

Amandine BROSSE  
Blandine CHAUVIN  
Emilie MORDACQUE

1A groupe 8  
Trinôme 84

**Département Mathématiques, Informatique et  
Physique**

# **Projet de modélisation**

10 juin 2005



## Table des matières

## Présentation du projet

Le projet consiste en l'étude de l'organisation de la flotte de véhicules dont dispose la SxTC (Société des Transports en Commun de l'agglomération de x) ainsi qu'en la proposition d'améliorations. Pour effectuer cette étude, les résultats d'une enquête ont été mis à notre disposition. Ces résultats comportent différents types de données: des données physiques (longueur de chaque ligne, nombre de bus affectés à chaque ligne, capacité de ces bus, vitesse moyenne des bus observées sur chaque ligne) et des données recueillies lors d'une enquête ponctuelle (nombre de voyageurs observés, attente moyenne qu'ils déclarent avoir subie avant de monter dans le bus, distance moyenne parcourue par ces voyageurs et la durée de l'enquête). Une autre donnée connue est la population de l'agglomération x qui s'élève à environ 400 000 habitants.

Ces données étant assez succinctes et les indications demeurant assez globales, il nous a fallu procéder à une recherche de documentation et formuler un certain nombre d'hypothèses pour nous permettre d'exploiter les données au mieux. Une fois toutes les hypothèses nécessaires formulées, nous avons pu modéliser l'état actuel du réseau à différentes périodes de la journée et mettre en évidence les faiblesses de certaines lignes par rapport à l'ensemble du réseau. Ce sont ces faiblesses constatées que nous avons essayé de pallier dans la seconde partie du projet en effectuant une nouvelle répartition des véhicules sur les lignes.

## I. Analyse des données recueillies lors de l'enquête

### 1. Traitement des données

#### a. Hypothèses

Le traitement des données a nécessité de poser certaines hypothèses sur ce que représentait précisément les données de l'enquête. Nous avons donc posé comme hypothèses préliminaires que :

- la longueur correspondait à la longueur physique de la ligne (i.e qu'elle ne correspondait qu'à un seul sens) et que la ligne avait la même longueur dans les deux sens de parcours
- le nombre de bus correspondait au nombre de bus disponibles pour la ligne. Il comprend donc les bus pour les deux sens de parcours de la ligne et ces bus sont considérés comme pouvant circuler tous simultanément sur la ligne. Les bus en révision et réparations diverses ne sont donc pas compris.

#### b. Traitement des données mises à disposition

Afin de mettre en évidence les caractéristiques de chaque ligne, nous avons calculé la moyenne  $m$  d'un certain nombre de variables ainsi que leur écart-type  $\sigma$  afin de procéder à un classement des lignes en 4 catégories pour chacun de ces paramètres selon la valeur  $v$  prise pour la ligne  $i$ . Nous avons défini quatre catégories :

- $v < m - \sigma$
- $m - \sigma < v < m$
- $m < v < m + \sigma$
- $m + \sigma < v$

#### c. Calcul d'indicateurs à partir des données

Nous avons également calculé certains indicateurs qui nous semblaient intéressants de connaître à partir des données de l'enquête :

- la capacité totale de la ligne
- le temps de parcours de la ligne (pour un sens)
- le nombre de voyageurs à prendre la ligne (pour un sens)
- le temps de séjour moyen des voyageurs dans le bus
- le taux de charge moyen au cours du trajet (rapport entre le nombre de voyageurs présent dans le bus et la capacité du bus)
- la période de passage des bus à un arrêt
- le rapport entre le temps d'attente et l'écart moyen entre 2 bus

## 2. Observations et interprétations

Le tableau ainsi obtenu permet de dégager un certain nombre de caractéristiques du réseau. Selon les paramètres envisagés, il est possible d'effectuer des rapprochements entre les différentes lignes du réseau.

