

MINT: PROPOSITION D'UN NOUVEL ALGORITHME D'AFFECTATION TRANSPORT EN COMMUN POUR LES RESEAUX DECRITS PAR LES FREQUENCES

Patrick Palmier
CETE Nord-Picardie

1 INTRODUCTION

Le CETE Nord-Picardie qui est un service d'ingénierie publique, membre du réseau scientifique et technique du Ministère français du développement durable, réalise des prestations pour les services de l'État et des collectivités locales.

Il réalise depuis de nombreuses années des études de modélisation et de planification des déplacements et spécialisé dans les recueils de données de mobilité et leur analyse.

Concernant la modélisation en transport collectif, c'est le plus souvent la méthode des stratégies optimales qui est utilisée. C'est pour essayer de contourner certaines limites de cette méthode que ce travail a été initié.

2 HISTORIQUE

Le concept des stratégies optimales a été introduit par Spiess – Florian en 1989.

Le principe repose sur l'hypothèse que l'utilisateur des transports collectifs, dispose d'un choix de stratégies attractives pour se rendre à sa destination. Il empruntera alors le premier véhicule qui se présentera à lui si celui-ci appartient à une ligne attractive.

Cet algorithme s'applique à des réseaux de transport en commun décrits par fréquences. Si cet algorithme a été mis en œuvre à l'origine dans le logiciel Emme/2 de INRO, il est depuis disponible dans différents autres logiciels de modélisation du marché.

La mise en œuvre de l'algorithme s'effectue en deux parties:

- On part de la destination et on détermine les lignes attractives pour se rendre à cette destination.
- On répartit ensuite la demande en partant de l'origine puis successivement jusqu'à la destination au prorata des fréquences des lignes attractives partant de chaque nœud.

3 LIMITES

Plusieurs limites dans la mise en œuvre standard de l'algorithme sont identifiées.

- L1 : Si une modification de l'offre en temps de parcours n'impacte pas, pour une origine destination, l'ensemble des lignes attractives, il n'y aura aucun impact sur la répartition des flux entre les différentes lignes. Cela peut être particulièrement gênant si l'on souhaite évaluer l'impact d'une amélioration de la vitesse commerciale d'une ligne, telle que la mise en place d'un bus à haut niveau de service
- L2 : Les tronçons de marche sont considérés comme des lignes de transport en commun de fréquence infinie. Dès lors, si en un nœud, un ensemble de lignes ainsi qu'un tronçon de marche sont attractifs, le trafic sera intégralement affecté sur le tronçon piéton. La répartition du trafic dépend ainsi de la manière dont on codifie le réseau, en particulier les points de correspondance. Par exemple, les descriptions suivantes correspondant à un même réseau réel conduisent à des résultats différents : Un nœud unique où toutes les lignes convergent, et deux nœuds reliés par un tronçon piéton fictif sur lesquels se répartissent les différentes lignes. Dans le deuxième cas, la demande sera intégralement affectée sur un seul des deux nœuds.
- De même, la fréquence du tronçon aval d'une même ligne est considérée comme infinie, puisque l'usager est déjà dans le véhicule. Donc, si une autre ligne attractive existe au nœud suivant, l'usager restera dans le véhicule, même si le changement de lignes lui fait gagner du temps.

Pour ces diverses raisons INRO a récemment introduit dans la dernière version de Emme une procédure d'affectation en transport collectifs avec variantes qui permet de s'affranchir de certaines de ces limites.

Dans la suite du document, nous proposons un algorithme dénommé « Mint » basé sur une nouvelle approche, qui permet de s'affranchir des principales limites identifiées.

4 OBJECTIF DE L'ALGORITHME

L'objectif de ce nouvel algorithme consiste, tout en gardant les principes de base de l'algorithme de stratégies optimales, à proposer une adaptation permettant de s'affranchir des limites énoncées ci-dessus, c'est-à-dire:

- de tenir compte des temps de parcours dans la répartition du trafic entre les lignes attractives.
- de proposer une répartition de la demande selon toutes les lignes attractives, y compris entre les lignes TC et les tronçons marche. (problèmes des fréquences infinies des tronçons marche)
- de pouvoir proposer une répartition entre la ligne dans laquelle voyage l'usager et une autre ligne attractive qui démarre à un nœud ultérieur (problème des fréquences infinies des segments successifs d'une même ligne)

- de pouvoir gérer également des itinéraires 100% marche sans qu'ils absorbent toute la demande
- de garantir une continuité dans la fonction de répartition des volumes qui dépend des fréquences et des temps de parcours.
- d'améliorer la convergence d'un algorithme itératif ayant pour objectif de prendre en compte les contraintes de capacité

4.1 Principes

- Si une ligne est attractive, le processus d'affectation doit pouvoir y associer une fraction de la demande correspondante.
- Si le temps de parcours d'une ligne par rapport aux autres est améliorée, même si l'ensemble des lignes attractives ne change pas, l'affectation doit être capable de lui associer une fraction supplémentaire de la demande.
- Le principe est de rester sur la logique des stratégies optimales et de ne pas introduire de paramètre ou variable supplémentaire, ou de méthode de choix d'itinéraires complémentaires.

5 DESCRIPTION DE L'ALGORITHME

Notations :

t : temps de parcours

hdw : intervalle inter-véhiculaire

v : proportion de la demande affectée sur la ligne

5.1 Exemple 1

- Stratégie optimales

Les deux lignes sont attractives. La répartition de la demande s'effectue au prorata des fréquences (5 véhicules sur 7 pour la ligne 1, 2 véhicules sur 7 pour la ligne 2)

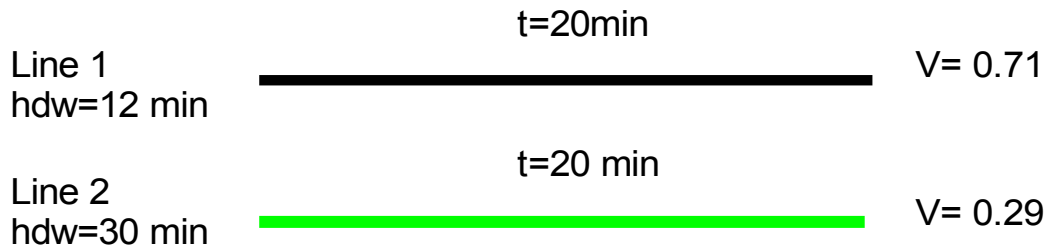


Illustration 1: Stratégies optimales, temps de parcours égaux

- Algorithme Mint

Une des principales adaptations de l'algorithme des stratégies optimales concerne la répartition de la demande qui ne s'effectue plus au prorata des fréquences. Il faut combiner les deux lignes différemment

- Étape 1 : Calcul des fréquences combinées

Le temps total sur la ligne 1 varie entre (20 et 32 minutes)

Le temps total sur la ligne 2 varie entre (20 et 50 minutes)

où le temps total = temps de trajet + temps d'attente

On détermine alors le « temps maximal minimum » (MINT= MINimum maximum Time) : 32 minutes (minimum de 32 et 50)

Principe : Si le temps de parcours en utilisant la ligne 2 est supérieur à 32 minutes, l'usager préférera utiliser la ligne 1 qui lui garantit un temps de 32 minutes au maximum.

Ligne 1 : La somme des temps d'attente attractifs est de 60 minutes (32-20)=12x5 passages de bus

Ligne 2 : La somme des temps d'attente attractifs est de 24 minutes (32-20)=12*2 minutes pour 2 passages de bus, parce que si le temps de parcours total estimé par la ligne 2 est supérieur à 32 minutes, les usagers préféreront utiliser la ligne 1 qui leur garantit un temps de 32 minutes maximum.

Les attentes des lignes 1 et 2 prises de manière indépendante conduisent à une amplitude de 84 minutes pour 7 passages. Cela conduit à un excédent de temps d'attente de 24 minutes à redistribuer. L'hypothèse principale de Mint consiste à répartir l'excédent de temps d'attente uniformément sur chaque intervalle inter-véhiculaire, soit 24/7=3.43 minutes par véhicule.

Le temps de parcours total en combinant les deux lignes, varie entre 20 minutes et 28.57 minutes (28.57=32 – 3.43)

- Etape 2 : Répartition de la demande

Mint propose de répartir la demande comme suit :

$$p_i = \frac{M - t_i}{hdw_i}$$

M : Minimum maximum time (MINT)

t_i : temps de parcours minimum time de la ligne i

hdw_i : Intervalle inter-véhiculaire de la ligne i

p_i : proportion de la demande sur la ligne i

Comme les temps de parcours sont identiques sur les deux lignes, la répartition de la demande est la même qu'avec la méthode de stratégies optimales

- Etape 3 : Calcul du temps de parcours total espéré

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i \in S} p_i (m_i + M)$$

T : Temps de parcours total

p_i : proportion de la demande sur la ligne i

S : ensemble des lignes attractives

Le temps moyen est de $0.5 * ((28.57-20)/12) * (28.57+20) + ((28.57-20)/30) * (28.57+20)$ **24.285 minutes**

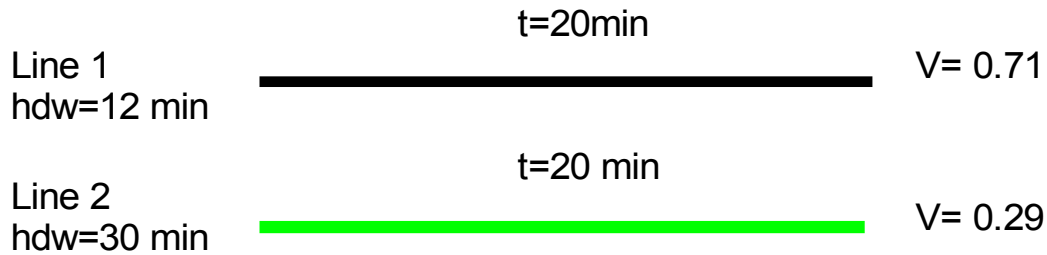


Illustration 2 : Algorithme Mint, temps de parcours indentiques

Si les temps de parcours des lignes 1 et 2 sont identiques, La méthode des stratégies optimales et Mint donnent des résultats identiques aussi bien en temps de parcours que sur la répartition des flux.

5.2 Exemple 2

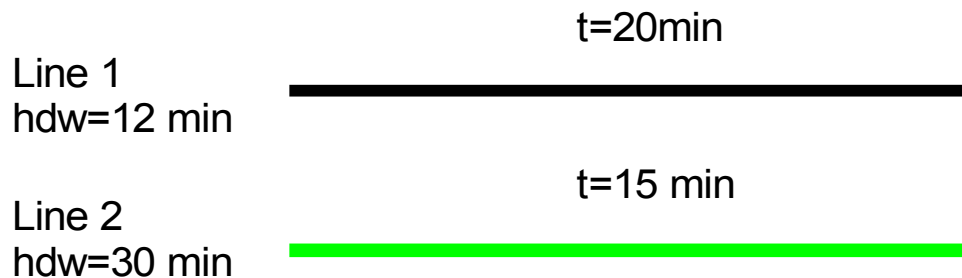


Illustration 3: réseau exemple 2

Si l'on considère que les usagers arrivent de manière uniforme et qu'ils connaissent parfaitement le réseau, leur temps de parcours espéré varie entre:

- Ligne 1: 20min et 32minutes
- Ligne 2: 15min et 45 minutes

Le temps maximal minimum entre les deux lignes est de 32minutes (20+12)

- Étape 1 :Calcul des fréquences combinées

Ligne1 : amplitude $(32-20)*5=60$ minutes pour 5 passages

Ligne 2 : amplitude $(32-15)*2=34$ minutes pour 2 passages

Donc en combinant les deux lignes, la somme des temps d'attente attractifs doit être de 60 minutes pour une heure, d'où un gain de temps d'attente par passage de $34/7=4.86$ minutes par bus.

Le temps de parcours espéré varie donc en combinant les deux lignes entre 20 minutes et $(32-4.86)=27.14$ minutes

- Étape 2 : Répartition de la demande

ligne 1 = $(27.14 - 20) / 12 = 0.595$

ligne 2 = $(27.14 - 15) / 30 = 0.405$

- Étape 3 : Calcul du temps de parcours total espéré

Le temps moyen est de $0.5 * ((27.14 - 20) / 12) * (27.14 + 20) + ((27.14 - 15) / 30) * (27.14 + 15)$ soit **22.56 minutes**

Le temps de parcours espéré est inférieur à celui trouvé par l'algorithme de stratégies optimales. La répartition des flux va être également différente.

