

ENTPE

Ecole Nationale des
Travaux Publics de
L'Etat

Projet de modélisation

Charvet Samuel
Senaillet Julien
Cornolle Florian
Trinôme 56
Promotion B

Sommaire

1	Présentation du sujet.....	3
2	Démarche	3
3	Première approche/Etude préliminaire.....	4
3.1.	Premier modèle	4
3.2.	Second modèle	5
4	Adaptation du modèle théorique précédent en fonction des données à disposition.....	5
4.1.	Analyse du tableau de données	5
4.2.	Exploitation du tableau de données (calcul des paramètres utiles).....	6
4.3.	Analyse des valeurs trouvées.	7
4.4.	Résolution.....	8
5	Propositions.....	10
5.1.	Proposition 1	10
5.2.	Proposition 2	11
5.3.	Proposition 3	11
5.4.	Commentaires :	12
6	Conclusion.....	12
6.1.	Choix d'une solution	12
6.2.	Limites du modèle.....	12
7	Annexes.....	13

1 Présentation du sujet

Venant d'être embauchés par la société de transports en commun de x, (agglomération d'environ 400 000 habitants) notre premier travail consiste à réaliser une étude sur l'organisation de la flotte de véhicules dont dispose la société et de proposer des améliorations. Nous disposons de plusieurs 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, observée sur chaque ligne
- Des données issues d'une enquête menée il y a peu sur le réseau et qui a recensé l'intégralité des voyageurs :
 - nombre de voyageurs observés
 - attente moyenne qu'ils déclarent avoir subie avant de monter dans le bus
 - distance moyenne parcourue par ces voyageurs
 - durée de l'enquête

2 Démarche

En premier lieu, nous avons cherché à déterminer quels types d'amélioration étaient attendus. Il est apparu que minimiser le temps d'attente sur chacune des voies de bus, (autrement dit augmenter la vitesse commerciale des bus sur chaque ligne) était l'objectif que nous devions nous fixer.

Afin d'atteindre cet objectif, nous avons procédé à la démarche suivante : nous avons d'abord mené une étude théorique simplifiée afin de déterminer la façon de calculer le temps d'attente d'un passager pour un cas simple. Ensuite nous avons adaptée cette étude en fonction des données dont nous disposions (tout en vérifiant régulièrement la cohérence de nos résultats).

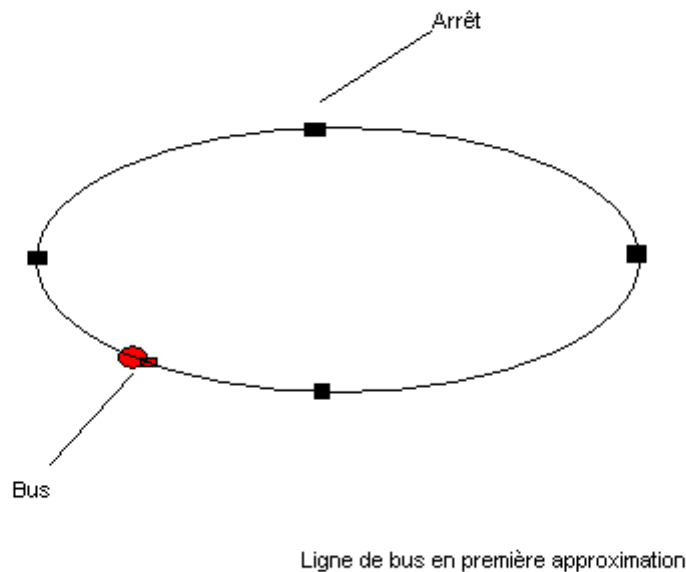
Enfin nous avons cherché la méthode à appliquer pour résoudre les équations obtenues.

La méthode que nous avons alors choisi d'appliquer est celle du simplexe. Pour résoudre le problème nous avons donc procédé à une phase de programmation sous Matlab (étant donné un nombre d'inconnus trop important pour faire le calcul à la main).

Finalement nous avons procédé à l'analyse des solutions obtenues.

3 Première approche/Etude préliminaire

3.1. Premier modèle



On se place dans le cas 1 seule ligne de bus avec 1 seul bus.
On considère la ligne de bus ci-dessus.
On admet que sur chacun des tronçons le bus roule de manière uniforme.
On se place sur une période de fonctionnement en continu du bus.
On admet que les voyageurs sont répartis uniformément sur les arrêts.

On note

T : le temps d'attente moyen d'un passager.
 V : la vitesse du bus sur chaque tronçon.
 L : la longueur de la ligne.
 N_v : le nombre de voyageurs à chaque arrêt.
 α : le temps moyen mis par un voyageur pour descendre du bus.
 N_a : le nombre d'arrêts total de la voie.

Alors T apparaît comme la somme de deux contributions :

- T_1 : le temps mis par le bus pour parcourir la distance qui le sépare du passager.
- T_2 : le temps perdu à chaque arrêt séparant le passager du bus qui doit le prendre

Avec :

$$T_1 = L/V.$$

$$T_2 = N_v * (2 * \alpha / 5 + 10) * N_a.$$

Le terme 10 représente la perte de temps ayant lieu lors des accélérations et décélérations (on suppose ainsi ce temps indépendant de la vitesse). On divise α par 5 car on estime que cinq personnes ont le temps de descendre du bus en même temps. On multiplie le tout par deux car on se place dans l'hypothèse où tous les voyageurs qui montent à un arrêt descendent à l'arrêt suivant : on se place dans le cas du comportement du voyageur moyen. Enfin on considère que les voyageurs arrivent tous ensemble à un arrêt juste au moment où le bus vient de partir ce qui permet d'avoir une marge de sécurité pour le temps d'attente.

3.2. Second modèle

Ayant trouvé une approximation de T on peut alors tenter de complexifier le problème : on considère n voies qui possèdent chacune N_i bus. Alors, en notant :

T_i : le temps d'attente moyen d'un passager.
 V_i : la vitesse du bus sur chaque tronçon.
 L_i : la longueur de la ligne.
 N_{vi} : le nombre de voyageurs à chaque arrêt.
 α : le temps moyen mis par un voyageur pour descendre du bus.
 N_{ai} : le nombre d'arrêts total de la voie.
 N_i : le nombre de bus circulant sur la voie i.

