Modélisation de la demande de transport

2C.

Affectation du trafic sur un réseau, le choix d'itinéraire

Fabien Leurent
ENPC / LVMT

Plan

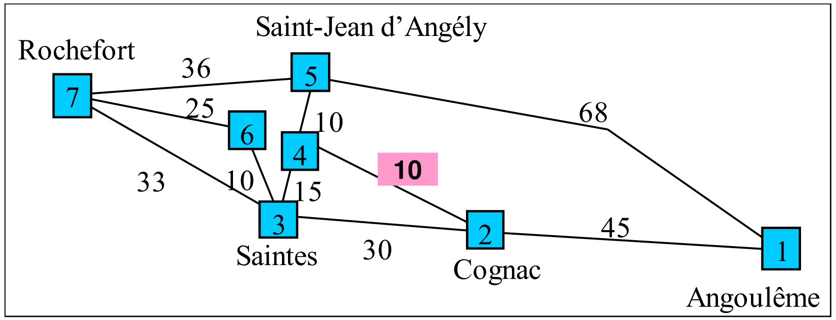
- Introduction
- L'aspect RESEAU
  - Formation des services : recherche de plus courts chemins
  - Chargement en volume : superposer les déplacements
- Le choix d'itinéraire et la répartition du trafic
  - Minimisation du coût généralisé
  - Variété des préférences et distribution des arbitrages : modèle prix-temps
  - Affectation stochastique
- L'équilibre offre-demande
- Conclusion

Introduction

- Objectifs
  - Sur un réseau, composer les services à partir des moyens élémentaires ; et caractériser ces services en prix, en qualité
  - Modéliser le choix du service, pour un demandeur, puis pour une population de demandeurs
  - Modéliser les relations offre-demande et leur conséquence : un état macroscopique du réseau, avec idéalement un équilibre du trafic
- La structure de réseau induit deux problèmes
  - Quelle formation des services ? À priori par segment et O-D. => Le problème de Plus Court Chemin (PCC) : rechercher un service optimal entre une origine et une destination
  - Quelle superposition des Dt pour former le trafic local ? => Pb du chargement en volume : charger des volumes d'itinéraires, sur les éléments correspondants du réseau

Exercice de recherche

Angoulême-Rochefort, PCC en distance



Problème de recherche

- Inputs
  - Critère d'optimalité
  - Nœud d'origine, nœud de destination
  - Réseau de nœuds et d'arcs, coûts des arcs
- Outputs
  - itinéraire de l'origine à la destination, sans arc répété
  - Coût O-D, éventuellement plusieurs composantes
  - Codage récursif : en chaque nœud du chemin un **arc d'accès**

Algorithme de Dijkstra (1957)

- Les données
  - Coûts c_a des arcs *a*
  - Nœud d'origine *o*, nœud de destination *s*
- Les variables
  - Par nœud *n* : un coût u_n initialement infini, et un arc d'accès θ_n initialement vide
  - Une liste *L* de nœuds en attente
  - Une liste *M* des nœuds *n* pour lesquels on connaît le PCC depuis *o*

Organigramme de l'algorithme

Début

- Poser $u_n \leftarrow \infty \; \forall n$, $u_o \leftarrow 0$, $L \leftarrow \{o\}$ et $M \leftarrow \varnothing$

Progression

- Dans *L* prendre *n* de coût u_n minimal, poser $L \leftarrow L \setminus \{n\}$ et $M \leftarrow M \cup \{n\}$
- $\forall a$ sortant de *n*, de nœud final *m* :
  si $u'_m \equiv u_n + c_a < u_m$ alors faire $\left\{ \begin{array}{l} u_m \leftarrow u'_m \\ \theta_m \leftarrow a \\ L \leftarrow L \cup \{m\} \end{array} \right.$

Test de fin

- si *L* est vide terminer, sinon aller à Progression

Traitement de l'exemple

n	u_n	Progression (*m*: u_m : θ_m)	*L* *attente*	*M* *résultats*
1	0	(2 : 45: 12), (5 : 68 : 15)	{2,5}	{1}
2	45	(3 : 75 : 23), (4 : 65 : 24)	{4,5,3}	{1,2}
4	65	(5 : 75 : 45) dominé	{5,3}	{1,2,4}
5	68	(7 : 104 : 57)	{3,7}	{1,2,4,5}
3	75	(7 : 108 : 37) non, (6 : 85 : 36)	{6,7}	{1,2,4,5,3}
6	85	(7 : 110 : 67) non	{7}	{1,2,4,5,3,6}
7	104	-	Vide	{1,2,4,5,3,6,7}

Complexité informatique

- Définition de la complexité informatique
  - En temps : nb d'opérations d'une certaine nature : additions, produits, fonction exponentielle etc
  - En mémoire : nb de variables nécessaires au calcul
- Ordre de grandeur
  - Fonction O(XY) à lire *Grand O de XY* : pour signifier que le nombre d'opérations est proportionnel à $X.Y$
  - Sur un réseau, les paramètres de base sont le nb de nœuds $|N|$ et le nb d'arcs $|A|$

