

f
'75

PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL
SYMPOSIUM AND COURSE

SIMULATION '75

Editor: M. H. HAMZA

ZURICH, JUNE 23 - 26, 1975

ACTA PRESS
CALGARY * ZURICH

SIMULATION D'UNE LIGNE D'AUTOBUS
POUR L'ETUDE DE STRATEGIES DE REGULATION

M. LLIBRE - J.J. HENRY

Département d'Etudes et de Recherches en Automatique
CENTRE D'ETUDES ET DE RECHERCHES DE TOULOUSE
BP 4025 - 31055 - TOULOUSE Cédex (FRANCE)

RESUME

La mise au point de la simulation décrite ici a été faite en vue de la mise en oeuvre sur le site de TOULOUSE d'une régulation centralisée du mouvement des autobus d'une ligne. Deux objectifs ont été définis : faire un outil général et d'utilisation pratique.

Cette simulation s'applique à toute ligne d'autobus et reproduit les phénomènes essentiels de la ligne. Elle traite la journée complète depuis le départ du premier autobus en service le matin jusqu'à l'arrivée le soir du dernier autobus, et tient compte des tableaux de service du personnel affecté à la ligne : ce qui se traduit par une variation du nombre d'autobus en service sur la ligne au cours de la journée.

Un soin particulier a été apporté à l'évaluation du temps d'attente et du temps de parcours des usagers.

Cette simulation a permis de tester et de sélectionner des algorithmes de régulation en temps réel qui doivent être implantés sur la ligne d'autobus N°12 de la ville de TOULOUSE.

INTRODUCTION

Dans la plupart des grandes villes, l'utilisation commune du réseau urbain par les véhicules particuliers et les autobus est souvent à l'origine de nombreuses difficultés d'exploitation pour les compagnies de transport en commun. Toute perturbation du trafic se répercute en effet sur le service des autobus, ce qui se traduit alors par des retards sur l'horaire, des temps d'attente prohibitifs pour les usagers, voire des demandes non satisfaites.

Une solution consiste à mettre en oeuvre des stratégies de régulation afin de satisfaire le plus grand nombre de demandes. D'où l'intérêt d'une simulation pour tester les différentes stratégies possibles.

Les simulations de ligne d'autobus ont été développées récemment. DEKINDT.H.[1] a présenté en 1970 une simulation en GPSS faite à la RATP. OLIVER et VREN ont simulé une ligne d'autobus de Londres [2] pour le compte du London Transport en 1972. Ces simulations ne convenaient pas pour de nombreuses raisons aux études entreprises à Toulouse. La simulation décrite a été mise au point en 1973 [3] et a servi à tester des stratégies de régulation pour une ligne en tenant compte des contraintes de service. L'intérêt de certaines de ces stratégies ayant été démontré il a été décidé d'implanter un système centralisé qui doit être opérationnel fin 1975.

Notons enfin qu'en 1974 BLY et JACKSON [4] ont présenté au RRL un modèle de simulation destiné à tester également des stratégies de régulation.

Après avoir décrit la ligne considérée et son fonctionnement actuel sans régulation, nous présenterons la stratégie choisie et sa mise en oeuvre. Puis nous exposerons le principe de la simulation, et enfin les différents résultats qu'elle fournit.

PRESENTATION DE LA LIGNE

Les caractéristiques physiques de la ligne qui comprend 20 stations dans chaque sens sont données par la figure 1.

SENS ALLER		
STATION	NUMERO	DISTANCE A LA STATION SUIVANTE
BARRIERE Croix Daurade	1	350 m
Route de Lavaur	2	330
Eglise Bonnefoy	3	320
Rue Joubert (Arago)	4	260
Gare Raynal	5	280
Pont Matabiau	6	200
Place Roquelaine	7	460
Place Jeanne-d'Arc	8	400
Rue d'Alsace (Capitole)	9	600
Rue d'Alsace (Genty Magre)	10	110
Place Rouaix	11	270
Place des Carmes	12	440
Place du Parlement	13	500
Pont Saint-Michel	14	610
Avenue de Muret (Fer à Cheval)	15	300
Avenue de Muret (G. Phoebus)	16	210
Avenue de Muret (Ecole Normale)	17	310
Avenue de Muret (Croix de Pierre)	18	490
Avenue de Muret (Rue Roe)	19	360
Avenue de Muret (La Pointe)	20	

