

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin technique de la Suisse romande
<b>Band:</b>	97 (1971)
<b>Heft:</b>	5
<b>Artikel:</b>	L'état géométrique quantifié: information indispensable à un système de gestion intégré de la maintenance des voies ferrées
<b>Autor:</b>	Juillerat, T. / Rivier, R.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-71186">https://doi.org/10.5169/seals-71186</a>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 12.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# L'état géométrique quantifié

## Information indispensable à un système de gestion intégré de la maintenance des voies ferrées

par T. JUILLERAT et R. RIVIER<sup>1</sup>

### 1. Introduction

#### *Le problème*

La détérioration toujours plus rapide des voies de chemins de fer, en raison de l'augmentation de la vitesse, de la densité des trains, de l'agressivité des engins moteurs, est un phénomène bien connu. Les travaux d'entretien et de renouvellement des voies mettent en œuvre dans l'espace et dans le temps des moyens considérables en main-d'œuvre et en équipements. L'objectif doit donc être de maintenir le tracé et la substance des voies tout en limitant les dépenses annuelles.

Les responsables de la maintenance des voies doivent élaborer leurs décisions à partir d'une masse considérable d'informations techniques et économiques. Leur volume et leur nature sont tels qu'il est difficile de prendre des décisions objectives et rapides. En effet, de nombreuses variables dépendantes et indépendantes interviennent dans les phénomènes qu'il s'agit d'analyser. Le recours à l'ordinateur s'impose, afin de traiter rapidement et économiquement cette masse d'informations.

#### *Objectifs des recherches*

Les études entreprises par l'Institut de technique des transports de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne avec l'appui des Chemins de fer fédéraux suisses et de l'industrie visent à définir les moyens et les méthodes à utiliser pour livrer à chaque responsable de la maintenance, quelle qu'en soit la fonction, les éléments nécessaires à ses prises de décisions et à l'évaluation de leurs conséquences.

Il s'agit, connaissant d'une part les caractéristiques de la voie, les sollicitations auxquelles elle est soumise ainsi que son état géométrique et d'autre part les moyens dont le réseau dispose, de définir une politique d'intervention plus élaborée que dans le passé et basée sur une vision d'ensemble. C'est en fait un véritable système de gestion intégré qui devrait être progressivement mis en place, c'est-à-dire un système dans lequel toutes les informations nécessaires à la gestion du service de la voie seraient collectées, mises en forme s'il y a lieu, vérifiées à la source et groupées dans une banque des informations. Elles seraient tenues à jour et traitées par ordinateur à l'aide de programmes appropriés.

Cette transformation du processus d'élaboration des éléments de décision, de l'organisation et du contrôle des activités du service de la voie, faisant appel aux nouveaux moyens de la science et de la technique, provoquera cer-

tainement une profonde réforme des structures qui devra être réalisée avec prudence [6]<sup>2</sup>.

#### *Quantification de l'état géométrique*

L'efficacité d'un système de gestion intégré repose avant tout sur la nature et la qualité des informations d'entrée retenues ainsi que sur l'efficacité des programmes nécessaires à leur traitement. Parmi les nombreuses informations utilisées par le service de la voie, celles de l'état géométrique sont décisives. Ces informations sont captées par des véhicules équipés de systèmes de mesure très différents dans leurs principes et performances [1, 5, 10, 11]. Elles sont actuellement livrées sous forme de graphiques analogiques donnant, en fonction de l'espace parcouru, les valeurs d'un certain nombre de paramètres définissant la géométrie de la voie. Cette information brute ne se prête pas au traitement sur ordinateur.

La quantification de l'état géométrique consiste à transformer cette information au moment de son captage et à l'analyser pour obtenir, non seulement le niveau de qualité global de la géométrie des tronçons de voie, mais aussi les éléments chiffrés suffisamment précis et représentatifs pour que puissent être élaborés automatiquement des programmes permettant de définir les interventions immédiates, à moyenne et à longue échéance.

### 2. Principes généraux d'analyse

#### *Nature et relevé des détériorations de la voie*

L'état géométrique d'une voie est dans la plupart des cas apprécié à partir d'un examen visuel des graphiques qui permet de porter un jugement sur la nature et l'importance des défauts. Ces derniers peuvent être classés en deux grandes catégories : les défauts de matériel et ceux du tracé. L'analyse quantitative de l'état géométrique doit permettre d'obtenir les éléments chiffrés qui les caractérisent de manière distincte. Les défauts de matériel sont généralement des défauts de faible longueur d'onde de la table de roulement et de la joue du rail. Par contre les déformations du tracé ont des longueurs d'onde variables qui peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres.

Pour des raisons techniques, les mesures géométriques sont généralement effectuées à partir de bases flottantes dont la longueur est limitée par celle du véhicule utilisé. Ainsi, les défauts de grande longueur d'onde ne sont pas mis en évidence. Chaque signal enregistré est par ailleurs l'image des défauts du matériel et des défauts de longueur d'onde moyenne du tracé, sans toutefois les distinguer.

Il faut donc, pour pallier ces lacunes, soit concevoir des équipements susceptibles de relever séparément les informations de chaque catégorie de défauts, soit tenter de les isoler par une analyse des signaux relevés à l'aide des équi-

<sup>1</sup> TRISTAN JUILLERAT, Dr ing. phys. ; collaborateur scientifique de l'ITEP jusqu'au 31.12.69.

ROBERT RIVIER, ing. dipl. ; collaborateur scientifique de l'ITEP et ingénieur de recherche aux Chemins de fer fédéraux suisses.

ITEP : Institut de technique des transports de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne ; directeur : Professeur D. Gen-ton.

<sup>2</sup> Les numéros entre crochets renvoient à la bibliographie, en fin d'article.