Cas de l'algo de Dijkstra

- Le traitement déterminant est la progression
  - Recherche du nœud de coût d'accès minimum : avec un algorithme de tri on réduit cela à O(ln$|N|$)
  - Chaque nœud n est traité une seule fois en sortie de L, donc complexité O($|N|$.ln$|N|$) pour les recherches de minimum
  - Tests pour l'entrée dans L : pour chaque nœud m un nombre de fois <= au nombre d'arcs entrant dans m, et chaque arc a est considéré au plus une fois : O($|A|$)
- Au total, le terme dominant est O($|N|$.ln$|N|$)

Algorithme de Ford-Bellman (1955-1956)

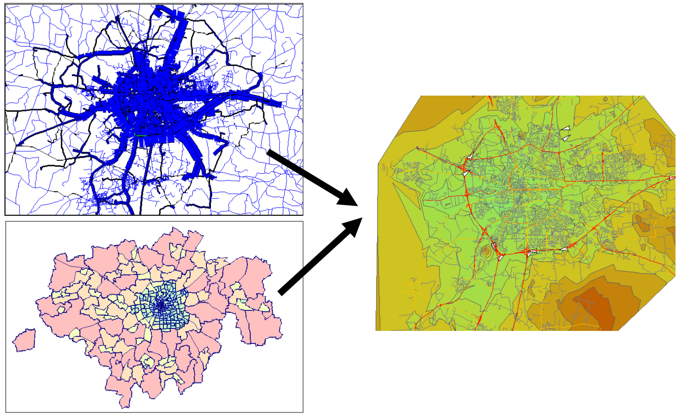
- Différences avec Dijkstra
  - La liste d'attente L n'est pas triée
  - Un nœud peut sortir de M et revenir à L
  - L'interprétation de M change : $M \cup L$ est l'ensemble des nœuds pour lesquels on connaît un chemin, pas nécessairement minimum
  - Fin quand L est vide
- Complexité en O($|N|^2$), mais efficace en pratique

Sophistications

- Classes ? APT distribués ?
  - Critères distincts
  - Conditions particulières d'accès
- Mouvements tournants
- Incertitude / information partielle
- Services discrets
- Variations temporelles

Applications

- Distanciers, isochrones, cartes d'accessibilité
- Calcul d'indicateurs complexes

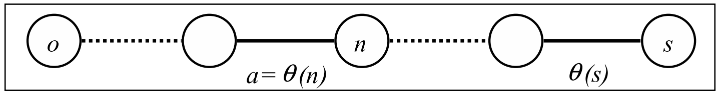


Exercice de chargement

- Réseau Angoulême-Rochefort
- Origine = Angoulême
- Destinations et flux
  - Rochefort (nœud 7) : volume O-D = 180
  - St Jean d'Angély (nœud 5) : 105
  - Nœud 4 : 72
  - Nœud 6 : 47
- Question : charger les flux sur les PCC, en déduire les flux des arcs

Chargement par chemins

- Par relation O-D, soit q le volume O-D
- Le long du chemin
  - En sens inverse depuis la destination
  - Au nœud n, on connaît l'arc d'accès θ_n : charger q dessus ; le nœud initial de θ_n est le nœud suivant
- C'est une méthode de Petit Poucet
- Complexité : NbDes x NbArcs



Algorithme de chargement en arbre

- Algorithme
  - Les PCC forment un arbre de chemins depuis l'origine
  - Pour le chargement, considérer des variables aux nœuds y_n et des variables aux arcs x_a
  - Fixer les y_n des destinations aux volumes O-D
  - Parcourir l'arbre dans l'ordre décroissant des u_n : ajouter y_n au volume x_a de l'arc d'accès, et à y_m du sommet opposé
- Complexité O($|A|$) : très efficace
- Dû à Robert Dial (1967)

Le problème d'affectation

- Par origine
  - Recherche
  - Chargement des arcs d'accès des destinations
  - Chargement en arbre => volumes par arcs pour l'origine
- Ensemble des origines
  - Charges des arcs cumulées sur les origines
- Complexité = NbOri . [$/A/.\ln/A/ + /A/$]
- Interprétation économique :
  - Recherche des PCC = former les services optimaux avec leurs coûts. Les inputs sont les coûts élémentaires des arcs, les outputs sont les coûts des services, par O-D et segment
  - Chargement en volume = former les volumes locaux. Les inputs sont les itinéraires et leurs volumes, les outputs sont les charges des arcs

