

Thèse de Doctorat

Fabien Menant

*Mémoire présenté en vue de l'obtention du
grade de Docteur de l'École Centrale de Nantes
sous le label de L'Université Nantes Angers Le Mans*

École doctorale : Sciences Pour l'Ingénieur, Géosciences et Architecture

Discipline : Génie civil

Unité de recherche : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de
l'Aménagement et des Réseaux

Soutenue le 4 Novembre 2014

Estimation de l'uni longitudinal des infrastructures routières au moyen de véhicules traceurs

Développements méthodologiques et expérimentations

JURY

Président :	Dominique GRUYER , Directeur de Recherche, IFSTTAR, Versailles
Rapporteurs :	Michèle ROMBAUT , Professeur des Universités, Université Joseph Fourier, Grenoble Laurent TRASSOUDAINÉ , Professeur des Universités, Institut Pascal, Clermont-Ferrand
Examineurs :	Éric LE CARPENTIER , Maître de Conférences, IRCCYN, École Centrale de Nantes Laurent MEVEL , Chargé de Recherche, INRIA, Université de Rennes 1
Directeur de Thèse :	Philippe LEPERT , Directeur de Recherche, IFSTTAR, Nantes

Résumé

Aujourd'hui, les gestionnaires d'infrastructures routières doivent composer avec des contraintes financières de plus en plus fortes. Le défi auquel ils doivent faire face est clair : maintenir leur patrimoine avec un budget restreint. Dans le domaine de l'auscultation des chaussées, cette problématique peut être résolue à travers deux approches complémentaires :

- L'optimisation de l'utilisation des systèmes existants pour le suivi de l'état de dégradation des chaussées ;
- Le développement d'une nouvelle génération de systèmes (appareils et méthodes) conciliant exigences métrologiques et contraintes financières.

Ces travaux de thèse s'inscrivent dans ce second point puisqu'ils s'intéressent à l'utilisation de véhicules traceurs (véhicules de flottes industrielles, dont la fonction première est autre que la mesure de l'état des chaussées) munis d'une instrumentation « bas-coût » pour le suivi de l'uni longitudinal des routes. Moins coûteux (à l'achat et à l'usage) que les moyens d'auscultation dédiés à cette fonction qui effectuent une mesure tous les 3 à 6 ans, ils permettront de recueillir des informations certes un peu moins précises mais continues (dans le temps) et denses (dans l'espace) sur l'intégralité du réseau routier.

Le niveau de performance d'une telle solution d'auscultation est conditionné par deux critères :

- La « richesse » (pertinence, exactitude, fidélité) des données apportées par chaque véhicule traceur ;
- La capacité des méthodes de traitement à délivrer, à partir de l'ensemble des données produites par les multiples passages des différents véhicules, une information agrégée qui soit la plus exacte et la plus fiable possible.

Dans cette perspective générale, un des objectifs spécifiques des travaux de thèse est d'estimer ce niveau de performance grâce, notamment, à la conduite d'expérimentations menées avec un dispositif prototype sur un itinéraire-test représentatif des réseaux routiers à ausculter. Pour y parvenir, une chaîne de mesures bas-coût a été spécialement développée et caractérisée sur un banc d'essais avant d'être intégrée dans plusieurs véhicules traceurs. Les données résultant des passages successifs de ces véhicules sur l'itinéraire-test ont ensuite été traitées par un panel de méthodes de fusion appartenant aux principaux cadres mathématiques existants (formalismes probabilistes, possibilistes et crédibilistes). Grâce à ces méthodes, les données issues des véhicules traceurs peuvent être agrégées tout en tenant compte des imprécisions et des incertitudes associées aux mesures. Dans ce domaine, l'une des contributions de la thèse est de proposer une architecture globale de traitement qui organise les connaissances, les modélisent et les combinent au moyen de différents opérateurs de fusion. Au final, les informations résultant des méthodes de fusion ont été comparées à des informations de référence afin d'estimer le niveau de précision offert par cette solution d'auscultation innovante.

Mots-clés : auscultation des chaussées, uni longitudinal, capteurs bas-coût, véhicules traceurs, caractérisation des incertitudes de mesures, fusion de données/informations.

Abstract

Nowadays, road infrastructure managers must deal with stronger and stronger financial constraints. The challenge they are facing is clear: maintain road assets with a limited budget. In the field of pavement monitoring, this problem can be solved through two complementary approaches:

- Optimizing the use of existing road condition measurement systems;
- Developing a new generation of systems (devices, methods) which meets both metrological requirements and financial constraints.

The works conducted under this PhD refer to the second item: they are investigating the use of probe vehicles (vehicles of industrial fleets, the first function of which is not the road condition measurement) equipped with a "low-cost" instrumentation for assessing the road longitudinal evenness. Less expensive than specialized measurement systems (i.e. systems exclusively dedicated to this function) performing a measurement every 3 to 6 years, they will certainly collect less accurate but continuous (in time) and dense (in space) data, on the entire road network.

- The level of performance of this monitoring method depends on two criteria: The "richness" (relevance, exactness, fidelity) of the data provided by each probe vehicle;
- The ability of processing methods to deliver, from the whole set of data produced by the multiples paths of the different probe vehicles, the most exact and reliable aggregated information.

Within this general prospect, the specific aim of the PhD thesis is to estimate this level of performance, mainly by performing experiments with a prototype system on a special itinerary representative of the roads networks.

To meet this goal, a measurement chain composed with low-cost sensors has been specially developed and characterized on a test bed before being integrated into several probe vehicles. The data issued by successive runs of probe vehicles were then processed with a panel of data fusion methods belonging to the main mathematical frameworks (probabilistic, possibility and evidence theories). It was demonstrated that, with these methods, data can be combined taking into account inaccuracy and uncertainty of the measurements. One of the contributions of the PhD works is to propose a processing framework which organizes the knowledge, represents it (modeling, weighting method) and select the relevant data fusion operators. Finally, the information resulting from each data fusion methods are compared with benchmark information in order to estimate the level of accuracy provided by this innovative pavement monitoring method.

Keywords: pavement monitoring, longitudinal evenness, low-cost sensors, probe vehicles, measurement uncertainties, data/information fusion.

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier les membres du jury qui ont évalué ces travaux de thèse. Je remercie donc Michèle Rombaut, Professeur à l'université Joseph Fourier de Grenoble, et Laurent Trassoudaine, Professeur à l'institut Pascal de Clermont-Ferrand, d'avoir accepté d'être rapporteurs et pour l'attention portée à ce mémoire. Je remercie également Dominique Gruyer (Directeur de Recherche à l'IFSTTAR), Éric Le Carpentier (Maître de Conférences à l'École Centrale de Nantes) ainsi que Laurent Mevel (Chargé de Recherche à l'INRIA de Rennes) pour avoir accepté d'être examinateurs.

Je remercie Philippe Lepert, Directeur de Recherche à l'IFSTTAR, de m'avoir persuadé de se lancer dans cette aventure puis d'avoir dirigé ces travaux de thèse. De façon plus personnelle, je remercie à nouveau Philippe que je considère, pour faire simple et court, comme une source d'inspiration professionnelle.

J'adresse mes remerciements aux membres de mon comité de suivi à savoir Louis-Marie Cottineau (IFSTTAR Nantes) et Yann Goyat (ex-IFSTTAR, néo-entrepreneur) pour m'avoir guidé et conseillé pendant ces années de thèse. Je remercie chaleureusement mon collègue Jean-Marc Martin, également membre du comité de suivi, qui de par son expertise dans le domaine de l'uni des chaussées et son pragmatisme, a grandement fait avancer ces travaux. Je le remercie de m'avoir fait partager ses connaissances et de m'avoir soutenu au quotidien en particulier dans les périodes de doute.

Ces travaux de thèse ont été réalisés au sein du Laboratoire Auscultation, Modélisation et Expérimentation des infrastructures de transport (LAMES) piloté par Pierre Hornych. J'en profite donc pour remercier tous mes collègues notamment Daniel Meignen pour son appui au développement de la chaîne de mesures et Manuel Roura pour son assistance lors des expérimentations sur route. Je remercie également Brigitte Beilvert, Denis Lièvre et Pierre Hankach pour leur soutien ainsi que Cédric Mansuy, stagiaire en 2010, qui a effectué une étude préliminaire très intéressante en lien avec ce sujet de thèse. J'ai également une pensée très émue pour Alain Riouall qui nous a quittés récemment et qui doit désormais cultiver un jardin bien plus grand...

Le caractère très applicatif de cette thèse a nécessité la réalisation d'un grand nombre d'essais en tous genres qui n'auraient pas été possibles sans le concours de Patrick Daburon, Samuel Louis, Jean-Pierre Desroche, Ivan Guéguen et Jean-Philippe Gourdon. Je les remercie sincèrement pour leur aide.

Et comme il faut bien savoir se détendre et se ressourcer pendant cette période particulière, je remercie toute ma famille ainsi que tous mes copains « Fertois », « Angevins » (spéciale dédicace à Alex pour les débriefings du lundi soir), « Mayennais », « Nantais », etc. Je ne suis pas vraiment certain qu'ils aient tout compris à ce je faisais pendant ces années ; il me reste maintenant à leur prouver que cela sera utile pour l'avenir...

Comme tout grand sportif (j'ai toujours rêvé de ce moment), je tiens à remercier mes sponsors (SNCF, RATP, Air France, Volotea, TAN....) qui m'ont permis d'aller voir régulièrement mes proches avec mon argent. J'espère ne plus avoir besoin de leur aide dans les années à venir.

Pour finir, je remercie Sophie, ma supportrice la plus inconditionnelle qui est devenue, pendant cette période de thèse, ma femme et qui m'a également fait le bonheur de devenir le papa de Stella (en 2012) et de Gaétan (en 2014). Une année de thèse supplémentaire et j'avais droit à la carte famille nombreuse (qui sait ?)....

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1 : État de l'art sur le concept de véhicules traceurs et sur l'uni longitudinal (sa mesure et son exploitation par les gestionnaires)	7
1.1 État de l'art sur la mesure de l'uni longitudinal et de son exploitation	8
1.1.1 Notions d'uni longitudinal des chaussées.....	8
1.1.2 Appareils pour la mesure d'uni.....	13
1.1.3 L'interaction uni-dynamique du véhicule	19
1.1.4 Analyse de l'uni et procédure opérationnelle	24
1.2 État de l'art sur la notion de véhicules traceurs	31
1.2.1 Définitions et terminologie	31
1.2.2 Instrumentation et technologies de véhicules traceurs.....	32
1.2.3 Schéma fonctionnel et architecture opérationnelle.....	33
1.2.4 Forces et faiblesses liées à l'usage de véhicules traceurs	36
1.2.5 Les applications.....	37
1.3 Bilan de l'état de l'art.....	40
Chapitre 2 : Spécifications du système envisagé et conséquences sur les travaux de thèse	41
2.1 Principe de la solution d'auscultation.....	42
2.2 Structure de la solution d'auscultation	42
2.3 Complémentarité avec la méthode d'auscultation traditionnelle.....	44
2.4 Cadre des travaux de thèse et cahier des charges	45
2.5 Bilan sur la solution d'auscultation et le cadre des travaux de thèse.....	46
Chapitre 3 : Recueil de données par les véhicules traceurs : informations à capter et caractérisation de l'instrumentation bas-coût	49
3.1 Informations candidates pour la détection des défauts d'uni.....	50
3.1.1 Information de profil par la méthode de Spangler.....	50

3.1.2	Informations exclusivement d'origines inertielles.....	51
3.1.3	Autres types d'informations	51
3.2	Sélection et caractérisation expérimentale des capteurs	52
3.2.1	Choix et dimensionnement des capteurs	52
3.2.2	Caractérisation des capteurs sur le banc de vibrations.....	56
3.3	Utilisation d'un GPS pour évaluer la distance parcourue.....	70
3.4	Comparaison des trois méthodes de mesures de l'uni	71
3.5	Conclusion sur la structure du système de mesure	74
Chapitre 4 : Variabilité des notes d'uni dans la solution d'auscultation proposée.....		75
4.1	Identification et description des facteurs de variabilité	76
4.2	Description et propriétés du circuit-test.....	79
4.3	Estimation des variations des notes d'uni.....	81
4.3.1	Estimation de l'erreur provenant de l'accéléromètre.....	82
4.3.2	Estimation de l'erreur liée à l'information de distance.....	84
4.3.3	Estimation de l'erreur de trace.....	88
4.3.4	Estimation de l'erreur de vitesse.....	90
4.3.5	Estimation de l'erreur liée à la dynamique du véhicule	92
4.4	Synthèse sur les facteurs de variabilité des notes d'uni	94
Chapitre 5 : Fusion des informations délivrées par les véhicules traceurs : méthodes et outils.....		97
5.1	Principales caractéristiques des informations à fusionner.....	98
5.1.1	Caractéristiques intrinsèques des sources de mesures.....	98
5.1.2	Caractéristiques intrinsèques des informations.....	99
5.1.3	Caractéristiques intrinsèques des sources et des informations.....	101
5.2	Principes de la fusion d'informations et architecture de traitement.....	101
5.2.1	Introduction générale sur la fusion d'informations.....	102
5.2.2	Proposition d'un schéma opérationnel	104
5.2.3	Architectures de fusion.....	105
5.3	Pré-traitement au processus de fusion : rejet des données aberrantes et pondération des sources de mesures.....	108

5.4 Les méthodes de fusion investiguées	114
5.4.1 Méthode de fusion dans un cadre statistique	115
5.4.2 Méthode de fusion dans un cadre probabiliste.....	116
5.4.3 Méthode de fusion dans un cadre possibiliste	120
5.4.4 Méthode de fusion dans un cadre crédibiliste	137
5.5 Construction d'un indice de confiance.....	155
5.6 Bilan sur l'utilisation des méthodes de fusion.....	158
Chapitre 6 : Application des méthodes de fusion sur des jeux de données et analyse de performances.....	161
6.1 Construction des jeux de données.....	162
6.1.1 Les jeux de données expérimentaux	162
6.1.2 Les jeux de données synthétiques.....	163
6.2 Analyse des résultats après application des méthodes de fusion sur les jeux de données	171
6.2.1 Analyse des résultats sur les jeux de classe A et B	171
6.2.2 Analyse des résultats sur les jeux de classe C.....	179
6.2.3 Exploitation de l'indice de confiance	183
6.3 Bilan sur les niveaux de performances des méthodes de fusion	187
Conclusion générale.....	191
Bibliographie	197
Annexe A.....	203
Annexe B.....	207
Annexe C.....	211

Liste des figures

FIGURE 1.1 : CONFIGURATION TYPE D'UNE STRUCTURE DE CHAUSSÉE.....	8
FIGURE 1.2 : SCHÉMA ILLUSTRANT LES NOTIONS DE LONGITUDINALITÉ ET DE TRANSVERSALITÉ SUR UNE CHAUSSÉE	9
FIGURE 1.3 : DOMAINES DE TEXTURE ET PRINCIPAUX FACTEURS D'IMPACT.....	11
FIGURE 1.4 : CLICHÉS DE CHAUSSÉES PRÉSENTANT DES DÉFAUTS D'UNI LONGITUDINAL (ONDULATIONS).....	12
FIGURE 1.5 : OPÉRATIONS DE RÉPANDAGE (À DROITE DE L'IMAGE) ET DE COMPACTAGE (À GAUCHE)	12
FIGURE 1.6 : CROQUIS D'UN DES PREMIERS APPAREILS D'AUSCULTATION (DÉBUT DU 20 ^{ÈME} SIÈCLE)	13
FIGURE 1.7 : MISE EN ŒUVRE D'UN PROFILOGRAPHE (VUE DE GAUCHE) ET DU DIPSTICK PROFILER (VUE DE DROITE)	14
FIGURE 1.8 : APPAREIL BUMP INTEGRATOR (VERSION REMORQUE)	15
FIGURE 1.9 : SCHÉMA DE PRINCIPE DE L'APL ET MONTAGE DE DEUX SYSTÈMES SUR UN VÉHICULE PORTEUR.....	15
FIGURE 1.10 : POUTRE MLPL SUR VÉHICULE PORTEUR ET SCHÉMA DE MONTAGE DES CAPTEURS.....	16
FIGURE 1.11 : CODEUR INSTALLÉ SUR LA ROUE D'UN VÉHICULE D'ESSAI	17
FIGURE 1.12 : COMPARAISON DES MODULES DES FONCTIONS DE TRANSFERT.....	18
FIGURE 1.13 : SCHÉMA ILLUSTRANT L'EFFET DES DÉFAUTS D'UNI SUR LA DYNAMIQUE DU VÉHICULE.....	20
FIGURE 1.14 : EXEMPLE DE REPRÉSENTATION DES SUSPENSIONS ET DES PNEUMATIQUES.....	21
FIGURE 1.15 : DESCRIPTION DES MOUVEMENTS DE CAISSE LIÉS AU CONFORT	22
FIGURE 1.16 : EFFETS DE POMPAGE (BOUNCE) ET DE TANGAGE (PITCH).....	22
FIGURE 1.17 : GRAPHIQUE EXTRAIT DE LA NORME ISO 2631 ILLUSTRANT	23
FIGURE 1.18 : EXEMPLE DE QUESTIONNAIRE UTILISÉ POUR DÉFINIR L'INDICATEUR DE CONFORT PSR (PRESENT SERVICEABILITY RATING). LA QUESTION POSÉE À L'USAGER ÉTAIT DE SAVOIR S'IL AIMERAIT ROULER SUR CE TYPE DE ROUTE TOUTE UNE JOURNÉE.	24
FIGURE 1.19 : SCHÉMA DÉCRIVANT LE CALCUL DE L'IRI	25
FIGURE 1.20 : EXEMPLES D'INTERPRÉTATION ET D'ANALYSE DE L'IRI. À GAUCHE, L'IRI SERT À APPRÉCIER LE CONFORT ET À DROITE IL PERMET DE CARACTÉRISER DES DÉFAUTS DE CHAUSSÉES.....	25
FIGURE 1.21 : SCHÉMA ILLUSTRANT LA DÉCOMPOSITION DU PROFIL EN SIGNAUX FILTRÉS	26
FIGURE 1.22 : EXEMPLE DE CONVERSION D'UN PROFIL EN NOTES PAR BANDES D'ONDES DANS APL 2000	28
FIGURE 1.23 : DÉTECTION D'UN DÉFAUT PÉRIODIQUE PAR L'ANALYSE DE LA DSP (LA COURBE BLEUE CORRESPOND AU RELEVÉ EFFECTUÉ DANS LA BANDE DE ROULEMENT GAUCHE ET LA COURBE ROUGE À CELUI EFFECTUÉ DANS LA BANDE DE ROULEMENT DROITE).....	29
FIGURE 1.24 : SCHÉMA D'INSTRUMENTATION POUR UN VÉHICULE TRACEUR DE LA CATÉGORIE XFCO (SOURCE CEESAR).....	32
FIGURE 1.25 : EXEMPLE D'ACCÉLÉROMÈTRE À TECHNOLOGIE MEMS	33
FIGURE 1.26 : ARCHITECTURE-TYPE D'UNE APPLICATION DE SERVICE UTILISANT DES VÉHICULES TRACEURS.....	34
FIGURE 1.27 : EXEMPLE D'ARCHITECTURE MULTI-APPLICATIVES (SOURCE US DOT).....	35
FIGURE 1.28 : INTERFACE DE VISUALISATION D'UNE APPLICATION RÉALISANT LE CALCUL DE TEMPS DE PARCOURS (SOURCE V-TRAFFIC).....	37
FIGURE 1.29 : LISTE D'APPLICATIONS DE SERVICE (SOURCE FOT-NET PROJECT)	39
FIGURE 2.1 : SCHÉMA ILLUSTRANT LA MÉTHODE DE DÉTECTION DES DÉFAUTS D'UNI AU MOYEN DE VÉHICULES TRACEURS	43
FIGURE 2.2 : SCHÉMA ILLUSTRANT LA PALETTE D'OUTILS DISPONIBLES POUR ESTIMER L'UNI	44
FIGURE 2.3 : CADRE DES TRAVAUX DE THÈSE DANS LA SOLUTION D'AUSCULTATION	47
FIGURE 3.1 : SCHÉMA DE PRINCIPE EXTRAIT DU BREVET GENERAL MOTORS.....	50
FIGURE 3.2 : CAPTEURS DE DÉBATTEMENT DE SUSPENSION POTENTIOMÉTRIQUES.....	52
FIGURE 3.3 : SCHÉMA DE PRINCIPE D'UN ACCÉLÉROMÈTRE CAPACITIF MEMS ET VUE DES COMPOSANTS AU MICROSCOPE.....	53
FIGURE 3.4 : NIVEAUX D'ACCÉLÉRATIONS VERTICALES ENREGISTRÉES SUR LE CIRCUIT-TEST.....	54
FIGURE 3.5 : ACCÉLÉROMÈTRES DE LA SÉRIE ADXL RETENUS POUR L'ÉTUDE	55
FIGURE 3.6 : CAPTEURS DE DISTANCE À ULTRASON (À GAUCHE) ET OPTIQUE (À DROITE)	55
FIGURE 3.7 : PROGRAMME DE TESTS POUR L'ÉTABLISSEMENT DE LA FONCTION DE TRANSFERT DES ACCÉLÉROMÈTRES	60
FIGURE 3.8 : EXEMPLE DE SIGNAL « PROFIL DE ROUTE » SIMULÉ ET SA DSP ASSOCIÉE	61
FIGURE 3.9 : PHOTOGRAPHIES DU MONTAGE EXPÉRIMENTAL MONTRANT LE POSITIONNEMENT	62
FIGURE 3.10 : CARACTÉRISTIQUES DES SIGNAUX POUR DÉTERMINER LE COEFFICIENT DE SENSIBILITÉ	63
FIGURE 3.11 : VARIATION DES COEFFICIENTS DE SENSIBILITÉ (EN %)	64
FIGURE 3.12 : SIGNAUX CAPTÉS PAR L'ACCÉLÉROMÈTRE ADXL FACE À UNE SOLLECITATION SINUSOÏDALE DE 0.2 Hz ET 0.8 Hz.....	65
FIGURE 3.13 : SIGNAL D'EXCITATION CORRESPONDANT AU BALAYAGE CONTINU EN SINUS	66
FIGURE 3.14 : FONCTIONS DE TRANSFERT ET DE COHÉRENCE DES CAPTEURS BAS-COÛT PAR RAPPORT AU CAPTEUR DE RÉFÉRENCE SUR LA PLAGE [1 Hz ; 2 Hz]	66
FIGURE 3.15 : FONCTIONS DE TRANSFERT ET DE COHÉRENCE DES CAPTEURS BAS-COÛT SUR LA PLAGE [2 Hz ; 10 Hz]	67
FIGURE 3.16 : FONCTIONS DE TRANSFERT ET DE COHÉRENCE DES CAPTEURS BAS-COÛT SUR LA PLAGE [10 Hz ; 100 Hz]	67

FIGURE 3.17 : EXEMPLE DE SIGNAUX CORRESPONDANT À LA REPRODUCTION DE DÉFAUTS D'UNI (SIGNAUX ISSUS DU CAPTEUR SERVANT À L'ASSERVISSEMENT DU VÉRIN ET DU CAPTEUR OPTIQUE)	68
FIGURE 3.18 : DENSITÉ SPECTRALE DE PUISSANCE DES PROFILS ISSUS DES DIFFÉRENTS CAPTEURS À PARTIR D'UN SIGNAL D'EXCITATION DE TYPE « ROUTE » (EN OBLIQUE, LES NIVEAUX D'ÉNERGIE CORRESPONDANT À LA NBO).....	69
FIGURE 3.19 : DISPOSITIF GPS À BAS-COÛT UTILISÉ POUR L'ÉTUDE.....	70
FIGURE 3.20 : DSP DES PROFILS ISSUS DE TROIS MÉTHODES DE PRISES D'INFORMATIONS DIFFÉRENTES	72
FIGURE 3.21 : SCHÉMA PRÉSENTANT LE PROCESSUS DE TRAITEMENT DES DONNÉES RECUEILLIES PAR LE VÉHICULE TRACEUR	73
FIGURE 3.22 : SCHÉMA ILLUSTRANT LA CHAÎNE DE MESURE ET DE TRAITEMENT À BORD DU VÉHICULE TRACEUR	74
FIGURE 4.1 : PRINCIPALES SOURCES D'ERREURS DE MESURES DANS LA SOLUTION D'AUSCULTATION	76
FIGURE 4.2 : SCHÉMAS ILLUSTRANT LES PRINCIPAUX TYPES D'ERREURS INTRINSÈQUES D'UN ACCÉLÉROMÈTRE.....	77
FIGURE 4.3 : SCHÉMA ILLUSTRANT LES RÉPERCUSSIONS DES ERREURS LIÉES À L'INFORMATION DE DISTANCE	78
FIGURE 4.4 : VUE AÉRIENNE DU CIRCUIT-TEST ET REPRÉSENTATION DES SECTIONS PARTICULIÈRES	79
FIGURE 4.5 : NOTES D'UNI DE RÉFÉRENCE SUR LE CIRCUIT-TEST.....	80
FIGURE 4.6 : RÉPARTITION DES NOTES D'UNI DE RÉFÉRENCE SUR LE CIRCUIT-TEST	81
FIGURE 4.7 : PROFILS CALCULÉS À PARTIR DE COEFFICIENTS DE SENSIBILITÉ DIFFÉRENTS.....	83
FIGURE 4.8 : VARIATION DU FACTEUR DE SENSIBILITÉ EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE DE FONCTIONNEMENT.....	84
FIGURE 4.9 : ÉCARTS À CHAQUE SECONDE ENTRE LES DISTANCES ISSUES DU GPS ET DU CODEUR DE ROUE	85
FIGURE 4.10 : SCHÉMA ILLUSTRANT L'ERREUR GLOBALE D'INFORMATION DE DISTANCE.....	88
FIGURE 4.11 : NOTES MOYENNES ET ÉCART-TYPES OBSERVÉS SUR LA SECTION DÉGRADÉE.....	89
FIGURE 4.12 : EFFETS DE LA VITESSE D'AVANCEMENT DU VÉHICULE SUR LES NOTES D'UNI.....	90
FIGURE 4.13 : EFFET DE LA VARIATION DE VITESSE DE PASSAGE À TRAVERS LES DENSITÉS DE PUISSANCE SPECTRALES	91
FIGURE 4.14 : NOTES D'UNI PRÉLEVÉES PAR TROIS VÉHICULES TRACEURS DE DIFFÉRENTES CATÉGORIES	92
FIGURE 4.15 : DENSITÉ SPECTRALE DE PUISSANCE DES SIX PASSAGES DE CHAQUE	93
FIGURE 4.16 : RÉPERCUSSION DE L'ÉTAT DE GONFLAGE DES PNEUS D'UN MÊME VÉHICULE TRACEUR SUR LA NOTATION D'UNI.....	94
FIGURE 4.17 : GRAPHIQUE DE SYNTHÈSE ILLUSTRANT LA QUANTIFICATION DES ÉCARTS D'UNI DÉTERMINÉS EXPÉRIMENTALEMENT SUR LES DEUX SECTIONS DE RÉFÉRENCE POUR TROIS VÉHICULES TRACEURS.....	95
FIGURE 5.1 : SCHÉMA REPRÉSENTANT LES CARACTÉRISTIQUES D'ERREURS DE MESURES.....	98
FIGURE 5.2 : PROPOSITION D'UN SCHÉMA OPÉRATIONNEL DE TRAITEMENT DES DONNÉES	104
FIGURE 5.3 : SCHÉMAS ILLUSTRANT LES PRINCIPALES ARCHITECTURES DE FUSION.....	105
FIGURE 5.4 : SCHÉMA DÉCRIVANT L'ARCHITECTURE DE FUSION RETENUE INCLUANT LES DIFFÉRENTES ÉTAPES.....	107
FIGURE 5.5 : SCHÉMA ILLUSTRANT LA MÉTHODE CHOISIE POUR CARACTÉRISER LES NIVEAUX.....	111
FIGURE 5.6 : FONCTIONS DE RÉPÉTABILITÉ ÉLABORÉES À PARTIR DE VALEURS SIGNIFICATIVES EXPÉRIMENTALES.....	113
FIGURE 5.7 : DIAGRAMME DE REPRÉSENTATION D'ÉTAT D'UN SYSTÈME	117
FIGURE 5.8 : DIAGRAMME DU FILTRE DE KALMAN	117
FIGURE 5.9 : EXEMPLE D'APPLICATION DU FILTRE DE KALMAN POUR LA FUSION DES NOTES D'UNI SUR UN MÊME SEGMENT DE ROUTE. LA NOTE D'UNI DE SYNTHÈSE EST ISSUE DE LA DERNIÈRE VALEUR FILTRÉE (À L'ITÉRATION N°40).....	120
FIGURE 5.10 : ILLUSTRATION DES CARACTÉRISTIQUES D'UN SOUS-ENSEMBLE FLOU	122
FIGURE 5.11 : EXEMPLE DE REPRÉSENTATION D'UNE DISTRIBUTION DE POSSIBILITÉS.....	122
FIGURE 5.12 : GABARIT DE LA DISTRIBUTION DE POSSIBILITÉS SUR L'EXEMPLE PRÉCÉDENT	126
FIGURE 5.13 : DISTRIBUTION DE POSSIBILITÉS CORRESPONDANT À L'EXEMPLE.....	126
FIGURE 5.14 : INTERVALLES DE CONFIANCE EMBÔITÉS DANS LA DISTRIBUTION $\Pi(x)$	127
FIGURE 5.15 : EFFETS DUS AU RÉTRÉCISSEMENT DU NOYAU (FIGURE DU HAUT) ET	128
FIGURE 5.16 : ILLUSTRATION DE L'EFFET DE L'OPÉRATEUR ADAPTATIF DE DUBOIS ET PRADE NON-PRIORISÉ.....	130
FIGURE 5.17 : ILLUSTRATION DE L'EFFET DE L'OPÉRATEUR ADAPTATIF DE DUBOIS ET PRADE PRIORISÉ.....	131
FIGURE 5.18 : TRACÉ DES QUATRE DISTRIBUTIONS SERVANT À L'EXEMPLE DE COMBINAISON GÉNÉRALISÉE.....	135
FIGURE 5.19 : RÉSULTAT DE LA COMBINAISON GÉNÉRALISÉE APPLIQUÉE AUX QUATRE DISTRIBUTIONS.....	135
FIGURE 5.20 : EXEMPLES DE CAS RENCONTRÉS LORS DE LA PRISE DE DÉCISION (SUR LA FIGURE DE GAUCHE, LA DÉCISION FINALE SE MATÉRIALISE PAR LA NOTE D'UNI 2.5 TANDIS QUE SUR LA FIGURE DE DROITE, AUCUNE DÉCISION NE PEUT ÊTRE PRISE).....	137
FIGURE 5.21 : SOUS-ENSEMBLES EMBÔITÉS DÉFINIS À PARTIR D'UNE DISTRIBUTION DE POSSIBILITÉ	141
FIGURE 5.22 : RÉSULTAT DU CALCUL DES MASSES DE CROYANCE SUR L'EXEMPLE	142
FIGURE 5.23 : EFFETS DUS À LA BAISSÉ DU DEGRÉ DE FIABILITÉ DE LA SOURCE (FIGURE DU HAUT).....	144
FIGURE 5.24 : ILLUSTRATION DES NOTIONS DE CRÉDIBILITÉ ET DE PLAUSIBILITÉ DANS LE CAS GÉNÉRAL.....	148
FIGURE 5.25 : ILLUSTRATION DES NOTIONS DE CRÉDIBILITÉ ET DE PLAUSIBILITÉ DANS LE CAS DE SOUS-ENSEMBLES EMBÔITÉS.....	149
FIGURE 5.26 : EXEMPLE DE DISTRIBUTION DE MASSES DE CROYANCE POUR CHACUNE DES HYPOTHÈSES.....	153
FIGURE 5.27 : SCHÉMA ILLUSTRANT LA MÉTHODE DES SOURCES SPÉCIALISÉES.....	154
FIGURE 5.28 : SCHÉMA REPRÉSENTANT LA CONSTRUCTION DE L'INDICE DE CONFIANCE	158
FIGURE 6.1 : SCHÉMA DE PRINCIPE DE LA CONSTRUCTION DES JEUX DE DONNÉES A_1 ET A_2	163

FIGURE 6.2 : ATTRIBUTION DES VALEURS DE VITESSE PAR ZONE POUR LA SIMULATION	165
FIGURE 6.3 : DSP DES SIGNAUX EXPÉRIMENTAUX ET SIMULÉS SUR LA SECTION DÉGRADÉE	166
FIGURE 6.4 : EXEMPLE DE LOI D'USURE APPLIQUÉE SUR LA RAIDEUR D'UN RESSORT (USURE D'ENVIRON 30%)	167
FIGURE 6.5 : FAISCEAU DE DSP DES SIGNAUX SIMULÉS PAR LA VARIATION DES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES D'UN VÉHICULE TRACEUR SEUL SUR LA SECTION DÉGRADÉE	168
FIGURE 6.6 : FAISCEAU DE DSP FINAL CORRESPONDANT À LA SIMULATION DE PLUSIEURS PASSAGES DE VÉHICULES TRACEURS DIFFÉRENTS SUR LA SECTION DÉGRADÉE	169
FIGURE 6.7 : DEGRÉ DE CONFLIT INTER-SOURCES GLOBAL POUR CHAQUE JEU DE DONNÉES ET POUR CHAQUE MÉTHODE DE FUSION ...	172
FIGURE 6.8 : MOYENNE DES VALEURS ABSOLUES DES ÉCARTS DE NOTES POUR CHAQUE MÉTHODE DE FUSION.....	175
FIGURE 6.9 : DISTRIBUTION DES ÉCARTS DE NOTES POUR LA BANDE PO (JEU A ₀)	177
FIGURE 6.10 : DISTRIBUTION DES ÉCARTS DE NOTES POUR LA BANDE MO (JEU A ₀)	178
FIGURE 6.11 : DISTRIBUTION DES ÉCARTS DE NOTES POUR LA BANDE GO (JEU A ₀)	178
FIGURE 6.12 : ÉVALUATION DES NIVEAUX D'EXACTITUDE POUR LES JEUX DE CLASSE A, B ET C.....	180
FIGURE 6.13 : ÉVOLUTION DU NIVEAU D'EXACTITUDE MOYEN CALCULÉ SUR L'ENSEMBLE DES SEGMENTS DE LA BANDE MO EN FONCTION DU POURCENTAGE DE PRÉSENCE DE SOURCES DÉFAILLANTES	181
FIGURE 6.14 : ÉVOLUTION DU NIVEAU D'EXACTITUDE DU FILTRE DE KALMAN SELON L'ORDRE COMBINATOIRE	182
FIGURE 6.15 : MOYENNE DES INDICES DE CONFIANCE POUR CHAQUE MÉTHODE ET POUR CHAQUE JEU	184
FIGURE 6.16 : CONFRONTATION ENTRE L'INDICE DE CONFIANCE ET L'ÉTAT DE LA CHAUSSÉE	185
FIGURE 6.17 : ÉVOLUTION DES INDICES DE CONFIANCE EN PRÉSENCE DE SOURCES DÉFAILLANTES	186
FIGURE 6.18 : ÉCARTS DE NOTES AVEC LA RÉFÉRENCE POUR LA BANDE PO	188
FIGURE 6.19 : ÉCARTS DE NOTES AVEC LA RÉFÉRENCE POUR LA BANDE MO.....	188
FIGURE 6.20 : ÉCARTS DE NOTES AVEC LA RÉFÉRENCE POUR LA BANDE GO.....	189
FIGURE B.1 : SCHÉMATISATION DU MODÈLE QUART DE VÉHICULE	207
FIGURE C.1 : SCHÉMATISATION DU MODÈLE DEMI-VÉHICULE LONGITUDINAL	211
FIGURE C.2 : DSP DES SIGNAUX DÉLIVRÉS PAR 20 VÉHICULES TRACEURS VIRTUELS.....	214

Liste des tables

TABLEAU 1.1 : PRIX DE VENTE APPROXIMATIFS DE QUELQUES APPAREILS (2013)	18
TABLEAU 1.2 : CARACTÉRISTIQUES DES 3 BANDES D'ONDES DANS LE SYSTÈME NBO	26
TABLEAU 1.3 : TABLE DE CONVERSION DES ÉNERGIES CALCULÉES	27
TABLEAU 1.4 : EXEMPLE DE SPÉCIFICATIONS ÉTABLIES POUR UNE ÉPAISSEUR DE COUCHE DE ROULEMENT INFÉRIEURE À 3 CM. LES VITESSES TRADUISENT LE TYPE D'INFRASTRUCTURE.	30
TABLEAU 3.1 : VALEURS D'ACCÉLÉRATIONS VERTICALES PARTICULIÈRES ENREGISTRÉES	54
TABLEAU 3.2 : PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES ACCÉLÉROMÈTRES UTILISÉS DANS LES ESSAIS	57
TABLEAU 3.3 : PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES CAPTEURS DE DISTANCE/DÉPLACEMENT	58
TABLEAU 3.4 : CARACTÉRISTIQUES DES FONCTIONS DE TRANSFERT - ESSAIS BASSES FRÉQUENCES	64
TABLEAU 4.1 : COMPOSITION DES PROGRAMMES DE TESTS	82
TABLEAU 4.2 : RÉPARTITION (EN %) DE L'ÉCART DE SENSIBILITÉ SUR LES SEGMENTS COMPOSANT LE CIRCUIT-TEST	83
TABLEAU 4.3 : ÉCART MAXIMAL (EN POINT) LIÉ À L'INFORMATION DE DISTANCE SUR LES SEGMENTS DU CIRCUIT-TEST	85
TABLEAU 4.4 : ÉCARTS DE NOTES GÉNÉRÉS PAR LE DÉCALAGE D'ABSCISSE CURVILIGNE	87
TABLEAU 4.5 : RÉPARTITION (EN %) DE L'ERREUR DE TRACE SUR LES SECTIONS PARTICULIÈRES DU CIRCUIT-TEST	89
TABLEAU 4.6 : RÉPARTITION (EN %) DE L'ERREUR DE VITESSE SUR LES SECTIONS PARTICULIÈRES DU CIRCUIT-TEST	91
TABLEAU 5.1 : PRINCIPALES PROPRIÉTÉS MATHÉMATIQUES D'UN OPÉRATEUR DE COMBINAISON	103
TABLEAU 5.2 : PRINCIPAUX COMPORTEMENTS DES OPÉRATEURS DE COMBINAISON	103
TABLEAU 5.3 : LISTE DES MÉTHODES DE FUSION INVESTIGUÉES	115
TABLEAU 6.1 : PRINCIPALES FORCES ET FAIBLESSES DES JEUX DE DONNÉES EXPÉRIMENTAUX ET SYNTHÉTIQUES	162
TABLEAU 6.2 : POURCENTAGE DE SEGMENTS DU CIRCUIT-TEST	174

Introduction générale

Éléments de contexte

Les travaux de thèse rapportés dans ce mémoire ont été réalisés au sein du LAMES (Laboratoire Auscultation, Modélisation et Expérimentations des infraStructures de transport) qui est l'un des laboratoires constituant l'IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux).

L'une des thématiques de recherche du LAMES concerne l'auscultation de « surface » des chaussées. Cette activité porte sur les méthodes et les outils permettant de détecter les défauts présents sur la couche dite de roulement, qui est la couche supérieure d'une chaussée, celle sur laquelle circulent les véhicules. On recense une grande variété de défauts à la surface d'une chaussée (arrachement, orniérage, fissuration, nid de poule,...) qui peuvent être classifiés selon plusieurs critères : longitudinaux, transversaux, ponctuels, périodiques, ressentis ou non par les automobilistes, etc.

Les travaux conduits dans la thèse se sont focalisés sur les défauts qui affectent l'uni longitudinal des routes. Ces défauts se caractérisent par des irrégularités du profil longitudinal (« bosses » et « creux ») contenues dans la bande de longueurs d'ondes [0.7 m ; 45 m]. La présence de ces irrégularités est principalement due à des défauts de construction mais également à des dégradations survenant au cours de la vie de l'infrastructure.

L'uni longitudinal d'une route altère la plupart des fonctions que doit assurer la route et pèse défavorablement sur les contraintes qu'elle doit respecter :

- fonction socio-économique (célérité de la circulation des personnes et des marchandises)
- fonction de sécurité (risque de délestage du contact pneumatique – chaussée, donc de dérapage du véhicule)
- fonction de confort (mise en vibration du véhicule, secousses, cahots...)
- contrainte environnementale (surconsommation de carburant, des émissions nocives...)

Depuis plusieurs décennies, en France mais aussi à l'étranger, la solution retenue pour mesurer l'uni longitudinal de manière dynamique est l'utilisation d'appareils spécialisés, appelés également « à grand rendement », c'est-à-dire des systèmes généralement très sophistiqués capables d'effectuer des mesures en s'insérant dans le trafic routier. Ces appareils délivrent des mesures très précises avec un niveau de fiabilité élevé et sont généralement pourvus de moyens informatiques embarqués pour le stockage et le prétraitement des données.

Cependant, pour les activités de suivi des défauts d'uni, ces moyens de mesure présentent plusieurs limites. Tout d'abord, les mesures sont exécutées périodiquement (tous les 3 à 6 ans dans le meilleur des cas) dans le cadre de campagnes d'auscultation. Il n'est donc pas

possible de détecter les apparitions ou les aggravations rapides de défauts entre ces campagnes, alors que ces situations sont finalement celles qui intéressent le plus les gestionnaires car elles sont bien souvent annonciatrices de « pathologies » plus préoccupantes (ex : défaut structurel). Par ailleurs, il faut rappeler que les appareils d'auscultation actuels, de par leurs équipements, sont des moyens de mesures onéreux, disponibles en quelques exemplaires seulement, et attachés de manière quasi-définitive à un véhicule-support qui n'est pas à l'abri de défaillances ou d'une usure naturelle.

Pour tenter de surmonter ces inconvénients, nous avons exploré une solution d'auscultation innovante obéissant à une nouvelle logique et qui fait intervenir deux moyens de recueil d'informations utilisés conjointement : des capteurs « bas-coût » et des véhicules traceurs.

Depuis plusieurs années, l'usage des capteurs dits de « bas-coût » s'est très largement répandu notamment à travers les produits technologiques du quotidien (téléphonie, électroménager, jeux vidéo, etc.). Bien souvent, la réduction du coût résulte d'une production massive et n'implique pas nécessairement une baisse significative du niveau de performance. Il est donc raisonnable de penser que l'utilisation de capteurs bas-coût pouvait être également compatible avec le développement de nouvelles solutions technologiques pour les activités d'auscultation de la surface des chaussées. Dans ce contexte, le qualificatif « bas-coût » renvoie à un capteur ou un système de mesure dont le montant est très nettement inférieur¹ à celui des capteurs ou des systèmes haut-de-gamme qui équipent aujourd'hui les appareils à grand rendement.

L'emploi de véhicules traceurs permet, quant à lui, de collecter des informations à des fréquences plus élevées et sur un ensemble spatial relativement large. L'expression « véhicules traceurs » désigne une flotte de véhicules qui ont généralement une autre fonction première que la mesure de l'état des chaussées (transport de personnes ou de marchandises, patrouillage, etc.), mais qui sont instrumentés au moyen de capteurs bas-coût pour mesurer l'état de la route de façon « transparente » pour l'utilisateur, et dont il est possible de suivre la « trace », c'est-à-dire, dans notre contexte, le cheminement géographique sur le réseau routier.

La solution d'auscultation que nous avons étudiée combine les notions mentionnées précédemment afin de pouvoir recueillir des données, à moindre coût, (presque) partout et (presque) tout le temps. Utilisée en premier échelon de détection sur les réseaux structurants, elle a l'ambition de cibler précocement et efficacement les zones défectueuses, optimisant ainsi le déclenchement des interventions d'appareils spécialisés. En d'autres termes, le gestionnaire, alerté en temps légèrement différé (voire en temps réel) pourra, s'il le souhaite, faire intervenir des appareils à grand rendement sur la zone en question afin d'obtenir une meilleure caractérisation des défauts. Appliquée sur les réseaux secondaires, cette solution d'auscultation pourrait même s'avérer suffisante au gestionnaire pour surveiller leurs évolutions.

La thèse a été engagée principalement pour explorer la faisabilité et les performances potentielles de cette nouvelle approche pour l'auscultation des chaussées et donc sa place à côté des moyens existants. Il est clair qu'il s'agit d'un chantier très vaste faisant intervenir une multitude de défis scientifiques et techniques (ex : communication véhicules-infrastructure, gestion des bases de données) et économiques (ex : trouver un « business

¹ Les capteurs utilisés dans ces travaux coûtent 50 fois à 100 fois moins que les capteurs montés sur les systèmes spécialisés.

model » acceptable par le gestionnaire d'infrastructure et par le gestionnaire de flotte de véhicules qui participe au recueil de données, etc.). Compte-tenu de ce contexte, cette thèse n'est donc qu'un premier pas.

Problématique et objectifs de la thèse

Dans le cadre d'une thèse, il n'était pas possible d'aborder le problème de l'auscultation des routes dans toute sa généralité. C'est pourquoi il a été choisi (cf. ci-avant) de restreindre la problématique au recueil d'une information très utile aux gestionnaires de réseaux routiers, et pour lequel il existe effectivement des solutions technologiques bas-coût sur le marché : la caractérisation de l'uni des routes. Ainsi, compte-tenu du contexte de l'étude, nous avons retenu une problématique opérationnelle que nous résumons à travers l'interrogation suivante :

« En combinant capteurs bas-coût (accéléromètres, GPS) et véhicules traceurs pour le recueil de données, peut-on proposer aux gestionnaires d'infrastructures une méthode produisant une information relative à la qualité de l'uni longitudinal qui soit exploitable ? ».

Pour répondre à cette problématique, une série de sous-problèmes a été identifiée permettant ainsi de mieux appréhender les difficultés techniques et scientifiques mises en jeu. Plus précisément, l'interrogation citée précédemment induit deux questions successives qui ont servi à articuler les travaux de thèse :

▪ 1^{ère} question : *Peut-on, avec les moyens d'instrumentations proposés (capteurs bas-coût), recueillir des données suffisamment riches, c'est-à-dire offrant une qualité de « matière première » suffisante pour être travaillée par la suite ?*

Ceci renvoie à des actions dans le domaine de la prise d'information, notamment :

- Développer une chaîne de mesure qui offre un compromis intéressant entre la qualité de l'observation effectuée et les contraintes de coût ;
- Choisir le positionnement adéquat des instruments de mesure dans le véhicule traceur ;
- Évaluer le niveau de richesse de l'information en sortie d'un véhicule traceur et y associer un indicateur pour la traduction du niveau d'uni.

Il s'agit donc de sélectionner d'abord des capteurs bas-coût et de les caractériser afin d'avoir une connaissance précise de leur comportement avant l'intégration dans le véhicule traceur. Par la suite, on s'intéresse à la réponse de ces capteurs dans leur environnement de travail (mode embarqué) avec toutes les contraintes que cela implique.

▪ 2^{ème} question : *Peut-on proposer une méthode permettant le traitement des données produites par ces capteurs qui tienne compte de leurs spécificités et en tire le meilleur parti possible ?*

Cette seconde question ne peut trouver de réponse que dans le choix des méthodes de traitement de l'information car *a priori* les moyens de collecte vont générer un vaste volume d'informations qu'il faudra traiter. Donc à partir de cet ensemble, l'objectif final consiste à délivrer, quand cela est possible, une information synthétique prenant, par exemple, la

forme d'un indicateur. Pour répondre à ce défi, il est nécessaire d'effectuer les actions suivantes :

- Identifier les méthodes qui vont tenir compte des propriétés et de la qualité des informations entrantes pour les agréger de façon pertinente et efficace ;
- Définir le format de l'information sortante et déterminer des règles de décision ou de non-décision.
- En fonction des critères retenus, sélectionner la ou les méthode(s) offrant le plus haut degré de performance.

Ainsi, à partir des moyens qu'on se propose d'utiliser dans notre solution d'auscultation, nous avons formulé une problématique opérationnelle qui nous paraissait être à la fois concrète et pertinente vis-à-vis des gestionnaires d'infrastructures. Dans le cadre de cette thèse, nous nous proposons d'étudier plus spécifiquement

1. La génération de l'information à l'échelle d'un véhicule traceur seul :
2. La combinaison des informations issues d'un ensemble de véhicules traceurs.

Cette décomposition a structuré notre approche, et donc, par voie de conséquence, ce mémoire.

Organisation du mémoire

L'organisation de ce manuscrit reflète l'organisation que nous avons réellement adoptée pour expliciter la problématique, construire et évaluer une solution.

Le premier chapitre, d'origine essentiellement bibliographique, dresse un état des lieux des différentes méthodes et outils opérationnels utilisés pour mesurer l'uni longitudinal des chaussées. Nous y expliquons l'interaction entre l'uni et la dynamique des véhicules puisque, comme nous le verrons, d'une part on ne saurait étudier un moyen de mesures sans considérer l'usage fait de ces mesures et, d'autre part, elle est à la source de notre solution d'auscultation. Par la suite, nous rappelons également quelles sont les techniques utilisées pour analyser les informations d'uni et comment leurs résultats sont exploités par les gestionnaires. À la fin de ce chapitre, nous menons une analyse fonctionnelle sur l'usage actuel des véhicules traceurs et des capteurs bas-coût dans le but de faire ressortir leur potentiel technologique et scientifique.

Le deuxième chapitre décrit dans un premier temps le concept général de la solution d'auscultation envisagée dans cette thèse puis, dans un second temps, se recentre sur la problématique spécifique de la mesure d'uni. Un ensemble de spécifications délimitant le cadre et les objectifs des travaux de thèse (cahier des charges) est alors proposé.

Le troisième chapitre répond à la première question évoquée dans la description de la problématique. En premier lieu, il décrit les approches que nous avons menées pour sélectionner les capteurs bas-coût et maîtriser, du mieux possible, leurs performances. Par la suite, il précise, en fonction du niveau d'instrumentation retenu, le pouvoir de détection des défauts d'uni (c'est-à-dire la capacité à restituer partiellement ou intégralement ces défauts).

Les chapitres suivants répondent à la seconde question exposée dans la problématique.

Dans le quatrième chapitre, nous avons recensé les facteurs qui pouvaient potentiellement nuire à ce pouvoir de détection et nous avons évalué leurs effets dans l'échelle d'évaluation de l'uni correspondant à l'indicateur choisi.

La quantification de ces effets est alors reprise dans le cinquième chapitre relatif à la présentation des méthodes de fusion de données. Ce chapitre est relativement dense puisque nous avons fait le choix de considérer un large spectre de méthodes de fusion existantes que nous avons adaptées à la problématique.

Le sixième chapitre décrit l'application des méthodes de fusion à plusieurs jeux de données « test » construits dans le but d'offrir un niveau de réalisme suffisant. L'analyse des résultats alimente alors la discussion portant sur le choix de la (ou les) meilleure(s) méthode(s) de fusion selon les critères propres à cette étude.

Enfin, en conclusion générale, un bilan est dressé afin d'apporter des réponses claires quant au degré de faisabilité de la solution d'auscultation considérée dans cette thèse. La réponse apportée s'appuie sur une quantification de l'écart de précision existant entre les estimations délivrées par les méthodes de fusion et des mesures de référence. Cette étude s'achève par quelques suggestions de prolongements scientifiques et technologiques portant en particulier sur l'utilisation des méthodes pour fusionner les informations décrivant l'état de l'uni des chaussées.

Chapitre 1

État de l’art sur le concept de véhicules traceurs et sur l’uni longitudinal (sa mesure et son exploitation par les gestionnaires)

SOMMAIRE

1.1 État de l’art sur la mesure de l’uni longitudinal et de son exploitation	8
1.1.1 Notions d’uni longitudinal des chaussées.....	8
1.1.2 Appareils pour la mesure d’uni.....	13
1.1.3 L’interaction uni-dynamique du véhicule	19
1.1.4 Analyse de l’uni et procédure opérationnelle	24
1.2 État de l’art sur la notion de véhicules traceurs	31
1.2.1 Définitions et terminologie	31
1.2.2 Instrumentation et technologies de véhicules traceurs.....	32
1.2.3 Schéma fonctionnel et architecture opérationnelle.....	33
1.2.4 Forces et faiblesses liées à l’usage de véhicules traceurs	36
1.2.5 Les applications.....	37
1.3 Bilan de l’état de l’art.....	40

En premier lieu, ce chapitre introduit la notion d’uni longitudinal des chaussées, qui est le paramètre de l’infrastructure auquel se sont intéressés les travaux de thèse.

Il présente ensuite les différents outils de mesure utilisés aujourd'hui en France mais aussi à l'étranger en insistant sur leurs évolutions, leurs forces et leurs faiblesses.

Nous décrivons comment ces mesures sont exploitées pour calculer des indicateurs, qui servent eux-mêmes à l’analyse puis à l’exploitation opérationnelle de l’uni des chaussées par les gestionnaires.

La fin de ce chapitre est dédiée à la notion de véhicules traceurs ; nous y avons mentionné les applications pour lesquelles ces types de véhicules sont actuellement utilisés tout en soulignant l’intérêt qu’ils présentent potentiellement pour les activités d’auscultation.

1.1 État de l'art sur la mesure de l'uni longitudinal et de son exploitation

L'uni longitudinal est un paramètre de l'infrastructure dont la mesure a fait l'objet d'un nombre assez conséquent de développements de matériels. Ces développements ont globalement toujours eu la même philosophie : améliorer encore et encore la précision des relevés. Les paragraphes suivants introduisent la notion d'uni, les moyens de mesures utilisés jusqu'à présent, ainsi que les méthodes d'analyse mises en œuvre pour traduire ces mesures d'uni en un indicateur plus facilement exploitable par les gestionnaires.

1.1.1 Notions d'uni longitudinal des chaussées

Dans ce paragraphe, la notion d'uni est abordée à travers sa définition technique mais également à travers les effets de ses défauts.

A – Définition de l'uni longitudinal

Avant de donner une définition précise de l'uni longitudinal, il est important de rappeler très brièvement ce qu'est une chaussée routière.

Une chaussée est une superposition de couches de différentes natures ayant chacune une fonction bien spécifique. La composition et les propriétés de ces couches varient en fonction des contraintes qui sont exercées (ex : contraintes liées au trafic, contraintes météorologiques...). Le calcul de l'épaisseur des couches répond à un objectif constant : faire en sorte que la chaussée résiste durablement à un ensemble de sollicitations [1].

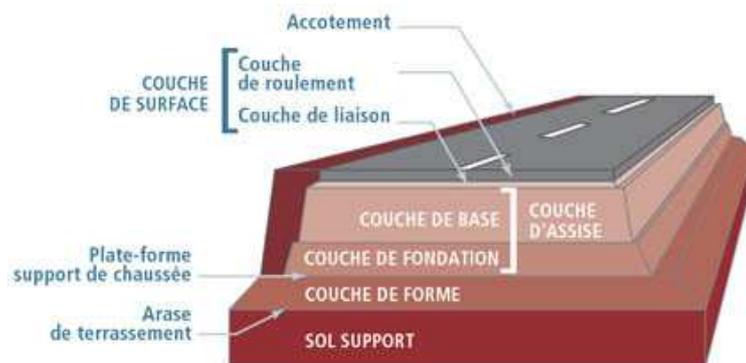


Figure 1.1 : Configuration type d'une structure de chaussée

Dans cette étude, la couche de chaussée qui va faire l'objet d'une auscultation est la couche dite de « roulement ». Il s'agit de la couche superficielle, celle qui est directement au contact des agressions extérieures. La couche de roulement est multifonctions puisqu'elle :

- protège les couches inférieures des infiltrations d'eau ;
- garantit des propriétés de surface dans les relations véhicules-infrastructures (effets d'acoustique, d'adhérence, de confort...).

En matière d'auscultation de chaussées, les caractéristiques géométriques de la couche de roulement sont fréquemment étudiées. Elles sont, jusqu'à très récemment, examinées et analysées selon deux axes distincts : le sens longitudinal (sens de circulation) et le sens transversal (sens pris dans la largeur de la chaussée). L'une des caractéristiques géométriques longitudinales très souvent mesurée est le profil en long.

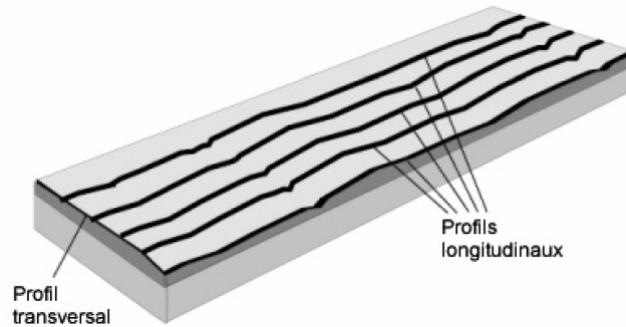


Figure 1.2 : Schéma illustrant les notions de longitudinalité et de transversalité sur une chaussée

Le profil en long d'une chaussée comporte une multitude d'irrégularités allant d'échelles très petites (submillimétriques) à des échelles beaucoup plus grandes (décamétriques). Pour apprécier au mieux ces irrégularités, on les décompose en quatre¹ domaines de texture [2] :

- la microtexture (irrégularités dont les longueurs d'ondes² sont inférieures à 0.5 mm) ;
- la macrotecture (irrégularités dont les longueurs d'ondes sont comprises entre 0.5 mm et 5 cm) ;
- la mégatexture (irrégularités dont les longueurs d'ondes sont comprises entre 5 cm et 70 cm) ;
- l'uni longitudinal (irrégularités dont les longueurs d'ondes sont supérieures à 0,7 m).

L'uni d'une chaussée est, plus précisément, le terme technique pour désigner les irrégularités de profil longitudinal contenues dans l'intervalle de longueurs d'ondes [0.7 m ; 45 m]. Lorsque l'amplitude et la quantité des irrégularités deviennent trop fortes, on peut parler de défauts d'uni.

B – Les défauts d'uni et leurs conséquences

Chaque défaut d'uni impacte soit l'utilisateur soit le véhicule en lui-même voire parfois les deux simultanément. C'est particulièrement le cas de l'uni longitudinal qui intervient principalement dans les domaines suivants :

¹ Pour l'auscultation des chaussées aéroportuaires, on introduit un autre domaine appelé TGO (Très Grandes Ondes). Les longueurs d'ondes des irrégularités prises en compte sont approximativement comprises entre 50 m et 200 m.

² Physiquement, la "longueur d'ondes" d'une irrégularité correspond à sa dimension caractéristique. Mathématiquement, ce serait la longueur d'ondes d'une sinusoïde ajustée au mieux sur cette irrégularité.

▪ Sécurité routière

L'infrastructure doit garantir certaines caractéristiques afin que le couplage revêtement - pneumatique offre le meilleur niveau d'adhérence possible au conducteur. Des défauts d'uni peuvent générer des phénomènes de délestage entre les pneumatiques et la chaussée ; la liaison au sol n'étant plus parfaite, les risques de pertes d'adhérence s'accroissent. Il est très difficile de trouver des études qui établissent un lien direct entre défauts d'uni et accidentologie. En effet, dans bien des cas, il faut considérer un ensemble de défauts concernant différentes classes d'uni et de texture. Par contre, il est admis que les défauts d'uni constituent un facteur aggravant dans les mécanismes conduisant à l'accident [3].

▪ Confort

Les irrégularités de surface appartenant au domaine de l'uni longitudinal génèrent également des mouvements verticaux du véhicule qui peuvent être ressenties, ou pas, par les usagers. Selon l'amplitude et la fréquence des mouvements, ces derniers peuvent alors se sentir en situation d'inconfort à travers différentes perceptions (tactiles, visuelles, auditives). Lorsque celles-ci atteignent le stade de nuisances, elles sont susceptibles de provoquer des énervements et des pertes de concentration chez l'utilisateur et altérer ainsi son attitude de conduite. En outre, en présence de défauts d'uni, le conducteur va machinalement chercher à réduire les gênes occasionnées en modulant sa vitesse (très souvent en la diminuant mais parfois en l'augmentant). Certaines études montrent d'ailleurs qu'il s'agit, dans certaines configurations (ex : virage), d'un des principaux paramètres de l'infrastructure influençant le choix de la vitesse de passage [4,5]. Enfin, il ne faut pas oublier qu'à travers le critère de confort, l'utilisateur peut se faire une idée de la qualité de l'infrastructure qu'il emprunte et par conséquent du sérieux des organismes en charge de son entretien.

▪ Protection de l'environnement

Cet aspect est beaucoup moins prégnant que ceux décrits précédemment. Néanmoins, compte-tenu des enjeux environnementaux actuels et futurs, il devient de plus en plus pertinent de l'étudier. Les effets mécaniques et dynamiques provoqués par des défauts d'uni sur les véhicules peuvent générer des surconsommations de carburant. Plusieurs études ont montré que, selon la gravité des défauts d'uni, ces surconsommations pouvaient varier de 1 à 5 % [6,7]. Mais, jusqu'à présent, personne n'a réellement réussi à établir une relation de corrélation exacte entre l'augmentation de la consommation de carburant d'un véhicule et la quantité de défauts d'uni. Seules des relations de type implication ont pu être démontrées. En outre, il est également clair que des hausses de consommation de carburant entraînent systématiquement l'émission de particules polluantes (ex : particule CO₂) plus élevée. Cette relation de cause à effet fait actuellement l'objet de nombreuses études [8].

Il existe d'autres aspects, plus en lien avec la notion d'interaction véhicule-infrastructure, qui sont moins souvent considérés mais que nous rappelons néanmoins :

▪ Usure du véhicule

L'une des fonctions d'un véhicule est de compenser les défauts présents à la surface de la chaussée pour améliorer la sécurité et le confort de l'utilisateur. Dans le cas des défauts d'uni, cette compensation s'opère essentiellement par le couple pneumatiques-suspensions. Des

sollicitations trop fréquentes et trop excessives vont alors accélérer le vieillissement prématuré de ces éléments et précipiter leur remplacement ; au final, l'utilisateur voit donc le coût de maintenance de son automobile s'alourdir.

▪ Dégradation de la structure de chaussée

Le trafic des poids lourds représente, avec le facteur météorologique (épisodes de gel/dégel), les principales causes de dégradation des structures de chaussée. Pour dimensionner correctement une structure de chaussée, l'une des premières choses à faire est d'estimer le volume et l'agressivité du trafic poids lourds et d'en déduire les charges cumulées qu'elle va devoir supporter [1]. Mais la présence de défauts d'uni à la surface de la chaussée, en générant des mouvements de caisse, peut générer des effets de surcharges dynamiques au passage de poids lourds ; le terme « surcharge » signifie alors que la structure de chaussée va subir des contraintes plus fortes que prévues. Les conséquences pour la structure sont importantes : apparition d'endommagements dans le corps de chaussée et aggravation des défauts d'uni à la surface.

▪ L'uni comme indicateur de défaut structurel

La détection et l'analyse des défauts d'uni peuvent également servir à d'autres composantes d'auscultation et en particulier l'auscultation structurelle. Comme illustré précédemment (Fig. 1.1), une structure de chaussée est composée de plusieurs couches. Il arrive parfois que les défauts déjà présents ou apparaissant dans les couches inférieures se propagent jusqu'à la couche de roulement ou, en tous cas modifient ses caractéristiques. On se retrouve alors dans le cas où, à partir des défauts d'uni observés à la surface, on peut essayer d'identifier certains défauts structurels. Actuellement, en France, des indicateurs dits de qualité de structure (QS) sont calculés à partir d'une analyse comparative de l'uni longitudinal à l'intérieur et à l'extérieur des bandes de roulement [9].

