

---

# **Introduction à la théorie de la circulation**

---

**Hamzeh Alizadeh, Ph.D.**

Directeur – Recherches et valorisation des données  
ARTM

# Théorie de la circulation

*“Mathematics is the language with which God has written the universe.”*

*Galileo Galilei*

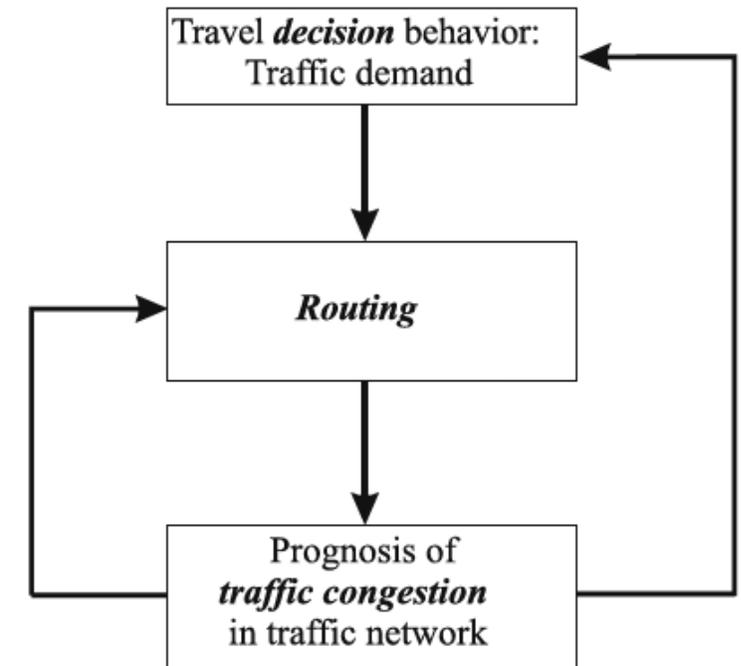
- Les approches mathématiques ont été largement utilisées et ont eu un succès éminent dans le domaine des sciences naturelles.
- Les théories de la circulation décrivent la dynamique de la circulation des véhicules en termes de modèles mathématiques.
  - ✓ Ils décrivent et prédisent l'état de la circulation sur les routes.
  - ✓ Ils peuvent modéliser le nombre de véhicules sur la route et leurs vitesses.
  - ✓ Ils peuvent prévoir les temps de trajet et les niveaux de congestion sur les routes.

# Théorie de la circulation

- La croissance démographique et la croissance économique s'accompagnent d'une augmentation de la demande de trafic et des niveaux accrus de congestion et de retards, de la pollution et de la diminution de la sécurité routière.
- Il existe plusieurs stratégies pour réduire la congestion, garder les villes vivables, propres et sûres et limiter l'augmentation du temps de parcours:
  - Encourager les gens à voyager en utilisant des modes de transport en commun,
  - Encourager les gens à voyager à des moments différents de la journée ou sur des itinéraires différents,
  - Appliquer les mesures de la gestion de la circulation pour utiliser les routes de manière plus efficace,
  - Améliorer les systèmes de transport et le réseau routier.
- Par conséquent, il est important de savoir à quoi ressemblera réellement la circulation routière:
  - Où et quand y aura-t-il de la congestion?
  - Quels / Où sont les goulots d'étranglement?
  - Où est la capacité routière déjà suffisante?

# Théorie de la circulation

- La circulation est un processus dynamique extrêmement complexe associée au comportement spatio-temporel de systèmes à plusieurs éléments.
- La complexité de la circulation routière est due aux interactions non linéaires et dynamiques entre les trois principaux processus suivants:
  - Comportements et décisions liés aux déplacements, qui déterminent la demande routière,
  - Affectation / « routing » des véhicules dans un réseau de circulation,
  - Et, occurrence de la congestion routière au sein du réseau.