SENS RETOUR		
STATION	NUMERO	DISTANCE A LA STATION SUIVANTE
Avenue de Muret (La Pointe)	20	490
Avenue de Muret (Rue Roe)	19	500
Avenue de Muret (Croix de Pierre)	18	310
Avenue de Muret (Ecole Normale)	17	330
Avenue de Muret (I. Barthèse)	16	210
Avenue de Muret (Fer à Cheval)	15	590
Pont Saint-Michel	14	450
Place du Parlement	13	140
Place du Salin	12	460
Place des Carmes	11	320
Rue d'Alsace (Musée)	10	160
Rue d'Alsace (Fourbastard)	9	350
Rue d'Alsace (Capitole)	8	210
Rue d'Alsace (Bayard)	7	250
Place J. d'Arc	6	400
Place Roquelaine	5	160
Pont Matabiau	4	300
Gare Raynal	3	290
Rue Arago	2	260
Eglise Bonnefoy	1	330
Route de Lavaur		460
Croix Daurade		

FIGURE 1 : Correspondance Numéro-Station

A cette description physique doit s'ajouter le tableau de marche des autobus, fourni par la Compagnie (figure 2) : on lit par exemple que le véhicule N° 1 doit effectuer trois rotations, la première commençant à 7 h 30 à la station N°1 et se terminant à 7 h 58 à la station N°20.

Le fonctionnement de la ligne sans régulation (que nous appellerons "situation de référence" par la suite) est alors le suivant : les autobus effectuent le plus grand nombre d'aller-retour possibles pendant la durée de leur service, compte tenu du fait que les conducteurs disposent d'un temps de repos réglementaire à chaque terminus. Il n'y a donc pra-

tiquement pas de régulation des instants de départ des véhicules aux terminus.

SERVICE DES AUTOBUS

1	7H30	1	7H58	20
1	11H47	27	12H 8	1
1	13H15	1	19H52	1
2	7H20	20	19H22	20
3	7H28	20	8H29	20
3	11H56	27	12H16	1
3	13H25	1	22H30	1
4	6H30	20	20H 8	1
5	5H45	1	19H35	1
6	7H18	1	12H47	1
6	13H31	1	14H 4	20
6	17H 0	20	21H10	1
7	7H 6	1	19H45	20
8	6H17	1	19H16	1
9	7H14	1	12H 6	20
9	13H12	20	19H53	20
10	7H24	20	9H 3	1
10	12H19	1	12H46	20
10	13H20	20	20H53	20
11	7H26	1	8H31	1
11	11H57	1	22H30	20
12	7H22	1	9H 0	20
12	12H 5	27	12H25	1
12	12H45	1	14H32	20
13	7H38	1	12H28	20
13	13H28	20	19H42	1
14	7H10	20	19H14	20
15	6H48	1	9H24	20
15	12H20	27	12H40	1
15	13H37	1	14H12	20
16	12H 4	1	12H32	20
16	13H36	20	14H10	1
16	16H42	1	19H26	1

FIGURE 2

STRATEGIES DE REGULATION

La méthode de régulation envisagée repose alors sur la constatation suivante : dans une tranche de temps donnée, avec un nombre d'autobus disponibles donné, et la demande étant supposée constante, il faut, pour minimiser le temps d'attente total des usagers à une station, faire passer les autobus à des intervalles de temps égaux.

