



TOPIC 13
PUBLIC SECTOR
PERFORMANCE

ÉVALUATION DE LA CAPACITÉ DE RÉSEAUX FERROVIAIRES

(EVALUATION OF CAPACITY OF RAIL NETWORKS)

PATRICK HACHEMANE

Swiss Federal Institute of Technology
Institute of Transportation and Planning
CH—1015 Lausanne, SWITZERLAND

Abstract

Evaluating the capacity of a rail network, taking into account the various elements of the system, is a complex problem. A flexible method based on automatic saturation helps provide a general solution, applicable at different levels of detail for regional or national rail network.

INTRODUCTION

Une grande partie des lignes ferroviaires de l'Europe de l'ouest ont été conçues et réalisées il y a plus d'un siècle. Entre les années 1930 et les années 1980, pratiquement aucune nouvelle ligne n'a été construite. Parallèlement, la concurrence d'autres modes de transport et l'urbanisation croissante ont profondément modifié la demande en matière ferroviaire. L'infrastructure actuelle, héritée du passé, est rarement adaptée aux flux actuels: sous-exploitée dans les régions rurales, elle est souvent insuffisante en trafic urbain et interurbain, ce qui favorise d'autant plus des modes de transports alternatifs.

C'est la raison pour laquelle de nombreux projets ferroviaires voient le jour en Europe depuis quelques années. Il peut s'agir de réseaux à grande vitesse (compatibles ou non avec le réseau classique, à trafic spécialisé ou mixte), de lignes pour le ferroutage (transversales alpines, liaisons interurbaines), d'interconnexions ou de réseaux express régionaux (RER) autour de grands pôles urbains. D'autres projets ambitieux visent à augmenter les performances du système d'exploitation (signalisation). Le matériel roulant n'échappe pas non plus à ce renouveau: système de pendulation, puissance du matériel tractant, voitures à deux niveaux, ... L'ensemble de ces développements va offrir de nouvelles capacités de transport dans un réseau européen déjà fortement maillé.

D'un autre côté, la libéralisation de l'accès à l'infrastructure (free-access), instituée par une directive de l'Union européenne (Directive du Conseil, 1991), va à terme intensifier la concurrence non seulement entre les modes de transports, mais encore entre les différents exploitants ferroviaires.

Il résulte de ces différents facteurs—inadéquation de l'infrastructure originelle, nouvelles lignes à trafic spécialisé ou mixte, grands projets de renaissance du rail, libéralisation de l'accès à l'infrastructure—une véritable compétition pour l'usage de la capacité limitée et évolutive des réseaux ferroviaires.

Au niveau de la planification, il s'agit d'évaluer les projets avec précision quant à leur effet sur la capacité de l'ensemble du réseau, afin d'obtenir une augmentation par étapes et au moindre coût de la capacité qui soit conforme à l'évolution des besoins du marché. Quant à la fixation de la redevance d'utilisation de l'infrastructure, qui "peut notamment tenir compte (du) niveau ou (de) la période d'utilisation de l'infrastructure" (op. cité), elle nécessite de disposer de critères objectifs indiquant quelle part de la capacité consomme chacun des exploitants.

L'évaluation de la capacité d'un réseau est un problème complexe et combinatoire qui exige une approche globale tenant compte des différents éléments du système ferroviaire. Parmi les nombreuses méthodes permettant de déterminer la capacité ferroviaire, la plupart considèrent une ligne ou un nœud isolé, et ne tiennent compte des éléments voisins que par des conditions aux limites. Cet article présente une méthode souple permettant d'évaluer la capacité d'un réseau entier, méthode qui est utilisée dans le logiciel de planification ferroviaire CAPRES (système d'aide à la gestion de la CAPacité des RESeaux ferroviaires).

CAPACITÉ FERROVIAIRE

Évaluer la capacité d'un système revient à en établir la charge limite, après avoir effectué une série d'hypothèses sur le système et la charge. Dans le cas de la capacité ferroviaire, le système à étudier est un réseau composé de lignes et de nœuds; la charge est constituée par les différents trains qui y circulent; les hypothèses effectuées concernent:

- les types de trains et leur alternance (structure des lignes exploitées selon les exigences de la demande et la structure de l'horaire);

- les conditions d'exploitation (systèmes d'exploitation, exigences de la maintenance des installations fixes, ...);
- la qualité de service voulue (stabilité de l'horaire et prestations).