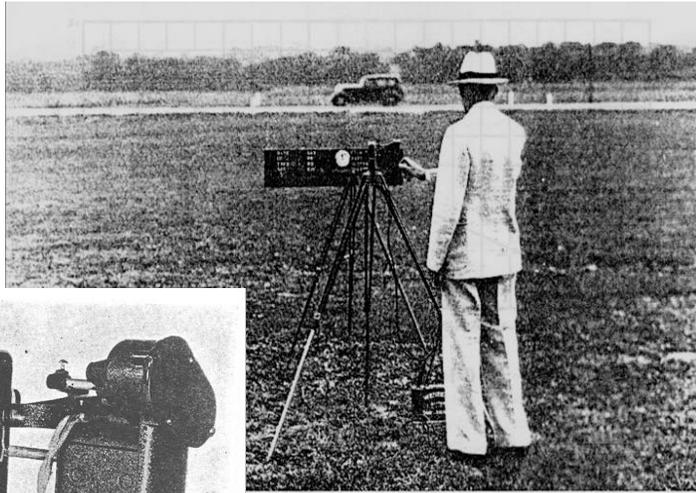


*Le processus dynamique et complexe de la circulation routière*

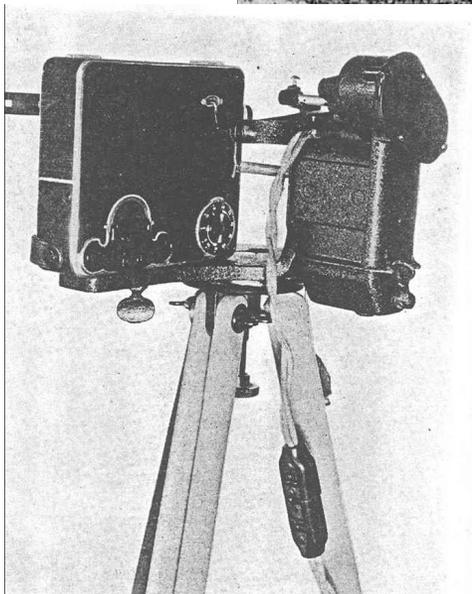
# Théorie de la circulation

- La compréhension de l'historique de la congestion routière est la clé d'une gestion efficace de la circulation.
- La congestion observée à partir des données réelles de la circulation est un effet spatio-temporel: la congestion se produit dans l'espace et dans le temps et se propage au sein d'un réseau de circulation. Ces modèles empiriques de la congestion routière présentent une variété de caractéristiques spatio-temporelles complexes.
- L'optimisation des systèmes de transport et de l'offre et la demande de transport devrait assurer soit la dissolution de la congestion routière, soit, si cela n'est pas possible, la minimisation de l'influence de la congestion routière sur les coûts de déplacement.

# Théorie de la circulation



Collecte de données  
par Greenshields  
(années 1930)



Appareil photo avec moteur utilisé  
par Greenshields (années 1930)

