

INCIDENTS

Réduction temporaire de la capacité. Le phénomène de sursaturation est généralement localisé à un point spécifique.

- *Zipper merge*
- Processus instable
- Ondes des chocs sont générées





MÉTHODES D'ATTÉNUATION



Pour entretien, construction :

- Travail hors-pointe : fin de semaine et/ou nuit
- Minimiser le nombre de voies fermés
- Détours

Pour incidents :

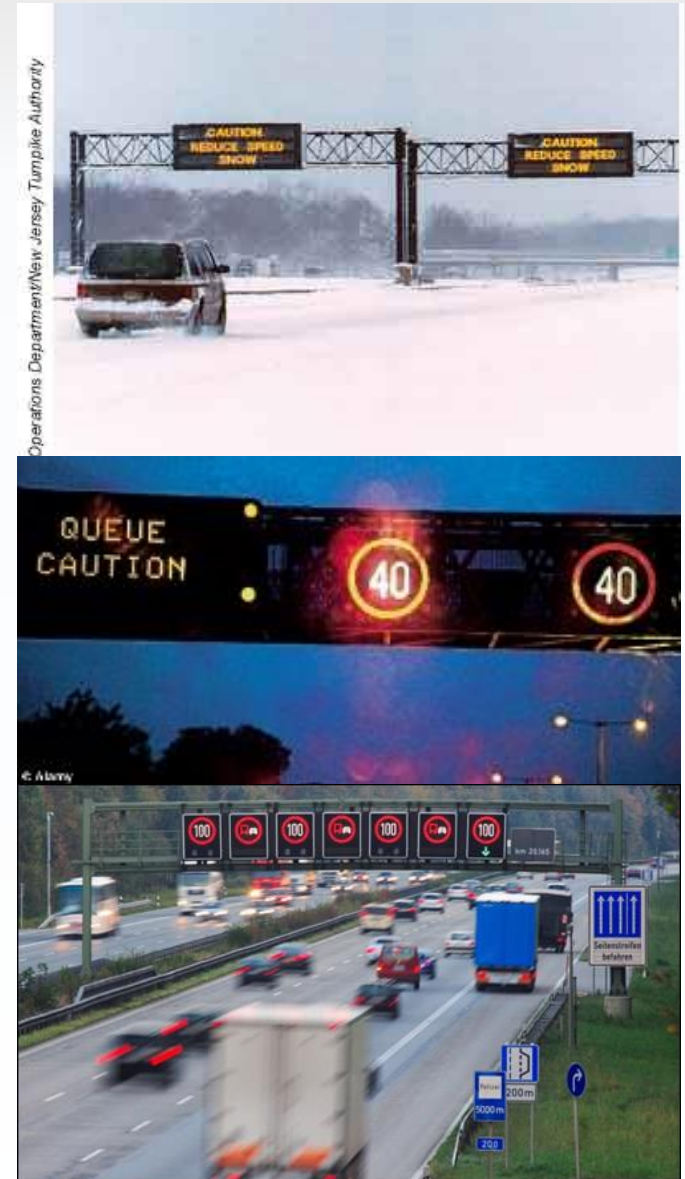
- Secours rapides
- Dégagement de l'incident sur l'accotement, si possible
- Détours placés à l'avance de l'incident
- Gestion « crise »
 - Reprogrammation des feux aux alentours pour accommoder la demande

Conditions météorologiques

- Panneau à messagerie variable avec informations concernant les conditions routières
- Réduction de la vitesse de conduite affiché (suggéré ou prescrit)

