

# Analyse de la relation entre l'uni et la qualité d'usage des routes

## Application à la fixation de spécifications pour les travaux neufs et à la définition de classes d'uni pour la gestion de l'entretien

### RÉSUMÉ

L'article présente les résultats obtenus dans deux études concernant la relation entre l'uni des chaussées et l'évaluation subjective et objective du confort. La première étude a été réalisée au LCPC dans le cadre d'un thème de recherche auquel ont participé Renault, Peugeot-Citroën et Michelin. La seconde étude a été réalisée au Portugal sous la direction des deux auteurs de cet article.

Les deux études ont été conduites suivant la même approche, à savoir :

- 1 sélection de sections dont les caractéristiques d'uni couvrent au mieux la variabilité possible de l'uni dans trois bandes d'ondes : petites, moyennes et grandes ondes ;
- 2 remplissage d'un questionnaire d'évaluation dans différentes rubriques liées au confort vibratoire par un panel restreint ;
- 3 mesures vibratoires sur le ou les véhicules utilisés pour l'appréciation du panel ;
- 4 traitement des données.

Pour les deux études, la moyenne par section des notes d'appréciation globale données par les membres du panel (variable subjective) est fortement corrélée à la moyenne quadratique de l'accélération verticale mesurée au niveau des glissières des sièges (variable objective) sur cette section. Ces deux variables peuvent être prédites à partir des énergies (ou notes) par bandes de bioctave. Les deux études montrent que les déformations du domaine des petites ondes jouent un rôle déterminant pour la qualité d'usage.

L'étude française a constitué une base pour l'élaboration d'une nouvelle circulaire sur l'uni des chaussées. Les données de l'étude portugaise ont été exploitées pour définir des classes d'uni pour la gestion de l'entretien des routes. Pour cette application, un complément d'étude par panel a été réalisé. Les résultats de ce travail confirment les principaux résultats des deux autres études.

**MOTS CLÉS :** 23-15-60 - Usager de la route - Mesure - Planéité - Bruit - Altération (gén.) - Revêtement (chaussée) - France - Portugal - Voiture particulière - Qualité - Confort - Recommandation - Entretien.

**Yves DELANNE**

Directeur de recherche  
Chef de section Surface des chaussées  
et dynamique des véhicules  
Division Gestion et entretien des routes  
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

**Paulo PEREIRA**

Professeur associé  
Département de Génie civil  
Université do Minho, Azurém  
Guimarães, Portugal

### Introduction

L'appréciation de la qualité d'une route portée par les usagers dépend de facteurs liés aux caractéristiques géométriques de la route, de son environnement, de ses conditions d'exploitation (densité, vitesse, fluidité et composition du trafic) et des caractéristiques de surface. Toutefois, en ne considérant pas les conditions d'exploitation, c'est le niveau d'uni qui est attaché de façon dominante à cette appréciation. Cette importance de l'uni a été prouvée dans les diverses enquêtes de satisfaction conduites dans le cadre des études relatives aux qualités d'usage des chaussées.

Le concept de qualité d'usage a été introduit en 1960 par Carey et Irick [1]. Cette étude, ainsi que la plupart de celles conduites dans les années suivantes avec la même approche, a établi que le jugement porté par un panel d'usagers est évalué correctement à partir d'un indice d'uni de type réponse et de l'état de dégradation de la couche de surface. Plus tard, il a été établi que le niveau d'uni, par ailleurs dépendant de l'état de dégradation, était un indice suffisant pour déterminer de façon prédictive ce jugement.

La limite principale de ces différentes études est le choix a priori d'un indice d'uni lié au moyen de mesure de l'époque : indice de type réponse. Entre 1982 et 1986, Janoff et ses collaborateurs [2-3-4] ont abordé cette question en mettant en cause la pertinence de ces indices. Dans leur travail, la recherche des meilleurs indices prédictifs est abordée de façon moins restrictive, ce qui a conduit à utiliser des indices spectraux en bandes d'ondes à bandes passantes relatives constantes (norme

ISO 8608 [5]). Ces indices sont calculés à partir du pseudo-profil relevé avec un appareil de type profilomètre. Leur analyse de la relation uni/qualité d'usage se fonde sur l'établissement d'une relation directe entre une note d'évaluation moyenne d'un panel restreint (variable expliquée) et différents paramètres d'uni (variables explicatives possibles). Il s'agit donc d'une analyse statistique fondée sur un plan d'expérience nécessairement limité pour des raisons d'ampleur.

L'uni constitue la caractéristique géométrique dominante apparente, mais ce n'est pas directement à partir de cet élément que les usagers portent leur jugement. En effet, abstraction faite des perceptions visuelles, comme cela a été démontré dans diverses études, ce jugement est fondé sur l'inconfort dû aux sollicitations dynamiques et vibratoires auxquels ils sont soumis dans le véhicule. Cet inconfort dépend bien de l'uni (en fait de l'ensemble des déformations géométriques de surface) mais aussi des caractéristiques de filtrage du véhicule et de sa vitesse.

L'utilisation d'un indice vibratoire du véhicule en variable explicative de l'évaluation subjective et en variable expliquée dans l'établissement des modèles uni/qualité d'usage (confort de roulement\*) permet de bénéficier des nombreux résultats d'études et de recherches de ce domaine, et notamment des normes s'y rapportant, et d'utiliser une donnée objective à la place de l'évaluation subjective pour l'établissement des modèles. Cette variable intermédiaire a été utilisée dans les études française [6] et portugaise [7].

## État des connaissances en 1992

Depuis 1984, les études ont été fortement marquées par l'expérience internationale de mesure de l'uni (International Road Roughness Experiment [8]). Elles établissent la relation entre l'indice d'uni international l'IRI (International Roughness Index, voir annexe III) et le niveau de service établi à partir du jugement d'un panel. La figure 1, extraite d'une étude australienne [9], montre que chaque étude a établi une relation particulière. Ces relations sont assez dispersées.

Il semble se confirmer, sur la base de quelques résultats récents, que chaque état (USA) ou pays disposant d'un réseau routier de qualité variable, avec des attentes d'usagers différentes, déterminera une relation spécifique entre la « qualité d'usage perçue  $I_{PSR}$  » et l'« indice international d'uni  $I_{IRI}$  ».

L'étude de Janoff et *al.*, commencée en 1982, a été réalisée dans le cadre du National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) [2]. La première étape fut une étude conduite dans cinq états sur une soixantaine de sections de 800 m de long avec un panel de trente-six personnes\*\*, ce qui conduisit à l'établissement de relations de la forme suivante [4] :

\* Dans les articles de langue anglaise les termes « serviceability » ou « riding quality » sont utilisés.

\*\* Jugement aux vitesses normales sur les voies (« normal operating speed »).

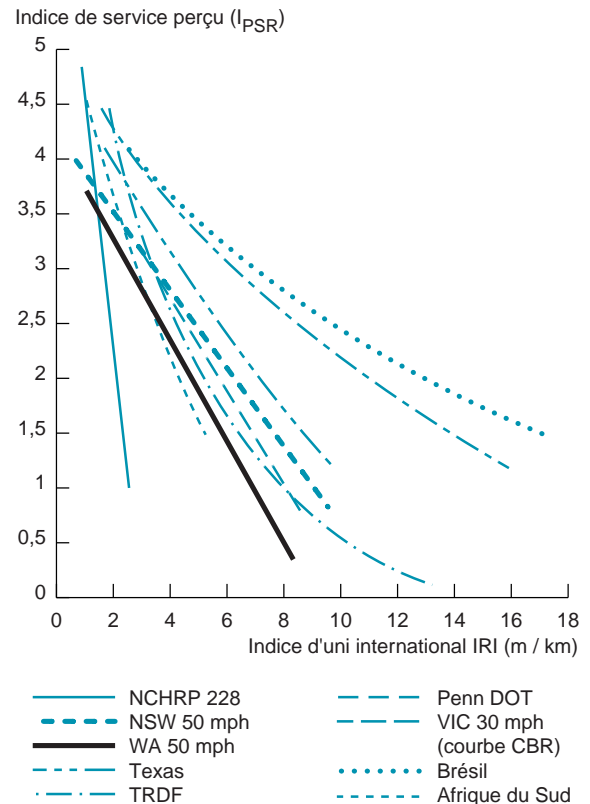


Fig. 1 - Relations entre l'indice d'uni perçu et l'indice d'uni longitudinal. Comparaison des résultats de l'étude australienne [9] avec les résultats d'autres études.

$$I_{MPR} = -\alpha - \beta / \lg I_{PSI}$$

ou

$$I_{MPR} = 5 \exp(-b I_{PI}^c) ***$$

avec

- >  $I_{MPR}$  : notation subjective moyenne (Mean Panel Rating),
- >  $I_{PI}$  : index de profil (Profile Index),
- >  $I_{PI}$  est la moyenne quadratique des amplitudes du profil dans la bande comprise entre 0,410 et 2,067 cycles/m (soit en longueur d'onde :  $0,48 \text{ m} < \lambda < 2,44 \text{ m}$ ).

Le second résultat, plus original, montre que les énergies spectrales de courte longueur d'onde expliquent le mieux le jugement porté (notation subjective moyenne,  $I_{PSR}$  : panel serviceability rating). La figure 2 donne les corrélations entre les valeurs des moyennes quadratiques par bande de tiers d'octave dans le domaine des courtes longueurs d'onde et la notation subjective moyenne.

Les bandes de fréquence de tiers d'octave sont référencées par un nombre dont la signification est donnée dans le tableau I. Les longueurs d'ondes centrales des octaves utilisées n'étant pas conformes à celles définies dans les normes ISO 8608 [5] et NF P 98-218-3 [10], elles sont aussi indiquées dans le tableau I.

\*\*\* Jugement aux vitesses normales sur les voies (« normal operating speed »).

TABLEAU I  
Bandes de tiers d'octave utilisées dans l'étude de Janoff

( $\lambda_c$  est la longueur d'onde centrale en mètres dans la bande) :

| N° bande    | 1      | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
|-------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\lambda_c$ | 123,86 | 98,31 | 78,03 | 61,93 | 49,15 | 39,01 | 30,97 | 24,58 | 19,51 |
| N° bande    | 10     | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    |
| $\lambda_c$ | 15,48  | 12,29 | 9,75  | 7,74  | 6,14  | 4,88  | 3,87  | 3,07  | 2,44  |
| N° bande    | 19     | 20    | 21    | 22    | 23    | 24    | 25    | 26    |       |
| $\lambda_c$ | 1,94   | 1,54  | 1,22  | 0,97  | 0,77  | 0,61  | 0,48  | 0,38  |       |

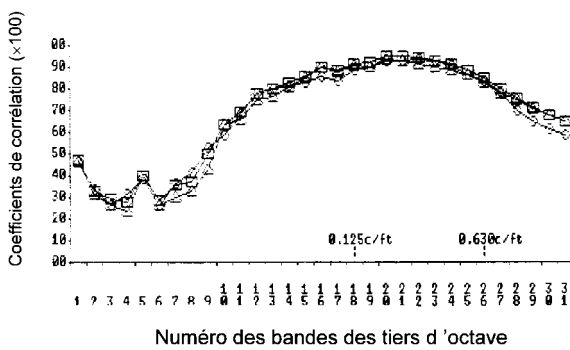


Fig. 2 - Corrélations entre les notes de service perçu ( $I_{PSR}$ ) et les énergies par bandes de fréquence tiers d'octave (figure extraite de [4]).