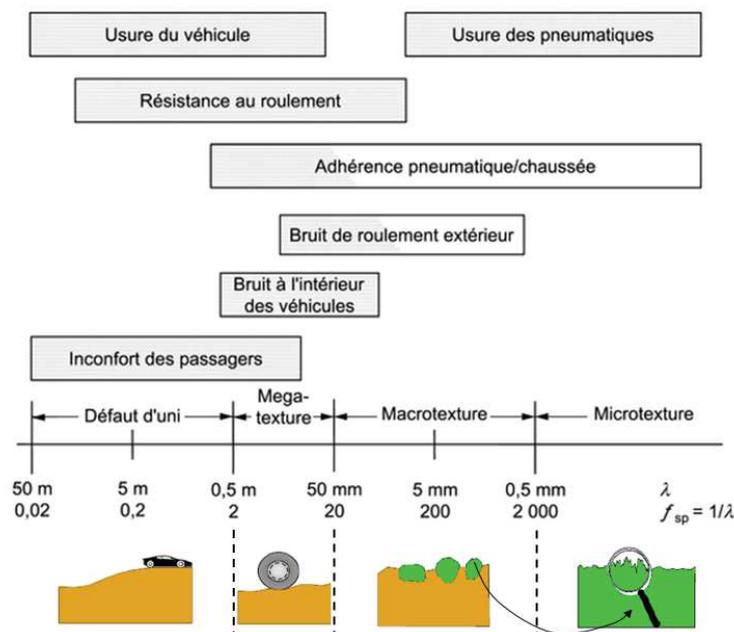


Figure 1.3 : Domaines de texture et principaux facteurs d'impact

C – Facteurs à l’origine des défauts d’uni

Un uni longitudinal parfait est un uni dépourvu de toute irrégularité et est donc totalement plan. Dans les faits, un tel uni n’existe pas sur les réseaux routiers puisque ceux-ci présentent toujours un certain niveau d’irrégularités qui, au-delà d’un certain seuil, peuvent être qualifiées de défauts. Ces irrégularités de surface se traduisent de diverses façons : ondulations, dénivellations, flaches, pelades, nid-de-poule, etc.



Figure 1.4 : Clichés de chaussées présentant des défauts d’uni longitudinal (ondulations)

Il existe essentiellement deux raisons principales expliquant la présence de défauts d’uni à la surface de la chaussée. La première provient de dysfonctionnements survenant lors de la construction des différentes couches composant la structure et plus particulièrement de la couche de roulement. Lors de cette phase, l’essentiel des défauts est généré pendant les opérations de répandage (dépôt et répartition des matériaux sur la couche à revêtir) et de compactage (tassement de la couche fraîchement répandue afin d’augmenter sa densité). Ces opérations nécessitent l’application stricte de protocoles et l’intervention d’engins de chantier dotés d’équipements très spécifiques, parfois difficiles à manier. Un non-respect des méthodes ou une défaillance de matériels peuvent alors engendrer des défauts d’uni ponctuels (très localisés) ou périodiques (se reproduisant sur une distance plus ou moins longue).



Figure 1.5 : Opérations de répandage (à droite de l’image) et de compactage (à gauche)

Le second facteur de génération de défauts d’uni correspond au vieillissement naturel de la chaussée suite aux agressions continues du trafic et des conditions météorologiques. Ce

vieillesse se manifeste par des dégradations qui peuvent soit directement survenir sur la couche de roulement soit résulter de la propagation de défauts initiés dans les couches inférieures de la chaussée.

1.1.2 Appareils pour la mesure d’uni

En premier lieu, il est bon de rappeler qu’un seul et même appareil ne peut mesurer un profil complet (des irrégularités allant de quelques millimètres à plusieurs centaines de mètres) qui plus est de façon continue (sans discrétisation). Il est donc plus juste de dire qu’un appareil est capable de mesurer le pseudo-profil de la chaussée. Mais, dans ce manuscrit, par commodité d’écriture, le terme « profil » renverra, comme dans la plupart des ouvrages, à l’expression pseudo-profil.

Les premières tentatives de mesure d’uni longitudinal, et donc l’apparition des premiers appareils, remontent au début du 20^{ème} siècle. À travers les années, les matériels de mesure ont connu bien des évolutions en s’adaptant aux spécificités des réseaux à ausculter et en profitant des avancées technologiques successives (dans les domaines de l’informatique et de l’électronique par exemple).

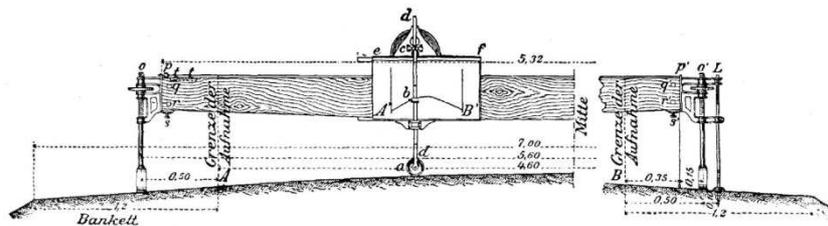


Figure 1.6 : Croquis d'un des premiers appareils d'auscultation (début du 20^{ème} siècle)

L’objectif du paragraphe suivant n’est pas de décrire précisément les différents appareils passés et contemporains mais plutôt d’exposer très succinctement leur principe de mesure et de faire ressortir leurs forces et faiblesses. Ceci permettra *in fine* de positionner nos propositions dans une démarche de progrès. On distingue habituellement deux classes d’appareils selon leur niveau de rendement c’est-à-dire selon leur aptitude à délivrer aisément, à vitesse élevée et en abondance, des relevés de profils.

A – Les appareils à faible rendement

Il s’agit de systèmes réalisant des relevés en mode statique ou quasi-statique. À partir d’un objet de géométrie connue ou d’une position connue, on détermine de façon comparative, les irrégularités de surface.

Les systèmes de type « règle roulante » (ex : viagraphes et profilographes) sont capables de mesurer des différences d’élévation relativement faibles (≈ 5 mm) mais d’autres, plus récents et plus modernes comme le Dispstick Profiler (système utilisant des inclinomètres), garantissent une précision de 0.005 mm, qui plus est avec une lecture directe (Fig. 1.7). Quel que soit le genre de système, l’inconvénient majeur est toujours le même : les relevés sont effectués à un pas fixe et à la vitesse de marche de l’opérateur. Ces systèmes ne peuvent

donc être utilisés que sur des voies soit complètement fermées à la circulation soit « protégées » pour assurer la sécurité des opérateurs et des conducteurs. Les appareils règle roulante et viagraphes, beaucoup utilisés dans les années 60 et 70, ne sont presque plus employés de nos jours à la différence du système Dipstick qui est encore vendu notamment pour son aptitude à délivrer également des informations dans d'autres domaines de texture (mégastructure et macrostructure).

Les relevés de type topographiques (théodolite, GPS) offrent un niveau de précision plus faible que les moyens décrits précédemment (les relevés par GPS en conditions standards de mesures sont généralement centimétriques) et ils nécessitent, en plus, le déplacement de l'opérateur à pied. Néanmoins, le profil peut être construit à des intervalles de distance très grands et variables. C'est pour cette raison que les relevés topographiques peuvent servir à la reconstruction du profil pour les longueurs d'ondes décimétriques ou supérieures.



Figure 1.7 : Mise en œuvre d'un profilographe (vue de gauche) et du Dipstick Profiler (vue de droite)

B – Les appareils à grand rendement

Les appareils à grand rendement sont des systèmes tractés ou embarqués dans des véhicules. Ils permettent de réaliser des mesures à des vitesses plus élevées et donc sur de grands linéaires. Dans cette catégorie, on distingue les appareils de type « réponse » et les appareils de type « profilomètre ».

▪ Les appareils de type « réponse »

Ces systèmes ont la particularité de ne pas exécuter des mesures de profil de façon directe mais de suivre une approche « relative » ou indirecte par la mesure de certains mouvements internes ou absolus du véhicule ou du système tracté. L'un des appareils les plus connus dans cette catégorie est le Bump Integrator (Fig. 1.8). Développé au début des années 80, celui-ci mesure les écarts successifs entre le corps du véhicule et ses suspensions. Ces déplacements sont ensuite directement convertis en indicateur d'uni appelé IRI (cf. paragraphe 1.1.3). Le Bump Integrator est un système robuste qui est capable d'œuvrer à n'importe quelle vitesse sur des chaussées non revêtues (d'où son utilisation encore fréquente dans les pays en voie de développement) ou revêtues y compris lorsque celles-ci sont humides. Cela étant, il n'est plus utilisé sur les réseaux routiers des pays développés de l'hémisphère nord notamment parce que ses capacités d'analyse sont très limitées sur des chaussées en relativement bon état (pouvoir de discriminance trop faible).



Figure 1.8 : Appareil Bump Integrator (version remorque)

▪ Les profilomètres dynamiques

Ces appareils sont capables de mesurer le profil de la chaussée principalement à partir de capteurs inertiels montés sur un véhicule ou sur un dispositif tracté. En France, il existe deux appareils de ce type : l'APL et le MLPL.

L'APL (**A**nyalysur de **P**rofil en **L**ong) est un appareil monotrace qui a été développé par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées vers le début des années 70 [10]. Il s'agit d'une remorque munie d'un pendule inertiel et d'un dispositif garantissant un contact optimal entre la roue et la chaussée (Fig. 1.9). La remorque étant découplée du véhicule tracteur, le principe de mesure consiste à déterminer l'angle formé entre le bras porte-roue et le pendule puis de le convertir en différence d'élévation. En France, l'APL est le système le plus répandu et sert d'ailleurs de matériel de référence pour la mesure d'uni. Il permet de réaliser des mesures sur des chaussées non revêtues et revêtues même par temps de pluie (chaussée humide) mais sa vitesse d'avancement doit être constamment égale à 72 km/h (± 5 km/h). Les dimensions de la remorque APL sont telles qu'il est possible d'en fixer deux à l'arrière d'un véhicule tracteur pour constituer un appareil « bi-traces ». Dans cette configuration, il est alors permis d'effectuer simultanément le relevé de profil dans les bandes de roulement de droite et de gauche.

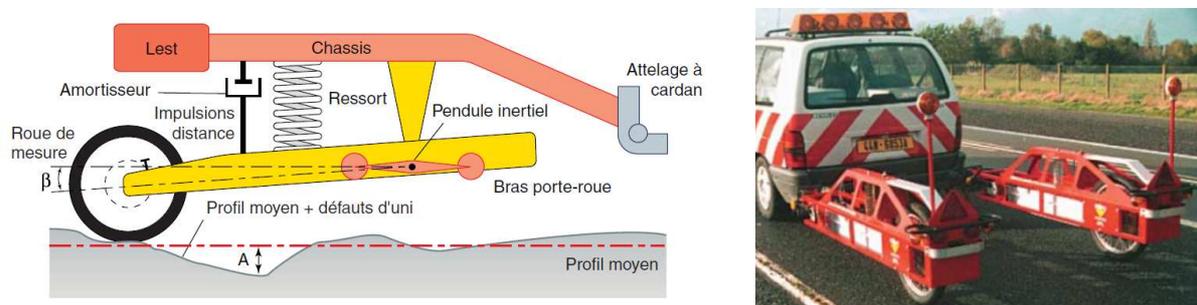


Figure 1.9 : Schéma de principe de l'APL et montage de deux systèmes sur un véhicule porteur (mode bi-traces)

Le MLPL (**Mu**lti**P**rofilomètre **L**ongitudinal) est un système tri-traces (Fig. 1.10) adaptée par le LCPC à partir d'un appareil original développé entre les années 90 et 2000 par la société

danoise Greenwood Engineering¹. Cet appareil a été conçu à partir de la méthode nommée « General Motors » ou méthode de Spangler (du nom de l'inventeur) [11]. Dans celle-ci, le profil de la chaussée est reconstruit à partir du couplage de deux paramètres mesurés simultanément :

- les accélérations de la caisse (ou corps) du véhicule ;
- les déplacements entre la caisse et la chaussée.

Les accélérations sont intégrées deux fois de suite puis filtrées pour générer le signal de déplacement de la caisse. Celui-ci est ensuite retranché au signal de déplacement de la caisse vis-à-vis de la surface de la route pour reconstituer *in fine* le profil de la chaussée (de plus amples informations sont données dans le chapitre 3).

Dans le MLPL, l'ensemble des capteurs est intégré dans une poutre fixée sur la caisse du véhicule porteur. Un accéléromètre traduit les mouvements de la caisse du véhicule et un capteur optique (laser) celui du déplacement entre la poutre et la surface de la chaussée. Afin de pouvoir réaliser simultanément des mesures sur trois traces (une au centre de la voie et une dans les bandes de roulement² droite et gauche), le MLPL est constitué, au total, d'un accéléromètre, de 3 capteurs laser et d'un gyromètre pour évaluer l'inclinaison transversale de la poutre par rapport au sol. Au final, le dispositif MLPL permet d'effectuer des mesures de profil sans contact avec la chaussée et sans contrainte de vitesse de passage (une vitesse minimale de 10 m/s est néanmoins conseillée). En outre, la puissance de ses capteurs laser est telle que des relevés sur chaussée humide sont possibles.

Au même titre que l'APL, l'appareil MLPL est un système qualifié (matériel mlpc[®]) pour exécuter des mesures sur les réseaux routiers français. Le niveau de sophistication de ces appareils étant élevé, leur coût l'est tout autant.

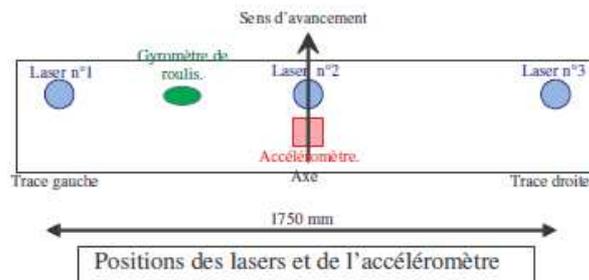


Figure 1.10 : Poutre MLPL sur véhicule porteur et schéma de montage des capteurs

▪ Les mesures de la distance parcourue

En plus des capteurs utilisés pour mesurer le profil, tous les appareils de mesure d'uni à grand rendement intègrent des systèmes permettant d'obtenir une information de distance parcourue. En effet, pour être analysés et exploités, les profils (au sens de niveaux

¹ Précisément, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées s'en est rendu acquéreur et a adapté le logiciel de traitement des mesures pour qu'il s'intègre dans la méthodologie d'exploitation française.

² Sur une voie de circulation, les bandes de roulement correspondent aux zones de passage des pneumatiques sur la chaussée.

d'élévation) doivent être représentés en fonction d'une abscisse curviligne. Les capteurs de distance les plus répandus appartiennent à la famille des codeurs (Fig. 1.11). Ces derniers, que l'on fixe sur une des roues du véhicule porteur, renvoient un signal (typiquement une impulsion électrique) à chaque fraction de tour de roue. En se servant des signaux du codeur pour cadencer et échantillonner les signaux provenant des capteurs dédiés à la mesure d'uni, il est possible d'obtenir un profil de chaussée à un pas spatial fixe (généralement, on s'arrange pour que ce pas soit égal à 5 cm).

Par ailleurs, l'alimentation des capteurs et l'acquisition des signaux nécessitent, dans la plupart des cas, l'intégration de moyens volumineux à l'intérieur du véhicule porteur. C'est pour cette raison que les appareils à grand rendement sont généralement installés de façon quasi définitive sur un véhicule dédié.



Figure 1.11 : Codeur installé sur la roue d'un véhicule d'essai et exemple de système informatique embarqué

C – Synthèse sur les appareils de mesure d'uni

Tout au long du 20^{ème} siècle, l'évolution des appareils a globalement obéi à un seul précepte : délivrer des mesures de plus en plus précises. Ce défi a été relevé grâce notamment aux progrès technologiques obtenus dans les domaines de l'électronique, de l'optique et de l'informatique. Les inventions successives ont effectivement permis de passer d'une précision centimétrique à une précision millimétrique (voire submillimétrique) pour la mesure de l'élévation des défauts d'uni.

À partir des années 70, la profilométrie inertielle associée à la dynamique du véhicule a contribué à agrandir le seuil de sensibilité spectrale (Cf. section 1.1.4). Le plus emblématique des systèmes de cette famille, l'APL, est l'un des premiers appareils à offrir une réponse spectrale correcte sur l'ensemble des fréquences de la bande d'uni (Fig. 1.12).

À partir des années 80, l'avènement des lasers a permis d'accélérer ce processus. Ces lasers tendent donc, peu à peu, à remplacer les capteurs de contact dans les appareils d'auscultation. Ils présentent néanmoins quelques faiblesses comme, par exemple, la sensibilité aux conditions de luminosité (éclairage du soleil trop fort, problèmes de réflectivité sur des pellicules d'eau...).

Mais cette course à la précision ne doit pas masquer d'autres améliorations, d'ordre pratique. Les appareils de mesure se sont de mieux en mieux adaptés aux conditions de circulation. Les relevés effectués avec les appareils statiques, comme le profilographe,

pouvaient perturber fortement le trafic et n’étaient pas vraiment sécurisant pour les opérateurs. Avec les profilomètres dynamiques, les mesures sont prises dans le flot de la circulation, avec des contraintes de vitesse de passage de moins en moins fortes. En outre, à l’image du MLPL, les systèmes de mesure s’intégrant de plus en plus dans le véhicule porteur et devenant des systèmes sans contact, leur mise en œuvre s’est simplifiée.

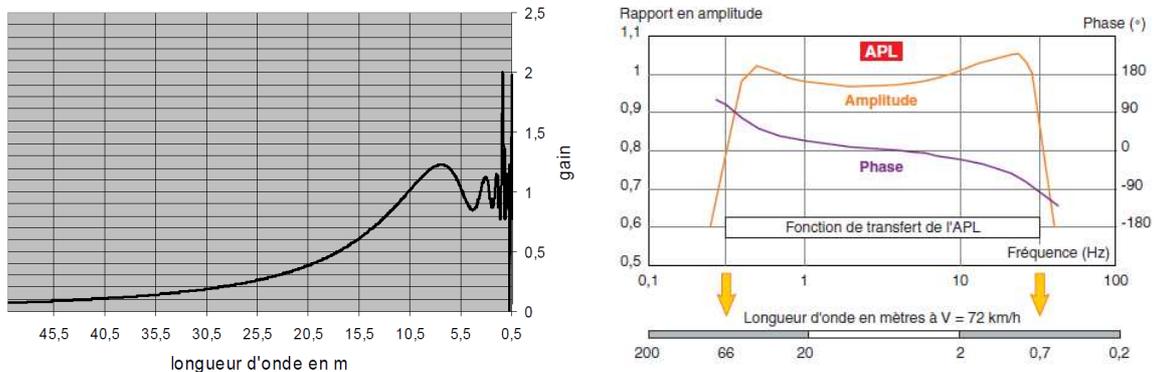


Figure 1.12 : Comparaison des modules des fonctions de transfert entre un profilographe (à gauche) et l'APL (à droite)

Aujourd’hui, il existe une large gamme d’outils pouvant servir à mesurer les défauts d’uni longitudinal. Ces outils ont été développés dans un contexte économique plutôt favorable ce qui a eu pour effet de minimiser l’importance du critère de coût. En conséquence, ce dernier n’a cessé de croître à chaque sortie de nouvel appareil. Pour fixer les idées et à titre indicatif¹, les prix de vente de quelques systèmes sont donnés :

Type d’appareil	Estimation du prix de vente	Observations
Dipstick	entre 7000 et 10000 Euros	
Bump integrator	entre 10000 et 40000 Euros	Prix fluctuant selon la version du dispositif choisi
APL bi-trace	≈ 200 000 Euros	2 systèmes APL montés en mode bi-trace et livrés opérationnels
MLPL	≈ 180 000 Euros	Livré opérationnel

Tableau 1.1 : Prix de vente approximatifs de quelques appareils (2013)

Actuellement, pour un acquéreur, en plus de faire le choix de l’outil le plus conforme à ses besoins, la difficulté est évidemment financière. L’environnement économique de notre époque nécessite d’être en rupture avec la démarche adoptée au siècle précédent et de proposer des outils d’auscultation moins onéreux qui viendront étoffer l’offre déjà existante.

¹ Ces informations sont assez difficiles à obtenir car soumises à la discrétion commerciale des entreprises de diffusion. En outre, il peut exister des différences de tarification notables selon la zone géographique mondiale.

1.1.3 L'interaction uni-dynamique du véhicule

On ne peut pas apprécier les performances d'un système de mesure de l'uni sans s'intéresser de très près à l'usage auquel sont destinées ses mesures, et donc d'une part aux effets des défauts d'uni (sur les conditions de roulage, la sécurité, le confort...), d'autre part aux méthodes qui permettent de traiter les mesures d'uni brutes pour quantifier ces effets. Ces remarques font l'objet des paragraphes qui suivent.

A – Généralités

Lorsqu'il roule, un véhicule est soumis à des contraintes provenant des caractéristiques de la chaussée. Le véhicule subit notamment un ensemble de forces mécaniques qui vont mettre en mouvement certaines de ses composantes. Selon la nature et la fréquence des mouvements, les fonctions de confort et de tenue de route peuvent être plus ou moins fortement altérées. Pour y remédier, les constructeurs automobiles dimensionnent au mieux leurs véhicules pour réduire ces nuisances.

L'interaction entre le véhicule et les caractéristiques de surface de la chaussée a fait l'objet de nombreuses études soit de la part des constructeurs automobiles soit de la part de spécialistes travaillant sur les propriétés de l'infrastructure. Dans cette relation, les éléments d'entrée sont les longueurs d'onde des défauts de surface et la vitesse de passage du véhicule. Selon la valeur de ces paramètres, le véhicule sera excité aux fréquences données par la formule :

$$f(\text{Hz}) = \frac{V(\text{m/s})}{\lambda(\text{m})} \quad (1.1)$$

En mécanique vibratoire, il est courant de représenter un véhicule comme un système composé de trois sous-ensembles :

- Sous-ensemble suspendu (caisse du véhicule)
- Sous-ensemble non-suspendu (comprenant les roues, les moyeux et les suspensions)
- Sous-ensemble pneumatique

Chacun de ces sous-ensembles est sensible à certaines gammes de fréquences et donc à certains types de défauts de chaussées en fonction de la vitesse d'avancement du véhicule. Ces sous-ensembles étant rattachés aux fonctions de confort et de tenue de route, on peut ainsi établir un lien entre ces dernières et les caractéristiques de surface de la chaussée.

Pour illustrer ces propos (Fig. 1.13), prenons le cas d'un véhicule qui circule à une vitesse de 20 m/s et qui franchit un défaut d'uni de longueur d'onde égale à 2 m. Dans cette configuration, les composantes du véhicule seront excitées à une fréquence de 10 Hz. Les sous-ensembles non-suspendus et les pneumatiques étant les plus sensibles à cette fréquence, il est possible qu'ils se mettent à vibrer. Si, de surcroît, les vibrations ont des amplitudes élevées, le véhicule risque de voir sa tenue de route dégradée (perte de sécurité). Dans la situation où, pour le même défaut d'uni, le véhicule ne roule qu'à 10 m/s, la fréquence d'excitation se décalera vers des fréquences plus faibles (2 Hz). La nuisance potentielle concernera alors davantage le confort du passager.

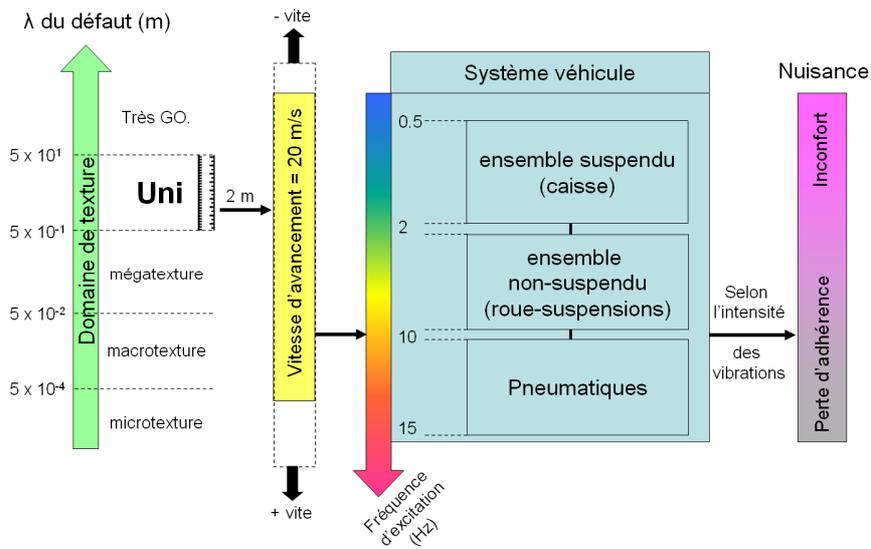


Figure 1.13 : Schéma illustrant l'effet des défauts d'uni sur la dynamique du véhicule

Bien que chaque sous-ensemble soit sensible à une bande de fréquences spécifique ([0.5 Hz ; 2 Hz] pour la caisse, [2 Hz ; 10 Hz] pour la composante non-suspendue et [10 Hz ; 15 Hz] pour les pneumatiques), il arrive que, à une fréquence donnée, des vibrations trop fortes viennent, par transmission de l'énergie d'un ensemble vers un autre, exciter le véhicule tout entier. Dans ce cas, le conducteur est affecté par des situations aussi inconfortables qu'insécurisantes.

Notons que les gammes de fréquences d'excitation mentionnées précédemment correspondent à la catégorie des véhicules légers. Pour d'autres catégories, comme les poids lourds par exemple, celles-ci diffèrent sensiblement.

B – Éléments de filtrage dans un véhicule

Pour garantir le maximum de sécurité et de confort à ses occupants, un véhicule doit pouvoir minimiser les mouvements (verticaux) parasites. Pour y parvenir, certains de ses éléments sont conçus pour compenser ou filtrer les vibrations générés par les défauts de surface ; il s'agit principalement des suspensions et des pneumatiques. En mécanique vibratoire, ces éléments de filtrage sont représentés et modélisés par des ressorts et des amortisseurs.

Les **suspensions** d'un véhicule sont disposées entre la caisse du véhicule et chacune des roues. Elles sont constituées d'un ressort et d'un amortisseur qui s'activent en même temps lors d'une sollicitation (fonctionnement en parallèle).

La fonction du ressort est de filtrer les irrégularités de la route et de soutenir la caisse. Pour cela, il produit une force s'opposant à sa déformation et proportionnelle à son amplitude à travers un facteur K appelé coefficient de raideur (s'exprimant en N/m). Le ressort emmagasine l'énergie générée par la déformation puis la restitue presque entièrement sous forme mécanique.

La fonction de l'amortisseur est de limiter l'amplitude des mouvements de caisse et de roue. Son action consiste à s'opposer, par un procédé physique, à la vitesse de déplacement entre

les éléments suspendus et non-suspendus. La force d'opposition est proportionnelle à la vitesse de déformation via un facteur nommé coefficient d'amortissement (s'exprimant en $N.m^{-1}.s$). Contrairement au ressort, l'amortisseur dissipe l'énergie emmagasinée sous forme de chaleur.

Les coefficients de raideur et d'amortissement sont dimensionnés par les constructeurs automobiles de façon à :

- préserver le confort des occupants en réduisant les oscillations verticales dues aux ondulations de la chaussée et aux chocs ;
- contribuer à la bonne tenue de route du véhicule en évitant les phénomènes de délestage et faire travailler les pneumatiques dans de bonnes conditions.

Les **pneumatiques** sont des équipements complexes que l'on peut avant tout assimiler à un ressort (dans la plupart des modélisations, l'effet d'amortisseur est considéré comme négligeable face à l'action du ressort).

Il existe beaucoup d'autres éléments participant à l'atténuation des mouvements ressentis, ou pas, par l'usager dans son véhicule. Les sièges, par exemple, sont très efficaces pour éviter que les vibrations de caisse ne se propagent jusqu'au corps du conducteur. D'autres systèmes beaucoup moins visibles, comme les barres stabilisatrices, contribuent également à limiter les mouvements des ensembles suspendus et non-suspendus.

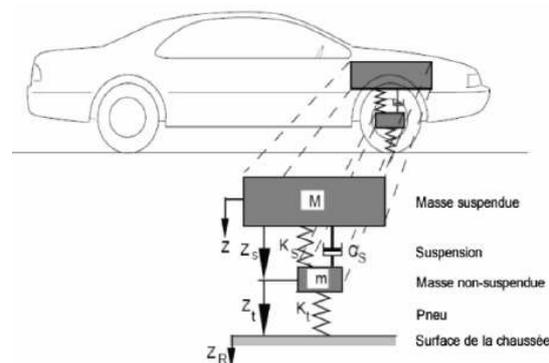


Figure 1.14 : Exemple de représentation des suspensions et des pneumatiques (modélisation quart de véhicule)

Cas particulier de vibrations : les phénomènes de résonance

Tout système vibrant possède une fréquence de résonance c'est-à-dire une fréquence excitatrice particulière qui peut déclencher des mouvements ayant des amplitudes de plus en plus fortes. Quand on étudie les phénomènes vibratoires d'un véhicule selon son axe vertical, deux éléments peuvent entrer en résonance : la caisse et la roue. Dans le premier cas, le phénomène est appelé effet de pompage ; le véhicule oscille alors à des fréquences relativement basses (autour de 1 Hz) ce qui nuit gravement au confort des passagers. Dans le second cas, le phénomène est désigné par l'expression battement de roue. La fréquence d'oscillation associée est plus élevée (entre 10 et 15 Hz) et affecte plus particulièrement la tenue de route. Afin d'annihiler l'apparition de ces mouvements parasites, les constructeurs automobiles configurent du mieux possible les systèmes de suspension.

C – Focus sur le confort vibratoire

a) Mouvements et confort

Les mouvements que l’on associe au confort du conducteur correspondent à ceux de la caisse. On en recense principalement trois : le tangage, le roulis et le pompage.

Le **roulis** est un mouvement de rotation autour de l’axe longitudinal du véhicule à des fréquences comprises entre 1 Hz et 2 Hz. Il est typiquement provoqué par une différence d’uni dans les bandes de roulement droite et gauche.

Le **tangage** est mouvement de rotation autour de l’axe transversal du véhicule à une fréquence proche de 1 Hz. Il est généré par une différence d’uni au niveau des trains roulants avant et arrière.

Le **pompage** est un mouvement vertical de la caisse dû à une concordance spatiale particulière des défauts d’uni entre les trains roulants avant et arrière. Le pompage, dont les fréquences varient de 1 à 1.5 Hz, résulte donc d’une relation entre l’empattement du véhicule (distance entre l’essieu avant et arrière) et la longueur d’onde du défaut. Sur un défaut périodique de longueur d’onde λ , un véhicule subira des effets de pompage si l’empattement du véhicule est un multiple pair de $\lambda/2$ et des effets de tangage si l’empattement est un multiple impair de $\lambda/2$;

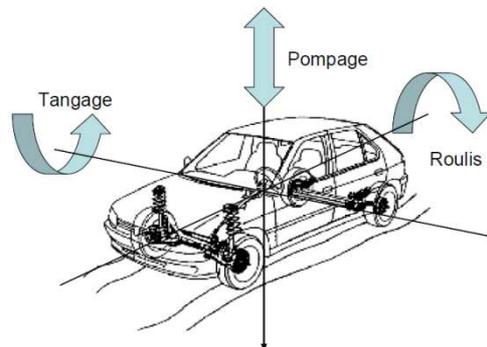


Figure 1.15 : Description des mouvements de caisse liés au confort

Les mouvements de roulis et de tangage peuvent être produits à partir de défauts périodiques mais aussi ponctuels lorsque ceux-ci sont importants. Le phénomène de pompage est, quant à lui, uniquement relié à des défauts périodiques (ondulations).

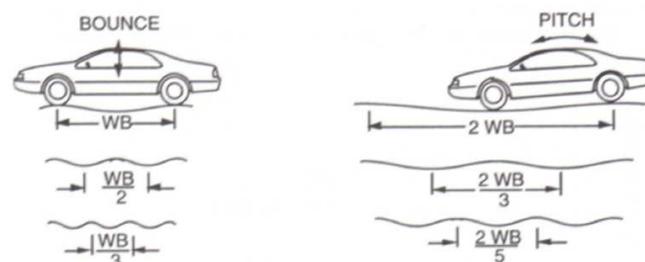


Figure 1.16 : Effets de pompage (bounce) et de tangage (pitch)

b) Caractérisation du confort

Les fréquences des mouvements de caisse subies par le véhicule ne sont pas les seules responsables des situations d'inconfort. La sensation d'inconfort perçue par le conducteur est issue de la conjonction de trois facteurs : les fréquences des mouvements, leurs intensités (accélérations) et leurs durées.

Les études portant sur l'effet combiné de ces trois paramètres ont donné lieu à la rédaction de guides et de normes basés afin de définir des seuils de tolérance [12].

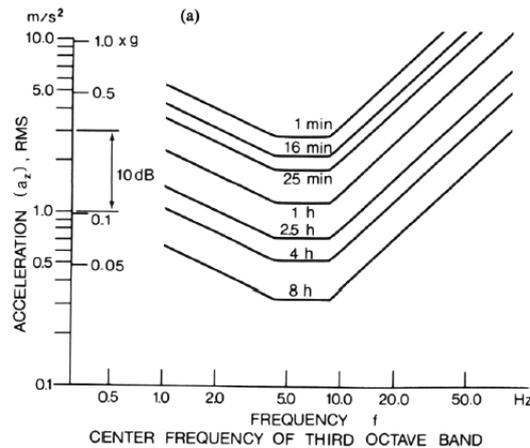


Figure 1.17 : Graphique extrait de la norme ISO 2631 illustrant les seuils de tolérance humaine aux vibrations verticales

c) Les indicateurs de confort

Dès les années 60, la communauté scientifique s'est attachée à construire des indicateurs de confort. Cette démarche a plus précisément été menée dans les pays d'Amérique du Nord, là où le confort est un critère prépondérant pour définir le niveau de service d'un réseau routier [13]. On recense une grande quantité d'indicateurs exclusivement dédiés au confort : PSR, Ride Number, Ride Quality Index, Truck Ride Number, etc. Si l'expression finale diffère d'un indicateur à un autre, la plupart d'entre eux sont construits de la même manière. Tout d'abord, un questionnaire est soumis à un panel d'utilisateurs qui, au final, attribuent une note à la route qu'ils viennent d'emprunter sur une certaine échelle. L'exercice consiste, par la suite, à raccorder certaines caractéristiques mesurées (profil de la chaussée, accélérations subies par le conducteur, fréquences des vibrations) à des seuils se rapportant à une échelle d'utilisation.

Surtout utilisés dans les années 50 et 60, ce type d'indicateurs a laissé place à des indicateurs beaucoup plus complets qui sont davantage représentatifs de l'état de la chaussée et pas seulement des sensations d'inconfort qu'elle génère.

The figure shows a questionnaire form for PSR. On the left, there is a section titled 'Acceptable?' with three options: 'Yes', 'No', and 'Undecided', each followed by a small rectangular box for a response. On the right, there is a vertical scale labeled 'Rating' with values from 0 to 5. The corresponding quality levels are: 0 - Very Poor, 1 - Poor, 2 - Fair, 3 - Good, 4 - Very Good, and 5 - Very Good. At the bottom of the form, there are fields for 'Section Identification', 'Rater', 'Date', 'Time', and 'Vehicle', each followed by a line for text entry.

Figure 1.18 : Exemple de questionnaire utilisé pour définir l'indicateur de confort PSR (Present Serviceability Rating). La question posée à l'utilisateur était de savoir s'il aimerait rouler sur ce type de route toute une journée.

1.1.4 Analyse de l'uni et procédure opérationnelle

Afin d'interpréter et de différencier les informations délivrées par les appareils de mesure d'uni, il est nécessaire de construire des indicateurs. La qualité des indicateurs est cruciale car c'est à travers eux que les gestionnaires jugent de l'état fonctionnel de leur réseau. En outre, il est important de comprendre quelle est la place du critère uni longitudinal dans les stratégies globales d'auscultation (fréquences et nature des relevés) et de gestion (exploitation des indicateurs, prises de décisions).

A – L'indicateur international IRI

L'IRI (International Roughness Index) est l'indicateur d'analyse et d'exploitation de l'uni le plus rencontré au monde. On l'utilise par exemple en Amérique du Nord (USA et Canada), dans les pays d'Afrique et d'Asie...mais pas en France. L'IRI a été créé dans les années 80 à la suite d'expérimentations impliquant différents appareils de mesure d'uni. Il est devenu et reste encore l'indicateur de référence pour la communauté scientifique lors d'échanges internationaux.

L'IRI est une fonction mathématique basée sur l'utilisation d'un modèle vibratoire de véhicule. Cette fonction agit comme un filtre passe-bande qui prend le profil mesuré de la chaussée en entrée et délivre, en sortie, une valeur traduisant le déplacement relatif cumulé de la caisse du véhicule par rapport à la roue sur une distance donnée [14]. Le modèle utilisé est la représentation « quart de véhicule » qui simule le mouvement vibratoire d'un ensemble caisse-roue-pneus (une description détaillée de cette modélisation est donnée dans l'annexe B).

Pour calculer l'IRI, il est obligatoire d'adopter un paramétrage précis du modèle de façon à simuler l'effet d'un seul et même type de véhicule (les anglophones le surnomment « Golden Car »). Ce paramétrage a été particulièrement conçu pour prendre en compte les défauts d'uni de longueurs comprises entre 1 et 30 m et d'atténuer les défauts n'appartenant pas à cet intervalle. En sachant que la vitesse d'avancement de la Golden Car est fixée à 80 km/h, l'IRI est donc approximativement sensible à la bande de fréquences [0.7 Hz ; 22 Hz].

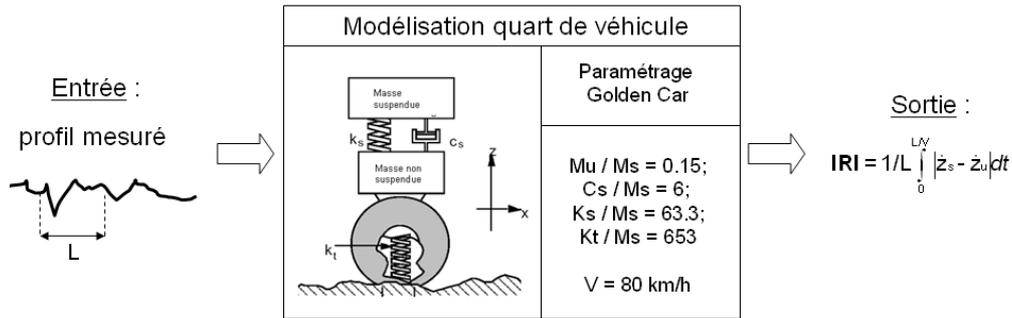


Figure 1.19 : Schéma décrivant le calcul de l'IRI

Une fois calculé, l'IRI prend la forme d'un nombre décimal sur une échelle débutant à la valeur 0 (uni parfait) et a la dimension d'une pente (en mm/m ou m/km). Selon les caractéristiques du réseau routier d'un pays et du niveau de service visé, plusieurs interprétations de l'IRI peuvent être données. Bien souvent, ces dernières sont construites à partir de la relation IRI-vitesse de passage.

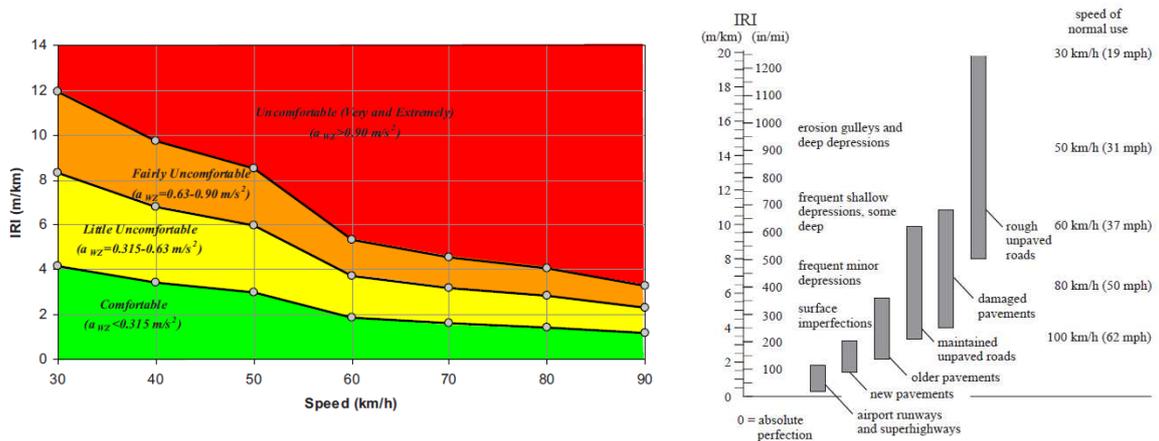


Figure 1.20 : Exemples d'interprétation et d'analyse de l'IRI. À gauche, l'IRI sert à apprécier le confort et à droite il permet de caractériser des défauts de chaussées

B – La notation par bandes d'ondes

Développée vers la fin des années 80, le système de notation par bandes d'ondes (NBO) est la méthode choisie en France pour analyser et caractériser les défauts d'uni longitudinal. La spécificité de la méthode NBO est de décomposer le profil en trois bandes spectrales puis d'y appliquer une analyse sur chacune d'entre elles. Les valeurs bornant les bandes d'ondes ont été ciblées pour être compatibles avec les caractéristiques des appareils de mesure utilisés à l'époque mais aussi pour encadrer les domaines de sensibilité fréquentielle de la caisse et de la roue d'un véhicule. Les dénominations et les spécificités des bandes d'ondes sont décrites dans le tableau 1.2.

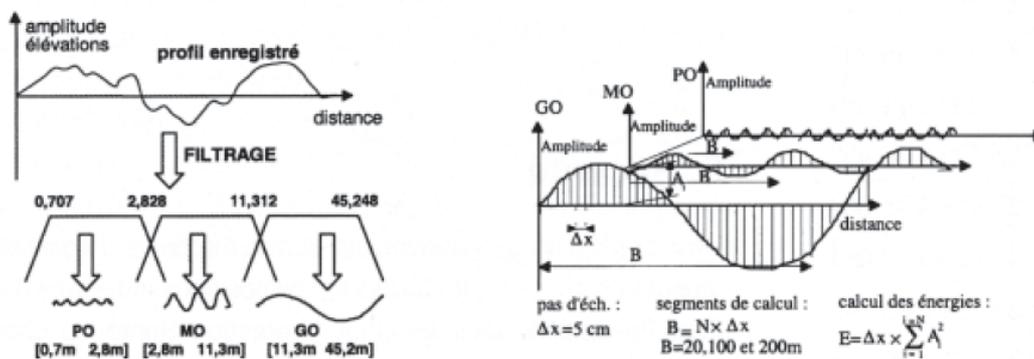
Identification de la bande	Intervalle de longueurs d'ondes (m)	Spécificité
Petites Ondes (PO)	[0.707 ; 2.828]	- Bande de défauts contribuant à exciter la dynamique des roues; - Des défauts graves dans la bande PO peuvent nuire à la tenue de route.
Moyennes Ondes (MO)	[2.828 ; 11.312]	- Bande de défauts contribuant à exciter la dynamique de la caisse et de la roue ; - Des défauts graves dans la bande MO peuvent nuire à la fois à la tenue de route et au confort.
Grandes ondes (GO)	[11.312 ; 45.248]	- Bande de défauts contribuant à exciter la dynamique de la caisse; - Des défauts graves dans la bande GO peuvent nuire au confort d'un conducteur de VL et de dégrader sensiblement la tenue de route d'un PL.

Tableau 1.2 : Caractéristiques des 3 bandes d'ondes dans le système NBO

Les valeurs bornant chacune des bandes d'ondes ont été précisément fixées en s'appuyant sur un découpage en bandes bi-octave à partir de la fréquence centrale spatiale $\Omega = 1 \text{ m}^{-1}$. Ces mêmes valeurs sont utilisées pour définir les fréquences de coupure des différents filtres¹ qui sont appliqués sur le signal profil [15]. Après filtrage, on obtient donc trois composantes (signaux PO, MO et GO) à partir desquels les indicateurs d'uni vont être élaborés (Fig. 1.21). En fonction de la nature de la bande d'onde étudiée, le signal filtré est d'abord découpé en segments de même longueur (20 m pour le signal PO, 100 m pour le signal MO et 200 m pour le signal GO) avant qu'une énergie ne soit calculée pour chacun d'entre eux. Cette valeur d'énergie (exprimée en cm^3) est numériquement déterminée de la façon suivante :

$$E = \Delta x \times \sum_{i=1}^N A_i^2 \quad (1.2)$$

où $\Delta x = 5 \text{ cm}$ est le pas d'échantillonnage du signal, N le nombre de points de mesure correspondant à la longueur du segment étudié et A_i l'amplitude du signal en cm.


Figure 1.21 : Schéma illustrant la décomposition du profil en signaux filtrés et le calcul d'énergie par bandes d'ondes

¹ Les filtres utilisés pour cette opération sont des filtres de Tchebychev d'ordre 2 avec une atténuation de 48 dB / octave.

Une fois ces énergies calculées sur tous les segments des signaux filtrés, elles sont ensuite converties, au moyen d’une table de correspondance, en une note allant de 0 (pour un uni médiocre) à 10 (pour un uni parfait) avec une résolution de 0.5 point (Tab. 1.3).

Notes NBO	Intervalle des énergies EBO (borne droite incluse, borne gauche exclue)		
	Petites ondes EPO ₂₀ (en cm ³)	Moyennes ondes EMO ₁₀₀ (en cm ³)	Grandes ondes EGO ₂₀₀ (en cm ³)
10	0 à 1,1	0 à 39	0 à 1 267
9,5	1,1 à 1,4	39 à 49	1 267 à 1 585
9	1,4 à 1,7	49 à 62	1 585 à 1 983
8,5	1,7 à 2,2	62 à 77	1 983 à 2 481
8	2,2 à 2,7	77 à 97	2 481 à 3 103
7,5	2,7 à 3,4	97 à 121	3 103 à 3 882
7	3,4 à 4,2	121 à 151	3 882 à 4 857
6,5	4,2 à 5,3	151 à 189	4 857 à 6 076
6	5,3 à 6,6	189 à 236	6 076 à 7 601
5,5	6,6 à 8,2	236 à 296	7 601 à 9 509
5	8,2 à 10,3	296 à 370	9 509 à 11 896
4,5	10,3 à 12,9	370 à 463	11 896 à 14 882
4	12,9 à 16,1	463 à 579	14 882 à 18 618
3,5	16,1 à 20,2	579 à 725	18 618 à 23 292
3	20,2 à 25,3	725 à 906	23 292 à 29 139
2,5	25,3 à 31,6	906 à 1134	29 139 à 36 453
2	31,6 à 39,5	1 134 à 1 419	36 453 à 45 604
1,5	39,5 à 49,5	1 419 à 1 775	45 604 à 57 051
1	49,5 à 61,9	1 775 à 2 220	57 051 à 71 372
0,5	61,9 à 77,4	2 220 à 2 778	71 372 à 89 288
0	> 77,4	> 2 778	> 89 288

Tableau 1.3 : Table de conversion des énergies¹ calculées par segment et par bande d'onde en note d'uni

Le résultat final de l’analyse prend donc la forme de trois notes :

- une note pour la bande PO (NPO), calculée tous les 20 m ;
- une note pour la bande MO (NMO), calculée tous les 100 m ;
- une note pour la bande GO (NGO), calculée tous les 200 m ;

Actuellement, ces opérations peuvent être assurées de façon automatique par un logiciel spécifique appelé APL 2000 dont un exemple de présentation est donné ci-après (Fig. 1.22):

¹ Cf. Équation 1.2

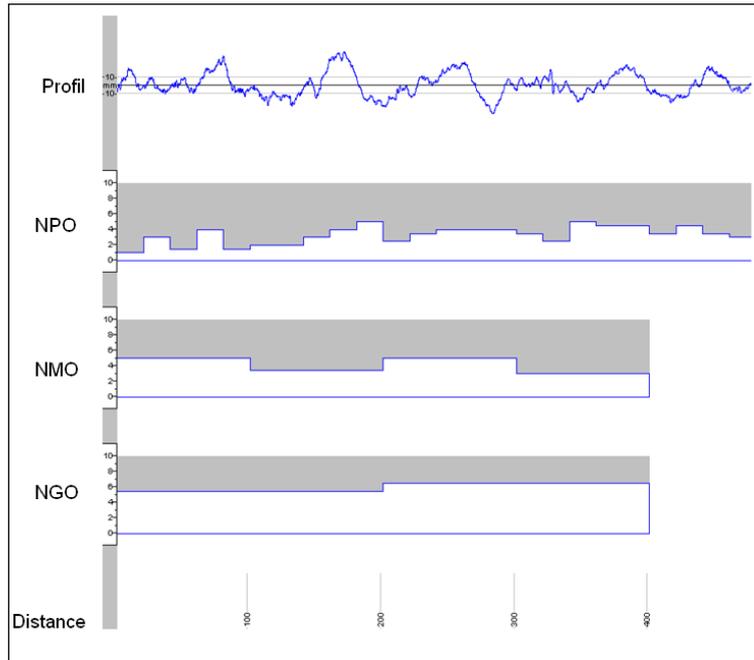


Figure 1.22 : Exemple de conversion d'un profil en notes par bandes d'ondes dans APL 2000

C – La représentation en densité spectrale de puissance

La représentation en notes par bandes d’ondes (NBO) permet d’avoir une vision des défauts d’uni à travers une succession de segments de longueur limitée. Parfois, il est nécessaire d’adopter une autre vision, soit pour observer les défauts sur des intervalles spatiaux plus grands, soit pour détecter des défauts bien spécifiques comme les défauts périodiques par exemple. En effet, pour ces derniers, qui sont très gênants pour le confort, le système NBO n’est pas vraiment adapté car l’énergie du défaut peut se « diluer » sur plusieurs segments et ainsi être minimisée. Pour cette raison, en complément de la NBO, une étude spectrale à travers le calcul de la densité spectrale de puissance (DSP) est souvent menée conformément à la norme ISO 8608 [16].

Le calcul de la DSP consiste à déterminer la répartition de la puissance d’un signal en fonction d’une échelle de fréquences. Mathématiquement, la DSP $S_x(\nu)$ d’un signal $x(t)$ est la transformée de Fourier de sa fonction d’autocorrélation :

$$S_x(\nu) = TF[\Gamma_x(\tau)]$$

$$\text{où } \Gamma_x(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)x(t-\tau)^* dt \quad (1.3)$$

Cette grandeur, qui peut être estimée très correctement par la méthode de Welch [17], représente, dans notre contexte, le volume de défauts d’uni par fréquence spatiale. Si la chaussée comporte un défaut périodique, c’est-à-dire un défaut qui se répète plusieurs fois à une même fréquence spatiale, alors la puissance associée à cette dernière sera amplifiée (Fig. 1.23).

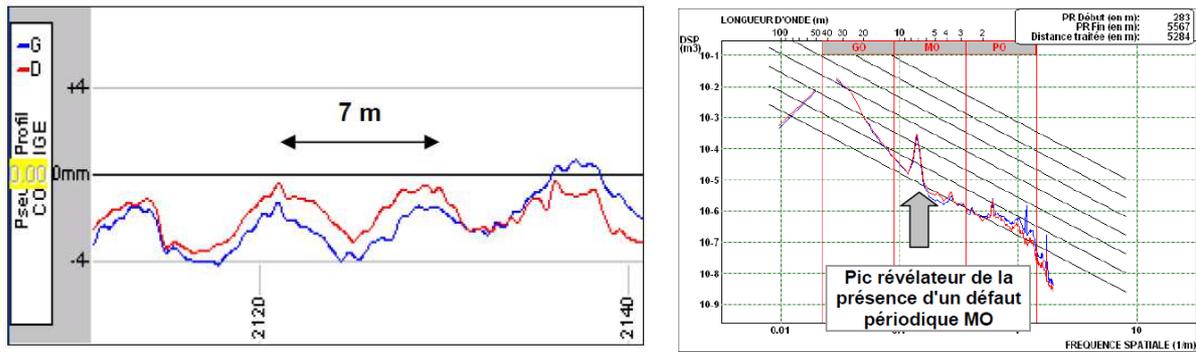


Figure 1.23 : Détection d'un défaut périodique par l'analyse de la DSP (la courbe bleue correspond au relevé effectué dans la bande de roulement gauche et la courbe rouge à celui effectué dans la bande de roulement droite)

En général, la présence de défauts périodiques est observée après la réalisation d’une couche de roulement neuve, suite aux dysfonctionnements d’engins de chantier.

D – Les stratégies d’auscultation et de gestion actuelles

Dans la plupart des pays et spécialement en France, les missions d’auscultation de l’uni longitudinal des chaussées s’inscrivent dans deux cas :

- la réception de constructions neuves ou après rénovation ;
- la surveillance continue des réseaux.

Dans le premier cas, la stratégie d’auscultation est simple : à la fin du chantier, on fait passer un appareil de haute précision (type APL ou MLPL) et on analyse les données dans la foulée. Pour savoir si les travaux réalisés sont conformes, les décideurs peuvent s’appuyer sur un ensemble de spécifications formalisées dans des guides [19]. En France, les spécifications sont établies à partir d’un dénombrement statistique des indicateurs NBO sur une distance donnée et en fonction de la nature de l’infrastructure (routes secondaires, voies express, autoroutes, etc.) et de sa structure (épaisseur des couches) comme le montre le tableau 1.4.

(km/h)	LONG. D'ONDES	SPECIFICATIONS POUR LA COUCHE DE ROULEMENT (N)	
		Chantier inférieur à 1000 mètres et supérieur à 200 mètres	Lots de 1000 mètres ou incluant extrémité de chantier
90	PO	100 % des notes ≥ 6 90 % des notes ≥ 7	100 % des notes ≥ 6 90 % des notes ≥ 7
	MO	100 % des notes ≥ 6	100 % des notes ≥ 6 90 % des notes ≥ 7
	GO	Sans objet	100 % des notes ≥ 5 80 % des notes ≥ 6
		Chantier inférieur à 1000 mètres et supérieur à 200 mètres	Lots de 1000 mètres ou incluant extrémité de chantier
110	PO	100% des notes ≥ 6 90% des notes ≥ 7	100 % des notes ≥ 6 90 % des notes ≥ 7

	MO	100% des notes ≥ 7	100 % des notes ≥ 7 90 % des notes ≥ 8
	GO	Sans objet	100 % des notes ≥ 7 80 % des notes ≥ 8
		Chantier inférieur à 1000 mètres et supérieur à 200 mètres	Lots de 1000 mètres ou incluant extrémité de chantier
130	PO	100% des notes ≥ 6 90% des notes ≥ 7	100% notes ≥ 6 90% notes ≥ 7
	MO	100% des notes ≥ 7	100% notes ≥ 7 90% notes ≥ 8
	GO	Sans objet	100% notes ≥ 8 80% notes ≥ 9

Tableau 1.4 : Exemple de spécifications établies pour une épaisseur de couche de roulement inférieure à 3 cm. Les vitesses traduisent le type d'infrastructure.

Pour la surveillance des réseaux, la stratégie d'auscultation est beaucoup moins claire. Tout d'abord, à la différence des interventions sur chaussées neuves, il n'existe pas de documents officiels décrivant, à travers l'examen des notes d'uni, la conformité d'une chaussée en cours de vie. Cette situation favorise une certaine hétérogénéité des pratiques même si les gestionnaires d'infrastructures font souvent appel à deux procédés :

▪ Une auscultation systématique périodique

Pour l'uni, cette activité est réalisée au mieux tous les 3 à 6 ans dans le cadre de vastes campagnes de mesures principalement effectuées sur les axes majeurs. Les gestionnaires font alors passer des appareils à grand rendement sur le réseau routier ; les relevés effectués permettent une mise à jour des bases de données et des indicateurs d'état de la chaussée (phase de diagnostic). Ces derniers constituent, par la suite, des éléments d'entrée d'algorithmes (stratégies d'entretien) chargés de proposer des remèdes (ex : réparation superficielle, renforcement de l'ensemble de la structure...).

Le principal inconvénient de ce procédé réside dans le fait que les gestionnaires peuvent rester plusieurs années avant de disposer de nouvelles données. Il est donc très difficile pour eux de d'anticiper l'apparition ou l'aggravation d'un défaut et donc d'agir précocement.

▪ Une auscultation ponctuelle

Suite à une détection visuelle d'un défaut ou à de forts soupçons, le gestionnaire peut déclencher « en urgence » l'intervention d'un appareil d'auscultation. Très souvent, le défaut a déjà alors atteint un stade de gravité trop élevé pour être réparé rapidement et à moindre coût.

1.2 État de l’art sur la notion de véhicules traceurs

Le concept de véhicules traceurs est apparu au milieu des années 2000 avec l’essor des technologies GPS embarquées (ex : produits commerciaux TomTom, Coyote...) et des smartphones. Historiquement, les procédés utilisant les véhicules traceurs renvoient à la notion des systèmes de transports intelligents (ITS) pour résoudre les problèmes liés à la mobilité. L’objectif des paragraphes suivants est de décrire le schéma de fonctionnement de ce genre d’outils et surtout d’illustrer leurs possibilités d’applications.

1.2.1 Définitions et terminologie

L’expression française « véhicule traceur » a une forte connotation géo-localisatrice : le véhicule laisse une trace (trajectoire GPS) de son passage ou permet de tracer (suivre) d’autres véhicules à proximité. Il existe également d’autres expressions synonymes qui possèdent néanmoins quelques nuances de sens :

- véhicule sonde (probe vehicle en anglais) où le véhicule est assimilé à une sonde (un capteur) que l’on introduit dans le réseau routier, dans le flot de la circulation ;
- véhicule témoin où le véhicule fait office de référence et permet de représenter, de façon relative, le déplacement ou le comportement d’un ensemble de véhicules.

Récemment, la terminologie a évolué en décrivant le véhicule non plus comme un support mobile instrumenté mais plutôt comme une source d’informations ou un capteur à proprement parler. De ce fait, la notion de véhicule traceur est désormais plutôt désignée par les expressions anglaises « Floating Car Data » (FCD) et « Probe Vehicle Data » (PVD). La norme ISO 22837 datant de 2009 [20] a donné une première définition des véhicules traceurs (uniquement en anglais) :

« Vehicle sensor information, formatted as probe data elements and/or probe messages, that is processed, formatted and transmitted to a land-based centre for processing to create a good understanding of the driving environment ».

Les choses allant très vite dans ce domaine, la définition des véhicules traceurs est aujourd’hui plus complète en intégrant le fait qu’ils peuvent être équipés d’une multitude de systèmes de mesures nomades et qu’ils sont capables de communiquer en temps réel avec des serveurs routiers ou avec d’autres véhicules traceurs par des liaisons internet ou téléphoniques [21].

1.2.2 Instrumentation et technologies de véhicules traceurs

Actuellement, on distingue plusieurs familles de véhicules traceurs selon la technologie et le niveau d'équipements employés.

▪ Les "Floating Car Data"

Cette catégorie de véhicules traceurs est utilisée pour relever des données de localisation spatio-temporelles : temps, distance et vitesse de parcours. Pour recueillir ces informations, un niveau d'instrumentation relativement faible est nécessaire (au minimum un système GPS). Quand un smartphone avec son instrumentation propre est utilisé on parle alors de "Floating Cellular Data". L'usage des FCD est principalement dédié à la mesure de temps de parcours.

▪ Les "Extended Floating Car Data" (xFCD)

Dans cette catégorie de véhicules traceurs, le niveau de moyens de mesures et d'équipements est beaucoup plus élevé (Fig. 1.24). En plus de l'instrumentation de base équipant les FCD, d'une part on récupère des informations transitant sur le bus CAN (réseau de communication propre au véhicule) et, d'autre part, on ajoute des capteurs externes. Les xFCD permettent donc de recueillir des données plus complexes convenant mieux à certaines applications.

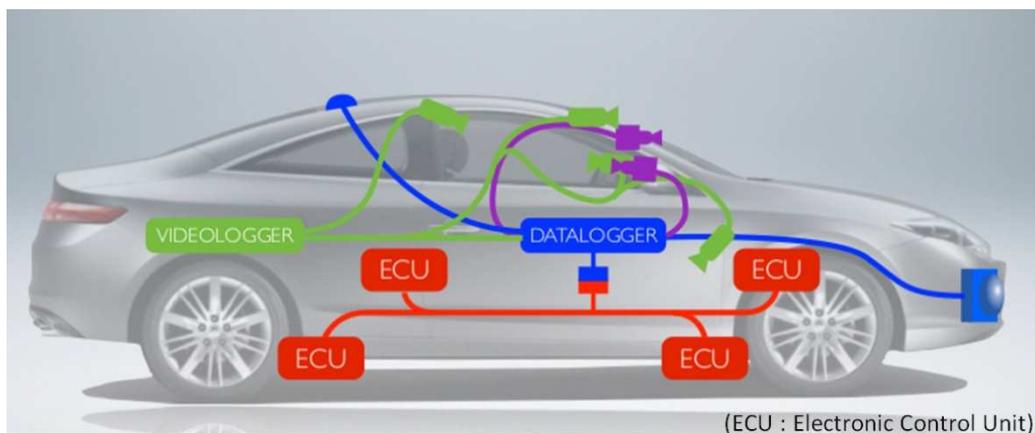


Figure 1.24 : Schéma d'instrumentation pour un véhicule traceur de la catégorie xFCD (source CEESAR)

Dans la majeure partie des FCD et des xFCD, les instruments de mesure utilisés sont de bas ou de moyen coût. En effet, la logique des méthodes de relevés à base de véhicules traceurs repose sur un déploiement massif de véhicules afin d'avoir le plus grand nombre de données possibles partout et tout le temps. En fusionnant ces données, on espère ainsi augmenter la précision portant sur l'information finale.

Le capteur de base dans les (x)FCD est le GPS (Global Positioning System). Par ce système, on a directement accès aux coordonnées spatiales successives du véhicule dans un référentiel et une base de temps donnés, et donc indirectement à la vitesse d'avancement. C'est principalement grâce à l'essor des systèmes GPS de bon marché que les méthodes utilisant des (x)FCD se sont fortement développées ces dernières années. Aujourd'hui, il est en effet

très facile de trouver des systèmes GPS d'un coût inférieur à 500 euros permettant une localisation relativement précise (< 10 mètres) pour le peu que l'on se place dans des conditions propices. Dans le cas contraire, comme lors d'une utilisation dans un environnement comportant des zones masquées (typiquement un environnement urbain), le niveau de précision peut rapidement se dégrader et atteindre plusieurs dizaines de mètres.

L'apparition sur le marché d'autres capteurs à bas-coût ont également servi la cause des véhicules traceurs. Parmi eux, se trouvent les capteurs inertiels dont les plus connus sont les accéléromètres et les gyromètres (Fig. 1.25). Avec ces capteurs, les mouvements du véhicule dans son référentiel propre peuvent être décrits et quantifiés selon plusieurs axes. En plus d'un coût faible, ces capteurs bénéficient pour la plupart de la technologie MEMS (microsystèmes électromécaniques) ce qui leur confère des dimensions extrêmement compactes (au maximum centimétriques) et donc très faciles à intégrer dans un véhicule.



Figure 1.25 : Exemple d'accéléromètre à technologie MEMS

Aujourd'hui, la quasi-totalité des smartphones est munie, de série, d'un système GPS et de capteurs inertiels (au minimum un accéléromètre triaxial) afin de servir le téléphone pour son propre fonctionnement (ex : orientation de l'affichage selon l'inclinaison du téléphone) ou pour servir aux applications de service (ex : applications de jeux, de navigation...). De ce fait, en plus d'être un objet connecté, le smartphone est réellement devenu un objet métrologique. Si l'on ajoute à cela le fait qu'il permet également d'enregistrer des données (data logger), on se rend bien compte qu'il s'agit d'un appareil multifonction offrant un potentiel scientifique très pertinent en particulier pour les technologies de véhicules traceurs.

1.2.3 Schéma fonctionnel et architecture opérationnelle

Le recours aux véhicules traceurs nécessite l'établissement d'une architecture complète permettant de garantir plusieurs fonctionnalités :

- Prise des informations ;
- Transmission d'une ou de plusieurs information(s) vers un serveur informatique ;
- Intégration des informations dans une base de données ;
- Traitement des informations donnant lieu à une information globale ou synthétique.

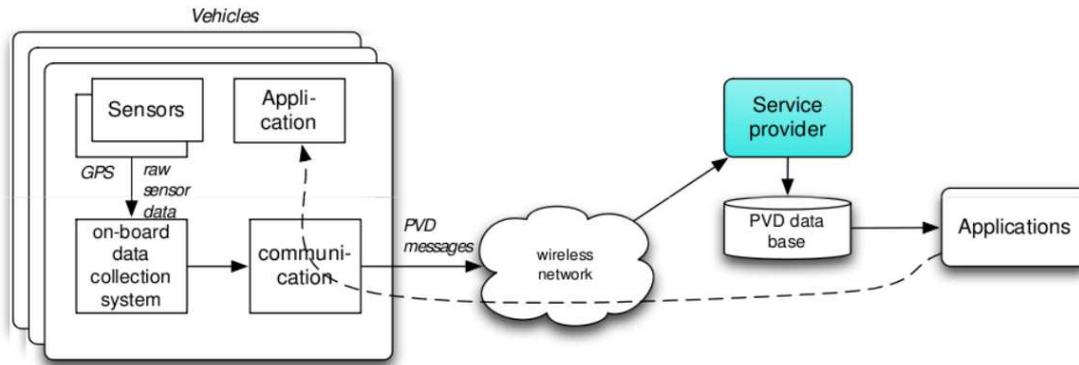


Figure 1.26 : Architecture-type d'une application de service utilisant des véhicules traceurs

La prise d'informations consiste à activer l'ensemble des instruments de mesures disponibles dans le véhicule et d'acquérir les données, si possible de façon synchronisée. Le déclenchement des moyens de mesure peut être effectué soit manuellement par l'utilisateur soit automatiquement lorsque le véhicule passe à proximité d'un dispositif bord de voie spécifique.

