Modélisation des transports : passé, présent et futur

Ph. Toint

GRT, FUNDP, Namur

Un bref panorama d'une discipline active
(alimenté par 25 ans de d'enseignement,
de recherche et de pratique)
et quelques perspectives...

Objectifs

- présenter une brève perspective historique de la modélisation des transports, qui tienne compte des évolutions
  - de la société
  - de la technologie (au sens large),
  - des développements techniques spécifiques
- utiliser ce contexte pour introduire brièvement quelques concepts importants
- introduire les défis pour le futur

Les années 1950 et 1960: les origines (1)

La société :

- société jeune avec des perspectives de croissance démographique
- trafic automobile naissant
  (peu ou pas d'autoroutes, vicinaux sans bus)
- taux de motorisation "faible"
- mobilité limitée, dominée par les déplacements domicile-travail
- croissance économique considérée comme permanente et durable
- lobbying balbutiant
- cellule familiale surtout "traditionnelle"
- travail féminin limité

Les années 1950 et 1960: les origines (2)

La technologie :

- sciences physiques et ingéniérie en plein essor
- invention de la recherche opérationnelle
- début de la planification scientifique
- naissance de l'informatique
- vision confiante de la science et de la technologie

Les années 1950 et 1960: les origines (3)

La modélisation des transports

Objectifs :

- planification du développement du réseau (routier surtout)
- rationalité surtout abstraite (sans contrainte)

Méthodes :

- modèle à 4 étapes
- notion d'équilibre de trafic
- calcul des équilibres "social" et "individuel"

Le modèle à 4 étapes : les choix de base

- détermination du territoire (input/output)
- zonage
- statique vs dynamique
  (durée des trajets, période de référence)
- réseaux

$\rightarrow$ magic box $\rightarrow$ portrait du trafic

- calibration sur un scenario de base
- exploration de scénarios alternatifs

Dans la boîte ...

- génération
  départs et arrivées
  ménages $\rightarrow$ émissivité functions $\rightarrow$ attractivités
- distribution
  détermine les paires (origine, destination)
  $\Rightarrow$ matrice O/D

	c_1	$\ldots$	c_j	$\ldots$	$\ldots$	c_n
c_1	-					
$\vdots$		$\ddots$				
$\vdots$			$\ddots$			
c_i			q_{ij}	$\ddots$		
$\vdots$					$\ddots$	
c_n						-

- choix modal modal
  matrices O/D par mode
- assignation
  choix des itinéraires (par mode)

Le modèle à 4 étapes

collecte des données

↓

generation

↓

distribution (O/D)

↓

choix modal

↓

assignation

↓

interpretation

Dans les sous-boîtes. . .

Prédominance des modèles physiques :

- émissivité / attractivité (motifs simples)
- distribution gravitaire

$$q_{ij} = k\frac{e_i a_j}{d_{ij}^2}$$

ou entropique(vraisemblance maximale parmi les configurations de demande equiprobables)

$$t_{ij} = ke_i a_j e^{-\sigma d_{ij}}$$

simplement ou doublement constraints (court/long terme, travail/autre)

Dans les sous-boîtes... (2)

- vue du trafic comme un écoulement
  - flot (débit)
  - densité
  - vitesse

  loi classique : $\boxed{\text{flot} = \text{densité} \times \text{vitesse}}$
- analyse du phénomène de congestion :
  - vitesse libre
  - capacité

  loi de Greenshields et fonctions
  de performance

Equilibres de trafic : les concepts

- temps de trajet (parcours) minimal
- plus court chemin(s) entre origine et destination
- interaction entre usagers

  → équilibre utilisateur (Wardrop 1952)

  “le temps de parcours experimenté sur tous les itinéraires utilisés est inférieur ou égal à celui qui serait experimenté par un usager isolé sur n'importe quel itinéraire non utilisé”

  > “aucun usager ne peut unilatéralement améliorer son temps de parcours”

  → équilibre social

  > “le temps de parcours total (pour tous les usagers) ne peut être réduit”

Equilibres de trafic (2)

Hypothèses implicites :

