



*Fabien LEURENT*

*Janvier 2007*

*ENPC / LVMT*

*ICPC, Enseignant-Chercheur*

*Tel 01 6415 2111, mél [fabien.leurent@enpc.fr](mailto:fabien.leurent@enpc.fr)*

## **Modélisation de la demande de transport**

Cours de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

Département d'enseignement Ville - Environnement - Transport

## Sommaire du syllabus

<b>0. Présentation générale.....</b>	<b>1</b>
0.1 Enjeux .....	1
0.2 Objectifs.....	1
0.3 Approche didactique .....	2
0.4 Plan du cours.....	2
0.5 Modalités pédagogiques.....	3
0.6 Equipe enseignante .....	3
<b>1. Généralités.....</b>	<b>4</b>
1.1 Définitions fondamentales (20') .....	4
1.2 Description essentielle de la demande de transport (30') .....	4
1.3 Motivations opérationnelles et contextes d'application (30').....	4
1.4 Principes généraux de modélisation (20').....	4
1.5 Démonstration d'une étude de trafic (45').....	4
1.6 Modèles de la demande de transport : une typologie (20').....	4
<b>2. L'affectation du trafic aux itinéraires sur un réseau : le choix d'itinéraire .....</b>	<b>5</b>
2.1 Description basique de la demande (20').....	5
2.2 Moyens et services de transport (25').....	5
2.3 Problèmes de réseau (45').....	5
2.4 Le choix d'itinéraire et la répartition du trafic (45') .....	5
2.5 Les relations offre-demande et l'équilibre (45').....	5
<b>3. Affectation aux transports collectifs et plurimodalité .....</b>	<b>6</b>
3.1 L'offre de TC (30').....	6
3.2 La demande et son comportement (45') .....	6
3.3 Structures de cheminement (30').....	6
3.4 L'équilibre offre-demande (15').....	6
3.5 TD : concurrence modale (60').....	6
<b>4. Choix discrets, choix modal .....</b>	<b>7</b>
4.1 Théorie des choix discrets (45').....	7
4.2 Econométrie des choix discrets (60').....	7

4.3	Modélisation du choix modal (50')	7
4.4	Choix modal des voyageurs dans l'agglomération parisienne (20')	7
<b>5.</b>	<b>La distribution spatiale des déplacements</b>	<b>8</b>
5.1	Approche empirique (15')	8
5.2	Inférence entropique d'une matrice O-D (25')	8
5.3	Modèles statistiques de distribution (20')	8
5.4	Modèle gravitaire (25')	8
5.5	Le choix discret de destination (20')	8
5.6	Modèle des opportunités (15')	8
5.7	Le choix d'activités et l'accessibilité (25')	8
5.8	Equilibre spatial et modèles d'échanges (30')	8
5.9	Récapitulation (5')	8
<b>6.</b>	<b>Génération et prospective</b>	<b>9</b>
6.1	Analyse spatialisée pour un territoire (20')	9
6.2	Modèle zonal de génération (30')	9
6.3	Modèle catégoriel de génération (40')	9
6.4	Modèles d'évolution agrégée (20')	9
6.5	Modèles d'évolution par transitions (20')	9
6.6	Scénarios et prospective (50')	9
<b>7.</b>	<b>Conclusion</b>	<b>10</b>
7.1	Contrôle des connaissances (80')	10
7.2	Sur les logiciels de modélisation (30')	10
7.3	Etudes et modèles (15')	10
7.4	La composition des modèles (30')	10
7.5	Conclusion (10')	10

## 0. PRESENTATION GENERALE

### 0.1 Enjeux

La demande de transport est constituée par des consommations, besoins et désirs de déplacement sur des liaisons internes, en échange (import ou export) ou en transit dans le territoire concerné. Plus profondément, elle comprend les acteurs économiques qui sont clients du système de transport, avec leurs intérêts, leurs contraintes et leur comportement d'usage.

Servir la demande est la raison d'être du système de transport : cette finalité primordiale motive la planification - dont certains modèles et instruments d'analyse peuvent aussi intégrer des considérations fines d'exploitation du trafic.

Dans un modèle de demande, on représente la demande et l'offre afin de simuler l'usage de l'offre par la demande et leurs adaptations mutuelles : idéalement, leur équilibre. Le modèle permet de simuler les effets de variations dans l'offre et la demande, et notamment des projets et des politiques de transport, ainsi éventuellement que des plans d'occupation du sol. Les modèles sont utilisés et nécessaires, pour l'évaluation technico-économique (rentabilité financière) et l'évaluation socio-économique (rentabilité collective) des investissements.

