

Les transports routier, ferroviaire, aéronautique

Séance 4 : Les flux et le trafic



Cours Magistral

18/03/2024

yeltsin.valero@transamo.com

Planning de la séance

- **Cours Magistral**

1. Introduction – concepts de base
2. Exposition au trafic
3. L'ingénierie du trafic
4. Etude des impacts
5. Modèles d'itinéraire

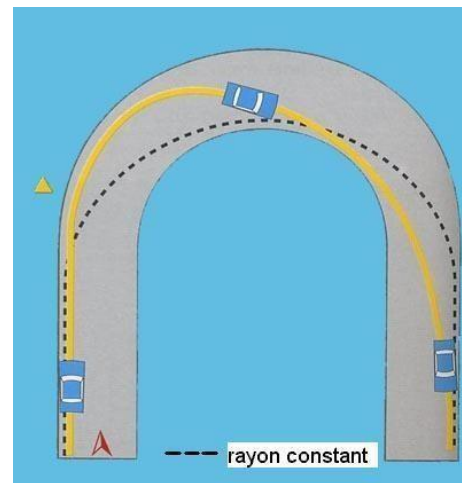
1. Introduction – concepts de base

Cours « Analyse et conception des systèmes de transport », F.Leurent, F.Combes, 2014

La trajectoire (1/4)



La réalisation de l'interaction **véhicule** – **infrastructure** à une **temporalité donnée**
(dans des circonstances particulières)



La trajectoire (2/4)

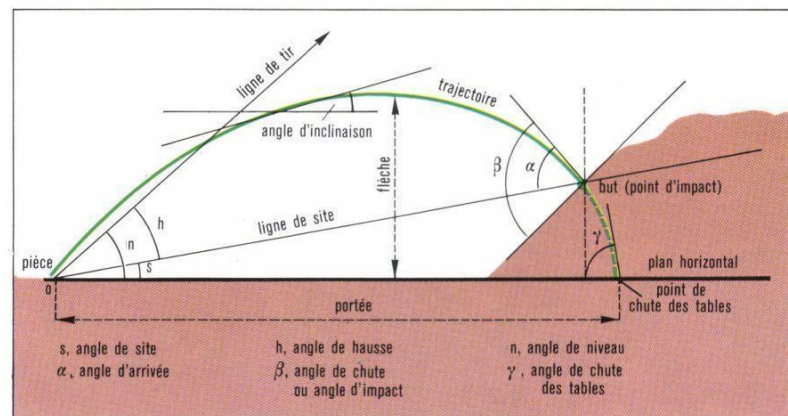
❑ Définition mathématique :

Courbe décrite par un point en mouvement par rapport à un repère donné.

La trajectoire d'un point est, dans un référentiel, l'ensemble des positions successives occupées par ce point au cours du temps.

❑ Définition en mécanique :

Ligne décrite dans l'air ou dans l'espace par un corps en mouvement et notamment par le centre de gravité d'un projectile.



Trajectoire d'un projectile classique.

La trajectoire (3/4)

□ Quelques caractéristiques qui en résultent :

- Dépend du système de référence des coordonnées et s'inscrit dans le périmètre physique de l'infrastructure
- S'exprime en 2- 3 - 4 dimensions (temps, espace)



✓ D'où la distinction
entre modes guidés
vs. trajet libre

La trajectoire (4/4)

❑ Elle dépend des facteurs :

- Physiques (cf. lois du mouvement, équilibre, degrés de liberté)
- Fonctionnels (cf. longueur du trajet, accessibilité)
- Géométriques (cf. tracé, gabarit)
- Opérationnels (repos du chauffeur, station service,...)
- Institutionnels (cf. code de la route)
- De performance (cf. sécurité, ...)
- **Humains** (cf. fatigue, alcoolémie, ...)

Définitions (1/ 1)

❑ Distance inter-véhiculaire (DIV) ou espacement (s)

- ✓ La distance séparant deux véhicules successifs à un instant t sur une même voie



❑ Densité (k) ou concentration en véh/km

- ✓ Le nombre de véhicules présents sur une section routière à un instant donné t

➡ $k = 1 / DIV$



Définitions (2/ 2)

❑ Temps inter-véhiculaire (TIV) ou headway (h)

- ✓ L'intervalle de temps séparant le passage de deux véhicules successifs sur une même voie (routière, ferroviaire, ...)



1 heure

❑ Débit (q) en véh/h

- ✓ Le nombre de véhicules passant d'un point de route pendant une période de temps donnée.

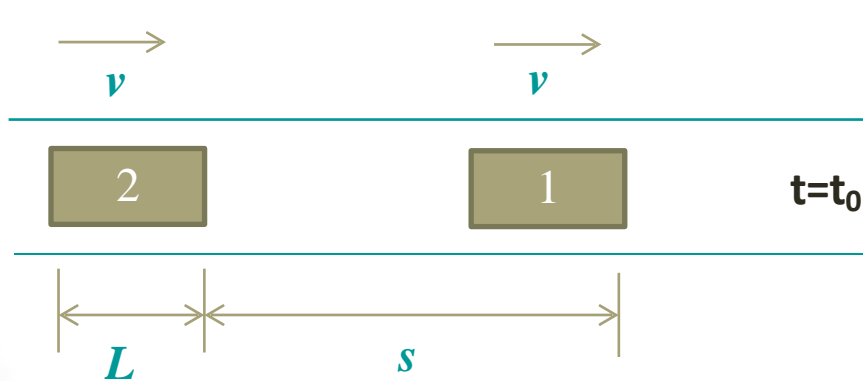
➡ $q = 1 / \text{TIV}$



Modèle de poursuite

□ Le cas simple :

- ✓ Un système de deux véhicules ($N = 2$) interagissent entre eux sans aucune influence des conditions externes
- ✓ Véhicule (« leader ») et suiveur (« follower ») à vitesse v et distance s



L = longueur de véhicule

d_l = décélération leader

d_f = décélération follower

δ = temps de réaction pour f

x_0 = distance de sécurité après arrêt



$$s = v \delta + \frac{v^2}{2d_f} - \frac{v^2}{2d_l} + N L + x_0$$

Diagramme espace – temps (1/3)

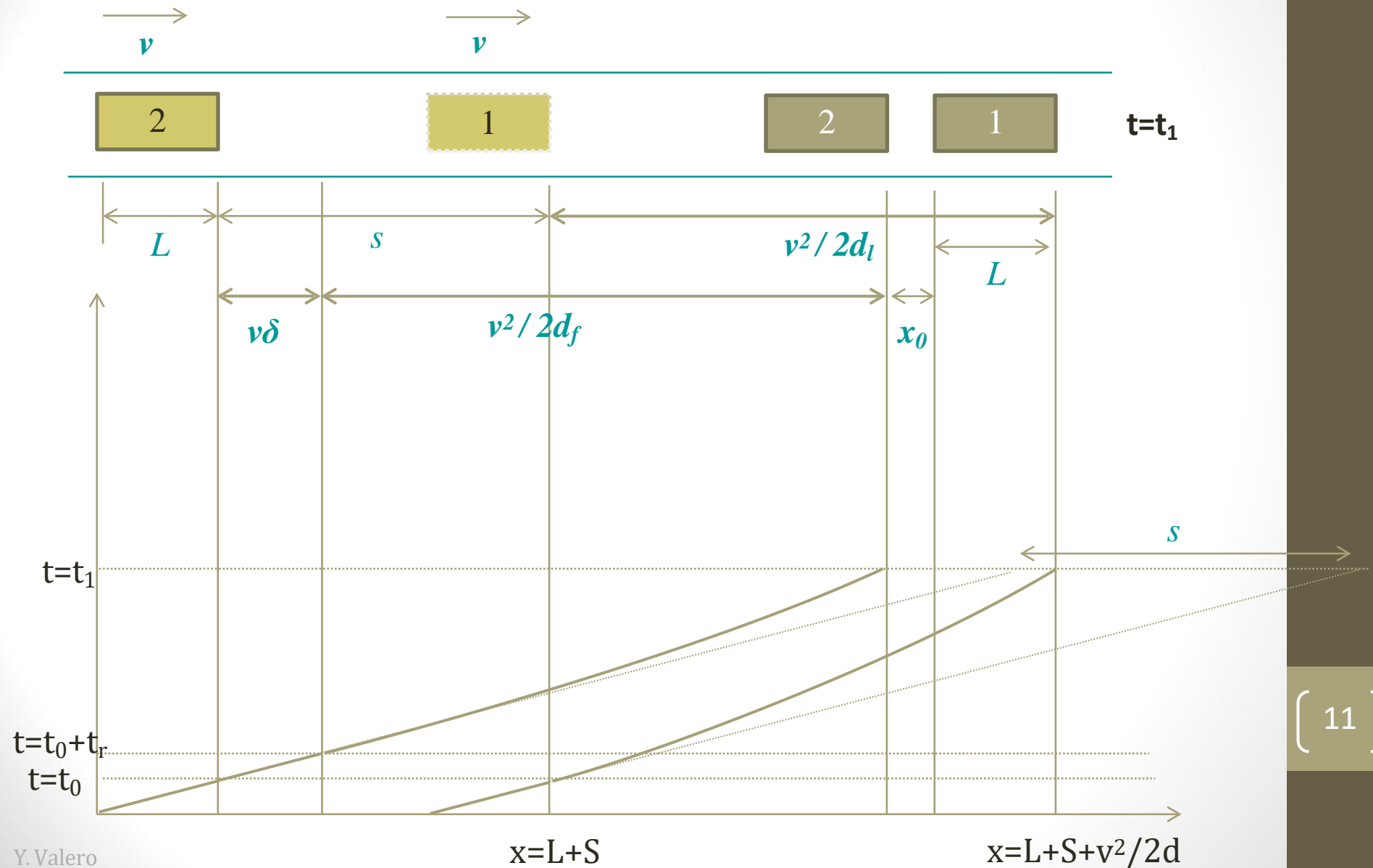


Diagramme espace – temps (2/3)