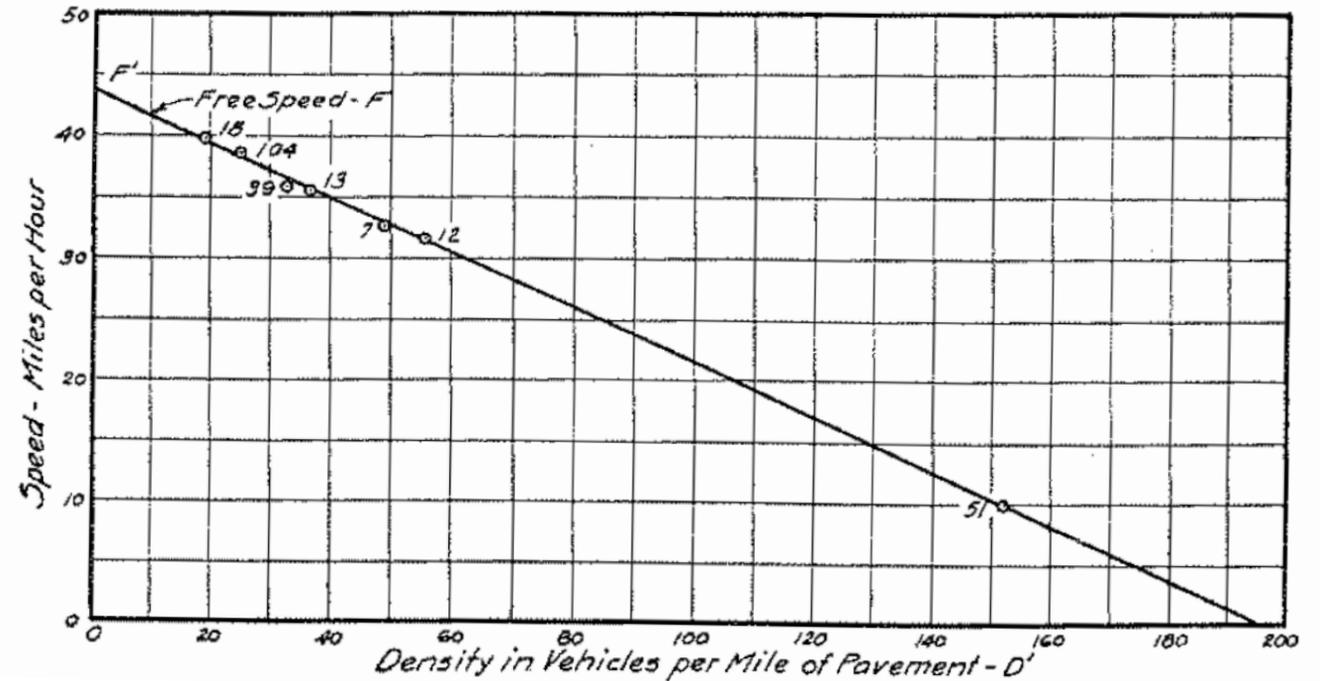
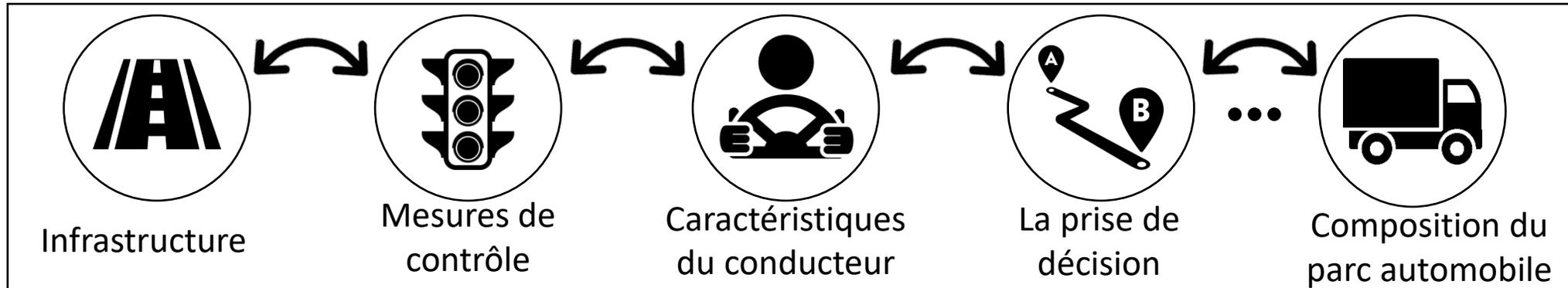


Diagramme fondamental de Greenshields (1935), montrant  
une relation linéaire entre la densité et la vitesse

# Systeme de la circulation

Composants interconnectés, complexes et fonctionnellement liés



## Système de circulation

Une unité complexe formée de diverses parties, réunies dans une interaction régulière ou une interdépendance, soumise à un plan commun ou servant un objectif commun.

## Modèle de circulation

Une représentation mathématique du système de la circulation, qui est utilisée pour étudier l'effet de divers composants sur la dynamique des flux de trafic.

# Simulation de la circulation routière

Qu'est-ce que la simulation de la circulation routière?

La mise en œuvre de modèles de la circulation routière pour créer un dispositif permettant de décrire et de comprendre comment un système de circulation routière fonctionne, se comporte et évolue au fil du temps est appelée simulation de la circulation routière .

Quel est le but de la simulation de la circulation routière?

Cet outil est utilisé pour prédire les résultats d'un système réel, dans diverses conditions qui sont spécifiées par les données d'entrée, sans utiliser réellement le système réel pour effectuer cette prédiction.

