

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 98 (1972)
Heft: 16

Artikel: Algorithme d'analyse en temps réel des mesures de l'état géométrique des voies de chemin de fer
Autor: Rivier, R.E.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-71555>

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: 26.01.2026

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

Algorithme d'analyse en temps réel des mesures de l'état géométrique des voies de chemin de fer

par R. E. RIVIER¹

Avant-propos

L'importance des dépenses pour la maintenance de la voie, les exigences de qualité des voies parcourues à des vitesses élevées ont engagé l'Institut de technique des transports de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne à poursuivre activement l'étude d'un système de gestion intégré de la maintenance de la voie.

Ces travaux, qui bénéficient de l'appui des Chemins de fer fédéraux suisses et d'industries, ont fait déjà l'objet de publications exposant les éléments d'un système de gestion intégré et des méthodes d'analyse de l'état géométrique de la voie [1, 2].

La publication qui suit présente les résultats d'études faites par Monsieur Rivier et s'inscrivant dans le cadre d'un travail de doctorat en voie d'achèvement.

Professeur D. GENTON
Directeur de l'Institut de technique
des transports de l'EPFL

1. Introduction

Il convient de rappeler que l'état géométrique est relevé de façon continue le long de la voie à l'aide de systèmes de mesure mécaniques ou électriques. Les paramètres de mesure relevés dans la pratique courante sont :

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

Les valeurs de ces paramètres sont généralement enregistrées graphiquement (fig. 1).

Mais le genre et la qualité des informations obtenues pour chacun de ces paramètres dépendent largement du système de mesure adopté, de la nature et de la disposition des palpeurs en contact ou non avec la joue et la table de roulement des rails [3, 4].

En outre ces informations ne peuvent être utilisées aisément à l'état brut pour définir les interventions dans le temps et dans l'espace. Il était donc indiqué de rechercher les moyens d'obtenir des informations chiffrées directement utilisables d'une part pour les prises de décisions immédiates, c'est-à-dire pendant les campagnes de mesure, et d'autre part pour les introduire dans la banque d'informa-

tions d'un système de gestion intégré. Il importe en effet que les traitements différés soient allégés le plus possible.

Dans ce but il a été prévu de placer dans le véhicule de mesure un mini-ordinateur et d'élaborer un algorithme suffisamment efficace pour quantifier en temps réel les signaux de l'état géométrique.

2. Principes de quantification

La quantification consiste en une transformation analogue-digitale des signaux et une analyse statistique, à partir des valeurs ainsi obtenues, effectuée en vue de chiffrer la qualité de chaque paramètre à l'aide d'un nombre restreint de grandeurs. Il est indispensable, pour que les résultats de l'analyse soient représentatifs et univoques, que la série de valeurs traitée :

- se rapporte à un tronçon dit homogène, c'est-à-dire à un tronçon tout au long duquel les caractéristiques de l'infrastructure, de la superstructure et du tracé, l'importance des sollicitations et le genre de travaux d'entretien subis restent les mêmes³,
- caractérise l'ensemble des informations élémentaires permettant de chiffrer avec précision la qualité de chaque paramètre de l'état géométrique⁴,
- se distribue selon une même loi de probabilité pour tous les tronçons homogènes et que cette loi puisse être définie mathématiquement.

Les enregistrements de l'état géométrique fluctuent autour d'une ligne moyenne qui dépend du tracé en plan ou en élévation de la voie. L'échantillonnage de ces signaux bruts consiste à mesurer, à intervalles réguliers, l'amplitude de chacun d'eux à partir d'une référence appelée zéro du signal et correspondant à une voie parfaite, supposée en alignement. Les valeurs y_i ainsi obtenues sont appelées valeurs discrètes fixes (VDX)

La ligne moyenne du signal ou signal filtré s'obtient par un filtrage passe-bas du signal brut. La différence entre la valeur du signal brut y_i et la valeur du signal filtré y'_i au même point de la voie fournit la valeur z_i des fluctuations du signal autour de sa ligne moyenne (fig. 2a). Les valeurs $v_i = |z_i|$ seront appelées valeurs discrètes flottantes (VDF).

Les informations nécessaires à la prise de décisions pour la maintenance de la voie doivent caractériser les fluctuations du signal autour de sa ligne moyenne et les variations

¹ ROBERT ETIENNE RIVIER, ing. dipl., chargé de cours à l'EPFL ; chef d'un groupe de recherche à l'Institut de technique des transports de l'EPFL.

² Les numéros entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

³ La longueur minimum des tronçons homogènes est notamment fonction de la durée des calculs effectués par le mini-ordinateur et de la vitesse de circulation du véhicule de mesure.

⁴ Des études antérieures [2] portant sur plusieurs ensembles de valeurs ont montré qu'il convient de recourir à un échantillonnage des signaux.

