

SM6

# ETUDE DES MODES D'EXPLOITATION DES LIGNES DU RER PAR LE SYSTÈME INTERACTIF D'AIDE A LA DÉCISION "RAFALE" (\*)

par Guy Sitruk,  
Inspecteur principal,  
et Josette Detroye,  
Inspecteur,  
à la Direction des études générales.

2029

Cette étude, conduite à la RATP par la Division de la recherche opérationnelle (RO) de la Direction des études générales, à la demande de la Division des horaires du Réseau ferré, a pour objet d'aider à définir le mode d'exploitation des lignes A et B du RER, lors de toute transformation devant intervenir dans les prochaines années. —

Le réseau RER actuel de la RATP est constitué par :

- la ligne B, axe nord-sud, exploitée jusqu'au Châtelet au nord ;
- la ligne A, axe est-ouest, exploitée jusqu'à Noisy-le-Grand à l'est.

Il est prévu d'étendre ces différentes lignes et de réaliser progressivement l'interconnexion avec des lignes de banlieue de la SNCF (voir schéma 1) :

- à la fin de 1980, prolongement de la ligne A de Noisy-le-Grand — Mont d'Est à Torcy ;
- à la fin de 1981, prolongement de la ligne B de Châtelet-Les Halles à Gare du Nord puis, progressivement, interconnexion avec les lignes SNCF du faisceau Aulnay - Roissy - Mitry - Claye ;
- à la fin de 1984, jonction à Nanterre de la ligne A et de la ligne SNCF de Cergy-Pontoise ;
- ultérieurement, jonction via les lignes A et B de lignes SNCF du nord et du sud-est.

Ces projets d'extension et d'interconnexion des réseaux soulèvent de nombreux problèmes liés à l'exploitation de certaines lignes en commun par deux entreprises différentes, et à la présence du personnel et du matériel de chacune d'elles sur le domaine de l'autre.

Un groupe de travail "Interconnexion", réunissant la SNCF et la RATP, a été mis en place pour aborder divers problèmes :

- la rentabilité du projet, liée à la prévision des flux de voyageurs (étudiée du côté RATP par la Division "Modèles de

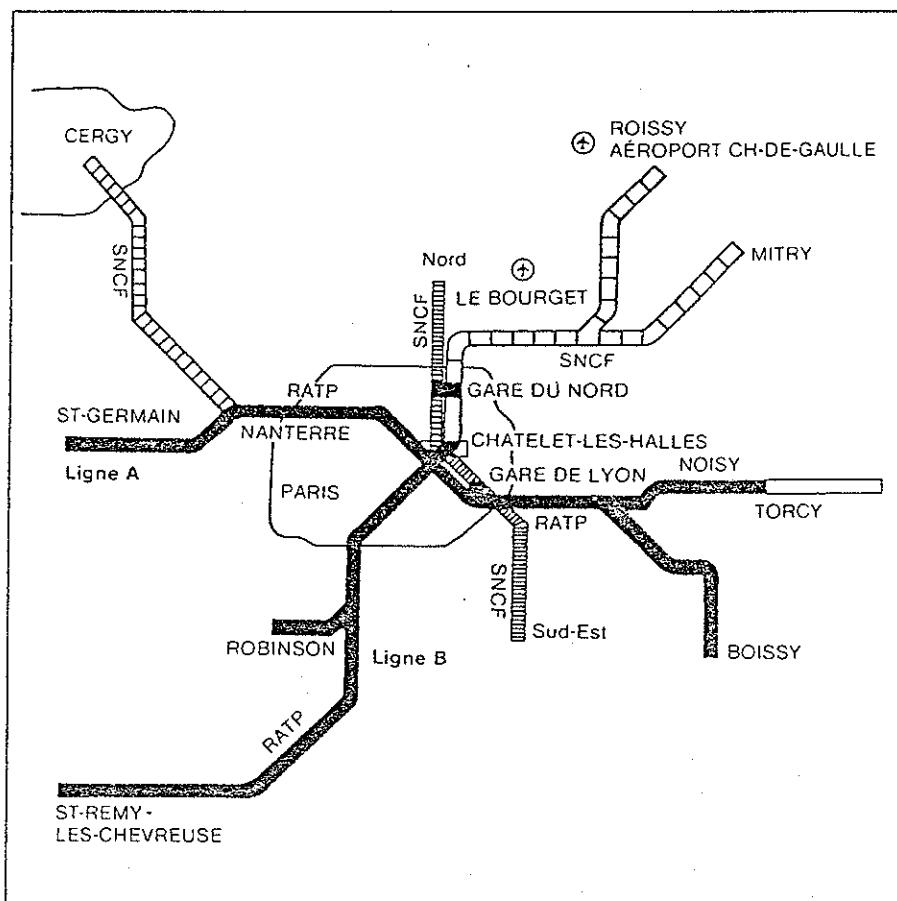


Schéma 1 : interconnexion.