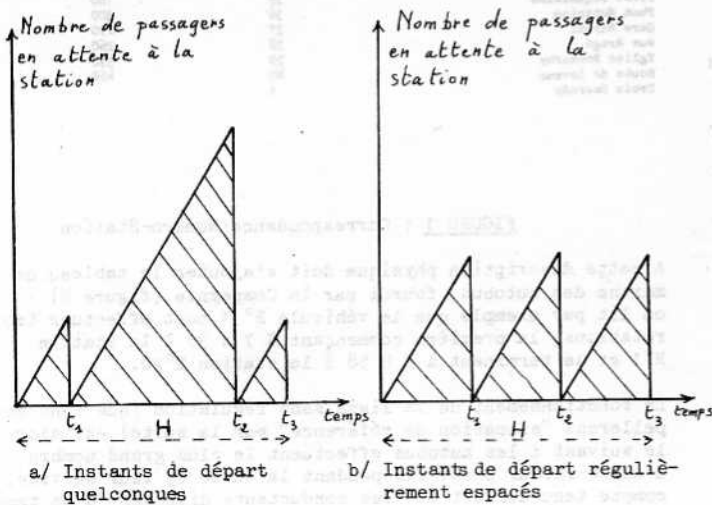


FIGURE 3

Ce résultat est très bien illustré par la figure 3 où la somme des aires hachurées représente le temps d'attente total; il est clair que cette somme est minimum dans le cas b/.

L'hypothèse que la demande est constante dans l'intervalle de temps envisagé peut être considérée réaliste dans la mesure où l'intervalle H est assez petit.

La figure 4 montre la manière suivant laquelle on procède pour effectuer cette régulation des instants de départ des véhicules (ou encore régulation d'intervalles); comme on connaît, grâce à un système de localisation continu, la position des véhicules à chaque instant, il est possible de prévoir combien d'entre eux seront disponibles à la station de régulation sur un horizon H; d'où la possibilité de répartir et de prévoir leurs instants de départ.

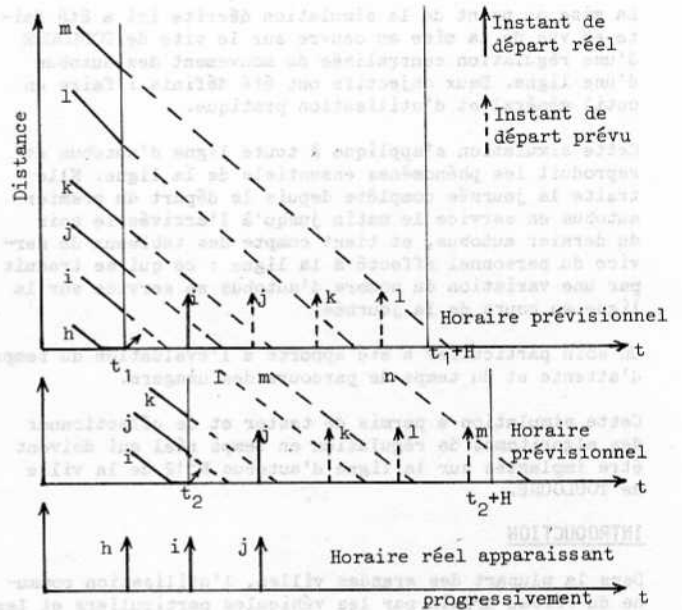


FIGURE 4

Les deux stratégies suivantes ont été testées grâce à la simulation : régulation aux terminus uniquement, et régulation aux terminus et à une station intermédiaire, dite station de régulation.

Bien qu'elles n'aient pas été traitées complètement, d'autres stratégies ont été testées : retournement d'un véhicule sur la ligne, injection de véhicules supplémentaires, marche haut-le-pied.

PRINCIPE DE LA SIMULATION

Pour comparer des stratégies de régulation différentes, il est nécessaire d'effectuer des statistiques sur un grand nombre de cas, c'est-à-dire d'avoir une simulation performante.

C'est pourquoi le principe d'une simulation de type macroscopique a été retenu : on ne cherche pas à représenter le comportement exact des véhicules à chaque instant, mais on se borne à calculer par exemple un temps de parcours global, entre deux stations.

Pour pouvoir calculer ces temps de parcours, temps d'attente aux stations, etc..., on a procédé à diverses enquêtes sur le site, dont les principaux résultats sont résumés sur la figure 5. Les temps de parcours par exemple ont donc été identifiés comme des variables aléatoires de moyenne et d'écart type donnés, ceci d'une part pour chaque inter-

station et d'autre part en tenant compte d'une modulation en fonction de la tranche horaire.