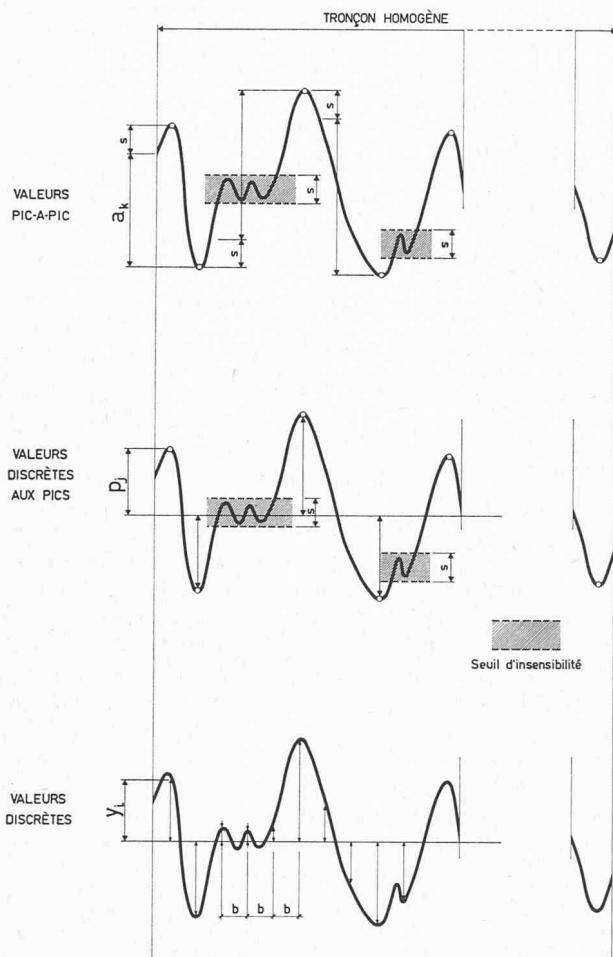


Fig. 1. — Valeurs mesurées des signaux.



Fig. 2. — Analyseur de l'état géométrique des voies.

pements traditionnels. C'est cette dernière voie qui a été retenue en Suisse dans le cadre des études faites pour évaluer les possibilités offertes par l'analyse des signaux traditionnels. Ces derniers sont également analysés aux Etats-Unis et en France dans le cadre des recherches entreprises pour les circulations à grande vitesse [1, 2]. Toutefois, pour une gestion moderne de la maintenance des voies, il semble nécessaire de détecter et mesurer les défauts de grande longueur d'onde du tracé en plan et en élévation de la voie et de mesurer l'état de surface de la table de roulement ainsi que l'usure latérale de la joue interne du rail. Ces exigences impliquent le développement de nouveaux équipements qui pourraient faire appel aux accéléromètres de précision et aux capteurs sans contact récemment développés.

#### Tronçons homogènes

La quantification de l'ensemble des valeurs d'un paramètre de mesure de la géométrie d'un tronçon fournit une série de valeurs qu'il s'agit d'analyser statistiquement pour pouvoir la caractériser par un nombre restreint de grandeurs. Il est donc indispensable, pour que les résultats soient représentatifs, que la série de valeurs se distribue selon une loi de probabilité donnée et qu'elle se rapporte à un tronçon dit homogène.

Un tronçon est homogène si, sur toute sa longueur, les caractéristiques suivantes sont constantes :

- nature de l'infrastructure, de la superstructure et du tracé ;
- importance des sollicitations et genre de travaux d'entretien subis ;
- état de la géométrie : défauts du matériel et déformations du tracé.

Sur un réseau tel que celui des CFF, ces trois types de données varient fréquemment le long d'une ligne en raison du caractère accidenté de la topographie et des interventions multiples. Le nombre des tronçons homogènes est donc très élevé.

#### Cinématique de l'état géométrique

Il est évident qu'un état géométrique quantifié à un instant donné ne suffit pas pour décider des interventions dans le temps et dans l'espace. La connaissance de la cinématique de l'état géométrique, c'est-à-dire de l'évolution dans le temps de la qualité de la voie, est nécessaire au choix du calendrier des interventions qui sera fonction de critères techniques et économiques. Les programmes doivent en outre pouvoir être réajustés en fonction de l'état géométrique afin de tenir compte de l'évolution imprévisible des détériorations dues par exemple à des conditions climatiques extrêmes ou à une modification du régime des sollicitations.

C'est donc sur ces bases que doit être conçue une méthode d'analyse susceptible de livrer l'état géométrique quantifié indispensable à une gestion de la maintenance de la voie.

### 3. Méthodes d'analyse

Plusieurs méthodes et procédés d'analyse automatiques des relevés de l'état géométrique de la voie ont vu le jour au cours de ces dernières années [1, 2, 7, 8, 9, 12]. Ce problème intéresse de nombreuses administrations ferroviaires qui désirent obtenir des informations objectives, chiffrées, indispensables à une politique efficace de maintenance de la voie. La diversité des moyens et méthodes utilisés montre la difficulté de saisir de façon satisfaisante un phénomène aussi complexe et révèle parfois que l'objec-

tif des recherches n'a pas été suffisamment précisé à l'origine.

Face à l'éventail des possibilités et à la difficulté de juger théoriquement de l'efficacité d'une méthode par rapport aux autres, il a fallu recourir à l'expérimentation.

Les paramètres de l'état géométrique présentent l'aspect de signaux à caractère aléatoire. Un moyen de les analyser consiste à les traiter sous forme digitale. A la suite d'une transformation analogue-digitale de chaque signal, l'analyse par tronçon homogène peut se faire à partir de différents ensembles de valeurs. Pour les études, trois ensembles sont envisagés (fig. 1).

Le premier est celui des valeurs dites « pic-à-pic », c'est-à-dire des différences d'amplitudes entre extrema successifs du signal. Un seuil d'insensibilité élimine les effets secondaires des systèmes mécaniques de captage et de transmission des signaux.

Le deuxième est défini par les valeurs des extrema du signal mesurés à partir d'une valeur de référence correspondant à la voie parfaite. Ce sont les valeurs discrètes « aux pics ».

Le troisième est celui des valeurs discrètes. Ce sont les valeurs successives de l'amplitude du signal, par rapport à cette même valeur de référence, mesurées en des points équidistants le long de la voie.

Ces trois types de valeurs des signaux ont été analysés pour les quatre paramètres suivants :

- gauche à l'échelle 1 : 1 mesuré sur une base de 3 m ;
- courbure d'une file de rail à l'échelle 1 : 1 mesurée par la méthode des flèches sur une corde de 10 m ;
- nivellation longitudinal d'une file de rail à l'échelle 1 : 1 mesuré par la méthode des flèches sur une corde de 6,5 m ;
- écartement à l'échelle 1 : 1.

Afin de faciliter les recherches, un analyseur, véritable ordinateur à programme fixe, a été construit pour la mesure et le traitement des valeurs « pic-à-pic » des signaux. Monté sur un véhicule de mesure de la voie, il livre en temps réel des grandeurs caractérisant chaque paramètre de mesure. Par la suite, cet analyseur a été complété pour fournir les valeurs discrètes « aux pics » ou les valeurs discrètes de chaque paramètre de mesure (fig. 2 et 3).