Quelles sont les applications de la simulation de la circulation routière?

En général, les modèles de simulation sont utilisés comme outils pour résoudre des problèmes des systèmes complexes, lorsque les composants du système interagissent.

Les modèles de simulation routière sont principalement utilisés pour évaluer l'impact d'une nouvelle infrastructure, d'un nouveau design routier ou d'une nouvelle mesure de gestion du trafic sur la dynamique de la circulation.



Source: <http://www.tatweer-co.ae/t-project/mobile-speed-radar/>

# Modélisation de la demande de déplacement

## Modélisation à quatre étapes

- Première étape – Génération des déplacements : Combien de déplacements sont générés?
  - L'objectif de cette étape est d'estimer le nombre de déplacements produits et attirés par chaque zone d'analyse.
- Deuxième étape – Distribution des déplacements : Où se destinent les déplacements générés?
  - Dans cette étape, les correspondances entre les origines et les destinations sont développées. Les fins de voyage sont liées pour créer des voyages complets.
- Troisième étape - Choix du mode: Quel mode de déplacement est utilisé pour chaque trajet?
  - Le choix du mode prédit les choix que font les individus ou les groupes pour sélectionner leurs modes de transport. Par exemple, un objectif important est de prédire la part des déplacements attirés par les transports publics.
- Quatrième étape - Affectation des déplacements : Quel est l'itinéraire de chaque déplacement?
  - La dernière étape consiste à déterminer les itinéraires que les voyageurs choisissent pour atteindre leurs destinations.

# Modèles mathématiques

## Différentes approches

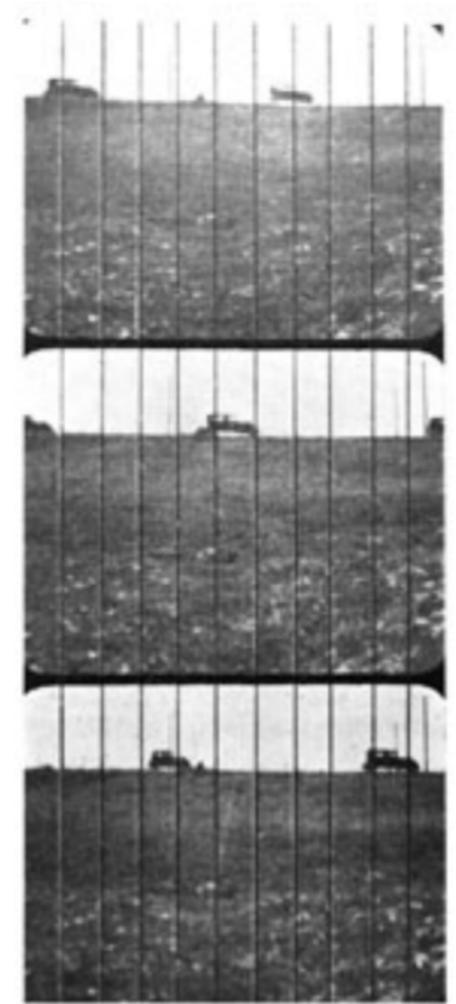
Les modèles mathématiques généraux visant à décrire les phénomènes observés dans la circulation routière comprennent les approches suivantes:

- Approches purement déductives, où des lois physiques largement acceptées et précises sont appliquées pour décrire les phénomènes (ex: loi de conservation).
- Approches purement inductives, où les données disponibles de systèmes réels (c'est-à-dire, des observations du monde réel) sont utilisées pour ajuster des structures mathématiques génériques (ex. Modèles ARIMA, réseaux de neurones).
- Approches intermédiaires, où les structures/modèles mathématiques de base sont développées dans la première étape, puis calibrées à l'aide d'observations du monde réel dans la deuxième étape.

