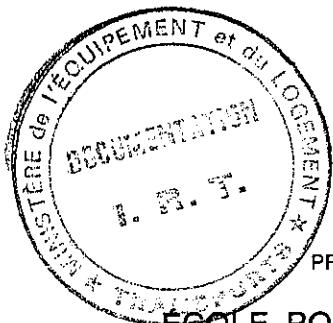


SCT-NB

ANALYSE AUTOMATIQUE ET EN TEMPS RÉEL DES MESURES DE L'ÉTAT GÉOMÉTRIQUE DES VOIES FERRÉES

APPLICATIONS POTENTIELLES DANS UN SYSTÈME DE GESTION INTÉGRÉ
DE LA MAINTENANCE DE LA VOIE



2703

THÈSE N° 221 (1975)

PRÉSENTÉE AU DÉPARTEMENT DU GÉNIE CIVIL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES TECHNIQUES

PAR

ROBERT ÉTIENNE RIVIER

Ingénieur civil EPFL
originaire de Lausanne, Aubonne et Genève

acceptée sur proposition du jury :

Prof. D. Genton, rapporteur
T. Juillerat, Dr. ès sciences, corapporteur
W. Simon, Dr. ès sciences, corapporteur

Lausanne EPFL

1975

14937

REMERCIEMENTS

Le présent travail a été effectué à l'Institut de technique des transports de l'EPF-L, en étroite liaison avec les Chemins de fer fédéraux suisses et la maison MATISA. Mes remerciements vont à la direction de chacun de ces trois organismes pour avoir mis à ma disposition les moyens nécessaires à la réalisation de ce travail.

Je tiens en particulier à remercier très sincèrement Monsieur le Prof. D. Genton d'avoir défini le cadre et le but de ce travail, et de l'avoir dirigé avec beaucoup d'enthousiasme. J'ai beaucoup apprécié ses précieux conseils me faisant profiter de sa large expérience.

Je suis aussi très reconnaissant à Monsieur le Docteur W. Simon, à Monsieur P. Cavaleri et à Monsieur R. Domeniconi des Chemins de fer fédéraux suisses qui, lors de nombreux entretiens, m'ont fait part de leurs remarques et suggestions pour que ce travail tienne compte des exigences de la pratique.

Les indications de collaborateurs de la maison MATISA en ce qui concerne les équipements de collecte et de traitement des mesures de l'état géométrique des voies m'ont été fort utiles; je tiens à leur faire part de ma gratitude.

Que Monsieur le Docteur T. Juillerat soit assuré de ma reconnaissance pour ses pertinentes observations et pour les intéressantes et fructueuses discussions que nous avons eues au sujet de ce travail.

Je remercie chaleureusement Messieurs A. Kellenberger, Q.M. Ho et P.E. Montus pour leur efficace collaboration lors des campagnes de mesure en voie et du dépouillement de celles-ci en centre de calcul.

Enfin, un grand merci à Mesdemoiselles L. Kraus et C. Simond, ainsi qu'à Messieurs R. Echenard, J.-C. Beck et A. Laurent pour le soin tout particulier apporté à la présentation de ce travail.

Mai 1975

R.E. Rivier

ANALYSE AUTOMATIQUE ET EN TEMPS REEL DES MESURES DE L' ETAT GEOMETRIQUE DES VOIES FERREES

Applications potentielles dans un système de gestion intégré de la maintenance de la voie

TABLE DES MATIERES

1.	INTRODUCTION	1
2.	LE ROLE DES MESURES DE L'ETAT GEOMETRIQUE DANS LA GESTION DE LA MAINTENANCE DES VOIES FERREES	6
2.1	La gestion de la maintenance des voies	
2.2	Les travaux de maintenance des voies	
2.3	Le rôle des mesures de l'état géométrique des voies	
3.	LA MESURE DE L'ETAT GEOMETRIQUE DES VOIES	21
3.1	Principes généraux	
3.2	Les mesures prenant appui sur les joues intérieures des rails	
3.3	Les mesures prenant appui sur les tables de roulement des rails	
4.	LES METHODES ET PROCEDES ACTUELS D'ANALYSE AUTOMATIQUE DES MESURES DE L'ETAT GEOMETRIQUE DES VOIES	32
4.1	Conceptions et leurs développements	
4.2	Analyses basées sur les pics	
4.3	Analyses basées sur un échantillonnage du signal	
5.	LES PRINCIPES D'UNE QUANTIFICATION DE L'ETAT GEOMETRIQUE DES VOIES	53
5.1	But et objectifs	
5.2	Données et contraintes	
5.3	Principes retenus	
6.	L'ACQUISITION DES VALEURS ELEMENTAIRES A TRAITER	73
6.1	Lignes moyennes des signaux	
6.2	Filtrage des signaux bruts	
6.3	Valeurs élémentaires pour l'analyse et particularités de certaines lignes moyennes	

7. LES DISTRIBUTIONS DES VALEURS DISCRETES FLOTTANTES, PROPRIETES STATISTIQUES	86
7.1 Echantillons	
7.2 Test du χ^2	
7.3 Conséquences	
8. LA CONCEPTION DE L'ALGORITHME ANAVOI	95
8.1 Bases de calcul	
8.2 Algorithme ANAVOI	
8.3 Enoncé des résultats	
9. L'ANALYSE DE L'ALGORITHME ET DES RESULTATS	109
9.1 Éléments paramétriques de l'algorithme	
9.2 Conformité et sélectivité des résultats	
9.3 Interprétation des résultats	
10. DE L'UTILISATION DES RESULTATS DANS UN SYSTEME DE GESTION INTEGRE DE LA MAINTENANCE DES VOIES	130
10.1 Le système de gestion intégré	
10.2 Applications potentielles de l'analyse automatique de l'état géométrique dans un système de gestion intégré de la maintenance des voies	
10.3 Cas de la voiture de mesure des CFF, expérimentation	
11. RESUME ET CONCLUSIONS	144

ANNEXES :

- A. Méthodes et procédés d'analyse des mesures de l'état géométrique
 - B. Calcul de la fonction de transfert du filtre digital
 - C. Distributions des valeurs discrètes flottantes, résultats détaillés du test du χ^2
 - D. Bibliographie
- Curriculum vitae

1. INTRODUCTION

L'augmentation de la population et de sa mobilité, l'accroissement du volume de matières premières et de produits à déplacer rendent toujours plus nécessaires les moyens de transport à grande capacité. Le *chemin de fer*, parmi ceux-ci, a plus que jamais un rôle important à jouer, car non seulement il offre cette capacité élevée, mais il limite la pollution grâce à une occupation rationnelle de l'espace et à une utilisation efficace de l'énergie.

Cela explique les efforts consentis pour augmenter son caractère attractif par la fréquence des circulations, la vitesse des convois, leur sécurité et le niveau du confort. C'est grâce aux progrès spectaculaires de la science et de la technique que des trains circulent à une cadence élevée à plus de 200 km/h depuis octobre 1964 [1]* et qu'aujourd'hui il est fréquemment fait allusion à des chemins de fer de conception traditionnelle permettant des vitesses voisines de 300 km/h.

L'un des éléments essentiels du système ferroviaire est la *voie ferrée*. En tant que support imposant aux véhicules leur trajectoire, elle joue un rôle déterminant et a même donné son nom à ce système. L'accroissement de la vitesse et de la densité des trains, l'augmentation des charges par essieu et de l'agressivité des engins moteurs ont pour conséquence d'exercer sur la voie des sollicitations considérables. Certes des progrès très importants ont été faits dans la conception de la voie et dans celle de ses éléments constitutifs pour augmenter sa résistance à l'usure et à la fatigue. Mais sa *maintenance*, c'est-à-dire les opérations d'*entretien* et de *renouvellement*, reste essentielle. Il importe en effet de maintenir le niveau de qualité du réseau des voies.

* Les numéros entre crochets renvoient à la bibliographie en annexe D.

Or, parmi les opérations de la *'gestion de la maintenance de la voie'*, celle qui consiste à déterminer dans le temps et dans l'espace les travaux de maintenance à effectuer, à opérer les choix les plus judicieux, compte tenu des moyens disponibles, se révèle l'une des plus complexes. L'élaboration de *décisions objectives* presuppose l'analyse d'une masse considérable d'informations techniques et économiques. Mais le nombre important de variables, leur nature qui rend leur quantification souvent difficile et leurs interactions parfois connues de manière peu précise compliquent fortement l'analyse. Il est donc indispensable de recourir à des procédés de *collecte*, de *traitement* et d'*analyse* des valeurs de ces variables tels que les responsables de la maintenance des voies ferrées puissent obtenir les éléments leur permettant d'*objectiver* leurs décisions et d'en évaluer les conséquences.

C'est ainsi qu'en 1877 déjà sont apparus des équipements pour mesurer et enregistrer les défauts de la géométrie de manière continue le long des voies [2]. Ces équipements ont été développés et perfectionnés progressivement et constituent aujourd'hui l'instrument auquel font appel les responsables d'un réseau pour collecter périodiquement des informations leur permettant d'organiser économiquement et de contrôler efficacement les travaux de maintenance des voies.

Rappelons que dans la pratique courante, les paramètres de mesure relevés sont :

- le *gauche*,
- la *courbure* de chaque file de rail,
- le *nivellement* de chaque file de rail,
- l'*écartement*,
- le *dévers*.

L'enregistrement graphique de ces paramètres définissant l'état géométrique des voies contient des informations abondantes et d'une grande importance pour l'élaboration de diagnostics et la préparation de certaines décisions. Mais l'exploitation visuelle de ces kilomètres de graphiques

analogiques est une opération fastidieuse. Il est par ailleurs difficile, aussi bien pendant qu'après les campagnes de mesure, de préparer des décisions objectives sans quantification.