trafic" des études générales) ;

- la faisabilité du projet, liée à des conditions d'exploitation nouvelles exigeant une régulation très performante (étudiée du côté RATP par la Division "Systèmes cybernétiques" des services techniques) ;
- la réalisation du projet, liée à la définition des modes d'exploitation du réseau interconnecté et étendu (étudiée du côté RATP par le Bureau des horaires du réseau ferré).

L'étude qui fait l'objet du présent article concerne ce dernier point, c'est-à-dire les modes d'exploitation du futur réseau.

(\*) Cette étude a fait l'objet d'un exposé à la Conférence européenne de Recherche Opérationnelle "EURO IV", à Cambridge, en juillet 1980.

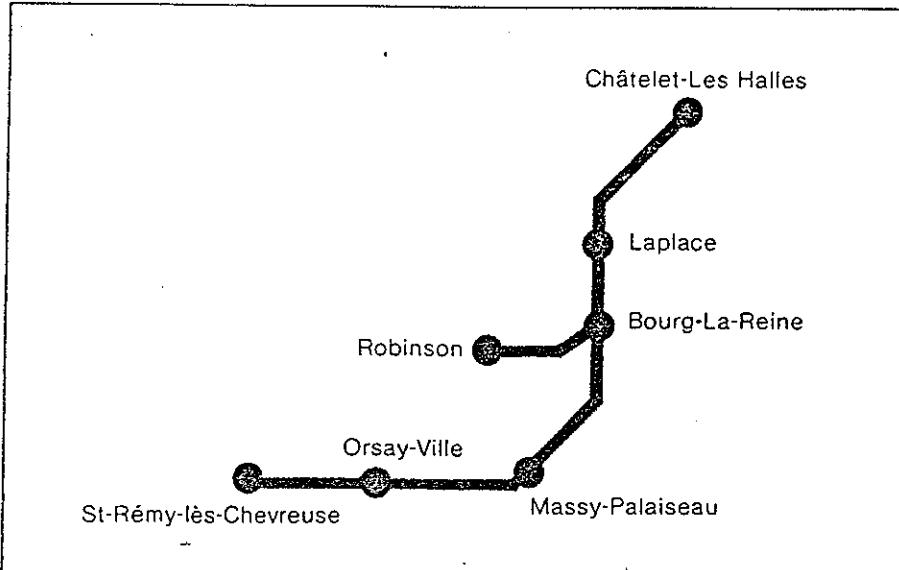


Schéma 2 : caractéristiques de la rafale de la ligne B du RER.

## L'exploitation en rafales

En raison de leurs tracés complexes et de la diversité des flux de voyageurs, les lignes du RER sont exploitées selon un principe de desserte en rafales.

Explicitons cette notion de rafales sur l'exemple de la ligne B. Ses principales caractéristiques sont (voir schéma 2) :

- la desserte de deux branches ;
- une possibilité de dépassement entre trains à la seule gare de Laplace, sur une seule voie ;
- la possibilité de retournement des trains aux gares de Robinson, Saint-Rémy-lès-Chevreuse, Orsay et Massy-Palaiseau.

A l'heure de pointe du soir, cette ligne est exploitée par une rafale de trois trains (trains courts) en neuf minutes (voir schéma 3) :

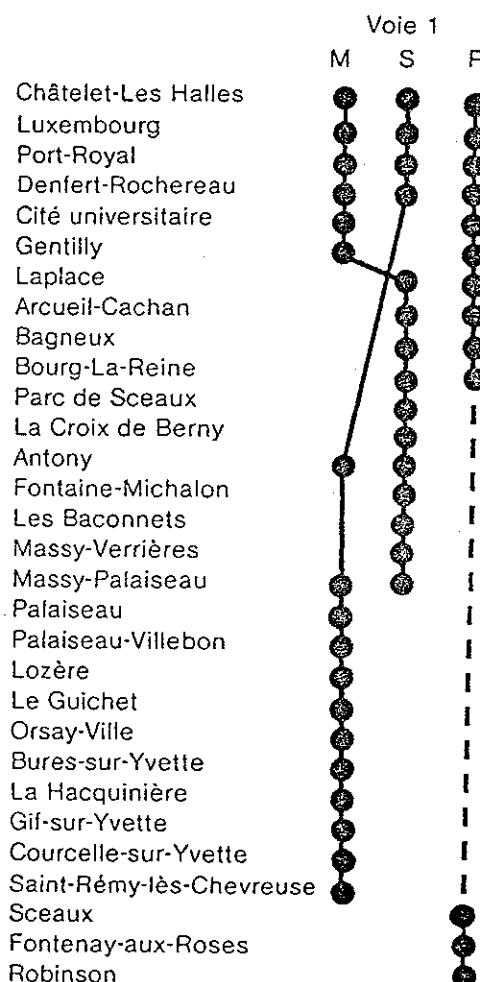
- un premier train part de Châtelet : il est omnibus jusqu'à Massy-Palaiseau ;
- un second train part de Châtelet trois minutes après le premier : il est semi-direct jusqu'à Saint-Rémy et dépasse le premier train à Laplace ;
- un troisième train part de Châtelet trois minutes après le second : il est omnibus jusqu'à Robinson.

