Les Systèmes Coopératifs de Transport Intelligents (C-ITS)

Maxime Guériau

Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR),
Université de Lyon 1

Smart environments : C-ITS

Mercredi 14 décembre 2016

Sommaire

1 Les transports intelligents hier, aujourd'hui et demain
- Depuis les années 70
- Aujourd'hui et demain

2 De l'aide à la conduite aux véhicules entièrement autonomes
- Véhicule intelligent ?
- Contexte technologique actuel
- Véhicule automatisé ?
- Véhicule coopératif ?

3 Systèmes Coopératifs de trafic
- Un monde connecté !
- Architecture
- Enjeux des C-ITS ?

4 Modélisation des Systèmes Coopératifs
- Comment modéliser la coopération ?
- Approche
- Simulation

Sommaire

1 Les transports intelligents hier, aujourd'hui et demain
- Depuis les années 70
- Aujourd'hui et demain

2 De l'aide à la conduite aux véhicules entièrement autonomes
- Véhicule intelligent ?
- Contexte technologique actuel
- Véhicule automatisé ?
- Véhicule coopératif ?

3 Systèmes Coopératifs de trafic
- Un monde connecté !
- Architecture
- Enjeux des C-ITS ?

4 Modélisation des Systèmes Coopératifs
- Comment modéliser la coopération ?
- Approche
- Simulation

Sommaire

1 Les transports intelligents hier, aujourd'hui et demain
- Depuis les années 70
- Aujourd'hui et demain

2 De l'aide à la conduite aux véhicules entièrement autonomes
- Véhicule intelligent ?
- Contexte technologique actuel
- Véhicule automatisé ?
- Véhicule coopératif ?

3 Systèmes Coopératifs de trafic
- Un monde connecté !
- Architecture
- Enjeux des C-ITS ?

4 Modélisation des Systèmes Coopératifs
- Comment modéliser la coopération ?
- Approche
- Simulation

Sommaire

1. Les transports intelligents hier, aujourd'hui et demain
   - Depuis les années 70
   - Aujourd'hui et demain
2. De l'aide à la conduite aux véhicules entièrement autonomes
   - Véhicule intelligent ?
   - Contexte technologique actuel
   - Véhicule automatisé ?
   - Véhicule coopératif ?
3. Systèmes Coopératifs de trafic
   - Un monde connecté !
   - Architecture
   - Enjeux des C-ITS ?
4. Modélisation des Systèmes Coopératifs
   - Comment modéliser la coopération ?
   - Approche
   - Simulation

Les Systèmes Coopératifs

1. Les transports intelligents hier, aujourd'hui et demain
   - Depuis les années 70
     - Années 70 à 90
     - Années 2000
     - Quels défis pour l'avenir ?
   - Aujourd'hui et demain
     - Contexte Européen

Les Systèmes Coopératifs

1. Les transports intelligents hier, aujourd'hui et demain
   - Depuis les années 70
     - Années 70 à 90
     - Années 2000
     - Quels défis pour l'avenir ?
   - Aujourd'hui et demain
     - Contexte Européen

Historique : Années 70 à 90

- Informations aux usagers



- Régulation des feux tricolores
- Métro automatique
- Panneaux à messages variables
- Contrôle des bus
- Billetterie sur carte à puce
- Télépéage

Historique : Années 70 à 90

- Informations aux usagers



- Régulation des feux tricolores
- Métro automatique
- Panneaux à messages variables
- Contrôle des bus
- Billetterie sur carte à puce
- Télépéage

Historique : Années 70 à 90

- Informations aux usagers



- Régulation des feux tricolores
- Métro automatique



- Panneaux à messages variables
- Contrôle des bus
- Billetterie sur carte à puce
- Télépéage

Historique : Années 70 à 90

- Informations aux usagers



- Régulation des feux tricolores
- Métro automatique



- Panneaux à messages variables



- Contrôle des bus
- Billetterie sur carte à puce
- Télépéage

Historique : Années 70 à 90

- Informations aux usagers



- Régulation des feux tricolores
- Métro automatique



- Panneaux à messages variables



- Contrôle des bus
- Billetterie sur carte à puce
- Télépéage

Historique : Années 70 à 90

- Informations aux usagers



- Régulation des feux tricolores
- Métro automatique



- Panneaux à messages variables



- Contrôle des bus
- Billetterie sur carte à puce
- Télépéage

Historique : Années 70 à 90

- Informations aux usagers



- Régulation des feux tricolores
- Métro automatique



- Panneaux à messages variables



- Contrôle des bus
- Billetterie sur carte à puce
- Télépéage



Historique : Années 2000

- Vélos en libre service



- Autopartage
- Covoiturage

Historique : Années 2000

- Vélos en libre service



- Autopartage



- Covoiturage

Historique : Années 2000

- Vélos en libre service



- Autopartage



- Covoiturage

BlaBlaCar

Quels défis pour l'avenir ?

- Accès aux zones urbaines et périurbaines
- Congestion
- Transition énergétique
- Enjeux économiques

Les Systèmes Coopératifs

1. Les transports intelligents hier, aujourd'hui et demain
   - Depuis les années 70
     - Années 70 à 90
     - Années 2000
     - Quels défis pour l'avenir ?
   - Aujourd'hui et demain
     - Contexte Européen

Contexte Européen



- Projet SCOOP :
  - Modifier la gestion du trafic et l'information routière.
  - Remplacer les équipements dynamiques
  - Améliorer le service
  - Sensibiliser les constructeurs
- en chiffres :
  - 20 millions d'euros
  - 3 000 véhicules
  - 2 000 km de routes et rues
  - 5 sites pilotes

Les Systèmes Coopératifs

2 De l'aide à la conduite aux véhicules entièrement autonomes

- Véhicule intelligent ?
- Contexte technologique actuel
  - Communication
  - Localisation
  - Capteurs
- Véhicule automatisé ?
  - Systèmes ADAS
  - Véhicules automatiques
- Véhicule coopératif ?
  - Résumé
  - Exemple
  - Objectif

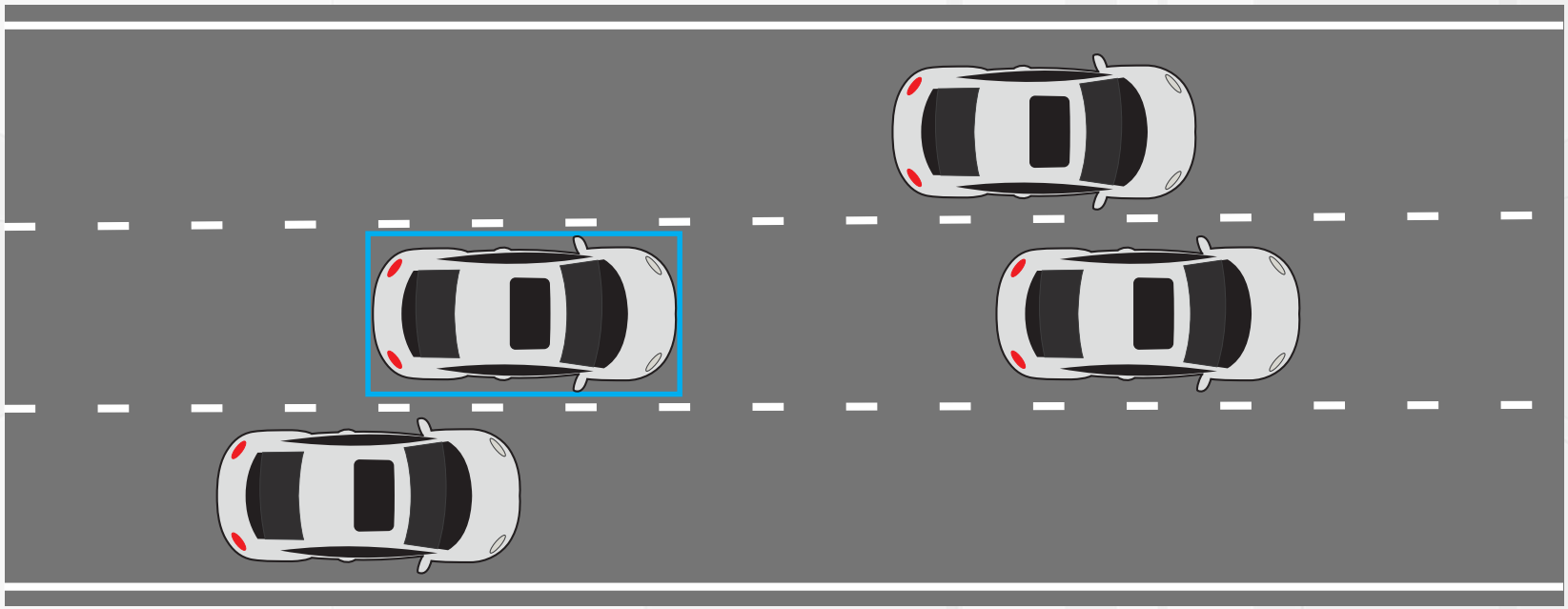
Les Systèmes Coopératifs

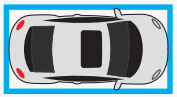
2 De l'aide à la conduite aux véhicules entièrement autonomes

- Véhicule intelligent ?
- Contexte technologique actuel
  - Communication
  - Localisation
  - Capteurs
- Véhicule automatisé ?
  - Systèmes ADAS
  - Véhicules automatiques
- Véhicule coopératif ?
  - Résumé
  - Exemple
  - Objectif

Véhicule intelligent ?

- Véhicule classique

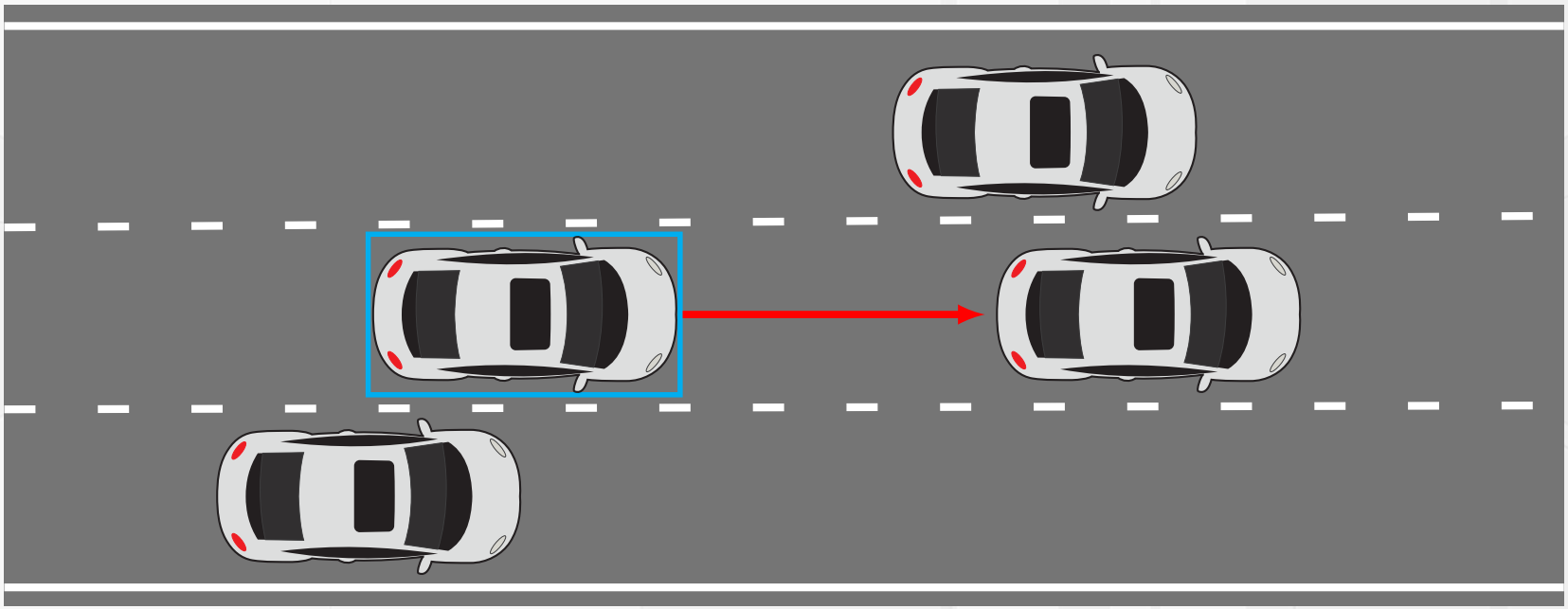




Véhicule courant

Véhicule intelligent ?