Il y a donc avant tout lieu de vouer une attention particulière au *captage* et à la *mise en forme* des valeurs de ces paramètres, à leur *analyse en temps réel* dans un véhicule de mesure, pour améliorer et faciliter l'exploitation de ces informations.

Nombreux sont ceux qui, depuis une dizaine d'années, ont développé des équipements d'analyse automatique des mesures de l'état géométrique des voies en vue d'évaluer quantitativement l'état des différents paramètres (voir annexe C). Toutefois, une étude systématique des méthodes et des procédés utilisés révèle qu'une telle quantification doit, d'une part, être conçue en fonction d'*objectifs* parfaitement définis et, d'autre part, être fondée sur des bases solides aussi bien du point de vue de la *statistique mathématique* que du point de vue des *besoins de la gestion* de la maintenance de la voie. Il s'agit en effet de savoir quels aspects de la détérioration de la voie peuvent et doivent être relevés, comment les appréhender par des chiffres et quels sont les objectifs à atteindre. Sur ces bases, il faut définir une méthode d'analyse automatique et en temps réel livrant des informations représentatives et univoques conçues en fonction des besoins réels des responsables de la maintenance de la voie.

Conscients de l'intérêt de l'analyse automatique des mesures de l'état géométrique dans le cadre de la maintenance des voies ferrées, les dirigeants de l'Institut de technique des transports de l'EPP-L et des Chemins de fer fédéraux suisses ont décidé d'engager et de supporter le travail de recherche que l'auteur présente ici avec leur autorisation.

Il sera tout d'abord question, dans le chapitre 2, de la gestion de la maintenance de la voie, puis des travaux d'entretien et de renouvellement des voies, afin d'expliquer le rôle des mesures de l'état géométrique dans les opérations de la maintenance de la voie.

Les chapitres 3 et 4 sont consacrés aux caractéristiques essentielles des équipements modernes de mesure de l'état géométrique et aux méthodes et procédés connus d'analyse et de traitement des informations collectées grâce à ces équipements.

Les objectifs à atteindre et les fondements d'une quantification de l'état géométrique des voies susceptibles d'atteindre ces objectifs sont définis dans le chapitre 5.

Les valeurs élémentaires des paramètres de mesure s'obtiennent grâce à un traitement hybride des signaux analogiques fournis par les équipements de mesure de l'état géométrique. Les propriétés statistiques de ces valeurs sont ensuite déterminées pour définir les grandeurs qui caractérisent les aspects de l'état de la voie qu'il s'agit de chiffrer. Ces questions sont exposées dans les chapitres 6 et 7.

Dans le chapitre 8 sont élaborées les bases théoriques d'un algorithme de traitement des valeurs élémentaires des paramètres de mesure conçu pour pouvoir opérer dans un *mini-ordinateur* et pour livrer les éléments chiffrés caractérisant l'état géométrique de la voie. Ces éléments sont ensuite décrits en fonction de la maintenance de la voie.

L'analyse des propriétés de cet algorithme et de ses éléments paramétriques, donnée au chapitre 9, en précise les possibilités et les limites d'utilisation pour un traitement (en temps réel dans un wagon de mesure) de l'ensemble des paramètres définissant l'état géométrique. Les résultats obtenus par l'analyse automatique constituent l'information de base pour la gestion de la maintenance de la voie. En effet, de par leur nature et leur forme, ces résultats peuvent être exploités sans traitement ultérieur par les responsables de la maintenance de la voie pour élaborer leurs *décisions*. Ils peuvent être aussi traités en temps différé sur ordinateur en vue d'établir les *programmes de travaux* à courte, à moyenne et à longue échéance.

Le chapitre 10 est consacré à la description d'applications potentielles des résultats de l'analyse automatique de l'état géométrique dans le cadre du développement d'un *système de gestion intégré* de la maintenance de la voie.

Le présent travail devrait apporter une contribution utile aux responsables de la voie car il livre :

- une méthode générale d'approche et d'analyse des besoins des gestionnaires de la maintenance de la voie en informations quantitatives concernant l'état géométrique des voies;
- une démarche systématique pour définir les principes à adopter pour la quantification de ces informations;
- une méthode scientifique d'étude de mesures faites en voie dont l'utilisation débouche sur un processus fondé de quantification de l'état géométrique.

L'application de ces méthodes à l'étude du cas d'un réseau tel que celui des CFF a abouti à la réalisation de l'algorithme ANAVOI d'analyse automatique et en temps réel des mesures de l'état géométrique des voies. Cette solution nouvelle, mise au point pour satisfaire à des exigences élevées, a été éprouvée; les analyses faites à l'aide de cet algorithme ont démontré que les résultats escomptés sont obtenus.

2. LE ROLE DES MESURES DE L' ETAT GEOMETRIQUE DANS LA GESTION DE LA MAINTENANCE DES VOIES FERREES

2.1 LA GESTION DE LA MAINTENANCE DES VOIES

La recherche des moyens et méthodes destinés à augmenter les performances de l'analyse des mesures de l'état géométrique doit considérer avec beaucoup d'attention l'opération qui précède cette analyse, c'est-à-dire la collecte des mesures, et l'opération qui la suit, autrement dit l'utilisation des résultats de l'analyse, car ces trois opérations sont étroitement interdépendantes. Sachant de plus que ces trois opérations sont presque toujours réalisées dans le cadre de la gestion de la maintenance des voies, il faut examiner systématiquement cet environnement pour mettre en évidence son influence et être à même d'en tenir compte. C'est pourquoi nous rappelons quelques caractéristiques essentielles de la gestion actuelle de la maintenance de la voie, notamment :

- son *objectif*,
- ses *ressources* ou éléments à disposition,
- ses *composantes* ou opérations,
- ses *mécanismes*.

L'entretien et le renouvellement des voies de chemin de fer vise à maintenir le niveau de qualité du matériel et celui de la géométrie, c'est-à-dire de conserver ce que l'on peut appeler la *substance* du réseau des voies. En effet, les multiples sollicitations auxquelles sont soumises les voies provoquent une perte de substance qui peut, si elle se poursuit, engendrer un déséquilibre financier et compromettre le fonctionnement de l'entreprise. La gestion de la maintenance de la voie consiste alors à prendre les décisions, à les mettre en œuvre, à surveiller et à contrôler leur exécution de sorte que la substance des voies soit conservée, voire améliorée, et que la circulation des trains, dans les conditions de sécurité et de confort fixées par le gouvernement de l'entreprise, soit à chaque instant garantie.

Pour remplir sa mission, le service de la voie a des besoins d'ordre financier et technique dont l'importance augmente avec l'accroissement des sollicitations subies par la voie. La maintenance des voies met en oeuvre dans l'espace et dans le temps des moyens considérables en main-d'oeuvre, en machines et en matériel. Les sommes engagées exercent un poids élevé dans les budgets des réseaux ferroviaires. A titre d'exemple, notons qu'actuellement les dépenses d'entretien et de renouvellement des voies aux CFF absorbent environ 7 % des recettes totales de l'entreprise.

Il s'agit en principe, pour les responsables de la maintenance des voies, de minimiser le coût global de cette maintenance. Si les moyens techniques et financiers sont momentanément insuffisants, il leur faut définir l'utilisation la plus efficace des moyens disponibles. Tel est donc l'objectif de la gestion de la maintenance de la voie.

Pour atteindre cet objectif, les responsables de la gestion de la maintenance de la voie disposent de ressources. Il s'agit principalement d'informations, de moyens et de méthodes.

Les *informations* disponibles pour la gestion diffèrent actuellement d'un réseau à l'autre. D'une manière générale, elles ont trait :

- aux éléments fixés par la politique de maintenance, tels que règlements, directives et consignes de nature technique et économique concernant :
 - la conception de la voie,
 - la maintenance de la voie,
 - l'utilisation des ressources financières et techniques;
- à ce qui peut être désigné par les caractéristiques de la voie :
 - nature et importance des charges supportées,
 - stabilité de l'infrastructure,
 - caractéristiques du tracé en plan et en élévation,
 - nature et âge du matériel,

- genre et date des travaux d'entretien effectués depuis le dernier renouvellement intégral du matériel ou dont la réalisation est prévue,
 - coûts de ces travaux;
- aux moyens disponibles pour effectuer les travaux :
- crédits budgétaires,
 - personnel,
 - machines,
 - matériel;
- et enfin aux multiples contraintes d'exécution.

A ces nombreuses informations, il convient d'ajouter celles des relevés graphiques de l'état géométrique des voies. Cette seule énumération révèle la masse considérable d'informations dont il faut tenir compte.

Or, les *moyens* utilisés pour faciliter le travail des responsables de la gestion sont assez rudimentaires. Pour ainsi dire, toutes les informations sont collectées manuellement, à l'exception des relevés de l'état géométrique qui sont réalisés au moyen d'équipements montés sur des drailles ou voitures de mesure. L'ensemble des traitements d'informations, des stockages et des remises à jour est opéré à la main.

