

DES SYSTÈMES EXPERTS POUR PLANIFIER LA MAINTENANCE DES VOIES FERRÉES

Robert E. RIVIER

Professeur, directeur à l'ITEP-EPFL

Institut des transports et de planification

de l'École polytechnique fédérale de Lausanne – Suisse

1. INTRODUCTION

Planifier la maintenance des voies ferrées, c'est déterminer périodiquement dans l'espace et dans le temps les travaux nécessaires et réalisables. Les travaux nécessaires à court, moyen et long terme pour assurer la sécurité et le confort des circulations, ainsi que pour conserver la substance du réseau, sont les entretiens de la géométrie et du matériel ainsi que les renouvellements des voies. Les travaux réalisables sont ceux qui restent dans les limites des moyens disponibles en personnel, matériels, machines, crédits et temps.

L'objectif du planificateur est d'assurer le niveau de qualité requis pour la géométrie et le matériel des voies avec des dépenses globales minimum; il doit donc définir ce niveau et allouer ensuite les ressources de manière optimale. Un tel objectif présuppose la connaissance des interactions entre les sollicitations que subit la voie, son état géométrique, l'état de son matériel et les effets des moyens et méthodes de maintenance.

Mais comme ces interactions sont complexes, mal connues, et variables d'un tronçon à l'autre, on ne parvient pas à modéliser valablement le processus de dégradation et de restauration de l'état des voies et par conséquent à faire des prévisions fiables. La prise en compte de cette incertitude est un défi pour le planificateur qui doit donc :

- collecter régulièrement une masse considérable d'informations techniques et économiques;
- analyser systématiquement ces informations en se basant sur ses connaissances et expériences;
- recourir à une planification continue pour ajuster ses prévisions et limiter les décisions subjectives.

L'importance des sommes consacrées – année après année – à la maintenance des voies d'une part et les exigences imposées à la voie par la croissance des vitesses et des charges d'autre part, incitent les réseaux à se doter de méthodes et d'outils permettant de créer un processus efficace pour faciliter la prise de décisions et l'évaluation de leurs conséquences techniques et économiques en matière de planification de la maintenance des voies.

Depuis une vingtaine d'années, la recherche scientifique et le développement d'outils informatiques se sont intensifiés dans des réseaux ferroviaires, des centres de recherche universitaires et des instituts spécialisés travaillant indépendamment. L'avènement des méthodes modernes de diagnostic basées sur des systèmes experts ouvre depuis peu de nouvelles perspectives.

A l'initiative de l'Union Internationale des Chemins de fer (UIC), les experts de douze réseaux collaborent pour mettre en commun leurs expériences et développer un système d'aide à la décision pour l'entretien et le renouvellement des voies ferrées.

L'objectif de cette communication est de mettre en évidence quelques orientations qui semblent prometteuses pour concevoir et développer de tels outils d'aide au planificateur. Elle présente successivement :

- une brève comparaison de quelques outils informatiques développés récemment pour l'aide à la planification de la maintenance des voies ferrées;
- les conditions pour la conception d'un outil en fonction du processus de planification, des utilisateurs, des décisions à élaborer et des données;
- les méthodes existantes et un concept d'outil modulaire mettant successivement en œuvre des méthodes diverses et complémentaires.

2. OUTILS RECENTS D'AIDE A LA PLANIFICATION

Au cours de ces dernières années, des systèmes très différents ont été développés pour l'aide à la décision en matière de maintenance des voies ferrées. Par la nature et l'ampleur des objectifs visés, ils constituent des systèmes d'aide à la planification stratégique, opérationnelle ou sectorielle selon trois filières que l'on peut caractériser de la manière suivante :

- développement de stratégies de maintenance à long terme à l'aide d'un modèle de simulation de la dynamique du système technique de maintenance des voies ferrées et de son environnement ferroviaire et socio-économique [1];
- aide au diagnostic et à la planification opérationnelle à moyen terme de travaux de maintenance des voies ferrées par l'exploitation interactive de modèles analytiques et statistiques de la dégradation et de la restauration de l'état des voies ainsi que de procédures d'évaluation des conséquences techniques et économiques de ces travaux (modèles "What if ?") [2, 3, 4];
- aide au diagnostic de l'état géométrique ou de l'état de composants de la superstructure, en vue d'une planification de certains travaux d'entretien ou de renouvellement partiel, grâce à la mise à disposition de données, à des systèmes experts, ou à une analyse économique [5, 6, 7, 8].