Il vient :

$$T_i = T_{1i} + T_{2i}$$

avec

$$T_{1i} = L_i / V_i$$

$$T_{2i} = N_{vi} * (2 * \alpha / 5 + 10) * N_{ai} / N_i$$

On obtient ainsi une formule approchée du temps d'attente moyen d'un passager.

4 Adaptation du modèle théorique précédent en fonction des données à disposition

4.1. Analyse du tableau de données

4.1.1. Présentation

Il s'agit d'un tableau dans lequel sont répertoriées des données physiques ainsi que des données issues d'une enquête.

Les données physiques.

- la longueur de chaque ligne. On note L_i la longueur de la ligne i. L'hypothèse faite ici est que la L_i représente la distance que parcourt un bus pour faire un aller retour à partir d'un point donné.

- la vitesse moyenne observée sur chaque ligne. On note V_{ci} la vitesse moyenne d'un bus sur la voie i . On considère que V_{ci} représente la vitesse commerciale du bus c'est-à-dire la vitesse correspondant au temps total que met le bus pour parcourir la distance L_i (on tient en compte le temps des arrêts).
- le nombre de bus sur chaque ligne et leur capacité. On note A_i, B_i, C_i et D_i les bus de capacité respectives $C_1=90, C_2=100, C_3=130$ et $C_4=135$ présents sur la ligne i . On considère que ces bus tournent en continue sur la voie i pendant la période d'observation.

Les données issues de l'enquête

- le nombre de voyageurs observés
- attente moyenne qu'ils déclament avoir subie avant de monter dans le bus
- distance moyenne parcourue par ces voyageurs
- durée de l'enquête

4.1.2. Premier diagnostic : justification de l'optimisation

Les vitesses commerciales constatées sont de l'ordre de grandeur des vitesses commerciales moyennes des grandes agglomérations françaises (entre 12 et 18 km/heure) pour la plupart des lignes mais pas pour toutes. Sans doute y a-t-il un effort à faire de ce côté-là. Par ailleurs, on note, un temps d'attente de 952 secondes sur la voie 10 ce qui est beaucoup.

On note enfin un déséquilibre des temps d'attente entre les voies 8 et 21 : alors que la voie 8 est plus peuplée que la voie 21 le temps d'attente d'un voyageur sur cette voie est plus grand.

Il convient donc de procéder à une optimisation de la répartition du nombre de bus.

4.2. Exploitation du tableau de données (calcul des paramètres utiles)

4.2.1. Calcul du nombre de personnes présentes à chacun des arrêts N_{vi} (toute configuration)

On se place dans le cas d'une répartition uniforme temporelle et spatiale (c'est-à-dire uniforme entre tous les arrêts) du nombre de personnes sur chacune des voies et entre les bus. On considère donc que les bus en circulation sont pleins.

Cela nous permet d'obtenir :

$$N_{vi} = (N_{vtot} - C_1 * A_1 - C_2 * A_2 - C_3 * A_3 - C_4 * A_4) * (D_{mi} / L_i) * (L_i * 3600 / V_{ci}) / D_i$$

$N_{vtot} - C_1 * A_1 - C_2 * A_2 - C_3 * A_3 - C_4 * A_4$ représente le nombre de voyageurs effectivement présents sur la voie i .

L_i / D_{mi} représente le nombre d'arrêts sur la voie i .

$D_i / (L_i * 3600 / V_{ci})$ représente le nombre de tours sur la voie i que fait un bus pendant la durée de l'enquête.

4.2.2. Calcul du temps perdu sur l'ensemble des arrêts qui sépare le voyageur du bus qu'il va prendre, par un bus pour la configuration initiale

$$T_{arrêts} = (N_{vi} * \alpha_2 + 10) * (L_i / D_{mi}) * 1 / (A_i + B_i + C_i + D_i)$$

α_2 représente le temps de "déversage-remplissage du bus" : tps mis par une personne pour descendre du bus divisé par le nombre de voyageurs qui peuvent descendre du bus en même temps multiplié par 2 (pour tenir

compte du temps de montée des nouveaux voyageurs et de descente des anciens voyageurs qu'on considère identiques). Arbitrairement on peut estimer que $\alpha_2 = 2 * 3/5$ (à réévaluer). 5 car on considère que le bus possède 3 doubles portes.

3 car un voyageur met en moyenne 3 secondes à descendre du bus.

10 représente le temps perdu lors des phases d'accélération et de décélération.

4.2.3. Vitesse réelle des bus

On en déduit le temps de parcours de la ligne sans arrêt :

$$T_p = T_{attente} - T_{arrêts}$$

Or $T_p = L_i/V_i$ où V_i est la vitesse moyenne réelle du bus (vitesse sans arrêt).

On en déduit le calcul de V_i qu'on supposera la même quelle que soit la configuration des bus (on suppose que le nombre de bus sur une voie n'influe pas sur la vitesse moyenne réelle de ces bus).

4.2.4. Calcul de $T_{attente_i}$

$$T_{attente_i} = L_i/(V_i*(A_i+B_i+C_i+D_i)) + (N_{vi} * \alpha_2 + 10)*(L_i/D_{mi}) * 1/(A_i+B_i+C_i+D_i)$$

Il apparaît ainsi que

$$T_{attente_i} = w_i/(A_i+B_i+C_i+D_i)$$

Où w_i est une constante propre à la ligne i .

On calcule donc w_i à partir de la configuration initiale.

On obtient alors $T_{attente_i}$ en fonction de la répartition des bus sur la voie.

Les valeurs ainsi calculées sont reportées en annexe 5.

4.3. Analyse des valeurs trouvées.

L'ensemble des résultats est consigné dans le tableau « calcul des données utiles », porté en annexe.

4.3.1. Nombre de voyageurs par arrêt

Tout d'abord rappelons en outre que dans l'approximation dans laquelle on s'est placé, le nombre d'arrêts considéré est ramené au nombre d'arrêts utiles : on calcule le nombre d'arrêt à partir de la distance moyenne parcourue par un voyageur. Ce qui veut dire que tous les voyageurs se comportent comme le voyageur moyen et qu'un groupe de voyageurs peut être identifié à une variable unique : tous les voyageurs qui montent à l'arrêt i descendent à l'arrêt $i+1$.