#### a. Etude des lignes à partir de leurs caractéristiques physiques (longueur, vitesse)

On peut tout d'abord mettre en évidence les caractéristiques physiques du réseau en s'intéressant à la longueur des lignes et à la vitesse commerciale des bus roulant sur chaque ligne. On constate ainsi que les lignes les plus longues ont la vitesse commerciale la plus élevée (lignes 1,2,28 par exemple) et que les lignes courtes ont une vitesse commerciale plutôt faible (lignes 3,7,9,17 notamment). La vitesse commerciale correspond à la vitesse moyenne du bus sur la ligne. Cette vitesse correspond au rapport de la longueur de la ligne par le temps de parcours. Ce temps de parcours se décompose en plusieurs parties :

- temps de roulement (temps pendant lequel le bus est en mouvement)
- temps d'arrêts aux stations
- temps d'arrêts dus à la circulation

On peut donc supposer à partir de ces informations, que les lignes de faible longueur et vitesse commerciale correspondent plutôt à des lignes urbaines, situées dans le centre ville qui comportent de ce fait des arrêts assez rapprochés et sont soumises à des temps d'attente importants dus aux nombreux feux et problèmes de circulation. Les lignes de grande longueur et à vitesse

commerciale importante s'assimilent plutôt à des lignes effectuant des liaisons entre la périphérie et le centre de l'agglomération. Elles couvrent ainsi une distance importante mais conservent une vitesse commerciale assez élevée car les arrêts sont relativement éloignés et les routes empruntées comportent moins de feux et la vitesse autorisée peut être plus importante que les 50km/h voire par endroits les 30km/h du centre de l'agglomération. Les lignes ayant des caractéristiques intermédiaires peuvent, dans cette optique, être assimilées à des lignes reliant les différents quartiers de la ville entre eux.

### ***b. Etude des lignes à partir de leur fréquentation et de leur exploitation actuelle (nombre de bus, nombre de voyageurs, attente, taux de charge)***

En un second temps, il est nécessaire de s'intéresser à la répartition des bus sur les différentes lignes du réseau. Pour cela, nous avons étudié la fréquentation des lignes, le temps d'attente moyen des voyageurs ainsi que le taux de charge moyen des bus de chaque ligne. De cette étude, il semble se dégager un certain nombre de lignes qui ont été privilégiées comme les lignes 2, 4, 5, 7, 11, 20 et 25. Ces sept lignes concentrent 54,6% de la flotte de la compagnie. Cette concentration importante de moyens permet de garantir une attente moyenne très courte sur ces lignes, 255s en moyenne contre une moyenne de 505s pour l'ensemble du réseau. Ce choix de répartition des bus peut s'expliquer par la fréquentation importante de ces sept lignes, 49,2% des utilisateurs du réseau empruntent ces lignes. Le taux de charge des bus de ces lignes se situe autour de la moyenne du réseau voire parmi les plus faibles comme c'est le cas pour les lignes 7 et 11.

D'autres lignes ont des moyens beaucoup plus restreints en accord avec leur faible fréquentation. Ainsi les lignes 3, 10, 12, 14, 15, 16, 17, 22, 27 et 28 concentrent 10,5% des véhicules pour assurer le transport de 9,4% des utilisateurs du réseau. Il résulte du peu de nombres de véhicules, une fréquence de passage assez basse qui se traduit par un temps d'attente plus élevé sur ces lignes : 754s en moyenne contre 505s pour le réseau. Toutes ces lignes ont un temps d'attente moyen supérieur à la moyenne et c'est parmi elles que se trouvent les lignes du réseau qui ont les temps d'attente les plus élevés (lignes 10, 12, 16 et 28). En ce qui concerne les taux de charge, il existe une certaine disparité au sein de ce groupe de lignes. Si ce groupe contient les lignes dont le taux de charge est le plus élevé (lignes 12, 14, 15 et 17), il comporte aussi des lignes avec des taux de charge relativement inférieurs à la moyenne du réseau, notamment la ligne 16.

