

LA VERIFICATION DE LA CAPACITE DE CIRCULATION DES INSTALLATIONS DE VOIE DES GARES FERROVIAIRES

Giuseppe R. CORAZZA
Professeur de transports
Université de Rome-La Sapienza
Rome, Italie

Antonio MUSSO
Professeur de transports
Université de Salerne
Salerne, Italie

1. INTRODUCTION

Lorsque l'on projette la construction d'une nouvelle installation ferroviaire ou que l'on envisage d'apporter d'importantes modifications à des gares existantes, il est normal de prendre en compte plusieurs solutions avant d'opérer un choix définitif. L'une des études auxquelles il y a lieu de procéder est d'évaluer dans quelle mesure les différentes solutions envisagées répondront aux besoins futurs en matière de trafic au cours des décennies à venir.

La durée de cette période empêche de formuler des programmes d'exploitation précis. Les méthodes de vérification qui nécessitent ce genre de données exigent un nombre excessif d'itérations et ne peuvent donc pas être aisément utilisées. Nous proposons de résoudre le problème de la vérification de la capacité de trafic en adoptant un point de vue réaliste qui consiste à se demander si, en présence d'une hypothèse donnée de trafic, il est possible d'élaborer un horaire de service satisfaisant pour l'installation. La méthode retenue prévoit les phases suivantes:

- a) formulation d'une ou de plusieurs hypothèses de répartition du trafic entre les lignes reliées à l'installation sur la base du plan de gare. Pour chaque hypothèse le nombre des trains en circulation constitue une variable pour laquelle on recherche une valeur maximale permettant de construire sans difficulté un graphique horaire;
- b) analyse topologique des fonctions du plan des voies, de façon à délimiter la ou les parties critiques par rapport au trafic. Cette partie correspond normalement à la zone d'accès ou à une portion de cette zone. Le logiciel d'une telle opération se fonde sur l'analyse des propriétés de la matrice des itinéraires;
- c) définition d'un intervalle de référence temporelle pendant lequel, compte tenu de la répartition envisagée, les trains peuvent se présenter à tout moment;
- d) déduction de l'arbre des combinaisons des itinéraires compatibles à partir de leur matrice, et, pour chaque combinaison, calcul de la probabilité d'occurrence en fonction du nombre de trains en circulation;
- e) élaboration d'une série de diagrammes indiquant le

nombre de trains pouvant circuler simultanément, la durée moyenne d'occupation des itinéraires et le degré moyen d'utilisation de l'installation;

f) introduction de distributions-type de retard, de façon à apprécier la durée des retards qui risquent d'intervenir en cours d'exploitation.

Ainsi, pour chaque solution envisagée, on est en mesure d'établir un rapport fiable entre les coûts prévus et les performances susceptibles d'être obtenues et évaluées du point de vue des trains en circulation et de leur régularité.

2. EXPOSÉ SYNTHÉTIQUE DE LA MÉTHODOLOGIE

2.1 Analyse du tracé des voies

La configuration reproduite per la fig.1 représente une gare dans laquelle 2 lignes à double voie côtoient une ligne à voie unique. Ce schéma a été simplifié grâce à la suppression des liaisons non utilisées ou utilisées à des fins autres que celles de notre étude. Par ailleurs, nous sommes partis de l'hypothèse que les voies de gare (indiquées en chiffres romains) sont en nombre suffisant de manière à ce qu'il soit pratiquement impossible qu'un train soit empêché d'entrer en gare en raison de l'occupation par un autre train de la voie qui lui est destinée.