Ce cycle se répète pendant toute la durée de la pointe.

**Une rafale**, sur une ligne donnée, est donc définie par :

- sa durée ;
- le nombre de trains différents qu'elle comporte ;
- pour chaque train, sa mission, c'est-à-dire la liste des gares desservies sur les deux voies ;
- l'ordre de départ et d'arrivée des trains au terminus principal, ou en un point de référence de la ligne (Châtelet) ;
- les intervalles entre trains au départ et à l'arrivée au terminus principal, ou en un point de référence de la ligne (Châtelet) ;
- les dépassements éventuels en ligne.

**Une exploitation en rafales** consiste en l'application de la même rafale durant une période de temps définie (la pointe, par exemple). Naturellement, la rafale peut être modifiée à plusieurs reprises au cours d'une même journée.



## Formulation du problème

La détermination des rafales à appliquer, lors de l'interconnexion et de l'extension du réseau, soulève des difficultés d'une acuité particulière.

Divers aspects viennent en effet compliquer la nature du problème à résoudre :

- l'évolution des hypothèses de fonctionnement, notamment en ce qui concerne les dates d'application et les prévisions de trafic, les différents types de matériels disponibles et leurs performances (MI 79 notamment), la symétrie de la desserte sur les deux voies ;
- l'imprécision de certaines informations, notamment en ce qui concerne la prévision des flux de voyageurs sur certains trajets, les performances des matériels roulants futurs ;
- la diversité des critères à prendre en compte, qui peuvent être soit des critères d'exploitation, soit des critères de qualité de service ;
- enfin, le caractère combinatoire du problème théorique (il existe, en effet, un très grand nombre de rafales possibles), limité toutefois en raison des contraintes d'exploitation.

Déjà, en 1973, le problème avait été abordé avec l'aide d'un conseil externe.

La méthode proposée consistait alors en la recherche d'une "meilleure" rafale par énumération de "toutes les rafales possibles" sous certaines hypothèses restrictives (réalisation de trois missions "Saint-Rémy", "Robinson", "Massy" ; prise en compte d'un quatrième train rapide "Orly" à desserte fixée à intercaler entre ces trois missions ; existence d'au moins un dépassement à Laplace par rafale et limitation de l'étude à une seule voie), puis en la sélection des solutions présentant un temps de rafale inférieur ou égal à dix minutes et permettant d'équilibrer les charges des trains (à 10% près entre chaque train) ou, à défaut, assurant une densité de charge ne dépassant pas quatre voyageurs au mètre carré.

Les quelque 130 solutions proposées par cette méthode ont été jugées inac-

ceptables par les exploitants du Bureau des horaires, et cela en raison des hypothèses restrictives introduites, du manque de réflexion approfondie sur les critères et les contraintes à prendre en compte et sur la valeur des flux de voyageurs à considérer, enfin, du caractère évolutif du problème.

C'est pourquoi, à la demande du Bureau des horaires du réseau ferré, l'équipe de RO de la RATP a repris cette étude dans une perspective nouvelle et en se fixant des objectifs plus modestes.

Tout d'abord, un travail important a été réalisé quant à la collecte et la formalisation des informations nécessaires. Ces informations concernent :

- la ligne et son exploitation (tracé de la ligne, type de matériel et performances, caractéristiques de signalisation, temps de stationnement aux gares) ;
- les terminus et leur exploitation (configuration, description des manœuvres, caractéristiques de signalisation, capacité) ;
- la prévision des flux de voyageurs au moyen d'enquêtes (sondages), de comptages et du modèle de prévisions de trafic établi par la RATP pour l'ensemble de la région parisienne.

Ensuite, les critères et les contraintes du problème ont été explicités.