- Véhicule équipé

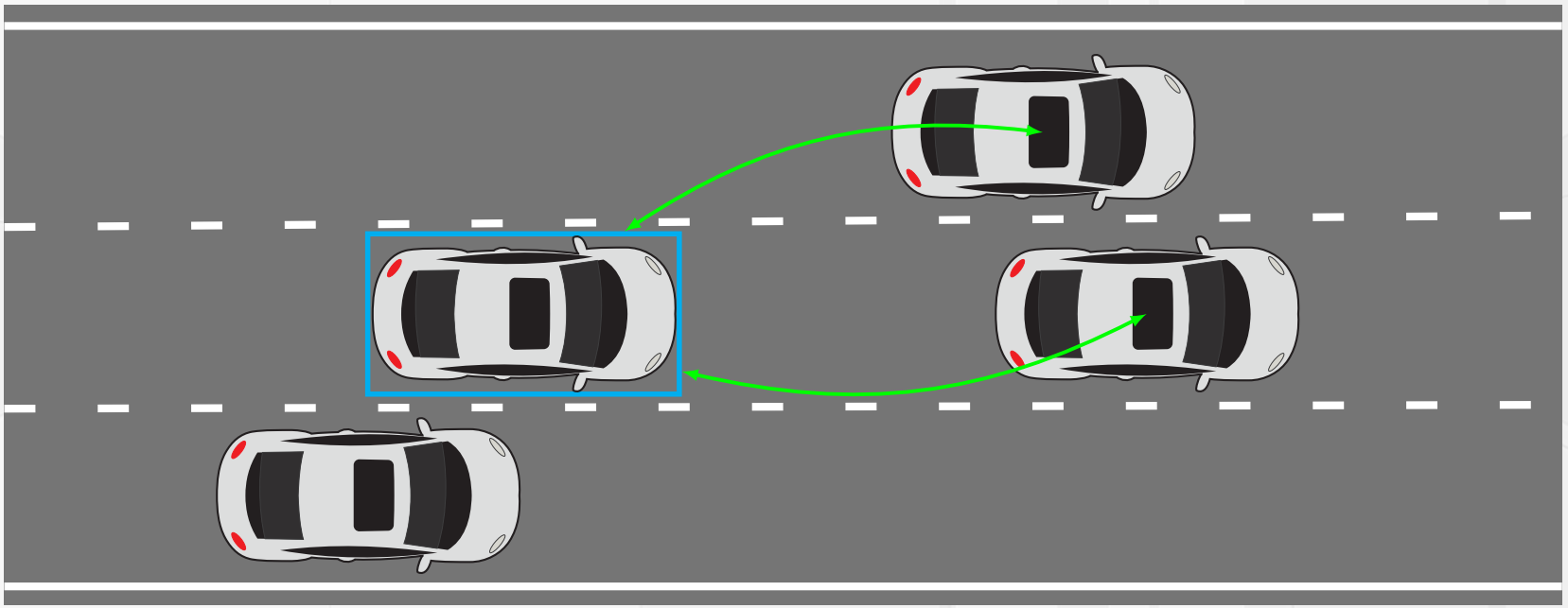


 Véhicule courant

 Mesure capteur

Véhicule intelligent ?

- Véhicule connecté (V2V)



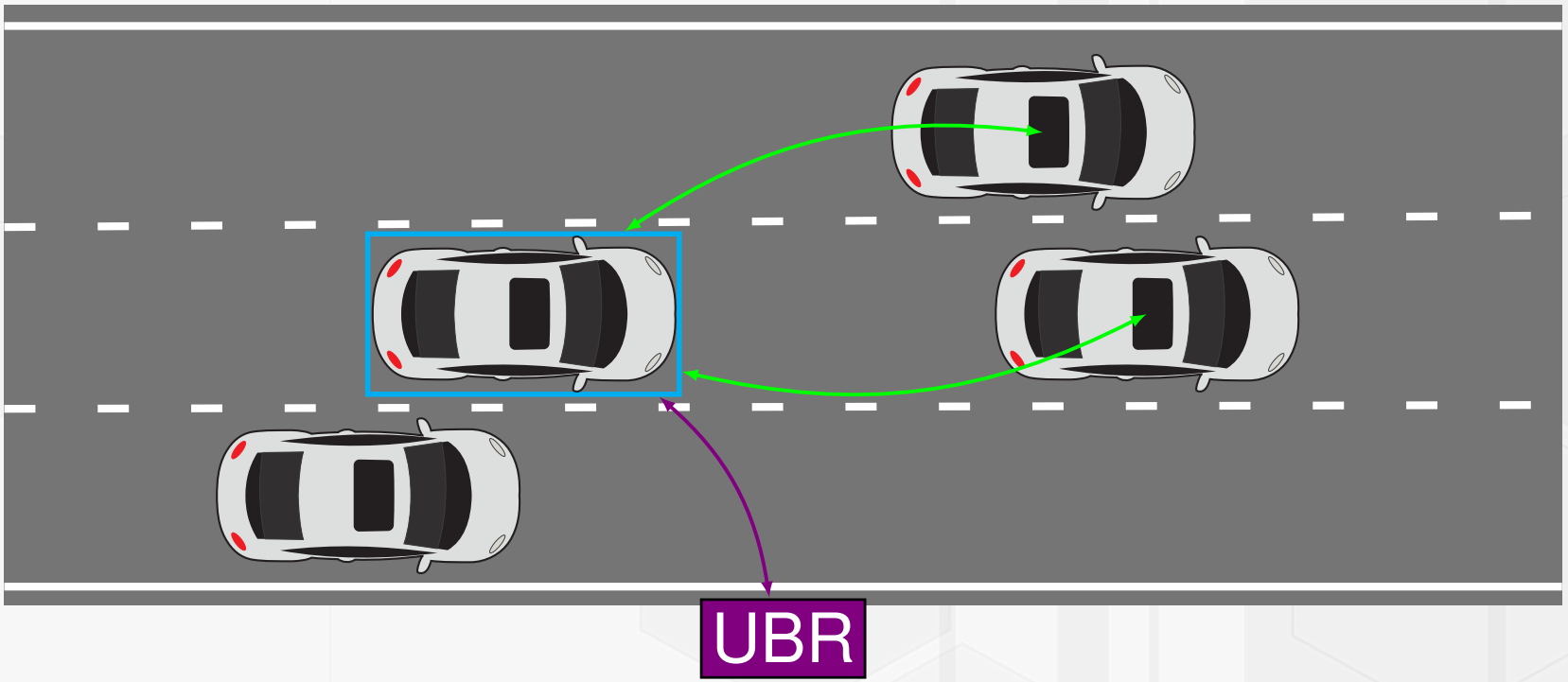


Véhicule courant

Informations échangées – V2V

Véhicule intelligent ?

- Véhicule connecté (V2V & V2I/I2V)





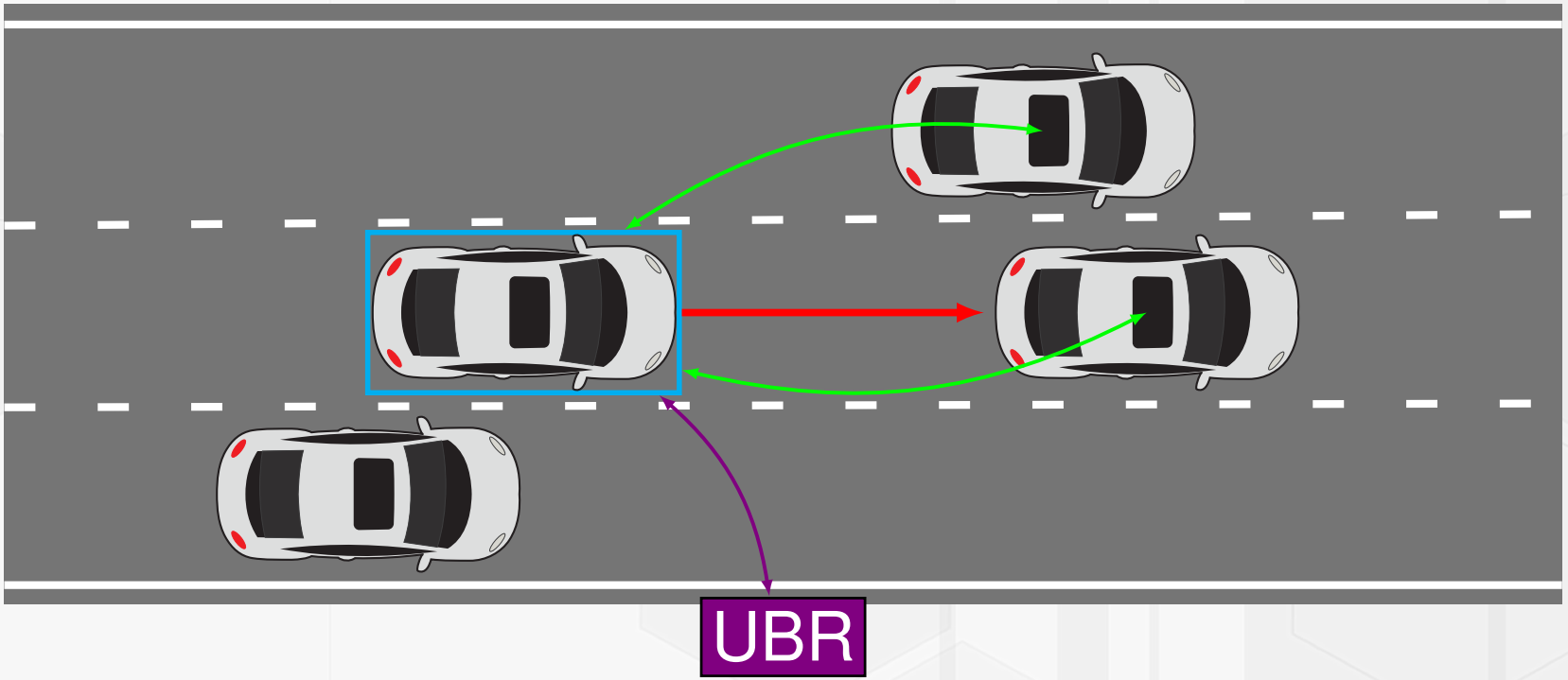
Véhicule courant

Informations échangées – V2V

V2I/I2V

Véhicule intelligent ?

