

GNCDS - Sous-groupe Uni Longitudinal

Rédacteurs :

Pierre DUPONT - SETRA - Secrétaire du GNCDS
Bernard ROBERT - LRPC Saint Brieux
Yves MORLOT - COLAS Centre Ouest
Jean-Marc MARTIN - LCPC Nantes
Yves DELANNE - LCPC Nantes - Co-animateur du Sous-groupe Uni Longitudinal
Jean-Luc GAUTIER - COLAS S.A. - Co-animateur du Sous-groupe Uni Longitudinal

Uni longitudinal des couches de roulement neuves : des surprises à éviter

L'application depuis 2001 de la circulaire DR 2000-36 ne rencontre pas vraiment de difficultés... si ce n'est qu'il peut arriver des surprises (défauts à caractère périodique, phénomène de roulis) rendant la route inconfortable alors que la vérification de conformité est satisfaisante.

Il en est ici fait une description visant à informer les acteurs de la technique routière et à les inciter à la plus grande rigueur envers la mise en oeuvre d'une couche de roulement.

Avant-propos

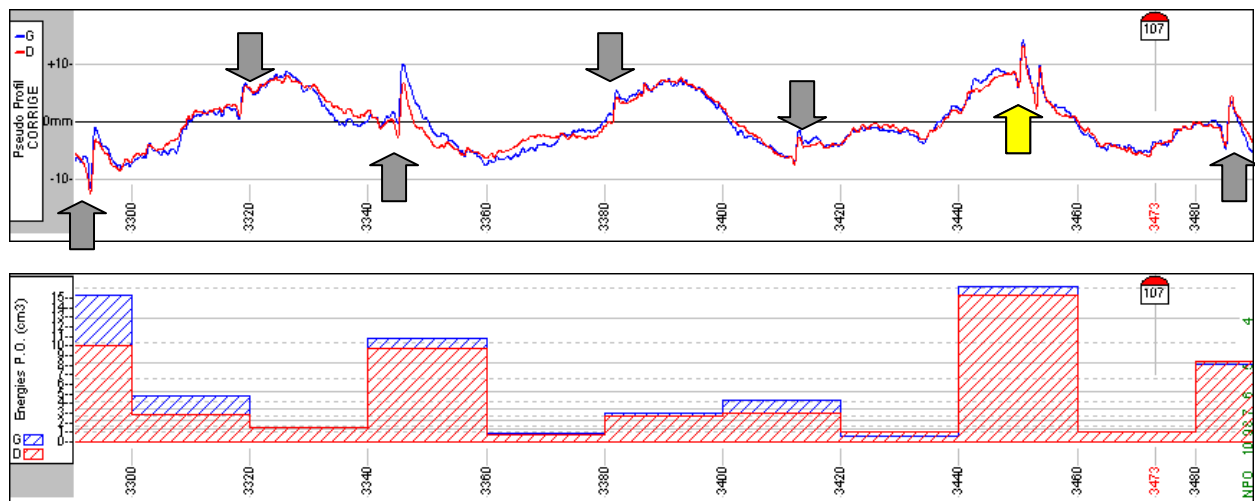
Afin de lever la confusion semblant exister, il convient tout d'abord de préciser l'appellation "à caractère périodique". S'agissant d'uni longitudinal des chaussées, elle s'applique à deux types de défauts distincts tels que décrits ci-après. Le premier est connu et ne pose généralement pas de problème d'application de la circulaire. En revanche, le second – moins connu – rend la route inconfortable pour les poids lourds alors qu'elle peut justement être en conformité avec la circulaire ; il justifie la présente note.

Du défaut périodique au sens cyclique (répétitif) du terme...

Dans ce premier cas de figure, il s'agit d'un défaut qui se reproduit à intervalles – plus ou moins – réguliers, et qui, dans la très grande majorité des cas, pénalise quasi exclusivement la bande PO (petites ondes) ; il provoque des accélérations verticales (secousses) à bord des véhicules. Des arrêts de finisseur intempestifs, et / ou des à-coups dans l'avancement du répandage de la couche, en sont la cause la plus fréquente.

Une illustration en est donnée par les deux graphiques ci-dessous (copies d'écran de l'application APL2000, logiciel d'exploitation de l'Analyseur de Profil en Long). L'exemple est tiré d'une "réhabilitation deux couches" au sens de la circulaire, avec un BBTM en roulement.