□ Le cas simple et idéal : flux uniforme et continu

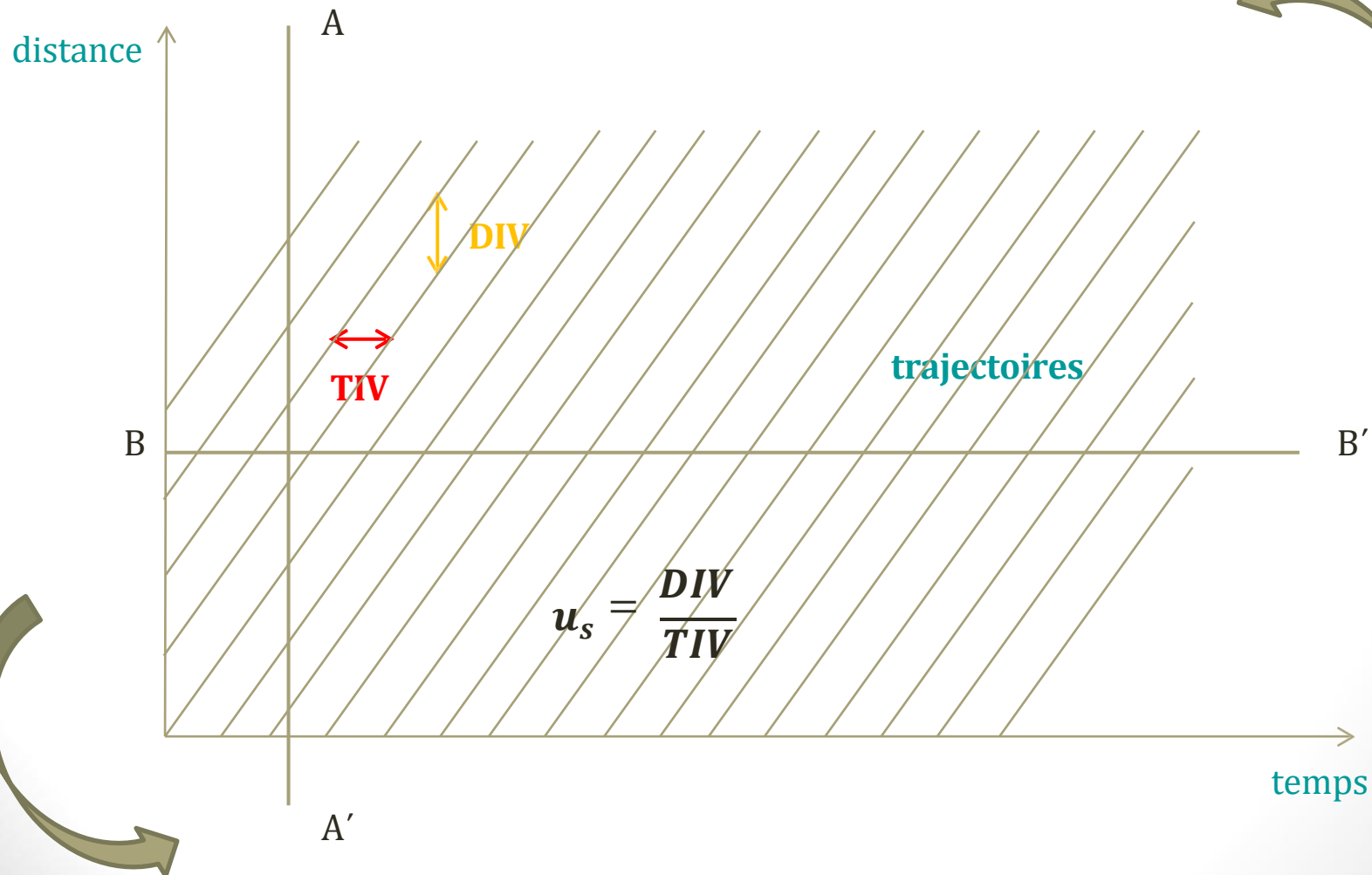


Diagramme espace – temps (3/3)

❑ Facteurs de complexité :

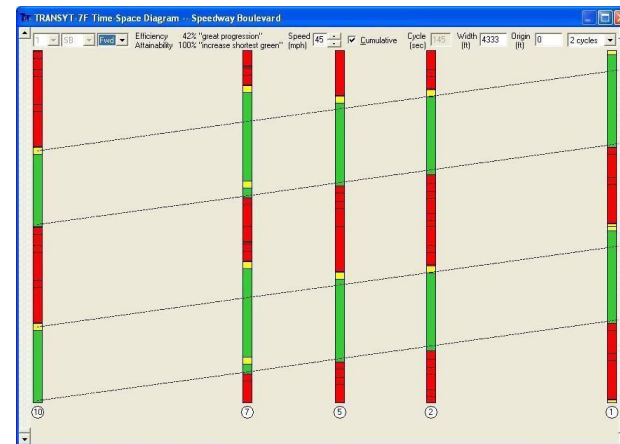
- comportement, conduite
- hétérogénéité de véhicules
- contraintes opérationnelles (arrêt de train, ...)
- contraintes géométriques (pentes, ...)
- exposition aux conditions météo
- ...
- **exposition au trafic**

2. L'exposition au trafic

Le flux uniforme

❑ Le flux uniforme offre plusieurs avantages comme :

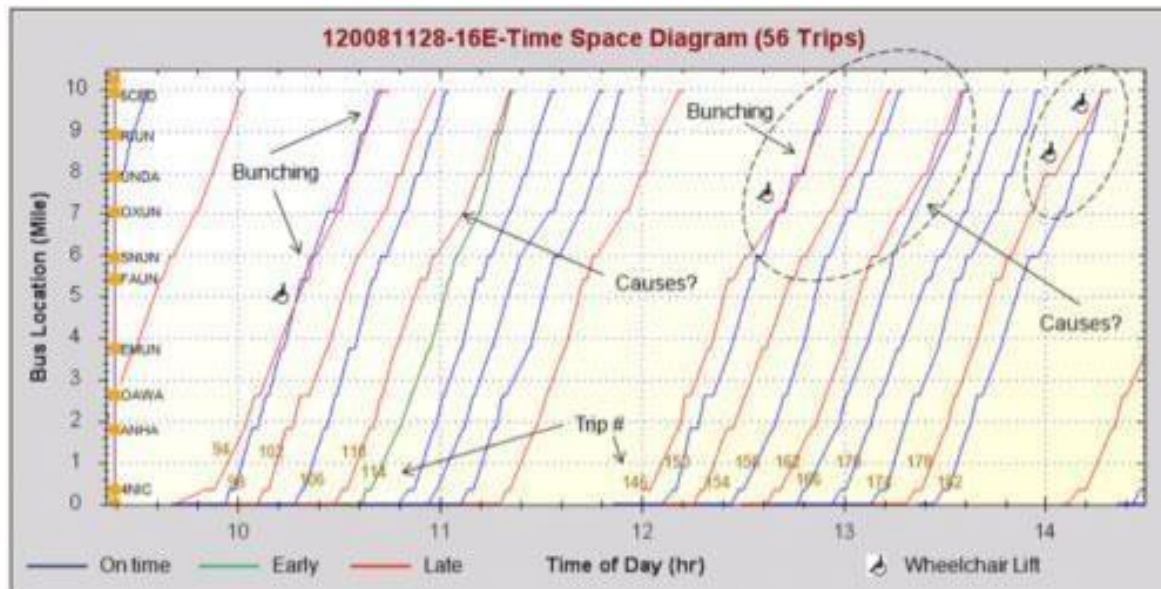
- La maximisation du débit en véhicules
- L'économie d'énergie et la diminution des émissions (accélération/ décélération)
- La régulation du temps d'attente à l'arrêt et du nombre de voyageurs
- La distance de sécurité



L'impact du trafic

❑ L'impact du trafic sur une ligne de bus :

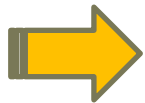
- Congestion, feux → vitesse commerciale faible
- Retards imprévus → fiabilité faible
- Espacement dissymétrique → temps d'attente élevé



Application - Bus

Solution :

- Bus en site propre
- Priorité aux feux



Bus à haut niveau de service



Le BHNS est un transport collectif en site propre urbain qui trouve son inspiration dans le concept de Bus Rapid Transit (BRT) américain.

Il lui emprunte notamment son approche « système » mais s'adapte au contexte français (rues étroites, partage de la voirie,...). L'ensemble des éléments du système doit garantir au bus un haut niveau de service (vitesse, confort, régularité, fréquences, accessibilité).

Application – Cas ferroviaire (1/5)

❑ Capacité en trains (c) :

- Le nombre maximal de trains susceptibles de circuler sur une section durant une période donnée

❑ Headway (h) :

- La distance temporelle inter-véhiculaire minimale permettant de fonctionner en sécurité

❑ Fréquence (f) :

- Nombre de passages dans un intervalle de temps donné (dans une heure : $f=60/h$)

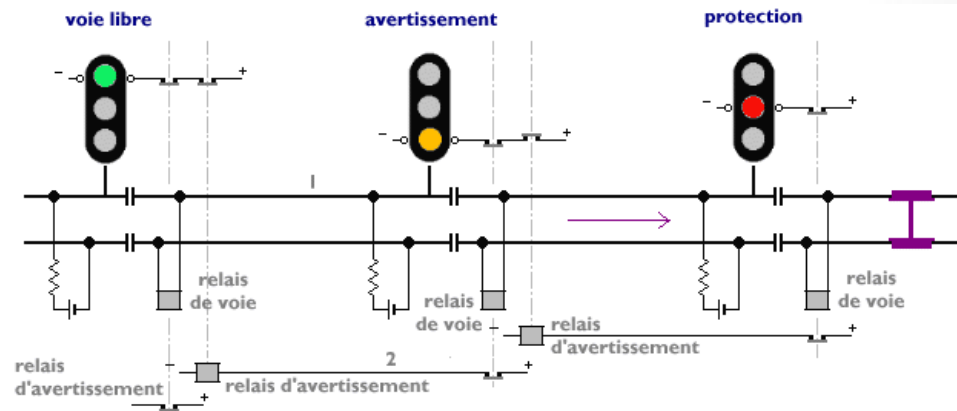
Application – Cas ferroviaire (2/5)

□ Le canton :