- Véhicule intelligent



Véhicule courant

Mesure capteur

Informations échangées – V2V

V2I/I2V

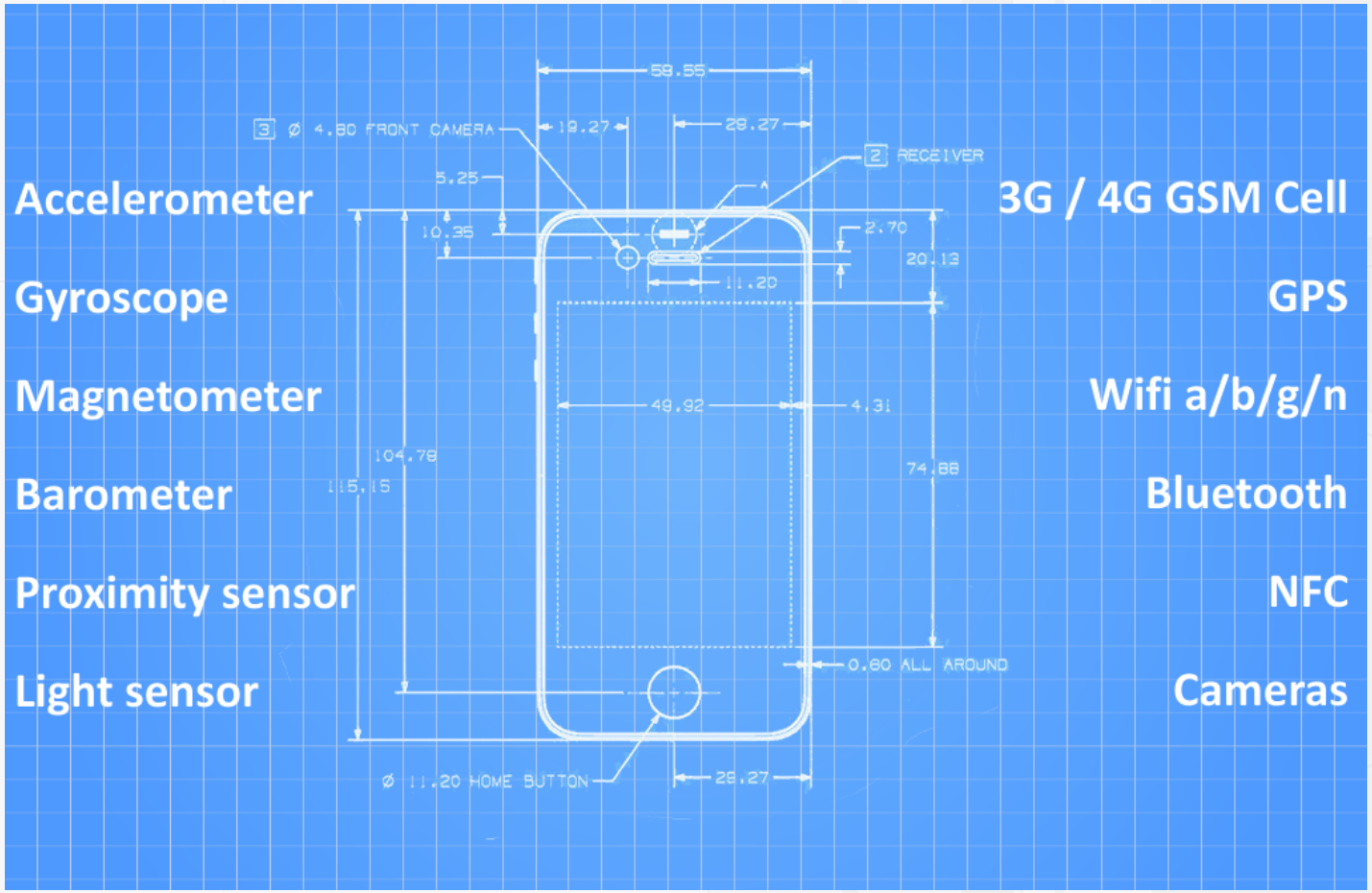
Les Systèmes Coopératifs

2 De l'aide à la conduite aux véhicules entièrement autonomes

- Véhicule intelligent ?
- Contexte technologique actuel
  - Communication
  - Localisation
  - Capteurs
- Véhicule automatisé ?
  - Systèmes ADAS
  - Véhicules automatiques
- Véhicule coopératif ?
  - Résumé
  - Exemple
  - Objectif

Contexte technologique : Smartphone

Autopsie d'un smartphone :



Contexte technologique : Capteurs embarqués

Un véhicule bien équipé :



Contexte technologique : Communication

- Standardisation



Contexte technologique : Communication

- Standardisation

- Wifi IEEE 802.11p

Contexte technologique : Communication

- Standardisation



- Wifi IEEE 802.11p



- Réseau cellulaire

Contexte technologique : Communication

- Standardisation
- Wifi IEEE 802.11p
- Réseau cellulaire
- Bluetooth

Contexte technologique : Communication

- Standardisation



- Wifi IEEE 802.11p



- Réseau cellulaire
- Bluetooth



Contexte technologique : Localisation

- GPS

Contexte technologique : Localisation

- GPS
- Galileo



Contexte technologique : Localisation

- GPS
- Galileo
- Réseau cellulaire et A-GPS



Contexte technologique : Perception

Des idées ?

Contexte technologique : Perception

- Télémétrie





Contexte technologique : Perception

- Télémétrie





- Scanner 3D



Contexte technologique : Perception

- Télémétrie





- Scanner 3D



- Stéreovision



Les Systèmes Coopératifs

2 De l'aide à la conduite aux véhicules entièrement autonomes

- Véhicule intelligent ?
- Contexte technologique actuel
  - Communication
  - Localisation
  - Capteurs
- Véhicule automatisé ?
  - Systèmes ADAS
  - Véhicules automatiques
- Véhicule coopératif ?
  - Résumé
  - Exemple
  - Objectif

Véhicules automatisés : Systèmes ADAS

- Lane-Keeping System



- Active park-assist

Véhicules automatisés : Systèmes ADAS

- Lane-Keeping System



- Active park-assist



Véhicules automatisés : Systèmes ADAS (2)

- Adaptive Cruise Control



Véhicules automatisés : Systèmes ADAS (3)

- Collision avoidance



Véhicules automatisés : Systèmes ADAS (3 bis)

- Collision avoidance



Véhicules automatiques : sans conducteur !

- Google Car



- DARPA Challenge

Véhicules automatiques : sans conducteur !

- Google Car



- DARPA Challenge





Véhicules automatiques : sans conducteur ! (2)

- DARPA Challenge (Bonus)



Véhicules automatiques : Platooning

- Projet ANR Safeplatoon



Véhicules automatiques : Piloted Parking

- Démonstration commerciale Audi

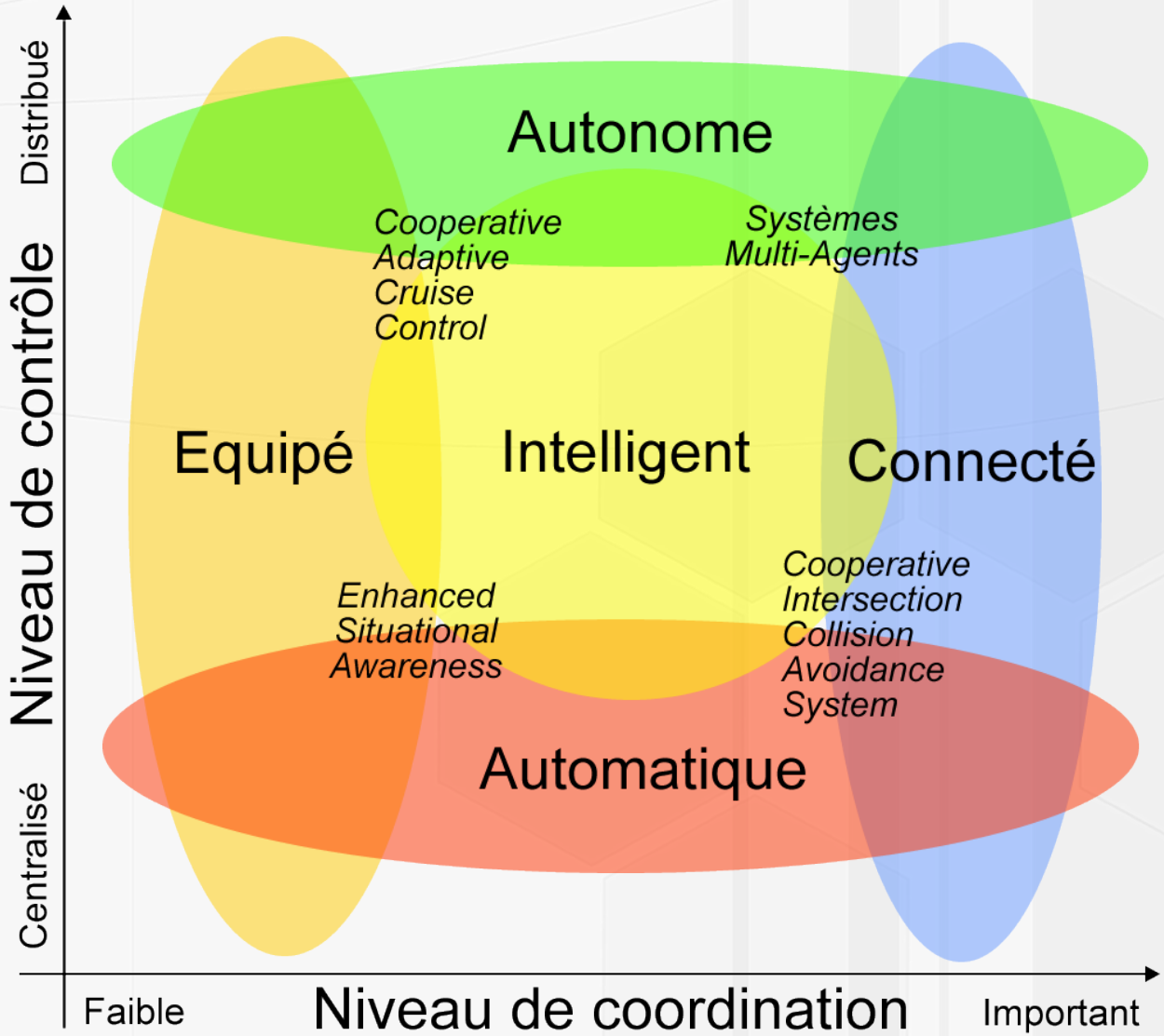


Les Systèmes Coopératifs

2 De l'aide à la conduite aux véhicules entièrement autonomes

- Véhicule intelligent ?
- Contexte technologique actuel
  - Communication
  - Localisation
  - Capteurs
- Véhicule automatisé ?
  - Systèmes ADAS
  - Véhicules automatiques
- Véhicule coopératif ?
  - Résumé
  - Exemple
  - Objectif