Les autres lignes (1, 6, 8, 9, 13, 18, 19, 21, 23, 24 et 26) ont des attentes et des taux de charge oscillant autour de la moyenne du réseau, sans trop s'en éloigner. Elles ne semblent pas avoir de fortes caractéristiques.

On peut constater que les deux optiques précédentes qui ne prennent pas en compte les mêmes paramètres n'aboutissent pas à la même classification des lignes.

### ***c. Temps d'attente et période de passage des bus***

Pour chaque ligne, nous avons calculé le rapport de l'attente sur la période des bus. Si les voyageurs arrivaient uniformément entre le passage de deux bus, le temps d'attente moyen devrait être égal à la moitié de la période des bus. Or nous avons constaté que ce rapport était inférieur à 50% sur toutes les lignes à l'exception de la ligne 21. Il semble que plus l'écart – horaire entre deux bus consécutifs est important, plus ce rapport est petit. En effet, les voyageurs n'arrivent pas aléatoirement à l'arrêt de bus, ils ont à leur disposition des horaires de passage. Plus les bus sont rares, plus les usagers se reportent à ces horaires afin d'éviter une trop longue attente. La valeur de ce rapport pour la ligne 21 (53,1%), peut s'expliquer par des retards importants par rapport aux horaires indiqués ou également par des correspondances mal coordonnées entre d'autres lignes et celle-ci.

## **II. Modélisation**

### **1. Choix effectués**

Les données de l'enquête peuvent être séparés en deux catégories : les données que nous considérerons comme fixes pour la modélisation et celles sur lesquelles nous serons susceptibles d'agir. Parmi les données fixes figurent :

- le nombre de lignes et leur longueur respective (n'ayant aucune indication sur la géométrie des lignes, on ne peut procéder à une restructuration des lignes à ce niveau)
- la vitesse
- les bus affectés à chaque ligne (on suppose, avant amélioration, que les bus demeurent affectés à la même ligne au cours de la journée)
- la distance moyenne parcourue par les voyageurs
- l'attente moyenne

Les données qui évoluent selon différents critères sont :

- le nombre de voyageurs : il évolue au cours de la journée
- le taux de charge

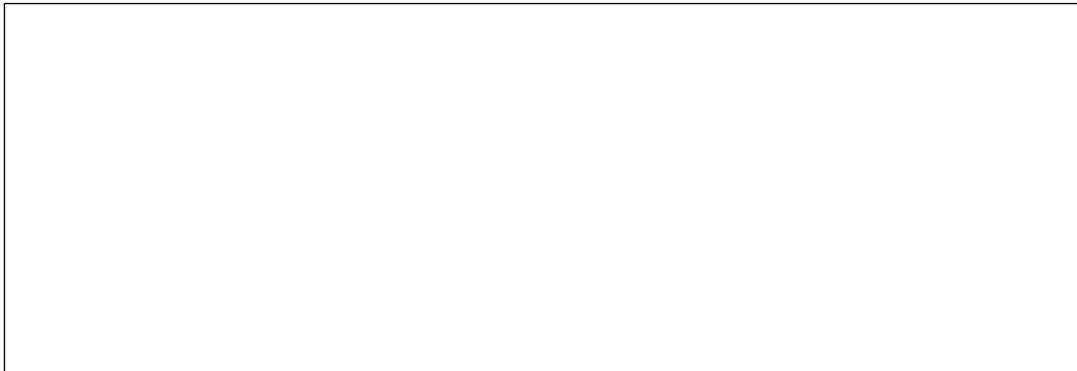
Nous avons donc décidé, à partir des données de l'enquête, de modéliser le comportement du réseau au cours de la journée.

## 2. Hypothèses

Les données étant des données moyennes qui ne prennent par conséquent pas en compte les variations pendant la durée de l'enquête, nous avons considéré qu'elles étaient homogènes sur la durée de l'enquête. Nous avons supposé que l'enquête avait été effectuée au cours d'une même tranche horaire sur toutes les lignes.