La capacité d'un réseau ferroviaire peut être finalement définie comme le nombre maximum de trains qui, selon une structure des lignes et une structure de l'horaire données, peuvent circuler dans des conditions pratiques d'exploitation avec une qualité de service donnée.

Le système supportant une charge discrète et non continue, la capacité en sera définie par un nombre entier de trains, relativement à un intervalle de temps défini (capacité horaire, journalière ou annuelle par exemple).

Il est possible de déduire de cette capacité en nombre de trains une capacité en nombre de places offertes et en tonnes transportables, en associant à chaque train sa capacité propre. La capacité des différents composants (nœuds, tronçons, lignes), dans le cadre des hypothèses effectuées sur le réseau, en découle également.

OBJECTIFS DE L'ÉVALUATION

Pour justifier de l'intérêt d'un investissement ferroviaire, quel qu'il soit, il convient de démontrer son utilité d'une part, et les avantages du projet retenu par rapport aux autres. Dans ce contexte, la capacité de transport offerte par un investissement constitue un critère important d'évaluation, entre différents projets ou par comparaison avec la situation actuelle.

L'objectif principal de l'évaluation de la capacité consiste à permettre la comparaison en termes de capacité de différents états du système ferroviaire.

Un autre objectif revient à orienter les investissements en fonction d'un objectif de capacité. Dans ce cas, la méthode doit non seulement évaluer la capacité, mais encore mettre en évidence les goulets d'étranglement du réseau, et proposer des solutions pour les supprimer. Pour que ce dernier point soit pleinement réalisé, il conviendrait d'introduire dans le modèle un grand nombre de données exogènes, telles le coût d'un investissement, la topographie de la région, les possibilités technologiques en matière de sécurité, les règlements d'exploitation, etc., ce qui n'est pas imaginable. Les "solutions proposées" se limitent dès lors à proposer la modification de la valeur de certains paramètres clés pour influencer sur la capacité: nombre de voies, distancement (intervalle minimal de sécurité entre trains successifs, etc).

La méthode, en définitive, vise à:

- intégrer, aussi simplement que possible, les différents paramètres qui influent sur la capacité;
- évaluer, à partir de ces paramètres, la capacité du réseau;
- mettre en évidence les points critiques du réseau;
- comparer différents états du système en termes de capacité.

La modélisation des données doit permettre de traiter aussi bien un réseau grandes lignes d'importance nationale qu'un réseau régional plus dense. Les nœuds doivent également être modélisés. En clair, la méthode doit pouvoir s'appliquer aussi bien dans le cadre de variantes de nouvelles lignes à hautes performances que lors de la mise en service d'un réseau express régional ou de la réduction du distancement, par exemple.

LA MÉTHODE D'ÉVALUATION CAPRES

Par rapport au cas d'un tronçon ou d'un nœud, l'évaluation de la capacité d'un réseau ferroviaire introduit une dimension supplémentaire dans le problème, par le fait que les tronçons et les nœuds peuvent être communs à plusieurs lignes. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire, pour

résoudre le problème, de disposer d'une donnée supplémentaire: la stratégie d'utilisation des nœuds et des tronçons communs à plusieurs lignes.

Cette donnée peut être définie de plusieurs manières:

- par une hiérarchie des lignes du réseau; la capacité est d'abord allouée aux lignes les plus prioritaires;
- par une hiérarchie des trains; la capacité est d'abord allouée aux trains les plus prioritaires;
- par une hiérarchie de l'affectation des trains dans les nœuds; les voies sont d'abord allouées aux trains les plus prioritaires.

Le problème revient donc maintenant à répartir la capacité des lignes et des nœuds du réseau en respectant les différentes conditions (structure de l'horaire, exploitation, installations de sécurité, ...) et la hiérarchisation définie. Au vu de la complexité du problème, les formules analytiques ont été abandonnées au profit d'un *processus de saturation d'horaire*. La méthode consiste à saturer le réseau, à partir d'un horaire dit de base, et selon une stratégie de saturation correspondant précisément à la hiérarchisation opérée dans le système.