*Propriétés statistiques des distributions des valeurs « pic-à-pic » et des valeurs discrètes « aux pics »*

L'étude des distributions des valeurs « pic-à-pic » et des valeurs discrètes « aux pics » de ces quatre paramètres de

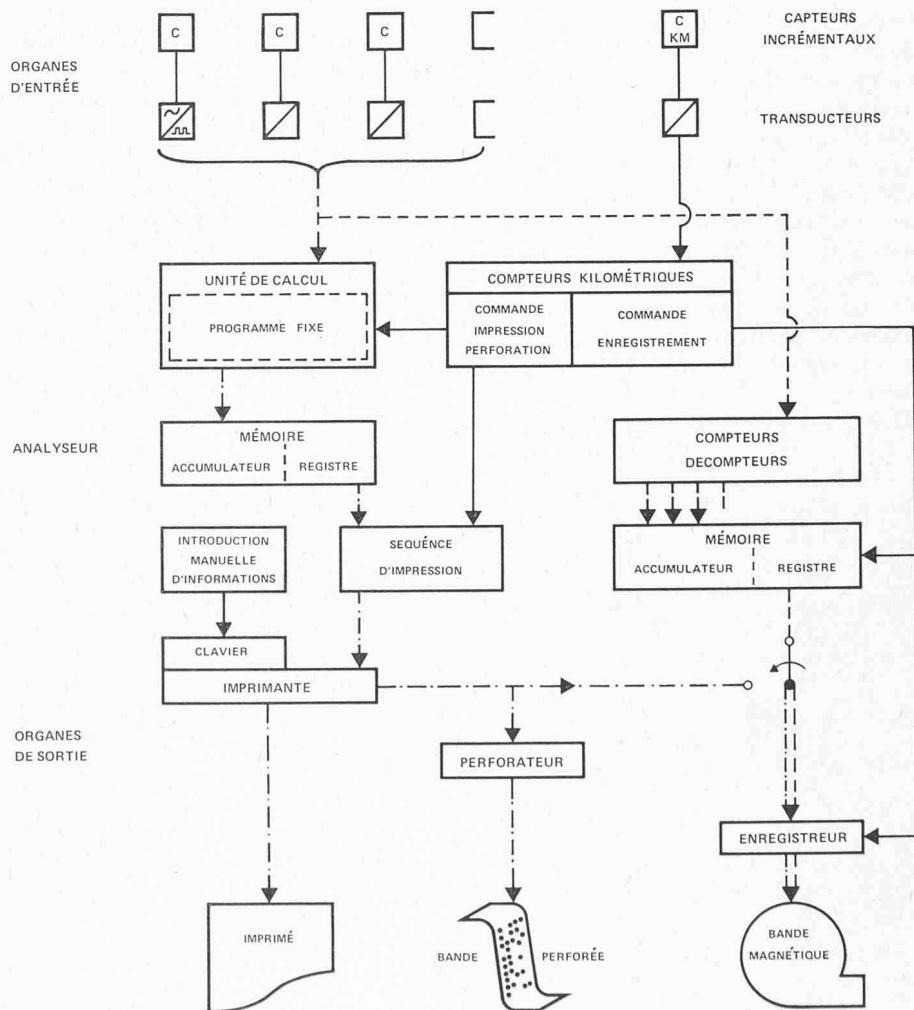


Fig. 3. — Schéma-bloc de fonctionnement de l'analyseur

COMMANDES → VALEURS PIC-A-PIC / VALEURS DISCRÈTES AUX PICS → VALEURS DISCRÈTES →

TABLEAU 1  
Analyse de la forme des distributions observées des valeurs discrètes.

% des cas (1)	Intervalles des valeurs de $\gamma_1$ . $\gamma_1$ calculé sur :			Intervalles des valeurs de $\gamma_2$ . $\gamma_2$ calculé sur :				
	la totalité des valeurs discrètes (2)		les valeurs restantes après avoir isolé les plus grandes (3)	la totalité des valeurs discrètes (4)		les valeurs restantes après avoir isolé les plus grandes (5)		
	50	-0,22	0,21	-0,15	0,14	-0,45	0,43	-0,25
70	-0,26	0,33	-0,25	0,25	-0,84	0,90	-0,37	0,36
90	-0,63	0,78	-0,33	0,35	-0,84	2,20	-0,62	0,49
100	-2,05	1,49	-0,80	1,17	-0,84	8,49	-0,84	0,72

mesure a été effectuée sur un nombre élevé de tronçons de voie, en recourant à un ordinateur IBM 7040.

Les distributions ont toutes une forme analogue. Elles semblent correspondre à une loi théorique gamma (Pearson Type III) dont la densité  $\gamma$  est donnée par la formule :

$$\gamma(v) = \frac{\lambda^k}{\Gamma(k)} \cdot v^{k-1} \cdot e^{-\lambda v}$$

$v$  : valeur ( $0 < v < +\infty$ )

$\lambda, k$  : paramètres ( $\lambda, k > 0$ )

La validité de cette hypothèse a été éprouvée à l'aide du test sur la valeur du  $\chi^2$ .

Pour les valeurs « pic-à-pic », retenues au début des études en raison de la simplicité du principe de leur mesure, et pour les valeurs discrètes « aux pics », ce test a montré qu'avec un risque de 1 %, l'hypothèse est acceptable dans respectivement 54 % et 50 % des cas. C'est nettement insuffisant pour accepter l'hypothèse.

Ce résultat est explicable : en effet, les caractéristiques du réseau CFF sont telles que, pour les études préliminaires, le découpage du réseau en tronçons homogènes doit être fait en tronçons de quelques centaines de mètres seulement. De ce fait, le nombre de valeurs « pic-à-pic » ou de valeurs discrètes « aux pics » est trop faible pour qu'il soit possible de les caractériser globalement par des

paramètres statistiques. Toutefois, ce nombre n'est pas uniquement fonction de la longueur du tronçon mais également de son état, sans pour cela que les grandeurs caractérisant l'état géométrique deviennent moins grossières. Par ailleurs, la mesure de l'amplitude des seuls défauts ne peut pas livrer l'état géométrique de l'ensemble du tronçon qui est indispensable à la gestion à moyen et à long terme.

Par contre, les valeurs discrètes « aux pics » présentent l'avantage de donner l'amplitude réelle de chaque défaut et permettraient de situer automatiquement dans l'espace les défauts nécessitant une intervention localisée et à court terme. Il n'est pas exclu qu'une quantification de l'état géométrique basée sur l'un de ces deux types de valeurs suffise à des réseaux présentant des caractéristiques différentes de celles des CFF.