Cette étude montre que l'information profilométrique dans les petites ondes permet de bien prévoir la qualité d'usage des routes.

Un complément d'analyse de cette étude a été publié par Hayhoe [11]. Des résultats intéressants ont été obtenus en effectuant le regroupement des tiers d'octave suivant :

| Bandes  | Longueurs d'onde | Domaine   |
|---------|------------------|---|
| 2 à 9   | 110,3 à 17,4 m   | Domaine des grandes ondes (DGO)                                 |
| 10 à 17 | 17,4 à 2,74 m    | Domaines des moyennes ondes (DMO)                               |
| 18 à 25 | 2,74 à 0,43 m    | Domaine des petites ondes et début de la mégatexture (DPO + MT) |

Les coefficients de corrélation entre les valeurs moyennes quadratiques (Root Mean Square RMS) par bandes d'ondes et la note subjective moyenne (MPR en anglais) sont les suivantes :

|              |             |
|--------------|-------------|
| RMS DGO      | $r = 0,301$ |
| RMS DMO      | $r = 0,795$ |
| RMS DPO + MT | $r = 0,936$ |

Comme nous l'avons indiqué, ces études cherchent à établir des relations directes entre les notes moyennes du panel et des indices d'uni. Nous avons signalé l'intérêt d'utiliser en variable objective intermédiaire les indices vibratoires décrivant les sollicitations dynamiques auxquelles sont soumis les usagers.

Des études utilisant cette variable ont été conduites au Transport Road Research Laboratory (TRRL) en 1978 [13], au Texas en 1976 [14] et à l'Institute of Sound and Vibration Research (ISVR) en 1983 [15]. Les méthodes d'évaluation subjective utilisées dans ces études sont assez différentes, allant d'un panel très restreint (8 personnes) au sondage auprès de 600 personnes.

Les études du TRRL et du Texas montrent que, pour un réseau routier en état normal, la moyenne quadratique non pondérée\* de l'accélération à l'interface homme/siège est bien corrélée à l'expression de la qualité de la route. L'étude américaine indique que les résultats ne diffèrent pas entre les mesures faites sur le siège et à l'entrée du siège (vibration de la caisse). L'étude conduite à l'ISVR a abouti aux critères de la norme British Standard BS 6841 [16], critères repris dans la norme française AFNOR [17] et la norme ISO 2631 [18].

En conclusion, sur la base de cette analyse bibliographique et de l'état des connaissances au moment d'engager l'étude expérimentale française, la démarche de travail présentée sur la figure 3 a été choisie.

Rappelons que l'utilisation d'un indice vibratoire permet :

- > d'établir une liaison avec l'ensemble des connaissances acquises dans l'analyse du confort vibratoire des véhicules,
- > de tenir compte de la vitesse limite autorisée dans l'évaluation subjective par panel,
- > de disposer d'un nombre important de données pour l'établissement des relations entre uni et indice de confort (données par pas de 200 mètres).

\* Les normes sur l'inconfort vibratoire définissent différents filtres de pondération suivant les axes X, Y, Z.

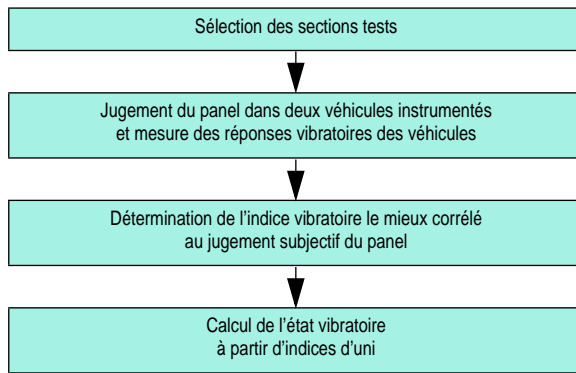


Fig. 3 - Démarche de travail pour l'étude française.

Pour compléter cette analyse bibliographique conduite en 1992, il faut signaler une étude publiée en 1994 [12] qui introduit l'indice de confort de roulement ( $I_{RN}$  : « Ride Number ») déterminé de la façon suivante :

$$I_{RN} = 5 \left[ \frac{\exp(-20I_{PIL}) + \exp(-20I_{PIR})}{2} \right]$$

Les variables explicatives  $I_{PIL}$  et  $I_{PIR}$  (notations utilisées dans l'article) sont les valeurs quadratiques moyennes des élévations pour les profils en traces gauche (L : left) et droite (R : right) filtrés par des filtres passe haut coupant à 0,417 cycle/m ( $\lambda \leq 2,4$  m). Dans cette étude, on compare, pour les études antérieures conduites avec la participation de Janoff, les corrélations entre l'évaluation moyenne du panel et cinq indi-

ces utilisés aux USA. Il s'avère que l'indice de confort de roulement ( $I_{RN}$ ) donne un meilleur résultat ( $r = 0,91$ ) que l'indice d'uni international  $I_{IRI}$  (coefficient de corrélation  $r = 0,77$ ).

## Étude réalisée en France (1992-1995)

Cette étude a été réalisée en étroite collaboration avec le monde de l'automobile et du pneumatique (Renault, Michelin, PSA Peugeot-Citroën). Les phases principales sont décrites ci-après.

### Sélection des sections

Dans un premier temps, à partir des données d'uni en notes par bandes d'ondes, nous avons sélectionné trente-sept sections à partir d'une centaine. Le choix de ces sections a été fait de manière à largement couvrir les combinaisons possibles en notes petites (PO), moyennes (MO) et grandes ondes (GO). Ces sections sont, pour la plupart, homogènes en notes par bandes d'ondes ( $N_{BO}$ ) et font une longueur de 1 500 à 4 000 m. La figure 4 donne la distribution des notes moyennes petites ondes ( $N_{PO}$ ), moyennes ondes ( $N_{MO}$ ) et grandes ondes ( $N_{GO}$ ) correspondantes.

Parmi ces trente-sept sections, quatorze ont été sélectionnées pour constituer le plan d'expérience (recours à un logiciel). La section de référence 38, proche du LCPC, a été ajoutée à ces sections. Ces quinze sections ont été jugées par un panel d'essayeurs (fig. 5).

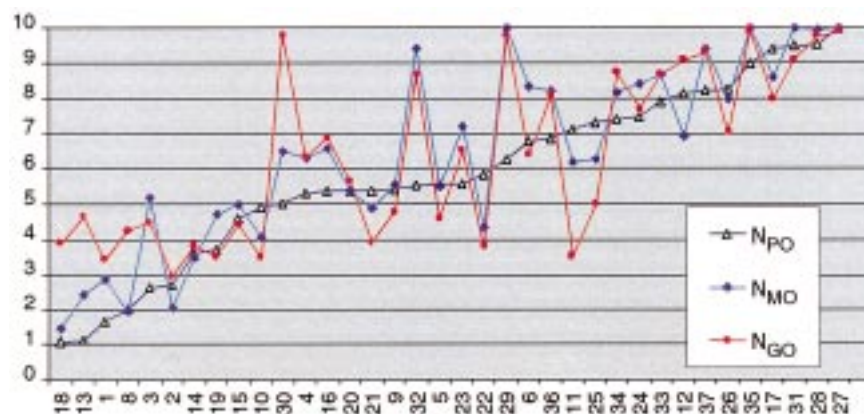


Fig. 4 - Distribution des notes petites, moyennes et grandes ondes ( $N_{PO}$ ,  $N_{MO}$ ,  $N_{GO}$ ) pour les trente-sept sections sélectionnées.

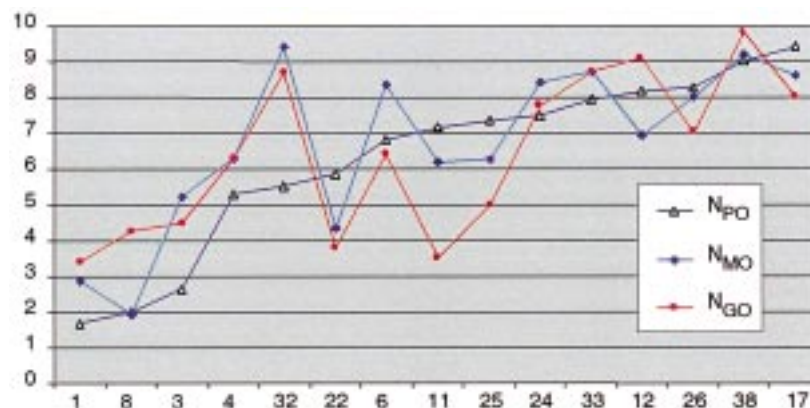


Fig. 5 - Distribution des notes par bandes d'ondes pour les quinze sections jugées par le panel.

## Constitution du panel

Nous avons constitué un panel « professionnel » de manière à concentrer l'attention des notateurs sur l'uni, en tenant peu compte des facteurs plus généraux d'appréciation de la qualité d'usage d'une route. Les six participants du monde de l'automobile et du pneumatique parmi les douze membres du panel sont des essayeurs professionnels. Les six autres membres appartiennent au monde de la route et sont bien sensibilisés, par leur expérience, au confort des véhicules en relation avec l'uni. Les douze membres du panel ont été regroupés par binômes associant de façon tournante un essayeur « automobile » et un essayeur « route ». Les membres du panel ont été alternativement « conducteur » et « passager » et ont rempli un questionnaire par véhicule à partir de ces deux situations vécues. Ils ont été interrogés à la fin des essais sur chaque section de manière à comprendre les raisons du jugement porté. La notation de la section 38, section de référence voisine du centre de Nantes, a été préparée soigneusement et fait l'objet de consignes précises et de débats, de manière à bien « caler » l'ensemble du panel.

## Questionnaire

Le questionnaire a été préparé par un groupe de travail associant Michelin, Renault, PSA et le LCPC sur la base des questionnaires utilisés dans le monde de l'automobile et du pneumatique. Outre l'évaluation globale de la section de route, les essayeurs devaient noter :

- les mouvements de caisse,
- les mouvements de siège,
- les vibrations,
- le bruit à l'intérieur de l'habitacle.

