



Fabien LEURENT

Modélisation de la demande de transport

Généralités

ENPC

Laboratoire Ville Mobilité Transport

Axe Economie des Réseaux et Modélisation Offre-Demande

Sommaire

Introduction	1
1. Définitions fondamentales.....	2
1.1 Aspects physiques : déplacement, usager, transport, mode, réseau	2
1.2 Aspects économiques : service, offre, demande	2
1.3 Aspects systémiques : marché, impacts, régulation	3
1.4 Synthèse graphique	4
2. Description essentielle de la demande.....	5
2.1 Caractères physiques.....	5
2.2 Une causalité dérivée de la demande pour les activités	5
2.3 Variétés, variabilités, variations	6
2.4 Caractères économiques : échanges, coûts, décisions	6
2.5 Caractères culturels, sociaux, psychologiques	7
2.6 Influence des institutions et de la régulation	10
2.7 Aspects technologiques et historiques.....	10
2.8 Un bilan provisoire.....	11
3. Motivations opérationnelles et contextes d'application.....	12
3.1 La prévision de la demande	12
3.2 L'évaluation des projets et des politiques	13
3.3 La planification des réseaux	14
3.3.1 Enjeux de la planification	14
3.3.2 Objectifs et variables d'action	15
3.3.3 Types d'études.....	16
3.3.4 Besoins en modèles de demande.....	17
3.4 L'exploitation des réseaux et des services.....	18
3.5 La gestion du réseau en temps réel	19
3.6 La gestion commerciale des services de transport	20
4. Principes généraux de modélisation	21
4.1 Définitions	21
4.2 Les quatre plans ou facettes, dans un modèle de simulation.....	22
4.3 Plan conceptuel ou sémantique.....	22
4.4 Plan formel	23
4.5 Plan technique	25
4.6 Plan empirique	26
4.7 Synthèse	27

5. Démonstration d'une étude de trafic.....	28
5.1 Enjeux d'une autoroute ferroviaire de fret sur l'axe Rhône-Languedoc.....	28
5.2 Objectifs de l'étude de trafic	29
5.3 La méthode d'étude et le modèle offre-demande	31
5.3.1 Spécifications majeures du modèle opérationnel.....	31
5.3.2 Représentation de l'offre.....	31
5.3.3 Représentation de la demande.....	33
5.3.4 Formule du coût généralisé	34
5.3.5 Cas de la relation Metz-Montpellier.....	35
5.4 Scénarios et simulations.....	36
5.4.1 Contenu et composition d'un scénario	36
5.4.2 Conception des scénarios.....	36
5.4.3 Résultats des simulations	37
5.5 Enseignements et commentaires	39
5.5.1 Analyse et diagnostic des résultats.....	39
5.5.2 Sur la portée du modèle.....	40
5.5.3 Sur la transférabilité du modèle	40
6. Modèles de la demande de transport : une typologie.....	41
6.1 Une grille d'analyse en quatre questions discriminantes	41
6.2 Panorama des modèles.....	42
6.2.1 Modèles non-spatialisés de volume d'usage : taux d'évolution et élasticités	42
6.2.2 Modèles spatialisés : formation des flux et choix	42
6.2.3 Modèles de choix discrets.....	44
6.2.4 Modèles d'acteurs et d'activités	44
6.2.5 Modèles de marchés économiques couplés.....	45
6.3 Systèmes de modèles	45
6.4 Quelques repères historiques.....	46
7. Conclusion.....	48
7.1 Synthèse	48
7.2 Prolongements	48
8. Exercices	49
8.1 Sur la définition de la demande	49
8.2 Sur la description de la demande	49
8.3 Sur les contextes d'application	49
8.4 Sur les principes de modélisation	50
8.5 Sur la démonstration d'étude de trafic	50
8.6 Sur les approches de modélisation.....	50
9. Bibliographie	51

INTRODUCTION

Cette leçon fournit des éléments basiques pour comprendre **l'objet à modéliser** : la demande de déplacement en relation avec l'offre de transport ; ainsi que **la démarche de modélisation**, de manière générale avec des principes généraux, et aussi de manière particulière au domaine.

Elle se compose de sept parties principales et deux parties annexes :

1. les définitions fondamentales.
2. une description « essentielle » de la demande.
3. les motivations opérationnelles et les contextes de modélisation.
4. les principes généraux de modélisation.
5. la démonstration d'une étude de trafic.
6. une typologie des modèles de transport.
7. une conclusion.
8. des exercices.
9. une bibliographie.

1. DEFINITIONS FONDAMENTALES

1.1 Aspects physiques : déplacement, usager, transport, mode, réseau

Un **déplacement** est le mouvement d'une entité matérielle, personne ou objet, entre deux lieux : le lieu de départ est l'origine du déplacement, le lieu d'arrivée la destination.

Un **usager du transport** est une personne qui effectue un déplacement ; plus largement, c'est un acteur économique qui commande, consomme des services de transport.

Le **transport** d'une personne ou d'un objet, est la réalisation d'un déplacement de l'entité considérée. Dans un sens spécialisé, le **transport** désigne l'activité exercée par certains acteurs économiques, appelés les transporteurs ou les offreurs de transport, pour produire du transport au service de voyageurs ou de chargeurs de fret.

Un **mode de transport** est une technologie élémentaire pour déplacer une entité entre deux lieux. On peut décomposer un mode en trois niveaux complémentaires, superposés : l'infrastructure, support matériel réputé fixe ; le véhicule, support matériel mobile ; et le protocole d'exploitation, ensemble des règles et pratiques de conditionnement, de manipulation, d'accès, de conduite, de circulation.

Un **moyen de transport** est une technique pour produire un déplacement, par un ou plusieurs modes de transport.

Un **réseau de transport** est un ensemble de moyens de transport qui couvrent un certain territoire, et relèvent d'un ou plusieurs modes (réseau monomodal ou plurimodal). On peut considérer un réseau géré par une certaine entreprise ; ou un réseau d'infrastructure, ou un réseau de services.

1.2 Aspects économiques : service, offre, demande

Service de transport : un **service rendu** est la réalisation d'un déplacement par un transporteur pour un client. Un **service offert** est une possibilité de service, accessible à des clients potentiels sous certaines conditions de disponibilité, de qualité et de prix.

Un **offreur de transport** est un acteur économique qui produit du transport sous forme intégrée ou partielle. Certains offreurs sont des opérateurs d'infrastructure, responsables de la construction, l'aménagement et l'équipement ; de la maintenance et de l'entretien ; ainsi que de l'accès des véhicules à l'infrastructure et de la circulation. D'autres sont des opérateurs de service, qui détiennent des véhicules pour transporter des voyageurs ou du fret selon certaines règles d'accès et de tarif, avec une certaine qualité de service. Il existe des entreprises intégrées qui exploitent une infrastructure et des services de manière intégrée. En transport de voyageurs, l'usager est co-producteur du déplacement, dont il choisit le mode et l'itinéraire, souvent en fournissant un véhicule (automobile, deux roues...). En ce qui concerne le fret, certaines entreprises produisent leur propre service de transport, en auto-production et auto-consommation.

L'**offre de transport**, sur un territoire donné, est l'ensemble des moyens, des services et des offreurs de transport, avec leurs comportements individuels et collectifs. Une restriction de l'offre à certains moyens modaux constitue un **secteur d'offre**.

Un **client / consommateur / demandeur** est un acteur économique qui consomme ou est susceptible de consommer des services.

La **demande de transport**, sur un territoire donné, est l'ensemble des consommations de transport et des demandeurs de transport, avec leurs comportements individuels et collectifs.

Un **secteur de demande** est une demande pour un certain **type de service** : par exemple du transport de voyageurs en milieu urbain et à distance intermédiaire (entre 1 et 5 km), éventuellement par moyen modal.

Un **segment de demande** correspond à un type de clients ou de comportement.

1.3 Aspects systémiques : marché, impacts, régulation

Le **marché du transport**, pour un territoire donné et une certaine catégorie de services, est constitué par l'offre de ces services, par la demande, par leurs relations mutuelles. La relation primordiale est que la demande consomme des services offerts : cela détermine des volumes de consommation, des niveaux de service, des recettes et des impacts. Cet usage de l'offre par la demande constitue le résultat primordial du marché, ou plus simplement : l'état du marché. L'état du marché rétroagit sur la demande : chaque demandeur choisit ses consommations en fonction de cet état, et adapte ses décisions en matière de transport ou au-delà (ex. plan de localisation industrielle). L'état du marché rétroagit aussi sur l'offre : à court terme les offreurs produisent les services consommés, et à moyen terme ils ajustent leurs objectifs et leurs moyens de production.

Le marché du transport exerce des effets non seulement sur l'usage, la demande et l'offre, mais encore :

- sur l'**accessibilité** des lieux : la commodité et le coût pour accéder aux établissements et aux activités situés dans telle zone, lui confère un certain avantage relatif de position. L'accessibilité influence la **rente foncière**, prix pour disposer d'une unité de surface par période.
- Sur l'organisation de l'espace : l'emprise spatiale de l'infrastructure et des points d'accès, avec leur aménagement particulier ; les effets de cicatrice sur le tissu urbain ou rural avoisinant ; les effets de coupure sur les relations locales au voisinage d'un axe.
- Sur les pratiques sociales, les modes de vie, et la cohésion d'une société humaine vivant sur le territoire.
- Sur la qualité de vie riveraine : l'encombrement de l'espace par la circulation et le stationnement ; le bruit et la pollution du trafic, sans oublier les accidents matériels et corporels.
- Sur l'environnement naturel : la consommation de ressources en énergie ; la pollution de l'air, des eaux et des sols ; les conséquences sur la flore et la faune.

Ces effets sont externes, relativement au marché des transports, même si certains d'entre eux sont internalisés dans d'autres marchés : notamment le marché foncier et le marché du logement pour la rente foncière.

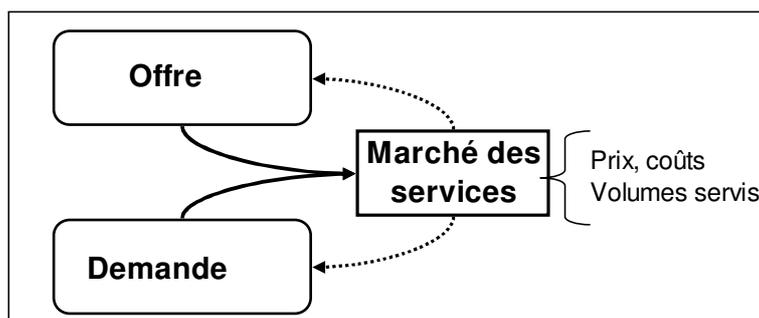
La gestion des effets externes et si besoin leur internalisation ; ainsi que l'encadrement des relations de service entre les offreurs et les demandeurs, des relations de concurrence ou de coopération parmi les offreurs : motivent la régulation du marché.

La **régulation du marché** est un ensemble de contrôles exercés pour influencer son organisation (par identification des acteurs et délimitation des rôles) et son fonctionnement (le comportement des acteurs, la nature et les formes de leurs interactions) au moyen de divers instruments juridiques, institutionnels, économiques, physiques. A priori la régulation est exercée au nom et au service de la collectivité, par une administration ou une agence dédiée.

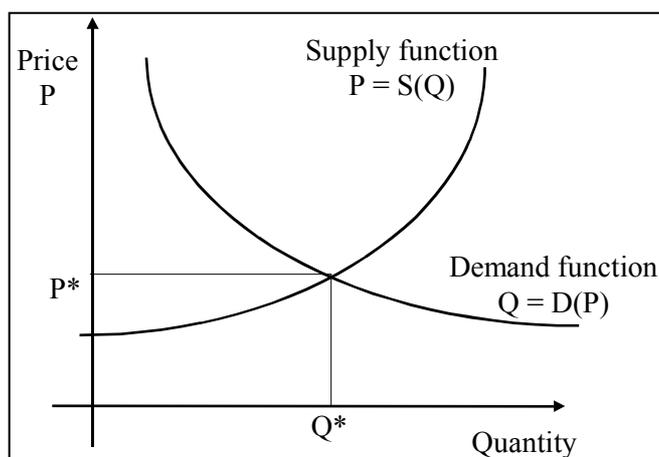
Le **système de transport**, sur un territoire, est l'ensemble des acteurs intervenant dans la production, la consommation et les effets du transport.

1.4 Synthèse graphique

Schéma de la rencontre entre l'offre et la demande sur un marché :



Analyse économique de l'équilibre offre-demande :



2. DESCRIPTION ESSENTIELLE DE LA DEMANDE

La demande de transport est un objet scientifique complexe : nous décrivons cet objet en considérant ses facettes respectivement physiques, causales, d'abondance, économiques, culturelles et sociales, technologiques et historiques.

2.1 Caractères physiques

Une demande élémentaire de déplacement concerne :

- une entité matérielle avec certaines propriétés physiques de dimension (taille, extension, volume), de masse (totale et en répartition), et des besoins spécifiques (confort pour les voyageurs, fragilité et température dirigée pour le fret).
- Deux lieux l'un d'origine et l'autre de destination, ainsi qu'un espace intermédiaire à franchir : caractère spatial du mouvement.
- Des circonstances temporelles : date de disponibilité au départ, créneau horaire cible pour l'arrivée, période de circulation.

Ces caractères conditionnent le service susceptible de satisfaire la demande. Ce service peut lui-même exercer des impacts physiques, cf la liste des effets externes.

A priori une demande peut admettre certains ajustements temporels, le client ou le serveur peut la stocker temporairement. Il est plus difficile de réaliser un report dans l'espace, qui supposerait un changement de destination, ou la substitution de flux entre clients dans le cas d'un produit : leur demande n'est guère déplaçable, sauf par éventuelles compensations entre des flux du même produit.

2.2 Une causalité dérivée de la demande pour les activités

Une demande émane d'un client, pour un motif qui dépasse le simple déplacement (à l'exclusion du motif de promenade). Pour un voyageur, il s'agit de mener une activité au lieu de destination, donc le transport permet certaines combinaisons d'activités menées dans des lieux distincts, et a priori l'individu en tire profit en tant que demandeur d'activité. Pour un objet, un déplacement constitue un maillon intermédiaire dans une chaîne de production, pour enchaîner des traitements successifs accessibles dans divers lieux. De leur côté, les offreurs d'activité peuvent spécialiser les établissements et bénéficier d'économies d'échelle.

Ainsi, pour tous les clients le déplacement sert un motif d'activité ou de traitement qui lui donne une finalité, une causalité. La demande de transport **dérive** de la demande pour les activités.

L'influence d'une action de contrôle sur les déplacements, dépend de leur motif d'activité : par exemple, les déplacements pour motif professionnel sont moins susceptibles de changer d'itinéraire en cas d'accroissement du tarif, que ceux pour motif de loisir.

2.3 Variétés, variabilités, variations

La demande de transport se caractérise encore par le foisonnement, la multiplicité et la diversité, en termes de besoins, d'acteurs et de modalités :

- La variété des besoins : variations selon la nature de l'entité à déplacer, les circonstances spatiales et temporelles, les motifs.
- La variété des acteurs : variations selon le centre de décision, les contraintes et les objectifs, les préférences et les comportements.
- La variété des modalités : les moyens de transport présentent une abondance combinatoire sur les réseaux maillés.

Ces **variétés** concernent la demande antérieurement à la réalisation du déplacement. De plus la réalisation est soumise à des **variabilités**, car dans le système de transport, le jeu des causes multiples induit de nombreuses perturbations et aléas : délais, défaillances, incidents, accidents...

Enfin, sur un certain territoire et à une époque donnée, la demande de transport est un phénomène humain, économique et social qui est localisé et temporalisé. Des analogies structurelles entre territoires en termes de distances, de superficies, de relief, de population et de répartition, voire même de climat et de ressources naturelles, peuvent être confortées par des analogies de besoins et de comportement, mais ces analogies sont limitées par des facteurs locaux de nature culturelle, démographique et sociale, qui induisent des variations. Pour un même territoire considéré à des époques distinctes, même si ces époques sont rapprochées et la plupart des individus sont conservés, chacun d'eux évolue : ses besoins et ses préférences varient avec l'âge, il est soumis à l'influence des modes, des formes et des normes sociales.

2.4 Caractères économiques : échanges, coûts, décisions

Un déplacement est un service rendu à un demandeur par un offreur, dans une relation **d'échange** à caractère économique. L'offreur a un processus de production et engage un coût de production. Le tarif reflète ces coûts, avec souvent des adaptations pour cause de politique commerciale ou de régulation.

Le demandeur subit le tarif, et de plus il ressent certains aspects qualitatifs du service, notamment le temps passé, comme un coût économique : l'ensemble des coûts subis ou perçus constitue le « **coût généralisé** ». C'est la contrepartie du service obtenu, et donc de l'utilité procurée au demandeur, du surplus brut qu'il retire en accédant à sa destination pour y mener l'activité désirée. La différence entre le surplus brut et le coût généralisé est le surplus net, le profit du consommateur.