Le premier graphique (200 m de longueur) reproduit la variation des signaux APL bi-trace par rapport à l'échelle d'amplitude ± 10 mm. Les flèches indiquent les positions du défaut répétitif en question, dont l'effet sur le confort est proportionnel à la variation brusque d'amplitude des signaux (jusque 1 cm sur 1 m de long). L'intervalle d'apparition du défaut varie ici entre 25 m et 38 m. Les flèches vers le bas désignent un défaut PO non pénalisant vis-à-vis des spécifications de la circulaire (notes PO ≥ 6) ; à l'inverse, les flèches vers le haut désignent un défaut PO pénalisant ; la flèche jaune désigne le défaut correspondant à la vue ci-dessous.



En parallèle, conformément à la méthode d'essai LPC n° 46, le second graphique reproduit, tous les 20 m, la variation des énergies PO (échelle de gauche) et des notes PO correspondantes (échelle de droite). On y voit l'effet des défauts, qui font varier les notes entre 4 et 7 (notes arrondies) alors qu'elles sont de 9 et 10 hors défaut.

La vue ci-contre donne une image du défaut situé à l'abscisse 3.450 m. La flèche jaune repère la première bosse du défaut, que l'on devine grâce à la bande de guidage de TPC.



Face à ce genre d'aléas de répandage d'une couche de roulement (succession d'arrêts... d'à-coups, souvent liés à l'organisation de chantier), l'application de la circulaire débouche généralement sur la réfection de la couche de roulement.

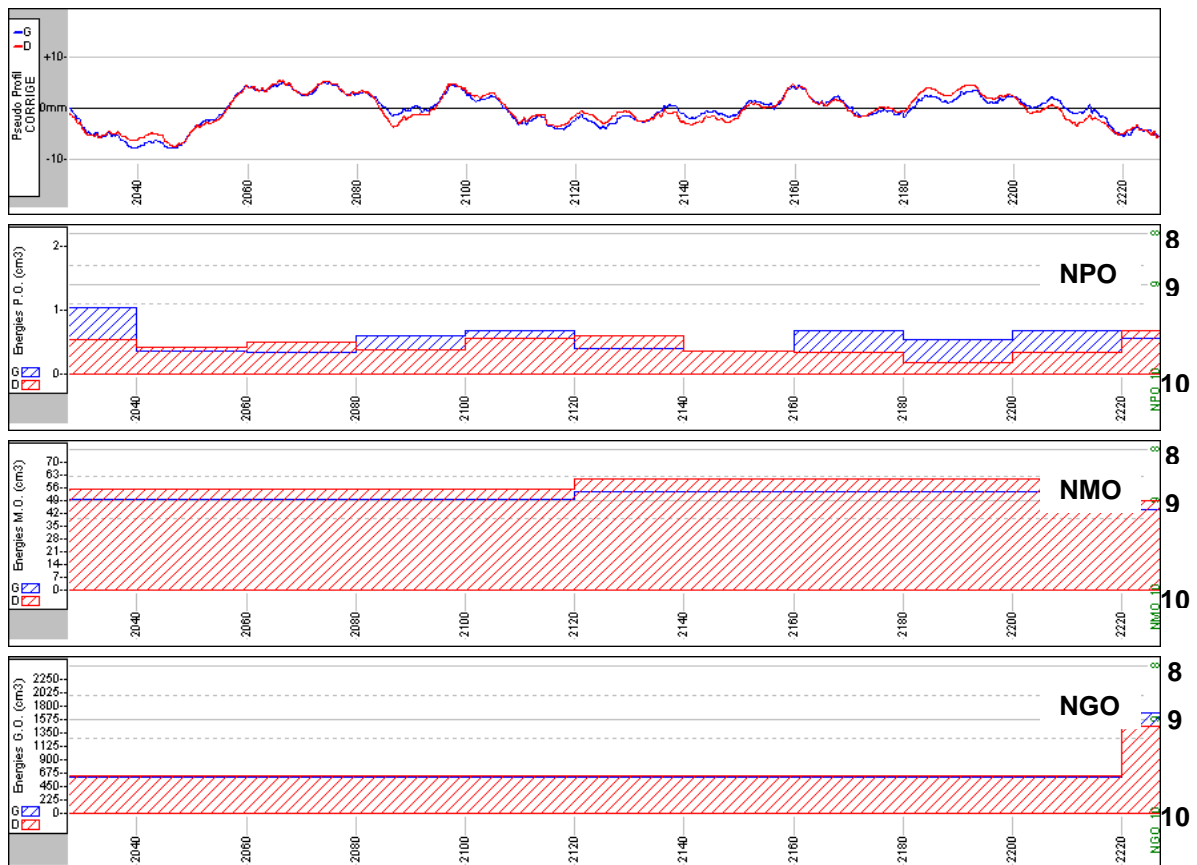
Au défaut périodique au sens mathématique (sinusoïdal) du terme...