Cette méthode, qui requiert davantage de temps de calcul qu'une simple formule analytique, possède les avantages suivants:

- dans la mesure où les différents paramètres ont été introduits et modélisés correctement, le résultat final de la méthode, qui consiste en un horaire saturé, est en principe exploitable sur le réseau;
- ce résultat prend en compte explicitement la stratégie de développement de l'offre, par l'intermédiaire de la liste des trains saturants. Il est ainsi possible de comparer facilement différentes variantes quant à leur capacité d'absorber une offre supplémentaire;
- en utilisant les résultats en sens inverse, il est possible de vérifier la faisabilité d'un horaire sur un réseau. Il est par exemple possible de voir si une série de trains supplémentaires peuvent être placés dans un horaire existant, sans modification de l'infrastructure;
- par la mise en évidence des contraintes qui ont arrêté le processus de saturation, il est facile de repérer les points critiques du réseau. Il est ensuite possible de voir l'effet sur la capacité de la suppression d'une contrainte particulièrement pénalisante.

La méthode ne consiste pas en une simulation des circulations sur le réseau, mais bien en l'élaboration de l'horaire le plus saturé sur un réseau. Plus précisément, la méthode construit une variante d'horaire comportant un maximum de trains saturants, à partir d'un horaire de base sur le réseau et en respectant les différentes hypothèses effectuées. La méthode recherche une solution parmi les variantes d'horaire permettant d'utiliser à plein la capacité du réseau.

En fait, si les temps de parcours ou les durées d'arrêt des différents trains peuvent fluctuer dans un intervalle, un grand nombre d'horaires différents peuvent être construits sur un réseau, en décalant légèrement le sillon horaire d'un des trains y circulant. Au sens de la méthode présentement décrite, deux variantes d'horaire sont différentes seulement si l'ordre de succession des trains est différent sur au moins une voie d'un des tronçons du réseau. Une *variante d'horaire* est donc définie non par l'horaire exact de chacun des trains du réseau, mais par:

- un ordre de succession des trains sur chaque voie de chaque tronçon;
- un intervalle horaire possible pour chaque départ et arrivée de train sur les tronçons.

Ces intervalles horaires possibles ont les propriétés suivantes:

- l'horaire composé des bornes inférieures des intervalles satisfait à l'ensemble des contraintes fixées sur le réseau, et il n'est pas possible de trouver d'horaire respectant les mêmes ordres de succession avec un départ ou une arrivée plus tôt (horaire au plus tôt de la variante);
- l'horaire composé des bornes supérieures des intervalles satisfait à l'ensemble des contraintes fixées sur le réseau, et il n'est pas possible de trouver d'horaire respectant les mêmes ordres de succession avec un départ ou une arrivée plus tard (horaire au plus tard de la variante);
- entre ces deux horaires extrêmes, il est probable que d'autres horaires satisfassent également aux contraintes du réseau.

Cette notion assez généreuse de variante d'horaire permet de réduire considérablement le nombre de possibilités à tester lors du processus de saturation, et donc le temps de calcul relatif.

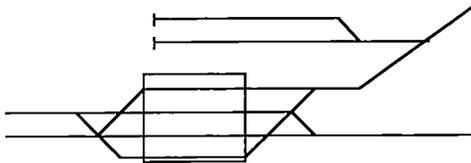
MODÉLISATION DES DONNÉES

Les différents composants du système ferroviaire susceptibles d'influer sur la capacité doivent être modélisés. Il s'agit essentiellement:

- de l'infrastructure (nœuds, tronçons);
- de l'horaire de base (types de trains, temps de parcours, durées d'arrêt, périodes de circulation, capacité propre, longueur, catégorie);
- de la stratégie de saturation (liste hiérarchisée de trains saturants).