Chaque acteur, offreur ou demandeur, peut être considéré comme un **centre de coût** et de profit, et donc comme une entité économique qui établit un budget. On le considère également comme un **centre de décision** : un décideur qui dispose d'une latitude de choix, d'une marge de manœuvre, d'une autonomie décisionnelle, et qui a une rationalité économique pour chercher à maximiser son profit.

En transport de voyageurs, le demandeur-décideur est souvent un individu pour son propre compte, ou un groupe d'individus à caractère familial (ménage) ou professionnel (entreprise, établissement scolaire) ou touristique. En transport de fret

le demandeur-décideur est en général une entreprise, ou une unité de l'entreprise : les comportements collectifs y sont plus fréquents qu'en transport de voyageurs, parce que si l'entreprise consomme un ensemble de déplacements elle recherche une optimisation globale, qui peut différer de l'union des optimisations locales.

Les décisions de la demande de transport peuvent consommer :

- A court terme, le choix d'un déplacement particulier dans le cadre-programme d'un ensemble de besoins, de choix d'horaire : le choix d'itinéraire sur un réseau ; éventuellement le choix modal et le choix de destination pour des motifs relativement imprévisibles (loisir, shopping).
- A moyen terme, le choix du moyen de transport, éventuellement complémentaire avec des choix d'équipement en moyens privés de transport (véhicule, abonnement) ; le choix de destination, pour des motifs d'usage répétitif (travail, scolarité, achats habituels) ; les contrats de client à fournisseur.
- A long terme, des choix de localisation : résidence d'un individu, établissement d'une entreprise ou autre organisme ; l'entreprise choisit encore l'organisation des circuits « internes » de production entre ses établissements. Le demandeur a aussi des choix à long terme concernant son accès aux moyens de transport : disposer du permis de conduire automobile pour un individu, ou d'un embranchement ferroviaire pour une entreprise.

Pour un demandeur, les divers choix se déterminent mutuellement, quel que soit leur terme temporel. On peut modéliser ces relations de dépendance par une structure de choix particulière au demandeur concerné.

Enfin, un acteur économique opère ses choix avec un certain **comportement économique** : soumis à certaines contraintes matérielles ou relationnelles, il cherche à optimiser son profit net. Cette recherche d'optimisation constitue la **rationalité économique** du comportement, et elle s'exerce dans des arbitrages entre des options. On modélise le comportement d'un acteur en représentant sa manière d'**arbitrer**, ses **préférences** individuelles pour telle catégorie d'options, sa **sensibilité** aux prix et aux divers aspects qualitatifs du service.

La rationalité du décideur est relative à **l'information** dont il dispose, et dont l'acquisition induit des coûts spécifiques de renseignement, d'apprentissage... Certaines options ne sont pas nécessairement connues, faute d'information. Certains aspects qualitatifs sont connus imparfaitement, éventuellement car ils présentent une variabilité intrinsèque qui n'est surmontée qu'avec la réalisation de l'option ; ou parce que la perception du décideur est entachée d'imprécision.

2.5 Caractères culturels, sociaux, psychologiques

Une population vivant sur un territoire est porteuse d'une culture, qui se développe à long terme, et qui conditionne ses besoins, ses habitudes, ses perceptions et comportements. De manière intimement imbriquée, les organisations et les pratiques sociales conditionnent également les besoins et les comportements. Enfin, s'agissant d'acteurs humains, des phénomènes psychologiques sont à l'œuvre dans les mécanismes de choix et la consolidation des comportements en habitudes et même en réflexes.

Les aspects et les formes culturels et sociaux déterminent d'abord les activités humaines et donc les besoins de déplacement. La vie sociale procède par des interactions entre les personnes, et donc par des activités pratiquées par plusieurs individus, dans des lieux dont ils partagent l'usage. Cela fixe des activités et des lieux de destination :

- des activités nécessaires et obligées, dans des établissements professionnels, scolaires, administratifs.
- Des activités nécessaires et en même temps choisies : affaires professionnelles et démarchage commercial dans les affaires de l'entreprise ; l'accès à des services commerciaux, médicaux, juridiques, bancaires... dans les affaires personnelles des individus ; l'accompagnement des jeunes enfants ou des personnes dépendantes par un adulte valide, dans le cadre du ménage ou de la famille.
- Des activités optionnelles pour les personnes, qui fixent elles-mêmes le degré de nécessité d'une activité et leur engagement individuel (exemple, pratique religieuse ou associative) : cette catégorie comprend notamment les loisirs (spectacle, cinéma, restaurant...).

La culture de la société engendre des besoins particuliers. Par exemple en Amérique Latine au 20^{ème} siècle, les services administratifs sont très présents et donnent lieu aux déplacements pour motif « bureaucratique », qui forment une part importante de la mobilité individuelle quotidienne.

L'organisation sociale influence aussi la répartition spatiale des activités, les formes d'habitat et d'établissements de diverses natures : ce qui détermine les distances à franchir pour mener certaines activités et entretenir des relations.

Concernant les comportements, la société conditionne chaque univers de choix (ensemble d'options) considéré par le demandeur d'un déplacement, en termes de possibilité matérielle et de possibilité morale pour les options de choix. Les possibilités matérielles sont liées au développement économique et social, à la panoplie des modes de transport qui équipent le territoire, à la structure et à la performance des réseaux : ce niveau d'offre correspond à une capacité de financement par la collectivité et par les consommateurs, donc aux revenus des demandeurs. Les revenus conditionnent également l'équipement privé en moyens de transport. De l'organisation sociale dépend également l'information accessible aux demandeurs, et nécessaire à l'identification des options de choix. De l'opinion sociale dépend encore l'acceptabilité de certaines formes d'organisation pour le système de transport : les sociétés plus libérales acceptent plus facilement des systèmes à tarification active (dynamique, différenciée par segments...) qui impliquent davantage les demandeurs dans la couverture des coûts de production.

Les croyances sociales en certaines valeurs, le regard social porté par la société sur les pratiques d'un individu, déterminent également les possibilités « morales » de choix :

- dans une très grande agglomération, il est banal que les actifs travaillent loin de leur domicile, avec des temps de transport élevés, typiquement 45 minutes par jour dans chaque sens en Ile-de-France. Un candidat sur le marché du travail, est soumis par son entourage à une pression morale de considérer les emplois offerts à cette distance de son domicile ; alors que dans un contexte

urbain de dimension inférieure, un tel éloignement paraîtrait anormal et réhibitoire.

- De manière plus culturelle, certaines sociétés considèrent positivement le partage des moyens de transport : usage plus large du transport collectif, partage des véhicules individuels et notamment le co-voiturage ou la voiture partagée. Alors des options matériellement possibles, deviennent aussi moralement possibles, concevables et acceptables.

Quant aux comportements, les pratiques d'usage des transports relèvent de codes officiels tels que le code de la route ou le règlement d'utilisation d'un mode de transport collectif ; ainsi qu'à des codes officieux :

- La fixation d'habitudes communes mais locales : dans certaines agglomérations les feux de circulation routière sont perçus comme des signaux davantage informatifs que contraignants, que les conducteurs interprètent en relation avec l'état de la circulation et des mouvements qu'ils croisent.
- Le degré de tolérance envers certaines anomalies de comportement, en particulier le stationnement sur un emplacement interdit : la tolérance est à la fois personnelle (en sens contraire de l'autodiscipline), collective informelle (les passants et riverains ne se formalisent guère), et collective formelle (peu de sanctions policières). Le niveau de tolérance influence le coût de déplacement pour le demandeur, puisqu'il conditionne la probabilité d'une amende (et aussi le tarif de l'amende, influencé par l'opinion sociale).

Enfin, la psychologie des demandeurs intervient dans les perceptions individuelles, et dans les mécanismes d'apprentissage et la formation des habitudes. Les voyageurs perçoivent les options de déplacement de manière subjective, avec des particularités individuelles qui relèvent de causes psychologiques (caractère subjectif d'un temps passé), physiques (taille, vitesse) et physiologiques (acuité des sensations, endurance à la pénibilité) et avec des idiosyncrasies dans leurs goûts et leurs préférences.

Un observateur extérieur tend à amalgamer ces causes, sur un groupe d'individus, comme des imprécisions à caractère aléatoire.

Des phénomènes psychologiques sont également à l'œuvre dans les comportements de choix. Un demandeur qui découvre une situation de choix la considère de manière relativement consciente et raisonnée, il tente de s'informer. Si la situation se répète, dans les occurrences initiales il peut expérimenter lui-même certaines options et variantes ; mais après cette phase initiale d'apprentissage, le demandeur prend l'habitude des options choisies, il devient conditionné par leur usage répété. Ainsi le raisonnement initialement actif et économique, se mue en choix intuitif, puis en choix instinctif, et à terme en habitude de comportement, que le demandeur tend à reproduire dans d'autres situations où l'option habituelle est disponible de manière analogue, même si d'autres options sont accessibles et pourraient se révéler avantageuses.

Ces habitudes, réflexes acquis imprègnent les comportements et confèrent à la demande de l'inertie, voire même une certaine irréversibilité. D'autant plus si une inertie économique vient renforcer l'inertie psychologique, lorsque le demandeur investit dans une ressource qu'il lui faut amortir à terme. Dans la mobilité des

personnes, les cas d'importance majeure sont la localisation résidentielle, et l'équipement automobile, avec éventuellement un couplage qui renforce l'effet d'inertie. En transport de fret, les équipements en véhicules et en infrastructures dédiées, en établissements immobiliers, induisent une inertie économique liée à l'amortissement des investissements : l'inertie psychologique touche plutôt des petites entreprises que des grandes, qui disposent d'une expertise interne pour élaborer les décisions logistiques.

2.6 Influence des institutions et de la régulation

La régulation des transports institue les formes et les relations sur le marché des transports : elle détermine quels acteurs peuvent offrir quels services, elle impose des formats institutionnels aux offreurs (en domaine et nature d'activités) et des relations institutionnelles entre les offreurs et les demandeurs.

La régulation de l'offre influence :

- la structure, la composition, et la performance des services : ce qui conditionne les options disponibles pour les demandeurs. En particulier pour les règles d'accès et d'usage des services ; et pour les moyens de transport qui combinent plusieurs réseaux d'entreprises, la régulation influence la coordination de ces réseaux, l'ergonomie d'accès et de transfert, les coûts d'information et de transaction pour les clients.
- Les tarifs : le niveau de prix d'un service détermine une accessibilité financière pour chaque demandeur. Le régulateur peut encadrer les tarifs et leurs variations commerciales. De plus, il peut imposer des tarifs à caractère social, afin de favoriser l'accès financier à certains segments de demande. En général le régulateur compense l'incidence sur les recettes par un versement financier à l'opérateur.
- Les formes contractuelles entre les offreurs, notamment la relation de client à fournisseur pour l'usage d'une infrastructure, et entre les offreurs et les demandeurs. Le degré de formalisation et d'adaptation du contrat de transport dépend évidemment de l'enjeu du déplacement concerné : l'usage d'un réseau de transport routier non concédé à un exploitant de trafic, est informel ⁽¹⁾, le passage par un réseau de transport collectif urbain se formalise uniquement par le titre tarifaire et le règlement d'utilisation.

2.7 Aspects technologiques et historiques

En transport la technologie est souvent associée aux véhicules, éventuellement aux infrastructures, rarement aux services et aux protocoles : on la conçoit plutôt en relation avec l'offre dans sa partie « hard », qu'avec la demande. Cependant la demande est conditionnée par la technologie en raison d'une série de relations :

- Les technologies modales déterminent les options de déplacement, à choisir par les demandeurs.

¹ ce qui n'exonère pas l'exploitant d'infrastructure de certaines responsabilités notamment en matière de sécurité

- La diffusion d'une technologie, de ses équipements et de son usage, façonne et structure la demande. Ainsi la diffusion de l'automobile dans les pays développés, a rendu possibles diverses pratiques, des programmes d'activités complexes qui associent une série d'activités menées dans des lieux distincts, avec éventuellement plusieurs individus : programmes qui seraient irréalisables par d'autres modes.
- Les règles techniques d'usage, qui sont incluses dans les protocoles de service, font partie intégrante de la technologie, et impliquent les demandeurs – du moins en transport de voyageurs.
- De manière connexe, la disposition d'information dynamique sur l'état d'un réseau de transport, permet aux demandeurs d'ajuster leur demande et donc leur usage.
- Le développement technologique d'ensemble, au-delà du secteur des transports, conditionne les pratiques sociales : pensons aux substitutions possibles entre les télécommunications et le transport grâce aux échanges téléphoniques, aux échanges télématiques de données, aux visio-conférences ; ainsi qu'à leurs complémentarités, quand des communications à distance permettent de planifier à très court terme des activités qui ne pourraient se tenir sans ces ajustements fins.

2.8 Un bilan provisoire

Toutes ces considérations révèlent la complexité de la demande de transport, et donc la difficulté d'une analyse systématique par la modélisation. Elles peuvent servir à décrire le contenu d'un modèle : en recherchant les caractères essentiels de l'objet qui sont modélisés explicitement, ou implicitement, ou pas du tout.

3. MOTIVATIONS OPERATIONNELLES ET CONTEXTES D'APPLICATION

Les modèles de la demande de transport sont des modèles de recherche opérationnelle, au croisement de l'analyse physique, de l'analyse économique, de la formulation mathématique et des théories de l'optimisation et des probabilités, du traitement algorithmique, et de l'estimation économétrique.

Originellement, ils ont été développés pour l'aide à la décision, dans le contexte du développement des grands moyens de transport, qui s'est ensuite élargi en contexte de la planification des réseaux. Progressivement, les modèles ont été sophistiqués pour servir aussi dans les contextes de l'exploitation du trafic et de la gestion des déplacements, et leurs applications s'étendent désormais jusqu'à la gestion commerciale et au revenue management.

Nous allons décrire successivement les principaux contextes d'application : 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 ; et la gestion commerciale des services de transport.

3.1 La prévision de la demande

Dès le 18^{ème} siècle, plus nettement au 19^{ème} siècle, et systématiquement depuis le 20^{ème} siècle, la puissance publique et les opérateurs de réseau se sont intéressés à prévoir la demande pour une infrastructure ou un service, afin d'évaluer l'opportunité de développer ce moyen.

Une telle prévision a deux composantes : d'une part établir la clientèle du service examiné, et d'autre part prévoir l'évolution à long terme de cette clientèle. En effet les investissements nécessaires au moyen sont coûteux, car les infrastructures comme les véhicules ont un prix élevé. C'est pourquoi ils sont conçus pour une longue durée de vie technique, ce qui permet de les amortir à long terme, autrement dit de leur donner une longue durée de vie économique. Cette stratégie d'amortissement permet de limiter le coût de chaque usage, à condition d'assurer un niveau suffisant d'utilisation pendant toute la période concernée.

Pour prévoir la demande, on modélise : d'une part la demande totale pour un ensemble de moyens qui englobe les divers ensembles de choix des demandeurs, avec son évolution à long terme ; et d'autre part, la part de marché du moyen examiné, par comparaison aux moyens concurrents. A chaque époque, la clientèle du moyen est le produit de la demande totale et de la part de marché.

Citons quelques études récentes de prévision de la demande :

- Trafic de l'autoroute A86-ouest en tunnel à l'ouest de Paris.
- Autoroute interurbaine A19 Arthenay-Courtenay (région Centre).
- Clientèle voyageurs et fret du tunnel ferroviaire Lyon-Turin.
- Trafic du canal Seine – Nord Europe reliant à fort gabarit le bassin de la Seine au réseau de voies navigables de l'Europe du Nord.

3.2 L'évaluation des projets et des politiques

Nous avons déjà indiqué la logique économique du développement d'un moyen de transport : amortir à long terme des équipements coûteux, grâce à un niveau suffisant de demande.

Dans l'évaluation financière des projets d'investissement, la prévision de la demande constitue une moitié, l'autre moitié étant l'estimation du coût de production : équipements, entretien et maintenance, commercialisation et exploitation.

La **rentabilité financière** du projet dépend de la comparaison entre les avantages que sont les recettes tarifaires provenant des clients ; et les coûts de production. Il s'agit d'une évaluation **technico-économique**, sous la forme d'une analyse coûts-bénéfices.

La collectivité, représentée par le régulateur, peut associer d'autres valeurs et coûts au projet de service, en raison des effets externes : on procède alors à l'**évaluation socio-économique** (ou collective), qui se distingue de l'évaluation technico-économique par :

1. l'intégration des coûts et bénéfices de tous les acteurs concernés et impactés (ou presque tous, autant que possible).
2. le plus souvent, la mise en équivalence sur une même échelle, pour les bénéfices et coûts des acteurs : cela conduit à agréger les surplus des demandeurs, ainsi qu'à neutraliser la recette puisqu'il s'agit d'un transfert des demandeurs aux offreurs. ⁽²⁾
3. concernant les clients, on considère le surplus de la demande, i.e. le bénéfice que les clients retirent du service, après déduction du coût généralisé.
4. par classe de demande, la collectivité peut associer des valeurs tutélaires à certains aspects : en particulier pour le coût unitaire du temps, et les coefficients de pénibilité.
5. concernant les externalités, on monétarise autant que possible, et notamment : l'insécurité (coûts des dommages corporels, évalués d'après des valeurs tutélaires pour un tué, un blessé grave ou léger) ; le bruit (selon la population impactée à certains niveaux d'exposition) ; certaines émissions de polluants, ainsi que les émissions à effet de serre.