Composition du trafic

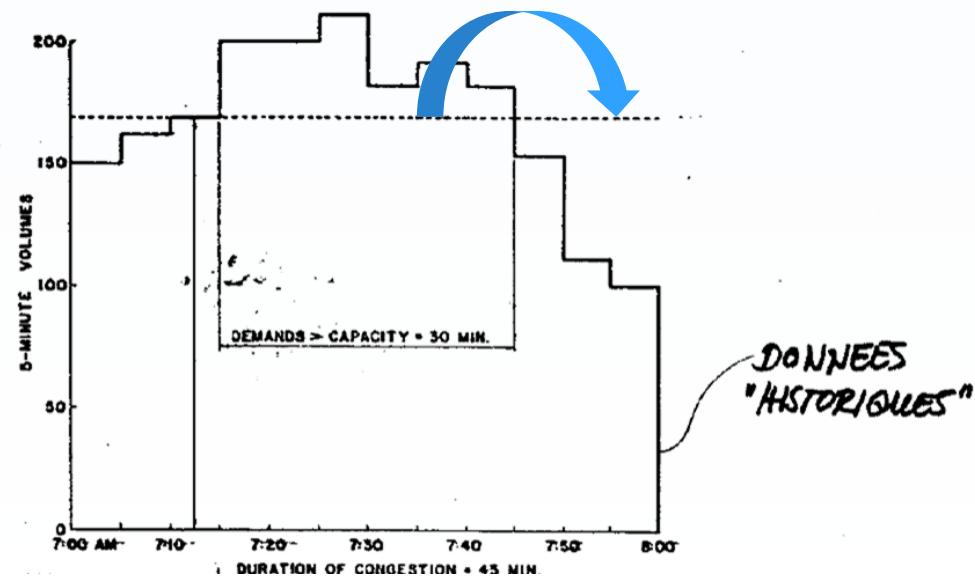
- Lissage des différentielles de vitesses en séparant les véhicules en termes de performance selon le besoin



GESTION DES ENTRÉES

La gestion des entrées (*ramp metering*) consiste à contrôler (avec un feu et parfois avec surveillance ou une barrière) la demande de manière artificielle en fonction du rapport de saturation ($x < 1$).

- Diminue le temps perdu par personne
- Mais...



On a un problème fondamental d'équité :

- Les gains de performances ne sont pas distribués uniformément entre tout les usager
 - Débordement sur un autre itinéraire
 - Engendrer l'utilisation d'un autre mode de transport (bénéfice)
 - Protestations!
 - Contrôle des infractions (taux d'entré de 1veh/4sec à 1veh/25sec)
- Comparer avec le « dilemme » premier arrivé, premier servi lors de attribution des places, p.ex. pour un service de transport publique



Lessons Learned: Monitoring Highway Congestion and Reliability Using Archived Traffic Detector Data

- (FHWA-HOP-05-003)