## 3. Modélisation

Pour modéliser l'évolution du réseau au cours de la journée, nous avons recherché des informations sur la répartition du trafic au cours de la journée. Nous avons retenu la représentation suivante qui est une représentation par tranches horaires. Les tranches horaires correspondent à l'heure de départ (donc au début du déplacement).



*Répartition du trafic sur la journée*

Nous avons considéré que le comportement du réseau était suffisamment homogène au sein de chaque tranche horaire pour qu'il puisse être représenté par des valeurs moyennes.

Il nous a ensuite fallu estimer au cours de quelle tranche horaire l'enquête avait été réalisée. Pour cela, nous avons estimé le pourcentage que les données de l'enquête représentaient par rapport au trafic journalier. Nous avons donc d'abord essayé de quantifier le trafic journalier sur le réseau de bus de l'agglomération x. A partir de données sur les transports en commun urbains de l'agglomération grenobloise (dont la taille est similaire à celle de l'agglomération x) qui dataient de 1997 et sur les déplacements urbains en Ile-de-France (données plus récentes datant de 2004), nous avons évalué à 0,4 le nombre de déplacements par habitant pour un jour de semaine. Nous obtenons donc un total de 160 000 déplacements quotidiens sur le réseau de la SxTC et un pourcentage d'environ 3,6% du trafic journalier pour une tranche d'1/2h au cours de l'enquête. Ce pourcentage correspond à celui d'1/2h au sein de la tranche horaire 11h30-14h15 pour la répartition du trafic quotidien retenue.

Pour obtenir le profil du réseau au cours d'une tranche horaire, il suffit alors de pondérer les données de l'enquête par le coefficient de proportionnalité correspondant ( $\%_{\text{tranche horaire}} / \%_{\text{enquête}}$ ). Nous avons ainsi obtenu 8 tableaux correspondant chacun à une tranche horaire.

## 4. Analyse des résultats

### *a. Avant 6h00 :*

Nous avons considéré que les bus commençaient à circuler à partir de 5h30. Si le pourcentage du trafic de cette tranche horaire est faible, il est concentré sur une étroite tranche horaire d'1/2h. Les taux de remplissage des bus ne sont donc pas aussi faibles que ce que l'on pourrait penser. Sa moyenne est de 19,28% et il varie entre 12,20% et 31,03%. Ce trafic correspond aux premiers départs du domicile pour le travail ainsi qu'éventuellement du trajet travail-domicile pour les personnes qui travaillent de nuit. Ce sont donc des déplacements réguliers. Les noctambules peuvent aussi emprunter ces bus pour regagner leur domicile mais comme nous sommes en semaine, leur part doit être relativement faible.

### *b. 6h00 – 8h15 :*

C'est la première pointe de la journée. Elle correspond au pic des départs pour l'école et le travail. Comme il s'agit de motifs de déplacement stables, la demande au cours de cette tranche horaire est assez régulière pendant l'année (hors vacances scolaires et sur semaine) et prévisible.



#### ***c.8h15 – 11h30 :***

Ce sont les heures creuses du matin. Les départs du domicile pour l'école et le lieu de travail ont quasiment eu tous lieu. Les motifs de déplacement de cette tranche horaire sont plutôt d'ordre ponctuels et donc plus difficiles à prévoir. Les taux de charge sont faibles : 16,46% en moyenne, 10,42% au minimum et 26,5% au maximum.

#### ***d.11h30 – 14h15 :***

Le trafic s'intensifie un peu et atteint une valeur moyenne. Cette tranche horaire correspond au temps de midi. Les voyageurs effectuent donc principalement des allers-retours travail/école – domicile/lieu de restauration. Il s'agit de déplacements réguliers. Le taux de charge moyen des bus est de 33,83% et va de 21,41% à 54,45% selon les lignes.