- information parfaite (complète et correcte)
- utilisateurs tous identiques
- utilisateurs tous rationnels
- pas d'interaction entre arcs
- vision statique (état stationnaire)

Méthodes de calcul :

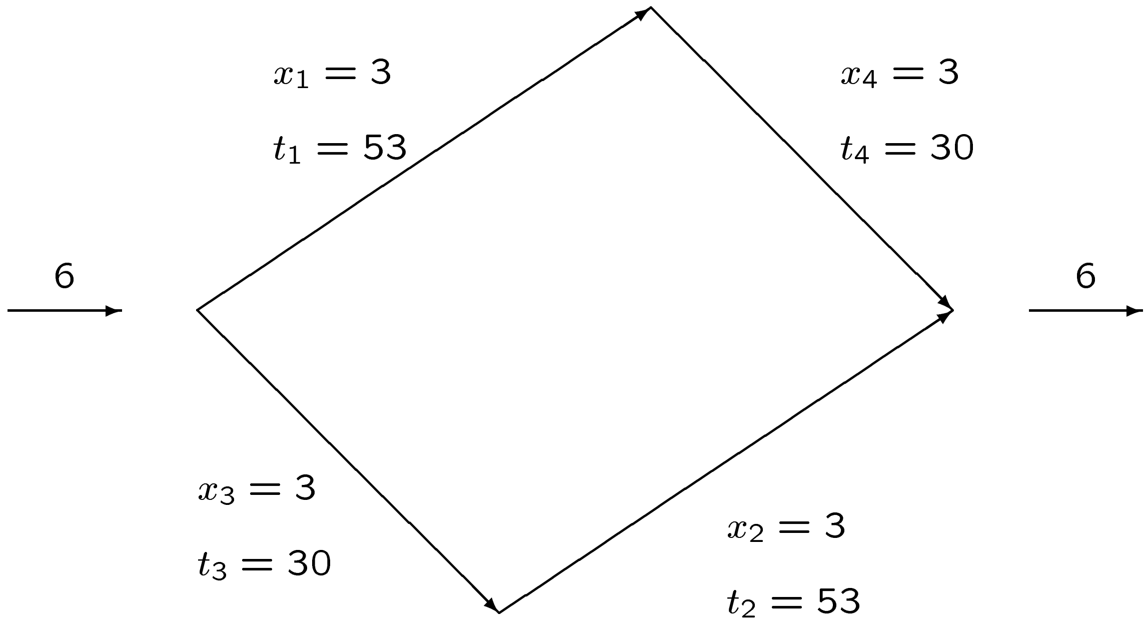
- transformation de Beckmann
- problème d'optimisation convexe (RO)
  (conditions d'optimalité
  = équilibre utilisateur)
- résolution simultanée de tous les flots

Le “paradoxe” de Braess (1)

$$
\begin{aligned}
t_1(x_1) &= 50 + x_1 \\
t_2(x_2) &= 50 + x_2 \\
t_3(x_3) &= 10x_3 \\
t_4(x_4) &= 10x_4
\end{aligned}
$$

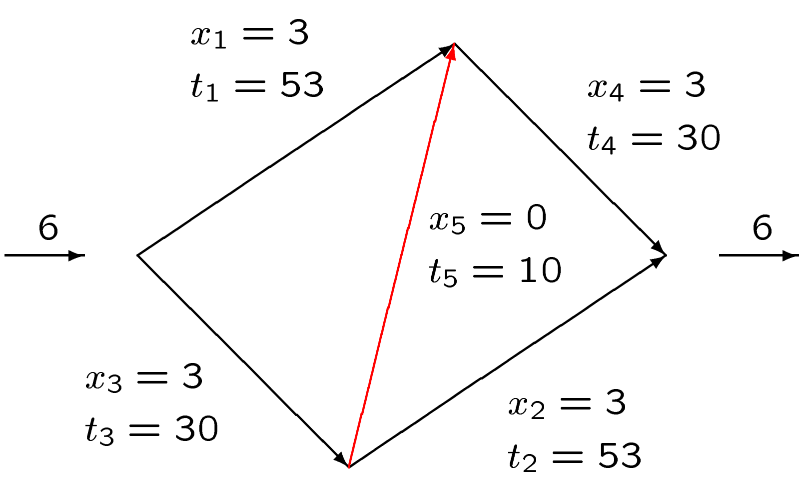
Equilibre utilisateur :