Le questionnaire utilisé est présenté sur la figure 6. Les définitions des termes du questionnaire sont données dans l'annexe I.

## Les véhicules instrumentés

Nous avons utilisé deux véhicules de moyenne catégorie : une Peugeot 306 XT et une Renault R21 TI. Sur les quinze sections jugées par le panel, des mesures d'accélération triaxiales (XYZ) « siège », longitudinale dossier siège conducteur (fig. 7) et verticales « glissières » ont été effectuées avec ces véhicules. La vitesse de consigne pour le jugement du panel et les mesures vibratoires était la vitesse limite autorisée sur la voie (130-110 et 90 km/h).

Ensuite, des mesures d'uni et de vibrations avec les véhicules instrumentés ont été effectuées sur les 37 sections sélectionnées au début de l'étude.

## Principaux résultats de l'étude

### Panel

Les jugements des membres du panel sont en général homogènes, avec toutefois une appréciation légèrement plus sévère par les membres appartenant au monde de l'automobile et du pneumatique. Les résultats des jugements sont donnés dans le tableau II.

| Questionnaire CONFORT       |                      |                          |         |                                      |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|---------|--------------------------------------|
| Essayeur :                  |                      | Date :                   |         |                                      |
| Matricule : acc - mouillé : |                      | Température extérieure : |         |                                      |
| Véhicule :                  |                      | Vitesse : 90 - 110 - 130 |         |                                      |
| Section d'essai :           |                      |                          |         |                                      |
|                             |                      | Critères                 | Note/10 | Commentaire                          |
| HF 0-2 Hz                   | Mouvements de caisse | Pourpays                 |         |                                      |
|                             |                      | Tangage                  |         |                                      |
|                             |                      | Roulis                   |         |                                      |
|                             |                      | Lacet/Tente de cap       |         |                                      |
|                             |                      | Roulis diagonal          |         |                                      |
| MF 2-8 Hz                   | Mouvements sur siège | Mouvements transversaux  |         |                                      |
|                             |                      | Tassements               |         |                                      |
|                             |                      | Rebondissements          |         |                                      |
| HF 8-80 Hz                  | Vibrations           | Touche de route          |         |                                      |
|                             |                      | Tremblements             |         | Volume/assise/dossier/plancher       |
|                             |                      | Percussions              |         | Volume/assise/dossier/plancher/bruit |
|                             | Acoustique           | Bruit de roulement       |         |                                      |
|                             |                      | Bruits de suspension     |         |                                      |
|                             |                      | Note globale             |         |                                      |

Fig. 6 - Questionnaire utilisé dans l'étude du LCPC.



Fig. 7 - Essais du LCPC avec la R21 ; accéléromètres à l'interface homme/siège.

TABLEAU II  
Évaluation du panel

| Références Sections | R21 TI  |            |                                | 306 XT  |            |                                |
|---------------------|---------|------------|--------------------------------|---------|------------|--------------------------------|
|                     | Moyenne | Écart-type | Intervalle de confiance à 95 % | Moyenne | Écart-type | Intervalle de confiance à 95 % |
| 1                   | 4,7     | 0,2        | 4,3 → 5,1                      | 4,8     | 0,2        | 4,3 → 5,2                      |
| 8                   | 3,5     | 0,2        | 3 → 3,9                        | 3,7     | 0,1        | 3,5 → 3,9                      |
| 3                   | 6,1     | 0,2        | 5,6 → 6,6                      | 6,5     | 0,2        | → 6,9                          |
| 4                   | 7       | 0,25       | 6,5 → 7,6                      | 7,3     | 0,2        | 6,8 → 7,8                      |
| 32                  | 6,5     | 0,2        | 6,2 → 6,9                      | 7,2     | 0,2        | 6,8 → 7,6                      |
| 22                  | 5,4     | 0,3        | 4,7 → 6,1                      | 5,7     | 0,2        | 5,2 → 6,2                      |
| 6                   | 7,4     | 0,2        | 6,9 → 7,8                      | 8       | 0,2        | 7,6 → 8,4                      |
| 11                  | 5,9     | 0,4        | 4,9 → 6,9                      | 6,3     | 0,45       | 5,3 → 7,2                      |
| 25                  | 6,1     | 0,2        | 5,7 → 6,5                      | 6,5     | 0,2        | 6,1 → 6,9                      |
| 24                  | 7,1     | 0,2        | 6,5 → 7,7                      | 7,7     | 0,3        | 7 → 8,3                        |
| 33                  | 6,5     | 0,2        | 5,8 → 7,3                      | 6,9     | 0,3        | 6,3 → 7,5                      |
| 12                  | 6,5     | 0,2        | 6 → 6,9                        | 7,2     | 0,2        | 6,8 → 7,6                      |
| 26                  | 8,1     | 0,2        | 7,7 → 8,6                      | 8,4     | 0,1        | 8,1 → 8,6                      |
| 38                  | 7,9     | 0,2        | 7,5 → 8,2                      | 8,4     | 0,3        | 7,8 → 9,9                      |
| 17                  | 7,8     | 0,3        | 7,4 → 8,2                      | 8,1     | 0,2        | 7,7 → 8,5                      |

### Indice vibratoire

Le dispositif instrumental comprenait plusieurs accéléromètres sur les sièges (fig. 7b) et au niveau des glissières des sièges avant. La moyenne quadratique de l'accélération verticale au niveau de la jonction siège/caisse (variables notées :  $R_{gsz}$ ,  $P_{gsz}$ ) s'est avérée être l'indice le mieux corrélé au jugement du panel ( $r > 0,85$ ), résultat en accord avec les études anglaise et texane.

### Variables prédictives

Les régressions directes entre les indices en bandes d'ondes et les notes moyennes du panel donnent des

modèles dont les coefficients de corrélation sont bons ( $r > 0,75$ ) mais dont les écarts types des écarts à la loi de régression sont trois fois plus élevés que les écarts types des notes du panel (tableau II). La figure 8 illustre les résultats obtenus.

Ces modèles, établis à partir de quinze données, ont la forme :

$$\text{Notes prédites} = a + bN_{PO} + cN_{MO} + dN_{GO}$$

a, b, c et d dépendent du véhicule et de la vitesse.

Les variables explicatives étant significativement corrélées (corrélation  $N_{PO}/N_{MO} = 0,82$  et  $N_{MO}/N_{GO} = 0,86$ ), ces modèles peuvent difficilement être

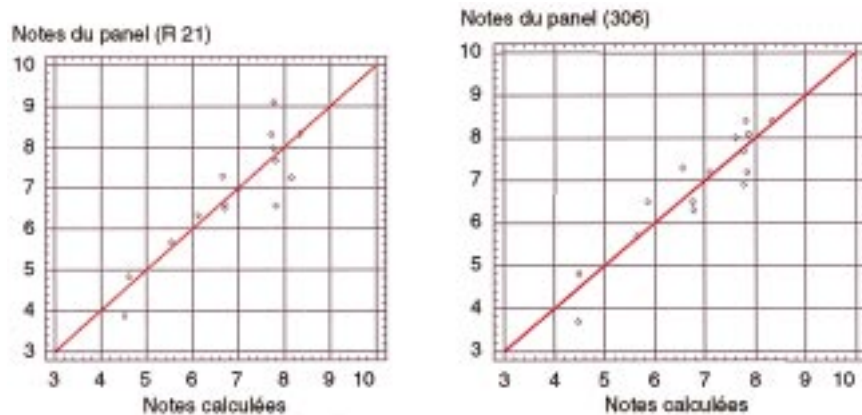


Fig. 8 - Régressions entre les notes du panel et les notes par bandes d'ondes.

validés. Ceci a conduit à utiliser l'indice vibratoire retenu ( $R_{gsz}$ ,  $P_{gsz}$ ) comme variable expliquée et à faire les calculs pour des données déterminées par pas de 200 mètres. Dans ce cas, les corrélations entre les variables explicatives sont significativement réduites et les modèles sont établis sur un nombre important de points (170 au moins). Le tableau III donne les coefficients des modèles prédictifs de la moyenne quadratique de l'accélération verticale à la jonction siège/châssis (au niveau des glissières  $R_{gsz}$  ou  $P_{gsz}$ ) établis à partir des notes par bandes d'onde\*. Les autres paramètres d'uni ( $I_{RI}$  ou  $I_{RN}$ ) donnent des modèles légèrement moins bons.

On constate que les coefficients des modèles sont assez semblables pour 90 km/h, cas pour lequel les petites ondes ont le coefficient le plus élevé (facteur le plus sensible). Pour la vitesse de 130 km/h, l'influence des caractéristiques des suspensions devient important : les petites ondes ont une influence dominante pour la Renault 21, alors que ce sont les ondes moyennes pour la Peugeot 306 (véhicule plus « souple »). La figure 9

\* Les meilleurs résultats sont obtenus avec les énergies par bandes d'octave mais, pour des raisons de pratique opérationnelle, ce sont les modèles établis avec les notes par bandes d'ondes qui ont été retenus.

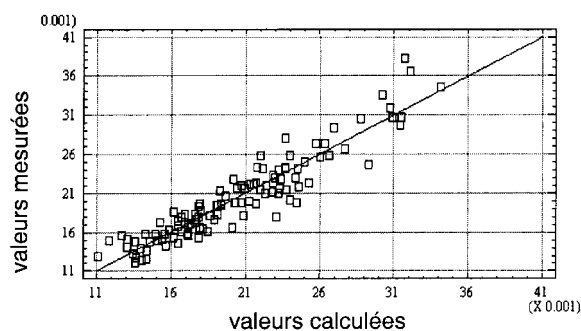


Fig. 9 - Relation entre les valeurs calculées et mesurées (170 points) de  $R_{gsz}$  accélération verticale à la jonction siège/caisse pour la R 21.

illustre la qualité des modèles ajustés (cas de la R21 à 90 km/h).