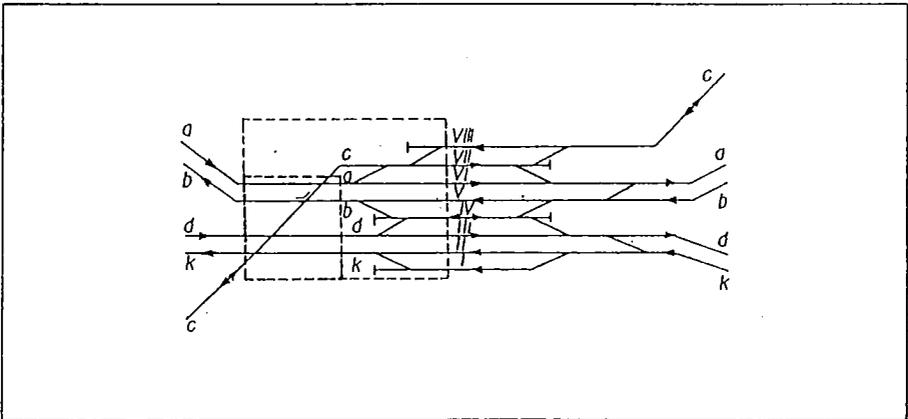


Figure 1 - Plan des voies: zone d'entrée à gauche.

Compte tenu de ces différentes hypothèses, on peut affirmer que la capacité de trafic de l'installation sera fonction des noeuds entrée/sortie de gauche et de droite. Toutes ces propriétés topologiques sont regroupées dans la matrice des itinéraires (fig.1) où chaque itinéraire est

défini par une lettre ou un chiffre romain indiquant son origine et sa destination. Les symboles de la matrice permettent de connaître les compatibilités et incompatibilités mutuelles des itinéraires. Seule la moitié de la matrice a été remplie puisque celle-ci est symétrique par rapport à sa diagonale.

Le noeud de gauche, représenté par la ligne en pointillés plus clairs (fig.1), correspond à la portion de matrice située en haut à gauche, et les différentes influences qu'il exerce sur celui de droite sont reportées sur l'autre moitié de la matrice, bien que l'on puisse les négliger compte tenu de l'hypothèse de surabondance de voies de gare. Il est possible de condenser encore davantage le noeud pour ne prendre en considération que la portion délimitée par les pointillés plus épais, ce qui nous permet, sans devoir nous apesentir longuement sur les raisons de cette réduction, de mieux cerner le problème et d'exposer plus clairement notre méthode. Le schéma ainsi élagué est reproduit (fig.2) avec sa matrice et l'arborescence hiérarchisée des itinéraires.

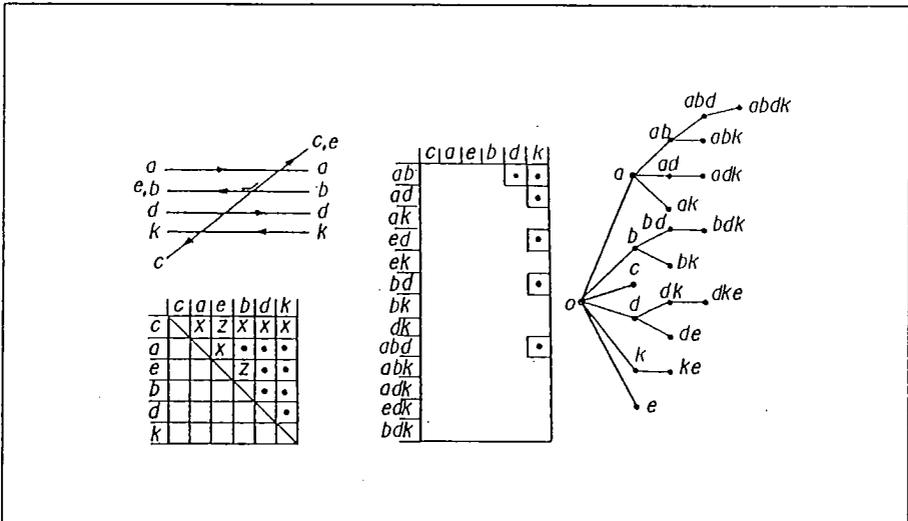


Figure 2 - Zone d'entrée réduite; matrices des routes et arborescence.

Les 2 extrémités d'un itinéraire étant représentées par la même lettre (par exemple a, a), une seule suffit pour définir chacun d'entre eux. L'arborescence de droite illustre toutes les variantes possibles de circulation; chaque ensemble est caractérisé par un groupe de lettres (variant de 1 à 4) correspondant à autant d'itinéraires

2.2 La circulation: un processus aléatoire.

Pour les raisons invoquées dans l'introduction il est impossible de fonder la vérification de la circulation sur des horaires précis. En revanche, si l'on souhaite appliquer cette méthode il faut nécessairement prendre en compte la démarche qui permettra de calculer ces horaires: plus le procédé utilisé sera général, plus on sera certain de pouvoir établir un horaire pleinement satisfaisant.