- chemin 1–4 : 83 sec
- chemin 3–2 : 83 sec



Le “paradoxe” de Braess (2)

$$\begin{array}{rrcl} & t_1(x_1) & = & 50 + x_1 \\ & t_2(x_2) & = & 50 + x_2 \\ & t_3(x_3) & = & 10x_3 \\ & t_4(x_4) & = & 10x_4 \\ \color{red}{\longrightarrow} & \color{red}{t_5(x_5)} & \color{red}{=} & \color{red}{10 + x_5} \end{array}$$

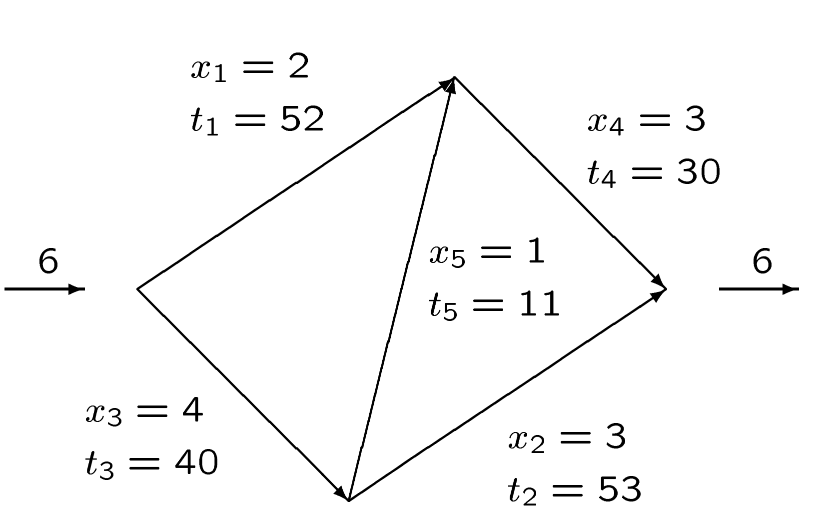


chemin 1–4	:	83
chemin 3–2	:	83
chemin 3–5–4	:	70

Le "paradoxe" de Braess (3)

$$\begin{aligned} t_1(x_1) &= 50 + x_1 \\ t_2(x_2) &= 50 + x_2 \\ t_3(x_3) &= 10x_3 \\ t_4(x_4) &= 10x_4 \\ t_5(x_5) &= 10 + x_5 \end{aligned}$$

$$\boxed{1\text{–}4 \longrightarrow 3\text{–}5\text{–}4}$$

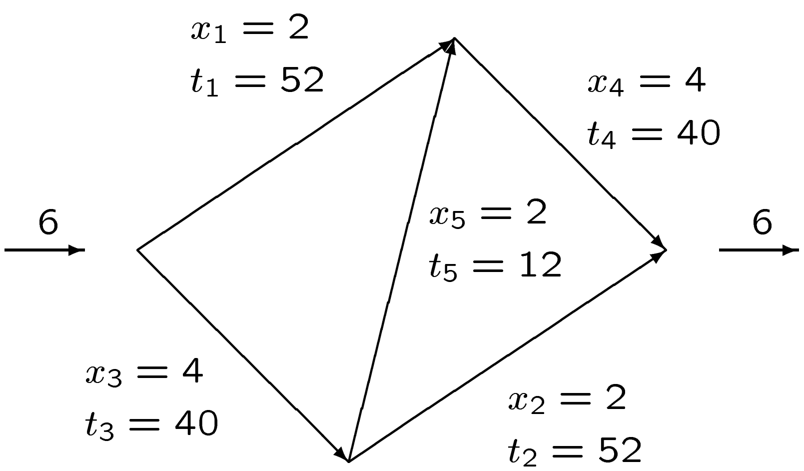


chemin 1–4	:	82
chemin 3–2	:	93
chemin 3–5–4	:	81

Le “paradoxe” de Braess (4)