### Conclusion

Cette étude a montré que le niveau moyen quadratique de la sollicitation vibratoire verticale d'entrée du siège était un indice bien corrélé au jugement d'un panel professionnel pour les deux véhicules. Cet indice « objectif » de confort est calculable partir des indices d'uni avec une précision qui permet une évaluation des

TABLEAU III  
Coefficient des modèles  $R_{gsz}$  ou  $P_{gsz} = a + bN_{P0} + cN_{M0} + dN_{G0}$

|                          | Constante a | b ( $N_{P0}$ ) | c ( $N_{M0}$ ) | d ( $N_{G0}$ ) | $r^2$   |
|--------------------------|-------------|----------------|----------------|----------------|---------|
| Peugeot 306<br>90 km/h   | 1,84893     | -0,06728       | -0,05602       | -0,03361       | 85,87 % |
| Peugeot 306<br>110 km/h  | -2,26855    | -0,03725       | -0,03572       | -0,04295       | 83,37 % |
| Peugeot 306<br>130 km/h  | -1,77562    | -0,04152       | -0,07907       | -0,04195       | 65,75 % |
| Renault 21TI<br>90 km/h  | -1,84493    | -0,06629       | -0,05737       | -0,03429       | 86,01 % |
| Renault 21TI<br>110 km/h | -2,33341    | -0,06410       | -0,03165       | -              | 80,49 % |
| Renault 21TI<br>130 km/h | -1,57310    | -0,09699       | -0,0808        | -0,01512       | 79,79 % |

notes moyennes du panel avec une précision inférieure aux variations individuelles (utilisation du modèle note panel = f (indice vibratoire)).

Il a été montré que le modèle le plus précis est celui établi à partir des énergies par bandes d'octave (ISO 8608). Le regroupement par bi-octaves\* « petites ondes : PO », « moyennes ondes : MO » et « grandes ondes : GO » conduit à une prévision très légèrement moins bonne, mais restant tout à fait acceptable suivant le critère préalablement défini.

### Étude réalisée au Portugal (1998-1999)

L'étude du Portugal a repris en partie les méthodes appliquées dans l'étude française. Toutes les simplifications possibles, ne mettant pas en cause la validité de l'approche, ont été appliquées. Les études sont comparables sur les points suivants :

- > évaluation par un panel restreint (mais sans essayeurs professionnels au Portugal),
- > mesures de vibrations sur le véhicule.

Elles diffèrent sur les points suivants :

- > sections évaluées plus homogènes en termes de géométrie et d'environnement,
- > évaluation avec un seul véhicule et toujours à une vitesse de 90 km/h.

### Sélection des sections d'essais

Une présélection a été faite à partir des données d'une campagne de mesure d'uni sur le réseau routier portugais. Il s'agissait de retenir des sections pas trop éloignées et couvrant la dynamique possible en notes dans les trois bandes d'ondes. Le choix final a été fait en circulant sur ces sections présélectionnées avec un véhicule du même type que celui choisi pour l'évaluation du panel. Les caractéristiques d'uni, en notes par bandes d'onde, des dix-huit sections retenues sont présentées sur la figure 10.

On constate sur cette figure que les notes petites ondes couvrent un large domaine de variation (de 1 à 9). Cette figure montre aussi que les notes PO et MO sont sensiblement corrélées (tableau IV).

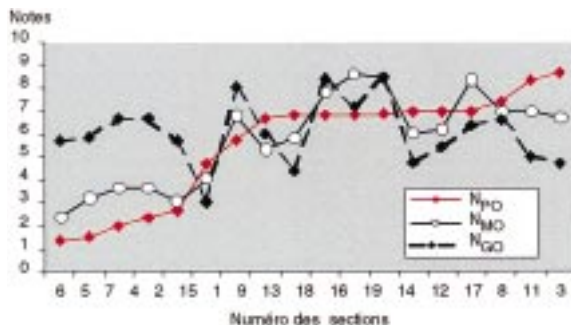


Fig. 10 - Notes petites, moyennes et grandes ondes sur les dix-huit sections.

\* Voir l'annexe 2 pour les définitions.

TABEAU IV

Corrélation entre les notes moyennes trace droite des 18 sections

|   |   |   |
|---|---|---|
| Corrélation $N_{PO}/N_{MO}$<br>$r^2 = 0,73$ | Corrélation $N_{PO}/N_{GO}$<br>$r^2 = 0,00$ | Corrélation $N_{MO}/N_{GO}$<br>$r^2 = 0,17$ |
|---|---|---|

Ce résultat est le meilleur obtenu lors de la sélection des trente sections initiales par la recherche de valeurs minimales dans la matrice de corrélation entre les notes. En effet, l'objectif de l'étude étant d'établir un modèle prévisionnel à partir des notes, une corrélation entre ces notes crée une difficulté due à la non indépendance des variables explicatives.

Les mesures d'uni ont été réalisées sur chaque section dans la trace droite et l'axe de la voie (notée gauche dans la suite de l'article\*\*). La figure 11 illustre les relations entre les notes dans ces deux traces. Les notes MO corrélées aux notes PO n'ont pas été tracées pour garder une courbe lisible.

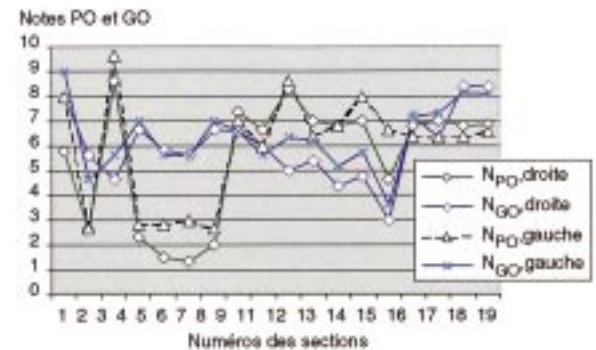


Fig. 11 - Comparaison des notes PO et GO dans les traces droites et gauches.

On constate quelques écarts ponctuels (jusqu'à deux points) entre les notes PO droites et gauches et des écarts faibles entre les notes GO droites et gauches, pouvant aller toutefois jusqu'à un point. Les notes PO en trace droite sont généralement légèrement inférieures aux notes en trace gauche.

### Jugement par panel

#### Le questionnaire

Un questionnaire simple a été établi à partir de celui qui a été utilisé en France. Ce questionnaire est présenté sur la figure 12.

Ce questionnaire comprend une évaluation globale notée en neuf niveaux et trois rubriques : dynamique globale du corps, dynamique du corps sur le siège et sollicitations vibratoires au niveau des mains (conducteur) et des pieds, notées en cinq niveaux. Le nombre de niveaux est impair pour avoir la possibilité d'une évaluation moyenne.

\*\* Pour la facilité d'identification de la variable pog au lieu de poa.



**Evaluation de l'uni par un panel d'usagers**

Section : 1 Route N4 Longueur : 1000 m sens : Montant/Extremat

Nom : \_\_\_\_\_ Véhicule  Route

1) Evaluation globale

1
2
3
4
5
6
7
8
9

mauvais ← Acceptable → excellent

2) Comment caractériser ce que vous avez ressenti en parcourant cette section de route?

|  | Peu sensible             | Sensible                 | Totalement sensible      |
|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Mouvement global du corps (mouvement de la caisse du véhicule) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Mouvement du corps par rapport au siège                        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Vibrations ressenties dans les pieds et dans les mains         | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Observations : \_\_\_\_\_

Fig. 12 - Questionnaire utilisé au Portugal.

### Le panel

Les membres du panel appartenait de façon paritaire au domaine de la route et au domaine de l'automobile. Huit personnes, dont trois femmes\*, ont effectué l'évaluation en étant alternativement conductrices et passagères dans une Renault CLIO modèle 1998. Quatre voitures identiques ont été utilisées.

À l'issue des essais du panel, les données obtenues sont des notes par section, par rubrique :

- évaluation/appréciation globale (variable :  $a_{gi}$ ),
- mouvements dynamiques du corps sur le siège (variable :  $m_{csi}$ ),
- vibrations ressenties dans les membres (pieds, mains variable :  $v_{pm}$ ).

Une analyse de variance a été faite sur les notes d'évaluation globale panel. Elle conclut qu'il n'y a pas de différence significative (au seuil de confiance à 95 %) entre les jugements des membres du panel. Par contre, l'analyse des données relatives aux autres rubriques a

\* Le panel de l'étude française ne comprenait aucune femme.

montré une certaine incohérence des jugements portés. Ces données n'ont donc pas été exploitées. Le tableau V donne les notes globales attribuées par les membres du panel.

La figure 13 donne la représentation « réduite\*\* » de la distribution des notes pour les dix-huit sections. On constate que deux membres du panel ( $a_{g5}$  et  $a_{g6}$ ) ont utilisé une échelle plus faible (4-7) que celle utilisée par les autres personnes. Quatre personnes, seulement, ont utilisé une échelle de 2 à 8. La figure 14 donne les notes moyennes pour chacune des sections.

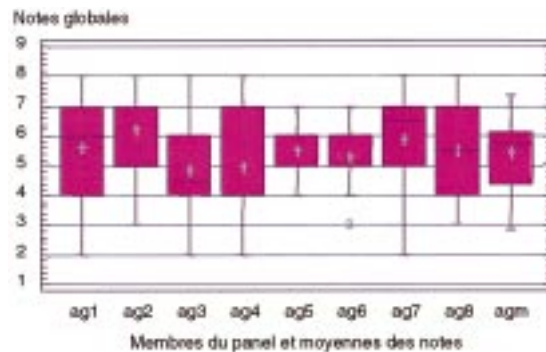


Fig. 13 - Distributions des notes par membre du panel ( $a_{g1}$  à  $a_{g8}$  et moyenne  $a_{gm}$ ) sur les dix-huit sections. Nota : le point isolé est considéré comme aberrant par le logiciel utilisé.

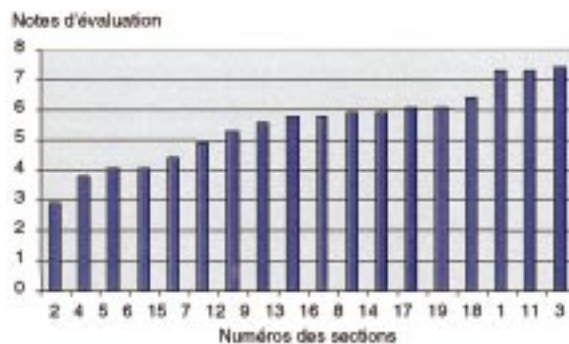


Fig. 14 - Variation des notes moyennes sur les dix-huit sections.

### Mesures des vibrations dans le véhicule d'essai

Pour les mesures de vibrations, les accéléromètres ont été placés sur les fusées des roues avant gauche et

\*\* Médiane, moyenne (croix), 50 % des valeurs dans les rectangles, valeurs extrêmes (box and whiskers plot).