#### Propriétés statistiques des distributions des valeurs discrètes

Les valeurs discrètes, mesurées tous les deux mètres de voie, ont été analysées pour les mêmes tronçons homogènes. Le traitement statistique de ces valeurs discrètes a tout d'abord consisté en une analyse de la symétrie de leurs distributions à l'aide du coefficient d'asymétrie de Fisher :

$$\gamma_1 = \frac{\mu_3}{\sigma^3}$$

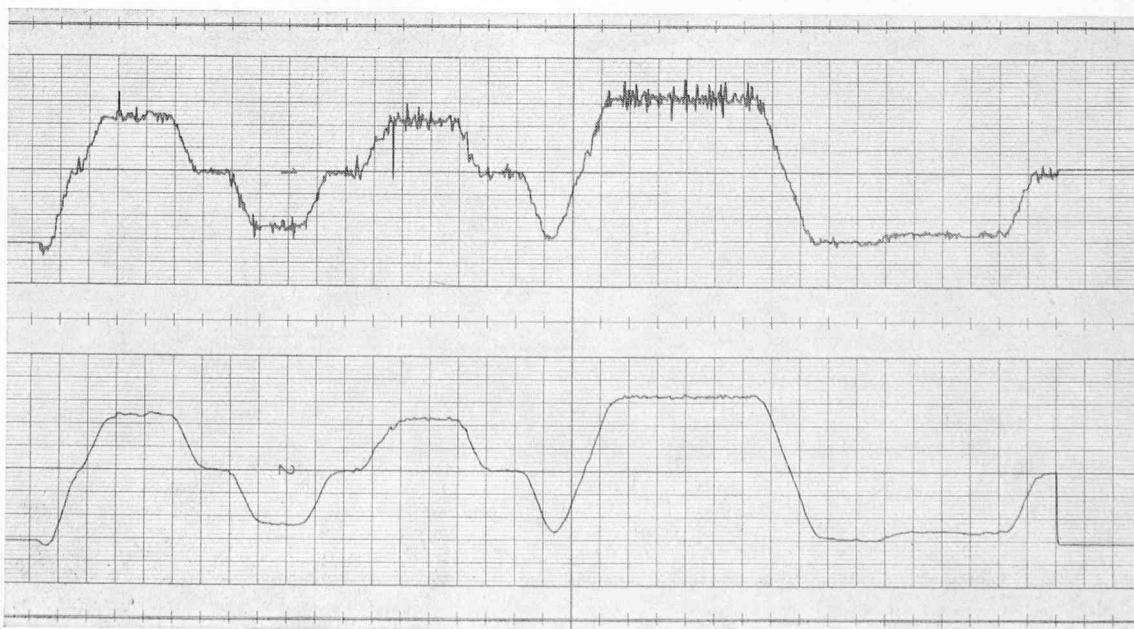


Fig. 4. — Effet d'un filtre « passe-bas » ; signal de la courbure non filtré et filtré.

où  $\mu_3$  est le moment centré d'ordre 3 et  $\sigma$  l'écart-type.

Le coefficient  $\gamma_1$  calculé pour chaque paramètre de mesure de chaque tronçon a révélé une nette symétrie des distributions (tabl. 1, col. 2).

Parmi les distributions théoriques symétriques, celle qui semble correspondre aux distributions observées est la loi normale dont la densité  $f$  est donnée par la formule :

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp [-(y-m)^2/2\sigma^2]$$

$y$  : valeurs discrètes

$m$  : zéro de référence

Le test du  $\chi^2$  montre qu'avec un risque de 1%, l'hypothèse est acceptable dans 86 % des cas. Cela confirme les résultats d'études semblables effectuées par les JNR qui ont trouvé que cette hypothèse est acceptable dans 80 % des cas [3].

Les valeurs du coefficient d'aplatissement de Fisher :

$$\gamma_2 = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} - 3$$

ne sont jamais inférieures à -0,9 alors qu'elles sont supérieures à 0,9 dans 30 % des cas (tabl. 1, col. 4). Cela signifie qu'en général la distribution observée est moins aplatie que la distribution théorique correspondante en raison de l'influence des valeurs discrètes les plus grandes en valeur absolue.

Il y a lieu de relever que, selon Onogi aussi, les valeurs discrètes extrêmes tendent à mettre en défaut l'hypothèse d'une loi normale [3]. De même Stassen [4] constate que la distribution des défauts de la courbure (flèches  $f$  sur une corde de 10 m) obéit à une loi normale de probabilité dans l'intervalle :

$$(\bar{f} - 2\sigma) < f < (\bar{f} + 2\sigma)$$

$\bar{f}$  : moyenne arithmétique

En dehors de cet intervalle, la loi est exponentielle.

Il semble donc que, si à l'aide d'un processus de calcul très simple qui sera décrit sous point 4 on isole les valeurs discrètes extrêmes, les valeurs discrètes restantes se répartissent selon une loi gaussienne d'écart-type  $\sigma_e$  généralement plus petit que  $\sigma_{tot}$ ,  $\sigma_{tot}$  étant l'écart-type qui correspond à la totalité des valeurs discrètes. En effet, sur l'ensemble des tronçons mesurés, l'élimination des valeurs discrètes extrêmes des paramètres analysés aboutit à une distribution des valeurs restantes présentant un coefficient  $\gamma_2$  beaucoup plus faible et une symétrie encore meilleure (tabl. 1, col. 5 et 3).

Ainsi les valeurs discrètes des signaux étudiés, moyennant un traitement préalable permettant d'isoler celles qui correspondent aux défauts les plus grands, se distribuent selon une loi normale.

#### 4. Analyse de l'état géométrique à partir des valeurs discrètes

« Pas » de mesure

Les valeurs discrètes des signaux ont donc été mesurées, dans une première série d'essais, tous les deux mètres de voie. Cette valeur a été choisie pour des raisons pratiques, mais il est bien évident qu'il ne s'agit pas là d'un pas de mesure optimal. Des travaux sont en cours pour déterminer ce pas de mesure pour chaque paramètre à partir d'essais à grande échelle où les mesures sont effectuées à des intervalles beaucoup plus restreints. Notons cependant que le pas de mesure optimal dépend notamment :

- de la configuration du système de captage,
- des caractéristiques des défauts de la voie,
- du degré de sensibilité recherché pour les résultats de l'analyse.

#### Zéro de référence pour les mesures

La valeur du paramètre de mesure qui ne présente pas de défauts est le zéro de référence. Les signaux relevés fluctuent autour de cette valeur de référence qui, en fonction du tracé, se situe de part et d'autre du zéro du signal.

Du point de vue de la maintenance de la voie, deux catégories d'informations sont nécessaires. Ce sont celles qui caractérisent d'une part les fluctuations autour du zéro de référence et d'autre part les variations de ce dernier par rapport au zéro du signal. Il est en effet important de connaître les valeurs absolues de certains paramètres de l'état géométrique, notamment du gauche, du dévers, de l'écartement et de la courbure. Ceci confirme les lacunes d'une analyse basée sur des valeurs indépendantes d'un zéro de référence telles que celles des amplitudes « pic-à-pic ». Le zéro du signal étant connu, il reste donc à définir, de manière continue et pour chaque paramètre, le zéro de référence par rapport auquel doivent être mesurées les valeurs discrètes.