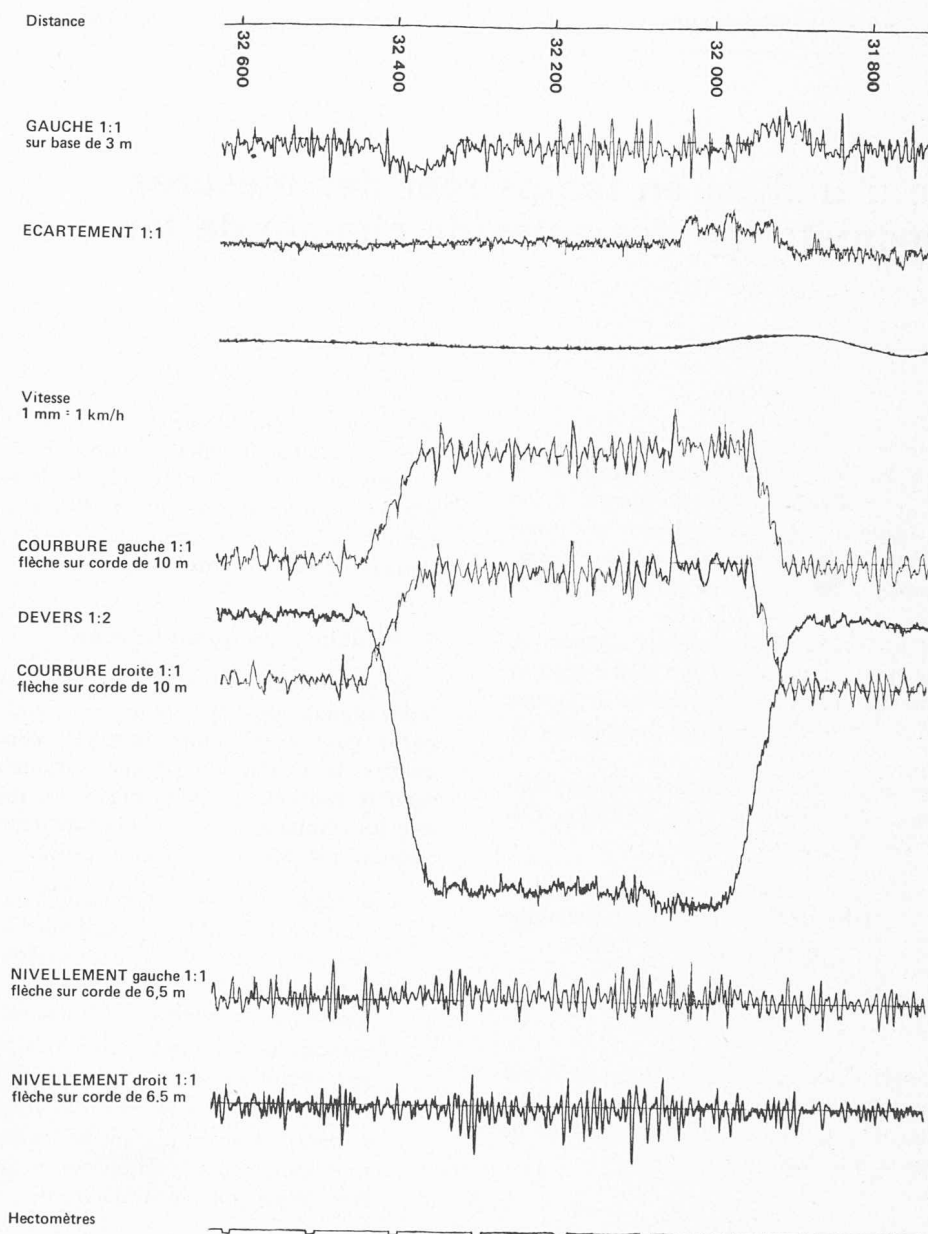


Fig. 1. — Exemple de graphique enregistré par une draine de mesure de l'état géométrique MATISA PV6.

de celle-ci par rapport au zéro du signal. En raison des tolérances prescrites pour la géométrie de la voie, ces informations doivent en outre définir les défauts locaux qui sont caractérisés par des VDX ou des VDF dépassant certains seuils d'amplitude. Il est donc nécessaire d'introduire pour l'analyse des seuils fixes et des seuils flottants (fig. 2 b, c).

Pour concevoir un algorithme d'analyse de l'état géométrique répondant à l'ensemble de ces exigences, il faut étudier le filtrage du signal brut pour obtenir sa ligne moyenne (§ 3) et définir les valeurs discrètes z_i des fluctuations ; à partir des propriétés statistiques des distributions des valeurs z_i (§ 4), il s'agit de déduire la procédure de traitement à adopter (§ 5, 6, 7).

3. Filtrage des signaux

Le filtrage passe-bas des signaux électriques analogiques captés peut être effectué directement à l'aide de filtres

analogiques ; il peut être aussi réalisé numériquement à partir du signal brut discrétisé. Ce sont des considérations d'ordre technique et économique qui permettront d'opérer un choix.

Il est bien connu que les filtres analogiques doivent être asservis à la vitesse de circulation ; celle-ci peut varier jusqu'à 160 km/h pour une voiture moderne de mesure de l'état géométrique. Cela exige des asservissements relativement complexes et par conséquent onéreux [5]. En outre, des essais sur calculateur analogique ont mis en évidence dans certains cas un déphasage entre le signal brut et le signal filtré, déphasage qui semble difficile à corriger.

Les filtres digitaux, par contre, ne nécessitent aucun asservissement à la vitesse. Plusieurs de ces filtres ont été testés sur ordinateur et les résultats dépouillés à l'aide d'un traceur digital.

Les filtres numériques simulant des filtres analogiques passe-bas n'ont pas été retenus, car ils présentent des déphasages importants. De même, les filtres basés sur

le calcul de moyennes arithmétiques ou sur la méthode d'intégration numérique de Simson n'ont pas donné de résultats acceptables. En effet, si les valeurs prises en considération correspondent à une longueur de voie trop faible, le signal filtré présente des ondulations d'assez forte amplitude. Par contre, le recours à un grand nombre de valeurs pour éliminer ces ondulations engendre la déformation de l'image des doucines.

Un filtrage basé sur un ajustement polynomial par la méthode des moindres carrés a également été écarté car il

s'est révélé incompatible avec l'utilisation d'un mini-ordinateur ; les calculs eussent été trop importants.

Le filtre décrit ci-dessous a finalement été retenu en raison de sa valeur intrinsèque et des possibilités qu'il offre. Les valeurs discrètes du signal filtré sont calculées de proche en proche à des intervalles égaux γP à l'aide des valeurs discrètes du signal brut mesurées avec un pas P . La formule générale de ce filtre prend en considération les VDX espacées de γP sur une longueur de voie mémorisée $2\beta P$:

$$y'_k = \frac{y_{k-\beta} + 2y_{k-\beta+\mu} + 3y_{k-\beta+2\mu} + \dots + \left(\frac{\beta+\mu}{\mu}\right)y_k + \dots + 3y_{k+\beta-2\mu} + 2y_{k+\beta-\mu} + y_{k+\beta}}{2 \left(1 + 2 + \dots + \frac{\beta+\mu}{2\mu}\right)}$$

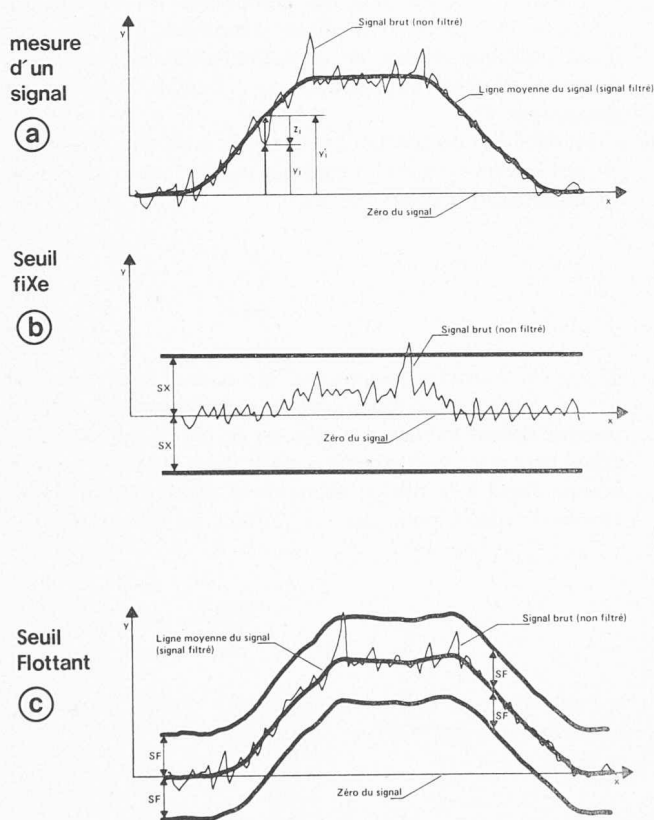


Fig. 2. — Définitions : valeurs mesurées des signaux, seuils.

γ , β et μ sont des entiers positifs ; k est l'indice mobile de la valeur filtrée et s'incrémente de γ . Pour γ supérieur à un, les valeurs discrètes filtrées intermédiaires sont calculées par interpolation linéaire. Dans le cas particulier ce filtre n'a pas été employé pour les signaux du nivellement longitudinal en raison de la longueur réduite de la base de mesure et de l'absence de dérive du système de mesure. Pour les autres paramètres de l'état géométrique relevé par la draine PV6, les valeurs de β , γ et μ dépendent directement du pas de mesure P choisi pour l'analyse.