Les principaux critères d'exploitation peuvent se formuler ainsi :

- il faut pouvoir appliquer la rafale choisie avec un nombre limité de trains ;
- il faut assurer une desserte par zone ;
- il faut éviter les ralentissements des trains en ligne ;
- il faut éviter les dépassements entre-trains.

Les principaux critères de qualité de service peuvent se formuler ainsi :

- il faut équilibrer les charges sur les différentes missions ;
- il faut assurer une fréquence suffisante des trains en chaque gare, notamment sur les branches extrêmes ;
- il faut minimiser les temps de trajet ;
- il faut éviter les doubles correspondances.

Par ailleurs, les contraintes du problème sont principalement axées sur :

- le respect de la signalisation en ligne ;

- le respect de la signalisation aux terminus ;
- la comptabilité avec l'exploitation SNCF.

A partir de la formalisation des informations et de l'explicitation des critères et des contraintes, l'étude actuelle consiste en l'**élaboration progressive d'une rafale à l'aide du système interactif d'aide à la décision "RAFALE"** : l'opérateur propose une rafale de son choix et, par simulation, le système en teste la faisabilité, puis l'évalue selon les critères précités.

## Description du système RAFALE

Le système interactif RAFALE consiste en un programme conversationnel permettant de simuler et d'évaluer rapidement, à partir d'un terminal d'ordinateur installé au Bureau des horaires, un nombre important de rafales susceptibles d'être appliquées sur une ligne du RER.

Un tel outil respecte la démarche logique de l'utilisateur qui peut réaliser, à sa convenance, les opérations suivantes :

- introduire une nouvelle rafale, ou examiner et modifier une rafale déjà étudiée et sauvegardée au cours d'un travail antérieur au terminal (phase 1 d'initialisation) ;
- simuler et tester cette rafale en ligne et aux terminus (phase 2 de faisabilité) ;
- puis, l'évaluer au moyen des différents critères (phase 3 d'évaluation) ;
- et enfin, la sauvegarder éventuellement, pour une étude ultérieure (phase 4 de stockage).

En fonction des différents résultats, visualisés sur écran, l'utilisateur peut alors modifier la rafale initiale, l'étudier de nouveau et construire ainsi, progressivement, la rafale qui lui paraît la meilleure.

L'étude d'une rafale est donc réalisée en quatre phases au cours d'un dialogue entre l'utilisateur et le programme ; l'organisation des questions et des réponses principales est présentée sur

les schémas suivants, dans lesquels le symbolisme marque une question posée par le programme à l'utilisateur.

## Initialisation (voir schéma 4)

Dans cette phase 1 :

- l'utilisateur peut introduire une nouvelle rafale : il doit alors entrer au terminal l'ensemble de ses caractéristiques en répondant à un questionnaire relatif aux paramètres de définition (durée de la rafale, nombre de trains par rafale, desserte, etc.) et aux conditions d'exploitation (période considérée, type de matériel choisi) ;
- l'utilisateur peut encore examiner ou modifier une rafale déjà sauvegardée en indiquant le numéro d'identification de cette rafale ;
- l'utilisateur peut ensuite :
  - visualiser la rafale,
  - modifier la rafale, c'est-à-dire changer une ou plusieurs de ces caractéristiques, en répondant à un questionnaire ;
  - traiter une autre rafale dans le cas d'une utilisation en "boucle" du programme réalisant l'étude successive de plusieurs rafales au cours de la même session au terminal ;
  - changer de phase, commande par laquelle il quitte la phase d'initialisation.

La rafale qui vient d'être constituée peut être maintenant testée en ligne et aux terminus, évaluée et sauvegardée au cours des phases ultérieures.

## Faisabilité (voir schéma 5)

Au cours de la phase 2, la simulation de la progression des trains sur la ligne permet de vérifier si l'intervalle entre le passage de deux trains successifs à une gare donnée est supérieur au temps de déblocage du signal correspondant. L'introduction de ralentissements peut être parfois nécessaire pour éviter un intervalle trop court entre les trains et assurer ainsi la **faisabilité en ligne** de la rafale.