Dans ce second cas de figure, il s'agit d'un défaut qui se reproduit en suivant une variation proche d'une fonction périodique, avec une amplitude (faible) et une longueur d'onde (le plus souvent moyenne (MO)) relativement constantes. Il a pour particularité d'être sans effet – ou très peu... à vitesse trop élevée (!) – sur les véhicules légers, et par contre d'être gênant pour les poids lourds (empattement plus grand). A bord de ces derniers, il provoque un mouvement régulier d'oscillation verticale dont l'inconfort est d'autant plus mal ressenti que le défaut se répète sur une longueur importante. Un dysfonctionnement ou un mauvais réglage d'un organe du finisseur – pas toujours évidents à identifier –, sont reconnus pour en être à l'origine.

Une illustration en est donnée par les graphiques ci-dessous (copies d'écran de l'application APL2000).

L'exemple est tiré d'un chantier de construction : deux couches de grave-bitume plus 2 x 4 cm de BBM, où le défaut en question existe de manière plus ou moins marquée... sur plus de 5 km. Il est à noter que l'auscultation APL de la couche de base en grave-bitume n'avait rien révélé de particulier.

Le premier graphique (200 m de longueur) reproduit la variation des signaux APL bi-trace par rapport à l'échelle d'amplitude ± 10 mm. On y voit très bien la présence d'une sinusoïde, qui est d'autant plus lisible que les signaux varient peu de part et d'autre de l'amplitude zéro, témoignant ainsi d'un uni a priori très satisfaisant dans les bandes d'ondes MO et GO.



En parallèle, conformément à la méthode d'essai LPC n° 46, les trois autres graphiques reproduisent, tous les 20 m, 100 m et 200 m, la variation des énergies PO, MO et GO (échelles de gauche) et des notes PO, MO et GO correspondantes (échelles de droite).

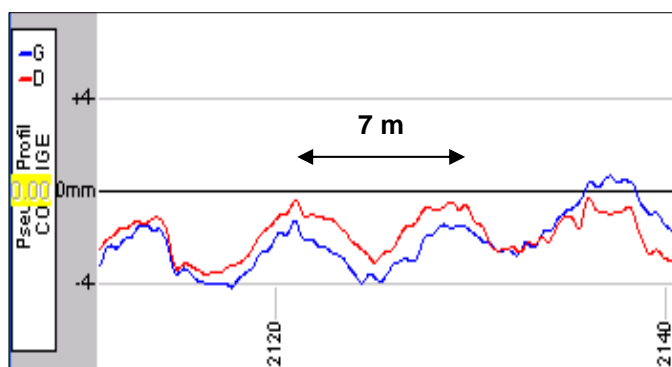
En référence à la circulaire, le niveau élevé de qualité de l'uni est indiscutable puisque toutes les notes PO sont égales à 10 (notes arrondies), les notes MO sont égales à 9 et la note GO est égale à 10. A l'image de cette zone, l'ensemble du chantier (plus de 5 km) est largement en conformité avec les spécifications NBO.

Et pourtant... la route en question – il s'agit d'un contournement d'agglomération (90 km/h) – est jugée inconfortable par les poids lourds qui l'empruntent régulièrement, certains plusieurs fois par jour.

Remarque - Les notes MO dépendent de l'amplitude de la sinusoïde ; elles sont ici de 9 pour une amplitude proche de ± 2 mm (voir le détail qui suit) ; ailleurs, elles sont de 10 pour une amplitude plus proche de ± 1 mm.

Le graphique ci-contre détaille (grossit) la zone des abscisses 2110 m à 2140 m du premier graphique ci-avant, avec une échelle d'amplitude de ± 4 mm. On constate que la période (longueur d'onde) de la sinusoïde est de l'ordre de 7 m et que l'amplitude est contenue dans la plage ± 1 à 2 mm (la flèche est inférieure à 4 mm).

Cette disproportion entre la longueur d'onde et la très faible amplitude du défaut le rend invisible sur la chaussée, contrairement au défaut précédent ; il n'est par conséquent pas possible d'en montrer une vue.