Le filtrage par cette méthode s'est révélé tout à fait satisfaisant, quels que soient l'état de la géométrie, le tracé en plan et en élévation de la voie (fig. 3).

4. Analyse statistique

Un échantillon des lignes du réseau CFF, consistant en 61 tronçons homogènes représentant plus de 44 km de voie, a été choisi pour l'analyse statistique des résultats des mesures.

Pour le gauche, les courbures, l'écartement et le dévers, cette étude a porté sur la série de valeurs $z_i = y_i - y'_i$; pour le nivellement longitudinal, elle a été faite à partir des valeurs $z_i = y_i$.

Les variables mesurées et prenant respectivement les valeurs $z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_n$ ont été supposées indépendantes en adoptant pour l'analyse statistique un pas de mesure de 5 m.

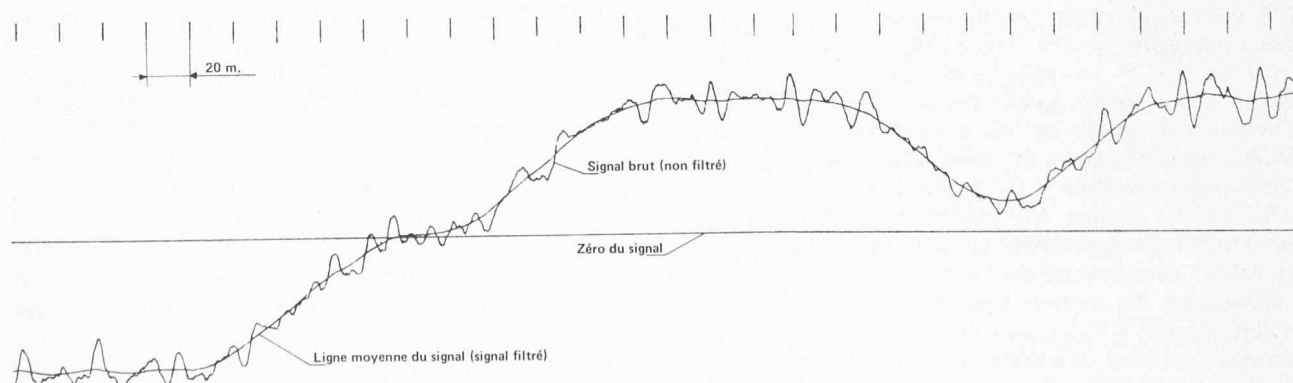


Fig. 3. — Filtrage numérique passe-bas de la courbure.

Pour chaque paramètre, la valeur de l'espérance mathématique

$$E(|\bar{z}|) = \frac{1}{61} \sum_{j=1}^{61} |\bar{z}_j|$$

où
$$\bar{z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i \quad N: \text{nombre de valeurs discrètes}$$

est de l'ordre de quelques centièmes de millimètre. Les distributions des valeurs sont centrées. Le signal filtré correspond donc bien à la ligne moyenne du signal. Les distributions sont en outre symétriques car les valeurs du coefficient d'asymétrie de Fisher γ_1 sont comprises dans l'intervalle $[-0,5; +0,5]$ dans 83 % des cas et n'excèdent jamais $\pm 2,5$.

Parmi les distributions théoriques, celle qui semble correspondre aux distributions observées est la loi normale centrée de densité :

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

Les premières lignes du tableau 1 donnent les résultats du test d'ajustement du χ^2 et montrent en particulier que si l'on admet un risque de 2,5 %, l'hypothèse est acceptable dans 83,4 % des cas.

TABLEAU 1

Test du χ^2 ; pourcentage de cas où l'hypothèse d'une loi normale est acceptable.

Test du χ^2 à partir \ Risk α	0,1	0,05	0,025	0,01
de la totalité des valeurs discrètes	65,6	74,9	83,4	89,6
des valeurs discrètes inférieures au seuil d'intervention	77,1	86,1	91,0	95,9

Toutefois il est indispensable de procéder à une analyse plus approfondie des distributions des valeurs observées. Pour les sept paramètres de mesure, les valeurs du coefficient d'aplatissement de Fisher γ_2 sont positives dans 82 % des cas. Plus précisément, les valeurs de γ_2 ne sont jamais inférieures à $-0,8$ alors qu'elles sont supérieures à $+0,8$ dans 48 % des cas. La distribution observée est donc en général moins aplatie que la distribution normale correspondante. Cela est dû à l'influence des valeurs discrètes les plus grandes en valeur absolue. Il semble que l'ajustement est meilleur si l'on prend la précaution d'isoler l'influence des valeurs discrètes extrêmes en définissant une valeur limite appelée par la suite seuil d'intervention. Les valeurs dépassant ce seuil sont les valeurs extra-seuil d'intervention. La seconde ligne du tableau 1 donne les résultats du test d'ajustement du χ^2 à partir des valeurs inférieures au seuil d'intervention. L'hypothèse est alors acceptable dans 91 % des cas avec le même risque de 2,5 %.

Il est intéressant de noter qu'après avoir isolé les valeurs extrêmes, les valeurs du coefficient γ_2 sont comprises dans l'intervalle $[-0,8; +0,8]$ dans 91 % des cas et celles de γ_1 dans l'intervalle $[-0,5; +0,5]$ dans 98 % des cas. L'ajustement est donc considérablement amélioré.

La population des valeurs inférieures au seuil d'intervention obéit ainsi à une loi normale avec une beaucoup plus grande certitude. Cela va permettre de quantifier l'état géométrique de manière très précise en considérant d'une part l'ensemble des valeurs discrètes obéissant à une loi normale et d'autre part les valeurs extra-seuil d'intervention.

5. Conception de l'algorithme ANAVOI

L'algorithme ANAVOI est conçu pour l'analyse automatique en temps réel de l'état géométrique des voies. Il doit livrer, tout au long des campagnes de mesure, les informations objectives, chiffrées, répondant aux exigences d'une politique efficace de la maintenance des voies. Son principe découle directement des résultats obtenus au paragraphe 4.

En effet, si l'on connaît la valeur du seuil d'intervention, on sait quelles sont les valeurs (au nombre de n) à prendre en considération pour calculer :

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n z_i^2$$

$\hat{\sigma}^2$ est la variance empirique, estimateur sans biais de σ^2 qui caractérise entièrement la distribution des valeurs puisque celle-ci est centrée. Elle est de plus symétrique. Le calcul peut donc être effectué à partir des VDF ($v_i = |z_i|$) en faisant appel à la notion de moment absolu. Le moment absolu d'ordre k pour une loi normale est donné par [6] :

$$m_k = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot 2^{\frac{k-1}{2}} \cdot \left(\frac{k-1}{2}\right)! \cdot \sigma^k$$

Pour $k = 1$, la formule ci-dessus donne l'espérance mathématique des VDF :

$$E(v) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \sigma$$

Un estimateur sans biais de $E(v)$ est :

$$E = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n v_i$$

Il en résulte que :

$$\hat{\sigma} = \frac{1}{n} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \sum_{i=1}^n v_i$$

Dans les développements ci-dessus, la valeur du seuil d'intervention est supposée connue. En réalité cette valeur ne peut être calculée qu'après avoir entièrement parcouru le tronçon. Il faut donc mémoriser toute l'information relative au tronçon, ce qui nécessite un nombre considéra-

ble de mémoires. Cet inconvénient peut être éliminé grâce à la procédure décrite ci-dessous.