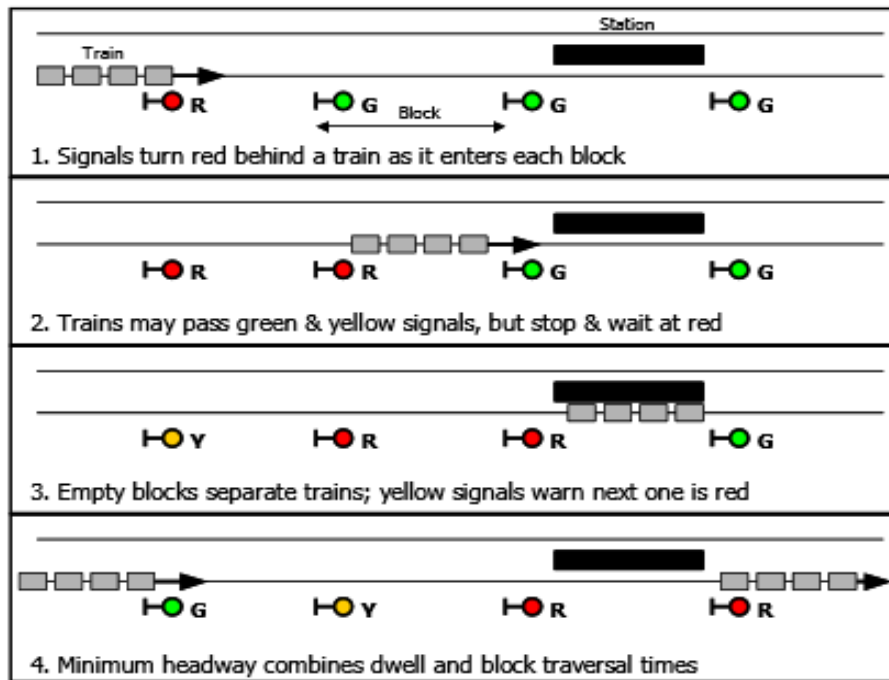
- ✓ la voie est divisée en cantons (blocks)
- ✓ sur chaque canton : un seul train peut circuler
- ✓ + de cantons → de headways plus courtes → capacité plus élevée

□ Système de cantonnement :

Système fonctionnant à l'aide d'un dispositif électrique reliant les appareils des postes qui commandent les signaux d'entrée de chaque canton (**block manuel**) ou bien agissant directement sur ces signaux en fonction de l'état d'occupation du canton (**block automatique**).

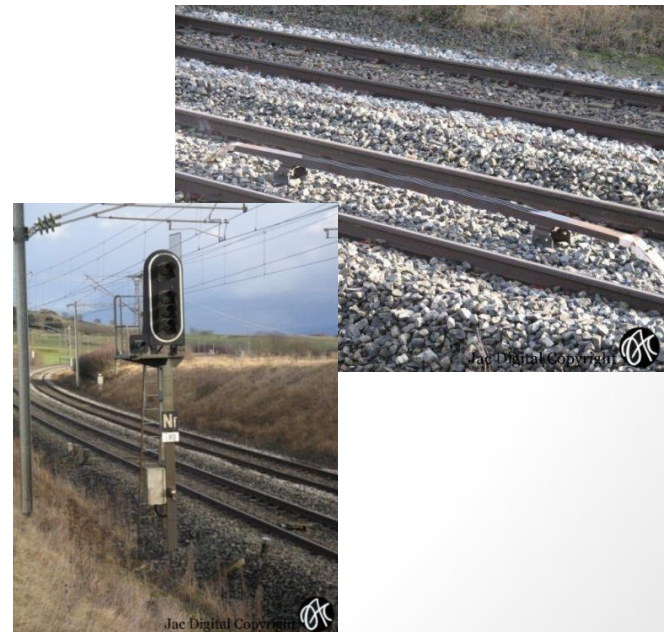


Application – Cas ferroviaire (3/5)



Par sa conception, le train est « prisonnier » de sa voie, l'aiguillage (ou branchement) permet de changer de voie.

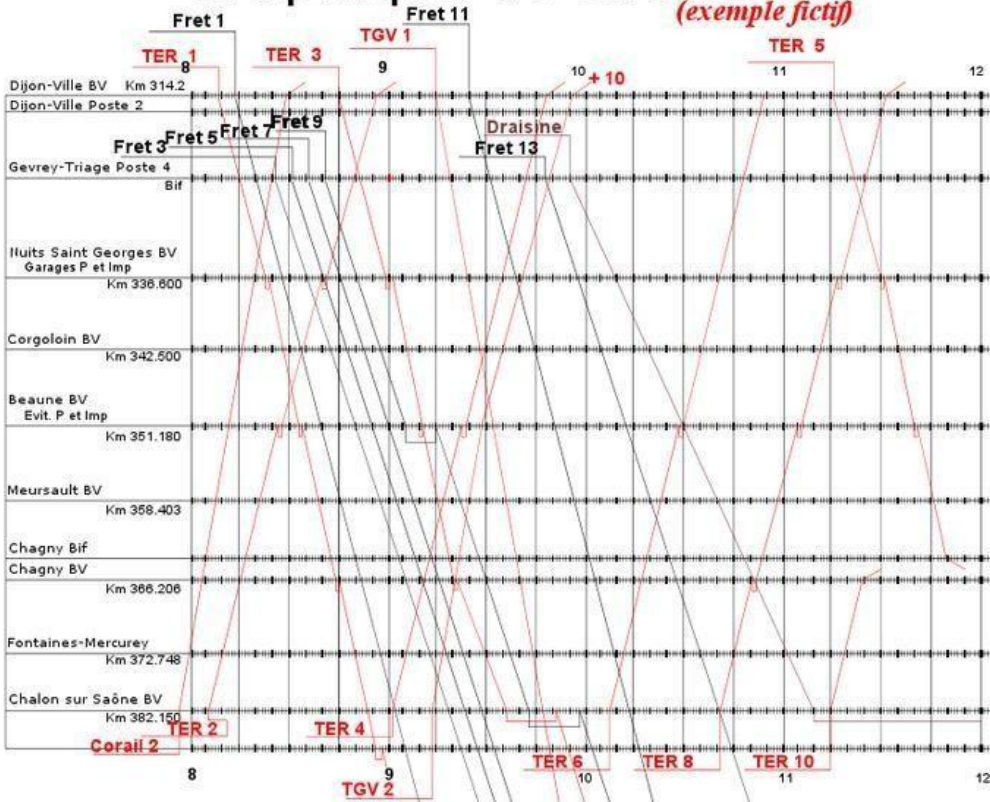
Les cantons sont balisés par des signaux symbolisant son occupation ou sa vacance et protégés par des aiguillages



Application – Cas ferroviaire (4/5)

Graphique de circulation

(exemple fictif)



- Représentation sur 2 axes espace-temps de l'utilisation de la capacité d'une ligne ferroviaire (se traduisant à la fois par des sillons et par des plages de maintenance).

- Schéma d'organisation de l'ensemble des **sillons** sur l'ensemble de l'infrastructure.

Application – Cas ferroviaire (5/5)



□ Sillon :

- La capacité d'infrastructure nécessaire pour faire circuler un train d'un point à un autre à un moment donné (RFF)
- Espace alloué à la circulation d'un train dans un graphique espace-temps.

créneau espace-temps permettant la circulation d'un train

Capacité :

Nombre maximal de sillons pouvant être tracés au graphique dans une configuration d'horaire et d'infrastructure.

3. L'ingénierie du trafic

Définitions : S. Cohen, 2000



Représentation du trafic

❑ Microscopique :

- Prise en compte des caractéristiques de chaque véhicule considéré individuellement. (TIV, DIV, ...)

❑ Macroscopique :

- Pas de distinction entre les véhicules
- Considération de flux (ou flots) de véhicules.
- Trafic par catégories de véhicules (ex PL, VL)

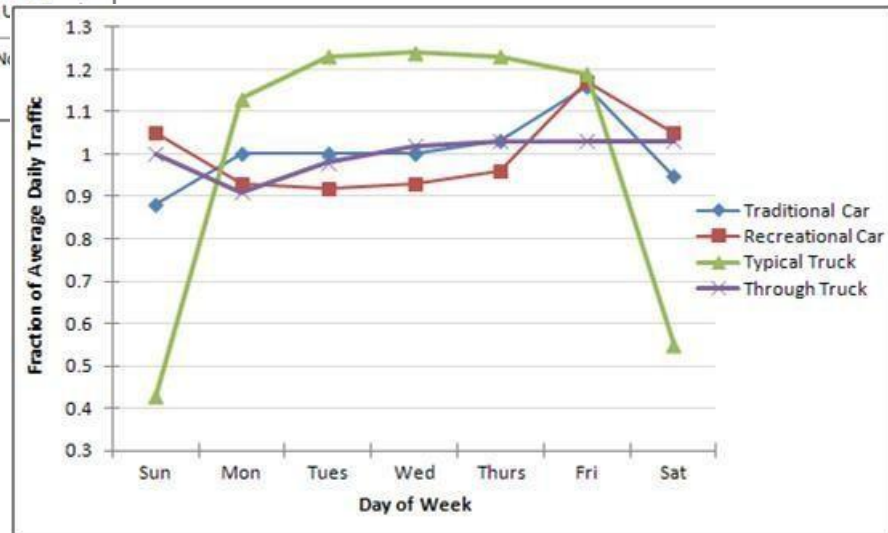
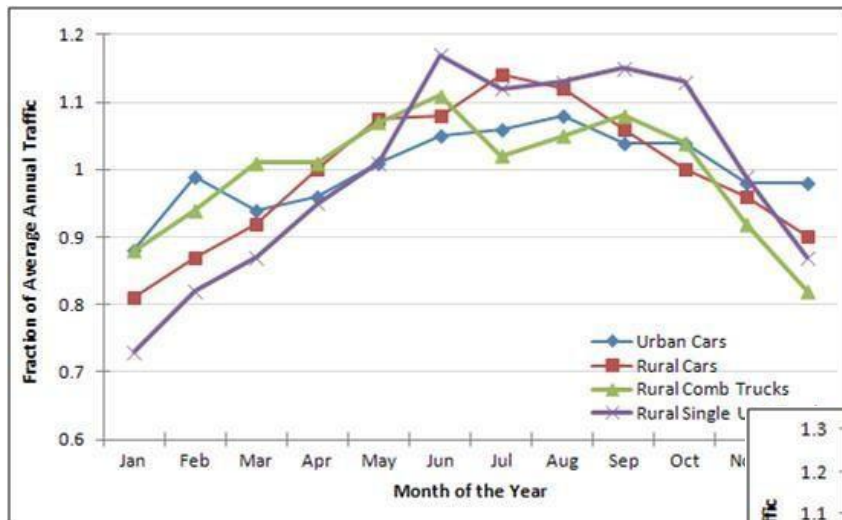
❑ Mésoscopique :

- Représentation intermédiaire en pelotons.