PARAMETRES DE LA SIMULATION (MINUTES)

STATION	ETAT STATION	DEMANDE MOYENNE PAR 10 MINUTES	TEMPS MINIMUM DE PARCOURS	RETARD MOYEN DU TEMPS DE PARC.	ECART-TYPE DU TEMPS DE PARC.
1	1	14.80	0.42	0.40	0.52
2	1	8.72	0.43	0.75	0.88
3	1	5.88	0.50	0.40	0.47
4	1	4.72	0.38	0.44	0.52
5	1	2.52	0.30	1.15	0.62
6	1	4.20	0.28	0.28	0.47
7	1	4.20	0.63	0.66	0.93
8	2	10.08	0.75	1.11	0.83
9	1	13.44	0.67	0.91	0.68
10	1	13.44	0.47	1.23	0.65
11	1	10.92	0.33	0.63	0.90
12	1	4.20	0.55	0.34	0.17
13	1	4.20	0.78	0.67	0.53
14	1	0.84	0.53	0.91	0.59
15	1	2.52	0.33	0.39	0.30
16	1	0.42	0.35	0.22	0.18
17	1	0.17	0.42	0.30	0.32
18	1	0.08	0.70	0.78	0.43
19	1	0.0	0.53	0.82	0.72
20	1	14.80	0.65	0.40	0.35
21	1	5.88	0.53	1.33	0.83
22	1	10.08	0.42	0.28	0.27
23	1	2.52	0.40	0.30	0.22
24	1	5.04	0.35	0.38	0.45
25	1	5.88	0.47	0.94	1.13
26	1	0.84	0.67	1.53	1.25
27	2	10.08	0.28	0.22	0.30
28	1	5.04	0.87	0.93	1.20
29	1	7.56	0.92	1.48	1.40
30	1	10.92	0.23	0.87	0.87
31	1	9.24	0.55	1.32	0.63
32	1	15.12	0.48	1.05	1.45
33	1	8.40	0.33	1.39	1.05
34	1	10.08	0.60	0.33	0.25
35	1	2.52	0.33	0.12	0.12
36	1	0.84	0.78	0.79	0.60
37	1	0.84	0.48	0.73	1.17
38	1	0.42	0.52	0.52	0.28
39	1	0.17	0.50	0.51	0.25
40	1	0.0	0.65	0.24	0.18

COEFFICIENTS MULTIPLICATIFS DE CORRECTION

TRANCHE	DEMANDE STATIONS		RETARD MOYEN DU TEMPS DE PARCOURS	ECART-TYPE DU TEMPS DE PARCOURS
	1 A 7 ET 20 A 27	8 A 19 ET 28 A 40		
5H40 A 7H30	0.80	0.40	0.82	0.60
7H30 A 8H40	1.00	0.60	0.87	0.90
8H40 A 11H40	0.40	0.60	1.10	0.70
11H40 A 12H30	0.40	1.00	1.10	0.90
12H30 A 13H30	0.40	0.40	0.93	0.70
13H30 A 14H10	1.00	0.50	1.10	0.90
14H10 A 17H30	0.80	0.40	1.10	0.70
17H30 A 18H30	0.80	1.00	1.27	0.90
18H30 A 20H30	0.40	0.60	0.67	0.70
20H30 A 24H00	0.30	0.30	0.82	0.60

FIGURE 5

Les mouvements des passagers sur la ligne ont été également identifiés par une autre enquête qui a fourni une matrice origine-destination pour chaque sens : pour une station origine donnée, on connaît alors la répartition des passagers vers les différentes destinations.

Le programme de simulation a été écrit en FORTRAN IV et mis au point sur l'ordinateur IBM 360/44 du DERA. Son fonctionnement est axé sur une gestion séquentielle des "événements".

Ces "événements" sont de trois types :

- 1 - arrivée d'un autobus à une station
- 2 - fin de l'échange des voyageurs entre un autobus et la station où il se trouve
- 3 - départ d'un autobus d'une station.

Pour chaque véhicule j , l'instant d'apparition du prochain événement est connu et rangé dans un tableau $T(j)$; dès qu'un événement a été traité, on recherche alors le suivant dans le tableau $T(j)$, qui sera donné par :

$$\min_{j=1, \dots, N} [T(j)]$$

(N étant le nombre total de véhicules).