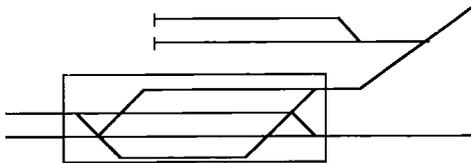
Les *nœuds* sont définis par leur nombre de voies et le niveau de modélisation voulu. Quatre niveaux sont possibles.

Niveau 0



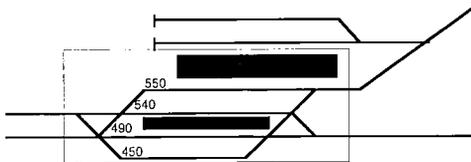
1. niveau 0 (simple): seul le nombre de voies limite la capacité du nœud;

Niveau J



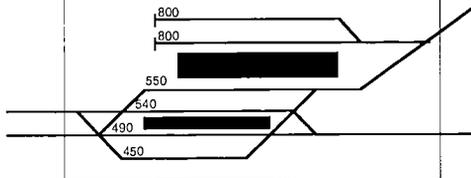
2. niveau J (jonction): aucun train ne peut s'arrêter dans le nœud. Par contre il est possible d'imposer un temps de séparation minimal (unique pour le nœud) entre courants de trafic passant par le nœud (itinéraires incompatibles);

Niveau V



3. niveau V (évitement): deux tronçons sont reliés au nœud, un de chaque côté; le nœud dispose de plus de voies que les tronçons, ce qui autorise donc le croisement ou le dépassement de trains; la position des différentes voies d'évitement est précisée, ainsi que les incompatibilités avec d'autres itinéraires pour y accéder; de plus des incompatibilités voie du nœud/train peuvent être définies, en raison de la longueur insuffisante de l'évitement, de l'absence de quai, etc.;

Niveau C



4. niveau C (complet): peuvent y être définies, sans restriction, des incompatibilités d'itinéraires d'entrée/sortie, ainsi que des incompatibilités voie du nœud/train.

Un temps de séparation doit être observé entre deux mouvements de trains sur itinéraires incompatibles; ce temps dépend du nœud et du type de mouvement des trains (départ ou arrivée).

Ce principe de modélisation permet de faire varier le niveau de détail de la modélisation assez aisément, en modifiant le type des nœuds clés du réseau. Il est notamment possible de commencer une étude avec une modélisation entièrement au niveau 0, puis d'introduire successivement les jonctions, les évitements et les nœuds complets.

Un *tronçon* relie deux nœuds entre eux. Il possède un certain nombre de voies. Le distancement entre deux trains, éventuellement majoré pour assurer la stabilité de l'horaire, est une valeur dépendante du tronçon, unique pour toutes les voies, et modulable selon un pourcentage d'utilisation en fonction de la catégorie des trains s'y succédant. Un temps de sécurité peut également être introduit entre trains empruntant en sens inverse une voie banalisée du tronçon.

L'horaire de base est défini par l'ensemble de trains circulant sur le réseau, en tenant compte des contraintes qui leur sont attachées:

- le parcours, c'est-à-dire la suite ordonnée des voies de tronçon à emprunter; la voie de tronçon empruntée doit être définie, contrairement à la voie de nœud;
- les temps de parcours minimal et maximal à respecter sur chaque voie de tronçon;
- les durées d'arrêt minimale et maximale à respecter dans chaque nœud;
- les temps de parcours globaux minimal et maximal à respecter pour effectuer le parcours;
- les intervalles horaires à respecter pour tout ou partie des départs ou des arrivées;
- la catégorie de circulation;
- les correspondances à respecter avec d'autres trains;
- les rotations de matériel roulant à respecter avec d'autres trains;
- les espacements minimal et maximal à respecter avec d'autres trains.

Les contraintes étant définies dans un intervalle, l'horaire de base (c'est-à-dire l'heure de départ et d'arrivée des trains) peut donc fluctuer entre certaines valeurs, ce qui permet d'optimiser l'utilisation de la capacité du réseau. Il peut aussi exister plusieurs variantes d'horaire de base satisfaisant à ces contraintes, auquel cas la méthode de saturation s'applique à chacune d'elles séparément.

