# Modélisation de la demande de transport

## 3

## Affectation sur un réseau de TC, éléments de comportement

**Fabien Leurent**
**ENPC / LVMT**



## Plan

- Rappels sur la représentation de l'offre de TC
- Le confort et le coût généralisé
- Le problème des lignes combinées : choix de mission
  - Sous information opportuniste
  - Sous information prévisionnelle
- La disponibilité des services
- Structures de cheminement
  - Treillis et hyperchemin
  - Chaîne
  - Multichemin
- Modèle par horaires
- Équilibre offre-demande

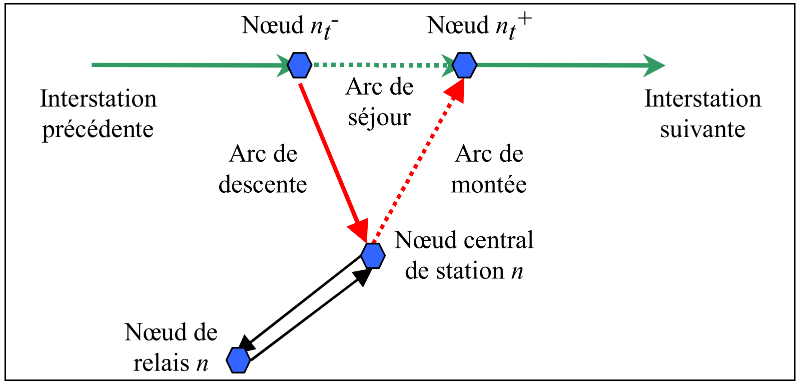


## Le réseau et ses services

- Services en ligne, par mission
  - Ligne = itinéraire via stations
  - Mission = desserte de certaines stations sur une ligne
  - Course = service d'un véhicule pour remplir une mission
  - Station = quais de ligne(s) et moyens d'accès et transfert
  - Mode auxiliaire : accès et transfert (échange TC – extérieur)
- Représentation par des éléments et objets
  - Objet **Ligne** : nœuds de **quai** et arcs d'**interstation**
  - Objet **Mission** : quais desservis, segments interstation avec durée, capacité, desserte
  - Mode auxiliaire : par éléments, nœuds ou arcs



## Représentation d'une station



# La qualité de service

- Qualité d'un service tel que perçu par un demandeur, et rapportée au prix
- **Effectivité** : arriver à destination
- **Fiabilité** : accord réalisation – prévision
- **Sécurité** et **sûreté**
- **Confort :** Mécanique (yc place assise) ; Thermique ; Respiratoire, olfactif ; Auditif ; Visuel ; Psychologique
- **Commodité**
  - Du voyageur – client - de l'usager personnellement
  - Du conducteur / passager - du chargeur
- **Information**
  - Orientation - Commerciale - Conduite - Dynamique
- **Disponibilité** selon le lieu, le temps, accessibilité physique
- **Accessibilité budgétaire** (en argent, en temps)
- **Accessibilité économique** : utilité des activités desservies



# Le confort et son évaluation

- Identifier des états et des transitions
  - État du mobile : ex. voyageur debout
  - Transition : ex. rupture de charge
- Intégration au coût généralisé
  - Par état : le temps passé dans l'état, multiplié par un facteur d'arbitrage avec le prix
  - Par type de transition : le nombre de transitions, multiplié par un coefficient de pénibilité



# Pénibilités relatives du temps

- La pénibilité du temps passé dépend de la position
  - Temps roulé assis = 100%
  - Temps roulé debout non serré = 160%
  - Temps roulé debout serré = 190%
  - Temps marché = 200%
    (+ effet de la vitesse de marche)
  - Temps d'attente debout = 200%
- Perception de l'attente
  - La distribution du temps d'attente objectif subi par un usager, diffère du temps inter-arrivée de véhicules sur la mission
  - Attente moyenne plus faible pour l'usager
  - Mais écart-type plus fort



# Le coût généralisé

- Il comprend le tarif et le coût de pénibilité associé aux temps passés (par état) et aux transitions
- Tarifs : diversité et complexité
  - *Pattern* spatial ? Section unique / Accès continu / Accès multiforme ?
  - Abonnements : réduction du prix (et du coût de transaction)
  - Réductions à caractères social ou commercial (groupes)
- Temps passé : pénibilité, et frais financiers
- Transitions entre moyens
  - Valoriser l'effort de rupture
- TC francilien : composition du CG hors tarif
  - 41% temps d'accès terminal, 10% coût de transfert hors attente, 10% coût d'attente, 39% en véhicule

