

Planification opérationnelle des transports urbains en commun: approches et applications

par

MATTHIAS H. RAPP

W. & J. Rapp SA, Ingénieurs-Conseils, Bâle, Suisse

et

PHILIPPE MATTENBERGER

Institut de technique des transports (ITEP)

Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (Suisse)

ROLE DE LA PLANIFICATION OPERATIONELLE DANS UN PROCESSUS GENERAL DE PLANIFICATION

Il y a lieu de tenter tout d'abord d'identifier les problèmes essentiels auxquels seront confrontés les décideurs en matière de transports urbains en commun dans le proche avenir.

Les contraintes fixées par l'aménagement existant de l'espace urbain et par les possibilités financières des collectivités publiques justifient l'hypothèse que, dans les pays industrialisés surtout, l'essentiel de l'infrastructure des systèmes de transport en commun urbains est déjà en place et que les décisions porteront à l'avenir moins sur la réalisation de nouveaux systèmes que sur l'adaptation des réseaux à l'évolution de la demande et aux exigences des collectivités. Ces actions, visant à améliorer les performances du système de transport en commun, porteront en tout premier lieu sur l'organisation de l'exploitation, c'est-à-dire sur l'ajustement de la structure de réseaux de surface, en site banal, sur les horaires, l'acquisition de matériel roulant, la régulation des circulations, la tarification, la politique de stationnement et de réservation de couloirs aux transports en commun (Fig. 1).

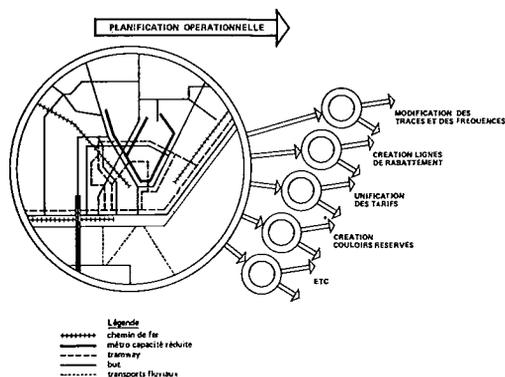


Fig. 1 - Possibilités d'actions sur l'organisation de l'exploitation d'un réseau de transport: illustration du cas de Lisbonne.

Toutefois, dans certains cas, une part importante des budgets d'investissement destinés à l'amélioration des réseaux de transport est et restera encore réservée à la réalisation de projets coûteux qui s'étendent sur plusieurs années. Il s'agira, par exemple, de l'extension d'un réseau lourd, de la réalisation de nouvelles connexions. Chaque nouvelle étape doit certes s'inscrire dans une conception globale cohérente, mais elle doit aussi apporter des améliorations immédiatement ressenties par les usagers. Elle sera ainsi remise en cause, réanalysée, voire optimisée, sur la base de l'état connu du système et des hypothèses de son évolution, au moment de la phase de réalisation (Fig. 2).

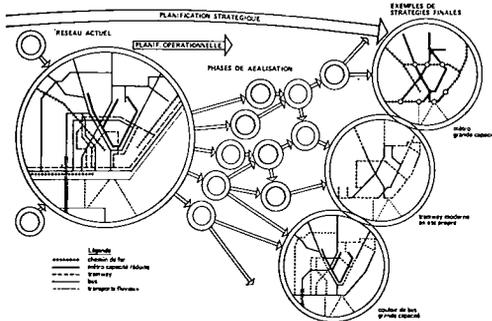


Fig. 2 - Evolution possible d'un système de transport, points de décision et phases de réalisation: illustration du cas de Lisbonne

Par ailleurs, la planification générale, stratégique, des systèmes de transport qui s'inscrit dans celle d'un plan directeur d'une agglomération repose généralement sur des hypothèses à long terme. Mais, l'incertitude, d'une part, concernant des hypothèses relatives à l'aménagement de l'espace, à l'évolution socio-économique et, d'autre part, les coûts internes et externes élevés des systèmes de transports justifie le recours à des instruments permettant de développer, d'évaluer, de faire émerger des propositions efficaces, réalistes et cohérentes n'hypothéquant pas de façon inacceptable l'avenir [1].

Ceci explique l'intérêt croissant d'études de planification

tion opérationnelle, portant sur le fonctionnement d'ensemble des réseaux multimodaux, avec pour objectif essentiel de faire le meilleur usage possible des infrastructures et équipements existants (fig. 3).

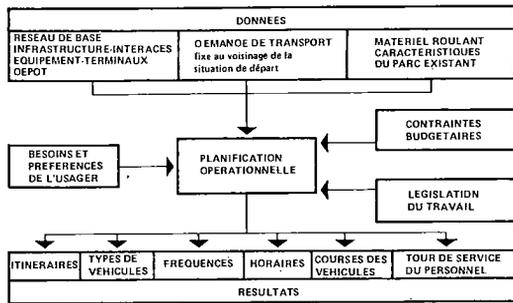


Fig. 3 - Planification opérationnelle: problème type.

METHODES D'APPROCHE

La démarche de la planification opérationnelle est donc apparentée à celle d'une optimisation. Cependant, la formulation des problèmes en termes de variables de décision, de contraintes et d'objectifs présente des particularités qui conditionnent fortement le choix d'une méthode d'approche.

Les variables de décision englobent tous les paramètres sur lesquels le planificateur peut agir pour modifier les performances de l'exploitation d'un système de transport en commun. Leur nombre est considérable et les possibilités de combinaisons difficilement dénombrables. Il y a lieu de citer, parmi celles qui sont les plus utilisées, l'itinéraire des lignes, l'organisation des circulations sur un tronçon donné, l'aménagement des interfaces, la structure des horaires, l'utilisation des véhicules.

Les contraintes expriment pour l'essentiel les limites que constituent les ressources disponibles. Il s'agit, dans le cas particulier, de celles qui ont trait à l'infrastructure du réseau, aux budgets d'investissement et d'exploitation des compagnies de transport, à certains éléments de la législation du travail... Il peut s'agir, par exemple, de conditions locales d'exploitation liées à la géométrie de l'infrastructure, à la régulation du trafic, à l'aménagement existant ou possible des interfaces, parfois même à certaines habitudes des usagers. La plupart d'entre elles n'ont donc pas un caractère définitif et sont difficilement quantifiables. Il importe donc de faire preuve d'une souplesse suffisante dans la prise en considération de telles contraintes.

Les objectifs de tout processus d'optimisation s'expriment sous forme de fonctions objectives, lorsqu'ils peuvent facilement être ramenés à un dénominateur commun, ces cas sont pratiquement inexistantes au niveau des objectifs généraux. Il est en revanche possible de rencontrer de telles circonstances pour l'une ou l'autre étape conduisant à l'ensemble des mesures envisagées.

Les prises de décision en matière de transport résultent le plus souvent d'approches et d'évaluations multi-objectifs et multi-critères. L'agrégation des variables d'évaluation ou de mesures d'impacts n'est pas souhaitable dans ces conditions, car elle constituerait ipso facto soit une véritable substitution des planificateurs aux décideurs, soit l'expression a priori de fonctions de préférence par ces mêmes décideurs (p.e. analyse coût-avantage), alors que de nombreux arbitrages ne se révèlent le plus souvent qu'en cours d'étude.

Le processus d'optimisation du fonctionnement d'un système de transport consiste donc à dégager des solutions pour une mise en oeuvre des ressources de façon à atteindre les meilleures performances, selon certains critères tels que réduction du nombre de transbordements, des temps moyens de parcours, des coûts d'exploitation, accroissement de l'accessibilité en provenance ou à destination de zones de la région d'étude (Fig. 4).

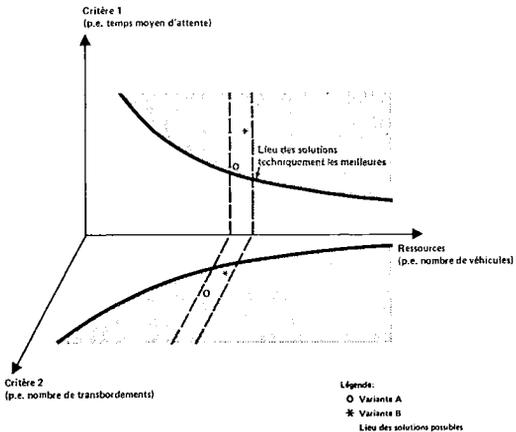


Fig. 4 - Evaluation de variantes selon plusieurs critères sur un domaine restreint de variation des ressources.

Le fonctionnement du système est représenté par des relations entre les variables de décision, les variables endogènes et exogènes et les variables d'évaluation qui constituent les bases de la modélisation. Il y a lieu, dans le cas de la planification opérationnelle, de rendre compte des modifications de l'équilibre offre-demande sous l'effet des actions sur l'offre, ainsi que des coûts qu'elles engendrent. Il s'agit donc des relations qui apparaissent, d'une part, dans les modèles de transport, et, d'autre part, dans les modèles de coût.

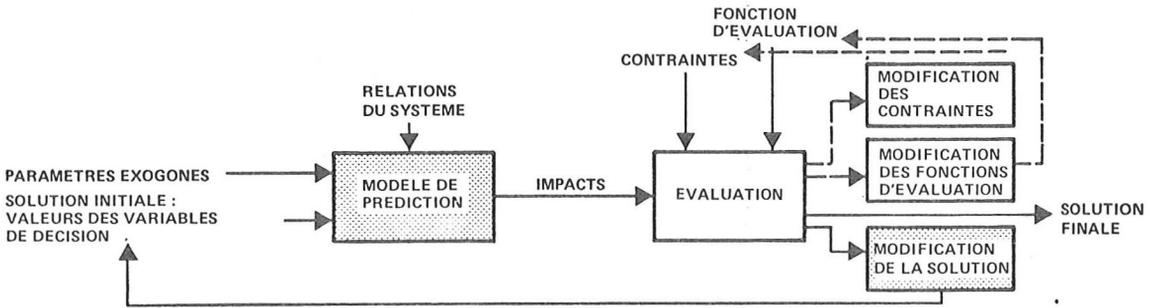
Les expressions qui interviennent sont complexes, elles ne peuvent pas être réduites, par exemple, à un système d'équations linéaires; elles font de plus intervenir des paramètres qu'il n'est possible d'appréhender que sur la base de l'analyse d'états de fait et en prenant pour hypothèse une certaine stabilité de comportement du système.

Compte tenu des remarques qui précèdent, les modifications qui peuvent être envisagées ne sauraient provoquer un bouleversement, mais il devrait s'agir de corrections successives qui conservent à la situation de départ un poids prédominant. Dans ces conditions, le fonctionnement du système peut être appréhendé par une méthode d'analyse du type „point pivot” ([2], chap. 1-3/17).

Les méthodes d'approches des problèmes d'optimisation peuvent être classées en deux groupes:

- l'approche directe basée sur une formalisation très poussée du problème, compatible avec l'existence d'un algorithme d'optimisation qui détermine les valeurs de la solution optimale;
- l'approche exploratoire qui repose sur un modèle de prédiction des impacts appliqué à chaque variante conçue à partir de solutions initiales, permettant ainsi, par corrections successives, d'approcher les solutions les meilleures (Fig. 5) [3].