Résultats :

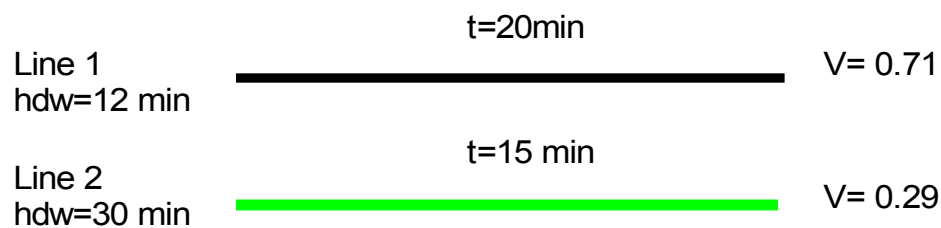


Figure 4: Stratégies optimales avec temps de parcours différents

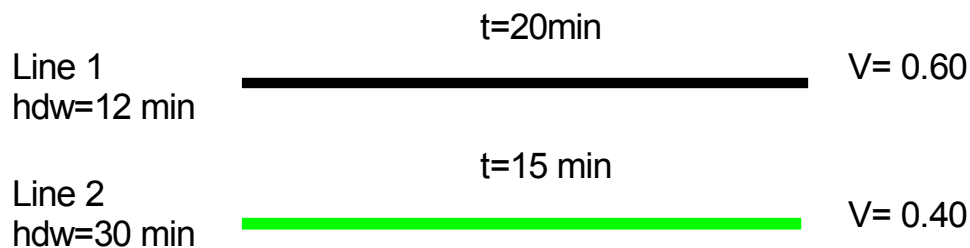
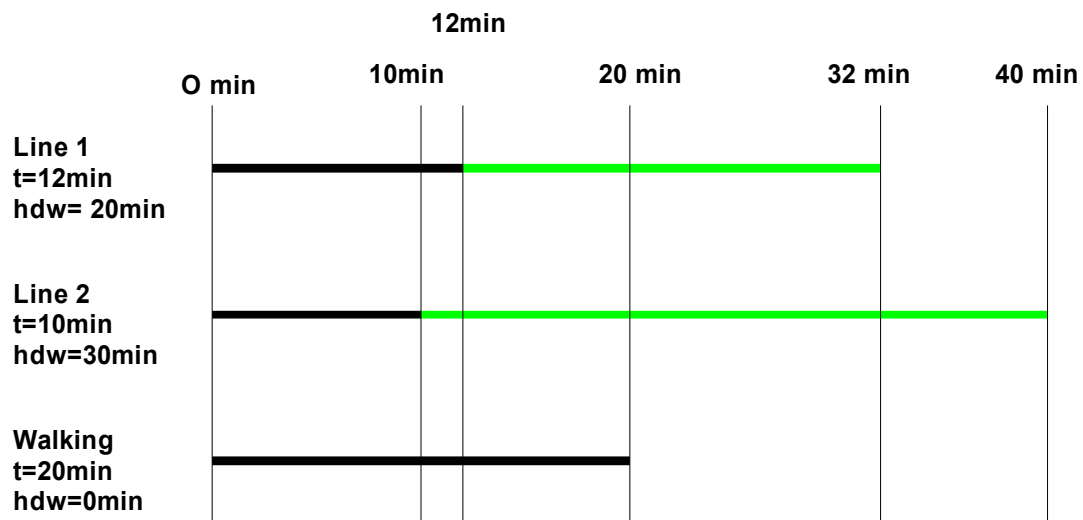


Figure 5: Algorithme proposé avec temps de parcours différents

De plus, on constate une cohérence de Mint avec la méthode des stratégies optimales : En effet, si les temps de parcours sont égaux, la répartition des volumes s'effectue au prorata des fréquences.

5.3 Application sur un réseau de 3 lignes dont une de fréquence infinie

- Caractéristiques du réseau



- Définitions

t = temps de parcours

hdw = intervalle inter-véhiculaire

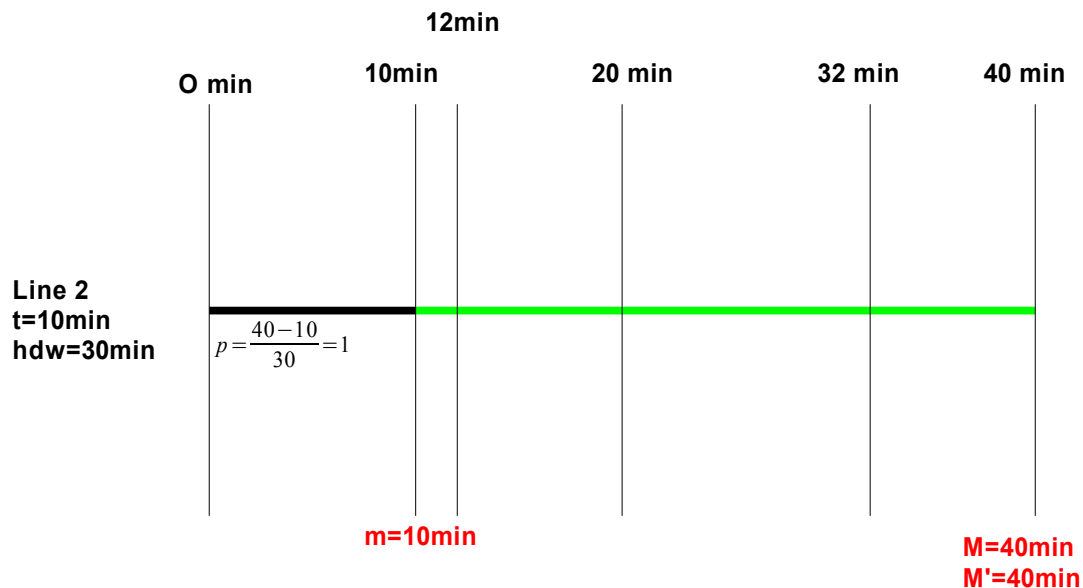
m = temps de parcours minimum

M = MINT : Temps maximum minimum.

M' = temps maximum minimum sans les stratégies de marche seule

- Etape 1

On prend la ligne avec le plus petit temps de parcours

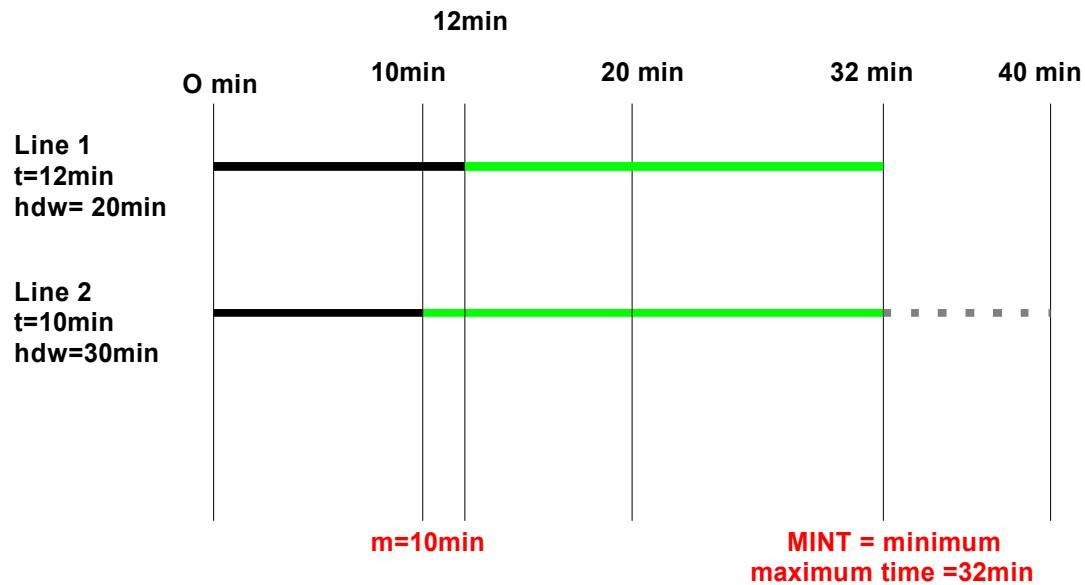


$$T = 1 \cdot \frac{10+40}{2} = 25 \text{ min}$$

- Étape 2

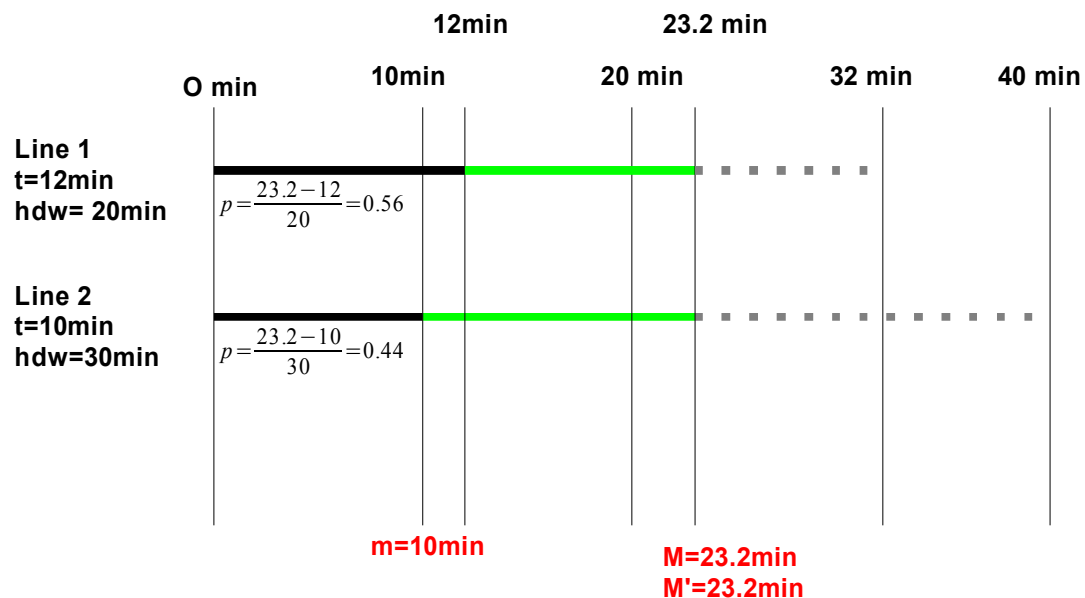
On prend la ligne suivante avec le plus petit temps de parcours. Il s'agit de la ligne 1, pour laquelle le temps de parcours de 12 minutes est inférieur à la valeur du temps maximum minimum ($M = 40$ min) : La ligne 1 est donc attractive.

Puis, on détermine le nouveau temps maximum minimum



- Étape 3

On tient compte des fréquences combinées des deux lignes, qui traduit le fait que la somme des durées inter-véhiculaires des deux lignes combinées ne peut excéder 60 minutes sur une plage d'une heure.



$$T = 0.56 \cdot \frac{10 + 23.2}{2} + 0.44 \cdot \frac{12 + 23.2}{2} = 17.04 \text{ min}$$

- Étape 4

On prend la ligne suivante avec le plus petit temps de parcours. Sa fréquence est infinie puisqu'il s'agit d'un lien marche seul. Le temps de parcours (20min) est inférieur au temps maximum minimum M' (23.2 min). Le lien marche est donc attractif

Le caractère infini de la fréquence nécessite une prise en compte particulière de ce type de ligne.