Enfin, la *stratégie de saturation* est définie, d'une part par le type de saturation, et d'autre part par la liste ordonnée des familles dont il faut rajouter un train à l'horaire. Le type de saturation peut notamment être [entre crochets, un exemple d'ordre d'introduction des trains saturants si la liste est composée des familles 1, 2 et 3]:

- par liste entière [123123];
- par ordre, sans retirer le train en cas d'échec [12312312];
- par ordre, en retirant le train en cas d'échec [12312312122];
- par train [1111222223].

ÉLABORATION ET SATURATION D'HORAIRE

Une fois ces données introduites, sont successivement créés par le modèle:

- une série de *voies* correspondant à un élément du réseau où l'ordre de succession ne peut pas changer: voie de tronçon, voie de nœud, élément d'itinéraire d'entrée-sortie;
- une série d'*événements* correspondant aux départs et aux arrivées de chaque train défini;
- une série de *contraintes* entre les événements correspondant aux différents intervalles de sécurité ou d'exploitation introduits (distancement, temps de séparation d'itinéraires, battement de correspondances, espacement minimal entre trains, etc).

Le modèle attribue ensuite à chaque événement un intervalle possible d'occurrence, dont les bornes coïncident au départ avec les bornes de l'intervalle de temps considéré pour le calcul de capacité. *L'algorithme d'élaboration* consiste alors à trouver un ordre de succession des trains sur chacune des voies, tel que l'ensemble des contraintes définies soient satisfaites.

Cet algorithme permet soit de trouver une variante satisfaisant à l'ensemble des contraintes (en s'arrêtant dès qu'une solution est trouvée), soit de trouver toutes les variantes d'horaire (en explorant l'ensemble de l'arbre des solutions).

Dans le cas de la saturation d'un horaire, l'algorithme d'élaboration est utilisé plusieurs fois en introduisant successivement les différents trains saturants dans l'horaire de base, en respectant le type de saturation défini.

Le temps de calcul total dépend fortement de l'ordre de traitement des voies d'une part, et des ordres de succession sur les voies d'autre part. La recherche des solutions est effectuée en profondeur (depth-first), ce qui accélère le traitement. La consommation de mémoire est assez importante, puisqu'il convient, pour chaque voie déjà traitée, de mémoriser les intervalles possibles des événements, afin de les réutiliser en cas d'itération.

LE LOGICIEL CAPRES

Le logiciel CAPRES (Système d'aide à la gestion de la capacité ferroviaire) intègre la méthode d'évaluation décrite ci-avant dans un cadre souple et convivial. Plus précisément, le logiciel CAPRES se compose des éléments suivants.

- Une *interface d'introduction* et de modification des données nécessaires permet de définir aisément, à l'aide de dialogues interactifs, les différentes contraintes du réseau.
- Un *outil d'élaboration* de variantes d'horaire, ainsi que de saturation d'horaire de base, utilise directement l'algorithme décrit plus haut.
- Enfin, un *module d'analyse* présente les différents résultats obtenus sous les formes habituelles de la planification ferroviaire: horaire graphique, horaire réseau, horaire ligne, araignée de correspondances, plan d'occupation des voies, diagramme d'écoulement, ... Toutes ces présentations sont disponibles sous forme graphique ou alphanumérique, en couleurs (cf. figure page suivante). Enfin, des résultats spécifiques d'analyse de la capacité sont regroupés dans des tableaux: pourcentages d'utilisation des lignes, capacité des différents composants, contraintes les plus limitatives (dont découlent les points critiques du réseau), ...

Ces trois modules permettent une approche itérative de l'évaluation de la capacité d'un réseau sous diverses conditions.