Pour répondre à ce critère de généralité, les conditions suivantes doivent être réunies:

- a) chaque train peut se présenter à tout moment dans la zone temporelle de référence T;
- b) la répartition des trains sur les différents itinéraires doit être connue et exprimée en pourcentages.

Si l'on choisit un intervalle de référence T relativement réduit, par exemple 1 heure, la condition a) est parfaitement remplie et permet de regrouper tous les horaires possibles lors de l'exploitation future de l'installation. Toutefois la condition b) est plus difficile à satisfaire, c'est la raison pour laquelle il y a lieu de la ventiler en supposant plus d'une répartition des trains et en répétant le calcul pour chacune d'elles. De la sorte, la circulation devient un phénomène aléatoire régi par les conditions a) et b) et dans ce cas le nombre total des trains en circulation N n'est plus qu'une simple variable. Pour qu'une valeur donnée de N soit acceptable, il faudrait que le phénomène de circulation correspondant satisfasse à une exigence de congruité temporelle entre le temps disponible T et le temps utilisé par la circulation t_1 , à savoir:

$$T \geq t_1 \quad (1)$$

Avant d'illustrer le procédé analytique permettant de résoudre l'équation (1), examinons la question des cas de circulation impossible, c'est-à-dire les cas de figure pour lesquels, sur la base de la condition a), 2 trains doivent utiliser simultanément 2 itinéraires incompatibles. Confrontée à une situation de ce genre, la personne chargée d'établir un horaire décalera de quelques minutes le passage de l'un des trains ou des 2 à la fois. Ce déplacement entraîne une légère entorse au processus aléatoire, ce qui est reflété dans la réalité. La démarche analytique en tient compte puisque les mouvements incompatibles doivent être indépendants comme par exemple, les mouvements effectués sur l'itinéraire C (fig.3). La figure est en effet une représentation qualitative sous forme de graphe de la condition (1).

Par ailleurs, ce modèle analytique de circulation dans une installation ferroviaire ne prend pas en considération les retards qui pourraient se produire pendant l'exploitation de la ligne, problème sur lequel nous aurons l'occasion de revenir un peu plus loin.

2.3 La démarche analytique

Le temps t_1 peut être exprimé de la manière suivante:

$$t_1 = \frac{N}{n_m} t_m \quad (2)$$

où, en plus des symboles déjà explicités, n_m représente le nombre moyen de trains circulant en même temps sur des itinéraires compatibles entre eux et t_m la durée d'occupation moyenne de ces itinéraires. En d'autres termes, la circulation est schématisée par des mouvements de n_m trains chacun.

Effectivement la circulation s'effectue avec un nombre de trains variant de 1 au chiffre maximum autorisé pour l'installation en question (4 dans le cas illustré par la fig.2). Si l'on indique par v le nombre de trains et par p_v sa probabilité, on pourra exprimer la valeur moyenne des trains en circulation en calculant la moyenne pondérale, c'est-à-dire:

$$n_m = \frac{\sum_v v p_v}{\sum_v p_v} \quad (3)$$

où $v = 1, 2, \dots, \text{max.}$

D'autre part la somme au dénominateur du second membre de la (3) exprime la probabilité d'avoir des trains en circulation dans le système, ce qui permet d'exprimer la durée globale de ce phénomène sous la forme:

$$t_1 = T \sum_v p_v \leq T \quad (4)$$

ce qui permet également d'obtenir:

$$t_m = \frac{T \sum_v v p_v}{N} \quad (5)$$

De cette façon tous les paramètres significatifs de ce modèle ont été exprimés en fonction de la probabilité p_v . Les contraintes auxquelles est soumis cet exposé ne nous

permettant pas de reproduire la démarche analytique utilisée pour calculer ces paramètres nous renvoyons le lecteur à l'article [2], en rappelant toutefois qu'il s'agit d'applications courantes du calcul des probabilités.