Comme nous l'avons vu précédemment, le niveau d'équipements dans les véhicules traceurs de type xFCD donnent souvent accès à un large spectre d'informations. Cependant, la manière dont celles-ci doivent être acquises dépend de l'application de service ou de l'information globale que l'on cherche à construire. On distingue deux stratégies de recueil :

- Une méthode dans laquelle les données brutes, directement issues des capteurs, sont enregistrées de façon périodique ou à cadence imposée (mode « snapshot »);
- Une méthode où l'enregistrement est commandé par un événement particulier (ex : déclenchement d'un système de sécurité ou dépassement de seuil).

La première méthode implique, dans la plupart des cas, l'usage de capteurs externes intégrés dans le véhicule. Elle permet de collecter une grande quantité de données à cadence élevée ce qui est particulièrement bien adapté aux applications nécessitant une connaissance continue d'un phénomène (ex : mouvements du véhicule). Cependant, le volume de données engendré est susceptible de poser problème lors de la phase de transmission.

La seconde méthode, beaucoup plus sélective, convient parfaitement aux applications exigeant une datation exacte d'un phénomène ou bien plus modestement la connaissance d'un changement d'état (ex : apparition de pluie). Contrairement à la première méthode, le volume de données à transmettre est très faible.

L'opération de **transmission** consiste à envoyer un ensemble de données recueillies par le véhicule traceur vers un serveur informatique dédié. Il existe plusieurs façons de réaliser cette action. La plus simple est de décharger *a posteriori* les données de chaque véhicule par une connexion physique au serveur. Cette solution est envisageable pour des applications ne nécessitant pas une connaissance en temps réel des informations, utilisant un faible nombre de véhicules traceurs et permettant un accès direct au serveur. La plupart du temps, ces conditions ne sont pas remplies et il y a obligation de passer par des moyens de télécommunications. Comme bien souvent dans ce domaine, l'usage de normes est de

rigueur pour à la fois uniformiser, réguler et sécuriser l'envoi des informations [22,23]. Ainsi, quel que soit le canal de communication utilisé (GPRS/EDGE/3G, internet...), les données sont envoyées sous forme de messages¹ dont le format doit être scrupuleusement respecté. Une fois reçue par le serveur, les informations sont intégrées dans des bases de données afin d'y être non seulement stockées mais également classées.

Enfin, les données enregistrées subissent un **traitement** mathématique adapté au service visé. Très souvent, ce traitement consiste à agréger ou fusionner diverses informations afin de délivrer, en sortie, un indicateur global qui peut, dans certaines applications, être renvoyé à chacun des véhicules traceurs. Cet indicateur est, dans la grande majorité des cas, intégré et représenté dans un système d'information géographique (SIG).

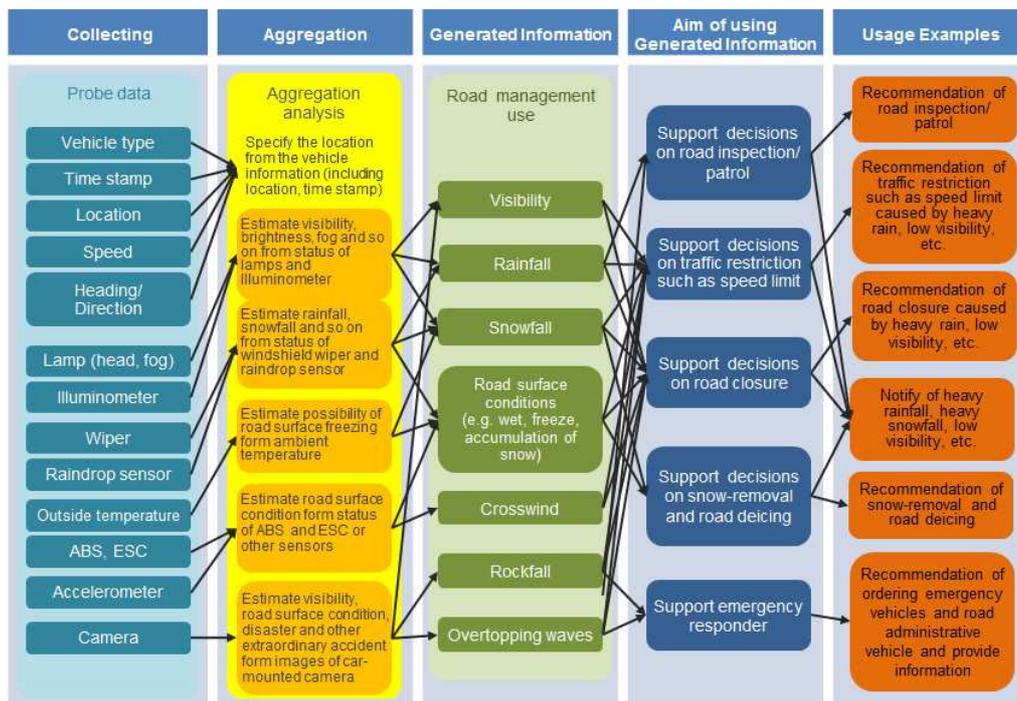


Figure 1.27 : Exemple d’architecture multi-applicatives (source US DOT)

Pour alimenter et faire fonctionner ce modèle de collecte d'informations, un certain nombre d'acteurs doivent entrer en jeu :

▪ Le gestionnaire d'infrastructures

Qu'il soit public ou privé, il est, dans la majorité des cas, le destinataire ou le client de l'indicateur global. Grâce à ce dernier, il va pouvoir approfondir la connaissance de son réseau et le surveiller. Parfois, le gestionnaire est également le propriétaire de la flotte de véhicules traceurs ainsi que des serveurs informatiques hébergeant les données.

¹ Les messages les plus courants sont les messages CAM (Cooperative Awareness Message) et DENM (Decentralized Environment Notification Message)

- Le conducteur du véhicule traceur

C'est la personne qui va assurer la mobilité du véhicule traceur et le cas échéant déclencher la mesure. Il doit donc être collaboratif et en accord avec la démarche. Selon qu'il agisse dans un contexte professionnel ou particulier, son degré d'acceptabilité peut varier. Le modèle économique régissant l'application doit éventuellement lui apporter une motivation (rémunération ou retour d'informations).

- Le constructeur automobile

Pour les applications nécessitant l'obtention d'informations issues du bus CAN (ex : déclenchement des phares, des essuie-glaces, de l'ABS, de l'ESP...), sa contribution est indispensable. Pour lui également, des modes d'incitation doivent être recherchés.

- L'opérateur de télécommunications

Il permet aux véhicules traceurs de se connecter à un serveur et d'y transmettre les données. Son réseau doit pouvoir supporter le volume d'informations communiquées par un ensemble de véhicules traceurs. En outre, il doit veiller à la sécurisation des données.

1.2.4 Forces et faiblesses liées à l'usage de véhicules traceurs

Le recueil d'informations au moyen de véhicules traceurs offre un certain nombre d'avantages tant sur des aspects métrologiques que sur des aspects économiques.

Tout d'abord, grâce à un nombre élevé de véhicules en service, les données peuvent être collectées de façon continue, sans limitation de temps (24h/24h) et avec une couverture géographique du réseau extensive contrairement aux capteurs bord de voie qui sont fixes. Au final, on obtient un volume d'informations considérable ce qui permettra, potentiellement, d'affiner la précision et/ou la fiabilité de l'indicateur global. Ensuite, les données peuvent être rapidement transmises en temps réel ou quasi-réel. C'est un atout notable pour les applications visant, par exemple, à alerter les gestionnaires ou les usagers de la présence d'un danger sur le réseau.

Pour finir, il a été montré à travers plusieurs exemples opérationnels, que les méthodes utilisant les véhicules traceurs comme moyen de recueil de données sont économiquement intéressantes. Par exemple, plusieurs études portant sur les systèmes d'analyseur de trafic ont indiqué que le coût global de fonctionnement de la méthode véhicules traceurs était de 20 à 30 % moins onéreuse que les méthodes utilisant des équipements de mesure fixes [24]. En effet, pour ces derniers, les frais d'installation et de maintenance sont très conséquents en particulier pour les systèmes nécessitant du génie civil (ex : boucles électromagnétiques).

Le modèle « véhicules traceurs » s'accompagne néanmoins de plusieurs inconvénients. Ainsi, bien qu'avantageux financièrement par rapport à d'autres méthodes sur l'ensemble de la durée de fonctionnement, de forts investissements doivent être engagés dès le début du processus (instrumentation de la flotte de véhicules, achats des équipements informatiques, location des réseaux de télécommunication, etc.) pour un retour très étalé dans le temps.

D'autre part, pour atteindre un niveau de performance acceptable, il faut disposer d'un parc de véhicules traceurs relativement fourni. Dans certains cas, ce critère peut induire beaucoup de difficultés pour trouver des acteurs potentiels. Quelle que soit l'application, il

n'existe pas de valeur seuil correspondant au nombre minimal de véhicules traceurs à engager. Donc à chaque fois, ce nombre, mais aussi le volume d'informations à faire transiter, doivent être dimensionnés en fonction des caractéristiques du réseau routier et du service visé.

Sur le plan métrologique, plusieurs difficultés peuvent également se dresser. La plus commune est relative aux imprécisions voire à l'absence des données GPS lorsque les systèmes passent dans des zones de masquage (tunnels, « canyons urbains », zones boisées...). Une autre correspond au concours obligé du constructeur automobile afin d'accéder à certaines informations circulant sur le bus CAN du véhicule lorsqu'elles sont nécessaires à l'application.

Enfin, pour générer des indicateurs globaux à partir de données souvent élémentaires, il faut très souvent créer ou adapter des solutions logicielles complexes. Cet exercice, qui nécessite des compétences particulières, consomme beaucoup de temps de recherche et de développement et doit donc être anticipé.

1.2.5 Les applications

Bien que les Européens aient travaillé sur le concept de véhicules traceurs depuis le milieu des années 2000 et qu'ils aient produit plusieurs démonstrateurs (projets FOT, CVIS, SAFESPOT...), la transposition opérationnelle n'a pas encore été réellement amorcée. Dans ce domaine, seuls les Américains et les Japonais ont réellement sauté le pas et déployé massivement des véhicules traceurs à des fins opérationnelles. Les USA et le Japon, deux pays très en pointe sur les systèmes ITS, possèdent de grandes mégapoles très souvent confrontées aux difficultés d'écoulement du trafic routier. L'usage des véhicules traceurs a permis aux gestionnaires de compléter leurs moyens de **surveillance** des zones de congestion (Fig. 1.28), qui plus est en temps réel, et d'améliorer leur connaissance du problème grâce à des estimations plus fines et plus nombreuses des **temps de parcours**. Pour ce type de service, les indicateurs globaux sont très souvent issus de l'exploitation des profils de vitesse.

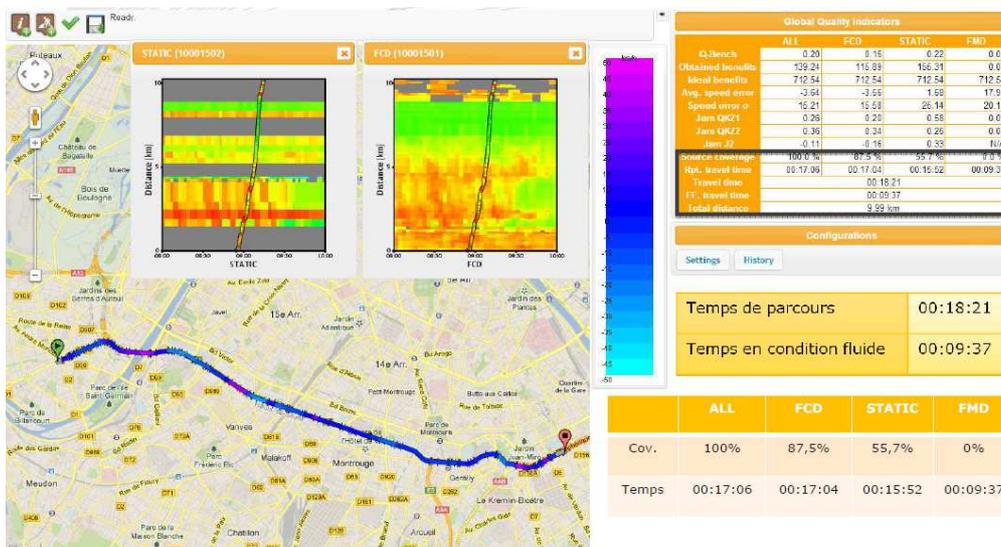


Figure 1.28 : Interface de visualisation d'une application réalisant le calcul de temps de parcours (source V-Traffic)

Même si la plupart des études faisant appel aux véhicules traceurs se sont concentrées sur les problèmes de mobilité, d'autres applications ont vu le jour (Fig. 1.29) mais sont encore rarement au stade opérationnel.

• **Application de sécurité routière**

Dans ce domaine, deux objectifs sont principalement ciblés :

- Identifier et recenser les zones du réseau où des situations atypiques (pour ne pas dire dangereuses) se produisent ;
- Alerter en temps réel les gestionnaires et les usagers d'un danger (accident, bouchon, conditions météorologiques difficiles, etc.).

Les informations utilisées pour ces applications proviennent essentiellement du bus CAN (déclenchement de l'ABS, de l'ESP, des feux antibrouillards...) et sont donc plutôt du domaine des xFCD. Pour les applications de type alerte, les informations sont aussi bien transmises en mode Car-to-Infrastructure (C2I) qu'en mode Car-to-Car (C2C).

• **Application de santé publique**

Récemment, la méthodologie véhicules traceurs a été utilisée afin de quantifier et de suivre les émissions de particules polluantes (CO₂). Cela implique un montage d'équipements de mesure très spécifiques à bord des véhicules traceurs qui, pour le coup, sont présents en plus faible quantité.

• **Application d'auscultation routière**

Pour ce genre d'application, on se sert des données décrivant la dynamique du véhicule pour caractériser la surface de la chaussée. Cette application nécessite le recours à des capteurs inertiels (accéléromètres, gyromètres) qui peuvent être soit directement intégrés dans le véhicule soit appartenir à un smartphone embarqué.

Jusqu'à présent, les applications dans ce domaine permettent uniquement de détecter des défauts de type nid-de-poule qui sont des défauts de surface aisément perceptibles par le véhicule et pour le conducteur.

Function	Description, examples
Traffic estimate (travel time, speed, congestion)	use in traveler information
Traffic management measures	usage of PVD to evaluate tolling on express ways has shown a change of speed during peak times that favours surprisingly the no-tolling approach (Japan)
Speed limit	dynamically adjust and coordinate vehicle speeds in response to congestion, incidents, and road conditions to maximize throughput and reduce crashes
Identify accident-prone locations (near miss incidents)	measure speed, acceleration, brake status, yaw rate, weather conditions
Identify road closures	in case of disaster (earthquake) probe data indicated passable routes. The same could be used in case of floods or heavy snow.
Detect stopped vehicles on the road	e.g. WAZE, user reporting
Identify duration of congestion	forecasting required
Determine traction conditions	(e.g. slippery road , road inspection)
Incident management	planning emergency response
Route guidance	dynamic and controlled proposal of alternative routes, avoiding their congestion too.
Multimodal intelligent traffic signal systems	comprehensive traffic signal system for complex arterial networks including passenger vehicles, transit, pedestrians, freight, and emergency vehicles.
Freight operations	e.g. Probe data from logistic vehicles are collected free of charge by the infrastructure and relayed to logistic centres in near realtime.
Road maintenance (snow)	the emergency service will follow the detection of snow conditions delivered by PVD, and based on temperature, precipitation, visibility and speed.
Pavement maintenance	Use PVD collection in order to measure the quality of the pavement [8] Using four sensors, the vertical acceleration, roll rate, pitch rate, and suspension deflection, the method can be used to detect potholes or large bumps in the road.
Dynamic low emission zone	geographically defined area which seeks to restrict or deter access by specific categories of high-polluting vehicles within the zone for the purpose of improving the air quality within the geographic area. Includes the applications: Dynamic Emissions Pricing, Connected Eco-Driving, and Multi-Modal Traveler Information.
Eco monitoring	sensing individual CMG emissions. The emission of polutants seems to follow the 80-20 rule: 80% of the emissions are produced by 20% of the vehicles, due to incomplete combustion. Monitor these cars using floating car data and send them to tune their motors.

Figure 1.29 : Liste d'applications de service (source FOT-Net Project)

1.3 Bilan de l'état de l'art

La qualité de l'uni longitudinal des chaussées conditionne la plupart des fonctions attendues d'un réseau routier : efficacité (temps de transport), sécurité, confort, impact environnemental, etc. C'est donc un paramètre très utile aux gestionnaires pour évaluer les performances de leur réseau et déclencher les opérations d'entretien. Sa mesure, aussi fréquente et systématique que possible, est un enjeu réel. Dans ce domaine, différentes évolutions matérielles ont abouti à la conception d'appareils à grand rendement certes extrêmement précis mais dont l'usage et le coût ne rendent pas possible une surveillance du réseau routier quasi-permanente et spatialement étendue.

Par ailleurs, les gestionnaires n'exploitent pas directement ces mesures d'uni, mais en déduisent d'abord des indicateurs (IRI, notes NBO...) sur lesquels ils s'appuient pour évaluer et éventuellement corriger les sections de routes dégradées. Au final, les performances des moyens de mesures (exactitude, fidélité) doivent donc être appréciées sur ces indicateurs, plus que sur les mesures elles-mêmes.

Grâce aux récents progrès technologiques, arrive sur le marché une nouvelle génération de capteurs (accéléromètres, lasers, GPS...) plus miniaturisés, plus communicants et surtout moins chers que ceux de la génération antérieure, à niveau de performance potentiellement équivalent. Grâce à ces capteurs, de nouvelles solutions pour la surveillance des réseaux routiers peuvent être imaginées et développées. C'est le cas du concept de « véhicules traceurs » qui se décline aujourd'hui en de nombreuses applications. Celles pour la surveillance du trafic, de sa fluidité et des obstacles qu'il rencontre, sont soit déployées, soit très avancées. D'autres applications se sont focalisées sur l'auscultation de surface des chaussées mais elles sont encore limitées à la détection des défauts les plus « évidents » (ex : nid-de-poule). Dans ce domaine, l'intérêt des travaux de thèse est de prolonger cette application en cherchant à savoir s'il est possible d'en augmenter le pouvoir de détection. Pour cela, il sera par exemple possible de s'appuyer sur les informations provenant de la dynamique du véhicule, laquelle est très dépendante des irrégularités présentes à la surface de la chaussée (défauts d'uni).

Chapitre 2

Spécifications du système envisagé et conséquences sur les travaux de thèse

SOMMAIRE

2.1 Principe de la solution d’auscultation.....	42
2.2 Structure de la solution d’auscultation.....	42
2.3 Complémentarité avec la méthode d'auscultation traditionnelle.....	44
2.4 Cadre des travaux de thèse et cahier des charges.....	45
2.5 Bilan sur la solution d’auscultation et le cadre des travaux de thèse.....	46

L’objectif principal de ce chapitre est d’expliciter et d’illustrer le concept global de « mesure de l’uni des chaussées au moyen de véhicules traceurs » tel que nous le proposons et de répondre aux questions suivantes :

- Quel service vise-t-il ?
- À qui est-il destiné ?
- Comment est-il organisé ?

Ce chapitre est également l’occasion de délimiter, au sein du schéma général de l’auscultation des routes, le champ d’exploration exact de la thèse, en explicitant les principales spécifications auxquelles devra répondre le concept et en précisant quelques hypothèses sur ses conditions d’application.

2.1 Principe de la solution d'auscultation

La solution d'auscultation faisant appel aux véhicules traceurs est uniquement définie et utilisable pour les activités de surveillance du réseau (ou « monitoring » en anglais) ; elle ne vise donc en aucun cas les activités de réception de chantier. Son ambition est de compléter ou de se substituer, dans certains cas (réseaux secondaires, notamment), aux campagnes d'auscultation périodiques. De plus, elle cible prioritairement les gestionnaires qui ont la charge de l'exploitation et de l'entretien des infrastructures de transports. Cela étant, un retour d'information vers les usagers est également envisageable (ex : publication de cartographies).

Cette solution est fondée sur l'utilisation du tandem capteurs bas-coût/véhicules traceurs pour la collecte d'informations. Elle vise à recueillir, à moindre frais, un grand volume de données de façon continue et sur une très large partie du réseau. Les principales cibles de cette solution sont les routes secondaires des réseaux départementaux qui ont la particularité d'être très vastes (environ 200 000 km en France) et de plus en plus circulés mais sur lesquels les appareils à grand rendement ne sont que très rarement voire jamais déployés. En outre, l'utilisation de ces moyens sur les routes structurantes, entre les campagnes d'auscultation périodiques, permettra un suivi plus continu de celles-ci. Pour autant, cette solution n'a pas besoin de produire des données en temps réel car la plupart des défauts de surface évoluent relativement lentement (sauf peut-être pour les nids-de-poule) ; l'important est que la mise à disposition des informations soit beaucoup plus fréquentes que celles des campagnes classiques pluriannuelles.

Enfin, à l'issue du processus, la solution d'auscultation délivrera un indicateur décrivant, avec un degré de précision qui reste à définir, le niveau d'uni sur une section donnée.

2.2 Structure de la solution d'auscultation

Le schéma de fonctionnement de cette méthode est identique à celui utilisé par les applications utilisant des véhicules traceurs (Cf. section 1.2.5). Il comporte donc les fonctions suivantes :

- **Recueil des données**

Cette opération consiste à activer les systèmes de mesures bas-coût embarqués dans les véhicules traceurs afin de recueillir des données le long d'un parcours. Le déclenchement des appareils peut être soit automatique (ex : dès l'allumage du moteur) soit manuel avec l'intervention du conducteur ou de ses passagers. Dans la mesure où la méthode d'auscultation est principalement destinée aux gestionnaires, on peut considérer que leur flotte de véhicules professionnels (ex : véhicules de patrouille, véhicules de liaison) fassent office de véhicules traceurs. En outre, le fait de travailler avec des véhicules de patrouille, par exemple, garantit l'accumulation de données sur des itinéraires identiques favorisant ainsi le degré de répétabilité des mesures.

Enfin, à ce stade de l'étude, le type de données à recueillir et par voie de conséquence le type de capteurs associé pour évaluer les défauts d'uni ne sont pas connus (ce choix fait

l'objet du chapitre suivant). La seule certitude repose sur l'utilisation d'un système GPS pour géo-localiser les passages des véhicules traceurs.

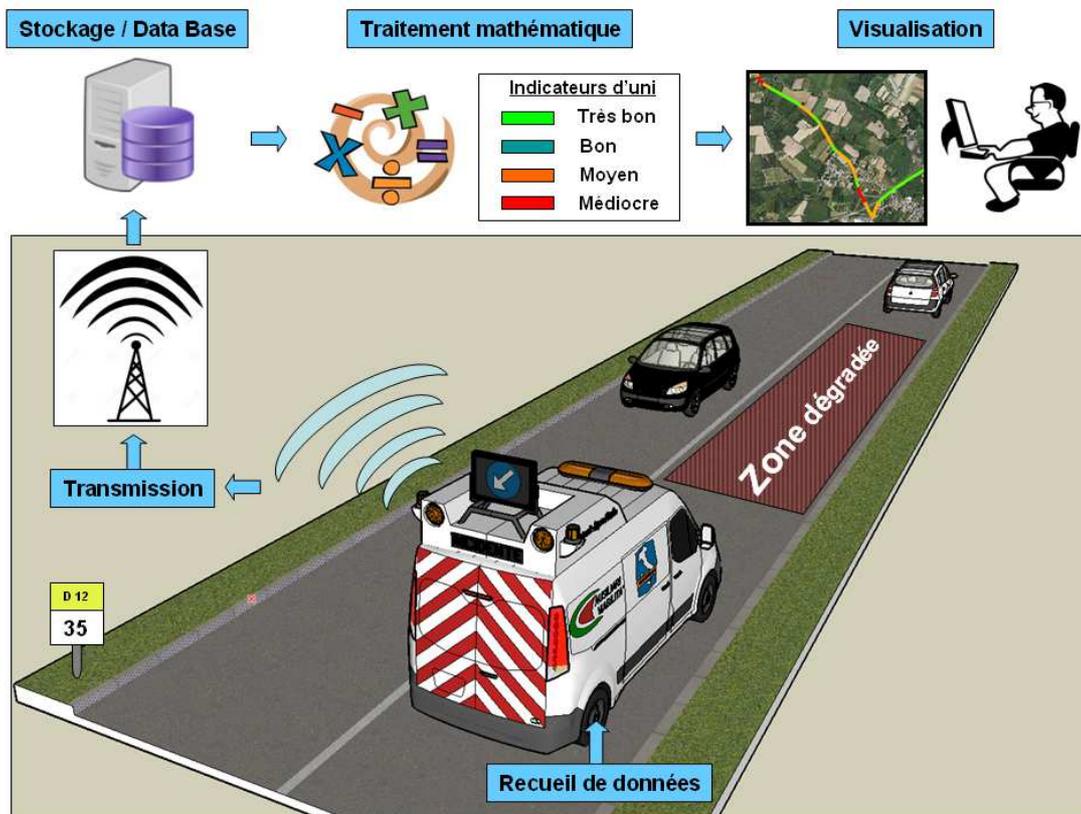


Figure 2.1 : Schéma illustrant la méthode de détection des défauts d'uni au moyen de véhicules traceurs

• Transmission vers un serveur

Les fichiers de mesures générés par chaque véhicule traceur doivent être transmis à un serveur informatique pour y être stockés en vue d'alimenter les opérations de traitement. Ceci implique que les véhicules traceurs doivent posséder des moyens de communication (clé ou câble USB, liaison téléphonique, wifi...) pour dialoguer avec le serveur. Les fichiers peuvent soit être envoyés au fur et à mesure soit être transmis d'une traite à un moment donné de la journée.

• Mise en base de données

Lorsque les fichiers de mesures arrivent sur le serveur, ils peuvent être intégrés dans des logiciels de base de données. Ces derniers sont capables de gérer un grand volume de fichiers et permettent une exploitation dynamique grâce aux fonctions de requêtes.

• Opération de traitement

Cette étape consiste à agréger et fusionner une somme d'informations pour en extraire un indicateur global. Cet indicateur, qui sera adapté au besoin du gestionnaire, va permettre de traduire le niveau d'uni pour une section de route et une période données (ex : niveau d'uni

sur la RD127 au mois de Juillet 2014). Le degré d'intelligence de la solution d'auscultation dépend donc essentiellement de cette opération.

• Présentation de l'indicateur

De nos jours, il est très commode d'utiliser des SIG (fonds de cartes interactifs) pour représenter des indicateurs dépendant d'une position spatiale. En plus de faciliter la vision des résultats, ces systèmes permettent de superposer différents indicateurs sur une même zone grâce aux fonctionnalités multicouches.

2.3 Complémentarité avec la méthode d'auscultation traditionnelle

La solution d'auscultation proposée dans ce chapitre s'insère dans une organisation plus large que l'on pourrait surnommer « méthode de l'entonnoir » (Fig. 2.2). Le principe y est relativement simple : attaquer le processus d'auscultation avec des outils simplifiés pour identifier les zones dégradées ou supposées dégradées parmi des milliers de kilomètres puis progresser avec des outils de plus en plus précis afin d'affiner le diagnostic.

Finalement, par cette approche, on optimise également l'usage des appareils à grand rendement pour les activités de surveillance ; non seulement le déclenchement de ces appareils sera effectué au bon moment mais en plus il se fera au bon endroit c'est-à-dire là où la caractérisation des défauts est la plus pertinente à effectuer. De plus, grâce à la méthode des véhicules traceurs, il sera possible d'obtenir des données pratiquement sur l'ensemble du réseau, même là où l'enjeu économique ne justifie pas le passage d'un appareil à grand rendement c'est-à-dire sur les routes secondaires. Ainsi, même sur celles-ci, les gestionnaires pourront s'appuyer sur des données d'auscultation objectives afin d'affiner leur stratégie d'entretien comme ils le font sur les réseaux principaux, et être ainsi beaucoup plus efficaces.

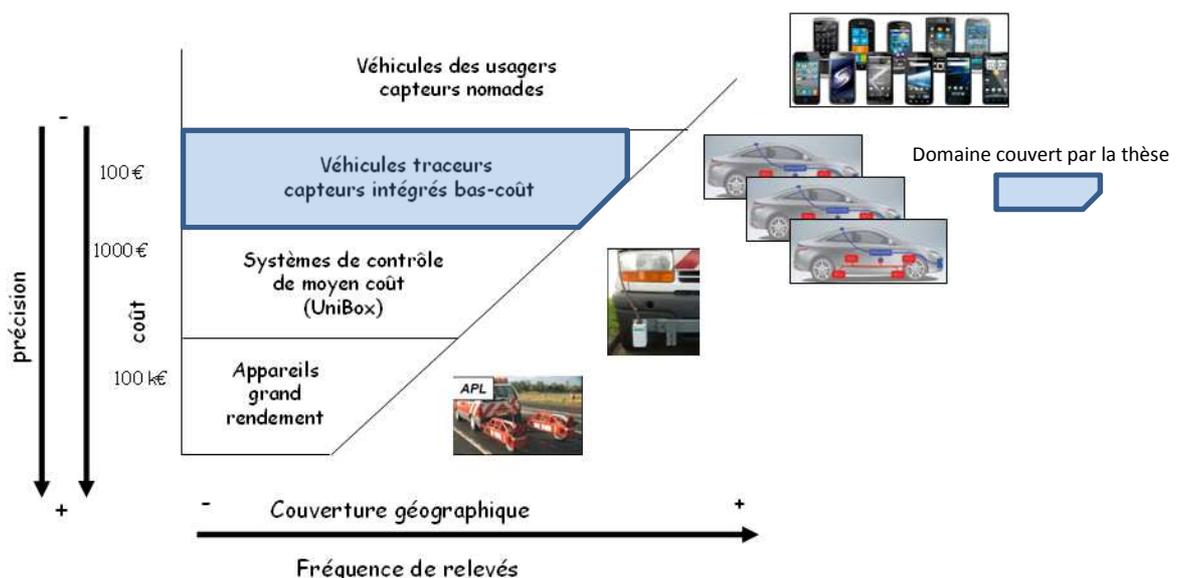


Figure 2.2 : Schéma illustrant la palette d'outils disponibles pour estimer l'uni

2.4 Cadre des travaux de thèse et cahier des charges

Les travaux de thèse se sont principalement intéressés à deux des aspects essentiels de la solution d'auscultation : le recueil de données et l'opération de traitement.

En ce qui concerne le **recueil de données**, les travaux ont avant tout porté sur la prise d'informations. En premier lieu, ceci signifie que l'on a recherché le type d'informations le plus pertinent à exploiter et trouver les différents moyens pour le capter. Comme il existe plusieurs types d'informations possibles pour caractériser les défauts d'uni, l'objectif des travaux dans ce domaine est de retenir l'information semblant être la plus adaptée à notre problématique et de déterminer quels sont les moyens de mesure les plus appropriés pour l'acquérir. Ce travail de sélection est crucial car plus l'information délivrée par chaque véhicule traceur sera riche, plus le niveau de précision et de fiabilité en fin de processus de traitement aura de chances d'être élevé.

Le traitement global consiste à **agrèger et fusionner l'ensemble des données** collectées par les véhicules traceurs pour en extraire un indicateur final. Il s'agit d'une opération très importante car de ce traitement dépend en grande partie le niveau de pertinence et de fiabilité de l'indicateur dont, à son tour, dépend la qualité générale de la solution d'auscultation. Dans ce domaine, l'objectif principal des travaux de thèse consiste à mettre au point une méthodologie répondant aux spécifications suivantes :

- Écarter les données aberrantes ou douteuses afin d'optimiser la puissance de résolution des méthodes de traitement ;
- Prendre en compte les spécificités des données utilisées en entrée (ex : redondance, degré d'incertitude, etc.) ;
- Évaluer la fiabilité des données à travers un suivi de chaque véhicule traceur ;
- Proposer un indicateur final suffisamment précis et intelligible pour qu'il puisse être exploitable par le gestionnaire. Cet indicateur devra apporter des enseignements sur le niveau d'uni pour une période et une zone donnée ;
- Assortir à cet indicateur un indice de confiance qui permettra d'exprimer le degré de conviction que l'on attribue au résultat final ;
- Être la plus automatisée possible c'est-à-dire nécessitant très peu d'interventions ou de paramétrage particulier en cours de processus.

Les autres fonctionnalités incluses dans le processus classique de relevés par véhicules traceurs (transmission des données, mise en base, intégration des indicateurs dans des SIG) ne sont pas couvertes par le champ de la thèse. Celles-ci, qui ne sont pas vraiment spécifiques à l'application visée (on les rencontre dans beaucoup d'autres applications), renvoient davantage aux domaines de l'informatique et des télécommunications. En conséquence, dans ces travaux, nous avons considéré comme acquis un certain nombre de prérequis comme, par exemple, la présence d'une base de données intégrant toutes les informations délivrées par les véhicules traceurs et dans laquelle plusieurs types de requêtes sont autorisés (tri chronologique, tri par véhicule, tri par section de route...).

D'autres hypothèses sont faites sur le contexte opérationnel qui s'avèreront très utiles en première approche :

- Chaque véhicule traceur conserve systématiquement le même identifiant (reconnaissance d'un véhicule parmi la flotte facilitée) ;
- Les véhicules traceurs sont assimilés à des véhicules parcourant régulièrement une même zone géographique garantissant ainsi un niveau minimal de fréquence de passage sur une même portion de route ;
- L'instrumentation dans chaque véhicule traceur est identique et maîtrisée (on connaît la nature et les caractéristiques des capteurs) ;
- On suppose que les sections de routes auscultées ne présentent pas de zones de masquage GPS intégral (ex : tunnel) de sorte qu'une position puisse être toujours fournie par le système GPS.
- On considère uniquement les axes de circulation à deux voies de circulation (une par sens) ce qui élimine les problèmes de reconnaissance de voies parallèles au moyen des traces GPS ;
- Le système de mesure équipant le véhicule traceur vise principalement à mesurer l'uni dans la bande de roulement située à droite de la voie, mais doit pouvoir être reconfiguré sans difficulté pour mesurer l'autre bande de roulement (éventuellement les deux) ; en revanche, on ne s'intéresse pas à l'uni hors des bandes de roulement ;
- On considère qu'aucune réparation n'a eu lieu sur la chaussée pendant la période d'observation. De ce fait, chaque véhicule traceur scrute bien les mêmes caractéristiques de surface.

2.5 Bilan sur la solution d'auscultation et le cadre des travaux de thèse

Dans ce court chapitre, nous avons exposé les spécifications puis les principes généraux du concept utilisant des véhicules traceurs pour estimer et suivre l'uni longitudinal des chaussées. Cette solution, qui se veut complémentaire des méthodes existantes, fait intervenir plusieurs fonctions afin de recueillir, transmettre et traiter les informations.

Comme il n'est pas possible de traiter en profondeur la totalité des questions soulevées par ce concept dans la période impartie à la thèse, celle-ci s'est principalement focalisée sur deux aspects techniques essentiels :

- L'élaboration d'une information individuelle (au sens d'un relevé issu d'un véhicule traceur) reflétant correctement l'état de l'uni de la chaussée ;
- La combinaison d'un ensemble d'informations individuelles (issu de plusieurs véhicules et/ou de plusieurs passages) pour créer une information synthétique qui contribuera à établir le diagnostic final de l'état de la chaussée.

Concernant le premier point, l'état de l'art laisse entrevoir plusieurs possibilités vis-à-vis du type de données à recueillir et des instruments de mesures associés. Ce travail est développé dans le chapitre suivant.

Pour le second, nous avons principalement spécifié une automatisation du processus de traitement ce qui implique de limiter au maximum les ajustements « manuels » (ex : seuillage) et nous avons également tenu à ce que les incertitudes de mesures découlant de l'usage de véhicules traceurs soient prises en compte dans le calcul de l'information finale (cf. chapitre 4).

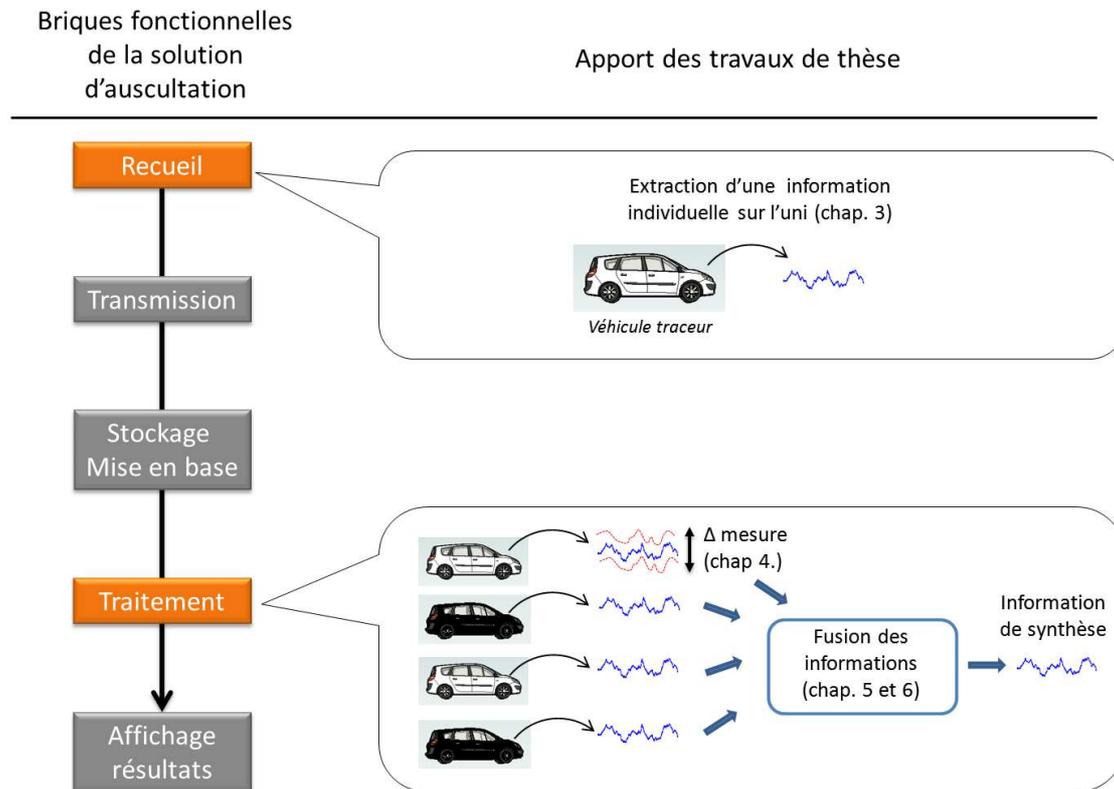


Figure 2.3 : Cadre des travaux de thèse dans la solution d'auscultation

Chapitre 3

Recueil de données par les véhicules traceurs : informations à capter et caractérisation de l'instrumentation bas-coût

SOMMAIRE

3.1 Informations candidates pour la détection des défauts d'uni.....	50
3.1.1 Information de profil par la méthode de Spangler.....	50
3.1.2 Informations exclusivement d'origines inertielles.....	51
3.1.3 Autres types d'informations	51
3.2 Sélection et caractérisation expérimentale des capteurs	52
3.2.1 Choix et dimensionnement des capteurs	52
3.2.2 Caractérisation des capteurs sur le banc de vibrations.....	56
3.3 Utilisation d'un GPS pour évaluer la distance parcourue.....	70
3.4 Conclusion : méthode et instrumentation retenues pour obtenir l'information d'uni de la chaussée	71

Ce chapitre, dédié à la conception du système de mesure d'uni par véhicule traceur, s'intéresse en premier lieu à la nature des données à enregistrer à bord du véhicule traceur et à la manière de les traiter afin de remonter à une information traduisant le niveau de l'uni longitudinal.

Compte-tenu des spécifications retenues dans le chapitre précédent, toute la difficulté de l'exercice consiste à identifier un ou plusieurs types de données pertinents pour l'évaluation de l'uni et correctement mesurables au moyen d'une instrumentation bas-coût.

Cette dernière condition exige de s'assurer, une fois les données identifiées et les capteurs bas-coût capables de les acquérir retenus, des capacités métrologiques de cette catégorie de capteurs. Ceci a notamment fait l'objet, dans ces travaux, d'expérimentations sur des bancs d'essais.

3.1 Informations candidates pour la détection des défauts d'uni

Comme l'a montré l'état de l'art, il existe plusieurs types d'informations pouvant s'avérer pertinentes pour la détermination du niveau d'uni d'une chaussée. Toutes ces informations, en lien avec le profil estimé de la chaussée, n'ont pas le même niveau de richesse et sont obtenues avec des méthodes et des moyens instrumentaux différents.

3.1.1 Information de profil par la méthode de Spangler

L'appareil à grand rendement MLPL, présenté dans le premier chapitre, s'appuie sur la méthode de Spangler (appelée aussi méthode General Motors) pour accéder à l'information de profil. Cette dernière étant indéniablement la plus à même de décrire précisément le niveau d'uni d'une chaussée, il est assez logique d'essayer de la reproduire mais à partir de moyens de mesures bas-coût.

La méthode de Spangler consiste à déterminer le profil d'une chaussée à partir de deux données distinctes utilisées simultanément :

- La distance entre la caisse du véhicule et la surface de la chaussée ;
- Le déplacement vertical de la caisse (dans un repère absolu).

À chaque instant, le profil s'obtient en retranchant la seconde donnée à la première en vérifiant bien que les vecteurs représentant les deux mouvements verticaux soient colinéaires et orientés dans un même repère (ex : déplacement signé positivement quand il est de sens opposé au vecteur gravitationnel).

Pour effectuer le relevé de ces paramètres, la méthode de Spangler nécessite donc le couplage de deux instruments de mesure : un capteur de distance pour déterminer l'écartement caisse/sol et un accéléromètre pour quantifier les déplacements de la caisse (après double intégration du signal). Ce genre de capteurs étant disponibles en version bas-coût, l'application de cette méthode pourrait donc être compatible avec les spécifications de l'étude.

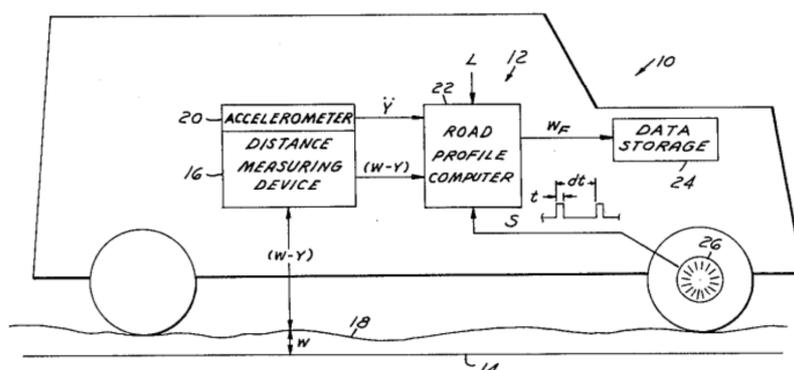


Figure 3.1 : Schéma de principe extrait du brevet General Motors

3.1.2 Informations exclusivement d'origines inertielles

L'état de l'art a permis de montrer que la dynamique du véhicule était très sensible aux défauts d'uni. Ainsi, un véhicule répond aux défauts d'uni de la chaussée qu'il parcourt par des mouvements verticaux spécifiques à ces défauts. Réciproquement, une analyse appropriée des mouvements du véhicule permet d'accéder à une information relative aux défauts d'uni.

La prise d'informations peut être réalisée en différents points :

- Sur la roue ;
- Sur la caisse ;
- Dans l'habitacle (sur la planche de bord par exemple).

Bien entendu, à chaque emplacement correspond un niveau d'informations et donc une fonction d'exploitation différents. Plus l'information prélevée sera proche du conducteur, plus elle sera soumise aux éléments de filtrage successifs du véhicule et moins elle sera porteuse des caractéristiques géométriques du profil (Cf. chapitre 1).

D'autre part, quel que soit le point de mesure et compte-tenu des moyens instrumentaux disponibles, l'information peut revêtir deux formes :

- une accélération verticale ;
- un déplacement vertical.

Dans le premier cas, l'information à traiter correspond à une donnée obtenue en sortie du capteur (accéléromètre). Bien que cette grandeur physique soit relativement difficile à appréhender, il existe un certain nombre d'études qui exploitent cette nature d'informations pour qualifier l'état de la chaussée et classer des axes routiers les uns par rapport aux autres [25].

Dans le second cas, l'obtention de l'information est un peu plus complexe car elle nécessite un traitement mathématique particulier des données brutes (double intégration et filtrage). Bien que ce dernier puisse déformer ou altérer l'information de base, le fait de travailler avec une grandeur de déplacement présente plusieurs avantages dont celui d'être directement utilisable par des indicateurs courants (NBO, IRI).

3.1.3 Autres types d'informations

Les informations issues des mouvements « absolus » des composantes du véhicule ne sont pas les seules à être candidates à la détection de défauts ; il est aussi envisageable de travailler à partir de mouvements relatifs comme les débattements de suspension par exemple. En effet, plus une chaussée est déformée, plus les suspensions qui relient la roue à la caisse du véhicule s'activent. Celles-ci vont alors alternativement se distendre et se compresser pour compenser les défauts d'uni et préserver la stabilité du véhicule. L'observation et l'exploitation des débattements de suspension rejoint donc, dans une certaine mesure, le principe de l'indicateur IRI (cumul des écarts entre les masses suspendue et non-suspendue sur une longueur donnée). Néanmoins, le recours à cette information est assez problématique car la prise de mesure est relativement difficile à effectuer et nécessite,

en outre, l'usage de capteurs qui n'existent pas en version bas-coût. Pour ces raisons, nous n'avons pas exploré plus en avant cette solution même si l'intégration de plus en plus commune des systèmes de suspension actives dans les véhicules de série laisse penser que, d'ici à quelques temps, cette information sera plus facilement accessible (sous réserve d'une coopération avec le constructeur).



Figure 3.2 : Capteurs de débattement de suspension potentiométriques

3.2 Sélection et caractérisation expérimentale des capteurs

Le choix du genre et du modèle de capteur à utiliser diffère selon le type d'informations à recueillir. De plus, l'exigence économique, mentionnée dans le cahier des charges, oriente les investigations vers les catégories de capteurs bas-coût pour lesquels il est bon de vérifier le niveau de performance.

3.2.1 Choix et dimensionnement des capteurs

A – Les accéléromètres

Le capteur le plus adéquat pour enregistrer les accélérations aux points de mesure cités précédemment est évidemment l'accéléromètre. Il existe une multitude de types d'accéléromètres (asservis, non-asservis, à détection capacitive, à détection piézoélectrique...) mais, compte-tenu des exigences de la solution d'auscultation, les accéléromètres de technologie MEMS sont ceux qui nous intéressent le plus [26]. C'est en effet parmi cette dernière génération de capteurs que l'on trouve à la fois les accéléromètres les plus compacts (capteurs et conditionneurs intégrés dans des circuits imprimés miniaturisés) et les moins coûteux (car vendus en grande série). En outre, ils ont également l'avantage de consommer très peu d'énergie et, par voie de conséquence, de pouvoir être alimentés par de faibles tensions ce qui est très appréciable pour des applications embarquées.

Les accéléromètres MEMS que nous avons retenus appartiennent à la série ADXL produite par la firme Analog Devices. Celle-ci est d'ailleurs un acteur majeur sur le marché de l'instrumentation automobile car elle fournit notamment les capteurs MEMS pour le fonctionnement des systèmes AIRBAG. Sans rentrer dans les détails, le principe de

fonctionnement de ce genre de capteurs est le suivant : l'accélération subie est estimée à partir du mouvement d'une série de peignes en silicium entrelacés qui forment ainsi un réseau de condensateurs ; le déplacement d'une lamelle du peigne par rapport à son vis-à-vis modifie la valeur de conductance électrique et module alors le signal de sortie.

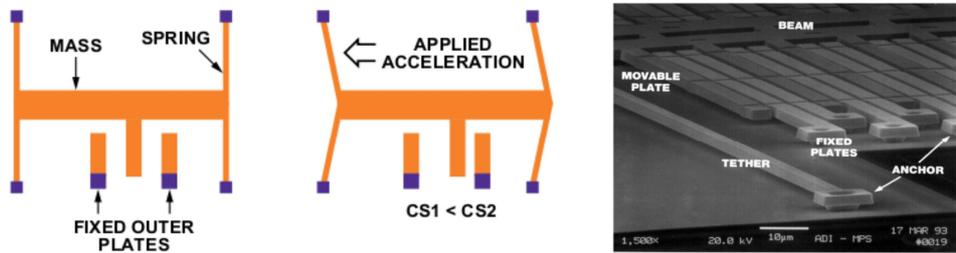


Figure 3.3 : Schéma de principe d'un accéléromètre capacitif MEMS et vue des composants au microscope

Notons qu'en plus des accéléromètres, on trouve sur le marché des gyromètres et même des centrales inertielles de technologie MEMS. La plupart du temps, ces capteurs sont à signaux de sortie analogiques ce qui convient parfaitement aux applications menées dans un cadre expérimental.

Pour choisir le bon modèle de capteur, il est nécessaire de connaître la gamme d'accélération auxquelles celui-ci sera soumis. Cette opération de dimensionnement est importante car elle va permettre au capteur d'évoluer dans une plage de fonctionnement optimale c'est-à-dire là où la dynamique de mesure est exploitée au maximum tout en s'abstrayant des phénomènes de saturation. Pour cela, il est possible de s'appuyer sur la littérature [27] et de réaliser également des essais préliminaires sur un itinéraire offrant des variations de niveau d'uni représentatives (présences de zones fortement, moyennement et pas du tout dégradées). Les résultats de ces essais effectués sur un circuit proche du centre IFSTTAR¹ sont présentés sur la figure ci-après (Fig. 3.4).

Selon le point d'enregistrement, les niveaux d'accélération diffèrent assez nettement en particulier entre la masse non-suspendue (roue) et la masse suspendue (caisse, habitacle). Cette observation permet notamment d'apprécier l'effet des suspensions dans le processus de stabilisation de la masse suspendue. Bien qu'appartenant au même ensemble, les accélérations observées sur la caisse et l'habitacle présentent quelques écarts la plupart du temps dus aux effets de filtrage de l'élément intérieur (siège, planche de bord) supportant le capteur.

¹ Les propriétés de ce circuit sont présentées dans le chapitre 4.

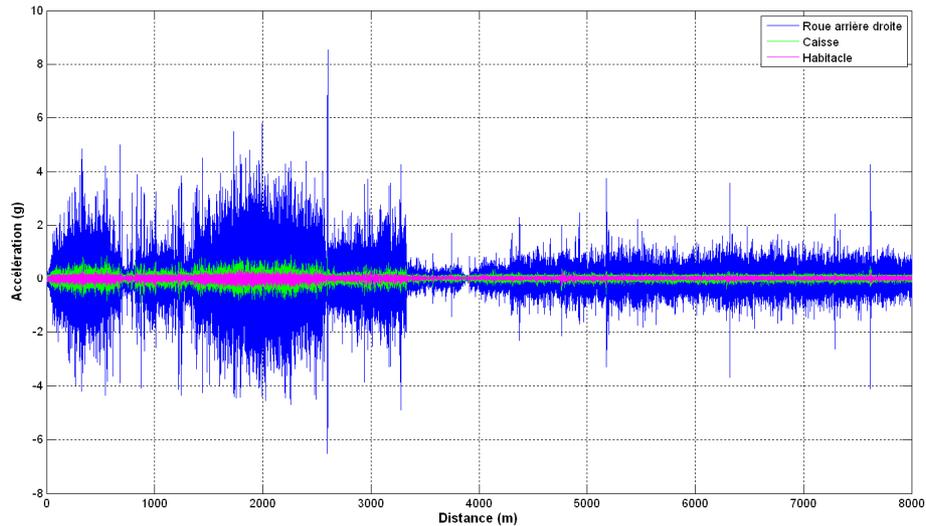


Figure 3.4 : Niveaux d'accélération verticales enregistrées sur le circuit-test en fonction du positionnement du capteur sur le véhicule d'essai

Grâce à ce genre d'expérience, le choix des modèles d'accéléromètres devient plus aisé. Dans notre étude, nous avons ainsi opté pour les capteurs MEMS suivants dont le prix d'achat à l'unité est proche de 50 euros¹ :

	Roue	Caisse	Habitacle
Accélération moyenne (g)	0.42	0.08	0.05
Accélération maximale (g)	8.60	1.03	0.48
Capteur choisi	ADXL 326 +/- 16 g	ADXL 335 +/- 3 g	

Tableau 3.1 : Valeurs d'accélération verticales particulières enregistrées sur le circuit-test et choix des accéléromètres

Les plages de mesure des accéléromètres sélectionnés sont supérieures aux accélérations maximales constatées sur le circuit-test et devraient ainsi permettre d'éviter les phénomènes de saturation. De plus, chacun de ces capteurs nécessite une tension d'alimentation très faible qui est donc parfaitement compatible avec les sources de tension disponibles dans un véhicule. Mais, à la différence de la catégorie haut de gamme, les capteurs bas-coût utilisés dans cette étude ne sont pas livrés avec un certificat d'étalonnage. Leur facteur de sensibilité est en effet variable et doit être recherché parmi un ensemble défini par trois valeurs : une sensibilité minimale, typique et maximale. Pour ce cas de figure, il est donc indispensable de vérifier la réponse de ces capteurs en procédant, par exemple, à des essais sur un banc de vibrations.

¹ Prix nettement inférieur à celui de l'accéléromètre de précision Schaevitz servant de référence dans cette étude (prix d'environ 3000 euros).

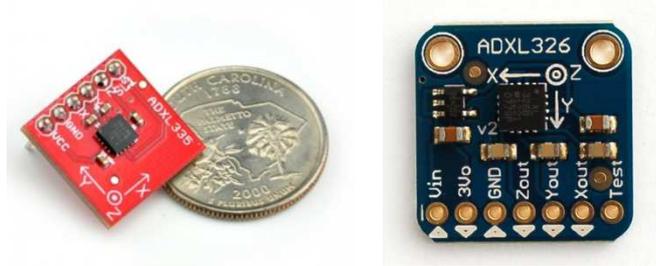


Figure 3.5 : Accéléromètres de la série ADXL retenus pour l'étude

B – Les capteurs de distance

Comme présenté dans les paragraphes précédents, la méthode de Spangler exige de disposer de l'information distance caisse/chaussée tout au long de l'avancement du véhicule. En tenant du compte du fait que le capteur doit assurer une mesure sans contact, seules deux technologies sont permises : les capteurs optiques et les capteurs ultrasoniques.

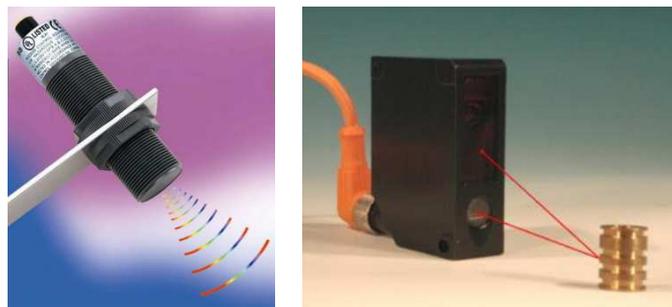


Figure 3.6 : Capteurs de distance à ultrasons (à gauche) et optique (à droite)

Ces deux technologies utilisent le même principe physique : un signal (optique ou acoustique) est émis vers la surface de la chaussée ; après réflexion, une partie du signal retourne vers la partie réceptrice du capteur, qui à partir de la durée émission/réception calcule alors la distance recherchée.

La nature des signaux émis conditionnent les caractéristiques de fonctionnement des capteurs. Pour des systèmes optiques, le signal envoyé étant une lumière, la vitesse de transmission est très rapide. Ce genre de capteur est donc parfaitement adapté aux applications nécessitant des cadences d'acquisition élevées mais est, en contrepartie, très sensible aux phénomènes de pollution lumineuse (ex : mesure par fort ensoleillement). La seule façon de contrer ce problème est d'utiliser alors des sources lumineuses puissantes (ex : LASER de classe 2 ou supérieure) qui sont cependant à la fois plus chères et plus difficiles à mettre en œuvre (consommation d'énergie plus élevée, protection des yeux, etc.).

Les capteurs à ultrasons ont, quant à eux, l'avantage de ne pas être perturbés par les problèmes de niveau de luminosité ambiante ou assez peu par les conditions de réflexion particulières, telles que les pellicules d'eau présentes à la surface des chaussées mouillées. Grâce à leur robustesse et à leur précision, on les retrouve régulièrement dans les systèmes

d'aide à la conduite (« radar » de recul). Par contre, leur principale limitation coïncide avec la vitesse de propagation du signal acoustique. En effet, par comparaison avec un signal lumineux, la durée d'émission/réception est bien plus longue ce qui abaisse fortement les fréquences d'échantillonnage. Ainsi, la plupart des capteurs à ultrasons disponibles sur le marché et compatibles avec notre application fonctionnent à une cadence maximale d'environ 30 Hz. En considérant une vitesse d'avancement du véhicule traceur de 20 m/s, une telle fréquence permettrait de récupérer des données tous les 67 cm, résolution spatiale insuffisante pour établir un profil de chaussée correctement exploitable. En outre, des recherches précédentes portant sur un appareil d'auscultation intégrant des capteurs à ultrasons ont révélé que ces derniers étaient fortement perturbés par des phénomènes de diffraction lorsque la surface de la chaussée était trop rugueuse.

Pour ces raisons, le capteur le plus à même de mesurer la distance entre la surface de la chaussée et la caisse du véhicule est un système optique utilisant un signal laser de faible puissance, dont il convient toutefois de vérifier sa sensibilité aux variations de luminosité. Les produits de cette nature permettent de réaliser des mesures à cadence élevée (jusqu'à plusieurs kHz) et à des portées compatibles avec notre application. Il n'existe pas, pour le moment, des capteurs de ce genre à très bas-coût puisque les prix les plus bas sont d'environ 500 euros par unité. Cela étant, cette gamme de prix n'étant pas non plus rédhibitoire, leur intérêt reste avéré et il a été décidé de procéder à leur évaluation, comme pour les accéléromètres.

3.2.2 Caractérisation des capteurs sur le banc de vibrations

L'opération de caractérisation des capteurs constitue un temps fort dans les travaux de thèse car elle permet d'avoir une connaissance relativement poussée des capteurs bas-coût qui sont destinés à équiper les véhicules traceurs.

Cette étape consiste avant tout à confirmer et à compléter les paramètres fournis par le constructeur et à s'assurer du bon fonctionnement des capteurs dans les conditions prévues dans l'application d'auscultation. Il peut également s'agir, le cas échéant, d'identifier et de caractériser les défauts (ex : biais) ou bien encore d'observer le comportement du capteur aux limites de ses conditions d'utilisation.

Dans le cadre des travaux de thèse, cette connaissance a été obtenue à partir de tests effectués sur une table vibrante, équipement spécifique de l'IFSTTAR, avec laquelle il est possible de générer des mouvements contrôlés.

A – Objectifs des essais

L'objectif général des tests effectués sur la table vibrante est d'évaluer les performances métrologiques intrinsèques des capteurs avant qu'ils ne soient intégrés dans leur environnement de travail (embarqué dans un véhicule). La plupart du temps, cet exercice a été réalisé en comparant la réponse du capteur à tester par rapport à celle provenant d'un capteur de référence ou d'un signal d'excitation connu. Deux types de capteurs ont été testés : des accéléromètres et un capteur de distance optique. Les premiers méritent une attention toute particulière car ils interviennent dans les deux méthodes d'auscultation d'uni

investiguées (méthode de Spangler et méthode inertielle) et parce que leur très faible coût suggère une qualité moindre.

Étudier le comportement d'un accéléromètre, c'est avant tout observer la réponse du capteur en fonction des fréquences d'excitation (étude fréquentielle) en régime dynamique. Pour cela, il est très courant, et très pratique, d'établir la fonction de transfert entre les signaux provenant du capteur à tester et ceux issus d'un système de référence. Le calcul de la fonction de transfert permet en effet d'apprécier la linéarité et le déphasage entre le signal délivré par le capteur à tester et celui du capteur de référence ou du signal consigne. L'évaluation d'un capteur de distance optique consiste, quant à elle, à vérifier que la distance déterminée par ce dernier est correcte tout au long de la plage de fonctionnement (écartement entre le capteur et sa cible) et à des fréquences de variation différentes.

Pour ces essais effectués en régime dynamique, nous avons bien évidemment cherché à éprouver les capteurs dans la gamme de fréquences « utiles » par rapport au cadre d'utilisation c'est-à-dire pour les fréquences d'excitation caractéristiques de l'interaction entre l'uni et les mouvements du véhicule. Par ailleurs, ces essais ont également été l'occasion de parfaire certaines opérations de traitement des données en sortie de capteur comme les algorithmes de reconstruction des valeurs de déplacement à partir des signaux d'accélération.

B – Caractéristiques des capteurs utilisés dans les essais

Les tableaux suivants récapitulent les propriétés les plus significatives des capteurs testés et des capteurs de référence. Dans ces essais, seule la composante verticale (axe Z) des accéléromètres a été testée car elle correspond à l'axe de vibration qui sera pris en compte pour évaluer les défauts d'uni une fois le capteur monté sur le véhicule.

▪ Accéléromètres :

Désignation	ADXL335	ADXL326	Schaevitz A215 (capteur référence ¹)
Axes de mesure	3	3	1
Type	MEMS, non-asservi	MEMS, non-asservi	Asservi (servo-mécanique)
Gamme	± 3 g	± 16 g	± 2 g
Sensibilité	[0.27 ; 0.33] V/g	[0.051 ; 0.063] V/g	2.49 V/g
Bande passante	Axes X, Y : 1600 Hz Axe Z : 550 Hz	Axes X,Y : 1600 Hz Axe Z : 550 Hz	Non communiquée
Fréquence de résonance	5.5 kHz	5.5 kHz	150 Hz
Niveau de bruit	300 μ g/VHz (rms) (densité de bruit)	300 μ g/VHz (rms) (densité de bruit)	< 5 mV (rms) (bruit sortie capteur)
Tension alimentation	Entre 1.8 et 3.6 V	Entre 1.8 et 3.6 V	-15 V / +15 V
Type de sortie	Analogique	Analogique	Analogique

Tableau 3.2 : Principales caractéristiques des accéléromètres utilisés dans les essais

¹ Ce capteur est utilisé dans les appareils de mesure d'uni à grand rendement MLPL

▪ Capteur de distance / déplacement :

Désignation	Capteur optique Wenglor	Capteur déplacement vérin (référence)
Sensibilité	30 mm/V	5 mm/V
Résolution	80 μm	Env. 10 μm
Plage de mesure / Course	300 mm	Env. 50 mm
Cadence de mesure	800 Hz max.	non communiqué
Tension alimentation	De 18 à 30 V	Alimentation par le système de contrôle de la table vibrante

Tableau 3.3 : Principales caractéristiques des capteurs de distance/déplacement utilisés dans les essais

Les accéléromètres bas-coût et l'accéléromètre de référence diffèrent sur bien des plans mais l'un des plus significatifs se rapporte au coefficient de sensibilité. À la différence d'un accéléromètre haut de gamme qui possède un facteur de sensibilité fixe (indiqué dans le certificat d'étalonnage), celui des accéléromètres de la série ADXL d'une part n'est pas clairement spécifié par le constructeur et, d'autre part, est susceptible de varier en fonction de la tension d'alimentation.

De plus, les documentations techniques des deux types d'accéléromètres ne permettent pas de comparer directement les niveaux de bruit respectifs car ceux-ci sont exprimés de façon différente : en densité de bruit pour les accéléromètres bas-coût et en tension de sortie pour l'accéléromètre haut de gamme. Néanmoins, par comparaison avec des spécifications issues d'autres capteurs du marché, on se rend compte que les accéléromètres bas-coût ADXL présentent un niveau de bruit supérieur aux accéléromètres de précision (ex : le niveau de bruit du produit Kistler 83330B3, dont les spécifications sont proches de l'accéléromètre de référence, affiche un niveau de bruit de 0.5 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ (rms)).