#### ***e.14h15 – 16h15 :***

Après le léger pic de midi, le trafic diminue tout en demeurant supérieur au creux du matin. Cette tranche horaire correspond aux heures creuses de l'après-midi. Les motifs des voyages peuvent être professionnels (déplacements dans le cadre de ses horaires de travail pour assister à des réunions,...) ou relever plutôt du loisir, notamment le mercredi puisque de nombreux scolaires n'ont pas cours. Ces déplacements sont moins réguliers et plus difficiles à estimer. Le taux de charge a une moyenne de 29,88% et varie entre 18,91% et 48,10%.

#### ***f. 16h15 – 18h30 :***

Le trafic s'intensifie de manière notable : il s'agit de la pointe du soir. Elle correspond au retour du travail et de l'école au domicile qui s'accompagne souvent de déplacements supplémentaires pour faire diverses courses. Il s'agit de nouveau de déplacements prévisibles et réguliers. Le réseau bien que fortement sollicité arrive encore à répondre à la demande puisque sur aucune ligne le taux de charge n'atteint les 100% (ce qui correspond à une demande égale à la capacité de la ligne). Le taux de charge est compris entre 35,25% et 89,65% et a une valeur moyenne de 55,70%.

#### ***g. 18h30 – 20h00 :***

La pointe du soir est passée. On assiste à une diminution importante du trafic. Les motifs de voyage peuvent être des retours plus tardifs au domicile mais également une part de loisirs qui suivent le travail ou l'école. Le taux de charge est faible avec une moyenne de 15,12%. Il culmine à 24,83% et descend jusqu'à 9,76%.

#### ***h. Après 20h00 :***

Nous avons considéré que les bus ordinaires circulaient jusqu'à 21h30. Au-delà de cette heure, ce sont les bus de nuit qui prennent le relais. Le trafic est assez faible dans cette tranche horaire. Les déplacements ont essentiellement comme motif les loisirs. Si une partie d'entre eux peut être régulière, il est probable qu'un grand nombre soit ponctuel et donc difficilement prévisible. Dans la mesure où tout les bus circulent, les taux de charge sont extrêmement bas : ils varient entre 3,46% et 8,79% pour une valeur moyenne de 5,48%.

# Propositions d'améliorations

## I. Hypothèses

Comme lors de la modélisation, nous avons défini certains paramètres comme étant fixes et d'autres comme étant modifiables. Les paramètres que nous considérerons fixes sont :

- le nombre de ligne, leur longueur et leur vitesse commerciale
- le nombre de bus total dont dispose l'ensemble du réseau
- le nombre de voyageurs empruntant chaque ligne sur la plage horaire considérée
- la distance moyenne parcourue
- le rapport de l'attente sur le temps entre le passage de deux bus consécutifs

Les améliorations porteront sur les paramètres variables :

- le nombre de bus affecté à chaque ligne et donc le taux de charge
- le temps entre le passage de deux bus consécutifs et par conséquent l'attente

Nous considérons toujours que le comportement du réseau au sein d'une des tranches horaires préalablement définies est suffisamment régulier pour que les valeurs moyennes soient représentatives de la réalité.

## II. Méthode

Les caractéristiques du réseau que nous nous proposons d'améliorer sont les temps d'attente et le taux de charge des bus. Pour cela, nous pouvons agir sur la répartition du parc de bus de la compagnie SxTC sur les différentes lignes. Par les formules qui relient le nombre de bus à l'écart entre le passage de deux bus consécutifs et donc l'attente, on sait qu'une augmentation du nombre de bus affectés à une ligne provoquera une baisse du temps d'attente et qu'inversement sa baisse augmentera l'attente des usagers. De même, une augmentation de la capacité totale de la ligne diminue le taux de charge moyen et sa diminution augmente le taux de charge.