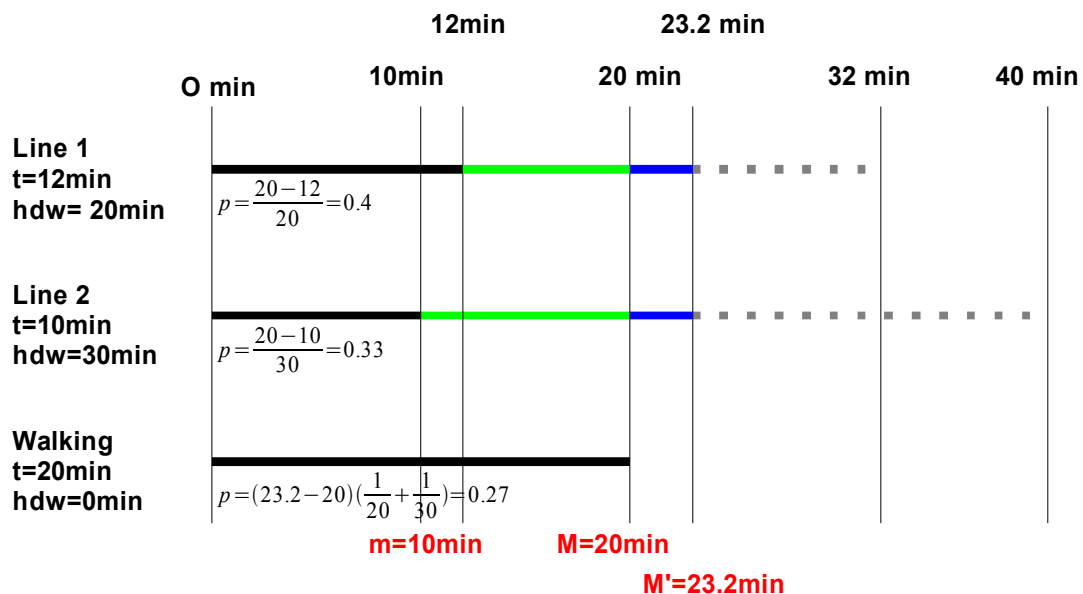
On en déduit alors le temps de parcours espéré global, et la répartition selon les différentes lignes.

$$p_i = (M' - M) \left(\sum_{i \in S} \frac{1}{hdw_i} \right) = 1 - \sum_{i \in S} \frac{M - m_i}{hdw_i}$$

n_i : nombre de passages de véhicules de la ligne i

S : Ensemble des lignes attractives de fréquences hors fréquences infinies

On en déduit le temps de parcours espéré total et la répartition de la demande selon les lignes.



$$T = 0.4 \cdot \frac{10+20}{2} + 0.33 \cdot \frac{12+20}{2} + 0.27 \cdot \frac{20+20}{2} = 16.68 \text{ min}$$

6 PRISE EN COMPTE DES LIENS PIÉTONS

6.1 Deux types de liens piétons

Les liens piétons peuvent être pris en compte de deux manières différentes :

- Type 1 : D'une manière spécifique

Cette approche considère que les deux stratégies suivantes sont équivalentes (à l'exception des pondérations de temps d'attente et de correspondance) :

$$L'_1(t=21, Hdw=10) = L_1(t=15, hdw=10) + P(t=6)$$

L_1, L'_1 sont des lignes TC

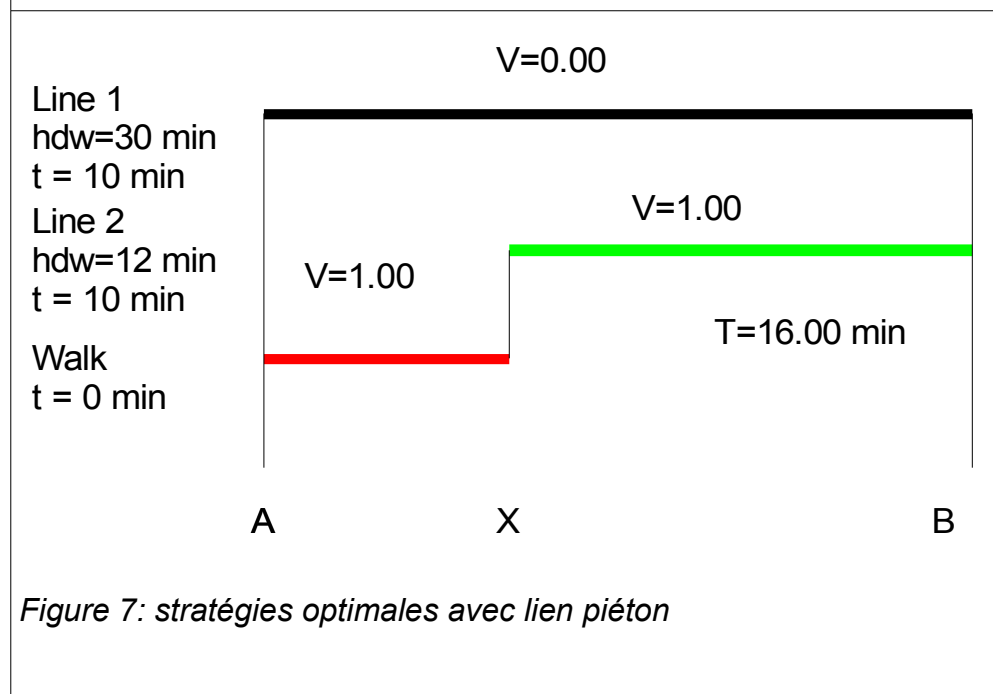
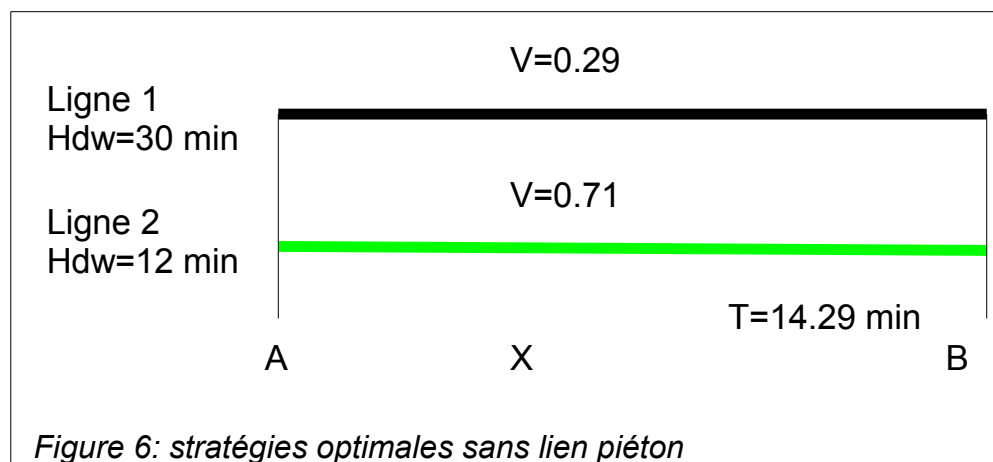
P un lien piéton

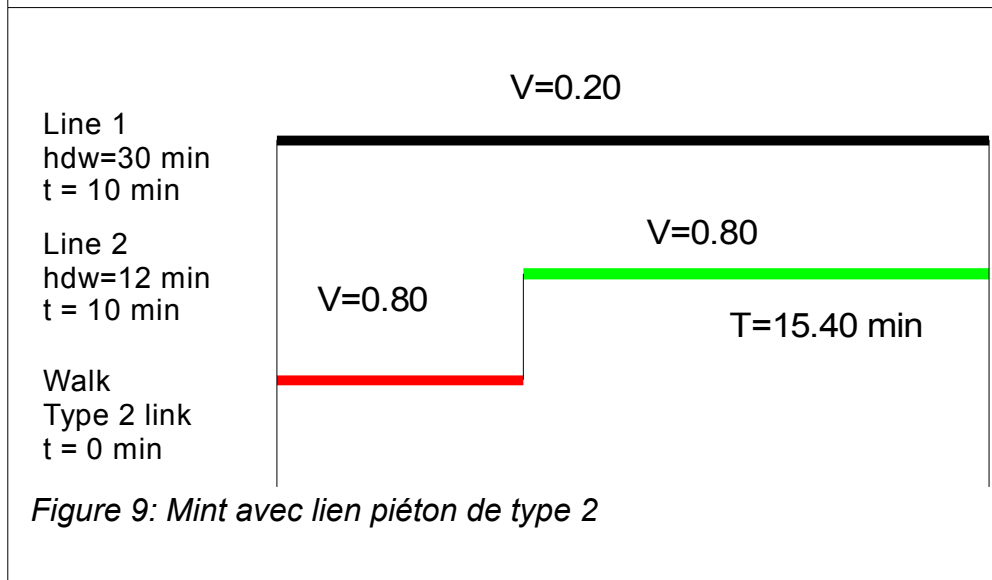
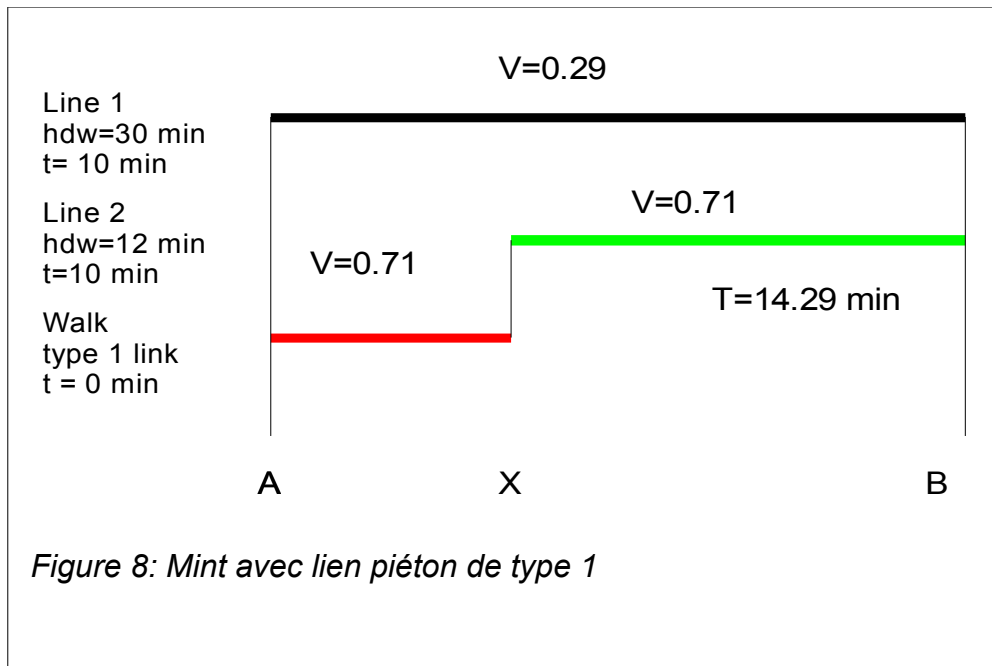
- Type 2 : De la même manière qu'une ligne de transport collectif

Cette méthode considère le lien piéton comme une ligne de transport collectif avec un intervalle inter-véhiculaire $hdw = \epsilon$ et $\epsilon \rightarrow 0$

6.2 Exemple

Les lignes 1 et 2 ont un temps de parcours de 10 minutes chacune et la longueur du lien piéton est prise comme étant nulle.





L'utilisation des liens piétons de type 1 permet de conserver les mêmes temps de parcours et la même répartition des flux que l'aurait fait la méthode des stratégies optimales sans l'introduction du lien piéton de longueur nulle. Ainsi, les résultats de l'affectation sont indépendants de la façon dont l'utilisateur a codifié son réseau.

Toutefois, la généralisation de cette approche pour les liens piétons de grande longueur peut ne pas être réaliste, puisqu'elle est basée sur l'hypothèse que l'utilisateur connaît parfaitement les horaires de passage de l'ensemble de lignes, et qu'il peut se rendre aux arrêts les plus intéressants, en tenant compte du temps de marche à pied pour se rendre à chacun des arrêts.

Mint peut traiter les deux types de liens piétons. Il paraît opportun de réserver

l'usage des liens piétons de type 1 aux tronçons de correspondance de proximité.

7 MISE EN ŒUVRE DE L'ALGORITHME

7.1 Définitions

Soit :

- $l_{i,j,l}$ le lien entre i et j de la ligne l
- $t_{i,j,l}$ le temps de parcours du lien i,j,l
- $T_{i,j,l}$ le temps de parcours moyen au lien i,j,l
- $m_{i,j,l}$ le temps minimal minimum du lien i,j,l
- $M_{i,j,l}$ le temps maximal minimum du lien i,j,l
- $M'_{i,j,l}$ le temps maximal du lien i,j,l pour les stratégies à fréquences infinies
- $hdw_{i,j,l}$ le headway de la ligne du tronçon i,j,l , 0 si marche à pied
- $V_{i,j,l}$ volume du tronçon i,j,l
- $S_{i,j,l}$ ensemble des stratégies $s_{i,j,l,k}$ du lien i,j,l
- $\mu_{i,j,k,l}$ le temps minimal de la stratégie k du lien i,j,l
- $\nu_{i,j,k,l}$ le temps maximal de la stratégie k du lien i,j,l
- $n_{i,j,k,l}$ fréquence horaire de la stratégie k du lien i,j,l
- $h_{i,j,k,l}$ le headway de la stratégie k du lien i,j,l
- $p_{i,j,k,l}$ la proportion de demande affectée de la stratégie k du lien i,j,l
- $\pi_{i,j,k,l}$ le tronçon pivot de la stratégie k du lien i,j,l
- Φ ensemble des liens non atteints
- P ensemble des liens atteints
- Ω ensemble des liens optimisés
- O origine du déplacement
- D destination du déplacement
- In() : retourne la liste des prédécesseurs
- Out() : retourne la liste des successeurs

7.2 Principe

On part de la destination pour déterminer les stratégies attractives

7.2.1 Phase 0 : Initialisation

$$P = \text{In}(D)$$

$\forall l_{i,j,l} \in P$, on ajoute une nouvelle stratégie k définie par :