C – Protocole expérimental

Les tests ont été réalisés sur la table vibrante de l'unité MACS de l'IFSTTAR. Cet équipement permet de reproduire des mouvements mécaniques correspondant à des signaux d'excitation préalablement définis au moyen d'un logiciel spécifique. Ce dispositif fonctionne en circuit fermé : un signal de consigne électronique est converti puis transmis mécaniquement à l'actionneur du vérin de la table vibrante ; le mouvement de cette dernière est alors enregistré par un capteur de contrôle (capteur de déplacement du vérin) qui renvoie l'information vers le système de commande. Grâce à ce système, il est possible de générer une grande variété de mouvements contrôlés à condition que l'amplitude de ces derniers n'excède pas la course maximale du vérin (± 50 mm).

Comme annoncé précédemment, ces essais ont deux objectifs principaux :

- L'établissement de la fonction de transfert pour les accéléromètres (comportement spectral) ; cette démarche n'est pas nécessaire pour les capteurs de déplacements car ils sont accompagnés d'un certificat d'étalonnage constructeur ;
- L'observation de la réponse des capteurs face à des excitations de type profils réels de chaussée.

Chacun de ces objectifs a fait l'objet d'un plan d'expérience particulier notamment dans le choix et la construction des signaux d'excitation.

• Établissement de la fonction de transfert des accéléromètres

La fonction de transfert est un outil du traitement du signal qui permet de déterminer le rapport d'amplitude et de déphasage entre deux signaux sur une gamme de fréquences donnée. En toute rigueur, l'analyse d'une fonction de transfert n'est permise que sur le domaine spectral pour lequel les signaux à comparer sont statistiquement liés. Cette condition est assurée par le biais d'un indicateur (fonction de cohérence) qui traduit les états suivants pour chaque fréquence :

- Si la fonction de cohérence tend vers 1 alors il existe un fort lien de causalité entre les deux signaux (la comparaison est permise) ;
- Si la fonction de cohérence tend vers 0 alors les signaux sont statistiquement indépendants. Une cohérence proche de 0 (niveau de bruit trop important sur l'un des signaux) invalide toute interprétation de la fonction de transfert.

Dans le domaine continu, les fonctions de transfert et de cohérence s'écrivent mathématiquement de la façon suivante :

Soient un signal d'excitation (ou d'entrée) $x(t)$ de transformée de Fourier $X(\nu)$ et un signal d'observation (ou de sortie) $y(t)$ de transformée de Fourier $Y(\nu)$.

$$\bullet \text{ Fonction de transfert : } H(\nu) = \frac{S_{yx}(\nu)}{S_{xx}(\nu)} \quad (3.1)$$

où

ν : Fréquence

S_{yx} : Spectre de puissance croisé entre le signal d'entrée et le signal de sortie

S_{xx} : Auto-spectre de puissance du signal d'entrée

avec

$$S_{yx}(\nu) = Y(\nu).X^*(\nu) \text{ et } S_{xx}(\nu) = X(\nu).X^*(\nu) \quad (3.2)$$

$$\bullet \text{ Fonction de cohérence : } C^2(\nu) = \frac{|S_{yx}(\nu)|^2}{S_{xx}(\nu) \cdot S_{yy}(\nu)} \quad (3.3)$$

où

S_{yy} : Auto-spectre de puissance du signal de sortie

$$S_{yy}(\nu) = Y(\nu).Y^*(\nu) \quad (3.4)$$

Dans la suite de ce mémoire, le signal d'entrée sera assimilé au signal provenant du capteur de référence tandis que le signal de sortie correspondra au signal du capteur à tester.

Pour cette expérience, nous avons cherché à vérifier que la réponse spectrale des accéléromètres était correcte dans la plage de fréquences [0.1 Hz ; 100 Hz] pour un même niveau d'accélération. Des essais préliminaires ont montré qu'il était difficile d'obtenir la fonction de transfert à partir de l'injection d'un seul signal d'excitation (signal aléatoire par exemple) sur ce domaine spectral. En effet, il n'est pas aisé de concilier les propriétés du signal recherché (ex : garantir une puissance suffisante du signal de sortie pour chaque fréquence) et les contraintes de fonctionnement de la table vibrante¹. En conséquence, la fonction de transfert a été construite « par morceaux » à partir de plusieurs signaux d'excitation pouvant revêtir différentes formes : sinusoïdales et aléatoires. Les signaux sinusoïdaux sont très commodes à utiliser car il est facile de définir ou de calculer certaines de leurs propriétés comme la fréquence du cycle ou les valeurs maximales des déplacements et des accélérations. Par contre, comparativement à l'emploi d'un signal aléatoire, la durée de test est assez longue (nécessité de réaliser plusieurs cycles pour le calcul de la fonction de cohérence). Finalement, les tests ont été réalisés comme suit (Fig. 3.7) :

- Un balayage harmonique en mode point à point au moyen de sinus pour les basses fréquences (< 1 Hz) ;
- Un balayage continu en sinus pour les fréquences comprises entre 1 et 10 Hz ;
- L'injection d'un signal aléatoire ayant un contenu spectral [10 Hz ; 100 Hz].

La génération du signal d'excitation aléatoire a été effectuée à l'aide d'un logiciel spécifique qui nécessite uniquement l'entrée de quelques paramètres (ex : niveaux d'accélération désiré).

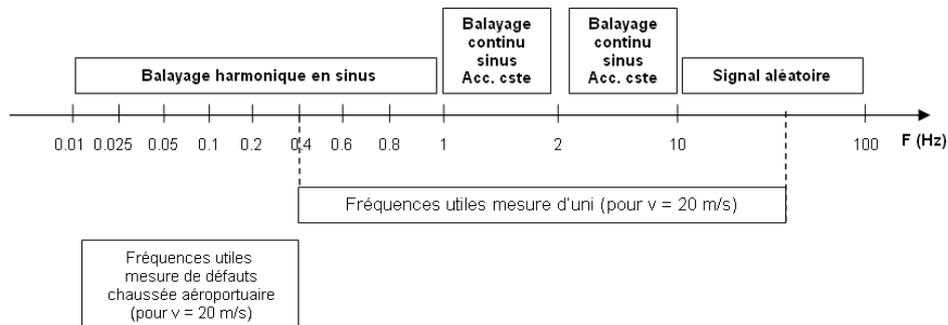


Figure 3.7 : Programme de tests pour l'établissement de la fonction de transfert des accéléromètres

• Simulation de défauts d'uni

Dans cette partie du programme de tests, nous avons sollicité les capteurs (accéléromètres et capteurs de distance optiques) avec des signaux d'excitation ressemblants le plus possible à des défauts d'uni (en amplitude et en gamme de fréquences). Le capteur optique, positionné à l'aplomb de la table vibrante, mesure en permanence les distances qui le sépare de cette dernière de la même manière que pointé vers la surface de la chaussée, il

¹ Les amplitudes des signaux d'excitation doivent respecter la longueur de course maximale du vérin de la table vibrante (± 5 cm).

mesurerait la distance caisse-chaussée (conformément à la méthode Spangler). La création d'un signal « route » est assez complexe à réaliser car les propriétés de ce signal doivent à la fois être ajustées par rapport aux défauts de chaussées que l'on veut reproduire et tenir compte des limitations mécaniques de la table vibrante (Fig. 3.8). Pour cette opération et sans trop rentrer dans les détails, nous précisons simplement que nous avons suivi le protocole suivant :

- On élabore une densité spectrale de puissance dont l'allure suit un niveau d'atténuation défini par l'expérimentateur (ex : 6 dB par octave) ;
- Suite au calcul de la transformée de Fourier inverse (passage du domaine fréquentiel au domaine temporel), on obtient un signal d'élévation de chaussée en fonction d'une base de temps ;
- Après avoir fixé une vitesse d'avancement du véhicule fictive, on génère un signal d'élévation (conversion des accélérations en valeurs de déplacement) en fonction d'une abscisse spatiale.
- On détermine le niveau de gravité des défauts simulés dans le référentiel NBO suite au traitement du signal obtenu avec le logiciel APL2000.

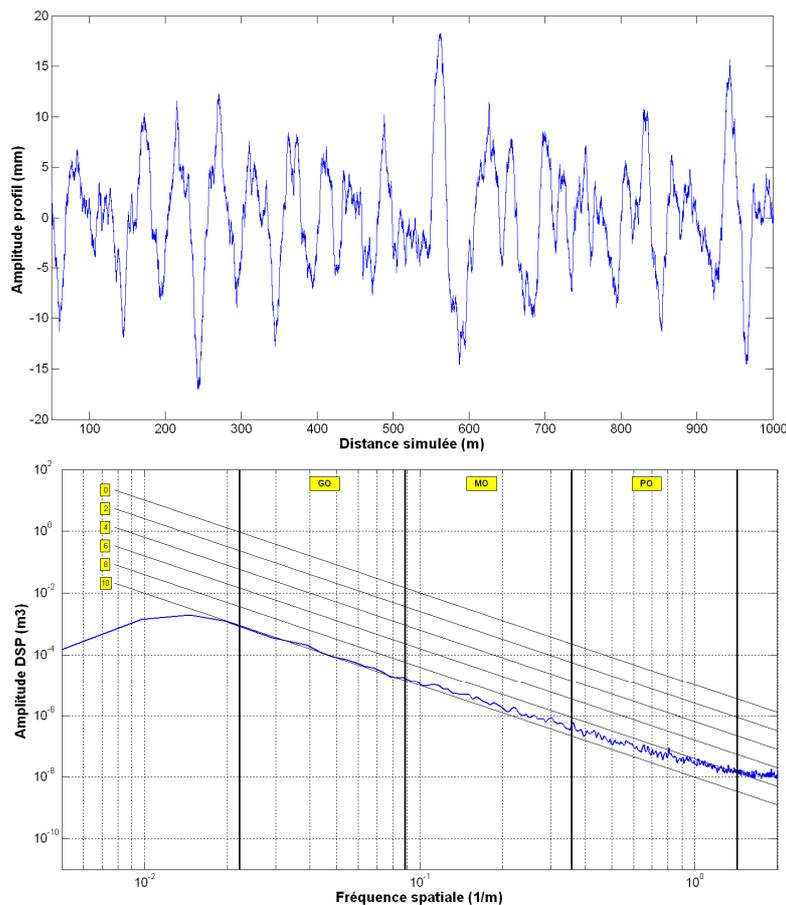


Figure 3.8 : Exemple de signal « profil de route » simulé et sa DSP associée (les notes par bandes d'ondes sont indiquées par les lignes obliques)

Grâce au choix des valeurs du coefficient d'atténuation, il est possible de reproduire différents niveaux de gravité mais essentiellement dans la bande PO (la course du vérin n'étant que de quelques centimètres, elle ne permet pas de générer des défauts significatifs dans la bande MO et encore moins dans la bande GO).

Pour chaque série de test, les accéléromètres ont été solidement fixés au centre de la table vibrante pour éviter toute vibration parasite. Le capteur optique, quant à lui, était positionné de façon statique au-dessus de la table vibrante, son spot lumineux pointant vers la surface du plateau (Fig. 3.9). L'enregistrement des signaux a été assuré à l'aide des moyens d'acquisition dédiés au banc de vibration.

Enfin, afin de se positionner dans les meilleures conditions d'exploitation des signaux, la durée de sollicitation et la fréquence d'échantillonnage ont été judicieusement déterminés (ex : $F_s > 400$ Hz pour l'étude des signaux « route »).

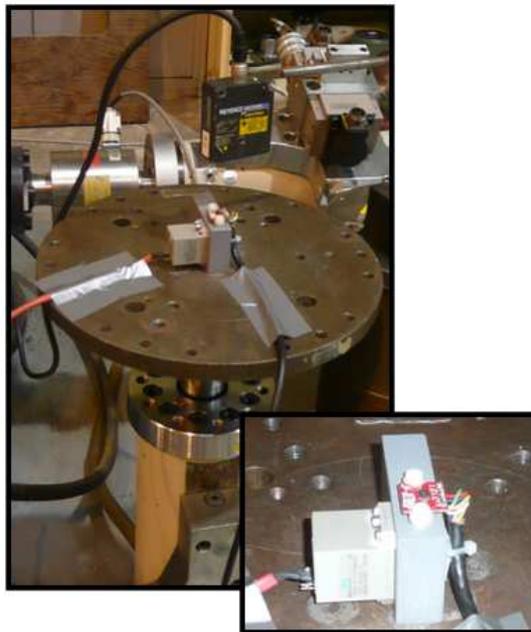


Figure 3.9 : Photographies du montage expérimental montrant le positionnement des capteurs sur la table vibrante

D – Résultats expérimentaux

Les résultats des essais sont présentés selon l'ordre établi dans le protocole expérimental (Cf. partie C). Dans un premier temps, ils concernent la vérification de certaines propriétés des accéléromètres comme le facteur de sensibilité avant d'analyser, dans un second temps, leur fonction de transfert et leur réponse face aux signaux d'excitation de type défauts d'uni.

• Recherche du coefficient de sensibilité des accéléromètres bas-coût

Le facteur de sensibilité des accéléromètres ADXL doit être recherché parmi un intervalle de valeurs spécifié dans la documentation technique. Ce coefficient est primordial car il permet de convertir les valeurs de tension électrique en sortie du capteur (Volts) en information d'accélération (m/s^2 ou g).

Pour le déterminer, il faut injecter un signal d'excitation (ex : balayage de fréquence, bruit blanc) et calculer le module de la fonction de transfert entre les signaux de sortie électrique bruts (en Volts) de l'accéléromètre bas-coût et de l'accéléromètre de précision. Connaissant le facteur de sensibilité de ce dernier (mentionné dans le certificat d'étalonnage), il est alors possible de trouver la valeur recherchée. Les résultats sont illustrés ci-après (Fig. 3.10) pour le cas de l'accéléromètre ADXL335.

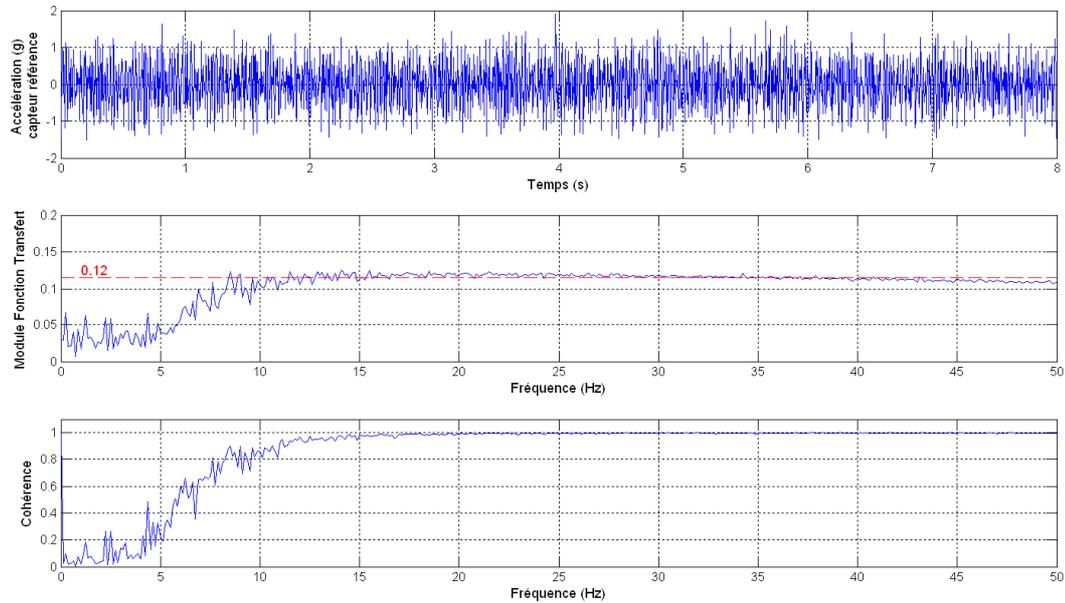


Figure 3.10 : Caractéristiques des signaux pour déterminer le coefficient de sensibilité de l'accéléromètre ADXL335

L'observation du module de la fonction de transfert indique qu'il existe un ratio de valeur 0.12 entre le signal brut de l'ADXL335 et celui du capteur de référence pour la gamme de fréquences où la fonction de cohérence est égale à 1 (*i.e.* pour les fréquences supérieures à 15 Hz dans cette expérience). Le coefficient de sensibilité de l'accéléromètre de référence étant de 2.499 V/g, celui de l'accéléromètre bas-coût est donc de 0.12×2.499 soit environ 300 mV/g pour toute la plage de fréquences observables. Or, cette valeur correspond exactement au facteur typique de sensibilité quand le capteur est alimenté à la tension nominale (3 V) d'après les indications techniques du constructeur. Une démarche similaire indique que le coefficient de sensibilité de l'ADXL326 vaut approximativement 57 mV/g. Ces deux valeurs ont donc été retenues pour la suite de l'étude.

Cette expérience permet de vérifier que les données du fabricant sont exactes (malgré l'absence de certificat) sur une plage de fréquences relativement large et souligne l'importance d'alimenter le capteur à sa tension nominale. En effet, la **tension de sortie** des **accéléromètres** de la série ADXL est de nature **ratimétrique** c'est-à-dire qu'elle change en fonction de la tension d'alimentation. Ainsi, si l'on change la tension d'alimentation du capteur en la faisant passer de 3 à 3.6 V, le facteur de sensibilité ne sera plus de 300 mV/g mais plutôt proche de 330 mV/g. À l'inverse, une tension d'alimentation plus faible contribuera à abaisser le coefficient en question. Pour s'en convaincre et pour déterminer cette variation, des tests en statique consistant à poser le capteur à plat sur une de ses faces peuvent suffire. Cette constatation est essentielle pour notre application car elle suggère de

disposer d'une tension d'alimentation strictement stabilisée à une certaine valeur quand le capteur sera embarqué dans un véhicule. Si tel n'était pas le cas, l'imprécision du capteur s'en trouverait augmentée et s'ajouterait à celle découlant de l'incertitude portant *de facto* sur la valeur du facteur de sensibilité à la tension d'alimentation nominale (Fig. 3.11).

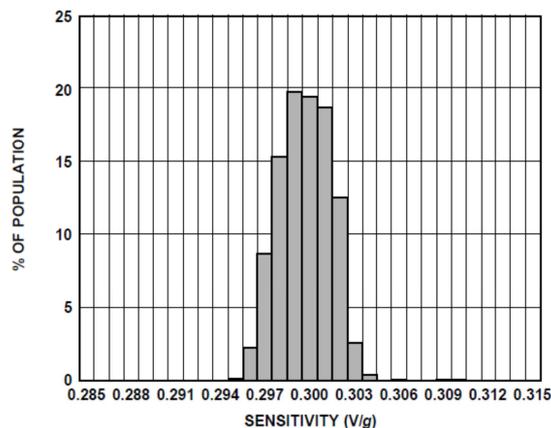


Figure 3.11 : Variation des coefficients de sensibilité (en %) pour 1 000 capteurs ADXL335 testés avec $V_s = 3\text{ V}$ (source Analog Devices)

• Établissement de la fonction de transfert

Comme décrit dans le protocole expérimental, la fonction de transfert entre les sorties en m/s^2 des deux accéléromètres (obtenues en appliquant le coefficient de sensibilité déterminé à l'étape précédente) a été construite par morceaux le long de la gamme de fréquences étudiée (de 0.1 à 100 Hz).

- Étude aux basses fréquences (de 0.1 à 1 Hz)

Les accéléromètres ont été soumis à des signaux d'excitation sinusoïdaux aux fréquences successives 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 et 1 Hz. Pour chacun de ces signaux, le module et la phase des fonctions de transfert ont été calculés à la fréquence du sinus. Les résultats de ces tests sont regroupés dans le tableau 3.4.

Fréquence sinus (Hz)		0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1
Module	ADXL335 / Référence	1.01	X*	1.02	1.01	1.00	1.00
	ADXL326 / Référence	X**	0.82	1.01	1.00	1.00	1.00
Phase (deg)	ADXL335 / Référence	0.1	X	0.1	0.0	0.0	0.0
	ADXL326 / Référence	X	0.2	0.0	0.1	0.0	0.0

Tableau 3.4 : Caractéristiques des fonctions de transfert - essais basses fréquences

* Pas de données expérimentales à cette fréquence pour ce capteur

** Cohérence trop faible pour analyser la fonction de transfert

De façon générale, les accéléromètres bas-coût répondent très correctement par rapport à l'accéléromètre de référence c'est-à-dire de façon linéaire et sans déphasage. Pourtant, à ces fréquences, les accélérations générées sont extrêmement faibles (quelques milli-g) et donc beaucoup plus difficiles à mesurer. Néanmoins, grâce à ces tests, on remarque que l'ADXL326 atteint ses limites puisqu'à partir de 0.2 Hz, ses performances se dégradent (signal fortement bruité et baisse de linéarité) comme le montre les graphiques suivants (Fig. 3.12).

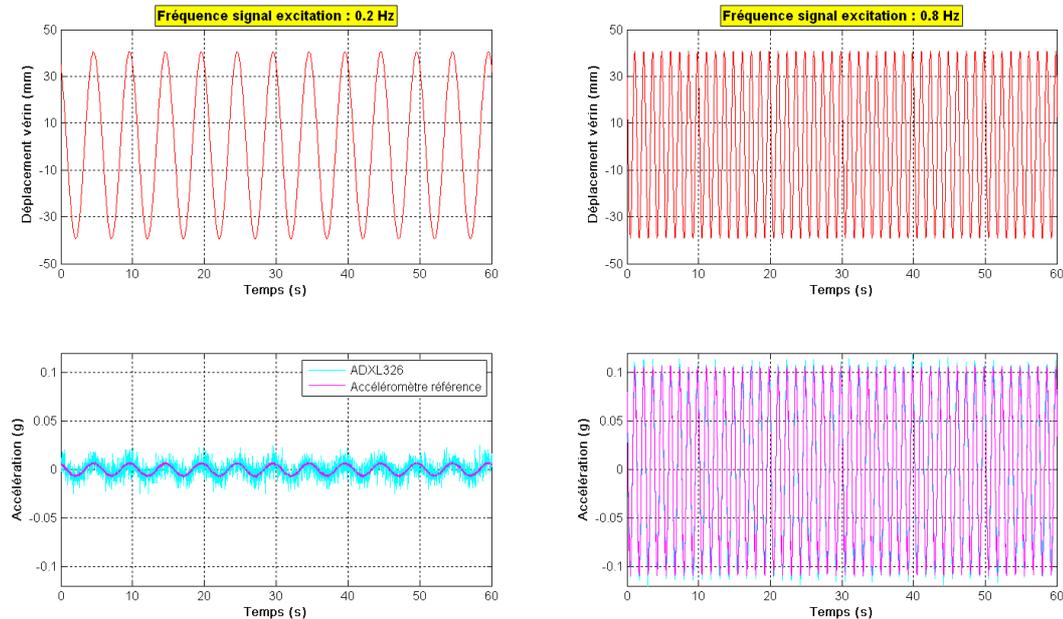


Figure 3.12 : Signaux captés par l'accéléromètre ADXL face à une sollicitation sinusoïdale de 0.2 Hz et 0.8 Hz (visualisation des limites de restitution de l'ADXL326)

L'accéléromètre ADXL335, quant à lui, répond encore très bien à 0.1 Hz. Afin de cerner un peu plus précisément ses limites de fonctionnement, une exploration vers des fréquences encore plus basses a été effectuée. Cette expérience a alors révélé qu'à une fréquence de 0.05 Hz, l'ADXL335 n'était plus capable de restituer l'information de déplacement. Son seuil de réponse spectrale est donc compris entre 0.1 et 0.05 Hz ce qui est déjà en soit très remarquable pour un capteur supposé de faible qualité.

- Étude aux moyennes fréquences (de 1 à 10 Hz)

Pour cette série de tests, des balayages en sinus à changement de fréquences continu et à accélération constante ont été appliqués sur la table vibrante. Afin de profiter au maximum des possibilités de déplacement du vérin et d'avoir un aperçu très précis des réponses des capteurs dans la bande de fréquences correspondant à la dynamique verticale d'un véhicule, le balayage a été décomposé en deux plages : entre 1 et 2 Hz (plage de fréquences correspondant aux oscillations de la masse suspendue d'un véhicule) puis entre 2 et 10 Hz (plage de fréquences correspondant aux oscillations de la masse non-suspendue d'un véhicule).

Le signal d'excitation et le comportement des capteurs sont illustrés à travers les tracés suivants (Fig. 3.13 et 3.14) :

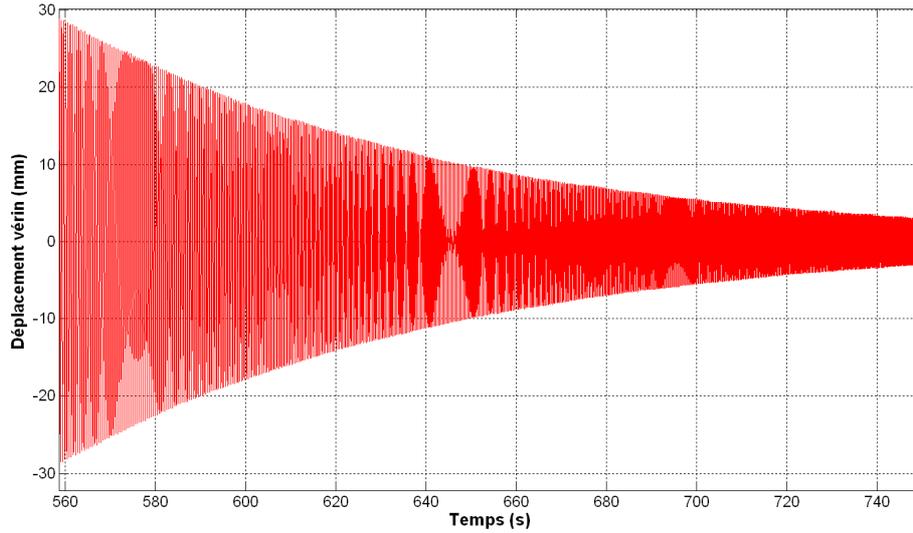


Figure 3.13 : Signal d'excitation correspondant au balayage continu en sinus

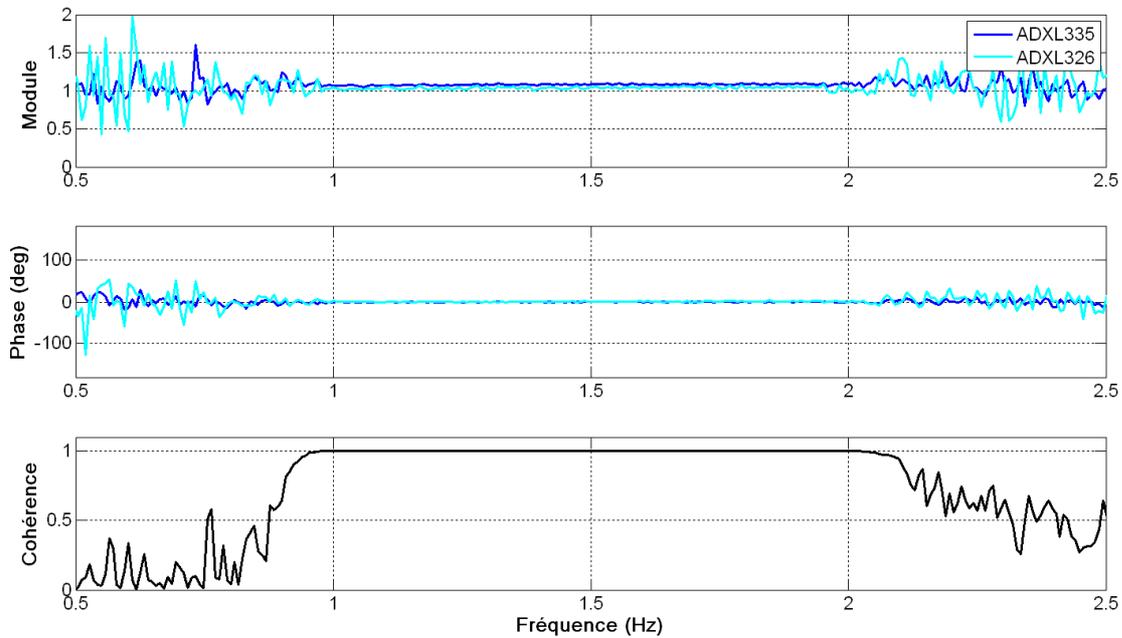


Figure 3.14 : Fonctions de transfert et de cohérence des capteurs bas-coût par rapport au capteur de référence sur la plage [1 Hz ; 2 Hz]

Sur la gamme de fréquences excitées, les modules des fonctions de transfert des deux accéléromètres sont très proches de la valeur 1 et les déphasages observés sont quasiment nuls. Il n’y a donc aucun problème de comportement sur cet intervalle. Un travail similaire, réalisé entre 2 Hz et 10 Hz (ou plutôt 9 Hz d’après la fonction de cohérence), aboutit également aux mêmes conclusions (Fig. 3.15).

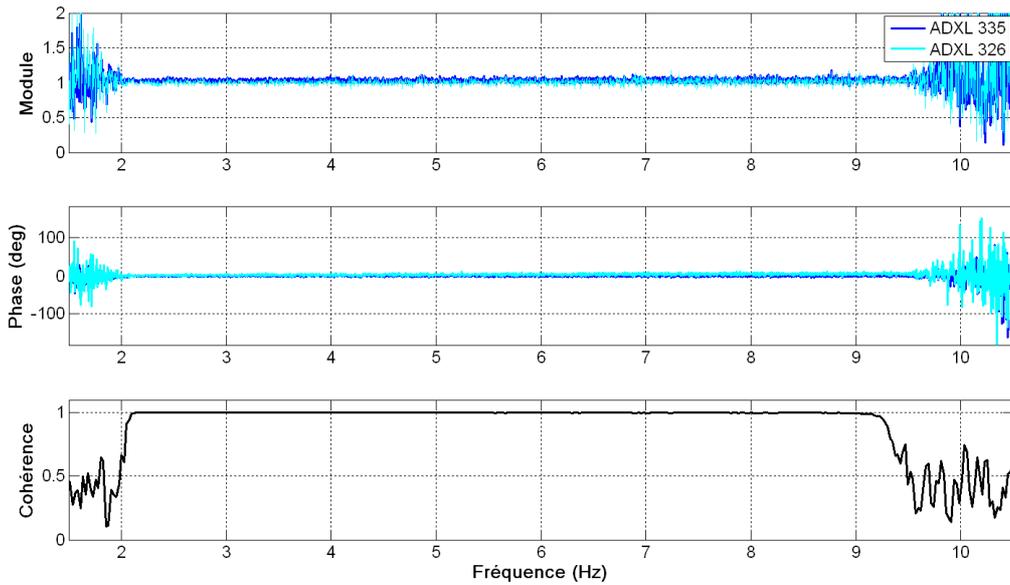


Figure 3.15 : Fonctions de transfert et de cohérence des capteurs bas-coût sur la plage [2 Hz ; 10 Hz]

- Étude aux fréquences supérieures (de 10 à 100 Hz)

Contrairement aux cas précédents, le signal d'excitation utilisé dans ces essais est un signal aléatoire conçu de manière à offrir un contenu spectral dans la bande [10 Hz ; 100 Hz].

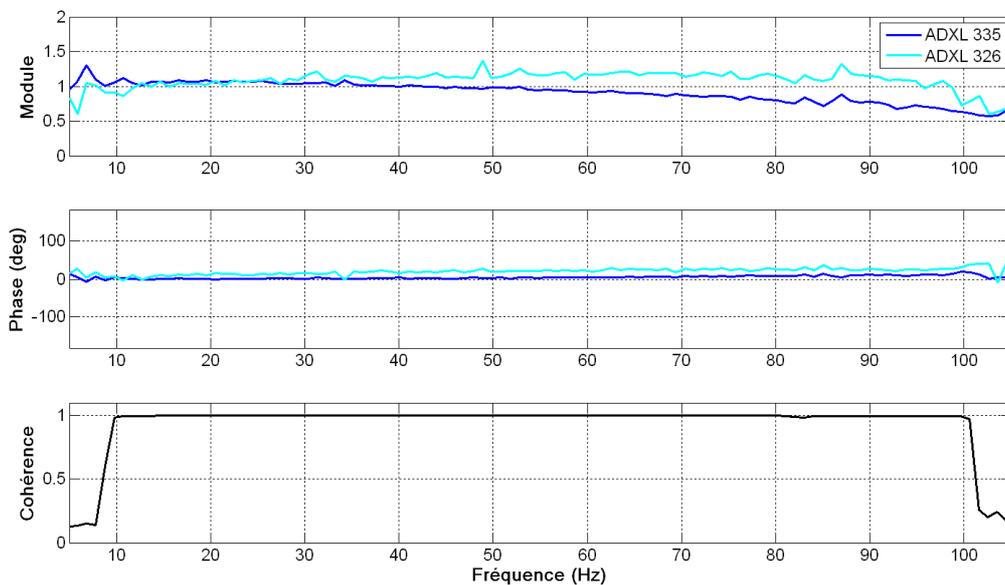


Figure 3.16 : Fonctions de transfert et de cohérence des capteurs bas-coût sur la plage [10 Hz ; 100 Hz]

Cette expérience permet de mettre en avant des comportements différents des capteurs sur cette plage de fréquences. L'examen des modules des fonctions de transfert révèle en effet plusieurs choses :

- Une baisse de linéarité continue de l'ADXL335 (le module passe de 1 pour 10 Hz à environ 0.6 pour 100 Hz) ;
- Un module stable mais légèrement surcoté (entre 1.1 et 1.2) pour l'ADXL326.

• Réponse à une excitation de type « défauts d'uni »

A priori, compte-tenu de la qualité de la fonction de transfert des accéléromètres, on s'attend à ce que ceux-ci répondent très correctement face à des signaux d'excitation balayant approximativement la bande de fréquences [0.4 Hz ; 30 Hz]. En parallèle, on rappelle que l'on cherche également à évaluer les performances du capteur de distance optique sur cette série de tests.

L'analyse des résultats est effectuée à travers une approche opérationnelle, c'est-à-dire en utilisant les indicateurs usuels de quantification des défauts d'uni (DSP et notation par bandes d'ondes des profils restitués). Ce mode d'observation présente les résultats par rapport à une échelle de fréquences spatiales comme cela a été précisé dans le protocole expérimental (Cf. partie C). Dans ces essais, nous avons considéré une vitesse d'avancement du véhicule fictive de 20 m/s ce qui signifie que la gamme de fréquences [0.4 Hz ; 30 Hz] correspond aux fréquences spatiales [0.02 m⁻¹ ; 1.5 m⁻¹] et donc à la plage de longueurs d'ondes [0.7 m ; 50 m].

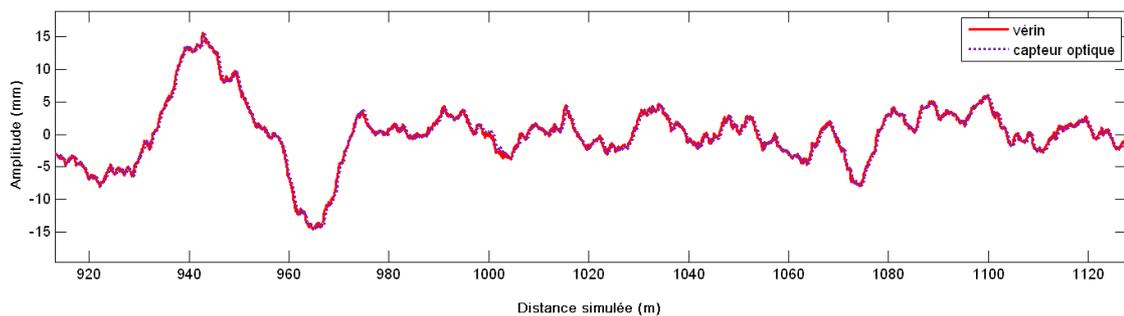


Figure 3.17 : Exemple de signaux correspondant à la reproduction de défauts d'uni (signaux issus du capteur servant à l'asservissement du vérin et du capteur optique)

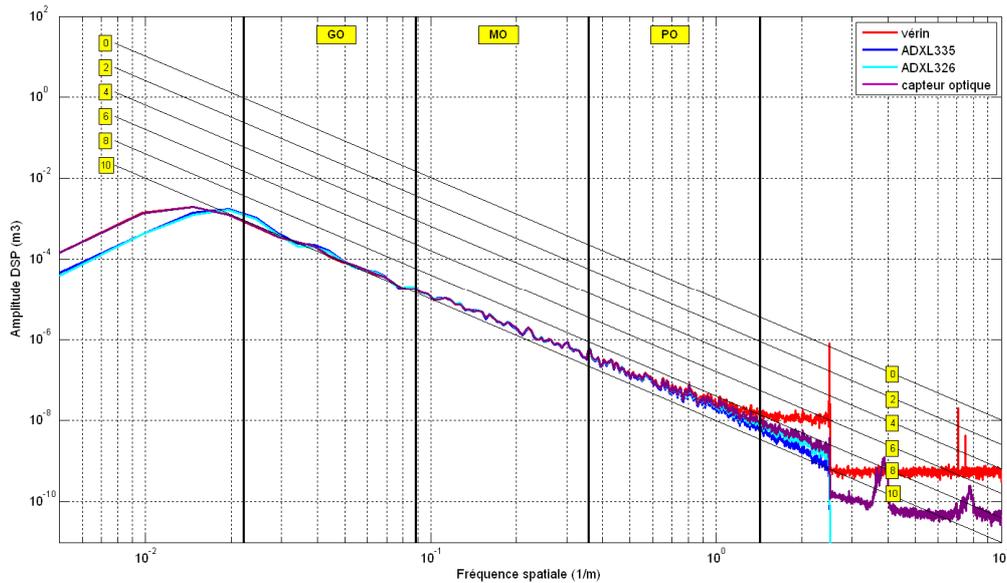


Figure 3.18 : Densité spectrale de puissance des profils issus des différents capteurs à partir d'un signal d'excitation de type « route » (en oblique, les niveaux d'énergie correspondant à la NBO)

L'examen des figures précédentes montre, de façon globale, que les réponses des capteurs bas-coût (accéléromètres et capteur optique) sont semblables au signal référence (capteur monté sur le vérin) sur les trois gammes d'uni GO, MO et PO. La réponse du capteur optique est celle qui se rapproche le plus du signal vérin sur l'ensemble de la plage de fréquences testées. Les réponses des accéléromètres sont légèrement différentes à la limite de la bande GO mais cela est en partie lié aux effets des filtres numériques utilisés dans l'opération de conversion des signaux d'accélération en signaux déplacement.

E – Bilan des essais sur table vibrante

Les essais réalisés sur la table vibrante ont permis de tester les capteurs bas-coût dans un environnement contrôlé avant que ces derniers ne soient intégrés et utilisés dans un environnement plus contraignant (embarqué dans un véhicule). Ces conditions expérimentales offrent l'avantage de pouvoir évaluer les performances métrologiques « pures » des capteurs et en particulier leurs réponses spectrales en régime dynamique. L'étude des fonctions de transfert des accéléromètres bas-coût a ainsi révélé qu'ils répondaient très correctement dans la bande de fréquences « utiles » pour la mesure d'uni c'est-à-dire entre approximativement 0.4 Hz et 30 Hz. Ces résultats ont été confirmés par les tests à partir de signaux route qui ont également mis en évidence les excellentes aptitudes du capteur optique de distance.

Cependant, d'autres aspects pouvant être influents dans le comportement des capteurs n'ont pas pu être explorés comme par exemple l'effet de la température ambiante (les spécifications techniques fournissent néanmoins quelques données à ce sujet). En outre, il aurait été aussi très intéressant de connaître le comportement de cette catégorie de capteurs sur le long terme voire d'estimer leur durée de vie. Malheureusement, le temps imparti à la thèse n'a pas permis de traiter toutes ces études techniques.

3.3 Utilisation d'un GPS pour évaluer la distance parcourue

Pour être traitée, l'information portant sur les défauts d'élévation de la chaussée doit être associée à une mesure de distance parcourue par le véhicule traceur le long de la route, appelée abscisse curviligne. Habituellement, pour obtenir ces données, on utilise un codeur de distance monté sur une des roues du véhicule supportant l'appareil d'auscultation (Cf. section 1.1.2). L'intérêt de ce genre de systèmes est leur capacité à délivrer un échantillonnage spatial très fin d'où leur présence systématique sur les appareils à grand rendement. Mais ces capteurs étant trop onéreux et donc incompatibles avec l'usage sur de multiples véhicules traceurs, nous nous sommes orientés vers l'utilisation de systèmes GPS (Fig. 3.19).



Figure 3.19 : Dispositif GPS à bas-coût utilisé pour l'étude

On rappelle très brièvement que le dispositif GPS permet de localiser un récepteur dans un référentiel donné au moyen de coordonnées géographiques. Ces coordonnées peuvent être recueillies en exploitant une série de messages (ex : trames NMEA) issues de la communication entre le récepteur et les satellites GPS. Pour les systèmes grand public, la cadence de fonctionnement est de 1 Hz ce qui signifie qu'un relevé de position est effectué toutes les secondes. En considérant donc qu'un véhicule avance à 20 m/s, l'intervalle de distance séparant deux positions successives sera de 20 m.

Dans la solution d'auscultation proposée, nous avons opté pour conserver une résolution spatiale de 5 cm car c'est celle qui est réclamée dans la méthode de notation par bandes d'ondes. Ce choix implique de ré-échantillonner, au pas de 5 cm, le segment de distance issu du relevé de deux positions successives par une opération d'interpolation. Pour cela, on fait donc l'hypothèse que la vitesse du véhicule reste constante entre deux relevés (durée d'une seconde). Bien évidemment, la puissance de cette méthode est conditionnée par la précision des relevés GPS : plus la précision des positions sera juste, plus la distance parcourue entre les deux relevés le sera et plus on s'approchera du niveau de performance d'un codeur de roue. Cela signifie que, pour mettre toutes les chances de leur côté, les véhicules traceurs doivent évoluer dans un environnement très peu masqué comme sur des réseaux non-urbains ou périurbains.

Actuellement, on trouve sur le marché des récepteur GPS à sortie USB très peu coûteux (moins de 100 euros) et très compacts. La plupart du temps, ceux-ci fonctionnent en mode dit « naturel » c'est-à-dire sans moyen de bénéficier de corrections différentielles. Mais certains produits, plus rares, sont capables de recevoir et d'utiliser ces corrections

(WAAS/EGNOS) et améliorer ainsi la précision de leurs relevés (il est alors possible d'atteindre une précision submétrique).

3.4 Comparaison des trois méthodes de mesures de l'uni

A – Rappel sur les méthodes envisageables pour relever l'uni des chaussées au moyen de véhicules traceurs

Nous avons vu, à travers l'état de l'art et l'étude de performances des capteurs, qu'il existait plusieurs méthodes de mesure possibles pour détecter, avec plus ou moins de sensibilité et de précision, les défauts d'uni de chaussées au moyen d'un véhicule traceur. À chacune de ces méthodes correspond des performances métrologiques et des propriétés d'instrumentation différentes :

▪ Méthode Spangler

Cette méthode délivre une information de profil très riche pouvant couvrir l'intégralité de la bande spectrale correspondant à l'uni longitudinal des chaussées. Cependant, il s'agit aussi de la méthode qui est la plus complexe d'un point de vue instrumental car elle nécessite la pose et la synchronisation de deux capteurs distincts (en plus du GPS) : un accéléromètre et un capteur de distance optique disposé sur la caisse du véhicule. En outre, de par les propriétés du capteur optique, les conditions de fonctionnement sont parfois restreintes (mesures déconseillées par temps lumineux et par temps de pluie).

▪ Exploitation des mouvements de roue

Avec cette méthode, l'information est moins riche qu'avec la méthode de Spangler notamment parce que le pouvoir de détection spectral est amputé des fréquences amorties ou totalement filtrées par les pneumatiques (une partie de la bande PO). Elle nécessite uniquement l'usage d'un accéléromètre mais avec la contrainte de disposer ce dernier sur la roue (le porte-fusée est l'endroit le plus approprié). C'est une tâche qui n'est pas très aisée mais acceptable dans la mesure où le capteur sera monté à demeure. Par comparaison avec la méthode précédente, les mesures peuvent être réalisées par tout temps et sans conditions de surface.

Enfin, à l'instar de la méthode de Spangler, cette solution s'accommode tout à fait bien avec l'indicateur NBO ce qui facilite, de fait, l'interprétation des mesures.

▪ Exploitation des mouvements de l'habitacle

Il s'agit de la méthode offrant le plus de facilité pour l'intégration du capteur. En effet, l'accéléromètre peut être aisément fixé dans l'habitacle voire même faire l'objet d'un système de montage/démontage à chaque utilisation. En contrepartie, l'information recueillie est la plus pauvre car une bonne partie des vibrations générées par les défauts de la chaussée sont successivement absorbées par les pneumatiques et les suspensions du véhicule. Etant donné la plage de fréquences couvertes par cette prise d'information, l'utilisation ou la création d'indicateurs autres que ceux utilisés traditionnellement en France serait souhaitable.

B – Comparaison des méthodes et choix final

Pour bien visualiser la richesse d'informations entre ces trois solutions, nous avons intégré l'ensemble des instruments de mesures nécessaires à chaque méthode dans un même véhicule et nous avons recueilli les données des capteurs de façon synchrone sur un parcours de plusieurs kilomètres. Les résultats de ces essais, illustrés sur la figure suivante (Fig. 3.20), sont reportés sous forme de DSP. Dans cette représentation, la richesse des informations recueillies s'exprime à travers les niveaux de puissance associés aux défauts d'uni. Nous constatons ainsi que, sur cette figure, la DSP correspondant aux mesures prélevées dans l'habitacle « décroche » des autres tracés à partir des fréquences délimitant la bande MO de la bande GO. Par comparaison avec la courbe associée à méthode de Spangler (méthode la plus riche), la DSP correspondant aux mesures prélevées sur la roue du véhicule restituée, quant à elle, pratiquement tous les défauts d'uni exceptés ceux pour relevant des très faibles longueurs d'ondes (partie basse de la bande PO).

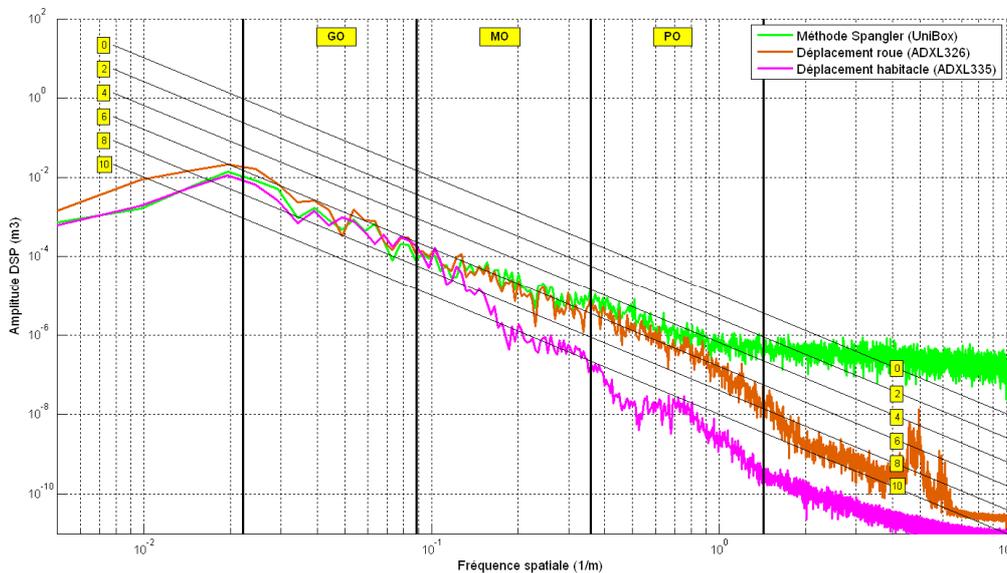


Figure 3.20 : DSP des profils issus de trois méthodes de prises d'informations différentes

Compte-tenu des avantages et inconvénients de chacune des méthodes décrites précédemment, nous avons opté pour celle basée sur **l'utilisation d'un accéléromètre placé sur la roue du véhicule traceur** car elle offre le meilleur compromis entre richesse d'information et facilité d'instrumentation¹.

C - Exploitation des mesures obtenues par la méthode retenue

Le capteur de roue délivre des données accélérométriques qu'il faut d'abord convertir en une grandeur de déplacement avant de pouvoir être exploitées. Ce traitement s'exécute en deux temps :

¹ Devant l'intérêt que représentent les deux autres méthodes, l'IFSTTAR a décidé d'exploiter leur potentiel à travers un projet de développement (prototype UniBox) et un projet de recherche interne nommé MIRANDA (Mesures d'Informations Routières par Appareils Nomades d'Auscultation) utilisant des smartphones comme moyens de recueil.

- double intégration des signaux d'accélération ;
- filtrage de la composante continue générée par les intégrations successives.

Bien qu'anodine au premier abord, cette opération est délicate car, très souvent, selon la nature et les caractéristiques des filtres choisis, les profils obtenus peuvent être significativement différents. Pour notre part, nous nous sommes inspirés des méthodes préconisées dans différents ouvrages scientifiques [26] pour développer nos algorithmes de reconstruction de profils. La mise au point et la validation de ces derniers ont, quant à elles, été effectuées à partir d'études comparatives avec les éléments de sortie du module de conversion du fabricant du MLPL (module « boîte noire »). Une fois le signal déplacement obtenu, ce dernier est associé à l'information de distance parcourue pour constituer *in fine* le pseudo-profil de la route.

Enfin, **l'information finale qui décrit le niveau d'uni** de la chaussée résulte de l'application de la méthode de notation par bandes d'ondes. L'information **se présente donc sous la forme d'une note allant de 0 à 10 avec une résolution de 0.5 point pour les bandes PO, MO et GO**. La décision de travailler à partir de cet indicateur est motivé par plusieurs facteurs :

- Le profil restitué à partir des mouvements est suffisamment complet pour être analysé selon les trois bandes d'ondes. Seuls les défauts de faibles longueurs d'ondes seront difficilement restitués.
- La notation par bandes d'ondes étant l'indicateur de référence en France, il sera alors possible de comparer les résultats avec ceux issus des appareils à grand rendement et d'avoir, en outre, une vision directe de la portée opérationnelle de la solution d'auscultation proposée.

Le processus de traitement conduisant à l'obtention de l'indicateur final est illustré au moyen du schéma ci-après (Fig. 3.21).

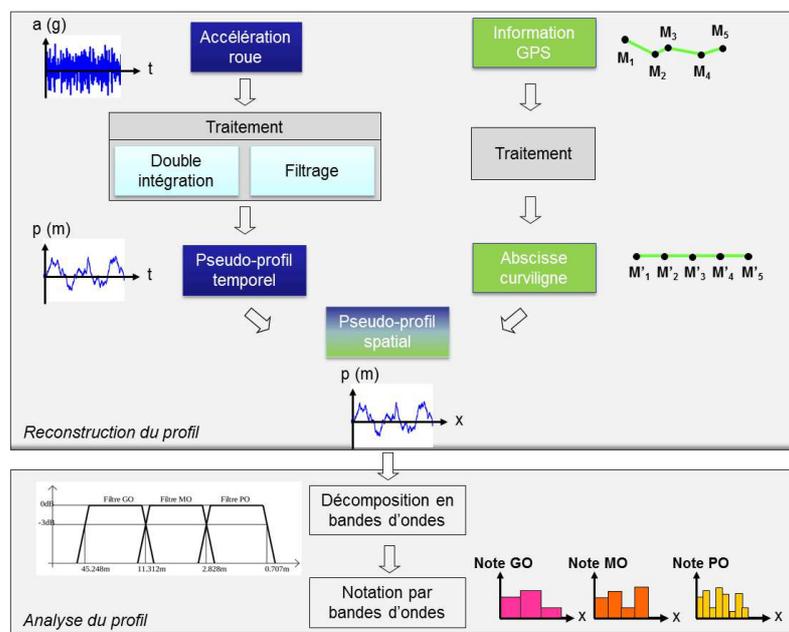


Figure 3.21 : Schéma présentant le processus de traitement des données recueillies par le véhicule traceur

3.5 Conclusion sur la structure du système de mesure

Dans la structure proposée, le véhicule traceur est équipé d'un accéléromètre de roue et d'un GPS (Fig. 3.22). L'hypothèse retenue au chapitre précédent étant que le système devait mesurer l'uni dans la bande de roulement de droite, l'accéléromètre a été positionné à droite du véhicule et à l'arrière de celui-ci pour s'éloigner des perturbations mécaniques et électromagnétiques engendrées par le bloc moteur. Les données délivrées par ces capteurs (accéléromètre et GPS) sont acheminées vers un PC muni d'une carte d'acquisition également de bas-coût (autour de 200 euros). L'ensemble est piloté par une solution logicielle propre à l'IFSTTAR appelée logiciel GSR (Gestion Simplifiée des Routes). Une fois le parcours terminé, les données enregistrées dans le PC de mesure peuvent être immédiatement traitées au moyen de ce même logiciel. Celui-ci génère quatre fichiers distincts :

- Un fichier contenant le profil de la chaussée en fonction d'une échelle spatiale ;
- Trois fichiers, issus du traitement du fichier précédent, renfermant les notes des bandes PO, MO et GO.

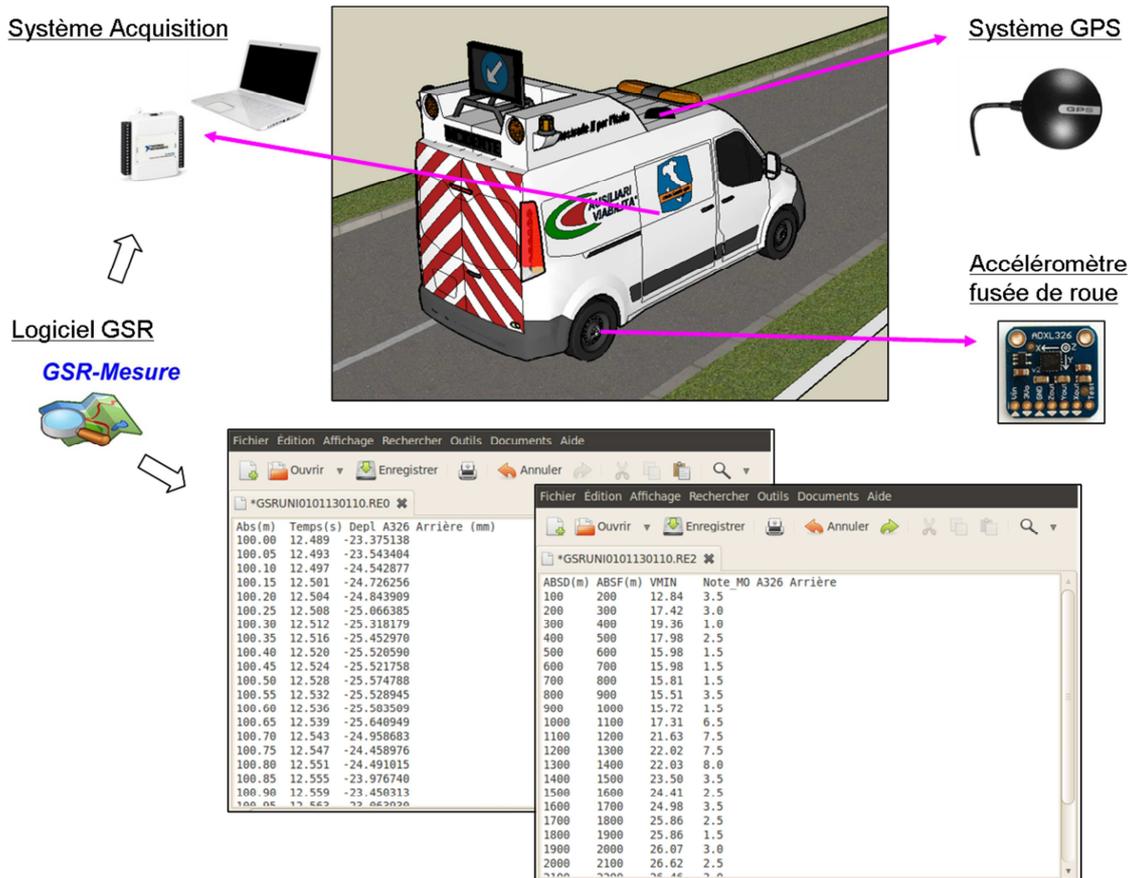


Figure 3.22 : Schéma illustrant la chaîne de mesure et de traitement à bord du véhicule traceur

Note : La chaîne de mesures développée dans cette thèse a pour seule ambition d'assurer le recueil d'informations à un stade expérimental. Il est clair que celle-ci ne convient pas, en l'état, à un stade opérationnel.

Chapitre 4

Variabilité des notes d’uni dans la solution d’auscultation proposée

SOMMAIRE

4.1 Identification et description des facteurs de variabilité	76
4.2 Description et propriétés du circuit-test	79
4.3 Estimation des variations des notes d’uni.....	81
4.3.1 Estimation de l’erreur provenant de l’accéléromètre.....	82
4.3.2 Estimation de l’erreur liée à l’information de distance.....	84
4.3.3 Estimation de l’erreur de trace.....	88
4.3.4 Estimation de l’erreur de vitesse.....	90
4.3.5 Estimation de l’erreur liée à la dynamique du véhicule	92
4.4 Synthèse sur les facteurs de variabilité des notes d’uni	94

La solution d’auscultation retenue dans cette étude entre dans une nouvelle stratégie de recueil d’informations dont il faut connaître et maîtriser les performances métrologiques. L’usage combiné d’une instrumentation bas-coût et de véhicules traceurs induit en effet un certain niveau de variabilité des mesures dans la prise d’information. Ayant choisi de travailler avec l’indicateur NBO, cette variabilité se traduit par des notes d’uni différentes alors qu’elles portent sur un même échantillon, ici sur une même section de route.

L’objectif de ce quatrième chapitre est de présenter les principaux facteurs responsables de ces variations et de quantifier leurs effets dans le référentiel de l’indicateur final à savoir la notation par bandes d’ondes. Par ce travail réalisé expérimentalement au moyen de passages de plusieurs véhicules traceurs sur un itinéraire-test, nous avons donc cherché à approximer le niveau global d’imprécision de la solution d’auscultation imputable à la phase de prise d’informations.

4.1 Identification et description des facteurs de variabilité

L'une des principales caractéristiques de la solution d'auscultation proposée dans cette thèse est l'obtention de données en abondance grâce à des relevés fréquents effectués par un nombre significatif de véhicules traceurs. Mais, de par les propriétés liées à l'usage des véhicules traceurs et de leurs capteurs, les informations collectées sont susceptibles d'être, à chaque passage, différentes les unes des autres. Au moins cinq facteurs peuvent expliquer ces variations :

- Différence de réponse d'un même accéléromètre ou d'un accéléromètre à un autre ;
- Échelle de distance parcourue (abscisse curviligne et découpage en segments) différente ;
- Erreur de trace (i.e. légère variation de position transversale des mesures entre deux passages) ;
- Effet de la vitesse de passage ;
- Propriétés dynamiques du véhicule.

Cette liste de facteurs n'a pas la prétention d'être exhaustive mais elle rassemble probablement ceux qui ont le plus d'influence dans des conditions normales de fonctionnement (on exclut pour le moment les cas liés à des situations extrêmes comme une panne totale de capteur). Chacun de ces facteurs est, par la suite, présenté dans le détail.

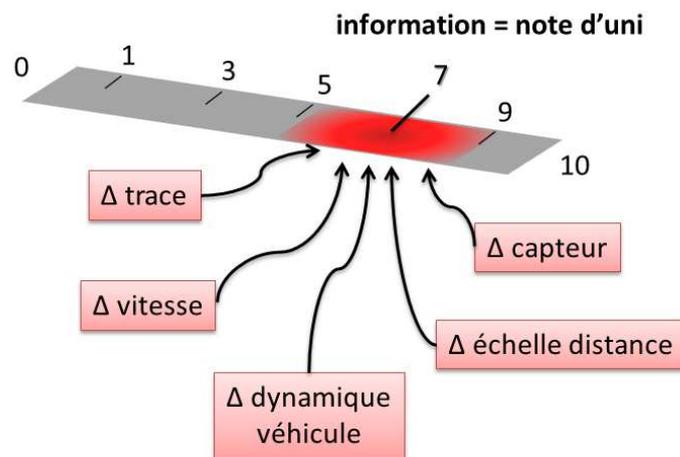


Figure 4.1 : Principales sources d'erreurs de mesures dans la solution d'auscultation

• Facteur lié à la réponse du capteur d'accélération

La réponse d'un capteur est très souvent entachée d'une erreur qui peut être systématique ou aléatoire. Celle-ci peut être liée au niveau de précision du capteur proprement dit mais peut également provenir de conditions d'utilisation changeantes (température, humidité, etc.). Les accéléromètres bas-coût n'échappent évidemment pas à cette règle et présentent donc un certain nombre de facteurs d'erreur intrinsèques.

Les principales sources d’erreurs recensées dans la documentation fournie par le constructeur des accéléromètres ADXL sont les suivantes (Fig. 4.2) :

▪ Erreur du « décalage en zéro » (biais)

Les accéléromètres ADXL possèdent des « erreurs en zéro » ou « offset ». La réponse du capteur n’est donc pas une fonction linéaire mais affine.

▪ Erreur d’échelle ou de gain

Cette erreur est due à un coefficient de sensibilité inexact. Dans le cas des accéléromètres de la série ADXL, cette erreur est accentuée par le caractère variable du facteur de sensibilité. En effet, les spécifications techniques le situent dans un intervalle de valeurs et précisent, en outre, qu’il est susceptible de fluctuer selon la tension d’alimentation et la température ambiante.

▪ Erreur de linéarité

Elle correspond à des variations de la sensibilité sur l’étendue de mesure. Elle est souvent définie à partir de l’écartement maximal entre la réponse idéale du capteur (fonction linéaire) et sa réponse réelle.

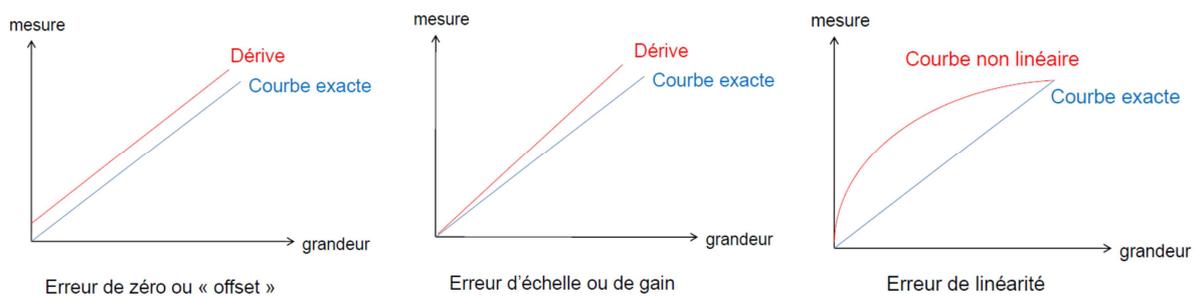


Figure 4.2 : Schémas illustrant les principaux types d'erreurs intrinsèques d'un accéléromètre

● **Facteur lié au niveau de précision de l’information de distance**

L’information de distance, et plus précisément l’abscisse curviligne, joue un rôle majeur dans le processus de calcul du profil puis dans l’attribution d’une note pour une longueur de section donnée (Fig. 4.3).

Dans la méthode d’auscultation usuelle, l’abscisse curviligne est calculée à partir des mesures issues d’un codeur de roue ; les relevés de distance sont alors obtenus de manière précise et fréquente. Dans la méthode des véhicules traceurs, cette même information est construite à partir des relevés de positions d’un GPS bas-coût. Compte-tenu du niveau de précision des systèmes GPS en mode naturel (sans corrections différentielles) et du cadencement maximal (1 Hz), on s’attend donc à ce que l’abscisse curviligne ne soit pas exacte.

Par ailleurs, la qualité des informations GPS n’est pas la seule source d’imprécision dans l’obtention de l’échelle de distance. Si deux sessions de mesures ne sont pas déclenchées exactement au même endroit alors les informations de distance ont toutes les chances d’être spatialement décalées.