3. RÉSULTATS

Dans le cas de l'installation de la fig.2, la fig. 4 fait état des résultats de l'application de la méthode pour trois hypothèses de répartition du trafic. Le tableau en haut à droite présente les pourcentages relatifs aux différents itinéraires et la dernière ligne indique les temps d'occupation des itinéraires. Les trois répartitions ne se différencient que par l'importance de la circulation sur l'itinéraire C, celui qui coupe et interdit les autres puisque les rapports relatifs entre les autres pourcentages demeurent inchangés.

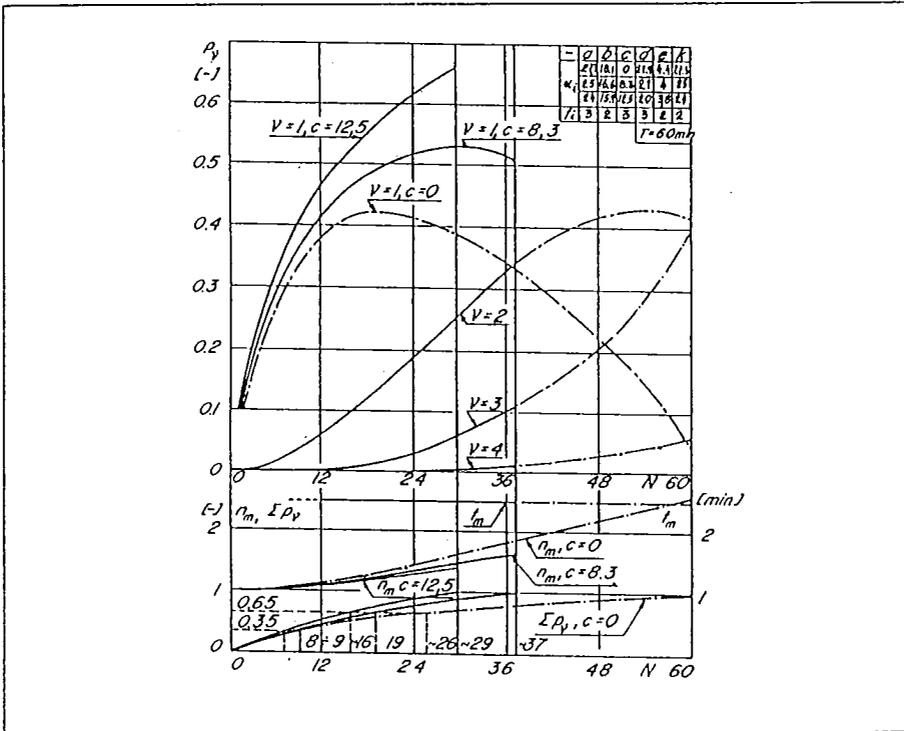


Figure 4 - En haut: probabilités de circulation en fonction de N. En bas: probabilités totales de circulation, nombre moyen de circulation contemporaine et leur durée.

Le diagramme supérieur de la fig. 4 présente les courbes de probabilités p_v en fonction du nombre de trains N en circulation. La variabilité de C exerce une influence sensible sur les courbes de paramètre $v = 1$, alors qu'elle est négligeable sur les autres.

Nous avons reporté en bas du diagramme les courbes relatives aux paramètres n_m , t_m et Σp_v . Il est intéressant de noter que les courbes de Σp_v s'arrêtent à la limite conventionnelle représentée par la condition $\Sigma p_v = 1$ qui correspond à la condition selon laquelle l'hypothèse initiale d'arrivée libre des trains n'est plus valable.

La littérature technique mentionne comme limites empiriques acceptables pour des durées brèves et longues à la fois les valeurs $\Sigma p_v = 0,65$ et $\Sigma p_v = 0,35$, ce qui correspond à des réductions de N égales à environ la moitié ou le tiers de la valeur maximale de la limite conventionnelle.