Les "événements" sont traités de la façon suivante :

1/ Arrivée d'un autobus en station

- calcul du nombre de passagers d qui descendent (fournit par la matrice origine-destination), et du temps d'attente θ_d qui en résulte

- calcul du nombre de passagers m qui montent, et du temps d'attente θ_m correspondant

- calcul du temps de transfert θ_a : $\theta_a = \max(\theta_d, \theta_m)$

- calcul de l'instant d'apparition du prochain événement pour le véhicule considéré : $T(j) = T(j) + \theta_a$

2/ Fin de l'échange des voyageurs

- s'il s'agit d'une station normale, le véhicule est prêt à repartir et on traite l'évènement de type 3

- s'il s'agit d'une station de régulation ou d'un terminus, on calcule le "temps de régulation" θ_r , et l'évènement suivant aura lieu à $T(j) = T(j) + \theta_r$ pour le bus j .

3/ Départ de l'autobus

On détermine un temps de parcours θ_p par tirage au hasard dans la répartition identifiée précédemment, et on fait $T(j) = T(j) + \theta_p$.

Notons toutefois que cette valeur θ_p peut être corrigée, étant donné que les autobus ne peuvent pas se dépasser sur la ligne.

La tranche de temps simulée est d'une journée complète, et le traitement de 100 journées ne demande que 20 minutes de temps machine sur un ordinateur de type IBM 370/168.

RESULTATS

Le tracé des trajectoires des autobus sur la ligne permet de visualiser directement les améliorations que l'on peut attendre de la régulation : les figures 6, 7, 8 et 9 représentent d'une part la situation de référence (fig. 6 sans régulation) et d'autre part trois stratégies de régulation différentes faisant intervenir des injections d'autobus (fig. 7 et 8) et un retournement en ligne (fig. 9).

Il est possible d'autre part d'évaluer le gain réel apporté par la régulation, et ceci en effectuant des calculs statistiques sur les 100 journées de simulation ; c'est ce que montre la figure 10, où l'on trouve des résultats concernant le temps d'attente des usagers, les temps de trajet, les intervalles de passage des autobus, la demande refusée et le nombre de courses perdues.

A partir de ces résultats, on peut comparer les différentes politiques ; la figure 11, qui représente la répartition du temps d'attente moyen des passagers pour 100 tranches du soir, met en évidence le déplacement de la courbe de répartition vers des temps d'attente plus faible grâce à la régulation.

De même, les résultats portés sur la figure 12 permettent de chiffrer exactement les gains obtenus par les différentes stratégies simulées ; on remarquera que les meilleurs résultats sont obtenus lorsque l'on effectue une régulation non seulement aux terminus mais aussi à une station intermédiaire, et que les gains sont particulièrement importants pour les heures de pointe (tranche du soir, 16 à 21 h).