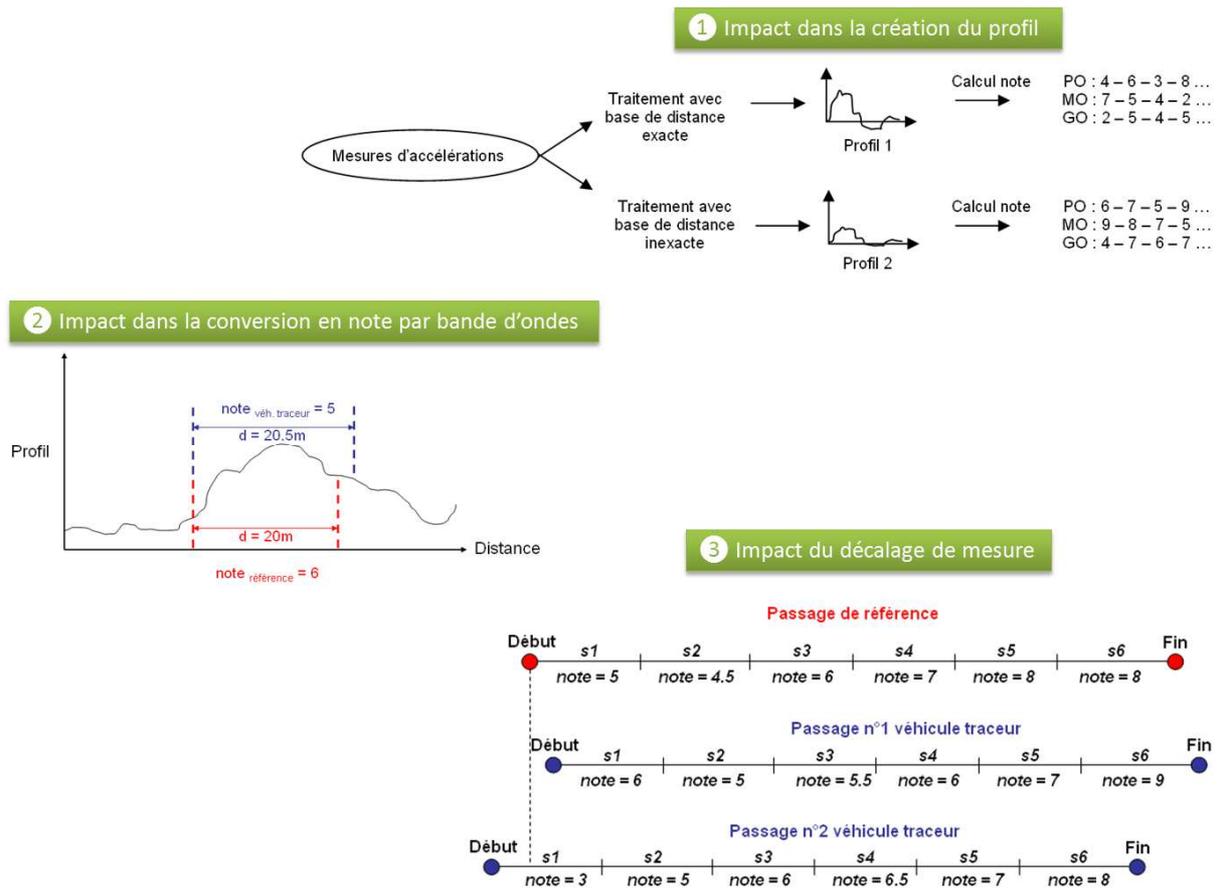


Figure 4.3 : Schéma illustrant les répercussions des erreurs liées à l'information de distance

• Erreur de trace

Pour les mesures d’uni effectuées avec les appareils à grand rendement, un seul relevé est bien souvent requis. Dans notre application, la note d’uni va être calculée à partir d’une multitude de passages. Ainsi, d’un passage à un autre, même si l’on considère un seul et même véhicule et un conducteur unique, il est très peu probable que les mesures soient prélevées au même endroit sur la chaussée.

L’erreur dite « de trace » fait donc référence à la variabilité des trajectoires possibles des véhicules traceurs sur la voie de circulation. Plus précisément, dans notre étude, l’erreur de trace renvoie à la dispersion latérale des trajectoires de la roue droite du véhicule dans la bande de roulement.

• Facteur lié à la vitesse de passage

Selon la vitesse d’avancement, un même véhicule traceur sera amené à percevoir différemment un même défaut d’uni. En effet, pour un défaut de longueur d’onde donnée, deux vitesses de franchissement exciteront le véhicule traceur à deux fréquences distinctes. C’est notamment pour cette raison que certains appareils d’auscultation classiques fonctionnent uniquement avec une vitesse de passage fixe (ex : 72 km/h pour l’APL). Dans

notre solution d’auscultation, il ne sera pas possible de contrôler la vitesse d’avancement de chaque véhicule traceur d’où une probable variabilité de notes d’uni.

• Facteur lié à la dynamique verticale du véhicule

Deux véhicules traceurs équipés chacun d’une instrumentation similaire (réponses des capteurs identiques) et franchissant exactement le même défaut (erreur de trace nulle) à la même vitesse ne retourneront pas exactement la même information car leurs propriétés vibratoires intrinsèques seront différentes. Bien que soumis à un même signal d’excitation, deux véhicules n’auront pas la même réaction car leurs caractéristiques de suspension et de pneumatiques ne peuvent être rationnellement identiques.

Une fois identifié, chacun de ces facteurs a fait l’objet d’une investigation afin d’estimer leur impact dans la notation d’uni. Certaines d’entre elles étant basées sur les notions de répétabilité et/ou de reproductibilité, il était nécessaire de réaliser des essais sur un même itinéraire dont les spécificités sont mentionnées dans le paragraphe suivant.

4.2 Description et propriétés du circuit-test

Afin de déterminer le plus fidèlement possible les aptitudes métrologiques de la solution d’auscultation au moyen de véhicules traceurs, l’aspect expérimental a été privilégié dans ces travaux de thèse. Cette orientation nous a amené à instrumenter plusieurs véhicules traceurs et à effectuer une grande quantité de mesures sur un circuit-test. Ce dernier a été choisi de sorte d’être le plus représentatif possible des réseaux routiers visés et d’offrir un large spectre de défauts d’uni (Fig. 4.4).

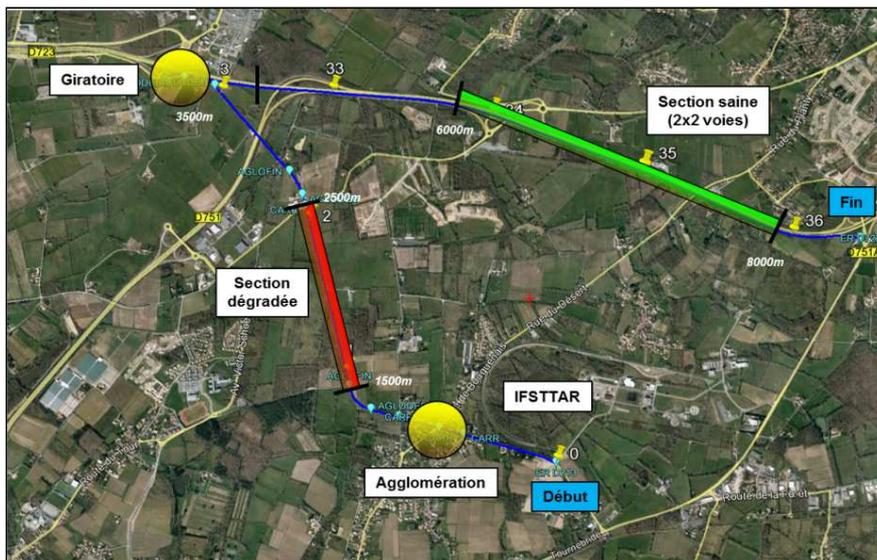


Figure 4.4 : Vue aérienne du circuit-test et représentation des sections particulières

Le circuit-test présente les attributs suivants :

- Longueur d’environ 8 200 m ;
- Une zone dégradée sur environ 1 km (entre $x = 1\,500$ m et $x = 2\,500$ m) où la vitesse réglementaire est de 90 km/h ;
- Une zone saine sur environ 2 km correspondant à la 2x2 voies (entre $x = 1\,500$ m et $x = 2\,500$ m) où la vitesse réglementaire est de 110 km/h ;
- Une traversée d’agglomération (entre $x = 200$ m et $x = 1\,400$ m) ;
- Un giratoire vers $x = 3\,500$ m.

Avant la campagne d’essais, des mesures d’uni ont été effectuées sur le circuit-test au moyen de l’appareil à grand rendement MLPL. Ce passage est essentiel car il permet de **disposer d’une référence sur l’itinéraire** (Fig. 4.5 et 4.6) et d’autoriser ainsi une analyse comparative avec les résultats issus du traitement des données des véhicules traceurs.

À partir du dépouillement des mesures provenant du MLPL, le circuit-test offre les caractéristiques suivantes :

- 400 segments PO, 80 segments MO, 40 segments GO ;
- Note moyenne d’uni sur la section dégradée : 1.5 p^t pour les PO, 2.5 p^t pour les MO et 5 p^t pour les GO ;
- Note moyenne d’uni sur la section saine : 8 p^t pour les PO, 9.5 p^t pour les MO et 8 p^t pour les GO ;

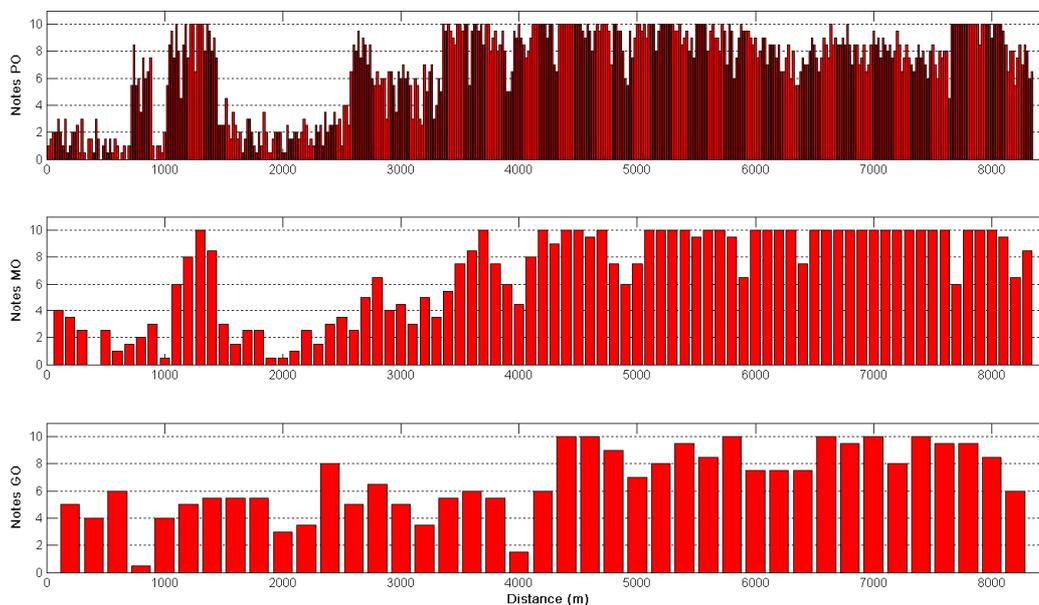


Figure 4.5 : Notes d’uni de référence sur le circuit-test

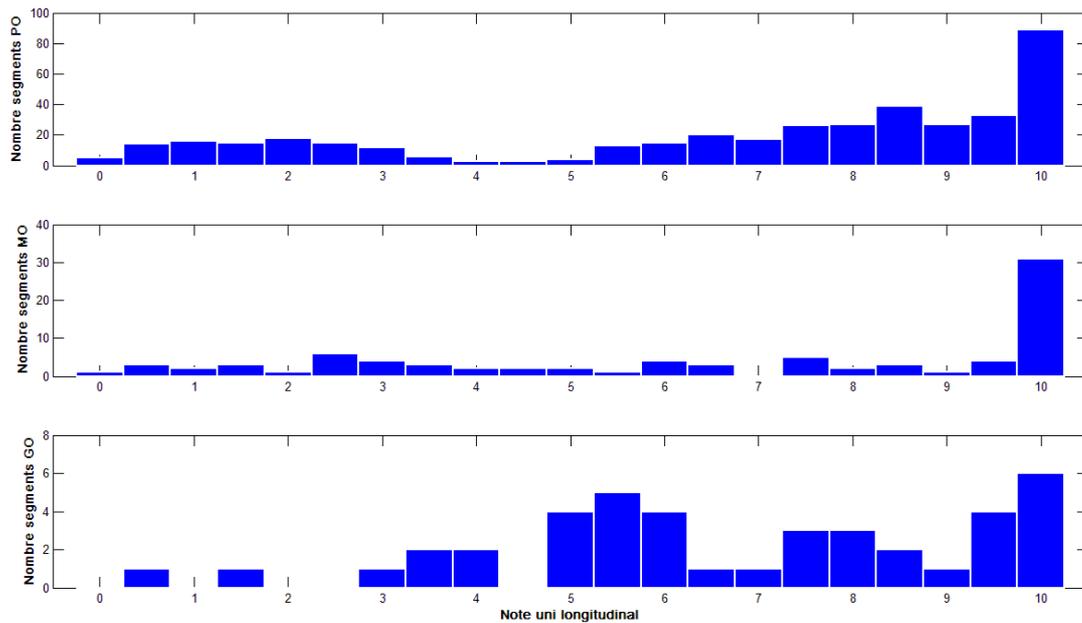


Figure 4.6 : Répartition des notes d’uni de référence sur le circuit-test

Grâce aux propriétés de ce circuit, nous avons pu observer le comportement des véhicules traceurs dans deux cas de figure bien distincts :

- Comportement face à une zone dégradée dans laquelle le véhicule va être fortement sollicité (signaux d’excitation de fortes amplitudes) ;
- Comportement face à une zone saine dans laquelle le véhicule traceur n’est soumis qu’à des excitations de faibles amplitudes.

Ces deux types de sections ont donc fait l’objet d’un examen particulier à la différence d’autres, comme par exemple les zones comportant des giratoires, qui ne présentent qu’un très faible intérêt opérationnel.

4.3 Estimation des variations des notes d’uni

L’objectif de cet exercice consiste à **caractériser l’impact de chaque facteur de variabilité dans le référentiel de l’indicateur NBO**. Pour ce faire, une série de tests a été élaborée afin d’isoler individuellement les effets des facteurs et de les quantifier. Le programme de ces tests est décrit au moyen du tableau ci-après (Tab. 4.1).

On rappelle que ces essais ont été menés sur le circuit-test avec un nombre limité de véhicules traceurs (issus du parc automobile de l’IFSTTAR-Nantes). Donc, en toute rigueur, on ne peut pas affirmer que les résultats obtenus soient applicables pour tous les véhicules traceurs et sur l’intégralité du réseau routier. Néanmoins, compte-tenu des propriétés de ce circuit, l’hypothèse d’un fort degré de représentativité semble tout à fait acceptable.

Composition des essais ✓ : facteur déterminé à partir de...		Facteur de variabilité à caractériser				
		σ capteur intrinsèque	σ info distance	σ trace	σ vitesse	σ véhicule
Nombre véhicules	1	✓	✓	✓	✓	
	N					✓
Nombre passages par véhicule	1	✓	✓			
	N			✓	✓	✓
Capteur de distance utilisé	Codeur roue	✓		✓	✓	✓ ¹
	Codeur roue + GPS (simultané)		✓			
Vitesse	Fixe			✓		✓
	Variable				✓	
Trace	Consignes de conduite sur le positionnement			✓		✓
Autre	Table vibrante (signal route)	✓				

Tableau 4.1 : Composition des programmes de tests

4.3.1 Estimation de l’erreur provenant de l’accéléromètre

Les essais sur table vibrante ont montré que la réponse dynamique de l’accéléromètre bascoût était quasiment identique à celle d’un accéléromètre de référence sur la bande de fréquences correspondant aux défauts d’uni. Aucune défaillance significative n’avait donc été détectée. Cependant, dans ces tests, nous avons préalablement caractérisé une partie des propriétés du capteur utilisé (ex : valeur de sensibilité).

Dans un contexte de déploiement sur un grand nombre de véhicules traceurs, il serait extrêmement lourd de déterminer précisément les paramètres de chaque accéléromètre utilisé. En conséquence, nous sommes donc dans l’obligation de composer avec ce type de spécificité en s’appuyant sur la documentation fournie par le fabricant.

Les principales sources d’erreur associées à l’accéléromètre ADXL326 et que nous avons analysées sont les suivantes :

- Erreur du « décalage en zéro » (biais)

La documentation technique donne une valeur typique en tension correspondant au biais de l’accéléromètre à 0 g. Pour obtenir la grandeur exacte, il suffit donc de retrancher la valeur du biais à celle délivrée par le capteur. Cependant, pour l’ADXL326, la valeur du biais en zéro peut évoluer en fonction de la tension d’alimentation et de la température. La première précaution à prendre pour minimiser cette fluctuation est donc d’alimenter le capteur par une tension constante.

¹ Le codeur de roue étant difficilement transposable d’un véhicule à un autre, un système GPS a été utilisé dans ces essais.

▪ Erreur de facteur d’échelle

Pour estimer l’effet de cette erreur, nous sommes partis du signal brut (en tension) délivré par l’accéléromètre le long du circuit-test et nous lui avons appliqué deux coefficients de sensibilité distincts donnés dans les spécifications techniques :

- Le facteur de sensibilité typique ou nominale ($S_{typ} = 57 \text{ mV/g}$) ;
- Le facteur de sensibilité maximal ($S_{max} = 63 \text{ mV/g}$).

L’application de ces coefficients aboutit à l’obtention de deux profils différents (Fig. 4.7) qui ont par la suite fait l’objet d’une analyse selon la méthodologie NBO (décomposition en bandes d’ondes et attribution de notes d’uni par segment).

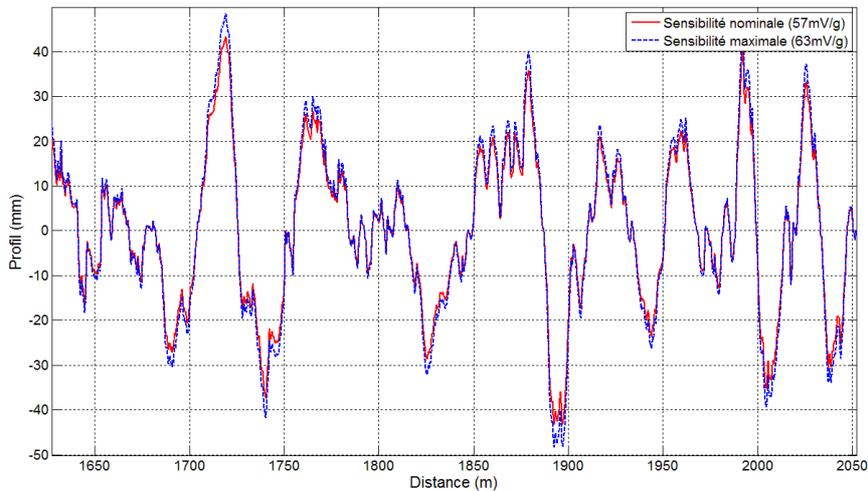


Figure 4.7 : Profils calculés à partir de coefficients de sensibilité différents

L’écart maximal constaté entre les deux profils de chaussées sur le circuit-test est d’environ 5 mm. Dans le référentiel NBO, cette différence de résultats se traduit par un écart maximal de notes de 0.5 point sur chaque bande d’ondes. Le tableau suivant donne la répartition de ces écarts sur les deux sections spécifiques de l’itinéraire-test.

	PO		MO		GO	
	Ecart nul (0 pt)	Ecart = 0.5pt	Ecart nul (0 pt)	Ecart = 0.5pt	Ecart nul (0 pt)	Ecart = 0.5pt
Section 2x2 voies	89%	11%	70%	30%	0%	100%
Section dégradée	0%	100%	0%	100%	0%	100%

*Section 2x2 voies : 100 segments PO, 20 segments MO et 10 segments GO
 Section dégradée : 50 segments PO, 10 segments MO et 5 segments GO*

Tableau 4.2 : Répartition (en %) de l’écart de sensibilité sur les segments composant le circuit-test

En plus de dépendre de la tension d’alimentation, on rappelle que le coefficient de sensibilité des accéléromètres ADXL est également susceptible de varier en fonction de la température de fonctionnement. Néanmoins, cette fluctuation est de très faible importance

($\pm 0.01 \text{ \%/}^\circ\text{C}$) comme l’illustre la figure suivante extraite de la documentation technique du fabricant (Fig. 4.8).

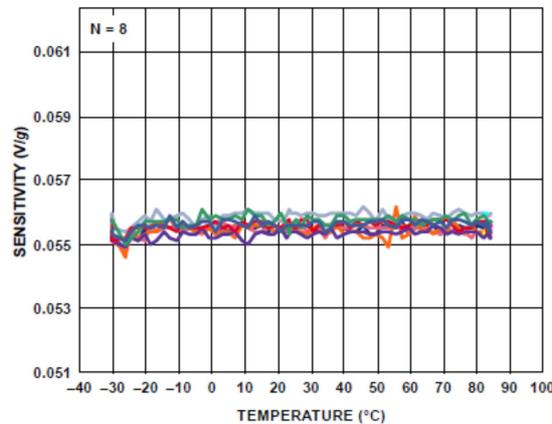


Figure 4.8 : Variation du facteur de sensibilité en fonction de la température de fonctionnement pour 8 accéléromètres ADXL326 (Source Analog Devices)

▪ Erreur de linéarité

Les données du constructeur indiquent que l’erreur de linéarité correspond à 0.3 % de l’étendue de mesure (16 g) ce qui renvoie à une valeur d’accélération de 0.048 g. Si l’on inclut cette erreur dans les signaux d’accélération originaux du circuit-test et que l’on suit le processus de traitement NBO, on constate que celle-ci ne génère aucune différence de note quelle que soit la bande d’onde. Pour fixer les idées, l’écart de profil maximal constaté entre le profil initial et le profil intégrant l’erreur de linéarité s’élève à 0.5 mm.

➤ Bilan : L’écart provenant des caractéristiques intrinsèques de l’accéléromètre résulte essentiellement de l’erreur d’échelle et n’excède pas, dans le système NBO, 0.5 point quels que soient la bande d’ondes et le niveau de gravité des défauts observés.

4.3.2 Estimation de l’erreur liée à l’information de distance

Il existe principalement deux raisons pouvant expliquer l’apparition d’une erreur d’information de distance :

- L’utilisation d’un système GPS pour déterminer l’abscisse spatiale du profil ;
- Un déclenchement spatialement approximatif d’une session de mesure.

Le premier facteur renvoie à une inexactitude métrologique liée aux caractéristiques du moyen de mesure utilisé ; on peut donc rigoureusement employer le terme d’erreur. Le second correspond davantage à des défauts de répétabilité car il est méthodologiquement lié à l’usage de véhicules traceurs. En effet, il sera très difficile de faire coïncider spatialement deux sessions de mesures provenant de deux passages distincts de véhicules traceurs ; d’abord parce qu’il faudrait que les opérateurs déclenchent l’acquisition exactement au même endroit mais surtout parce qu’il est improbable que les trajectoires

suivies par les deux véhicules soient rigoureusement identiques. Dans ces travaux, nous nous sommes donc efforcés d’évaluer, en plus de l’erreur portant sur l’utilisation d’un GPS, celle relative au décalage spatial lors du déclenchement des relevés¹.

A – Erreur dans la construction de l’abscisse curviligne et de son exploitation

Pour évaluer l’effet de cette erreur, la stratégie adoptée a consisté à acquérir simultanément les informations de distance au moyen d’un GPS et d’un codeur de roue puis à comparer les notes d’uni résultant du traitement de chacun des deux profils obtenus.

Dans un premier temps, il est intéressant d’observer les écarts de distances entre les informations GPS et celles du codeur de roue à chaque seconde (Fig. 4.9). Calculés à chaque réception de trame GPS (1 Hz), ces écarts sont globalement inférieurs à 1 m et ont également la particularité d’être aussi bien négatifs que positifs. Cela signifie que les distances calculées par le GPS peuvent être ponctuellement plus courtes ou plus longues que celles issues du capteur de référence (codeur). Sur des longueurs de parcours relativement grandes, ces écarts ont tendance à se compenser (phénomène de rattrapage) et on constate très souvent, de façon empirique, que la distance finale obtenue avec l’information GPS diffère de moins de 2 % de la distance de référence.

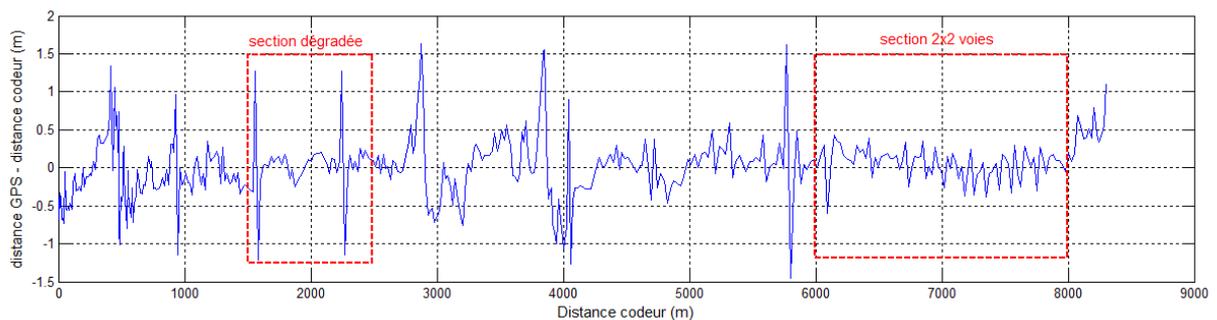


Figure 4.9 : Écarts à chaque seconde entre les distances issues du GPS et du codeur de roue

Les abscisses curvilignes provenant des données de chacun des deux capteurs sont ensuite intégrées dans le processus de calcul des notes d’uni. La comparaison de ces dernières est reportée dans le tableau ci-après.

	PO		MO		GO	
	Ecart max (pt)	% Ecart nul (0 pt)	Ecart max (pt)	% Ecart nul (0 pt)	Ecart max (pt)	% Ecart nul (0 pt)
Intégralité circuit	1.5 pt	93%	0.5 pt	96%	0.5 pt	97,50%
Section 2x2 voies	1 pt	96%	0 pt	100%	0 pt	100%
Section dégradée	1 pt	98%	0 pt	100%	0 pt	100%

Intégralité circuit : 415 segments PO, 83 segments MO et 41 segments GO

Section 2x2 voies : 100 segments PO, 20 segments MO et 10 segments GO

Section dégradée : 50 segments PO, 10 segments MO et 5 segments GO

Tableau 4.3 : Écart maximal (en point) lié à l’information de distance sur les segments du circuit-test

¹ La source d’erreur correspondant aux écarts de superposition entre trajectoires n’a pas été prise en compte dans ces travaux (problématique relevant des techniques de map-matching).

Pour ce type de facteur, l’apparition d’écart de note est très rare mais, quand cela arrive, il affecte principalement la bande PO. Ce résultat peut sembler logique car, pour cette dernière, le calcul de la note d’uni étant effectué sur une distance relativement courte (20 m), l’erreur d’abscisse y est davantage prégnante que pour les distances d’analyse des bandes MO et GO (respectivement 100 et 200 m).

Remarque sur les conditions de mesure avec le GPS

Les résultats présentés dans cette investigation proviennent d’essais menés sur le circuit-test pour lequel il n’y a pas de zone de masquage. Bien que ce critère corresponde aux hypothèses de travail formulées dans le cahier des charges, il serait intéressant de s’interroger sur l’amplification de ce type d’erreur quand le véhicule traceur évolue dans un environnement masquant partiellement et ponctuellement le GPS¹. De même, l’apport des corrections différentielles (ex : EGNOS) dans la précision des informations de distance mériterait d’être également estimée.

B – Erreur liée au décalage spatial des sessions de mesure

Cette erreur vient du fait que deux sessions de mesure ne pourront être exactement déclenchées au même endroit. Le décalage spatial ainsi engendré est susceptible de créer des différences de notation puisque l’analyse par bande d’ondes ne sera pas réalisée rigoureusement sur les mêmes segments.

Pour quantifier l’impact de ce phénomène, nous sommes partis du fichier de mesure contenant les informations de profil et nous y avons translaté, de façon artificielle et progressive, l’abscisse curviligne autour de sa position initiale. Comme pour les autres types d’erreurs, nous avons, par la suite, déroulé le processus de traitement jusqu’au calcul des notes d’uni. La progression de l’abscisse curviligne s’est faite par pas de 5 m pour la bande PO (longueur approximative d’un véhicule) et par pas variant de 5 à 20 m pour les bandes MO et GO. Les résultats de cette opération pour les deux sections particulières du (saine et dégradée) sont exposés dans le tableau suivant (Tab 4.4).

¹ Des expériences préliminaires ont été réalisées dans le cadre de ces travaux de thèse mais uniquement sur la base de relevés statiques. Des passages en milieu urbain ou en zones boisées devraient permettre d’estimer plus précisément la perte de précision engendrée par les effets de masquage.

Nb segments : 99		Section saine - PO			
Longueur décalage (m)	Ecart de note max	Ecart de note moyen	% écart note ≤ 1pt	% écart note ≤ 2pts	% écart note ≤ 3pts
5	5	0.10	98.0	99.0	99.0
10	5	0.12	98.0	99.0	99.0
15	6	0.18	97.0	98.0	98.0

Nb segments : 49		Section dégradée - PO			
Longueur décalage (m)	Ecart de note max	Ecart de note moyen	% écart note ≤ 1pt	% écart note ≤ 2pts	% écart note ≤ 3pts
5	2	0.43	98.0	100.0	100.0
10	2.5	0.63	85.7	98.0	100.0
15	4.5	1.17	63.3	87.8	95.9

Nb segments : 19		Section saine - MO			
Longueur décalage (m)	Ecart de note max	Ecart de note moyen	% écart note ≤ 1pt	% écart note ≤ 2pts	% écart note ≤ 3pts
5	0	0.00	100.0	100.0	100.0
10	0.5	0.03	100.0	100.0	100.0
15	0.5	0.05	100.0	100.0	100.0
20	1.5	0.16	94.7	100.0	100.0
40	4	0.63	78.9	84.2	94.7
60	4.5	0.87	78.9	78.9	78.9

Nb segments : 8		Section dégradée - MO			
Longueur décalage (m)	Ecart de note max	Ecart de note moyen	% écart note ≤ 1pt	% écart note ≤ 2pts	% écart note ≤ 3pts
5	0	0.00	100.0	100.0	100.0
10	0.5	0.11	100.0	100.0	100.0
15	0.5	0.17	100.0	100.0	100.0
20	0.5	0.22	100.0	100.0	100.0
40	0.5	0.17	100.0	100.0	100.0
60	0.5	0.39	100.0	100.0	100.0

Nb segments : 9		Section saine - GO			
Longueur décalage (m)	Ecart de note max	Ecart de note moyen	% écart note ≤ 1pt	% écart note ≤ 2pts	% écart note ≤ 3pts
5	0.5	0.06	100.0	100.0	100.0
10	0.5	0.11	100.0	100.0	100.0
15	0.5	0.11	100.0	100.0	100.0
20	0.5	0.11	100.0	100.0	100.0
40	1	0.44	100.0	100.0	100.0
60	1.5	0.67	77.8	100.0	100.0
80	1.5	0.61	88.9	100.0	100.0
100	2	0.78	77.8	100.0	100.0
120	2.5	0.78	77.8	88.9	100.0

Nb segments : 4		Section dégradée - GO			
Longueur décalage (m)	Ecart de note max	Ecart de note moyen	% écart note ≤ 1pt	% écart note ≤ 2pts	% écart note ≤ 3pts
5	0	0.00	100.0	100.0	100.0
10	0	0.00	100.0	100.0	100.0
15	0	0.00	100.0	100.0	100.0
20	0.5	0.13	100.0	100.0	100.0
40	0.5	0.25	100.0	100.0	100.0
60	0	0.00	100.0	100.0	100.0
80	0.5	0.13	100.0	100.0	100.0
100	1	0.50	100.0	100.0	100.0
120	2	1.00	50.0	100.0	100.0

Tableau 4.4 : Écarts de notes générés par le décalage d'abscisse curviligne

Les données de ce tableau sont analysées au moyen de trois indicateurs :

▪ Écart de note maximal constaté parmi l’ensemble des segments de la section étudiée

Cet indicateur est intéressant quand les défauts sont uniformément répartis sur l’ensemble des segments (cas de la section dégradée). Sur la section saine, l’un des segments contient un défaut grave générant une note d’uni basse. Comme les segments adjacents sont affectés d’une note haute, la translation d’abscisse fait « coulisser » ce défaut vers le segment suivant d’où un écart de note très conséquent d’environ 5 points pour les PO et autour de 4 points pour les MO.

▪ Écart de note moyen

Cet indicateur est la moyenne des écarts de notes calculés sur l’ensemble des segments constituant la section étudiée. Il prend en compte l’effet global du décalage d’abscisse sur la section étudiée. Très logiquement, cet indicateur croit au fur et à mesure que le décalage devient important. Pour la suite de l’étude, le niveau moyen d’incertitude causé par le décalage d’abscisse sera défini à partir de cette valeur.

▪ Pourcentage d’écarts de notes en dessous d’un certain seuil (1pt, 2pts et 3pts)

Son intérêt est de pouvoir apprécier la répartition des écarts de notes sur la section étudiée. Pour les deux sections spécifiques, nous remarquons que, finalement, un décalage des mesures ne génère pas un volume d’écarts significatif. Certes, ce constat n’est basé que sur quelques kilomètres d’un circuit donné mais on peut penser que la robustesse ainsi que la stabilité de la méthode NBO y sont aussi pour quelque chose.

Pour résumer, l’effet de ce facteur est fortement conditionné par le caractère homogène des défauts d’uni sur un secteur de route donné. Si les défauts se répartissent uniformément sur plusieurs segments alors le décalage en abscisse n’aura que peu d’impact sur la variabilité des notes. À l’inverse, une analyse par méthode NBO menée sur une route comprenant des défauts très localisés et de surcroît très prononcés sera très sensible aux effets de décalage.

► **Bilan** : L’erreur liée à la précision de l’information de distance a été estimée de façon individuelle pour deux facteurs :

- Utilisation des coordonnées GPS pour fabriquer l’abscisse curviligne
- Décalage spatial des abscisses curvilignes

Pour le premier facteur, l’erreur affecte uniquement les notes PO à la hauteur maximale d’1 point et de façon moyenne à 0.5 point.

Pour le second facteur, en considérant un décalage maximal de 10 m, l’erreur moyenne sur la bande PO est estimée à 0.5 point.

Quel que soit le facteur, l’erreur sur l’information de distance semble laisser intact les notations des bandes MO et GO.

Bien évidemment, dans la pratique, les effets de ces facteurs sont susceptibles de se combiner pour donner lieu à une erreur globale qui sera soit plus forte (addition des effets) soit plus faible (annihilation des effets).

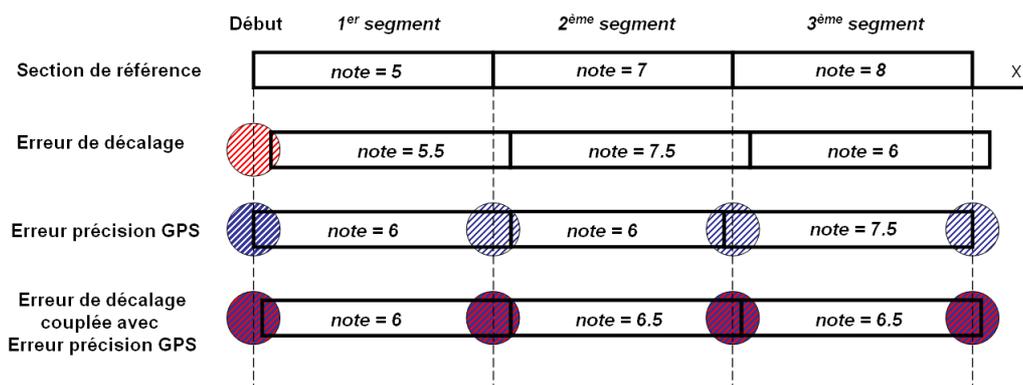


Figure 4.10 : Schéma illustrant l’erreur globale d’information de distance

4.3.3 Estimation de l’erreur de trace

L’erreur de trace a été calculée à partir de 6 passages exécutés à vitesse similaire par un même véhicule muni pour la circonstance d’un codeur de roue pour minimiser les erreurs de distance parcourue. Dans notre cas, cette erreur correspond aux fluctuations de trajectoires « normales¹ » autour d’une trace de référence qui se situe exactement au centre de la bande de roulement droite.

Le tracé des moyennes des notes d’uni associées à leurs écarts-types sur la section dégradée donne une bonne indication de l’ampleur de l’erreur de trace (Fig. 4.11). Un travail similaire aux facteurs d’erreurs traités précédemment permet de conclure sur le faible impact de cette erreur sur les notes d’uni. Le niveau de variabilité le plus élevé est observé pour la

¹ Les situations où la trace du véhicule est exagérément éloignée de la bande de roulement (ex : situation de dépassement d’un vélo) ne rentrent pas dans cette catégorie d’erreur.

bande PO (avec un écart maximal d’1 point) ce qui est aisément compréhensible compte-tenu du caractère très localisé de ce type de défauts sur la chaussée.

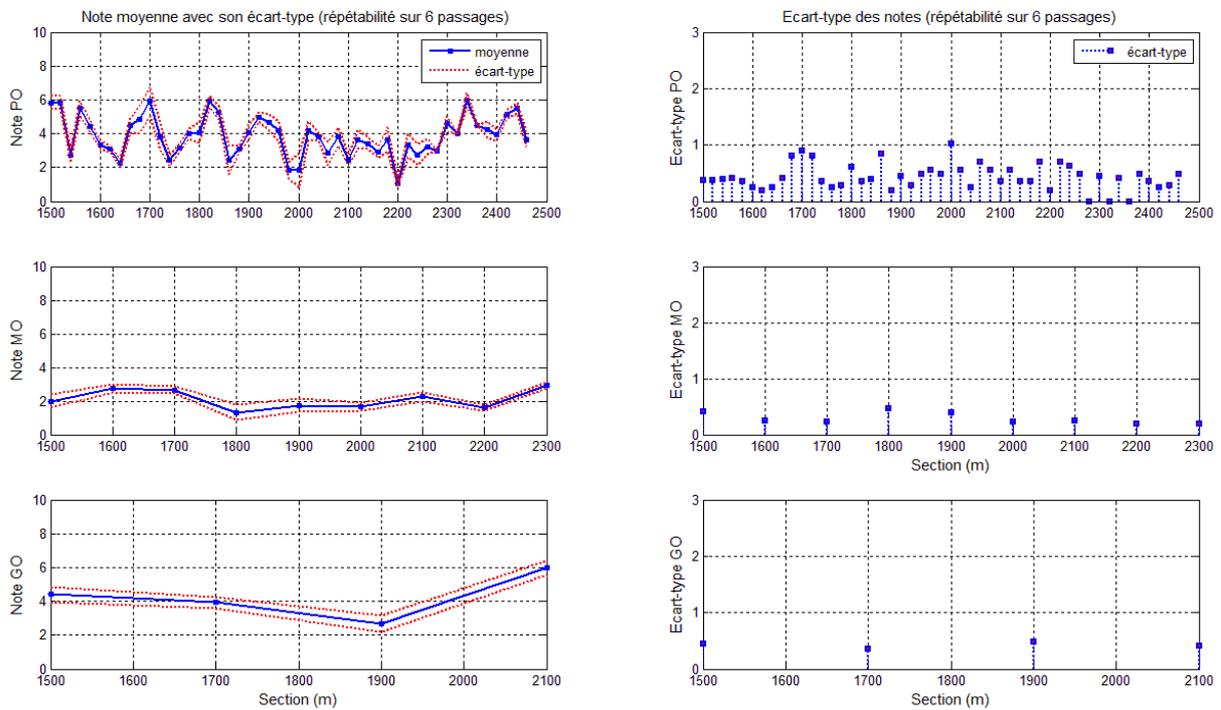


Figure 4.11 : Notes moyennes et écart-types observés sur la section dégradée

Les répartitions d’écarts de notation sur les segments composant les sections dégradées et saines du circuit-test sont récapitulées dans le tableau 5.11. Elles confirment à la fois la faible influence et la faible occurrence de l’erreur de trace sur ce parcours.

	PO			MO			GO		
	$\sigma \leq 0.5$ pts	$\sigma \leq 1$ pts	$\sigma \leq 2$ pts	$\sigma \leq 0.5$ pts	$\sigma \leq 1$ pts	$\sigma \leq 2$ pts	$\sigma \leq 0.5$ pts	$\sigma \leq 1$ pts	$\sigma \leq 2$ pts
Section 2x2 voies	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Section dégradée	72%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tableau 4.5 : Répartition (en %) de l’erreur de trace sur les sections particulières du circuit-test

► **Bilan** : L’erreur de trace a été estimée à partir de six passages réalisés par un même véhicule traceur. Quelle que soit la section prise en compte, cette erreur se matérialise par des écarts de notation extrêmement faibles :

- inférieurs à 1 point pour les PO,
- inférieurs à 0,5 point pour les MO et GO.

Cela étant, ces résultats découlent d’une analyse portant sur des sections géométriquement droites ; les possibilités de variations de positionnement latérales y sont, en général, plus limitées que sur des sections courbes.

4.3.4 Estimation de l’erreur de vitesse

Cette erreur est déterminée à partir de l’analyse des notes délivrées par un véhicule traceur unique muni d’un codeur de roue circulant sur un même itinéraire mais à des vitesses significativement différentes. L’estimation du niveau de dispersion des notes d’uni en fonction de la vitesse pratiquée est réalisée au moyen des résultats suivants (Fig. 4.12).

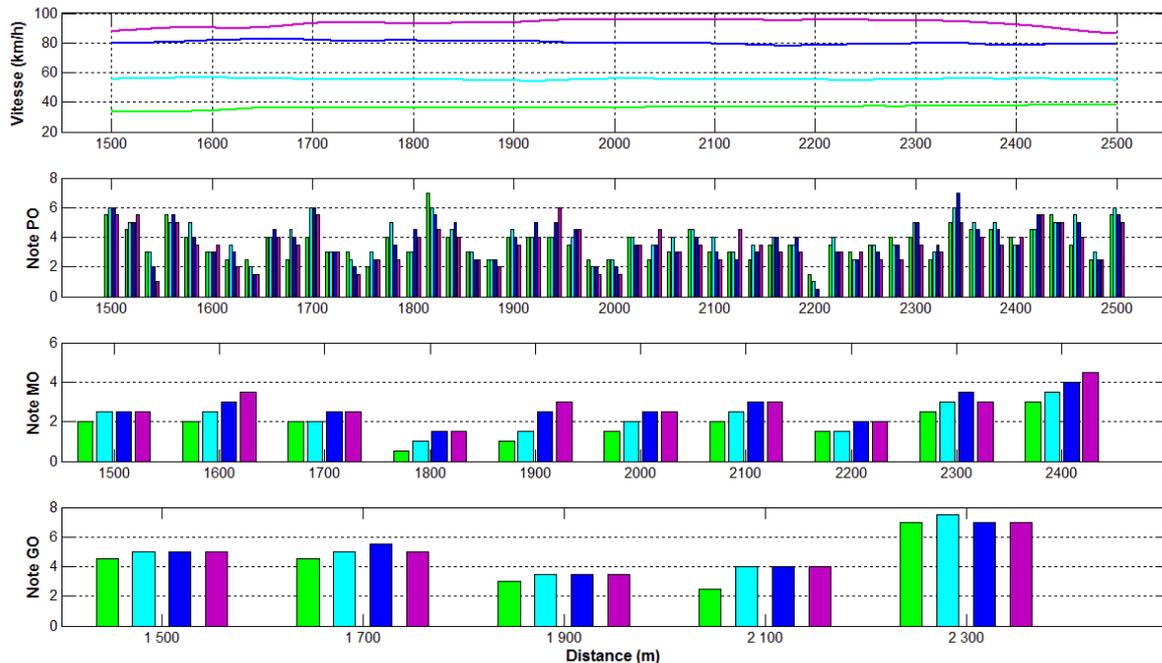


Figure 4.12 : Effets de la vitesse d’avancement du véhicule sur les notes d’uni pour la section dégradée (4 passages à environ 40, 60, 80 et 100 km/h)

La moyenne des écarts de notes calculés entre le passage le plus lent et le plus rapide s’élève à 0.5 point pour chacune des trois bandes d’ondes. L’écart maximal observé à partir de ces mêmes données atteint, quant à lui, 2.5 points pour la bande PO et 1.5 point pour les bandes MO et GO.

De façon générale, une variation du facteur vitesse conduit à modifier la fréquence d’excitation du véhicule traceur correspondant à un défaut donné. Ce phénomène est vérifié à partir de l’observation des densités spectrales de puissance (Fig. 4.13). Plus la vitesse du véhicule diminue, plus la bande passante se décale vers les hautes fréquences spatiales et plus le pouvoir de détection s’améliore pour les défauts de petites longueurs d’ondes au détriment de ceux composés de grandes longueurs d’ondes. De façon réciproque, plus la vitesse augmente, plus la capacité de détection s’accroît pour les défauts de la bande GO (décalage de la puissance spectrale vers les basses fréquences spatiales).

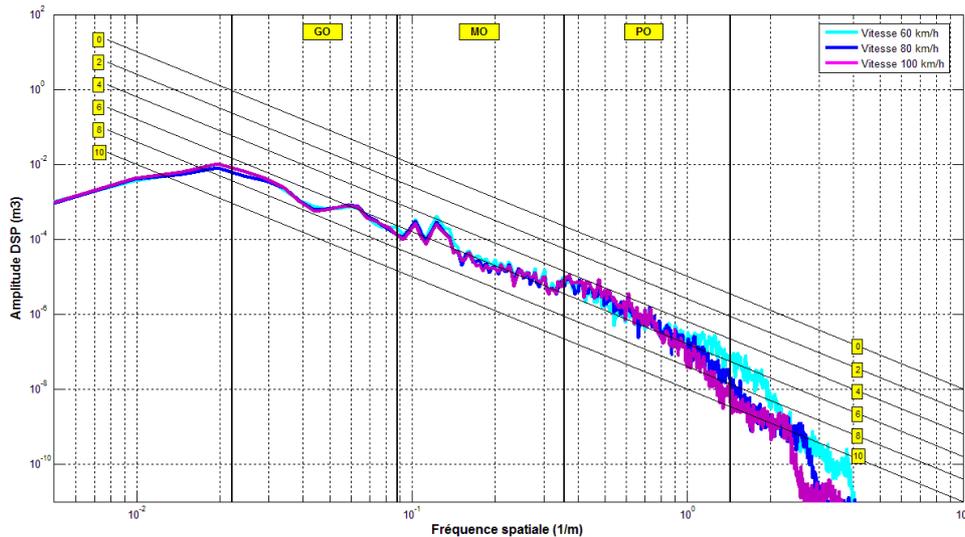


Figure 4.13 : Effet de la variation de vitesse de passage à travers les densités de puissance spectrales

À la différence des autres sources d’erreur, celle liée à la vitesse de passage est beaucoup plus systématique car elle est présente sur un nombre relativement élevé de segments. Ainsi, si 24% des segments de la section dégradée ont des écarts de notes PO inférieurs ou égaux à 0.5 point, ce pourcentage monte à 61% pour les écarts inférieurs ou égaux à 1 point et à 94% pour les écarts inférieurs ou égaux à 2 points.

Enfin l’erreur de vitesse, de par sa nature, n’affecte que les segments présentant une quantité significative de défauts ; une section ne présentant aucun défaut ne sera évidemment pas concernée par ce facteur.

	PO			MO			GO		
	$\sigma \leq 0.5$ pt	$\sigma \leq 1$ pt	$\sigma \leq 2$ pt	$\sigma \leq 0.5$ pt	$\sigma \leq 1$ pt	$\sigma \leq 2$ pt	$\sigma \leq 0.5$ pt	$\sigma \leq 1$ pt	$\sigma \leq 2$ pt
Section saine	92%	100%	100%	90%	95%	100%	85%	90%	100%
Section dégradée	24%	61%	94%	27%	73%	100%	67%	83%	100%

Tableau 4.6 : Répartition (en %) de l’erreur de vitesse sur les sections particulières du circuit-test

► **Bilan** : Cette erreur a été quantifiée à partir de passages présentant un différentiel de vitesse relativement élevé (env. 50 km/h). De cette manière, on peut affirmer que l’erreur de vitesse a été estimée par excès.

D’autre part, cette erreur se rapporte essentiellement aux segments offrant des notes d’uni moyennes à médiocres. Dans ces conditions, les écarts peuvent alors atteindre les valeurs suivantes :

- Bande PO : écart maximal de 2.5 pts et écart moyen de 1 pt ;
- Bande MO : écart maximal de 1.5 pt et écart moyen de 1 pt ;
- Bande GO : écart maximal de 1.5 pt et écart moyen de 0.5 pt ;

4.3.5 Estimation de l’erreur liée à la dynamique du véhicule

Cette erreur aurait théoriquement pu être déterminée à partir de modèles vibratoires de véhicule soumis à un signal d’excitation de type profil de chaussée et dans lesquels des paramètres comme la raideur des suspensions auraient fait l’objet de modifications. Malheureusement, dans la mesure où les constructeurs automobiles et leurs fournisseurs ne divulguent pas ce genre d’informations, il est très difficile de se procurer les valeurs exactes des paramètres en question. Pour cette raison, mais aussi pour augmenter le degré de réalisme, nous avons opté pour une approche expérimentale utilisant trois véhicules traceurs de différentes catégories (citadine, berline et utilitaire). De cette manière, on s’assure de travailler avec des véhicules ayant des propriétés dynamiques distinctes (ex : différences de masses, dimensions des pneumatiques).

Cette erreur est certainement celle qui est la plus difficile à évaluer car elle nécessite la maîtrise d’un certain nombre de facteurs :

- Instrumentation identique d’un véhicule traceur à un autre ;
- Vitesse de passage et trace similaires ;
- Mesures spatialement superposables.

Afin de limiter les effets d’un passage qui ne remplirait pas ces critères, chaque type de véhicule traceur a exécuté une série de six passages. L’erreur liée à la dynamique du véhicule a ensuite été déterminée par comparaison des moyennes de notes issues des six passages des différents véhicules traceurs. Les notes moyennes collectées par les trois véhicules traceurs sont représentées sur la figure suivante (Fig. 4.14) :

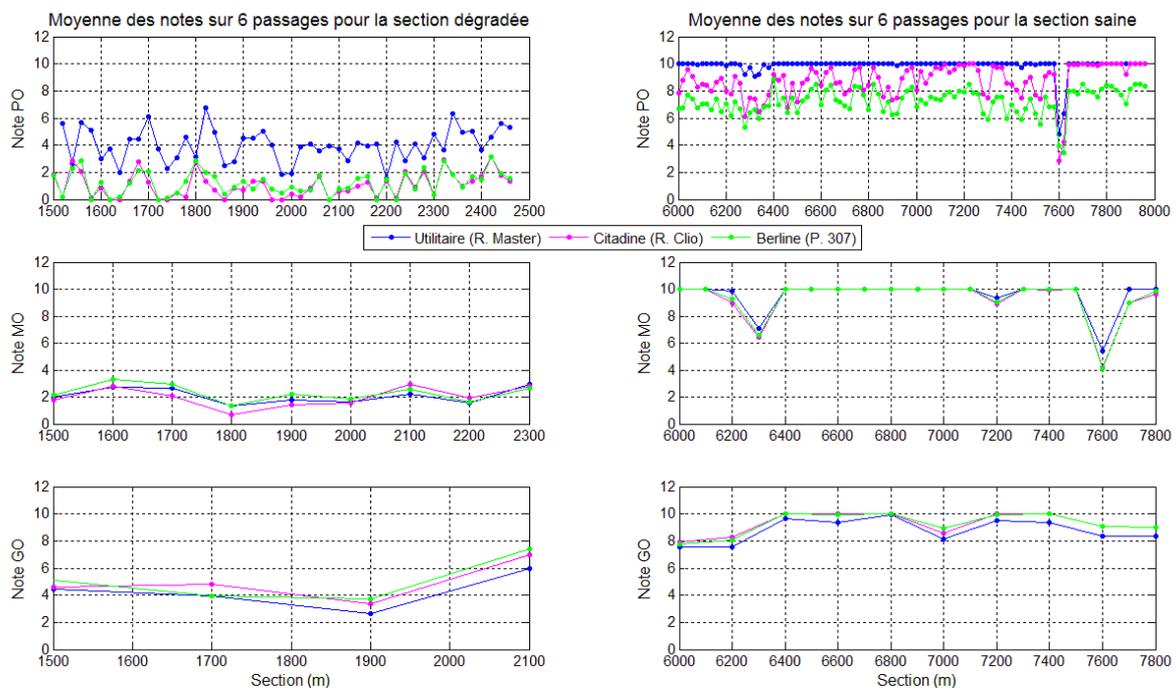


Figure 4.14 : Notes d’uni prélevées par trois véhicules traceurs de différentes catégories sur les sections dégradée et saine

Plusieurs enseignements valables aussi bien pour la portion du circuit-test dégradée que la portion saine peuvent être tirés de l'examen de cette figure :

- une variation fortement marquée dans la bande PO et relativement faible pour les bandes MO et GO ;
- des réponses nettement distinctes dans la bande PO entre la catégorie utilitaire d'une part et les catégories citadine et berline d'autre part ; les notes calculées à partir des données enregistrées sur l'utilitaire étant systématiquement plus élevées dans la bande PO et plus basse dans la bande GO que celles issues des autres catégories.

Cette divergence de réponse s'observe également à travers la représentation en DSP (Fig. 4.15). Sur celle-ci, on s'aperçoit que la puissance spectrale des signaux du véhicule utilitaire sur la bande PO est, de façon globale, inférieure à celle des autres véhicules. Ces résultats traduisent des comportements vibratoires différents dus essentiellement, pour cette bande d'ondes, à l'influence des caractéristiques pneumatiques.

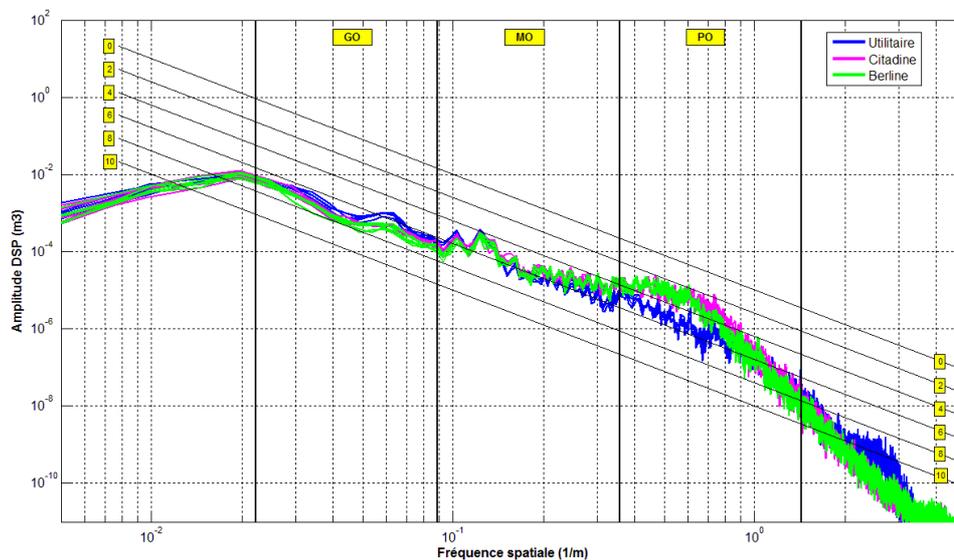


Figure 4.15 : Densité spectrale de puissance des six passages de chaque véhicule traceur sur la section dégradée

Pour confirmer la prépondérance de l'impact des propriétés des pneumatiques dans la restitution des défauts d'uni dans la bande PO, des expériences complémentaires ont été menées. Celles-ci ont consisté à utiliser un seul véhicule traceur et à modifier l'état de gonflage de ses pneus (un passage à pression standard et un passage en état de sous-gonflage). La différence de notation PO entre ces deux scénarii peut atteindre jusqu'à deux points ; les écarts de notes relatifs aux bandes MO et GO sont, quant à eux, globalement nuls (Fig. 4.16).

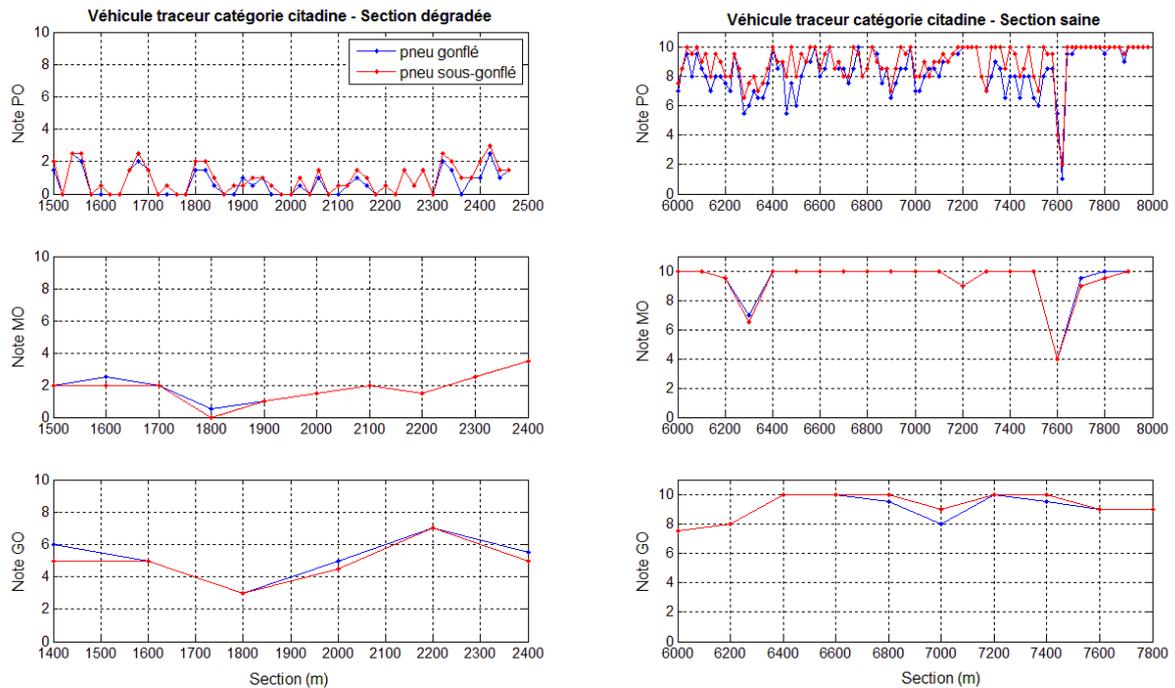


Figure 4.16 : Répercussion de l'état de gonflage des pneus d'un même véhicule traceur sur la notation d'uni

► **Bilan** : La différence de propriétés vibratoires des véhicules traceurs génèrent des écarts de notation significatifs, en particulier pour la bande PO. Ces écarts ont pu être estimés par l'analyse des informations délivrées par trois véhicules traceurs appartenant à des catégories représentatives du parc automobile ciblé par notre solution d'auscultation. Sur la section dégradée, la disparité de notes se traduit par les valeurs suivantes :

- Bande PO : écart maximal de 4 pts et écart moyen de 2.5 pts
- Bande MO : écart maximal de 1 pt et écart moyen de 0.5 pt
- Bande GO : écart maximal de 1 pt et écart moyen de 0.5 pt

4.4 Synthèse sur les facteurs de variabilité des notes d'uni

La solution d'auscultation développée dans cette thèse fait intervenir des outils et des procédés dont il est indispensable de connaître les imprécisions et les incertitudes de mesures dans le référentiel de l'indicateur choisi (NBO). Pour chacun des facteurs d'erreur identifiés, nous avons tenté d'isoler et de quantifier expérimentalement l'impact individuel sur la notation d'uni (Fig. 4.17). Le résultat de cette caractérisation est présenté à travers deux indicateurs : l'écart maximal et l'écart moyen de notation. Ceux-ci ont été calculés pour chaque bande d'ondes et sur deux sections de référence qui représentent les états très différents du niveau d'uni d'une chaussée (section dégradée et section saine). En procédant de la sorte, on considère que ces observations peuvent être généralisées à l'échelle d'un réseau routier.

L’étude menée dans cette partie est une étape charnière des travaux de thèse car, à partir des éléments conceptuels présentés dans le deuxième chapitre (description générale de la solution d’auscultation), elle fait émerger des éléments métrologiques qui serviront à alimenter les mécanismes de fusion des données collectées par les véhicules traceurs (Cf. chapitre suivant).

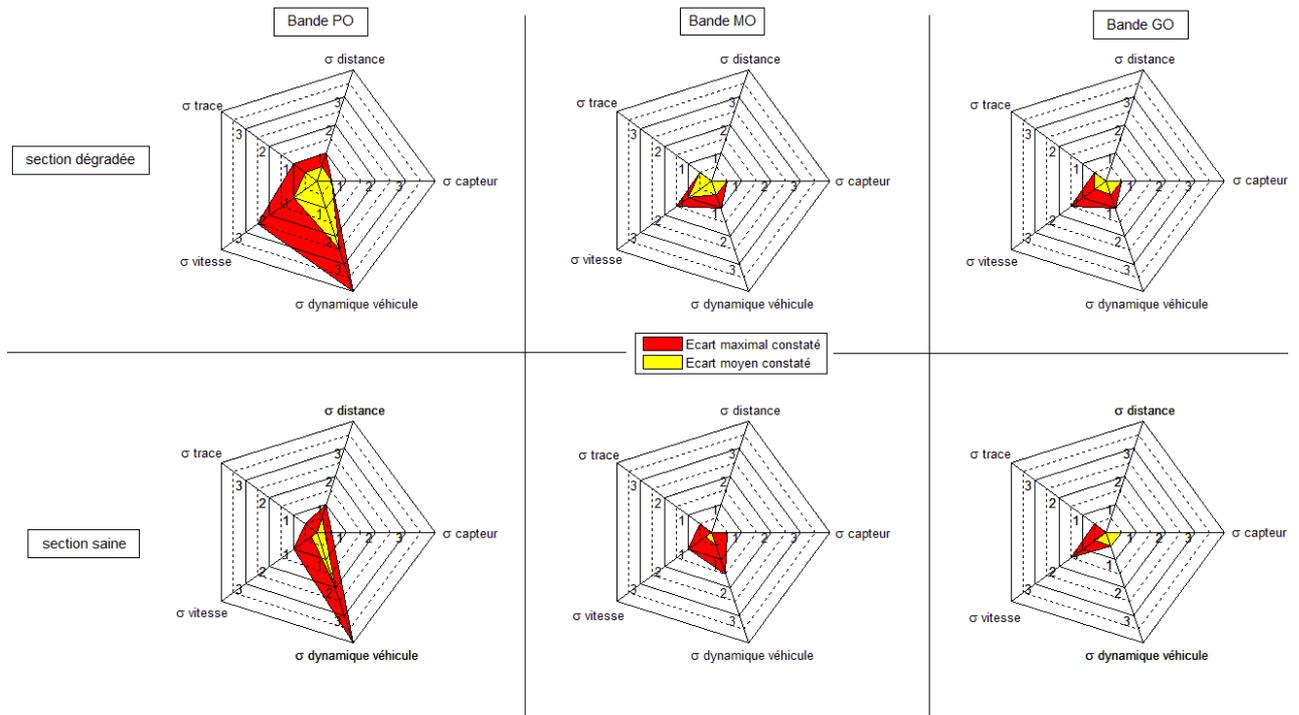


Figure 4.17 : Graphique de synthèse illustrant la quantification des écarts d’uni déterminés expérimentalement sur les deux sections de référence pour trois véhicules traceurs et sur la base d’une quarantaine de passages

Chapitre 5

Fusion des informations délivrées par les véhicules traceurs : méthodes et outils

SOMMAIRE

5.1 Principales caractéristiques des informations à fusionner	98
5.1.1 Caractéristiques intrinsèques des sources de mesures	98
5.1.2 Caractéristiques intrinsèques des informations.....	99
5.1.3 Caractéristiques intrinsèques des sources et des informations.....	101
5.2 Principes de la fusion d'informations et architecture de traitement	101
5.2.1 Introduction générale sur la fusion d'informations	102
5.2.2 Proposition d'un schéma opérationnel.....	104
5.2.3 Architectures de fusion	105
5.3 Pré-traitement au processus de fusion : rejet des données aberrantes et pondération des sources de mesures	108
5.4 Les méthodes de fusion investiguées	114
5.4.1 Méthode de fusion dans un cadre statistique.....	115
5.4.2 Méthode de fusion dans un cadre probabiliste	116
5.4.3 Méthode de fusion dans un cadre possibiliste.....	120
5.4.4 Méthode de fusion dans un cadre crédibiliste.....	137
5.5 Construction d'un indice de confiance.....	155
5.6 Bilan sur l'utilisation des méthodes de fusion.....	158

La force de la méthodologie d'auscultation à base de véhicules traceurs ne doit pas uniquement reposer sur l'accumulation d'informations ; elle doit également découler de l'efficacité des outils de traitement mis en œuvre pour délivrer une information finale qui soit la plus précise et la plus fiable possible. À ce stade de l'étude, le défi consiste donc à trouver au moins une méthode de traitement de données qui permette d'agrèger les données disponibles, parfois entachées d'erreur, tout en exploitant le maximum de leur quintessence. Dans ce contexte, ce chapitre dresse une liste de techniques candidates à cette opération dite de « fusion » et présente, pour chacune d'entre elles, les adaptations portées dans le but de répondre du mieux possible aux spécificités de la méthode d'auscultation proposée dans cette thèse.