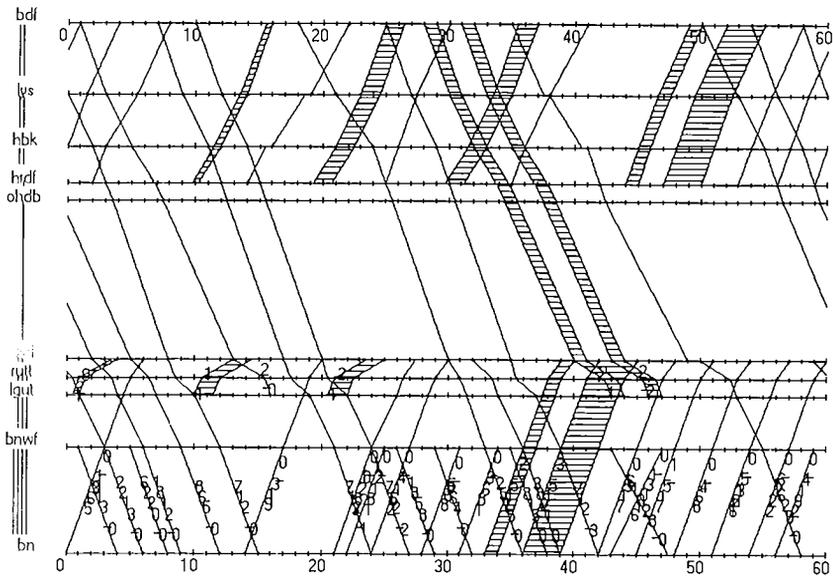
Dans l'état actuel du développement informatique de CAPRES, seul le cas de l'horaire cadencé, de cycle quelconque, a été traité. L'extension au cas non cadencé est prévue par la suite. Toutefois, en raison des temps de calcul importants, il est préférable de découper temporellement le réseau étudié en tranches de 1 à 4 heures au maximum. L'option cadencée a été développée en priorité pour les besoins des Chemins de fer fédéraux suisses (CFF), qui se sont engagés dans le projet en partenariat avec l'Institut des transports et de planification (ITEP) de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL).

CONCLUSION

L'évaluation de la capacité d'un réseau ferroviaire, par le fait qu'elle induit une dimension supplémentaire par rapport au cas d'une ligne ou d'un nœud, requiert également l'introduction d'une donnée supplémentaire: la stratégie d'utilisation des tronçons communs à plusieurs lignes. Cette stratégie peut être définie par une hiérarchisation des différents trains saturants de l'horaire.

La méthode d'évaluation de la capacité se base sur le principe que la capacité d'un réseau peut être définie comme l'état saturé d'un horaire de base, après avoir effectué une série d'hypothèses sur l'infrastructure, l'exploitation et la qualité de service. Le logiciel CAPRES, qui utilise cette méthode, est actuellement en phase de tests auprès des Chemins de fer fédéraux suisses (CFF), qui doivent évaluer les effets sur la capacité de nombreux investissements dans le cadre de Rail 2000 (nouveau concept d'offre), d'AlpTransit (construction de nouvelles transversales alpines) et de la

mise en place de réseaux express régionaux notamment. L'analyse des résultats déjà obtenus avec CAPRES a mis en évidence sa grande souplesse d'utilisation, et a permis d'affiner la méthode d'élaboration et la présentation des résultats.



Exemple de présentation de CAPRES (horaire graphique ligne)

Finalement, CAPRES permet une évaluation itérative et structurée de la capacité ferroviaire. De par la généralité de l'algorithme, il s'applique à des réseaux de taille diverse avec un niveau de détail très variable, ce qui ajoute une grande flexibilité d'utilisation à sa haute convivialité.

BIBLIOGRAPHIE

Directive du Conseil du 29 juillet 1991 relative au développement de chemins de fer communautaires (91/440/CEE) *Journal officiel des Communautés européennes* (24.8.91) No L 237/25.

Hachemane, P. (1995a) *CAPRES (Système d'aide à la gestion de la capacité des réseaux ferroviaires) Rapport technique*, Institut des transports et de planification de l'École polytechnique (ITEP), Lausanne.

Hachemane, P. (1995b) *CAPRES (Système d'aide à la gestion de la capacité des réseaux ferroviaires) Présentation des objectifs et de l'état du projet*, Institut des transports et de planification de l'École polytechnique (ITEP), Lausanne.

Hachemane, P. et A. Curchod (1994) *CAPRES (Système d'aide à la gestion de la capacité des réseaux ferroviaires) Manuel de l'utilisateur*, Institut des transports et de planification de l'École polytechnique (ITEP), Lausanne.