Presque tous les outils mentionnés dans les références ci-dessus sont soit en cours de développement, soit sous forme de prototypes, soit en cours d'évaluation; le recul manque pour tirer des enseignements sur leur efficacité technique et économique.

3. EXIGENCES POUR UNE AIDE A LA PLANIFICATION OPERATIONNELLE

Un outil d'aide à la planification opérationnelle des travaux de maintenance des voies ferrées doit être conçu en fonction du processus de planification, des caractéristiques des utilisateurs, des décisions à élaborer ainsi que des données disponibles.

3.1 Processus de planification

Les responsables de l'état des voies réalisent leur mission selon le cycle d'opérations suivant :

- surveillance de l'état des voies comportant les mesures périodiques de l'état géométrique et les relevés de l'état du matériel des voies;
- planification de l'entretien et du renouvellement des voies qui comprend la détermination des besoins et l'élaboration des décisions quant aux travaux à réaliser;
- ordonnancement de ces travaux, c'est-à-dire programmation dans le temps et dans l'espace de la mise en œuvre des moyens d'exécution;

– exécution des travaux, suivie des contrôles techniques et économiques.

Dans ce cycle d'opérations, la planification constitue l'élément central aboutissant à la définition de la nature et de l'urgence des travaux à réaliser, compte tenu des moyens disponibles. Dans la pratique courante, les connaissances et expériences du planificateur jouent un rôle déterminant dans l'élaboration des décisions. Un système d'aide à la décision doit donc permettre à son utilisateur de continuer à jouer ce rôle. En outre le processus de planification des renouvellements de voies est indissociable de celui des entretiens de voies aussi bien du point de vue technique qu'économique.

3.2 Utilisateur et décisions à élaborer

Rappelons que pour pouvoir assurer un niveau de qualité des voies avec des dépenses globales minimum, le planificateur doit identifier les besoins de maintenance et allouer ensuite les ressources de manière optimale. Dans la pratique courante, c'est une tâche de gestion (planification, direction et contrôle) technico-économique confiée aux directions opérationnelles situées hiérarchiquement entre la direction générale d'un réseau et les unités de production chargées de l'exécution des travaux de voie. C'est ce planificateur-gestionnaire avec ses subordonnés directs, responsables de la maintenance de plusieurs milliers de kilomètres de voies, qui sont les utilisateurs potentiels d'un système d'aide à la décision.

Une analyse des travaux de voie, effectuée dans plusieurs réseaux permet de constater que 50 à 80% de la totalité des dépenses de maintenance des voies sont consacrées aux travaux de maintenance continue (sur des tronçons allant de 200 m à plusieurs kilomètres) des seules voies principales, c'est-à-dire des lignes les plus chargées et/ou à grande vitesse. C'est donc pour la planification de ces travaux qu'un système d'aide à la décision est particulièrement nécessaire si l'on vise un but économique.

Par ailleurs, les techniques modernes de maintenance des voies ferrées, qui ont de plus en plus recours à la mécanisation et à l'automatisation, aboutissent à une standardisation des travaux continus et par conséquent à une dizaine de décisions-types quant à la nature du travail. Ainsi, pour les entretiens continus de voie, on peut distinguer les décisions de rectification de la géométrie, de meulage des rails et de révision générale du matériel de voie. Pour les renouvellements continus de voie on distingue le renouvellement intégral de la superstructure, les renouvellements partiels d'un ou de plusieurs des composants : rails, traverses et attaches, ballast avec ou sans assainissement de l'infrastructure.

Un système d'aide à la décision devra donc permettre de localiser les tronçons où il y a lieu de faire l'un ou l'autre de ces travaux. Il devra en outre permettre de préciser dans le temps la période optimale pour leur réalisation, compte tenu des exigences de l'exploitation, de la sécurité et des moyens disponibles. Cela présuppose la possibilité de prévoir l'évolution de l'état de la voie (géométrie et matériel) que l'on réalise ou pas le travail de maintenance à un moment donné. Or le meilleur modèle de la dégradation disponible à ce jour est, pour chaque tronçon de voie, l'extrapolation linéaire de l'évolution de la dégradation passée; la meilleure estimation de l'effet d'une restauration envisagée est donnée par l'effet du dernier travail de même nature sur le même tronçon. Dans ces conditions, la fiabilité des prévisions sera d'autant plus fragile que les échéances seront éloignées. C'est la raison pour laquelle les termes de planification utilisés dans la pratique sont de l'ordre de deux années pour les entretiens et de cinq années pour les

renouvellements de voie et que les programmes élaborés sont des programmes glissants remis à jour annuellement.