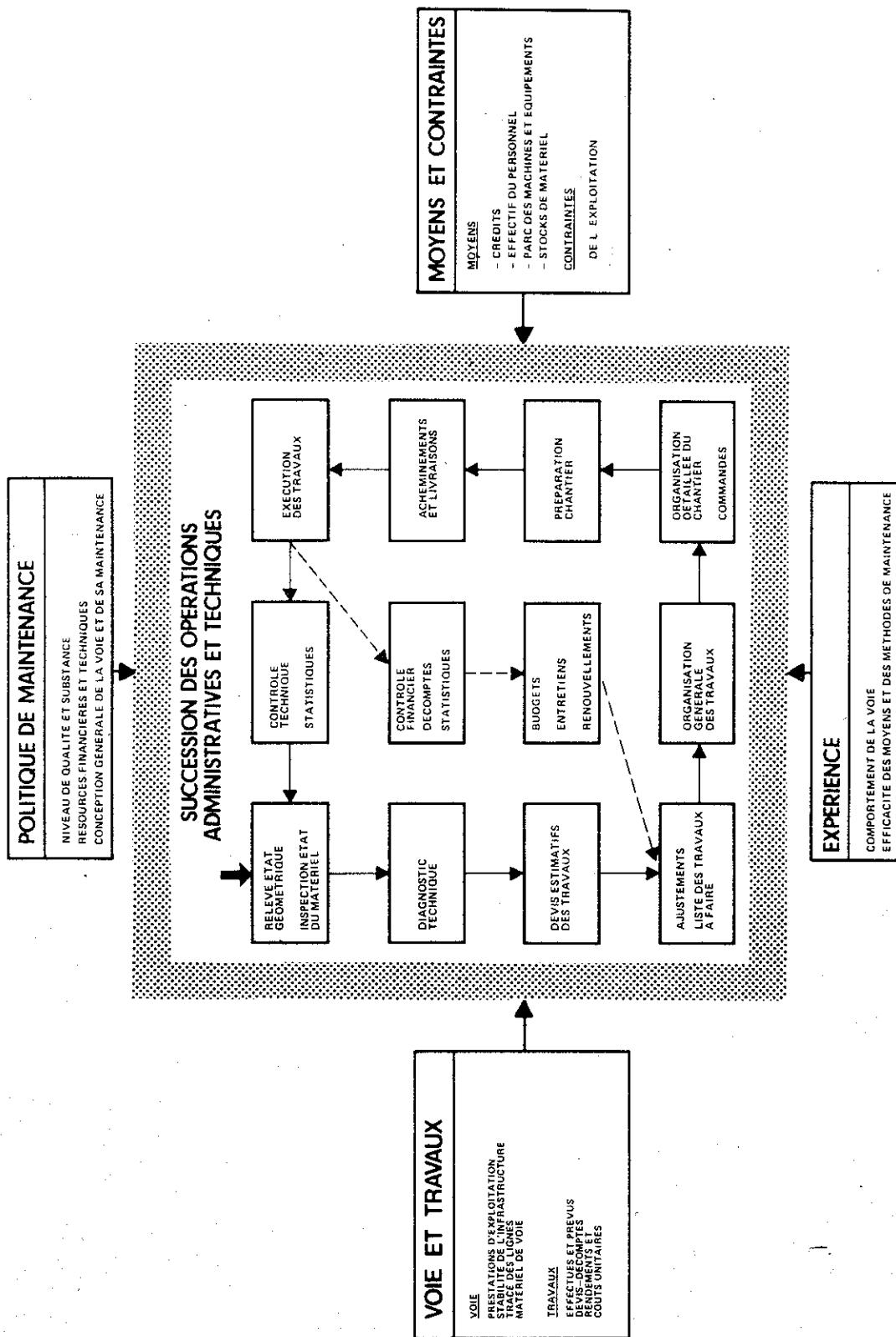
Les *méthodes* de travail sont par contre relativement efficaces, si l'on tient compte des moyens à disposition. Ces méthodes ont été progressivement développées et affinées grâce aux connaissances empiriques accumulées par les responsables qui disposent parfois d'un très grand savoir-faire.

Les moyens et les méthodes en vigueur ressortissent, pour la plupart, au phénomène héréditaire et leur précarité devient évidente face aux exigences d'optimisation formulées par les objectifs. Des ressources nouvelles issues de l'évolution technologique doivent à l'avenir être exploitées. Nous pensons plus particulièrement aux méthodes avancées de management qui font largement usage de l'informatique.

Les composantes de la gestion de la maintenance de la voie sont les opérations techniques et administratives ayant chacune leur objectif propre et qui, par la combinaison de leurs effets, concourent à atteindre l'objectif global. Rappelons quelles sont les principales opérations réalisées chaque année (Figure 1) :

- la collecte d'informations relatives à l'état actuel des voies par la mesure de l'état géométrique, l'auscultation et l'inspection du matériel; l'analyse des informations ainsi collectées;
- l'élaboration du diagnostic pour chaque tronçon de voie permettant de déterminer les besoins de maintenance, c'est-à-dire la nature et la priorité des travaux qui devraient être faits, compte tenu des objectifs à atteindre;
- la confrontation des besoins de maintenance avec la disponibilité des moyens financiers, techniques et en personnel fournit les programmes de maintenance;
- la préparation du planning complet et détaillé de l'ensemble des travaux;
- l'organisation et la préparation du travail de chaque chantier, l'exécution et le contrôle;
- l'analyse des informations techniques et économiques récoltées pendant la campagne annuelle des travaux afin d'établir les décomptes, ainsi que toute une série de statistiques détaillées concernant les coûts, les rendements, la qualité, en vue d'apprecier l'efficacité des moyens et méthodes utilisés.

Fig. 1 — Gestion de la maintenance des voies.



Ce cycle annuel très simplifié constitue une boucle fermée qui, tel un système cybernétique, doit réagir lorsque l'objectif n'est pas atteint en opérant des corrections et en définissant ses actions futures sur la base notamment des résultats d'actions passées. Les mécanismes de la gestion consistent alors essentiellement en des flux d'informations entre les composantes. Mais comme celles-ci sont réalisées aux nombreux niveaux d'une structure d'organisation administrative très hiérarchisée, les contrôles et les actions correctives se multiplient. Ces mécanismes doivent être allégés et simplifiés. Ils doivent aussi être perfectionnés pour éviter les décisions subjectives, leur mise en œuvre insuffisamment précise et les contrôles incomplets. Cela confirme le rôle essentiel des *valeurs des variables d'état* relatives à la voie, aux finances, au stock de matériel, au parc de machines pour les travaux de maintenance, au personnel, etc..., valeurs permettant de déterminer les écarts par rapport à l'objectif et de définir les meilleures possibilités de les combler.

Ces constatations concernant l'environnement des opérations de collecte, d'analyse et d'utilisation des résultats de l'analyse des mesures de l'état géométrique nous amèneront à formuler des propositions visant à tirer profit de ressources inexploitées. Pour l'instant, relevons que ces opérations figurent au premier plan dans la succession des opérations de la gestion. Elles s'inscrivent notamment dans le cadre de la préparation et de la prise de décisions menant aux programmes d'action. Il y a donc lieu de rappeler quelles sont les actions possibles de la maintenance de la voie, les travaux.

2.2 LES TRAVAUX DE MAINTENANCE DES VOIES

L'état d'une voie est défini par celui de son *matériel* et par celui de sa *géométrie*. Dans le processus complexe de détérioration et de renaturation de la voie, ces deux groupes d'éléments sont étroitement liés : le mauvais état de l'un contribue à la dégradation de l'autre et inverse

le matériel est en mauvais état, la géométrie ne peut pas être rectifiée efficacement. Ainsi, les opérations de maintenance doivent être adaptées à l'âge de la voie. C'est pourquoi on distingue ce qui peut être désigné comme la période de *jeunesse*, la période de *veillesse* et la période de *vie intermédiaire*. La durée de chacune de ces périodes et la durée de vie d'une voie varient sensiblement en fonction des caractéristiques de cette voie. Parmi celles-ci, le nombre et l'importance des travaux de maintenance jouent un rôle essentiel. Ces travaux peuvent être définis en fonction de leurs objectifs, selon qu'il s'agit de *maintenance préventive, corrective ou substitutive*.

En effet, dans la pratique courante, les interventions de maintenance ont, de manière prépondérante, l'un de ces trois objectifs : la prévention pendant la période de jeunesse, la correction pendant la période de vie intermédiaire et la substitution pendant la période de vieillesse.

La maintenance préventive vise à empêcher que ne se produisent préma-turément certaines déformations ou dégradations permanentes des éléments de la voie (usure, fatigue, ...). Elle est programmée avant tout en fonction de critères d'économie.

La maintenance corrective consiste à restaurer l'état de la voie et à le ramener dans les tolérances prescrites. Il s'agit principalement d'actions sur la géométrie pour en corriger les défauts. Par ailleurs, certains défauts du matériel sont également corrigés. L'objectif est de remettre la voie en bon état pour ralentir le processus de détérioration et pour assurer la sécurité des convois et la protection du ma-tériel.

La maintenance substitutive intervient lorsque la maintenance correcti-ve est techniquement impuissante ou non rentable. Les opérations con-sistent à remplacer partiellement ou intégralement le matériel de voie lorsque la qualité et la quantité de ce dernier ne lui permettent plus

de remplir sa fonction ou exigeraient des dépenses de maintenance corrective trop élevées.

Une définition précise des travaux et des moyens à mettre en œuvre rappellera la consistance des programmes d'action de la maintenance de la voie. Pour des conditions propres à un réseau, la conception générale de la maintenance se traduit par une *gamme de travaux standard* résultant d'innombrables expériences. Les constructeurs de machines pour l'exécution des travaux de voie ont largement contribué à cette standardisation. Une gamme très étendue de machines où l'automatisme intervient de plus en plus permet actuellement de remplacer l'effort humain (système musculaire et même nerveux) pour un grand nombre d'opérations, d'accélérer le travail et d'en améliorer la qualité. C'est grâce à cette *mécanisation* toujours plus poussée des travaux de voie qu'il est possible de faire face, dans bien des cas, à la réduction des intervalles disponibles entre les trains et aux difficultés croissantes de recrutement de la main-d'œuvre.

Ce sont donc principalement les exigences de qualité du travail, de productivité et de rentabilité qui sont à l'origine de cette standardisation des travaux. Ainsi la plupart des travaux comportent des opérations principales hautement mécanisées complétées par quelques opérations secondaires plus ou moins mécanisées ou manuelles. On distingue généralement les types d'interventions de maintenance selon qu'il s'agit d'*entretien* ou de *renouvellement* à caractère partiel ou intégral, discontinu ou continu sur un tronçon de voie relativement long.