# Modèle à lignes (missions)

- Hypothèses
  - Ligne $a$, fréquence $f_a$
  - En station : attente moyenne $\beta / f_a$
  - Par interstation : durée $t_{ai}$
- Modèle pour un tronçon station+interstation
  - Temps attente + parcours $g_a = \beta' / f_a + t_a$

    dans cette formule, le coefficient β' incorpore β et la pondération du temps d'attente relativement au temps de roulement, par l'usager
- Choix entre 2 lignes parallèles de bus
  - l'usager préfère combiner en prenant le 1er bus qui passe, si les deux lignes sont attractives et hors…
  - Information prévisionnelle, qui peut inciter à attendre l'autre service



# Commentaires

- En temps objectif, valeur « physique » de β
  - Système 'sans mémoire' : arrivées markoviennes des dessertes, β = 1
  - Desserte cadencée β = ½
- En temps subjectif, valeur « économique »
  - Pénibilité du temps d'attente relativement au temps de roulement, représentée par les APT respectifs
  - Souvent un rapport de 2
- Combinaison courante
  - $\left.\begin{array}{l}\beta = ½ \\ \text{APT relatif} = 2\end{array}\right\} \Rightarrow \beta' = 1$



# Combiner les missions, information opportuniste

- Information opportuniste
  - l'usager ne connaît que les véhicules qui passent, pas les horaires exacts
- Définitions
  - En combinant des missions, les fréquences s'additionnent
  - Le maillon composite a une fréquence $f_m = \sum_{a \in m} f_a$
- Conséquences
  - Attente moyenne $\beta / f_m$
  - Temps moyen $g_m = \beta' / f_m + \sum_{a \in m} t_a . f_a / f_m$
  - Proportion de l'option $a$ : $\pi_a = f_a / f_m$
  - Domaine de combinaison : si $t_1 > t_2 + \beta' / f_2$ alors l'usager prend seulement la ligne 2



# Combiner les missions, information prévisionnelle

- Hypothèses
  - Au nœud de choix, services $m$ de coût aval $G_m^{\text{post}}$ et de temps d'attente résiduel $w_m$
  - Soit α la pénibilité relative de l'attente
  - Postulat : l'usager est informé des $w_m$ et choisit $m$ telle que
    $$\alpha_{\text{w}} . w_m + G_m^{\text{post}} \leq \alpha_{\text{w}} . w_r + G_r^{\text{post}} \quad \forall r \neq m$$
- Alors, en notant $F_m$ la fonction de répartition de $w_m$

$$\pi_m = \Pr\{\alpha_{\text{w}} . w_m + G_m^{\text{post}} \leq \alpha_{\text{w}} . w_r + G_r^{\text{post}} \quad \forall r \neq m\}$$

$$= \int \Pr\{\alpha_{\text{w}} . x + G_m^{\text{post}} \leq \alpha_{\text{w}} . w_r + G_r^{\text{post}} \quad \forall r \neq m \mid w_m = x\} \, \mathrm{d}F_m(x)$$

- En cas d'indépendance des $w_m$:

$$\pi_m = \int \prod_{r \neq m} [1 - F_r(x + \frac{G_m^{\text{post}} - G_r^{\text{post}}}{\alpha_{\text{w}}})] \, \mathrm{d}F_m(x)$$

- Si $w_r \approx \mathrm{U}(0, H_r)$ alors $F_r(x) = \min\{1, \max(0, x / H_r)\}$

# La disponibilité

- Quand l'usager arrive sur le quai, la mission *m* est disponible avec une probabilité

$$\rho_m = \sigma_m \,.\, f_m$$

si $\sigma_m$ durée de séjour en station et $f_m$ fréquence de mission

- Classons les missions *m* en ordre des $G_m^{\text{post}}$ croissants
  - L'événement « *m* est disponible et optimal parmi les dispo » a une probabilité $p_m$ telle que

$$p_1 = \rho_1 \qquad q_1 = p_1$$

$$p_{m+1} = (1-q_m).\rho_{m+1} \qquad q_{m+1} = q_m + p_{m+1}$$

  - Soit $\overline{m}$ la dernière option attractive : une option attractive a pour **proportion d'usage** $\pi_m = p_m + (1-q_{\overline{m}})f^m / f^{\text{tot}}$
- Coût généralisé moyen

$$G(M_n) = (1-q_{\overline{m}})\frac{\alpha_{\text{w}}}{f^{\text{tot}}} + \sum_{m\in M_n} \pi_m . \widetilde{G}_m^{\text{post}}$$