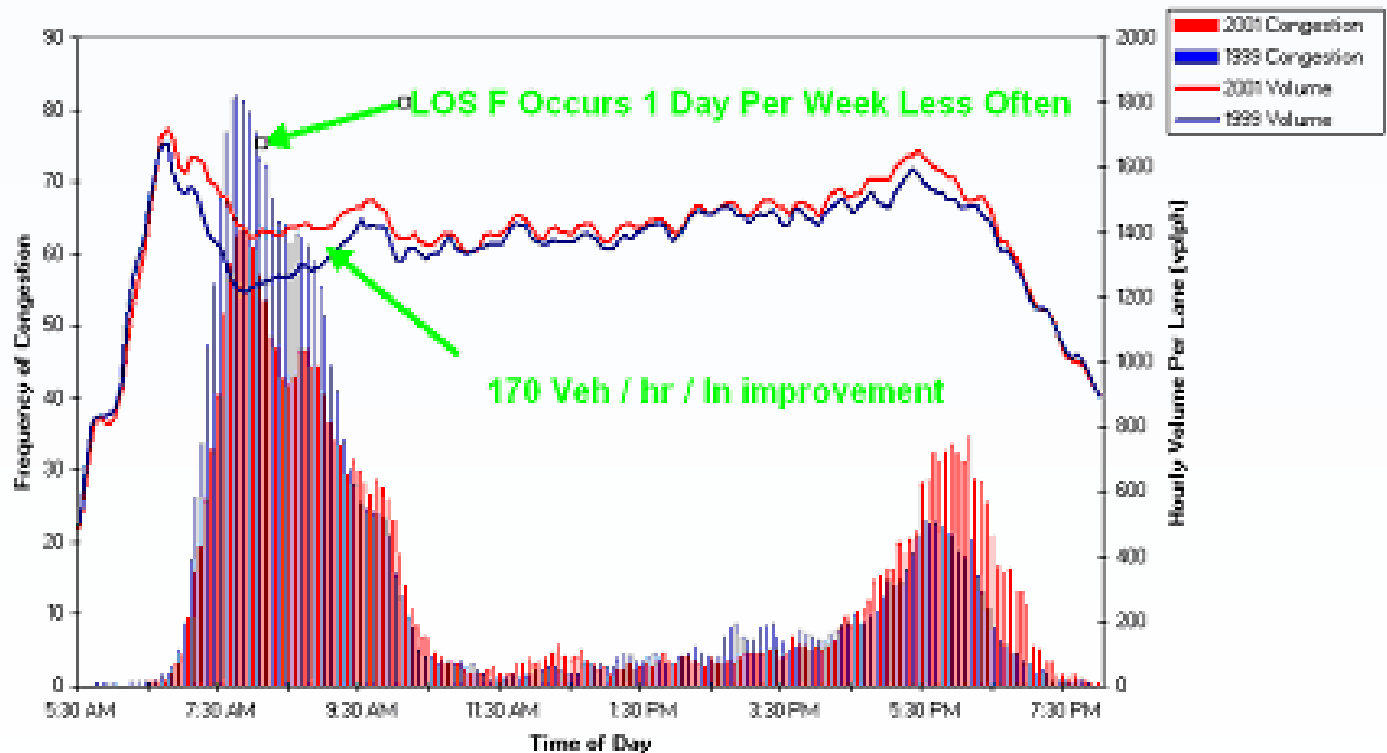


Table 4.3. Summary of reported benefits of entrance ramp metering systems

Location	Length (Mi)	Time Period (Hr)	Travel Time Improvement (Percent)	Congested Freeway Travel, Minute-Mile, Reduction (Percent)
Minneapolis (Minnesota)				
I-35W				
Inbound	16.6	7:15-8:15 a.m.	34	95
		6:30-9:30 a.m.	14	100
Outbound	12.7	4:30-5:30 p.m.	19	59
		3:30-6:30 p.m.	19	92
Chicago (Illinois)				
Eisenhower Expressway				
Inbound	9.4	2-hr a.m. peak	9	22
		4-hr a.m. peak	5	23
Los Angeles (California)				
Santa Monica Freeway				
Inbound	13.5	6:30-9:30 a.m.	40	100
Houston (Texas)				
Gulf Freeway				
Inbound	6	7:00-8:00 a.m.	60	66
Los Angeles (California)				
Harbor Freeway				
Outbound	4	3:45-6:15 p.m.	55	80
Detroit (Michigan)				
Lodge Freeway				
Inbound	6	2:30-6:30 p.m.	33	89
Toronto (Canada)				
Queen Elizabeth Way (QEW)				
Inbound	3.9	7:00-9:00 a.m. (good conditions)	45	45
		7:00-9:00 a.m. (poor conditions)	59	40

Source: Reference (29)