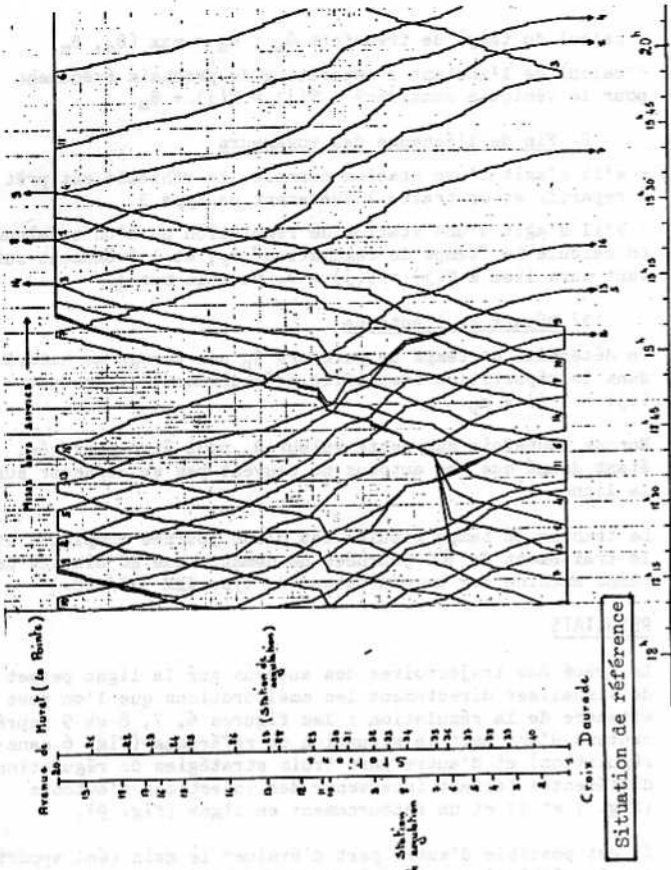


FIGURE 6

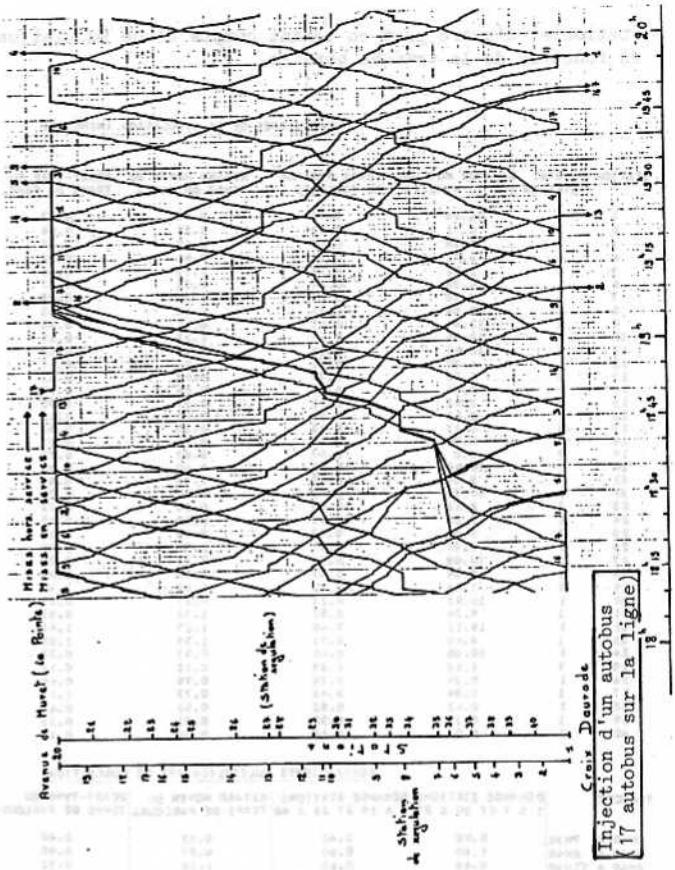


FIGURE 8

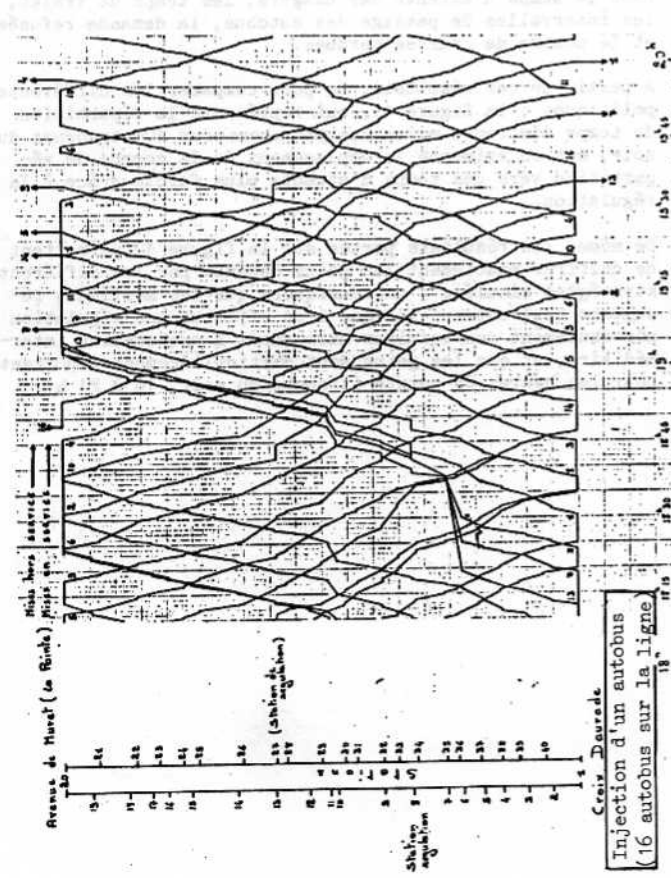


FIGURE 7

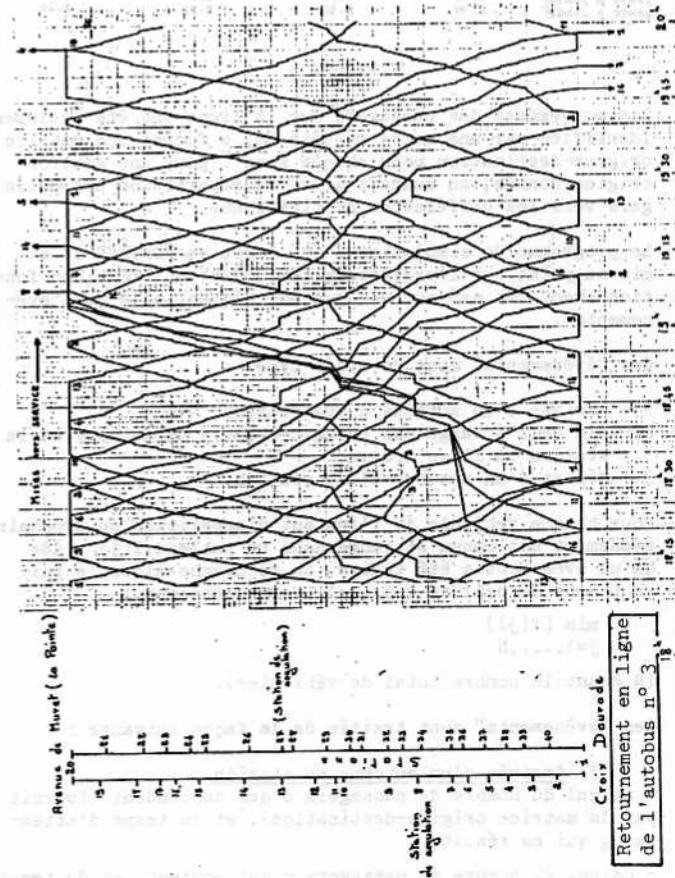


FIGURE 9

STATISTIQUES PAR STATION

NUM. DE STATION	FAC (2) / COL (1)	TEMPS ATT. TOTAL	TEMPS ATT. MOYEN	INTERVAL. MOYEN	E. TYPE DE L'INIER.	INTERVAL. MAXIMUM	DEMANDE USAGERS	DEMANDE REFUSÉE
1	2	2311.67	2.25	7.52	4.89	38.20	1026	0
2	1	1712.65	4.39	7.52	4.91	38.63	390	0
3	1	1409.11	4.74	7.52	5.03	39.42	297	0
4	1	1681.12	4.62	7.52	5.07	40.77	364	0
5	1	591.14	4.38	7.52	5.16	40.34	135	0
6	2	1175.78	4.74	7.52	5.14	39.92	248	0
7	1	1230.42	4.68	7.52	5.51	39.77	263	0
8	2	2716.16	4.52	7.52	5.23	36.81	601	3
9	2	3778.74	4.71	7.52	5.30	35.50	803	4