Véhicule coopératif

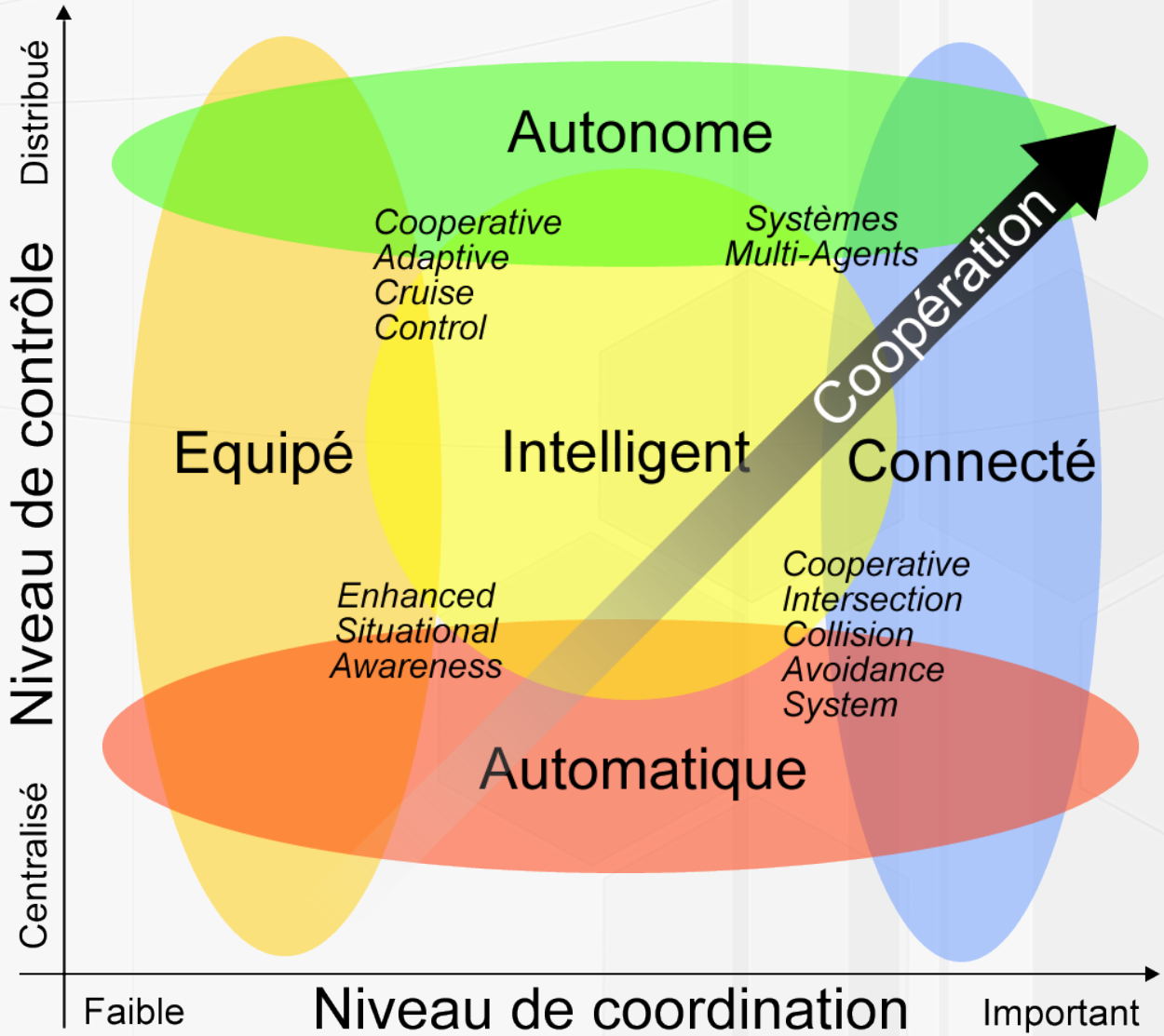


Véhicules coopératifs : CACC

- Cooperative Adaptive Cruise Control



Véhicule coopératif



Les Systèmes Coopératifs

3 Systèmes Coopératifs de trafic

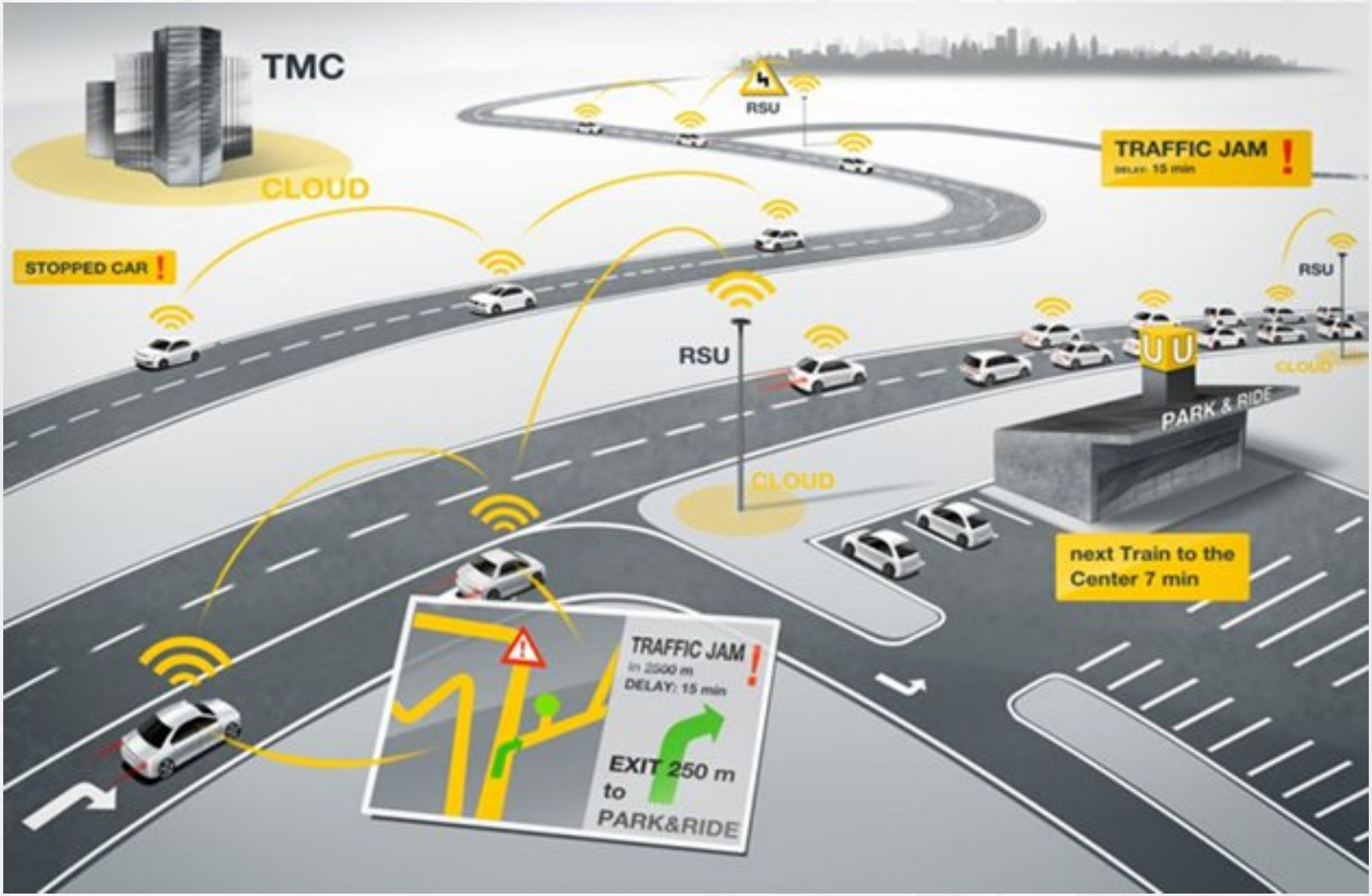
- Un monde connecté !
- Architecture
- Enjeux des C-ITS ?

Les Systèmes Coopératifs

3 Systèmes Coopératifs de trafic

- Un monde connecté !
- Architecture
- Enjeux des C-ITS ?

Systèmes Coopératifs : Un monde connecté !

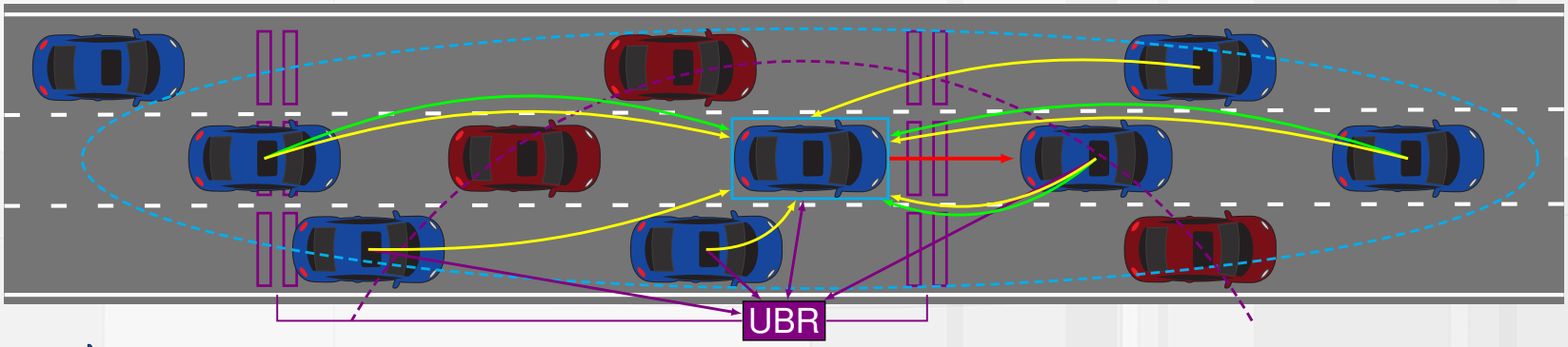


Les Systèmes Coopératifs

3 Systèmes Coopératifs de trafic

- Un monde connecté !
- Architecture
- Enjeux des C-ITS ?

Systèmes Coopératifs : architecture



Véhicule connecté

Véhicule non-connecté

Mesure directe $(\Delta x, \Delta \dot{x})$

Mesure échangée $(\Delta x, \Delta \dot{x}, x, \dot{x})$

Valeur de confiance partagée

Véhicule courant

Rayon de communication

Stratégie de contrôle

Rayon de com. de l'UBR

Boucle électromagnétique

Les Systèmes Coopératifs

3 Systèmes Coopératifs de trafic

- Un monde connecté !
- Architecture
- Enjeux des C-ITS ?