5.1 Principales caractéristiques des informations à fusionner

Le but de cette section est d'explicitier le sens¹ d'un certain nombre de termes (données, informations, imprécision, incertitude, conflit, etc.) repris dans la suite du mémoire et de mettre en place quelques éléments du cadre mathématique.

5.1.1 Caractéristiques intrinsèques des sources de mesures

Les informations à fusionner peuvent être entachées d'imperfections car les sources de mesures (*i.e.* les véhicules traceurs) sont elles-mêmes imparfaites. En effet, une source, que l'on peut assimiler à un capteur, est susceptible de délivrer des mesures intégrant deux types d'erreur : une erreur systématique (biais) et une erreur aléatoire. Une mesure x provenant d'une source peut alors être modélisée de la façon suivante :

$$x = M + b + \varepsilon \quad (5.1)$$

où M est la valeur vraie (ou de référence), b l'erreur systématique et ε l'erreur aléatoire.

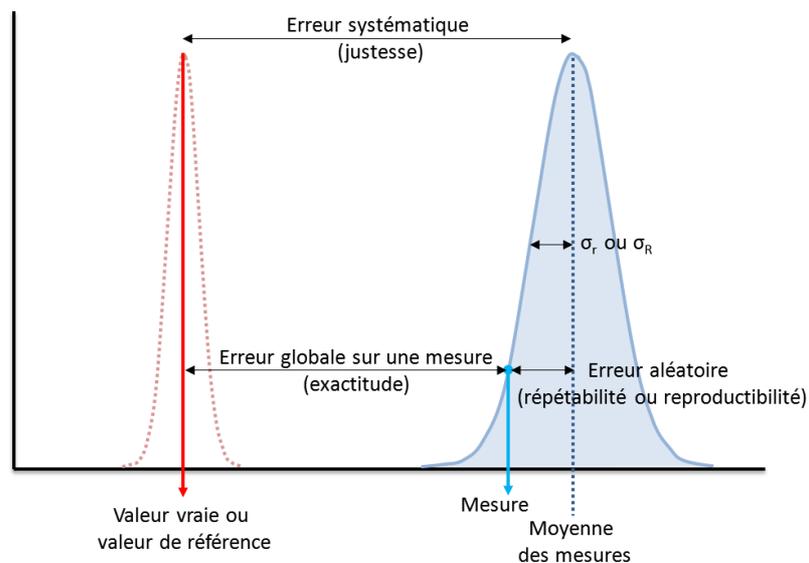


Figure 5.1 : Schéma représentant les caractéristiques d'erreurs de mesures

Selon l'ampleur de l'erreur systématique et de l'erreur aléatoire, on caractérise une source ou un groupe de sources au moyen des notions suivantes :

¹ La plupart des définitions apportées dans les paragraphes suivants sont propres au contexte de l'étude et ne doivent donc pas être considérées comme des définitions générales.

● La **répétabilité** (ou **fidélité**) renvoie à l'étroitesse de l'accord entre les valeurs obtenues par des mesurages répétés. Le niveau de répétabilité d'une source dépend donc uniquement des caractéristiques de l'erreur aléatoire.

Dans notre contexte, la répétabilité (ou fidélité) d'une source traduit le fait que celle-ci repassant à plusieurs reprises sur une section inchangée (hypothèse valable pour un court laps de temps), produira des mesures plus ou moins identiques ou au contraire, dispersées. Elle est quantifiée par l'écart-type σ_r des mesures ainsi réalisées.

● La **justesse** correspond à l'étroitesse de l'accord entre la moyenne calculée à partir d'une large série de mesures provenant de cette même source et une valeur « vraie » connue grâce au passage d'un appareil de référence. Une source juste implique qu'il n'y a pas d'erreur systématique et que l'erreur aléatoire est nulle en moyenne.

● L'**exactitude** de mesure est définie par l'étroitesse de l'accord entre une valeur mesurée et la valeur vraie (ou de référence). Elle renvoie donc à la somme de l'erreur systématique avec l'erreur aléatoire. Par la suite, on dira d'une source, qui produit des mesures exactes, qu'elle est **fiable**.

● L'**écart inter-source** d'un groupe de sources traduit le fait que si ces sources passent une fois chacune sur une section inchangée (en un court laps de temps), elles produiront des mesures plus ou moins identiques ou, au contraire, dispersées ; elle est quantifiée par l'écart-type σ_I des mesures ainsi réalisées. Cette notion intègre les différents biais de mesures existants entre les sources, mais pas entre les sources et une valeur "vraie".

● La **reproductibilité** d'un groupe de sources traduit le fait que si ces sources passent plusieurs fois chacune sur une section inchangée (en un court laps de temps), elles produiront des mesures plus ou moins identiques ou au contraire, dispersées ; elle combine donc la répétabilité et l'écart inter-source. Elle peut être calculée directement par l'écart-type σ_R de toutes les mesures ainsi réalisées, mais elle est liée à l'écart-type de répétabilité et à l'écart inter-sources (sur un grand nombre de mesures) par la formule¹ :

$$\sigma_R = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_I^2} \quad (5.2)$$

5.1.2 Caractéristiques intrinsèques des informations

On rappelle qu'à ce stade de l'étude, on assimile chaque véhicule traceur à un instrument de mesure ou à un capteur qui délivre un seul et même type de mesure (ou donnée) pour chaque segment de route d'un parcours à savoir une note d'uni. Les données à traiter sont donc **homogènes, unidimensionnelles** et appartiennent à un cadre de discernement S **exhaustif** (valeurs composant le système de notation par bandes d'ondes) tel que :

$$S = \{0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, \dots, 10\} \quad (5.3)$$

¹ Formule tirée de la norme ISO 5725-2 intitulée « Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesures : méthode de base pour la détermination de la répétabilité et la reproductibilité d'une méthode de mesure normalisée ».

Les imperfections de mesures, définies dans la partie précédente à travers une description métrologique, donnent naissance à des notions supplémentaires dans le domaine de la fusion de données (ou fusion d'informations¹). Ces notions sont présentées ci-après au moyen d'exemples en lien avec le contexte de l'étude.

- **L'imprécision** renvoie au contenu de l'information proprement dit. Elle correspond à un défaut quantitatif de connaissance du, par exemple, au niveau de précision du capteur utilisé [30].

- Exemple n°1 d'information imprécise : « la note d'uni sur cette section est d'environ 7 » (description qualitative).

- Exemple n°2 d'information imprécise : « la note d'uni sur cette section est 7 plus ou moins 2 points » (description quantitative).

Sur ce dernier exemple, la note d'uni sur la section se situe donc dans l'intervalle [5 ; 9].

- **L'incertitude** renvoie au degré de conformité (ou confiance, ou véracité) d'une information par rapport à la réalité [31].

- Exemple n°1 d'information incertaine : « Il est plausible que la note d'uni sur cette section soit de 7 » (description qualitative).

- Exemple n°2 d'information incertaine : « La probabilité que la note d'uni sur cette section soit de 7 est de 65% » (description quantitative).

- **Lien entre imprécision et incertitude**

Ces deux notions sont bien souvent confondues par abus de langage mais il est vrai qu'elles peuvent être liées voire interdépendantes (en particulier dans la représentation probabiliste). Ainsi, dans le cas d'informations quantitatives, la principale cause d'incertitude provient généralement de l'imprécision. Par ailleurs, il est parfois possible de réduire une incertitude en augmentant l'imprécision comme le montre l'exemple suivant :

- Information initiale : « la note d'uni sur cette section est probablement supérieure à 6 ».

☞ L'incertitude est définie par le terme probablement tandis que l'imprécision est représentée par l'intervalle [6 ; 10].

☞ En affirmant que « la note d'uni sur cette section est très certainement supérieure à 4 », on abaisse le degré d'incertitude (de probablement à très certainement) tout en ayant délibérément augmenté le niveau d'imprécision (de l'intervalle [6 ; 10] à l'intervalle [4 ; 10]).

Lors du processus de fusion des informations, d'autres notions peuvent apparaître :

¹ Une information a une dimension plus large que la donnée car elle englobe en plus la connaissance accumulée sur les moyens et conditions de mesure. Malgré cette différence de sens, les expressions « fusion de données » et « fusion d'informations » seront considérées comme équivalentes et indifféremment utilisées dans la suite du mémoire.

- Le **conflit** entre deux informations renvoie à leur degré de contradiction [32]. D'une façon générale, il y a conflit lorsqu'au moins une des informations à traiter provient d'une source non fiable voire défallante.
- L'**ambiguïté** d'une information renvoie à la pluralité de ses interprétations [33]. Elle découle, la plupart du temps, de niveaux d'imprécision et d'incertitude élevés mais elle peut également provenir d'une description incomplète du cadre de discernement.
- L'**incomplétude** est le manque d'informations apporté par la source. Elle peut se mesurer par la différence de la quantité d'information réellement fournie par la source et de la quantité d'information que la source devrait fournir [34].

5.1.3 Caractéristiques intrinsèques des sources et des informations

On peut établir des liens entre les caractéristiques intrinsèques des sources et celles des informations qu'elles délivrent. Par exemple :

- Une source non répétable produit des informations plus imprécises et plus incertaines qu'une source répétable. Il est en de même si on considère des défauts de reproductibilité pour un groupe de sources donné.
- Deux sources présentant, entre elles, un écart important par rapport à leur propre répétabilité (et de ce fait une mauvaise reproductibilité), peuvent produire, sur les mêmes sections, des informations conflictuelles ou ambiguës.
- Indépendamment de ce qui précède, une ou des sources présentant un écart de justesse important produiront des informations pouvant être précises mais incertaines voire erronées.

Finalement, il conviendra donc, quand on voudra évaluer le degré de confiance (la fiabilité) qu'on apporte à une information (et donc le poids qu'on lui donne dans l'analyse) de considérer à la fois la reproductibilité et la justesse du parc de sources.

5.2 Principes de la fusion d'informations et architecture de traitement

Dans notre solution d'auscultation, l'opération de fusion d'informations consiste avant tout à agréger un ensemble de données entrantes pour en faire émerger une information finale que l'on souhaite synthétique. On sait également, de par les conclusions du chapitre précédent, que les mesures effectuées par les véhicules traceurs risquent d'être de qualité variable car soumises à des facteurs d'imprécisions et/ou de variabilité. En conséquence, nous avons besoin d'outils qui exploitent et gèrent au mieux ces deux aspects (agrégation et gestion de la qualité des données) ; c'est l'objectif des méthodes de fusion de données.

Dans cette section, après une introduction générale portant sur la fusion d'informations, nous présentons la méthodologie retenue pour traiter les données collectées par les

véhicules traceurs. Cette méthode de traitement doit remplir un certain nombre de fonctions (Cf. spécifications dans le chapitre 2). Aussi, dans un premier temps, nous avons tenté d'apporter une réponse globale à ces objectifs par l'établissement d'un schéma de principe opérationnel. Afin d'atteindre un certain degré de performance et de robustesse, nous avons par la suite intégré, au sein de ce schéma, des mécanismes scientifiques provenant des méthodes de fusion.

5.2.1 Introduction générale sur la fusion d'informations

A – Généralités

La fusion de données est une discipline relativement récente qui a accompagné le déploiement de plus en plus massif de capteurs dans diverses applications (aéronautique, robotique, transports...). L'augmentation du nombre d'instruments de mesures déployés a mécaniquement provoqué l'augmentation du nombre de données à traiter ce qui a fait émerger de nouvelles problématiques : gain en précision, gain en fiabilité, gestion de la redondance des informations, gestion des données conflictuelles, etc. Depuis quelques années, la fusion de données est fortement connotée « fusion multi-capteurs » renvoyant au traitement de données homogènes et/ou hétérogènes issues de capteurs de différentes natures (ex : fusion des informations provenant d'une caméra avec celles délivrées par un radar).

La fusion de données et la fusion d'informations ont fait l'objet de plusieurs définitions qui diffèrent les unes des autres selon le contexte d'application. Celle qui est la plus proche de notre problématique est la suivante :

« La fusion d'informations consiste à combiner des informations issues de plusieurs sources afin d'améliorer la prise de décision » [29].

Cette définition rappelle en effet que le processus de fusion conduit au choix d'une valeur (ou d'un ensemble de valeurs) correspondant directement ou indirectement à l'indicateur qui permet de donner une estimation de l'état d'un système (dans notre cas, le niveau d'uni de la chaussée).

Bien qu'issues d'un nombre limité de formalismes mathématiques, il existe actuellement une grande diversité de techniques de fusion puisque, généralement, chacune d'entre elles a été développée pour les besoins d'une application particulière. En outre, il est tout à fait possible que, pour un même jeu de données, deux outils de fusion conduisent à des résultats différents car chacun d'entre eux exploite, à sa manière, les propriétés des données (ex : niveau de redondance, degré d'incertitude, etc.).

Pour finir, la fusion de données intervient principalement dans les actions suivantes [28] :

- Reconnaissance et identification d'objets ;
- Association de données (classification) ;
- Estimation d'un paramètre ou de l'état d'un système.

Cette dernière action est celle qui relève de notre problématique car l'objectif est bel et bien d'estimer le niveau « réel » de l'uni à l'aide d'un ensemble de mesures fournies par des sources différentes (véhicules traceurs).

B – Les principales étapes de la fusion d'informations

Quel que soit le cadre mathématique choisi, le processus de fusion est très souvent articulé autour de trois étapes majeures :

- La représentation de la connaissance ;
- L'opération de combinaison (ou selon les cas, d'association, d'estimation...);
- L'opération de décision.

- Dans le domaine de la fusion, la première chose à faire est de **représenter la connaissance** que l'on a des informations à traiter. Cette opération est en général loin d'être évidente car elle a pour but de retranscrire les différentes facettes des informations recueillies (ex : degré d'incertitude) en fonctions mathématiques. Cette étape consiste donc à choisir un cadre mathématique dans lequel l'information va pouvoir s'exprimer (ex : probabilité, distribution, objet géométrique, etc.) et à l'adapter au référentiel de mesure.

Les étapes suivantes sont généralement beaucoup moins délicates puisqu'elles intègrent des opérateurs mathématiques qui agissent de façon « mécanique ». En contrepartie, chacune d'entre elles rassemblent un nombre considérable de techniques ; la difficulté est alors de choisir la ou les plus adéquate(s).

- L'étape de **combinaison** consiste à assembler les informations modélisées au moyen d'opérateurs mathématiques. Selon les propriétés de ces derniers, le résultat peut prendre une ou plusieurs valeurs mais toujours de format identique aux informations à combiner. Les opérateurs se distinguent les uns des autres par leurs propriétés mathématiques (Tab. 5.1) et par leurs comportements (Tab 5.2).

Propriétés mathématiques		
Soit * un opérateur de combinaison et E, F, G trois ensembles à fusionner		
Associativité	Commutativité	Idempotence
Si * est associatif alors $(E * F) * G = E * (F * G)$	Si * est commutatif alors $E * F = F * E$	Si * est idempotent alors $E * E = E$

Tableau 5.1 : Principales propriétés mathématiques d'un opérateur de combinaison

Comportement des opérateurs		
Sévère	Indulgent	Prudent
<ul style="list-style-type: none"> ▪ L'opérateur est discriminant et a tendance à restreindre l'ensemble fusionné ; ▪ En algèbre, il renvoie à des opérations conjonctives (opérateur ET) ; ▪ Il facilite la prise de décision car le nombre de propositions finales est relativement faible. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ L'opérateur est tolérant et a donc tendance à étendre l'ensemble fusionné ; ▪ En algèbre, il renvoie à des opérations disjonctives (opérateur OU) ; ▪ Il n'aide pas la prise de décision car le nombre de propositions finales est généralement très élevé. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ L'opérateur a tendance à chercher le meilleur compromis en s'adaptant au niveau de concordance des informations. Ainsi, quand celles-ci sont concordantes, il se montre conjonctif et lorsqu'elles sont discordantes, il est plutôt disjonctif.

Tableau 5.2 : Principaux comportements des opérateurs de combinaison

- La prise de **décision** achève le processus de fusion en sélectionnant une ou plusieurs valeurs de l'ensemble combiné. Généralement, la décision correspond à la minimisation ou à la maximisation d'une fonction mathématique appliquée à l'ensemble combiné.

L'ensemble des étapes énumérées précédemment forme le bloc-fusion. La plupart des processus de fusion respectent cet agencement qui peut néanmoins se décliner en plusieurs architectures.

5.2.2 Proposition d'un schéma opérationnel

Dans cette partie consacrée au traitement des données fournies par les véhicules traceurs, l'objectif opérationnel est de fournir au gestionnaire un outil (logiciel) qui lui permettra de connaître, pour la période qui l'intéresse, le niveau d'uni d'une partie ou de l'intégralité de son réseau routier.

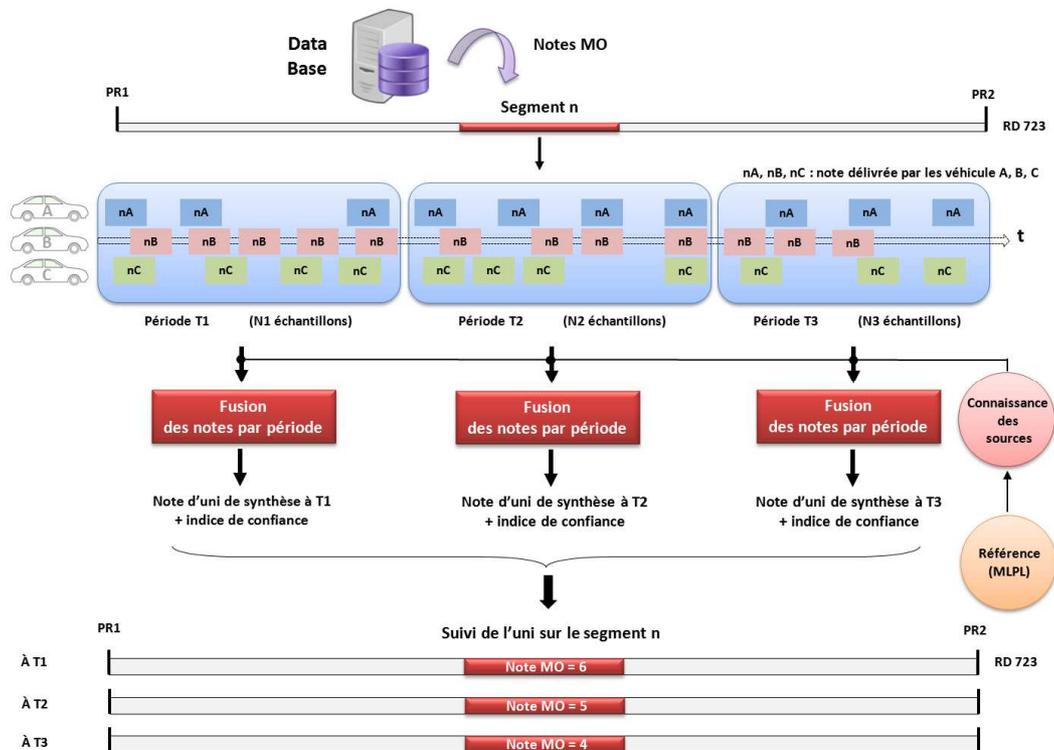


Figure 5.2 : Proposition d'un schéma opérationnel de traitement des données

Pour y parvenir, on suppose que le gestionnaire aura à sa disposition une base de données à partir de laquelle il pourra effectuer un certain nombre de requêtes comme par exemple l'importation de toutes les notes d'uni de la bande MO recueillies sur chaque segment de la route X, sens positif, lors du premier trimestre 2014. Une fois les données sélectionnées¹, celles-ci sont attaquées par des algorithmes de calcul assurant le processus de fusion dont la finalité est de délivrer, en sortie, une note d'uni de synthèse assortie d'un indicateur de confiance.

¹ Pour chaque période sélectionnée, on fera l'hypothèse que chaque véhicule traceur aura délivré un minimum de trois notes d'uni pour la section de route considérée (condition de répétabilité).

Par ailleurs, ce schéma opérationnel prévoit également l'utilisation de mesures de références (quand elles sont disponibles) ainsi que des éléments de sortie issus de l'analyse des mesures (ex : écart-type de répétabilité) pour caractériser les sources et les informations qu'elles ont produites.

Pour la suite de l'étude, il est important de comprendre que ce schéma répond à une logique de suivi de l'uni par intervalles de temps (ou périodes), la durée de cet intervalle étant choisi par le gestionnaire¹. Dans ce contexte, toutes **les données à traiter sont donc simultanément disponibles**.

5.2.3 Architectures de fusion

A – Exemples d'architectures de fusion

Dans le domaine de la fusion de données, il existe plusieurs types d'architectures de traitement (cycliques, bouclées, coopératives, etc.) [35,36,37]. Compte-tenu de l'organisation du schéma opérationnel illustré précédemment, nous nous sommes orientés vers un type d'architecture « verticale » pour lequel on dénombre principalement trois systèmes qui diffèrent les uns des autres par le niveau de centralisation des informations à traiter.

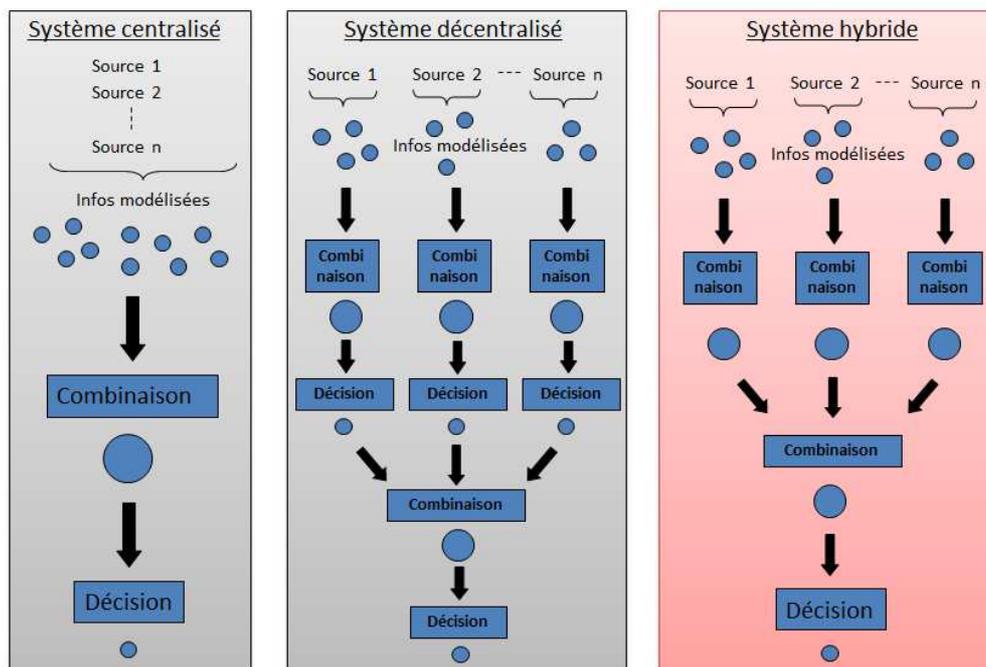


Figure 5.3 : Schémas illustrant les principales architectures de fusion

¹ à la différence d'un schéma où le niveau d'uni serait continuellement et automatiquement mis à jour à chaque arrivée de donnée.

1^{ère} architecture : **système centralisé**

Dans ce système, les informations provenant de l'ensemble des sources de mesures (véhicules traceurs) sont d'abord modélisées avant d'être combinées globalement. Le processus de fusion s'achève alors par une prise de décision appliquée à l'ensemble combiné. Cette architecture est la plus directe car elle met en œuvre le moins d'étapes possibles. En revanche, elle offre trois principaux inconvénients :

- L'opération de combinaison est alourdie car elle doit gérer un nombre très élevé d'informations entrantes ;
- En fonction de l'opérateur de combinaison choisi, la présence d'un nombre élevé d'informations conflictuelles peut compromettre le processus de fusion ;
- Il n'est pas possible d'assurer un suivi par source de mesures et donc de prendre en compte les caractéristiques spécifiques de chacune (répétabilité, justesse...).

2^{ème} architecture : **système décentralisé**

Contrairement au système précédent, celui-ci est basé sur une analyse locale des informations. La première partie d'une architecture décentralisée consiste à appliquer des schémas bloc-fusion par source de mesures (*i.e.* par passage du véhicule, chaque passage étant la source d'une mesure). Ce traitement parallèle débouche alors sur des prises de décision locales qui constituent les éléments d'entrée de la seconde partie du processus : une combinaison et une décision globales.

Un des avantages majeurs de cette architecture réside dans les possibilités de connaissances et de suivi des sources de mesures. Grâce à ces capacités de caractérisation, il devient même envisageable d'adapter les règles de combinaison et de décision pour chacune d'entre elles. Néanmoins, le prix à payer pour disposer de ces atouts est la perte d'informations causée par les prises de décisions intermédiaires.

3^{ème} architecture : **système partiellement décentralisé (hybride)**

À mi-chemin entre les deux systèmes précédents, le système partiellement décentralisé se caractérise par une étape de combinaison mixte (combinaison locale puis combinaison globale) et une prise de décision globale.

Cette architecture offre un excellent compromis entre les forces et faiblesses des systèmes présentés précédemment. En effet, le caractère décentralisateur du système permet à la fois de suivre les sources de mesure et de répartir la charge d'opérations à effectuer. En outre, le fait de procéder à des combinaisons locales mais sans prises de décision permet de condenser les informations sans occasionner de perte significative. Pour finir, la décision se fait de façon centralisée parmi l'ensemble combiné global.

Donc, dans la mesure où ces propriétés semblent être les plus adaptées aux besoins de l'étude, l'architecture partiellement décentralisée est celle qui a été retenue par la suite.

B – Architecture retenue

Pour ces travaux, nous avons retenu un schéma de traitement s'inspirant de l'architecture partiellement décentralisée. Ce schéma, appliqué de façon individuelle à chacune des bandes d'ondes caractéristiques de l'uni (PO, MO et GO) est représentée sur la figure suivante (Fig. 5.4).

Ce schéma de traitement repose sur l'enchaînement des parties suivantes :

- Une fusion intra-véhiculaire (intra-source) dans laquelle les informations sont modélisées puis combinées localement ;
- Une fusion inter-véhiculaire (inter-sources) comprenant une combinaison globale suivie d'une prise de décision d'où ressort la note d'uni de synthèse.

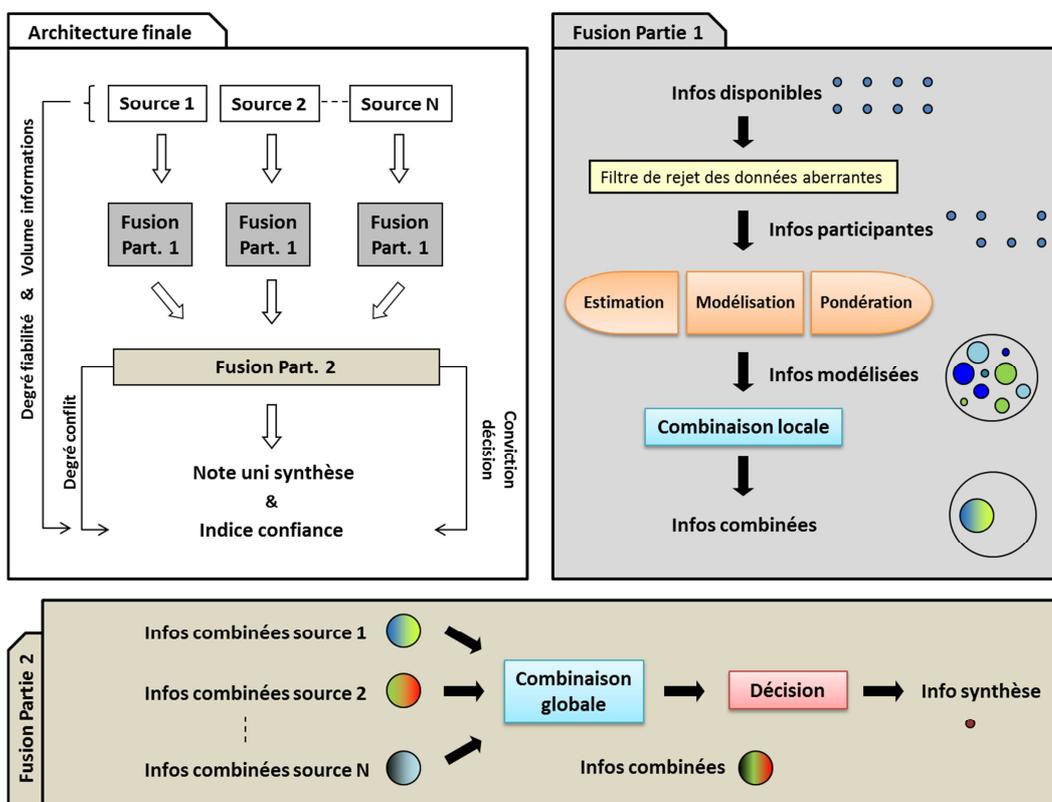


Figure 5.4 : Schéma décrivant l'architecture de fusion retenue incluant les différentes étapes conduisant au calcul d'une information de synthèse

Ces deux parties sont précédées de deux étapes présentées dans les paragraphes suivants : le filtrage des données aberrantes et l'attribution d'un coefficient de fiabilité calculé pour chacune des sources (opération de pondération). En sortie, conformément aux besoins opérationnels, le processus de traitement délivre une note d'uni de synthèse accompagnée d'un indicateur de confiance pour chaque segment de route du parcours.

5.3 Pré-traitement au processus de fusion : rejet des données aberrantes et pondération des sources de mesures

La phase de pré-traitement est composée de deux fonctionnalités : la suppression des données considérées comme aberrantes¹ et l'affectation d'un coefficient de pondération à chacun des véhicules traceurs selon leur degré de fiabilité.

A – Rejection des données aberrantes

Afin de placer le processus de fusion dans de bonnes conditions, un filtre a été mis en place en amont de ce processus de sorte à rejeter les données les plus douteuses. Ce filtrage, basé sur une analyse intra-véhiculaire, est de nature statistique. Toutes les notes d'uni issues d'une même source sur un même segment de route et pour une même période d'analyse n'appartenant pas à l'intervalle I_F^{source} suivant sont exclues :

$$I_F^{source} = [\mu^{source} - 2\sigma^{source}, \mu^{source} + 2\sigma^{source}] \quad (5.4)$$

où μ^{source} est la moyenne des notes d'uni produites par la source sur ce segment et σ^{source} l'écart-type caractéristique de ce type de sources.

Ce filtrage est donc fondé sur le degré de répétabilité des informations délivrées par une même source. Sur une période d'observation relativement courte, on s'attend en effet à ce que les notes délivrées par un même véhicule traceur soit assez proches les unes des autres. Par cette procédure assez simple à mettre en œuvre, on arrive ainsi à éliminer les données aberrantes sans pour autant être trop sélectif² car un intervalle plus étroit augmenterait le risque de perte d'informations « utiles ».

B – Pondération des sources de mesures selon leur degré de fiabilité

Cette étape vise à pondérer chacun des véhicules traceurs (sources de mesure) participant à la collecte d'informations à partir d'une analyse menée sur une section de calibrage. À cette fin, nous appellerons **degré de fiabilité** d'une source, une valeur w établie en fonction des niveaux de répétabilité et de justesse de cette même source par le biais d'une fonction de fiabilité notée Θ_w à valeurs dans $[0,1]$.

La fonction de fiabilité a été établie de manière à refléter le niveau de confiance que l'on peut accorder aux informations produites par une source compte tenu de son degré de dispersion global, c'est-à-dire par rapport à sa répétabilité et à sa justesse. Ainsi, plus une source délivrera des informations justes et répétables, plus elle sera considérée comme fiable et plus le coefficient w associé à la source tendra vers 1.

¹ Opération permettant de supprimer, par exemple, les notes d'uni délivrées par des véhicules traceurs s'écartant significativement des bandes de roulement ou roulant à vitesse très réduite.

² On rappelle à titre d'exemple que pour une distribution suivant une loi normale, la probabilité pour que les mesures appartiennent à cet intervalle est d'environ 0.975 (niveau de confiance de 97.5%).

La fonction de fiabilité Θ_w a été conçue au moyen d'une combinaison équilibrée d'une **fonction de répétabilité** notée Θ_r et d'une **fonction de justesse** notées Θ_j toutes les deux à valeurs dans $[0,1]$. Elle s'écrit :

$$\begin{aligned} \Theta_w : [0,10] &\rightarrow [0,1] \\ \sigma_r, \mu_j &\mapsto \Theta_w(\sigma_r, \mu_j) = \frac{\Theta_r(\sigma_r) + \Theta_j(\mu_j)}{2} \end{aligned} \quad (5.5)$$

où, pour une source j :

- σ_r correspond à la moyenne des écarts-type de répétabilité sur chacun des segments composant la section de calibrage ;
- μ_j représente la moyenne des écarts de justesse sur chacun des segments composant la section de calibrage entre les mesures délivrées par la source j et les mesures de référence fournies par un appareil dédié.

Afin de tenir compte du fait que le potentiel de détection de défauts d'uni par un véhicule traceur est différent selon la bande d'ondes considérée (Cf. section 3.4), nous avons choisi de différencier les fonctions de fiabilité : l'une est dédiée à l'analyse des notes PO (Θ_w^{PO}) et l'autre est destinée à l'analyse des notes MO et GO (Θ_w^{MGO}). Ces deux fonctions s'écrivent alors :

$$\Theta_w^{PO}(\sigma_r, \mu_j) = \frac{\Theta_r^{PO}(\sigma_r) + \Theta_j^{PO}(\mu_j)}{2} \quad (5.6)$$

$$\Theta_w^{MGO}(\sigma_r, \mu_j) = \frac{\Theta_r^{MGO}(\sigma_r) + \Theta_j^{MGO}(\mu_j)}{2} \quad (5.7)$$

Dans les paragraphes suivants, nous présentons successivement la manière dont est obtenue la fonction de fiabilité d'une source au moyen de ces fonctions ainsi que la méthode suivie pour les élaborer.

▪ Obtention du degré de fiabilité d'une source de mesures :

La fonction de fiabilité Θ_w d'une source, dépendante des fonctions de répétabilité $\Theta_r(\sigma_r)$ et de justesse $\Theta_j(\mu_j)$, est calculée à partir de toutes les mesures prises sur chacun des L segments composant la section de calibrage. Sur chaque segment k , une source j délivre n mesures d'uni (une mesure étant notée x). On note μ_k la moyenne des mesures sur ce segment.

La variable σ_r s'écrit :

$$\sigma_r = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu_k)^2}{n}} \quad (5.8)$$

En considérant maintenant que l'on dispose de mesures de références sur chacun des segments du parcours (M_k désignant la mesure de référence sur le segment k), la variable μ_j s'écrit :

$$\mu_j = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L \sqrt{(\mu_k - M_k)^2} \quad (5.9)$$

Afin de déterminer le coefficient de pondération w de la source j , la suite de la procédure consiste à calculer $\Theta_r(\sigma_r)$ et $\Theta_j(\mu_j)$.

▪ Méthode suivie pour concevoir les fonctions de répétabilité :

Les fonctions de fiabilité, de répétabilité et de justesse sont des concepts propres à ces travaux de thèse ; leurs expressions mathématiques restent donc à trouver. Si celle correspondant à la fonction de fiabilité a déjà été présentée (relation 5.5), les expressions des fonctions de répétabilité et de justesse doivent être définies.

La fonction de répétabilité est la plus facile à appréhender notamment grâce aux enseignements et aux éléments métrologiques extraits du chapitre relatif à la variabilité des mesures d'uni effectuées par les véhicules traceurs (Cf. chapitre 4). On rappelle en effet que la fonction de répétabilité Θ_r prend comme variable d'entrée σ_r , l'écart-type de répétabilité d'une source de mesures dans son contexte opératoire c'est-à-dire en intégrant un certain nombre de facteurs de variabilité comme :

- $\sigma_r^{capteur}$ et $\sigma_r^{distance}$ qui sont véritablement intrinsèques au groupe de sources intervenant sur le réseau ;
- σ_r^{trace} et $\sigma_r^{vitesse}$ qui sont davantage liés à la façon de mettre en œuvre ces sources.

En outre, la fonction de répétabilité doit respecter un certain nombre de critères :

- être définie sur $[0,10]$;
- être à valeurs dans $[0,1]$;
- tendre vers 1 quand les mesures fournies par la source sont fortement répétables (c'est-à-dire quand σ_r tend vers 0) ;
- tendre vers 0 quand les mesures fournies par la source ne sont pas du tout répétables ;

- être monotone.

Pour construire l'ossature de cette fonction, nous nous sommes donc appuyés sur certaines valeurs spécifiques ou seuils issus des conclusions métrologiques du chapitre 4 (Cf. figure 4.17). Ces seuils, au nombre de trois (notés α_1 , α_2 et α_3) sont présentés et définis ci-après.

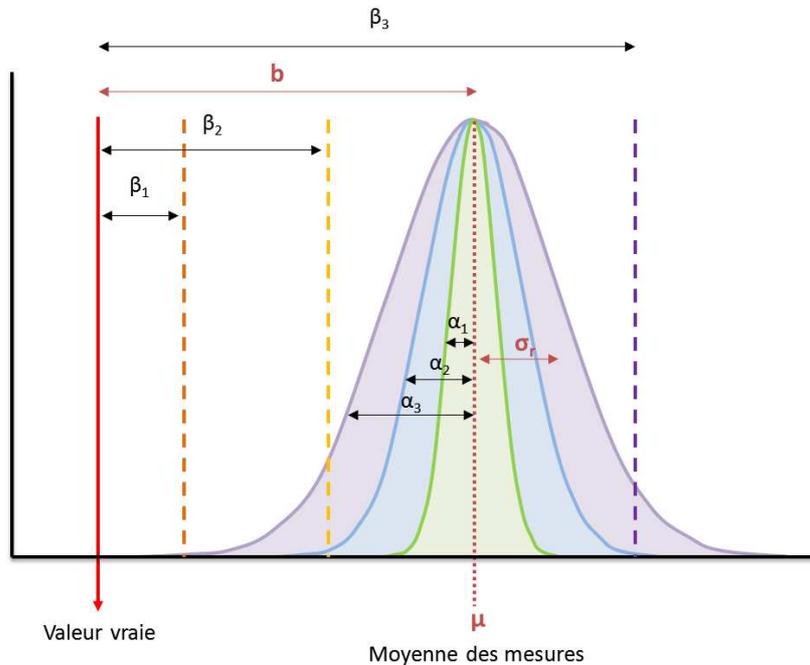


Figure 5.5 : Schéma illustrant la méthode choisie pour caractériser les niveaux de répétabilité et de justesse de chaque source de mesure.

Cette méthode s'appuie sur des valeurs « seuils » (notées α_1 , α_2 et α_3 pour la fonction de répétabilité et notées β_1 , β_2 et β_3 pour la fonction de justesse).

▪ *Seuil minimal (α_1)*

Pour les valeurs de σ_r inférieures ou égales à ce seuil la fonction de répétabilité doit tendre vers 1. Par cette démarche, on admet qu'il existe une valeur de dispersion minimale propre à la méthode d'auscultation.

Le seuil de tolérance minimale α_1 est calculée à partir des valeurs de répétabilité moyenne des facteurs $\sigma_{r,moyen}^{capteur}$, $\sigma_{r,moyen}^{distance}$, $\sigma_{r,moyen}^{trace}$ et $\sigma_{r,moyen}^{vitesse}$ (surface jaune sur la Figure 4.17) estimées sur la section la plus dégradée du circuit d'expérimentation (là où la dispersion est la plus forte) :

$$\alpha_1 = \frac{\sigma_{r,moyen}^{capteur} + \sigma_{r,moyen}^{distance} + \sigma_{r,moyen}^{trace} + \sigma_{r,moyen}^{vitesse}}{4} \tag{5.10}$$

▪ *Seuil à mi-hauteur (α_2)*

Lorsque l'écart type de répétabilité de la source s'approche d'un second seuil, la fonction de répétabilité doit tendre vers 0.5. Ce seuil à mi-hauteur est calculé à partir des valeurs de dispersion maximales des facteurs $\sigma_{r,max}^{capteur}$, $\sigma_{r,max}^{distance}$, $\sigma_{r,max}^{trace}$ et $\sigma_{r,max}^{vitesse}$ (surface rouge sur la Figure 4.17) observée sur la section dégradée. Dans ces conditions, nous avons choisi de définir α_2 de la façon suivante :

$$\alpha_2 = \sqrt{(\sigma_{r,max}^{capteur})^2 + (\sigma_{r,max}^{distance})^2 + (\sigma_{r,max}^{trace})^2 + (\sigma_{r,max}^{vitesse})^2} \quad (5.11)$$

▪ *Seuil maximal (α_3)*

Lorsque l'écart-type de répétabilité de la source dépasse une certaine valeur, on force la fonction de répétabilité à tendre vers 0. Par cette démarche, on admet qu'il existe un seuil maximal au-delà duquel la source, à travers son écart-type de répétabilité, est jugée totalement non répétable. La valeur du seuil maximal α_3 est définie de la façon suivante :

$$\alpha_3 = 2\alpha_2 \quad (5.12)$$

Après avoir défini analytiquement ces trois seuils puis de calculer leurs valeurs numériques sur la section de calibrage¹, l'étape suivante consiste à trouver une fonction mathématique qui « passe » par, ou à proximité, de ces valeurs spécifiques. Nous avons opté ici pour une fonction de type exponentielle quadratique décroissante, qui après ajustement sur les seuils, s'écrit :

$$\Theta_r^{PO}(\sigma_r) = \exp(-0.08\sigma_r^2) \quad (5.13)$$

$$\Theta_r^{MGO}(\sigma_r) = \exp(-0.32\sigma_r^2) \quad (5.14)$$

D'après les essais rapportés au chapitre 4, les valeurs de ces seuils sont :

- $\alpha_1 = 0.6$, $\alpha_2 = 3$ et $\alpha_3 = 6$ pour la bande PO ;
- $\alpha_1 = 0.5$, $\alpha_2 = 1.5$ et $\alpha_3 = 3$ pour les bandes MO et GO ;

¹ Pour ces travaux de thèse, cette section particulière correspond à l'ensemble du circuit-test (Cf. section 4.2) pour lequel des mesures de référence sont disponibles pour chacun des segments de route.

Les tracés de ces fonctions sont représentés sur la figure suivante :

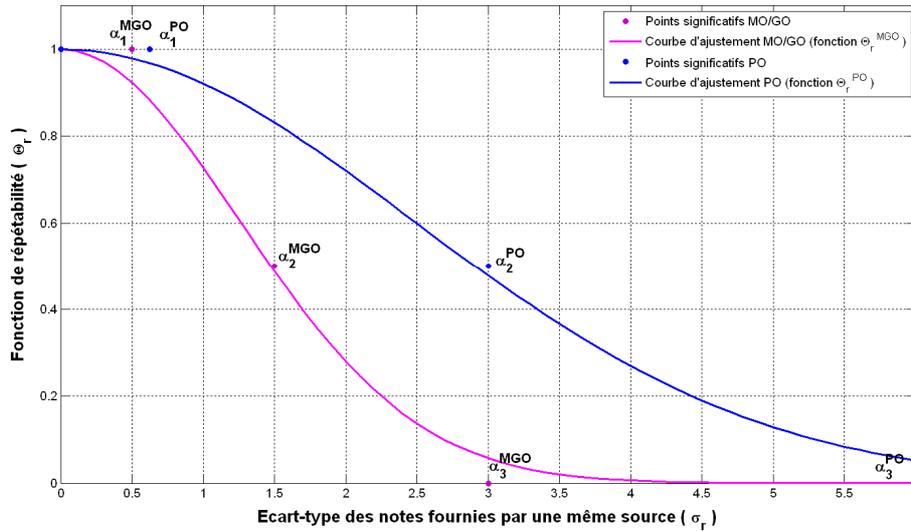


Figure 5.6 : Fonctions de répétabilité élaborées à partir de valeurs significatives expérimentales

▪ Méthode suivie pour concevoir les fonctions de justesse :

Comme pour la fonction de répétabilité, la fonction de justesse doit répondre à un certain nombre de critères :

- être définie sur [0,10] ;
- être à valeurs dans [0,1] ;
- tendre vers 1 quand les mesures fournies par la source sont très justes (c'est-à-dire quand μ_j tend vers la valeur de référence);
- tendre vers 0 quand les mesures fournies par la source ne sont pas du tout justes (biais important) ;
- être monotone.

À la différence de la fonction de répétabilité, nous ne disposons que de très peu d'éléments expérimentaux pour la construction de la fonction de justesse. Pour cette raison, et afin de garantir une symétrie vis-à-vis de la fonction de fiabilité, la fonction de justesse reprend les mêmes expressions mathématiques que la fonction de répétabilité à la différence près que les valeurs seuils sont désignées par les variables β_1 , β_2 et β_3 . Nous rappelons que le calcul de cette fonction nécessite de disposer d'une valeur de référence pour chaque segment de route et que la variable d'entrée correspond à l'estimation du biais de mesure d'une même source :

$$\Theta_j^{PO}(\mu_j) = \exp(-0.08\mu_j^2) \tag{5.15}$$

$$\Theta_j^{MGO}(\mu_j) = \exp(-0.32\mu_j^2) \tag{5.16}$$

▪ Synthèse sur les fonctions de fiabilité, de répétabilité et de justesse :

Les fonctions de fiabilité ont été bâties afin d'intégrer les niveaux de répétabilité et de justesse des sources de mesures. Elles permettent ainsi d'apporter de la connaissance supplémentaire aux données initiales ce qui est particulièrement utile pour hiérarchiser les sources de mesure par exemple (Cf. section 5.4.3.B). Ces fonctions, construites à partir de points singuliers (seuils α_1 , α_2 et α_3 pour la fonction de répétabilité) dont les valeurs numériques ont été calculées sur la base de données expérimentales, délivrent des coefficients de pondération qui sont proches de 1 quand la source est supposée fiable (c'est-à-dire juste et répétable) et proches de 0 quand celle-ci est supposée non fiable.

La logique de construction des fonctions Θ_r et Θ_j fait intervenir un certain nombre d'hypothèses. On suppose ainsi que chaque véhicule traceur effectue un minimum de trois passages sur chaque segment de route (condition de répétabilité) et que, de surcroît, ce même véhicule passe sur une section de calibrage pour laquelle des mesures de référence issues d'appareils dédiés à la mesure d'uni (APL, MLPL, UniBox) sont disponibles.

5.4 Les méthodes de fusion investiguées

Dans la mesure où l'appel à des outils de fusion d'informations est un procédé novateur dans l'exploitation des notes d'uni, un large spectre méthodologique a été exploré. Ce spectre englobe les formalismes les plus fréquemment rencontrés en fusion d'informations à savoir les approches probabilistes, possibilistes et crédibilistes. Pour chacune d'entre elles, une ou plusieurs méthodes ont été retenues et analysées avant d'être appliquées sur des jeux de données test. Les principales caractéristiques de ces méthodes sont récapitulées dans le tableau suivant :

		FONCTIONS DU PROCESSUS DE FUSION			Numérotation de la méthode
		Représentation de la connaissance	Combinaison	Décision	
FORMALISME	Statistique	Singleton (note)	Moyenne arithmétique pondérée		1
	Probabiliste	Singleton (note)	Filtre de Kalman		2
	Possibiliste	Distribution de possibilité	Opérateur adaptif non-priorisé (mode cascade)	Degré de possibilité maximal	3
			Opérateur adaptatif priorisé	Degré de possibilité maximal	4
			Opérateur généralisé	Degré de possibilité maximal	5
	Crédibiliste	Jeu de masses de croyance	Opérateur de Dempster-Shafer	- Maximum de croyance - Maximum de probabilité pignistique	6
			Opérateur de Dubois et Prade	- Maximum de croyance - Maximum de probabilité pignistique	7
		Jeu de masses de croyance spécialisées	Opérateur de Dempster-Shafer	- Maximum de croyance - Maximum de probabilité pignistique	8

Tableau 5.3 : Liste des méthodes de fusion investiguées

5.4.1 Méthode de fusion dans un cadre statistique

L'application d'une moyenne arithmétique pour fusionner un ensemble de notes d'uni est la solution la plus naturelle et la plus simple à mettre en œuvre. Cet estimateur, bien que rudimentaire, reste l'un des plus communs et, à ce titre, il peut être considéré comme une méthode « témoin » dans ces travaux. Afin de tenir compte du niveau de fiabilité de chacune des sources de mesures, nous avons utilisé l'opérateur de moyenne arithmétique pondérée.

Pour chaque segment du circuit-test, cet opérateur s'écrit de la façon suivante :

- Pour la fusion intra-véhiculaire de n mesures faites par une source j de coefficient de pondération w_j ,

$$\bar{x}_j = \frac{1}{nw_j} \sum_{i=1}^n w_j x_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{5.17}$$

Dans ce cas, l'opérateur correspond à la moyenne arithmétique simple puisque les coefficients de pondération de chaque mesure sont égaux (à celui de la source).

- Pour la fusion inter-véhiculaire de J sources,

$$\bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^J w_j \bar{x}_j}{\sum_{j=1}^J w_j} \quad (5.18)$$

5.4.2 Méthode de fusion dans un cadre probabiliste

Dans le domaine de la fusion de données, le filtrage de Kalman fait partie des techniques relevant du cadre probabiliste les plus rencontrées. Le filtre de Kalman [38, 39] est un filtre bayésien communément utilisé pour traiter des signaux ou des données bruitées notamment dans des systèmes dynamiques.

En se positionnant dans le contexte de l'étude, on pourrait décrire l'action du filtre Kalman comme suit : il s'agit d'un filtre récursif où les mesures fournies par un véhicule traceur (notes d'uni) vont, à chaque itération, mettre à jour le niveau d'uni estimé à partir de mesures précédentes.

Le fonctionnement du filtre de Kalman se fait donc selon deux temps :

- Prédiction de l'état du système (par exemple du niveau d'uni) à partir d'informations passées (état *a priori*);
- Mise à jour (correction) de l'estimation par l'analyse d'une donnée observable (mesure).

L'action de filtrage consiste alors à minimiser la variance de l'erreur d'estimation *a posteriori* pour proposer le meilleur estimateur possible.

A – Expression générale

Pour décrire mathématiquement l'action du filtre de Kalman, il faut partir de la représentation d'état d'un système linéaire dans sa forme discrétisée :

$$\begin{cases} x_{k+1} = A x_k + B u_k + g \\ y_{k+1} = H x_{k+1} + v \end{cases} \quad (5.19)$$

où $x_k = x(k)$ et $y_k = y(k)$ sont respectivement les vecteurs d'état et de mesure (ou d'observation) à l'instant k .

Ce modèle, constituée de deux équations (équation d'état et équation d'observation), fait intervenir les paramètres suivants :

- x_k : vecteur d'état du système à l'étape k ;
- y_k : vecteur de sortie (ou d'observation) à l'étape k ;
- u_k : vecteur commande d'entrée du système ;

- A : matrice d'état (ou d'évolution) ;
- B : matrice de commande ;
- H : matrice de mesure (ou d'observation) ;
- g : vecteur bruit de processus ;
- v : vecteur bruit de mesure¹.

Les vecteurs de bruit de processus g et de mesures v sont des signaux aléatoires gaussiens centrés en 0. Ils sont respectivement associés aux matrices de covariance notées Q et R .

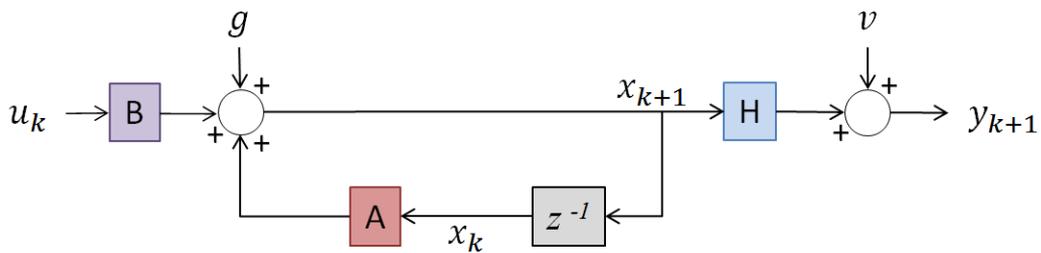


Figure 5.7 : Diagramme de représentation d'état d'un système

À partir de ce modèle, le filtre de Kalman va essayer de déterminer le meilleur estimateur possible du vecteur d'état à l'étape k (noté \hat{x}_k) par la minimisation de l'erreur portée par la matrice de covariance d'erreur d'estimation (notée P_k). Le diagramme de ce filtre est donné ci-après.

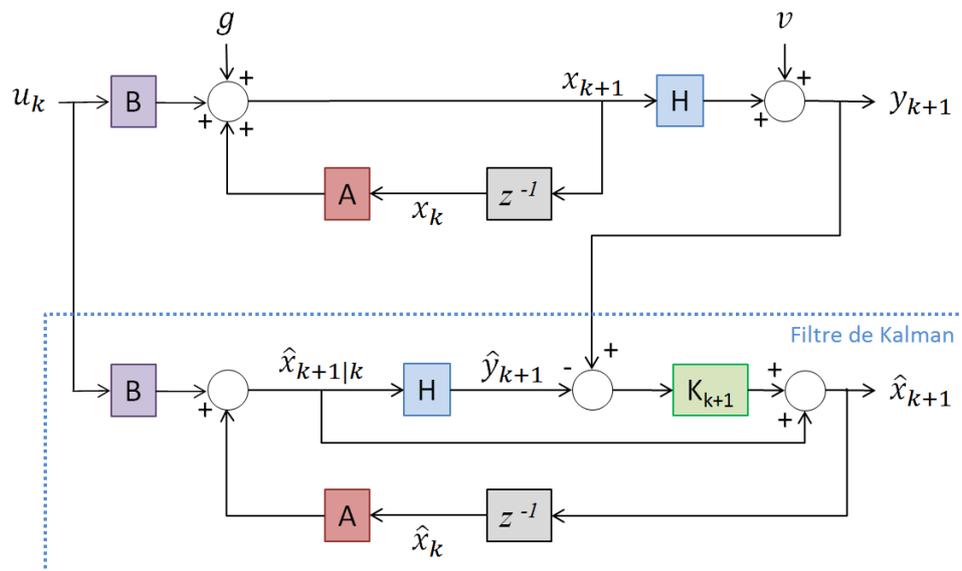


Figure 5.8 : Diagramme du filtre de Kalman

¹ Les bruits de processus et de mesure sont généralement indépendants du temps ou de l'itération.

Le procédé de calcul correspondant à l'utilisation du filtre de Kalman est le suivant :

▪ **Initialisation** des variables ($k=0$)

Pour amorcer le processus de filtrage, il faut définir les valeurs initiales de plusieurs variables :

- \hat{x}_0 ;
- P_0 : matrice de covariance de l'erreur d'estimation ;
- Q : matrice de covariance du bruit de processus ;
- R_0 : matrice de covariance du bruit de mesure ;

▪ **Prédiction** d'évolution pour l'instant $k+1$

$$\begin{cases} \hat{x}_{k+1|k} = A \hat{x}_{k|k} + B u_k \\ P_{k+1|k} = A P_{k|k} A^T + Q \end{cases} \quad (5.20)$$

▪ **Correction** de l'état prédit par l'apport de la mesure à l'instant $k+1$

$$\begin{cases} K_{k+1} = P_{k+1|k} H^T (H P_{k+1|k} H^T + R)^{-1} \\ \hat{x}_{k+1|k+1} = \hat{x}_{k+1|k} + K_{k+1} (y_{k+1} - H \hat{x}_{k+1|k}) \\ P_{k+1|k+1} = (I - K_{k+1} H) P_{k+1|k} \end{cases} \quad (5.21)$$

où K_k représente le gain de Kalman à l'instant k et I la matrice identité (ayant les mêmes dimensions que la matrice P) ; l'expression $K_{k+1} (y_{k+1} - H \hat{x}_{k+1|k})$ correspond à la correction apportée par la mesure.

▪ **Itération** suivante et répétition du processus en posant $k = k + 1$.

Pour s'assurer du bon fonctionnement du filtre, il est courant d'observer l'évolution de la matrice de covariance d'erreur d'estimation P ainsi que celle de la matrice K correspondant au gain de Kalman car elles traduisent respectivement la rapidité de convergence vers la valeur estimée et le niveau de stabilité associé.

D'autre part, l'observation de ces deux matrices permet d'apprécier, à chaque instant, le comportement du filtre : plus l'erreur de prédiction est grande (P élevée), plus le filtre va privilégier l'information portée par la donnée observable (mesure) et *vice versa*.

B – Expression dans le contexte de l'étude

Compte-tenu des caractéristiques des données à fusionner et de l'état du système propres au sujet d'étude, l'écriture des équations du filtre de Kalman s'allège quelque peu. En effet, le vecteur d'état ainsi que les autres paramètres intervenant dans le processus sont

unidimensionnels. De plus, certains paramètres prennent des valeurs simplifiant les systèmes d'équation :

- $A = 1$: la loi de prédiction de l'état du système consiste uniquement à proposer l'état estimé à l'itération précédente.
- $u_k = 0$: il n'y a pas de commande d'entrée au système ;
- $H = 1$: les mesures utilisées pour la phase de correction sont directement celles issues des sources de mesure (véhicules traceurs) ;

Les équations du filtre de Kalman s'écrivent alors :

$$\text{Étape de prédiction :} \quad \begin{cases} \hat{x}_{k+1|k} = \hat{x}_{k|k} \\ P_{k+1|k} = P_{k|k} + Q \end{cases} \quad (5.22)$$

$$\text{Étape de correction :} \quad \begin{cases} K_{k+1} = P_{k+1|k} (P_{k+1|k} + R)^{-1} \\ \hat{x}_{k+1|k+1} = \hat{x}_{k+1|k} + K_{k+1} (y_{k+1} - \hat{x}_{k+1|k}) \\ P_{k+1|k+1} = (1 - K_{k+1}) P_{k+1|k} \end{cases} \quad (5.23)$$

C – Principe d'application du filtre de Kalman pour la fusion des notes d'uni

Le filtre de Kalman remplit parfaitement son rôle d'outil de fusion car il retourne une note d'uni unique correspondant à la meilleure valeur estimée parmi un ensemble de mesures. Cependant, son utilisation ne permet pas de respecter rigoureusement le schéma de fusion retenu (Cf. section 5.2.3), puisque, par exemple, il représente à lui seul les étapes de combinaison et de décision. Ce filtre a donc été appliqué selon la procédure suivante :

- ① Sélection des notes d'uni disponibles pour le segment et la bande d'ondes désirés.
- ② Ordonnancement des notes d'uni disponibles selon deux recommandations :
 - Classement des sources de mesures par ordre croissant du coefficient de pondération (ordre inter-véhiculaire) ;
 - Pour chaque source, disposer les mesures d'uni par ordre chronologique (ordre intra-véhiculaire).
- ③ Application du filtre de Kalman :
 - La valeur initiale de \hat{x}_k correspond à la moyenne des mesures disponibles ;
 - La valeur initiale de la variance du bruit de mesure est choisie à partir des valeurs de variabilité des notes d'uni (Cf. Chapitre 4) ;
- ④ Arrondissage de la dernière note estimée par le filtre au demi-point le plus proche (respect du barème de notation par bandes d'ondes). Cette valeur correspond alors à la note d'uni de synthèse sur le segment de route étudié.

Dans le filtrage de Kalman, les capacités de modélisation des données à traiter sont relativement limitées. L'information prend donc tout simplement la forme d'un singleton (note d'uni) tandis que son imperfection, qui est transmise à travers le niveau du bruit de mesure, renvoie uniquement, dans ce contexte, à la notion d'imprécision.

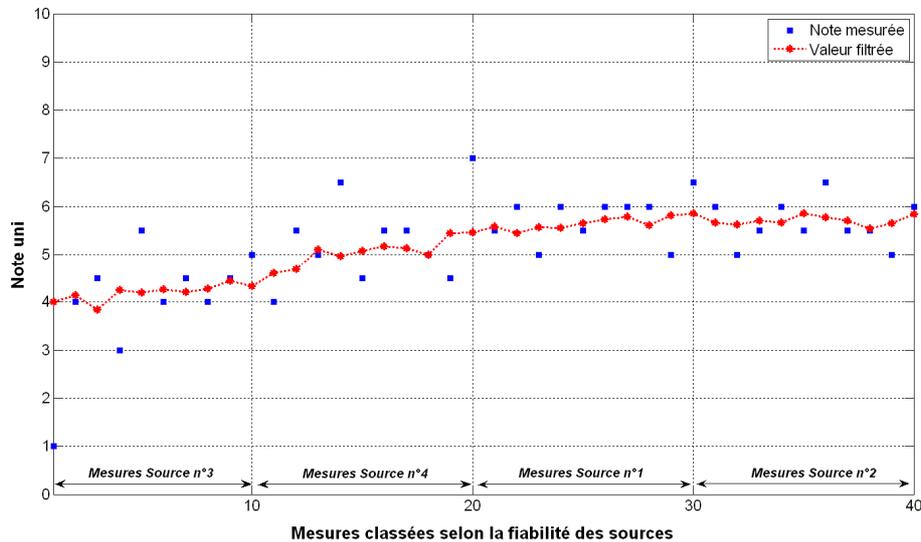


Figure 5.9 : Exemple d'application du filtre de Kalman pour la fusion des notes d'uni sur un même segment de route. La note d'uni de synthèse est issue de la dernière valeur filtrée (à l'itération n°40).

5.4.3 Méthode de fusion dans un cadre possibiliste

Le cadre possibiliste, défini par Zadeh [40] puis développé principalement par Dubois et Prade [41], découle de la théorie des ensembles flous [42]. Il s'agit d'un cadre méthodologique qui a la particularité de proposer, d'une part, un modèle de représentation simultanée des degrés d'imprécision et d'incertitude d'une information et, d'autre part, un nombre élevé d'opérateurs de combinaison.

A – Représentation de la connaissance dans le cadre possibiliste

La construction du modèle servant à exprimer la connaissance dans le cadre possibiliste reprend plusieurs spécificités propres à la théorie des ensembles flous et à la théorie des possibilités. Afin de bien comprendre la structure mathématique du modèle, le début de cette section est consacré à une brève présentation de ces spécificités.

• Éléments mathématiques issus de la théorie des sous-ensembles flous

Soit x un élément quelconque d'un ensemble S .

Dans la théorie des ensembles flous, le degré d'appartenance de x à un sous-ensemble A de S peut être représenté de façon graduelle (contrairement à la logique booléenne qui ne prévoit que deux états : appartenance ou non-appartenance). Autrement dit, dans cette représentation, x peut appartenir plus ou moins fortement au sous-ensemble A (on parle

d'appartenance floue); un tel sous-ensemble, appelé sous-ensemble flou, est alors caractérisé par une fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ tel que :

$$A = \{(x, \mu_A(x)), x \in S\} \quad (5.24)$$

avec $\mu_A(x) : S \rightarrow [0,1]$

Pour l'élément x , la valeur $\mu_A(x)$ représente le degré d'appartenance au sous-ensemble A . On distingue alors trois cas :

- $\mu_A(x) = 0$ (x n'appartient pas à A);
- $0 < \mu_A(x) < 1$ (x appartient partiellement à A);
- $\mu_A(x) = 1$ (x appartient entièrement à A);

Selon les valeurs prises par la fonction d'appartenance, le sous-ensemble flou A peut être décrit au moyen de plusieurs caractéristiques : le noyau, le support, la hauteur et l'alpha-coupe (écrit α -coupe par la suite).