(a) L'APPROCHE EXPLORATOIRE



(b) L'APPROCHE DIRECTE

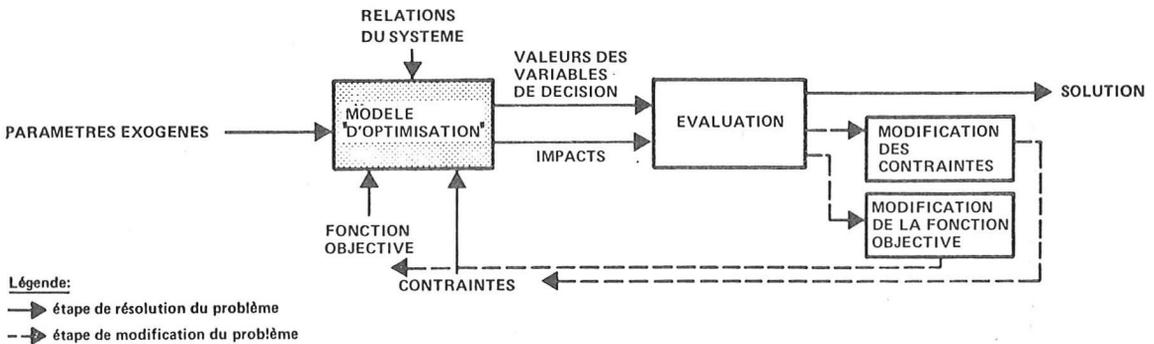


Fig. 5 - Les méthodes d'approche des problèmes de conception d'un système

Il apparaît clairement que les caractéristiques des problèmes de planification opérationnelle des transports en commun dont il a été question justifient une approche exploratoire. L'optimisation directe par des méthodes mathématiques, si elle était légitime et possible, exigerait des dépenses importantes et parallèlement des simplifications souvent incompatibles avec les exigences pratiques.

La recherche des solutions les plus prometteuses à l'aménagement et l'exploitation de réseaux de transport passe donc par le développement, l'évaluation puis l'amélioration de variantes dans un même processus. Il s'est avéré, dans les expériences réalisées depuis quelques années, que le recours à des modèles interactifs livrant des informations numériques et graphiques est particulièrement efficace pour ce genre d'activités [4].

Ils offrent à leur utilisateur la possibilité d'être informé très rapidement et de façon précise sur les conséquences des dispositions envisageables et de porter un jugement sur leur efficacité. Les opérateurs conservent tout au long de l'étude une vision globale des problèmes, ils peuvent ainsi exercer leurs capacités d'innovation et faire la synthèse de leurs démarches, alors qu'ils confient à l'ordinateur les tâches de calcul et de présentation des résultats (Fig. 6).

De telles méthodes offrent la souplesse désirée pour faire intervenir des contraintes et les arbitrages. Elles ont un effet de stimulation inventive qui favorise l'émergence des solutions dominantes.

Un certain nombre de méthodes d'étude et d'instruments ont été développés jusqu'ici pour la planification opérationnelle des systèmes de transport, ils sont utilisés, dans la pratique courante, pour les études sectorielles auxquelles ils semblent le mieux convenir: l'établissement des horaires, la rotation du matériel roulant et l'élaboration des tableaux de services.¹

Mais les limites de telles pratiques résident dans la difficulté de tenir compte de l'interdépendance des problèmes allant du choix de la structure d'un réseau multimodal à l'élaboration des horaires, des plans de courses et des tours de services.

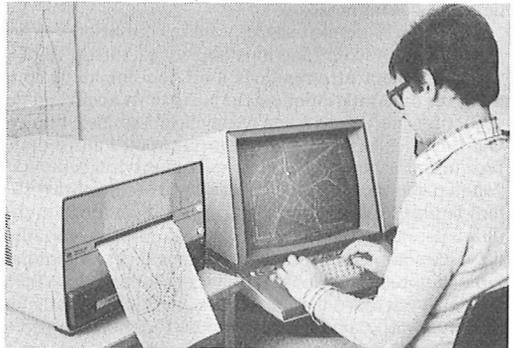


Fig. 6 - Illustration de l'utilisation d'un modèle interactif et graphique.

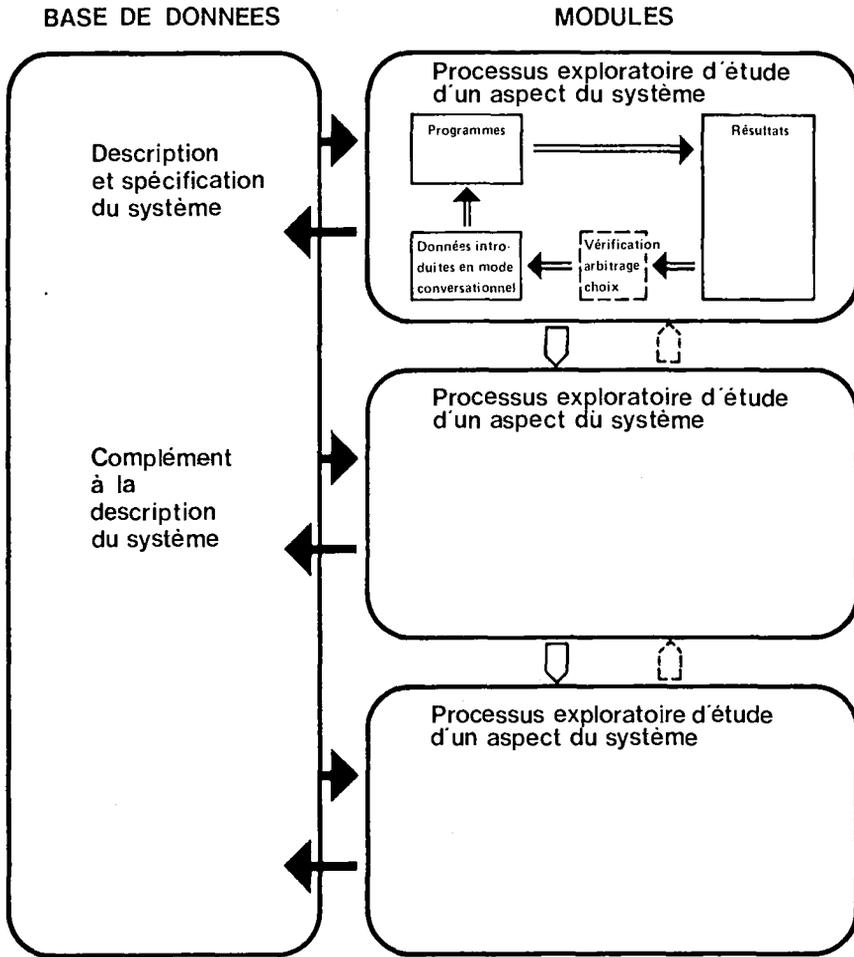


Fig. 7 - Instrument de planification opérationnelle: principe de l'articulation base de données et modules.

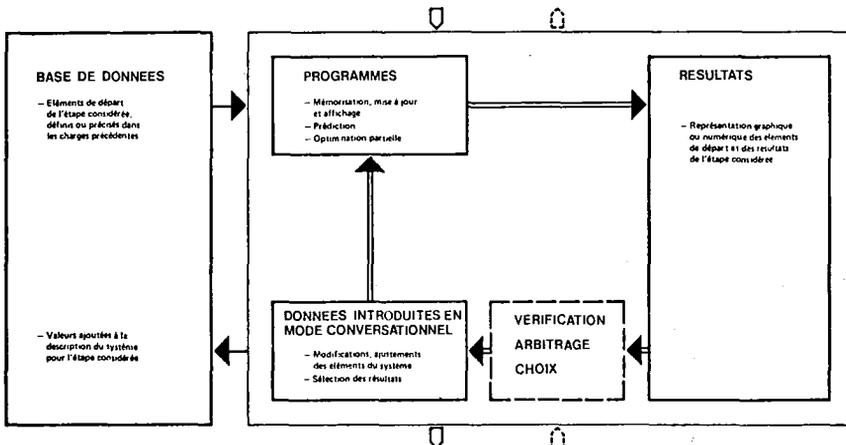


Fig. 8 - Instrument de planification opérationnelle: principe de fonctionnement d'un module.

LES INSTRUMENTS

L'instrument qui est présenté ici, le modèle NOPTS, a été développé en recourant non seulement à l'interactivité, mais en tentant d'intégrer diverses étapes de planification opérationnelle. Il met en interaction:

- une base de données, dont le rôle est la description permanente des composants du système étudié et de leurs interactions (Fig. 7);
- un certain nombre de modules ou programmes interactifs permettant de définir, de modifier, de compléter et d'analyser l'état du système étudié sous la forme où il est représenté (Fig. 8).

Une telle conception favorise la création et la mise à jour permanente d'une base de données unique et facilite le développement continu du modèle.

Dans la plupart des études de transport, en effet, le coût de la préparation des données est considérable et cet investissement est en grande partie perdu après les études souvent ponctuelles pour lesquelles il a été consenti. La mise en place d'une base de données et surtout

de procédures d'examen et de mise à jour en mode conversationnel élargit l'éventail et augmente la fréquence de son usage assurant par là même en permanence des informations de qualité et donc mieux adaptées au caractère continu du processus de planification.

Le développement de nouveaux modules en fonction de l'évolution des connaissances et de la nature des objectifs est rendu plus aisé, puisqu'ils viennent se greffer sur un système informatique dont un grand nombre d'éléments sont utiles à l'étude de nouveaux aspects, favorisant ainsi tout à la fois l'extension et l'affinement progressif de l'instrument.

L'état actuel du développement du modèle NOPTS et de ses différents modules est représenté schématiquement dans la figure 9.

Conception et évaluation des réseaux

Leur premier module a pour objet l'étude du tracé ou de l'itinéraire des lignes, du type des convois et des fréquences d'exploitation suivant la démarche présentée à la figure 10.