- $T_{i,j,l} = M_{i,j,l} = m_{i,j,l} = \mu_{i,j,k,l} = \nu_{i,j,k,l} = t_{i,j,l}$
- identifiant « l » numéro de ligne du tronçon

7.3 Phase 1: Boucle principale

- *Phase 1.1 : Calcul et optimisation des potentiels des liens*

On prend le $l_{i,j,l} \in P$ avec la valeur $T_{i,j,l}$ minimale comme pivot.

$$P = P - \{l_{i,j,l}\} \text{ et } \Omega = \Omega \cup \{l_{i,j,l}\}$$

Pour chaque prédécesseur u de $l_{i,j,l}$:

- si u n'a pas déjà été atteint $u \notin P$
 - Si u et $l_{i,j,l}$ appartiennent à des lignes différentes et chacune de fréquence non nulle
 - On génère la stratégie moyenne s à partir des stratégies de $l_{i,j,l}$
 - $S_u = s$
 - s est définie par:

$$\begin{aligned} \mu_s &= T_{i,j,l} + t_u \\ \nu_s &= T_{i,j,l} + t_u + h d w_{i,j,l} \\ p_s &= 1 \\ \pi_s &= l_{i,j,l} \end{aligned}$$
 - Sinon, l'ensemble des stratégies de u est l'ensemble des stratégies de $l_{i,j,l}$ pour lesquelles le temps de parcours de u aura été ajouté aux temps minimaux, maximaux et moyen. La répartition des volumes selon les stratégies restent également identiques.
 - $S_u = S_{i,j,l}$
 - $\mu_{u,k} = \mu_{i,j,k,l} + t_u$
 - $\nu_{u,k} = \nu_{i,j,k,l} + t_u$
 - $m_u = m_{i,j,k} + t_u$
 - $M_u = M_{i,j,l} + t_u$

- $T_u = T_{i,j,l} + t_u$
- $M'_u = M'_{i,j,l} + t_u$
- $\forall k \in S_{u,k}, p_u = p_{i,j,k,l}$
- si u a déjà été atteint ($u \in P, \Rightarrow S_u \neq \emptyset$)
 - Si u et $l_{i,j,l}$ appartiennent à des lignes différentes et chacune de fréquence non nulle et que $m_{i,j,l} + t_u < M_u$, on peut optimiser.
 - On génère la stratégie moyenne s à partir des stratégies de

$$\begin{aligned}
 \mu_s &= T_{i,j,l} + t_u \\
 \nu_s &= T_{i,j,l} + t_u + h d w_{i,j,l} \\
 l_{i,j,l} \quad p_s &= 1 \\
 \pi_s &= l_{i,j,l}
 \end{aligned}$$
 - Si $s \in S_u$ et comme $T_{i,j,l} + t_u < T_u$, on met à jour la stratégie s de u qui est ainsi optimisé, sinon on ajoute s à liste des stratégies de u $S_u = S_u \cup \{s\}$
 - Sinon si $m_{i,j,l} + t_u < M_u$ alors on peut optimiser
 - $\forall s \in S_u \cap S_{i,j,l}$, si $\mu_s + t_u < T_u$ alors on met à jour la stratégie s de u qui est ainsi optimisé, sinon on garde les valeurs existantes.
 - Ensuite,

$$\forall s \notin S_u \text{ et } s \in S_{i,j,l}, S_u = S_u \cup \{s\} \text{ si } \mu_s + t_u < T_u \text{ et } h d w_s > 0 \text{ ou } \mu_s + t_u < M_u \text{ si } h d w_s = 0$$
 on ajoute aux stratégies de u les stratégies de $l_{i,j,l}$ qui ne sont pas dans celles de u et qui permettent une optimisation de u.

• *Phase 1.2: Mise à jour de M et M'*

On met à jour les valeurs m, M et M' de u à partir de ses stratégies

- $m_u = \text{Min}(\mu_k), k \in S_u$
- $M'_u = \text{Min}(\mu_k + h_k) \forall k \in S_u$
- $M_u = M'_u$ si $\forall k \in S_u, n_k > 0$
sinon
 $M_u = \text{Min}(\mu_k) \forall k \in S_u$ tel que $n_k = 0$
- $$\delta = \frac{(\sum_{s \in S_u} n_s (M - \mu_s)) - 60}{\sum_{s \in S_u} n_s}$$
- $M' = M' - \delta$
- $M = \text{Min}\{M', M\}$

- *Phase 1.3: Mise à jour des poids des stratégies*
- $\forall k \in S_u$
 - Si $n_k > 0$, $p_{u,k} = \frac{M - \mu_{u,k}}{hdwy_{u,k}}$
 - si $n_k = 0$, $p_{u,k} = (M' - M) \left(\sum_{k \in S_u} \frac{1}{hdwy_{u,k}} \right) = 1 - \sum_{k \in S} \frac{M - \mu_{u,k}}{hdwy_{u,k}}$
 - Si $\sum_{k \in S_u} n_{u,k} = 0$, $p_{u,k} = 1$
- *Phase 1.4: Mise à jour du temps de parcours espéré*
- $T_u = \frac{1}{2} \sum_{k \in S_u} p_{u,k} (\mu_{u,k} + M) \quad \forall k \in S_u \quad \text{si} \quad \sum_{k \in S_u} n_{u,k} > 0$
- $T_u = M \quad \text{si} \quad \sum_{k \in S_u} n_{u,k} = 0$

7.4 Phase 2: Affectation de la demande au prorata des poids des stratégies

On part de l'origine,

- *Phase 2.1 Initialisation*

$$P = \text{Out}(O)$$

- *Phase 2.2 Boucle principale*

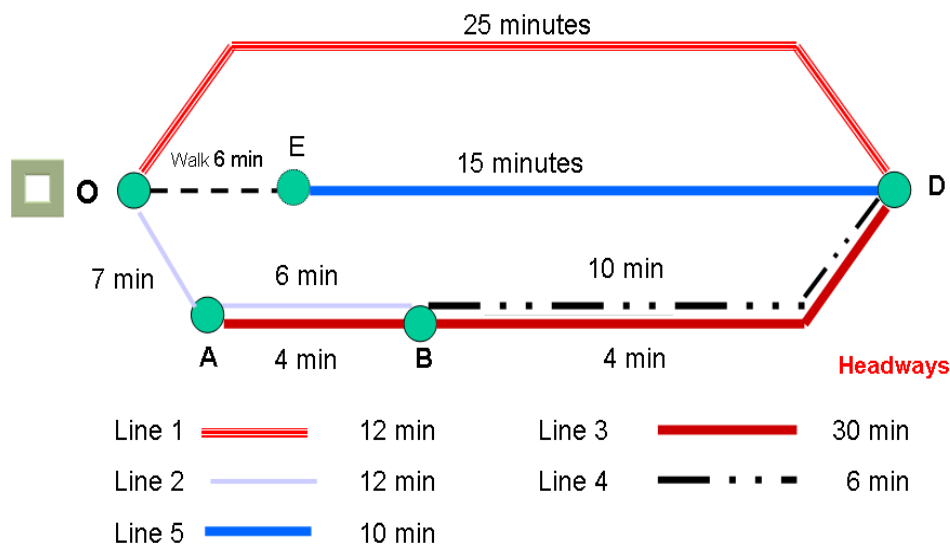
$$\forall u \in P, \forall k \in S_u, V_{\pi_u} = V_{\pi_u} + V_u \cdot p_{u,k}$$

si π_u existe, on ajoute π_u à P , soit $P = P \cup \{\pi_u\}$ et on enlève u de P , $P = P - \{u\}$

On répète la procédure jusqu'à ce que $P = \emptyset$

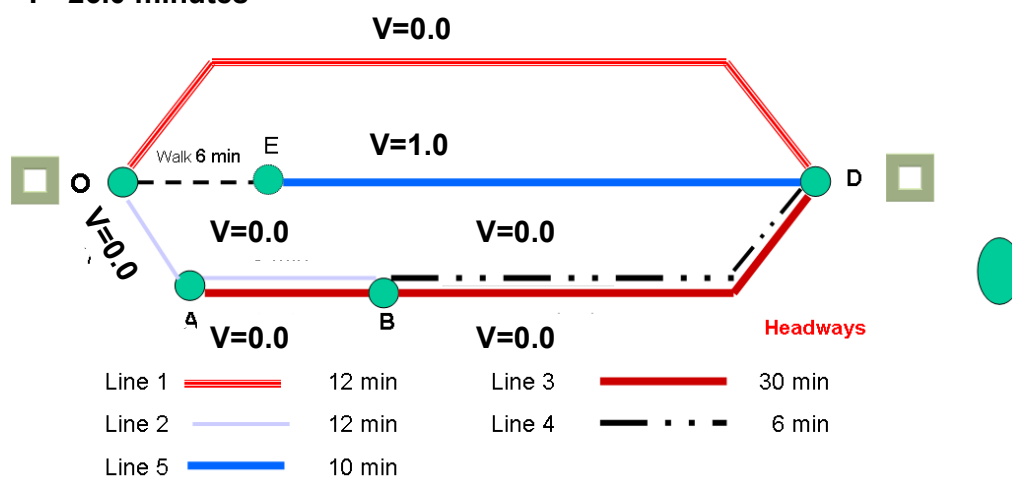
8 APPLICATION SUR UN RÉSEAU TEST

Ce réseau test a été utilisé notamment par INRO pour montrer les apports du nouveau module d'affectation en transport collectif avec variantes récemment mis en œuvre dans Emme. Ce réseau permet en particulier de comparer les résultats de Mint avec la méthode des stratégies optimales avec et sans variantes.



8.1 Résultats stratégies optimales

T= 26.0 minutes



Emme - new methods

EMME

Illustration 10: Répartition des flux avec la méthode des stratégies optimales

8.2 Stratégies optimales avec variantes

Avec cette méthode et le choix par logit des stratégies, toutes les alternatives sont utilisées à l'exception de la stratégie de la ligne 3 qui nécessite de descendre du véhicule avant la fin de la ligne 2 en A

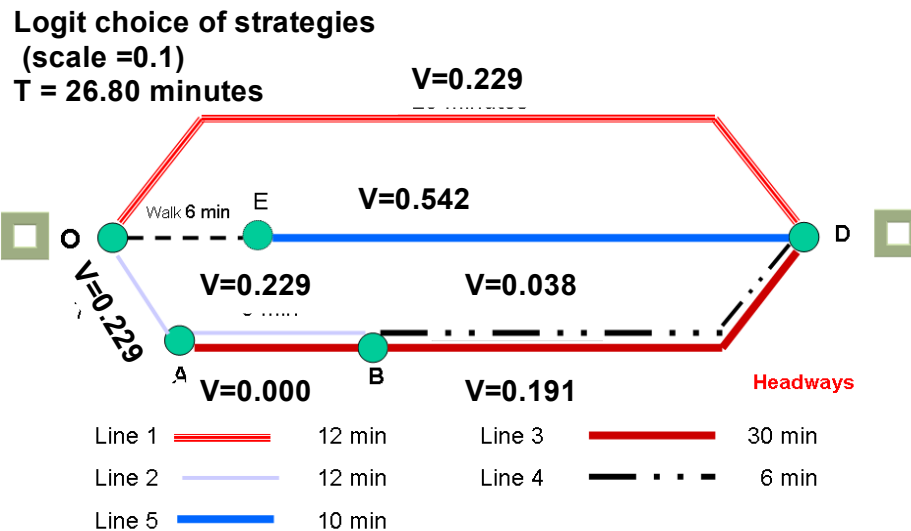


Figure 11: Répartition de la demande avec la méthode des stratégies optimales avec variantes