Dans les études effectuées, le zéro de référence a été défini comme une succession de segments de droites dont les coefficients, par rapport à un système d'axes rectangulaires attaché au zéro du signal, ont été calculés par ordinateur. Les valeurs discrètes des ordonnées des signaux par rapport à ces segments de droite ont été obtenues par soustraction.

Cette méthode numérique a donné satisfaction quel que soit le tracé de la voie. Toutefois, une méthode analogique serait plus économique et permettrait d'obtenir en temps réel chaque zéro de référence à l'aide de filtres « passe-bas » asservis à la vitesse de circulation du véhicule de mesure. L'effet de tels filtres a été simulé sur le calculateur hybride « Applied Dynamics AD4-IBM 1130 » de l'Institut de réglage automatique de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Il semble qu'une mesure simultanée faite à partir d'un même référentiel des valeurs discrètes du signal filtré et non filtré permettra d'obtenir les deux informations dont il a été question (fig. 4).

#### Algorithme d'analyse

L'analyse de l'état géométrique à partir des valeurs discrètes est effectuée à l'aide de l'algorithme décrit dans la figure 5.

Tout d'abord les coefficients des segments de droite «  $m$  », zéro de référence dans le système d'axes rattaché au zéro du signal, sont calculés à partir des valeurs discrètes  $y_i$  pour chaque tronçon homogène.

Ensuite les nouvelles valeurs discrètes  $y_i - m$  sont traitées statistiquement en vue de l'obtention de  $\sigma_e$  et de  $n$ , où  $n$  représente le nombre de valeurs isolées. Ce traitement s'effectue sur les valeurs discrètes prises en valeur absolue  $z_i = |y_i - m|$ , puisque les distributions sont symétriques.

Les distributions observées étant normales dans leur partie centrale, un pourcentage  $X$  donné des valeurs  $z_i$  est compris dans un intervalle dont l'étendue est fonction de l'écart-type  $\sigma_{e1}$  de la distribution normale correspondante ; l'intervalle considéré comprend donc expérimentalement et théoriquement le même pourcentage de valeurs.

Maintenant il s'agit d'isoler les valeurs extrêmes, c'est-à-dire les plus grandes en valeur absolue. Mais cette opération a pour effet de modifier le pourcentage expérimental des valeurs comprises dans l'intervalle considéré.

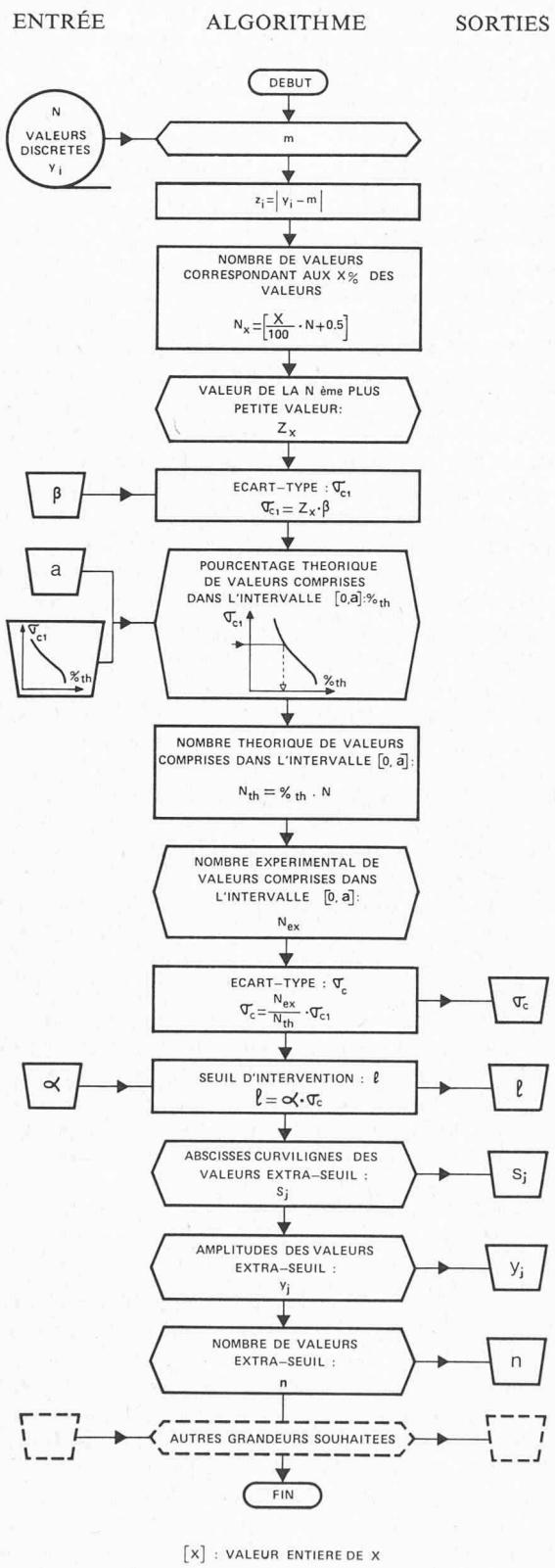


Fig. 5. — Algorithme d'analyse de l'état géométrique à partir des valeurs discrètes.

Un réajustement de l'écart-type est donc nécessaire. La correction consiste à multiplier  $\sigma_{c1}$  par le rapport entre l'effectif expérimental et l'effectif théorique de valeurs comprises dans l'intervalle  $[0, a]$ . La constante  $a$  est choisie expérimentalement de façon à être indépendante du paramètre de mesure. L'écart-type « corrigé » ainsi obtenu est désigné par  $\sigma_c$ . Il caractérise la dispersion

des fluctuations du signal par rapport au zéro de référence, les fluctuations extrêmes « anormales » exceptées. Ces dernières sont relatives aux défauts géométriques qui doivent être éliminés pour que l'état de détérioration moyen du paramètre de mesure puisse être chiffré par la valeur  $\sigma_c$ .

Pour caractériser entièrement un paramètre de mesure, il faut encore trouver le nombre  $n$  de valeurs discrètes relatives aux fluctuations extrêmes « anormales ». Ces valeurs discrètes, dites valeurs « extra-seuil », sont supérieures à la valeur  $l$  du seuil d'intervention :  $l = \alpha \cdot \sigma_c$ . La valeur du coefficient d'intervention  $\alpha$  est choisie en fonction de la politique d'entretien. Elle sera d'autant plus petite que la politique se veut sévère. Le coefficient d'intervention peut être choisi différent d'une ligne à l'autre pour tenir compte des caractéristiques de la ligne, de celles des circulations, ainsi que des moyens disponibles pour les interventions « par point à temps ». Dans les exemples qui seront présentés,  $\alpha$  est choisi arbitrairement égal à 3.