Le débit

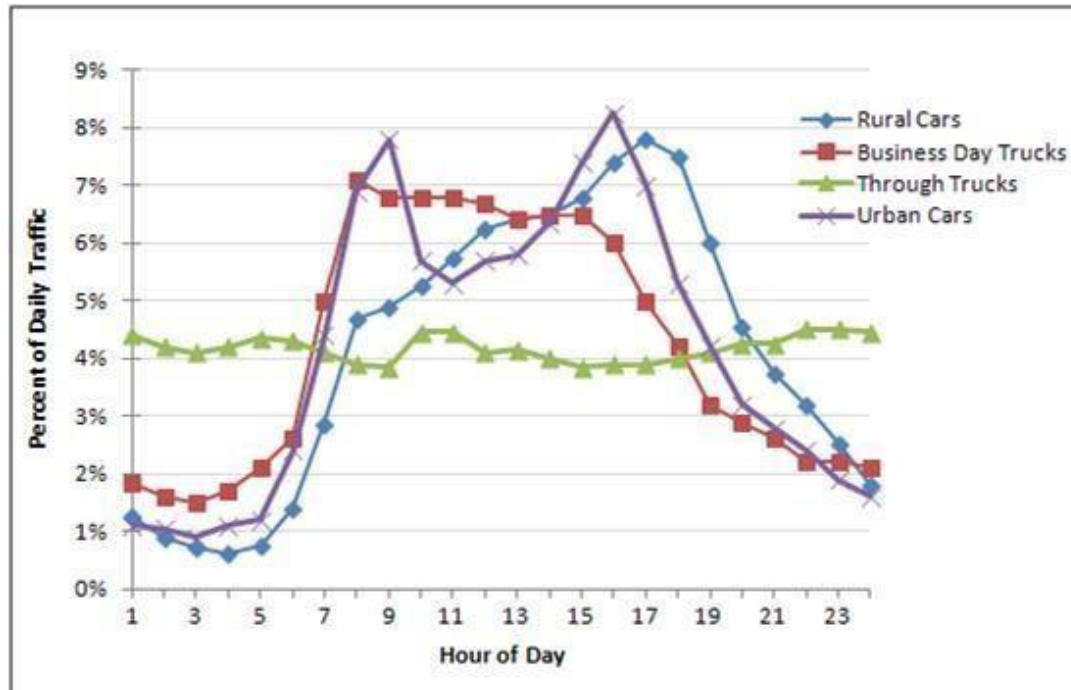
- Il définit la répartition des véhicules dans le temps.
- Le débit, en un point de la route, correspond au :
**nombre de véhicules passant par ce point pendant une
période de temps donnée**
- Notation : **q** (véh/h).
- Variations temporelles : TMJA, mensuelles, journalières, horaires

Les oscillations du débit



Source: FHWA

Les oscillations du débit dans la journée



Dans la même heure ?

Facteur de pointe instantanée

- Il caractérise les variations du débit au cours d'une même heure
- Le débit, en un point de la route, correspond au :

**rapport du débit horaire de pointe au maximum de
l'intensité horaire atteinte pendant une durée de base comprise
dans la même heure**

- Notation : FP_i (pour 6min, 15min, ...) = $Q(1\text{heure}) / (60/i) * Q(i\text{-min})$
- Les faibles valeurs de FP_i impliquent une grande variabilité du débit.

Le coefficient d'équivalence

- Il permet de définir les débits en unités de voitures particulières par unité de temps (uvp/h).
- Il correspond au :
**nombre de voitures particulières (VL) que représente
chaque poids lourd (PL) dans des conditions de
circulation données**
- Notation : **e**
- $Q_{uvp} = Q_{VL} + e Q_{PL}$
- $Q_{uvp} = Q [1 + \sum (e_i - 1) p_i]$

Le taux d'occupation

- Le taux d'occupation, en un point de la route, désigne **la proportion de temps durant laquelle ce point de la chaussée est occupé par des véhicules.**

- Durant une période d'observation T , on désigne par t_i le temps de présence du véhicule i en un point de la route :

$$\tau = (\sum t_i) / T$$

- Notation : τ , généralement exprimé en %.

$$\tau = (L + l) k$$

où L = longueur moyenne des véhicules l = longueur de la boucle

Le diagramme fondamental (1/4)

❑ Relation fondamentale d'équilibre : $u = q / k$

où u : vitesse moyenne d'un flot de véhicules

❑ **Exemple :**

Pour un débit de 2000 véh/h et une concentration de 50 véh/km, la vitesse moyenne du flot vaut $2000/50 = 40$ km/h.

❑ **Vitesse u :**

- Elle correspond à la vitesse moyenne d'espace
- Elle est égale à la moyenne harmonique des vitesses des véhicules passant en un point pendant une certaine durée

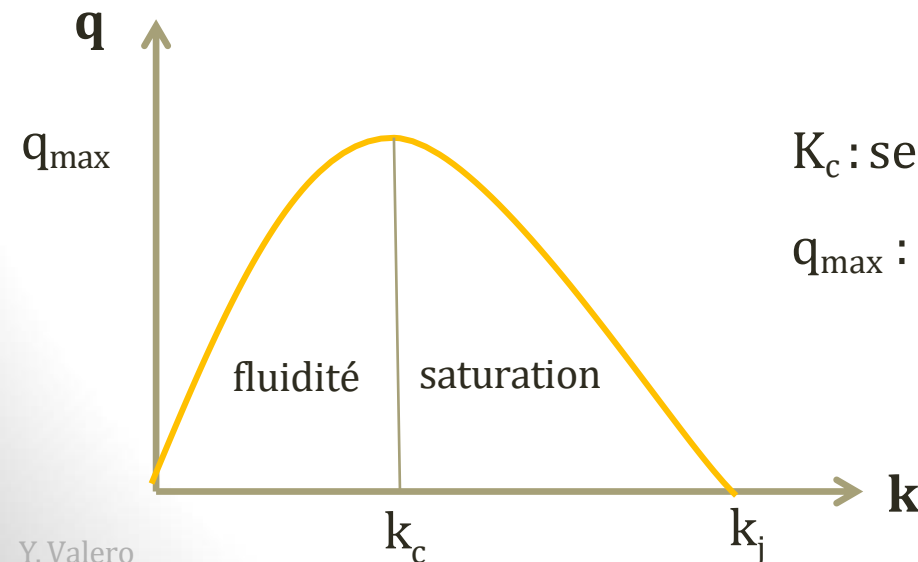
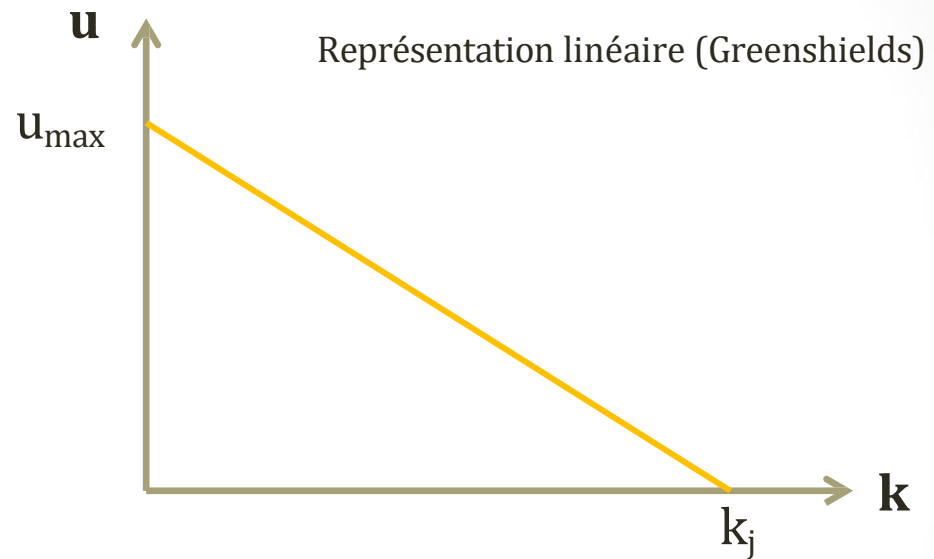
$$1 / u = 1 / N (\sum 1 / u_i)$$

Le diagramme fondamental (2/4)

■ Constat :

Si k est faible, u est élevée

Si k augmente, u diminue.



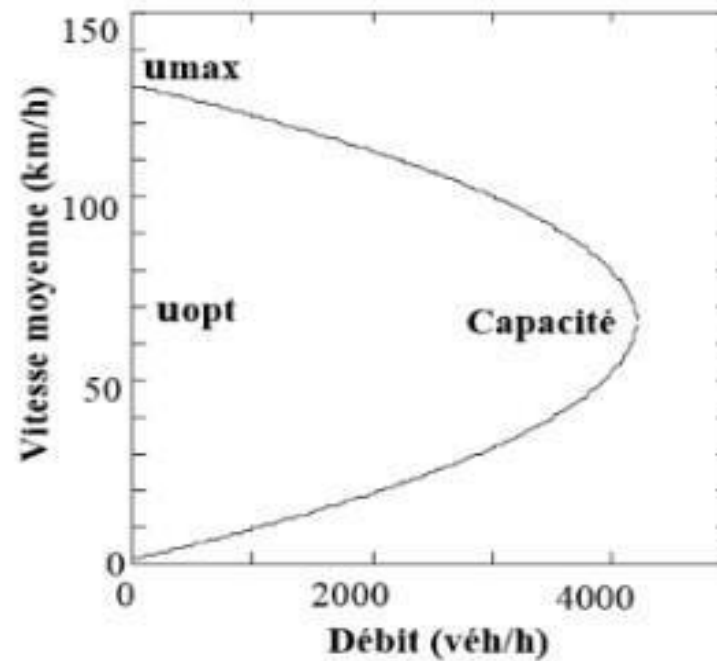
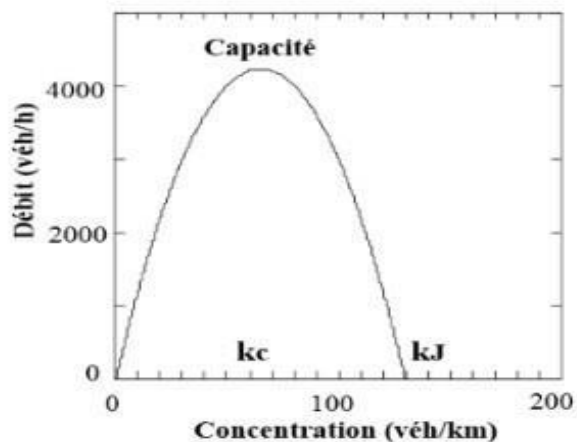
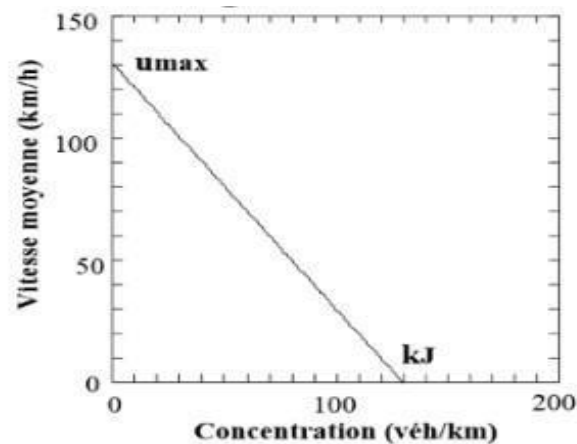
K_c : seuil de concentration critique

q_{\max} : capacité

dépend de la géométrie, la
météo, la composition du trafic, ...