$$\begin{aligned} t_1(x_1) &= 50 + x_1 \\ t_2(x_2) &= 50 + x_2 \\ t_3(x_3) &= 10x_3 \\ t_4(x_4) &= 10x_4 \\ t_5(x_5) &= 10 + x_5 \end{aligned}$$

$$\boxed{3\text{–}2 \longrightarrow 3\text{–}5\text{–}4}$$



chemin 1–4	:	92
chemin 3–2	:	92
chemin 3–5–4	:	92

Les années 1970 : l'âge d'or (1)

La société :

- boom démographique ralenti
- vision "économique" de la société
- développement des universités
- motorisation croissante (2nde voiture)
- problématique des embouteillages
- croissance du transport de marchandises par route
- déplacements scolaires de plus en plus motorisés
- développement des infrastructures de transport routier (autoroutes)
- choc pétrolier
  - dépendance énergétique
  - apparition de la notion de durabilité

Les années 1970 : l'âge d'or (2)

La technologie :

- ordinateurs plus puissants et accessibles dans les centres spécialisés
- progrès fulgurant des méthodes de calcul (en RO et statistiques en particulier)
- développement des premiers logiciels "indépendants des applications"
- début des télécoms mobiles (radio)
- conquête de l'espace (vulgarisation de la 'vision satellitaire)
- progrès des intruments de mesure en tout genre (y compris pour le trafic)

Les années 1970 : l'âge d'or (3)

La modélisation des transports :

Objectifs

- réalisation économique des infrastructures
- rationalisation du trafic afin de réduire la consommation énergétique
- idée des actions sur la demande (prix, localisation)

Evénements (?) :

- 1974 : naissance du GRT
- 1975 : premier modèle de trafic du GRT (NAMUR0)
- écho enthousiaste de la presse . . . et très réservé du pouvoir politique!

Les années 1970 : l'âge d'or (4)

La modélisation des transports :

Méthodes :

- extensions des méthodes d'équilibre
  - demande variable
  - interactions entre arcs
  - équilibre à plusieurs modes
  - équilibre stochastique
    (temps de parcours mesuré
    $\rightarrow$ temps de parcours perçu)
- méthode des choix discrets

Choix discrets

- ensemble de choix fini (alternatives)
- les caractéristiques d'un utilisateur
  $\rightarrow$ utilité d'un choix
- l'utilisateur maximise son utilité

Problème :
les caractéristiques des utilisateurs sont trop complexes pour être analysées

$\Rightarrow$ utilité aléatoire

$$U_i(a) = d_i(a) + r_i(a)$$

où

$$E[r_i(a)] = 0$$

Les modèles logit et probit

- Le modèle logit

$$p_k = Pr[U_k(a) \geq U_i(a), \forall i] = \frac{e^{d_k(a)}}{\sum_{i=1}^{K} e^{d_i(a)}}$$

independence, equidistribution (Gumbel)
largement utilisé
cas multinomial facile, logit hiérarchique

- Le modèle probit

pas d'hypothèse d'independance
distribution normale
difficultés: calcul numérique, covariance

Les années 1980: une révolution (1)

La société :

- éclatement progressif du modèle familial
- rurbanisation croissante
  ($\rightarrow$ pendulaire plus long)
- prise de conscience collective des effets de la dette publique ($\rightarrow$ évaluation a priori vue comme plus importante)
- mobilité (et trafic) en hausse constante (prévisions de taux de motorisation. . .)
- croissance importante du trafic de marchandises par camion et conteneurs
- premier effets structurants des grands travaux routiers (ring)
- parachèvement des grandes infrastructures
- début de la régionalisation (1988)

Les années 1980: une révolution (2)

La technologie :

- apparition des micro-processeurs, et donc
  - automatisation
  - gestion décentralisée des systèmes techniques
- percée des GIS
- apparition des systèmes d'information des usagers !!
  (RTT, ATT, ATIS, . . .)