- Conséquence = plurimodalité



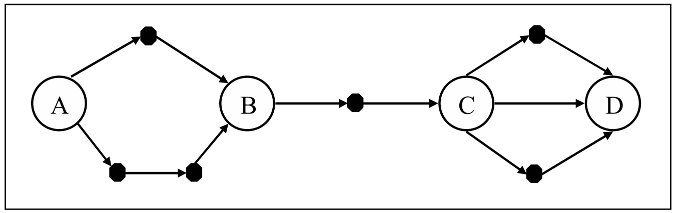
# Structures de cheminement

- Définitions
  - Sur un réseau, une **structure de cheminement** est un ensemble d'arcs *M* dont chacun peut être traversé pour aller d'une origine à une destination
- Structures simples
  - Le chemin : structure « linéique », avec éventuellement des contraintes de non-multiplicité des nœuds ou des arcs
  - L'arbre : union de chemins, avec connexité mais sans circuit
- Structures complexes
  - Chaînes
  - Treillis => Hyperchemins
  - Faisceaux => Multichemins



# Maillons et chaînes

- Maillon = entre deux stations, un sous-ensemble des missions qui vont de l'une (entrée) à l'autre (sortie)
- Chaîne $R$ = séquence de maillons $m_i$
  - Topologie : le nœud final de $m_i$ est identique au nœud initial de $m_{i+1}$
- Coût d'une chaîne $C(R) = \sum_{m\in R} C(m)$






# Problème de chaîne optimale

- Problème de recherche
  - Entre un nœud d'origine et un nœud de destination
  - Trouver une chaîne de coût minimal
- Discussion
  - Trouver les nœuds de correspondance : combinatoire
  - **problème local de multimodalité** : entre deux nœuds de correspondance, composer un maillon optimal

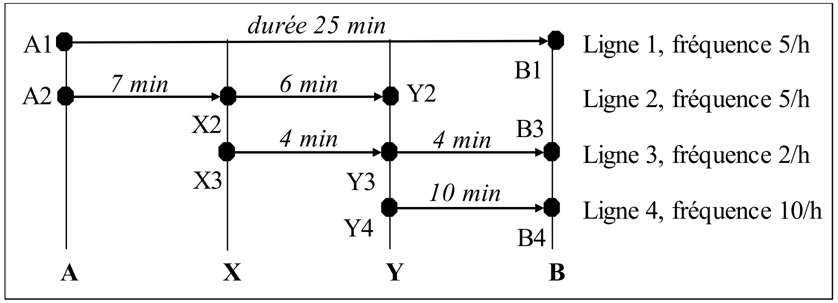
# Algorithme de chaîne optimale

- Inspiré de l'algorithme de Dijkstra pour les PCC
- Commencer au nœud d'origine *o*
- Au nœud courant *n*
  - Considéré comme une entrée/sortie
  - Vers chaque nœud possible de sortie, *r*
    On optimise le maillon $m^* = (n, r)$ : multimodalité locale
    Peut-on améliorer l'accès à *r* avec la chaîne de *o* à *n* prolongée par $m^*$?
- Intérêt = génération dynamique des maillons



# Exemple

- Chercher la chaîne optimale de A à B, en temps pur pour une information opportuniste et β' = 1/2






# Traitement de l'exemple

- En A, trois nœuds cibles B, X, Y
  - B : ligne 1 coût d'accès 31
  - X : ligne 2 coût 13
  - Y : ligne 2 coût 19
- En X deux nœuds cibles Y et B
  - Y : maillon {2, 3} coût 22.7 *non* $(\frac{30}{7}+4\frac{2}{7}+6\frac{5}{7}=9.7)$
  - B : ligne 3 coût 36 *non*
- En Y un nœud cible B
  - B : maillon {3, 4} **coût 30.5** $(\frac{30}{12}+4\frac{2}{12}+10\frac{10}{12}=11.5)$