▪ Le **support** d'un sous-ensemble flou A de S est l'ensemble des éléments x pour lesquels la fonction d'appartenance est non nulle.

$$Sup(A) = \{x \in S : \mu_A(x) > 0\} \quad (5.25)$$

▪ La **hauteur** d'un sous-ensemble flou A correspond au plus fort degré d'appartenance avec lequel x appartient à A .

$$h(A) = \sup_{x \in S} \mu_A(x) \quad (5.26)$$

▪ Dans le cas d'un sous-ensemble flou normalisé ($h(A) = 1$), le **noyau** d'un sous-ensemble flou A de S est l'ensemble des éléments x appartenant totalement à A .

$$Noy(A) = \{x \in S : \mu_A(x) = 1\} \quad (5.27)$$

▪ L' **α -coupe** de A (ou la coupe de niveau α) noté A_α est l'ensemble des éléments appartenant à A dont le degré d'appartenance est supérieur ou égal à α .

$$A_\alpha = \{x \in S : \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad (5.28)$$

L'ensemble des attributs décrits précédemment sont illustrés dans le schéma suivant (Fig. 5.10).

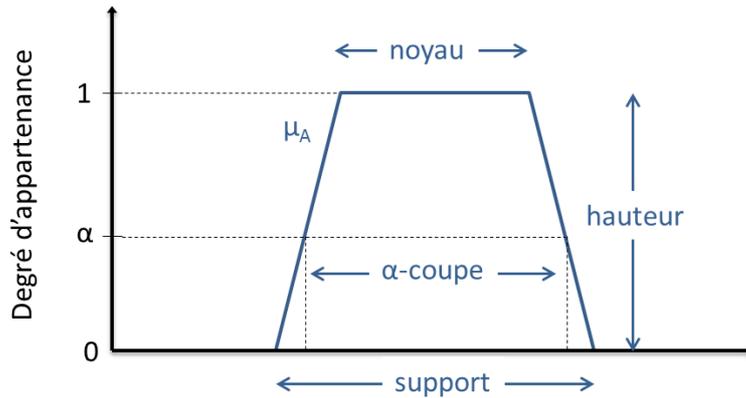


Figure 5.10 : Illustration des caractéristiques d'un sous-ensemble flou

• Généralités sur la modélisation de l'information dans la théorie des possibilités

Dans la théorie des possibilités, l'information est représentée par une distribution de possibilité (notée $\pi(x)$) qui s'apparente à la fonction d'appartenance dans la théorie des ensembles flous. Cette distribution qui associe à tout x de S une valeur dans $[0,1]$ vérifie la propriété de normalisation :

$$\sup_{x \in S} \pi(x) = 1 \tag{5.29}$$

Dans un espace discrétisé, une distribution de possibilités est très souvent perçue comme un ensemble d'intervalles de mesures (ou intervalles de confiance) emboîtés et disposés sur une échelle quantifiant le degré de confiance. Pour faire le lien avec la théorie des ensembles flous, une distribution de possibilité est affecté d'un support et d'un noyau tandis que chaque intervalle de confiance correspond à une α -coupe A_α (Fig. 5.11).

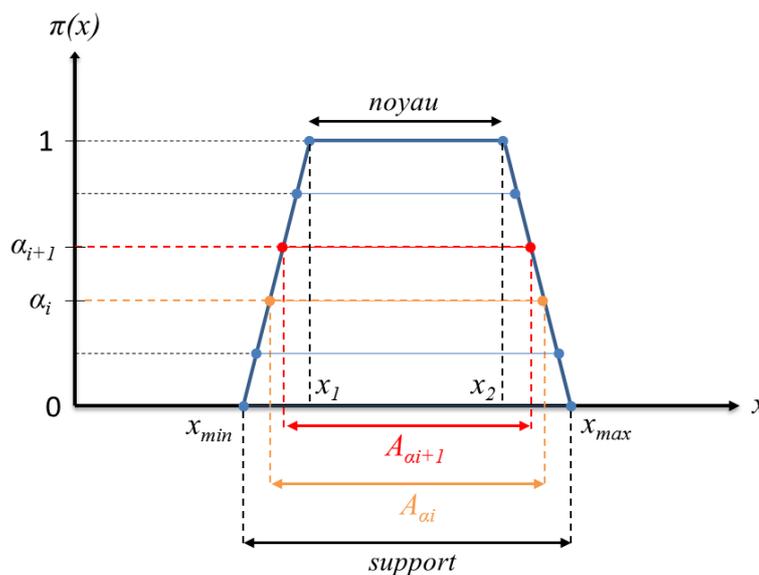


Figure 5.11 : Exemple de représentation d'une distribution de possibilités

La théorie des possibilités prévoit deux types de mesures pour caractériser l'information : une mesure de possibilité et une mesure de nécessité. Ces deux mesures sont définies de la façon suivante :

Soit S un ensemble des n éléments $x : S = \{x_1, \dots, x_n\}$ et A un sous-ensemble de S .

Soit $F(x)$ une affirmation portant sur l'élément x de S . Par exemple : « x est le résultat recherché ».

▪ $\Pi(A)$ est appelée mesure de possibilité du sous-ensemble A . Elle exprime le degré de possibilité que l'affirmation $F(x)$ soit exacte sur l'un au moins des éléments x composant A . Elle est définie par :

$$\Pi(A) = \sup_{x \in A} \pi(x) \quad (5.30)$$

▪ $N(A)$ est appelée mesure de **nécessité** du sous-ensemble A . Elle quantifie le degré d'impossibilité que l'affirmation $F(x)$ soit exacte sur un élément x pris hors de A (c'est-à-dire dans le complément A^c de A au sein de S)

$$N(A) = 1 - \Pi(A^c) = \inf_{x \notin A} (1 - \pi(x)) \quad (5.31)$$

Comme le montre la relation 5.31, les mesures de nécessité et de possibilité sont étroitement liées. Ces dernières vérifient, en outre, la propriété suivante :

$$N(A) \leq \Pi(A) \quad (5.32)$$

Le couple $[N, \Pi]$ permet d'encadrer le degré de confiance d'une information. La mesure de nécessité N représente alors une limite basse que l'on peut assimiler au degré de certitude de l'information (appréciation optimiste). La mesure de possibilité Π , qui correspond à la limite haute de cet intervalle renvoie au degré de plausibilité de l'information (appréciation pessimiste). Les trois cas de figure suivants illustrent la signification de cet intervalle :

- Si $N(A) = 1$ alors $\Pi(A) = 1$ et l'affirmation $F(x)$ est certainement exacte sur au moins un $x \in A$;
- Si $\Pi(A) = 0$ alors $N(A) = 0$ et l'affirmation $F(x)$ est certainement fautive pour tout $x \in A$;
- Si $\Pi(A) = 1$ et $N(A) = 0$ alors on ne peut rien dire sur l'exactitude de $F(x)$ sur A (ignorance totale) ;

Par ailleurs, pour deux sous-ensembles A et B de S , les mesures de possibilité et de nécessité vérifient :

$$\Pi(A \cup B) = \max(\Pi(A), \Pi(B)) \quad (5.33)$$

$$N(A \cap B) = \min(\Pi(A), \Pi(B)) \quad (5.34)$$

• Présentation du modèle retenu dans la thèse

Le modèle choisi dans ces travaux s'appuie sur les éléments théoriques issus des théories des ensembles flous et des possibilités pour la méthode de construction ainsi que sur des résultats expérimentaux (tirées du chapitre 4) pour le paramétrage.

À chaque traitement, le modèle va dépendre de plusieurs facteurs :

- La bande d'ondes considérée (PO, MO ou GO) ;
- Le segment de route considéré ;
- Le coefficient de fiabilité de la source de mesure (*i.e.* du véhicule traceur) dont est issue l'information.

La représentation de l'information est donc susceptible de varier d'un segment à un autre pour une même source, d'une source à une autre pour un même segment ou bien encore d'une bande d'ondes à une autre pour une même source et un même segment.

De façon plus précise, la construction du modèle fait intervenir trois éléments fondateurs :

- un intervalle de confiance conservatif (ou prudent) ;
- un intervalle de confiance optimiste ;
- le coefficient de fiabilité (coefficient de pondération) de la source par bande d'ondes.

Le dernier élément ayant déjà été présenté dans le détail (Cf. section 5.3), nous allons expliciter les deux premiers. Pour cela, nous considérons la notation mathématique ci-après.

Soit S l'ensemble des valeurs que peuvent prendre les notes d'uni par bande d'onde

($S = \{0, 0.5, 1, 1.5, 2, \dots, 9.5, 10\}$) et x la mesure d'uni délivrée par une source j de coefficient de pondération w_j sur un segment k .

L'intervalle conservatif (noté I_c) correspond à un encadrement pessimiste de la valeur « vraie ». Cet intervalle, centré autour de la mesure x , a pour largeur $l_1 = \alpha_3$ (Cf. relation 5.12 de la section 5.3 définissant le seuil de tolérance maximal α_3). On rappelle que l_1 varie selon la bande d'ondes étudiée et qu'elle prend les valeurs numériques suivantes :

- $l_1 = 6$ pour la bande PO ;
- $l_1 = 3$ pour les bandes MO et GO.

Donc, pour une même bande d'ondes, l'intervalle conservatif est fixe quels que soient le segment et la source de mesure considérés.

Au final, l'intervalle conservatif s'écrit donc :

$$I_c = \left[x - \frac{l_1}{2}, x + \frac{l_1}{2} \right] \quad (5.35)$$

L'intervalle optimiste ou prudent (noté I_o) correspond à un encadrement plus fin de la valeur « vraie ». Il est également centré autour de x mais sa largeur est susceptible de varier en fonction du segment et de la source de mesure pris en compte. Cette largeur, notée l_2 , est

calculée à partir de l'écart-type de répétabilité des mesures issues de la source j sur le segment k .

$$l_2 = 2\sigma_{r,k}^j \quad (5.36)$$

Cette valeur est par la suite arrondie au demi-point le plus proche afin de correspondre à une valeur dans S .

Au final, l'intervalle optimiste s'écrit donc :

$$I_o = \left[x - \frac{l_2}{2}, x + \frac{l_2}{2} \right] = \left[x - \sigma_{r,k}^j, x + \sigma_{r,k}^j \right] \quad (5.37)$$

Une fois les caractéristiques de ces deux intervalles de confiance connues, on fait intervenir le degré de fiabilité de la source de mesure pour créer une distribution de possibilité. Le raisonnement qui conduit à la construction du modèle est décrit à l'aide de l'exemple ci-après.

Exemple :

Soit une source j , de degré de fiabilité $w_j = 0,8$, et dont l'écart-type de répétabilité sur le segment k , pour la bande PO, est $\sigma_{r,k}^j = 1$. On suppose que, parmi l'ensemble des mesures faites sur le segment k , l'une vaut 5. C'est cette mesure qu'on cherche à modéliser.

En premier lieu, on choisit le support et le noyau de la distribution de possibilité. Ces éléments correspondent respectivement à l'intervalle conservatif (noté I_c) et à l'intervalle optimiste (noté I_o) de la source, centrés autour de x . Conformément aux éléments fournis dans l'exemple, et aux relations (5.36) à (5.37), il vient $I_c = [2,8]$ et $I_o = [4,6]$.

On intègre alors au modèle le degré de fiabilité de la source, w_j , en faisant les hypothèses suivantes :

- « La source est à 100% sûre que la note d'uni appartient à l'intervalle conservatif I_c » ;
- « La source est à $w_j \times 100\%$ (soit 80%) sûre que la note d'uni appartient à l'intervalle optimiste I_o ».

Ces deux affirmations vont servir à établir les niveaux de confiance associés aux intervalles conservatif et optimiste, puis par construction, à l'ensemble des intervalles (α -coupes) inclus dans la distribution de possibilité. Pour cela, on fait appel aux mesures de possibilité et de nécessité en procédant comme suit :

$$\Pi([4,6]) = 1 \text{ et } N([4,6]) = 0.8$$

Ces mesures servent alors à établir le gabarit du modèle comme le présente la figure suivante.

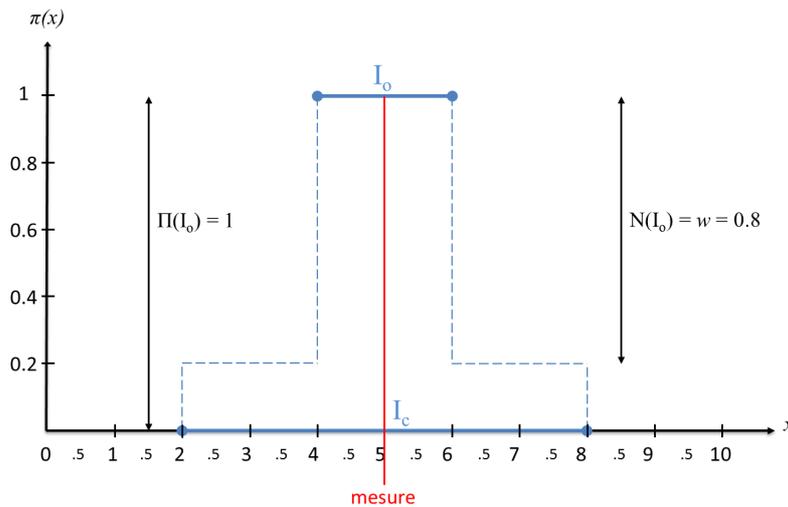


Figure 5.12 : Gabarit de la distribution de possibilités sur l'exemple précédent

La dernière étape de construction du modèle consiste à lier, par linéarisation, d'une part l'intervalle optimiste à l'intervalle $A_{\alpha=1-w}$ et, d'autre part, ce même intervalle à l'intervalle conservatif. L'intervalle $A_{\alpha=1-w}$ est défini par :

$$A_{\alpha=1-w} = \left[x - \frac{l_2}{2} - 0.5, x + \frac{l_2}{2} + 0.5 \right] \quad (5.38)$$

Au final, la distribution de possibilité correspondant à l'exemple est illustrée sur la figure suivante.

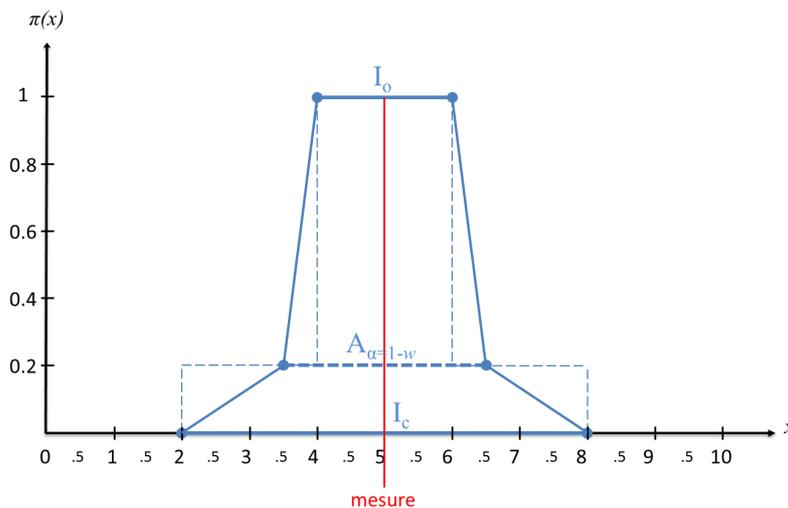


Figure 5.13 : Distribution de possibilités correspondant à l'exemple

Conclusion sur le modèle possibiliste retenu

Les règles de construction de la distribution de possibilités $\pi(x)$ ont été élaborées de sorte à encadrer la mesure courante au moyen de deux intervalles de confiance (l'un étant optimiste, l'autre prudent) et d'intégrer le degré de fiabilité de la source dans le calcul du degré de confiance accordé à chacun des intervalles.

La distribution ainsi obtenue fait donc apparaître un certain nombre d'intervalles emboîtés dont le plus large correspond au support et le plus étroit au noyau. Chaque intervalle intermédiaire coïncide avec une α -coupe de $\pi(x)$ dont le degré de certitude vaut $1-\alpha$. Ainsi, l'intervalle le moins certain (mais le plus informatif) correspond au noyau tandis que l'intervalle le plus certain (mais le moins informatif) équivaut au support. On voit alors le lien entre imprécision et incertitude car plus on élargit l'intervalle de confiance plus on est certain que la valeur recherchée y appartient.

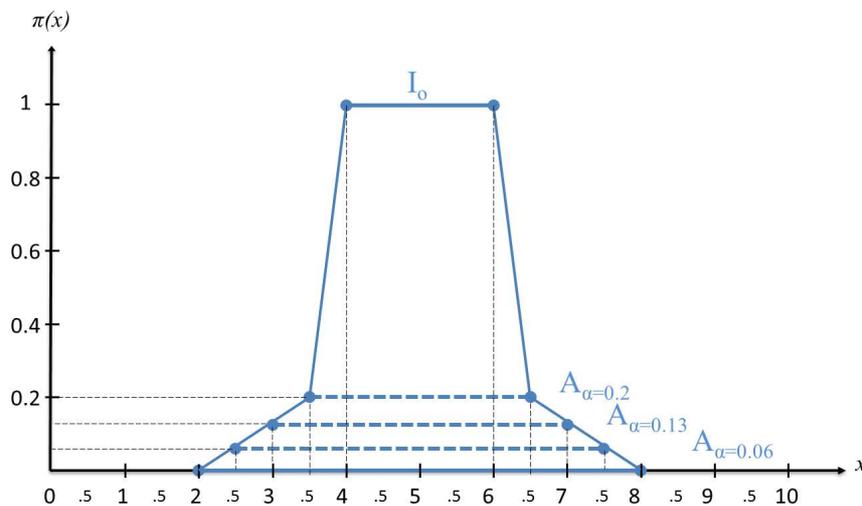


Figure 5.14 : Intervalles de confiance emboîtés dans la distribution $\pi(x)$

Dans la modélisation utilisée dans ces travaux, la largeur de l'intervalle de confiance est modulée par deux facteurs : la largeur du noyau et le degré de fiabilité de la source de mesure.

Le premier dépend du degré de répétabilité des mesures issues d'une même source sur le segment considéré ; plus les mesures sont répétables, plus le noyau se rétrécit jusqu'à devenir unimodal quand $\sigma_{r,k}^j = 0$. La distribution de possibilités est donc susceptible de s'élargir ou de rétrécir selon les caractéristiques de la source mais aussi selon les caractéristiques de l'infrastructure. En effet, la probabilité que des mesures soient répétables sur un segment appartenant à une section courbe ou à une section particulière comme une voie d'insertion est plus faible que sur une section droite.

Le second a pour effet de faire tendre la largeur « globale » de $\pi(x)$ vers la largeur du noyau quand le degré de fiabilité de la source est excellent (w tend vers 1) ou vers la largeur du support quand ce même degré est très faible (w tend vers 0).

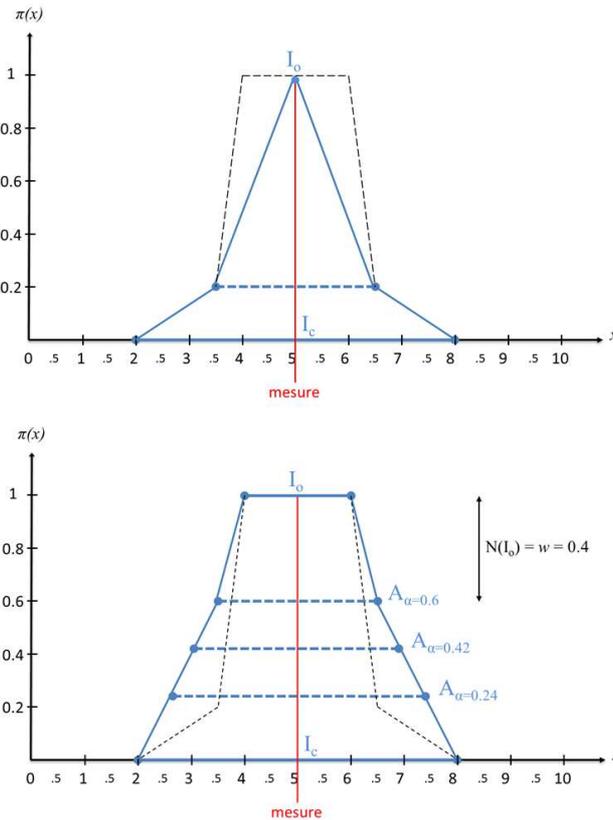


Figure 5.15 : Effets dus au rétrécissement du noyau (figure du haut) et à la baisse du degré de fiabilité de la source (figure du bas) sur la distribution de possibilités $\pi(x)$

Enfin, il faut préciser que lorsque la mesure d'uni est centrée par rapport à l'échelle de notation (cadre de discernement), la forme de la distribution est symétrique. Mais quand la mesure est proche des bornes inférieure ou supérieure du cadre de discernement le modèle perd cette symétrie et la forme de la distribution devient tronquée.

Une fois les mesures d'uni modélisées, elles sont fusionnées les unes aux autres au moyen d'opérateurs de combinaison.

B – Combinaison des distributions

Le cadre possibiliste offre une multitude d'opérateurs de combinaison qui se différencient les uns des autres par leurs propriétés mathématiques et par leur comportement face à des informations plus ou moins concordantes. Pour ces travaux de thèse, nous avons choisi de considérer trois opérateurs dits « adaptatifs » (ou de compromis) au comportement plutôt prudent. Le point commun de ces opérateurs réside donc dans leur aptitude à estimer le niveau de consensus (ou de conflit par complémentarité) des informations puis de l'intégrer dans leur mécanisme de combinaison. De façon globale, ils adoptent un mode conjonctif quand le conflit entre les informations à fusionner est faible et un mode disjonctif dans le cas contraire. Cependant, bien que ces opérateurs suivent un principe commun, ils affichent plusieurs dissemblances principalement liées à leur mode d'utilisation (ex : mode d'appel des informations différent).

La plupart des opérateurs de combinaison étant issus de la logique floue (pour le traitement de la superposition de deux états), ceux-ci ont été conçus de manière à agréger des distributions de possibilités deux à deux. Les deux premiers opérateurs utilisés dans ces travaux suivent cette règle ; il s'agit des opérateurs de Dubois et Prade adaptatifs en version non-priorisée [43] et priorisée [44, 45]. Le troisième opérateur, appelé ici opérateur de Dubois et Prade généralisé [46], est une extension du premier afin de pouvoir agréger plus de deux distributions en une seule et même opération.

• **Opérateur de combinaison n°1 : opérateur adaptatif non-priorisé de Dubois et Prade**

Considérons deux distributions de possibilités $\pi_1(x)$ et $\pi_2(x)$ définis sur l'espace de discernement $S = \{x_1, \dots, x_N\}$. La distribution π_{ADNP} résultant de la combinaison de π_1 et π_2 au moyen de l'opérateur adaptatif de Dubois et Prade s'écrit :

$$\pi_{ADNP}(x) = \max \left(\frac{\min(\pi_1(x), \pi_2(x))}{h(\pi_1, \pi_2)}, \min(\max(\pi_1(x), \pi_2(x)), 1 - h(\pi_1, \pi_2)) \right) \quad (5.39)$$

où $h(\pi_1, \pi_2)$ représente le niveau de consensus entre $\pi_1(x)$ et $\pi_2(x)$. Celui-ci est calculé de la façon suivante :

$$h(\pi_1, \pi_2) = \max_{x \in S} \min(\pi_1(x), \pi_2(x)) \quad (5.40)$$

La valeur de h , qui quantifie le degré de consensus entre deux distributions, correspond donc à la hauteur maximale de chevauchement de ces dernières. Par complémentarité, la valeur $1-h$ quantifie, quant à elle, le degré de conflit. Selon la valeur prise par h , l'opérateur va s'adapter à la situation et se comporter différemment :

- Quand h tend vers 1 (fort consensus / faible conflit), l'opérateur privilégie l'intersection des distributions normalisée par h et fait l'hypothèse que les deux sources (ou les deux informations) sont toutes les deux fiables.
- Quand h tend vers 0 (faible consensus / fort conflit), l'opérateur privilégie l'union des distributions et fait l'hypothèse qu'au moins une des deux sources (ou une des deux informations) est fiable.

Quand le conflit est total ($h=0$), le résultat de l'opération de combinaison n'a pas de solution analytique (problème de discontinuité). En général, deux possibilités s'offrent alors :

- Choisir l'ignorance totale en posant $\pi_{ADNP}(x) = 1$;
- Opter pour une règle de combinaison disjonctive en posant par exemple $\pi_{ADNP}(x) = \max(\pi_1(x), \pi_2(x))$.

C'est cette dernière option qui a été retenue dans ces travaux, car la distribution résultante sera, dans la plupart des cas, plus informative (on considèrera alors que la valeur recherchée appartient au support).

Pour fixer les idées, le résultat de la combinaison de deux distributions au moyen de l'opérateur de Dubois et Prade est illustré ci-après. Sur cette figure, on observe que la

distribution de possibilité fait émerger un mode centré sur la valeur x pour laquelle le degré de consensus est le plus élevé. Pour les valeurs de x correspondant à des zones de discordance totale, le degré de possibilité est affecté de la valeur $1-h$.

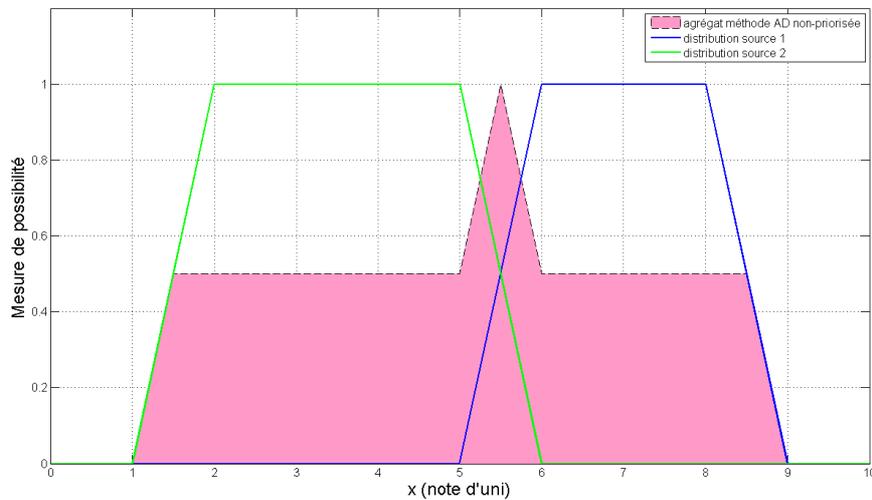


Figure 5.16 : Illustration de l'effet de l'opérateur adaptatif de Dubois et Prade non-priorisé

Cet opérateur ne pouvant combiner uniquement que deux distributions, son utilisation nécessite d'établir une organisation particulière pour traiter l'ensemble des informations. Ceci est d'autant plus vrai que, comme son nom l'indique, cet opérateur ne priorise pas telle ou telle source (ou information) par rapport à une autre. Nous avons donc opté pour la solution suivante :

- Pour la fusion intra-source (ou intra-véhiculaire), les informations sont combinées deux à deux selon un processus « en cascade » en partant de la mesure la plus ancienne vers la mesure la plus récente ;
- Pour la fusion inter-source (ou inter-véhiculaire), les distributions résultant de la fusion intra-source sont combinées deux à deux selon un processus « en cascade » en partant de la source la moins fiable vers la source la plus fiable ;

Pour finir, il faut noter que l'utilisation de cet opérateur dans un processus de combinaison en cascade présente une certaine faiblesse liée à sa non-associativité. La distribution finale obtenue après n combinaisons est donc dépendante de l'ordre de traitement. Lorsque les sources de mesures peuvent être précisément caractérisées et que leur ordonnancement est clairement établi cette particularité ne constitue pas réellement un frein au processus de fusion ; mais dans le cas contraire, la propriété de non-associativité peut devenir gênante.

• Opérateur de combinaison n°2 : opérateur adaptatif priorisé de Dubois et Prade

Quand le niveau de fiabilité des sources de mesures est connu sans ambiguïté, il peut être intéressant d'en tirer profit pour optimiser le processus de combinaison. C'est ce raisonnement qui a conduit Dubois et Prade à élaborer un opérateur adaptatif dit « priorisé » ou « à priorité ».

Soient $\pi_1(x)$ et $\pi_2(x)$, deux distributions de possibilités provenant respectivement des sources s_1 et s_2 . En considérant que le niveau de fiabilité de la source s_1 est supérieur à celui de la source s_2 , l'opérateur adaptatif priorisé s'écrit :

$$\pi_{ADP}^{1>2}(x) = \min(\pi_1(x), \max(\pi_2(x), 1 - h(\pi_1, \pi_2))) \quad (5.41)$$

avec $h(\pi_1, \pi_2) = \max_{x \in S} \min(\pi_1(x), \pi_2(x))$, la mesure de consensus ayant les mêmes propriétés que celles évoquées dans le paragraphe portant sur l'opérateur de combinaison n°1.

Comme pour l'opérateur non-priorisé, le mode de fonctionnement de cet opérateur dépend de la valeur de h :

- Quand h tend vers 1 (fort consensus / faible conflit), les deux distributions à combiner sont concordantes et le résultat de l'opération correspond à une conjonction des distributions ($\min(\pi_1(x), \pi_2(x))$) ;
- Quand h tend vers 0 (faible consensus / fort conflit), les deux distributions à combiner sont discordantes et le résultat de l'opération est la distribution de la source la plus fiable (l'opérateur ne tient donc pas compte de l'information apportée par la source la moins fiable).

La figure suivante illustre le résultat de la combinaison fourni par l'opérateur priorisé sur un exemple simple.

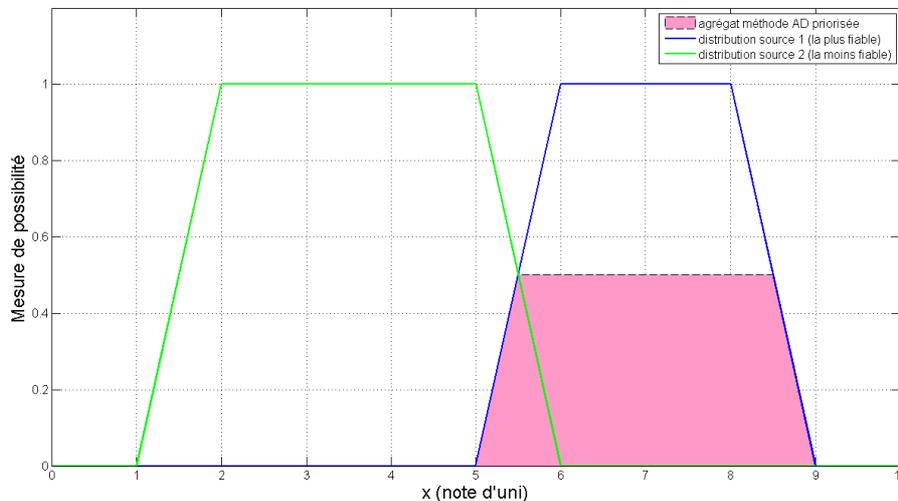


Figure 5.17 : Illustration de l'effet de l'opérateur adaptatif de Dubois et Prade priorisé

La mise en œuvre de cet opérateur requiert, au préalable, une hiérarchisation de l'ensemble des sources contribuant au processus de fusion selon leur degré de fiabilité. Quand cela est obtenu, le processus de combinaison en cascade consiste alors à combiner les distributions deux à deux en commençant par la distribution issue de la source la plus fiable. À chaque itération et à condition que les sources soient concordantes, la distribution de possibilité s'affine progressivement : c'est ce qu'on appelle le raffinement hiérarchique. De cette

manière et par comparaison avec l'opérateur non-priorisé, la valeur recherchée a une forte probabilité d'appartenir à un intervalle conservatif (support) moins large et donc plus précis.

Néanmoins, compte-tenu de la nécessité de hiérarchiser les distributions selon le degré de fiabilité des sources de mesure, l'opérateur priorisé a uniquement été utilisé dans le cadre de la combinaison inter-véhiculaire. N'étant pas capable de classier les informations fournies par une même source autrement que par leur chronologie de relevé, nous avons préféré utiliser l'opérateur non-priorisé pour la combinaison intra-véhiculaire.

• Opérateur de combinaison n°3 : opérateur adaptatif généralisé de Dubois et Prade

Pour introduire ce nouvel opérateur, il faut rappeler l'une des particularités de l'opérateur n°1 (opérateur de Dubois et Prade adaptatif non-priorisé). Ce dernier, en présence de forts conflits, est de nature disjonctive ce qui conduit à une distribution résultante de faible niveau d'informativité. Autrement dit, dans cette configuration, l'opérateur n° 1 fait l'hypothèse qu'au moins une des sources à combiner est fiable. L'opérateur de Dubois et Prade généralisé est plus ambitieux puisqu'il s'efforce d'identifier, à partir des caractéristiques de l'ensemble des distributions à combiner, celles qui sont susceptibles de correspondre à un sous-ensemble de sources supposées fiables. Les distributions appartenant à un tel sous-ensemble peuvent alors être combinées de façon conjonctive pour former des distributions intermédiaires ; si plusieurs sous-ensembles ont été identifiés, alors les distributions intermédiaires de ces sous-ensembles sont combinées avec prudence, c'est-à-dire de façon disjonctive. Une telle procédure peut être décrite au moyen du formalisme mathématique ci-après, appelé combinaison quantifiée.

Soit N l'ensemble des sources et K un sous-ensemble quelconque de N , de cardinal k ; K rassemble donc k sources, c'est à dire k distributions.

On appelle combinaison quantifiée du sous-ensemble K la distribution, notée $\pi_{(k)}(x)$ obtenue en combinant de façon conjonctive les k distributions du sous-ensemble K . De façon formelle, on note :

$$\pi_{(k)}(x) = \max_{\substack{K \subseteq N \\ k=|K|}} (\min_{i \in K} \pi_i(x)) \quad (5.42)$$

En outre, pour chaque sous-ensemble K , on définit la valeur $h(K)$, appelée le degré de consensus entre les distributions de K , par l'expression :

$$h(K) = \max_{x \in S} \left[\min_{i \in K} \pi_i(x) \right] \quad (5.43)$$

Dans leur opérateur généralisé, Dubois et Prade propose d'encadrer le nombre de sources supposées fiables au moyen de deux valeurs :

- Une valeur (notée m) correspondant au nombre maximum de sources (ou distributions) ayant une intersection non nulle de leur noyau, autrement dit, au nombre de sources en concordance totale ;

- Une valeur (notée n) correspondant au nombre maximum de sources (ou distributions) ayant une intersection non nulle de leur support, autrement dit, au nombre de sources susceptibles d'être concordantes ;

Par conséquent, n est une estimation optimiste du nombre de sources fiables tandis que m est une estimation pessimiste.

En considérant tous les sous-ensembles K' de N pour lesquels $h(K') = 1$ et en appelant k' le cardinal du sous-ensemble K' , alors :

$$m = \max_{K'} [k'] \quad (5.44)$$

Par exemple, si $m=2$, alors il existe au moins un sous-ensemble K'_2 composé de deux distributions de possibilités en consensus total sur au moins un élément du cadre de discernement.

De même, en considérant tous les sous-ensembles K'' de N pour lesquels $h(K'') > 0$ et en appelant k'' le cardinal d'un tel groupe de distributions, alors :

$$n = \max_{K''} [k''] \quad (5.45)$$

Par exemple, si $n=3$, alors il existe au moins un sous-ensemble K''_3 composé de trois distributions de possibilités en consensus partiel sur au moins un élément du cadre de discernement.

Les sous-ensembles K'_m et K''_n peuvent être confondus ou pas mais, dans tous les cas, $n \geq m$.

Une fois ces valeurs déterminées, on fait ensuite l'hypothèse que l'on ne sait pas distinguer les sources fiables de celles qui ne le sont pas. L'opérateur de Dubois et Prade généralisé, procède alors de la façon suivante :

$$\pi_{ADG}(x) = \max \left(\frac{\pi_{(n)}(x)}{h(n)}, \min(\pi_{(m)}(x), 1 - h(n)) \right) \quad (5.46)$$

où $\pi_{(n)}$ et $\pi_{(m)}$ sont les combinaisons quantifiées de m et n distributions tandis que $h(n)$ exprime la plus grande intersection non nulle du plus grand nombre de distributions possibles. La valeur $h(n)$ correspond donc au degré de consensus le plus élevé parmi tous les sous-ensembles K de N tel que :

$$h(n) = \sup \{ h(K) : |K| = n \} \quad (5.47)$$

Par comparaison avec l'opérateur n°1, l'opérateur généralisé permet de combiner plus de deux distributions simultanément (et donc d'échapper au mode de combinaison en cascade) ce qui permet de s'affranchir de tout problème d'associativité. Cette propriété lui permet en plus de faire l'hypothèse qu'il existe plusieurs sources fiables pour lesquelles une

combinaison conjonctive est permise. Au bout du compte, le gain attendu correspond à une augmentation du niveau d'informativité de la distribution finale.

Pour faciliter sa compréhension, le fonctionnement de cet opérateur est illustré à travers plusieurs exemples.

Exemple n°1 : combinaison de 2 sources

Considérons les distributions $\pi_1(x)$ et $\pi_2(x)$ utilisées pour l'illustration de l'opérateur n°1 (Fig. 5.16).

Dans cette configuration, les valeurs encadrant le nombre de sources fiables sont $n=2$ et $m=1$. On estime donc qu'il existe au moins une source fiable mais pas plus de deux parmi les deux sources d'où proviennent les distributions à combiner. Les combinaisons quantifiées réclamées par l'opérateur généralisé s'écrivent donc :

$$\begin{aligned}\pi_{(n)}(x) &= \pi_{(2)}(x) = \min(\pi_1(x), \pi_2(x)) ; \\ \pi_{(m)}(x) &= \pi_{(1)}(x) = \max[\min(\pi_1(x)), \min(\pi_2(x))] = \max(\pi_1(x), \pi_2(x)) ;\end{aligned}$$

De plus, $h(n) = \min(\pi_1, \pi_2)$.

Dans ce cas, l'opérateur généralisé devient :

$$\pi_{ADG}(x) = \max \left(\frac{\min(\pi_1(x), \pi_2(x))}{\min(\pi_1, \pi_2)}, \min(\max(\pi_1(x), \pi_2(x)), 1 - h(\pi_1, \pi_2)) \right)$$

ce qui correspond exactement à l'expression de l'opérateur n°1. Le résultat de la combinaison sera donc identique.

Exemple n°2 : combinaison de 4 sources

Considérons maintenant quatre sources dont les distributions, notées π_1, π_2, π_3 et π_4 , sont représentées sur la figure suivante (Fig. 5.18). La distribution π_4 est volontairement éloignée des autres pour introduire un minimum de conflit entre les sources.

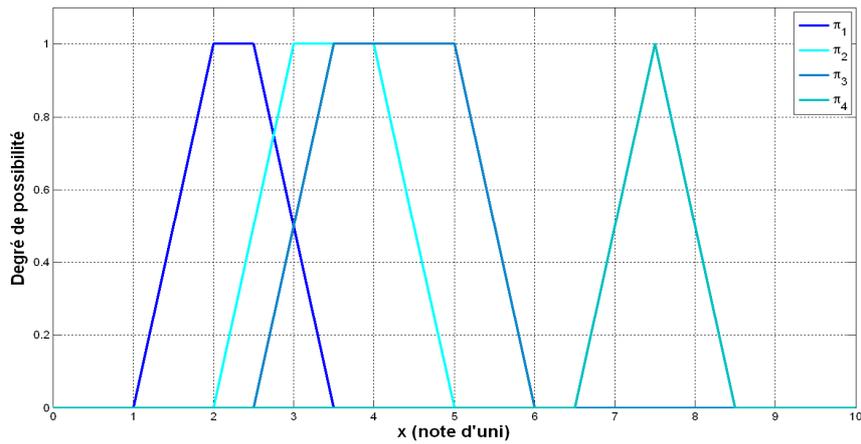


Figure 5.18 : Tracé des quatre distributions servant à l'exemple de combinaison généralisée

Dans cette configuration, les valeurs encadrant le nombre de sources fiables sont $n=3$ (π_1 , π_2 et π_3) et $m=2$ (π_2 et π_3). On estime donc qu'il existe au moins deux sources fiables mais pas plus de trois parmi les quatre sources d'où proviennent les distributions. Les combinaisons quantifiées réclamées par l'opérateur généralisé s'écrivent donc :

$$\pi_{(n)}(x) = \pi_{(3)}(x) = \max \left[\begin{array}{l} \min(\pi_1(x), \pi_2(x), \pi_3(x)), \min(\pi_1(x), \pi_2(x), \pi_4(x)), \min(\pi_1(x), \pi_3(x), \pi_4(x)), \dots \\ \dots \min(\pi_2(x), \pi_3(x), \pi_4(x)) \end{array} \right]$$

$$\pi_{(m)}(x) = \pi_{(2)}(x) = \min(\pi_2(x), \pi_3(x))$$

Pour le calcul de $\pi_{(m)}$, afin d'alléger la relation, on ne reportera pas le résultat de la conjonction des distributions π_1, π_2, π_3 avec π_4 dont le résultat est nul. Il vient alors :

$$\pi_{(m)}(x) = \pi_{(1)}(x) = \max[\min(\pi_1(x), \pi_2(x)), \min(\pi_1(x), \pi_3(x)), \min(\pi_2(x), \pi_3(x))]$$

Le résultat de l'opération de combinaison au moyen de l'opérateur généralisé est représenté sur la figure suivante (Fig. 5.19).

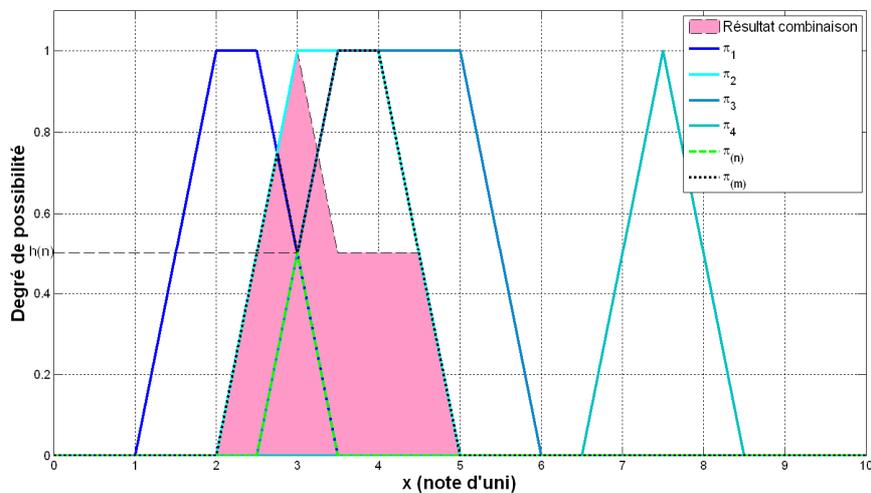


Figure 5.19 : Résultat de la combinaison généralisée appliquée aux quatre distributions

La distribution résultant de la combinaison généralisée présente donc un mode centré sur la valeur x pour laquelle le plus grand nombre de distributions sont en concordance même partiellement. Par ailleurs, malgré le caractère conflictuel imposé par les propriétés de π_4 vis-à-vis des autres distributions, le résultat de la combinaison est assez informatif comme le témoigne la valeur du support.

L'opérateur généralisé de Dubois et Prade offre certes un certain nombre d'avantages (combinaison simultanée de plusieurs sources, associativité, etc.) mais il s'accompagne également de plusieurs contraintes. Par exemple, sur le plan algorithmique, l'opérateur généralisé a tendance à rechercher puis privilégier systématiquement les zones de consensus entre les distributions au détriment des zones contenant des distributions dupliquées¹. Sur le plan numérique, l'utilisation de l'opérateur généralisé peut s'avérer fastidieuse, et donc gourmande en temps de calcul, compte-tenu du traitement combinatoire lié au calcul de $\pi_{(n)}$ et $\pi_{(m)}$.

C – Règles de décision

Dans notre contexte, le but de la prise de décision est de choisir une unique valeur x pour laquelle la mesure de possibilité associée appartient au résultat de la combinaison. Cette valeur particulière représente le résultat final du traitement de l'ensemble des mesures fournies par l'ensemble des véhicules traceurs pour un segment de route et une période donnés.

Comme pour la représentation de la connaissance, le cadre possibiliste s'inspire fortement de la théorie des ensembles flous (plus précisément des techniques dites de « défuzzification ») pour établir les règles de décision. Et, à l'instar des opérateurs de combinaison, la diversité des règles de décisions est relativement grande. Ainsi, certaines règles peuvent être qualifiées de prudente (ex : valeur choisie parmi le support), d'optimiste (ex : valeur choisie parmi le noyau) ou intermédiaire (ex : valeur choisie à proximité du centre de gravité de la surface correspondant à la distribution finale).

Pour ces travaux, nous avons retenu, comme mesure décisionnelle, la **valeur d'abscisse associée au maximum de degré de possibilité** de la distribution finale et arrondie au demi-point le plus proche (pour respecter l'échelle de notation par bandes d'ondes). Cette règle générale, de nature optimiste, est nuancée par des critères supplémentaires lorsque la distribution finale présente des propriétés particulières. Nous avons ainsi distingué plusieurs cas de figure :

- Le résultat de la combinaison est unimodal

La distribution résultant de l'opération de combinaison globale présente une convexité qui se traduit par l'observation d'un pic unique. Le processus de décision suit alors la règle générale.

¹ Ce mode de fonctionnement peut s'avérer pénalisant car, dans cette étude, il arrive régulièrement que des distributions soient dupliquées.

▪ Le résultat de la combinaison est multimodal

Cette situation, qui correspond à la présence d'au moins deux pics, est elle-même décomposée en plusieurs scénarii :

- Si les modes sont adjacents et centrés sur des valeurs d'abscisse dont l'écart est inférieur ou égal à un point, il se forme alors un « plateau ». Si ce plateau est associé à trois valeurs (ex : 4.5, 5 et 5.5), la valeur de décision correspond à la valeur médiane ($x=5$). Si le plateau est associé à deux valeurs (ex : 4.5 et 5), alors on considère le niveau de gravité le plus élevé ; la valeur de décision correspond donc à la note d'uni la plus basse ($x=4.5$).
- Si deux modes ne sont pas adjacents (plusieurs pics de même hauteur) mais espacés au maximum d'un point (ex : un pic centré sur la note 3.5 et un autre centré sur la note 4.5), la valeur de décision correspond à la moyenne des valeurs d'abscisses associées aux deux modes. Cette moyenne est ensuite arrondie au demi-point le plus proche ;
- Si plusieurs modes ne sont pas adjacents et séparés de plus d'un point ou bien si le degré de possibilité de la distribution est identique pour toutes les valeurs d'abscisse (ignorance totale), la prise de décision consiste à ne pas en prendre.

Quelques-unes des situations évoquées précédemment sont illustrées sur la figure suivante.

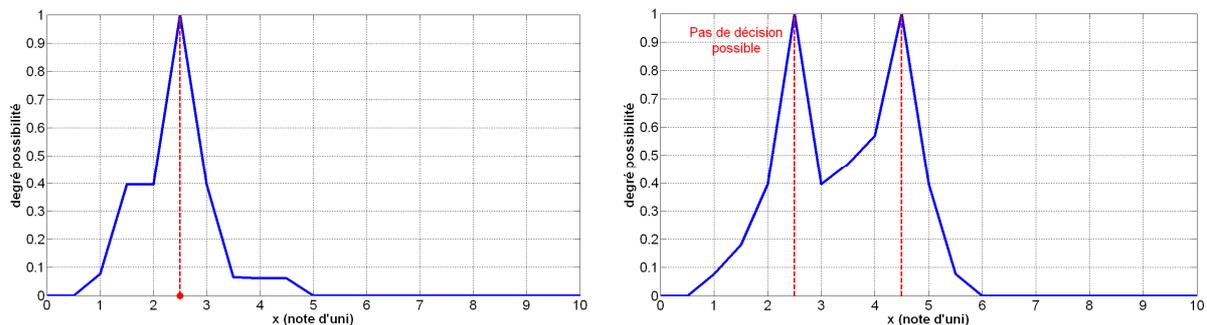


Figure 5.20 : Exemples de cas rencontrés lors de la prise de décision (sur la figure de gauche, la décision finale se matérialise par la note d'uni 2.5 tandis que sur la figure de droite, aucune décision ne peut être prise)

5.4.4 Méthode de fusion dans un cadre crédibiliste

La théorie des croyances a été introduite par Dempster à la fin des années 60 [47, 48] puis développée et formalisée par Shafer [49] au milieu des années 70. Elle est donc parfois appelée théorie de Dempster-Shafer ou encore théorie de l'évidence. La théorie des croyances s'inspire du cadre probabiliste pour représenter et synthétiser des informations mais avec l'avantage de pouvoir intégrer distinctement les propriétés d'incertitude et d'imprécision (à l'instar du formalisme possibiliste).

Dans le cadre crédibiliste, la modélisation de la connaissance est portée par des masses de croyance qui peuvent aussi bien être associées à des hypothèses singletons (comme dans la théorie des probabilités) qu'à des sous-ensembles plus larges (composées de plusieurs hypothèses singletons) permettant ainsi de représenter des situations incertaines. Le

processus de fusion consiste alors à manipuler les masses de croyance et à analyser leur répartition selon les hypothèses de réalisation.

Comme pour la théorie des possibilités, un certain nombre de techniques ont déjà été développées et appliquées principalement pour assurer les étapes de combinaison et de prise de décision. Nous avons fait le choix de travailler avec les plus communes, c'est-à-dire les opérateurs de Dempster-Shafer [50] et de Dubois et Prade [51] pour les opérations combinatoires, ainsi que les critères de maximum de croyance et de probabilité pignistique [52] pour les règles de décision.

À l'image de l'organisation utilisée pour le cadre possibiliste, nous avons choisi de présenter les différentes méthodes crédibilistes à travers une analyse séparée des étapes de modélisation, de combinaison et de décision excepté pour la méthode n°8 (méthode dite des « sources spécialisées » [53, 54]) qui, de par son originalité, a été traitée dans sa globalité.

A – Représentation de la connaissance (pour les méthodes n°6 et n°7)

Avant de décrire la manière dont le formalisme crédibiliste a été utilisé et adapté au contexte de l'étude, il est nécessaire de l'introduire dans un cadre général.

• Représentation crédibiliste de la connaissance dans un cadre général

La théorie des croyances nécessite, en premier lieu, de définir un ensemble S nommé cadre de discernement. Cet ensemble est constitué de toutes les propositions (ou hypothèses) simples d_i (singletons) correspondant, par exemple, aux différents états possibles pris par un système.

$$S = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_n\} \quad (5.48)$$

Dans une configuration dite en « monde fermé », le cadre de discernement est considéré comme exhaustif ; la solution au problème appartient donc forcément à une des propositions de S . Il existe cependant d'autres configurations (dites de « monde ouvert ») dans lesquelles le cadre de discernement peut ne pas être exhaustif du fait, par exemple, de l'arrivée de nouvelles hypothèses en cours de processus de fusion.

À partir du cadre de discernement, on construit un autre ensemble appelé référentiel de définition et noté 2^S . Celui-ci rassemble toutes les propositions possibles (simples ou composées) pouvant résulter d'une combinaison disjonctive des propositions du cadre de discernement. Autrement dit, 2^S contient l'ensemble de tous les sous-ensembles de S .

$$2^S = \{\emptyset, d_1, d_2, d_3, \dots, d_n, d_1 \cup d_2, d_1 \cup d_2 \cup d_3, \dots, S\} \quad (5.49)$$

On remarque que le référentiel de définition contient deux ensembles particuliers : l'ensemble vide et l'ensemble S . Le premier représente la proposition impossible tandis que le second, qui correspond à l'union de toutes les propositions simples, renvoie à l'ignorance totale.

Dans la suite du mémoire, afin d'alléger les notations, on notera $\{d_i, d_j\}$ l'ensemble correspondant à la proposition composée $d_i \cup d_j$. En outre, on parlera indifféremment de proposition ou d'hypothèse sachant qu'une proposition simple équivaut à un singleton tandis qu'une proposition composée correspond à un sous-ensemble né de l'union de plusieurs propositions simples.

Dans la théorie des croyances, le caractère incertain d'une proposition est porté par une masse de croyance élémentaire. Par analogie avec la théorie des probabilités, on peut donc percevoir cette masse de croyance comme une probabilité portant sur une proposition, la somme des masses de croyance affectées à l'ensemble des propositions possibles étant unitaire. Cependant, la théorie des croyances se démarque de la théorie des probabilités essentiellement par le fait que la masse de croyance unitaire peut être aussi bien répartie sur l'ensemble des propositions simples (singletons) que sur l'ensemble des propositions composées. On appellera donc fonction de masse, l'application qui affecte à chacun des sous-ensembles A du référentiel de définition une masse de croyance à valeur dans $[0,1]$ tel que :

$$m: 2^S \rightarrow [0,1]$$

$$\sum_{A \in 2^S} m(A) = 1 \quad (5.50)$$

Les sous-ensembles A de 2^S pour lesquels la masse de croyance n'est pas nulle sont appelés éléments focaux. Quand les éléments focaux se réduisent aux seules propositions simples, les masses de croyance sont assimilables à des probabilités ; on parle alors de jeu de masses bayésiens.

Dans le cadre crédibiliste, le fait d'affecter de la masse de croyance sur une proposition A de nature composée permet d'introduire la notion d'ignorance partielle. Celle-ci peut alors représenter une alternative très utile quand, par exemple, on ne connaît pas parfaitement le degré de croyance d'un élément d_i de A . Enfin, la théorie des croyances prévoit également le cas d'une ignorance totale par rapport à toutes les propositions de 2^S puisque, dans cette situation, la masse unitaire est exclusivement et intégralement affectée sur S .

• Représentation crédibiliste de la connaissance dans le cadre de la thèse

La phase d'attribution des masses de croyances est certainement l'étape la plus délicate dans un processus de fusion crédibiliste. Étant très dépendante du contexte d'application, l'élaboration de la fonction de masse correspond très souvent à une solution « sur-mesure » même si dans certains domaines comme le traitement d'images, des techniques « standards » existent (modélisation basée sur des probabilités, sur des distances [55], des histogrammes [56], etc.). Pour ces travaux, nous nous sommes appuyés sur le modèle de distribution de possibilité décrit dans la section 5.4.3 pour représenter la connaissance dans le domaine des croyances.

À ce stade, il est important de faire un bref rappel sur le modèle possibiliste utilisé dans la thèse. Dans le cadre possibiliste, l'information est représentée au moyen d'une distribution de possibilité formée à partir d'une série d'intervalles de confiance emboîtés (un intervalle renvoyant à une α -coupe de la distribution) et centrés autour de la mesure d'uni. Parmi ces

intervalles, on distingue le noyau (intervalle ayant le moins d'éléments) et le support (intervalle ayant le plus d'éléments) ; les autres intervalles, qualifiés « d'intermédiaires » sont obtenus, par construction, à partir du noyau et du support. Enfin, les caractéristiques de la distribution de possibilité (ex : nombre d'éléments composant le noyau et du support) varient selon la bande d'ondes, le degré de fiabilité de la source et l'écart de répétabilité des mesures sur le segment de route considéré.

Dans le cadre crédibiliste, la masse de croyance unitaire va être répartie sur les propositions simples et/ou composées correspondant aux intervalles emboîtés mentionnés précédemment. Une telle démarche conduit alors à fabriquer un jeu de masses dit « consonant ».

La procédure mathématique permettant d'assurer l'attribution des masses de croyance est décrite ci-après. Elle est illustrée au moyen de l'exemple qui a servi à expliciter le modèle possibiliste retenu dans la thèse (Cf. Fig. 5.12).

a) Définitions

Soit S le cadre de discernement constitué des hypothèses singletons $\{d_i\}$, signifiant chacune « La valeur vraie de l'uni est d_i ». Dans notre contexte, l'ensemble S correspond aux valeurs que peuvent prendre les notes d'uni par bande d'ondes. Donc :

$$S = \{0, 0.5, 1, 1.5, 2, \dots, 9.5, 10\} \quad (5.51)$$

Par ailleurs, on note A un sous-ensemble du référentiel de définition 2^S tel que :

$$A = d_i \cup d_{i+1} \cup d_{i+2} \cup \dots \cup d_{i+k} \quad (5.52)$$

ou dans une notation plus allégée :

$$A = \{d_i, d_{i+1}, d_{i+2}, \dots, d_{i+k}\} \quad (5.53)$$

Un sous-ensemble A est donc constitué de disjonctions de singletons de sorte que $0 \leq i, 0 \leq k, 0 \leq i+k \leq 10$ et $d_{i+\lambda} - d_{i+\lambda-1} = 0.5$.

b) Identification des intervalles emboîtés

Soit $\{d_x\}$ la proposition correspondant à la mesure d'uni de valeur x que l'on cherche à représenter. À partir de $\{d_x\}$ et en s'aidant de la représentation en distribution de possibilité, on commence par identifier tous les sous-ensembles correspondant au noyau, au support et aux intervalles de confiance intermédiaires. Une fois ce travail accompli, on a donc $A_1 \subset A_2 \subset \dots \subset A_\lambda \subset \dots \subset A_n$ (A_1 étant le noyau et A_n le support), chacun de ces sous-ensembles satisfaisant la relation 5.52. Le résultat de cette démarche est illustré au moyen de l'exemple ci-après.

Exemple :

On considère une source j qui, sur un segment k et pour la bande PO , présente un écart-type de répétabilité $\sigma_{r,k}^j$ et un degré de fiabilité w . Sur ce segment, cette source mesure une note d'uni PO égale à 5. On pose, par exemple, que $\sigma_{r,k}^j = 1$, $w = 0.8$ et $x = 5$. La distribution de possibilité correspondant à la modélisation de cette note d'uni dans cette situation est représentée sur la Figure n°5.22.

À partir de cette distribution de possibilité, centrée sur $d_x = 5$, on construit plusieurs intervalles emboîtés correspondant aux sous-ensembles suivants :

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \{4, 4.5, 5, 5.5, 6\} ; \\
 A_2 &= \{3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5\} ; \\
 A_3 &= \{3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5, 7\} ; \\
 A_4 &= \{2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5, 7, 7.5\} ; \\
 A_5 &= \{2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5, 7, 7.5, 8\} ;
 \end{aligned}$$

où A_1 et A_5 correspondent respectivement au noyau et au support de la distribution de possibilité.

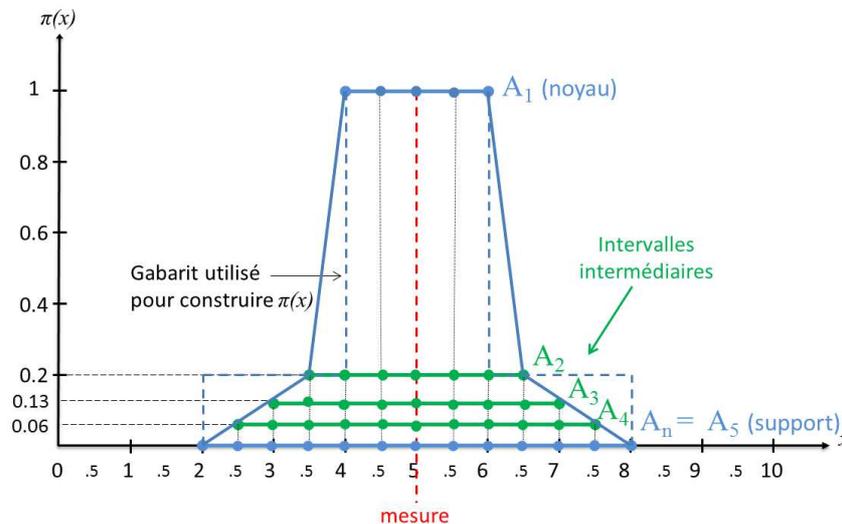


Figure 5.21 : Sous-ensembles emboîtés définis à partir d'une distribution de possibilité

c) Attribution des masses de croyance

Pour finaliser le processus, l'étape suivante consiste à répartir la masse unitaire sur les sous-ensembles identifiés précédemment en faisant appel aux mesures de nécessité de la théorie des possibilités. La méthode retenue pour effectuer cette opération s'exprime de la façon suivante :

$$\begin{cases} m(A_1) = N(A_1) \\ m(A_k) = N(A_k) - N(A_{k-1}) \quad \forall k \in [2, n-1[\\ m(A_n) = 1 - N(A_{n-1}) \\ m(\emptyset) = 0 \end{cases} \quad (5.54)$$

en rappelant que $0 \leq N(A_1) \leq N(A_2) \leq \dots \leq N(A_n) \leq 1$.

Cette opération peut se résumer comme suit :

- La masse de croyance attribuée à A_1 (noyau de π) est égale à la mesure de nécessité de ce sous-ensemble ;
- La masse de croyance attribuée à un sous-ensemble intermédiaire A_k (pour $k = 2, \dots, n-2$) est égale à la différence des mesures de nécessité entre ce sous-ensemble et le sous-ensemble de cardinal « immédiatement » plus petit ;
- La masse de croyance attribuée à A_n (support de π) est égale à la différence entre le degré de nécessité maximal ($N=1$) et la mesure de nécessité du sous-ensemble de cardinal « immédiatement » plus petit ;

Dans cette méthode, la proposition correspondant à l'intervalle A_n récupère donc la masse de croyance qui aurait dû être affectée à la proposition A_{n-1} .

Dans le contexte de l'exemple, l'application de la relation 5.54 donne les résultats suivants :

$$\begin{aligned} m(A_1) &= N(A_1) = 0.8 \\ m(A_2) &= N(A_2) - N(A_1) = 0.87 - 0.8 = 0.07 \\ m(A_3) &= N(A_3) - N(A_2) = 0.94 - 0.87 = 0.07 \\ m(A_5) &= 1 - N(A_4) = 1 - 0.94 - 0.87 = 0.06 \end{aligned}$$

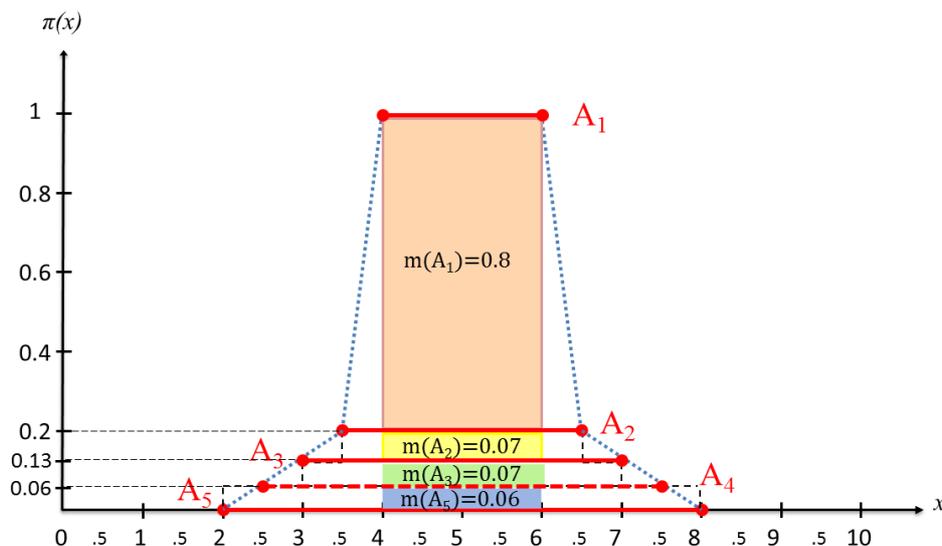


Figure 5.22 : Résultat du calcul des masses de croyance sur l'exemple

d) Discussion sur la modélisation retenue

Le processus de modélisation décrit précédemment fait émerger un jeu de masses consonant ce qui signifie que la seule partie réduite du référentiel de définition est exploitée. En conséquence, le nombre d'éléments focaux potentiels est donc relativement faible au regard du nombre de propositions inclus dans le référentiel de définition. Par ailleurs, le fait de travailler avec un jeu de masses consonant permet de rapprocher le modèle crédibiliste du modèle possibiliste¹. De cette manière, en essayant d'établir des modèles analogues, le comparatif portant sur le niveau de performance de chacune des méthodes investiguées ne sera pas uniquement conditionné par l'étape de modélisation mais donnera également toute sa place aux étapes de combinaison et de prise de décision.