### 0.2 Objectifs

La modélisation de la demande repose sur les principes suivants :

- Décrire dans l'espace le territoire, certains réseaux et leurs services, pour une époque et une période fixées.
- décrire les flux de déplacement par nature de trafic, par relations entre zones d'origine et zones de destination.
- Simuler des choix micro-économique de la demande : pour l'itinéraire, le mode, l'horaire de départ, la destination, voire même le placement d'établissement et l'équipement en moyen de transport.

Chaque choix de la demande fait l'objet d'un composant de modélisation, avec éventuellement des traitements conjoints.

Le cours MOTRA porte sur les principaux modèles-composants : affectation du trafic aux itinéraires sur un réseau, choix modal, distribution spatiale, génération ; ainsi que sur la composition et l'architecture des modèles.

On y traite essentiellement :

- la représentation des services de transports, avec la qualité de service et les phénomènes de congestion.
- La représentation de la demande, avec le caractère territorial, la diversité des clients, leurs contraintes, intérêts et comportements économiques d'usage et de choix ; avec aussi leurs perceptions des caractéristiques des services.
- Les relations entre l'offre et la demande, leur adaptation mutuelle.

Cette modélisation économique repose sur des hypothèses économiques et probabilistes, et sur des traitements sophistiqués de recherche opérationnelle. Les hypothèses sont présentées

et discutées, tandis que les traitements sont plutôt esquissés, en privilégiant certains algorithmes significatifs (recherche d'itinéraire, chargement d'un réseau, répartition du trafic entre options concurrentes, équilibrage offre-demande).

### 0.3 Approche didactique

Priorité est donnée à la capacité de représentation et à la logique input-output de chaque modèle : on privilégie systématiquement l'interprétation économique avec ses causalités propres (coût, utilité, profit) et les comportements micro-économiques des acteurs.

La variété des acteurs-demandeurs (segmentation des clients) et la diversité des circonstances (espace, temps, aléas...) sont modélisées de manière statistique : certains modèles ont un caractère probabiliste poussé, et notamment les modèles de choix discret.

Les éléments d'hypothèses et de méthodes sont introduits progressivement, au cours de la présentation d'un modèle qui les utilise.

Le cours nécessite des connaissances basiques préalables en micro-économie, en économie des transports, en probabilité et statistique, et en informatique et modélisation.

Dans sa configuration actuelle, le cours procède surtout par des exposés magistraux qui présentent les principes, démontrent les effets et montrent des applications. Le cours ne comporte pas de travaux dirigés autres que des exercices à traiter « à la main » (et souvent avec la calculatrice). Les logiciels de modélisation-simulation, instruments irremplaçables des études opérationnelles, sont évoqués mais non utilisés. Une utilisation intensive et élargie, en particulier pour le diagnostic « territoire et transport », a lieu dans le cours Méthodes d'Analyse des Systèmes Territoriaux (MASYT).

### 0.4 Plan du cours

Dans le cours, on approfondit progressivement la modélisation de la demande, en considérant d'abord le niveau « minimal » des flux origine-destination de déplacement sur un réseau modal, puis le niveau « intermédiaire » du choix modal, enfin le niveau « fondamental » de la distribution spatiale et de la génération des déplacements, en liaison avec l'occupation du sol par des établissements et des activités.

Précisément, le cours est organisé en sept séances :

1. Généralités : éléments essentiels sur la demande ; principes de modélisation ; démonstration d'une étude.
2. affectation du trafic sur un réseau routier : choix d'itinéraire et répartition du trafic.
3. affectation aux services de transport collectif et sur un réseau plurimodal.
4. modèles de choix discret, modélisation du choix du mode de transport.
5. modèles de distribution spatiale.
6. modèles de génération ; prospective.
7. bilan et prolongements : logiciels de modélisation ; types d'études ; description du milieu professionnel ; composition des modèles.

## 0.5 Modalités pédagogiques

Le cours procède par exposés magistraux de l'enseignant-responsable.

L'évaluation des connaissances est pratiquée au moyen d'un examen final au cours de la dernière séance, d'une durée de 80 minutes. Le sujet d'examen comporte plusieurs exercices dont la résolution est analogue à des exercices traités en cours.

La participation orale est encouragée, que ce soit pour demander des éclaircissements ou apporter des commentaires constructifs, ou contribuer à la résolution des exercices. Les contributions orales de qualité sont sanctionnées par un bonus de notation.

L'assiduité est obligatoire, conformément au règlement de scolarité de l'ENPC. Deux absences non motivées entraînent l'exclusion. Un retard long (supérieur à 15 minutes) équivaut à une absence.