Cependant quelle que soit la fonction d'optimisation choisie, il est nécessaire que le résultat réponde à certaines contraintes. Tout d'abord que le nombre total de chaque type de bus (90, 100, 130, 135) affectés aux lignes n'excède pas les moyens dont dispose la compagnie SxTC (hypothèse de la fixité du nombre de bus total). En outre, il semble indispensable que le réseau soit en mesure de répondre à la demande après les modifications apportées puisqu'il est, dans l'état initial, en mesure de le faire. On doit donc obtenir un taux de charge inférieur à 100%, puisqu'un taux de charge supérieur à 100% signifierait que le bus transporte plus de passagers que sa capacité, ce qui est, peut-être, possible dans une certaine mesure mais non souhaitable ou que des passagers sont obligés de rester à l'arrêt malgré le passage du bus.

A partir des connaissances acquises au cours de l'année, nous avons donc décidé de nous orienter vers l'algorithme du simplexe qui permet de résoudre un problème d'optimisation en tenant compte de contraintes. Les contraintes imposées par l'utilisation du simplexe sont l'existence de relations linéaires entre les inconnues que l'on souhaite déterminer et les contraintes et la fonction à optimiser.

Les inconnues à déterminer sont le nombre de chaque type de bus affectés à chaque ligne. Nous avons donc  $4 \times 28 = 112$  inconnues à déterminer plus les variables d'écart qu'il sera nécessaire d'introduire pour le fonctionnement de l'algorithme. La relation entre ces variables et la capacité de chaque ligne est clairement linéaire :

$$\text{capacité} = 90 \cdot n_{90} + 100 \cdot n_{100} + 130 \cdot n_{130} + 135 \cdot n_{135}$$

Par contre la relation entre ces variables et le temps d'attente n'est pas linéaire. En effet :

$$\text{attente} = \frac{\text{attente initiale}}{\text{période initiale}} \times \frac{2 \times \text{temps de parcours}}{n_{90} + n_{100} + n_{130} + n_{135}}$$

Il semble donc plus judicieux de se référer à une autre variable comme la fréquence de passage des bus pour une ligne :

$$\text{fréquence} = \frac{n_{90} + n_{100} + n_{130} + n_{135}}{2 \cdot \text{temps de parcours}}$$

ou de définir une fonction pondérée du nombre de bus sur chaque ligne, en mettant un poids plus important pour les variables représentant le nombre de bus affectés aux lignes dont on souhaite diminuer l'attente. L'application à des cas concrets va permettre de déterminer la méthode à utiliser et une fonction d'optimisation permettant de remplir les objectifs fixés.

### **III. Application aux heures de pointe du soir**

#### **1. Objectifs**

La distribution initiale des bus comporte plusieurs faiblesses au moment des heures de pointe du soir. Sur certaines lignes, le taux de charge est très élevé (presque 90% sur la ligne 28) ce qui diminue le confort des passagers. De plus, ces lignes ayant un taux de charge élevé ne pourraient pas faire face à une croissance du trafic. En considérant également qu'il s'agit de valeurs moyennes, il est plausible qu'avec un taux de charge de 90%, certains bus atteignent un taux de charge voisin de 100% et que donc certains usagers se trouvent dans l'incapacité de monter dans le premier bus passant à l'arrêt pour cause de manque de place et soient alors contraints d'attendre le bus suivant.

Les temps d'attente sont également très disparates selon les lignes.

Nous avons donc défini plusieurs objectifs :

- diminuer l'attente moyenne des lignes et l'amplitude des attentes selon les lignes
- assurer le confort des passagers et permettre de faire face à un trafic plus important en diminuant les taux de charge