Ces limites ont aussi une signification physique. On peut par exemple démontrer que, pour la valeur 0,65, la probabilité de trouver dans deux groupes de trains un intervalle temporel qui permette d'insérer un groupe supplémentaire de n_m trains est pratiquement négligeable; auquel cas, compte tenu de nos hypothèses de départ, les intervalles libres sont trop réduits pour permettre d'accroître l'intensité du trafic et ne peuvent donc servir qu'à absorber les irrégularités des mouvements. La valeur inférieure 0,35 prévoit un régime moyen de trafic de un train à la fois; si l'on rapporte cette limite à des intervalles de longue durée, elle indique simplement que l'installation présente une grande disponibilité.

Nous pouvons également constater que dans le type de circulation pris en considération, la présence simultanée de groupes de trains exprimée par n_m , augmente très lentement en fonction de N et s'écarte à peine de l'unité.

Par contre, l'arborescence des itinéraires affiche diverses possibilités de mise en circulation simultanée de groupes de trains plus importants à concurrence de 4 trains. Force est donc de constater que l'hypothèse de circulation aléatoire des trains empêche de tirer pleinement parti des potentialités offertes par l'installation ferroviaire en matière de capacité de trafic.

A ce stade, il nous a paru intéressant d'examiner les marges de circulation encore disponibles ainsi que leurs modalités d'utilisation.

4. ORGANISATION DES MOUVEMENTS

Considérons la fig.5 qui reproduit, sous forme d'histogramme, les mouvements exprimés en pourcentages sur les différents itinéraires du noeud de la fig.2, dans l'un des cas cités en exemple.

Si la circulation est organisée de façon à tirer d'abord parti de la combinaison ayant la valeur maximale de n_m , puis, progressivement, les valeurs les moins importantes, on est alors à même d'exploiter l'installation de façon optimale, ce qui est illustré par les différentes hachures de la fig.5.

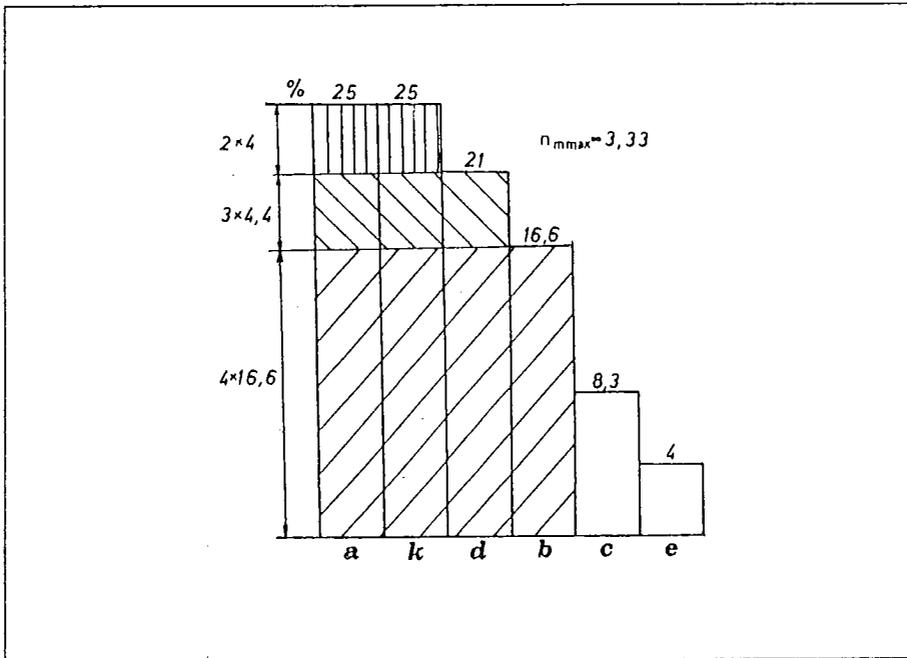


Figure 5 - Histogramme de circulation organisé par groupes.