Les divers types d'entretiens consistent à agir de manière continue ou discontinue sur la géométrie et/ou sur le matériel avec des moyens plus ou moins importants. Une conception fréquente de la gamme de travaux d'entretien fait une distinction entre le petit entretien (entretien par points à temps) qui est discontinu et l'entretien systématique qui est généralement continu.

Le petit entretien englobe les interventions locales de corrections de défauts accidentels, portant sur la géométrie et/ou le matériel. Ils sont exécutés par des équipes à effectifs réduits disposant parfois d'engins mécaniques légers. Il s'agit de remplacements isolés du matériel, de petites réparations consistant par exemple à bourrer quelques traverses danseuses, etc... Ces travaux sont destinés à corriger les seuls défauts qui ne peuvent subsister jusqu'à la prochaine opération d'entretien systématique. Lorsque ces travaux localisés sont nombreux sur un tronçon ou une ligne, il est plus économique de recourir à des machines travaillant sur de courts tronçons discontinus.

Les travaux d'entretien systématique sont souvent fortement mécanisés et programmés à l'avance. Ils comprennent des opérations d'entretien effectuées systématiquement de façon continue (parfois discontinue) sur des tronçons relativement longs.

Il y a lieu de distinguer :

- l'entretien systématique (dit complémentaire) effectué dans l'année qui suit un renouvellement intégral, un renouvellement du ballast, des traverses (plancher de la voie) ou parfois des rails seuls; il est destiné à rectifier la géométrie et à homogénéiser l'assiette de la voie. C'est avant tout un entretien préventif;
- l'entretien systématique intégral comprend tous les travaux nécessaires à la remise en état complète de la voie; il agit principalement sur la géométrie et, selon les cas, sur le matériel, avec un degré de mécanisation variable selon les opérations;
- l'entretien systématique partiel agit sur certains éléments de la géométrie et/ou du matériel; il s'agit entre autres de la régularisation de l'écartement, du serrage des attaches, de la neutralisation des contraintes dans les longs rails soudés, du meulage des rails pour supprimer l'usure ondulatoire, du rechargeement par soudure des abuts de rails*, du bourrage des joints*, etc.

* Ces opérations sont effectuées systématiquement de façon discontinue.

Cette gamme des travaux d'entretien peut donc, dans certains cas, comprendre des remplacements isolés de matériel. La pratique des remplacements isolés est toutefois progressivement abandonnée au profit des renouvellements effectués sur des tronçons relativement longs :

- les renouvellements partiels qui consistent à remplacer les rails, les traverses ou le ballast ou deux de ces trois éléments;
- le renouvellement intégral de tout le matériel de voie.

Ces travaux de renouvellement du matériel sont, pour la plupart, complétés par une remise en état du tracé par nivellation, dressage et bourrage de la voie.

A l'exception du petit entretien manuel qui, de par sa nature, peut être improvisé, tous les autres travaux doivent faire l'objet de prévision à court, moyen ou long terme en raison de contraintes budgétaires et d'organisation. Ces contraintes étant les plus fortes pour les renouvellements, ceux-ci sont planifiés plusieurs années à l'avance. Les entretiens, par contre, sont généralement planifiés à court et à moyen terme.

Les responsables qui ont la charge de cette planification des travaux se trouvent confrontés à l'un des problèmes les plus délicats de la gestion de la maintenance de la voie : la détermination de la nature et de la priorité des travaux, compte tenu des objectifs à atteindre et des moyens disponibles.

Ces programmes de maintenance de la voie sont élaborés à partir d'un ensemble de constatations et d'interprétations d'états de faits, d'actions dictées par l'expérience et par le jugement des résultats constatés dans la voie elle-même.

Parmi ces informations, celles qui caractérisent l'état géométrique des voies revêtent une importance capitale. Analysons donc le rôle

de ces informations dans les différentes opérations de la gestion de la maintenance de la voie.

2.3 LE ROLE DES MESURES DE L'ETAT GEOMETRIQUE DES VOIES

Il y a lieu de rappeler tout d'abord que pour disposer d'informations caractérisant l'état géométrique de la voie, il est possible de recourir à différents procédés de mesure. Une distinction peut être faite entre les mesures :

- *manuelles et géodésiques* qui sont discontinues et non automatisées;
- *dynamiques et géométriques* qui sont continues et automatisées.

Leurs rôles respectifs dans la gestion de la maintenance de la voie sont d'importance très inégale.

Les mesures manuelles et géodésiques consistent à relever point par point le long de la voie non chargée les valeurs d'un ou de plusieurs paramètres de la géométrie, à l'aide d'instruments plus ou moins perfectionnés. Ceux-ci présentent, il est vrai, des performances insuffisantes pour livrer rapidement et économiquement les informations nécessaires à la gestion de la maintenance de la voie.

Les mesures dynamiques et géométriques ne présentent pas ces inconvénients car elles peuvent être effectuées automatiquement en continu, sous charge et à vitesse élevée à l'aide d'instruments placés dans des voitures (généralement sur leurs parties non suspendues) circulant sur les voies.

Mais pour pouvoir apprécier l'état géométrique des voies à partir de mesures dynamiques, c'est-à-dire d'efforts et/ou d'accélérations d'éléments du matériel roulant, il est nécessaire de bien connaître les phénomènes d'interaction entre le matériel roulant et la voie. En réalité, ces phénomènes sont extrêmement complexes et s'ils ont fait l'ob-

jet de nombreuses études, celles-ci étaient avant tout destinées à orienter la conception des véhicules ou de leurs éléments et parfois celle de la voie en vue notamment de réaliser des grandes vitesses. Les résultats obtenus intéressent donc avant tout les constructeurs et dans une faible mesure les responsables de la maintenance de la voie. De même, une confrontation des valeurs définissant l'état géométrique et celles qui caractérisent le comportement d'un véhicule particulier circulant à vitesse variable sur des voies de caractéristiques diverses peut servir à orienter les actions concernant la maintenance de la voie. Une telle confrontation ne fournit toutefois que des résultats fragmentaires dont l'utilisation, pour définir les éléments d'une politique de maintenance, est très délicate.

C'est pourquoi presque tous les réseaux de chemin de fer recourent aux mesures géométriques qui fournissent une image graphique de l'état géométrique de la voie par l'enregistrement continu des paramètres appelés gauche, écartement, dévers ainsi que courbure et nivellation de chaque file de rail. Le rôle de ces mesures peut varier d'un réseau à l'autre en fonction des tolérances fixées pour l'état géométrique. Celles-ci, définies par la politique de maintenance, sont plus ou moins sévères selon la conception des relations entre le matériel roulant et la voie.

Aux *Etats-Unis*, par exemple, la voie est constituée par des rails très lourds qui reposent quasi librement sur un ensemble traverse-ballast, les attaches n'ayant pour fonction essentielle que d'éviter le déplacement latéral des rails. Les véhicules qui circulent sur ces voies sont lourds, ils ont des bogies capables d'absorber les défauts géométriques relativement importants. Une telle conception de la voie comporte de gros investissements en matériel pour les véhicules et pour la voie, mais la géométrie peut être maintenue dans des tolérances assez larges. Bien qu'indispensables, les contrôles de la géométrie de la voie peuvent être plus espacés et plus sommaires.

En revanche, au Japon, en Europe et en particulier en Suisse, la voie est formée de rails et de traverses étroitement solidaires, le tout reposant dans un lit de ballast. Les véhicules et les rails sont plus légers, ce qui limite les dépenses d'investissement et d'énergie de traction. Mais le tracé géométrique doit dans ce cas satisfaire à des tolérances beaucoup plus sévères afin de garantir la sécurité des circulations et de ménager le matériel roulant et le matériel de voie. Les contrôles de la géométrie doivent donc être plus fréquents et plus étendus.

Précisons que dans ce qui suit, il sera avant tout question des mesures géométriques en liaison avec les problèmes soulevés par la maintenance des voies européennes ou japonaises, pour lesquelles les exigences de qualité du tracé sont les plus grandes.

Ces mesures sont alors principalement destinées à l'établissement des diagnostics concernant l'état des voies, à la préparation des programmes de travaux à court, moyen et long terme, ainsi qu'aux contrôles de réception de ces travaux. *La périodicité des mesures* diffère généralement suivant les catégories de lignes. Celles-ci sont définies selon la nature et l'importance des charges roulantes, des vitesses, du trafic (voyageur ou marchandise), des sinuosités, etc... Elle est par exemple de dix jours sur des lignes à forte densité et parcourues à très grande vitesse comme la ligne du Tokaido-Sanyo au Japon.