C'est à ce niveau que l'on détecte le caractère réalisable ou non de la rafale

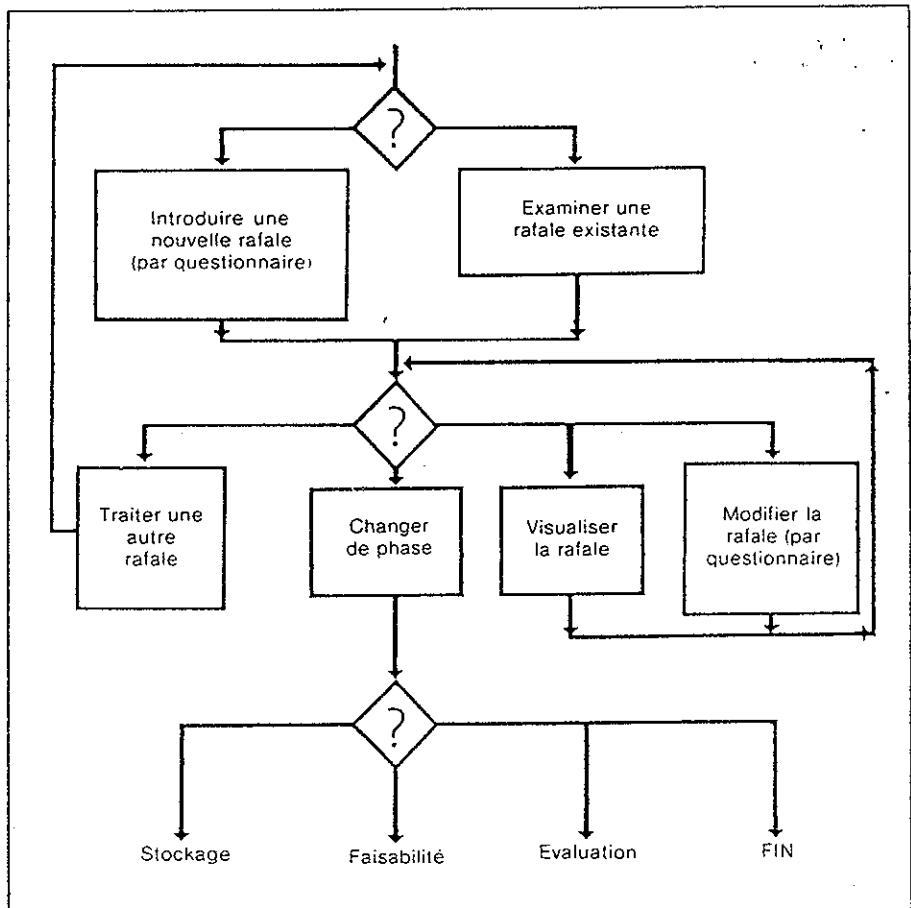
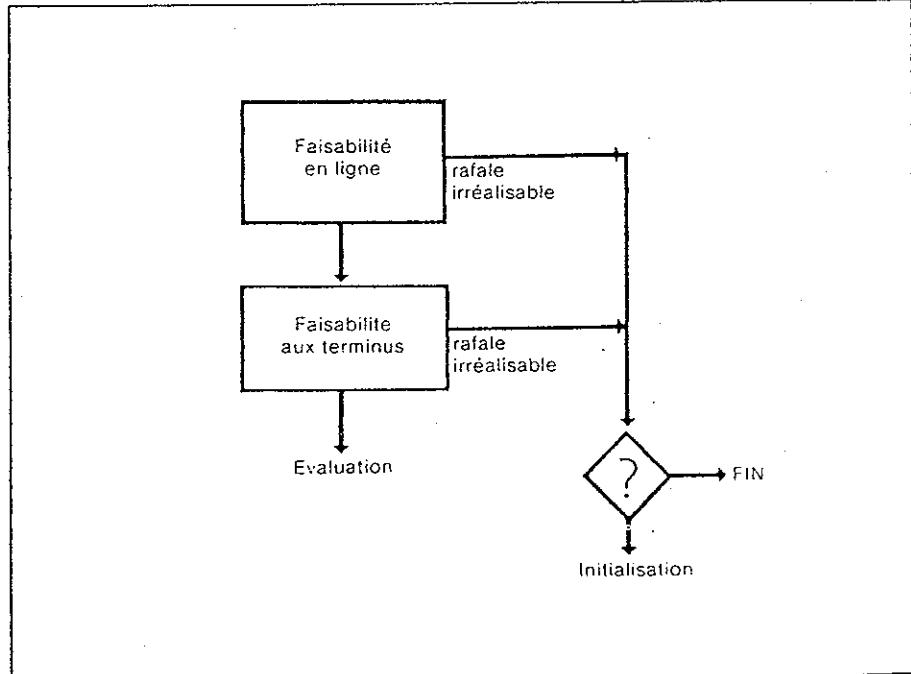


Schéma 4 : étude d'une rafale - phase 1 d'initialisation.

Schéma 5 : étude d'une rafale - phase 2 de faisabilité.



en ligne et la valeur des temps de ralentissement éventuel, à introduire localement; dans la marche-type pratique.