TABLEAU V  
Traitement statistique des notes des membres du panel

| Sections                      | 1               | 2               | 3             | 4               | 5               | 6               | 7               | 8             | 9               | 11              | 12            | 13              | 14            | 15              | 16            | 17              | 18            | 19              |
|-------------------------------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|
| Moyenne                       | 7,3             | 2,9             | 7,4           | 3,8             | 4,1             | 4,1             | 4,9             | 5,9           | 5,6             | 7,3             | 5,3           | 5,8             | 5,9           | 4,4             | 5,8           | 6,1             | 6,4           | 6,1             |
| Écart-type                    | 0,3             | 0,4             | 0,3           | 0,3             | 0,3             | 0,3             | 0,4             | 0,5           | 0,3             | 0,3             | 0,3           | 0,4             | 0,5           | 0,3             | 0,5           | 0,3             | 0,3           | 0,2             |
| Intervalle de confiance à 95% | 6,7<br>↓<br>7,8 | 1,9<br>↓<br>3,8 | 6,7<br>↓<br>8 | 3,2<br>↓<br>4,3 | 3,4<br>↓<br>4,8 | 3,4<br>↓<br>4,8 | 4,0<br>↓<br>5,7 | 4,7<br>↓<br>7 | 4,9<br>↓<br>6,4 | 6,7<br>↓<br>7,8 | 4,5<br>↓<br>6 | 4,8<br>↓<br>6,7 | 4,7<br>↓<br>7 | 3,6<br>↓<br>5,1 | 4,5<br>↓<br>7 | 5,4<br>↓<br>6,8 | 5,7<br>↓<br>7 | 5,6<br>↓<br>6,7 |

droite et sur les glissières des sièges avant gauche et droite. À partir des signaux, les valeurs moyennes quadratiques pour chaque section ont été calculées.

### Analyse des données

Le nom des variables utilisées est donné dans le tableau VI.

TABLEAU VI  
Nom des variables utilisées dans l'étude de modélisation

|                   |   |                       |
|-------------------|---|-----------------------|
| N <sub>POd</sub>  | Notes Petites Ondes dans la trace droite        | (entre 1 et 10)       |
| N <sub>MOd</sub>  | Notes Moyennes Ondes dans la trace droite       | (entre 1 et 10)       |
| N <sub>GOd</sub>  | Notes Grandes Ondes dans la trace droite        | (entre 1 et 10)       |
| N <sub>POg</sub>  | Notes Petites Ondes dans la trace gauche        | (entre 1 et 10)       |
| N <sub>MOg</sub>  | Notes Moyennes Ondes dans la trace gauche       | (entre 1 et 10)       |
| N <sub>GOg</sub>  | Notes Grandes Ondes dans la trace gauche        | (entre 1 et 10)       |
| I <sub>IRId</sub> | Indice d'uni international dans la trace droite | (entre 0,5 et 10)     |
| I <sub>IRIg</sub> | Indice d'uni international dans la trace gauche | (entre 0,5 et 10)     |
| N <sub>pan</sub>  | Notes globales du panel                         | (entre 1 et 10)       |
| γ <sub>ls</sub>   | Accélération glissière gauche (valeur RMS)      | (entre 0,03 et 0,1 g) |
| γ <sub>rs</sub>   | Accélération glissière droite (valeur RMS)      | (entre 0,03 et 0,1 g) |

La première analyse conduite concerne la note globale moyenne (variable expliquée) et les différents indices d'uni (variables explicatives). Pour la suite de l'analyse, nous avons établi les modèles prédictifs des notes du panel en fonction des différentes variables explicatives possibles : indices d'uni et accélérations au niveau des glissières siège.

#### Calcul des notes du panel à partir des indices d'uni

■ Le premier modèle ajusté est de la forme suivante :

$$N_{\text{pan}} = a + b(N_{\text{POd}} + N_{\text{POg}})/2 + c(N_{\text{MOd}} + N_{\text{MOg}})/2 + d(N_{\text{GOd}} + N_{\text{GOg}})/2$$

Les tests statistiques montrent que, compte tenu de la corrélation entre deux des variables explicatives, le modèle à retenir est le suivant :

$$N_{\text{pan}} = 0,95 + 0,476(N_{\text{POd}} + N_{\text{POg}})/2 + 0,293(N_{\text{GOd}} + N_{\text{GOg}})/2$$

Le coefficient de corrélation carré (r<sup>2</sup>) ajusté en fonction des degrés de liberté est égal à 0,834. La figure 15 donne les écarts entre les notes données et les notes calculées avec le modèle.

■ Le second modèle ajusté est de la forme suivante :

$$N_{\text{pan}} = a + b(I_{\text{IRId}} + I_{\text{IRIg}})/2$$

Le modèle déterminé est :

$$N_{\text{pan}} = 7,82 - 0,91(I_{\text{IRId}} + I_{\text{IRIg}})/2$$

Le coefficient de corrélation quadratique (r<sup>2</sup>) ajusté en fonction des degrés de liberté est égal à 0,71. La figure 16 donne les écarts entre les notes données et les notes calculées avec le modèle.

Le modèle établi avec les valeurs moyennes des I<sub>IRI</sub> gauche et droite est significativement moins bon que le modèle établi avec les N<sub>BO</sub> (fig. 16). Le tableau VII résume les résultats obtenus.

TABLEAU VII  
Comparaison des modèles de prévision des notes globales moyennes du panel

| Type de modèle  | r <sup>2</sup> ajusté | Écart-type des écarts d'estimation |
|---|-----------------------|------------------------------------|
| N <sub>pan</sub> prédit à partir des N <sub>PO</sub> et N <sub>GO</sub> | 0,834                 | 0,516                              |
| N <sub>pan</sub> prédit à partir des N <sub>PO</sub>                    | 0,742                 | 0,644                              |
| N <sub>pan</sub> prédit à partir d'I <sub>IRI</sub> moyen               | 0,712                 | 0,680                              |

Il apparaît donc que les notes par bandes d'ondes permettent de prédire de façon plus exacte l'évaluation moyenne du panel. On constate que l'introduction de la variable N<sub>GO</sub> améliore significativement le modèle établi avec les Notes Petites Ondes (N<sub>PO</sub>) seules.

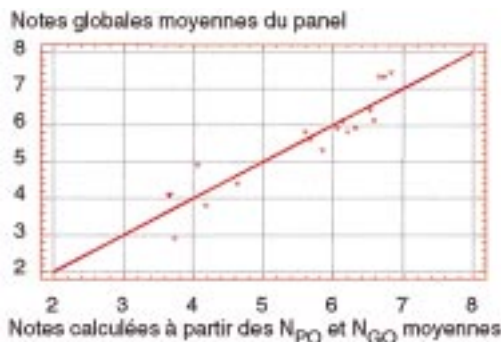


Fig. 15 - Écarts d'évaluation des notes globales du panel à partir des N<sub>PO</sub> et N<sub>GO</sub> moyennes.

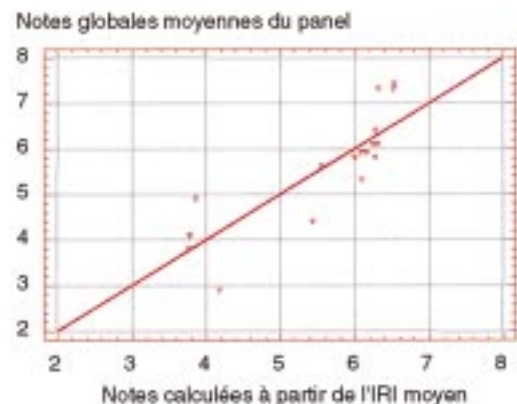


Fig. 16 - Écarts d'évaluation des notes globales du panel à partir des I<sub>IRI</sub> moyens.

Par ailleurs, il s'avère que l'indice d'uni international (IRI) peut se calculer avec une bonne précision à partir des notes petites et grandes ondes ( $r^2$  ajusté = 0,947). La figure 17 illustre le résultat obtenu.

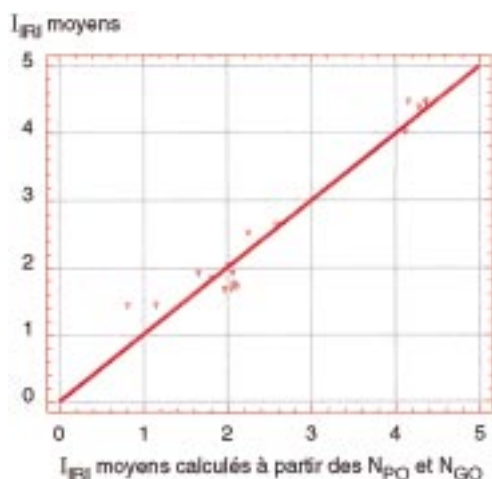


Fig. 17 - Écart d'évaluation des indices  $I_{IRI}$  moyen et  $I_{IRI}$  calculé à partir des notes  $N_{PO}$  et  $N_{GO}$  moyennes.

### Calcul des notes du panel à partir des accélérations « entrée » siège

L'estimation des notes moyennes du panel à partir des données vibratoires conduit à un coefficient  $r^2 = 0,833$  et à un écart type des estimations inférieur au demi-point (0,458). La figure 18 illustre ce résultat.

La loi de régression simple entre la variable principale  $N_{pan}$  et la variable secondaire considérée comme explicative de la première donne un coefficient de corrélation égal à  $-0,92$ .

La loi ajustée de la figure 19 est la suivante :

$$N_{pan} = -5,546 - 3,956 \ln (\gamma_{1s} + \gamma_{rs})/2$$

### Calcul des accélérations à partir des indices d'uni

Les modèles de prévision des valeurs moyennes quadratiques des accélérations de roues, régressions éta-

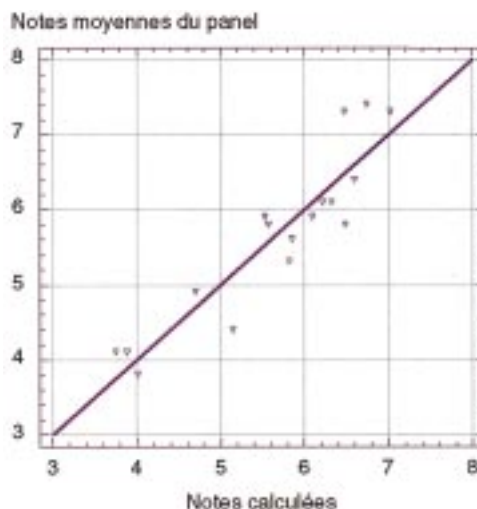


Fig. 18 - Estimations des notes moyennes du panel à partir des valeurs quadratiques des accélérations verticales au niveau des glissières des sièges gauche et droite.

blies à partir des variables  $N_{PO}$  et  $N_{GO}$  d'une part et la variable  $I_{IRI}$  d'autre part, ne sont pas significativement différents ( $r^2 \approx 0,85$ ). Les notes petites ondes sont les variables explicatives principales.

Les résultats obtenus pour les modèles prédictifs des accélérations moyennes des entrées siège sont résumés dans le tableau VIII.