# Critique des chaînes

- Enchaîner des maillons parallèles
  - Dans l'exemple, on voudrait combiner les routes (A,B) et (A,X,Y,B)
- Coût de correspondance
  - De X à B la chaîne {2, 3} U {3, 4} coûte 21.2
    - De X à Y : $\frac{30}{7}+4\frac{2}{7}+6\frac{5}{7}=9.7$
    - De Y à B : $\frac{30}{12}+4\frac{2}{12}+10\frac{10}{12}=11.5$
  - En fait : d'après les correspondances, seulement 19.1

# Treillis

- Définition d'un treillis
  - Sous-graphe connexe et sans circuit positif, qui dirige vers un nœud de « terminus »
  - Pour un nœud de « terminus » *s*, sous-ensemble *M* d'arcs tel que chaque arc participe à un chemin positif dans *M* jusqu'en *s*, et sans circuit positif
- Le treillis modélise un rapprochement vers une destination : son terminus
  - Cf signalisation de destination, avec indication de distance
- Propriété : l'ordre topologique
  - On sait énumérer les arcs du treillis depuis, ou inversement vers, le terminus



# Parcours topologique d'un treillis

- Ordre topologique
  - Direct : vers le terminus, tel que toute portion *amont* est traitée avant ses portions *aval*
  - Inverse : à partir du terminus, de l'aval vers l'amont
- Un treillis a des ordres topologiques naturels
  - Distance maximale en nombre d'arcs via le treillis, entre un nœud courant et le terminus
  - Épuisement progressif des prédécesseurs : on traite d'abord les nœuds sans antécédents, on déduit leurs arcs sortants du nb d'antécédents de leurs nœuds successeurs, et on poursuit avec les nœuds dont les antécédents ont été épuisés etc
- Applications : recherche d'hyperchemin, et chargement d'un hyperchemin



# Les stratégies en TC

- En tout nœud, adaptation dynamique du chemin
- Information statique
  - temps de parcours + fréquence
- Information dynamique opportuniste
  - L'usager perçoit chaque véhicule qui passe
- Comportement
  - Coût moyen en TC $C_{TC}$
  - Attendre ? si $C_{TC}$ < coût de la marche, alors prendre le 1er véhicule 'rentable'



# Recherche d'une stratégie optimale

- Variables
  - Arc $a$ : *inputs* = coût $c_a$ et fréquence $f_a$ ; *outputs* = coût $v_a$ minimal jusqu'à la destination et indicateur $\delta_a$ égal à 1 si l'arc est retenu dans la stratégie ou 0 sinon
  - Nœud *n* : *outputs* = coût $u_n$ moyen jusqu'à la destination, fréquence $f_n$ combinée des arcs attractifs sortant du noeud
- Principes
  - On fait la recherche depuis la destination $s$
  - En traitant les arcs $a$ par ordre croissant de coût minimal $v_a$ de $n$ via $a$ jusqu'à $s$
  - Chaque arc donne une possibilité d'améliorer la stratégie depuis son nœud initial

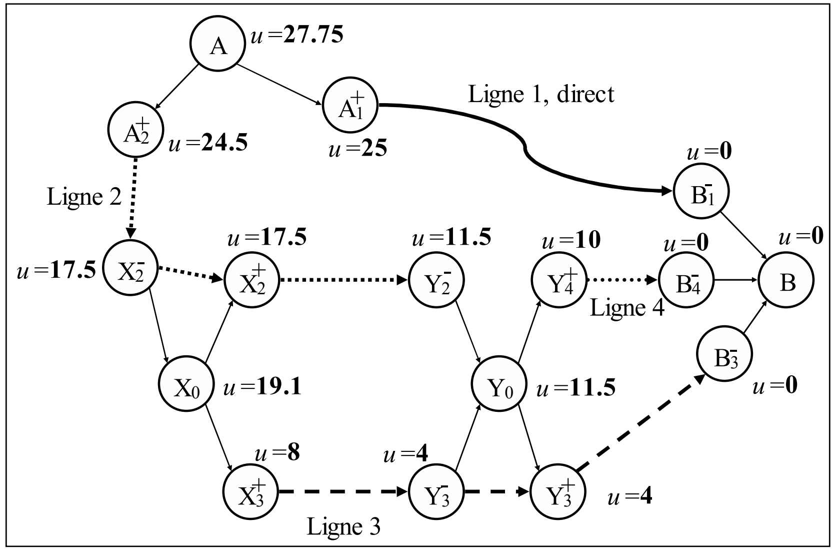
# Algorithme de stratégie optimale (Spiess, 1984)