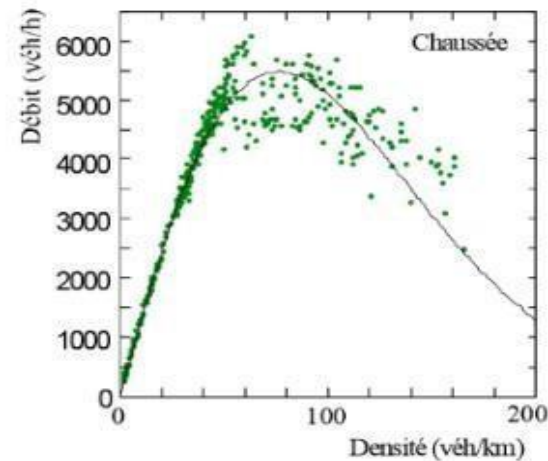
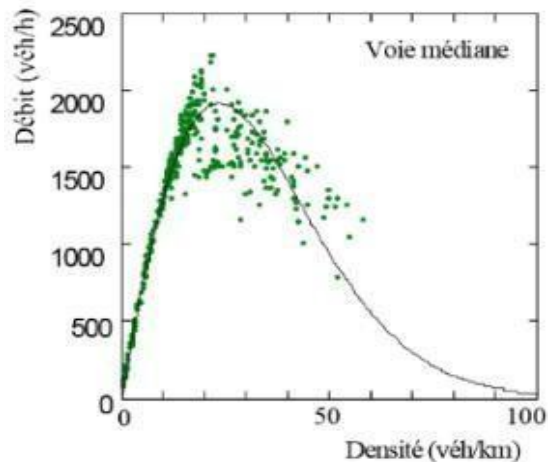
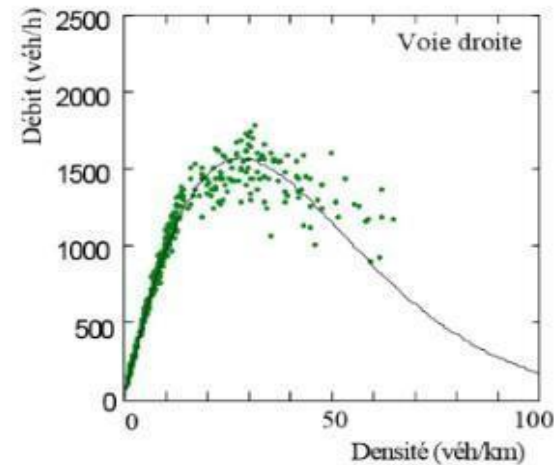
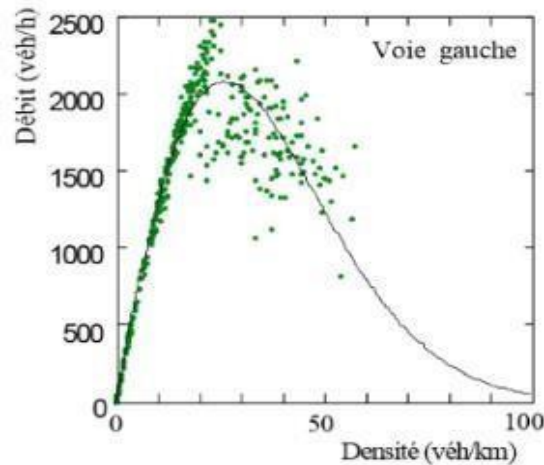
Le diagramme fondamental (3/4)

□ Principaux modèles des diagrammes :

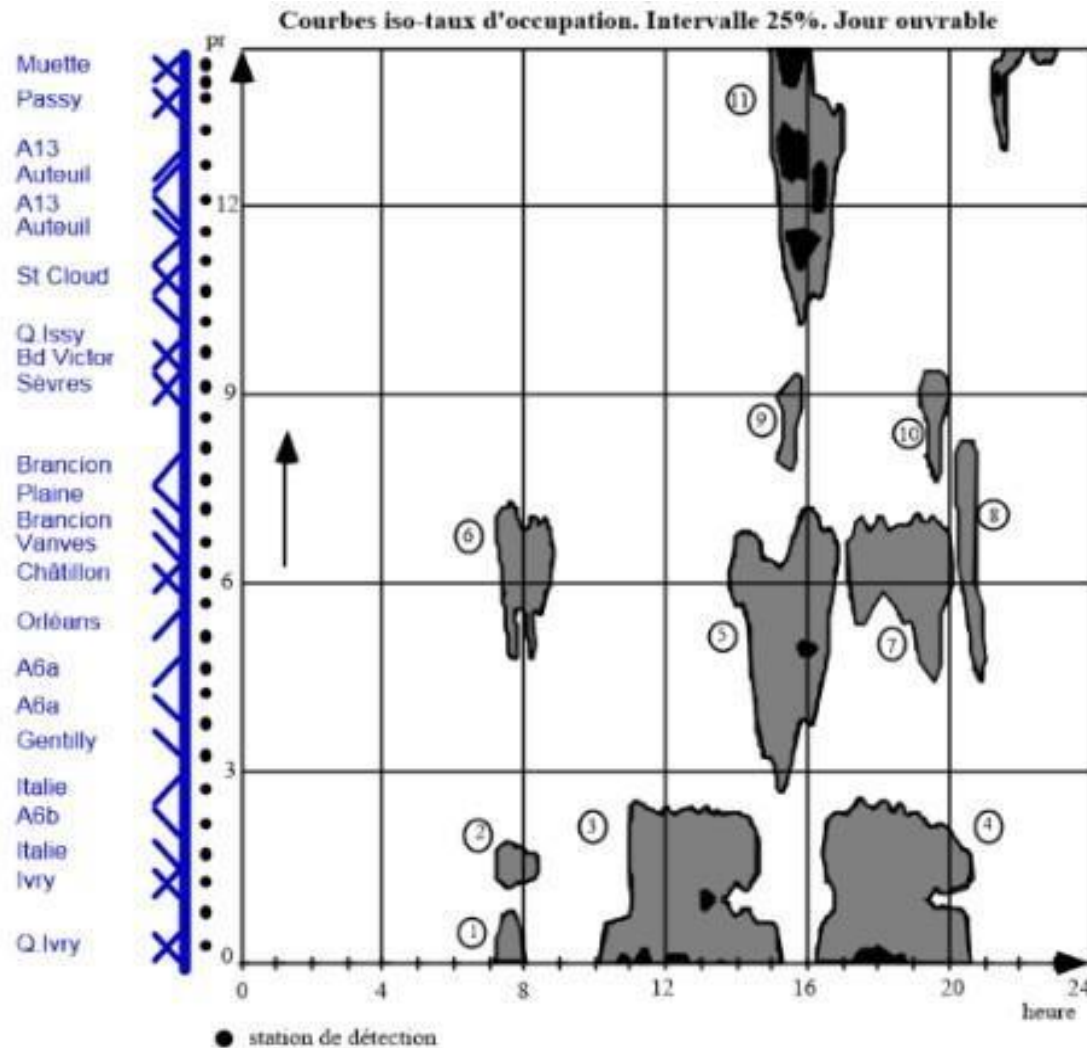


Le diagramme fondamental (4/4)

❑ **Exemple :** Section à 3 voies d'une autoroute péri-urbaine (A6)



La cartographie automatique



Le système de recueil de données (1/3)

Panorama des systèmes de recueil de données trafic Besoins des exploitants et autres besoins (1/3)

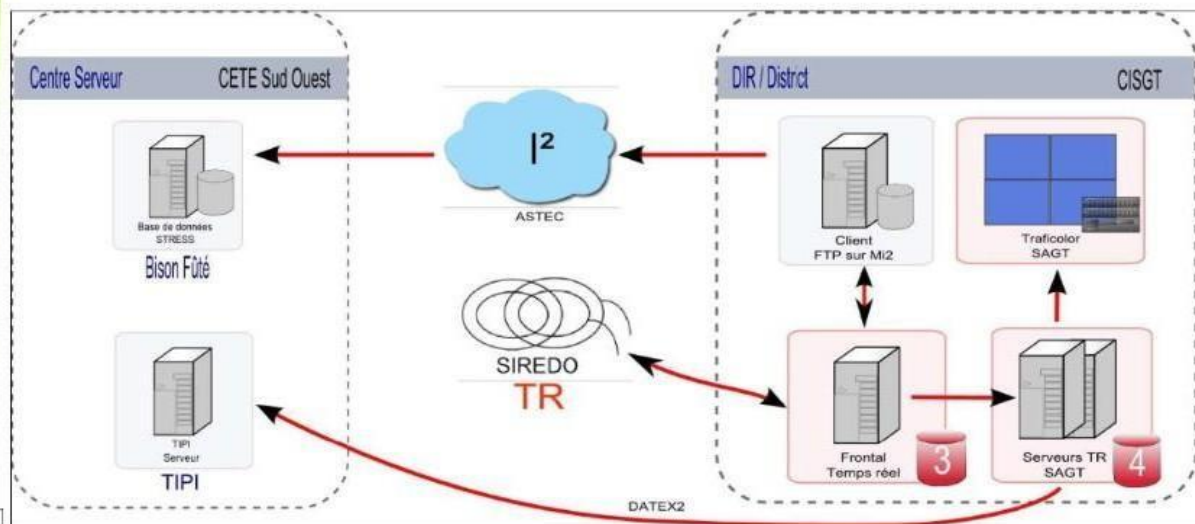
- Plusieurs types de besoins
 - Temps réel
 - Temps différé
 - Les recueils microscopiques
 - La détection de véhicules particuliers, de PMR et de piétons
 - Le contrôle automatisé des infractions
 - Autres besoins ponctuels et/ou spécifiques