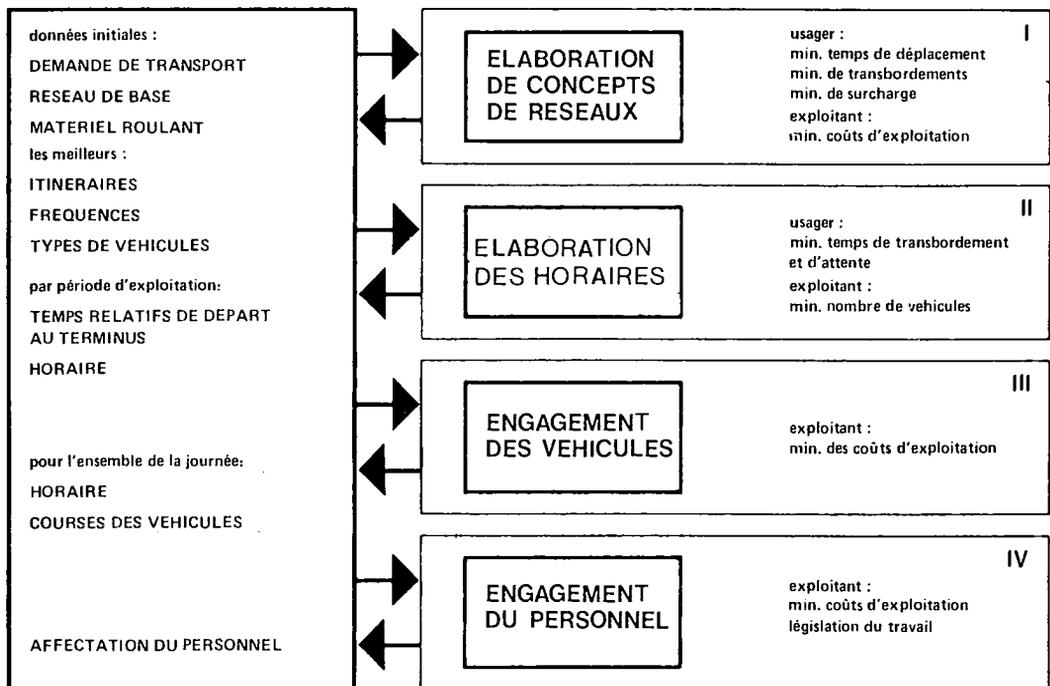


Fig. 9 - Modèle NOPTS: articulation des modules

Le modèle d'affectation des transports collectifs constitue la pierre d'angle de ce module qui permet de passer de la phase d'élaboration d'une variante à celle de son évaluation. Son rôle est de simuler le comportement des usagers face à l'offre de transport dont le planificateur définit les caractéristiques. Cette opération prépare donc les éléments nécessaires à la vérification de certaines contraintes et à l'appréciation de l'effet des paramètres et de l'efficacité des choix.

L'évaluation des choix des usagers repose sur une technique d'affectation multi-chemin qui permet de tenir compte de la diversité telle qu'opérations élémentaires de déplacement - parcours à bord des véhicules, transbordements, attente des convois, déplacements à pied - des réactions différenciées des usagers. Une autre caractéristique importante, qui a guidé le choix de la

technique adoptée, touche à la rapidité d'exécution des informations, de façon à rendre possible l'intégration de la phase d'affectation dans le processus itératif d'élaboration et d'évaluation de variantes.

Le modèle multiplicatif que R.B. Dial a proposé pour le trafic individuel a été retenu comme base de travail [5].

Considérons un graphe $G(V, E, d)$ avec:

V ensemble de noeuds V_i

E ensemble fini d'arcs directionnels et représentant une opération élémentaire de déplacement

d une fonction définie sur les arcs et qui associe à chacun d'eux une valeur non négative. Cette fonction peut être définie comme une mesure de l'utilité (ou conductivité) de l'arc

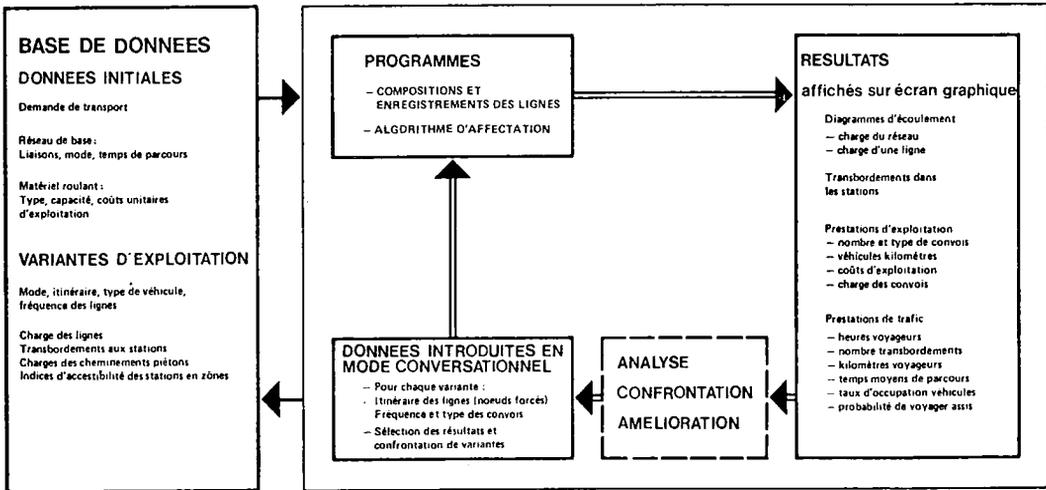


Fig. 10 - NOPTS phase 1: élaboration de concepts de réseaux.

$L(e)$ caractéristique additive d'un arc; longueur ou coût généralisé

$P_{i,j}$ un chemin sur G de V_i à V_j

$P_{i,j}$ l'ensemble des chemins de V_i à V_j

$Pr(p)$ mesure du poids (ou de la probabilité d'être emprunté d'un chemin)

$Pr(e)$ mesure du poids d'un arc

Un modèle multiplicatif a la forme suivante:

$$Pr(p) = \prod_{e \in E} K Pr(e)^{\delta_{ep}}$$

K : facteur de proportionnalité

$$\delta_{ep} = \begin{cases} 1 & \text{si } e \in p \\ 0 & \text{si } e \notin p \end{cases}$$

R.B. Dial a proposé d'adopter comme fonction de mesure de l'utilité des arcs une expression qui peut être ramenée à la forme suivante [6]:

$$\text{si } e \in p \quad \forall p \in P \\ d(e) = 0$$

$$\text{si } e \notin p \quad \forall p \in P \\ d(e) = \exp(-\theta L(e))$$

L'application de principes similaires au cas de réseaux de transport individuel comporte deux phases:

- la construction du graphe G à partir de la description des lignes, des cheminements piétons et des interfaces, cette opération est réalisée automatiquement, sur la base des informations disponibles dans la base de données pour chaque variante; il s'agit principalement du tracé des lignes, du type et de la fréquence des convois (Fig. 11a);

- l'attribution à chaque opération élémentaire de déplacements d'une fonction $L(e)$ permettant d'exprimer et de mesurer la conductivité ou l'utilité des arcs, c'est à ce niveau que doivent être mises en évidence les valeurs relatives que l'utilisateur place dans les diverses opérations élémentaires de déplacement et qui déterminent le choix de son itinéraire.

Des coefficients expriment ces relations entre les opérations de parcours à bord des véhicules, les transbordements, les délais d'attente des véhicules, les déplacements à pied.

La forme générale est: $L(e) = \alpha_i t_e$ où t_e est la durée de l'opération et α_i le coefficient de la catégorie à laquelle

appartient e , qui doit être déterminé statistiquement sur la base d'états de fait. Ces valeurs peuvent être attribuées pendant la phase de création du graphe. Font exceptions les opérations d'attente des convois qui dépendent des fréquences combinées des lignes disponibles et par là même de l'origine et de la destination des usagers.

Dès lors, le calcul des volumes de déplacement pour chaque arc d'un réseau multimodal comporte les mêmes étapes que celles d'un réseau homogène, unimodal.

Ce calcul est effectué successivement pour chaque origine de déplacement

- dans un *pas en avant*, les poids relatifs des arcs sont calculés à un facteur près, les nœuds étant traités dans un ordre topologique fixé par leur temps ou coût d'accès minimum depuis l'origine considérée. Cet ordre résulte dans notre cas de l'application de l'algorithme de Moore [7];

- dans un *pas en arrière*, les poids des arcs sont déterminés et simultanément les volumes de déplacement sur chacun d'eux; l'ordre topologique étant l'inverse du précédent.

Les charges des lignes, les mouvements de transbordement, les temps moyens de déplacements et d'attente, l'ensemble des variables caractérisant les déplacements des usagers peuvent être évalués (Fig. 11b) à partir des valeurs obtenues pour chaque opération élémentaire représentée dans le graphe.

Optimisation des horaires

Pour tirer profit au maximum d'un réseau des équipements du matériel roulant et d'un programme d'exploitation donné, les entreprises de transports publics sont placées, lors de l'établissement de l'horaire, face aux problèmes de l'ajustement des correspondances des lignes, de la succession des véhicules aux arrêts et sur les tronçons communs à plusieurs lignes.

L'objectif principal du deuxième module est de permettre à l'exploitant d'améliorer la qualité de service en réduisant les temps de transbordement résultant de l'attente des correspondances, tout en utilisant de façon efficace le matériel roulant (Fig. 12).

L'ajustement des horaires est réalisé pour diverses périodes d'exploitation de la journée, pendant lesquelles les lignes sont exploitées à des fréquences constantes.

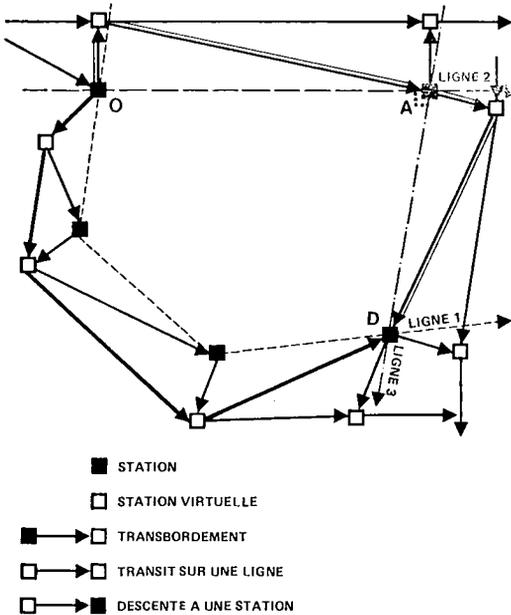
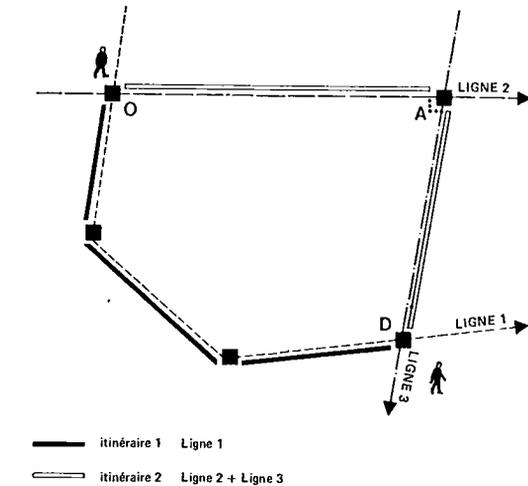


Fig. 11A - Représentation partielle d'un graphe créé à partir de la description des lignes.

Ces périodes correspondent à celles qui ont été choisies pour l'évaluation des concepts. Les résultats de l'affectation, notamment les mouvements de transbordement de ligne et au niveau de chaque noeud qui ont été enregistrés, sont alors utilisés pour l'étude des horaires.

L'ajustement des correspondances aux noeuds du réseau consiste à favoriser les mouvements préférentiels de ligne à ligne. Cependant, toute modification qui apporte des améliorations locales peut avoir globalement une incidence néfaste sur le temps total de transbordement.