Conclusion provisoire

- Récapitulation
  - Deux problèmes types, avec des algorithmes efficaces
  - En les combinant, on peut affecter des flux O-D sur un réseau, selon un comportement de choix d'itinéraire
- Prolongements
  - Modèles raffinés, sophistiqués : priorité à la représentation microéconomique des demandeurs
  - Équilibre offre-demande : priorité aux relations macro entre l'offre et la demande
- Modèle de choix d'itinéraire = affectation aux iti
  - Principe = optimisation par un (ou des) acteur(s)
  - Outputs = itinéraires en topologie et en volume par segment et O-D, volumes par arcs, par O-D etc
  - Inputs = réseau et matrice de demande

Choix de l'itinéraire sur un réseau, et répartition du trafic entre itinéraires

- Hypothèses pour modéliser le choix d'itinéraire
  - *Cas d'un mode privé de transport*
  - Rationalité économique du demandeur individuel
  - Variété des préférences => segmentation
  - Circonstances aléatoires
- Modèles « simples » de répartition du trafic
  - Bicritère prix-temps
  - Probit
  - Logit linéaire
  - Logit logarithmique

Hypothèses

- Transport privé : ex. voiture, marche, deux roues
  - Le mode offre une disponibilité totale à l'usager, à la fois dans le temps et dans l'espace
- En transport privé, un service est un chemin
  - Description de la topologie : séquence d'arcs, de nœuds
  - Description économique : attributs qui interviennent dans la formule du coût généralisé
- Univers de choix : l'ensemble des options
  - Tous les itinéraires 'connus' par le demandeur
  - En pratique, énumération implicite : on privilégie des PCC
- Caractérisation des options
  - Itinéraires *abstraits* : réduits à leurs caractères économiques (prix, temps…) en faisant abstraction de leur topologie

Comportement / Segmentation

- Modèle de comportement : la rationalité individuelle
  - Préférences de l'individu : ses arbitrages entre les caractères des services => son évaluation de chaque service, et la comparaison des services
  - Rationalité économique = choisir le service préféré
  - On se limite aux services dont l'usager est informé, sans contredire l'hypothèse de rationalité
- Segmentation selon le comportement de circulation
  - Conditions d'accès à certaines parties du réseau
  - Emprise sur la capacité d'écoulement ou de stockage
- Segmentation selon le comportement de choix
  - Caractères économiques, arbitrages
  - Niveau d'information, imprécision sur les perceptions
- Et bien sûr selon les relations O-D, les périodes

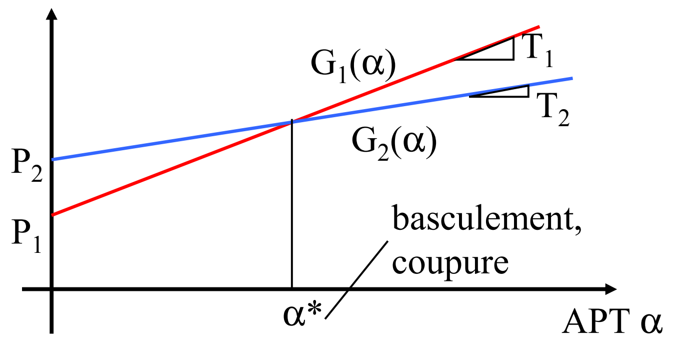
Modèle prix-temps

- Hypothèses
  - Chaque décideur minimise le CG pour son APT
  - Les APT suivent une distribution statistique dans une population de décideurs
- Exercice : concurrence de deux chemins
  - Chemin 1, prix 10 €, temps 2 h
  - Chemin 2, prix 20 €, temps 1 h 30
  - APT distribués uniformément sur [0, 50] €
  - Part de marché de chaque chemin ?

Modèle bicritère prix-temps

- Hypothèses relatives aux services
  - L'option *m* est caractérisée en prix et temps, $X_m = (P_m, T_m)$
- Hypothèses relatives à la demande
  - Chaque demandeur a un arbitrage prix-temps α (en €/h ou autre unité)
  - Distribution des arbitrages α dans la population des décideurs, avec une fonction de répartition cumulée $A(\alpha)$
  - Un demandeur d'arbitrage α perçoit pour l'option *m* un coût généralisé de $G_m(\alpha) = P_m + \alpha T_m$
- Principe du modèle
  - Chaque demandeur est affecté à une option de coût minimal pour lui
  - Les choix individuels induisent l'usage de chaque option

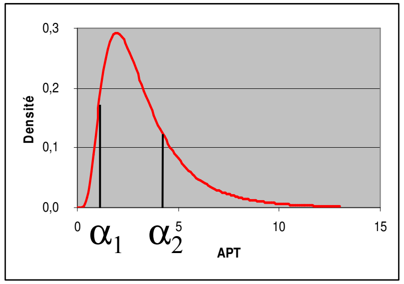
Comparaison des options

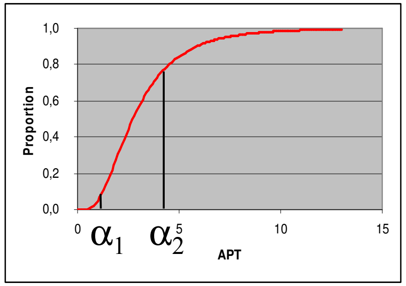


- Si $\alpha \leq \alpha^*$: option 1 meilleure pour α
- Si $\alpha > \alpha^*$: option 2 meilleure pour α