Systèmes Coopératifs : les enjeux

- Enjeux des systèmes coopératifs =
  - Sécurité
  - Fluidité
  - Confort
  - Environnement

Systèmes Coopératifs : les enjeux

- Enjeux des systèmes coopératifs =
  - Sécurité
  - Fluidité
  - Confort
  - Environnement

Systèmes Coopératifs : les enjeux

- Enjeux des systèmes coopératifs =
  - Sécurité
  - Fluidité
  - Confort
  - Environnement

Systèmes Coopératifs : les enjeux

- Enjeux des systèmes coopératifs =
  - Sécurité
  - Fluidité
  - Confort
  - Environnement

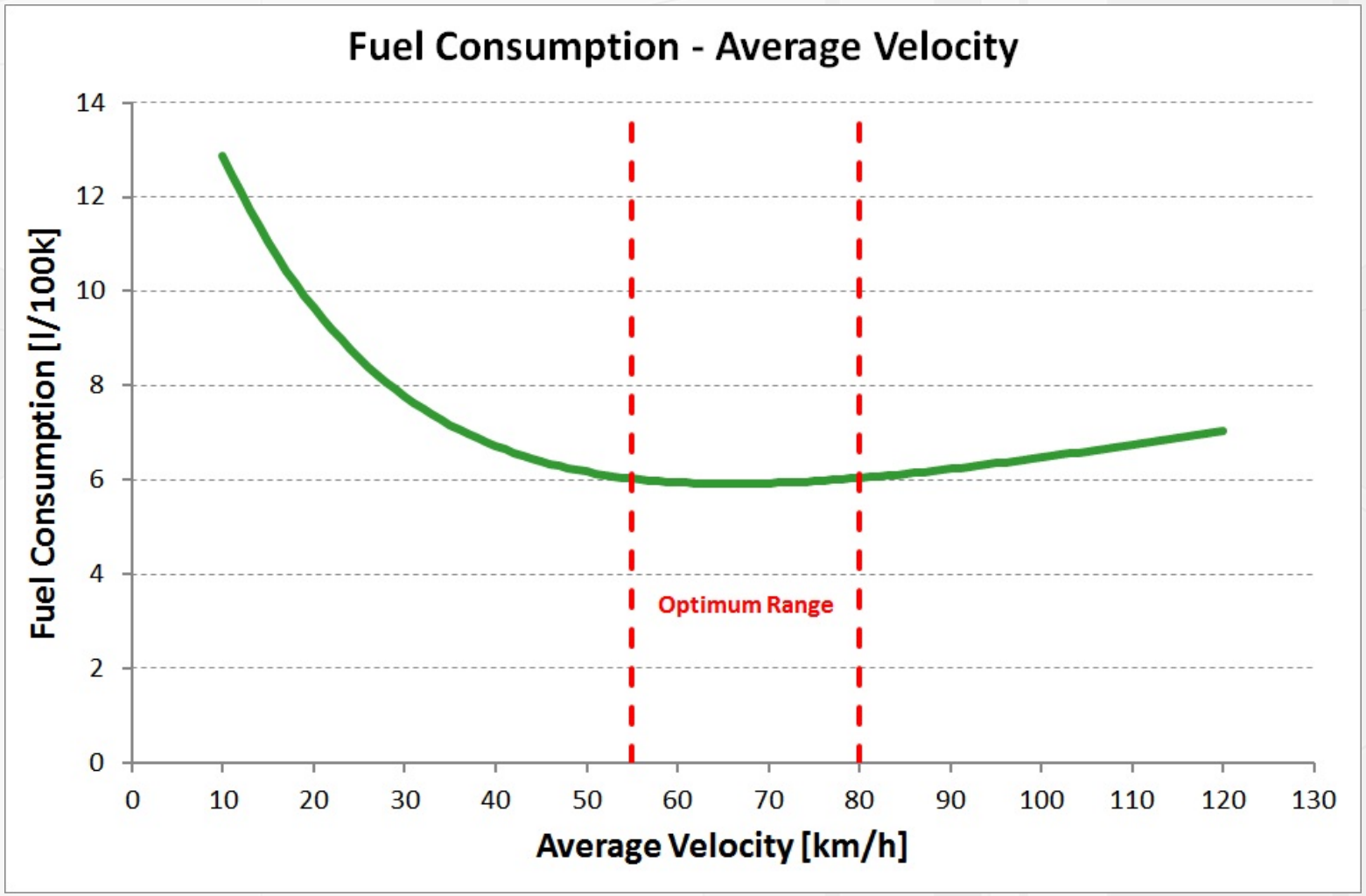
Systèmes Coopératifs : les enjeux

- Enjeux des systèmes coopératifs =
  - Sécurité
  - Fluidité
  - Confort
  - Environnement

Systèmes Coopératifs : les enjeux

- Enjeux des systèmes coopératifs = trafic + homogène et + stable
  - Sécurité
  - Fluidité
  - Confort
  - Environnement

Systèmes Coopératifs : l'enjeu environnemental



Les Systèmes Coopératifs

4 Modélisation des Systèmes Coopératifs

- Comment modéliser la coopération ?
  - Problématique
  - Approche centralisée/décentralisée ?
- Approche
  - Rappel : niveaux de modélisation du trafic
  - Modèle non-coopératif
  - Application : conditions de statiblité
  - Modèle coopératif
  - Application : homogénéisation du flux
  - Application : Stratégies de contrôle
- Simulation
  - Résultats
  - Application : Stratégies de contrôle (2)
  - Démonstration

Les Systèmes Coopératifs

4 Modélisation des Systèmes Coopératifs

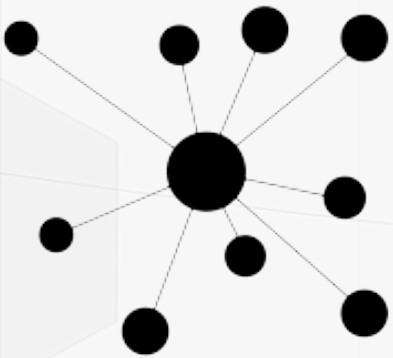
- Comment modéliser la coopération ?
  - Problématique
  - Approche centralisée/décentralisée ?
- Approche
  - Rappel : niveaux de modélisation du trafic
  - Modèle non-coopératif
  - Application : conditions de statiblité
  - Modèle coopératif
  - Application : homogénéisation du flux
  - Application : Stratégies de contrôle
- Simulation
  - Résultats
  - Application : Stratégies de contrôle (2)
  - Démonstration

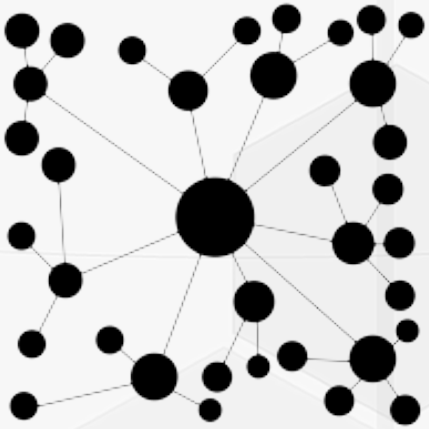
Modélisation : problématique

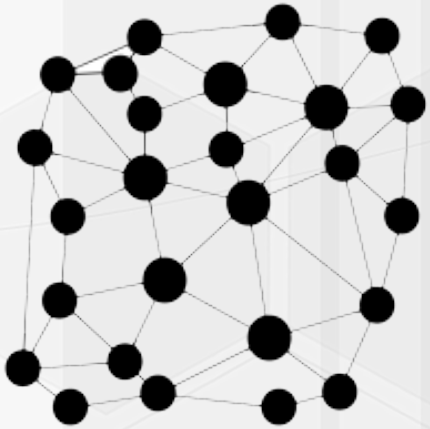
Coopération

La coopération dans les systèmes ouverts composés de multiples entités est une initiative individuelle orientant les actions d'une entité vers la délégation de toute ou partie d'une tâche par une autre entité.

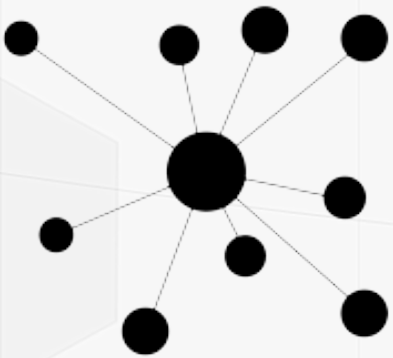
Modélisation : Approche centralisée/décentralisée ?

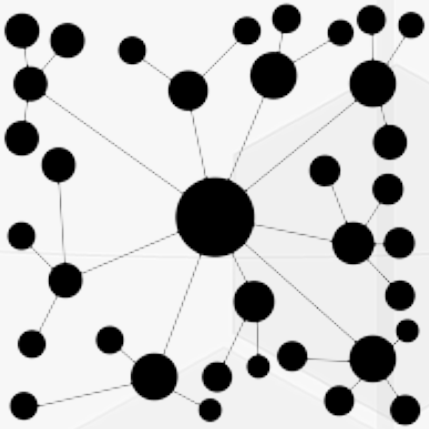


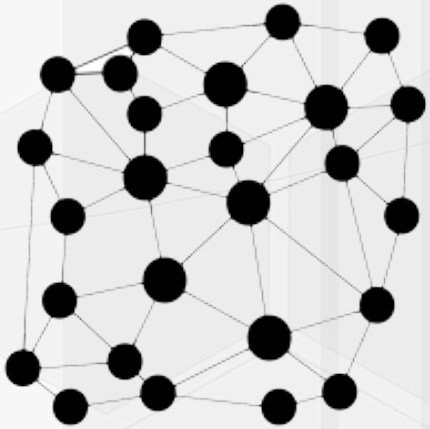




Modélisation : Approche centralisée/décentralisée ?

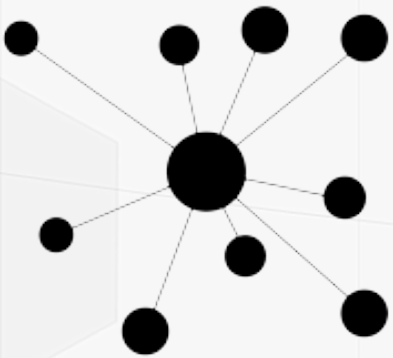




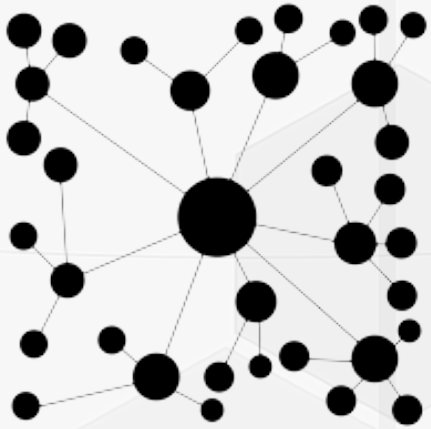


Centralisée

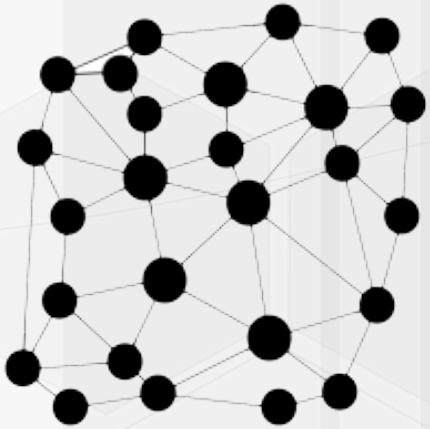
Modélisation : Approche centralisée/décentralisée ?