On constate qu'on observe des nombres de voyageurs relativement important sur certaines lignes. Notamment 94 voyageurs sur la ligne 2 à chaque arrêt. Cela veut donc dire que sur la ligne 2, dans notre modèle, et dans la configuration initiale à chaque arrêt le bus laisse des voyageurs dehors. Autrement dit certains voyageurs ont leurs temps d'attente doublé car ils doivent attendre le passage d'un deuxième bus. Ceci est un problème que nous évoquerons dans la partie 4.4.2.

Par ailleurs, les nombres de voyageurs restant pour la plupart inférieurs aux capacités des bus on tire plusieurs conclusions : d'une part que la configuration initiale des bus n'est pas trop mauvaise car elle permet d'accueillir

la plupart des voyageurs sans saturation. D'autre part que notre modélisation n'est pas trop « mauvaise » car les résultats à ce stade ne paraissent pas aberrants.

4.3.2. Temps des arrêts du prochain bus

Ce temps est donc la différence entre le temps d'attente du voyageur et le temps que mettrait le bus le plus proche du groupe de voyageur qui l'attend, à parcourir cette distance. L'ordre de grandeur d'une moyenne de 39 secondes semble cohérent : il n'est pas trop élevé.

4.3.3. Vitesse du bus

Les vitesses des bus semblent très cohérentes : la moyenne est de 24.7 km/heures. C'est une vitesse qui colle à la réalité. Cependant on observe un gros écart sur la ligne 28 avec une vitesse de 51.7 km/heures. Comme on se trouve en agglomération et que la vitesse est limitée à 50km/heures on pourrait soupçonner les chauffeurs de bus de ne pas respecter le code de la route. Mais étant donné la très grande longueur de cette ligne (20,04 km) on peut peut-être supposer que le bus emprunte des portions limitrophes de l'agglomération, où il roule sur des routes où la limitation de vitesse n'est pas à cette hauteur.

4.3.4. Pondération bêta

Le calcul de la pondération bêta est le suivant :

β_i représente le rapport du nombre total de personnes fréquentant la voie i par le nombre total de personnes fréquentant la totalité des voies.

Les voies les plus peuplées sont donc les voies 8 et 2 (avec une pondération de 0,09) suivies de la voie 5 (pondération 0,07).

4.4. Résolution

Objectif :

Maximiser $\sum_i \beta_i * 1/T_i$

avec β_i qui représente le rapport du nombre total de personnes fréquentant la voie i par le nombre total de personnes fréquentant la totalité des voies (propositions 1 et 2). On privilégie alors un temps d'attente plus faible pour les voies les plus fréquentées.

4.4.1. Définition de la matrice des contraintes

Dans un premier temps on établit une première série d'équations de contraintes qui tiennent en compte la capacité de transport des bus sur chacune des voies. Le nombre total de personnes présentes sur le tour de voie doit être inférieur au nombre totale de places disponibles dans tous les bus. Ce qui se traduit par les n équations ci-dessous :

$$\begin{aligned} A1*c1 + B1*c2 + C1*c3 + D1*c4 - E1 &= Nvt1 \\ A2*c1 + B2*c2 + C2*c3 + D2*c4 - E2 &= Nvt2 \\ \dots\dots\dots &= \dots\dots\dots \\ An*c1 + Bn*c2 + Cn*c3 + Dn*c4 - En &= Nvtn \end{aligned}$$

Où

- E_i représente le nombre de voyageurs supplémentaires qu'il faudrait pour remplir tous les bus de la voie i .
- N_{vt} représente le nombre de voyageurs total présent sur un tour de ligne.

Dans un second temps on établit une deuxième série d'équations de contraintes qui tiennent en compte les contraintes des nombres de bus de chaque type disponibles (un type correspond à une capacité particulière). Avec les notations précédentes, on a les 4 équations ci-dessous.

$$\sum A_i + S_1 = 181$$

$$\sum B_i + S_2 = 20$$

$$\sum C_i + S_3 = 6$$

$$\sum D_i + S_4 = 11$$

Où S_1, S_2, S_3 et S_4 représentent respectivement les nombres de bus de capacité 90, 100, 130 et 135 qui n'ont été affectés sur aucune voie (lors de la configuration initiale ces quantités sont nulles).

D'après ce qui précède le problème se ramène à la résolution du système ci-dessous :

$N > 0$
 $A * N = b$
 Maximiser $\sum c_t * N$

$$b = \begin{bmatrix} 181 \\ 20 \\ 6 \\ 11 \\ N_{vt1} \\ N_{vt2} \\ \dots \\ N_{vtn} \end{bmatrix} \quad \text{résolution} \quad N = \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \\ D_1 \\ E_1 \\ A_2 \\ B_2 \\ C_2 \\ D_2 \\ E_2 \\ \dots \\ \dots \\ A_n \\ B_n \\ C_n \\ D_n \\ E_n \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{bmatrix}$$

Avec

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & -1 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$c_t = \begin{bmatrix} \beta_1/w_1 & \beta_1/w_1 & \beta_1/w_1 & \beta_1/w_1 & 0 & \beta_2/w_2 & \beta_2/w_2 & \beta_2/w_2 & \beta_2/w_2 & 0 & \dots & \dots & \beta_n/w_n & \beta_n/w_n & \beta_n/w_n & \beta_n/w_n & 0 \end{bmatrix}$$

Lors de la résolution de ce système il est apparu opportun d'ajouter d'autres contraintes (voir constat des résultats de la proposition 1) : des contraintes de temps d'attente maximal sur une voie.

Ce qui se traduit par $T_{attente_i} < k$.

Où k est le temps maximal d'attente tolérable.

Or on a vu précédemment que $T_{attente_i} = w_i / (A_i + B_i + C_i + D_i)$. Donc on transforme ces contraintes en n équations supplémentaires :

$$-k * (A_i + B_i + C_i + D_i) + P_i = -w$$

où P_i est une quantité positive.

On a alors modifié les matrices précédentes en ajoutant les n variables P_i au vecteur N , on a ajouté n colonnes de zéros au vecteur ct , on a ajouté les n lignes de contraintes correspondantes aux matrices A et b . Le principe de construction étant le même que précédemment nous avons pas jugé utile de l'expliquer plus amplement ici.