Les proportions d'usage

- Chaque option reçoit les clients qui la préfèrent
- Option m optimale sur $]x, y]$ =>
  Proportion d'usage $\pi_m = A(y) - A(x)$





Exercice

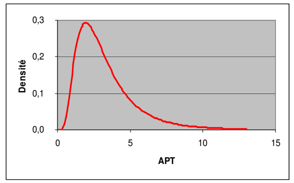
- Hypothèses
  - Mode 1 : prix 10 €, temps 2 h
  - Mode 2 : prix 20 €, temps 1 h 30
  - Distribution des APT : uniforme sur [5, 25] €/h
- Questions
  - Arbitrage de coupure ?
  - Parts de marché ?
  - Conséquences de faire varier P_2 de 0 à 50 € ?

Algorithmes multiclasses ou multicritères

- Définitions
  - Multiclasse : divers comportements de circulation
  - Multicritère : arbitrages distribués
- Principes des algorithmes
  - Traiter chaque classe isolément
  - Par classe : traitement générique, collectif, depuis une origine, pour toutes les destinations, et tous les arbitrages
  - Algorithmes bicritères pour une distribution des APT : évolutions sophistiquées des algorithmes de recherche de plus court chemin
  - Algorithme multicritère : tirage aléatoire dans la distribution des arbitrages. Obligé si plus de deux critères

Algorithme multicritère

- Calculer la répartition du trafic entre les itinéraires, pour une demande avec des préférences distribuées
- Modèle prix-temps : APT distribués



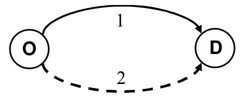
- Variables $\boxed{x_a^{(k)}}$ itération k
  Volume arc a
- Déroulement : par itérations k
  - Tirer α_k au hasard dans la distribution des APT
  - En déduire les coûts par arcs $g_a^{(k)} = p_a + \alpha_k . t_a$
  - Rechercher les PCC et les charger en volume => $y_a^{(k)}$
  - Volume courant $x_a^{(k)} = \frac{1}{k} \sum_{\ell=1}^{k} y_a^{(\ell)}$
- Exercice : exprimer $x_a^{(k+1)}$ en fonction de $x_a^{(k)}$ et de $y_a^{(k+1)}$

Modèle probit

- Principe : par classe *u*
  - Par arc a, coût généralisé aléatoire $g_{au}(\omega) = c_{au} - \varepsilon_{au}(\omega)$ avec ω un aléa et ε perturbation aléatoire
  - Le chemin *m* a pour *u* le coût généralisé $G_{mu} = \sum_{a \in m} g_{ua}$
  - Pour la classe *u* et l'O-D *i* de volume q_{ui}, le chemin *m* reçoit le volume
    $$x_{mu} = q_{ui}.\Pr\{G_{mu}(\omega) \leq G_{ru}(\omega) : \forall r \in M_{ui}\}$$
- Algorithme de Monte-Carlo (Burrell, Sheffi / Powell)
  - Tirer l'aléa ω => un tirage des coûts $\hat{g}_{au}$
  - PCC et chargement du trafic sur la base de ces coûts
  - Itérer, en moyennant les résultats des itérations successives
  - La moyenne finale des volumes des arcs, est une approximation numérique de l'affectation probit

Une affectation probit

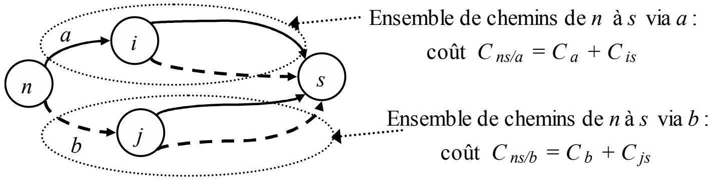
- Choix entre deux chemins 1 et 2 :



- Coûts généralisés aléatoires
  $$G_1 = 6 + \left\langle \begin{array}{ll} -2 & 60\% \\ 3 & 40\% \end{array} \right. \qquad G_2 = 7 + \left\langle \begin{array}{ll} -4 & 20\% \\ 1 & 80\% \end{array} \right.$$
- On suppose l'indépendance des deux CG
- Calculer les proportions d'usage (parts de marché) de chaque chemin
  - *Conseil : faire un tableau des cas en croisant, en ligne les variations de G_1, et en colonne les variations de G_2*
- *Calculer le « coût généralisé minimal moyen » ie* E[min{G_1,G_2}] (opérer d'abord le min, puis la moyenne)

Modèle logit d'affectation

- Justification empirique
  - Entre deux chemins aux coûts proches disons 17 et 18, pourquoi charger 100% sur le plus court et 0% sur le plus long, plutôt que répartir « en mix » 90%-10% ou 60%-40% ?