Ainsi l'algorithme d'analyse fournit, pour chaque paramètre de mesure et pour chaque tronçon homogène, un ensemble de valeurs ( $\sigma_c, m, n$ ) qui caractérise son état de détérioration. Il permet en outre d'obtenir les abscisses curvilignes  $s_j$  et les amplitudes en millimètres  $y_j$  des valeurs « extra-seuil ».

#### Illustration graphique de résultats de l'analyse

Les figures 6 et 7 illustrent graphiquement les résultats obtenus pour deux tronçons homogènes. Ces deux exemples mettent en évidence que les lois normales  $f_c$  d'écart-type  $\sigma_c$  sont une meilleure approximation des distributions expérimentales que les lois normales  $f_{tot}$  d'écart-type  $\sigma_{tot}$ , écart-type calculé à partir de la totalité des valeurs. Ce phénomène est particulièrement évident pour le gauche et le niveling du tronçon km 28.062 à km 28.250.

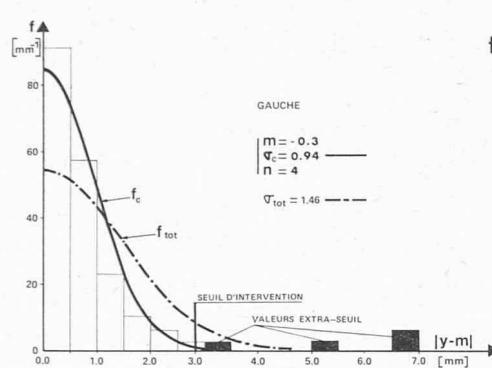
Du point de vue pratique, la valeur de  $\sigma_c$  correspond à l'état moyen des paramètres de la géométrie. Cette caractéristique est mise en évidence lors de la comparaison des enregistrements graphiques du niveling des deux tronçons pris comme exemples (fig. 8). En effet, moyennant deux petites interventions aux « joints bas », le premier tronçon est nettement en meilleur état que le second. Les valeurs respectives de  $\sigma_c$  sont en accord avec cet état de fait, alors que les valeurs respectives de  $\sigma_{tot}$  laisseraient croire que les deux tronçons ont un état moyen semblable.

Ainsi l'analyse de tous les paramètres de mesure de l'état géométrique s'effectue à l'aide d'un seul algorithme, ce qui permet d'utiliser les mêmes ensembles de grandeurs pour chiffrer tous les paramètres et rend possible la classification des différents tronçons selon l'état de la voie.

#### 5. Exploitation des résultats

L'analyse de l'état géométrique livre deux catégories de résultats : chaque tronçon homogène étant identifié par les abscisses curvilignes de ses extrémités et par sa longueur, chaque paramètre de mesure est caractérisé par l'ensemble ( $\sigma_c, m, n$ ) et par les couples ( $y_j, s_j$ ) rattachés aux défauts d'amplitude supérieure au seuil d'intervention (fig. 9 et 10).

L'exploitation de ces résultats associés à d'autres données permet de définir dans le temps et dans l'espace la nature des travaux à effectuer. Dans le temps, les travaux peuvent être classés par degré d'urgence selon qu'ils doivent être effectués à court, moyen ou long terme.



$$f_n(|y-m|) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \sigma_n \cdot \exp \left[ -\frac{(y-m)^2}{2 \sigma_n^2} \right]$$

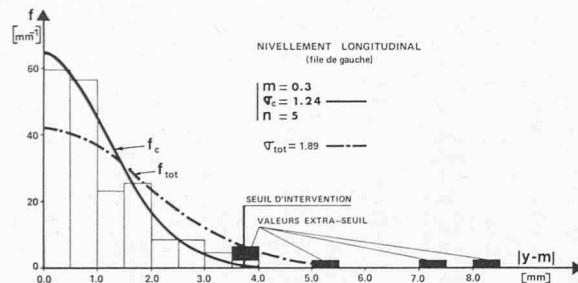
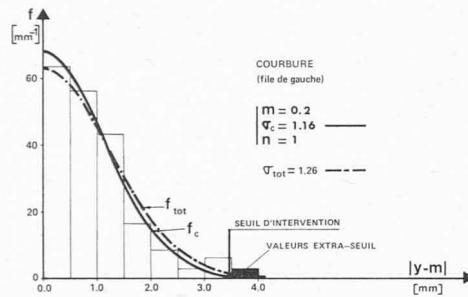


Fig. 6. — Analyse de l'état géométrique à partir des valeurs discrètes.

Exemple de résultats : distributions observée et théoriques.  
Rails éclissés : km 28.062 à km 28.250.

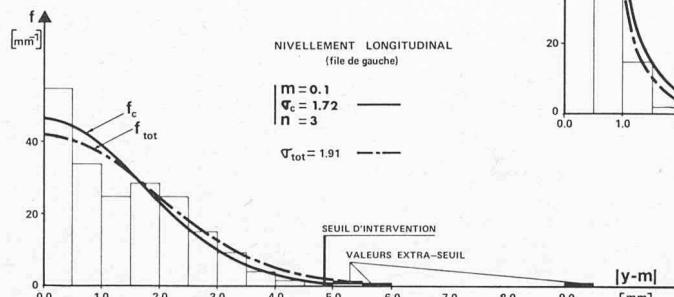
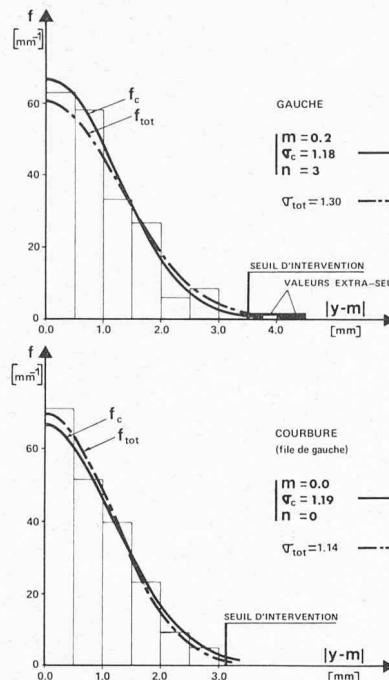
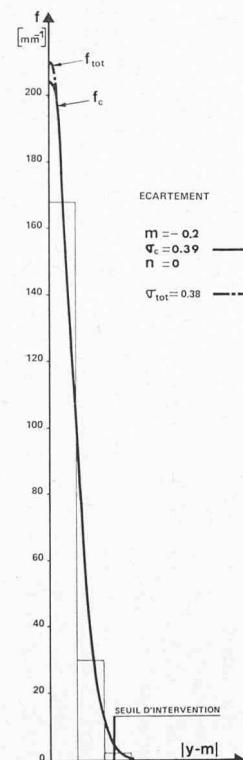


Fig. 7. — Analyse de l'état géométrique à partir des valeurs discrètes.