L'évaluation socio-économique nécessite de prévoir la demande, et donc le modèle correspondant : elle en retire davantage d'information que l'évaluation technico-économique, afin de renseigner les termes complémentaires. ⁽³⁾

² cette mise en équivalence est discutable. Notamment la collectivité pourrait exprimer une préférence pour les recettes commerciales, afin de privilégier le développement de l'activité économique, en comptant davantage une unité de monnaie perçue par un offreur, qu'une unité dépensée par un demandeur

³ d'ailleurs les entrepreneurs de transport qui déposent un projet en réponse à un appel d'offres de la collectivité, doivent évaluer eux-mêmes certains impacts, en complément de leur proposition technique et financière

Au-delà d'un projet particulier, l'évaluation peut concerner une action ou un ensemble d'actions sur un système de transport, autrement dit une certaine **politique de transport**. Cela impose plusieurs exigences sur le modèle de demande :

- traiter un réseau et pas seulement un faisceau d'options parallèles.
- Représenter les divers effets de toutes les actions considérées. Or certaines actions sont difficiles à modéliser, notamment pour les aspects suivants.
- Le stationnement, dont l'occupation varie au cours d'une période. Une modélisation réaliste nécessite d'explicitier les stocks de véhicules servis ou en attente, et les réserves de capacité, avec leurs évolutions dynamiques. Or la grande majorité des simulations restent encore statiques.
- Le bouclage de plusieurs déplacements dans le programme d'activités d'un individu, ce qui va souvent de pair avec l'usage de la voiture, et doit être modélisé pour simuler correctement certaines politiques de transfert modal.
- Les impacts sur la qualité de vie, encore peu appréhendés et mal connus.
- Les interactions entre le transport et l'occupation des sols, avec le marché foncier, celui du logement, celui de l'établissement des entreprises. Les interactions sont comprises de manière qualitative, mais encore peu intégrées dans les modèles opérationnels, pour cause à la fois de lourdeur et de manque de données.

3.3 La planification des réseaux

Ce contexte privilégié d'application mérite une présentation circonstanciée des enjeux, des objectifs et des variables d'action de la planification, avant de décrire les types d'études et de caractériser les besoins en modèles.

3.3.1 ENJEUX DE LA PLANIFICATION

Sur un territoire, un réseau de transport répond aux enjeux basiques suivants :

- **connecter** les personnes et les activités, et donc connecter chaque lieu porteur aux autres afin de rendre le contact possible.
- Assurer une **liaison efficace**, de bonne qualité : facilité et économie d'accès, rapidité, sur les relations origine-destination.
- Offrir une **capacité** suffisante à l'écoulement des flux de déplacement, afin d'éviter que le niveau d'usage ne menace la fluidité et surtout la fiabilité du service. Cet enjeu de capacité interagit avec l'enjeu d'efficacité, il dépend structurellement de la forme de réseau, car on le satisfait en général en concentrant les flux sur de grands itinéraires, donc en hiérarchisant le réseau.

Les enjeux de connexion, d'efficacité et de capacité sont basiques en ce qu'ils concernent le service rendu par le réseau, donc la finalité du réseau au service de la population. Ils entraînent des enjeux dérivés, qui résultent des conditions matérielles, financières et économiques qui s'appliquent aux modes de transport :

- la **durabilité** : réduire les impacts dommageables du réseau sur l'environnement, son emprise écologique, énergétique, ses effets sur les

milieux naturels, la flore et la faune, ainsi bien sûr que sur le milieu humain : sécurité, qualité de vie locale, préservation du tissu traversé et de la cohésion sociale.

- La **faisabilité financière**, avec la contribution des clients et éventuellement de la collectivité.
- La **performance économique** : le rendement économique pour une entreprise opératrice, le rendement socio-économique pour la collectivité.

L'ensemble des enjeux pèsent sur la sélection des moyens, avec des influences diverses et parfois contraires. La planification du transport a pour but de servir les enjeux et de les concilier, en établissant des compromis efficaces et robustes, quelques principes étant :

- de mettre en adéquation la capacité et les coûts de production, avec le niveau de « besoins » et d'usage.
- D'arbitrer entre le niveau d'usage et l'exigence de durabilité, éventuellement en modérant l'usage ou en l'orientant vers certains modes plus respectueux de l'environnement.
- D'agir non seulement sur le réseau, mais aussi sur la demande au travers de l'occupation des sols, de la répartition des activités dans l'espace et les unes relativement aux autres, ainsi que du management de la mobilité.

3.3.2 OBJECTIFS ET VARIABLES D'ACTION

Les principaux acteurs de la planification sont la collectivité, porteuse de tous les intérêts et notamment des besoins des usagers ; et les offreurs, les entreprises productrices.

La planification du réseau consiste à le structurer, le dimensionner, le hiérarchiser et le conditionner :

- le **structurer** en définissant la topologie des tronçons et des jonctions, leur orientation uni- ou bidirectionnelle, leurs éventuelles restrictions d'accès à certaines classes de trafic.
- Le **dimensionner** : choisir la capacité d'écoulement au niveau local d'un tronçon ou d'une jonction, en relation avec le volume de trafic à écouler. Fixer également la capacité de stationnement, pour les véhicules comme pour les voyageurs en attente dans les TC.
- Le **hiérarchiser** en fixant la fonction d'acheminement pour chaque axe du réseau : desserte fixe, artère, axe structurant, ou axe à grande circulation. En milieu routier urbain ces catégories correspondent à, respectivement : la petite rue, la grande rue, l'avenue ou le boulevard, la voie rapide ou l'autoroute. Les modes de TC de voyageurs suivent une hiérarchie comparable : bus simple, bus à haut niveau de service, tramway, métro, train.
- Le **conditionner**, en déterminant le niveau de service, le tracé et le type d'aménagement pour chaque élément, tronçon ou jonction. Pour un tronçon on choisit les modalités d'exploitation : le type de régulation en sortie, la vitesse limite, les flux admis et leurs conflits potentiels, l'aménagement des abords (stationnement, croisement d'autres flux). Pour une jonction, on choisit

le type (carrefour plan ou échangeur), la configuration (éventuels îlots centraux, forme des branches...) et les modalités d'exploitation.

Comme le réseau sert des courants de déplacement, les divers choix de planification doivent présenter une cohérence : une continuité topologique par itinéraires ou lignes pour les fonctions et les modalités d'exploitation ; une progression logique de la hiérarchie ; une relation d'homogénéité au sein de chaque type de moyens. La signalisation des destinations et des itinéraires sert à rendre lisible le réseau : le schéma de signalisation doit ainsi présenter une cohérence, pour éviter d'induire en erreur les usagers.

Les **variables d'action** sont relatives aux éléments du réseau, tronçons et jonctions, à leurs combinaisons en forme d'itinéraire et de lignes, et à l'organisation générale de la circulation (le plan de circulation et le schéma de signalisation).

A une époque donnée, la grande majorité des variables d'action sont fixées et seules certaines variables sont considérées pour servir des objectifs particuliers : combler le manque d'un maillon ; améliorer l'accessibilité d'une zone ; fluidifier une jonction ; réduire la congestion sur un itinéraire ; réaménager un itinéraire ; reconfigurer une ligne ; etc.

3.3.3 TYPES D'ETUDES

Les études de planification concernent l'analyse de l'existant pour diagnostiquer l'état de l'offre et son usage par la demande ; l'identification et la hiérarchisation de besoins d'action ; la conception et l'évaluation de scénarios d'évolution de l'offre ; la prospective de la demande et le management de la mobilité ; la prospective du système de transport. Chaque type d'étude a un objet et des enjeux spécifiques.

Le **diagnostic d'offre et d'usage** concerne un réseau existant et observé. Il s'agit de caractériser et de qualifier le niveau d'usage et la qualité de service sur une partie ou la totalité du réseau, en recherchant les éventuels points noirs : saturations, dégradation du niveau de service, usage d'itinéraire en dépit des fonctions assignées... Il serait bon de rechercher également les réserves de capacité, les marges de manœuvre, qui sont peut-être des gisements d'économie. Un diagnostic d'ensemble est préférable pour identifier les principaux défauts et les principaux gisements ⁽⁴⁾.

Les **analyses de besoins** comportent l'identification de besoins d'aménagement du réseau, à caractère local ou plus étendu ; leur évaluation, en proposant des solutions qui offrent des avantages et ont des coûts ; leur hiérarchisation en intensité de besoin et en rendement des solutions. Le résultat attendu est une liste d'actions, ainsi qu'une programmation temporelle des investissements pour une certaine hypothèse de budget.

La **conception – évaluation de scénarios d'offre** sert à préparer les grands choix de planification. Un scénario d'évolution de l'offre consiste en une série d'aménagements, réalisés à une ou plusieurs époques. Dans une telle étude, on établit un scénario de référence qui intègre l'état courant du réseau et ses évolutions

⁴ un tel diagnostic d'ensemble a vocation à s'insérer dans un observatoire territorial. Les cartes d'insécurité routière montrent les accidents et leurs concentrations ; et les cartes de bruit avec les points-noirs bruit, relèvent d'une démarche analogue.

déjà décidées ; ainsi que des scénarios alternatifs qui visent en général un même objectif. Chaque scénario est simulé, et comparé au scénario de référence afin d'évaluer la rentabilité de l'investissement correspondant.

D'autres types d'études concernent principalement la demande et son évolution. Les **analyses prospectives** servent à anticiper les évolutions structurelles de la demande, dans sa composition démographique et ses comportements de déplacement. Dans une étude de **management de la mobilité**, on conçoit des plans d'action sur la demande, au moyen de la configuration de l'offre, de la tarification, de l'information ; ou par des leviers extérieurs à l'offre tels que l'occupation du sol et la répartition spatiale des activités.

Enfin, la **prospectivité du système de transport** constitue le type d'étude au champ le plus vaste, couvrant à la fois l'offre et la demande. On y combine des scénarios d'évolution de l'offre avec des scénarios d'évolution de la demande qui résultent d'une analyse prospective et peuvent impliquer du management de la mobilité. Le but est de sélectionner un scénario d'offre et management « préférentiel », qui soit robuste face aux incertitudes sur l'évolution non contrôlée de la demande.

3.3.4 BESOINS EN MODELES DE DEMANDE

Le diagnostic d'offre et d'usage nécessite un modèle de demande avec une composante d'affectation sur le ou les réseaux concernés, une représentation de la capacité et des mécanismes de congestion. L'étude nécessite aussi des observations de référence sur les volumes et les temps de parcours, mesurés par des méthodes d'ingénierie du trafic.

L'identification et l'évaluation des besoins nécessitent de plus la modélisation des choix d'itinéraire, et du choix modal en cas de réseau plurimodal. Il faut aussi un modèle d'évaluation.

La conception et l'évaluation des scénarios d'offre nécessitent un modèle de simulation et un modèle d'évaluation. Si elles concernent plusieurs époques, l'évaluation est inter-temporelle, et des fonctions dédiées à cet aspect sont bienvenues. Jusqu'à présent, la conception des scénarios reste l'affaire des chargés d'études, qui s'appuient sur une carte de réseau et aussi une carte de trafics, éventuellement en utilisant l'interface utilisateur du modèle de simulation offre-demande. Mais on manque d'une famille complémentaire de modèles qui générerait et testerait des scénarios d'offre de manière intensive, afin d'élargir les options pour le planificateur.

Les études de prospective de la demande relèvent de la démographie et de la sociologie, bien davantage que des modèles offre-demande, sauf s'il y a lieu de projeter sur le territoire les évolutions ainsi conçues. L'évolution démographique d'une population d'individus peut faire l'objet d'un modèle démographique.

Les études de management de la mobilité nécessitent les modèles de demande, au minimum dans les composantes d'affectation et de choix modal, éventuellement avec une représentation explicite des programmes d'activités et du stationnement.

Enfin les études de prospective du système nécessitent l'ensemble des éléments de modélisation déjà mentionnés, et aussi l'analyse prospective de la demande.

3.4 L'exploitation des réseaux et des services

Nous considérons ici la préparation de l'exploitation, pour tout ou plus souvent partie d'un réseau, et en distinguant des catégories de trafic pour en traiter une sélection de manière approfondie.

La problématique concerne la gestion fine, jusqu'au niveau local, de certaines infrastructures et véhicules qui forment un sous-système, en explicitant les contraintes matérielles de la circulation physique des véhicules et en les utilisant pour gérer le sous-système. Il s'agit de concevoir des plans de gestion à court terme ou à moyen terme, en jouant sur des variables d'action plus fines et moins coûteuses que celles qui sont pertinentes dans la planification de réseau.

Evidemment les sous-systèmes potentiels sont très divers : nous les rangeons en trois catégories, relatives respectivement à la voirie, aux lignes et pôles de TC, aux réseaux de services logistiques.

La gestion de chaque catégorie nécessite une certaine connaissance de la demande, particularisée à certains segments, et réduite à la composante spatiale et temporelle, sans ou presque composante comportementale pour des choix de déplacement : on s'intéresse plus aux courants de trafic qu'aux demandeurs qui les constituent. Ce modèle restreint de demande est utilisé en liaison avec un modèle de gestion de l'offre : au niveau d'un sous-réseau, parfois d'un seul axe ou une jonction, parfois encore une ligne ou un itinéraire.

La gestion de voirie concerne la gestion du trafic selon certains objectifs de niveau de service, et aussi le management de la mobilité, notamment son orientation modale. Les principaux d'études sont :

- le schéma de circulation sur un sous-réseau de voirie, typiquement un quartier ou un centre-ville, afin d'affecter les axes aux sens de circulation et de répartir localement la largeur de la voie aux sens et files de circulation ainsi qu'aux usages connexes.
- Le plan de gestion du trafic, pour définir des affectations provisoires de la voirie en situation occasionnelle : chantiers de maintenance ou d'entretien, crue de trafic ou perturbation exogène importante.
- La gestion d'une jonction : répartition de la capacité entre les branches ; priorités à certaines classes (bus, tramway).
- La gestion d'axe : réglage de l'allure du flot (onde verte pour la continuité d'allure, modération de vitesse) ; gestion des interactions locales (stationnement, traversée piétonne) ; et la gestion multimodale du trafic (répartition de voies par mode de déplacement en distinguant les TC, les bicyclettes, les taxis, les voitures particulières, éventuellement parmi celles-ci les véhicules qui acquittent un péage ou ceux qui ont plus de 2 ou 3 occupants).

La gestion des lignes et pôles de TC comprend :

- par ligne, la configuration de la flotte de véhicules (nombre, taille, capacité intérieure) ; celle des arrêts, en localisation et en durée ; éventuellement la vitesse d'exploitation, en interaction avec la gestion des axes empruntés.

- Par pôle tel qu'une gare routière : la configuration des emplacements respectifs alloués aux lignes et aussi des zones d'attente des voyageurs ; les circuits d'accès et de transfert pour ceux-ci ; et les modalités de synchronisation des lignes pour faciliter les correspondances.

La gestion d'un réseau logistique peut concerner le transport de fret (souvent une sélection de produits) mais aussi du transport de voyageurs pour des trajets à la demande plutôt qu'en ligne : location de véhicules (automobiles ou bicyclettes), taxis, transport à la demande. La préparation d'une telle gestion comprend :

- la localisation et le dimensionnement des pôles et autres nœuds du réseau.
- Le dimensionnement et la composition d'une flotte de véhicules.
- Le dimensionnement et la composition du personnel d'exploitation, la répartition entre roulants-navigants et fixes.
- Une anticipation des flux de mouvements de véhicules, en lien avec une prévision de la demande.

3.5 La gestion du réseau en temps réel

Cette catégorie d'applications constitue le pendant dynamique, réactif de la précédente : il s'agit de piloter en temps réel les flux et les ressources, fixes ou mobiles. Le terme temporel est instantané ou presque, avec des délais de réaction aussi réduits que possible : notamment pour intervenir sur un accident ou pour limiter la propagation d'une saturation.

Les actions concernent :

- le pilotage de la capacité : sur un réseau d'infrastructure, la répartition de la capacité à une jonction ou le long d'un axe ; pour un réseau de services, la disposition des véhicules et des agents de service.
- Le pilotage du flux : contrôle des vitesses pour les homogénéiser et donc réduire les risques internes de perturbation ; alerte sur obstacle ou encombrement ou toute perturbation externe.
- L'orientation du flux : agir sur les choix d'itinéraire, en-route pour les usagers présents sur le réseau ; ou hors réseau pour anticiper sur les prochains déplacements. Les moyens sont l'information dynamique et la recommandation d'orientation ; le cas échéant, la modulation tarifaire.