8.3 Résultats de Mint temps de parcours seul

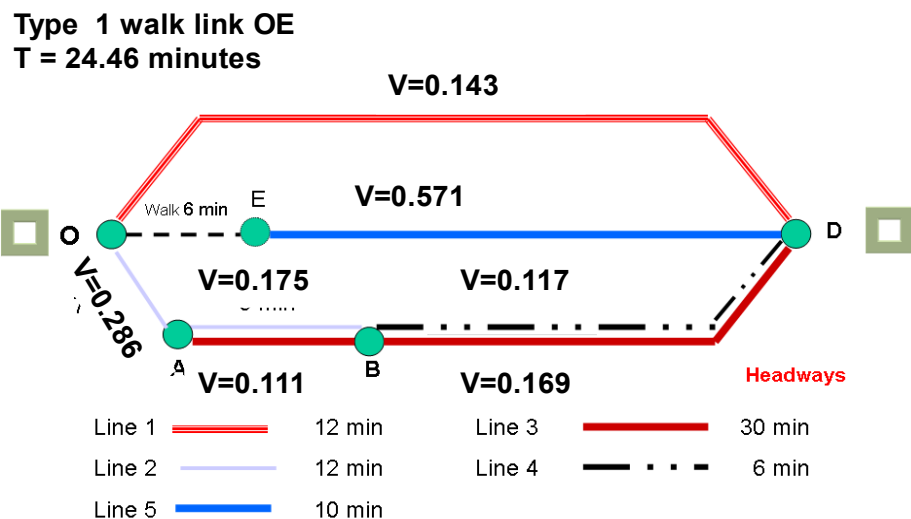


Figure 12: Répartition de la demande avec Mint et un lien piéton de type 1

Type 2 walk link OE
T = 25.67 minutes

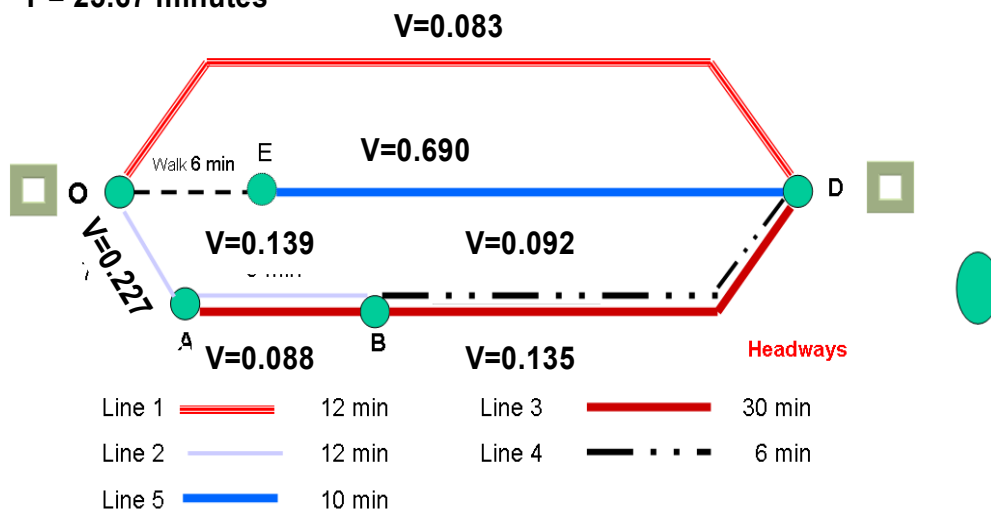


Figure 13: Répartition de la demande avec Mint et un lien piéton de type 2

8.4 Résultats de l'algorithme MINT en temps généralisé

Les diverses pondérations prises en compte sont les suivantes

Facteur temps marche : 2

Facteur temps d'attente : 2

Temps de correspondance 2 :

Facteur temps de correspondance : 2

T= 25.15 minutes

C=34.84

V=0.411

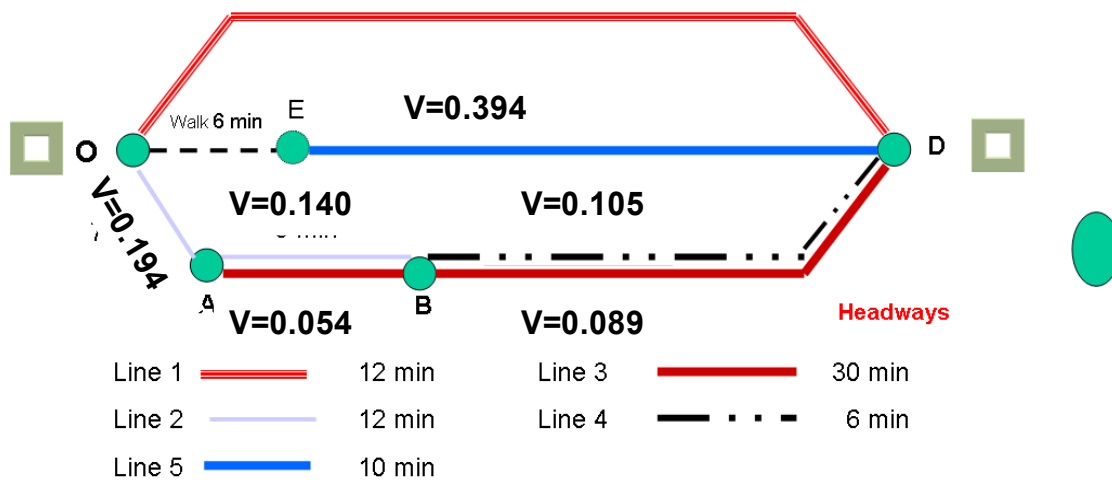


Figure 14: Répartition de la demande avec Mint en temps généralisé et un lien piéton de type 2

Contrairement à l'algorithme de stratégies optimales, même si la prise en compte du temps généralisé ne modifie pas les stratégies attractives, la répartition des flux est modifiée selon les différentes stratégies en fonction des diverses pondérations.

8.5 Test sur la banque de démonstration Winnipeg

Ce test a été réalisé sur la banque de démonstration de EMME sur Winnipeg

Le réseau comprend 154 zones, 900 nœuds et 3000 liens. L'intérêt réside principalement dans le fait de tester Mint sur un réseau réel et pas seulement sur des cas tests. Les résultats d'affectation ci-dessous semblent cohérents à ceux produits par Emme.

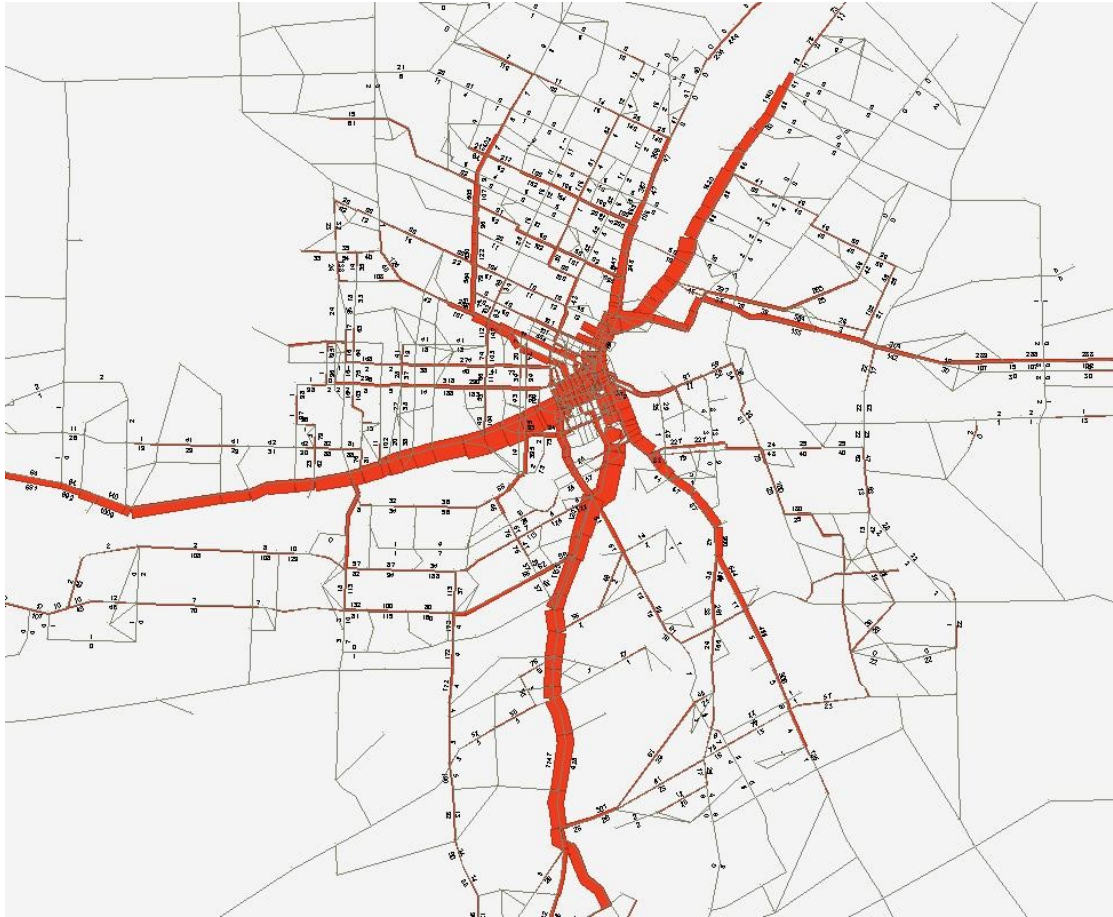


Illustration 15: Winnipeg demo Mint transit assignment

9 TEST MINT ON THE PARIS URBAN AREA

L'objectif de ce test est d'évaluer le comportement de Mint sur des réseaux de taille importante.

Caractéristiques du réseau Ile de France testé :

- 1293 zones
- 17404 nœuds
- 60358 liens
- 4577 lignes TC
- 71279 segments de lignes

L'affectation s'est bien déroulée et a pris 4h50.

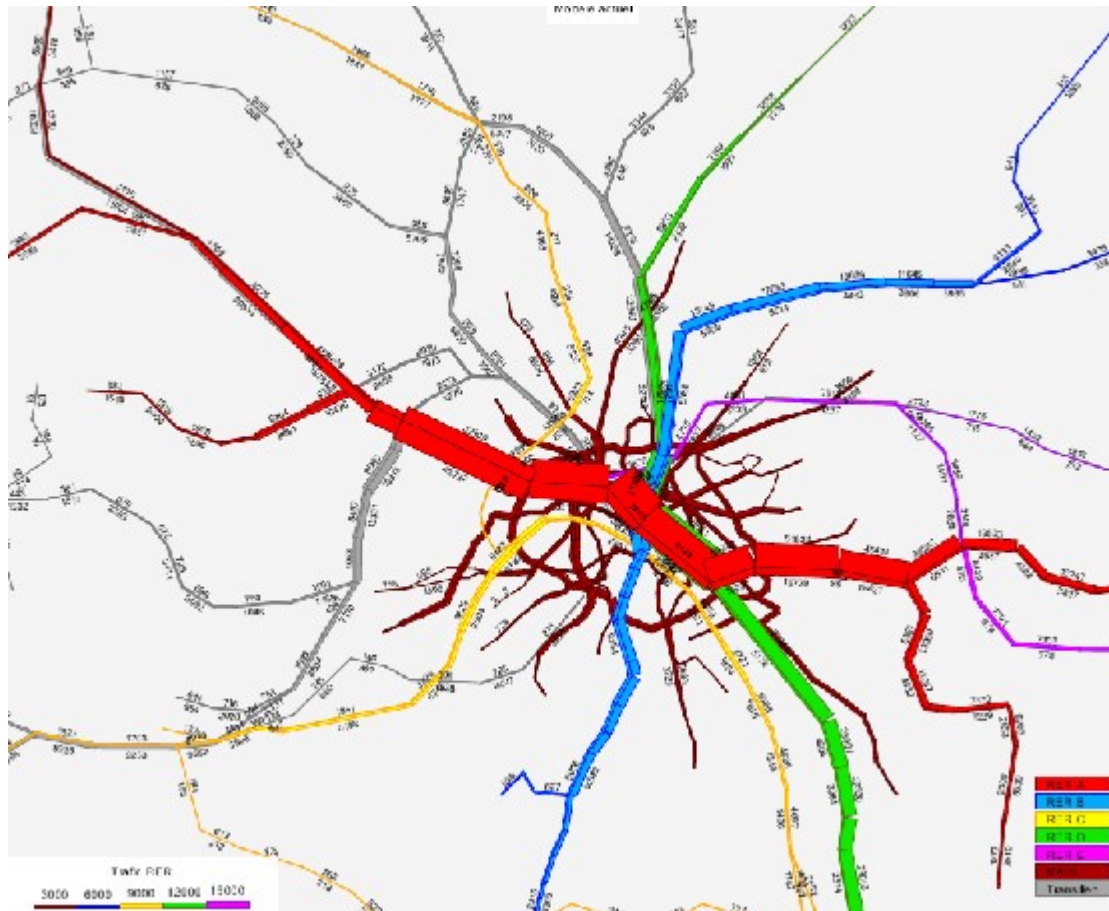


Figure 16: Résultats d'affectation de Mint sur le réseau Ile de France (visualisation du réseau ferré)

10 IMPLICATION SUR LES HORAIRES DE PASSAGES

Reprenons l'exemple 2 suivant constitué de deux lignes de transport en commun de fréquence différente et de temps de parcours différents

$$t=20\text{min}, \text{hdw}=12\text{min}$$

Ligne 1 —————

$$t=15\text{min}, \text{hdw}=30\text{min}$$

Ligne 2 —————

Supposons dans un premier temps que les intervalles inter-véhiculaires de chacune des deux lignes sont constants. Nous obtenons alors la distribution des temps entre A et B pour chacune des deux lignes en fonction de l'horaire de départ