Summary of reported benefits of traffic-responsive freeway ramp metering systems

Location	Number of Ramps Used in Evaluation	Change (Veh-Hr/Yr)	Travel Time		Accidents		Other Effects	Assumptions	Increase in Annual Net Benefits per System (Dollars)
			Annual Savings (Dollars)	Annual Change	Annual Savings (Dollars)				
San Diego (California)	2	N/A		N/A			Reduction in congestion on mainline and in rear-end ramp collisions. Easier merging operation.		
Detroit (Michigan)	8	-225,000	+675,000	N/A			High meter violation rate.	250 working days per year. Value of time equals \$3 per veh-hr	675,000
Chicago (Illinois)	8	-64,000	-192,000	-51	+39,300		Some permanent diversion to alternate routes.	250 days on which benefits achieved. Value of time equals \$3 per veh-hr \$770 per accident.	231,300
Houston (Texas)	8	-72,670	+218,000	-40	+24,000		Reduction in vehicle-operating costs equal \$18,400. Level of service increased.	\$3 per veh-hr \$600 per accident.	260,400
Minneapolis (Minnesota)	-39	N/A		-115	N/A		Average speeds during peak periods increased on the order of 10 mph. Reduction in accidents is average for 9 years of operation as compared to 2 years prior to system activation.		

Le contrôle des entrées est parfois aussi utilisé pour faciliter l'insertion des véhicules en indiquant les créneaux d'insertion acceptable (**contrôle de la convergence**).

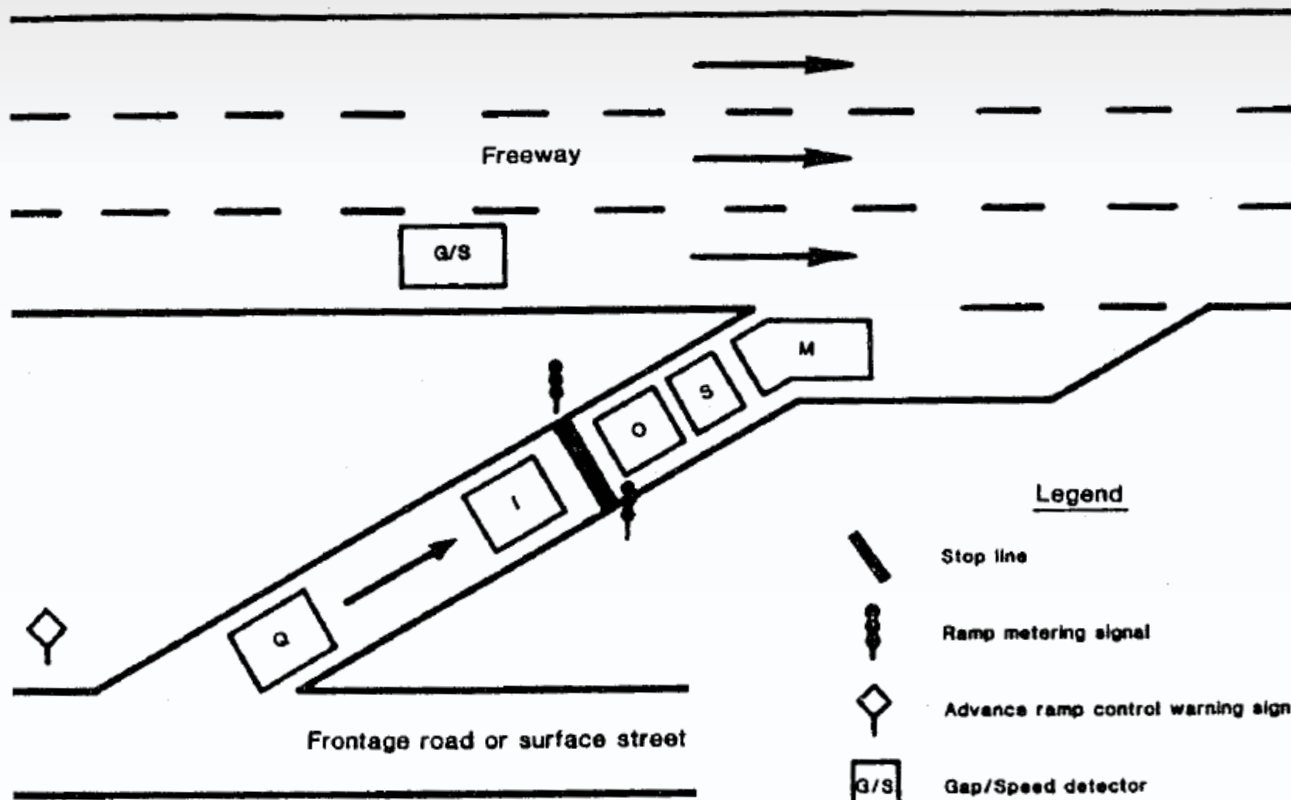
On note que tout système de contrôle des entrées nécessite nécessairement des données de circulation en temps réelle.