Le programme teste ensuite la faisabilité aux terminus : il vérifie si la rafale proposée respecte les contraintes de retournement imposées dans les différents terminus par construction d'un raccordement réalisable, s'il en existe ; cette opération consiste à affecter à chaque train l'ensemble des départs qu'il doit assurer, c'est-à-dire, à "raccorder" les arrivées aux départs dans chaque terminus.

Le caractère réalisable ou irréalisable de la rafale aux terminus est le premier résultat fourni par le programme. L'ensemble des raccordements possibles est ensuite proposé à l'utilisateur avec, pour chacun, l'évaluation de plusieurs critères d'exploitation : temps de séjour aux terminus, nombre de rames en circulation sur le réseau pour la période d'application de la rafale, etc.

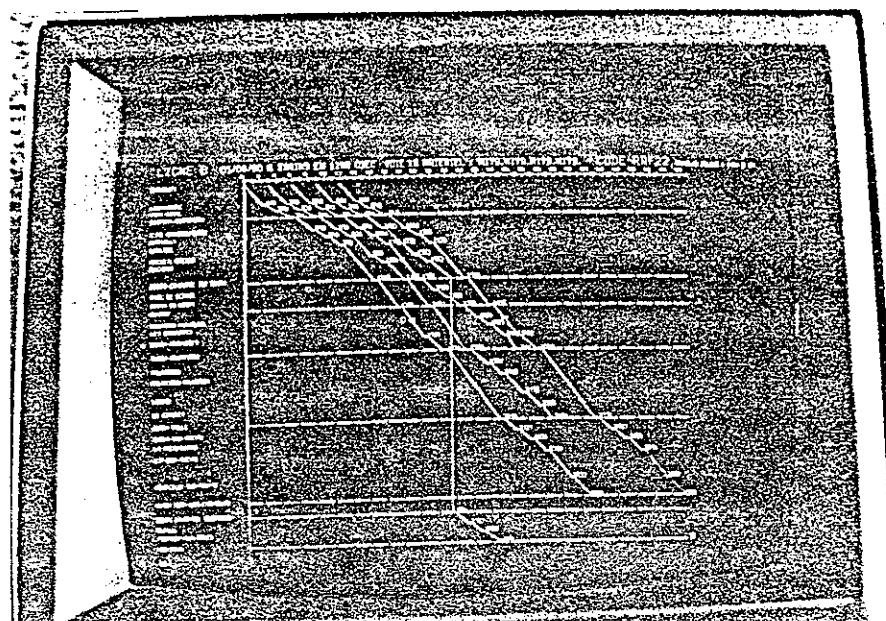
A la fin de cette phase, un module de visualisation sur écran graphique permet de représenter le diagramme espace-temps de la circulation des trains : la rafale se présente ainsi sous une forme directement utilisable par le Bureau des horaires.

## Evaluation (voir schéma 6)

Au cours de la phase 3, la rafale étudiée est évaluée à la demande de l'utilisateur au moyen des différents critères de qualité de service :

- temps de parcours d'un train de la rafale entre deux gares ;
- fréquence de desserte des gares ;
- évaluation des charges des trains à l'horizon actuel ou à l'horizon de l'interconnexion (la charge d'un train est évaluée aux gares successives de la ligne ; on en déduit la charge maximale du train et la gare correspondante) ;
- détection des ruptures de charge (ou correspondances).