Le système de recueil de données (2/3)

Panorama des systèmes de recueil de données trafic Besoins des exploitants et autres besoins (2/3)

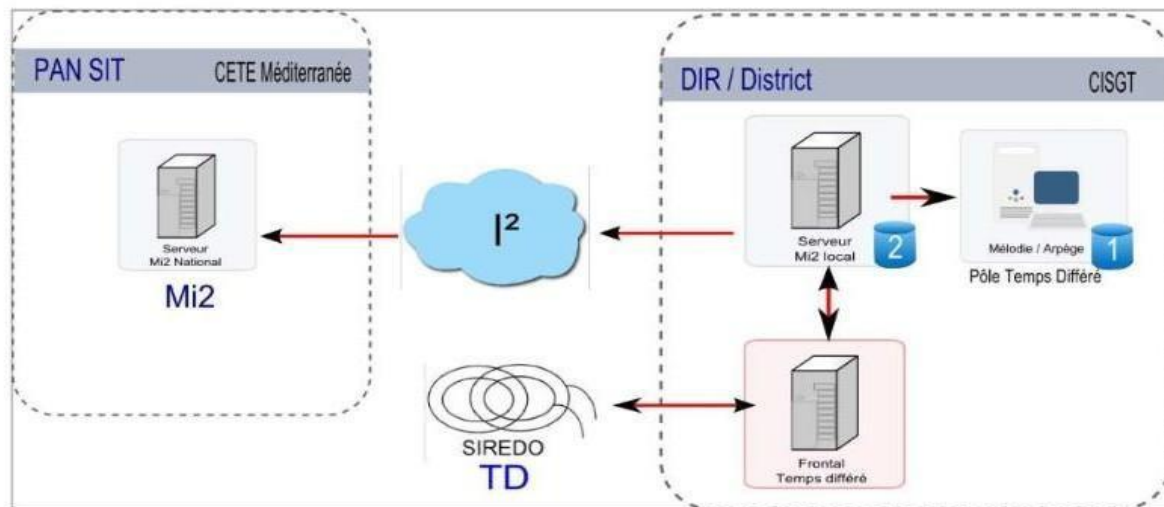
- Principes du recueil temps réel
 - Schéma présentant un recueil type en DIR
 - Frontal M12 ou spécifique



Le système de recueil de données (3/3)

Panorama des systèmes de recueil de données trafic Besoins des exploitants et autres besoins (3/3)

- Principes du recueil temps différé
 - Schéma présentant un **recueil type en DIR**
 - Les campagnes de **comptage en mode 4 x 1 semaine** s'ajoutent aux recueils des stations fixes
 - Frontal Mélodie ou spécifique
 - Une base de données **nationales** est alimentée à partir des recueils locaux
 - Architectures différentes dans les **Conseils Généraux**



Les mesures (1/4)

❑ À partir de capteurs fixes :

- boucles magnétiques
- vidéo
- plaques minéralogiques, ...

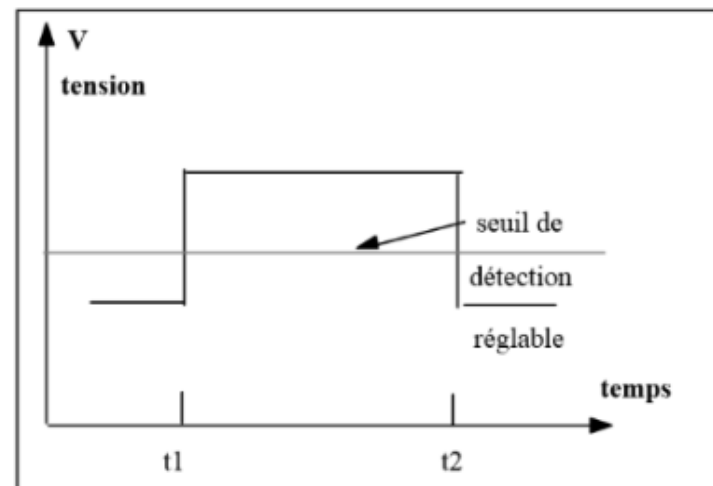
❑ À partir de capteurs mobiles :

- traceurs (identification badges)
- véhicule flottant
- localisation automatique
- GSM, ...

Les mesures (2/4)

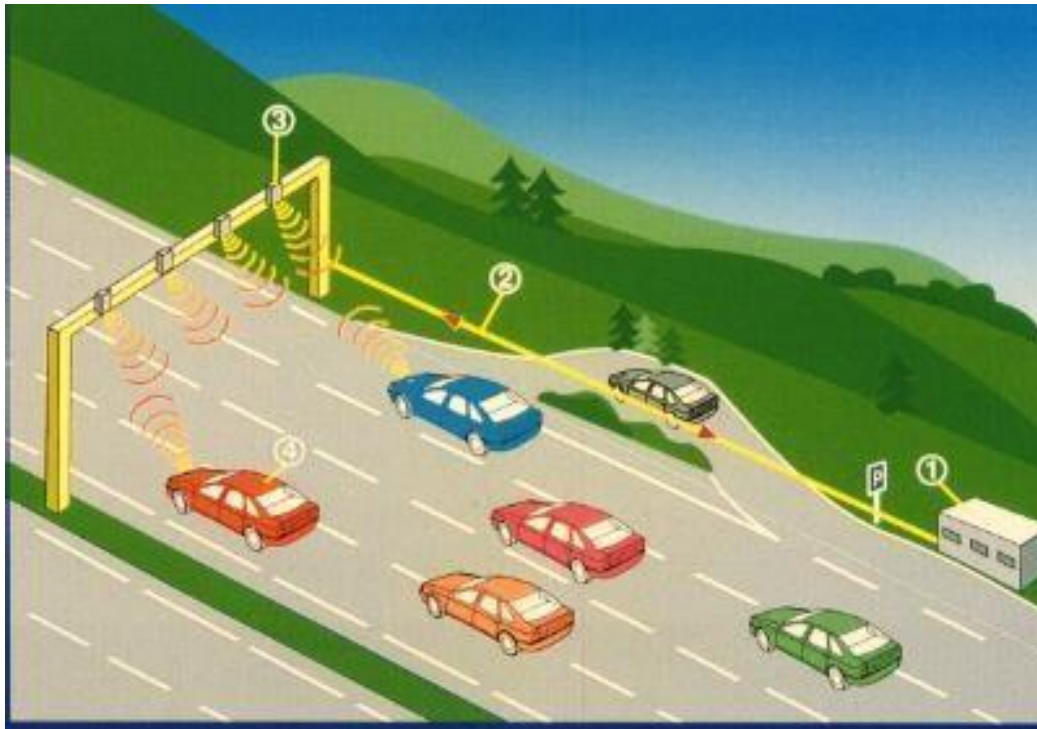
❑ Le boucle magnétique :

- Capteur (intrusif) constitué par une boucle inductive, généralement noyée dans la chaussée et reliée à un détecteur.
- Principe : Le passage des véhicules provoque une variation du champ électromagnétique, repérée par un créneau de tension. La longueur du créneau est liée à celle du véhicule et à son temps de passage.
- Un outil « traditionnel »



Les mesures (3/4)

❑ Véhicules traceurs :



- (1) Poste central
- (2) Réseau Communication
- (3) Balises
- (4) Badges embarqués



Les mesures (4/4)

❑ Lecture des plaques minéralogiques : Isère-système TEMPO

Site 1

Visée plaques arrières
Implantation accotement
Nombre de voie : 1



4. Etude des impacts

Les impacts

- ❑ Les trajectoires, le trafic et leurs caractéristiques ont des impacts :

1. Directs

Temps de parcours / attente aux arrêts



Performance pour les clients



Qualité de service → contrat



Performance pour l'opérateur

2. Indirects

Consommation d'énergie

Emissions de polluants

Bruit

Accidents

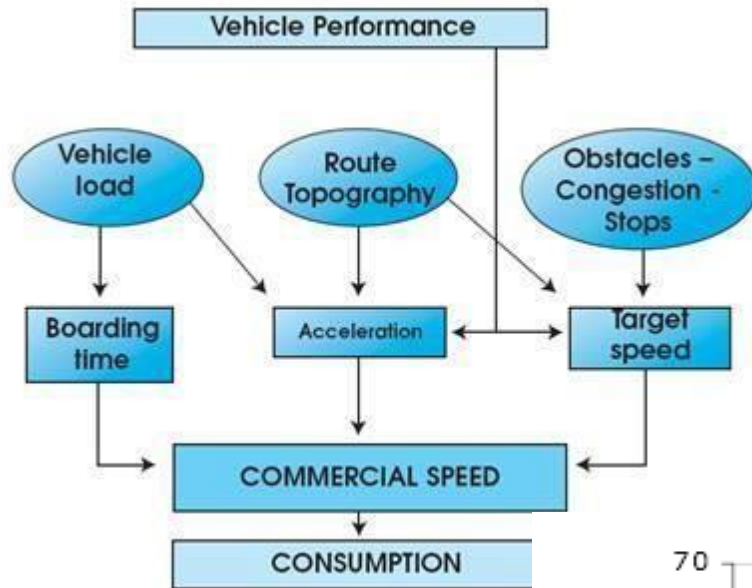
Cohérence de la ville

....