Le problème est donc complexe et il s'est avéré utile de confier à l'ordinateur non seulement une tâche d'évaluation, mais également celle de dégager, par une heuris-

tique, du type "branch and bound", une solution optimale ou quasi optimale. L'opérateur peut agir par corrections successives, à partir d'une variante établie dans l'optique d'abaisser au maximum le temps total de transbordement, tout en maintenant le nombre de véhicules au niveau fixé pour les fréquences d'exploitation et les temps de pause minimums en fin de parcours. Les documents d'exploitation tels que les horaires graphiques peuvent être affichés à volonté sur l'écran et reproduits sur un support permanent. Ils donnent des indications utiles sur l'occupation des tronçons et la succession des convois.

Elaboration des courses et rotation du matériel

Les deux premiers modules sont utilisés pour une ou successivement plusieurs périodes d'exploitation journalières pendant lesquelles le fonctionnement du système est considéré comme invariable.

Le troisième module permet de composer le programme d'exploitation journalier du réseau de transport en commun étudié, à partir des tranches horaires définies préalablement (Fig. 13).

La transition d'une période d'exploitation, qui correspond par exemple à un faible niveau de demande, à la suivante, celle qui est exigée par un trafic d'une heure de pointe, est ajustée en mode conversationnel par l'utilisateur du modèle, vraisemblablement, à ce stade, par le service des horaires de l'exploitant. Cette opération achevée, il peut procéder à l'élaboration du tableau des courses de chaque véhicule. Les lignes, qui ont un terminus commun et dont le service peut être assuré successivement par les mêmes véhicules, doivent être regroupées. Il y a lieu de tenir compte enfin des temps de parcours entre terminus et dépôt.

Le tableau de formation des courses peut dès lors être élaboré grâce au modèle, à partir de l'horaire complet.

Chaque transfert possible des véhicules, d'un terminus ou d'un dépôt à un autre terminus ou dépôt, pour assurer le service, est représenté sur un graphe par un arc muni d'une capacité de borne inférieure à un ou zéro et de borne supérieure à un, ainsi que d'un coût unitaire de transfert. Le programme détermine alors le flot de coût minimal, compatible avec les bornes de capacités.

L'algorithme utilise la méthode out-of-kilter de Fulkeron [8].

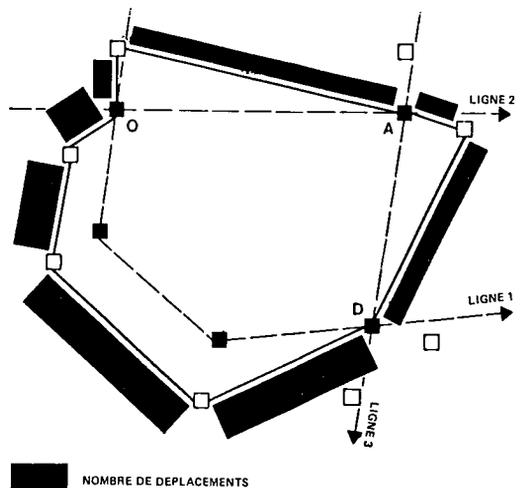


Fig. 11B - Illustration partielle des résultats de l'affectation obtenus sur le graphe des opérations élémentaires de déplacement.

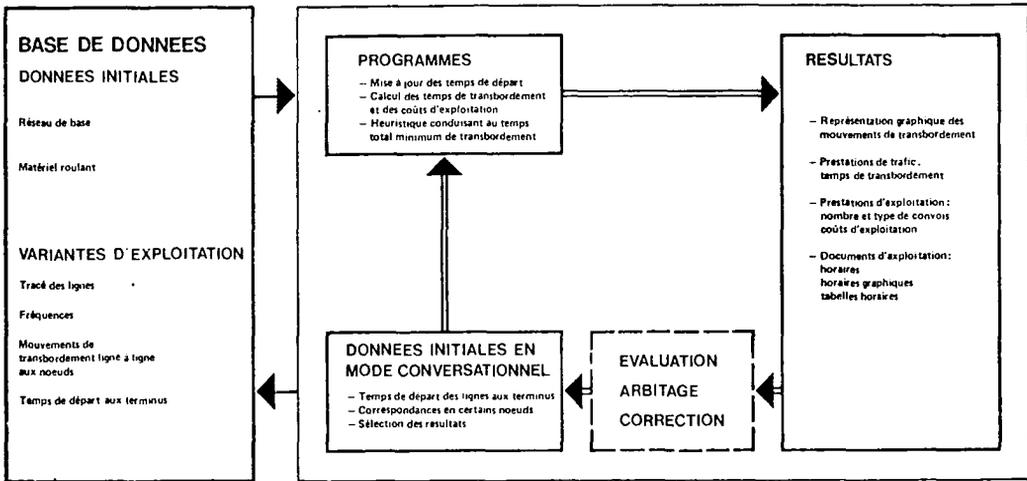


Fig. 12 - NOPTS phase II: élaboration des horaires

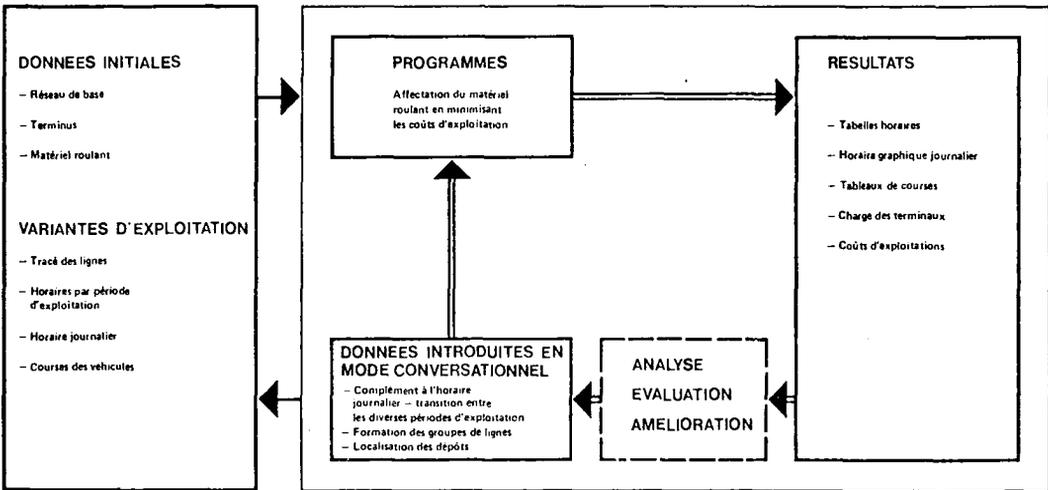


Fig. 13 - Nopts phase III: élaboration des courses des véhicules

L'utilisateur peut établir diverses stratégies de service en intervenant au niveau du groupement des lignes et du graphe composé des transferts possibles.

La phase traitant de la formation des tours de service et de l'engagement du personnel n'a pas encore été abordée sur le plan de la programmation.

APPLICATIONS ET ENSEIGNEMENTS

Le modèle NOPTS est opérationnel depuis près de trois ans. Il a été appliqué et l'est actuellement dans le cadre d'études des réseaux de transport de Lausanne, Bâle, Zurich, Turin, Lisbonne et Porto. Il a de plus été acquis par l'administration américaine des transports urbains (UMTA)² qui assurera sa distribution aux Etats-Unis³.

Une brève description des objectifs, du contexte dans lequel elles se sont déroulées et des résultats de ces applications est donnée en appendice, à l'exception de

celle de Turin⁴, dont nous n'avons pas encore eu connaissance jusqu'ici de l'ensemble des résultats.

Un certain nombre d'enseignements peuvent être déjà tirés de ces expériences: *le fonctionnement et la qualité de service d'un réseau de transport en commun peut être souvent substantiellement amélioré tout en respectant la contrainte fixée par le niveau des coûts d'exploitation existants ou en consentant des investissements limités.*

L'étude de restructuration du réseau de Bâle a montré, par exemple, que même un réseau très bien géré peut voir son service amélioré en adaptant les itinéraires, par le jeu de lignes radiales et diamétrales, ainsi que les fréquences à l'évolution de la demande. Quelques éléments de comparaison entre la situation de départ (1975) et la variante retenue comme étant la mieux adaptée par le service des transports en commun, à l'issue de l'étude, sont rassemblés dans le tableau 1.

Tableau 1 – Comparaison réseau actuel, variante retenue (source: Basler Verkehrs-Betriebe „Netzoptimisierungssystem für die Netzstruktur der öffentlichen Nahverkehrsmittel in der Region Basel“, Basel, Juni 1975).

Critères	Réseau (1975) existant	Variante retenue	Améliorations relatives (%)
– Temps moyen de déplacement (min.)	17.0	16.9	0.6
– Nombre de transbordements (par heure de pointe)	17'550	15'830	8.2
– Degré de surcharge (% de passagers-km en véhicules surchargés)	4.8%	3.8%	20.8
– Probabilité d'obtenir une place assise	70.6%	68.4%	-3.1
– Nombre de véhicules engagés pour l'heure de pointe	202	204	-1.0
– Coûtes d'exploitation par heure (S.Fr.) (y compris l'amortissement du matériel)	19'287	20'139	-4.4

Sur le plan de l'adaptation des horaires, il a été possible de mettre en évidence, toujours pour le cas de Bâle, la possibilité de réduire considérablement les temps d'attente des correspondances en ajustant, pour des fréquences données, les temps de départ aux terminus. Cette opération n'entraîne aucun accroissement des coûts d'exploitation et respecte les temps minimums d'arrêts en bout de ligne, fixés par des conventions collectives.

Les gains obtenus sur les temps d'attente sont évidemment plus importants pour les périodes de la journée durant lesquelles la demande est faible, par exemple le soir et les fins de semaine où, à Bâle, la plupart des lignes sont exploitées avec cadence de 12 minutes. Le tableau 2 est établi pour un tel cas.

Tableau 2 – Comparaison horaire actuel et horaire optimisé en fonction d'une réduction de la durée d'attente des correspondances.

Critères	Horaire actuel	Horaire optimisé	Améliorations relatives (%)
Temps moyen d'attente des correspondances (min.)	7.0	5.7	19
Nombre de véhicules engagés	82	82	—

La technique interactive, associant au modèle l'expérience du planificateur et de l'exploitant, favorise une approche exploratoire qui conduit à des solutions mieux adaptées à la situation existante et à son évolution, que les approches traditionnelles.

Des études parallèles ont été effectuées à Bâle, l'une, celle de la restructuration de l'optimisation de certains éléments du réseau existant de Bâle, à l'aide du modèle NOPTS et l'autre en s'appuyant sur des modèles de planification stratégique, cette dernière a été d'ailleurs proposée dans le cadre de l'établissement d'un plan directeur des transports.⁵ Le réseau de transport en commun proposé dans ce plan pour une hypothèse donnée de l'évolution de l'occupation du sol a été comparé, sur la base de la demande actuelle à la variante développée à l'aide du NOPTS. Les résultats obtenus se présentent comme il suit:

Tableau 3 – Comparaison des variantes de réseaux de transport en commun résultant d'une approche exploratoire et d'une approche classique dans le cadre d'une planification stratégique.