TABLEAU VIII  
Estimations des valeurs moyennes quadratiques des accélérations des glissières des sièges à partir des indices d'uni

| Variables estimées                    | Modèle ajusté  | Valeur de $r^2$ | Écart-type des écarts |
|---------------------------------------|--|-----------------|-----------------------|
| $\ln [(\gamma_{1s} + \gamma_{rs})/2]$ | $-1,850 - 0,108(N_{POd} + N_{POg})/2 - 0,059(N_{GOd} + N_{GOg})/2$ | 0,920           | 0,0460                |
| $\ln [(\gamma_{1s} + \gamma_{rs})/2]$ | $-3,377 + 0,21(I_{IRIlg} + I_{IRId})/2$                            | 0,887           | 0,0870                |

### Conclusion

La prévision directe des notes moyennes du panel et des valeurs quadratiques moyennes des accélérations

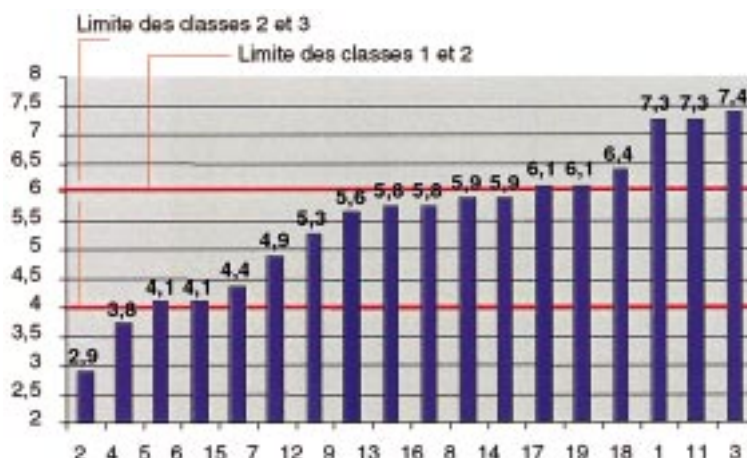


Fig. 19 - Définition de trois classes à partir des notes moyennes du panel.

verticales au niveau des glissières des sièges avant est légèrement meilleure à partir des notes par bandes d'ondes qu'à partir de l'indice d'uni international.

Les modèles de prévision des notes moyennes du panel et des accélérations moyennes verticales à partir des notes par bandes d'ondes sont rappelés dans le tableau IX.

TABLEAU IX  
Modèles liant les notes moyennes du panel et les accélérations verticales au niveau des glissières des sièges aux notes par bandes d'ondes

| Variabiles estimées                  | Modèles ajustés   | Valeur de r <sup>2</sup> |
|--------------------------------------|---|--------------------------|
| $\ln[(\gamma_{ls} + \gamma_{rs})/2]$ | $-1,850 - 0,108(N_{POd} + N_{POg})/2$<br>$- 0,059(N_{GOd} + N_{GOg})/2$ | 0,920                    |
| $N_{pan}$                            | $0,95 + 0,476(N_{POd} + N_{POg})/2$<br>$+ 0,293(N_{GOd} + N_{GOg})/2$   | 0,834                    |

On constate que  $N_{POd}$  et  $N_{POg}$  sont les variables dominantes. Il convient de rappeler toutefois que les variables  $N_{MOd}$  et  $N_{MOg}$  sont significativement corrélées avec les variables de petites ondes et exercent aussi une influence sensible sur la qualité d'usage des sections.

## Application des résultats

Les résultats des études réalisées en France et au Portugal ont été utilisés pour les spécifications de travaux neufs en France et la définition de classes d'uni pour la gestion de l'entretien au Portugal.

### France. Spécifications pour les travaux neufs

Les données vibratoires ont été interprétées de manière à définir différents niveaux de qualité en se référant aux seuils d'inconfort définis dans la norme BS 6841 [16]. Sur cette base et en utilisant les modèles statistiques, un tableau de spécifications a été établi (tableau X).

TABLEAU X  
Notes limites pour un niveau de qualité *minimal* en travaux neufs

| Bande d'ondes | 130 km/h                    | 110 km/h                    | 90 km/h                     |
|---------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|               | Limite inférieure des notes | Limite inférieure des notes | Limite inférieure des notes |
| PO            | 6                           | 6                           | 6                           |
| MO            | 7                           | 7                           | 6                           |
| GO            | 8                           | 7                           | 5                           |

Les valeurs des notes sont des limites inférieures arrondies au point correspondant à la limite inférieure de la classe « légèrement inconfortable » de la norme BS 6841.

### Portugal. Définition de classes d'uni pour la gestion de l'entretien

Pour cette étude, ce sont les notes du panel qui ont été interprétées. Sur la figure 19, trois classes ont été définies :

- > classe 1 : notes comprises entre 6 et 8 (sections 17, 19, 18, 1, 11,3),
- > Classe 2 : notes comprises entre 4 et 6 (sections 5, 6, 15, 7, 12, 9, 13, 16, 8, 14),
- > Classe 3 : notes comprises entre 2 et 4 (sections 2, 4).

Suivant la logique de cette classification, une note moyenne du panel inférieure à 4 correspond à la nécessité d'engager des travaux d'entretien vis-à-vis de la qualité perçue.

À partir du modèle reliant les notes du panel et les moyennes des valeurs RMS des accélérations gauche et droite ( $\gamma_{ls}$  et  $\gamma_{rs}$ ), on constate que les notes 4 et 6 correspondent sensiblement aux limites inférieures respectivement des appréciations légèrement inconfortable et inconfortable de la norme ISO 2631.

Les tableaux XI et XII ont été établis à partir des modèles reliant les notes du panel aux notes par bandes d'ondes et reliant les notes par bandes d'ondes entre elles ( $N_{PO}$  et  $N_{MO}$ ) déterminés dans l'étude.

TABLEAU XI

| $N_{PO}$ | $N_{MO}$ | $N_{GO}$ | $N_{PAN}$ |
|----------|----------|----------|-----------|
| 1        | 2,9      | 5,5      | 3,0       |
| 1        | 2,9      | 7        | 3,5       |
| 2        | 3,6      | 5,5      | 3,5       |
| 2        | 3,6      | 7        | 4,0       |
| 3        | 4,2      | 5,5      | 4,0       |
| 1,5      | 3,2      | 8        | 4,0       |
| 2,5      | 3,9      | 6,5      | 4,0       |
| 1,5      | 3,2      | 9,5      | 4,5       |
| 4        | 4,9      | 5,5      | 4,5       |
| 2,5      | 3,9      | 8        | 4,5       |
| 3,5      | 4,6      | 6,5      | 4,5       |
| 2        | 3,6      | 9        | 4,5       |
| 3,5      | 4,6      | 8        | 5,0       |
| 4,5      | 5,3      | 6,5      | 5,0       |
| 3        | 4,2      | 9        | 5,0       |
| 5,5      | 5,9      | 5        | 5,0       |
| 5,5      | 5,9      | 6,5      | 5,5       |
| 4        | 4,9      | 9        | 5,5       |
| 6,5      | 6,6      | 5        | 5,5       |
| 5        | 5,6      | 7,5      | 5,5       |
| 6,5      | 6,6      | 6,5      | 6,0       |

TABLEAU XII

| N <sub>PO</sub> | N <sub>MO</sub> | N <sub>GO</sub> | N <sub>PAN</sub> |
|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| 5               | 5,6             | 9               | 6,0              |
| 7,5             | 7,3             | 5               | 6,0              |
| 6               | 6,3             | 7,5             | 6,0              |
| 4,5             | 5,3             | 10              | 6,0              |
| 7               | 7               | 6               | 6,0              |
| 8,5             | 8               | 5               | 6,5              |
| 7               | 7               | 7,5             | 6,5              |
| 8               | 7,6             | 6               | 6,5              |
| 6,5             | 6,6             | 8,5             | 6,5              |
| 8               | 7,6             | 7,5             | 7,0              |
| 6,5             | 6,6             | 10              | 7,0              |
| 9               | 8,3             | 6               | 7,0              |
| 7,5             | 7,3             | 8,5             | 7,0              |
| 7,5             | 7,3             | 10              | 7,5              |
| 10              | 9               | 6               | 7,5              |
| 8,5             | 8               | 8,5             | 7,5              |
| 9,5             | 8,7             | 7               | 7,5              |
| 8               | 7,6             | 9,5             | 7,5              |
| 9,5             | 8,7             | 8,5             | 8,0              |
| 9               | 8,3             | 9,5             | 8,0              |
| 10              | 9               | 9,5             | 8,5              |

Ces tableaux confirment que les notes PO faibles (< 3) constituent le critère principal pour l'engagement de travaux d'entretien pour restaurer la qualité d'usage de la voie concernée. La valeur de la note MO permet de définir le type de travaux qu'il est nécessaire de conduire pour rétablir le niveau de qualité d'usage souhaité

par le maître d'ouvrage (couche d'épaisseur moyenne ou deux couches).

La nécessité de confirmer ces résultats établis sur peu de données a conduit à la réalisation d'un complément d'étude réalisé au début de l'automne 1999. Un panel restreint de six personnes groupées en trois binômes a noté cinquante sections représentatives de la variabilité du réseau en qualité d'uni (I<sub>IRI</sub> compris entre 1,2 et 4,5). Pour ces sections, quatre indices d'uni par trace (gauche et droite) : l'indice d'uni international (IRI), les énergies cumulées moyennes en petites, moyennes et grandes ondes (E<sub>PO</sub>, E<sub>MO</sub>, E<sub>GO</sub>) ont été déterminés à partir du pseudo-profil relevé avec l'analyseur de profil en long.

À titre d'illustration on donne sur la figure 20 la répartition des notes des membres du panel (mb1,2,...6) sur les dix premières sections. On constate des écarts qui peuvent atteindre plusieurs points pour les dix premières sections évaluées.

Plusieurs sections ont fait l'objet d'une double évaluation. Les deux jugements sont cohérents et ne sont pas significativement différents.

La moyenne des notes est retenue en variable expliquée pour l'établissement des modèles :

$$\text{Qualité perçue} = f(\text{indices d'uni})$$

Les indices d'uni, variables explicatives, sont l'indice d'uni international et les énergies par bandes d'ondes en trace gauche et droite. Le tableau XIII donne une comparaison entre les différents modèles établis. Les variables explicatives (I<sub>IRI</sub>, E<sub>PO</sub>, E<sub>MO</sub>) sont des valeurs moyennes pour les traces gauche et droite.