#### **2. Mise en œuvre**

Nous avons donc décidé d'imposer des contraintes sur le taux de charge :

$$30\% \leq \text{taux de charge} \leq 70\%$$

La contrainte inférieure permet de ne pas avoir des bus trop sous-utilisés alors que le trafic est à son maximum sur le réseau. La contrainte supérieure permet de ne pas avoir des bus saturés et donc d'augmenter le confort des passagers et de permettre de répondre à une éventuelle augmentation de la demande sur la ligne. La fonction à optimiser retenue est un croisement des deux possibilités exposées précédemment au paragraphe méthode. En effet maximiser la fréquence moyenne n'équivaut pas à minimiser l'attente moyenne. Or les objectifs portent sur l'attente et non la fréquence. En utilisant une fonction du nombre de bus combinant la fréquence obtenue après les modifications avec une fonction linéaire du nombre de bus pondéré par l'attente initiale, les résultats se sont avérés meilleurs que ceux obtenus en ne maximisant qu'une seule de ces fonctions. L'établissement de la fonction à optimiser a été quelque peu empirique mais il était difficile de fixer des coefficients a priori.

#### **3. Résultats**

Après les modifications apportées, l'attente moyenne a, conformément aux objectifs, diminué. L'attente moyenne est de 394s contre 505s initialement, soit une baisse de l'attente moyenne de 22%. On peut également constater que l'attente cumulée (somme des attentes pondérées par le nombre de passagers) a diminué ce qui n'était pas nécessaire (l'inverse aurait pu se produire étant donné qu'aucune contrainte n'avait été imposée). Cette baisse est très légère et non significative (seulement 0,2%). L'écart-type de l'attente moyenne a également diminué en passant de 198s à 75s. Le maximum du temps d'attente a diminué (527s contre 952s initialement) et son minimum a quant à lui augmenté (251s contre 172s initialement). Les disparités des temps d'attente ont donc bien été diminuées. Les temps d'attente ont été uniformisés respectant ainsi l'objectif fixé. On observe également que les minima des temps d'attente ne se situent plus sur les mêmes lignes. Certaines lignes ont vu leur temps d'attente augmenter pour permettre de diminuer celui d'autres lignes. Certaines lignes qui avaient initialement un temps d'attente inférieur à la moyenne se retrouvent avec un temps d'attente supérieur à la moyenne et inversement.

En ce qui concerne les taux de charge, les contraintes sont bien respectées. Les valeurs extrémales du taux de charge, 30% et 65% se situent bien dans les bornes fixées. Avec une valeur de 47,7%, le taux de charge moyen a baissé de 8 points. Par contre l'écart-type a augmenté 3,6 points.

### **IV. Application aux heures creuses du matin**

#### **1. Objectifs**

La situation au moment des heures creuses du matin est très différente de celle des heures de pointe du soir. Le taux de charge des bus est très bas car la demande est beaucoup plus faible. Cette fois l'objectif n'est plus de diminuer l'attente mais de faire des économies par rapport au coût d'exploitation. L'objectif est donc de diminuer le nombre de bus circulant sur les lignes et de faire augmenter le taux de charge. Cependant il est nécessaire de garantir également un service minimum sur chaque ligne.

## **2. Mise en œuvre**

Nous avons cette fois procédé à une optimisation ligne par ligne. Nous avons minimisé le nombre de bus circulant sur chaque ligne (en n'envisageant que des bus de 90 places) en imposant une contrainte à respecter absolument : un taux de charge supérieur à 10% et une contrainte à respecter dans la mesure du possible : une attente inférieure à 10min.

## **3. Résultats**

On observe que le nombre de bus en circulations a bien diminué : seuls 146 bus circulent. Comme il y a au total 181 bus de 90 places, l'hypothèse selon laquelle seuls des bus de 90 places circulent est bien vérifiée. La contrainte sur les taux de charge est bien respectée sur toutes les lignes. Le taux de charge moyen est de 22,56% il a donc augmenté de plus de 6 points. Le taux de charge varie entre 11,82% et 42,06%. Le taux de charge minimum a donc été augmenté de 1,4 points et le taux de charge maximal a augmenté de 16 points. La contrainte secondaire sur l'attente moyenne est remplie sur la plupart des lignes (sur toutes les lignes où cela était possible en conservant un taux de charge supérieur à 10%). L'attente moyenne est de 592s, elle n'a donc augmenté que de 17% alors que le nombre de bus en circulations a diminué de 33%. La compagnie réalise donc des économies sur les coûts de fonctionnement tout en n'augmentant que modérément les temps d'attente.