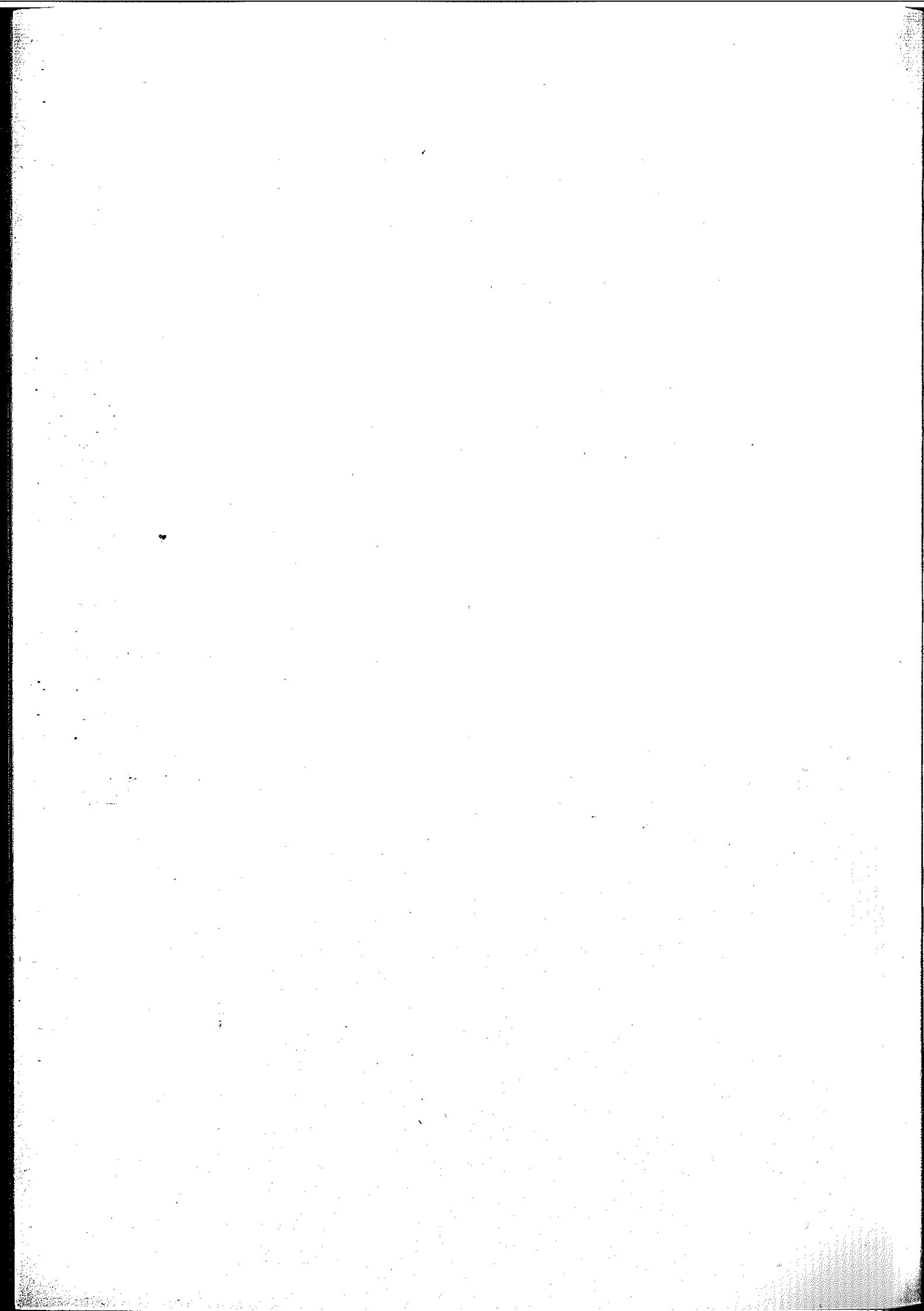
C'est toutefois un cas extrême. Cette périodicité oscille généralement entre trois mois et deux ans sur les autres réseaux. Les enregistrements graphiques ainsi obtenus sont exploités la plupart du temps visuellement pour apprécier aussi bien l'état général que le détail de la géométrie d'une voie, pour tenter de trouver les causes de déformations et des défectuosités et encore pour définir les travaux à opérer, la nature exacte des opérations à effectuer, leurs priorités dans le temps et dans l'espace. Précisons le rôle des informations sur l'état géométrique de la voie dans le processus de décision d'un *entretien* puis dans celui d'un *renouvellement*.

Dans un passé récent, les travaux d'entretien étaient programmés sur des tronçons continus selon des cycles rigides prévoyant l'exécution systématique de l'ensemble des opérations d'entretien. Il s'avère beaucoup plus économique de réaliser des programmes d'entretien englobant les seules opérations nécessaires et indispensables. Cette évolution n'est possible que si les mesures de l'état géométrique sont fréquentes, si leur dépouillement et leur analyse sont faits avec grand soin et s'il existe des tolérances concernant l'état des voies des différentes catégories de lignes. Dans ces conditions, le diagnostic, fixant la nature et l'urgence des travaux d'entretien qui devraient être faits, est élaboré en analysant l'évolution de l'état géométrique de chaque tronçon à partir des enregistrements graphiques successifs et en confrontant les résultats ainsi obtenus avec des tolérances tout en tenant compte des caractéristiques de la voie.

L'opportunité d'effectuer un renouvellement de matériel peut être définie par des raisons techniques telles que l'état de dégradation trop accusé du matériel qui ne permet plus d'assurer le confort et la sécurité des circulations. Elle peut aussi être définie par des raisons économiques selon les principes d'économie générale du matériel ou les disponibilités financières de l'entreprise. Mais l'évolution de l'état géométrique de la voie, l'efficacité des travaux d'entretien, la progression de leur rythme et des frais qu'ils occasionnent sont également des éléments de poids intervenant dans une décision de renouvellement.

Ainsi les mesures de l'état géométrique de la voie jouent un rôle primordial. En résumé, disons que l'homme de la voie s'y réfère en permanence en vue de remplir sa fonction de surveillance et de contrôle, pour élaborer ses diagnostics, définir les tronçons de voie nécessitant des travaux, pour fixer leurs urgences, la nature du travail à faire, contrôler la qualité des travaux effectués, pour juger de l'efficacité des moyens et des méthodes mis en œuvre et pour étudier le comportement de la voie et de certains de ses éléments dans le temps en fonction des caractéristiques de tracé, des charges, de la stabilité de l'infrastructure, etc...

C'est donc à ces mesures que l'on recourt pour obtenir les informations indispensables à de très nombreuses opérations de la gestion de la maintenance de la voie. Il s'agit maintenant d'examiner comment sont mesurés les différents paramètres de la géométrie et d'analyser les caractéristiques des informations ainsi obtenues.



3. LA MESURE DE L' ETAT GEOMETRIQUE DES VOIES

3.1 PRINCIPES GENERAUX

Les deux files de rail d'une voie se présentent comme deux courbes tridimensionnelles qui peuvent, théoriquement, être définies dans un référentiel fixe par les coordonnées de leurs points. La mesure précise et continue de ces coordonnées, si elle était économiquement réalisable, serait d'un intérêt considérable pour la recherche, mais ne serait pas actuellement utilisable telle quelle pour la maintenance de la voie. En effet, ce qui intéresse directement les services d'entretien, c'est de détecter et de mesurer toutes les anomalies de la géométrie générale et de détail de la voie, des surfaces de contact rail-roue.

Ce sont donc les *tables de roulement* et les *joues intérieures des deux files de rail* qu'il faut mesurer. De plus, ces mesures doivent être faites *sous charge*, afin de capter aussi bien les déformations permanentes que les déformations élastiques qui se produisent au passage des trains et qui en définissent la trajectoire. Des informations précises et complètes collectées dans ces conditions permettent alors de déterminer avec rigueur quels sont les travaux à envisager, les valeurs des corrections à apporter au tracé en plan et en élévation de la voie, leur nature et à en contrôler l'exécution.

C'est pourquoi, il y a environ un siècle, les premiers constructeurs d'équipements permettant de mesurer en continu des caractéristiques géométriques de la voie se sont inspirés des méthodes manuelles de correction en usage dans la pratique courante de l'entretien et reposant sur l'emploi de règles d'écartement, de niveaux d'eau, de cordeaux et de réglettes, de nivelettes, etc.

Mais au fur et à mesure que la vitesse et la densité des trains augmentaient, les administrations de chemins de fer devaient adapter leurs équipements pour mettre en évidence les défauts les plus nocifs, pour

mieux définir le comportement de la voie et de ses éléments constitutifs sous l'effet des sollicitations dues aux charges roulantes, pour évaluer avec plus de précision la qualité des moyens et des méthodes de maintenance. De nombreuses recherches ont été effectuées, aussi bien en ce qui concerne les *principes de mesure* que les *appareillages* utilisés pour réaliser ces mesures. L'ouvrage remarquable de Fr. Dubois [2] en témoigne.

Ce souci permanent des ingénieurs de mieux appréhender l'état géométrique des voies a donné lieu, depuis une cinquantaine d'années, à une prolifération de *systèmes de mesure*. Ceux-ci sont toujours plus performants et permettent de relever avec plus de précision des caractéristiques plus nombreuses de l'état géométrique des voies. Actuellement, les appareillages de mesure sont montés sur des *draisines*, *autorails* ou *voitures*. Ils sont utilisés sur la grande majorité des réseaux du monde pour relever en continu et sous charge les valeurs analogiques des paramètres de la géométrie.

Un exposé des caractéristiques des appareillages développés depuis une cinquantaine d'années sort évidemment du cadre de ce travail. Dégageons toutefois l'essentiel des *principes des systèmes de mesure* actuels (systèmes analysés aux § 2.3 et 2.4), ainsi que des *appareillages* utilisés.

Ces *principes de mesure* sont souvent restés similaires depuis un demi-siècle. La géométrie en plan des joues intérieures des deux files de rails et la géométrie en élévation des tables de roulement sont obtenues par des mesures de flèches (ou de distances) ou des mesures d'angles, soit à partir de bases relatives ou flottantes telles que cordes de longueurs fixes, soit à partir de bases dites absolues données par des pendules, des gyroscopes ou des éléments fixes du véhicule.

L'avantage de systèmes utilisant des bases dites absolues est de restituer sans distorsion (autre que celle due à l'imperfection de l'appareillage), aussi bien en amplitude qu'en longueur d'onde, un défaut d'un pa-

ramètre géométrique. La fonction de transfert d'un tel système, c'est-à-dire la fonction qui définit analytiquement le passage de l'équation de la caractéristique géométrique (valeur d'entrée exprimée à partir d'un référentiel fixe) à celle du signal enregistré (valeur de sortie) a pour valeur un. Cela explique les efforts qui sont faits pour tenter d'éviter le recours aux bases flottantes en utilisant, par exemple, la direction du nord magnétique pour mesurer la géométrie en plan, ou des bases absolues artificiellement créées par des systèmes gyroscopiques complexes pour mesurer le profil en long de la table de roulement de chaque rail. Mais ces systèmes de mesure exigent des appareillages onéreux qui de plus sont imprécis en raison de leur nature même.