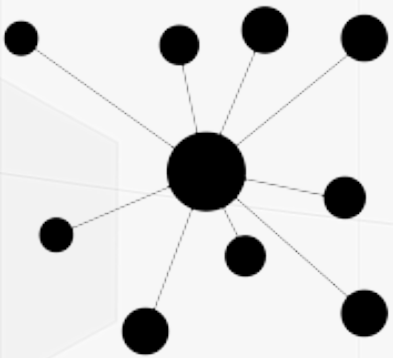
Centralisée



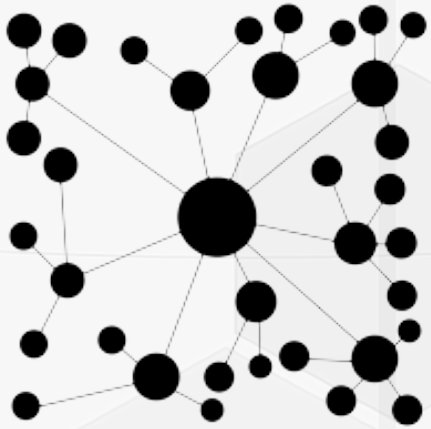
Décentralisée



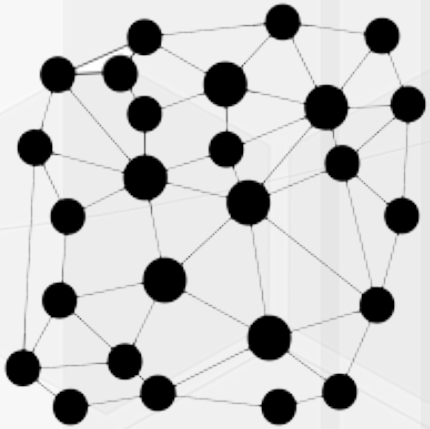
Modélisation : Approche centralisée/décentralisée ?



Centralisée

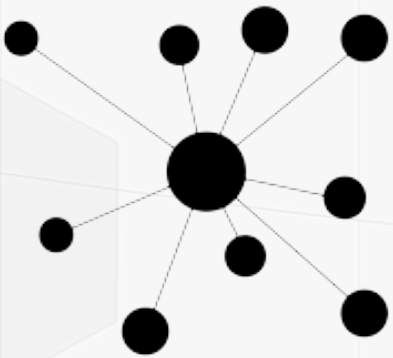


Décentralisée

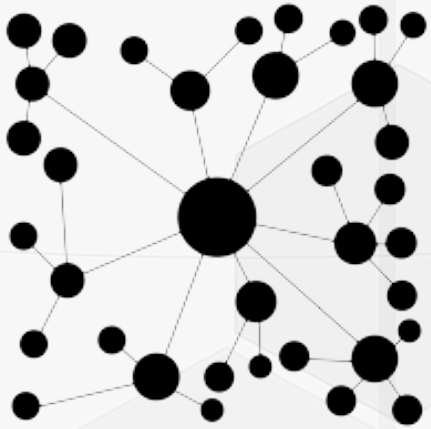


Distribuée

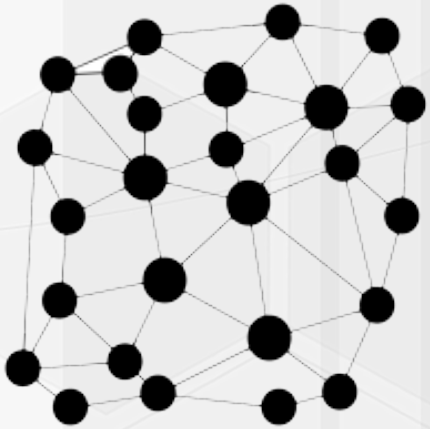
Modélisation : Approche centralisée/décentralisée ?



Centralisée



Décentralisée



Distribuée

Les Systèmes Coopératifs

4 Modélisation des Systèmes Coopératifs

- Comment modéliser la coopération ?
  - Problématique
  - Approche centralisée/décentralisée ?
- Approche
  - Rappel : niveaux de modélisation du trafic
  - Modèle non-coopératif
  - Application : conditions de statiblité
  - Modèle coopératif
  - Application : homogénéisation du flux
  - Application : Stratégies de contrôle
- Simulation
  - Résultats
  - Application : Stratégies de contrôle (2)
  - Démonstration

Niveau de modélisation du trafic

- Modélisation macroscopique
  - Indicateurs globaux : densité, débit, vitesse moyenne
  - Modèle d'ordre 1, d'ordre 2
- Modélisation mésoscopique
  - Niveau intermédiaire
  - "Gas-kinetic models"
  - Fonction de densité de probabilité
- Modélisation microscopique
  - Comportements individuels
  - Modélisation particulaire
  - Lois de poursuite

Niveau de modélisation du trafic

- Modélisation macroscopique
  - Indicateurs globaux : densité, débit, vitesse moyenne
  - Modèle d'ordre 1, d'ordre 2
- Modélisation mésoscopique
  - Niveau intermédiaire
  - "Gas-kinetic models"
  - Fonction de densité de probabilité
- Modélisation microscopique
  - Comportements individuels
  - Modélisation particulaire
  - Lois de poursuite

Niveau de modélisation du trafic

- Modélisation macroscopique
  - Indicateurs globaux : densité, débit, vitesse moyenne
  - Modèle d'ordre 1, d'ordre 2
- Modélisation mésoscopique
  - Niveau intermédiaire
  - "Gas-kinetic models"
  - Fonction de densité de probabilité
- Modélisation microscopique
  - Comportements individuels
  - Modélisation particulaire
  - Lois de poursuite

Niveau de modélisation du trafic

- Modélisation macroscopique
  - Indicateurs globaux : densité, débit, vitesse moyenne
  - Modèle d'ordre 1, d'ordre 2
- Modélisation mésoscopique
  - Niveau intermédiaire
  - "Gas-kinetic models"
  - Fonction de densité de probabilité
- Modélisation microscopique
  - Comportements individuels
  - Modélisation particulaire
  - Lois de poursuite

Modélisation : lois de poursuite

Equation générale d'une loi de poursuite

$$\ddot{x}_n = f\left(\dot{x}_n, \Delta x_n, \Delta \dot{x}_n\right)$$

avec

- n : l'indice du véhicule
- x_n : la position du véhicule
- $\dot{x}_n$: la vitesse instantanée du véhicule
- $\ddot{x}_n$: l'accélération du véhicule
- Δx_n : l'écart entre les position des véhicules n et n+1 *(space headway)*
- $\Delta \dot{x}_n$: l'écart entre les vitesses des véhicules n et n+1 (vitesse relative)

Modélisation : IDM

Intelligent Driver Model

$$\ddot{x}_n = a\left[1 - \left(\frac{\dot{x}_n}{V_0}\right)^{\delta} - \left(\frac{s_0 + \dot{x}_n T + \frac{\dot{x}_n \Delta\dot{x}_n}{2\sqrt{ab}}}{\Delta x_n}\right)^2\right]$$

- a : accélération maximum
- b : décélération désirée
- V_0 : vitesse désirée
- s_0 : distance en congestion
- T : temps inter-véhicule désiré
- δ : traduit l'agressivité (accélération)

Modélisation : IDM

Intelligent Driver Model

$$\ddot{x}_n = a \left[1 - \left(\frac{\dot{x}_n}{V_0} \right)^{\delta} - \left(\frac{s_0 + \dot{x}_n T + \frac{\dot{x}_n \Delta \dot{x}_n}{2\sqrt{ab}}}{\Delta x_n} \right)^2 \right]$$

- a : accélération maximum
- b : décélération désirée
- V_0 : vitesse désirée
- s_0 : distance en congestion
- T : temps inter-véhicule désiré
- δ : traduit l'agressivité (accélération)

Modélisation : IDM

Intelligent Driver Model

$$\ddot{x}_n = a \left[1 - \left(\frac{\dot{x}_n}{V_0} \right)^{\delta} - \left(\frac{s_0 + \dot{x}_n T + \frac{\dot{x}_n \Delta \dot{x}_n}{2\sqrt{ab}}}{\Delta x_n} \right)^2 \right]$$

- a : accélération maximum
- b : décélération désirée
- V_0 : vitesse désirée
- s_0 : distance en congestion
- T : temps inter-véhicule désiré
- δ : traduit l'agressivité (accélération)

Modélisation : IDM

Intelligent Driver Model

$$\ddot{x}_n = a\left[1 - \left(\frac{\dot{x}_n}{V_0}\right)^{\delta} - \left(\frac{s_0 + \dot{x}_n T + \frac{\dot{x}_n \Delta\dot{x}_n}{2\sqrt{ab}}}{\Delta x_n}\right)^2\right]$$

- a : accélération maximum
- b : décélération désirée
- V_0 : vitesse désirée
- s_0 : distance en congestion
- T : temps inter-véhicule désiré
- δ : traduit l'agressivité (accélération)

Application : conditions de statiblité

Mini TP n° 1 : stabilité du flux de trafic

1. Ouvrir la page :
   `http://www.traffic-simulation.de/`
2. Sélectionner le scénario "ring road"
3. Répondre aux questions suivantes :
   - 3.1 Quel(s) phénomène(s) peut-on observer ?
   - 3.2 Identifier les causes de ce(s) phénomène(s)
4. Proposer une solution au(x) problème(s) observé(s)
   - 4.1 Quels paramètres du scénario permettent d'éviter le(s) problème(s) ?
   - 4.2 Quelle(s) conclusion(s) peut-on en tirer ?