Exemple de résultats : distributions observée et théoriques.  
Longs rails soudés : km 48.668 à km 49.150.

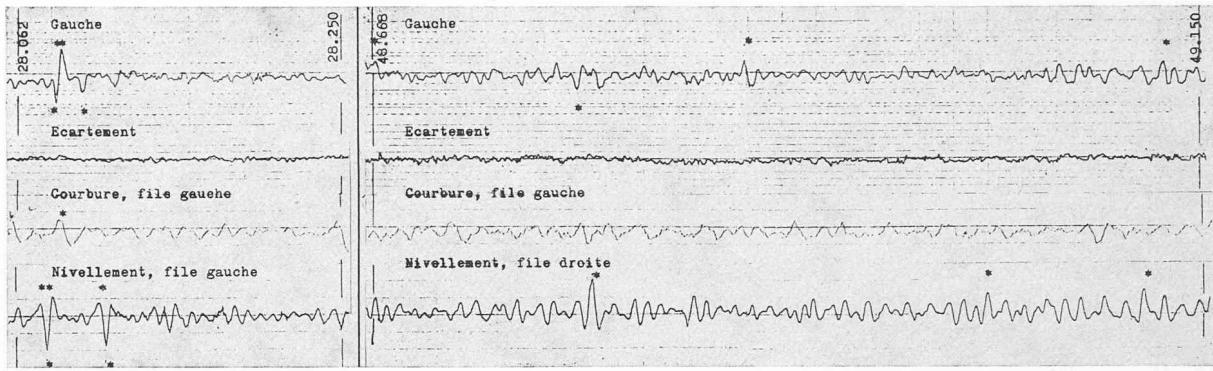


Fig. 8. — Graphiques de l'état géométrique.

Km 28.062 à km 28.250.  
Km 48.668 à km 49.150.  
\* : Valeurs extra-seuil.

KM	A	KM	LON	GAUCHE			ECARTEMENT			COURBURE			NIVEL.			LONG.		
				SIGC	M	N	SIGC	M	N	SIGC	M	N	SIGC	M	N	SIGC	M	N
54.684	-	55.110	426	1.00	0.1	2	0.43	0.2	5	1.85	0.2	0	1.89	-0.1	0			
55.110	-	55.560	450	1.16	-0.1	3	0.51	0.2	0	1.73	0.1	3	1.55	-0.2	1			
55.560	-	55.990	430	1.13	0.1	2	0.71	0.3	1	1.79	0.1	0	1.35	0.1	8			

Fig. 9. — Résultats de l'analyse de l'état géométrique en vue de la gestion des interventions à moyen et à long terme.

Les interventions à très court terme consistent en des corrections de défauts locaux risquant de compromettre la sécurité des circulations. Ce sont les défauts signalés par les couples  $(y_j, s_j)$  dont l'amplitude  $y_j$  dépasse un seuil de sécurité fixé pour chaque paramètre. Les autres dépassements du seuil d'intervention sont des défauts locaux qu'il faut corriger à court terme pour assurer la protection du matériel, garantir un confort suffisant et obtenir un niveau de qualité homogène de la voie sur un tronçon.

Pour décider des travaux à entreprendre et déterminer s'ils doivent être effectués à moyenne ou à longue échéance, il faut traiter une masse considérable d'informations. Ces décisions sont actuellement basées sur l'expérience des responsables, sur une appréciation globale de l'état d'une voie. Cette appréciation consiste à mettre en regard de façon plus ou moins objective l'état de la voie existant et les tolérances d'intervention, compte tenu des sollicitations.

Il est possible de recourir à un processus analogue pour préparer automatiquement les éléments nécessaires aux décisions. Les tronçons homogènes du réseau sont classés

en un nombre limité de tronçons homogènes types. Des gammes de tolérance de réceptions et d'interventions sont définies pour chaque tronçon homogène type et pour chaque paramètre de mesure. Les travaux à effectuer ressortent alors de la confrontation, pour chaque tronçon, entre les résultats de l'analyse de l'état géométrique et des tolérances prescrites. Cette confrontation doit faire appel à des algorithmes qui intègrent consignes techniques et contraintes.

Certes, ces algorithmes devront être élaborés, ajustés et affinés progressivement mais, même rudimentaires, ils contribueront à une plus grande objectivité et efficacité des décisions.

## 6. Conclusions

Les résultats de cette étude permettent donc d'obtenir l'état géométrique quantifié indispensable à un système de gestion intégré de la maintenance des voies. Une partie des objectifs fixés est ainsi atteinte.

La suite des recherches consiste à élaborer les algorithmes de gestion et les procédures de traitement de l'ensemble des informations propres à livrer aux responsables de la maintenance des instruments de décision rationnels. Il faudra aussi recourir aux méthodes modernes d'ordonnancement pour améliorer l'organisation et le contrôle du déroulement des nombreux chantiers afin de prolonger l'efficacité du système jusque dans l'application des décisions.

C'est alors seulement que sera atteint l'objectif qui est de limiter les dépenses annuelles tout en maintenant le niveau de qualité des voies.

## BIBLIOGRAPHIE

KM	A	KM	LON	GAUCHE	G	ECART.	E	COURB.	C	NIVEL.	N
L	N	L	N	L	N	L	N	L	N	L	N
54.684	-	55.110	426	3.00	0	1.29	5	5.55	0	5.67	0
PARAMETRE/SJ/YJ * G/54.840/-1.3 * E/54.862/-1.5 * G/54.894/-3.1 * E/54.906/-1.5 * E/54.918/-1.5 * E/54.930/ 1.3 * E/55.002/-1.5 *											
KM	A	KM	LON	GAUCHE	G	ECART.	E	COURB.	C	NIVEL.	N
L	N	L	N	L	N	L	N	L	N	L	N
55.110	-	55.560	450	3.48	3	1.53	0	5.19	3	4.65	1
PARAMETRE/SJ/YJ * N/55.224/ 6.2 * G/55.244/-3.9 * G/55.316/ 3.8 * G/55.376/ 3.5 * C/55.376/ 6.4 * C/55.382/-6.7 * C/55.384/-5.5 *											
KM	A	KM	LON	GAUCHE	G	ECART.	E	COURB.	C	NIVEL.	N
L	N	L	N	L	N	L	N	L	N	L	N
55.560	-	55.990	430	3.39	2	2.13	1	5.37	0	4.05	8
PARAMETRE/SJ/YJ * N/55.592/-6.4 * N/55.624/ 5.7 * N/55.762/-4.3 * N/55.794/ 4.9 * N/55.826/ 4.3 * N/55.830/-5.4 * N/55.864/-4.7 * N/55.898/-4.6 * G/55.956/-3.8 * G/55.958/ 3.6 * E/55.986/-2.7 *											

Fig. 10. — Résultats de l'analyse de l'état géométrique.