Les appareillages utilisés consistent en des *chaînes d'équipements* placés entre le rail et le papier d'enregistrement. Les *organes de mesure* sont pour la plupart reliés à des palpeurs en contact avec les rails; il s'agit des roues du véhicule, de roulettes ou de patins dont les mouvements sont transmis mécaniquement ou électriquement, les valeurs mesurées sont enregistrées graphiquement sur une table "traçante". La précision des enregistrements dépend de la conception même de chaque élément de la chaîne. Il faut diminuer la masse des organes mécaniques de captage afin de limiter les erreurs dues aux effets dynamiques, réduire la résistance des transmissions et rendre celles-ci insensibles aux variations de température. Le recours aux capteurs sans contact avec le rail afin de se libérer des effets de l'inertie pose encore des problèmes de précision et de fiabilité. Une transmission fidèle des valeurs mesurées peut actuellement être assurée par voie électrique; les chaînes de mesure modernes garantissent une *reproductibilité* suffisante des enregistrements graphiques pour qu'ils puissent être parfaitement superposables. La *précision* dépend évidemment des appareillages, de leur disposition, de la nature des défauts de la voie et de la vitesse pratiquée pendant les mesures. On considère généralement que pour des vitesses voisines de 100 km/h, la précision des mesures peut être de l'ordre de $\pm 0,5$ mm.

Partant de ces considérations générales, il s'agit d'examiner dans ce qui suit la structure des systèmes de mesure couramment utilisés et surtout l'aspect et les caractéristiques des graphiques qu'ils fournissent, car ceux-ci servent à juger de l'état géométrique d'une voie et même de celui de certains de ses éléments constitutifs.

3.2 LES MESURES PRENANT APPUI SUR LES JOUES INTERIEURES DES RAILS

La géométrie en plan d'une voie est donnée par celle des joues intérieures des deux files de rails. Pour la caractériser, on mesure généralement l'*écartement* de la voie et la *courbure* de chaque file de rail.

La mesure de l'écartement est effectuée par *deux palpeurs* plaqués contre les joues intérieures des rails à une hauteur constante par rapport à la surface définie par les deux tables de roulement. L'enregistrement graphique indique les *écart*s par rapport à une valeur constante qui est généralement la valeur théorique de l'écartement en alignement (par exemple 1435 mm pour la voie normale).

Il s'agit donc d'une mesure à partir d'une base absolue si l'on considère l'ensemble constitué par les deux files de rail. La *fonction de transfert* du système est constante et égale à un. L'interprétation de l'enregistrement graphique est donc simple; chaque défaut d'écartement est restitué en amplitude et en longueur d'onde.

Par contre, la position de chaque file de rail par rapport à un référentiel fixe n'est pas définie par la mesure de l'écartement. Un défaut d'écartement peut être dû à la position incorrecte d'une file de rail ou bien des deux files de rails sans qu'il soit possible de le déterminer. En ayant recours aux enregistrements de la courbure de chaque file de rail, il est parfois possible d'apprécier l'origine de certaines variations d'écartement. Relevons encore qu'un défaut d'écartement peut provenir de la dislocation des attaches ou bien, en courbe,

de l'usure du rail de la file extérieure ou encore de l'écrasement de la table de roulement du rail de la file intérieure ou de toute combinaison de ces défauts du matériel. Pour distinguer ces défauts, il faudrait compléter la mesure de l'écartement par celle de l'*usure latérale des champignons* du rail. Cette mesure est malheureusement très délicate à opérer car il faudrait recourir à des palpeurs sortant du gabarit des parties basses des véhicules.

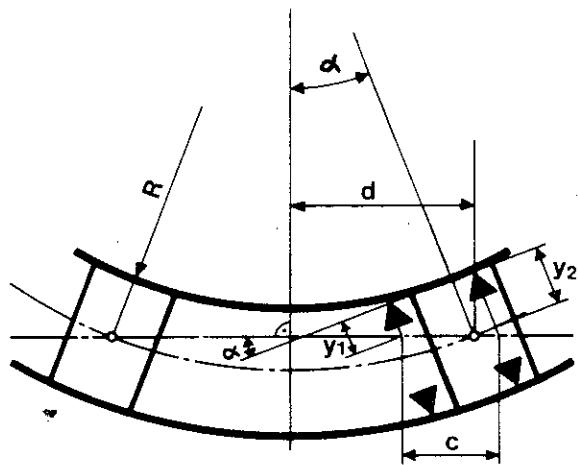
L'importance que les réseaux attachent au maintien de l'écartement est très variable. Toutefois, le respect de tolérances strictes semble être générateur d'économie en évitant des usures prématuées et des détériorations trop rapides du matériel. Quoi qu'il en soit, l'enregistrement graphique répété de l'écartement livre des enseignements concernant l'évolution de l'état du matériel et en particulier des éclissages, des attaches et des traverses. Son rôle dans l'élaboration des décisions de maintenance est donc important.

Les exigences relatives à la précision du tracé en plan de la voie sont de plus en plus sévères en raison de l'accroissement des vitesses et en raison du souci de freiner le processus de détérioration de la voie, afin d'espacer les interventions d'entretien. Le contrôle de ce tracé est donc primordial. Il existe de nombreux systèmes de mesure continue soit du rayon R, soit de la courbure $\frac{1}{R}$ (ou de grandeurs qui leur sont proportionnelles) de la joue intérieure de chaque file de rail. Deux systèmes à bases flottantes sont le plus fréquemment utilisés. Le premier est dû à A.J. Amsler [2], le deuxième est appelé *système à trois points* ou *système de mesure de flèches*.

Le système Amsler définit la courbure à partir de la mesure d'un angle α entre une corde et la tangente au rail à l'une des extrémités de cette corde (figure 2.1). La tangente au rail est déterminée par la droite joignant deux palpeurs nécessairement très proches (environ 2 m) plaqués

Fig. 2 — Mesure de la courbure — système Amsler

2.1 — Principe de mesure

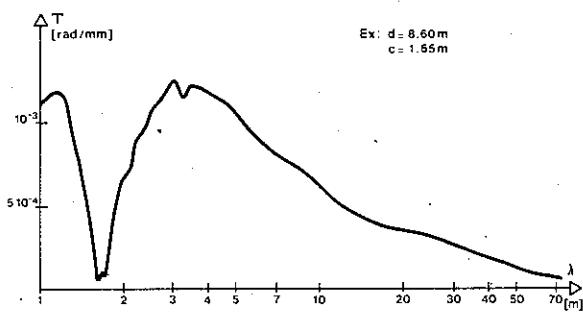


$$\frac{1}{R} = \frac{y_2 - y_1}{c \cdot d}$$

2.2 — Défaut de la voie Enregistrement graphique



2.3 — Fonction de transfert (source Matisa)

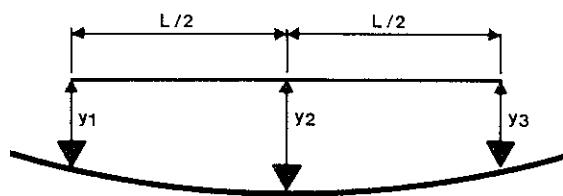


contre le rail, l'un des palpeurs est celui qui sert à la mesure de l'écartement; la corde est l'axe longitudinal du véhicule défini par la droite joignant les axes des pivots des bogies. La figure 2.2 donne l'image graphique d'un défaut isolé. La proximité des palpeurs a pour conséquence de rendre les mesures extrêmement sensibles aux moindres irrégularités du rail et aux effets dynamiques qu'elles provoquent aux vitesses de mesure élevées. L'enregistrement graphique ainsi obtenu est difficile à exploiter par les services d'entretien qui ont généralement recours sur la voie à des mesures de flèches au milieu d'une corde de longueur fixe.

Le système à trois points consiste en trois palpeurs souvent équidistants appliqués contre la joue intérieure du rail; une combinaison de leurs déplacements dans un plan horizontal permet de mesurer la flèche f (proportionnelle à $\frac{1}{R}$) sur une corde de longueur fixe (figure 3.1). La figure 3.2 montre l'image de défauts isolés sur l'enregistrement graphique.

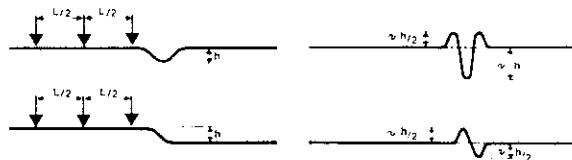
Fig. 3 – Mesure de la courbure – système à trois points

3.1 – Principe de mesure (flèche f)

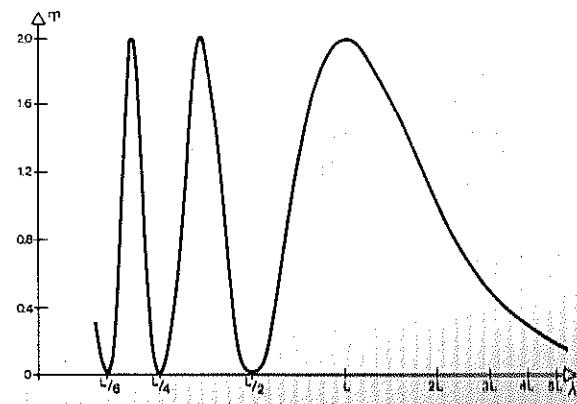


$$f = y_2 - \frac{y_1 + y_3}{2}$$

3.2 – Défaut de la voie Enregistrement graphique



3.3 – Fonction de transfert



La longueur L de la base flottante varie selon les équipements; elle est toutefois limitée par la longueur du véhicule de mesure et ne peut guère dépasser une quinzaine de mètres. La fonction de transfert de ce système (figure 3.3) varie entre 0 et 2, en prenant plusieurs fois ces valeurs dans l'intervalle des longueurs d'onde rencontrées le plus souvent en voie. Un autre inconvénient d'une telle fonction de transfert est que sa valeur devient très faible pour les défauts de longueur d'onde supérieure à $2L$. Il s'ensuit que les défauts de courbure de grande longueur d'onde sont très mal restitués. Or, aux grandes vitesses, les défauts de longueur d'onde comprises entre 30 et 60 m ont une influence importante sur le comportement des véhicules et il importe de les détecter et de les mesurer. De nombreuses recherches ont été faites pour mettre en évidence ces défauts par traitement analogique [3] ou digital (combinaison de valeurs de flèches) [4, 5, 6] des mesures. Ces traitements ont pour effet de modifier la fonction de transfert et d'augmenter sa valeur dans l'intervalle des grandes longueurs d'onde, d'où leur très grand intérêt.