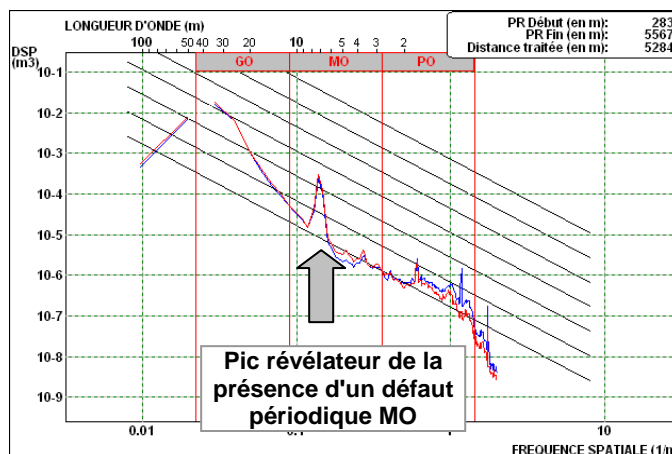


La méthode NBO – comme l'ancienne méthode CAPL – se montre donc insuffisante pour détecter et évaluer ce type de défaut. En revanche, une autre technique d'analyse, sans doute encore méconnue, s'avère pertinente : c'est l'analyse spectrale DSP (Densité Spectrale de Puissance – voir en [annexe 1](#)), laquelle peut être définie comme la contribution de chaque bande fine de longueur d'onde au carré moyen du signal.

Le graphique ci-contre (copie d'écran APL2000) représente la courbe DSP de la totalité du chantier de l'exemple présent (5284 m de longueur).

La flèche montre un pic au milieu du spectre, centré sur la longueur d'onde 7,30 m et ayant pour base une bande allant de 6,50 m à 8,50 m (bande d'onde MO).

Ce pic révèle précisément la présence d'un défaut périodique (au sens mathématique). Il est à souligner que l'usage opérationnel de l'analyse DSP est facilité par l'application APL2000, notamment pour l'examen détaillé des lots de contrôle (ex. 1000 m).

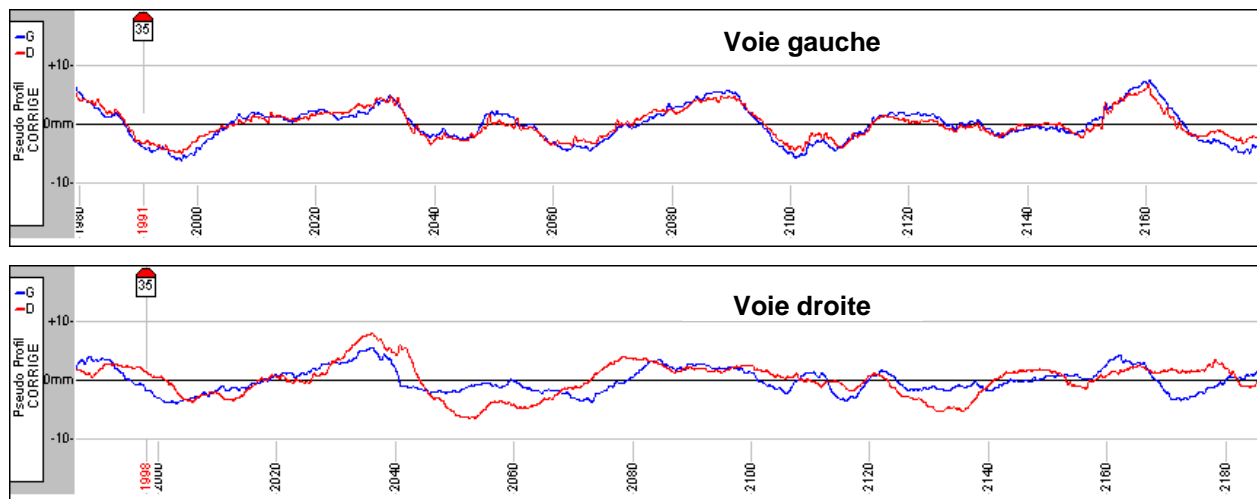


Face à ce type de défaut très particulier d'une couche de roulement neuve, l'application de la circulaire DR 2000-36 peut donc conclure à la conformité des travaux alors que la route est inconfortable pour les poids lourds. Les moyens qui permettent de l'identifier et de l'évaluer sont l'analyse spectrale DSP et l'analyse graphique des signaux APL.

En passant par le phénomène de roulis...