- Boucles
- Caméras-détecteurs
- Ces systèmes sont complexes, peut fiable et/ou coûteux, alors son application est souvent limitée aux cas particuliers












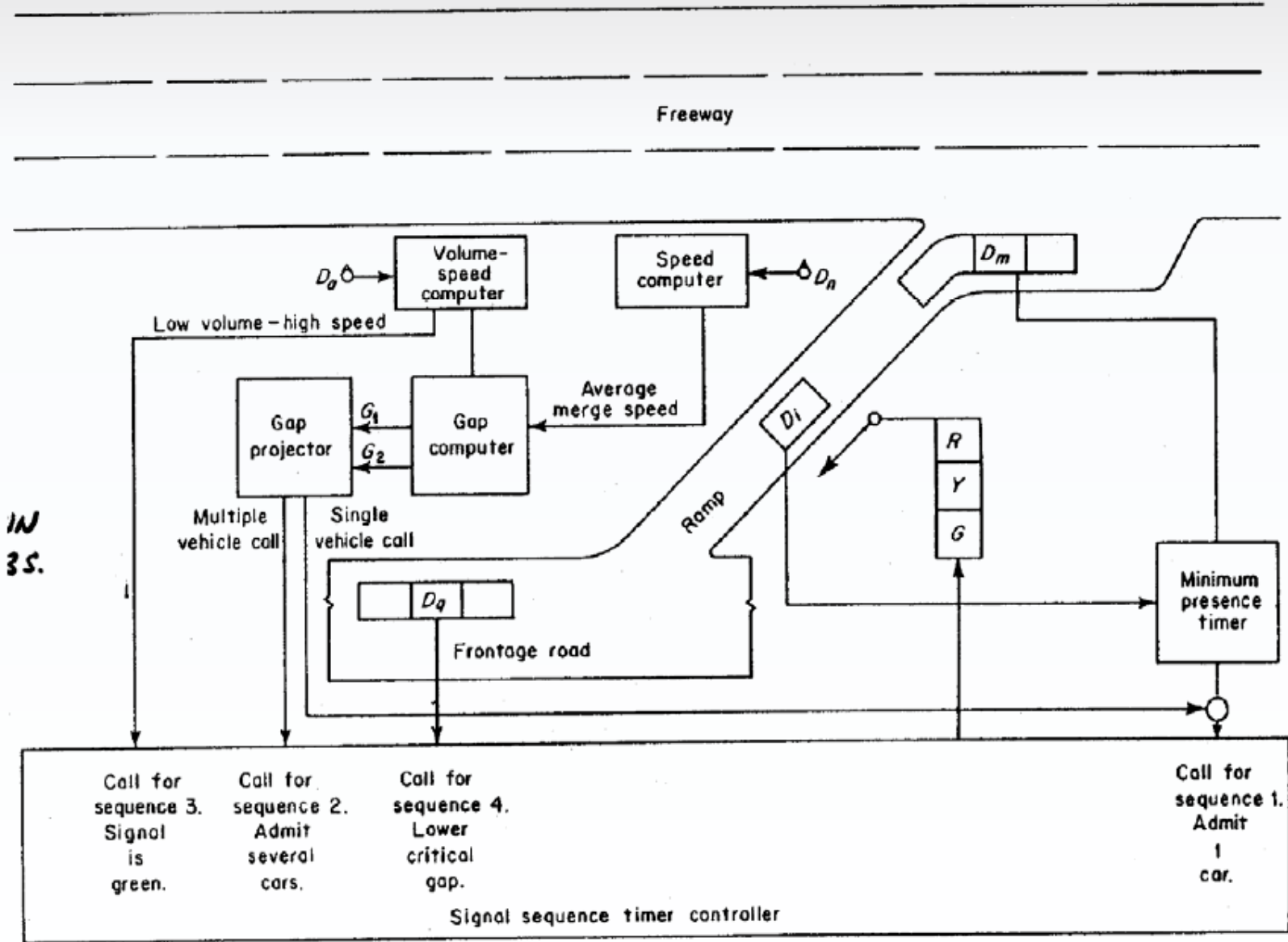
On distingue différentes modes de contrôle :