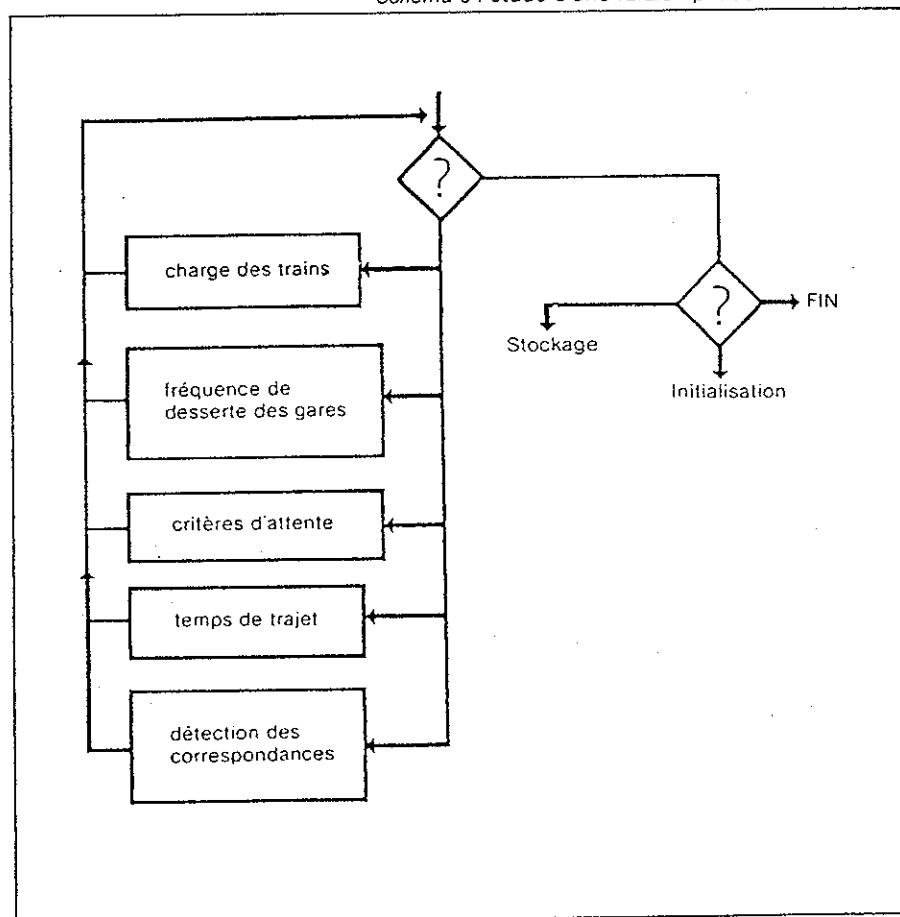
Pour tout couple de gares, on détermine, au moyen d'un algorithme de plus court chemin, le nombre minimal de trains qu'un voyageur doit prendre pour aller d'une gare à l'autre.

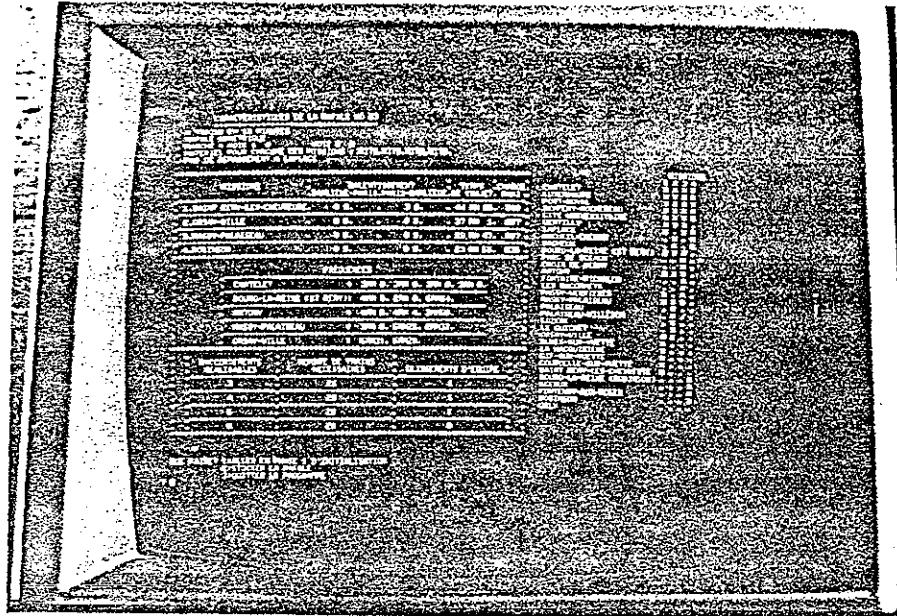


Exemple de diagramme espace-temps (ligne B, rafale n° 22, sens Paris-banlieue) obtenu sur écran graphique de visualisation.

RATP - Chabrol

Schéma 6 : étude d'une rafale - phase 3 d'évaluation.





Ligne B, rafale n° 22 : tableau synthétique des caractéristiques.

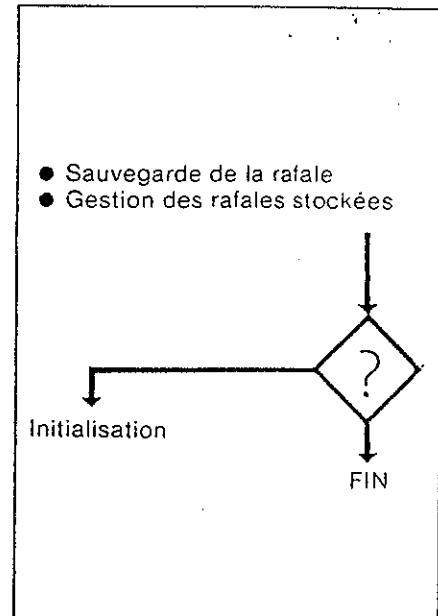


Schéma 7 : étude d'une rafale - phase 4 de stockage.