Des valeurs possibles du seuil d'intervention, appelées niveaux, sont fixées pour chaque paramètre de mesure. Pour chacun de ces niveaux, un additionneur fait la somme des valeurs d'amplitude supérieure au niveau considéré, alors qu'un compteur mémorise le nombre de valeurs additionnées.

Soient :

$N_0, N_1, \dots, N_j, \dots, N_k$ les niveaux,

$J_0, J_1, \dots, J_j, \dots, J_k$ le contenu des compteurs en fin de tronçon,

$S_0, S_1, \dots, S_j, \dots, S_k$ le contenu des additionneurs en fin de tronçon.

En choisissant $N_0 = 0$, il est alors possible de calculer :

$$\hat{\sigma}_t = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{S_0}{J_0}$$

l'indice t de $\hat{\sigma}_t$ signifiant que toutes les VDF ont été prises en considération.

La valeur du seuil d'intervention peut en être déduite :

$$SI = \alpha \cdot \hat{\sigma}_t$$

où α est le coefficient d'intervention. Sa valeur est fonction de la politique de maintenance. Pour des raisons statistiques, elle doit être voisine de 3. Il suffit ensuite de déterminer l'indice p du niveau le plus proche du SI pour trouver la contribution des valeurs extra-seuil d'intervention dans l'additionneur S_p , leur nombre dans le compteur J_p et calculer :

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{S_0 - S_p}{J_0 - J_p}$$

$\hat{\sigma}$ caractérise alors entièrement la loi normale ajustée sur la partie centrale de la distribution observée et J_p les valeurs extra-seuil.

6. Description de l'algorithme ANAVOI ; résultats

Le système de captage et de traitement des informations comprend les organes de mesure et de transformation des signaux, la table d'enregistrement de l'état géométrique et un mini-ordinateur ayant comme périphérique un lecteur-perforateur¹ de bande et une imprimante.

Le mini-ordinateur reçoit ses ordres du lecteur de bande perforée et fournit deux ensembles de résultats sur des supports différents :

- un listing des informations exigées en temps réel,
- une bande perforée contenant les résultats complets pour la banque d'informations du système de gestion intégré.

L'algorithme ANAVOI traite séquentiellement les paramètres dans l'ordre suivant : gauche, courbures, nivellements, écartement et dévers. A titre d'exemple, les fig. 4 et 5 décrivent les processus de traitement des informations relatives au gauche et aux courbures files gauche et droite en supposant qu'ils sont indépendants. Sur ces organigram-

mes, le processus est décomposé en sept blocs ayant pour fonction :

- (bloc A) — obtenir les signaux bruts et les signaux filtrés discrétisés² ;
- (bloc B) — contrôler le processus dans l'espace et dans le temps ;
- (bloc C) — compter les dépassements de seuils de sécurité fixes (SSX) ou flottants (SSF)³ ;
— signaler les dépassements de seuils de tolérance fixes (STX) ou flottants (STF)⁴ ;
- (bloc D) — enregistrer graphiquement les signaux bruts et imprimer des signes particuliers au droit des dépassements de seuils de sécurité et de tolérance ;
- (bloc E) — sommer et compter les VDF comprises entre les différents niveaux et la valeur du seuil de sécurité ;
- (bloc F) — calculer la valeur du seuil d'intervention SI, rechercher le niveau correspondant et le nombre de valeurs extra-seuil d'intervention ;
— calculer la valeur de $\hat{\sigma} = \text{SIGC}$;
— perforer sur bande les résultats complets de l'analyse ;
— mémoriser certains résultats intermédiaires pour l'utilisation des résultats en temps réel⁵ ;
- (bloc G) — calculer une note pour chaque paramètre de chaque tronçon temps réel. Dans les figures 4 et 5 il est prévu une note variant de 0 à k , où k est le nombre de niveaux, et une note moyenne a été calculée pour les deux courbures et pour les deux nivellements.

Lorsque l'extrémité d'un tronçon homogène ou d'un tronçon temps réel est atteinte, les informations concernant le prochain tronçon sont lues sur la bande perforée de commande qui contient le programme de la course de mesure.

Une campagne de mesure sur plusieurs lignes du réseau CFF a fourni sur bande magnétique les signaux bruts discrétisés tous les 0.5 m. Cela a permis de mettre au point l'algorithme ANAVOI avec l'ordinateur IBM 7040 du centre de calcul de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Les résultats de l'analyse par tronçon homogène pour la gestion, stockés sur bande, ont été reproduits dans la figure 6. Sachant que le pas de mesure utilisé dans les calculs est d'un mètre, la signification des valeurs obtenues est la suivante :

- SIGC chiffre l'état de détérioration moyen du paramètre de mesure sans prendre en compte les défauts locaux d'amplitude extrême,
- SI permet de déduire l'amplitude minimum de ces défauts,

¹ Le perforateur peut être remplacé par un enregistreur magnétique.

² Pour faciliter la représentation de l'organigramme, il a été admis ici que le filtrage est effectué analogiquement.

³ Ces défauts risquent de compromettre la sécurité des circulations.

⁴ Il s'agit de tolérances bien définies d'intervention ou de réception pour certains paramètres.

⁵ Pour permettre une exploitation efficace en temps réel des résultats sur listing, il convient de condenser les informations relatives à plusieurs tronçons homogènes successifs de caractéristiques voisines. Nous appellerons ces groupes de tronçons homogènes des tronçons temps réel.

Fig. 4

ALGORITHME "ANAVOI"