- Début : poser $v_a \leftarrow \infty$ et $\delta_a \leftarrow 0 \ \forall a$ ; $u_n \leftarrow \infty$ et $f_n \leftarrow 0 \ \forall n$
  Poser $L \leftarrow \{\underline{a}\}$ et $v_{\underline{a}} \leftarrow 0$ pour un arc fictif $\underline{a}$ de nœud initial $s$
- Progression
  - Sortir de $L$ l'arc $a$ de coût $v_a$ minimal : soit $n$ son nœud initial
  - Faire $L \leftarrow L \setminus \{a\}$ et $M \leftarrow M \cup \{a\}$
  - Si $v_a < u_n$ alors (i) poser $\begin{cases} u_n \leftarrow \dfrac{f_n.u_n + f_a.v_a}{f_n + f_a} \\ \delta_a \leftarrow 1 \\ f_n \leftarrow f_n + f_a \end{cases}$

    et (ii) $\forall b \approx (m,n)$ faire $v_b \leftarrow u_n + c_b$ et $L \leftarrow L \cup \{b\}$
- Test de fin : si $L$ n'est pas vide, aller à Progression
- A l'issue : poser $\eta_a \leftarrow \delta_a . f_a / f_m$ si $a \approx (m,n)$



# Exemple






# Traitement…

| Arc $a$ | $U_a$ | $u(n_a^+)$ | Prolongements |
|---|---|---|---|
| $\alpha$ | 0 | $B \to 0$ | $b \approx (B_1^-, B)$ avec $U_b = 0$ : mis dans $L$<br>$b \approx (B_3^-, B)$ avec $U_b = 0$ : mis dans $L$<br>$b \approx (B_4^-, B)$ avec $U_b = 0$ : mis dans $L$ |
| $(B_1^-, B)$ | 0 | $B_1^- \to 0$ | $b \approx (A_1^+, B_1^-)$ avec $U_b = 25$ : mis dans $L$ |
| $(B_3^-, B)$ | 0 | $B_3^- \to 0$ | $b \approx (Y_3^+, B_3^-)$ avec $U_b = 4$ : mis dans $L$ |
| $(B_4^-, B)$ | 0 | $B_4^- \to 0$ | $b \approx (Y_4^+, B_4^-)$ avec $U_b = 10$ : mis dans $L$ |
| $(Y_3^+, B_3^-)$ | 4 | $Y_3^+ \to 4$ | $b \approx (Y_3^-, Y_3^+)$ avec $U_b = 4$ : mis dans $L$<br>$b \approx (Y_0, Y_3^+)$ avec $U_b = 4$ : mis dans $L$ |
| $(Y_3^-, Y_3^+)$ | 4 | $Y_3^- \to 4$ | $b \approx (X_3^+, Y_3^-)$ avec $U_b = 8$ : mis dans $L$ |
| $(Y_0, Y_3^+)$ | 4 | $Y_0 \to 19$ | $b \approx (Y_3^-, Y_0)$ avec $U_b = 19$ : pas dans $L$<br>$b \approx (Y_2^-, Y_0)$ avec $U_b = 19$ : mis dans $L$ |
| $(X_3^+, Y_3^-)$ | 8 | $X_3^+ \to 8$ | $b \approx (X_0, X_3^+)$ avec $U_b = 8$ : mis dans $L$ |