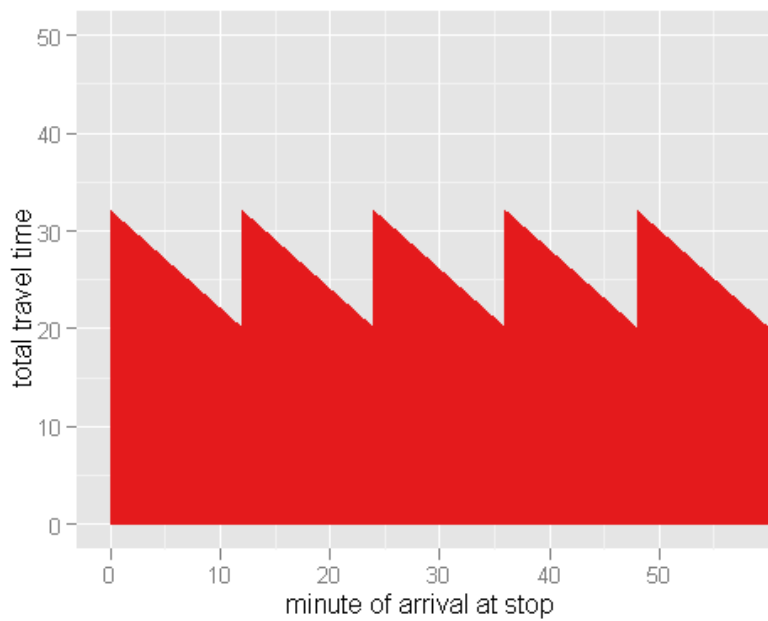


Figure 17: Distribution des arrivées de la ligne 1

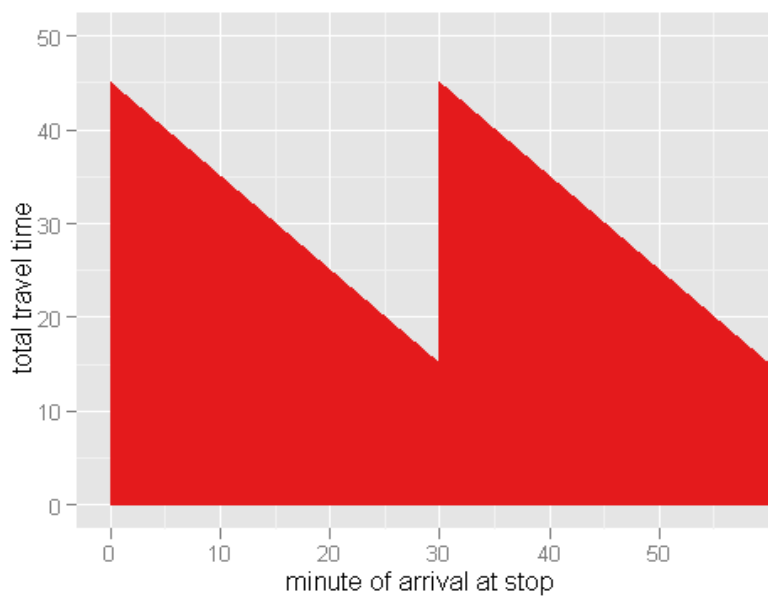


Figure 18: Distribution des arrivées de la ligne 2

Les deux lignes étant attractives, l'usager aura le choix d'utiliser soit la ligne 1 soit la ligne 2.

Cela lui reviendra à utiliser une ligne définie comme étant la combinaison des lignes 1 et 2, définie par la fréquence combinée des deux lignes

Le temps de parcours espéré dépend de la manière dont les deux lignes

s'inscrivent dans les horaires de passage

10.1 Intervalles inter-vehiculaires uniformes sur chacune des lignes

Dans un premier temps, on considère que les intervalles inter-vehiculaires des deux lignes sont constants et que les horaires de passage sont définis comme suit:

Line 1 : 0,12,24,36,48

Line 2: $x, 30+x$ où x varie entre 0 et 30

L'impact des horaires sur le temps de parcours espéré sera analysé selon les deux stratégies suivantes

- L'utilisateur monte dans le premier véhicule qui se présente à lui (stratégies optimales)
- L'utilisateur monte dans le véhicule qui minimise son temps de parcours plus temps d'attente (Mint). Dans cette stratégie, l'utilisateur peut-être amené à ne pas monter dans le premier véhicule si un autre véhicule arrivant après lui permet d'arriver à sa destination avant l'autre.

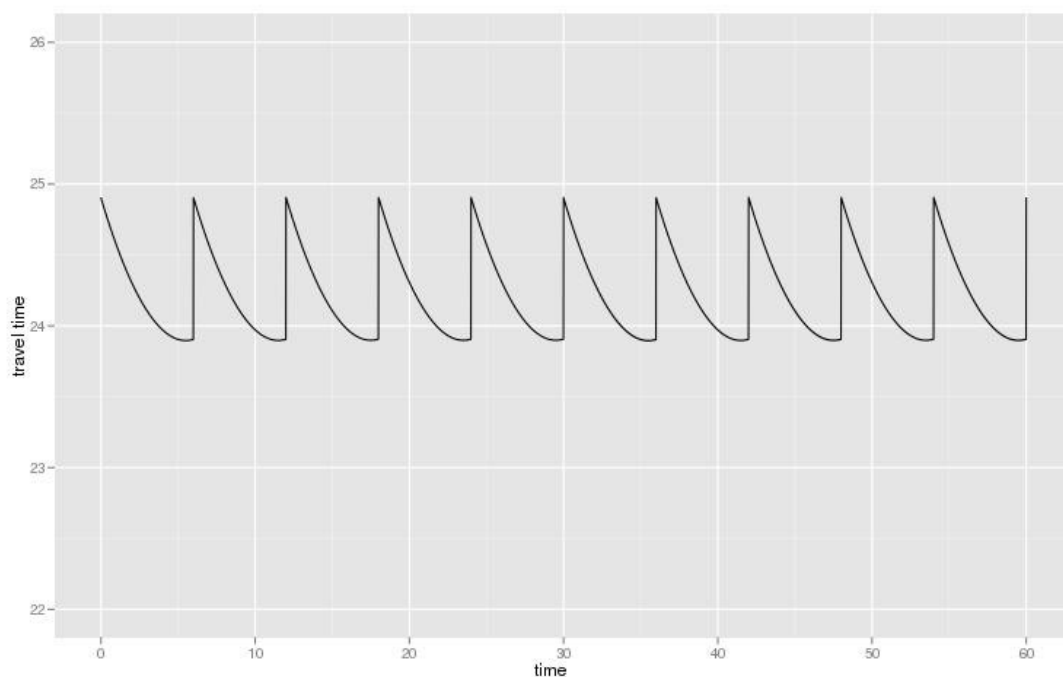


Illustration 19: Stratégie de montée dans le premier véhicule qui se présente

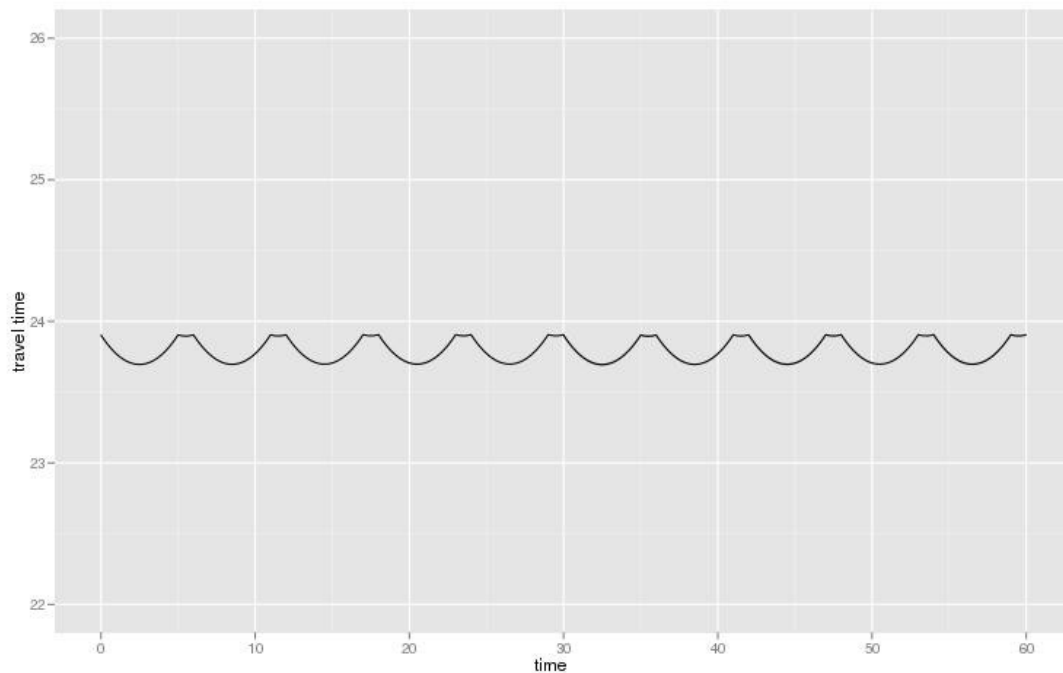


Illustration 20: Stratégie du temps maximum minimum

Les deux diagrammes montrent, que si les intervalles inter-véhiculaires sont uniformes pour chacune des lignes, le temps de parcours global en combinant les deux lignes est toujours supérieur à celui déterminé par la méthode des stratégies optimales et Mint

Les résultats de la simulation sont les suivants:

- Stratégie de montée dans le premier véhicule qui se présente:
Min:23.89 min Max : 24.91 min Moy:24.21 min
- Stratégie du temps maximum minimum : Min : 23.69 min Max : 23.91 min Moy:23.79 min

Pour rappel, les valeurs trouvées par les deux algorithmes sont:

Stratégie de montée dans le premier véhicule qui se présente: 22.86

Stratégie du temps maximum minimum: 22.56

Ces résultats démontrent que les horaires de passage sur lesquels sont basés les méthodes de résolution des stratégies optimales et de Mint ne sont pas ceux pris précédemment, et donc que les intervalles inter-véhiculaires ne sont pas, pour cet exemple, uniformes pour chacune des deux lignes.

Ces deux méthodes s'appuient donc sur des grilles horaires implicites, résultats d'une optimisation

10.2 Décalage aléatoire

On suppose toujours dans cet exemple que les intervalles inter-véhiculaires pour chacune des deux lignes est constant.

On génère des grilles horaires avec décalage aléatoire de telle manière que pour un usager les temps de parcours en utilisant chacune des deux lignes

est défini comme suit :

$$T_1 = 20 + 12 \cdot \alpha_1$$

$$T_2 = 15 + 30 \cdot \alpha_2$$

α_i sont des variables aléatoires entre 0 et 1

Il a été effectué 10000 tirages aléatoires des variables (α_1, α_2) en retenant pour chacune des simulations le minimum $\min(T_1, T_2)$ pour le choix de la ligne à utiliser.