ORGANIGRAMME N°1: ANALYSE DU GAUCHE

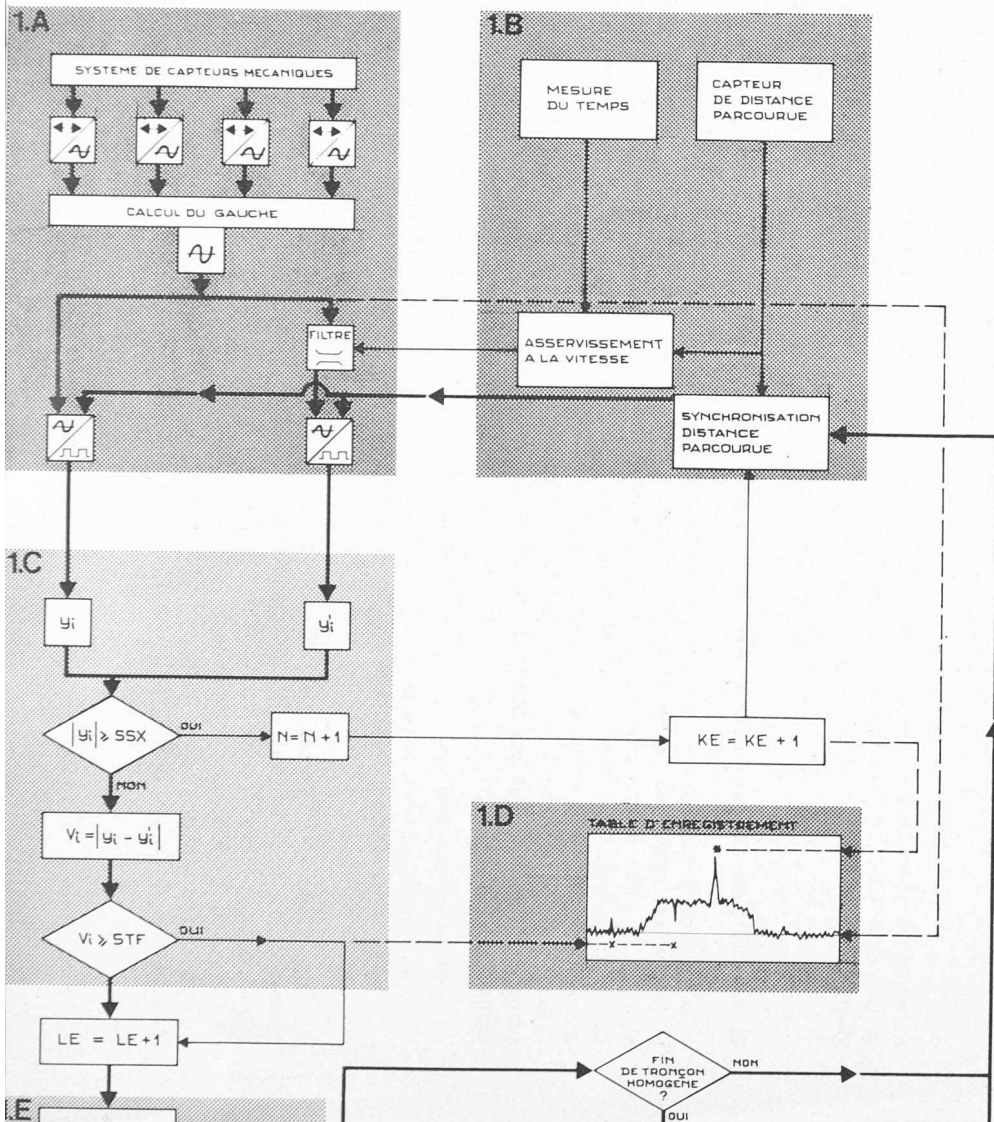
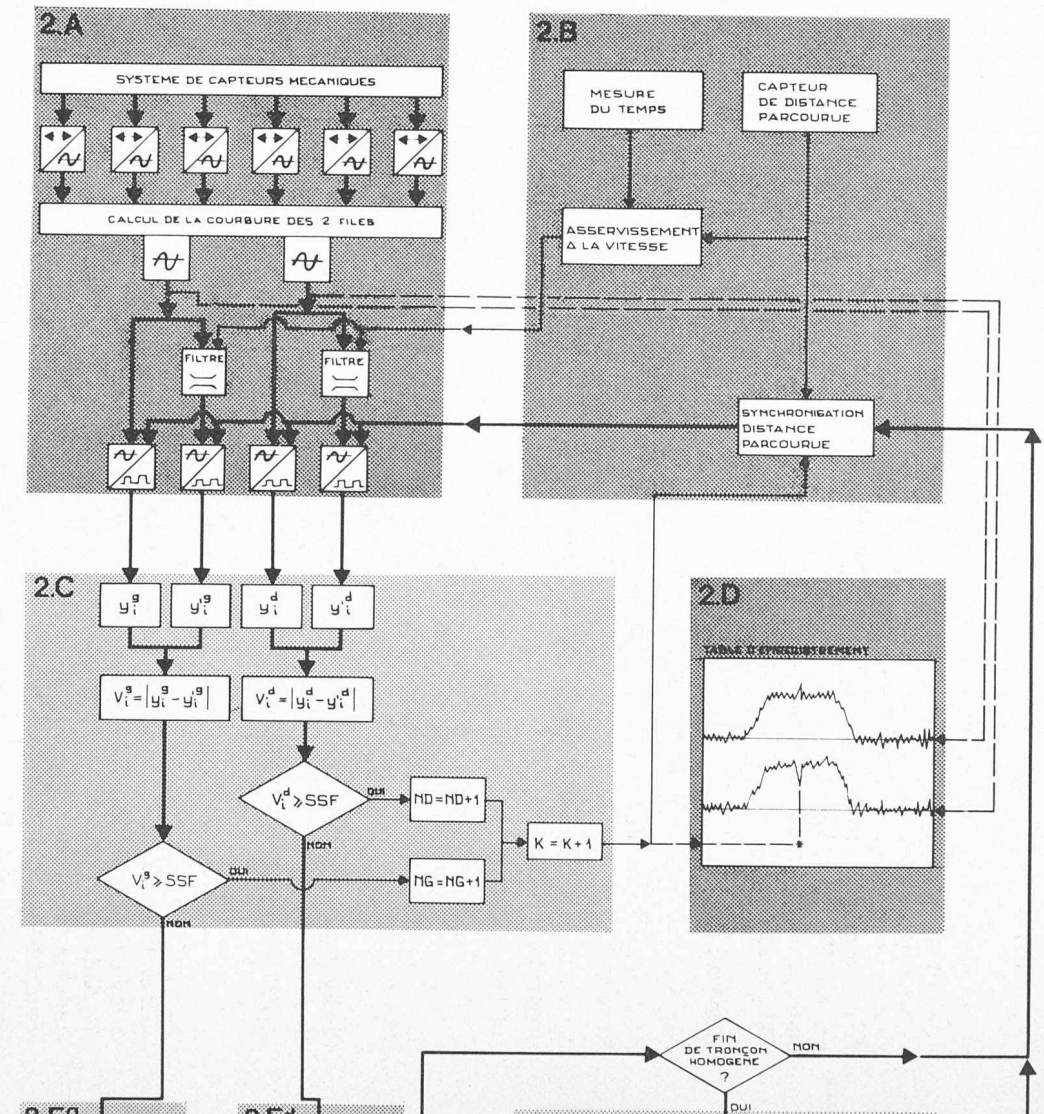
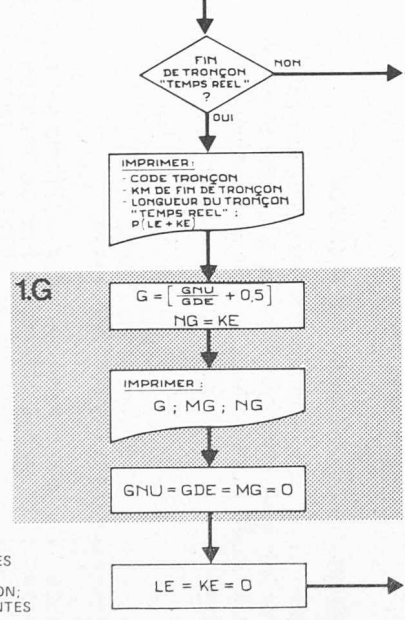
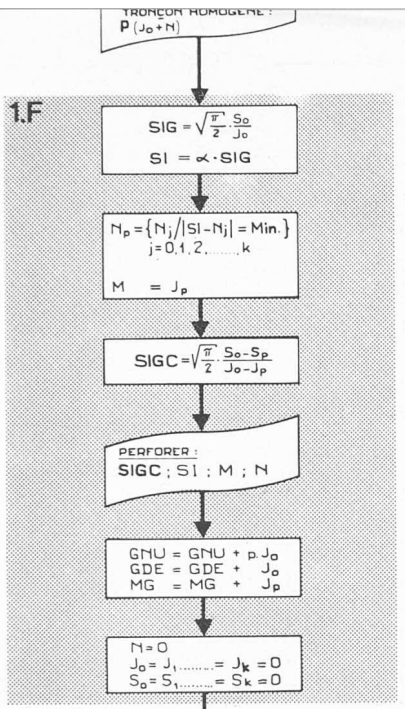
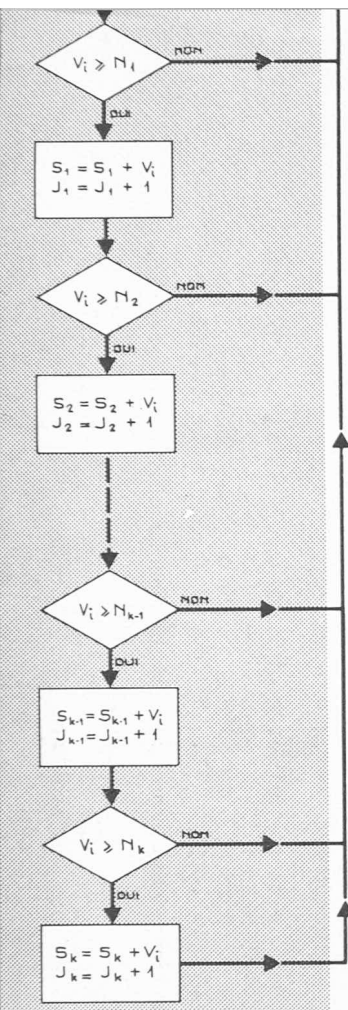