Application : conditions de statiblité

Mini TP nº 2 : scénarios dans MovSim

1. Télécharger une version du simulateur MovSim : `http://liris.cnrs.fr/~mgueriau/enseignement/entpe/c-its/tp_c-its.zip`
2. Lancer le scénario "ring road"
3. Editer le fichier de configuration (`sim/TP/ringroad_2lanes.xprj`) :
   - 3.1 Modifier la composition du flux pour retirer les poids lourds
   - 3.2 Identifier les paramètres du modèle longitudinal
   - 3.3 Ajuster ces paramètres pour éviter la congestion (utiliser les conclusions du TP nº 1)

Application : homogénéisation du flux

Mini TP n° 3 : véhicules coopératifs

1. Dans le simulateur, lancer le scénario "3 lanes motorway" et observer le résultat
2. Editer le fichier de configuration (`sim/3lanes.xprj`) :
   - 2.1 Modifier la composition du flux pour introduire une fraction de véhicules coopératifs (10%, 20%, 30%, 40%, 50%)
   - 2.2 Quel pourcentage permet d'éviter la congestion ?
   - 2.3 Lancer le scénario avec ce pourcentage et observer les informations d'un seul véhicule (stopper le scénario, puis cliquer sur un véhicule coopératif - en bleu)
   - 2.4 Déduire de cette observation le comportement exécuté par les véhicules coopératifs

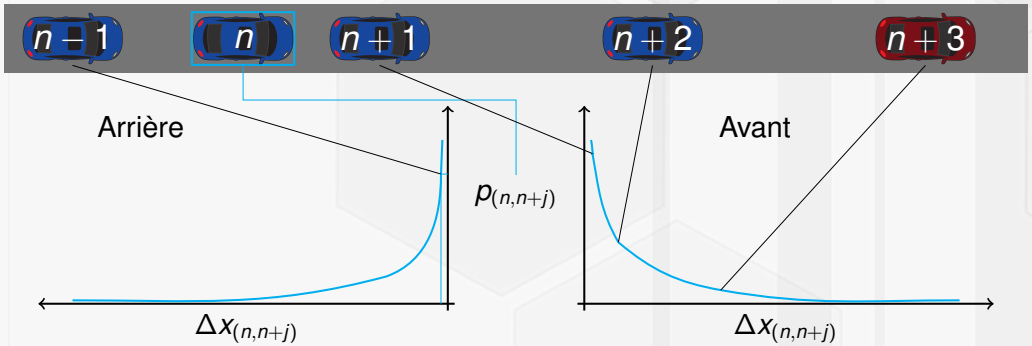
Modèle coopératif : loi multi-anticipative bilatérale

Loi multi-anticipative bilatérale

$$\ddot{x}_n = f_{IDM}(\dot{x}_n, \sum_j a_{nj}\Delta x_{n+j}, \sum_j a_{nj}\Delta \dot{x}_{n+j})$$

avec

- a_{ij} : coefficient de pondération de j par i



Application : routage

Mini TP nº 4 : routage

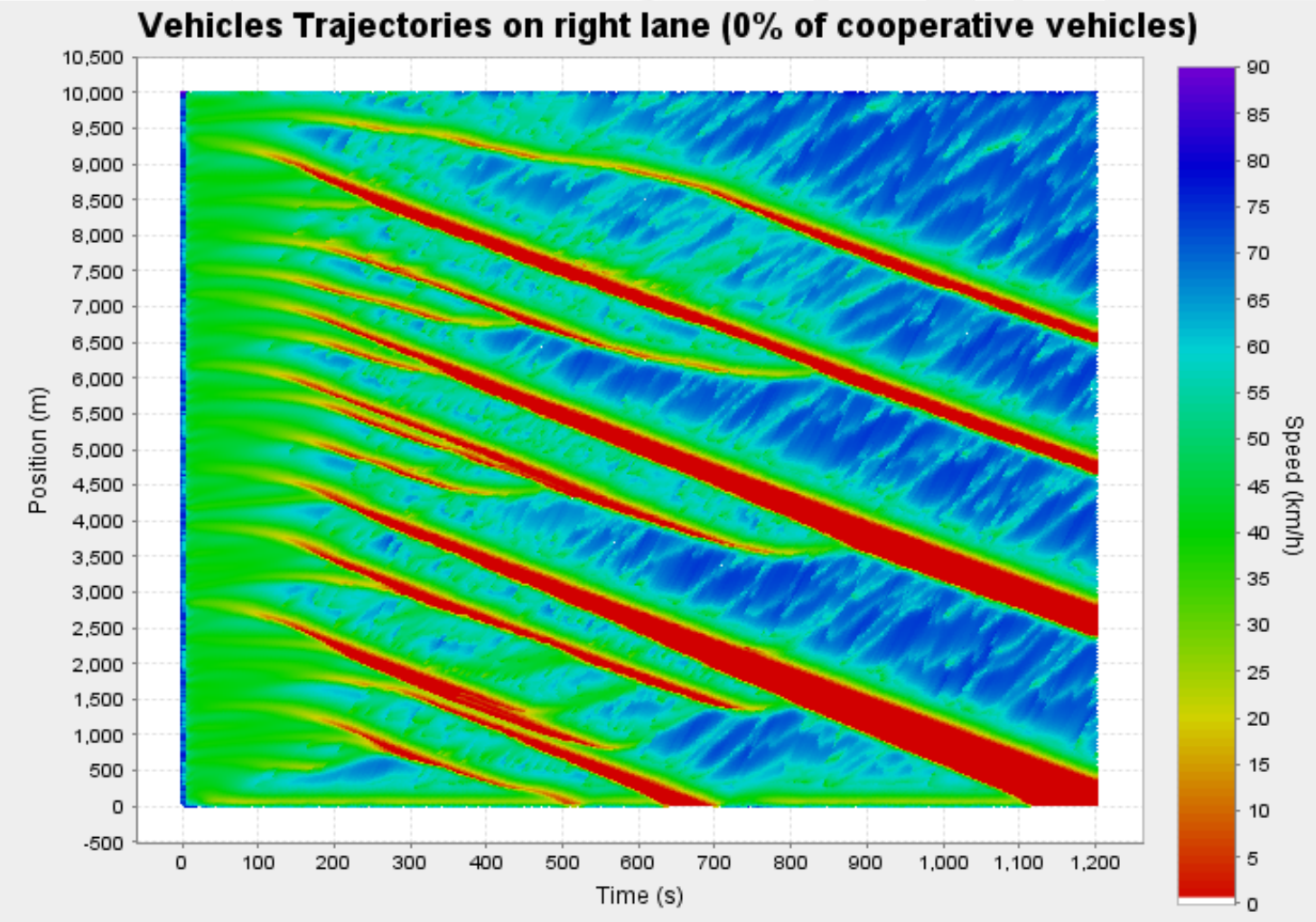
1. Dans le simulateur, lancer le scénario "routing" ou télécharger l'application Android sur `https://play.google.com/store/apps/details?id=org.movsim.movdroid`
   Ce scénario est un mini jeu dont l'objectif est de minimiser le temps de trajet des véhicules.
   Un clic sur la vue trafic oriente une partie des véhicules :
   - sur l'itinéraire principal qui comporte une fermeture de voie (travaux)
   - sur l'itinéraire de délestage qui traverse une agglomération
2. Jouer tour à tour et comparer vos scores
3. Conclure sur la difficulté d'optimiser un tel problème et proposer une solution

Les Systèmes Coopératifs

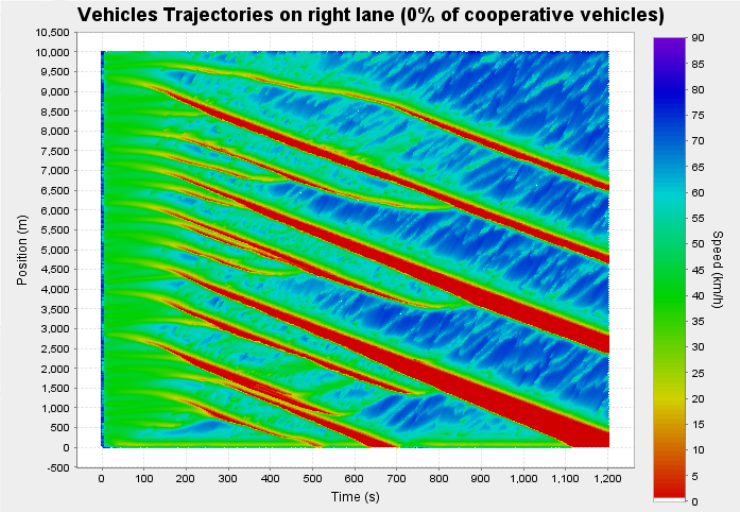
4 Modélisation des Systèmes Coopératifs

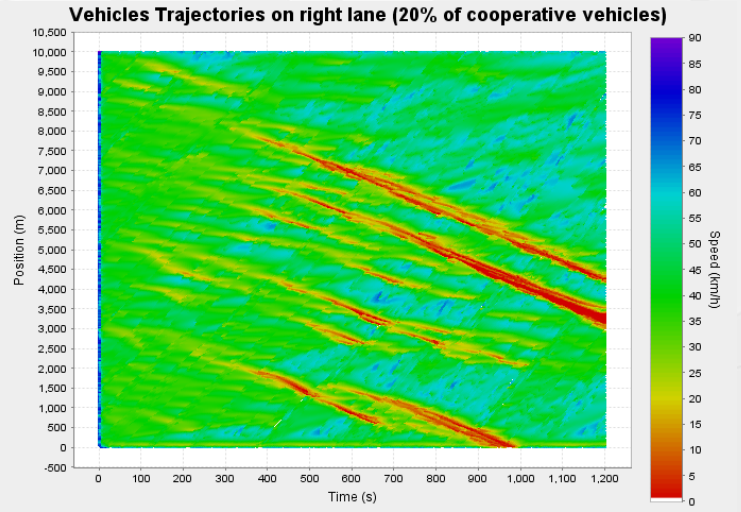
- Comment modéliser la coopération ?
  - Problématique
  - Approche centralisée/décentralisée ?
- Approche
  - Rappel : niveaux de modélisation du trafic
  - Modèle non-coopératif
  - Application : conditions de statiblité
  - Modèle coopératif
  - Application : homogénéisation du flux
  - Application : Stratégies de contrôle
- Simulation
  - Résultats
  - Application : Stratégies de contrôle (2)
  - Démonstration

Résultats : loi multi-anticipative bilatérale

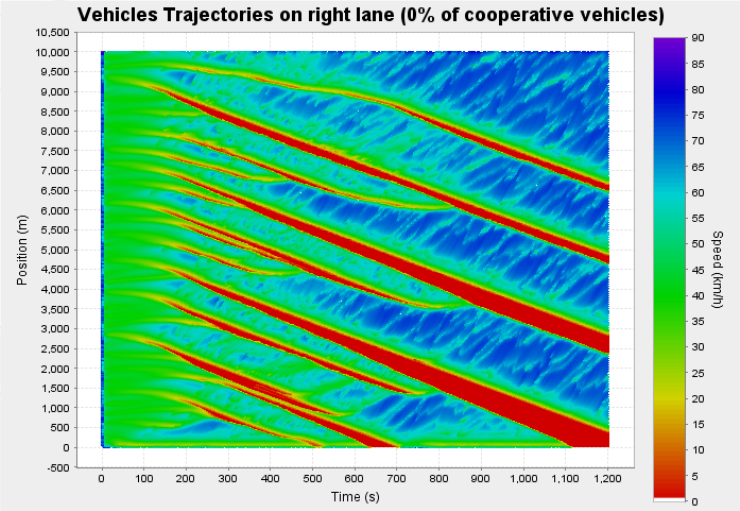


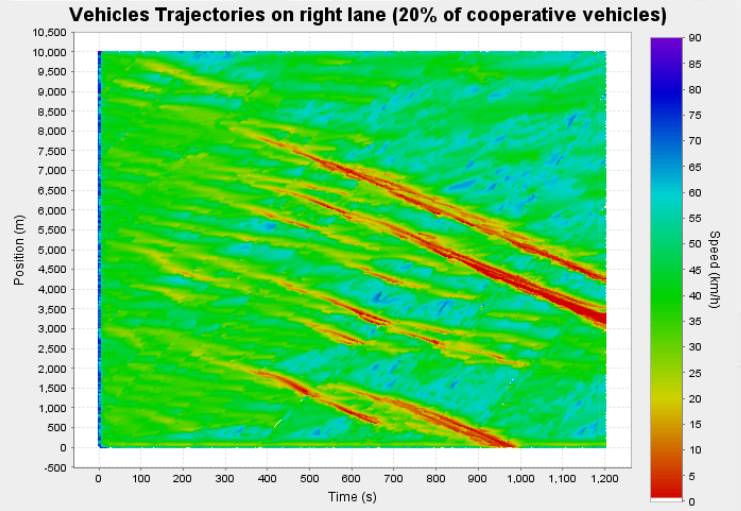
Résultats : loi multi-anticipative bilatérale