L'image graphique formée par la mesure de la courbure présente donc certaines lacunes; elle n'est pas indépendante de celle fournie par la mesure de l'écartement. Malgré ces lacunes et redondances, elle est d'un grand intérêt et permet les contrôles indispensables au maintien du tracé en plan de la voie.

3.3 LES MESURES PRENANT APPUI SUR LES TABLES DE ROULEMENT DES RAILS

En élévation, la géométrie de la voie est donnée par celle des tables de roulement des rails. Les mesures faites sont le *dévers*, le *gauche* de la voie et le *nivellement longitudinal* de chaque file de rail.

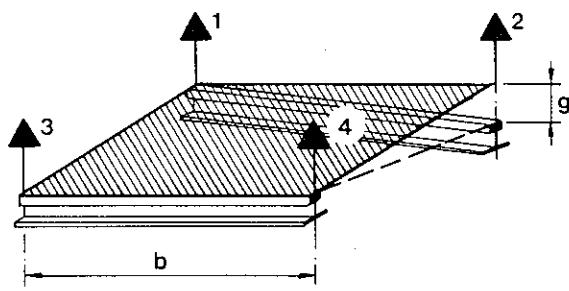
La mesure du *dévers*, ou différence de niveau entre les deux tables de roulement, est généralement effectuée à partir d'une référence absolue donnée par un *pendule gyroscopique* solidaire de la caisse et compensé des influences perturbatrices de la force centrifuge, des chocs transversaux ou longitudinaux, ainsi que du roulis. Par la position centrale qu'occupe généralement le pendule gyroscopique dans la voiture de mesure et en raison des effets des systèmes d'amortissements, on obtient un enregistrement graphique très clair mettant en évidence les défauts importants. L'interprétation du graphique du dévers en termes de défauts de la géométrie mesurée à partir des tables de roulement est analogue à celle de l'écartement pour les joues intérieures des rails.

La mesure continue du dévers est importante sur les réseaux sinueux car elle permet de contrôler les rampes de dévers dans les courbes de raccordement et la valeur absolue du dévers dans les pleines courbes, notamment lorsque la géométrie est modifiée à la suite d'un changement de normes. Toutefois, la variation du dévers joue un rôle tel que la mesure du gauche s'est petit à petit imposée.

Le *gauche* peut être obtenu en différenciant la valeur du dévers en fonction de la distance parcourue, mais il est généralement mesuré directement à partir d'un ensemble formé par les *quatre points* de contact des

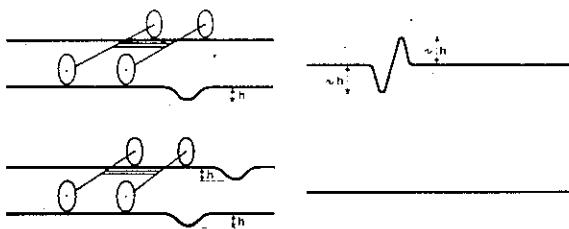
Fig. 4 – Mesure du gauche – système à quatre points

4.1 – Principe de mesure (gauche g)



$$g = \left[\frac{(1) + (4)}{2} \right] - \left[\frac{(2) + (3)}{2} \right]$$

4.2 – Défaut de la voie Enregistrement graphique



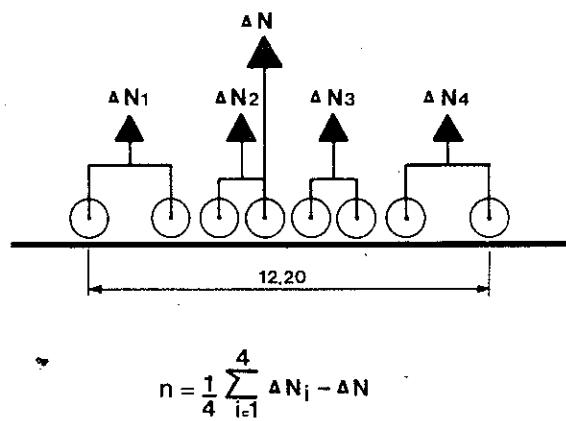
roues de deux essieux du véhicule.

Trois points sont situés dans un plan; la mesure continue du gauche est celle de la distance entre ce plan et le quatrième point de l'ensemble (figure 4.1). Le gauche est généralement exprimé en mm/m ou en ‰. Il fait intervenir la distance b séparant les deux essieux (ou base de mesure flottante). Cette distance varie selon les équipements; elle est le plus souvent voisine de l'empattement des bogies du matériel roulant. Pour interpréter l'enregistrement graphique, il y a donc lieu de prendre en considération l'espace-ment des essieux de mesure (figure 4.2).

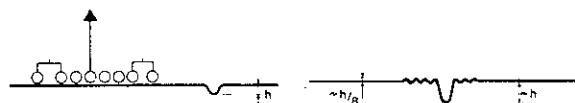
Le gauche est considéré par les services d'entretien comme le paramètre de l'état géométrique exigeant le plus d'attention. Il est soumis à des tolérances très sévères et sa mesure est essentielle pour contrôler périodiquement que sa valeur absolue ne dépasse pas les tolérances prescrites en raison de son incidence sur la sécurité et le confort (déraillements dus notamment à l'escalade de roues de wagons à petit empattement chargés de façon dissymétrique). Ces con-

Fig. 5 – Mesure du nivelllement – système Mauzin (SNCF)

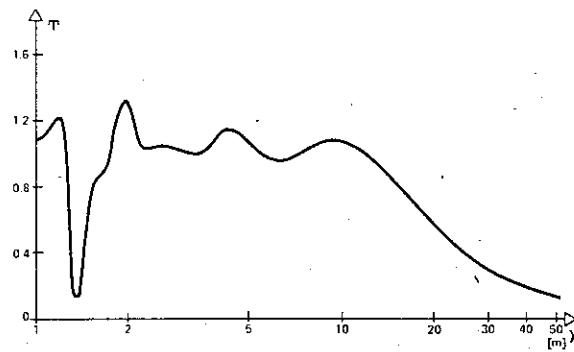
5.1 – Principe de mesure (nivelllement n)



5.2 – Défaut de la voie Enregistrement graphique



5.3 – Fonction de transfert (source: [3])



trôles sont particulièrement importants dans les courbes de raccordement qui comportent déjà un gauche de construction dû aux rampes de dévers car, dans ce cas, il y a cumul entre le gauche dû aux rampes et les déformations.

La géométrie de la voie en élévation, mesurée à partir de la table de roulement de chaque file de rail, est appelée nivelllement longitudinal. Un système de mesure fréquemment utilisé est celui de *Mauzin*. Il définit le nivelllement par la différence entre le niveau d'une roue centrale et la moyenne des niveaux de toutes les roues du véhicule (figure 5.1). Cette mesure présente l'avantage de restituer presque toujours en vraie grandeur un défaut local sur le graphique.

L'effet des roues autres que la roue centrale de mesure est réduit en fonction directe du nombre de roues à partir duquel est définie la base moyenne (figure 5.2). La *fonction de transfert* de ce système présente l'avantage d'avoir une valeur voisine de 1 pour les longueurs d'onde inférieures à l'empattement du véhicule, mais cette valeur décroît rapidement pour les longueurs d'onde supérieures (figure 5.3).

On lui préfère parfois la mesure de flèche dans le plan vertical à l'aide d'un *système à trois points* appliqué à la table de roulement de chaque file de rail. Ce sont alors trois roues ou roulettes qui servent de palpeurs. Les propriétés de ce système sont absolument identiques à celles de la mesure de flèche utilisée pour la courbure (§ 3.2).

D'autres systèmes font l'objet d'études et d'essais pour détecter et pour mesurer les défauts de grande longueur d'onde en plan ou en élévation à partir de mesures d'*accélérations horizontales ou verticales* en effectuant une double intégration des signaux mesurés. Toutefois, l'élimination des effets d'actions dynamiques parasites dans les mesures est complexe et le principe même de la double intégration et de la prise en compte de la vitesse variable du véhicule pendant les mesures influence nécessairement la précision des résultats. Si ces mesures dynamiques sont indispensables pour l'étude de nombreux phénomènes et en particulier pour le confort, elles ne se prêtent pas facilement à des traitements pour être transformées avec précision en terme de longueur d'onde et d'amplitude de défauts géométriques sur lesquels se basent les services d'entretien de la voie. Ceux-ci préfèrent encore, pour les besoins courants, recourir aux mesures directes des défauts de la géométrie.

C'est donc à l'aide des variations, en fonction de l'espace parcouru, des valeurs de sept paramètres (courbure et nivellation de chaque file de rail, gauche, écartement et dévers) décrivant la géométrie de la joue intérieure et de la table de roulement de chaque file de rail que travaille l'ingénieur de la voie.