Les documents du cours comprennent :

- Le présent syllabus.
- Les exposés présentés en séance.
- Documents joints au cours et dont la lecture est recommandée : sous forme d'articles en langue anglaise qui présentent un modèle particulier et son application concrète.
- Documents téléchargeables sur le site web du cours, spécialement le guide du Certu sur la modélisation des déplacements de voyageurs.

Une liste de références additionnelles est fournie.

## 0.6 Equipe enseignante

Enseignant responsable, chargé des cours magistraux : Fabien Leurent

## **1. GENERALITES**

### **1.1 Définitions fondamentales (20')**

Notions physiques. Notions économiques. Notions systémiques

### **1.2 Description essentielle de la demande de transport (30')**

Caractères physiques

Une causalité dérivée de la demande pour les activités

Variétés, variabilités, variations

Caractères économiques : échanges, coûts, décisions

Caractères culturels, sociaux, psychologiques

Influence des institutions et de la régulation

Aspects technologiques et historiques

### **1.3 Motivations opérationnelles et contextes d'application (30')**

La prévision de la demande

L'évaluation des projets et des politiques

La planification des réseaux

L'exploitation des réseaux et des services

La gestion du réseau en temps réel

La gestion commerciale des services de transport

### **1.4 Principes généraux de modélisation (20')**

Les quatre facettes d'un modèle : sémantique, formelle, technique, empirique

### **1.5 Démonstration d'une étude de trafic (45')**

Enjeux d'une autoroute ferroviaire de fret sur l'axe Rhône-Languedoc

Objectifs de l'étude de trafic

La méthode d'étude et le modèle offre-demande

Scénarios et simulations

### **1.6 Modèles de la demande de transport : une typologie (20')**

Modèles non-spatialisés de volume d'usage : taux d'évolution et élasticités

Modèles spatialisés : formation des flux et choix

Modèles de choix discrets

Modèles d'acteurs et d'activités

Modèles de marchés économiques couplés

## **2. L'AFFECTATION DU TRAFIC AUX ITINERAIRES SUR UN RESEAU : LE CHOIX D'ITINERAIRE**

### **2.1 Description basique de la demande (20')**

Consistance ; spatialisation ; segmentation

### **2.2 Moyens et services de transport (25')**

Définitions : services, moyens, maillons, structures de cheminement

Représentation par éléments : noeuds et arcs d'un réseau

### **2.3 Problèmes de réseau (45')**

Composition des services : la recherche d'itinéraires

Problème de plus court chemin, algorithme de Dijkstra

Formation du trafic local : le problème de chargement en volume

Problème d'affectation

### **2.4 Le choix d'itinéraire et la répartition du trafic (45')**

Hypothèses microéconomiques : comportement individuel, rationalité économique, information

Variété des préférences : modèle bicritère prix-temps

Caractère stochastique : modèles probit, logit linéaire, logit logarithmique

Modélisation de l'information

### **2.5 Les relations offre-demande et l'équilibre (45')**

Nature des relations entre l'offre et la demande

La congestion locale et le "comportement" d'un offreur élémentaire

Les choix de la demande : volume élastique, sélection de moyen

Effets agrégés : état du marché

La concurrence entre itinéraires alternatifs

Equilibre du marché : l'optimum individuel ou l'optimum collectif

Calcul d'un équilibre

### **3. AFFECTATION AUX TRANSPORTS COLLECTIFS ET PLURIMODALITE**

#### **3.1 L'offre de TC (30')**

Les services : organisation en lignes et en missions

Lignes et stations : les modes auxiliaires en accès et en correspondance

Conditions d'accès et de correspondance

Dispositions tarifaires

L'offre telle que perçue par la demande : la qualité de service

#### **3.2 La demande et son comportement (45')**

Le problème des lignes multiples : le choix de mission sous information opportuniste ; ou sous information prévisionnelle

La disponibilité des services

Le confort

Le coût généralisé : dépendance envers la classe d'utilisateur

#### **3.3 Structures de cheminement (30')**

Treillis et hyperchemin : hypothèses, traitement (recherche et chargement), critique

Chaînes

Multichemins

#### **3.4 L'équilibre offre-demande (15')**

Phénomènes de congestion

Surplus de la demande

#### **3.5 TD : concurrence modale (60')**

Transport interurbain de voyageurs

Mode routier versus TC

## **4. CHOIX DISCRETS, CHOIX MODAL**

### **4.1 Théorie des choix discrets (45')**

Approche empirique d'une répartition

Formules-types de répartition

Dérivation microéconomique : théorie de l'utilité aléatoire

Modèles basiques de choix discret : coefficients distribués ; probit ; logit

Modèles mixtes : stochastiques à coefficients distribués

Modèles avancés : les captivités, les non-linéarités, la structuration des choix complexes