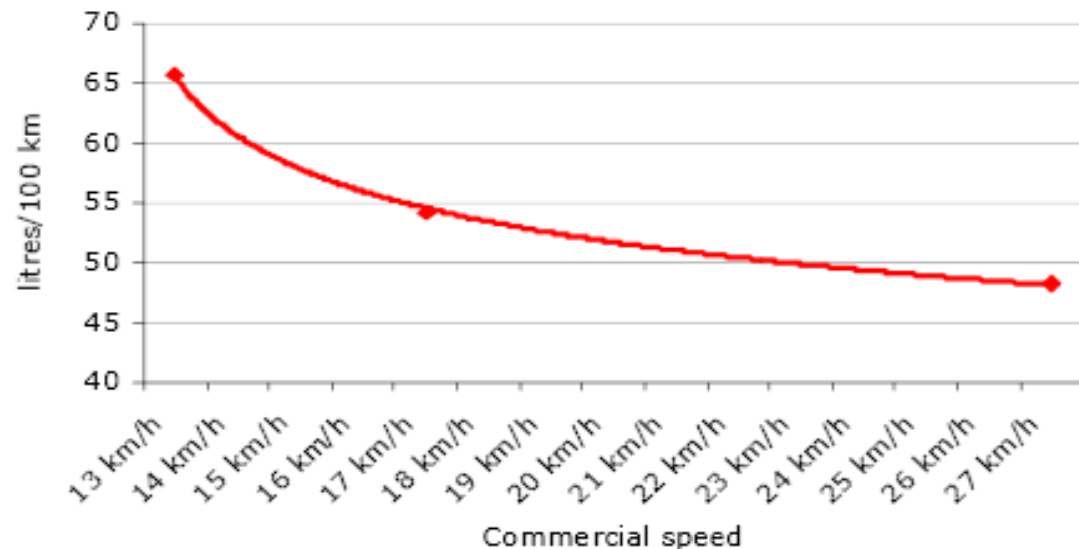
facteur critique : **la vitesse et sa variation**

Consommation d'énergie : bus (1/2)



Source : UITP

- ✓ De manière générale :
le bus a une **bonne** performance énergétique
- ❖ Toutefois : l'impact de la **vitesse** commerciale est critique !

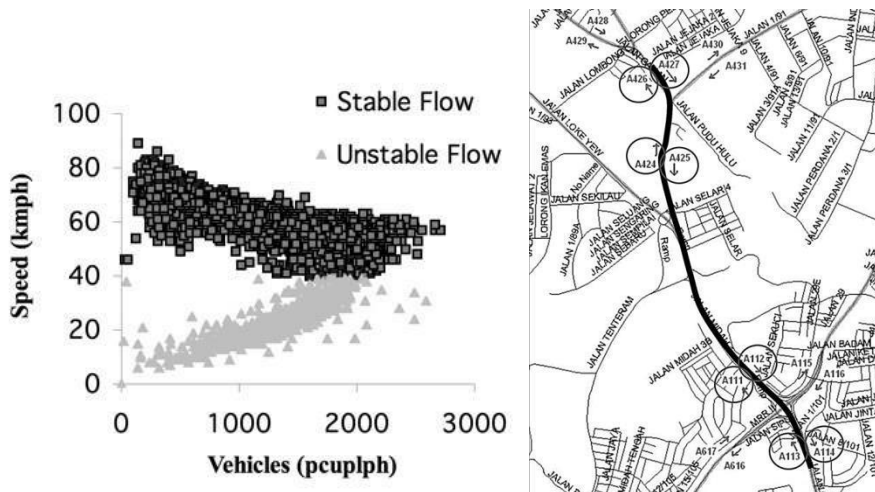


Consommation d'énergie : bus (2/2)

Etude de cas : Economies d'énergie - Kuala Lumpur

Scénarios:

1. BAU (business as usual)
2. BL (voie de bus réservée)
3. BRT (bus rapid transit)



Source : Hossain and Kennedy, 2008

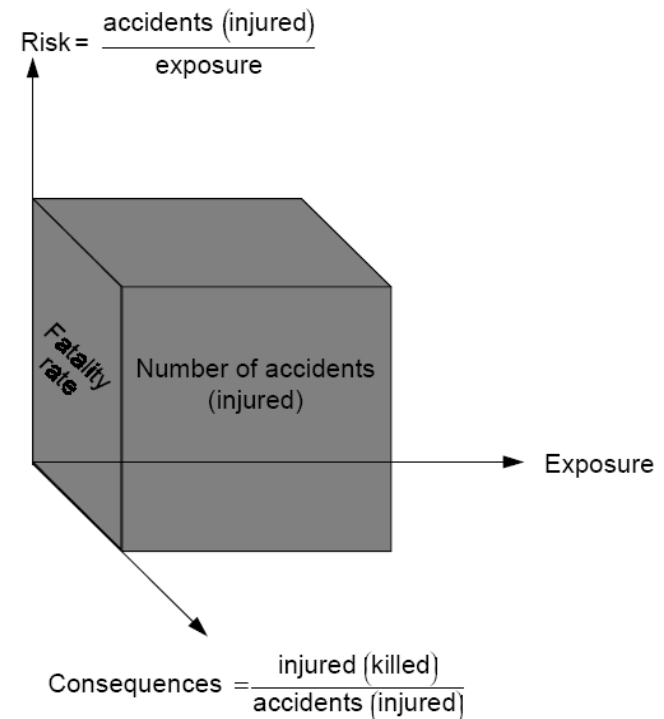
Lane Extension Case (LE)	Year	BAU	BL	BRT
	2010	0.55	0.53	0.42
			-4%	-24%
	2020	0.72	0.66	0.46
No Lane Extension Case (NLE)	Year	BAU	BL	BRT
	2010	0.59	0.57	0.45
			-3%	-24%
	2020	0.83	0.73	0.50
Improvement in Energy Savings Due to Lane Extension	Year	BAU	BL	BRT
	2010	6.8%	7%	6.7%
	2020	13.2%	9.6%	8%
Maximum Possible Energy Saving	Year	BAU	BL	BRT
	2010			29%**
	2020			45%**

Accidentologie (1/2)

- ❑ L'accident n'est presque jamais dû à un seul facteur, mais à une combinaison de facteurs contribuant à la défaillance.
- ❑ Les facteurs les plus importants sont les facteurs humains :
 - Alcoolémie
 - Fatigue
 - Distraction

❑ Exposition :

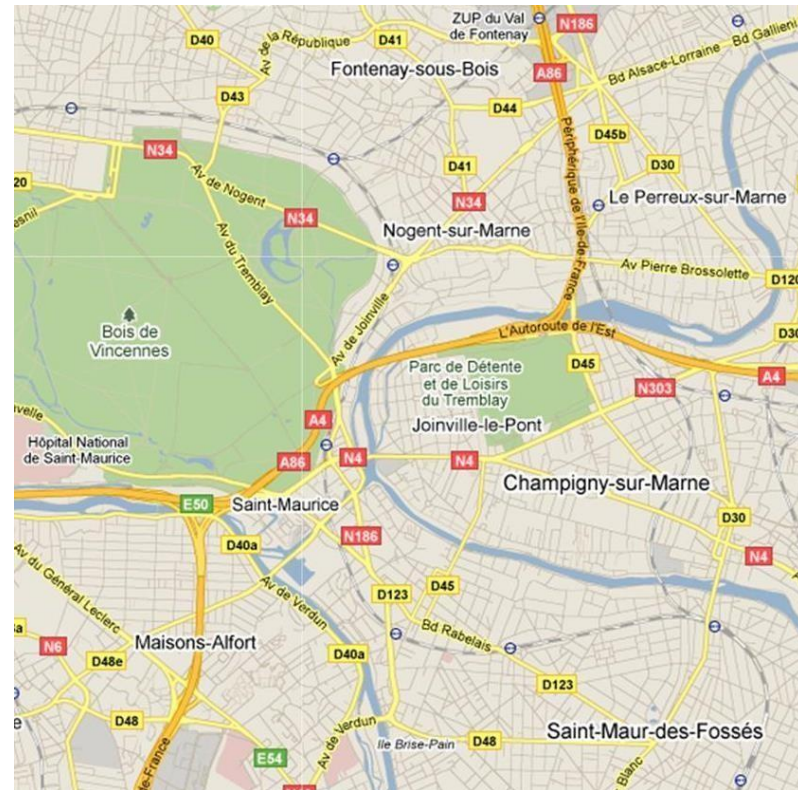
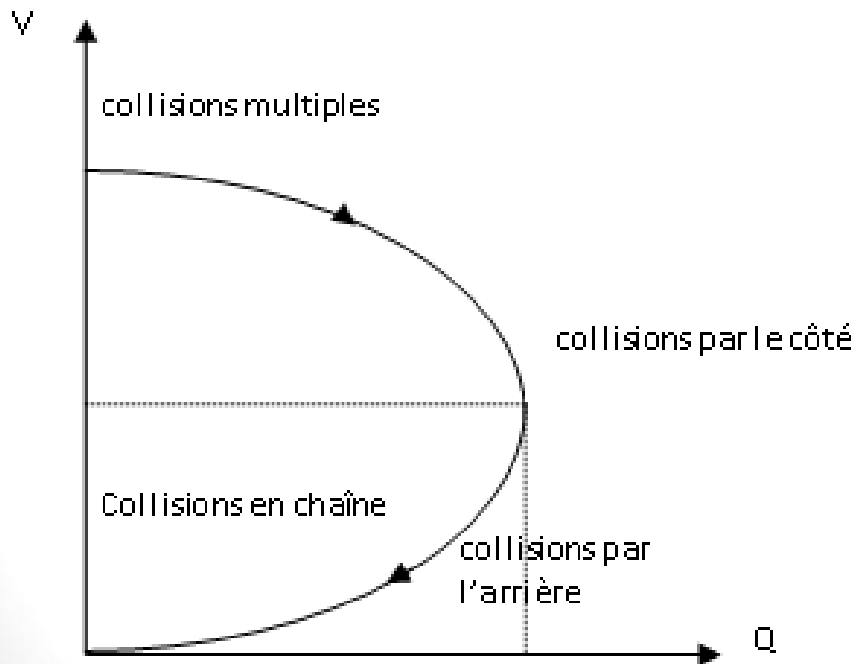
l'impact du trafic **ambiant**



Accidentologie (2/2)