  - Au-delà du cas particulier, formulation générique ?
- Modèle de Dial (1971) : affectation exponentielle
  - Au nœud n, le volume se partage entre les prochains arcs a vers la destination s, au prorata des exp[-θ.$C_{ns/a}$]
  - Formule $$\frac{x_a}{x_b} = \frac{\exp[-\theta.C_{ns/a}]}{\exp[-\theta.C_{ns/b}]}$$
  - Contrôle grâce au paramètre θ : + fort => + discriminant

Costing et splitting

- Algorithme d'affectation exponentielle (Dial, 1971) =
  - Une phase « backward » : formation des coûts et des proportions de routage en chaque noeud
  - Une phase « forward » : chargement du volume sur les arcs
- Variables de la phase Backward
  - Inputs = réseau, noeud s, coûts g_a, W_a = exp[-θ.g_a], et θ
  - Outputs = Ψ_n, u_n coût de n à s, et η_a proportions locales
- Organigramme « *Costing & splitting* »
  - Initialisation : $\Psi_n \leftarrow 0 \;\; \forall n; \; \Psi_s \leftarrow 1$
  - Parcours depuis s, depuis l'aval vers l'amont
  - Au nœud courant n : $\begin{cases} \Psi_i \leftarrow \Psi_i + W_b.\Psi_n & \forall b \approx (i,n) \\ \eta_a \leftarrow W_a.\Psi_i / \Psi_n & \forall a \approx (n,i) \end{cases}$
  - À l'issue : $u_n \leftarrow [\ln \Psi_n]/\theta \;\; \forall n$

Flow loading

- Variables de la phase Forward
  - Inputs = réseau, noeud s, proportions η_a, flux O-D q_{os}
  - Outputs = x_a volume d'arc a, z_n volume sortant de n vers s
- Organigramme « *Flow loading* »
  - Initialisation : $x_a \leftarrow 0 \;\; \forall a$; $z_n \leftarrow 0 \;\; \forall n$; $z_o \leftarrow z_o + q_{os} \;\; \forall o$
  - Parcours vers s, depuis l'amont vers l'aval
  - Au nœud courant n : $\forall a \approx (n,i) \;\; x_a \leftarrow z_n.\eta_a$

$$z_i \leftarrow z_i + x_a$$

- L'algorithme d'affectation expo est très efficace
  - Costing et splitting, en O(|*A*|)
  - Flow loading, en O(|*A*|) : chargement « en treillis » très proche du chargement « en arbre »

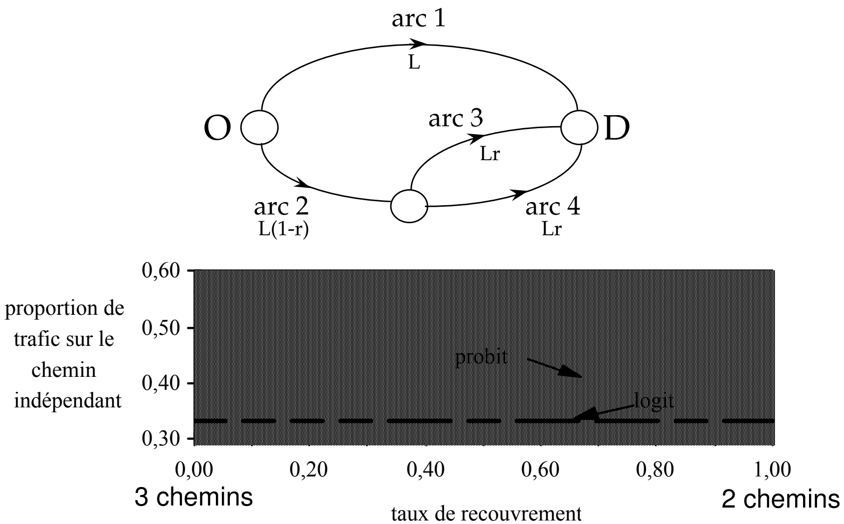
Discussion économique

- Cohérence macroéconomique avec les coûts
  - $\theta > 0$ => si $C_{ns/a} < C_{ns/b}$ alors $x_a > x_b$
  - En faisant tendre θ vers l'infini, tout le trafic s'affecte sur l'option de coût minimal
- Interprétation microéconomique (Florian et Fox, 1976)
  - L'affectation exponentielle correspond à un modèle « logit » de choix discret entre les itinéraires, de paramètre θ,
  - i.e. chaque chemin *m* est une option de coût généralisé aléatoire $G_m(\omega) = C_m - \varepsilon_m(\omega)$ avec $C_m = \sum_{a \in m} c_a$ et des variables aléatoires $(\varepsilon_m)_m$ distribuées Gumbel de paramètre θ et indépendantes
  - Clientèle d'option $x_m = q_i.\Pr\{G_m(\omega) \leq G_r(\omega) : \forall r \in M_i\}$
  - Coût généralisé minimal = variable aléatoire Gumbel-θ

$$G_n(\omega) = \min\{G_m(\omega) : m \text{ de } n \text{ à } s\}$$

de moyenne $\mathrm{E}[G_n] = \frac{1}{\theta} \ln \sum_m \exp(-\theta.C_m) \quad = u_n$