A titre d'exemple, les quatre itinéraires "a b d k" sont compatibles et par conséquent peuvent être simultanés; ce qui fait que l'on peut regrouper $4 \times 16,6 = 66,4\%$ des trains de cette façon. A noter que cela n'impose pas un horaire d'arrivée prédéterminé mais seulement que cet horaire soit identique pour les trains de chaque groupe. Encore $4,4 \times 3 = 13,2\%$ peuvent circuler par groupes de 3, $4 \times 2 = 8\%$ par couple, alors que $12,3\%$ des trains des itinéraires "e" et "c" circulent seuls. La moyenne pondérée des valeurs caractéristiques de ces groupes permet

d'obtenir:

$$n_m = 3,33 \text{ trains} \quad t_m \approx 2,5 \text{ minutes}$$

En rappelant l'expression (2) on peut introduire le taux d'utilisation de l'installation ρ :

$$\rho = \frac{t_1}{T} = \frac{N t_m}{n_m T} \leq 1 \quad (6)$$

En tenant compte de la (4), ce paramètre est parfaitement comparable avec les probabilités de mouvements Σp_v . Leur dénomination est différente car ils expriment l'aboutissement de deux processus de circulation distincts.

Enfin, la fig. 6 offre une représentation synthétique des différentes modalités d'exploitation d'une installation. La droite 1 correspond à la fonction (6) imposant la circulation d'un seul train à la fois, $n_m = 1$; la ligne 2 correspond à la (6) dans des conditions d'exploitation optimales. La zone A représente le domaine de mouvements impossibles, dans la mesure où les trains sont trop peu nombreux pour obtenir de tels taux d'utilisation; la zone B, elle aussi, désigne des cas de circulation impossible en raison du nombre excessif de trains; la zone C enfin exprime les marges de circulation utilisables en passant de la condition aléatoire à celle d'organisation optimale.

Dans le cas pris en exemple, le passage de la circulation aléatoire aux mouvements organisés permet de doubler au moins le nombre acceptable de trains.

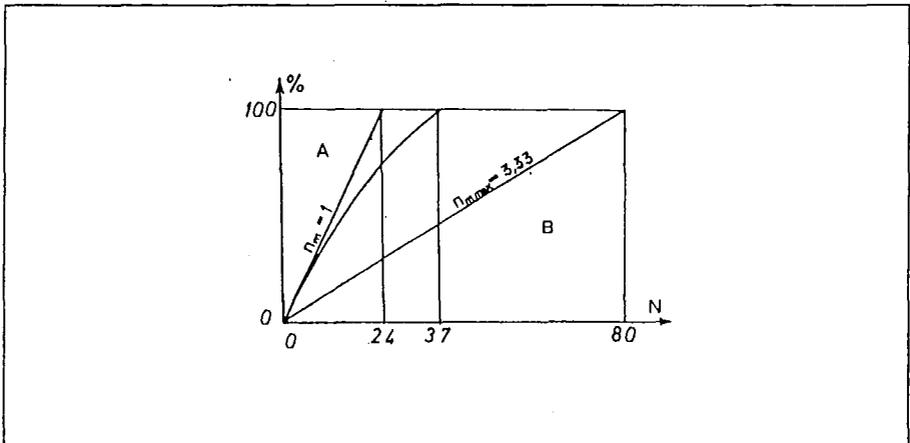


Figure 6 - Diagramme d'exploitation de l'installation.

5. CONCLUSIONS

Le procédé que nous avons présenté permet d'associer au plan d'une gare une série de diagrammes qui permettent de prévoir les performances d'une installation lorsque l'on fait varier le nombre des trains. Les conditions opérationnelles sous examen peuvent varier entre deux limites constituées d'une part par une situation de circulation aléatoire et d'autre part par une circulation organisée en groupes optimaux de trains.

Les horaires cadencés des trains constituent l'instrument susceptible d'atteindre les niveaux de circulation les plus élevés.

L'un des résultats particulièrement intéressants est que l'on peut établir une relation entre les coûts de construction de plusieurs solutions possibles et les performances de ces installations. Il est aussi possible d'approfondir cette méthode en introduisant les retards inévitables entraînés par le trafic ferroviaire et en évaluant les systèmes de contrôle de la circulation s'avérant les plus appropriés pour parvenir au niveau d'exploitation souhaité.

BIBLIOGRAPHIE

1. Corazza G.R., Musso A., Exposé d'une méthodologie du tracé des voies dans les gares, Rail International, 1/1990, pag. 11-18.
2. Corazza G.R., Musso A., La circolazione ferroviaria e gli impianti di stazione - La verifica a lungo termine, Ingegneria Ferroviaria, octobre 1991, pag. 607-618.