4.4.2. Extensions possibles

Pour tenir compte du problème de la partie 4.3.1 et donc se débrouiller pour que chaque voyageur monte dans le bus à chaque arrêt on peut introduire des contraintes telle que la capacité moyenne (ou bien de chacun des bus si le problème a une solution) des bus soit supérieur ou égale au nombre de voyageurs présents à chaque arrêt.

Par ailleurs on pourrait ajouter des contraintes qui permettraient d'empêcher que le temps de parcours à pied jusqu'au prochain arrêt soit supérieur au temps d'attente du bus. Ici ce n'est pas utile car ce temps pris excède en moyenne très largement celui du plus grand temps d'attente qu'on puisse trouver dans l'ensemble des propositions que nous avons faites ici (en prenant un piéton qui voyage à une vitesse moyenne de 5km/heure). Mais ce genre de contrainte pourrait être utile dans le cas où l'on aurait à disposition le nombre d'arrêts de bus et où l'on modéliserait de manière plus complexe les flux de voyageurs.

4.4.3. Identification de la méthode de résolution et programmation

La méthode de résolution qui apparaît alors ici la plus pertinente est la méthode du simplexe. En effet toutes les conditions pour son application sont vérifiées.

Nous avons donc procédé à la résolution du système par application de cette méthode.

Nous avons commencé par définir les matrices dans un fichier Matlab appelé `matrices.m`. Puis nous avons créé une fonction principale nommée `principale()` qui appelle la fonction `matrices()` pour générer les matrices A , b , et c . Cette fonction principale appelle ensuite une fonction `simplexe()` qui résout le simplexe correspondant.

Cette fonction simplexe a été récupérée lors du dernier tp de MRO : elle n'est donc pas de notre cru. Cependant pour vérifier la justesse des résultats nous l'avons testé sur des exemples simples.

Nous avons après avoir programmé cette méthode, résolu le problème sous 3 façons différentes (correspondant à trop types d'exigences différentes) et consignés les résultats obtenus dans des tableaux excels portés en annexe. Les résultats obtenus sont commentés ci-dessous.

5 Propositions

5.1. Proposition 1

Comme la résolution se fait par l'algorithme du simplexe les solutions obtenues ne sont pas entières. L'idéal serait d'inclure l'algorithme du simplexe dans une heuristique. Cependant par manque de temps, il ne nous a pas été possible de procéder à une telle méthode.

C'est pourquoi nous avons procédé à une méthode alternative : on arrondit les nombres de bus à l'entier le plus proche. On obtient alors les résultats portés en annexe 1.

On observe cependant un problème : il y a certes un nombre total de bus de 218 comme au départ mais on a 1 bus de capacité 90 en plus et un bus de capacité 100 en moins. Ce qui n'est en fait pas un problème : car sous les hypothèses faites dans cette étude, un bus de capacité 100 est plus rentable qu'un bus de capacité 90. Ainsi on peut choisir d'affecter le bus de capacité 100 (celui dont on dispose réellement) à la place du bus de capacité 90 (celui que l'on n'a pas).

On peut choisir de l'affecter sur la voie ayant le plus grand temps d'attente, par exemple.

C'est pourquoi on peut choisir de le placer sur la ligne 15 : parmi les lignes qui utilisent le bus de capacité 90 c'est celle qui a le temps d'attente le plus grand.

On obtient les résultats portés en annexe 1.

La pondération choisie oriente l'amélioration des temps d'attente des voies les plus peuplées. On peut donc s'attendre à ce qu'effectivement les temps d'attentes soient améliorés sur les voies 2 et 8, et également sur la voie 5. C'est effectivement ce que l'on observe : on a gain de 32 secondes sur la voie 2, de 290 secondes sur la voie 8, et de 50 secondes sur la voie 5. On observe cependant une dégradation de tous les autres temps d'attente. Les temps d'attente sont très élevés sur les voies les moins peuplées (de 1900 secondes pour l'attente la plus élevée c'est-à-dire de l'ordre de la demi-heure). Ce sont donc des temps d'attente qui ne sont pas admissibles même si on améliore considérablement les temps d'attente sur les voies les plus peuplées. C'est pourquoi nous avons ajouté des contraintes de temps d'attente maximal.

5.2. Proposition 2

On ajoute ainsi les contraintes de temps. On choisit arbitrairement un temps d'attente maximal admissible de 14 minutes (840 secondes), afin de ne pas pénaliser trop les lignes les plus peuplées.

Comme ici aussi la résolution est faite sans heuristique on s'arrange pour arrondir les nombres de bus à l'entier supérieur afin que les temps maximaux ne soient pas dépassés.

En appliquant cette méthode on se retrouve cette fois avec des bus en excédant : 9 bus de capacité 90 en trop, 2 bus de capacité 100 en trop, 1 bus de capacité 130 et un bus de capacité 135. Il faut donc enlever ces bus de lignes judicieusement choisies. En enlevant les 9 bus de capacité 90 sur la ligne 8 on passe d'un temps d'attente de 76 à 91 secondes. Ce qui est tout à fait admissible. Il faut ensuite enlever 2 bus de capacité 100. On enlève le bus de capacité 130 sur la voie 22 ainsi que le bus de capacité 100 ce qui fait passer également le temps d'attente de 605 à 757 secondes (c'est une des seules voies qui couple ces deux types de bus en nombre relativement important, aussi une faible diminution ne peut être trop néfaste). On enlève également 1 bus de capacité 100 sur la voie 1 ce qui fait passer le temps d'attente de 440 secondes à 495 secondes (c'est une des seules voies qui utilise beaucoup de bus de type 100 aussi une diminution ne peut-être trop néfaste). Enfin la voie 24 est la voie sur laquelle on enlève le bus de capacité 135 (c'est elle qui les utilise le plus et donc même justification qu'auparavant+ c'est la seule qui reste dans la norme de 840 secondes).

Les résultats sont reportés en annexe 2. On observe ici des temps d'attente maximaux tout à fait admissibles.

En outre on a toujours une amélioration sensible des temps d'attente sur les voies les plus peuplées. D'autre part, la voie 10 a son temps d'attente amélioré, et les voies 3, 12, 14, 15, 16, 17, 19, 22, 27 et 28 ont des temps qui d'attente qui ne sont pas dégradés par rapport à la configuration initiale. Enfin compte tenu des approximations faites on arrive à un temps d'attente maximal de 873 secondes (voie 13) : on dépasse effectivement les 840 secondes que l'on s'était fixé au départ mais seulement de 33 secondes ; le temps d'attente restant sur cette voie inférieur au quart d'heure, il s'agit d'un temps d'attente tout à fait admissible.