Corrélation entre chemins



Logit logarithmique

- Formule de répartition entre deux itinéraires

$$\frac{x_1}{x_2} = \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^{-\theta}$$

- Résulte d'une utilité logit $U_k = -\frac{1}{\theta}\ln(C_k) + \varepsilon_k$
- Utilisations
  - modèle californien (1950)
  - Ministère français des transports pour les projets routiers en interurbain (loi d'Abraham, 1960-2005) : θ = 10
- Enjeu : les non-linéarités
  - un même écart de coût généralisé n'a pas le même effet selon qu'il concerne des valeurs faibles ou fortes

Modélisation de l'information

- Limiter le modèle aux options identifiées et aux caractères perçus par le demandeur
  - Dans une recherche de PCC, on considère toutes les options, avec perception précise des attributs
  - Mais le demandeur n'est pas hyper- calculateur et informé !
- OBJECTIF = modéliser l'information du demandeur, en fonction de l'offre d'information et de son usage
- Comment faire ?
  - Sélectionner un sous-ensemble de « moyens-candidats » : en ajustant les éléments et paramètres du CG
    - Moyen + rapide / - cher / - pénible / + agréable / + signalisé
  - Bruiter le coût des options : cf modèle probit
  - Un service d'information est utilisé par certains demandeurs => segmentation : un segment équipé perçoit un coût moins bruité

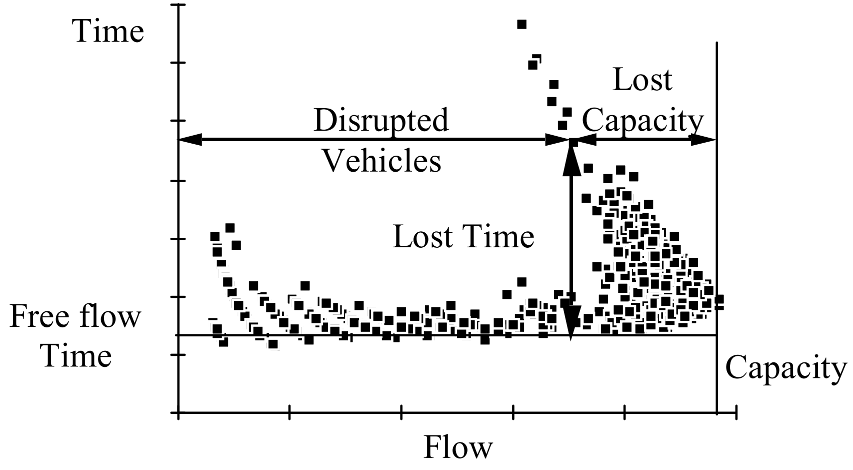
Demande élastique

- Segment z = (O-D-I i, classe u, comportement α) : volume $\mathrm{d}Q_z = \mathrm{d}Q_{ui}\,\mathrm{dA}_{ui}\,(\alpha)$
- Choisir un traitement
  - Désagrégé $\begin{cases} \mathrm{d}Q_z = \mathrm{D}_z(G_z) & \text{élasticité pour le segment} \\ \mathrm{d}Q_{ui} = \Sigma\ \mathrm{d}Q_z & \text{agrégation après élasticité} \end{cases}$
  - Élasticité agrégée (sur la classe u) au coût généralisé moyen
    $$\mathrm{d}Q_{ui} = \mathrm{D}_{ui}(\ [\Sigma\ G_z\, \mathrm{d}Q_z]\ /\ [\Sigma \mathrm{d}Q_z])$$
- Méthode de résolution
  - Recherche de PCC => G_z
  - Élasticité du volume => $\mathrm{d}Q_z$ et $\mathrm{d}Q_{ui}$
  - Chargement des volumes Q_z => volumes des arcs

Les relations offre-demande et l'équilibre

- Les relations offre-demande
  - *Formation du volume d'un moyen, par superposition des demandes individuelles*
  - Comportement d'un moyen / offreur élémentaire : phénomène de congestion, le temps dépend du volume. *C'est un ajustement à court terme*
  - Comportement de la demande : choix de service selon les prix et les qualités, ou report (élasticité du volume au coût)
- L'ensemble de ces mécanismes met en concurrence les moyens alternatifs, en liant leurs coûts respectifs
- Equilibre offre-demande
  - Quand toutes les relations sont satisfaites conjointement pour les mêmes valeurs des variables d'état
  - Alors ces valeurs constituent un état d'équilibre offre-demande