# …suite et fin

| | | | |
|---|---|---|---|
| $(X_0, X_3^+)$ | 8 | $X_0 \to 23$ | $b \approx (X_2^-, X_0)$ avec $U_b = 23$ : mis dans $L$ |
| $(Y_4^+, B_4^-)$ | 10 | $Y_4^+ \to 10$ | $b \approx (Y_0, Y_4^+)$ avec $U_b = 10$ : mis dans $L$ |
| $(Y_0, Y_4^+)$ | 10 | $Y_0 \to 11{,}5$ | $b \approx (Y_3^-, Y_0)$ avec $U_b = 11{,}5$ : pas dans $L$<br>$b \approx (Y_2^-, Y_0)$ avec $U_b = 11{,}5$ : avance dans $L$ |
| $(Y_2^-, Y_0)$ | 11,5 | $Y_2^- \to 11{,}5$ | $b \approx (X_2^+, Y_2^-)$ avec $U_b = 17{,}5$ : mis dans $L$ |
| $(X_2^+, Y_2^-)$ | 17,5 | $X_2^+ \to 17{,}5$ | $b \approx (X_2^-, X_2^+)$ avec $U_b = 17{,}5$ : mis dans $L$<br>$b \approx (X_0, X_2^+)$ avec $U_b = 17{,}5$ : mis dans $L$ |
| $(X_2^-, X_2^+)$ | 17,5 | $X_2^- \to 17{,}5$ | $b \approx (A_2^+, X_2^-)$ avec $U_b = 24{,}5$ : mis dans $L$ |
| $(X_0, X_2^+)$ | 17,5 | $X_0 \to 19{,}1$ | $b \approx (X_2^-, X_0)$ avec $U_b = 19{,}1$ : pas dans $L$ |
| $(A_2^+, X_2^-)$ | 24,5 | $A_2^+ \to 24{,}5$ | $b \approx (A, A_2^+)$ avec $U_b = 24{,}5$ : mis dans $L$ |
| $(A, A_2^+)$ | 24,5 | $A \to 30{,}5$ | Pas de prolongement en amont de A |
| $(A_1^+, B_1^-)$ | 25 | $A_1^+ \to 25$ | $b \approx (A, A_1^+)$ avec $U_b = 25$ : mis dans $L$ |
| $(A, A_1^+)$ | 25 | $A \to 27{,}75$ | Pas de prolongement en amont de A |

# Hyperchemin

- Définition
  - Un hyperchemin *H* = (*M*, η) est l'association d'un treillis *M* et d'une fonction de routage η : $A \to [0,1]$ telle que
    $\eta_a = 0$ si $a \in A \setminus M$
    et en tout nœud *n* incident à *M*, $\sum_{a \in A_n^+} \eta_a = 1$
- L'hyperchemin modélise un partage local du trafic en chaque nœud du treillis (sauf le terminus)
- Propriétés des masses
  - Masse d'un chemin *r* : $\eta_r = \prod_{a \in r} \eta_a$
  - Normalisation des masses : en tout nœud *n* incident à *M*, soit $M_{ns}$ l'ensemble des chemins de *n* à *s* via *M* : alors

$$\sum_{r \in M_{ns}} \eta_r = 1$$

- Algorithmes récursifs : parcours, recherche, chargement



# Charger un hyperchemin

- Le problème
  - Pour la destination *s*, charger depuis les origines *o* les flux $q_{os}$ sur l'hyperchemin *H* = (*M*, η)
  - Sur chaque chemin *r* sur *M* de *o* à *s*, affecter $x_r = \eta_r \, q_{os}$
- Exemple
  - Sur le réseau précédent, pour la destination B, charger un flux de 20 en A et un flux de 10 en X
- Principe
  - Parcourir le treillis en ordre topologique direct, en totalisant progressivement les volumes des chemins
  - Ordre topologique : n'importe lequel convient – tant qu'il est topologique. Si on a trouvé un hyperchemin optimal, une possibilité est d'énumérer les nœuds par ordre décroissant du coût $u_n$