5.3. Proposition 3

On peut chercher enfin à minimiser ce temps d'attente en considérant que toutes les lignes ont la même importance. Pour cela on affecte la valeur 1 à tous les β_i et on essaye de faire descendre au maximum le temps maximal autorisé en contrainte : le simplexe fonctionne (en valeurs réelles) jusqu'à une exigence de 406 secondes.

Les résultats sont portés en annexe 3.

Il y a un bus de chaque capacité en trop hormis pour les bus de capacité 90 qui sont en excédant au nombre de 10.

On parvient finalement à des solutions entières avec des temps n'excédant pas 406 secondes (moins de 7 minutes d'attente) avec des temps sur le réseau étant homogénéisés.

Tous les temps d'attente sont améliorés sauf ceux des voies : 2, 4, 7, 8, 11, 20, 21, 25 et 26.

5.4. Commentaires :

Chacune des trois propositions peut-être choisit. Les exigences conditionnent ensuite ce choix.

Aussi choisira-t-on la proposition 1, si le souci unique des élus est d'assurer le confort des voies les momentanément plus peuplées, la proposition 2 si à ce souci s'allie également une préoccupation relative des autres usagers, et enfin on choisira la proposition 3 si l'on estime que tous les usagers doivent être traité au même titre.

Les types d'exigence envisagés ici sont loin d'être exhaustif. Cependant compte tenu des informations mises à disposition on n'a pu proposer d'autres solutions car les exigences n'étaient pas clairement définies. Par exemple, il aurait peut-être été utile de privilégier la diminution du temps d'attente sur certaines voies ou certaines parcelles de voies qui ont la particularité d'être fréquentées par les personnes âgées (notamment les voies à proximités de maison de retraite ou les voies traversant des quartiers où la moyenne d'âge est élevée).

Enfin si l'on n'est pas satisfait de l'organisation de la flotte plusieurs autres solutions sont possibles (à utiliser ou non en complémentarité des solutions proposées):

- acheter de nouveau bus pour faire diminuer le temps d'attente.
- Aménager des couloirs de bus ce qui permet d'augmenter la vitesse commerciale du bus (le bus n'est pas pris dans la circulation ou n'est pas pris dans les feux)
- Si ce genre d'aménagement existe déjà on peut également procéder à une meilleure régulation des feux entre les carrefours à bus afin de minimiser les arrêts.

6 Conclusion

6.1. Choix d'une solution

Parmi les trois propositions proposées, il est sans doute préférable de choisir la proposition 2. Car peut-être que certains passagers de certaines voies attendront plus de temps que ceux des autres voies mais cela permettra d'éviter des mouvement de foule, de type émeute dû à un stress collectif découlant d'un temps d'attente trop long. Il est plus facile de maîtriser la colère d'un petit groupe d'individu que celle d'un gros groupe. Par ailleurs, en choisissant d'imposer un temps d'attente maximal on préserve également les minorités.

6.2. Limites du modèle

Il s'agit ici d'un modèle très approximatif. Avec plus de temps, plus de paramètres auraient pu être pris en compte (pensons notamment à la contrainte de capacité moyenne d'un bus sur une voie, on aurait pu également envisager d'une autre façons la distribution des voyageurs entre les arrêts). Avec plus de temps nous aurions pu achever la programmation de notre heuristique pour obtenir les solutions optimales entières. Car les solutions que nous avons ici sont certes meilleures que celles de la configuration initiale, mais ne sont pas les solutions optimales.

Enfin avec plus de données, plus de moyens il aurait été possible de s'affranchir beaucoup plus des approximations. Notamment, on aurait pu mettre au point un programme de gestion de la distribution des bus en temps réel. On pourrait ainsi se libérer de la modélisation du passager moyen pour envisager chaque passager comme une variable à part entière. On peut imaginer l'installation de caméras au niveau des arrêts de bus qui auraient plusieurs rôles : compter le nombre de passagers dans l'attente du bus, mais aussi surveiller qu'aucune agression ne soit commise. Le champ de la caméra photographierait également le bus ce qui permettrait d'évaluer sur chaque tronçon la vitesse moyenne instantanée. On pourrait également évaluer le temps de descente des personnes du bus en connaissant à chaque instant quels types de personnes sont présentes dans le bus : des personnes âgées, des personnes jeunes et alertes, des personnes souffrant d'un handicap.

7 Annexes

En annexes ne figurent que les résultats obtenus sous forme de tableau excel.

Les codes de programme Matlab ne sont pas joints étant donné qu'une annexe de cinq pages maximum est exigée, et que le code excède pour lui seul cette quantité.

On trouve d'abord le tableau de données initial, puis les 3 propositions et en dernier lieu le tableau de calcul des données utiles.