Les décisions à élaborer reposent en premier lieu sur une analyse de chaque tronçon de voie et en second lieu sur l'évaluation économique de l'opportunité et de la faisabilité des travaux. Un système d'aide à la décision doit donc permettre d'élaborer un diagnostic et des prévisions techniques aussi fiables que possible pour permettre ensuite une évaluation économique valable et pour s'assurer de la faisabilité des travaux à réaliser compte tenu des moyens disponibles.

3.3 Les données

Les nombreuses données utilisées pour planifier les travaux de maintenance peuvent être regroupées sommairement comme suit :

- topologie du réseau, des lignes, des voies;
- tracé des voies, charges supportées, composition du trafic, vitesse maximum des trains, stabilité de l'infrastructure;
- caractéristiques de la superstructure, c'est-à-dire type et âge des rails, traverse, attaches, ballast;
- historique des travaux et des dépenses par tronçon de voie et prévisions d'entretien et de renouvellement;
- relevés et analyses de l'état géométrique des voies et de l'état du matériel;
- connaissances et expériences concernant le comportement de la voie et les effets des travaux;
- politique de maintenance, tolérances géométriques et d'usure du matériel par catégorie de lignes;
- techniques d'exécution des travaux, rendements et coûts unitaires;
- limites des moyens disponibles en personnel, matériels, machines, crédits et temps.

Ces informations sont sous forme graphique, numérique et écrite. De nombreux réseaux tendent à les informatiser progressivement dans des bases de données car, fréquemment utilisées pour diverses applications, elles doivent en permanence être remises à jour.

Dans ce chapitre, les objectifs, exigences, données et contraintes d'une planification opérationnelle de la maintenance des voies ferrées ont été sommairement présentés. Sur ces bases, il convient de préciser les fonctionnalités d'un système d'aide à la décision et les méthodes d'analyse et de traitement des données qui semblent les mieux à même de réaliser ces fonctionnalités.

4. ELABORATION DES DECISIONS ASSISTEE PAR LES TECHNIQUES DES SYSTEMES EXPERTS

Pour qu'un système d'aide à la planification opérationnelle de la maintenance des voies ferrées soit un véritable outil pour le planificateur, il importe que :

- sa structure logique et son fonctionnement soient calqués sur le processus d'élaboration des décisions utilisé par les planificateurs;
- le système apporte une aide efficace au planificateur à chaque étape principale du processus et que ces contributions soient intégrées;
- le planificateur puisse utiliser ses connaissances et expériences pour améliorer la qualité des décisions;

- le système soit convivial, interactif et livre les résultats intermédiaires et finaux sous la forme la mieux adaptée pour un planificateur non informaticien.

4.1 Processus d'élaboration des décisions

Le processus d'élaboration des décisions est itératif et complexe, car il fait intervenir de nombreuses analyses des données mentionnées dans le paragraphe 3.3. Schématiquement, il peut être structuré et subdivisé en quatre étapes définissant les fonctionnalités d'un système d'aide à la décision.

4.1.1 Détermination des besoins de maintenance

Il s'agit d'une opération fastidieuse d'analyse et de tri de milliers de segments de voie ayant par exemple 200 ou 500 m de longueur. Elle consiste à faire un premier diagnostic technique pour identifier les segments qui sont hors tolérances ou qui le seront dans un délai plus ou moins rapproché en ce qui concerne l'état géométrique et les sollicitations cumulées du matériel de la voie. Les objectifs sont d'une part d'éliminer pour les étapes suivantes la majorité des segments de voie qui ne nécessiteront pas d'entretien ou de renouvellement dans les échéances de planification respectives, et d'autre part de classer les segments de voie par nature des besoins de maintenance et par urgence probable du travail; ce classement est assorti d'un indicateur de fiabilité du diagnostic.