Contrairement aux routes secondaires, le phénomène de roulis – mouvement d'oscillation d'un bord sur l'autre des véhicules – se rencontre assez rarement sur les chaussées à fort trafic. Mais il arrive que des dispositions constructives en soient à l'origine, avec là aussi la possibilité d'un bon résultat NBO malgré l'inconfort.

A titre d'illustration, les deux graphiques ci-dessous (200 m de longueur) reproduisent la variation des signaux APL bi-trace sur les deux voies de circulation d'une chaussée unidirectionnelle où les notes PO, MO, GO sont de 9 et 10. On constate la quasi-superposition des signaux de la voie gauche, contrairement à ceux de la voie droite qui sont irrégulièrement décalés (déphasés), traduisant ainsi le roulis ressenti sur cette voie.



La vue ci-contre montre la chaussée en question, avec un plan sommaire de la disposition adoptée – deux finisseurs en parallèle – pour le répandage d'une couche de roulement d'entretien (4 cm de BBDr).

Le premier finisseur a répandu la voie gauche et une bonne moitié de la voie droite ; le second finisseur a répandu le reste de la voie droite et la bande d'arrêt d'urgence.

Comme on peut le voir, les deux bandes de roulement de la voie droite sont respectivement sur chacune des deux bandes de répandage, expliquant ainsi le roulis traduit par la non-superposition des signaux APL bi-trace (1,50 m d'écartement). Il est à noter que le support était exempt de roulis, les fichiers de mesure APL le confirmant.



Cet exemple vient d'un chantier d'entretien de près de 3 km où le confort de roulement de la voie droite est discutable malgré le bon résultat NBO. Le choix de la disposition constructive adoptée est en question ; il est en effet souhaitable qu'une voie de circulation fasse l'objet d'une seule et même bande de répandage.

Comme pour le défaut précédent, l'inconfort dû au roulis est d'autant plus mal ressenti qu'il existe sur une longueur importante. Les poids lourds y sont aussi plus sensibles que les véhicules légers.

La méthode NBO donnant des résultats trace par trace, elle montre ses limites face au phénomène de roulis. En conséquence, au-delà de l'analyse graphique des signaux APL, il resterait à étudier un indicateur de roulis, à partir par exemple de l'aire engendrée par la superposition des signaux bi-trace.

D'où l'intérêt de préparer la mise en oeuvre d'une couche de roulement

La circulaire DR 2000-36 fixe des spécifications NBO en matière d'uni longitudinal pour la réception des couches de roulement neuves. Pour en faciliter l'obtention, le guide technique qui l'accompagne préconise des règles applicables aux travaux de construction, de réhabilitation ou d'entretien des chaussées.

Or, le respect de ces règles, et parfois même la conformité avec les spécifications NBO, n'empêchent pas des surprises en fin de chantier comme en témoignent les exemples présents.

C'est pourquoi il convient de rappeler que la mise en oeuvre d'une couche de roulement ne s'improvise pas, voire que le droit à l'erreur n'existe pas... ou en tout cas ne peut plus être rattrapé comme pour les autres couches. Et il faut insister à cet égard sur le rôle primordial des règles de l'art suivantes :

- ❶ une organisation de chantier rigoureuse et une maîtrise parfaite des conditions de fabrication et des cadences d'approvisionnement ;
- ❷ un finisseur en bon état de fonctionnement, avec des réglages adaptés et vérifiés, servi par une équipe compétente, solidaire et attentive (voir en [annexe 2](#) les conseils pratiques sur l'emploi des finisseurs).

C'est à ces conditions que les surprises en matière d'uni longitudinal peuvent être évitées. En bref, il est impératif de préparer la mise en oeuvre d'une couche de roulement.

Annexe 1 : Ce qu'il faut savoir sur les exploitations possibles des signaux d'uni longitudinal

Les différentes méthodes de traitement appliquées au signal acquis lors du relevé du profil en long d'un tronçon de chaussée permettent plusieurs types d'exploitation, afin d'en estimer la qualité de l'uni.

Ces méthodes peuvent fournir

- une vision locale, pour identifier et localiser un éventuel défaut ponctuel par **analyse graphique du pseudo-profil**
- une appréciation globale par segments de chaussée, sous la forme de la traditionnelle **notation par bandes d'onde (NBO)**
- une mise en évidence de défauts périodiques très spécifiques, par **analyse de la densité spectrale de puissance (DSP)**

Localisation de défauts ponctuels : analyse graphique du pseudo-profil

Sur l'Analyseur de Profil en Long (APL), les caractéristiques mécaniques et physiques de la remorque et du pendule inertiel introduisent des distorsions entre le profil réel mesuré et le signal enregistré.