La figure 21 donne les écarts par rapport aux notes moyennes du panel des notes calculées avec trois modèles :

- le modèle avec les énergies petites et moyennes ondes (mod PO MO),

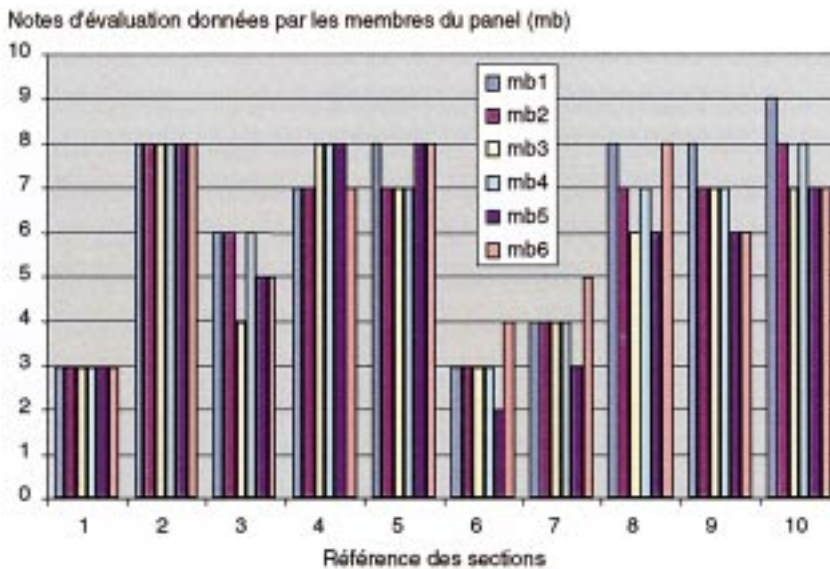


Fig. 20 - Distribution des notes des six membres du pane pour les dix premières sections évaluées.

TABLEAU XIII  
Comparaison des modèles

| Modèles   | Valeur du $r^2$ corrigé | Écart-type des écarts d'estimation |
|---|-------------------------|------------------------------------|
| $N_{\text{moy}} = 9,08707 - 4,17109 \lg(I_{\text{IRI}})$                              | 0,896                   | 0,523                              |
| $N_{\text{moy}} = 14,4808 - 1,34583 \lg(E_{\text{PO}}) - 0,585686 \lg(E_{\text{MO}})$ | 0,913                   | 0,478                              |

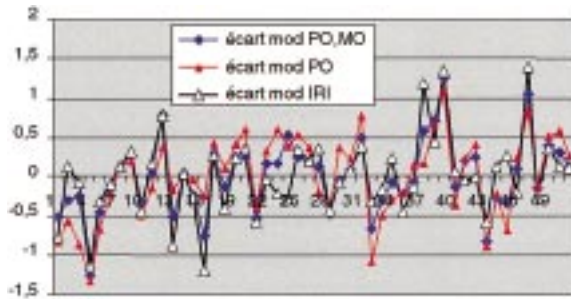


Fig. 21 - Écarts de prévisions des notes moyennes à partir de trois modèles  $N_{\text{moy}} = f(E_{\text{PO}}, E_{\text{MO}})$ ,  $N_{\text{moy}} = f(E_{\text{PO}})$  et  $N_{\text{moy}} = f(I_{\text{IRI}})$ .

- le modèle avec les énergies PO (mod PO),
- le modèle avec l'indice d'uni international (mod IRI).

L'analyse des écarts montre que le modèle utilisant les énergies (ou notes\*) petites ( $E_{\text{PO}}$ ) et moyennes ondes ( $E_{\text{MO}}$ ) en variables explicatives donne la distribution des écarts la mieux répartie.

Ce résultat confirme le résultat établi antérieurement.

La notation faite sur ces différentes sections peut être utilisée pour définir des classes de qualité. La répartition la plus logique conduit à définir trois groupes :

- la classe 3 comprenant les notes de 2 à 4 inclus,
- la classe 2 comprenant les notes de 5 et 6 inclus,
- la classe 1 comprenant les notes supérieures à 6.

## Conclusion

Les deux études effectuées en France et au Portugal montrent que l'évaluation subjective moyenne par un panel de la qualité de sections de routes et les accélérations

\* La note est calculée par transformation logarithmique à partir des énergies avec un arrondi.

tions verticales moyennes, non pondérées, au niveau des glissières des sièges (données mesurables) sont des variables fortement corrélées. Ces variables moyennes subjectives et objectives peuvent être prédites à partir des énergies ou notes par bandes d'onde.

Les modèles, qui dépendent de la vitesse, ont la forme suivante :

$$\text{Variable expliquée} = \Phi(\alpha N_{\text{PO}} + \beta N_{\text{MO}} + \gamma N_{\text{GO}})$$

Les modèles de prévision de l'indice vibratoire sont meilleurs que les modèles de prévision des notes moyennes du panel (0,936/0,834 pour l'étude portugaise).

L'étude française a bien montré que le jugement de qualité est lié au véhicule utilisé mais que la classification des sections faite avec deux véhicules différents reste identique. Dans cette étude, il a été possible d'établir les modèles sur un nombre important de données. Les modèles ajustés pour les deux véhicules montrent que le poids de chaque domaine d'ondes (petites, moyennes et grandes ondes) dépend des caractéristiques des suspensions du véhicule et de la vitesse considérée.

Pour l'étude portugaise, par suite de problèmes de mesure, les modèles de prévision de la variable vibratoire n'ont pu être établis sur des données par pas de 200 mètres.

Les deux études montrent que, pour une vitesse de 90 km/h, les déformations du domaine des petites ondes jouent un rôle déterminant pour la qualité d'usage. La variable  $N_{\text{MO}}$ , qui est souvent corrélées à la variable  $N_{\text{PO}}$ , joue aussi un rôle important sur cette qualité.

L'étude française montre que les ondes moyennes et grandes ont, pour les vitesses supérieures à 90 km/h, un « poids » qui dépend du type de véhicule (influence du filtrage de la suspension).

En termes d'application, l'étude exécutée en France a constitué une base de l'élaboration d'une nouvelle circulaire sur l'uni des chaussées. Les données de l'étude portugaise ont été exploitées pour définir des classes d'uni pour la gestion de l'entretien des routes. Pour cette application, un complément d'étude par panels a été réalisé. Les résultats de ce travail confirment les principaux résultats des deux autres études.

ANNEXE I  
Définitions des termes du questionnaire utilisé en France

|                         |   |
|-------------------------|---|
| Tenue de cap            | Capacité de garder la trajectoire malgré les sollicitations dynamiques dues à l'uni                     |
| Pompage                 | Mouvement vertical de la caisse par rapport au sol  |
| Roulis                  | Mouvement de la caisse autour d'un axe longitudinal du véhicule   |
| Tangage                 | Mouvement de la caisse autour d'un axe transversal du véhicule  |
| Roulis diagonal         | État de tangage et de roulis cumulé   |
| Mouvements transversaux | Mouvement transversal de la caisse par rapport au sol   |
| Tassement               | Mouvements verticaux secs et aléatoires de moyenne amplitude et dissymétriques ressentis sur les sièges |
| Rebondissement          | Mouvements verticaux secs et répétés de faible amplitude ressentis sur les sièges                       |
| Trépidations            | Vibrations entretenues ressenties dans le plancher, les sièges et le volant                             |
| Percussions             | Vibrations et chocs sonores lors du franchissement de dénivelées brusques                               |
| Toucher de route        | Capacité de gommer les petites inégalités du sol  |
| Bruit de suspension     | Bruit provenant des mouvements des suspensions  |
| Bruit de roulement      | Bruit de contact pneumatique/chaussée perçu à l'intérieur du véhicule                                   |
| Qualité de la route     | Note d'application générale de la qualité de la route   |

ANNEXE II  
Définition des énergies et notes par bandes d'ondes

La densité « spectrale de puissance » (DSP) de l'uni des chaussées, considéré comme un signal aléatoire continu de l'espace, est une courbe continue qui possède des propriétés particulières. Les figures ci-après donnent deux exemples de densités spectrales de puissance (estimées à partir du périodogramme moyen), établies selon les procédures décrites dans la norme ISO 8608 [5]. Ces DSP sont représentées sur une échelle bilogarithmique. On constate que des droites de régression peuvent être ajustées.

Quatre traits verticaux ont été tracés sur ces figures, ils distinguent trois gammes d'ondes :

- la première bande à partir de la gauche, dès le début de l'ajustement linéaire, correspond au domaine des grandes ondes ;
- la bande centrale correspond au domaine des ondes moyennes ;
- la bande la plus à droite, dans le domaine de la régression linéaire, correspond à la bande des petites ondes.

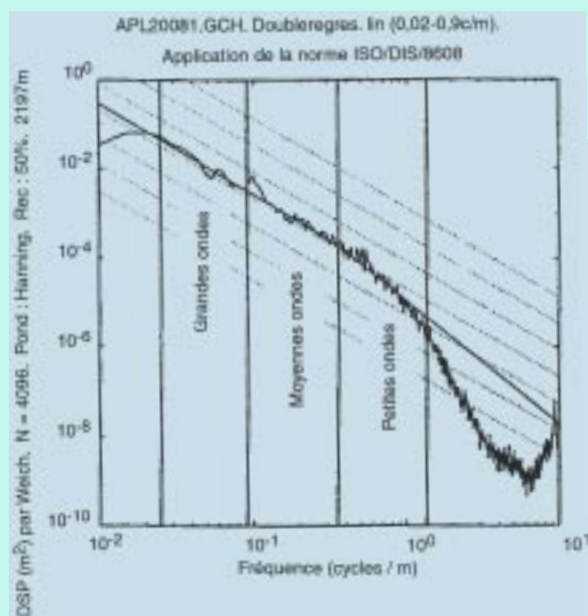


Fig. A2-1 - Périodogramme pour une section moyenne.