Critères	Réseau résultant de l'étude de restructuration NOPTS	Réseau proposé dans le cadre du plan directeur (1)	Différences relatives (%)
– Temps moyen de déplacement (min.)	16.9	17.3	- 2.4
– Nombre de transbordements (heure de pointe)	15'830	23'830	- 50.5
– Degré de surcharge	4.8%	1.9%	+60.4
– Nombre de véhicules engagés	204	233	+ 14.2
– Coûts d'exploitation par heure de pointe	19'287	25'382	+31.6

Même si les données à partir desquelles sont bâties ces deux variantes sont différentes, il est intéressant de constater que la variante élaborée dans le cadre d'un plan directeur sur la base d'une évolution de la demande, qui reste hypothétique, représente, pour la situation existante, une solution mal adaptée.

Un modèle de planification opérationnelle utilisant une technique interactive graphique offre une possibilité intéressante de concilier les points de vue entre les différents services chargés de la gestion des réseaux et les différents groupes d'utilisateurs, en favorisant leur participation dans le processus d'élaboration et d'évaluation de variantes.

L'application de Bâle permet également d'illustrer ce point. Elle a été mandatée par trois services concernés par les transports en commun de la région: le service d'urbanisme de la ville, le service de planification régionale et la compagnie d'exploitation (Basler Verkehrs-Betriebe).

Un ou plusieurs professionnels de la planification, appartenant à chaque organisme, ont suivi une rapide mise au courant de l'utilisation du modèle avant de procéder, d'abord indépendamment, puis conjointement, à l'élaboration de diverses variantes. Cette approche qui rappelle celle des jeux d'entreprise a été réalisée à partir d'une base de données commune, mais parfois avec des objectifs différents.

La solution retenue à la fin de ces travaux a été le résultat d'une confrontation d'idées et d'objectifs, de négociations et d'arbitrages.

Par la suite, la solution retenue par les professionnels a été comparée, toujours en mode conversationnel, avec la structure des lignes proposée par une association d'usagers des transports publics.

La souplesse offerte par la technique interactive graphique, associée à la désagrégation de l'évaluation et de la représentation des impacts favorise l'examen détaillé du fonctionnement des réseaux sous de multiples aspects, en particulier celui de chaque action envisagée et prise isolément.

Même des actions mineures, relatives à l'exploitation, telles qu'une augmentation ou une diminution des fréquences, ainsi que des adaptations d'horaire provoquent des effets favorables pour certains groupes d'usagers et défavorables pour d'autres.

Il est dès lors très précieux d'être en mesure de comparer des variantes sur la base non seulement de valeurs globales, mais également au niveau des effets locaux. Par exemple, la représentation graphique d'indices de modi-

fication „d'accessibilité" permet de mettre en évidence les zones favorisées ou défavorisées par les mesures envisagées et de les tester sous l'angle de l'équité (Fig. 14).

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Il est souvent délicat d'évaluer, à partir d'une situation connue et de quelques scénarios d'occupation future du sol, ce que pourra être la demande dans un avenir plus ou moins lointain et d'en tirer des propositions précises sur le développement à donner à l'offre de transport.

De telles études permettent toutefois d'évaluer certains impacts d'options, à moyen terme, portant par exemple sur l'extension de l'ossature principale d'un réseau de transport en commun.

De telles options peuvent servir à orienter les corrections et transformations successives qui sont apportées aux réseaux de transport et à leur exploitation afin de les adapter à l'évolution progressive de l'aménagement de l'espace (voir fig. 2).

APPLICATION EXEMPLE BASEL, SWITZERLAND NETWORK OPTIMIZATION

COPY OF DESIGN 1000

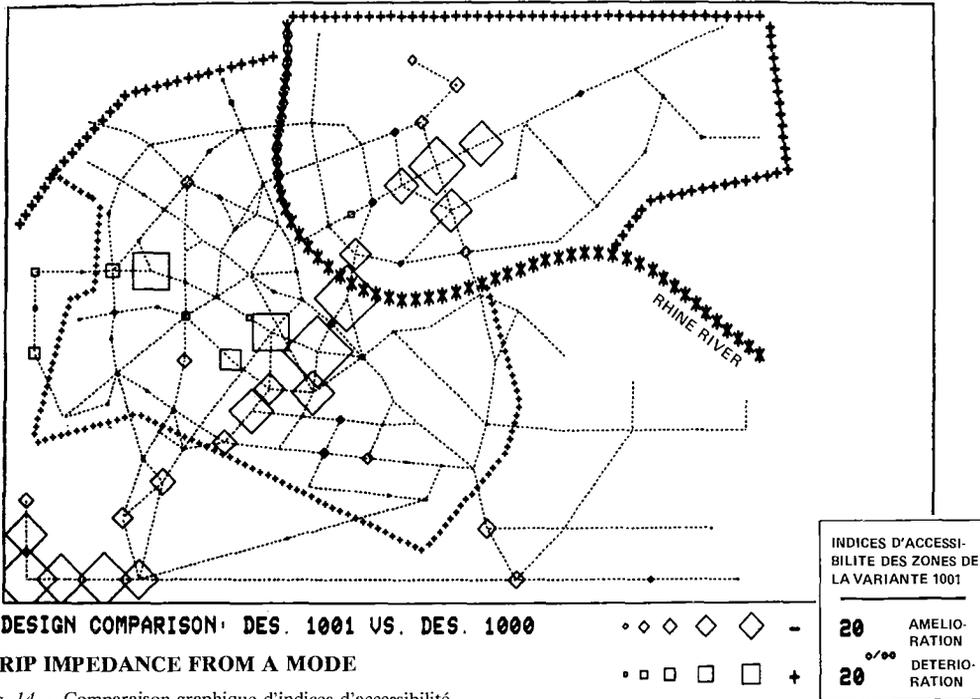


Fig. 14 - Comparaison graphique d'indices d'accessibilité

Bien que les études de planification de nombreux réseaux de transport se soient étendues sur plusieurs années, elles ont été basées sur des données représentant un état instantané. Une part non négligeable des moyens a été consacrée à la récolte et à la codification des données caractérisant un état de fait. Les efforts de mise à jour des données n'ont souvent pas été suffisants pour fournir au planificateur une source permanente d'informations durant le processus cyclique de planification, de décision et de réalisation qui conduit, étape après étape, aux véritables transformations d'un réseau.

Il importe donc de donner à l'établissement d'une base de données et de procédures d'examen et de mise à jour une importance de premier ordre.

Leur conception doit être guidée par le souci de livrer aux organismes chargés de la gestion des réseaux, les données et un instrument leur permettant de développer et d'évaluer eux-mêmes leurs solutions.

Le niveau de détail d'une telle base de données devrait être adapté, tout au moins à l'origine, aux problèmes qu'il est indiqué de résoudre en priorité et aux moyens à disposition. Un usage fréquent de ces moyens conduira

progressivement à un affinement des informations et à un élargissement de l'éventail des questions auxquelles il serait possible d'apporter des réponses.

En effet, comment tirer d'un ensemble de données statiques des éléments d'appréciations, statistiquement valables, liés aux caractéristiques de la demande et plus particulièrement au choix modal? Seul le suivi des modifications réelles de l'équilibre offre - demande résultant des actions réalisées, peut créer une situation de connaissances de laquelle les impacts pressentis, tenant compte de l'évolution de la demande, pourront être appréhendés sur la base de méthodes du type point pivot.

C'est dans cette voie que le développement du NOPTS se poursuivra par l'introduction au niveau du modèle des relations entre les fonctions d'offre et de demande selon une approche par élasticité. Parallèlement, les applications devraient, par une accumulation, il est vrai assez lente, d'un matériel statistique indispensable permettre d'isoler dans chaque cas les paramètres dont l'influence est prépondérante, dans l'étude du compte offre - demande.

REMERCIEMENTS

Le modèle décrit dans cet article a été développé conjointement par l'Institut de technique des transports (ITEP) de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, sous la direction du Professeur D. Genton et par le bureau d'ingénieurs-conseils W. & J. Rapp SA à Bâle (WJR). Le développement principal de la première étape a été réalisé par les auteurs et H. Spiess (WJR), la seconde partie par H. Spiess (WJR) et la troisième par M. Crvcnin (ITEP).

Nous remercions les nombreux collaborateurs des deux partenaires et les représentants des organismes mandataires de leur précieuses contributions relatives aux applications du NOPTS. L'édition technique a été préparée à l'ITEP sous les bons offices de R. Echenard.

REFERENCES

sur la planification des transports et les méthodes interactives graphiques

[1] Genton David L., „Planung von Verkehrssystemen unter Ungewissheit“, Vorträge und Studien aus dem Institut für Verkehrswissenschaft an der Universität Münster, Heft 16.

[2] Manheim Marvin L., „Fundamentals of Transportation System Analysis“, Vol. I, Preliminary Edition, fourth revision; Department of Civil Engineering, MIT, August 1976.

[3] Rapp M.H., „Planning Demand-Adaptive Urban Public Transportation Systems: The Man-Computer Interactive Graphic Approach“, Dissertation University of Washington, Seattle, USA, NTIS PB 212 540, June 1972.

[4] Rapp M.H., „Transit System Planning: A Man-Computer Interactive Graphic Approach“, Highway Research Record, No. 415, pp. 49-61, Washington, D.C., 1972.

[5] Dial Robert B., „Probabilistic Assignment: A Multipath Traffic Assignment Model which Obviates Path Enumeration“, Highway Research Record no. 369, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1971.

[6] Trahan Michel, „Probabilistic Assignment: An Algorithm“, Transportation Research, Vol. 8, no. 4 (Nov. 1974).

[7] Moore E.F., „The Shortest Path Through a Maze“, International Symposium on the Theory of Switching, Proceedings, Harvard University, Cambridge, Mass., 1957.

[8] Bray T.A., Witzgall C., „Algorithm 336: NETFLOW (H)“, Boeing Scientific Research Laboratories, Seattle, Communications of the ACM, Vol. 11, Sept. 1968.

sur le développement du modèle NOPTS

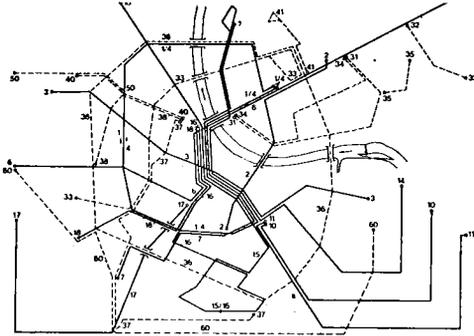
Rapp M.H., Mattenberger Ph., Piguët S., Robert-Grandpierre A., „Rapport RHITUC Modèle Interactif Graphique pour la Recherche Heuristique d'itinéraires de Transports Urbains Collectifs“, Institut de technique des transports ITEP/ EPF-L, Lausanne, Switzerland, July 1974.

Rapp M.H., Mattenberger Ph., Piguët S. and Robert-Grandpierre A., „Interactive Graphic System for Transit Route Optimization“, Transportation-Research Record, no. 559, pp. 73-80, Washington, D.C., 1976.