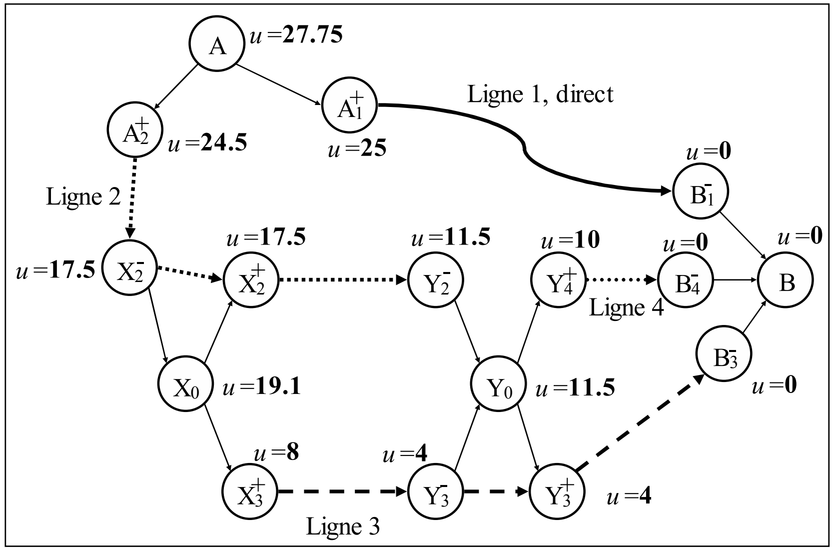


# Algorithme de chargement

- Variables
  - Nœud $n$ : *inputs* = volume $q_{os}$ si $n = o$ est une origine, éventuellement les coûts $u_n$ pour l'ordre de parcours ;
    *outputs* = volume sortant $z_n$
  - Arc $a$ : *inputs* = masse $\eta_a$ ;
    *outputs* = volume $x_a$ qui superpose les flux O-D pour *s*
- Organigramme
  - Début : poser $x_a \leftarrow 0 \; \forall a$ et $z_n \leftarrow 0 \; \forall n$ ; pour toute origine *o* faire $z_o \leftarrow z_o + q_{os}$ . Poser $L \leftarrow \{\text{noeuds incidents à } M\}$
  - Progression : tant que *L* n'est pas vide, retirer de *L* le nœud *n* de coût $u_n$ minimal, et faire $\begin{cases} x_a \leftarrow \eta_a . z_n & \forall a \approx (n,m) \\ z_m \leftarrow z_m + x_a \end{cases}$



# Exercice de chargement



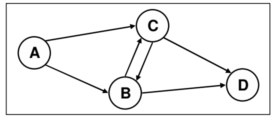
# Critique des modèles

- Hypothèses trop fortes ?
  - Information opportuniste : usager vigilant en permanence ?
  - Individu hyper-informé et toujours en apprentissage ?
  - Individu hyper-calculateur ?
- Tactiques d'atténuation
  1. Limiter le nb de noeuds de choix par Dt O-D, en limitant le nombre de "mix" locaux, ou en réduisant à une chaîne
  2. Limiter le nb de situations de choix local par relation O-D, en limitant le nb de transferts, ou en construisant une chaîne à nb borné de transferts
  3. Limiter le nb d'options candidates pour un choix local
  4. Réduire la précision de la sélection, en tolérant des options dont le coût est un peu plus élevé
  5. Ajouter une perturbation aléatoire pour simuler la subjectivité et l'incertitude dans les perceptions des usagers
  6. Simplifier les formules de répartition locale du flux



# Les multichemins

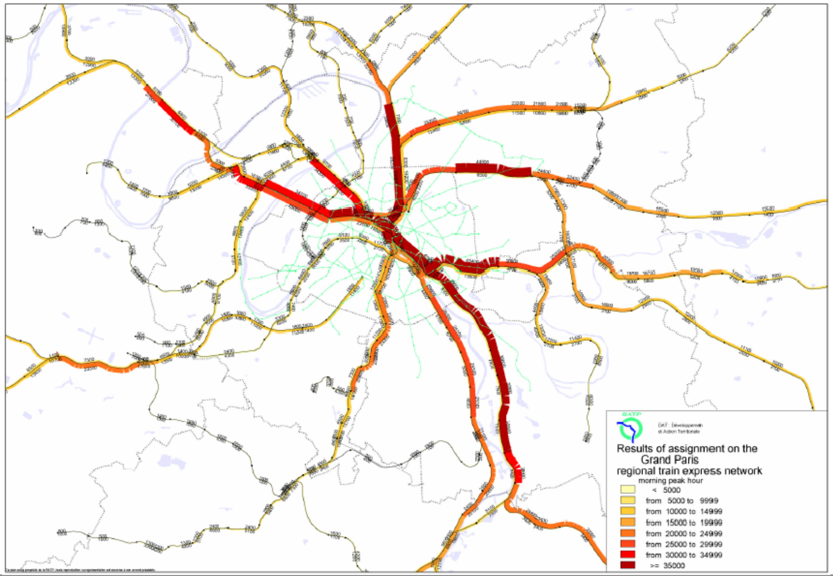
- Définition
  - Un multichemin est un ensemble de chemins qui partagent certaines propriétés et se distinguent selon d'autres. Exemple, un multichemin de PCC entre O et D pour un ensemble d'APT