L'utilisateur peut demander la valeur d'un ou plusieurs critères déterminés ; il peut également obtenir une impression abrégée de l'ensemble des critères sous forme d'un tableau synthétique.

### Stockage (voir schéma 7)

Au cours de la phase 4, l'utilisateur peut sauvegarder la rafale étudiée ; le programme lui restitue le numéro d'identification.

Après la sauvegarde d'une rafale, le programme propose à l'utilisateur de rendre actives ou de supprimer certaines rafales : la gestion des rafales est une autre fonction du système.

L'utilisateur est maître de la stratégie d'élaboration de la solution tandis que le programme effectue des diagnostics et des évaluations. Le dialogue se fait en langage naturel, et n'exige aucune connaissance de l'informatique. Seul un manuel d'utilisation pratique a été écrit pour faciliter l'apprentissage du système.

Retraçons rapidement le processus de conception et de mise en œuvre du système "RAFALE" :

- l'étude, commencée en novembre 1977, a conduit à la conception de la première version du système RAFALE adaptée à la ligne B ; elle reposait sur un corps d'hypothèses H (\*) ;
- en mars 1978, cette version a été jugée probante par les exploitants, qui ont formulé néanmoins certaines réserves sur l'évaluation des charges des trains ;

- en mai 1978, les hypothèses de fonctionnement ayant évolué, le Bureau des horaires a demandé l'adaptation du système à un nouveau corps d'hypothèses H' (\*) ;

- en juillet 1978, la seconde version du système a été présentée et expérimentée avec les responsables du Bureau des horaires ; de nouveau, une réticence assez vive s'est manifestée sur le mode d'évaluation des charges, et, donc, sur la

validité des prévisions de flux de voyageurs de gare à gare.

Une réflexion générale a donc été conduite sur ce point pour confronter les différentes informations disponibles et les diverses méthodes utilisées pour l'évaluation des charges.

Un accord est finalement intervenu, à cet égard, vers le mois d'août 1978.

Depuis cette date, le système "RAFALE" est devenu opérationnel au Bureau des horaires pour la ligne B après une phase d'acceptation et d'apprentissage. Les utilisateurs ont néanmoins la charge de mettre à jour le système d'informations (signaux et charges) à mesure qu'il se constitue, afin d'assurer une précision

(\*) Hypothèses H et H' :  
pour H : le matériel roulant est homogène (c'est le matériel d'interconnexion),  
pour H' : il existe trois types de matériels roulants.

pour H : les heures de départ et d'arrivée des trains au terminus principal (ou en un point de référence de la ligne) correspondent à des minutes entières,  
pour H' : pas nécessairement,

pour H : la desserte des trains est symétrique sur les deux voies,  
pour H' : pas nécessairement

## Mise en œuvre du système RAFALE

Rappelons qu'il s'agit d'un système interactif homme-machine : les agents du Bureau des horaires travaillent à partir d'un terminal connecté à un ordinateur de temps partagé.

croissante des résultats. Cette mise à jour doit se faire selon les modalités explicitées dans le manuel d'utilisation.

En janvier 1979, le Bureau des horaires a demandé l'extension du système à la ligne A. Depuis septembre 1979, ce nouveau système est disponible.

## **Conclusion**

La détermination d'un mode d'exploitation en rafales pour une ligne du RER constitue un problème faiblement "structuré". En effet, il s'agit d'un problème imprécisément défini et difficile à exploiter car il relève d'une activité de type "métier" où interviennent le savoir-faire et l'expérience. Par ailleurs, d'une part les informations ne sont pas toujours disponibles, d'autre part les hypothèses de travail et les critères de choix évoluent rapidement.

Pour ce type de problèmes, il semble que la mise au point d'un système interactif d'aide à la décision constitue une intervention appropriée de la recherche opérationnelle.

Un tel système est fondé sur les principes suivants :

- il doit permettre une amplification du raisonnement humain, d'une part en conduisant à la meilleure formalisation des informations, d'autre part en offrant la possibilité d'expérimentations rapides et nombreuses ;
- il suppose la collaboration des utilisateurs dès la phase de conception de l'outil pour permettre sa prise en charge effective après une nécessaire période d'apprentissage.

Il en résulte certaines qualités déterminantes de l'outil : d'une part, la simplicité des traitements pour en permettre la maîtrise par les utilisateurs ; d'autre part, la souplesse de l'ensemble afin d'assurer une rapide adaptation du système en cas d'évolution du problème.