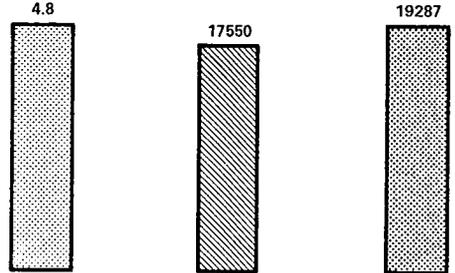
Rapp M.H. and Gehner C., „Transfer Optimization to Minimize Delays: Stage II of an Interactive Graphic System for

VARIANTE DE BASE

BVB BU/Gr 18.3.75

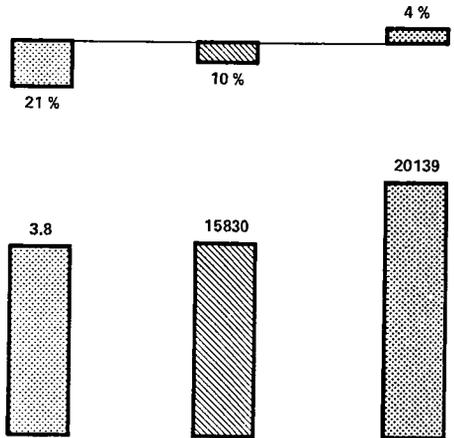
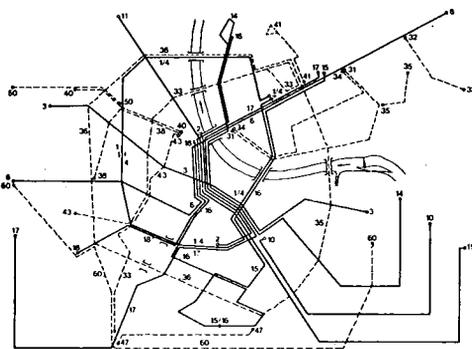


DEGRE DE SURCHARGE TRANS-BORDEMENTS COUT D'EXPLOITATIO



NOUVELLE VARIANTE

BVB BU/Sü 1.4.75



APPLICATION DU NOPTS AU RESEAU DE BALE:
COMPARAISON ETAT DE FAIT, NOUVELLE VARIANTE.

% DE VOYAGEURS
EN VEH. SURCHARGES

NOMBRE

Frs./h

Operational Transit Planning", Transportation Research Record, Washington, D.C., forthcoming.

CRVCANIN Milan, „OPTILO, Détermination sur un réseau du flot compatible à coût minimal", bibliothèque des programmes de calcul du Département de génie civil de l'EPFL-Lausanne.

ITEP and W. & J. Rapp AG:

– „**NOPTS – Programmsystem für die Betriebsplanung im öffentlichen Verkehr**", Allgemeine Beschreibung und Benutzerhandbuch, Juni 1975.

– „**NOPTS – Computer Program for Operational Planning in Public Transit**", General Description and User Manual, June 1975.

– „**NOPTS – Modèles de planification opérationnelle de systèmes de transports en commun**", Aperçu général, février 1976.

– „**NOPTS – Computer Program for Operational Planning in Public Transit**", General Overview and Examples of Applications. Dec. 1976.

– „**NOPTS – Modelos de Planificação Operacional de Sistemas de Transportes Colectivos**", Generalidades e Manual do Utilizador, GEPP, Porto, 1976.

NOTES EN BAS DE PAGES

1. Voir le résumé des moyens d'études existant ou en développement donné dans la revue UITP no 1, 1975.

2. Par l'intermédiaire de Peat, Marwick, Mitchell & Co.

3. Sous le nom d'ITAM (Interactive Transit Assignment Model)

4. Etude entreprise par SITECO (Società Italiana Tecnica Consulenze SPA, Torino)

5. Prof. W. Grabe „Überprüfung der Struktur und Gesamtverkehrsplanung Städte", Institut für Verkehrswirtschaft, Strassenwesen und Städtebau, Technische Universität Hannover, Hannover, 1976.

ANNEXES: APPLICATIONS DU MODELE NOPTS

Étude du système des transports en commun de Bâle

Clients

Basler Verkehrsbetriebe (BVB, Société de transport en commun bâloise)

Stadtplanbüro Basel (Bureau de planification de la ville de Bâle)

Regionalplanungsstelle beider Basel (Bureau de planification régionale bâloise)

Date

1974/75

Objectifs

La société de transport en commun de Bâle exploite 12 lignes urbaines de transport par rail comprenant des lignes de tramways légers en site banal au centre-ville et dans les faubourgs et des lignes de tramways en site propre en banlieue, ainsi qu'un nombre identique de parcours de bus. Une autre compagnie assure le service de deux lignes de tramways de banlieue dont les itinéraires ne pénètrent pas jusqu'au centre-ville, ce qui oblige un grand nombre d'usagers à transborder sur le système de transport urbain.

Le but de cette application du NOPTS était d'examiner d'une part les possibilités de prolongement des lignes de banlieue jusqu'au centre urbain et d'établir d'autre part des lignes radiales (rocaudes) au niveau de la banlieue de façon à augmenter le nombre de parcours directs, cette amélioration devant amener à une réduction des mouvements de transbordement sans augmentation sensible du matériel roulant et du personnel.

Dimension du problème

– Population urbaine: 202'000

– Population de l'agglomération: 380'000

– Réseau de base: 150 noeuds, 520 liaisons (directionnelles), 26 lignes de transit (14/TRL, 12/bus urbains)

– Usagers: 150 mio. de passagers par an, 50'000 passagers par heure de pointe.

Sources des données

Les données de la demande ont été récoltées d'après plusieurs enquêtes O-D sur les passagers transportés (1962, 1968 et 1972): Pour le NOPTS, la matrice originale de 229x229 a été compactée en matrice de 150x150 et mise à jour en utilisant les comptages par écrans de 1974. Les caractéristiques de l'offre (liaisons, vitesses, coûts unitaires d'exploitation par véhicule,

etc.) ont été obtenues des statistiques courantes d'exploitation des BVB.

Cadre institutionnel

Étant donné que le réseau de la compagnie des transports bâlois couvre des entités politiques différentes, les décisions à prendre concernant les changements de parcours devaient être coordonnées entre trois autorités: le service des transports, les bureaux de planification de la ville et de la région. Une équipe de spécialistes réunissant des représentants des trois autorités fut créée. Le bureau conseil expert à mis le NOPTS à disposition, a préparé les données de base, a calibré le modèle et a donné l'assistance nécessaire pour former les membres de l'équipe à l'utilisation du modèle.

Résultats

80 Variantes ont été élaborées et évaluées, nécessitant environ 30 heures de dialogue avec l'ordinateur. Le procédé interactif graphique s'est avéré très efficace pour mettre en évidence les divers éléments d'arbitrage provenant d'objectifs de départ divergents et permettre ainsi d'isoler une dizaine de solutions recevant l'approbation de l'ensemble des membres. Parmi ces solutions, l'alternative offrant le rapport jugé le meilleur entre les coûts d'exploitation et la diminution du nombre de transbordements fut retenue.

Experts

W. & J. Rapp AG, Bâle, et Rudolf Keller, Muttenz, Suisse

Matériel utilisé

Ordinateur HP – 2100 avec CRT Tektronix 4014.

Étude d'adaptation des horaires

Client

Basler Verkehrsbetriebe (Société de transport en commun bâloise)

Date

1976

Objectif

Étude pilote dont le but est d'examiner l'utilisation potentielle du NOPTS II en tant qu'instrument permettant de réduire les temps d'attente des correspondances des passagers, en dehors des heures de pointe, en coordonnant au mieux les temps de départ des véhicules au terminus pour un tracé des lignes et une périodicité donnés (12 min. pour la plupart des lignes).

Dimension du problème

Voir ex. 1

Sources des données

Pour les données de la demande, voir ex. 1. Réseau de base avec vitesses en-dehors des heures de pointe fournies par les BVB. Périodes et heures de départ résultant des horaires existants.

Résultats

Comparé à l'horaire établi manuellement, l'horaire proposé à la suite de l'optimisation par le NOPTS réduit le temps d'attente total des correspondances de 20'500 pass.-min./hr. à environ 16'700 pass.-min./hr. pendant la période creuse de la soirée. Le matériel roulant (82 véhicules) reste stable. Ceci signifie qu'un gain d'environ 20% peut être obtenu sans augmenter les coûts de fonctionnement.

Expert

W. & J. Rapp AG, Bâle

Contribution de l'expert

Étude complète.

Matériel utilisé

Ordinateur HP – 2100 avec écran Tektronix 4014 CRT.

Évaluation de la ligne de metro Lausanne-Ouchy (L-O)