Le délai imparti et la nature de l'action limitent le recours à des modèles de demande : seules des représentations simplifiées peuvent être utilisées, avec une description explicite des courants de trafic dans l'espace et le temps, mais superficielles sur le plan des comportements, sauf si l'action joue sur les choix d'itinéraire et d'horaire, ou peut conditionner le report ou l'annulation du déplacement.

En revanche, dans certains modèles de demande il convient de représenter les effets de la gestion dynamique du réseau sur la qualité de service et les tarifs, en moyenne et en variations, afin de décrire l'offre de transport avec suffisamment de réalisme.

Cela concerne notamment les modèles d'affectation dynamique du trafic.

3.6 La gestion commerciale des services de transport

Un opérateur de service cherche à le rentabiliser, à court terme en utilisant au maximum la capacité dont il dispose, à moyen terme en ajustant la capacité au potentiel de demande. Cette recherche d'optimisation à court et moyen terme relève de la gestion commerciale.

Pour développer la clientèle et l'usage, l'opérateur peut jouer sur le tarif et sur la qualité de service, pour gagner des parts de marché, pour induire de nouveaux besoins qu'il peut espérer satisfaire, pour mieux adapter son service à la variété de la demande en segmentant plusieurs classes, qu'il différencie en termes à la fois de niveau de service et de tarif.

Parmi les actions particulières, citons :

- 1) la distinction de plusieurs classes de confort.
- 2) Les abonnements et programmes de fidélisation.
- 3) La modulation tarifaire par segment de clientèle, selon un statut démographique ou social tel que l'âge pour un voyageur, ou pour les groupes selon la taille et la composition.
- 4) La modulation tarifaire en fonction du jour et de l'horaire.
- 5) La modulation tarifaire en fonction de la durée d'anticipation de la réservation sur la réalisation du service.

La recherche d'une offre commerciale attractive relève de la prévision de la demande. On peut utiliser un modèle de demande, avec représentation du service et des alternatives, en affinant la description des conditions qualitatives, tarifaires et commerciales pour chaque modalité de service.

Cela nécessite de raffiner la description de l'offre. De plus, l'aspect temporel et les possibilités de report de chaque demande dans le temps induisent une dimension supplémentaire, dont l'analyse relève actuellement davantage de la recherche que de la gestion opérationnelle.

Cette problématique s'applique en transport aux opérateurs de service et également, selon les mêmes principes bien qu'à une échelle temporelle distincte, aux constructeurs de véhicules particuliers.

4. PRINCIPES GENERAUX DE MODELISATION

Dans cette section, nous donnons des principes généraux pour comprendre et entreprendre la modélisation. Nous commençons par définir un modèle, une simulation, et la modélisation qui recouvre en fait diverses activités. Puis nous distinguons quatre « facettes » respectivement sémantique et conceptuelle, formelle, technique, empirique, dans un modèle. Nous précisons successivement le contenu de chaque facette, en donnant des exemples relatifs à la modélisation de la demande.

4.1 Définitions

Un **modèle** d'un objet ou d'un système, est une représentation simplifiée où certains aspects sont privilégiés. Le modèle est destiné à l'analyse scientifique ou à la simulation qualitative ou opérationnelle.

La **simulation** d'un objet ou d'un système, consiste à en reproduire l'état et souvent aussi le fonctionnement dynamique, au moyen d'un modèle. La simulation sert à l'aide à la décision, pour concevoir des actions sur le système qui en améliorent l'état et le fonctionnement.

La **modélisation** recouvre diverses activités liées aux modèles, dont chacune est exercée par des personnes aux compétences spécialisées :

- la **conception d'un modèle générique** au plan qualitatif (sémantique), au plan formel. Cela relève de la recherche scientifique dans la discipline concernée, éventuellement de la théorie des probabilités lorsqu'il y a des aspects aléatoires.
- L'**analyse formelle** des propriétés d'un modèle déjà conçu et spécifié. Cela relève des mathématiques appliquées : théorie des probabilités, théorie de l'optimisation, algorithmique, analyse formelle, analyse numérique.
- Le **développement d'un simulateur**, de nature analogique (maquette de bâtiment ou de véhicule pour la soufflerie) ou numérique (logiciel). Un simulateur numérique relève d'une ingénierie logicielle, tandis qu'un simulateur analogique nécessite de connaître les deux domaines physiques qui correspondent dans l'analogie, ainsi que des principes de correspondance tels que l'analyse dimensionnelle, ou la théorie des analogies dynamiques et énergétiques entre domaines physiques (bond-graphs...).
- A l'aide d'un simulateur, la **description concrète** d'un objet ou système à simuler. Cette description consiste en la représentation d'objets aux propriétés spécifiques (ex. des arcs pour des tronçons, des nœuds pour des jonctions), et le renseignement de certaines formes et paramètres. Cette tâche nécessite une connaissance et une compréhension technique, avec beaucoup de rigueur, ainsi qu'une capacité à schématiser et à généraliser. Elle est confiée ordinairement à un ingénieur-junior ou à un technicien supérieur expérimenté. La description peut comprendre aussi, quand l'objet est complexe, des choix de représentation structurelle qui nécessitent l'expertise d'un ingénieur confirmé.

- La **simulation opérationnelle** consiste à appliquer un simulateur à une description concrète, pour produire des résultats relatifs à l'état et au fonctionnement. Elle relève d'une exécution technique, opérée par un chargé d'étude (ingénieur-junior ou technicien supérieur) sous la conduite d'un directeur d'étude (ingénieur-senior).

L'objet ou le système visé par un modèle appliqué, constitue la **cible concrète**.

4.2 Les quatre plans ou facettes, dans un modèle de simulation

Le tableau suivant donne un modèle du modèle, qui distingue quatre parties : le sens, la forme, la technique et l'empirique. Ce méta-modèle permet d'analyser, non seulement le contenu du modèle, mais encore l'incertitude relative au modèle : incertitude elle-même divisée en incertitude de sens, incertitude de forme, incertitude technique et incertitude empirique.

Tab. 1. Facettes d'un modèle.

Facette du modèle	Explicitation	Disciplines privilégiées	Types d'erreurs
Sémantique	Ensemble d'éléments et de relations entre éléments, avec leur interprétation	Physique, économie, Analyse systémique	Erreur de conception, « sémantique »
Formelle	Ensemble de conditions caractéristiques (équations...)	Mathématiques	Erreur formelle, par incohérence ou faute logique
Technique	Produire une solution par un dispositif ad hoc	Physique, algorithmique, informatique	Erreur de résolution, dont erreur de convergence
Empirique	Spécification des fonctions de dépendance et des inputs	Statistique, économétrie	Erreur empirique, dont erreur d'estimation et erreur exogène

4.3 Plan conceptuel ou sémantique

On exprime le modèle sémantique par une description littérale (en phrases), qualitative, à laquelle on peut adjoindre un schéma explicatif, un diagramme des éléments et des relations qui exprime la structure sémantique.

On s'intéresse notamment aux relations déterminantes, par lesquelles un élément dépend d'autres éléments, comme dans une fonction mathématique. Pour une telle dépendance, on cherche une interprétation en termes de cause : une causalité met en relation des causes, des inputs, avec des effets, des outputs, pour une certaine raison. C'est la logique même de l'interprétation scientifique, et chaque science se rapporte à un certain objet, avec certaines propriétés, et comprend un ensemble de causalités.

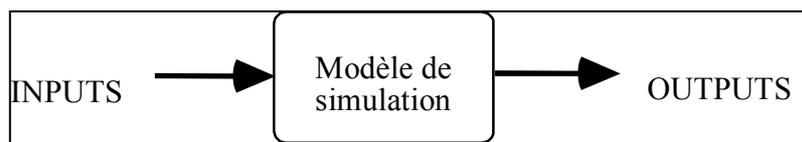


Fig. 1. Dépendance input-output et causalité.

Montrons quelques causalités dans le domaine du transport. D'abord, l'enchaînement logique de la demande : les activités motivent les déplacements, les déplacements forment des flux de trafic, et les flux produisent des impacts ; et ces éléments rétro-agissent les uns sur les autres. (fig. 2).



Fig. 2. Causalité de la formation du trafic.

Ensuite, il y a le comportement économique en situation de choix : c'est la diversité des options qui cause le contexte de choix, on peut l'illustrer par un arbre des options (fig. 3) ou plus concrètement par un schéma des itinéraires si le choix porte sur des moyens de déplacement (fig. 4).

Au plan sémantique, le modèle se compose d'une palette de représentation (en termes d'éléments, de relations) et d'une structure de dépendance. Leur variété et leur degré de signification, de détermination, constituent la capacité (ou la portée) de représentation en largeur et en profondeur.

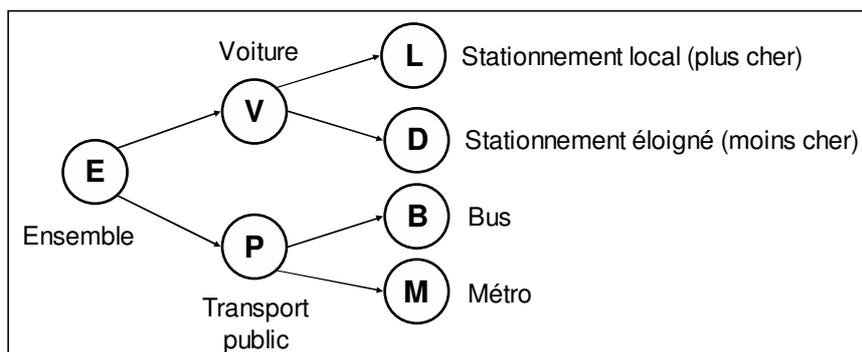


Fig. 3. Arbre d'options de choix.

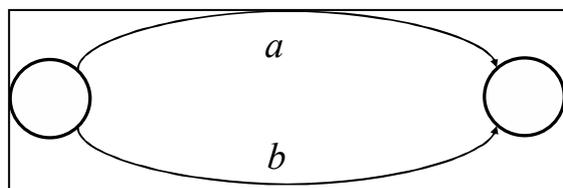


Fig. 4. Concurrence entre deux itinéraires.

4.4 Plan formel

Le modèle formel est une représentation d'ordre mathématique, une formulation du modèle. Il a pour but d'exprimer précisément les éléments et les relations, sous la forme de variables et de fonctions mathématiques.

Le modèle formel d'une dépendance input-output est une formulation $Y = F(\Theta, X)$ dans laquelle la variable endogène ou expliquée, Y , est liée à la variable exogène ou explicative, X , par une fonction de dépendance F elle-même conditionnée par le

paramètre Θ . F et Θ modélisent la relation. Le paramètre intervient dans la fonction, de manière conjoncturelle relativement à la fonction elle-même qui a un caractère plus structurel, qui se conserve sur une classe plus large de problèmes. De même le paramètre est proche en nature de la variable exogène X , mais Θ est stable sur une classe d'applications plus large que la variable exogène, destinée à varier à chaque simulation.

A partir de l'expression conceptuelle d'un modèle, on obtient un modèle formel de la manière suivante :

1. expression concise par variables et relations, avec des notations symboliques, pour concentrer l'attention sur les opérateurs fonctionnels.
2. Parmi les variables, la sélection des variables exogènes et donc des variables endogènes. Parmi les variables endogènes, la sélection d'une base i.e. d'une partie qui jointe aux variables exogènes suffit pour déterminer les autres variables endogènes.
3. les relations entre les variables forment des contraintes de dépendance. A priori les contraintes qui définissent les variables endogènes non basiques sont maintenues dans le traitement ; tandis que les contraintes entre variables endogènes basiques peuvent être relâchées provisoirement, en assignant au traitement l'objectif de les établir in fine.

Le modèle formel permet de rechercher et d'établir des propriétés formelles génériques, valables pour de larges classes de problèmes : existence d'une solution ; son unicité ; la sensibilité à des perturbations dans les variables exogènes. Pour cela on rattache le modèle formel à des types de formulation, des problèmes-types pour lesquels des théorèmes généraux donnent des propriétés génériques : le système d'équations linéaires ; l'optimisation d'une fonction convexe, éventuellement sous contraintes ; le problème d'inéquation variationnelle ; le problème de point fixe.

Montrons quelques modèles formels en transport.

D'abord, la relation temps-flux ou vitesse-débit, qui formule le phénomène de congestion sur un axe en situation stationnaire. Dans un modèle statique d'affectation, sur chaque arc a du réseau on suppose que le flux de déplacements N_a rapporté à la période temporelle considérée H , i.e. le débit $x_a = N_a / H$, cause le temps individuel, t_a , par une fonction de temps t_a qui décroît quand le débit augmente (fig. 5).

Dans cette dépendance, on peut modéliser la fonction t_a par type d'arcs et non pour un seul arc, en spécifiant les paramètres caractéristiques de l'arc. Quand celui-ci a un profil en travers homogène, sa largeur et les modalités d'exploitation déterminent la capacité d'écoulement moyenne, κ_a , et le temps de parcours est proportionnel à la longueur, L_a . Alors on peut élaborer la relation de dépendance en :

$$t_a(x_a) = L_a \cdot \tau_{a0} \left(\frac{x_a}{\kappa_a} \right)$$

avec une fonction τ_{a0} de temps par unité de distance, relative au type d'arc (autoroutier ou urbain ou rural etc). Une forme particulière est la fonction BPR :

$$\tau_{a0}(\xi) = \tau \cdot (1 + \gamma \cdot \xi^\alpha)$$

avec τ le temps unitaire en l'absence de congestion, γ et α deux paramètres de forme.

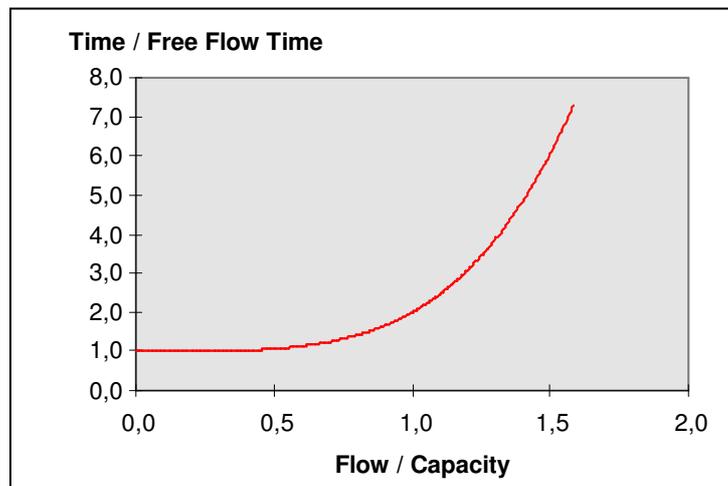


Fig. 5. Une fonction de temps.

Ensuite, donnons un modèle formel pour un problème de choix. Les variables exogènes sont le volume total Q , et des caractères $(X_m^k)_{k \in K_m}$ des options m . Les variables endogènes sont les proportions des options π_m (les parts modales). Avec des fonctions de dépendance F_m , on peut spécifier un modèle formel de répartition

$$\pi_m = \frac{F_m(X_m^k)}{\sum_{r \in M} F_r(X_r^\ell)}$$

Ce modèle sous forme quotient est correct formellement si les fonctions F_m sont non négatives et de somme non nulle. Il convient aussi de rechercher la cohérence comportementale, sémantique, dans les fonctions de dépendance : si un caractère X_m^k modélise la qualité de service en sens croissant, alors on attend que F_m en dépende de manière croissante, car une amélioration du service devrait améliorer la proportion d'usage.

4.5 Plan technique

Le plan technique concerne la réalisation d'une simulation par un processus technique dédié, le **solveur**, qui relève de l'analogie physique ou du calcul numérique avec un logiciel de simulation.

Quelle que soit la nature du solveur, le modèle formel constitue la cible de la simulation.

Quand le solveur est numérique, il peut également servir de plan de calcul. Pour certains modèles formels, la structure de dépendances est complexe car il y a des rétroactions : alors il est rare qu'une méthode de calcul permette d'obtenir directement le résultat, et on procède par des algorithmes itératifs.

Dans un algorithme itératif, à chaque itération on modifie la valeur des variables endogènes basiques afin de se rapprocher d'un état cible qui possède les caractéristiques désirées : l'état d'équilibre, dans un modèle d'équilibre. Il convient de mesurer rigoureusement la convergence.

La constitution d'un solveur est une tâche d'autant plus délicate que le modèle est plus complexe. La conception et l'analyse des algorithmes relèvent d'une science des procédés informatiques, dans laquelle sont importants :

- la précision numérique de chaque traitement.
- Le comportement de convergence d'un algorithme donné : les états attracteurs avec leur bassin d'attraction ; et le rythme de convergence vers un état attracteur, d'itération en itération.
- La complexité informatique de chaque traitement, notamment de chaque itération dans un algorithme itératif. On distingue la complexité en temps qui est proportionnelle au nombre d'opérations élémentaires requises ; et la complexité en espace qui est proportionnelle au volume d'information à stocker en espace mémoire.