Un procédé de filtrage inverse basé sur des algorithmes établis par analogie électromécanique inversible et « calé » à partir d'essais sur un banc de vibration permet de corriger le pseudo-profil pour que la position des pics du signal enregistré soit la plus représentative possible de la position des irrégularités mesurées.

Une analyse graphique des signaux est alors possible, avec **zoom local sur les défauts et identification précise de leur position.**

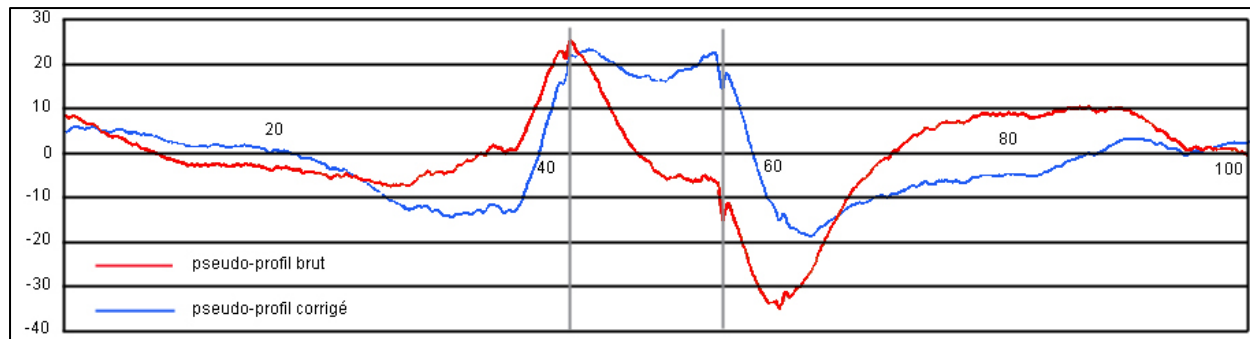


Figure 1 : Effet de la correction de phase, sensible en Moyennes Ondes (passage sur un ouvrage)

Appréciation de la qualité globale de l'uni : notation par bandes d'onde (NBO)

Le signal enregistré étant la superposition de signaux sinusoïdaux de différentes longueurs d'onde, le principe du calcul des notes en bandes d'onde consiste à mesurer la contribution respective de ces différentes longueurs d'onde, en les regroupant en trois classes, **Petites Ondes**, **Moyennes Ondes** et **Grandes Ondes**. Ces trois classes ont été déterminées à la fois à cause de leurs conséquences spécifiques sur la dynamique du véhicule et aussi en raison de leurs mécanismes différents de génération :

Bande	Bi-octave	Octave	Fréquence spatiale
Petites ondes 0,7 à 2,8 m	0,7 m	0,7 m	1
	1,41 m	1,41 m	
	2,82 m	2,82 m	
Moyennes ondes 2,8 à 11,3 m	2,82 m	2,82 m	0,25
	5,66 m	5,66 m	
	11,32 m	11,32 m	
Grandes ondes 11,3 à 45,2 m	11,32 m	11,32 m	0,0625
	22,62 m	16 m	
	45,25 m	22,62 m	
		32 m	
		45,25 m	

Tableau 1 : Définition des trois bandes d'onde

Ce traitement du signal est effectué par application de filtres de Tchebychev d'ordre II à 48 dB / octave en réjection puis par découpage en segments élémentaires d'une longueur de 20 m en P.O., 100 m en M.O. et 200 m en G.O. (par le biais d'une fenêtre de Hanning pour réduire les effets de fuite).