Fig. 5

ALGORITHME "ANAVOI"

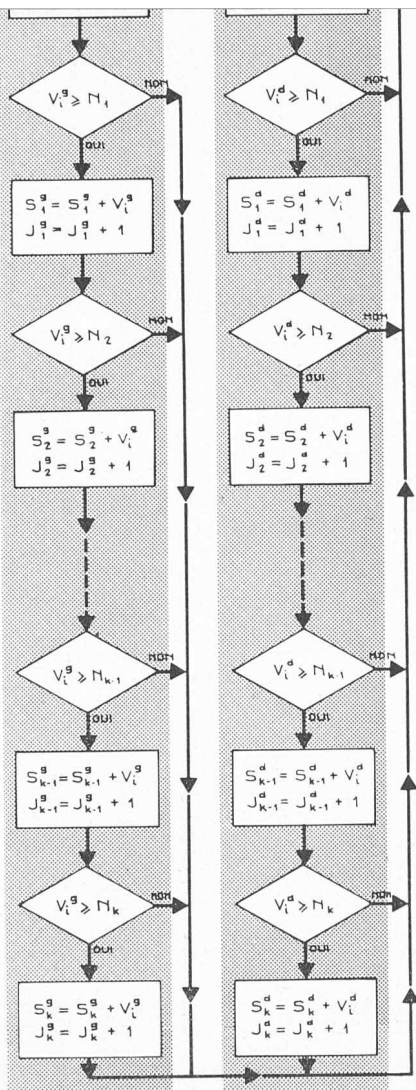
ORGANIGRAMME N°2: ANALYSE DE LA COURBURE





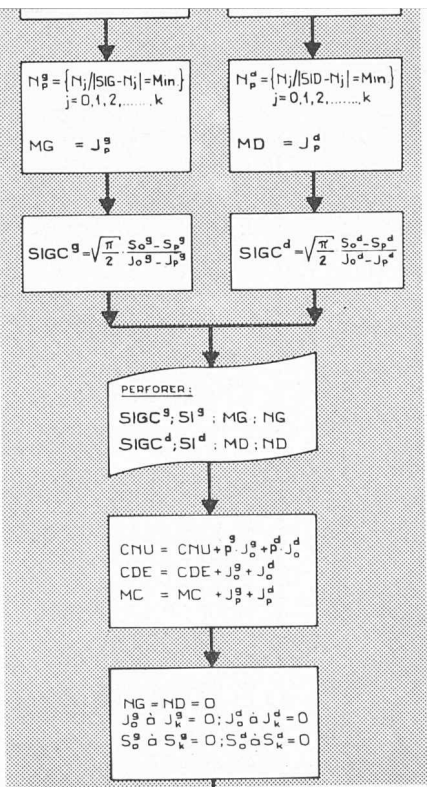
LIRE SUR LA BANDE
PERFORME LES
INFORMATIONS
RELATIVES AU
PROCHAIN
TRONÇON
HOMOGÈNE

LIRE SUR LA BANDE
PERFORME LES
INFORMATIONS
RELATIVES AU
PROCHAIN
TRONÇON
"TEMPS REEL"

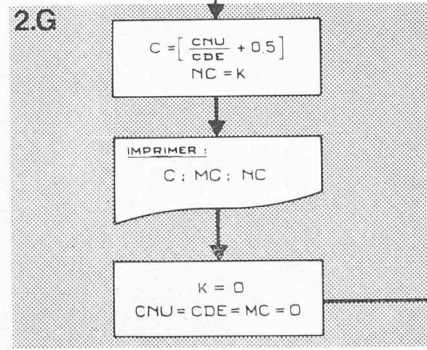


[X] : PARTIE ENTIÈRE DE X

N.B. LA DIFFÉRENCE ENTRE LES NOMS DES VARIABLES
DANS L'ORGANIGRAMME ET DANS LES SORTIES
PROVIENT DES EXIGENCES DE LA PROGRAMMATION ;
CEPENDANT LES CORRESPONDANCES SONT ÉVIDENTES



2.G



LIRE SUR LA BANDE
PERFORME LES
INFORMATIONS
RELATIVES AU
PROCHAIN
TRONÇON
HOMOGÈNE

LIRE SUR LA BANDE
PERFORME LES
INFORMATIONS
RELATIVES AU
PROCHAIN
TRONÇON
"TEMPS REEL"

[X] : PARTIE ENTIÈRE DE X

N.B. LA DIFFÉRENCE ENTRE LES NOMS DES VARIABLES
DANS L'ORGANIGRAMME ET DANS LES SORTIES
PROVIENT DES EXIGENCES DE LA PROGRAMMATION ;
CEPENDANT LES CORRESPONDANCES SONT ÉVIDENTES