# Modèles mathématiques

## Différentes approches

- La modélisation de la circulation est un processus largement inductif.
- Les observations de la circulation sont utilisées pour construire une théorie sur le comportement des conducteurs et des véhicules individuels ou sur la circulation en général.
- Par la suite, cette théorie est utilisée pour construire un modèle, le discrétiser et l'appliquer dans des simulations.
- Un exemple simple est l'observation par Greenshields de véhicules passant devant sa caméra dans les années 1930.
- Tracer la distance entre les véhicules (espacement) et leur changement de position sur des photographies consécutives conduit à une théorie selon laquelle l'espacement et la vitesse sont liés.
- Par la suite, cela conduit à un modèle avec une relation linéaire entre l'espacement et la vitesse.

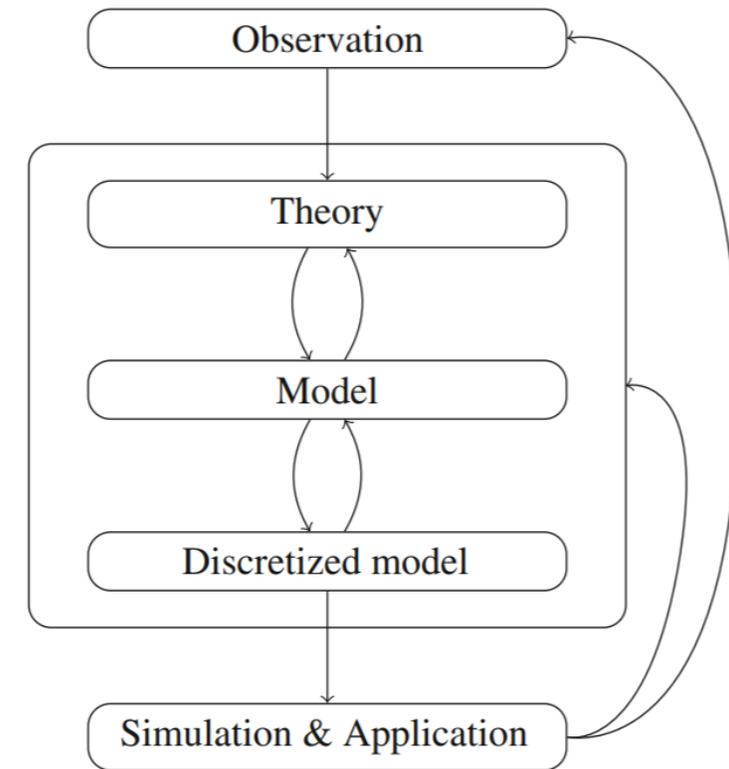


*Observations sur le terrain de Greenshields*

# Modèles mathématiques

## Différentes approches

- Le développement et l'application des modèles de simulation est schématisé.
- Dans un premier temps, les données sont collectées.
- Cela peut être fait en utilisant, par exemple, des détecteurs de boucle, des caméras ou des dispositifs GPS que de nombreux véhicules ont à bord, tels que des systèmes de navigation ou des téléphones portables.
- Alternativement, les données sont collectées à l'aide d'expériences en laboratoire, par exemple avec un simulateur de conduite.
- Ces observations sont analysées et les phénomènes qui caractérisent l'état de la circulation sont reconnus.