Valeurs extra-seuil des défauts nécessitant une intervention à court terme.

- [1] F. J. HURLEY, J. N. GOESER, B. R. KOCH, P. J. McCONNELL : *Railroad research field testing program first progress report*. Melpar Inc. Falls Church, Virginia. USA. Décembre 1968.
- [2] L. GENT et G. JANIN : *La qualité de la voie ferrée. Comment la définir quantitativement?* Revue générale des Chemins de fer, décembre 1969.
- [3] J. ONOGI : *A study of railway track displacement*. Synopsis of JSCE prize papers for 1961.

- [4] H. G. STASSEN : *Random lateral motions of railway vehicles*. Travail de thèse sous la direction de Prof. ir. R. G. Boiten. Delft, Nederland. 6 décembre 1967.
- [5] FR. DUBOIS : *L'inspection automatique des voies de chemin de fer*. Librairie scientifique et technique A. Blanchard, Paris 1965.
- [6] D. GENTON : *Maintenance de la voie, approches d'une gestion intégrée*. Simpozij o suvremenom zeljezničkom kolosijeku, Zagreb 1969.
- [7] W. B. O'SULLIVAN : *Boston and Maine expends role of mechanical track inspection*. Railway Track and Structures. Avril 1966.
- [8] *On the Baltimore and Ohio, computers as a tool in programming track maintenance*. Railway Track and Structures. Mars 1965.
- [9] I. NAKAMURA, K. WADA : *Data handling machine for the No. 2 track inspection car of the New Tokaido Line*. Quarterly Report RTRI, vol. 7, No 3, 1966.
- [10] CURTIS W. LAW : *Instrumentation for high speed railroad research project*. U. S. Department of Transport. Septembre 1967.
- [11] K. MATSUBARA : *High speed track inspection car*. Bulletin of Permanent Way Society of Japan, vol. 7, No 2-3, 1966.
- [12] D. H. COOMBS : *Computerised data processing of track geometry recording*. The Railway Gazette, 15 juillet 1966.

Adresse des auteurs :

Institut de technique des transports de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 9, chemin des Délices, 1007 Lausanne.

## Utilisation de treillis d'armature dans la construction

par MICHEL ANDENMATTEN, ing. EPFL-SIA, Sion

### 1. Préambule

En août 1969, les promoteurs du « Centre Etoile » à Sion mettaient en chantier le plus grand immeuble locatif et commercial construit en Valais ces dernières années (fig. 1).

Cet ensemble de 140 000 m<sup>3</sup> situé au centre de la Ville de Sion, conçu par les bureaux A. Perraudin et R. & J. L. Tronchet, architectes SIA à Sion, a été étudié par le bureau Michel Andenmatten, ingénieur SIA à Sion.

Cet immeuble comporte une surface de construction de 5000 m<sup>2</sup> par étage et possède 4 étages de garages et dépôts en sous-sol et 9 étages de magasins, bureaux, et appartements hors du sol (fig. 2).

### 2. Choix de la structure porteuse

De nombreux calculs préliminaires ont été établis et après plusieurs demandes de prix auprès d'entreprises susceptibles d'exécuter ce travail, le choix du bureau d'ingénieurs s'est porté sur l'utilisation de dalles en béton armé pleines de 28 à 36 cm d'épaisseur, sans sommiers, posées sur des colonnes métalliques munies de têtes de poinçonnement en acier. Les surcharges varient de 400 à 1000 kg/m<sup>2</sup> suivant les étages et les portées sont de 7,50 à 11,0 m suivant les locaux.

Pour supporter les très grandes charges des piliers, au 3<sup>e</sup> sous-sol des garages, les colonnes métalliques ont été remplies de béton CP 300 vibré et le calcul s'est effectué comme suit :

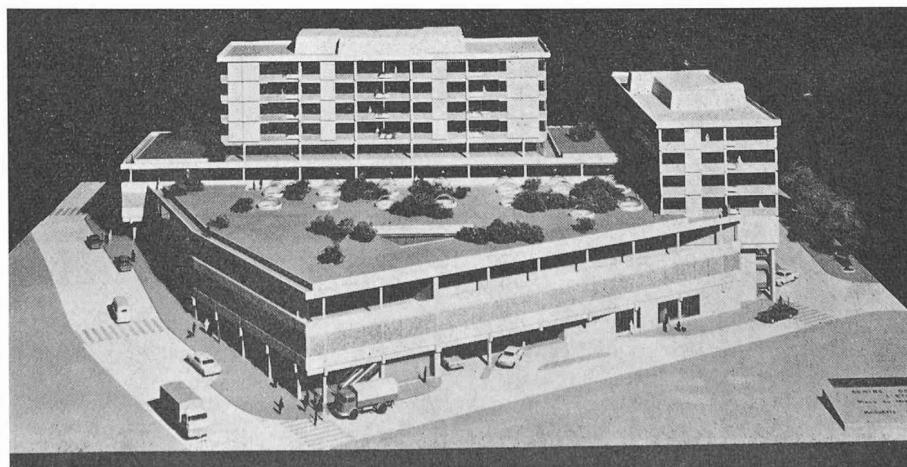


Fig. 1. — Façade Sud-Ouest.

$$F_{id} = F_t + \frac{F_b}{n}$$

$F_{id}$  — section idéale

$F_t$  — section du tube en cm<sup>2</sup>

$F_b$  — section du béton en cm<sup>2</sup>

$n$  — rapports des modules d'élasticité de l'acier et du béton

$$n = \frac{E_t}{E_b} = 10$$

$$\lambda_{id} = \frac{l_i}{\sqrt{\frac{J_{id}}{F_{id}}}}$$

$l_i$  — longueur de flambage

$J_{id}$  — moment d'inertie idéal en cm<sup>4</sup>, donc

$$J_{id} = J_t + \frac{J_b}{n}$$

$J_t$  — moment d'inertie du tube en cm<sup>4</sup>

$J_b$  — moment d'inertie du béton en cm<sup>4</sup>

Pour le cas « P » et acier 52-3

$$\sigma_{ad} = 2,21 - 13 \lambda_{id}$$

$$P_{ad} = \sigma_{ad} \times F_{id}$$