- **Fermeture périodique** : cette méthode est peu populaire car elle est la plus restrictive et suscite les périodes d'attentes les plus longues et les périodes sont distribuées non-uniformément (comparer: cycle de feu très long). Système le moins dispendieux (détection « lente », barrières physiques, etc.)
- **Contrôle de la convergence** : répond aux conditions en temps réel. Système le plus dispendieux.
- **Feux** : divers moyens classiques de contrôle de feu (fixe TOD, adaptatif, dynamique) répondant aux conditions de circulation, choisis selon la résolution de détection et de réponse voulue.



Legend

-  Stop line
-  Ramp metering signal
-  Advance ramp control warning sign
-  Gap/Speed detector
-  Queue detector (optional)
-  Checkin detector (required)
-  Checkout detector (optional)
-  Slow-vehicle detector
-  Merge detector (optional)



IN
35.

Merging control block diagram.

Summary of various traffic-responsive, entrance ramp metering strategies

Location	Type of Control	Method of Determining Metering Rate	Overrides
San Diego (California)	Occupancy	Occupancy measured on all mainline lanes upstream of the merge area. From these occupancy measurements, one of 3 metering rates (10, 6 to 7, and 4 vpm) selected	None
Detroit (Michigan) (Texas Transportation Institute)	Demand capacity	Flow measured upstream of the ramp compared to the predetermined down stream capacity every minute, and the metering rate (4 vpm) calculated accordingly	Queue, merge area, and maximum red
Chicago (Illinois)	Occupancy	One of 5 metering rates (13, 10, 8, 6, and 4 vpm) selected on the basis of 1-min average occupancy measured in mainline lane upstream	Queue and merge area
Houston (Texas)	Demand capacity	Metering rates selected once every minute on the basis of volume-capacity comparisons of 2 bottlenecks in the control section and volume and speed checks at the ramps	Queue, merge area, and maximum red
Minneapolis (Minnesota)	Volume capacity	Metering rates selected on basis of upstream, downstream, and at-ramp volume and occupancy measurements compared with threshold values established for each ramp; metering rates ranging from 3 to 14 vpm	Weather conditions — one for rain and another for snow

Source: Reference (27)

AUTRES TYPES DE ROUTES MAJEURES

On a parlé principalement des autoroutes à accès limité. Cependant on distingue aussi d'autre type avec accès ordinaire:

- Route « nationale »
- Route « régionale »



Figure 1.4-1
Raccords théoriques entre les classes de routes

Ces routes se distinguent par le nombre des voies et le dépassement souvent effectué dans la(es) voie(s) opposée(s). De plus l'accès est directe, avec des carrefours à niveau et des entrées privées.

- Ces routes traversent souvent des villes et servent d'artère principale où la limite de vitesse baisse et où il y a souvent des carrefours signalisés.
- Voir Tome 1 – Conception Routière, Ch 1, Tab. 1.5-1à5

La procédure de conception est essentiellement semblable, avec des cas de signalisation particulier et des valeurs de base différentes.

- Voir chapitres 14 et 15 du HCM 2010

C'est tout pour aujourd'hui!