La description de ces principaux systèmes de mesure et des informations qu'ils fournissent étant faite, il convient maintenant d'examiner les différentes conceptions de l'analyse automatique des mesures de l'état géométrique.

Annexe D

BIBLIOGRAPHIE

- [1] JAPANESE NATIONAL RAILWAYS : *General description.*
New Tokaido Line, JNR, 1971.
- [2] Francis DUBOIS : *L'inspection automatique des voies de chemins de fer.*
A. Blanchard, Paris, 1965.
- [3] L. GENT et G. JANIN : *La qualité de la voie ferrée, comment la définir quantitativement ?* Revue générale des chemins de fer. Déc. 1969.
- [4] P.J. McCONNELL, R. GREENSPUN : *Two Methods of Determining a Rail's Coordinate from its Midordinate to Cord Measurements.* PRC 69-15.
Melpar Inc., Falls Church, Virginia. Aug. 1969.
- [5] Y. BAN, H. MURAYAMA, Y. SATO : *Quelques problèmes concernant la voie et son entretien pour une exploitation de circulation aux grandes vitesses.* Bulletin de l'Association internationale du congrès des chemins de fer-UIC. Symposium Vienne, 1968.
- [6] P.N. BHASKARAN NAIR : *Systèmes de mesure des caractéristiques géométriques de la voie - Conceptions et technique -* Rail international.
5 mai 1972.
- [7] Jiro ONOGI : *A Study of Railway Track Displacement.* Synopsis of Japan Society of Civil Engineers Prize Papers for 1961.
- [8] O.C. BENSON : *New Track-Maintenance System Paying off on Boston & Maine.* Railway Track and Structures. March 1965.
- [9] William B. O'SULLIVAN : *Boston & Maine Expands Role of Mechanical Track Inspection.* Railway Track and Structures. April 1966.
- [10] *On the Baltimore & Ohio, Computers as a Tool in Programming Track Maintenance.* Railway Track and Structures. March 1965.

- [11] Computers Help B & O Schedule M/W Jobs. Railway Age. March 8, 1965.
- [12] BRITISH RAILWAYS BOARD : *Brevet d'invention; Perfectionnements aux appareils enregistreurs.* Classification Internationale : G 01 d// B 61k. Bulletin officiel de la propriété industrielle no 23 de 1966, Ministère de l'Industrie, France.
- [13] BRITISH RAILWAYS BOARD et Geoffrey Stuart DRURY : *Brevet d'invention : Analyseur de sommets.* Classification internationale G 06 f// B 61k. Priorité : Grande-Bretagne, 23.11.65. Publié le 31 mai 1968 par le Bureau fédéral de la propriété intellectuelle, Suisse.
- [14] D.H. COOMBS : *Computerised Data Processing of Track Geometry Recording.* The Railway Gazette. July 15, 1966.
- [15] MATISA (Lausanne) : *Notice descriptive. Analyseur ADM-5.* 1968.
- [16] MATISA (Lausanne) : *Notice descriptive. Analyseur géométrique de la voie AGV 21.* Programme A1. 1971.
- [17] L.S. CRANE, J.H. SULLIVAN, C.R. KAELIN : *Development and Use of a Track Quality Index.* Transaction of the ASME, Journal of Engineering for Industry. May 1969.
- [18] On the Southern, *Track Inspection - Mechanized - Automated - Computerized.* Railway Track and Structures. March 1971.
- [19] D. GENTON, R.E. RIVIER : *Rapport de voyage d'étude au Japon et aux Etats-Unis.* ITEP - EPFL, 9.4.1973.
- [20] TAMPER (Columbia S.C.) : *Notice descriptive. Tamper Valuator.* 1971.
- [21] PLASSER : *Technische Beschreibung - Gleisanalysiersystem ADA.* 1972.
- [22] MATISA (Lausanne) : *Voiture de contrôle électronique à 5 essieux.* (Système Schenkir). Notice technico-commerciale.

- [23] MATISA (Lausanne) : *Draisine de mesure électronique type SD-10 (Système Schenkir)*. Notice technico-commerciale.
- [24] Jiro ONOGI : *Statistical Control of Track Maintenance*. Japanese Rail-way Engineering. June 1960.
- [25] JAPANESE NATIONAL RAILWAYS : *Maintenance of track, Chap. V, Track-control*. 1960.
- [26] Ichiro NAKAMURA : *Data Handling of High-Speed Track Inspection Car*, Japanese Railway Engineering. Vol. 4, No. 3, Sep. 1963.
- [27] Ikuma HIROI : *Maximum of Track Irregularity*, Permanent Way. Vol. 5, No. 3, Sep. 1962.
- [28] Yoshio BAN : *Control of Track Irregularities in JNR*, Japanese Rail-way Engineering Vol. 4, No. 4, 1963.
- [29] Ichiro NAKAMURA, Kakutaro WADA : *Electronic equipment to Estimate the Standard Deviation of Track Irregularities*, JNR. Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, Vol. 6, No. 3, Sep. 1965.
- [30] Ichiro NAKAMURA, Kakutaro WADA : *Data Handling Machine for the No. 2 Track Inspection Car of the New Tokaido Line*, JNR. Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, Vol. 7, No. 3, 1966.
- [31] Ikuma Hiroi : *High Speed Track Inspection Car*, Japanese Railway Engineer-ing, Vol. 7, No. 4, Dec. 1966.
- [32] PV de la 1ère réunion du groupe de travail chargé de l'étude de la ques-tion 7H6 : "Etude des critères de définition de l'état d'une voie à par-tir de l'analyse des enregistrements graphiques". UIC. Sous-commission "Maintenance". Vienne, 25 et 26 nov. 1964.
- [33] Annexe II au PV de la réunion de la Sous-commission "Maintenance" du 3.2.66 : *Analyse des enregistrements graphiques d'état des voies*; état des recherches de la SNCF au 1er février 1966. UIC 7e Commission.

- [34] Annexe No 4 au PV de la réunion de la Sous-commission Matériel fixe - Maintenance des 9, 10 février 1967 : *Analyse des enregistrements graphiques d'état des voies*; état des recherches de la SNCF au 1.2.1967.
- [35] Annexe no 2 au PV de la réunion de la Sous-commission Matériel fixe - Maintenance des 18 et 19 janvier 1968; *Analyse des enregistrements graphiques d'état des voies*; état des recherches de la SNCF au 1.1.1968.
- [36] L. GENT et G. JANIN : *Analyse statistique des défauts de la voie ferrée, action réciproque entre ces défauts et le comportement des véhicules*. 2e conférence internationale sur la mécanique des véhicules. Paris, 6-9 septembre 1971.
- [37] L. GENT : *Analyse géométrique de la voie par traitement sur ordinateur*. 2e Colloque ORE "Programmes techniques de calculatrices". Derby, 16-18 mai 1972.
- [38] F.J. HURLEY, J.N. GOESER, B.R. KOCH, P.J. Mc CONNELL : *Railroad Research Field Testing Program, First Progress Report*. Melpar Inc., Falls Church, Virginia, Dec. 1968.
- [39] F.J. HURLEY, J.N. GOESER, B.R. KOCH, P.J. Mc CONNELL : *Test Car Program. Second Progress Report*. Melpar Inc., Falls Church, Virginia, Sep. 1970.
- [40] T.P. WOLL : *Automated Track Inspection Information and its Use*. Federal Railroad Administration, Department of Transportation, Washington D.C., Sep. 1970.
- [41] H. DEMUTH, C. GERHARDT, J. MAY, W. TRZASKOMA : *Test Train Program, Third Progress Report*, ENSCO Inc. Springfield, Virginia, June 1971.
- [42] C.L. GERHARDT, J.T. MAY : *DOT Test Train Program, System Instrumentation Manual*, ENSCO Inc., Springfield, Virginia, Jan. 1971.
- [43] ENSCO Inc., Springfield, Virginia : *Description of Computer Reports of Track Geometry Measurement Parameters*, 1972 (Document interne).
- [44] H.G. STASSEN : *Random Lateral Motions of Railway Vehicles*. Travail de thèse sous la direction du Prof. Ir. R.G. Boltens, Delft, Nederland, 6 déc. 1967.

- [45] R. COUSTY et G. TRO : *Etude théorique de l'évolution des défauts de nivellation longitudinal d'une voie ferrée sous l'effet de charges roulantes répétées.* Revue générale des chemins de fer. Mars 1972.
- [46] Communication de l'ORE : *Spectres de densité de puissance de défauts de voie* (Comité C 116). Rail International, Déc. 1972.
- [47] M.A. PRUD'HOMME : *La voie.* Revue générale des chemins de fer. Numéro spécial "Les très grandes vitesses ferroviaires sur infrastructures nouvelles". Janvier 1970.
- [48] T. JUILLERAT, R.E. RIVIER : *L'état géométrique quantifié, information indispensable à un système de gestion intégré de la maintenance des voies ferrées.* Bulletin technique de la Suisse romande no 5, 6 mars 1971.
- [49] F.A. HAIGHT : *Mathematics in Science and Engineering.* Volume 7, Academic Press, New York - London, 1963.
- [50] R.E. RIVIER : *Algorithme d'analyse en temps réel des mesures de l'état géométrique des voies de chemins de fer.* Bulletin technique de la Suisse romande no 16, 5 août 1972.
- [51] B.V. GNEDENKO : *The Theory of Probability.* Chelsea Publishing Company, New York, 1967.
- [52] C. SHANNON and W. WEAVER : *The Mathematical Theory of Communication.* The University of Illinois Press, 1949.
- [53] D. GENTON : *Maintenance de la voie, approches d'une gestion intégrée.* Simpozij o suvremenom zeljezmickom kolosijeku, Zagreb, 1969.
- [54] I. MURAYAMA : *Use of Electronic Techniques in the Supervision of Track Maintenance.* Japanese Railway Engineering, special issue : Cybernetics Vol. 10, No. 4, 1969.