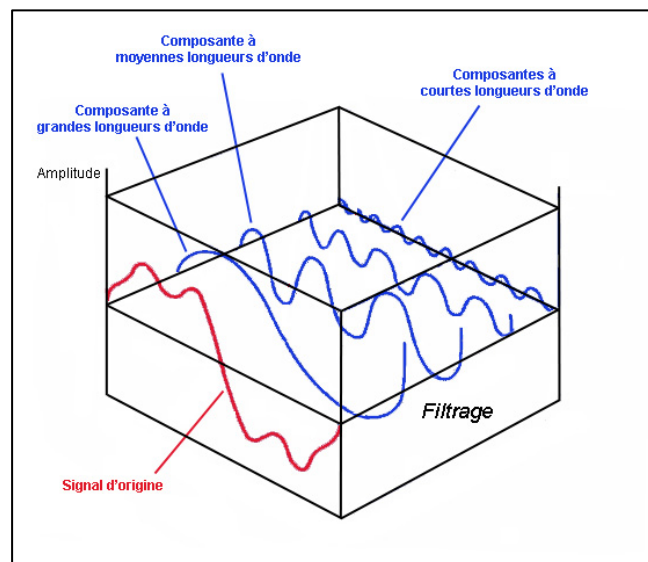


Figure 2 : Décomposition du signal par filtrage en bandes d'onde

Pour chaque composante filtrée du signal et chaque segment élémentaire, l'énergie correspondante est calculée comme étant l'intégrale du carré de l'amplitude du signal, soit compte tenu de la discrétisation du signal :

$$E = \Delta x \times \sum_{i=1}^{i=N} A_i^2$$

avec $\Delta x = 5$ cm, N le nombre de points de mesure (soit la longueur du segment, 20, 100 ou 200 m divisée par 0,05), et A_i l'amplitude locale du signal

Les notes qui sont donc **une appréciation globale de la qualité de l'uni pour chaque tronçon élémentaire** sont ensuite obtenues par le biais de tables de conversion où les niveaux d'énergie sont les données d'entrée.

Analyse de phénomènes répétitifs : densité spectrale de puissance

Une autre exploitation plus fine du signal peut-être effectuée, en particulier par le logiciel APL 2000, à savoir l'analyse de la **Densité Spectrale de Puissance (DSP)**.

La DSP décrit comment la puissance du signal est répartie en fonction de la fréquence ou de la longueur d'onde de ses différentes composantes élémentaires.

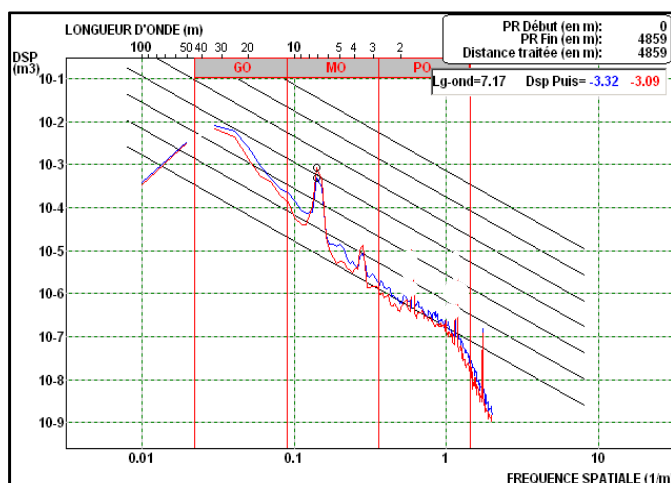


Figure 3 : Densité spectrale de puissance

Par définition, la DSP est le carré du module de la transformée de Fourier du signal. Les signaux observés sont considérés comme stationnaires (leurs propriétés statistiques telles que moyenne et autocorrélation ne dépendent pas du lieu de l'observation, ce qui signifie que les énergies et notes en bandes d'onde varient peu sur le tronçon considéré), et le calcul de la DSP s'effectue par la méthode du périodogramme de Welch, sur N points (1024,2048, etc..), soit une longueur de 51,2 m ou 102,4 m, application d'une fenêtre de Hanning et recouvrement 50%.

Une autre approche de la DSP peut être obtenue à partir de la notion d'autocorrélation du signal :

- La valeur de la fonction d'autocorrélation d'un signal calculée pour une distance L mesure en quelque sorte la manière dont les structures que l'on peut voir dans le signal se répètent sur des échelles de longueur de l'ordre de L.
- Or on démontre que la transformée de Fourier de cette fonction d'autocorrélation est aussi égale à la Densité Spectrale de Puissance.
- **L'analyse de ce spectre permet ainsi de localiser d'éventuelles émergences** sous forme de pics à des longueurs d'ondes particulières, **synonymes de concentration de puissance à ces longueurs d'onde, qui révéleront des phénomènes périodiques**, dont l'amplitude énergétique ne serait par ailleurs pas forcément suffisamment élevée pour affecter la notation en bande d'onde du signal.