Congestion routière : observations



Modèle statique de la congestion : la loi débit-vitesse

Macroscopique, statique

Principe

– Axe a, classe u

– Temps moyen

$$T_{au} = t_{au0} F_{au}\left(\frac{x_a}{K_a}\right)$$

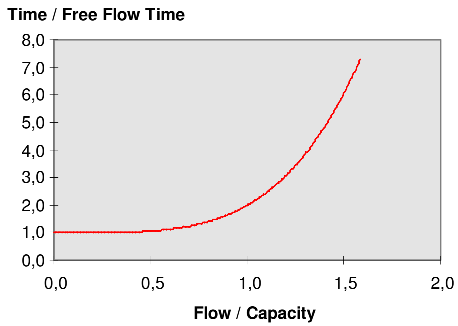
Formules en interurbain

– Véhicules Légers (VL)

$$F_{a,VL}(\xi) = 1 + 0.4\xi^{4\,\mathrm{ou}\,6}$$

– Poids Lourds (PL)

$$F_{a,PL}(\xi) = 1 + 0.1\xi$$



Comportement de la demande

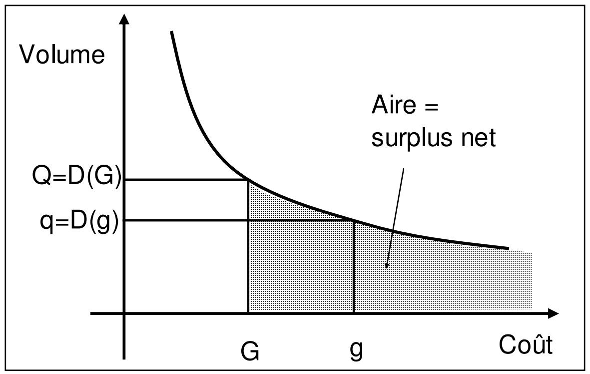
- Le volume
  – Par segment
  – Élasticité du volume au coût généralisé
- La structure
  – Choix par acteur : comportement microéconomique d'optimisation
  – Pour les Dt : itinéraire, horaire, mode, localisation
- Coûts et surplus
  – Surplus brut, d'après la fonction de demande
  – Coût selon l'état du marché
  – Surplus net = surplus brut - coût

Fonction de demande et surplus

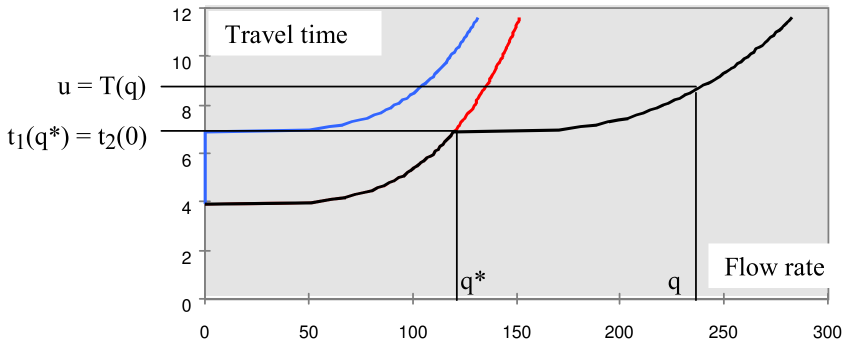
Consommateurs rangés dans l'ordre des *prix de réserve* croissants