4.1.2 Etablissement des travaux nécessaires

La deuxième étape du processus consiste en une analyse fine par segment de voie pour établir la nature et l'urgence des travaux dits nécessaires pour que le niveau de qualité requis soit respecté. Cette étape peut nécessiter la récolte d'informations complémentaires concernant certains segments de voie, notamment pour ceux qui ont été identifiés comme candidats à un renouvellement; ces informations proviendront d'une inspection de l'état du matériel de ces seuls segments de voie.

4.1.3 Structuration des plans de travaux

La planification vise à établir le plan des travaux nécessaires d'entretien pour les 2 à 3 années à venir ainsi que le plan des travaux nécessaires de renouvellement pour les 5 années à venir par exemple. Il s'agit donc, à partir des résultats de l'étape 2 obtenus par segment de voie, de les structurer pour qu'il y ait cohérence :

- dans l'espace, car les segments nécessitant des travaux ne sont pas forcément contigus et les tronçons qui feront l'objet de travaux doivent être de longueur techniquement et économiquement rentable;
- du point de vue du type d'entretien ou de renouvellement nécessaire, et enfin
- dans le temps, car les urgences peuvent varier pour un même travail entre segments contigus.

4.1.4 Elaboration des plans de travaux à réaliser

Les plans des travaux nécessaires sont évalués pour chaque année à venir afin de déterminer s'ils sont compatibles avec les moyens disponibles pour les réaliser. Cette restructuration dans le temps vise à allouer les ressources de manière optimale.

L'ensemble de ce processus en quatre étapes doit, de manière continue, être sous-tendu par des analyses d'opportunité économique et des évaluations basées sur des

simulations du type “What if ?” afin de permettre au planificateur d'évaluer les conséquences des décisions qu'il prend et limiter ainsi leur subjectivité.

4.2 Systèmes experts et aide à la planification

Plusieurs expériences de développement de systèmes d'aide à la planification ainsi que l'examen des outils récents mettent en évidence les possibilités et les limites des méthodes d'analyse et de traitement de données. Il apparaît clairement que le choix d'une méthode ou technique pour résoudre efficacement les problèmes d'une étape du processus d'élaboration des décisions ne convient pas aux autres et qu'il faut recourir à des méthodes ad hoc pour chaque étape. Parmi ces méthodes ou techniques on peut distinguer :

- celles qui sont de type analytique-algorithmique ou basées sur des algorithmes heuristiques qui tentent de modéliser la démarche du planificateur; bien qu'efficaces, elles sont trop rigides pour tenir compte des cas particuliers ou sont trop sophistiquées pour qu'un planificateur intervienne à bon escient dans le déroulement des calculs; en outre, elles ne sont exploitables que si toutes les données nécessaires sont stockées;
- celles qui sont plus souples et laissent le planificateur participer aux analyses et aux choix en tirant parti de ses connaissances et expériences; parmi celles-ci, il y a celles qui sont de type analytique-algorithmique mais très interactives, et celles qui sont basées sur les techniques des systèmes experts.

4.2.1 Systèmes experts

Parmi les techniques de l'intelligence artificielle, les systèmes experts sont des programmes qui visent à simuler sur ordinateur les raisonnements humains réputés intelligents. Le recours à cette approche est particulièrement indiqué dans les domaines où il n'existe pas de solution algorithmique, pour lesquels la combinatoire est très vaste avec de nombreux cas particuliers ou pour lesquels les données sont incomplètes, contradictoires ou entachées d'erreurs. Les systèmes experts développés avec succès sont généralement basés sur un ensemble de connaissances approfondies d'un domaine restreint, ce qui est le cas pour l'élaboration de diagnostics techniques notamment.

Un système expert comprend une base de faits connus (description des objets ou symboles pris en compte et de leurs relations, description des cas particuliers), ainsi qu'une base de connaissances comportant des règles propres au domaine d'expertise et leurs conditions d'application. Les règles permettent d'exploiter la base de faits grâce à un moteur d'inférence qui détermine la stratégie de résolution du problème. L'objectif n'est pas de trouver la solution optimale (car souvent il est impossible de la définir), mais de trouver la meilleure solution possible dans l'état actuel des connaissances sur le domaine considéré et formalisé dans la base de connaissances. Cette dernière peut être enrichie avec l'expérience et favorise l'auto-apprentissage de l'utilisateur. En effet, les systèmes experts incluent, dans le programme, des procédures qui expliquent leurs “raisonnements” en mettant en évidence les déductions successives qui ont permis d'arriver à une conclusion. Cela est particulièrement nécessaire à l'utilisateur qui peut ainsi évaluer les résultats obtenus.