Etude de cas : l'impact du trafic sur le type de collision

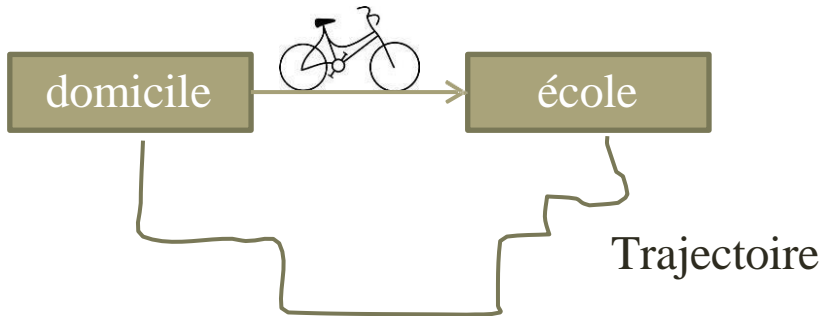
Tronc commun A4-A86



5. Modèles d'itinéraire

Définitions

- ❑ **Déplacement** : l'action de se déplacer d'un point à un autre



- ❑ **Itinéraire** : le trajet, le chemin parcouru pour aller d'un point à un autre

➤ Exemple : la succession des routes pour aller au travail (Cf. GPS)

- ❑ **Déplacement porte-à-porte** : l'ensemble de « sous-déplacements » nécessaires pour se déplacer d'un point d'origine à un point de destination finale



Concepts de base (1/2)

- ✓ **Intermodalité** : l'utilisation des plusieurs modes au cours d'un même déplacement
 - Le passage d'un mode à l'autre peut se faire de manière :
 - simple (cf. marche à pied → voiture) ou
 - plus complexe (cf. avion → voiture)
 - ✓ dans les cas complexes : pôle d'échange – ruptures de charge
 - La correspondance est critique (confort, facilité, lisibilité, temps)
 - exemple : correspondances d'avions
 - Elle joue un rôle majeur
 - ✓ au choix modal et
 - ✓ à la qualité de service rendu

Concepts de base (2/2)

❏ **Caractéristiques d'itinéraire selon le point de vue :**

- **Usager**
 - ✓ Temps de parcours
 - ✓ Lisibilité au long du trajet
- **Opérateur de service TC**
 - ✓ Temps sur un axe
 - ✓ Quelle fréquence de desserte pendant les HPM
- **Opérateur d'infrastructure**
 - ✓ Continuité dans le tracé
 - ✓ Signalisation directionnelle
- **Autorité organisatrice**
 - ✓ Intermodalité

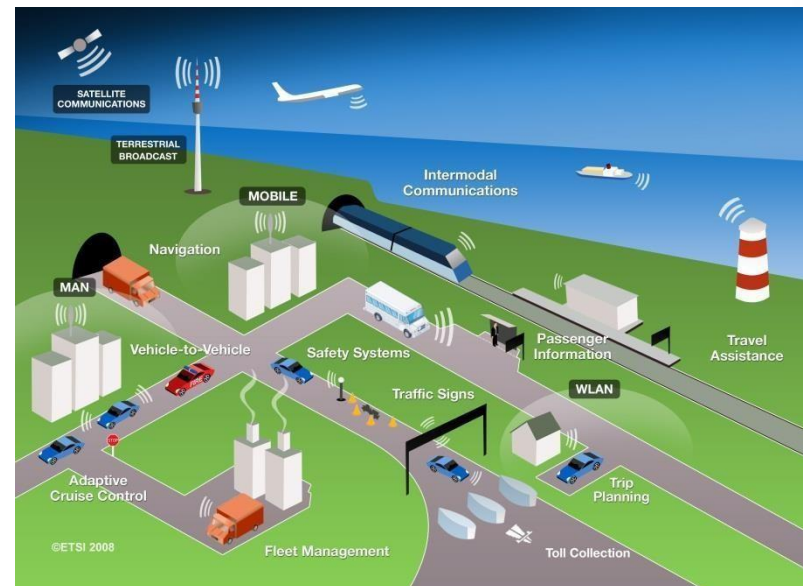
Applications ITS (1/4)

❑ Systèmes de Transports Intelligents :

les applications des nouvelles technologies de l'information
et de la communication au domaine des transports

➤ Des applications pour :

- l'utilisateur : navigation
- l'infrastructure : CCTV
- le véhicule : systèmes embarqués
- leurs interfaces : V2I



Applications ITS (2/4)

Exemple : **Advanced Traveler Information Systems**

- Objectif : optimisation de l'utilisation du réseau de transport (tous modes confondus) d'une région métropolitaine
- Méthode : par la modification d'itinéraire avant le déplacement ou en route
 - Recueil, traitement et diffusion d'informations en temps réel sur :
 - L'offre de transport (trafic RER perturbé, ...)
 - La demande (aires de stationnement vacantes, ...)

L'utilisateur modifie son heure de départ, son itinéraire et/ou ses modes de déplacement en fonction des informations reçues pour réaliser **le même déplacement**, le même trajet O-D

Applications ITS (3/4)

res - Vianavigo, vos transports sur Paris et l'Ile-de-France...

<http://www.viana>

The screenshot displays the Vianavigo website interface. At the top, there are navigation links: Aide, Accessibilité, Contact, Mon espace, Tous les sites, and a logo for 'un site du STIF'. The main content area is divided into several sections:

- Itinéraire & Plan de quartier**: Includes a search bar for 'Départ (Adresse, arrêt, lieu...)' and 'Arrivée (Adresse, arrêt, lieu...)', a date selector (04/11/2012), a time selector (Départ à 23:05), and a 'Rechercher' button.
- Horaires & Plans de lignes**: A section for finding schedules and maps.
- Transports à proximité**: A section for finding nearby transport options.
- Actualités trafic**: A section for traffic updates, listing events like 'RER C - Travaux du 04 au 10 novembre' and 'Ligne P - Travaux du 28 au 30.10 et le 04.11'.
- Titres et tarifs**: A section for tickets and fares.
- Vos transports, mode d'emploi**: A section for transport modes.
- Actualités trafic**: A section for traffic updates.

A large map of Paris is displayed in the center, showing various transport lines and stations. The map includes labels for major stations like Gare du Nord, Gare de l'Est, Gare de Lyon, and Gare Montparnasse. A text box on the map says 'Par la carte, c'est facile !' and 'Zoomez sur le plan pour : - définir un itinéraire, - accéder aux horaires de ligne, - visualiser un plan de quartier.'

- le trafic routier ?
- les travaux ?
- les accidents ?
- la météo ?
- la qualité de l'air ?
- les vols, les trains ?
- le temps de correspondance ?

Applications ITS (4/4)

Florida's 511 Traveler Information System | Home

<http://www.fl511.com/>

Welcome to Florida's Statewide 511 Website

[Home](#) | [Traffic](#) | [My Florida 511](#) | [Construction Info](#) | [Emergency Info](#) | [Transit](#) | [Links](#) | [Help](#) | [Newsroom](#)

ALERTS: Due to a Jaguars Football Game expect delays in the Downtown area.

[View All Alerts](#)

[Printer-Friendly](#)

[Español](#)



Login to My Florida 511

Username

☐ Remember Me?

Login

[Forgot your password?](#)

Sign Up!

PLEASE CLICK ON YOUR REGION FOR CURRENT CONDITIONS



[INCIDENTS & CONSTRUCTION](#)

[TRAFFIC CAMERAS](#)

[CONNECT WITH FL511](#)

[FL511 APP](#)

Available on the
App Store

© Copyright 2009 Florida Department of Transportation. All Rights Reserved. [Privacy Policy](#)

[Home](#) | [Traffic](#) | [My Florida 511](#) | [Construction Info](#) | [Emergency Info](#) | [Transit](#) | [Links](#) | [Help](#) | [Newsroom](#) | [Site Map](#) | [Contact Us](#) | [Twitter Feeds](#) | [FL511 App](#)



[56]

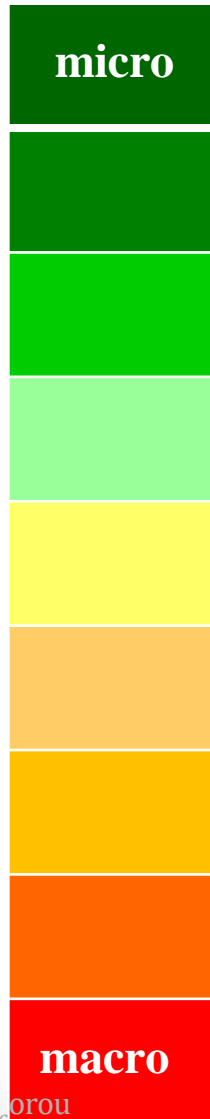
<http://www.youtube.com/watch?v=kWRaQfKmlSY>

6. Synthèse

Synthèse (1/3)

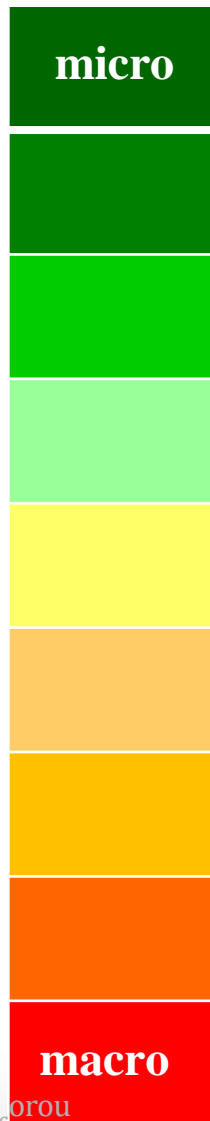
micro	Trajectoire de véhicule isolé
	Trajectoire de deux véhicules
	Interaction entre plusieurs véhicules
	Interaction véhicules-infra-usager
	Trafic et circulation sur un tronçon
	Trafic et circulation sur un axe, une route
	Déplacements monomodales sur un réseau
	Déplacements intermodales sur un réseau
macro	Trafic total sur le réseau de transport

Synthèse (2/3)



- De l'utilisateur au système
- Par des enquêtes et des mesures
- Agrégation des trajectoires → itinéraires
- Agrégation des itinéraires → le trafic total
- A court terme : prévisions, gestion du réseau
- A moyen terme : prévisions à partir des probabilités
- A long-terme : dimensionnement

Synthèse (3/3)



- **Du système à l'utilisateur**
- Par des mesures (boucles, tickets, ...)
- Désagrégation du trafic aux itinéraires
- Désagrégation des itinéraires aux trajectoires
- A court terme : la gestion du réseau, infos aux usagers
- A moyen terme : impact des interventions
- A long-terme : aménagement des territoires

Merci