RESULTATS PAR TRONCON HOMOGENE POUR LA GESTION

LEGENDE C = NUMERO DE CODE DU TRONCON HOMOGENE
 ***** KFTH = KILOMETRAGE EN METRES DE LA FIN DU TRONCON HOMOGENE
 L = LONGUEUR EN METRES DU TRONCON HOMOGENE

IDENTIFICATION		GAUCHE			COURBURE FG			COURBURE FD			NIVELLEMENT FG			NIVELLEMENT FD			ECARTEMENT			DEVERS		
C	KFTH	L	SIGC	SI	M	N	SIGC	SI	M	N	SIGC	SI	M	N	SIGC	SI	M	N	SIGC	SI	M	N
2001	38360	235	0.74	2.24	1	0	1.07	3.41	5	0	1.20	3.74	2	0	1.63	5.12	3	0	1.75	5.43	2	0
2002	37845	515	0.71	2.67	19	0	1.24	3.78	3	0	1.22	3.80	6	0	1.92	6.06	7	0	2.26	6.91	4	0
2003	37660	185	0.78	2.87	7	0	1.15	3.92	5	0	1.18	4.11	6	0	1.84	5.80	3	0	1.65	5.54	5	0
2004	37480	180	0.50	1.57	2	0	0.98	2.92	0	0	0.93	2.79	0	0	1.60	4.99	2	0	1.60	5.00	2	0
2005	37100	380	0.91	3.08	10	0	1.17	3.54	1	0	1.15	3.52	2	0	1.87	5.59	0	0	2.18	6.72	3	0
2006	36495	605	0.71	2.34	13	0	1.20	3.71	6	0	1.43	4.47	6	0	1.69	5.37	9	0	1.99	6.14	4	0
2007	36340	155	0.73	2.20	0	0	1.19	3.58	0	0	1.12	3.47	2	0	1.89	6.17	4	0	1.97	6.01	1	0
2008	35660	680	0.83	2.52	2	0	1.42	4.28	2	0	1.40	4.20	0	0	1.63	4.94	3	0	1.67	5.04	1	0
2009	34900	760	0.73	2.23	6	0	0.99	3.03	4	0	0.94	2.95	9	0	1.45	4.50	7	0	1.58	4.80	3	0
2010	34070	830	0.75	2.46	13	0	0.84	2.61	10	0	0.89	2.74	7	0	1.57	4.92	11	0	1.43	4.51	14	0
2011	33244	826	0.69	2.14	8	0	0.94	2.95	11	0	0.99	3.05	7	0	1.42	4.29	3	0	1.38	4.22	5	0
2101	32090	282	0.54	1.67	3	0	1.12	3.37	1	0	1.35	4.06	0	0	1.33	4.05	1	0	1.44	4.31	0	0
2102	31785	305	0.43	1.39	7	0	0.86	2.59	0	0	1.03	3.11	1	0	1.13	3.38	0	0	1.10	3.43	3	0
2103	30735	1050	0.39	1.28	24	0	0.89	2.72	6	0	0.88	2.65	4	0	1.09	3.30	2	0	1.14	3.50	8	0
2104	30395	340	0.45	1.41	4	0	1.02	3.09	2	0	0.88	2.69	2	0	1.08	3.32	3	0	1.04	3.21	3	0
2105	29800	595	0.31	1.06	19	0	0.88	2.64	2	0	0.99	2.98	0	0	1.09	3.32	3	0	1.08	3.26	2	0
2106	29245	555	0.48	1.53	7	0	1.03	3.11	1	0	0.94	2.87	2	0	1.19	3.74	6	0	1.19	3.68	5	0
2107	29132	113	0.43	1.26	0	0	0.89	2.76	1	0	0.79	2.50	2	0	1.03	3.07	0	0	1.08	3.24	0	0
2108	28290	842	0.43	1.39	16	0	1.18	3.64	7	0	0.85	2.63	7	0	1.32	4.06	5	0	1.20	3.73	9	0
2109	28103	187	0.36	1.16	3	0	0.91	2.78	1	0	0.69	2.07	0	0	1.10	3.33	0	0	1.22	3.66	0	0
2201	26028	556	0.68	2.22	15	0	1.22	3.67	1	0	1.33	4.05	3	0	3.12	9.77	7	0	2.90	9.13	8	0
2202	25407	621	0.56	1.82	13	1	1.15	3.54	5	0	0.98	3.04	6	0	1.94	5.87	1	0	1.89	5.77	3	0
2301	23204	1293	0.68	2.29	29	0	1.39	4.21	3	0	1.47	4.51	9	0	1.19	3.73	16	0	1.29	4.12	21	0
2302	22401	803	0.75	2.34	7	0	1.43	4.34	4	0	1.22	3.79	9	0	1.74	5.36	6	0	1.78	5.43	3	0

Fig. 6. — Résultats de l'analyse de l'état géométrique à introduire dans la banque d'informations du système de gestion intégré.

- M est la longueur de voie en mètres présentant ces défauts,
- N est la longueur de voie en mètres présentant des défauts qui dépassent les tolérances de sécurité.

La figure 7 reproduit le listing des résultats de l'analyse effectuée par tronçon temps réel sur la même section de voie. NO est une note moyenne au sens de SIGC ; M et N ont la même signification que précédemment, mais se rapportent maintenant au tronçon temps réel et aux deux files de rail en ce qui concerne la courbure et le nivellement. NG est réservé à une cotation globale de l'état géométrique. Les dernières informations de chaque ligne du listing indiquent les caractéristiques essentielles du tronçon — genre et date du dernier travail effectué, type et âge du matériel — pour les prises de décisions en temps réel.

7. Optimisation de l'algorithme ANAVOI

L'optimisation de l'algorithme consiste, pour une précision désirée des résultats, à minimiser le nombre d'opérations à effectuer et le volume de mémoires occupé afin de permettre son implémentation dans un mini-ordinateur.

La précision des résultats dépend notamment du nombre de niveaux. L'erreur commise sur la valeur de SIGC est toutefois en rapport avec la précision des mesures si le nombre des niveaux est de 15 à 25.

Le nombre d'opérations est fonction du pas adopté pour mesurer les signaux. Le pas de mesure optimal pour une précision donnée des résultats dépend des caractéristiques du signal et par conséquent du système de mesure et des défauts de la voie.

Théoriquement, le signal est complètement déterminé à l'aide des valeurs discrètes mesurées à intervalles égaux $1/2f$ si la fréquence spatiale du signal se situe dans une bande de 0 à f cycles par mètre [7]. Pour situer cette bande, la valeur de la demi-longueur d'onde moyenne des fluctuations du signal autour de sa ligne moyenne a été calculée pour plusieurs tronçons de voie. Selon le paramètre et l'état de la voie, cette valeur varie entre 3 et 6 mètres.

Il importe en pratique de ne pas ignorer des défauts locaux de faible longueur d'onde.