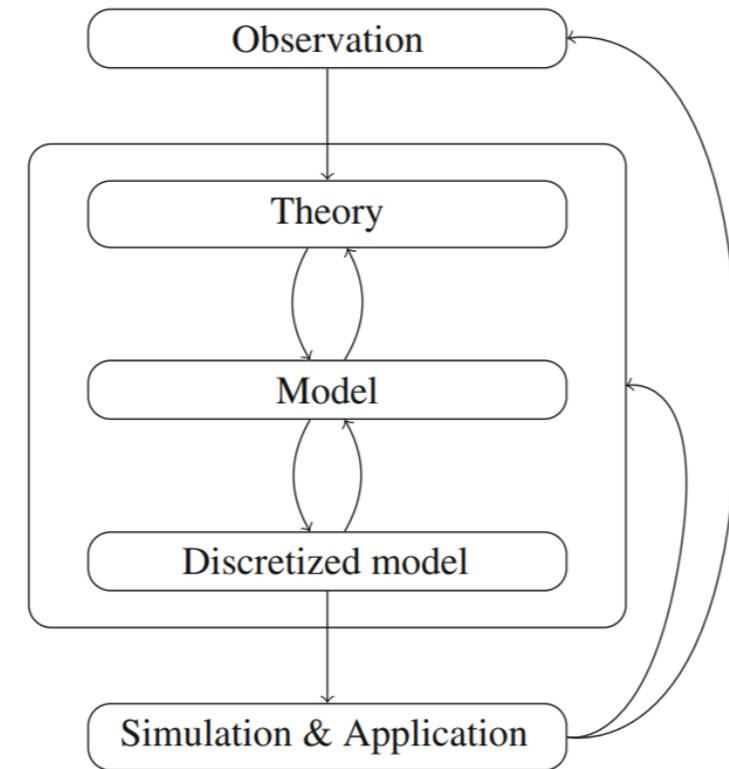


*Cycle de modélisation de la circulation*

# Modèles mathématiques

## Différentes approches

- Dans la deuxième étape, les observations sont utilisées pour construire un cadre théorique.
- Le cadre théorique se compose d'énoncés – principalement qualitatifs – et d'hypothèses comportementales.
- Par exemple, on suppose que les conducteurs perçoivent les distances courtes dans l'espace étant plus dangereuses à haute vitesse qu'à basse vitesse.
- On suppose que c'est la raison pour laquelle, à basse vitesse, des distances plus courtes sont maintenues.
- Une autre hypothèse est que les conducteurs ne réagissent qu'à leurs dirigeants et non à leurs suiveurs.

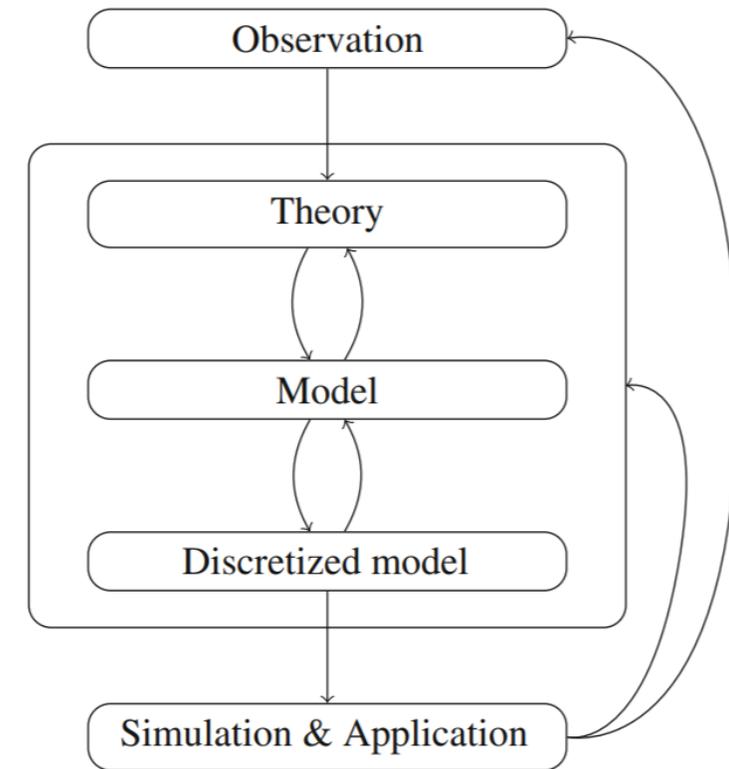


*Cycle de modélisation de la circulation*

# Modèles mathématiques

## Différentes approches

- Dans la troisième étape, le cadre théorique est utilisé pour construire un modèle de flux de trafic.
- Le modèle consiste en un ensemble d'équations, parfois complété par un ensemble de règles comportementales.
- Par exemple, la théorie sur les espaces inter véhiculaires courts et longs à basse vitesse et à haute vitesse respectivement, est quantifiée dans un diagramme fondamental.
- Il exprime la vitesse moyenne du véhicule en fonction de l'espace inter véhiculaire .
- Alternativement, un modèle de suivi de voiture est développé qui décrit comment un véhicule réagit aux véhicules devant lui, à quelle distance le véhicule de tête est suivi et comment la distance dépend de la vitesse du véhicule de tête et du véhicule suiveur.