Méthodes :

- rôle moteur des programmes européens (DRIVE)
- part de marché croissante des consultants (STRATEC fondé en 1984)
- modèles conjoints du trafic et des systèmes d'information
- modèles dynamiques
  (rerouting, accidents, . . .)

Quelle révolution?

- information en temps réel
  $\rightarrow$ modèles statiques inadéquats
- l'information modifie le trafic
  $\rightarrow$ la notion d'équilibre ne convient pas

REVOLUTION

- équilibre dynamique (?)
- modèles de simulation dynamique (PACSIM, AIMSUN, DYNASMART, ...)
- approche comportementale des déplacements

Quelques mots sur PACSIM

- développé au GRT
- sucession d'événements (départs, arrivées, feux, accidents, . . .)
- simulation de paquets de véhicules
- réseau d'information (détecteurs, centres de traitement, distribution :RDS, VMS, . . .)
- réseau hiérarchisé
- choix d'itinéraire comportemental (réseau perçu + règles)
- transports publics et privés
- (émission des gaz polluants)
- base de l'étude actuelle sur Namur

Les années 1990: traversée du désert (1)

La société :

- altération profonde du modèle familial
- individualisme croissant
- prise de conscience du vieillissement de la population
- intégration progressive des comportements sociaux : mobilité plus complexe
- percée des préoccupations environnementales (développement durable)
- vision des sciences et technologies comme "technocratiques" (millénarisme)
- les problèmes de la mobilité deviennent politiquement importants
- JIT : les stocks des industries sont sur la route

Les années 1990: traversée du désert (2)

La technologie :

- microinformatique et internet se généralisent
- avancées des télécoms (GPS, GSM, . . .)
- remise en question du rôle des modèles (prédictif, cognitif, inutile ?)

Les années 1990: traversée du désert (3)

La modélisation des transports :

- intégration des aspects environnementaux
- avènement (contesté) des méthodes de préférences déclarées
- réalisation des limites pratiques (calibrage) de certains modèles :
  - modèles d'affectation dynamique
  - modèles "transport-aménagement du territoire"
  - modèles de la demande de déplacement

  (→ niches)
- premiers modèles de chaînes d'activités (Melbourne, NL, CH, Puget Sound, . . .)
- prise de conscience de la difficulté du transfert technologique

Les défis des années 2000 (1)

La société :

- vieillissement marqué de la population (actifs / inactifs)
  - occupation des banlieues (trajets pendulaires)
  - limite le caratère substituable des modes de déplacement
  - émergence de nouveaux critères de choix (sécurite, comfort, accessibilité, fiabilité, . . .)
  - nécessité de politiques à effets rapides
- diminution importante des motifs de déplacement traditionnels : mobilité plus diffuse
- évolution incertaine de la structure familiale
- évolution des comportements (télétravail ? e-shopping ?, place des loisirs, . . .)
- complexification institutionnelle probable
- préoccupation environnementale forte

Les défis des années 2000 (2)

La technologie (?) :

- trains à grande vitesse
- informatique nomade
- télécoms et information embarquée
- ...

Les défis des années 2000 (2)

La modélisation des transports :

- suivi des comportements
  - chaînes d'activités et représentation spatiale
  - techniques d'enquêtes continues
  - techniques de consolidation statistique
  - nouveaux instruments de mesure (GPS, video, . . .)
- révision importante des modèles de demande (tours, données)
- calibration/validation des simulateurs complexes (assignation dynamique, . . .)
- synthèse de modèles existants

Quelques chiffres. . .

Importance relative (et approximative) des chaînes d'activités en Belgique :

– domicile-travail : 10%
– domicile-commerce : 7.5%
– domicile-école : 7%
– domicile-visites : 4%
– domicile-loisirs : 3.5 %

total des "chaines simples" : $\approx$ 33% !!!

Quelques conclusions

Parce que les modèles restent

la seule méthode réaliste

pour l'analyse, il faut absolument

- poursuivre l'évaluation des comportements
- intégrer les outils
  - déplacements privés et professionnels
  - personnes et marchandises
  - en transports privés et publics
- améliorer encore les modèles existants (données, maintenance, utilisation, . . .)
- préparer la prochaine génération de modèles