Fonction de demande : au coût *G*, volume consommé *D(G)*

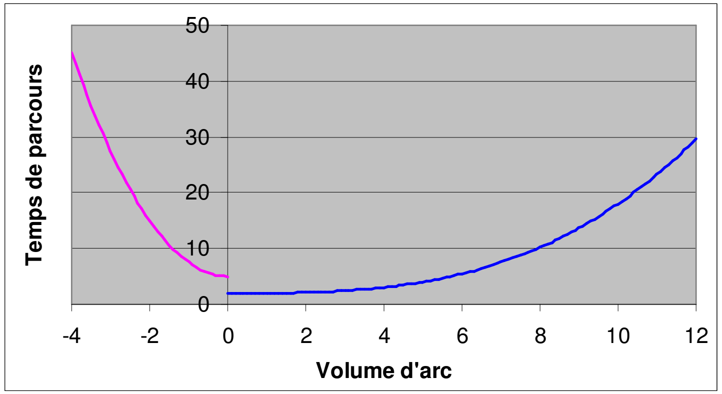
Bien *normal* si *D* est décroissante



Concurrence de 2 moyens alternatifs



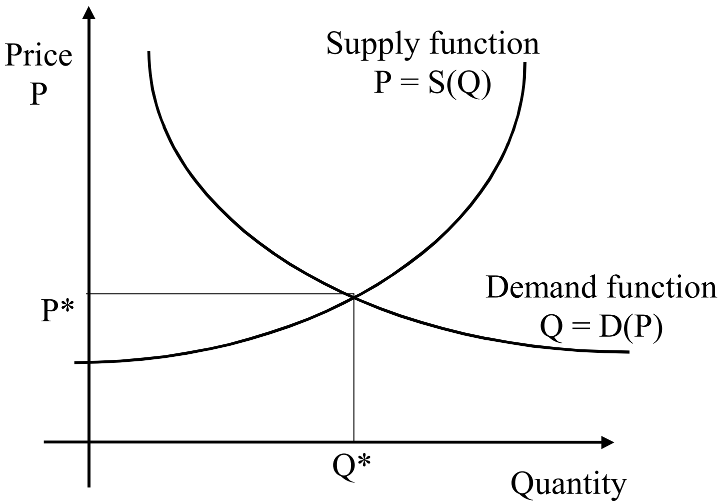
Autre approche graphique



Les principes de Wardrop (1952)

- L'optimum individuel (= des usagers)
  - Chaque client choisit l'option la meilleure pour lui
  - Équilibre quand aucun client ne peut améliorer son choix
- L'optimum collectif (= du système)
  - Un régulateur impose les options aux clients, de manière à maximiser l'utilité socio-économique collective
  - Applications en transport : régulation des feux à une jonction, répartition des flux de fret sur un réseau d'entreprise

Équilibre offre-demande



Progression vers un équilibre

- Représentation statique
  - sur l'arc a, le volume x_a détermine le temps individuel t_a, selon une fonction $t_a(x_a)$
- Conséquence : bouclage
  - les volumes affectés modifient les temps de parcours, donc modifient les PCC, donc modifient les choix d'itinéraire, donc modifient les volumes affectés
- Algorithme des combinaisons convexes
  - À l'itération k, volumes courants x_a sur les arcs a
  - En déduire les temps $t_a = t_a(x_a^{[k]})$
  - À partir des t_a, rechercher les PCC et charger en volume => y_a
  - Actualiser les volumes $x_a^{[k+1]} \leftarrow x_a^{[k]} + w_k(y_a - x_a^{[k]})$
  - Le coefficient de combinaison convexe w_k est compris entre 0 et 1 et décroît vers 0

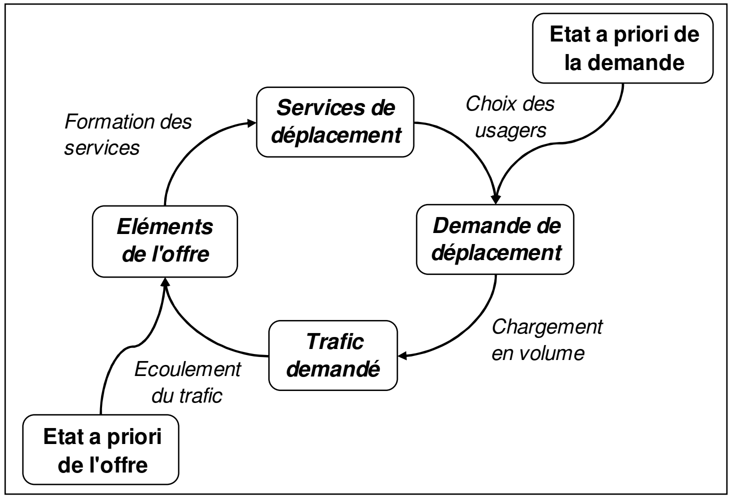
Limites du traitement statique

- Régime permanent ?
  - Durée de validité : 1 h ? Plus ? Moins ?
  - Distinction de périodes : pointe / normale / creuse
- Régime permanent et loi débit-vitesse
  - Stocks constants => régime permanent
  - La loi D-V ne vaut que pour les stocks nuls
- Analyse a posteriori des résultats d'un modèle statique
  - Pb si débit > capacité : trop de flux sur cet axe, pas assez sur les autres, et le temps est faux (pas totalement)

Récapitulation

- Etablir la demande
  - En niveau de volume
  - En structure par segment / service / moyen
- Interprétation du comportement
  - Niveau microscopique : principe individuel, désagrégé
  - Niveau macroscopique : résultats en volumes
- Panoplie de modèles et combinaisons
- Algorithmes : recherche, chargement, superposition

Synthèse systémique



Applications

- Diagnostic offre-demande
  - Moyens structurants = les plus chargés
  - Localisation de la congestion, points durs
  - Qualité de service, performance
  - Coûts et surplus de la demande
- Évaluation économique
- Conception de l'offre
  - Localisation de besoins en capacité
  - Schéma de circulation, projet d'aménagement => prévision de demande
- Management de la demande
  - Management par la capacité
  - Effets de l'information
  - Effets de la tarification : sur l'usage, les recettes et autres impacts