## Conclusion

Les méthodes mises en œuvre pour améliorer le réseau ont donné des résultats conformes aux objectifs préalablement fixés. Nous avons décidé de traiter ce projet en envisageant les différentes tranches horaires caractéristiques du trafic. C'est la modélisation pour laquelle nous avons opté qui a conditionné les paramètres que nous avons modifiés et les types d'améliorations envisagées. Il y avait une multitude d'autres façons d'aborder ce projet en se basant sur des hypothèses différentes, en considérant comme fixes d'autres paramètres,... qui aboutissent à autant de propositions d'améliorations différentes. Il aurait pu être intéressant d'envisager la modification de la vitesse commerciale des bus en fonction de la période de la journée car elle dépend des conditions de circulation qui ne sont pas constantes au cours de la journée ainsi que du nombre de passagers puisque plus il y a de passagers à monter et descendre aux arrêts, plus le temps d'arrêt aux stations est élevé.

Nous avons essayé d'adopter une démarche cohérente et de recueillir des données pour pouvoir réaliser une modélisation aussi réaliste que possible. Mais il est parfois difficile de trouver certaines données, notamment pour fixer les contraintes sur les taux de charge. Les méthodes ont été appliquées avec des contraintes qui nous semblaient plausibles et les résultats obtenus demeurent cohérents et acceptables dans leur ensemble.

La grande autonomie dont nous avons disposé pour ce projet est relativement inhabituelle dans les autres projets. Pourtant elle permet de s'approcher d'une situation de travail réaliste et de prendre des initiatives : recherche de documentation, choix des hypothèses nécessaires pour simplifier un problème très complexe comportant de nombreux paramètres à différents stades du projet... Il a permis de faire appel à des notions abordées dans différents cours notamment dans ceux de probabilités et statistiques pour l'analyse des données et dans ceux d'informatique et de recherche opérationnelle plus spécifiquement pour l'amélioration du réseau.

## Annexes

### Formules des calculs effectués sur les données

Temps de parcours de la ligne (s):

$$\frac{\text{longueur de la ligne}}{\text{vitesse}}$$

Nombre de voyageurs à emprunter la ligne dans un sens

$$\text{Nombre de voyageurs observés pendant l'enquête} \times \frac{\text{Temps de parcours}}{\text{Durée de l'enquête}}$$

Temps de séjour moyen des passagers dans le bus

$$\frac{\text{Distance moyenne parcourue}}{\text{Vitesse}}$$

Taux de charge (taux de remplissage moyen du bus)

$$\frac{\text{Nombre de passagers à emprunter un bus} \times \text{temps de séjour moyen}}{\text{Temps de parcours}} \times \frac{1}{\frac{\text{Capacité totale}}{2}}$$

Période de passage des bus (écart entre 2 bus consécutifs)

$$\frac{2 \times \text{temps de parcours}}{\text{Nombre de bus}}$$

Attente cumulée

$$\text{Nombre de passagers} \times \text{attente moyenne}$$

## Sources

- Déplacements, l'ère de la gestion  
Congrès international francophone  
Parc Floral de Paris du 28 au 30 janvier 1998  
Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
  
- Les déplacements des Franciliens en 97-98 : Enquête globale de Transport  
DRE d'Ile-de-France Division des infrastructures et des transports
  
- Les déplacements en transports collectifs dans l'agglomération lyonnaise  
Syndicat des Transports en commun de la région lyonnaise  
Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement de Lyon  
DDE du Rhône
  
- Les cahiers de l'enquête globale de transport, avril 2005  
L'impact des modes de vie sur les déplacements  
Jérémy Courel  
Alain Meyere  
Dany Nguyen-Luong
  
- Annuaire statistique des transports collectifs urbains 1997-1998