10	2	4378.44	5.38	7.52	5.33	35.06	804	49
11	2	3162.02	4.85	7.52	5.33	35.38	652	27
12	2	1281.64	4.93	7.53	5.42	36.05	260	3
13	2	1241.57	4.79	7.52	5.44	36.02	259	8
14	1	279.91	5.96	7.53	5.49	35.87	47	0
15	1	707.77	4.51	7.53	5.52	35.11	157	0
16	1	111.95	5.33	7.53	5.56	35.31	21	0
17	1	59.59	8.51	7.53	5.50	35.38	7	0
18	2	19.69	3.28	7.53	5.61	35.20	6	0
19	1	0.0	0.0	7.53	5.65	35.52	0	0
20	2	1937.92	2.05	7.79	4.97	37.45	944	0
SOIT POUR LA TRANCHE		58974.32	4.31	7.59	5.38	40.34	13673	112

NOMBRE DE PASSAGERS TRANSPORTES 13673

TEMPS DE PRESENCE DES PASSAGERS DANS LES AUTOBUS TOTAL 188216.56 MOYENNE 13.77

DU TEMPS DE PARCOURS TERMINUS-TERMINUS	VALEUR MOY.	ECART-TYPE	VALEUR MAX.	VALEUR MIN.
SENS 1-20	28.99	3.60	51.52	24.10
SENS 20-1	35.70	2.98	43.48	27.85