4.2.2 Vers un système ad hoc d'aide à la planification

Les caractéristiques du processus de planification opérationnelle de la maintenance de la voie d'une part, et celles des méthodes et techniques d'autre part, permettent de

concevoir un système ad hoc d'aide à la planification comportant les quatre étapes décrites au paragraphe 4.1.

La première étape consiste à traiter tous les segments de voie successivement pour déterminer les besoins de maintenance. Il faut donc une méthode efficace pour réaliser un diagnostic sommaire. Le recours à un système hybride qui combine les techniques algorithmiques d'application de règles à celles des systèmes experts [4] est particulièrement adapté, car :

- il peut automatiser cette fonction de diagnostic sommaire et ses tris fastidieux;
- il permet de conserver la trace du diagnostic, c'est-à-dire les déductions successives qui ont permis d'arriver à la conclusion.

La deuxième étape, qui consiste à établir les travaux nécessaires, est plus complexe, mais concerne un nombre réduit de segments de voie. Elle exige une participation interactive du planificateur pour l'analyse fine des cas particuliers. Un système mixte qui comporte une partie hybride et un système expert doit permettre au planificateur d'exploiter la base de connaissances et sa propre expérience pour la prise de décision.

Pour la troisième étape, il est envisagé d'automatiser la structuration des plans de travaux avec un système hybride. Des analyses approfondies sont en cours.

Enfin, pour la quatrième étape destinée à l'élaboration des plans de travaux à réaliser, l'utilisation de techniques algorithmiques et interactives doit permettre au planificateur de s'assurer que les moyens nécessaires restent dans les limites des moyens disponibles.

5. CONCLUSIONS

Une planification des travaux de maintenance des voies ferrées résultant de décisions objectives reste un défi dont l'enjeu est très important pour les réseaux ferroviaires, qui doivent limiter leurs coûts de production afin de rester compétitifs. La complexité du processus d'élaboration des décisions résulte de l'hétérogénéité des conditions dans lesquelles se trouve chaque segment de voie. Un haut niveau d'expertise est indispensable pour allouer judicieusement les ressources. Les réseaux veulent se doter de méthodes et d'outils permettant de créer un processus efficace pour faciliter la prise de décision en matière de planification de la maintenance des voies. Une collaboration internationale a été mise en place à l'initiative de l'Union International des Chemins de fer afin de mettre en commun les expériences d'experts et développer prochainement un prototype de système d'aide à la décision pour l'entretien et le renouvellement des voies. Hautement interactif, ce prototype tirera parti des techniques utilisées par les systèmes experts et fera ainsi progresser les connaissances en vue d'une gestion plus scientifique de la maintenance des voies ferrées.

RÉFÉRENCES

- [1] Schmidt D., Schroeder-Baumgart R., Kurzrock G., Darstellung der Ursache/Wirkung-Beziehungen verschiedener Oberbau-Instandhaltungsstrategien mit Hilfe von System Dynamics-Modellen. Universität Stuttgart und Hannover. SICO Oberhausen.
- [2] Shenton M.J., MARPAS – Maintenance and Renewal Planning Aid System. British Rail Research. Derby, Great Britain.
- [3] Sherman C., TMS – Track Maintenance System. Cole Sherman and Associates. Ontario, Toronto, Canada.

- [4] Rivier R.E., Expert Systems Plan Track Maintenance. Railway Gazette International. Sutton Surrey, Great Britain. June 1991. pp. 391-395.
- [5] Esveld C., BINCO – Bovenbouw INformatic en Control per Onderhoudsectie. Modern Railway Track (ISBN 90-800324-1-7).
- [6] Martland C.D., REPOMAN – Rail Expert Planning, Organisation and Maintenance. Application of Expert Systems in Railroad Maintenance : Scheduling Rail Relays. Transportation Research Vol. 24A n° 1. pp. 39-52. 1990.
- [7] Baluch H., DONG, KOMPLAN, Basic Concept of the PKP Computer-Aided Track Maintenance and Renewal System. Seminar of the International Railway Congress Association. Budapest. 23-24 May 1991.
- [8] Shenton M.J., Rail Renewal, Net Present Value. British Rail Research. Derby, Great Britain.