Numéro	Longueur	Vitesse	Nbre Bus	Capacité	Nbre voyageurs	D.moy.parcou rue	Durée enquête	Attente
1	24,600 km	15,4 km/h	9	90	1272	4,246 km	9243 s	440s
2	30,890 km	15,1 km/h	22	90	2706	4,868 km	8931 s	270s
3	7,620 km	9,7 km/h	2	90	403	1,713 km	10094 s	670s
4	13,400 km	11,1 km/h	13	90	1447	3,148 km	9011 s	250s
5	23,940 km	13,5 km/h	15	90	2177	3,225 km	8731 s	300s
6	13,080 km	12,5 km/h	6	90	852	3,939 km	9417 s	495s
7	10,160 km	9,8 km/h	15	90	1517	2,826 km	9330 s	172s
8	17,280 km	12,5 km/h	12	135 (4bus) 90 (8)	2485	3,223 km	9331 s	362s
9	10,250 km	10,0 km/h	6	130	796	2,837 km	8538 s	465s
10	17,200 km	13,9 km/h	2	90	224	5,306 km	10359 s	952s
11	21,060 km	15,4 km/h	15	90	1728	3,358 km	9043 s	200s
12	16,260 km	13,2 km/h	2	90	286	4,334 km	8911 s	758s
13	24,740 km	14,8 km/h	9	100	1097	5,440 km	8396 s	485s
14	11,300 km	11,1 km/h	3	90	587	3,032 km	9167 s	652s
15	13,840 km	13,8 km/h	3	90	582	3,635 km	9671 s	623s
16	13,260 km	15,1 km/h	2	90	359	2,754 km	9687 s	790s
17	10,440 km	10,9 km/h	2	90	465	2,377 km	9551 s	703s
18	19,740 km	13,8 km/h	6	90	817	3,578 km	8582 s	512s
19	14,000 km	12,8 km/h	3	135	576	4,140 km	9843 s	670s
20	17,390 km	11,8 km/h	15	90	1766	3,537 km	8527 s	298s
21	20,250 km	12,8 km/h	17	90	1695	3,747 km	8718 s	356s
22	13,540 km	13,0 km/h	3	90	575	3,688 km	9378 s	658s
23	13,460 km	12,2 km/h	5	90	701	2,703 km	8935 s	508s
24	17,460 km	12,8 km/h	5	100	694	3,751 km	7889 s	487s
25	22,220 km	13,9 km/h	12	90	1385	4,889 km	8809 s	298s
26	13,100 km	11,3 km/h	10	135 (4 bus) 100 (6)	1458	3,918 km	8694 s	365s
27	12,340 km	12,3 km/h	2	90	235	3,603 km	9034 s	652s
28	20,040 km	18,0 km/h	2	90	348	6,609 km	10740 s	750s

Tableau de données initial

Numéro	Nombre de bus de capacité				Temps d'attente estimé (théorique)	Nombre de bus de capacité				w	Temps d'attente estimé (proposition)	Temps d'attente initial	Variation	Vitesse commerciale	Vitesse commerciale initiale	Variation
	90 (théorique)	100 (théorique)	130 (théorique)	135 (théorique)		90 (proposition)	100 (proposition)	130 (proposition)	135 (proposition)							
1	6	2	0	0	495 s	6	2	0	0	3960	495s	440s	-55s	13,8 km/h	15,4 km/h	1,6 km/h
2	25	0	0	0	238 s	25	0	0	0	5940	238s	270s	32s	16,7 km/h	15,1 km/h	-1,6 km/h
3	0	0	0	1	1340 s	0	0	0	1	1340	1340s	670s	-670s	3,8 km/h	9,7 km/h	5,9 km/h
4	8	0	0	0	406 s	8	0	0	0	3250	406s	250s	-156s	10,1 km/h	11,1 km/h	1,0 km/h
5	18	0	0	0	250 s	18	0	0	0	4500	250s	300s	50s	15,5 km/h	13,5 km/h	-2,0 km/h
6	4	0	0	0	743 s	4	0	0	0	2970	743s	495s	-248s	9,0 km/h	12,5 km/h	3,5 km/h
7	7	0	0	0	369 s	7	0	0	0	2580	369s	172s	-197s	9,7 km/h	9,8 km/h	0,1 km/h
8	60	0	0	0	72 s	60	0	0	0	4344	72s	362s	290s	16,0 km/h	12,5 km/h	-3,5 km/h
9	4	0	0	0	698 s	4	0	0	0	2790	698s	465s	-233s	7,0 km/h	10,0 km/h	3,0 km/h
10	0	0	0	1	1904 s	0	0	0	1	1904	1904s	952s	-952s	7,7 km/h	13,9 km/h	6,2 km/h
11	10	0	0	0	300 s	10	0	0	0	3000	300s	200s	-100s	16,6 km/h	15,4 km/h	-1,2 km/h
12	0	0	0	1	1516 s	0	0	0	1	1516	1516s	758s	-758s	8,2 km/h	13,2 km/h	5,0 km/h
13	0	0	6	0	728 s	0	0	6	0	4365	728s	485s	-243s	11,9 km/h	14,8 km/h	2,9 km/h
14	3	0	0	0	652 s	3	0	0	0	1956	652s	652s	0s	9,7 km/h	11,1 km/h	1,4 km/h
15	2	0	0	0	935 s	1	1	0	0	1869	935s	623s	-312s	9,5 km/h	13,8 km/h	4,3 km/h
16	0	0	0	1	158 s	0	0	0	1	1580	1580s	790s	-790s	5,3 km/h	15,1 km/h	9,8 km/h
17	2	0	0	0	703 s	2	0	0	0	1406	703s	703s	0s	8,7 km/h	10,9 km/h	2,2 km/h
18	0	4	0	0	768 s	0	4	0	0	3072	768s	512s	-256s	10,1 km/h	13,8 km/h	3,7 km/h
19	0	2	0	0	1005 s	0	2	0	0	2010	1005s	670s	-335s	9,5 km/h	12,8 km/h	3,3 km/h
20	12	0	0	0	373 s	12	0	0	0	4470	373s	298s	-75s	10,5 km/h	11,8 km/h	1,3 km/h
21	0	11	0	0	550 s	0	11	0	0	6052	550s	356s	-194s	8,2 km/h	12,8 km/h	4,6 km/h
22	3	0	0	0	658 s	3	0	0	0	1974	658s	658s	0s	11,6 km/h	13,0 km/h	1,4 km/h
23	0	0	0	2	127 s	0	0	0	2	2540	1270s	508s	-762s	5,6 km/h	12,2 km/h	6,6 km/h
24	0	0	0	3	812 s	0	0	0	3	2435	812s	487s	-325s	10,4 km/h	12,8 km/h	2,4 km/h
25	10	0	0	0	358 s	10	0	0	0	3576	358s	298s	-60s	16,3 km/h	13,9 km/h	-2,4 km/h
26	8	0	0	0	456 s	8	0	0	0	3650	456s	365s	-91s	9,5 km/h	11,3 km/h	1,8 km/h
27	0	0	0	1	1304 s	0	0	0	1	1304	1304s	652s	-652s	7,8 km/h	12,3 km/h	4,5 km/h
28	0	0	0	1	1500 s	0	0	0	1	1500	1500s	750s	-750s	12,1 km/h	18,0 km/h	5,9 km/h

Proposition 1

Proposition 1 (partie bleue foncé)