DU TEMPS DE REGULATION DES AUTOBUS	VALEUR MOY.	ECART-TYPE	VALEUR MAX.	VALEUR MIN.
AU TERMINUS 1	5.37	3.28	19.07	0.80
A LA STATION 8	0.54	0.87	3.00	0.01
AU TERMINUS 20	5.30	3.66	20.82	0.40
A LA STATION 27	0.63	0.91	3.00	0.01

DU DECALAGE ENTRE HEURES DE SORTIES NOMINALES ET REELLES -0.12 16.40 22.75 -47.02

NOMBRE DE COURSES NOMINALES 261 REELLES 253

FIGURE 10

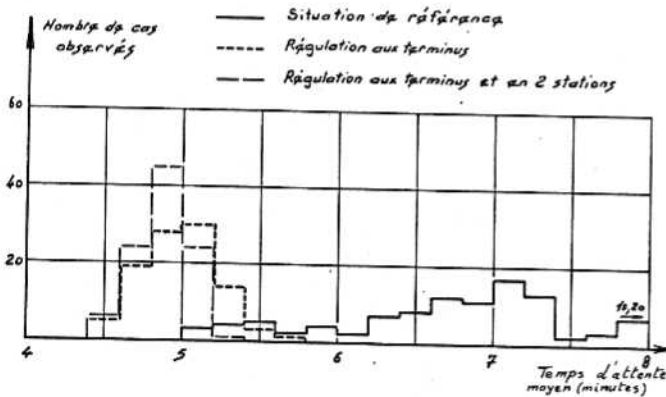


FIGURE 11 : Influence de la régulation sur le temps d'attente moyen (histogramme portant sur 100 tranches du soir, de 16 h à 22 h)

TRANCHE HORAIRE	MOYENNE (minutes)			GAIN			DEMANDE MOYENNE USAGERS NON SATISFAITE (1000 passagers transportés)		
	I	II	III	II/I	III/II	III/I	I	II	III
6 H à 11 H	4,78	4,62	4,52	3X	2X	5X	-	-	-
11 H à 16 H	3,32	3,35	3,16	-1X	6X	5X	-	-	-
16 H à 21 H	6,75	4,98	4,87	26X	2X	28X	173	21	14
6 H à 21 H	5,05	4,34	4,21	14X	3X	16X	223	78	61

Cas I : Absence de régulation
 Cas II : Régulation aux terminus
 Cas III : Régulation aux terminus et en 2 stations

FIGURE 12

CONCLUSION

Le programme présenté permet de simuler n'importe quelle ligne d'autobus dans un réseau, connaissant les divers paramètres de cette ligne dont certains doivent être obtenus à partir d'une enquête sur le site.

La gestion par "événement" lui confère une particulière souplesse d'emploi, en ce sens qu'elle permet de simuler toutes les manoeuvres de véhicules envisageables sur une ligne : injection ou éjection en n'importe quel point de la ligne, retournement, dépassement, marche haut-le-pied, etc...

Enfin signalons que la stratégie de régulation qu'elle a permis de tester est en voie d'implantation sur la ligne 12 de TOULOUSE.

NOTE

- Cette étude a été menée en collaboration avec le L.A.A.S. (Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes - CNRS) dans le cadre d'une convention DGRST.

- J.F. GABARD - Ingénieur au DERA a mis en forme et présenté cette communication.

REFERENCES

1. DEKINDT Horace - "Simulation d'une ligne d'autobus" 1^o symposium International sur la régulation du trafic - Versailles Juin 1970
2. OLIVER et UREN M.B.- "A computer simulation Model of the E.3 bus route operational Research Report 182" London Transport Executive - 1972
3. J.J. HENRY - M. LLIBRE - "Etudes des possibilités d'aide électronique aux transports en commun de la ville de Toulouse" - Annexe simulation - Convention DGRST - Juillet 1973
4. BLY P.H. - JACKSON R.L. - "Evaluation of bus control strategies by simulation" - TRRL Laboratory Report 637 Crowthorne 1974