4.6 Plan empirique

Le plan empirique concerne l'ajustement du modèle à sa cible concrète : les rapports et les relations entre la cible concrète, et la représentation dans le modèle. Il s'agit essentiellement de décrire les parties et les éléments, et de renseigner des formes et des paramètres.

L'ajustement empirique relève de :

- la **métrologie**, science de la mesure et des expériences. Par exemple, « comment mesurer la longueur d'une route » est une question de métrologie physique. D'autres questions relèvent d'une métrologie spécialisée en ingénierie du trafic, notamment la mesure de la capacité d'écoulement d'un axe.
- La **statistique** : l'observation statistique de population par l'échantillonnage d'individus, afin de baser une connaissance d'ensemble sur un relevé partiel. Il y a une liaison forte avec le recueil de données, qui peut être partiel ou exhaustif ; même en cas d'exhaustivité, les concepts statistiques servent pour résumer l'information et en extraire les caractéristiques essentielles, notamment en présence d'incertitude de mesure. Par exemple, pour mesurer un volume journalier de déplacements, on peut compter ce volume chaque jour tout au long d'une année : pour ensuite déterminer la moyenne, l'écart-type, et probablement segmenter la journée en des catégories (jours-types) selon le régime du volume. L'observation statistique peut nécessiter des plans et protocoles d'expérience sophistiqués ; elle soulève des questions de segmentation, de variables discriminantes etc.
- **L'économétrie** : c'est la branche de la statistique qui concerne l'estimation de relations de dépendance, et en particulier l'estimation de paramètres dans une forme fonctionnelle, parfois même la sélection d'une forme fonctionnelle. L'exemple de base est l'estimation des coefficients dans un modèle de régression linéaire. Là encore il existe une théorie étendue et des outils

puissants, en particulier l'estimation par la méthode du maximum de vraisemblance.

L'ajustement du modèle à la cible concrète engage l'analyste à faire des choix :

- dans le codage des éléments : par exemple, distinguer plusieurs arcs pour une même route car les caractéristiques varient ; ou plusieurs segments de demande car il y a une forte hétérogénéité des contextes et des comportements.
- Dans la sélection des caractères et propriétés de la cible concrète, que l'on cherche à reproduire. Certains aspects externes à la modélisation mais qui la conditionnent, sont à expliciter et à intégrer sous la forme de variables exogènes.
- Eventuellement, investir dans une représentation probabiliste pour la cible concrète, cette représentation probabiliste devenant une partie du modèle.
- En liaison avec le point précédent, investir dans une représentation probabiliste pour certains instruments d'observation, afin d'éviter des aberrations lors de l'ajustement, même si le coût de modélisation est sensiblement alourdi.

4.7 Synthèse

Les quatre facettes sémantique, formelle, technique et empirique, s'assemblent dans un modèle de simulation opérationnelle. La facette sémantique peut suffire pour une compréhension qualitative, et parfois même pour une réflexion prospective de l'évolution d'une cible concrète.

Les facettes ont des interfaces, et bien des recouvrements sont possibles :

- l'expression formelle se situe à l'interface entre la facette sémantique et la facette formelle.
- La formulation caractéristique se situe à l'interface entre la facette formelle et la facette technique.
- La facette technique est développée de manière proportionnée aux choix sémantiques de représentation.
- De même la facette empirique est développée en proportion avec la facette sémantique. Plus la cible concrète est définie, que ce soit en largeur ou en profondeur, plus il y a de variables et de fonctions à mesurer.
- Le codage relève de la facette empirique en tant qu'activité, mais sa nature et sa portée sont déterminées par la facette sémantique. On peut considérer que les caractères « structurels », jugés transférables entre plusieurs simulations, appartiennent à la facette sémantique ; tandis que les caractères « conjoncturels » à portée plus locale, appartiennent à la facette empirique. Mais c'est le modélisateur qui trace la frontière entre le structurel et le conjoncturel, entre le générique et le particulier.

5. DEMONSTRATION D'UNE ETUDE DE TRAFIC

A titre d'exemple, nous allons évoquer une étude de prévision de trafic qui a été réalisée par le Sétra en 2003 ⁽⁵⁾. Nous présenterons successivement : les enjeux, les objectifs, la méthode et les résultats de l'étude, avant d'en tirer des enseignements.

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

Le transport routier de fret s'est considérablement développé au 20^{ème} siècle. Dans les pays industrialisés, le développement de la consommation va de pair avec un développement quantitatif de la production et des échanges, donc du transport de fret. De plus l'appareil de production se transforme, avec une division accrue du travail pour dégager des économies d'échelle : cette division est opérée entre divers sites de production, et nécessite des transports entre les sites. Enfin, la demande de biens se transforme qualitativement : les marchés s'étendent, ce qui signifie une diffusion plus large de certains biens ; tandis que les biens se diversifient, afin d'offrir aux consommateurs une gamme toujours plus large de biens toujours plus sophistiqués dans leur composition ⁽⁶⁾. Les quatre raisons ainsi mentionnées induisent un développement des flux de fret, qui historiquement s'est produit en parallèle et en complémentarité avec le développement du mode routier. C'est ainsi que la route a capté l'essentiel des nouveaux flux, et domine désormais le transport tous modes confondus.

Cependant les flux de transport routier de marchandises ont des impacts sur l'environnement : sécurité, émissions de bruit, émissions de polluants chimiques, consommations d'énergie et contribution à l'effet de serre. Les populations sont devenues sensibles à ces impacts et réclament des actions publiques pour les réduire. Une catégorie importante d'actions est constituée par l'intermodalité, i.e. l'utilisation combinée de plusieurs modes par un envoi de fret au cours de sa chaîne logistique : le mode routier étant privilégié pour l'accès terminal ou certaines correspondances, tandis que les parcours principaux sont effectués avec un mode « massifié » plus respectueux de l'environnement : le rail, la voie navigable ou le transport maritime.

Comment réduire les impacts environnementaux du transport de fret ? Une voie évidente est le transfert modal du trafic routier vers des modes massifiés. Encore faut-il que ce transfert présente un intérêt économique :

- pour le client, transporteur ou chargeur : une compétitivité avec le mode routier, en termes de prix et de qualité de service. La **qualité** de référence est celle du transport routier utilisant autant que possible le réseau autoroutier : disponibilité totale dans le temps et dans l'espace, fiabilité presque totale (hors saturation ou perturbation externe), rapidité.
- Pour les offreurs des modes « respectueux de l'environnement », et la collectivité qui les soutient, que les coûts de production soient proportionnés à l'usage des modes et aux bénéfices en matière d'environnement, et donc que les services offerts trouvent un bon niveau de clientèle. La **quantité** de

⁵ par Séverine Carpentier et l'auteur de ce cours

⁶ Y compris le conditionnement dans un emballage

référence est celle du transport autoroutier : plusieurs milliers de poids lourds (PL) par jour.

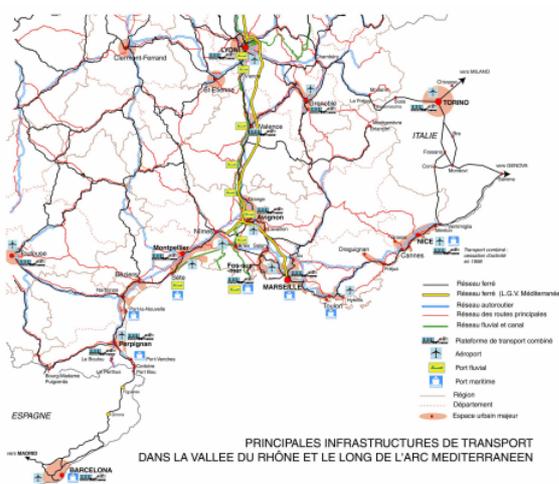
C'est pourquoi les services projetés portent le nom d'autoroute ferroviaire ou d'autoroute maritime : ils ont pour référence le transport autoroutier en termes de qualité de service et de niveau d'usage, et idéalement aussi, de coût de production.

Comme l'usage d'un service massifié nécessite que le fret passe par des plateformes de transbordement, en entrée et en sortie du mode massifié, il faut des distances longues, au-delà de 500 km voire davantage, pour atteindre la compétitivité face à la route.

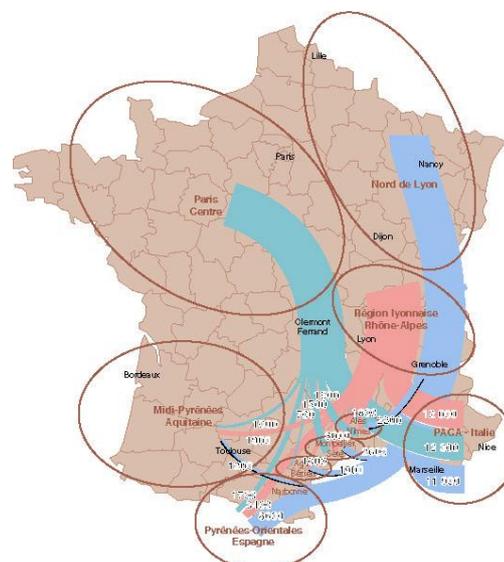
Pour le planificateur des transports, le transport massifié de fret concerne donc :

- la longue distance,
- sur des corridors où les courants de trafic sont forts,
- où les coûts de production ne sont pas trop élevés.

En France, les flux de fret en traversée Nord-Sud sont considérables, avec notamment beaucoup de transit entre l'Europe du Nord et la péninsule ibérique ainsi que l'Italie. Ils s'écoulent en direction de l'Espagne par deux corridors principaux, situés l'un le long de l'océan Atlantique, l'autre le long de la vallée du Rhône puis de la mer Méditerranée. Tous deux font l'objet de projets d'autoroute ferroviaire, et d'études de prévision de trafic. Nous nous intéressons ici à une autoroute ferroviaire dans la vallée du Rhône et l'arc languedocien (fig. 6).



Grandes infrastructures



Grands flux Nord-Sud, 1997

Fig. 6. Le Grand Sud-Est de la France.

5.2 Objectifs de l'étude de trafic

Le réseau ferroviaire français a été largement développé au 19^{ème} siècle, avec 36 000 km de lignes. Depuis le milieu du 20^{ème} siècle, les nouveaux développements concernent les lignes à grande vitesse destinées essentiellement au transport de voyageurs, et le contournement des grandes agglomérations. La vallée du Rhône est

équipée de trois lignes : non seulement la ligne à grande vitesse « Méditerranée », mais encore sur les rives gauche (est) et droite (ouest) du Rhône, la rive droite servant particulièrement aux convois lourds de fret, tandis que la voie en rive gauche sert à acheminer des trains de transport combiné et des trains de voyageurs.

Ainsi l'infrastructure linéaire existe déjà ; de même que les plate-formes de transbordement au voisinage des villes principales, Dijon, Lyon, Valence, Avignon, Montpellier, Perpignan.

Il reste à concevoir le service à offrir :

- Les postes d'accès pour les clients : leur situation relativement aux lieux de demande et au réseau routier.
- Les conditions d'accès et notamment les délais de transbordement.
- Les fréquences de service.
- La vitesse commerciale.
- Les tarifs.

L'étude de trafic a pour objectif de prévoir la clientèle du service pour plusieurs scénarios de service, en qualité et en prix ; d'estimer le potentiel de demande, en volume et en structure ; et d'évaluer des recettes potentielles.

Voici les hypothèses posées a priori :

- 1- on recherche un trafic issu du transport routier, par report modal. On doit donc modéliser la concurrence avec le mode routier.
- 2- Les postes d'accès sont fixés au voisinage de Dijon, Lyon, Valence, Avignon, Montpellier, Perpignan.
- 3- Les délais de transbordement peuvent être limités à 20-30 minutes par poids lourd (PL), en utilisant une technologie spécifique telle que le wagon Modalhor.
- 4- La vitesse de roulement doit se situer dans un intervalle entre 80 et 120 km/h.
- 5- Les fréquences de service sont en trains par jour ouvrable, par sens de circulation, avec un cadencement au long de la journée.



Fig. 7. Usage du wagon Modalhor.

5.3 La méthode d'étude et le modèle offre-demande

L'étude a été réalisée au moyen du logiciel de modélisation TransCad ; les principaux logiciels concurrents disposent aussi d'une capacité fonctionnelle appropriée aux besoins.

Ici nous présentons les spécifications majeures du modèle opérationnel, la représentation de l'offre et celle de la demande. Nous réservons la conception, la spécification et la prévision des scénarios, pour la section relative aux résultats.

5.3.1 SPECIFICATIONS MAJEURES DU MODELE OPERATIONNEL

Dans l'application opérationnelle d'un modèle d'offre et demande de transport, les grands choix de spécification concernent :

- le **territoire d'étude**, essentiellement à l'intérieur d'un **périmètre d'étude**. Ici le territoire est la France entière, avec des liaisons internationales vers les pays voisins, éventuellement divisés en grandes zones compte tenu des lieux frontaliers traversés par les courants de trafic.
- **L'époque de la simulation**, qui détermine un état de référence pour l'offre et la demande. Ici on choisit l'année 2000.
- La **période temporelle**. On considère ici la journée ouvrable de semaine, en moyenne dans l'année, et on choisit de la traiter de manière statique, en supposant que l'offre ne varie pas significativement au cours d'une journée.
- Les **moyens de transport**. On considère ici le réseau de transport routier accessible aux poids lourds, auquel on ajoute un itinéraire ferroviaire traité comme un itinéraire autoroutier, avec des caractéristiques propres de péage, de temps d'accès et de conditions de transfert (facteur de fréquence).
- La **demande de déplacement**. On décrit la demande au niveau des déplacements entre zones d'origine et destination, par mouvement de poids lourd. On représente le comportement de choix d'itinéraire, en traitant le moyen ferroviaire comme un itinéraire.

5.3.2 REPRESENTATION DE L'OFFRE

Le réseau routier interurbain est décrit par la totalité des autoroutes et des routes nationales, ainsi que les principales routes départementales : toutes les routes servant au transport interurbain entre agglomérations sont représentées. Les carrefours et les routes sont modélisés respectivement par des nœuds et des arcs.

Pour chaque arc unidirectionnel, les caractères physiques et économiques suivants sont renseignés :

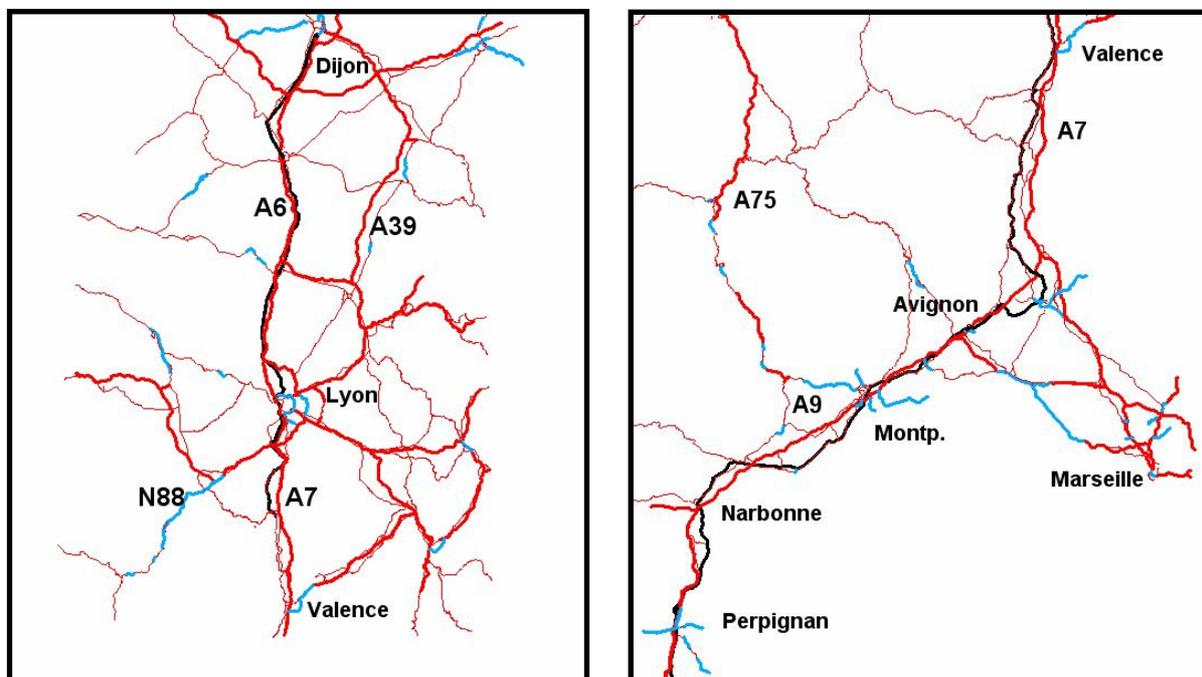
- le type d'arc qui indique les modalités d'exploitation : urbain ou interurbain, autoroute à chaussée à 2 ou 3 voies, ou route banalisée ; ainsi que le modèle de congestion.
- La longueur en km.
- La capacité d'écoulement, en unités de voitures particulières par heure.
- La vitesse de référence pour les PL, en l'absence de congestion.