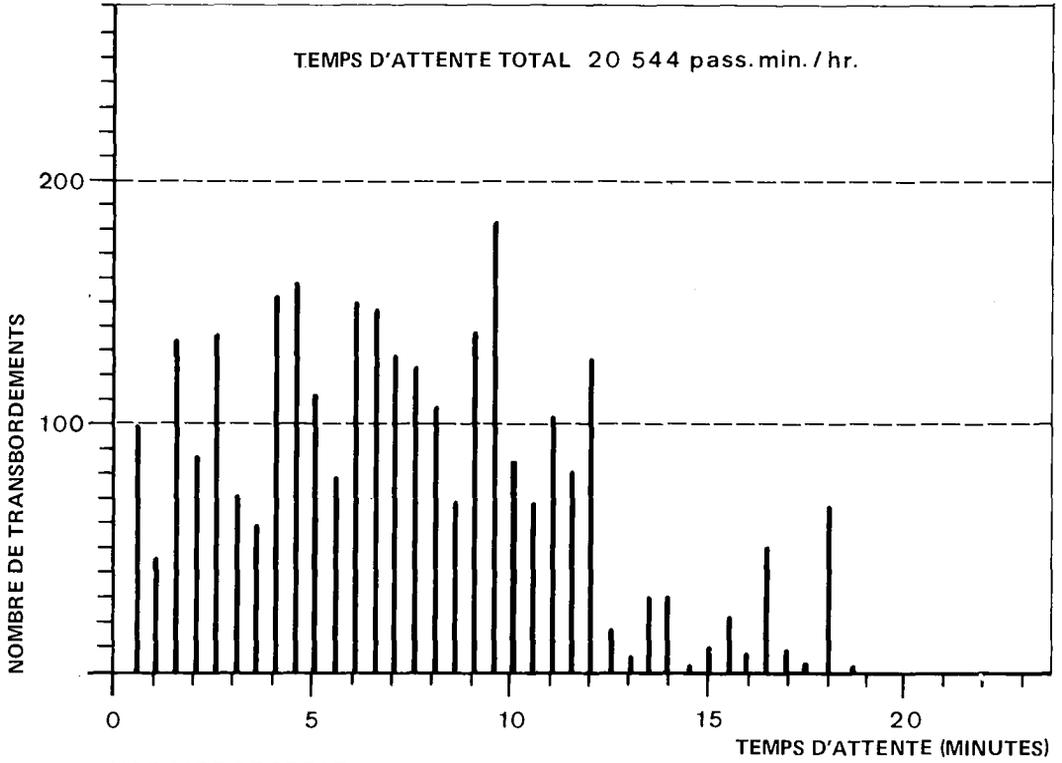
Client

Municipalité de Lausanne, Suisse

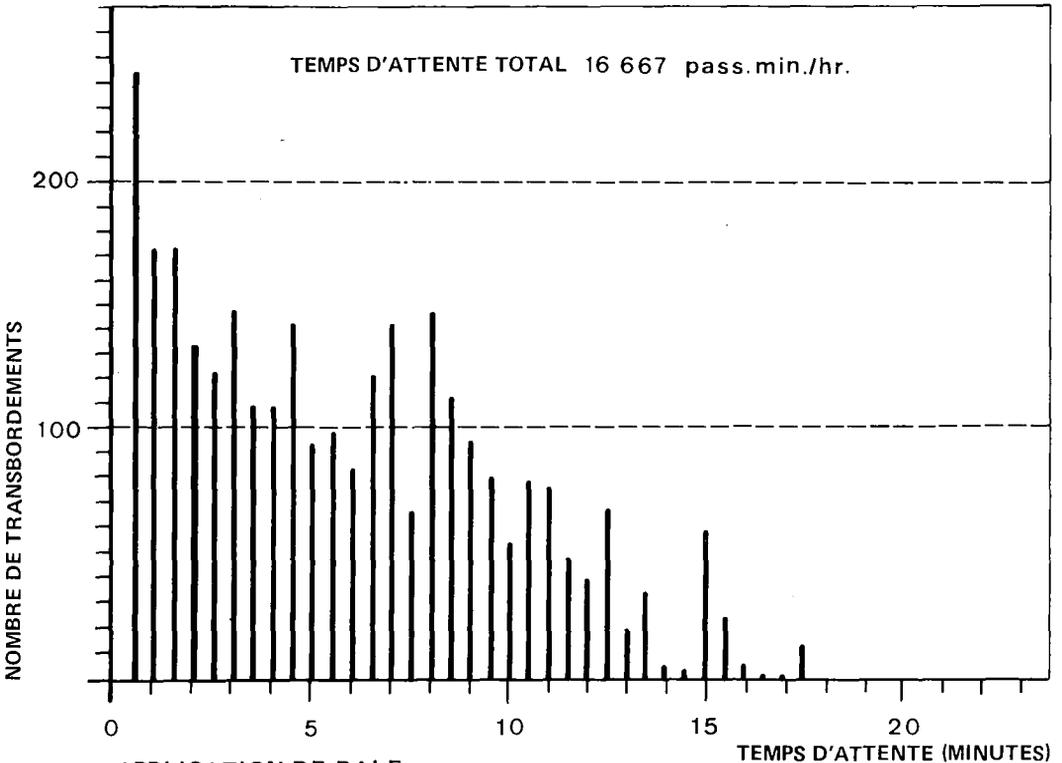
Date

1975-76

HORAIRE EXISTANT



HORAIRE PROPOSE



APPLICATION DE BALE
COMPARAISON DES DISTRIBUTIONS DES TEMPS D'ATTENTE
DES CORRESPONDANCES

Objectif

La compagnie du „métro” Lausanne-Ouchy exploite deux lignes urbaines parallèles dans la ville de Lausanne. Devant faire face depuis peu à des déficits croissants, le L-O hésite à supprimer ce service. Il incombait à la municipalité de Lausanne de décider si elle désirait reprendre ou abandonner l'exploitation du L-O. Deux alternatives furent évaluées: (1) maintenir l'exploitation de ces lignes en les intégrant au réseau municipal de bus ou (2) abandonner ce service et le remplacer par de nouvelles lignes de bus et des améliorations de fréquences.

Dimension du problème

- population de la région lausannoise: 235'000
- réseau de base: 132 noeuds, 344 liaisons (directionnelles)
- 30 lignes
- usagers: 55 mio. de pass. par an, 185'000 pass. par jour.

Source des données

Les données de la demande sont tirées de l'étude effectuée pour le plan de transport de la région lausannoise. Les caractéris-

tiques de l'offre ont été obtenues du L-O et des Transports lausannois (service régional de bus).

Résultats

Pour des niveaux de service similaires, l'alternative 1 (maintien du système ferré urbain) est moins déficitaire que l'alternative 2 (remplacement par des lignes de bus), cette dernière ne permettant pas, en outre, d'assurer une même accessibilité dans le couloir métro où sont concentrés un grand nombre de postes de travail.

Expert

Robert-Grandpierre et Rapp SA, Ingénieurs-Conseils, Lausanne et ITEP, Lausanne.

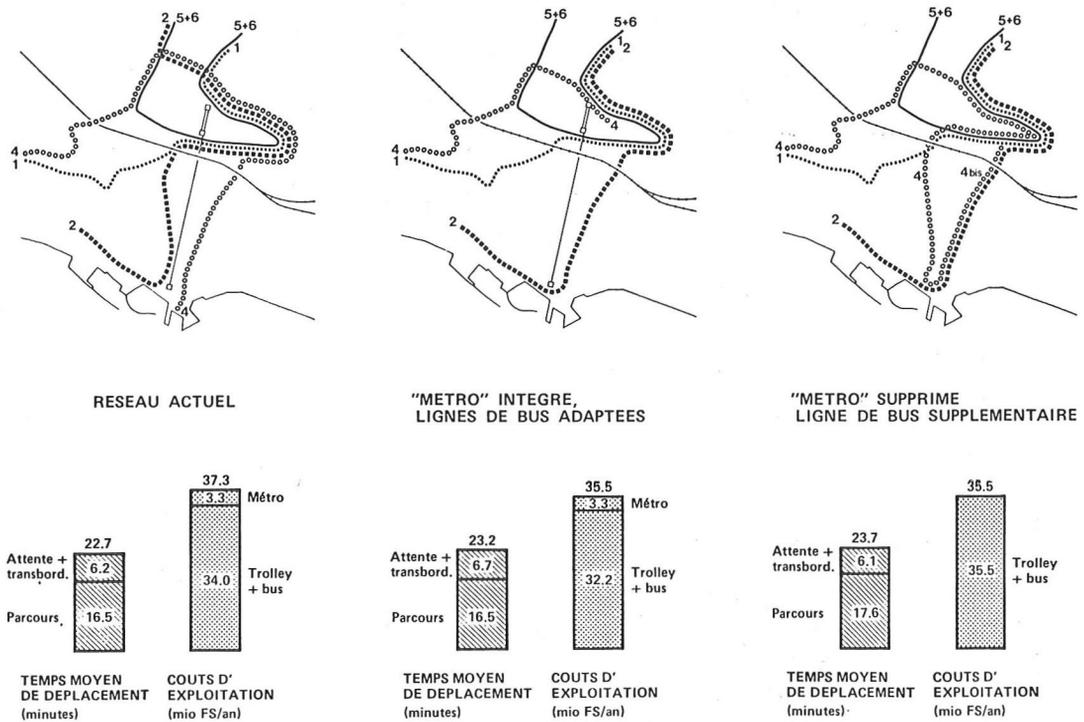
Contribution des experts

Etude complète.

Matériel utilisé

CDC Cyber 7326 et Tektronix 4014

ETUDE DE LAUSANNE: VARIANTES RELATIVES A L'EVALUATION DU METRO L - O



Étude d'évaluation du réseau des systèmes de transport de Zürich

Client

Verkehrsbetriebe der Stadt Zürich (VBZ, compagnie des transports publics de Zürich)

Date

1976/77

Objectifs

- 1) Examen des conséquences de l'introduction d'une nouvelle ligne de tramways légers et de différents prolongements de quelques lignes existantes de bus et de tramways
- 2) Evaluation des possibilités offertes par le NOPTS en tant qu'instrument permanent de planification opérationnelle.

Dimension du problème

- population urbaine: 434'000

- population de la zone métropolitaine: 639'000
- réseau de base: 220 noeuds, 820 liaisons (directionnelles)
- 46 lignes (14 tram, 32 bus)
- usagers: 210 mio. de passagers par an. 76'600 pass. par heure de pointe.

Sources des données

Matrice des déplacements station à station (220x220) obtenue à partir du recensement détaillé des ménages effectué en 1969 dans toute la zone métropolitaine et mise à jour en 1976 par des comptages par écrans.

Résultats

Excellente concordance entre les valeurs déterminées par le modèle et les résultats d'enquêtes à bord des véhicules. Des résultats sur l'évaluation des variantes sont prévus pour le premier semestre 1977.

Expert

W. & J. Rapp AG, Bâle et Rudolf Keller, Muttenz, Suisse.

Contribution des consultants

Préparation des données, calibrage du modèle, assistance technique durant les phases d'utilisation du NOPTS. Utilisation interactive du NOPTS par le personnel technique de la compagnie VBZ.

Matériel utilisé

Ordinateur HP-2100 avec écran Tektronix 4014 CRT

Étude des transports publics de la région de Lisbonne

Client

Direcção-Geral de Transportes Terrestres (Public Transport Administration of Portuguese Transport Ministry)

Date

1976/77

Objectif

Étude du système des transports publics dans le cadre de la planification des transports de la région de Lisbonne. Evaluation des principales alternatives de développement à court et à moyen terme du système des transports publics, comprenant l'extension du réseau métro, le perfectionnement des chemins de fer subur-

bains et des tramways, des conversions de mode tramway-bus, la restructuration du réseau urbain et suburbain de bus, l'adaptation de la capacité des lignes de transports fluviaux.

Dimension du problème

- population urbaine: 900'000
- population de l'agglomération: 2'250'000
- réseau de base traité par le NOPTS: 230 noeuds, 1100 liaisons, 160 lignes (4/trains, 2-5/métro, 7/bacs, 17/tramways, 60/bus urbains, 70/bus sururbains).
- usagers: 300'000 passagers à l'heure de pointe du matin.