Annexe 2 : Réflexion stratégique sur le choix du finisseur

La première question que doit se poser l'Entreprise en charge d'un chantier d'application d'enrobés est : **Quel atelier de mise en œuvre doit on retenir, compte tenu de la production de l'usine d'enrobage, de la distance de transport (disponibilité du parc routier) et des conditions d'exécution (largeur, épaisseur,...) ?**

La réponse qui doit en découler, intègre les éléments suivants :

- Choix de la table fonction de la largeur et de l'épaisseur
- Choix de la puissance du tracteur fonction de la table et de l'épaisseur
- Choix de l'approvisionnement : alimentateur ou non
- Choix de la référence spatiale :
poutre 5 / 8m, poutre enjambeuse (simple ou double), poutre virtuelle, laser, fils, vis calée, en fonction d'une qualité d'uni optimum en PO ou MO ou GO
- Choix de l'atelier de compactage en fonction du rendement et de l'épaisseur

Réglages préalables

Le choix du tracteur et de la table ayant été fait, il devient indispensable de procéder à la vérification et aux réglages préalables à la mise en œuvre.

- Vérification des organes fonctionnels :

- Planéité et alignement de la table et des allonges hydrauliques et/ou mécaniques (usure différentielle)
- Contre-vis au palier central (si présence) pour éviter la ségrégation au centre de la table
- Fonctionnement et homogénéité des systèmes de vibrations, dameurs, ciseaux... sur la table centrale et sur les allonges.
- Propreté et chauffe de la table
- Propreté et usure des patins des chenilles (peut compromettre l'obtention de l'uni demandé)
- Longueur de la vis de répartition en adéquation avec la largeur de la mise en œuvre
- Vérification (en salle) de la qualité et de la précision du pendule d'asservissement de la pente de la table.
- Propreté des rouleaux pousseurs de camions

- Réglage des organes opérationnels

- Positionnement des points d'encrage de la table (faible ou forte épaisseur)
- Positionnement de la hauteur de vis en fonction de l'épaisseur à mettre en œuvre :
ex : BBM en 4 cm → point bas de la vis à 7/8 cm
GB en 10 cm → point bas de la vis à 13/15 cm
- Réglage des portes du tunnel de transit des enrobés, de façon à maintenir les enrobés à hauteur de l'axe de vis de répartition
- Optimisation du réglage des vibrations, dameurs, ciseaux... en fonction de l'épaisseur et du type d'enrobés GB / BBSG / BBM / etc....

Fonctionnement du finisseur

La règle générale est le non-arrêt du finisseur.

De par sa conception de « table flottante », les arrêts, même courts engendrent une imperfection au niveau de l'uni dans les petites ondes.

Les systèmes de blocage automatique des vérins de table tendent à atténuer ce phénomène sans l'annihiler totalement.

- Règles de Bon Fonctionnement

- Positionnement des camions pour alimenter le finisseur ou l'alimentateur avec le moins de discontinuité possible.
- Les camions au recul, sans alimentateur ne doivent pas donner de « coup de boutoir » sur les rouleaux pousseurs du finisseur.
- La vitesse du finisseur est calculée en fonction de la rame de camion et de la cadence de l'usine d'enrobage.
- L'objectif est de ne pas arrêter le finisseur. On peut éventuellement faire varier la vitesse de celui-ci en cours de fonctionnement en s'interdisant les à-coups.
- La surface de roulement des chevilles doit être parfaitement dégagée.
- La chambre de stockage de l'enrobé doit être remplie juste au dessus de l'axe de la vis de répartition.
- Les palpeurs de veine des enrobés en bout de table doivent être positionnés pour couper l'alimentation des enrobés, lorsque ceux-ci dépassent la hauteur de l'axe de la vis.
- Le chauffeur du finisseur doit piloter l'engin en souplesse, en particulier éviter les à-coups de correction de direction.

Tous ces conseils pratiques ont pour but d'éviter, tant que faire se peut, les défauts d'uni en particulier en moyennes et petites longueurs d'ondes.

Pour en savoir plus...

[1] Pierre PERES (LR Saint-Brieux) et Patrice RETOUR (CETE Ouest)
« *Le finisseur, ça se règle* » - Bitume Actualités - Octobre 1979.

[2] Marie-Line GALLENNE (LCPC)
« *Mise en œuvre au finisseur* » - Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées
CR 29 - Août 2002

[3] Direction des Routes
« *Guide Technique pour l'application de la circulaire n° 2000-36* » - Mai 2000

[4] GNCDS - Sous-groupe Uni
« *Uni et mise en œuvre* » - Note d'information n° 90 - SETRA - Août 1996