### **4.2 Econométrie des choix discrets (60')**

Méthodes d'observation : Revealed Preferences versus Stated Preferences

La méthode du maximum de vraisemblance

- formulation désagrégée et son application
- traitement d'un exemple

Formulation et application au niveau agrégé

Méthode de régression (au niveau agrégé)

Estimation d'une distribution d'arbitrages prix-temps

### **4.3 Modélisation du choix modal (50')**

Répartition basée sur une grille

Modèles directs des volumes par mode

Formules "agrégées" de répartition

Modèles "désagrégés" basés sur des fonctions d'utilité aléatoire

Instances typiques

### **4.4 Choix modal des voyageurs dans l'agglomération parisienne (20')**

Revue des modèles appliqués au transport de voyageurs

Coefficients des fonctions d'utilité

Place du choix modal dans un système de modèles

## **5. LA DISTRIBUTION SPATIALE DES DEPLACEMENTS**

### **5.1 Approche empirique (15')**

Traitement par relations origine-destination (O-D) : flux et matrice O-D

Mesure d'une matrice O-D : enquêtes et traitements

### **5.2 Inférence entropique d'une matrice O-D (25')**

Méthode des facteurs de croissance. Interprétation par l'entropie. Modèle multiproportionnel

### **5.3 Modèles statistiques de distribution (20')**

Equation structurale

Formulation de l'erreur d'observation

Estimation statistique

Traitement algorithmique

### **5.4 Modèle gravitaire (25')**

Formulation simplifiée

Usages du modèle gravitaire

Modèle avec contraintes de marges simples ou doubles, avec contraintes multiples

Interprétation des variables duales associées aux contraintes : l'accessibilité

### **5.5 Le choix discret de destination (20')**

Hypothèses. Formulation. Comparaison au modèle gravitaire

Choix conjoint d'origine et de destination

### **5.6 Modèle des opportunités (15')**

Principe. Formulation. Applications

### **5.7 Le choix d'activités et l'accessibilité (25')**

Modèle de Cochrane et Koenig. Critique

Modèle d'accessibilité aux activités vacantes. Synthèse sur l'accessibilité

### **5.8 Equilibre spatial et modèles d'échanges (30')**

Principe de l'équilibre spatial pour la production, la consommation et l'approvisionnement.  
Le problème "classique" de transport et commerce

Modèles de commerce : échanges entre zones.

Modèle d'input-output : échanges intersectoriels pour la production économique.

Modèles d'input-output spatialisé

### **5.9 Récapitulation (5')**

Domaines d'application des modèles

Complémentarités potentielles

## **6. GENERATION ET PROSPECTIVE**

### **6.1 Analyse spatialisée pour un territoire (20')**

Délimitation d'un territoire, périmètre d'étude

Décomposition en zones

Observation d'une population, de ses mouvements

### **6.2 Modèle zonal de génération (30')**

Descripteurs d'une zone

Formules d'émission, de réception

Distinction des motifs de déplacement

Cas du fret

### **6.3 Modèle catégoriel de génération (40')**

Principe

Cas des voyageurs

Cas du fret. Le modèle FretUrb pour les marchandises en ville

### **6.4 Modèles d'évolution agrégée (20')**

Evolution d'un volume agrégé de trafic

Séries chronologiques

Facteurs explicatifs, régression

### **6.5 Modèles d'évolution par transitions (20')**

Modèles démographiques

- analyse temporelle d'une population
- modèle de cycle de vie
- applications en transport

Modèles de migrations

### **6.6 Scénarios et prospective (50')**

Principes de l'analyse prospective

La méthode des scénarios

Prévision d'un scénario

Analyse multicritère

Comparaison des scénarios, aide à la décision

## **7. CONCLUSION**

### **7.1 Contrôle des connaissances (80')**

### **7.2 Sur les logiciels de modélisation (30')**

Enjeux de productivité

Capacité fonctionnelle

Démonstration avec animation visuelle

Atouts respectifs des principaux logiciels du commerce

### **7.3 Etudes et modèles (15')**

Besoins d'études, et dispositifs de modélisation (composition, organisation)

### **7.4 La composition des modèles (30')**

Composants élémentaires

Combinaison en profondeur, internes à un bloc-composant

Combinaisons en largeur : interconnexion de composants, architecture du modèle

### **7.5 Conclusion (10')**