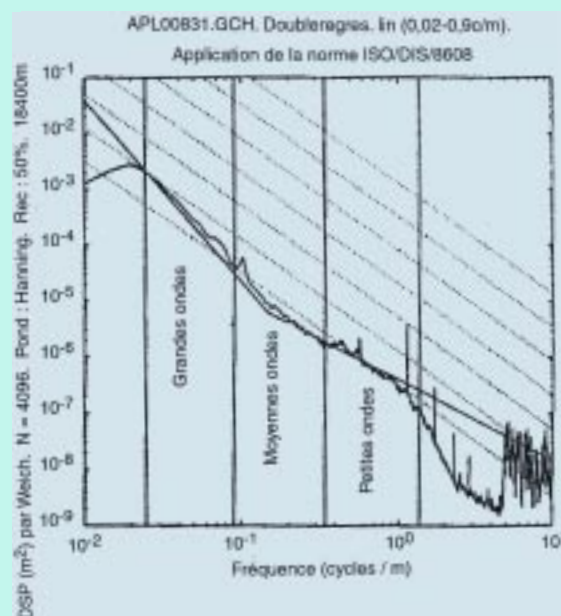


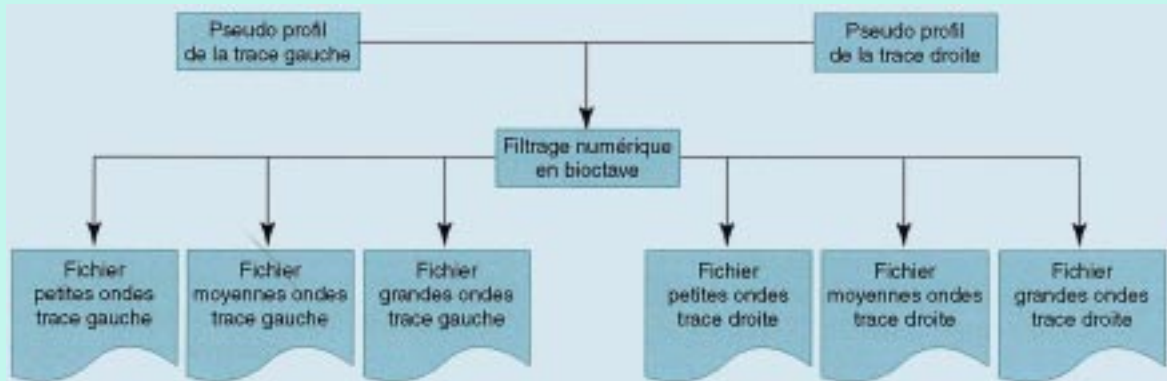
Fig. A2-2 - Périodogramme pour une bonne section.

Les limites de ces bandes sont définies dans la norme NF P 98-218-3 [10]. Ces limites sont rappelées dans le tableau suivant :

| Désignation         | Coupure basse en longueur d'ondes | Coupure haute en longueur d'ondes |
|---------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| petites ondes (PO)  | 0,707 m                           | 2,828 m                           |
| moyennes ondes (MO) | 2,828 m                           | 11,312 m                          |
| grandes ondes (GO)  | 11,312 m                          | 45,248 m                          |

#### Détermination des énergies et notes par bandes d'ondes

Le diagramme ci-après décrit le traitement des fichiers correspondants aux pseudo profils en trace gauche et en trace droite avec l'analyseur de profil en long (APL) permettant d'obtenir les fichiers par trace et par bandes d'ondes.



Les fichiers en bandes d'ondes, obtenus après une opération de filtrage numérique comprennent :

- > les fichiers petites ondes comprenant les octaves\* {1 m} et {2 m},
- > les fichiers moyennes ondes comprenant les octaves {4 m} et {8m},
- > les fichiers grandes ondes comprenant les octaves {16 m} et {32 m},

À partir de ces fichiers, on calcule les énergies par bandes d'ondes ( $E_{BO}$ ) de la manière suivante :

$$\text{Énergies sur une longueur } L : 10^{-3} \times 50 \sum_{k=i}^{i+L/0,05} z_k^2 \quad (1)$$

L'amplitude du signal  $z$  est donnée en millimètres et les énergies sont exprimées en centimètres cube, ce qui explique le «  $10^{-3}$  » dans la formule ci-dessus. Dans cette formule, «  $L$  » est exprimé en mètre.

Les notes par bandes d'ondes sont obtenues à partir de ces énergies par une transformation logarithmique :

$$N_{BO} = a \ln E_{BO} + b$$

\* Définies dans la norme NFP 98 218-3.



La définition mathématique est donnée à droite du schéma du quart de véhicule. L'indice d'uni international (International Roughness Index, noté  $I_{IRI}$ ) est un indice qui décrit les débattements de la suspension d'un quart de véhicule soumise aux sollicitations dues aux défauts d'uni de la route lorsque ce quart de véhicule se déplace à la vitesse de 80 km/h.

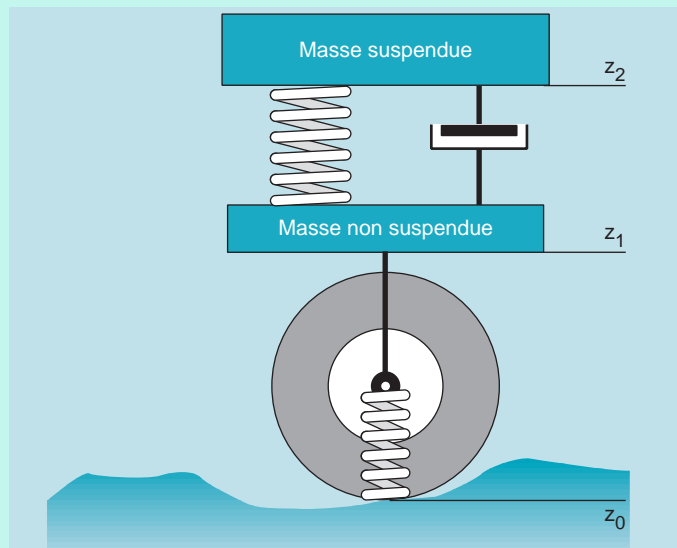


Fig. A3-1 - Schéma du quart de véhicule.

Définition de l'indice d'uni international :

$$IRI = \frac{1}{B} \times \int_0^B |z_2(x) - z_1(x)| dx$$

B est la base de calcul (longueur en m)  
x est l'abscisse sur le profil.

L'indice d'uni international est déterminé par l'application d'un algorithme de calcul au pseudo-profil numérisé. Il peut être estimé avec un intervalle de confiance inférieur au cinquième de sa valeur à partir des notes par bandes d'ondes. Le modèle a la forme suivante :

$$\lg I_{IRI} = a + bN_{PO} + cN_{MO} + dN_{GO}$$

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- |   |  |
|---|--|
| <p>[1] CAREY W.N., IRICK P.E. (1960), The pavement serviceability, performance concept. <i>Highway Research Board Bulletin</i>, <b>250</b>, Publication 739, pp. 40-58.</p> <p>[2] JANOFF M.S. (1982). Pavement roughness and rideability, <i>ZA State of the art Review. Transportation Engineering Journal of ASCE</i>, vol. <b>108</b>, n° TE6, November, pp. 662-675.</p> <p>[3] NICK J.B., JANOFF, M.S. (1983). Evaluation of panel rating methods for assessing pavement ride quality. <i>Transportation Research Record</i>, <b>946</b>, pp. 5-13.</p> | <p>[4] JANOFF M.S. (1986), Methodology for computing pavement ride quality from pavement roughness measurements. <i>Transportation Research Record</i>, <b>1084</b>, pp. 9-17.</p> <p>[5] ISO 8608 (1995), <i>Mechanical vibrations – Road surface profiles – Reporting measured data</i>.</p> <p>[6] DELANNE Y. (1996), <i>Effect of road unevenness on road users comfort</i>, Proceedings of the third International Symposium on Pavement Surface Characteristics, Christchurch, New Zealand, pp. 373-389.</p> |
|---|--|

- [7] PEREIRA P., DELANNE Y., FREITAS E. (1999), *Établissement des classes d'uni pour la gestion de l'entretien des routes*. SIAIS Porto, Editors P. Pereira et V. Miranda, pp. 295-311.
- [8] SAYERS M.W., GILLESPIE TD., QUEIROZ A.V. (1986), The international roughness experiment. *World Bank technical paper number*, **45**.
- [9] CAIRNEY P.T. et al. (1989), *A literature study of pavement user rating*. Research report ARR 161.
- [10] NF P 98-218-3 (1995), *Détermination de quantificateurs d'uni longitudinal à partir de relevés profilométriques*.
- [11] HAYNOE G.F. (1992), *Spectral characteristics of longitudinal highway profiles as related to ride quality*, Vehicle tire pavement interface, ASTM 1164, Editor Henry/ Wambold, pp. 32-53.
- [12] SPANGLER, E.B., KELLY J.W. (1994), *Development and evaluation of the ride number concept*, ASTM STP 1225, B.T. Kulakowski Editor, pp. 135-149.
- [13] COOPER D.R.C., YOUNG J.C. (1978), *Road surface irregularity and vehicle ride*, Part 2, Riding comfort in cars driven by the public, Department of the Environment, Department of Transport. Transport and Road Research Laboratory, Report SR 400.
- [14] SMITH C.C., McGEHEE D.Y., HEALEY A.J. (1976), *The prediction of passenger riding comfort from acceleration data*, Research Report 16, Department of transportation, Office of University Research, Washington D.C.
- [15] PARSONS K.C., GRIFFIN M.J. (1983), *Methods for predicting passenger vibration discomfort*, Passenger Car Meeting Michigan, SAE 831 029.
- [16] British Standard BS 6841 (1987), *Guide to Measure and evaluation of human exposure to whole body vibration and repeated shock*.
- [17] Norme française NF EN 1032 (1997), *Vibrations mécaniques. Essai des machines mobiles dans le but de déterminer l'intensité vibratoire transmise à l'ensemble du corps. Généralités*.
- [18] Norme ISO 2631 (1991), *Human exposure to mechanical vibration and shock*.

**Remerciements.** Les auteurs remercient Patrick Daburon (LCPC) pour sa contribution aux traitements des données vibratoires pour les deux premières études.

## ABSTRACT

### **An analysis of the relationship between the evenness and the riding quality of roads : application to the establishment of specifications for new construction works and the definition of evenness classes for maintenance management**

Y. DELANNE, P. PEREIRA

This paper presents the results from two studies of the relationship between pavement evenness and a subjective and objective assessment of riding comfort. The first of these studies was conducted by the LCPC as part of a research project in which Renault, Peugeot-Citroën and Michelin were also involved. The second study was conducted in Portugal under the supervision of the authors of this paper.

Both studies used the same approach, namely :

- 1 – selection of road sections which display the variability of evenness as well as possible in three wavebands – short, medium and long ;
- 2 – completion of a multiple section assessment questionnaire dealing with vibration comfort by a small panel of motorists ;
- 3 – vibration measurements of the vehicle or vehicles used by the panel for assessments ;
- 4 – data processing.

In the case of both studies, on a given road section the average overall rating given by the members of the panel (subjective) was strongly correlated with the rms value of the vertical acceleration measured at the seat rail (objective variable). It is possible to predict both these variables on the basis of their energies (or notes) in two octave bands. The two studies show that small wave length deformations are decisive in determining riding quality.

The French study provided the foundation for a new circular on pavement evenness. The data from the Portuguese study have been exploited in order to define evenness classes for road maintenance management. For this application, an additional panel study was performed. The results of this research have confirmed the principal findings of the other two studies.