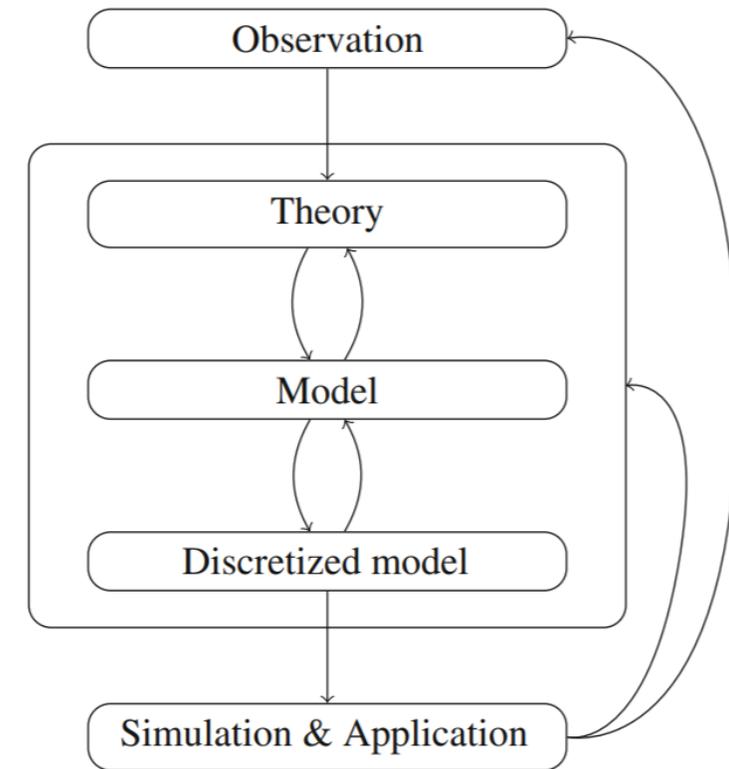


*Cycle de modélisation de la circulation*

# Modèles mathématiques

## Différentes approches

- Les modèles ne peuvent pas être directement intégrés dans des outils de simulation informatique.
- Par conséquent, la discrétisation est appliquée à la quatrième étape.
- Dans la plupart des outils de simulation, le temps est divisé en pas de temps discrets.
- De plus, selon le modèle, l'espace ou d'autres variables continues sont également discrétisés.
- Des méthodes numériques sont appliquées pour approximer le nouvel état du trafic à chaque pas de temps.
- Le résultat est un modèle discret de la circulation routière.