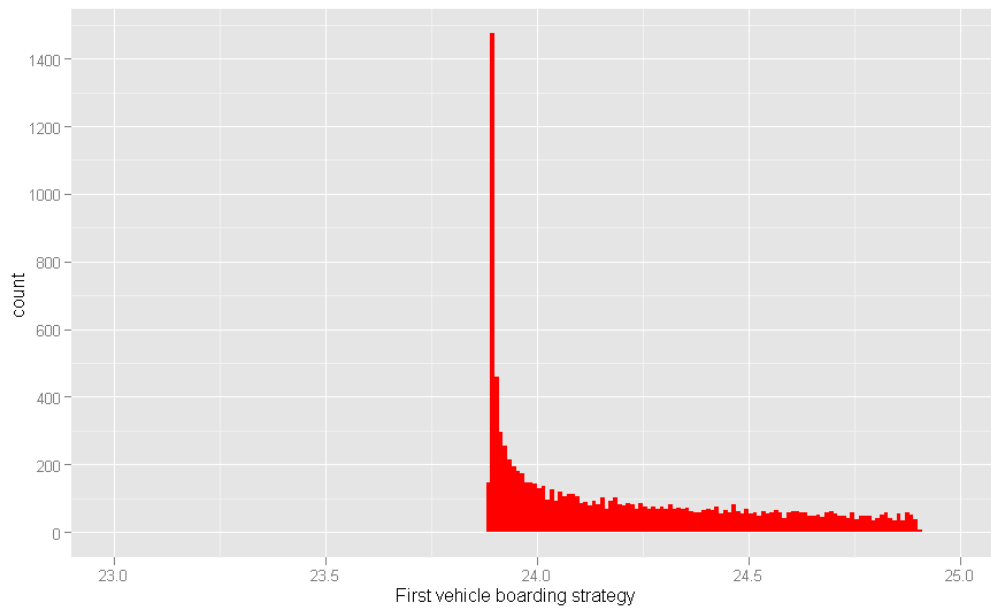


Figure 21: Résultat des 10000 tirages aléatoires α_1, α_2 , stratégie de montée dans le premier véhicule qui se présente

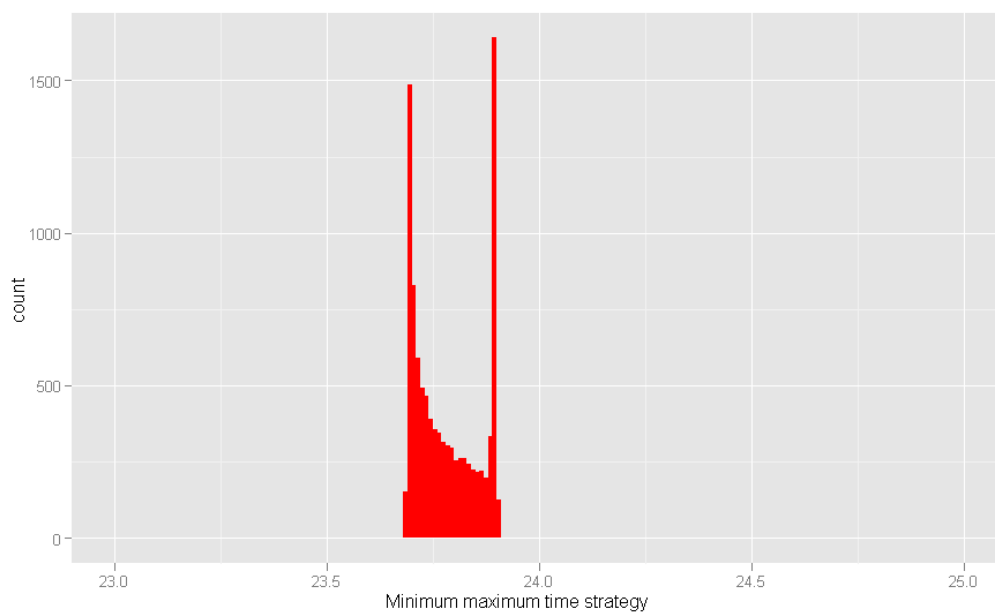


Figure 22: Résultat des 10000 tirages aléatoires α_1, α_2 , Stratégie du temps maximum minimum

| | <i>Stratégie de montée dans le premier véhicule qui se présente</i> | <i>Stratégie du temps maximum minimum</i> |
|-------------|---|---|
| Minimum: | 23,89 | 23,69 |
| Maximum: | 24,90 | 23,90 |
| Moyenne | 24,20 | 23,78 |
| Ecart type: | 0,30 | 0,075 |

Si l'on considère que les intervalles inter-véhiculaires sont uniformes pour chacune des deux lignes avec un décalage aléatoire, les temps de parcours espérés sont toujours supérieurs à ceux des stratégies optimales ou de Mint. La stratégie du temps maximum minimum est toujours plus rapide et le temps total espéré est moins sensible au décalage entre les deux lignes

10.3 Grilles horaires aléatoires

L'objectif est d'étudier l'impact à fréquence et temps de parcours constants de la structure de la grille horaire sur le temps de parcours espéré.

La méthode utilisée consiste à analyser la distribution du temps de parcours espéré calculé pour un grand nombre de grilles horaires générés aléatoirement pour chacune des lignes.

La seule contrainte sur les grilles horaires consiste à imposer pour chacune

des lignes un nombre de passages égal à leur fréquence horaire

Le principe consiste à effectuer des simulations de Monte-Carlo en générant 10000 grilles horaires pour les lignes 1 et 2 et d'estimer le temps de parcours moyen espéré

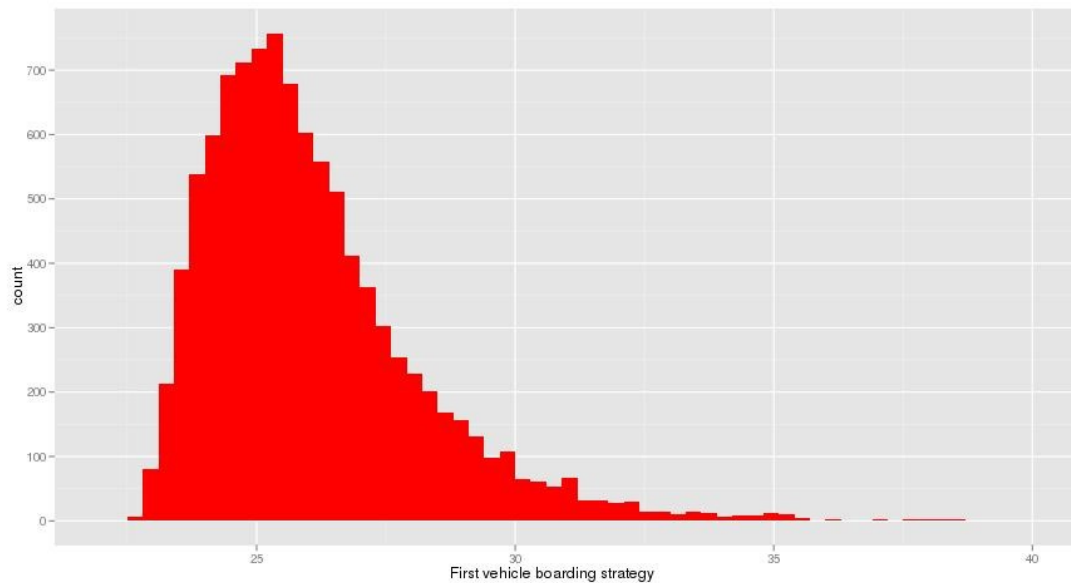


Illustration 23: Distribution du temps total moyen avec des grilles horaires aléatoires pour les lignes 1 et 2, stratégie de montée dans le premier véhicule qui se présente

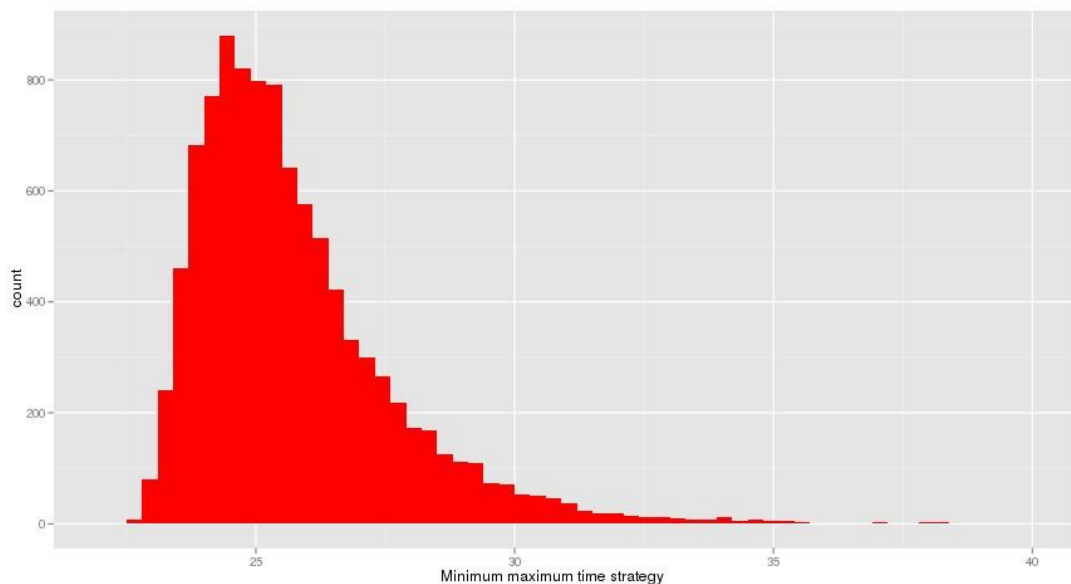


Illustration 24: Distribution du temps total moyen avec des grilles horaires aléatoires pour les lignes 1 et 2, stratégie du temps maximum minimum

Les résultats des simulations sont les suivants:

| | <i>stratégie de montée dans le premier véhicule qui se présente</i> | <i>stratégie du temps maximum minimum</i> |
|-------------|---|---|
| Minimum: | 22,63 | 22,63 |
| Maximum: | 38,83 | 39,52 |
| Moyenne | 25,74 | 26,07 |
| Ecart type: | 1,91 | 2,09 |

Ces résultats montrent que la moyenne des temps de parcours espéré est plus grande que les temps de parcours globaux moyens déterminés par les deux approches (stratégies optimales et Mint). De plus, on constate, pour quelques grilles horaires, que le temps de parcours espéré est inférieur à celui de la méthode des stratégies optimales.

Le temps de parcours espéré de Mint semble être l'optimum. Nous montrerons :

- qu'il est basé sur une grille horaire construite à partir du concept d'égalité des temps maximum.
- qu'une grille horaire d'égalité des temps maximum est optimale, en montrant que tout autre grille horaire conduit à un temps de parcours global moyen supérieur à celui de Mint

10.4 Grille horaire implicite des stratégies optimales

La méthode des stratégies optimales est basée sur le fait que les intervalles inter-véhiculaires de la combinaison des lignes attractives est uniforme. La grille horaire peut-être construite en calculant le nombre de passages de véhicules des deux lignes et en déterminant un intervalle moyen qui sera supposé régulier

Dans notre exemple, il y a 5 passages de véhicules par heure pour la ligne 1 et deux pour la ligne 2

La fréquence combinée est donc de 7 véhicules par heure espacés régulièrement de $60/(5+2)=8.57$ minutes

| MINUTES | LINE | TRAVEL_TIME |
|---------|------|-------------|
| 0.00 | 1 | 20 |
| 8.57 | 1 | 20 |
| 17.14 | 1 | 20 |
| 25.71 | 2 | 15 |
| 34.29 | 1 | 20 |
| 42.86 | 1 | 20 |
| 51.43 | 2 | 15 |

Tableau 1: Grille horaire stratégies optimales

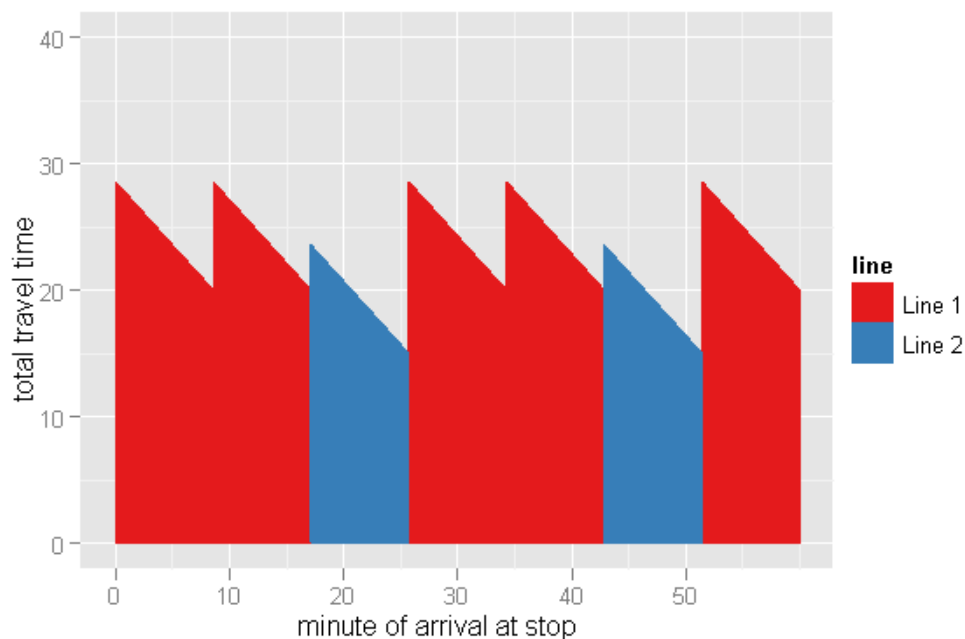


Figure 25: Horaires implicites des stratégies optimales

10.5 Grille horaire implicite Mint

L'algorithme Mint est basé sur une optimisation du concept de temps maximum. Le temps maximum est défini par la somme du temps de trajet et de l'intervalle entre deux véhicules consécutifs. Lorsque les temps de trajet des deux lignes sont identiques, les grilles horaires implicites des stratégies optimales et de Mint sont identiques; Le temps de parcours espéré des deux méthodes est également identique et est alors optimum en si seules ces deux lignes sont attractives