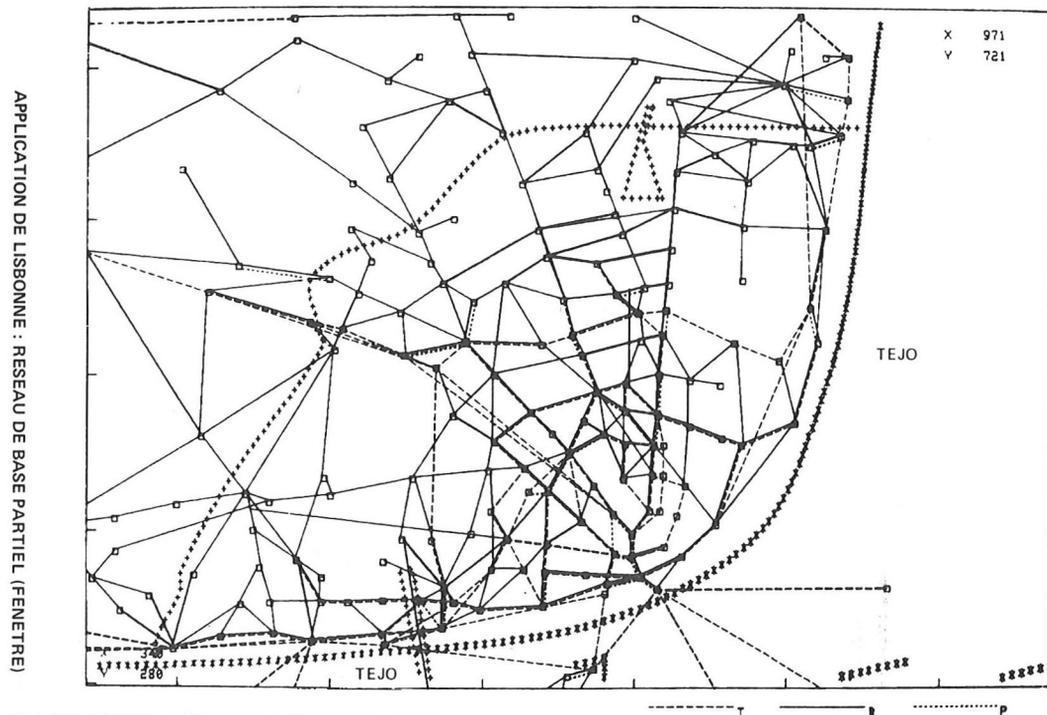
Sources de données

Enquête à domicile origine-destination de 1973 mise à jour en 1975/76 par une série de comptages par écrans, sur les lignes et aux stations. La demande a été mise sous la forme d'une matrice 230x230 de station à station. Les données de l'offre ont été obtenues des principales compagnies de transport.

Cadre institutionnel

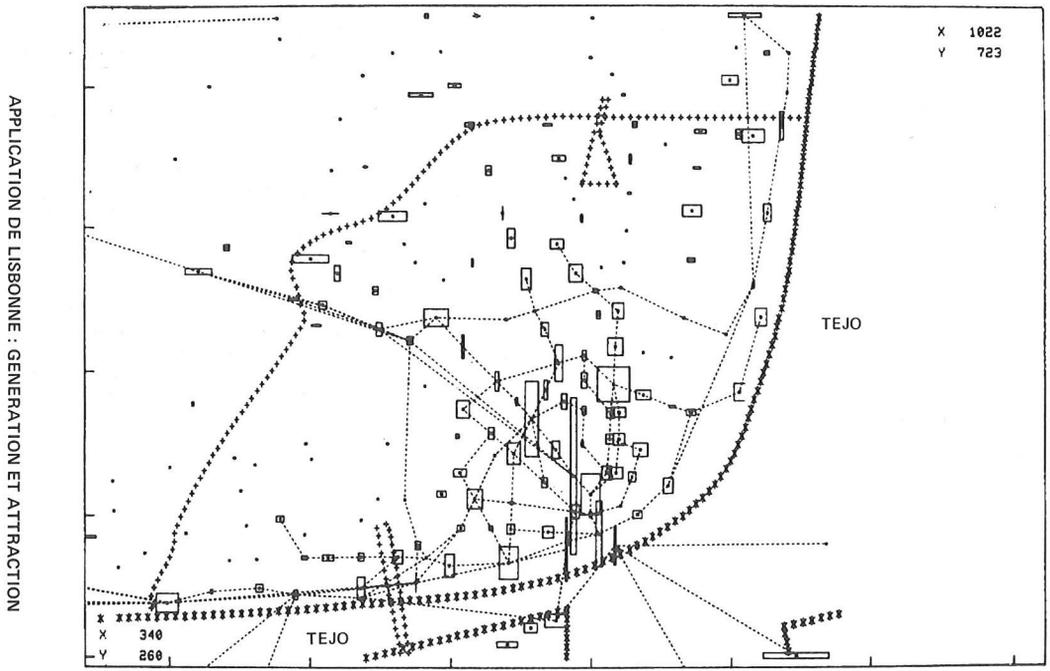
Sous la direction sur place d'un état-major du consultant, les divers services de planification ont rassemblé les informations et préparé les concepts à évaluer. L'élaboration et l'évaluation des alternatives sont réalisées au siège du consultant, mais l'installation du NOPTS sur place pourrait entrer en considération.

**RÉSEAU TC DE LA REGION DE LISBONNE
CALIBRAGE DU 8 9 76 MATRICE NO 3**



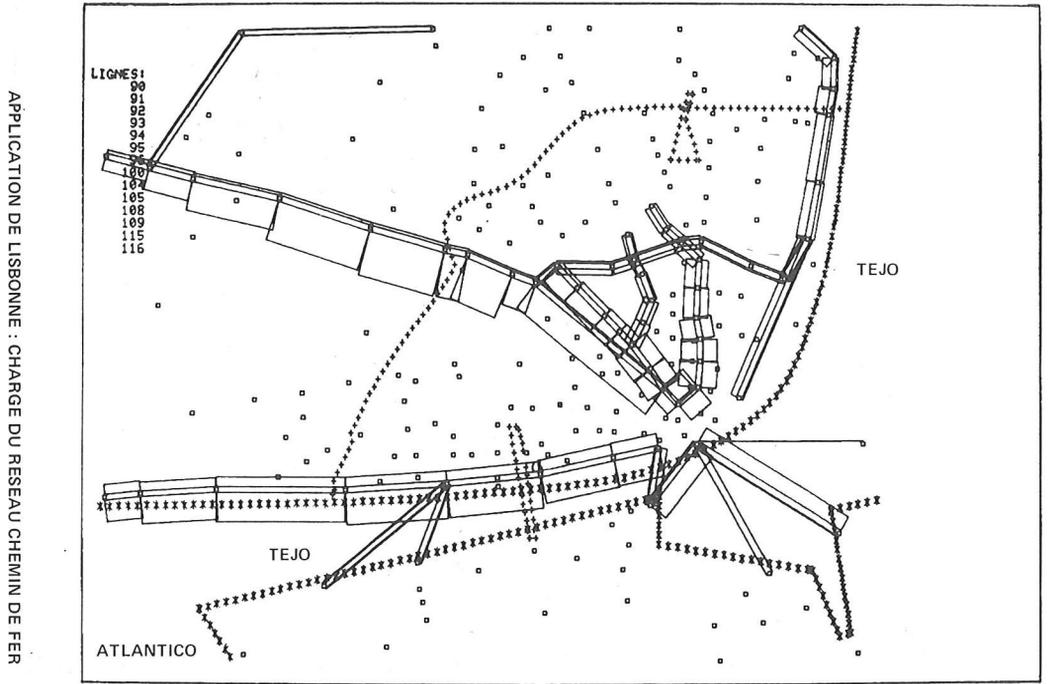
VARIANTE 1 RESEAU DE BASE

RESEAU TC DE LA REGION DE LISBONNE
 CALIBRAGE DU 8 9 76 MATRICE NO 3



VAR. 1 GENERATIONS (>) ET ATTRACTIONS (Δ)

RÉSEAU TC DE LA REGION DE LISBONNE CALIBRAGE DU 8 9 76 MATRICE NO :



VARIANTE 1 CHARGE DES LIGNES

Evaluation des résultats

Approximativement 25 variantes tirées de 9 concepts différents sont en phase de réalisation et d'évaluation.

Expert

ITEP, Lausanne, Suisse.

Matériel utilisé

Ordinateur CDC Cyber 7326 avec écran Tektronix 4014.

Étude des transports de Porto

Client

Direcção-Geral de Transportes Terrestres (Département des transports publics du Ministère des transports portugais)

Date

1975/77

Objectifs

A partir d'une analyse détaillée des itinéraires, du matériel roulant, des fréquences ainsi que des interfaces sur l'ensemble du réseau des transports en commun de la région de Porto, faire des propositions pouvant porter sur des conversions de mode tramways, bus, trolleybus, tendant à améliorer les services à court et à moyen terme.

Dimension du problème

- population urbaine: 310'000
- population de l'agglomération: 860'000
- réseau de base traité par le NOPTS: 188 noeuds et 814 liaisons, 58 lignes (14/tramways, 10/trolleybus, 34/bus)
- usagers: 580'000 passagers par jour.

Sources des données

- enquêtes 1972/73 à bord des véhicules
- mesures des temps parcourus
- données de base de l'offre fournies par STCP (compagne des transports de Porto)

Evaluation et résultats

Prévu pour le deuxième trimestre 1977.

Cadre institutionnel

Une équipe à vocation interdisciplinaire a été mise sur pied. Elle comprend une quinzaine de spécialistes représentant les autorités publiques concernées (compagnie de transport, chemin de fer portugais, municipalités, ministère des transports) et elle se trouve sous la direction technique des représentants sur place du consultant.

Expert

W. & J. Rapp AG, Bâle, Suisse

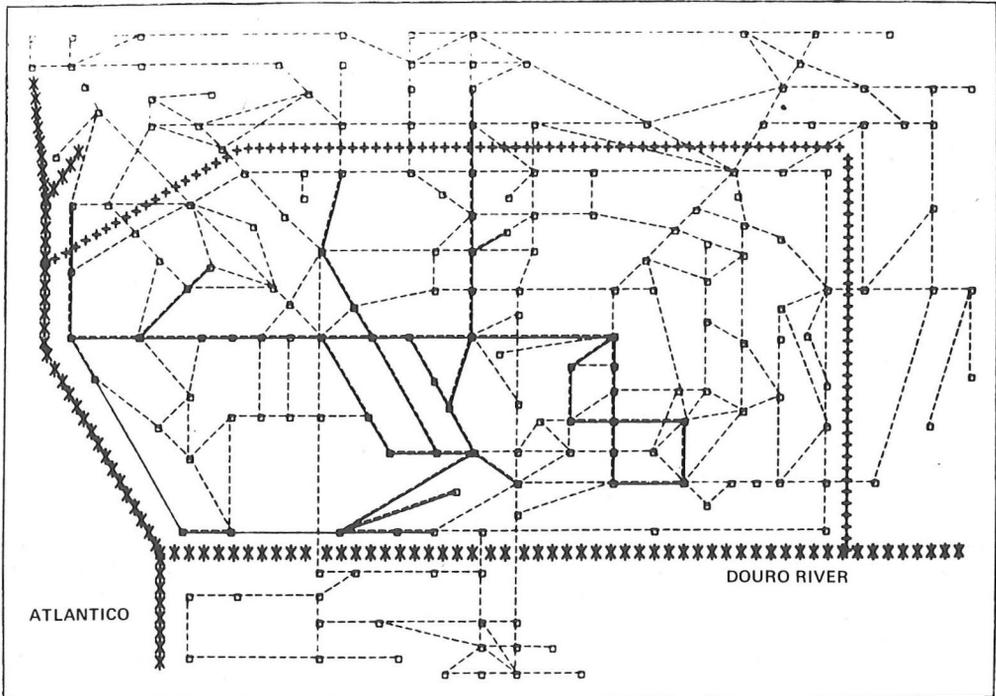
Matériel utilisé

Ordinateur HP-2100 avec écran Tektronix 4014

PORTO ESTUDO DA REDE
STCP
REDE 1971

GEPP / RAPP

APPLICATION DE PORTO : RESEAU DE BASE



DESIGN 1 BASE NETWORK

——— R, - - - - - B, P
 Tramways Bus Piétons