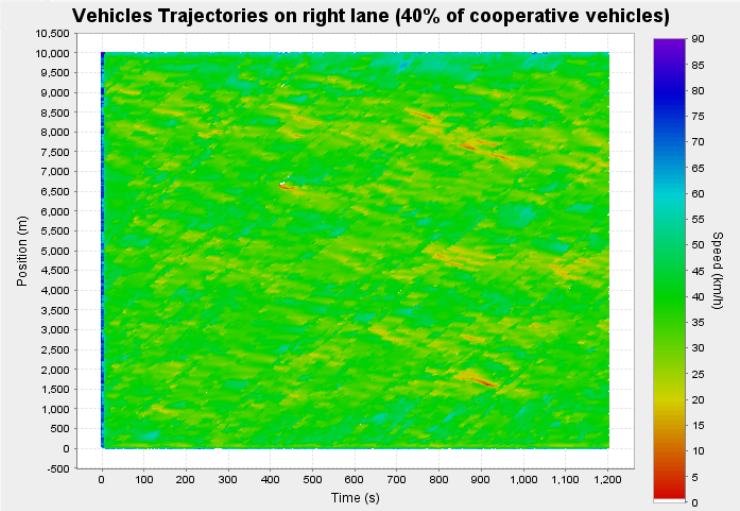




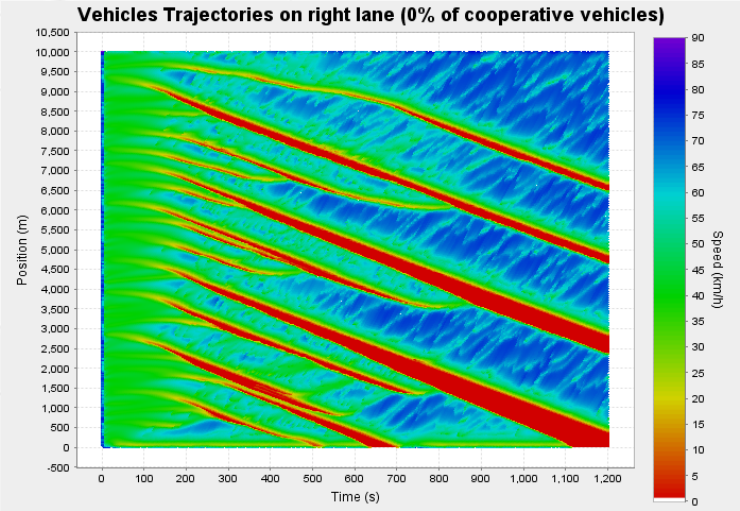
Résultats : loi multi-anticipative bilatérale

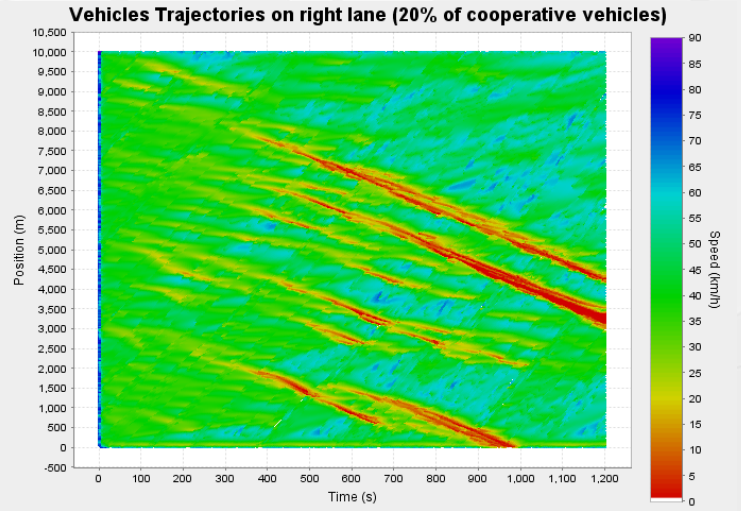


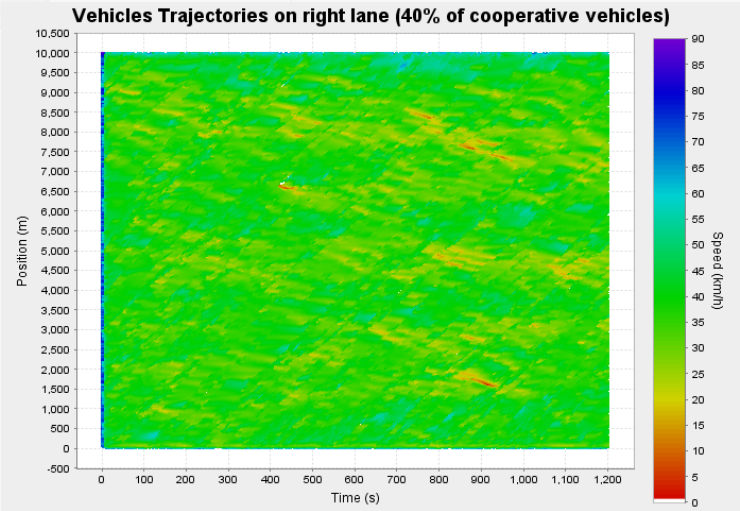


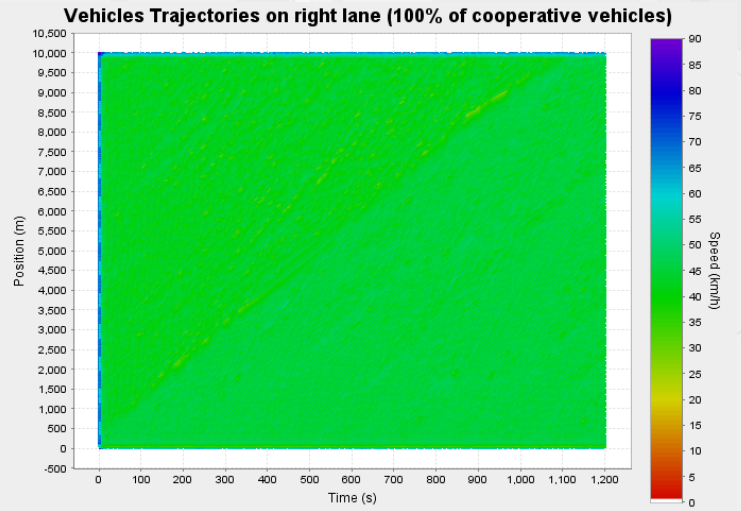


Résultats : loi multi-anticipative bilatérale







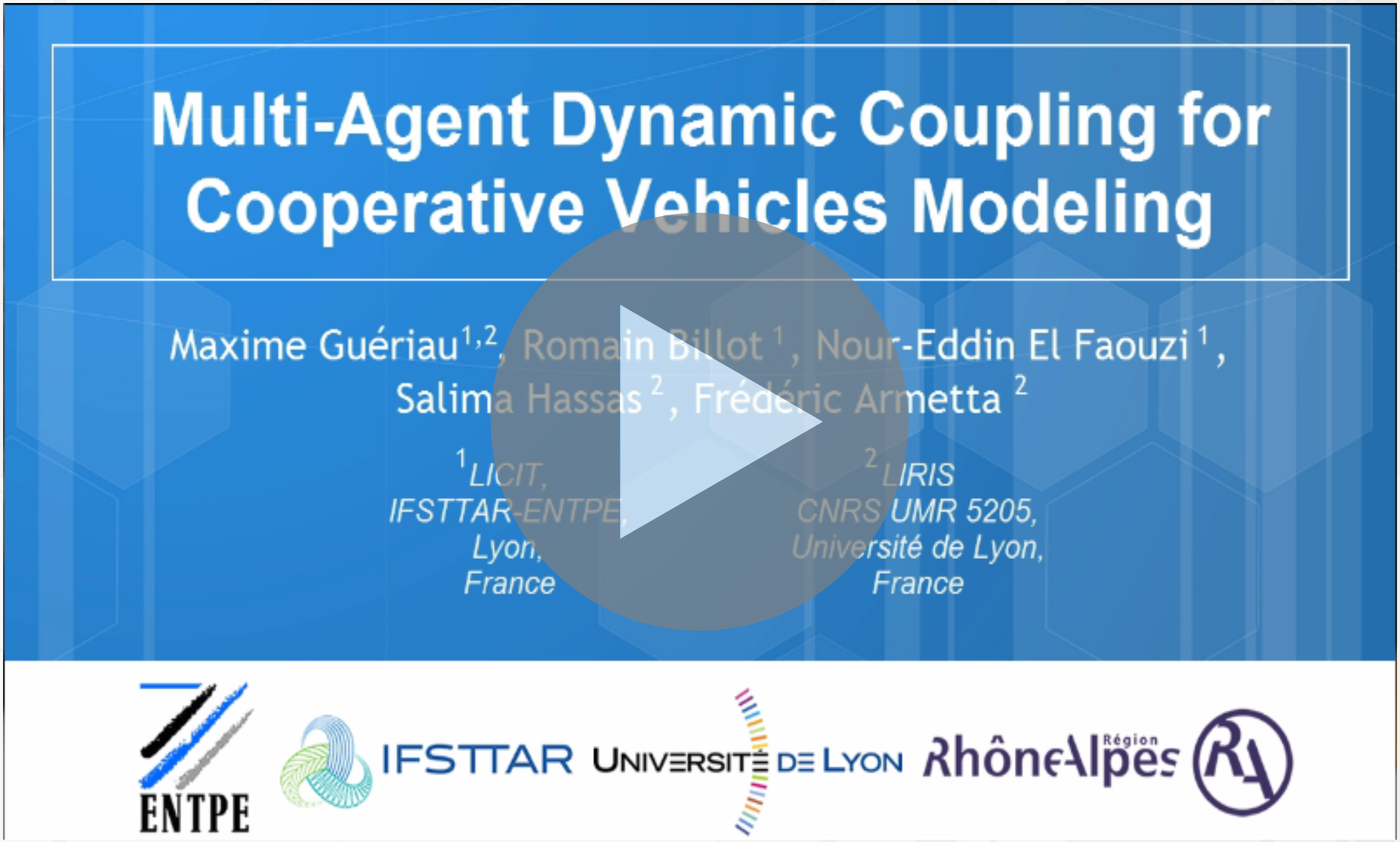


Application : fermeture de voie

Mini TP n° 5 : fermeture de voie

1. Ré-ouvrir la page :
   `http://www.traffic-simulation.de/`
2. Sélectionner le scénario "Lane closing"
3. Répondre aux questions suivantes :
   - 3.1 Dans quelle(s) condition(s) observe-t-on la formation de congestion ?
   - 3.2 Proposer une solution
   - 3.3 Conclure

Démonstration



Merci de votre attention

Maxime Guériau
PhD
Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR)
Université de Lyon 1

Contact :

maxime.gueriau@ifsttar.fr