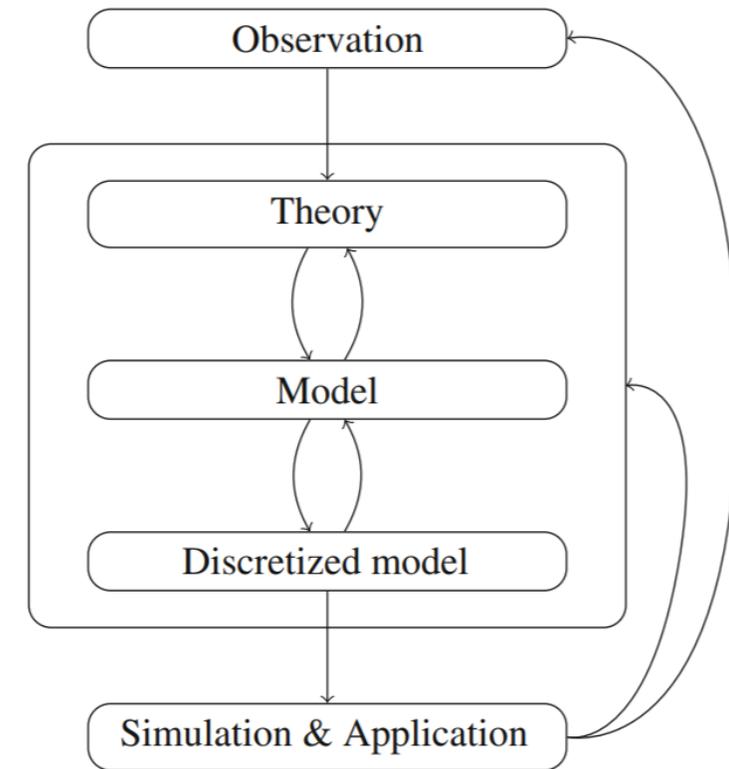


*Cycle de modélisation de la circulation*

# Modèles mathématiques

## Différentes approches

- Enfin, le modèle discret est implémenté dans un programme informatique, résultant en un outil de simulation.
- En appliquant cet outil et en le combinant avec des entrées, telles que des données provenant de capteurs de trafic, il est possible d'estimer et de prédire l'état du trafic.
- Les résultats de la simulation sont comparés aux observations pour calibrer les paramètres et valider l'outil de simulation.



*Cycle de modélisation de la circulation*

# Modèles mathématiques

## Caractéristiques souhaitées

### 1. « Tractable »

En gros, un modèle « Tractable » utilise des méthodes simples et robustes et est un problème qui peut être résolu par un algorithme en temps polynomial.

### 2. Parcimonieux

Modèles simples avec un grand pouvoir explicatif avec le moins de variables prédictives possible. Il faut faire un compromis entre la capacité d'explication du modèle et sa complexité.

### 3. Prédisant

Un bon modèle conduit à des prévisions utiles. Les prévisions les plus utiles ne sont pas toujours produites par le modèle le plus précis.

**Buisson, C. (2010).**  
Comprendre, quantifier et réduire  
la congestion autoroutière.  
Technical report, ENTPE.

# Modèles de la circulation

## Modèle unique d'un système

- Les modèles de la circulation routière ont de nombreuses applications, à des fins différentes
  - Estimation d'état et prévisions à court terme pour informer les voyageurs,
  - Estimation d'état et prédictions à court terme pour la gestion du trafic (ex. panneaux à messages variables ou le contrôle de débit des bretelles d'accès),
  - Aide à la décision pour les véhicules autonomes,
  - Optimiser le fonctionnement des feux de signalisation,
  - Évaluation à long terme des plans de développement, par ex. la (re) conception d'un réseau de transport,
  - Évaluation de l'impact du trafic sur la sécurité et les émissions,
  - Conception de plans d'évacuation.
- Il faut souligner que dans la simulation de la circulation routière, il n'existe pas de «Le modèle de système», c'est-à-dire un modèle unique du système.
- Un modèle dépend :
  - Des objectifs de l'étude,
  - Du problème que le constructeur du modèle tente de résoudre, et
  - De la compréhension qu'il a du système modélisé.



*Une intersection isolée*



*Voyages partant de Laval avec une destination à Montréal*

# Références

- May, A. D. (1990). *Traffic flow fundamentals*.
- Gartner, N. H., Messer, C. J., & Rathi, A. (2002). Traffic flow theory-A state-of-the-art report: revised monograph on traffic flow theory.
- Ni, D. (2015). *Traffic flow theory: Characteristics, experimental methods, and numerical techniques*. Butterworth-Heinemann.
- Kessels, F., Kessels, R., & Rauscher. (2019). *Traffic flow modelling*. Springer International Publishing.
- Treiber, M., & Kesting, A. (2013). Traffic flow dynamics. *Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation, Springer-Verlag Berlin Heidelberg*.
- Garber, N. J., & Hoel, L. A. (2014). *Traffic and highway engineering*. Cengage Learning.
- Elefteriadou, L. (2014). *An introduction to traffic flow theory* (Vol. 84). New York: Springer.
- Victor L. Knoop (2017), Introduction to Traffic Flow Theory, Second edition
- Serge P. Hoogendoorn, Traffic Flow Theory and Simulation
- Nicolas Saunier, Course notes for “Traffic Flow Theory – CIV6705”
- Mannering, F., Kilareski, W., & Washburn, S. (2007). *Principles of highway engineering and traffic analysis*. John Wiley & Sons.
- Haight, F. A. (1963). *Mathematical theories of traffic flow* (No. 519.1 h3).



Thank  
you