Les calculs effectués à l'aide de l'algorithme ANAVOI pour 400 tronçons homogènes en prenant successivement un pas de mesure de 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 et 2.5 m ont permis

RESULTATS PAR TRONCON TEMPS REEL

LEGENDE C = NUMERO DE CODE DU TRONCON TEMPS REEL
 ***** KFTR = KILOMETRE DE FIN DE TRONCON TEMPS REEL
 L = LONGUEUR EN METRES DU TRONCON TEMPS REEL

***** IDENTIFICATION GAUCHE COURBU. NIVELL. ECARTE. CARACTERISTIQU. *****

C	KFTR	L	NO	M	N	NO	M	N	NO	M	N	NO	M	N	NG
0020	33.244	5351	9	81	0	8	94	0	11	96	0	5	51	0	R2 68,60U,60A
0021	28.103	4269	4	83	0	6	39	0	7	50	0	6	29	0	R1 64,63E,63A
0022	25.407	1177	7	28	1	8	15	0	18	19	0	6	4	0	R2 68,49L,67AE
0023	22.401	2096	8	36	0	11	25	0	9	46	0	5	11	0	R1 65,49L,64AE

Fig. 7. — Résultats de l'analyse de l'état géométrique obtenus sur l'imprimante pour les prises de décisions en temps réel.

d'analyser et de vérifier ces phénomènes par une confrontation entre les valeurs de SIGC obtenues avec les quatre pas de mesure les plus grands et la valeur de SIGC obtenue avec le pas de 0.5 m. Cette confrontation révèle pour chaque paramètre que l'erreur relative est inférieure à 5 % dans moins de 10 % des tronçons si le pas de mesure se situe entre :

- 1.0 et 1.5 m pour le gauche, le dévers et l'écartement
- 1.5 et 2.0 m pour le nivellement
- 2.0 et 2.5 m pour la courbure.

TABLEAU 2

Paramètres des filtres numériques pour un pas de mesure $P = 1.0$ m

	Gauche	Courbure	Ecartement	Dévers
γ	5	5	5	5
μ	5	5	5	5
β	15	15	15	5
$2\beta P$ [m]	30	30	30	10

Il semble donc qu'un pas de mesure compris entre 1.0 et 1.5 m devrait être retenu pour analyser les paramètres de l'état géométrique relevés par une draisine PV6. Le tableau 2 donne les valeurs des paramètres des filtres numériques utilisés pour un pas de mesure $P = 1.0$ m. Dans ce cas, le filtrage numérique du gauche, des courbures, de l'écartement et du dévers nécessite la mémorisation de 130 valeurs discrètes. Il y a lieu de noter qu'en adoptant un pas de mesure égal à un sous-multiple de la demi-base de mesure pour les systèmes de mesure des flèches, l'équation du filtre préconisé donne, à un facteur constant près, la valeur de la flèche sur une base $(\beta + \mu)/\mu$ fois plus grande. Cette propriété peut être utilisée pour détecter et mesurer des défauts de plus grande longueur d'onde.

Relevons finalement les performances de l'algorithme ANAVOI comprenant le filtrage numérique : sachant que les valeurs discrètes du signal brut, mesurées tous les mètres de voie, sont stockées sur bande magnétique, la totalité du traitement et des opérations d'entrée-sortie a

été effectuée à raison de 130 km de voie par heure d'ordinateur IBM 7040. Or le mini-ordinateur qu'il est prévu de monter sur la voiture de mesure est environ trois fois plus rapide. Il est donc possible d'implémenter cet algorithme ; et la vitesse de circulation de 160 km/h prévue pourra être dépassée.

8. Conclusions

Une voiture moderne de mesure de l'état géométrique est en construction pour les Chemins de fer fédéraux suisses. Les équipements envisagés pour le système de traitement des informations sont tels qu'il sera possible d'implémenter l'algorithme ANAVOI sous la forme décrite dans cet article.

Il faudra encore mettre à l'épreuve ce système, apporter peut-être des modifications, mais d'ores et déjà il est légitime d'affirmer que l'essentiel des équipements et des modes de traitement des informations est acquis pour la quantification des mesures de l'état géométrique des voies. Il s'agit maintenant de mettre sur pied le système de gestion intégré de la maintenance des voies.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] D. GENTON : *Maintenance de la voie, approches d'une gestion intégrée*. Simpozij o suvremenom željeznikom kolosijeku, Zagreb 1969.
- [2] T. JUILLERAT et R. 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, N° 5 du 6 mars 1971.
- [3] L. GENT : *Analyse géométrique de la voie par traitement sur ordinateur*. 2^e Colloque ORE, « Programmes techniques de calculatrices », Derby- 16/18 mai 1972.
- [4] H. DEMUTH, C. GERHARDT, J. MAY, W. TRZASKOMA : *DOT test train program third progress report*. ENSCO, INC. Springfield, Virginia, June 1971.
- [5] I. NAKAMURA, K. WADA : *Data handling machine for N° 2 track inspection car of the New Tokaido Line*. Quarterly Report RTRI, vol. 7, N° 3, 1966.
- [6] B. V. GNEDENKO : *The theory of probability*. Chelsea Publishing Company, New York, 1967.
- [7] C. SHANNON and W. WEAVER : *The mathematical theory of communication*. The University of Illinois Press, 1949.

Adresse de l'auteur :

R. E. Rivier, Institut de technique des transports de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 9, chemin des Délices, 1006 Lausanne.

Bibliographie

Physique appliquée aux industries du vide et de l'électronique. — Tome II (en deux fascicules), par G.-A. Boutry, professeur au Conservatoire national des arts et métiers. Paris, Masson & Cie, 1971.

— *Fascicule 1* : L'électron dans les solides. — Emission des électrons. — Construction des tubes électroniques. — Un volume 16×25 cm, 240 pages, 211 figures. Prix : relié, 80 F.
— *Fascicule 2* : Optique électronique et tubes spéciaux. — Eléments de circuits semiconducteurs. — Un volume 16×25 cm, 254 pages, 218 figures. Prix : relié, 80 F.

Huit ans se sont écoulés depuis la rédaction de l'ouvrage dont voici la seconde édition en deux fascicules.

Le livre qui correspond à la deuxième année du cours professé au Conservatoire national des arts et métiers par le professeur G.-A. Boutry, est essentiellement consacré à la construction et à l'étude des propriétés des composants

électroniques. Pendant ces huit années, l'évolution rapide de nombreux chapitres du programme s'est confirmée avec des conséquences d'ailleurs prévisibles : certaines formes frustes des composants semiconducteurs ont disparu (transistors à pointes) ; — le champ d'application des composants semiconducteurs s'est étendu dans la double direction des circuits hyperfréquence et des puissances accrues ; les sous-ensembles intégrés ont commencé à prendre le pas sur les composants eux-mêmes, augmentant la fiabilité, diminuant les prix, les dimensions et l'encombrement des réalisations.

Pour tenir compte de cette évolution, on a refondu et développé considérablement les chapitres consacrés aux propriétés des semiconducteurs électroniques vrais, à la description et aux propriétés des composants semiconducteurs, diodes de toutes sortes, transistors à effet de champ (pour des raisons pédagogiques évidentes, c'est eux que l'on décrit en premier), transistors à double jonction, thyristors, etc...