Numéro	Nombre de bus de capacité				Temps d'attente estimé (théorique)	Nombre de bus de capacité				w	Temps d'attente estimé (proposition)		Variation	Vitesse commerciale	Vitesse commerciale initiale	Variation
	90 (théorique)	100 (théorique)	130 (théorique)	135 (théorique)		90 (proposition)	100 (proposition)	130 (proposition)	135 (proposition)		Temps d'attente initial	Temps d'attente initial				
1	1	8	0	0	440 s	1	7	0	0	3960	495 s	440 s	-55 s	13,8 km/h	15,4 km/h	1,6 km/h
2	25	0	0	0	238 s	25	0	0	0	5940	238 s	270 s	32 s	16,7 km/h	15,1 km/h	-1,6 km/h
3	2	0	0	0	670 s	2	0	0	0	1340	670 s	670 s	0 s	6,5 km/h	9,7 km/h	3,2 km/h
4	8	0	0	0	406 s	8	0	0	0	3250	406 s	250 s	-156 s	10,1 km/h	11,1 km/h	1,0 km/h
5	18	0	0	0	250 s	18	0	0	0	4500	250 s	300 s	50 s	15,5 km/h	13,5 km/h	-2,0 km/h
6	2	3	0	0	594 s	2	3	0	0	2970	594 s	495 s	-99 s	9,9 km/h	12,5 km/h	2,6 km/h
7	7	0	0	0	369 s	7	0	0	0	2580	369 s	172 s	-197 s	9,7 km/h	9,8 km/h	0,1 km/h
8	57	0	0	0	76 s	48	0	0	0	4344	91 s	362 s	272 s	15,6 km/h	12,5 km/h	-3,1 km/h
9	4	0	0	0	698 s	4	0	0	0	2790	698 s	465 s	-233 s	7,0 km/h	10,0 km/h	3,0 km/h
10	3	0	0	0	635 s	3	0	0	0	1904	635 s	952 s	317 s	15,9 km/h	13,9 km/h	-2,0 km/h
11	11	0	0	0	273 s	11	0	0	0	3000	273 s	200 s	-73 s	17,2 km/h	15,4 km/h	-1,8 km/h
12	2	0	0	0	758 s	2	0	0	0	1516	758 s	758 s	0 s	13,7 km/h	13,2 km/h	-0,5 km/h
13	0	0	0	6	728 s	0	0	0	5	4365	873 s	485 s	-388 s	11,0 km/h	14,8 km/h	3,8 km/h
14	3	0	0	0	652 s	3	0	0	0	1956	652 s	652 s	0 s	9,7 km/h	11,1 km/h	1,4 km/h
15	3	0	0	0	623 s	3	0	0	0	1869	623 s	623 s	0 s	12,3 km/h	13,8 km/h	1,5 km/h
16	2	0	0	0	790 s	2	0	0	0	1580	790 s	790 s	0 s	9,1 km/h	15,1 km/h	6,0 km/h
17	2	0	0	0	703 s	2	0	0	0	1406	703 s	703 s	0 s	8,7 km/h	10,9 km/h	2,2 km/h
18	0	0	2	2	768 s	0	0	2	2	3072	768 s	512 s	-256 s	10,1 km/h	13,8 km/h	3,7 km/h
19	1	2	0	0	670 s	1	2	0	0	2010	670 s	670 s	0 s	12,1 km/h	12,8 km/h	0,7 km/h
20	13	0	0	0	344 s	13	0	0	0	4470	344 s	298 s	-46 s	10,8 km/h	11,8 km/h	1,0 km/h
21	0	6	4	0	605 s	0	5	3	0	6052	757 s	356 s	-401 s	7,3 km/h	12,8 km/h	5,5 km/h
22	3	0	0	0	658 s	3	0	0	0	1974	658 s	658 s	0 s	11,6 km/h	13,0 km/h	1,4 km/h
23	0	3	1	0	635 s	0	3	1	0	2540	635 s	508 s	-127 s	8,8 km/h	12,2 km/h	3,4 km/h
24	0	0	0	4	609 s	0	0	0	4	2435	609 s	487 s	-122 s	12,4 km/h	12,8 km/h	0,4 km/h
25	11	0	0	0	325 s	11	0	0	0	3576	325 s	298 s	-27 s	16,8 km/h	13,9 km/h	-2,9 km/h
26	8	0	0	0	456 s	8	0	0	0	3650	456 s	365 s	-91 s	9,5 km/h	11,3 km/h	1,8 km/h
27	2	0	0	0	652 s	2	0	0	0	1304	652 s	652 s	0 s	12,8 km/h	12,3 km/h	-0,5 km/h
28	2	0	0	0	750 s	2	0	0	0	1500	750 s	750 s	0 s	19,7 km/h	18,0 km/h	-1,7 km/h