- Le péage moyen par PL sur autoroute : environ 0.14 €/km sur les sections concédées.

La base de données du réseau routier comprend environ 30 000 arcs.

Le **moyen ferroviaire** est représenté comme un itinéraire autoroutier :

- chaque gare est modélisée, dans chaque sens de circulation, par un arc de séjour (des convois en gare), un nœud d'arrivée du service et un nœud de départ.
- Un arc de séjour a pour temps de traversée, la durée d'arrêt en gare pour un train.
- Un arc intermédiaire pour chaque segment de ligne entre deux gares consécutives, par sens de circulation. Cet arc a un temps qui dépend de la longueur et de la vitesse de circulation des trains, et un prix qui est le produit du tarif unitaire par la longueur.
- La connexion de chaque gare au réseau routier est assurée par des arcs d'accès en montée ou descente du service, par sens.
- Un arc de montée aboutit au nœud gare-départ. Son temps de traversée représente le délai de transbordement et le temps d'attente du départ du prochain service.
- Un arc de descente part d'un nœud de gare-arrivée. Son temps de traversée correspond au délai de transbordement d'un PL ou d'un chargement, et de sortie du terminal.



Partie Nord

Partie Sud

Fig. 8. Réseau routier et moyen ferroviaire (en noir).

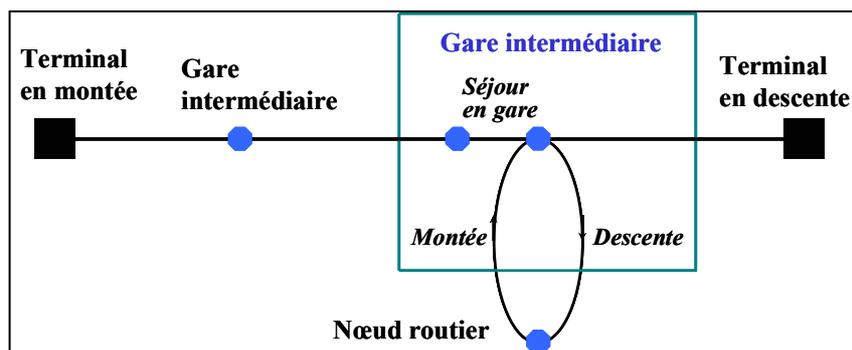


Fig. 9. Schéma de principe pour une gare.

5.3.3 REPRESENTATION DE LA DEMANDE

La demande a été représentée au niveau d'un déplacement de PL, avec pour origine et destination, deux lieux consécutifs de (dé-) chargement.

Les zones de demande, sont les départements français ou les grandes zones étrangères déjà mentionnées : avec pour centroïdes, les chefs-lieux de département ou les postes frontaliers.

Les courants de trafic sont les flux d'échange entre les zones, à l'exception des échanges internes aux zones, des échanges entre zones étrangères qui ne transitent pas par la France, et des échanges entre départements français voisins.

Ainsi la matrice origine-destination de flux concerne le trafic routier à longue distance (⁷).

Pour les comportements de déplacement, on suppose que :

- sur un itinéraire routier, tous les PL ont le même comportement d'usage, donc le même temps de circulation et aussi le même tarif.
- Chaque déplacement donne lieu à un choix d'itinéraire, sous les hypothèses d'information parfaite concernant les services disponibles et de rationalité économique : l'itinéraire d'utilité maximale est choisi, celui qui est le moins cher en coût généralisé.
- Le décideur du déplacement subit un coût généralisé d'itinéraire qui correspond au prix (péage, tarif) ; aux frais monétaires de circulation (carburant, usure et entretien du véhicule) ; et au coût du temps (salaires et charges du chauffeur, amortissement du véhicule, délai sur la livraison du chargement) qui est le produit du temps physique par un arbitrage prix-temps (valeur unitaire du temps).
- Les arbitrages prix-temps sont variés et présentent une distribution statistique sur chaque relation O-D.

De plus, par déplacement on distingue **deux modes d'usage du moyen ferroviaire** : le PL avec chauffeur, ou la remorque seule, ce qui réduit le coût du temps au coût du délai sur le chargement et au coût d'immobilisation de la remorque.

⁷ les trajets terminaux sont négligés, mais leur distance est courte relativement au déplacement, dans le cas des zones situées en France

Les flux O-D des PL sont connus d'après un dispositif national d'enquêtes aux relations origine-destination : les routes principales sont enquêtées périodiquement (tous les cinq ans) afin de renseigner pour un échantillon de véhicules, les lieux d'origine et destination, la masse du chargement, la nature du produit, la fréquence de passage.

Les arbitrages prix-temps ont été obtenus de la manière suivante :

- une distribution statistique a été estimée sur le réseau routier en ajustant une affectation du trafic à des comptages locaux. Cela concerne les temps de parcours avec arrêt, i.e. les temps de trajet, car les conducteurs sont soumis à des contraintes matérielles de fatigue et à des obligations juridiques de repos.
- On a déduit pour chaque arbitrage avec arrêt, α_T , un arbitrage hors arrêt α_R qui concerne le temps de parcours pur. L'indice T signifie « Trajet » ou « Travel », l'indice R signifie « Roulement » ou « Run ». Pour la conversion, on forme l'égalité $\alpha_T.T_T = \alpha_R.T_R$, avec $T_T = \frac{8+2}{8}T_R$ car dans la législation sociale française il faut au moins deux heures d'arrêt après huit heures de conduite, donc $\alpha_R = \frac{4}{5}\alpha_T$.
- Pour le moyen ferroviaire en mode « PL avec chauffeur », on reporte α_R .
- Pour le moyen ferroviaire en mode « remorque seule », on suppose que le coût du temps est réduit d'un facteur 3 (en comptant les coûts salariaux pour 1/3 dans le coût du temps, et les coûts d'amortissement pour 1/3) : on prend donc $\alpha_F = \alpha_R/3$.

5.3.4 FORMULE DU COUT GENERALISE

En résumé, la fonction de coût généralisé pour un itinéraire r de distance L_r^{road} sur la route et L_r^{rail} sur le moyen ferroviaire, avec des temps T_r^{road} et T_r^{rail} et des prix P_r^{road} et P_r^{rail} , est formulée de la manière suivante pour un arbitrage prix-temps α_R et une variable indicatrice δ égale à 1 si le moyen ferroviaire est utilisé en remorque seule ou à 0 sinon :

$$G_r(\alpha_R, \delta) = P_r^{road} + \gamma_{road}L_r^{road} + \alpha_R T_r^{road} + P_r^{rail} + \gamma_{rail}L_r^{rail} + \alpha_R(1 - \frac{2}{3}\delta)T_r^{rail}$$

avec γ_{road} les frais de circulation routière (hors péage) par unité de distance, et γ_{rail} un coefficient correspondant côté ferroviaire mais a priori de valeur nulle.

On compose le temps ferroviaire de la manière suivante :

- le temps d'attente moyen vaut $1/(2f_{rail})$, en fonction de la fréquence f_{rail} du service ferroviaire supposé cadencé.
- Le temps de roulement vaut L_r^{rail}/V_{rail} avec V_{rail} la vitesse de roulement moyenne.

- Le temps d'arrêt en gare, $n.D_{stop}$, en fonction du nombre n de gares intermédiaires avec arrêt sur l'itinéraire et de la durée moyenne D_{stop} d'un arrêt.
- Le temps de déchargement, qu'on peut noter D_{unload} .

$$\text{Au total, } T_r^{rail} = \frac{1}{2f_{rail}} + \frac{L_r^{rail}}{V_{rail}} + n.D_{stop} + D_{unload}.$$

Il a été supposé dans l'étude que le temps de chargement initial est compris dans le temps moyen d'attente d'un départ, que la durée moyenne d'un arrêt est limitée à 20 minutes, que le temps de déchargement en gare terminale est limité à 30 minutes, au moyen d'une technologie spéciale telle que le wagon Modalhor.

5.3.5 CAS DE LA RELATION METZ-MONTPPELLIER

Concrétisons la comparaison des modes avec le cas particulier de la relation origine-destination de Metz (Est-Nord-Est de la France) à Montpellier (au Sud). Les deux villes sont distantes de 750 km par le réseau routier.

Pour le mode uniquement routier, $L_r^{road} = 750$ km, $P_{pur}^{route} = P_r^{road} + \gamma_{road} L_r^{road} = 296$ €, et $T_{route} = 7,6$ h.

Pour le moyen intermodal route et ferroviaire, $L_{\cap}^{route} = 275+55 = 320$ km, $T_{\cap}^{route} = 3,9$ h, $P_{\cap}^{route} = 127$ € ; $L_{\cap}^{rail} = 467$ km, avec $T_{\cap}^{rail} = 8,2$ h et $P_{\cap}^{rail} = 140$ €⁽⁸⁾. Le coût généralisé de l'itinéraire intermodal est

$$\begin{aligned} G_{\cap}(\alpha_R, \delta) &= P_{\cap}^{rail} + P_{\cap}^{route} + \alpha_R \left[\left(1 - \frac{2}{3}\delta\right) T_{\cap}^{rail} + T_{\cap}^{route} \right] \\ &= P_{\cap} + \alpha_R T_{\cap}(\delta) \end{aligned}$$

en regroupant les termes de prix en une seule variable P_{\cap} et de temps en une fonction T_{\cap} qui dépend du mode d'usage.

En fonction de l'APT α_R , l'itinéraire intermodal est préféré à la route pure si

$$\begin{aligned} G_{\cap}(\alpha_R, \delta) &\leq G_{route}(\alpha_R) \\ P_{\cap} + \alpha_R T_{\cap}(\delta) &\leq P_{route} + \alpha_R T_{route} \\ \alpha_R (T_{\cap}(\delta) - T_{route}) &\leq P_{route} - P_{\cap} \end{aligned}$$

Pour le mode d'usage « PL avec chauffeur », $\delta = 0$ et le temps intermodal est supérieur au temps routier pur, la condition devient $\alpha_R \leq \frac{P_{route} - P_{\cap}}{T_{\cap}(0) - T_{route}} \equiv \alpha_R^* = 31$ €/h.

Pour en déduire le partage modal, il faut aussi connaître la distribution statistique des arbitrages prix-temps.

⁸ On suppose ici que le moyen est exploité avec une vitesse de roulement de 85 km/h et une fréquence de 10 trains par jour. Et pour le prix, que le tarif est fixé à 0,3 €/km pour tout mode d'usage

Pour le mode d'usage « remorques seules », $\delta = 1$ et le temps intermodal équivalent est inférieur au temps routier : la condition de préférence est vérifiée pour toute valeur positive de l'arbitrage prix-temps. Sur cette liaison géographique et dans ces conditions économiques, le service intermodal capterait l'intégralité du fret routier.

5.4 Scénarios et simulations

Après avoir composé le modèle, on passe à la phase de simulation. Le « **scénario** » d'une simulation particulière est constitué par l'ensemble des hypothèses ; en pratique, on spécifie un scénario par différence avec un scénario de référence, et en distinguant deux volets relatifs l'un à l'offre et l'autre à la demande.

Ici nous traitons successivement du contenu-type d'un scénario ; de la conception des scénarios à simuler ; et de leur prévision au moyen du modèle, ce qui produit les résultats des simulations.

5.4.1 CONTENU ET COMPOSITION D'UN SCENARIO

L'étude menée a un caractère surtout exploratoire : on considère une seule époque, l'année de référence 2000, et le volet « demande » de tout scénario est identique à l'état de référence.

Le volet « offre » d'un scénario concerne uniquement le moyen ferroviaire, et seulement en termes de prix et de qualité de service (sans notion de capacité ni de coût de production).

On suppose que l'offreur du moyen choisit :

- la vitesse de roulement des convois entre les gares.
- Les durées d'arrêt en gare. Certaines gares pourraient être passées sans y arrêter le convoi, pour certains services : on les modéliserait en annulant la durée de séjour dans les gares non desservies, et en ajustant la fréquence de service en chaque gare en fonction de sa desserte effective.
- Par mission de service, i.e. le sous-ensemble des gares qui sont desservies, la fréquence de la mission, en nombre de trains par jour.
- Le délai de chargement d'un PL ou d'une remorque seule.
- Le délai de déchargement d'un PL ou d'une remorque seule.
- Le prix, par mode d'usage « PL avec chauffeur » ou « remorque seule ».

5.4.2 CONCEPTION DES SCENARIOS

Une gamme de scénarios a été conçue, afin de prévoir les effets suivants :

- l'effet du mode d'usage : en l'absence d'indication sur comment se répartirait le trafic entre les deux modes d'usage, on a simulé chacun d'eux de manière séparée, en diminuant les temps des segments parcourus par la « remorque seule » pour ce mode.
- L'effet du prix du moyen ferroviaire. Un scénario « enveloppe » à prix nul permet de cerner un potentiel maximal de demande. On a aussi testé un tarif « faible » à 0,3 €/km, et un tarif « moyen » à 0,6 €/km pour une remorque

seule et 0,8 €/km pour un PL avec chauffeur. A priori seuls les tarifs moyens peuvent correspondre aux coûts de production.

- L'effet de la fréquence de service : par sens, 10 ou 20 trains par jour.
- L'effet de la vitesse de roulement : 85 ou 120 km/h.
- Une seule mission de service : desserte « omnibus » de toutes les gares d'accès le long du moyen ferroviaire.

5.4.3 RESULTATS DES SIMULATIONS

Le tableau suivant présente les résultats des simulations, avec une case par scénario testé, pour la section Valence-Avignon et avec une vitesse de circulation fixée à 85 km/h. L'unité de compte est le poids lourd par jour ouvrable.

Pour l'ensemble du trafic, on obtiendrait un résultat intermédiaire entre ceux des deux modes d'usage, « remorques seules » ou « PL avec chauffeur ».

Résultats des simulations pour le moyen ferroviaire.

Tarif	Classe	10 trains/jour	20 trains/jour
0	PL+chauffeur	13 000	/
	Remorque seule	27 000	/
0,3 €/km	PL+chauffeur	840	1 070
	Remorque seule	9 000	11 300
0,8 €/km	PL+chauffeur	0	/
0,6 €/km	Remorque seule	2 100	/

Les scénarios d'enveloppe à trafic nul amènent un trafic très élevé : comparable au double du trafic PL sur les autoroutes A7 et A9 qui constituent actuellement le principal mode d'acheminement sur le corridor, tandis que le mode ferroviaire actuel écoule l'équivalent de 1500 à 3000 PL/jour selon la section.

Pour le mode « remorque seule », les résultats restent encourageants au niveau moyen de prix. Pour le mode « PL avec chauffeur », le prix moyen ne permet pas de capter des clients ; le prix faible permet d'attirer une clientèle assez importante : en comptant une capacité de 50 PL par train, avec 10 trains par jour et par sens on chargerait l'équivalent de 17 trains complets, soit un taux de remplissage de 85%.

La vitesse de roulement a un effet plus marqué : passer de 85 km/h à 120 km/h fait augmenter le volume de clientèle de 2/3 (au niveau faible de tarif).

Le logiciel de modélisation permet des visualisations utiles pour analyser les résultats : une carte des sections avec les débits en épaisseur proportionnelle (fig. 10), ainsi que les cartes de « chevelus » ⁽⁹⁾ qui montrent les itinéraires suivis sur le réseau par les déplacements qui traversent un itinéraire sélectionné (fig. 11).