Si les temps de trajet sur les lignes 1 et 2 sont différents, le temps de parcours global moyen déterminé par la méthode des stratégies optimales

n'est plus minimum. Le temps de parcours espéré optimum est celui donné par Mint, qui minimise le temps maximum

On peut montrer que la solution optimale est donnée par Mint avec une grille horaire basée sur le principe d'égalité des temps maximaux

Supposons que nous avons une grille horaire Mint (diagramme ci-dessous). Le temps de parcours espéré est donné par le rapport de l'aire sous la courbe et la durée de la période ($T=60$ minutes dans notre cas) et que pour un intervalle inter-véhiculaire on applique un décalage de δ_t positif ou négatif

$$\Delta_T = \frac{(M \cdot \delta_t + \frac{\delta_t^2}{2} - ((M - \delta_t) \cdot \delta_t + \frac{\delta_t^2}{2}))}{T}$$

$$\text{soit } \Delta_T = \frac{\delta_t^2}{T}$$

Δ_t est toujours positif et donc quelque soit les modifications d'intervalle par rapport à la grille horaire Mint, le temps de parcours espéré de Mint sera toujours inférieur.

| MINUTES | LINE | TRAVEL TIME |
|---------|------|-------------|
| 0.00 | 1 | 20 |
| 7.14 | 1 | 20 |
| 14.29 | 1 | 20 |
| 26.43 | 2 | 15 |
| 33.57 | 1 | 20 |
| 40.71 | 1 | 20 |
| 52.86 | 2 | 15 |

Tableau 2: Grille horaire Mint

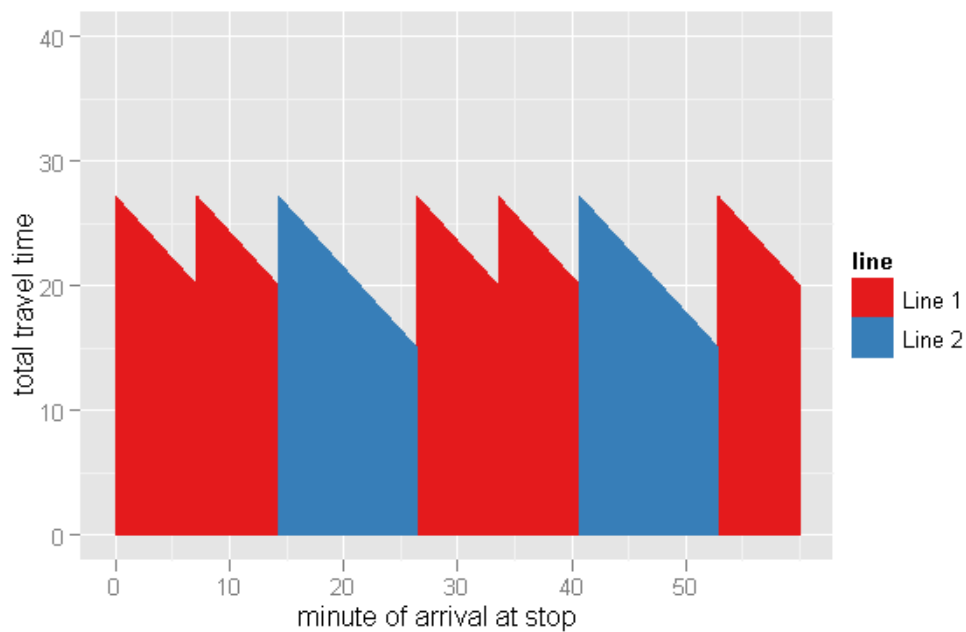


Figure 26: Horaires implicites de Mint

10.6 Horaire avec stratégie marche à pied

A l'exemple précédent on peut visualiser l'impact sur les grilles horaires d'une stratégie exclusivement piétonne. On considère alors qu'aux deux lignes l1 et l3 s'ajoute une stratégie exclusivement piétonne de 25 minutes

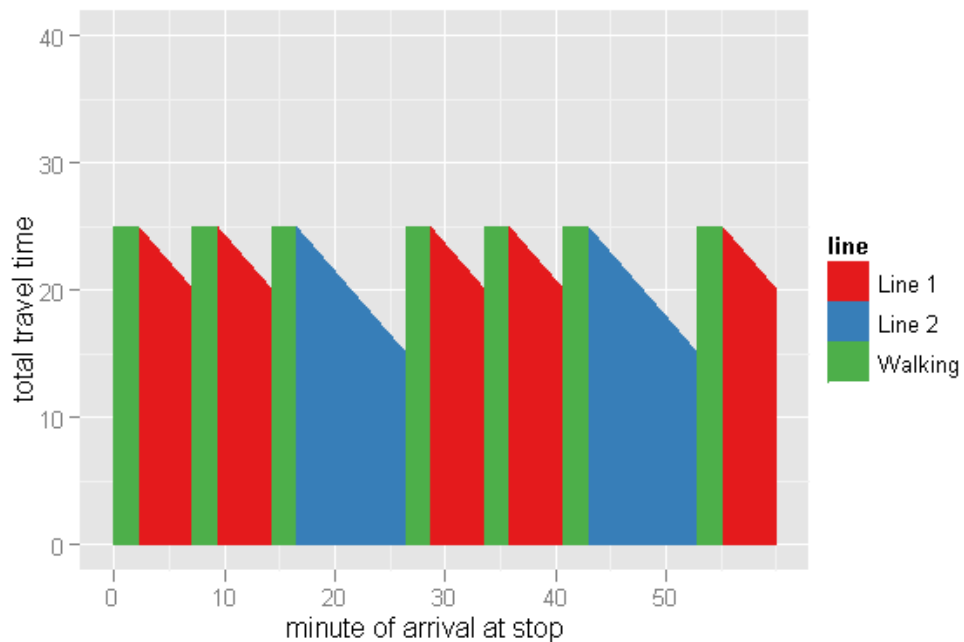


Figure 27: Horaires implicites de Mint avec l'ajout d'une stratégie exclusivement piétonne

11 CONSIDÉRATIONS TECHNIQUES POUR LA MISE EN ŒUVRE OPÉRATIONNELLE DE L'ALGORITHME

11.1 L'outil Mint

Le CETE a développé l'outil Mint qui met en œuvre de manière opérationnelle l'algorithme éponyme.

Cet outil développé en C# fonctionne avec:

- un réseau de transports collectifs codifié par fréquences
- une matrice de demande
- des paramètres d'affectation, diverses pondérations pour le coût généralisé et un paramètre d'algorithme

Les fichiers réseau et demande sont des fichiers de type texte à séparateur « , ».

Le réseau est définie par une liste de segments de ligne. Un segment est défini par un identifiant de nœud initial, un identifiant de nœud final, un identifiant de ligne. Les segments de type marche sont considérés comme des segments de lignes de transport en commun auxquels on affecte une fréquence infinie (headway=0).

Pour chaque segment il faut renseigner les champs suivants:

- identifiant de nœud initial (texte)
- identifiant de nœud final (texte)
- identifiant de ligne (texte)
- temps de parcours (réel)
- headway (réel)
- capacité du véhicule (réel)
- Montées autorisées au nœud initial (0=non; 1=oui)
- Descentes autorisées au nœud final (0=non; 1=oui)

Le fichier demande est définie simplement par une liste d'origine-destinations avec un volume associée:

- identifiant de nœud origine (texte)
- identifiant de nœud destination(texte)
- volume de demande sur l'origine destination

Mint produit trois type de fichiers en sortie:

- Un fichier des résultats d'affectation, avec pour chaque segment le

volume correspondant, ainsi que le nombre de montées au nœud initial et le nombre de descentes au nœud final

- Un fichier des résultats des temps interzones, avec pour chaque origine-destination, le temps et coûts espérés
- Un fichier optionnel des stratégies, qui décrit pour chaque segment l'ensemble des stratégies attractives de rang 1, avec les indications de proportion de volume par stratégie, le temps maximum minimum

11.2 Temps généralisé

L'algorithme est décrit ici sans tenir compte des diverses pondérations des différentes composantes du temps, qui modifient quelque peu les formules mais pas le principe.

Dans la version prototype du logiciel Mint, les paramètres suivants sont pris en compte :

- Facteur de pondération du temps de marche à pied :
- Facteur de pondération du temps d'attente :
- Temps de correspondance :
- Facteur de pondération du temps de correspondance :

11.3 Prise en compte des stratégies marche à pied seule

La proportion de volume pour les stratégies marche à pied seule sont données par les formules suivantes.

$$p_{u,k} = (M' - M) \frac{(\sum_{k \in S_u} n_{u,k})}{60} = 1 - \sum_{k \in S} \frac{M - \mu_{u,k}}{hdwy_{u,k}}$$

Les tronçons de marche à pied sont équivalents à des lignes de fréquences infinies. S'il est impossible d'appliquer les mêmes formules que pour les lignes classiques, il est possible de démontrer les formules ci-dessus en considérant à la place du lien piéton une ligne avec un intervalle véhiculaire ϵ et faire tendre ϵ vers 0. La proportion de la stratégie marche à pied seule est

obtenue par $\lim_{\epsilon \rightarrow 0} p_{u,k}(\epsilon) = 1 - \sum_{k \in S} \frac{M - \mu_{u,k}}{hdwy_{u,k}}$

11.4 Indépendance des stratégies

Lors de la mise en œuvre opérationnelle de Mint, il est indispensable d'assurer l'indépendance des stratégies. Pour cela, il faut s'assurer en combinant deux stratégies de ne pas combiner deux fois la même ligne, ce qui aurait pour conséquence de diminuer le temps maximum minimum de manière artificielle et erronée.

11.5 Problématique des cycles

Pour que l'algorithme fonctionne correctement, il faut éviter la possibilité de cycles dans la recherche des stratégies attractives, qui peuvent de manière artificielle optimiser le temps de trajet global de manière erronée et empêcher la convergence de l'algorithme. Pour éviter un tel dysfonctionnement, un segment de ligne ou lien piéton ne peut être utilisé que s'il ne fait pas partie des segments et des liens qui constituent l'ensemble des stratégies alors généré.

11.6 Optimisation du calcul

Dans la mise en œuvre opérationnelle de Mint, plusieurs coûts entre en jeu dans l'optimisation ce qui rend l'utilisation d'algorithmes couramment utilisés de type Dijkstra non adaptés, car le temps du successeur peut-être inférieur à celui du pivot s'il se situe après le regroupement de plusieurs lignes.

L'algorithme utilisé dans le prototype est le « graph growth algorithm with buckets ». La taille des intervalles est variable et est fonction de la racine carrée du potentiel du lien pour essayer de stocker un nombre constant. Le temps de calcul est plus long que celui de la procédure des stratégies optimales puisque l'affectation sur le banque test Winnipeg de Emme prend quelques minutes contre quelques secondes. Il est certainement possible d'améliorer sensiblement la performance de l'algorithme actuellement implanté.

11.7 Prise en compte des contraintes de capacité

La répartition des flux étant une fonction continue des fréquences et des temps de parcours, l'application d'un algorithme itératif de prise en compte des contraintes de capacité, devrait induire une meilleure convergence.

Il est possible également, que cet algorithme puisse permettre la mise en œuvre d'un algorithme de convergence plus performant que la méthode par « successive average » actuellement utilisée dans la macro captras, à l'instar de ce qui se fait pour le mode auto avec les « volume delay functions »

12 CONCLUSION

En conclusion, les méthodes de stratégies optimales et de Mint sont fondées sur des hypothèses fortes et comparables sur la structure de leurs grilles horaires associées. La seule différence entre les deux méthodes réside dans la manière de construire les grilles horaires implicites.

Mint permet de lever les principales limitations inhérentes à l'algorithme des stratégies optimales et détermine le temps total optimal pour un ensemble donné de lignes attractives

Pour la méthode des stratégies optimales, l'intervalle inter-véhiculaire est supposé constant, alors que pour la méthode Mint, il s'agit du temps maximum

La version actuelle de Mint a été testée sur deux réseaux réels de différentes taille, Winnipeg et l'Île de France. Les résultats sont encourageants et l'algorithme semble bien se comporter sur des réseaux de grande taille.

13 BIBLIOGRAPHIE

Florian M, Constantin I.(2011), *Emme Strategy Transit Assignments with Variants*, INRO, Montréal, QC, Canada, Ontario Emme Users' Group / ITE Toronto Meeting

INRO (2011), Emme prompt manual, INRO, Montréal, QC, Canada

R Development Core Team (2011). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Spiess H., Florian M. (1989), Optimal strategies: A new assignment model for transit networks, *Transportation Research Part B: Methodological*, **23** (2) 83-102

Wickham H. (2009), *ggplot2: elegant graphics for data analysis*, Springer New York,