Proposition 2

Numéro	Nombre de bus de capacité				Temps d'attente estimé (théorique)	Nombre de bus de capacité				w	Temps d'attente estimé (proposition)		Temps d'attente initial	Variation	Vitesse commerciale		Variation
	90 (théorique)	100 (théorique)	130 (théorique)	135 (théorique)		90 (proposition)	100 (proposition)	130 (proposition)	135 (proposition)						Vitesse commerciale	Vitesse commerciale initiale	
1	10	0	0	0	396 s	10	0	0	0	3960	396 s	440 s	44 s	15,1 km/h	15,4 km/h	0,3 km/h	
2	0	0	6	12	330 s	0	0	5	11	5940	371 s	270 s	-101 s	14,8 km/h	15,1 km/h	0,3 km/h	
3	4	0	0	0	335 s	4	0	0	0	1340	335 s	670 s	335 s	10,1 km/h	9,7 km/h	-0,4 km/h	
4	9	0	0	0	361 s	8	0	0	0	3250	406 s	250 s	-156 s	10,1 km/h	11,1 km/h	1,0 km/h	
5	0	16	1	0	265 s	0	16	1	0	4500	265 s	300 s	35 s	15,2 km/h	13,5 km/h	-1,7 km/h	
6	8	0	0	0	371 s	8	0	0	0	2970	371 s	495 s	124 s	11,7 km/h	12,5 km/h	0,8 km/h	
7	7	0	0	0	369 s	7	0	0	0	2580	369 s	172 s	-197 s	9,7 km/h	9,8 km/h	0,1 km/h	
8	15	0	0	0	290 s	11	0	0	0	4344	395 s	362 s	-33 s	11,1 km/h	12,5 km/h	1,4 km/h	
9	7	0	0	0	399 s	7	0	0	0	2790	399 s	465 s	66 s	8,8 km/h	10,0 km/h	1,2 km/h	
10	5	0	0	0	381 s	5	0	0	0	1904	381 s	952 s	571 s	20,1 km/h	13,9 km/h	-6,2 km/h	
11	11	0	0	0	273 s	8	0	0	0	3000	375 s	200 s	-175 s	15,0 km/h	15,4 km/h	0,4 km/h	
12	4	0	0	0	379 s	4	0	0	0	1516	379 s	758 s	379 s	20,6 km/h	13,2 km/h	-7,4 km/h	
13	11	0	0	0	397 s	11	0	0	0	4365	397 s	485 s	88 s	15,0 km/h	14,8 km/h	-0,2 km/h	
14	5	0	0	0	391 s	5	0	0	0	1956	391 s	652 s	261 s	12,6 km/h	11,1 km/h	-1,5 km/h	
15	5	0	0	0	374 s	5	0	0	0	1869	374 s	623 s	249 s	16,0 km/h	13,8 km/h	-2,2 km/h	
16	4	0	0	0	395 s	4	0	0	0	1580	395 s	790 s	395 s	14,2 km/h	15,1 km/h	0,9 km/h	
17	4	0	0	0	352 s	4	0	0	0	1406	352 s	703 s	352 s	13,5 km/h	10,9 km/h	-2,6 km/h	
18	8	0	0	0	384 s	8	0	0	0	3072	384 s	512 s	128 s	14,4 km/h	13,8 km/h	-0,6 km/h	
19	5	0	0	0	402 s	5	0	0	0	2010	402 s	670 s	268 s	15,5 km/h	12,8 km/h	-2,7 km/h	
20	8	5	0	0	344 s	8	4	0	0	4470	373 s	298 s	-75 s	10,5 km/h	11,8 km/h	1,3 km/h	
21	15	0	0	0	403 s	15	0	0	0	6052	403 s	356 s	-47 s	9,1 km/h	12,8 km/h	3,7 km/h	
22	5	0	0	0	395 s	5	0	0	0	1974	395 s	658 s	263 s	15,0 km/h	13,0 km/h	-2,0 km/h	
23	7	0	0	0	363 s	7	0	0	0	2540	363 s	508 s	145 s	11,6 km/h	12,2 km/h	0,6 km/h	
24	6	0	0	0	406 s	6	0	0	0	2435	406 s	487 s	81 s	15,2 km/h	12,8 km/h	-2,4 km/h	
25	11	0	0	0	325 s	9	0	0	0	3576	397 s	298 s	-99 s	15,7 km/h	13,9 km/h	-1,8 km/h	
26	9	0	0	0	406 s	9	0	0	0	3650	406 s	365 s	-41 s	9,8 km/h	11,3 km/h	1,5 km/h	
27	4	0	0	0	326 s	4	0	0	0	1304	326 s	652 s	326 s	18,8 km/h	12,3 km/h	-6,5 km/h	
28	4	0	0	0	375 s	4	0	0	0	1500	375 s	750 s	375 s	28,5 km/h	18,0 km/h	-10,5 km/h	

Proposition 3

Numéro	Nb voyageurs par arrêt	temps des arrêts du prochain bus	temps d'attente du prochain bus sans arrêt	Vitesse du bus	(réel commercial)	w=T*Nb	béta (pondération)	nb voyageurs sur un tour
1	50	45 s	395 s	24,9 km/h	9,5 km/h	3960,0	0,04	791
2	94	36 s	234 s	21,6 km/h	6,5 km/h	5940,0	0,09	2231
3	14	60 s	610 s	22,5 km/h	12,8 km/h	1340,0	0,01	113
4	31	16 s	234 s	15,8 km/h	4,7 km/h	3250,0	0,05	698
5	81	53 s	247 s	23,3 km/h	9,8 km/h	4500,0	0,07	1592
6	38	30 s	465 s	16,9 km/h	4,4 km/h	2970,0	0,03	341
7	19	8 s	164 s	14,8 km/h	5,0 km/h	2580,0	0,05	607
8	122	70 s	292 s	17,7 km/h	5,2 km/h	4344,0	0,09	1325
9	2	7 s	458 s	13,4 km/h	3,4 km/h	2790,0	0,03	344
10	6	28 s	924 s	33,5 km/h	19,6 km/h	1904,0	0,01	96
11	33	21 s	179 s	28,2 km/h	12,8 km/h	3000,0	0,06	941
12	14	50 s	708 s	41,4 km/h	28,2 km/h	1516,0	0,01	142
13	31	24 s	461 s	21,5 km/h	6,7 km/h	4365,0	0,04	786
14	34	63 s	589 s	23,0 km/h	11,9 km/h	1956,0	0,02	235
15	31	59 s	564 s	29,5 km/h	15,7 km/h	1869,0	0,02	217
16	12	59 s	731 s	32,7 km/h	17,6 km/h	1580,0	0,01	117
17	23	84 s	619 s	30,3 km/h	19,4 km/h	1406,0	0,02	168
18	30	42 s	470 s	25,2 km/h	11,4 km/h	3072,0	0,03	490
19	20	39 s	631 s	26,6 km/h	13,8 km/h	2010,0	0,02	230
20	53	24 s	274 s	15,2 km/h	3,4 km/h	4470,0	0,06	1099
21	20	11 s	345 s	12,4 km/h	-0,4 km/h	6052,0	0,06	1107
22	33	61 s	597 s	27,2 km/h	14,2 km/h	1974,0	0,02	230
23	22	37 s	471 s	20,6 km/h	8,4 km/h	2540,0	0,02	312
24	26	38 s	449 s	28,0 km/h	15,2 km/h	2435,0	0,02	432
25	44	24 s	274 s	24,3 km/h	10,4 km/h	3576,0	0,05	905
26	46	22 s	343 s	13,7 km/h	2,4 km/h	3650,0	0,05	700
27	6	30 s	622 s	35,7 km/h	23,4 km/h	1304,0	0,01	94
28	21	53 s	697 s	51,7 km/h	33,7 km/h	1500,0	0,01	130

Calcul des données utiles