⁹ en anglais : critical link analysis

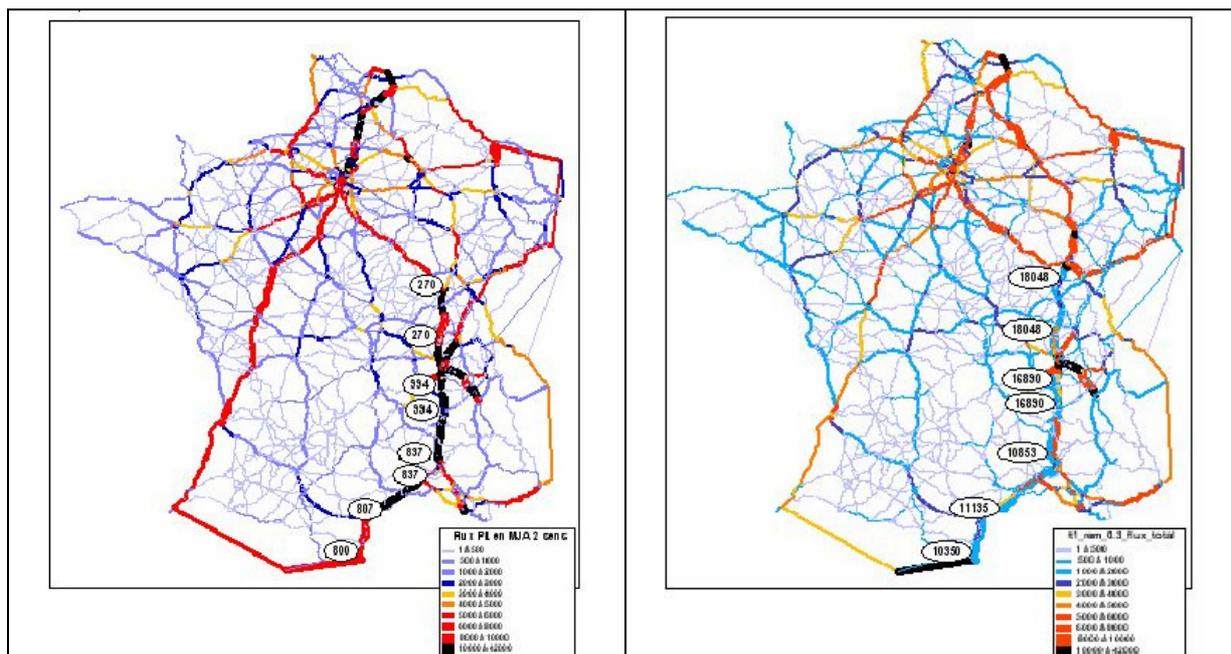


Fig. 10. Cartes de débit, tarif 0,3 €/km : PL avec chauffeurs / Remorques seules.

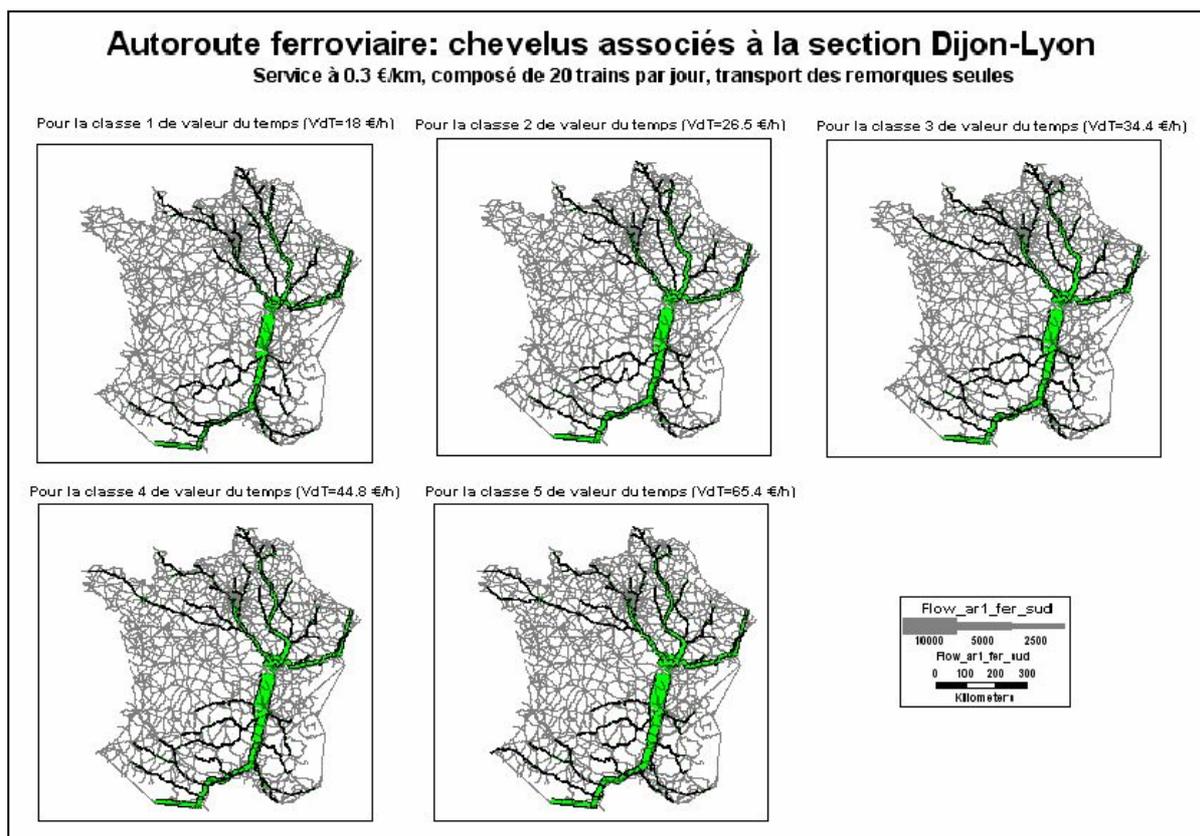


Fig. 11. « Chevelu » du segment Dijon-Lyon.

5.5 Enseignements et commentaires

5.5.1 ANALYSE ET DIAGNOSTIC DES RESULTATS

L'analyse et la discussion des résultats de simulation, constituent une partie essentielle dans l'étude : il convient de leur réserver une place suffisante dans le planning.

Il est bon aussi d'en tirer une synthèse, au même niveau d'exposé que pour les enjeux et les motifs de l'étude.

En l'occurrence :

- les deux modes d'usage constituent deux cibles commerciales à bien distinguer et à valoriser de manière spécifique.
- Sur le corridor, le potentiel de demande est élevé, avec un ordre de grandeur comparable au trafic routier d'ensemble si le prix est nul, ou au trafic routier « de transit » pour un prix moyen en remorque seule.
- Les facteurs « prix », « rapidité » et « fréquence » sont déterminants pour la fréquentation du service, fort logiquement.
- Le mode « remorque seule », pour bien fonctionner, nécessiterait une offre de services abondante et performante pour le transport routier terminal, avec une bonne interface commerciale et technique aux gares de transbordement.
- Plus largement, d'autres conditions nécessaires concernent la gestion des gares, de leurs accès routiers, la fiabilité du moyen ferroviaire, et la commercialisation des services correspondants.

Dans le modèle, on suppose ⁽¹⁰⁾ que les demandeurs disposent d'une information totale : pour qu'un service concret obtienne effectivement le trafic prévu en simulation, il faudrait qu'en pratique l'information soit très largement disponible et diffusée, y compris aux transporteurs non francophones.

Dans certains cas, spécialement en cas d'innovation, il arrive que certaines hypothèses relèvent non pas d'un opérateur mais du régulateur : dans notre étude, nous avons constaté l'effet très fort de réduire l'arbitrage prix-temps pour le « temps ferroviaire », par différence entre le mode « PL avec chauffeur » et le mode « remorque seule ». Or, le régulateur décide entre autres de la législation sociale en transport : c'est lui qui décide comment comptabiliser le temps passé par un chauffeur de PL à bord du train, comme une durée travaillée ou comme une durée de repose. De son choix dépend l'arbitrage prix-temps du transporteur !

La synthèse des résultats, ainsi que leur évaluation relativement aux hypothèses de modélisation et simulation, constituent le **diagnostic des résultats**.

¹⁰ explicitement dans notre présentation. Dans toute étude, il revient au maître d'œuvre de rendre le maître d'ouvrage conscient de telles hypothèses et de leurs conséquences. Pour un autre exemple d'hypothèse que nous n'avons pas explicité jusqu'ici : la question du coût de transaction pour le client, comment fait-il pour acheter un droit d'accès et d'usage, combien cela lui coûte-t-il ?

5.5.2 SUR LA PORTEE DU MODELE

Il convient aussi d'affirmer et de relativiser la portée du modèle.

Dans notre cas :

- le modèle représente les services offerts, la demande et l'usage.
- Le modèle ne représente pas les offreurs, ni les coûts de production, ni la fonction de production et ses contraintes techniques. En particulier, les trafics très élevés des scénarios à tarifs nuls, ne pourraient être écoulés avec le nombre et la capacité des trains qui correspondent à l'hypothèse de fréquence !
- Pour l'opérateur du mode ferroviaire, il conviendrait d'examiner l'économie conjointe des services ferroviaires classiques et du service massificateur de fret routier : comment « jumeler » les services, éventuellement au niveau de trains par assemblage en convois de segments par type de service, ou au minimum au niveau de l'usage des voies, en organisant une circulation « en batterie » pour des trains qui ont la même vitesse de croisière et qui peuvent donc se suivre de plus près que des trains aux vitesses différentes (car un suiveur plus rapide risque d'être ralenti par un prédécesseur plus lent).
- On n'a pas modélisé non plus les impacts environnementaux.
- Les coûts de production et les impacts environnementaux seraient à quantifier pour évaluer le bilan socio-économique du moyen massifié pour la collectivité.

5.5.3 SUR LA TRANSFERABILITE DU MODELE

L'approche de modélisation rapportée ici pour un moyen de transport ferroviaire en ligne, peut être transférée, transposée, à tout projet de service massifié en ligne sur un réseau de transport privé, à condition que le service massifié concerne une seule ligne (¹¹). Un système massifié composé de plusieurs lignes formant réseau, nécessiterait un modèle plus sophistiqué : cf les modèles d'affectation du trafic sur un réseau de transport collectif.

Enfin, l'étude a été rendue possible grâce à l'existence préalable de l'offre pour simuler la concurrence mais aussi les complémentarités avec le mode routier ; ainsi que la représentation de la demande, en localisation origine-destination des flux et en comportement économique pour le choix du moyen de transport.

¹¹ ou qu'il y ait plusieurs moyens massifiés en parallèle, ne pouvant servir conjointement dans un même déplacement : par exemple, une autoroute maritime entre Nantes (France) et Bilbao (Espagne), en parallèle avec une autoroute ferroviaire Lille-Tours-Vittoria

6. MODELES DE LA DEMANDE DE TRANSPORT : UNE TYPOLOGIE

La modélisation de la demande de transport a fait l'objet de nombreuses approches, qui partagent de multiples caractéristiques et souvent se renforcent mutuellement ou se complètent, bien plus qu'elles ne s'opposent.

Cette section ne vise pas à résumer la suite du cours : mais à donner des repères pour situer les principaux modèles scientifiques présentés dans le cours, ou des modèles opérationnels particuliers.

Nous donnons d'abord une grille d'analyse ; puis nous dressons un panorama, avant de montrer que bien des combinaisons sont possibles. Nous terminons par quelques repères historiques.

6.1 Une grille d'analyse en quatre questions discriminantes

Les quatre questions suivantes permettent de caractériser les grands principes dans un modèle de demande de transport :

1. est-ce un modèle de demande directe, ou un modèle spatialisé (géographique) ? Dans un modèle de demande directe, un moyen de transport est conçu en faisant abstraction de son caractère spatial, en le réduisant à quelques grandeurs physiques telles que la longueur et la durée de traversée, sans liaison aux lieux desservis ou traversés ni aux moyens de transport complémentaires dans un réseau. Tandis que dans un modèle spatialisé, on explicite la dimension spatiale : les distances, les voisinages et les contiguïtés, les continuités ou les ruptures, ont une signification et une représentation explicites.
2. est-ce un modèle macroéconomique ou microéconomique ? L'usage d'un moyen est-il décrit par une fonction au niveau agrégé sur toute une population de demandeurs, ou obtenu par agrégation explicite d'un ensemble de décisions microéconomiques ? Une situation intermédiaire est l'hypothèse de l'individu représentatif, quand la fonction au niveau agrégé d'une population, coïncide avec le produit entre l'effectif de la population, et une fonction de demande microéconomique, supposée identique (homogène) pour tous les individus concernés.
3. les choix de la demande sont-ils représentés au niveau d'un déplacement considéré isolément, ou d'un programme d'activité ? Les modèles au niveau du déplacement sont majoritaires. Mais les modèles d'activités permettent d'intégrer les contraintes inter-activités et interpersonnelles.
4. modélise-t-on la demande de transport seule, ou en liaison avec la demande d'autres biens : la demande d'une activité et donc le choix de destination ; la localisation d'établissement et l'usage du sol ; la production économique intersectorielle, le marché du travail et de l'emploi...

6.2 Panorama des modèles

Nous distinguons cinq grandes familles : les modèles non-spatialisés de volume d'usage ; les modèles spatialisés de formation des flux ; les modèles de choix discrets ; les modèles d'acteurs et d'activités ; enfin, les modèles de marchés économiques couplés.

6.2.1 MODELES NON-SPATIALISES DE VOLUME D'USAGE : TAUX D'EVOLUTION ET ELASTICITES

Pour un volume d'usage (agrégat comptable), on suit l'évolution chronologique, usuellement selon une base de temps annuelle, mensuelle ou journalière, afin de modéliser le taux d'évolution.

L'agrégat peut concerner un effectif de déplacements, ou un volume d'échanges (cas du fret), ou un volume de trafic (un total de distances parcourues, éventuellement pondérées par les masses chargées pour du fret), ou la valeur monétaire d'un volume d'échanges. Il mesure une quantité d'usage pour un service ou un réseau de transport.

Modèle de régression entre un volume d'usage d'un service, et des facteurs explicatifs concernant ce service. Par exemple, modèle des distances parcourues par des voitures sur le réseau autoroutier français, en fonction de la longueur du réseau, de la population sur le territoire couvert, du PIB par habitant, du taux de motorisation, du prix des carburants. Ou pour des services de TC, d'autres variables explicatives seraient le temps de service et la fréquence. Un tel modèle permet d'établir les élasticités du volume d'usage, aux variables explicatives "directes" du service.

Modèle de régression entre un volume d'usage d'un service, et les facteurs explicatifs pour ce service et des services concurrents ou complémentaires. Cela permet d'établir non seulement les élasticités directes aux attributs de ce service, mais encore les élasticités croisées aux attributs des autres services (notamment les prix).

Modèle de régression multiple entre les volumes d'usage de plusieurs services (ou leurs parts de marché) et leurs variables explicatives. Généralisation du cas précédent.

6.2.2 MODELES SPATIALISES : FORMATION DES FLUX ET CHOIX

Dans les modèles spatialisés, la dimension géographique est explicite. On modélise l'usage de l'offre par la demande, en concevant la demande comme des flux de déplacements liés à une zone (en émission ou en réception), ou à deux zones en relation origine-destination, ou à tout moyen de transport que le flux utilise, traverse.

Ainsi la notion de flux est centrale : comme elle est intrinsèquement de nature agrégée, a priori le modèle de demande est de nature macroéconomique. Cependant on cherche souvent à modéliser le flux comme la superposition locale de déplacements individuels, chacun résultant d'un acteur microéconomique avec son comportement : cela ajoute un fondement microéconomique, qui permet l'interprétation comportementale au niveau individuel. Un tel modèle traite en cohérence, des flux et des choix.

Les modèles de flux ont des composants simples, qui correspondent chacun à un type de choix :

- le modèle de génération.
- le modèle de distribution spatiale.
- le modèle de choix modal.
- le modèle d'affectation sur un réseau.

Pour chaque type de choix, il existe divers modèles de flux, qui se différencient par les hypothèses élémentaires de modélisation : les segments de demande, le niveau d'information, la fonction d'utilité et les facteurs de qualité de service, le jeu des aléas sur la rationalité économique...

Les modèles de flux peuvent être articulés à des modèles de gestion d'un service ou d'un réseau, auxquels ils fournissent la composante "trafic".

On utilise des modèles d'affectation aux itinéraires, afin de simuler l'équilibre entre l'offre et la demande : l'usage respectif des divers moyens, leur niveau de service respectif sous l'effet de la congestion, éventuellement la rétroaction des coûts sur les volumes de demande (fonction de demande élastique).