- Boucles possibles
- Emploi en TC
  - Selon incertitude de perception des coûts : modèle probit
  - Selon vitesse de marche des voyageurs
- Maher et Hughes (1997) : traiter un multichemin comme un hyperchemin
- Leurent (2006) **Faisceau d'atomes** pour un traitement générique aussi poussé que possible



# Réseau de TC francilien, modèle RATP Majic






# Simulations des cheminements

- Paramètres de dimension
  - 96 missions de train, 79 de RER, 17 lignes de métro, 3 de tramway, et 1 097 missions de bus
  - Dans le modèle Majic : 1 314 missions, 7 831 stations ou centroïdes, 27 815 noeuds de service, 250 432 arcs dont 27 853 de service et 84 089 connecteurs
- Scénarios de contrôle
  - Tolérance sur l'attractivité : niveaux 0, 1, 2 et 3 minutes
  - Nb maximum de transferts : niveaux illimité, 3, 2, 1 et 0
- Résultats

| Tolérance | # Route / OD pair | Same, services |
|---|---|---|
| 0 | 5.4 | 19.5 |
| 1 minute | 6.9 | 27.5 |
| 2 minutes | 8.8 | 40.5 |
| 3 minutes | 11.2 | 60.0 |

| Bound on # of transfers | # Route / OD pair | Same, services | Mean Gen Cost | Taux de connexion (%) |
|---|---|---|---|---|
| Unbounded | 5.4 | 19.5 | 8.71 | 98.8 |
| 3 | 5.3 | 17.2 | 8.71 | 98.5 |
| 2 | 4.4 | 11.7 | 8.69 | 92.7 |
| 1 | 2.6 | 4.9 | 7.93 | 50.0 |
| 0 | 0.7 | 0.9 | 2.69 | 7.8 |

# Modèles à horaires

- Modèle de comportement
  - Chaque moyen *m* a un coût généralisé en fonction de l'horaire *h* où le client arrive et du prochain départ à $H_m(h)$

$$G_m(h) = G_m^{\text{post}} + \alpha.[H_m(h) - h]$$

  - Si le client est informé et choisit à son horaire le moyen de moindre coût généralisé, alors

$$\pi_m = \Pr\{h \in \Im \; : \; G_m(h) \leq G_r(h) \;\; \forall r \neq m\}$$

- Cf modèle statique d'information prévisionnelle
- Algorithme de recherche : PCC dynamique
- Discussion
  - Décrire chaque course : mission + horaires
  - Volume d'information important pour l'usager : réalisme ? Plus pour un transporteur que pour un voyageur !
  - Variabilité des temps => l'usager prend une marge



# Equilibre offre-demande

- Relations offre-demande
  - Superposition locale des demandes
  - Formation du prix et de la qualité de service
  - Choix du moyen par les demandeurs
- Réseau de TC ou plurimodaux
  - Par segment de demande et relation O-D, a priori le volume se répartit entre plusieurs itinéraires sur une structure
  - Demande élastique au coût généralisé moyen : celui-ci admet une formule récursive et une formule par chemins i.e. décomposée par structure de cheminement
  - Congestion sur le réseau : plusieurs effets, selon le lieu
  - Approche d'un équilibre : mêmes algorithmes que pour un réseau de transport privé



# Congestion en TC

- Niveau du véhicule
  - Flux de véhicules et capacité d'infrastructure
  - Emprise d'un véhicule à quai (longueur, durée de séjour) ou en section courante (selon vitesse)
- Niveau du voyageur
  - Attente d'un véhicule : congestion du quai
  - Possibilité d'entrer dans le véhicule ?
  - Friction en montée / descente dans le véhicule ?
  - Mouvements dans le véhicule ?
  - Encombrement dans véhicule : nb de places assises ? Places debout : encombrement et gêne ?
- Interaction des niveaux : la montée/descente influence la durée du séjour en station



# Conclusion

- Récapitulation
  - Modèles à lignes et fréquences : chaînes, stratégies (hyperchemins)
  - Modèles à horaires : PCC dynamiques
  - Description assez réaliste des services
  - Formulations existent ; nécessitent des définitions rigoureuses
  - Algorithmes efficaces pour les modèles à fréquence
- Développements (sujets au LVMT)
  - Segmentation selon le comportement de circulation
  - Intégrer la disponibilité (proportion de présence) en plus de la fréquence de passage
  - Représenter la congestion en véhicule : dans les simulations microscopiques, ou dans un modèle macroscopique