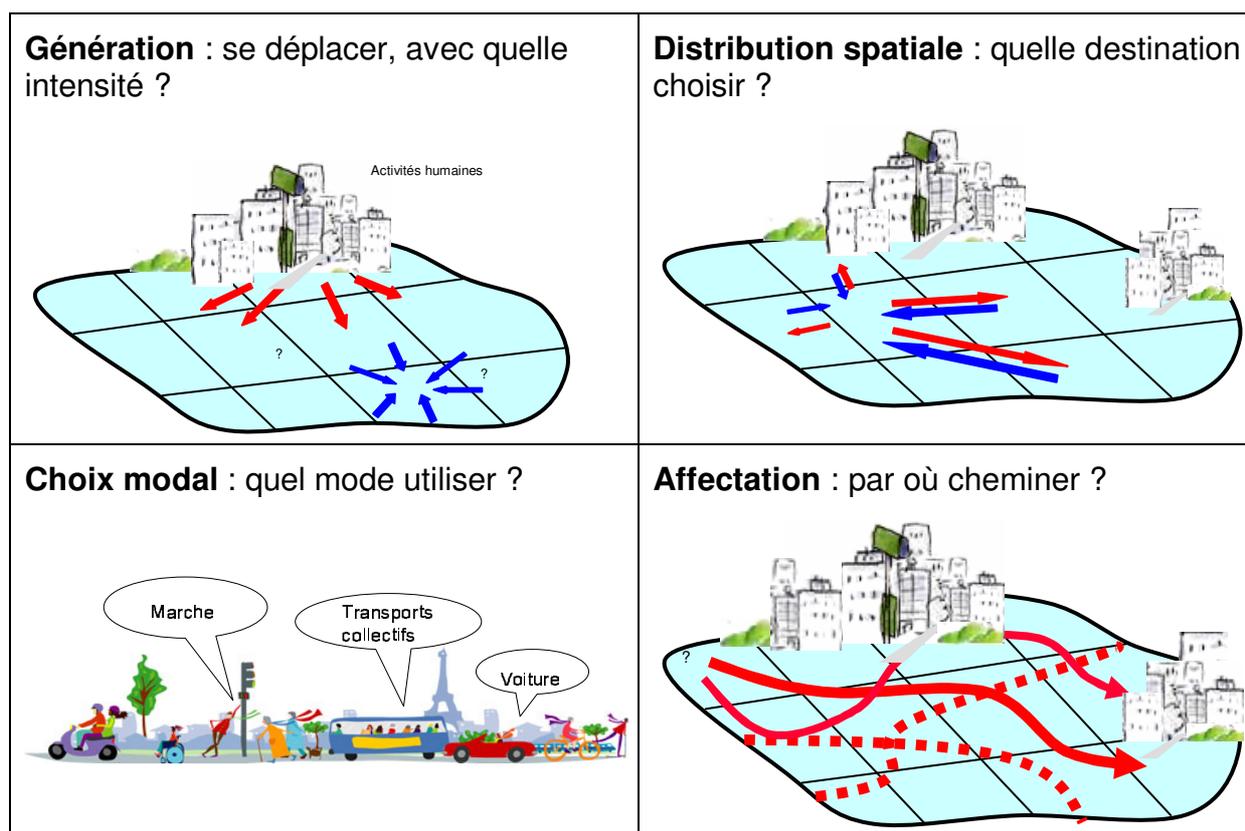


Fig. 12. Les modèles de choix de déplacement ⁽¹²⁾.

¹² source des illustrations : Yoann La Corte

6.2.3 MODELES DE CHOIX DISCRETS

Dans un modèle de choix discret, on représente un décideur en situation de choisir une option dans un ensemble d'options appelé l'univers de choix. Le modèle est microéconomique : on explicite les prix, les coûts, les caractères qualitatifs, les préférences du décideur et ses arbitrages entre les caractères des options et le facteur prix.

En général on considère une population de décideurs, et on la traite de manière désagrégée en explicitant chaque situation individuelle et chaque comportement individuel de chaque individu-décideur.

La modélisation de la demande de transport est, historiquement, le terrain privilégié du développement des modèles de choix discret. Les choix abordés concernent :

- le mode de déplacement.
- le lieu de destination et l'activité particulière.
- l'itinéraire sur un réseau, dans un modèle d'affectation du trafic.
- l'équipement en moyens de transport, notamment la motorisation automobile.
- des choix conjoints qui portent sur plusieurs des objets précédents.
- le programme d'activités, dans la journée d'un individu, ou dans un programme de production pour une entreprise (en matière de fret).

L'aspect microéconomique est renforcé par rapport aux modèles de flux : mais il n'y a pas incompatibilité, au contraire : la compatibilité est attestée par les modèles de flux et choix, où l'interprétation microéconomique est déjà présente.

6.2.4 MODELES D'ACTEURS ET D'ACTIVITES

Dans un modèle de choix discret, l'individu-décideur est un acteur dans une situation de choix. Si le choix porte sur une activité, c'est déjà un modèle simple d'activité.

De manière plus générale, un modèle d'acteurs et d'activités traite des situations plus riches et plus complexes d'activités, notamment :

- un programme d'activités pour un individu dans une journée : le choix des activités à mener, des lieux où les exercer, leur combinaison en un programme d'activités et donc un programme de déplacements.
- le programme d'usage de certaines ressources : notamment pour un véhicule partagé par les membres d'un ménage pour leurs déplacements respectifs.
- des contraintes interpersonnelles entre plusieurs personnes-acteurs établissant leur programme d'activités respectif.

On peut rattacher à cette famille, les modèles démographiques qui représentent les individus dans une population et leur évolution temporelle : le terme temporel est beaucoup plus long, mais les événements majeurs dans une vie, sont des transitions

dans un cycle de vie (¹³), comparables aux déplacements dans un programme d'activités.

On utilise des modèles démographiques pour simuler :

- l'évolution d'une population sur un grand territoire.
- la détention du permis de conduire.
- l'équipement automobile.
- l'usage des modes de transport, au niveau d'un pays, d'une région ou d'une agglomération.

Le fondement démographique donne de fortes garanties pour des époques relativement lointaines. Par exemple, la détention du permis de conduire est un phénomène facile à prédire à long terme, car elle nécessite un âge minimum (18 ans en France) donc le recensement de la population permet d'anticiper sur une durée équivalente avec une bonne fiabilité.

6.2.5 MODELES DE MARCHES ECONOMIQUES COUPLES

Dans un modèle de marchés économiques couplés, un (sous-)système de transport est considéré en interaction avec le système d'activités, ou certains sous-systèmes d'activités : notamment les activités de production économique, ou le marché foncier et le marché immobilier (¹⁴).

L'enjeu est d'explicitier la causalité qui motive la demande de transport, pour approfondir la compréhension des déterminants et ne pas négliger des facteurs structurels potentiellement importants.

Citons quelques types de modèles dans cette famille :

- modèles couplés du transport et du logement, pour la structuration de la mobilité quotidienne et du parc de logements.
- modèles couplés transport - logement - emploi.
- modèles couplés de transport et de production économique, pour un ou plusieurs secteurs d'activité : en économie spatiale.
- modèles couplés du transport et de l'activité logistique, pour saisir la motivation logistique des mouvements de fret et approfondir les facteurs du choix du mode de transport.

6.3 **Systèmes de modèles**

Il y a bien des manières de combiner plusieurs des modèles évoqués, dans un grand modèle ou "système de modèles" à la portée plus large et plus profonde, mais au coût plus élevé.

¹³ Les principaux stades de la vie d'un individu sont : la naissance ; la petite enfance ; l'enfance "plus autonome" ; l'adolescence ; jeune adulte ; mise en ménage ; éducation des enfants ; départ des enfants ; retraite ; décès.

¹⁴ localisation d'entreprise ou résidentielle ; bien immobilier à la vente ou à la location

Citons quelques combinaisons :

- l'articulation de modèles de génération, distribution spatiale, choix modal et affectation, dans une séquence à quatre étapes. On l'appelle traditionnellement, le **modèle à quatre étapes** ("four-step model").
- des systèmes avec des rétroactions, où on simule par le modèle d'affectation les niveaux de service et les coûts généralisés, que l'on utilise pour conditionner la distribution spatiale des flux et parfois même la génération.
- des systèmes où certains blocs-composants sont traités de manière agrégée (ex. la distribution), et d'autres de manière désagrégée (ex. choix modal).
- des modèles de choix discret qui traitent conjointement plusieurs décisions : mode et destination, ou mode et itinéraire etc. La hiérarchisation des options de choix, la constitution de sous-groupes, et le rattachement d'une option ou d'un sous-groupe à un sous-groupe d'ordre supérieur (voire même à plusieurs sous-groupes d'ordre supérieur, avec pour chacun un degré d'appartenance) : constituent la structure de choix.
- le couplage d'un modèle d'affectation avec un modèle de simulation fine du trafic : par simulation microscopique des interactions entre les véhicules et avec leur environnement de circulation ; ou la simulation macroscopique de l'écoulement par des modèles analytiques.
- le couplage d'un modèle d'affectation avec des modèles d'impacts environnementaux : émissions de bruit, émissions de polluants, impacts sanitaires etc.

6.4 Quelques repères historiques

Début du 18^{ème} siècle : création de corps d'ingénieurs dans l'administration française, afin d'évaluer et de contrôler les coûts des chantiers techniques.

Courant du 18^{ème} siècle : considérations économiques pour développer tel mode de transport pour tel besoin (voie d'eau ou route pour le fret).

Première moitié du 19^{ème} siècle : modèles de coût généralisé et comparaison d'options de déplacement. Surplus de la demande. Equations de Kirchhoff, début du traitement mathématique des réseaux. Problèmes économiques d'entretien routier (diffusion du macadam en remplacement de l'empierrement).

Seconde moitié du 19^{ème} siècle : modèle gravitaire de distribution spatiale. Problèmes d'économie ferroviaire.

Années 1930 : formalisation de la théorie des probabilités (Kolmogorov). Problèmes combinatoires, premiers algorithmes de recherche opérationnelle (algorithme hongrois pour certains problèmes d'affectation).

Années 1940. Apparition des ordinateurs. Conditions de Karush-Kuhn-Tucker en optimisation. Modèle des opportunités en distribution spatiale, et méthode des facteurs de croissance. Problèmes de distribution en logistique (problème de transport de Hitchcock, des soviétiques).

Années 1950. Schéma à trois étapes Génération – Distribution – Affectation routière dû à Alan Voorhees. Algorithmes de plus court chemin. Principes de Wardrop. Formulation extrême de Beckmann. Modèles logit agrégés de choix discret.

Années 1960 : apparition des systèmes d'information géographique en lien avec les modèles d'interaction transport – urbanisme. Affectation au transport collectif. Modèles prix-temps de choix modal. Méthode de Frank-Wolfe pour équilibrer un réseau de transport. Hypothèses micro-économiques pour les modèles de choix discret.

Années 1970 : interprétation désagrégée du modèle logit et développement des modèles de choix discret (McFadden, Ben-Akiva). Méthodes de Stated Preferences pour enquêter les choix. Modèles d'équilibre pour plusieurs modes de transport, plusieurs types de choix. Problème des lignes combinées en transport en commun. Modèle logit d'affectation.

Années 1980 : choix d'horaire. Développement des modèles stochastiques d'affectation. Modèles de stratégie optimale et d'équilibre en TC. Développement de la composition des modèles, pour les modèles d'équilibre offre-demande comme pour les modèles de choix discret.

Années 1990 : modèles d'équilibre prix-temps pour l'affectation. Modèles d'équilibre multi-classes. Confluence avec les modèles hydrodynamiques de trafic. Développement de la simulation microscopique du trafic. Modèles bi-niveau pour optimiser la gestion du trafic.

Années 2000 : les recherches en cours concernent surtout, l'affectation dynamique du trafic ; la modélisation du fret ; l'interaction transport – usage du sol ; la congestion en TC ; et les applications des modèles d'affectation en couplage avec un modèle d'optimisation du réseau et/ou du trafic.

7. CONCLUSION

7.1 Synthèse

Nous avons défini la demande et les concepts liés d'offre, de marché et de régulation. Puis nous avons décrit qualitativement les aspects de la demande, tant les aspects matériels et physiques, que les aspects sociaux, culturels et psychologiques, en passant par les aspects économiques et technologiques.

Ensuite nous avons indiqué les motivations opérationnelles pour modéliser la demande de transport, dans une série de contextes d'application : les principaux contextes sont la prévision de la demande, l'évaluation de projet, et la planification de réseau.

Nous avons alors donné des principes généraux pour la modélisation : des définitions, et une analyse en quatre facettes pour un modèle de simulation. Les quatre facettes concernent, respectivement, le contenu sémantique, la formulation et son analyse mathématique, le traitement technique par un solveur, la relation empirique entre le modèle et sa cible concrète.

A titre de démonstration, nous avons synthétisé une étude de prévision de trafic pour un service ferroviaire de fret "en autoroute ferroviaire" dans la vallée du Rhône : avec le contexte, les objectifs, la méthode de modélisation, la conception et la prévision des scénarios.

Pour finir, nous avons établi une typologie des modèles de demande, en insistant sur quatre questions discriminantes : abstrait / spatialisé ; macro- ou micro-économique ; déplacement / programme d'activités ; demande de transport seulement ou couplée à d'autres biens économiques.

7.2 Prolongements

Dans la suite du cours, nous traitons principalement :

- les modèles offre-demande pour le choix du moyen de transport. L'offre y est représentée en termes de services et de prix. Pour la demande, les contextes et les comportements de choix sont représentés de manière microéconomique. La notion d'équilibre offre-demande tient une place centrale.
- les modèles de demande pour la formation des flux de déplacement : modèles de génération et distribution spatiale. A priori ils sont de nature macroéconomique, mais certains ont aussi un contenu microéconomique, avec des choix de destination ou des choix de localisation d'établissement.
- les modèles d'évolution chronologique, utiles à la prospective.
- la composition de modèles en des systèmes.

8. EXERCICES

8.1 Sur la définition de la demande

Définir l'équilibre entre l'offre et la demande sur un marché économique :

1. de manière appliquée, au cas du marché de l'équipement automobile (distinguer le neuf et l'occasion).
2. de manière abstraite.

8.2 Sur la description de la demande

Aspects économiques

Aspects qualitatifs de certains types de déplacement ? Connaissance préalable au choix d'horaire ?

A quels groupes en déplacement avez-vous l'occasion d'appartenir ? Comment cela conditionne-t-il vos déplacements ? Ex. tarif scolaire et carte orange ; gestion en entreprise des déplacements ; ménages et équipement automobile ; groupe en vacances

Aspects culturels, sociaux, psychologiques

Décrire un programme de fidélisation d'une compagnie aérienne. Indiquer les effets des programmes sur la clientèle, et sur l'opérateur

Analogie ferroviaire sur les effets de fidélisation : réservation en avance, quels sont les avantages qu'en retire le producteur ?

Aspects institutionnels

Discuter quelles peuvent être les raisons pour encadrer les tarifs, soit à la hausse par un tarif-plafond, soit à la baisse par un tarif-plancher.

8.3 Sur les contextes d'application

Pour planifier le développement en France d'un réseau ferroviaire à grande vitesse, pendant la période 1970-2000 les études de trafic ont été réalisées par la SNCF qui était alors opérateur intégré des infrastructures et des services : avec un modèle de trafic par ligne. Ce modèle a servi pour étudier les lignes Paris-Lyon, LGV Ouest, LGV Méditerranée, LGV Est.

1. Décrire et commenter les conséquences sur la prise en compte (ou non, bonne ou mauvaise) des effets de réseau.
2. Discuter la force des conséquences selon les caractères des corridors desservis : en distance, en volume de trafic.
3. recommander un modèle d'étude pour la LGV Rhin-Rhône (Bâle-Lyon).

8.4 Sur les principes de modélisation

Modélisation formelle

Mise en scène d'un pb de point fixe pour l'équilibre offre-demande

Commenter les signes, valeurs et domaines admissibles pour les paramètres a et g dans une fonction BPR vitesse-débit

Exos plan empirique

Enquête sur les comportements de choix : dans chaque mode, dénombrement

A rapporter à des situations de choix : dans le modèle éco sous-jacent, segmenter la demande

8.5 Sur la démonstration d'étude de trafic

Commenter, justifier l'hypothèse sur la période temporelle, effets routier, ferr ?

Transférabilité. Expliquer comment transposer à l'étude d'une ligne de bus en milieu urbain. Quels seraient les risques pour l'étude d'une ligne de tramway ?

8.6 Sur les approches de modélisation

Fonction de consommation. Modèle de Cramer

9. BIBLIOGRAPHIE

Beckmann M, McGuire C, Winsten C (1956) *Studies in the economics of transportation*. Cowles commission report. Harvard University Press.

Ben-Akiva M (1974) Structure of Passenger Travel Demand Models. *Transportation Research Record*, Vol. 526, pp. 26-42.

Certu (1999) *Guide de la modélisation des déplacements de voyageurs en milieu urbain*. Certu, Lyon.

Jones P, Koppelman F and Orfeuil JP (eds) (1990) *Developments in Dynamic and Activity-Based Approaches to Travel Analysis*. Oxford Studies in Transport, Avebury.

Leurent F (1997) *Analyse et mesure de l'incertitude dans un modèle de simulation. Principes, une méthode et le cas de l'affectation bicritère du trafic*. Thèse de doctorat de l'ENPC, ENPC, Paris.

Leurent F (2006) *Structures de réseau et modèles de cheminement*. Lavoisier, Cachan, France.

Mannheim (1979) *Transport systems analysis*.

McFadden D (1974). Conditional logit analysis of qualitative choice behaviour. In Zarembka P (ed), *Frontiers in Econometrics*, pp. 105-142. Academic Press, New York.

Ortuzar J de Dios, Willumsen L (1994) *Modeling Transport*. Wiley and Sons.

Sheffi Y (1984) *Urban Transportation Networks*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Small KA (1987) A Discrete Choice Model for Ordered Alternatives. *Econometrica*, Vol. 55 (2), pp. 409-424.

Voorhees AM (1955). A general theory of traffic movement. In *Proceedings of the Institute of Traffic Engineers Annual Meeting*. New Haven CT, pp. 46-56.