De plus, à l'instar du modèle possibiliste retenu dans la thèse, le modèle crédibiliste offre une certaine sensibilité vis-à-vis du degré de fiabilité de la source, de l'écart de répétabilité des mesures sur le segment de route considéré et enfin de la bande d'ondes. Il faut voir cette propriété comme un atout puisqu'elle permet de moduler la représentation des différentes informations à fusionner. On remarque ainsi que (Cf. Fig. 5.23) :

- Plus le degré de fiabilité de la source de mesure augmente, plus la masse unitaire se reporte sur les propositions de cardinal faible, proches du noyau. À l'inverse, plus le degré de fiabilité de la source diminue, plus la masse unitaire se reporte sur les propositions de cardinal élevé, proches du support (on accorde alors plus de croyance aux hypothèses « imprécises ») ;
- Pour une même source et un même support A_n , plus le degré de répétabilité de la source sur un segment donné est faible (*i.e.* l'écart type de répétabilité et donc le nombre d'éléments du sous-ensemble correspondant au noyau sont donc relativement élevés), moins le nombre d'intervalles intermédiaires est élevé. La masse se répartit alors sur des éléments focaux moins nombreux ce qui peut s'apparenter à une baisse de résolution du niveau d'informativité.

Pour finir, il faut également noter que, comme pour la distribution de possibilité, le modèle crédibiliste retenu pour ces travaux perd sa symétrie au fur et à mesure que la note d'uni à représenter se rapproche d'une des bornes du cadre de discernement.

¹ On rappelle cependant que, dans cette modélisation, la théorie des croyances n'est pas utilisée au maximum de ses capacités puisqu'elle prévoit, à la différence de la théorie des possibilités, les situations où les intervalles peuvent se chevaucher (on parle alors de jeu de masses partiellement consonant) voire même n'avoir aucun singleton en commun.

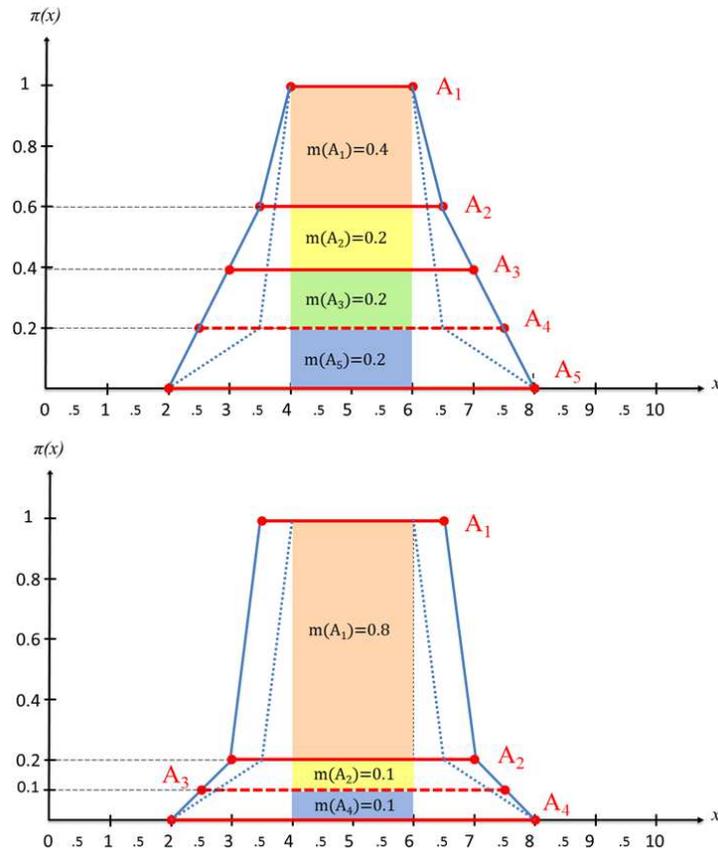


Figure 5.23 : Effets dus à la baisse du degré de fiabilité de la source (figure du haut) et à la baisse du degré de répétabilité sur le segment de route (figure du bas) sur le modèle crédibiliste

B – Combinaison des masses de croyance (pour les méthodes n°6 et n°7)

Dans la théorie des croyances, cette étape consiste à combiner les éléments focaux issus des sources de mesures ainsi que leurs jeux de masses respectifs. Selon l'opérateur choisi, la combinaison peut déboucher sur des issues différentes :

- Renforcement, affaiblissement ou invariance des masses de croyance attribuées aux éléments focaux ;
- Émergence de nouveaux éléments focaux (nouvelles hypothèses) avec calcul des jeux de masses associés.

Les opérations de base pour relier des sous-ensembles sont l'opération d'intersection (correspondant à un ET logique dans l'algèbre booléenne) et l'opération d'union (correspondant à un OU logique dans l'algèbre booléenne).

La règle d'attribution des masses de croyance sur chacune des hypothèses formées à partir des éléments focaux est fixée par l'opérateur de combinaison. Comme pour la théorie des possibilités, le cadre crédibiliste recense plusieurs opérateurs de combinaison qui se répartissent en plusieurs familles (sévères, indulgents, prudents, etc.). Dans ces travaux, nous avons retenu deux opérateurs : l'opérateur de Dempster-Shafer et l'opérateur de Dubois et Prade. Chacun de ces opérateurs est intégré dans un processus de fusion en

cascade où les informations sont combinées deux à deux, d'abord dans un cadre intra-source puis dans un cadre inter-sources.

• Opérateur de combinaison n°1 : opérateur de Dempster-Shafer

Cet opérateur, également appelé règle ou somme orthogonale de Dempster-Shafer, est certainement l'opérateur de combinaison le plus communément rencontré dans la théorie des croyances. Pour la combinaison de deux fonctions de masses, il s'exprime de la façon suivante¹ :

Considérons une fonction de masse m_1 , qui a pour élément focaux les hypothèses formant le sous-ensemble B_1 de 2^S . Soit $m_{1,j}$ la valeur, non nulle, que prend cette fonction sur l'élément focal j .

Considérons une autre fonction de masse m_2 , qui a pour élément focaux les hypothèses formant le sous-ensemble B_2 de 2^S . Soit $m_{2,k}$ la valeur, non nulle, que prend cette fonction sur l'élément focal k .

On appelle $m_{1\&2}$ la fonction de masse combinant m_1 et m_2 . Cette fonction est définie sur un sous-ensemble A de 2^S , composé des éléments focaux de m_1 et des éléments focaux de m_2 tel que $A = B_1 \cap B_2$.

La masse attribuée à l'élément focal l , c'est-à-dire à l'hypothèse l de A , dans la fonction combinée est donnée par :

$$m_{1\&2,l} = \sum_{\substack{l \in A \\ l \cap j \neq \emptyset \\ l \cap k \neq \emptyset}} m_{1,j} \cdot m_{2,k} \quad (5.55)$$

Ce que nous noterons, de façon condensée :

$$m_{\oplus}(A) = (m_1 \oplus m_2)(A) = \sum_{A=B_1 \cap B_2} m_1(B_1) m_2(B_2) \quad (5.56)$$

En considérant une opération de combinaison portant sur J fonctions de masses (i.e. avec J sources), l'expression précédente peut alors se généraliser :

$$(m_1 \oplus \dots \oplus m_J)(A) = \sum_{A=B_1 \cap B_2 \cap \dots \cap B_J} \prod_{j=1}^J m_j(B_j) \quad (5.57)$$

Le comportement de cet opérateur de nature conjonctive (il considère donc que les sources à combiner sont toutes fiables), ce qui signifie qu'il va systématiquement privilégier les propositions issues de l'intersection des éléments focaux. Donc, comme tout opérateur conjonctif, la règle de Dempster-Shafer est relativement discriminante ce qui a pour effet de restreindre, au fur et à mesure de son application, le nombre de propositions possibles.

De plus, lorsque les informations à fusionner ne sont pas en concordance totale (c'est le cas lorsque, dans l'expression 5.8, on a soit $l \cap j = \emptyset$ soit $l \cap k = \emptyset$), la règle de Dempster-Shafer

¹ Un exemple d'application sur un exemple simple est donné en Annexe A.

va mécaniquement faire croître la masse portant sur l'ensemble-vide. Cette dernière peut alors être interprétée comme une mesure de conflit dont l'expression mathématique s'écrit :

$$K = \sum_{B \cap C = \emptyset} m_1(B)m_2(C) \quad (5.58)$$

Lorsque la mesure de conflit est non nulle, deux opérations sont possibles :

- On redistribue la masse de l'ensemble vide vers les autres éléments focaux. Dans ce cas, la règle de Dempster-Shafer prévoit l'opération de normalisation suivante :

$$m_{\oplus}(A) = \frac{1}{1-K} (m_1 \oplus m_2)(A) = \frac{1}{1-K} \sum_{B \cap C = A} m_1(B)m_2(C) \quad (5.59)$$

En procédant de la sorte, la masse de l'ensemble vide est alors réinitialisée à la valeur nulle. On respecte alors strictement l'hypothèse d'un monde fermé qui considère que seuls les éléments appartenant au cadre de discernement peuvent constituer les éléments focaux. Le prix à payer pour cette normalisation est l'ignorance et le masquage du degré de conflit existant entre deux sources. Or, cette valeur est susceptible de constituer, en soit, une information intéressante à exploiter.

- On conserve la masse de l'ensemble vide pour l'opération de combinaison suivante. En fin de processus, l'ensemble-vide peut alors représenter une hypothèse possible voire même la seule hypothèse possible quand le conflit entre les sources de mesure est total. Dans ce cas, on se ramène à une hypothèse de monde ouvert et on se laisse ainsi le choix de ne pas prendre de décision. C'est cette solution qui a été retenue dans ces travaux.

Compte-tenu du niveau de fiabilité des sources dans notre étude et de la présence possible d'informations conflictuelles, l'opérateur de Dempster-Shafer pourrait s'avérer trop sévère et ne déboucher, au final, que sur l'ensemble vide. Néanmoins, en plus d'être une des méthodes les plus répandues, celui-ci présente plusieurs avantages :

- Il est associatif et donc insensible à l'ordre combinatoire ;
- Il n'est pas idempotent, ce qui signifie que la combinaison d'une information avec elle-même (ou autrement dit la combinaison de deux informations identiques) aura pour effet de renforcer les masses fortes et d'affaiblir les masses faibles. Cette propriété est intéressante dans le contexte de l'étude puisque le nombre d'informations identiques peut être assez conséquent (en particulier dans la fusion intra-source) ;
- Son comportement conjonctif limite le nombre d'éléments focaux et facilite donc la prise de décision.

• Opérateur de combinaison n°2 : opérateur de Dubois et Prade

L'opérateur de Dubois et Prade est un opérateur mixte qui se comporte, selon la situation, soit de façon conjonctive soit de façon disjonctive. Dans le cas d'une combinaison de deux fonctions de masses, cet opérateur s'exprime de la façon suivante¹ :

Pour tous les éléments non vides $A, B, C \in 2^S$ ($A \neq \emptyset$)

$$m_{DP}(A) = \sum_{B \cap C = A} m_1(B)m_2(C) + \sum_{\substack{B \cup C = A \\ B \cap C = \emptyset}} m_1(B)m_2(C) \quad (5.60)$$

L'opérateur de Dubois et Prade fonctionne de la façon suivante :

- Quand les sources ne sont pas en conflit, l'opérateur adopte un comportement conjonctif. Le sous-ensemble obtenu correspond alors à l'intersection des deux sous-ensembles à combiner et est affecté d'une masse de croyance égale au produit des masses des deux sous-ensembles en question.
- Quand les sources sont en conflit, l'opérateur fait l'hypothèse qu'au moins une des deux sources dit vrai (sans savoir laquelle) et redistribue la masse conflictuelle sur le sous-ensemble correspondant à l'union des deux sous-ensembles à combiner.

L'intérêt d'utiliser cet opérateur réside donc principalement dans sa capacité à fonctionner dans un environnement conflictuel [57] même quand celui-ci est total. En outre, comme pour l'opérateur de Dempster-Shafer, l'opérateur de Dubois et Prade n'est pas idempotent ; on lui prêtera alors les mêmes qualités. Néanmoins, l'opérateur de Dubois et Prade ne possède pas la propriété d'associativité ce qui signifie que le résultat final dépend de l'ordre combinatoire. En conséquence, son utilisation nécessite de respecter la méthode d'ordonnement des informations à combiner préalablement établie (Cf. section 5.4.3).

C – Règles de décision pour les méthodes n°6 et n°7

On rappelle que, pour les besoins de notre étude, la décision finale doit soit prendre la forme d'un singleton (note d'uni) soit conduire à une non-décision. Dans la théorie des croyances, la prise de décision consiste généralement à choisir un ou plusieurs éléments satisfaisant l'un des critères suivants : maximum de crédibilité, maximum de plausibilité et maximum de probabilité pignistique. Chacune de ces notions fait l'objet d'une brève description avant de préciser, dans le détail, les règles de décision retenues.

Description de la fonction de crédibilité :

La masse de croyance $m(A)$ affectée au sous-ensemble A représente le degré de croyance placée exactement sur A . Si l'on veut obtenir le degré total de croyance correspondant à ce même sous-ensemble, il faut ajouter toutes les masses de croyance issues des sous-ensembles B qui impliquent A (autrement dit, qui sont inclus dans A). De façon formelle, la crédibilité de A est définie, de façon générale, par :

¹ Un exemple d'application sur un exemple simple est donné en Annexe A.

$$Cr: 2^S \rightarrow [0,1]$$

$$Cr(A) = \sum_{B \subseteq A, B \neq \emptyset} m(B) \tag{5.61}$$

Description de la fonction de plausibilité :

La plausibilité d'un sous-ensemble A correspond au rassemblement des masses de croyances de toutes les propositions qui ne contredisent pas A . Autrement dit, elle correspond à la somme des masses de croyance associées aux propositions dont les intersections avec la proposition A n'est pas vide. Elle s'exprime mathématiquement par :

$$Pl: 2^S \rightarrow [0,1]$$

$$Pl(A) = \sum_{A \cap B \neq \emptyset} m_j(B) \tag{5.62}$$

Le mécanisme des fonctions de crédibilité et de plausibilité est illustré à travers la figure suivante (Fig. 5.24).

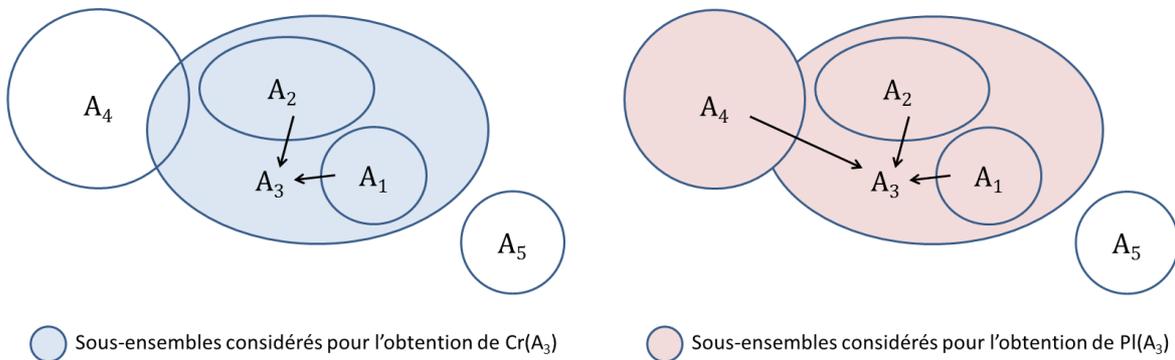


Figure 5.24 : Illustration des notions de crédibilité et de plausibilité dans le cas général

À l'image du couple $[N(A), \Pi(A)]$ qui permettait d'encadrer le degré de certitude d'une information dans la théorie des possibilités, les mesures de crédibilité et de plausibilité peuvent être perçues comme des bornes encadrant le degré de croyance d'une information. Dans ce cas, il faut alors considérer l'intervalle $[Cr(A), Pl(A)]$ où la mesure de crédibilité, qui est une mesure prudente du degré de croyance, correspond à la borne inférieure de l'intervalle tandis que la mesure de plausibilité, qui est une mesure optimiste du degré de croyance, correspond à la borne supérieure.

Par ailleurs, dans le cas précis de notre étude où les sous-ensembles sont agencés de façon particulière (emboîtés), la mesure de plausibilité, qui n'était déjà pas de nature

discriminante, perd réellement de son intérêt puisque la plupart des sous-ensembles (non vides) seront crédités de la valeur de plausibilité maximale. Pour cette raison, nous ne l'avons pas retenu comme critère de décision et nous avons préféré faire appel à un second critère appelé probabilité pignistique.

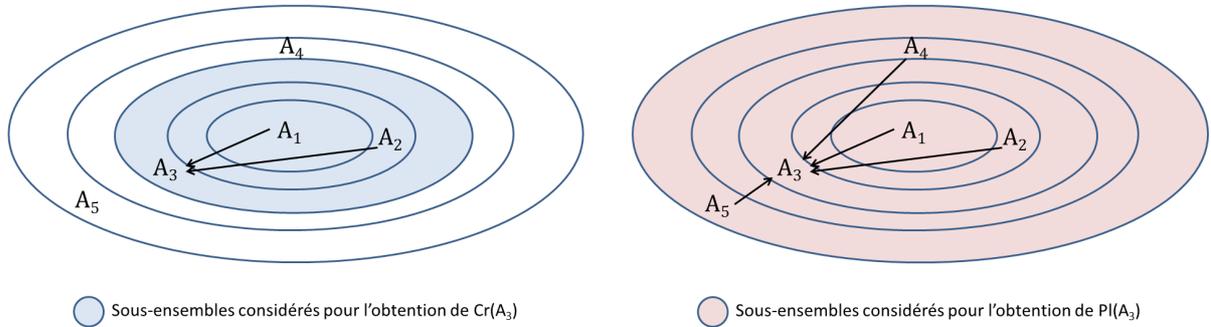


Figure 5.25 : Illustration des notions de crédibilité et de plausibilité dans le cas de sous-ensembles emboîtés

▪ Description de la probabilité pignistique :

Le calcul de la probabilité pignistique résulte du passage du cadre crédibiliste vers le cadre probabiliste. Il a pour effet de redistribuer équitablement (proportionnellement au nombre d'hypothèses concernées) les masses de croyance de chacun des éléments focaux vers les singletons qui les composent. La probabilité pignistique, $BetP(d_i)$ à valeurs dans $[0,1]$, est calculée de la façon suivante :

$$BetP(d_i) = \sum_{A \in 2^\Omega, d_i \in A} \frac{m(A)}{|A|(1 - m(\emptyset))} \tag{5.43}$$

Finalement, pour le processus de décision dans le cadre crédibiliste, deux règles générales ont été retenues. La première est basée sur le maximum de crédibilité, la seconde sur le maximum de probabilité pignistique. Chacune de ces règles est adaptée au contexte de l'étude au moyen de critères supplémentaires.

▪ Décision au moyen de la fonction de crédibilité

La prise de décision consiste, en premier lieu, à choisir le sous-ensemble (autre que l'ensemble vide) ayant la mesure de crédibilité la plus élevée. Plusieurs cas de figures se posent alors :

Cas n°1 : il existe un unique sous-ensemble A_f parmi les éléments focaux résultant de l'opération de combinaison tel que :

$$Cr(A_f) = \max_i [Cr(A_i)] \tag{5.63}$$

Si A_f correspond à une proposition simple (singleton) tel que $A_f = \{d_f\}$ alors, la décision finale est la note d'uni de valeur d_f . Mais si A_f correspond à une proposition composée alors d_f est égale à la moyenne des singletons composant A_f arrondie au demi-point le plus proche.

Cas n°2 : il existe plusieurs sous-ensembles A_f ayant le maximum de crédibilité.

Si tous ces sous-ensembles sont des singletons et qu'ils sont espacés de deux points au plus (ex : $\{4\}, \{4.5\}, \{5\}, \{5.5\}, \{6\}$), alors d_f est égale à la moyenne de ces singletons (dans l'exemple, $d_f = 4.5$). Sinon, aucune décision n'est prise.

Si la condition précédente n'est pas remplie (ex : les sous-ensembles sont des propositions composées), alors la décision est prise parmi la proposition contenant le plus faible nombre d'éléments ; on poursuit alors le processus de prise de décision avec la démarche exposée dans le cas n°1.

▪ Décision au moyen de la probabilité pignistique

La prise de décision consiste à choisir le singleton $\{d_f\}$ qui a la probabilité pignistique la plus élevée :

$$BetP(d_f) = \max_i [BetP(d_i)] \quad (5.64)$$

S'il existe au moins deux singletons ayant une probabilité pignistique égale à la probabilité maximale, plusieurs cas de figures peuvent se présenter :

- Si tous les singletons en question sont espacés d'un demi-point (singletons « voisins »), la décision correspond à leur moyenne arrondie au demi-point le plus proche ;
- Si les singletons ne sont pas voisins mais espacés au maximum de deux points, la décision correspond également à leur moyenne ;
- Si les singletons ne sont pas voisins et séparés de plus de deux points la prise de décision consiste à ne pas en prendre.

Pour conclure sur les règles de décision, il faut préciser que d'autres cas particuliers en lien avec la masse de croyance portant sur l'ensemble vide (masse de croyance représentant le niveau de conflit) ou, plus rarement, avec la masse portant sur S (ignorance totale) peuvent survenir. Par exemple, dans le cadre d'une combinaison avec l'opérateur de Dempster-Shafer, si la masse de croyance associée à l'ensemble vide est trop importante, aucune décision n'est prise. Il en va de même quand la masse de croyance portant sur S est trop élevée.

D – Fusion par méthode des sources spécialisées (méthode n°8)

La méthode des sources spécialisées se démarque des schémas classiques de fusion principalement par sa façon de représenter la connaissance. Dans le cas de notre étude, cette méthode considère le fait que chaque source se « spécialise » sur chacune des classes de notes d'uni d_i (avec $d_1 = 0, d_2 = 0.5, d_3 = 1, \dots, d_{20} = 9.5, d_{21} = 10$) à travers une hypothèse d'approbation (notée H), une hypothèse de négation (notée \overline{H}) et une hypothèse d'ignorance (correspondant au cadre de discernement Ω) tel que :

$$\Omega = \{H, \overline{H}\} \quad (5.65)$$

Le référentiel de définition issu de Ω s'écrit donc :

$$2^\Omega = \{\emptyset, H, \overline{H}, \Omega\} \quad (5.66)$$

La signification et l'utilisation des trois propositions H, \overline{H} et Ω sont illustrées à travers l'exemple suivant :

Exemple :

- Hypothèse H : selon la source s_j , la note d'uni sur ce segment de route vaut 3 sur 10 ;
- Hypothèse \overline{H} : selon la source s_j , la note d'uni sur ce segment de route n'est pas égale à 3 sur 10 ;
- Hypothèse Ω : la source s_j ne sait rien de la note d'uni sur ce segment de route (ignorance totale).

En considérant ces trois éléments focaux, l'étape suivante consiste à leur attribuer des masses de croyance.

• Attribution des masses de croyance

Pour cet exercice, on rappelle qu'il n'existe pas de modèle standard¹ valable pour toute application et qu'il appartient donc à chacun de trouver le modèle semblant être le plus approprié pour rassembler toutes les connaissances portant sur les informations à traiter.

Pour notre part, nous avons choisi de raisonner avec les grandeurs spécifiques déterminées puis utilisées précédemment à savoir :

- w_j : la fiabilité de la source s_j (à valeurs dans $[0,1]$) ;
- $\sigma_{r,k}^{s_j}$: l'écart type de répétabilité des notes d'uni délivrées par une source s_j sur un segment k donné (valeur faisant office de seuil de tolérance minimale);
- α_3 : le niveau de dispersion maximal des notes d'uni pour chaque bande d'ondes établi à partir d'essais sur route (valeur faisant office de seuil de tolérance maximale).

¹ La littérature propose cependant quelques cadres méthodologiques généraux.

Le principe général de construction des fonctions de masses élémentaires associées à chacune des sources est basé sur une mesure d'éloignement entre la mesure fournie par la source et les classes de note d'uni. Ainsi, plus une classe de note est éloignée de la note délivrée par la source de mesure, plus la masse correspondant à l'hypothèse « vraie » (H) s'amenuise au profit des hypothèses \bar{H} et Ω .

Soit x une classe de notes et u la variable désignant l'écart entre cette même classe et la mesure fournie par la source de mesure. Pour une source s_j , les masses de croyance portant sur les éléments focaux de x sont attribuées de la façon suivante (Cf. exemple Fig. 5.26) :

$$\forall u \in [0, \sigma_{r,k}^{s_j}],$$

$$\begin{cases} m_{s_j}(H_x) = w_j \\ m_{s_j}(\bar{H}_x) = 0 \\ m_{s_j}(\Omega_x) = 1 - w_j \end{cases} \quad (5.67)$$

$$\forall u \in]\sigma_{r,k}^{s_j}, \alpha_3],$$

$$\begin{cases} m_{s_j}(H_x) = \frac{-w_j}{\alpha_3 - \sigma_{r,k}^{s_j}}(u - \alpha_3) \\ m_{s_j}(\bar{H}_x) = 0 \\ m_{s_j}(\Omega_x) = 1 - \left[\frac{-w_j}{\alpha_3 - \sigma_{r,k}^{s_j}}(u - \alpha_3) \right] \end{cases} \quad (5.68)$$

$$\forall u \in]\alpha_3, 2\alpha_3 - \sigma_{r,k}^{s_j}],$$

$$\begin{cases} m_{s_j}(H_x) = 0 \\ m_{s_j}(\bar{H}_x) = \frac{w_j}{\alpha_3 - \sigma_{r,k}^{s_j}}(u - \alpha_3) \\ m_{s_j}(\Omega_x) = 1 - \left[\frac{w_j}{\alpha_3 - \sigma_{r,k}^{s_j}}(u - \alpha_3) \right] \end{cases} \quad (5.69)$$

$$\forall u \in > 2\alpha_3 - \sigma_{r,k}^{s_j},$$

$$\begin{cases} m_{s_j}(H_x) = 0 \\ m_{s_j}(\bar{H}_x) = w_j \\ m_{s_j}(\Omega_x) = 1 - w_j \end{cases} \quad (5.70)$$

La fonction de masse, construite par intervalles, est donc, comme pour celle établie dans le cadre des méthodes n°6 et n°7, sensible aux valeurs particulières w_j , $\sigma_{r,k}^{s_j}$ et α_3 . En considérant l'ensemble des classes de notes, cette sensibilité se traduit notamment par les propriétés suivantes :

- Plus le degré de fiabilité de la source est faible, plus la masse de croyance portant sur l'hypothèse correspondant à l'ignorance ($m(\Omega)$) est forte. Par réciprocité, plus le degré de fiabilité de la source est fort, plus la masse affectée à Ω est faible.
- Plus le degré de répétabilité de la source sur un segment donné est faible (forte dispersion des mesures), moins la masse de croyance allouée à H est concentrée sur une classe de note en particulier. Une telle configuration tend à faire croître le niveau d'ambiguïté lors de la prise de décision.

De plus, cette fonction respecte le fait qu'il ne peut y avoir simultanément des masses de croyance affectées sur les hypothèses H et \bar{H} une telle situation étant sémantiquement incorrecte et, plus grave, génératrice de conflit.

Sur un exemple ($w_j = 1$; $\sigma_{r,k}^{s_j} = 0.5$; $\alpha_3 = 1.5$), la fonction de masse adoptée pour cette méthode est représentée sur la figure suivante.

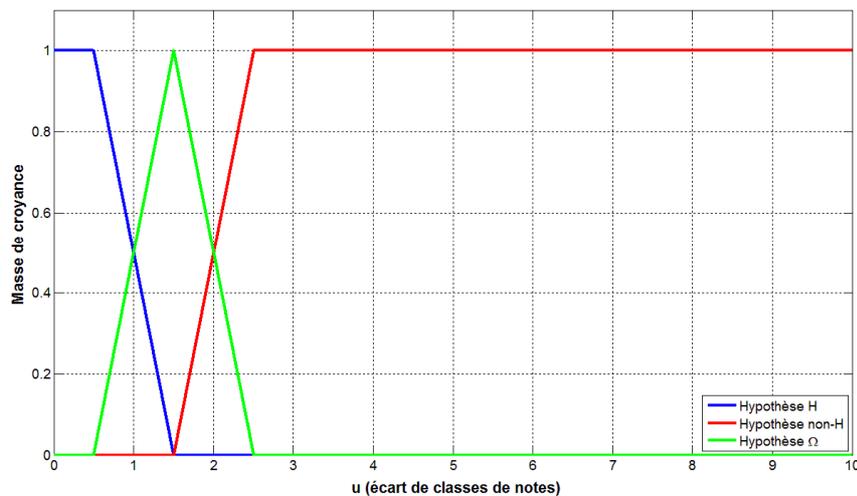


Figure 5.26 : Exemple de distribution de masses de croyance pour chacune des hypothèses

À l'issue de cette opération, pour une source donnée, chaque proposition possède alors sa masse de croyance et ce pour toutes les classes de notes d'uni. L'étape suivante consiste à combiner ces masses pour un ensemble de sources.

• Combinaison des sources spécialisées

Pour cette étape, les informations sont combinées par classe de notes au moyen de l'opérateur de Dempster-Shafer. Ce dernier traite, en une seule opération, les fonctions de masses de l'ensemble des sources participant au processus de fusion au moyen des équations suivantes [58] :

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{s_1, \dots, s_n}(H_x) = \prod_{s_j=1}^n (m_{s_j}(H_x) + m_{s_j}(\Omega_x)) - \prod_{s_j=1}^n m_{s_j}(\Omega_x) \\ m_{s_1, \dots, s_n}(\overline{H}_x) = \prod_{s_j=1}^n (m_{s_j}(\overline{H}_x) + m_{s_j}(\Omega_x)) - \prod_{s_j=1}^n m_{s_j}(\Omega_x) \\ m_{s_1, \dots, s_n}(\Omega_x) = \prod_{s_j=1}^n m_{s_j}(\Omega_x) \\ m_{s_1, \dots, s_n}(\emptyset_x) = 1 - \prod_{s_j=1}^n (1 - m_{s_j}(H_x)) - \prod_{s_j=1}^n (1 - m_{s_j}(\overline{H}_x)) + \prod_{s_j=1}^n m_{s_j}(\Omega_x) \end{array} \right. \quad (5.71)$$

Après combinaison, on retrouve donc quatre hypothèses pour chacune des 21 classes de notes d'uni à savoir : l'hypothèse d'approbation, l'hypothèse de négation, l'hypothèse d'ignorance et l'ensemble vide. Quand une masse est allouée à l'ensemble vide, celle-ci peut alors s'interpréter comme le degré de conflit général régnant entre les sources. Par ailleurs, lorsque la masse unitaire est intégralement attribuée à Ω alors l'ignorance est totale sur la classe de notes considérée. Par conséquent, il est intéressant de prendre en compte et d'analyser les masses portant sur ces deux propositions lors de la prise de décision.



Figure 5.27 : Schéma illustrant la méthode des sources spécialisées

• Prise de décision

Une fois les masses de croyances combinées localement (par classe de notes), l'étape suivante consiste à prendre une décision de façon globale, c'est-à-dire en observant la répartition des masses sur l'ensemble des classes de notes.

La règle de décision adoptée dans cette méthode obéit à la démarche suivante : parmi toutes les classes de notes dont le degré de conflit (masse de l'ensemble vide) est inférieur à 0.5, on recherche celle qui a la masse associée à l'hypothèse H la plus élevée. À ce stade, s'il n'est pas possible de départager les classes (ambiguïté), on retient celle pour qui le niveau d'ignorance est le plus faible. Et, si cela ne suffit toujours pas, alors on se ramène aux cas évoqués dans la partie C en suivant les mêmes instructions (ex : départager plusieurs classes de notes voisines). Enfin, si, pour toutes les classes, le degré de conflit ou d'ignorance est trop fort aucune décision n'est prise.

5.5 Construction d'un indice de confiance

L'une des spécifications du cahier des charges est d'assortir la note d'uni issue du processus de fusion d'un indice de confiance pour chaque segment de route étudié. À travers cet indice, on souhaite préciser si le contexte dans lequel la décision a été prise est favorable ou défavorable.

Pour construire cet indice de confiance, nous avons notamment récupéré une somme d'informations diverses provenant des différentes étapes des processus de fusion utilisés dans ces travaux. Ces informations ont par la suite été converties en plusieurs critères à valeurs dans $[0,1]$, sachant que certains de ces critères ne peuvent pas être obtenus pour l'ensemble des méthodes investiguées.

▪ Critère n°1 : Volume de mesures fournies par l'ensemble des sources

On part du principe que plus il y a d'informations disponibles, plus le niveau de confiance associé à la note d'uni finale sera élevé. L'opération de conversion utilisée pour transposer ce nombre dans une échelle comprise entre 0 et 1 est la suivante :

Soit n le nombre d'informations disponibles,

$$C_1 = 1 - \frac{\sqrt{n}}{n} \quad (5.72)$$

Plus le nombre d'informations est important, plus C_1 tend vers 1.

▪ Critère n°2 : Niveau global de fiabilité des sources

Très logiquement, plus le degré de fiabilité global des sources participant à la mesure est élevé plus la décision a de chances d'être exacte. Le degré de fiabilité de chaque source étant traduit par un coefficient de pondération compris entre 0 et 1, ce critère s'écrit donc tout simplement :

Soit J le nombre total de sources,

$$C_2 = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J w_j \quad (5.73)$$

Plus le degré de fiabilité des sources est élevé, plus C_2 tend vers 1.

▪ **Critère n°3** : Niveau global de consensus entre les sources lors de l'étape de combinaison inter-sources

Parmi les techniques de combinaisons exposées précédemment, la plupart dégage une mesure de consensus (ou de conflit par complémentarité) issue de la fusion inter-sources qui correspond à :

- La hauteur maximale de chevauchement des distributions de possibilités dans le cadre possibiliste (notée h) ;
- Le complémentaire à un de la masse de croyance portant sur l'ensemble vide dans le cadre crédibiliste (soit la valeur $1 - K$, K désignant la mesure de conflit) ;

Pour calculer ce critère, il faut également tenir compte du mode de combinaison adopté. Ainsi, pour les méthodes où les informations ont été combinées deux à deux (méthodes n°3, n°4, n°6 et n°7) ce critère est défini par :

Soit J le nombre total de sources,

$$\left\{ \begin{array}{l} C_3 = \frac{1}{J-1} \sum_{i=1}^{J-1} h_i \\ C_3 = \frac{1}{J-1} \sum_{i=1}^{J-1} (1 - K_i) \end{array} \right. \quad (5.74)$$

Plus les sources sont en accord, plus C_3 tend vers 1.

Pour les cas particuliers des méthodes utilisant une combinaison généralisée (méthodes n°5 et n°8), la mesure globale de consensus inter-sources est directement disponible (à travers la hauteur $h(n)$ pour l'opérateur généralisé de Dubois et Prade et à travers la valeur $1 - m(\emptyset)$ de la classe de notes correspondant à la décision pour la méthode des sources spécialisées).

▪ **Critère n°4** : Mesure de possibilité, de croyance ou de probabilité pignistique associée à la décision.

Dans la plupart des méthodes, La note d'uni finale est obtenue par la maximisation d'un à valeurs dans $[0,1]$. Il s'agit des mesures de possibilité pour le cadre possibiliste et des fonctions de crédibilité et de probabilité pignistique pour le cadre crédibiliste.

Soit d_i la décision finale sur le segment i ,

$$\begin{cases} C_4 = \Pi(d_i) \\ C_4 = Cr(d_i) \\ C_4 = BetP(d_i) \end{cases} \quad (5.75)$$

Plus la mesure (de possibilité, de croyance, de probabilité pignistique) associée à la décision d_i est élevée, plus C_4 tend vers 1.

▪ Critère n°5 : Netteté de la décision

La netteté d'une décision correspond à la différence des deux valeurs maximales des mesures de possibilité, de croyance ou de probabilité pignistique.

Soient d_i et d'_i les décisions ayant les mesures maximales de possibilité, de croyance ou de probabilité pignistique,

$$\begin{cases} C_5 = \Pi(d_i) - \Pi(d'_i) \\ C_5 = Cr(d_i) - Cr(d'_i) \\ C_5 = BetP(d_i) - BetP(d'_i) \end{cases} \quad (5.76)$$

Plus la décision prise est nette et discriminante, plus C_5 tend vers 1.

Au final, l'indice de confiance, qui prend ses valeurs dans $[0,10]$ est défini dans un premier temps par :

Soit n le nombre de critères retenus,

$$IC = 10 \times \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i \right) \quad (5.77)$$

Dans un second temps, cette valeur d'indice est arrondie au point le plus proche afin de prendre une valeur entière (ex : 7/10).

Pour les méthodes n°3, n°4, n°5, n°6 et n°7, l'indice de confiance est calculé à partir des cinq critères décrit précédemment. Les autres méthodes (n°1 et n°2) ne sont pas capables de restituer l'intégralité des critères ; dans ce cas, l'indice de confiance est uniquement calculé sur les deux premiers critères.

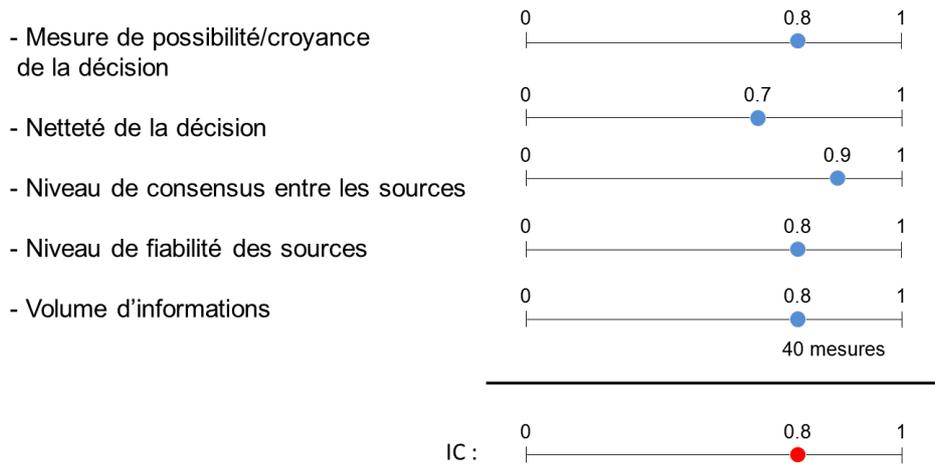


Figure 5.28 : Schéma représentant la construction de l'indice de confiance

5.6 Bilan sur l'utilisation des méthodes de fusion

Du fait des contraintes liées à l'usage de véhicules traceurs munis de capteurs bas-coût pour le recueil de données, les notes d'uni relevées sont entachées d'erreurs de mesure que l'on peut caractériser par des imprécisions et des incertitudes. On peut toutefois compenser plus ou moins ces erreurs en exploitant le fait que ces véhicules traceurs passent plusieurs fois sur chaque section, produisant ainsi plusieurs estimations de sa note. Le recours aux méthodes de fusion permet précisément d'agrèger ces estimations en tenant compte de leurs imperfections.

Nous avons fait le choix d'étudier les techniques de fusion les plus fréquemment utilisées pour traiter des données incertaines mais répétées. Dans la plupart de ces méthodes, le processus de fusion est constitué de trois étapes fondamentales (modélisation, combinaison, décision). Parmi les formalismes retenus, ceux correspondant à la théorie des possibilités et à la théorie des croyances sont les plus adaptés à l'architecture de fusion. En outre, ces théories, qui permettent de représenter distinctement le caractère imprécis et incertain d'une information, sont les plus efficaces pour gérer les situations conflictuelles quand les informations à combiner sont discordantes.

Dans ce chapitre, nous avons décrit successivement les étapes de modélisation, de combinaison et de décision. Si, pour les deux dernières, des outils « standards » existent, la première nécessite une approche individualisée très dépendante du contexte de l'étude. Dans la problématique que nous traitons, quel que soit le cadre mathématique utilisé, les caractéristiques du modèle sont modulées par trois critères : le niveau de variabilité maximal des mesures par bandes d'ondes, le degré de fiabilité de la source et le degré de répétabilité des mesures sur le segment de route considéré. Ce dernier critère n'est évidemment pertinent que dans la situation où les véhicules traceurs passent régulièrement sur un même itinéraire ; c'est en particulier le cas quand ces derniers sont assimilés à des véhicules de patrouille. Quant au paramétrage de ces trois facteurs, celui-ci découle de connaissances expérimentales obtenues à un moment donné et sur un itinéraire donné. Mais compte-tenu

de ses propriétés, on peut faire l'hypothèse que ce paramétrage restera valide sur d'autres itinéraires.

Pour l'étape de combinaison, nous avons utilisé des opérateurs diversifiés mais également les plus communs. On distingue généralement deux types d'opérateurs :

- Les opérateurs conjonctifs, qui gèrent mal les situations conflictuelles, nécessitent de travailler uniquement avec des sources fiables. En contrepartie, leur pouvoir discriminant permet de réduire les imprécisions et les incertitudes et donc de faciliter, *in fine*, la prise de décision ;
- Les opérateurs de compromis (ou adaptatifs), qui nécessitent au moins une source fiable, sont plus adaptés à la gestion des conflits. Mais, étant moins discriminant, leur utilisation produit des solutions plus ambiguës et ne facilitent donc pas la prise de décision.

En plus de ces particularités, certains opérateurs ne peuvent être utilisés que si un ordre combinatoire est préalablement établi (cas des opérateurs non-associatifs). Afin de classer les sources les unes par rapport aux autres, nous avons affecté à chacune d'entre elles un degré de fiabilité calculé à partir des niveaux de répétabilité et de justesse.

Enfin, concernant la prise de décision, le nombre de techniques étant plus restreint, nous nous sommes orientés vers les plus usuelles tout en proposant quelques règles additionnelles prévoyant, par exemple, des cas de non-décision (quand le degré de conflit inter-sources est très élevé).

Pour la suite, l'ensemble des techniques mentionnées dans ce chapitre, a été implémenté en vue d'une application sur plusieurs jeux de données dont les caractéristiques sont présentées dans le chapitre suivant. Cette application est accompagnée d'une analyse portant sur les niveaux de performances des méthodes candidates.

Chapitre 6

Application des méthodes de fusion sur des jeux de données et analyse de performances

SOMMAIRE

6.1 Construction des jeux de données.....	162
6.1.1 Les jeux de données expérimentaux	162
6.1.2 Les jeux de données synthétiques.....	163
6.2 Analyse des résultats après application des méthodes de fusion sur les jeux de données	171
6.2.1 Analyse des résultats sur les jeux de classe A et B	171
6.2.2 Analyse des résultats sur les jeux de classe C.....	179
6.2.3 Exploitation de l'indice de confiance.....	183
6.3 Bilan sur les niveaux de performances des méthodes de fusion	187

Ce dernier chapitre a pour objectif d'estimer les niveaux d'exactitude et de robustesse de chacune des méthodes de fusion étudiées dans le chapitre précédent, et ainsi d'identifier celles qui paraissent être les plus performantes pour traiter notre problème. À cette fin, on a appliqué ces différentes méthodes sur un ensemble de jeux de données construits pour être aussi représentatifs que possible du contexte opérationnel.

Deux ensembles de jeux de données ont été constitués : le premier est un ensemble de données expérimentales obtenu au moyen de quelques véhicules traceurs « réels » équipés d'une instrumentation bas-coût ; le second est un ensemble de données synthétiques obtenu en simulant des passages de véhicules traceurs « virtuels » représentés par des modèles mécaniques.

L'exploitation conjointe de ces deux ensembles a permis d'évaluer les méthodes de fusion dans leurs contextes (c'est-à-dire au sein d'une architecture globale de traitement) à partir de données à la fois réalistes et « diversifiées » (provenant d'une multitude de sources de mesures).

6.1 Construction des jeux de données

Pour ces travaux de thèse, plusieurs jeux de données ont été construits soit à partir des relevés expérimentaux (nous les appellerons jeux de type A) soit à partir des simulations (nous les appellerons jeux de type B). Dans le premier cas, les données proviennent d'un nombre limité de véhicules traceurs « réels » munis de l'instrumentation bas-coût présentée dans le troisième chapitre ; dans le second, elles sont issues de l'utilisation de modèles mécaniques simulant les mouvements d'un véhicule à partir d'un signal d'excitation de type « route ». L'une et l'autre de ces solutions présentent un certain nombre d'avantages et de faiblesses :

	Jeu de données expérimentales	Jeu de données synthétiques
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> → Données forcément réalistes → Intégration des facteurs de variabilité de mesure (erreur de trace, de vitesse, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> → Diversification à l'infinie des propriétés mécaniques du véhicule « virtuel » → Génération illimitée de passages
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> → Limitation du nombre de véhicules traceurs → Contraintes liées au montage des capteurs sur chaque véhicule → Nombre de passages limité (contraintes de temps, de coût...) 	<ul style="list-style-type: none"> → Degré de réalisme moindre → N'intègre pas tous les facteurs de variabilité (ex : erreur de distance) → Nécessité de disposer d'un signal d'excitation adapté (dit "signal route")

Tableau 6.1 : Principales forces et faiblesses des jeux de données expérimentaux et synthétiques

Les jeux de données issus des relevés expérimentaux et simulés ont également été construits de sorte à ce que les sources de mesures offrent différents degrés de fiabilité et donc, potentiellement, différents niveaux de conflit.

6.1.1 Les jeux de données expérimentaux

Les données expérimentales ont été recueillies au moyen de trois véhicules traceurs appartenant à des catégories différentes : une citadine, une berline et un utilitaire. Chacun de ces véhicules a été équipé d'une instrumentation bas-coût et a effectué plusieurs séries de relevés sur le circuit-test (Cf. chapitre 3). Le jeu de données ainsi constitué et noté A_0 rassemble au total une quarantaine de notes d'uni pour chaque segment de route.

Afin d'augmenter le potentiel de conflit des données à fusionner, et de placer ainsi les méthodes de fusion dans un contexte plus difficile, deux autres jeux de données ont été créés à partir du jeu A_0 . Ces jeux, appelés A_1 et A_2 , intègrent les mesures du jeu expérimental initial auxquelles s'ajoutent des mesures bruitées. Deux types de bruit ont été utilisés :

- un bruit de capteurs (capteur accéléromètre et capteur de distance GPS) ;
- un bruit de passage issu de la somme d'un bruit de vitesse et d'un bruit de trace ;

Grâce aux conclusions tirées dans le quatrième chapitre (chapitre portant sur l'estimation des facteurs de variabilité de la mesure d'uni), nous avons construit un générateur de bruit aléatoire¹ qui délivre des valeurs appartenant à l'échelle de notation par bandes d'ondes. Pour le jeu A_1 , ces niveaux de bruit sont ajustés de sorte à être modérés tandis que pour le jeu A_2 , ces mêmes bruits sont amplifiés.

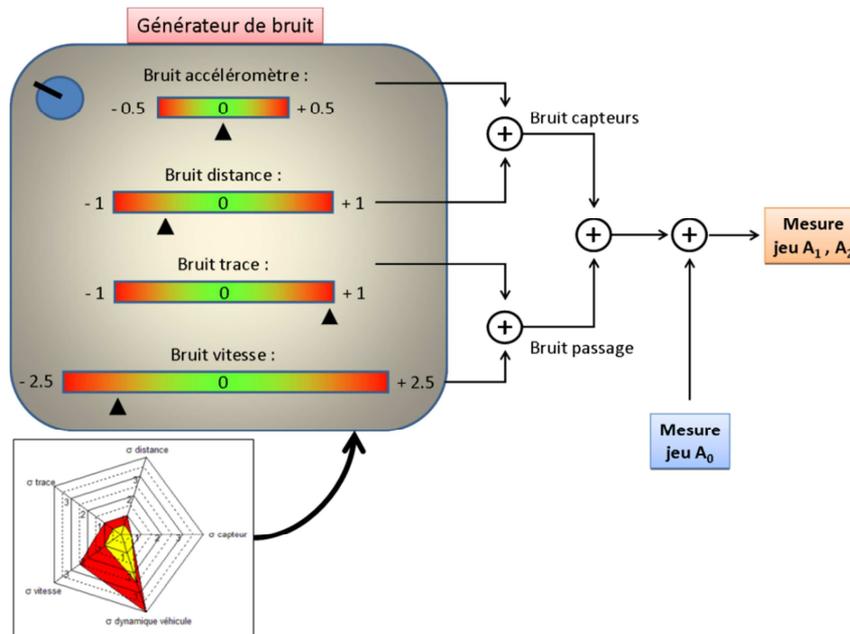


Figure 6.1 : Schéma de principe de la construction des jeux de données A_1 et A_2 (jeux issus du jeu expérimental A_0 avec ajout de bruit plus ou moins fort)

Le fait d'ajouter des mesures bruitées au jeu purement expérimental conduit à renforcer les effets de certains facteurs de variabilité un décalage latéral un peu plus accentué sur la chaussée (erreur de trace). Néanmoins, cette opération peut ne pas paraître suffisante pour diversifier les données car celles-ci sont toutes issues de trois véhicules traceurs uniquement. Idéalement, pour compléter cet ensemble expérimental, il aurait fallu faire appel à d'autres sources de mesures (d'autres véhicules) et multiplier les passages sur le circuit-test. Malheureusement, une telle démarche aurait été à la fois coûteuse en temps et difficilement réalisable compte-tenu des possibilités offertes par le parc automobile de l'IFSTTAR. Pour cette raison, il a été décidé de générer artificiellement des jeux de données issus de « véhicules traceurs » aux propriétés mécaniques différentes.

6.1.2 Les jeux de données synthétiques

Il existe plusieurs façons de générer artificiellement des notes d'uni. La plus simple consiste à tirer aléatoirement une note d'uni parmi celles composant le cadre de discernement et ce pour chacun des segments du circuit-test et pour chaque bande d'ondes. Une telle approche, bien que pratique pour contrôler et ajuster le niveau conflictuel des informations,

¹ Les bruits générés ici ont une densité de probabilité uniforme

est dénuée de tout sens physique et donc de tout réalisme. Pour cette raison, nous avons préféré une approche fondée sur la simulation numérique de la réponse d'un véhicule, représenté par un modèle mécanique, à un signal d'entrée représentant le profil de référence du circuit-test (obtenu avec un appareil dédié, le MLPL).

Pour effectuer ces simulations, nous avons voulu recourir à un modèle de véhicule assez simple mais suffisant pour décrire correctement les mouvements verticaux d'une roue du véhicule. Nous nous sommes donc orienté vers le modèle dit « quart de véhicule » qui a déjà été introduit lors de l'état de l'art sur la mesure d'uni (Cf. section 1.1.4 sur le calcul de l'indicateur IRI).

A – Présentation du modèle quart de véhicule

Le modèle quart de véhicule (appelé également modèle monoroue [59]) permet de représenter l'action d'une seule roue liée à une masse suspendue au moyen d'un couple ressort-amortisseur. La description mathématique de ce modèle est donnée dans l'annexe B.

La simulation au moyen du modèle quart de véhicule nécessite une série d'actions qui sont développées dans les paragraphes suivants :

- le paramétrage du modèle ;
- l'injection d'un signal d'excitation ;
- la résolution du système d'équations et la conversion des résultats en notes d'uni;

B – Paramétrage et validation du modèle quart de véhicule

En plus d'avoir un sens physique, le modèle quart de véhicule doit également correspondre à une réalité « automobile » ce qui implique de paramétrer de façon cohérente l'ensemble des variables (masses, coefficients de raideur, coefficient d'amortissement). Dans les faits, il est très difficile de connaître les valeurs exactes de ces paramètres car les constructeurs et équipementiers automobiles communiquent très peu ce genre d'informations. Cette difficulté est encore accentuée pour le paramètre k_t car les propriétés des pneumatiques sont extrêmement complexes (influence de la gomme, de la pression de gonflage, de la température, etc.).

Pour surmonter ce problème, nous sommes partis des règles de paramétrage régissant la configuration « Golden Car » [60] qui sert au calcul de l'indicateur IRI. Ces règles de paramétrage sont les suivantes :

$$\left| \begin{array}{l} \frac{m_u}{m_s} = 0.15 \\ \frac{c_s}{m_s} = 6 \\ \frac{k_s}{m_s} = 63.3 \\ \frac{k_t}{m_s} = 653 \end{array} \right. \quad (6.7)$$

Dans cette démarche, le paramétrage de chaque véhicule traceur est donc conditionné par la valeur de sa masse suspendue, valeur qui peut être estimée à partir de sa masse totale. À titre indicatif, la valeur de m_s pour un véhicule utilitaire est généralement compris entre 700 et 800 kg tandis que pour une citadine, elle se situe plutôt entre 250 et 350 kg.

• Le signal d'excitation

Le signal d'excitation correspond au vecteur d'entrée dans la représentation d'état. Il représente le profil en long de la chaussée avec lequel le pneumatique est en contact. Si l'on veut obtenir des données de sortie réalistes, il faut que ce signal corresponde le plus possible au profil réel de la chaussée. Nous avons donc injecté, à chaque simulation, un signal issu du profil mesuré par un appareil de référence (le MLPL) sur le circuit-test.

Une autre propriété du signal d'excitation est qu'il intègre également l'influence de la vitesse de passage par l'intermédiaire du niveau d'échantillonnage spatial. La simulation ne supportant que des discrétisations uniformes, la valeur de vitesse doit donc être fixe. Pour couvrir l'intégralité du circuit-test, qui ne se parcourt évidemment pas à vitesse constante, nous avons découpé le circuit en quatre zones. Chacune de ces dernières est alors affectée d'une vitesse de passage fixe.

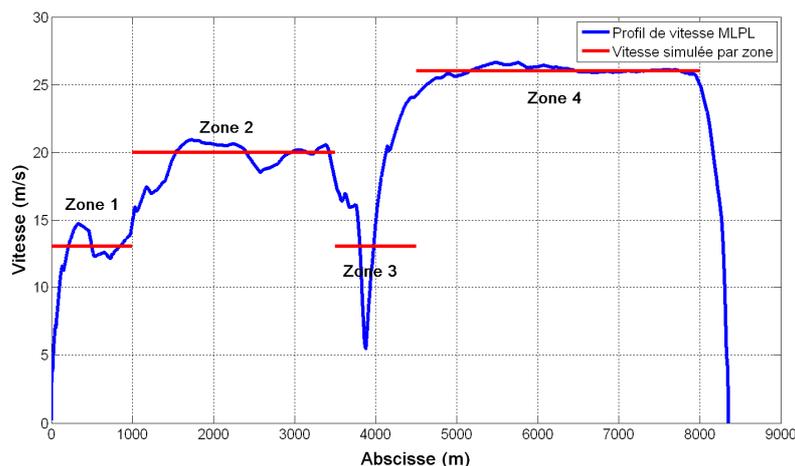


Figure 6.2 : Attribution des valeurs de vitesse par zone pour la simulation

• Éléments de sortie de la simulation

La résolution numérique du système d'équations correspondant au modèle quart de roue fournit, à chaque instant, les valeurs du signal de déplacement de la roue.

Avant d'être converti en notes d'uni via la méthode NBO, ce signal a été traité par un filtre spatial qui simulait la perte d'informations due à l'écrasement du pneumatique sur la surface de la chaussée (filtre spatial passe-bas avec une fréquence de coupure f_{ct} correspondant à une distance d'environ 25 cm¹).

Une fois le paramétrage du modèle établi, il restait à s'assurer que celui-ci fournisse des données suffisamment réalistes pour valider son utilisation puis à le diversifier afin de produire une multitude de véhicules traceurs virtuels.

¹ Cette valeur correspond à une longueur standard de la zone de contact entre le pneumatique et la chaussée.

• Calage du modèle et validation

Pour vérifier que le modèle quart de véhicule renvoie des mouvements de roue réalistes, une solution consiste à le faire fonctionner à partir d'un paramétrage correspondant le plus possible aux véhicules traceurs expérimentaux puis à comparer le degré de ressemblance entre les signaux issus de la modélisation et ceux recueillis expérimentalement à travers la représentation en DSP. L'opération débute par le choix de la valeur de la masse suspendue qui, par l'application des règles de paramétrage Golden Car, donne accès aux valeurs initiales de m_u , k_s , c_s et k_t . Ces dernières ainsi que la valeur de f_{ct} sont ensuite ajustées « à la main », par comparaison avec les signaux expérimentaux, pour rehausser le niveau de réalisme.

Le résultat de cet exercice est présenté pour les véhicules traceurs de catégorie citadine et utilitaire sur la section dégradée du circuit-test.

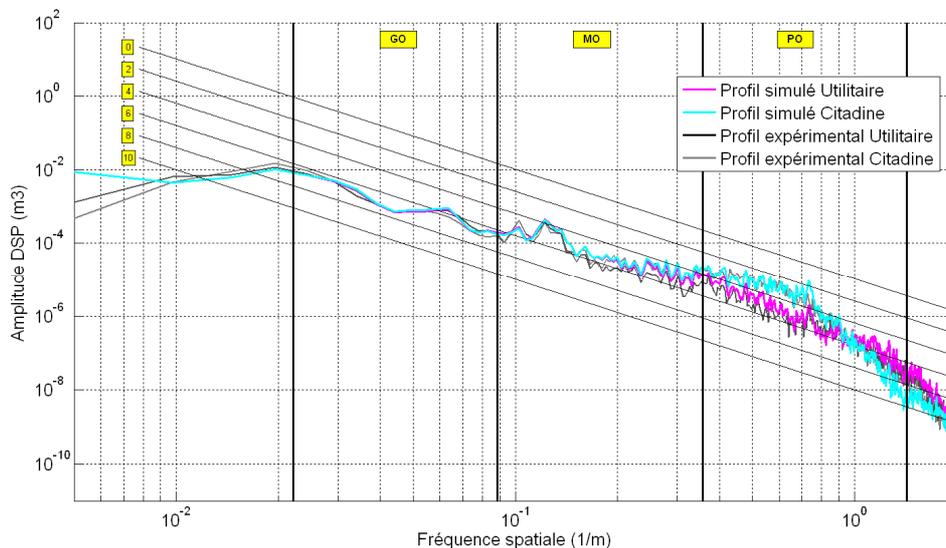


Figure 6.3 : DSP des signaux expérimentaux et simulés sur la section dégradée

Pour cette section, on observe que les courbes correspondant aux véhicules traceurs virtuels sont assez bien calées sur celles correspondant aux véhicules expérimentaux. Un exercice similaire a été mené sur la section saine ce qui a permis de constater que le calage était plus difficile dans les gammes de fréquence associées au mode de résonance de la roue. Cependant, compte-tenu du degré de proximité des DSP, la règle de paramétrage choisie semble être satisfaisante en première approche ; elle est donc validée pour la suite de l'étude.

• Diversification du paramétrage pour la génération de plusieurs véhicules traceurs virtuels

À partir du calage des signaux provenant des véhicules simulés sur ceux provenant des véhicules expérimentaux, des paramètres « d'équilibre » ont été définis pour chacune des

catégories de véhicule. La génération de véhicules traceurs virtuels a alors consisté à choisir des valeurs autour de ces paramètres d'équilibre, soit de façon aléatoire, soit en appliquant une forme de « loi d'usure » sur les suspensions représentées par le couple ressort-amortisseur.

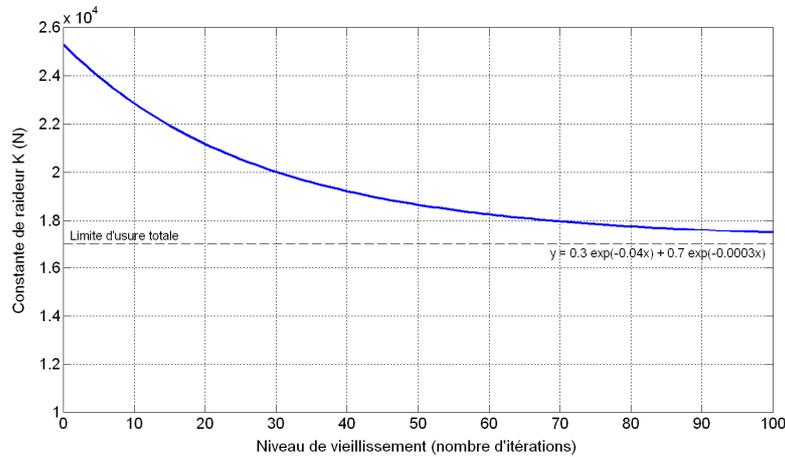


Figure 6.4 : Exemple de loi d'usure appliquée sur la raideur d'un ressort (usure d'environ 30%)

En tirant de façon aléatoire des jeux de paramètres autour de leurs valeurs d'équilibre et en ajoutant l'effet de la loi d'usure des suspensions, nous avons généré un ensemble de véhicules traceurs virtuels, chacun d'entre eux étant défini par le vecteur :

$$P_{quarter-car} = \begin{bmatrix} m_s \\ m_u \\ k_s \\ c_s \\ k_t \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

Grâce à cette modélisation, on a pu produire autant de pseudo-profilés que de véhicules traceurs virtuels.

C – Données issues du modèle quart de véhicule

L'utilisation du modèle quart de véhicule s'inscrit dans un processus qui conduit à générer une note d'uni par segment de route pour chaque véhicule traceur. Ce processus comporte donc les étapes suivantes :

1. Choix d'une valeur de masse suspendue définissant la classe du véhicule traceur ;
2. Application des règles de paramétrage Golden Car puis calage du modèle sur des courbes expérimentales pour trouver un paramétrage « d'équilibre » ;
3. Génération des caractéristiques mécaniques du véhicule traceur par une variation autour du paramétrage d'équilibre ;
4. Choix d'une vitesse de passage par zone du circuit-test ;

5. Simulation de passage du véhicule traceur virtuel sur le circuit-test et obtention d'un signal intégrant les déplacements successifs de la roue.
6. Application de la méthode NBO sur ce signal pour le convertir en notes d'uni pour chacun des segments du circuit et pour chaque bande d'ondes.

En fin de processus, on obtient, pour chaque véhicule traceur, une série de notes d'uni allant de 0 à 10 pour les bandes PO, MO et GO et pour l'intégralité du parcours. En outre, pour un ensemble de véhicules traceurs, les notes d'uni successives sont spatialement calées sur les mêmes segments de route (à l'image de ce que l'on pourrait obtenir après une opération de map-matching sur des données expérimentales).

Au sein de ce processus, il est intéressant de constater que pour un type de véhicule traceur donné, la variation des valeurs des paramètres autour du paramétrage d'équilibre conduit à un élargissement significatif du faisceau de DSP pour la bande PO mais beaucoup plus limité pour les bandes MO et GO. Pour être encore plus précis, on constate que ces élargissements ont lieu sur des bandes de fréquences spatiales correspondant aux modes de résonance de la roue (entre 7 et 10 Hz) et de la caisse (entre 1 et 2 Hz).

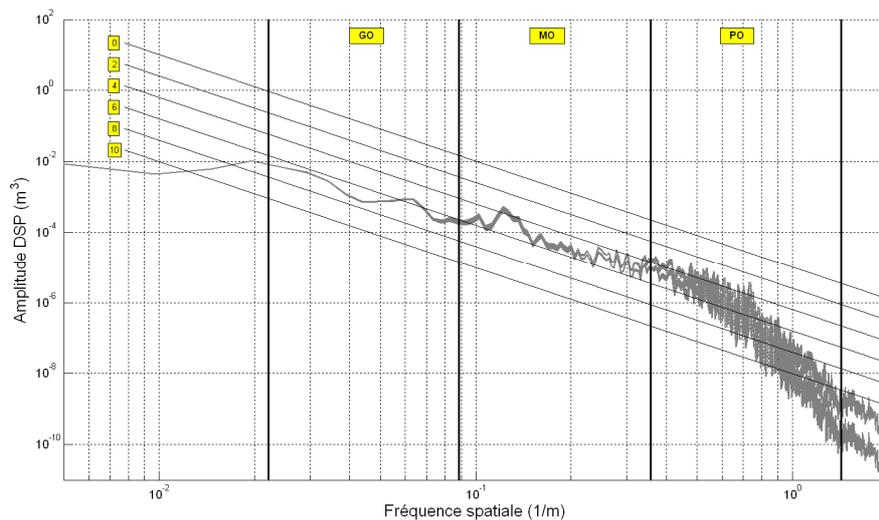


Figure 6.5 : Faisceau de DSP des signaux simulés par la variation des caractéristiques mécaniques d'un véhicule traceur seul sur la section dégradée

Pour obtenir une dispersion plus importante des DSP, il est nécessaire de jouer sur le facteur vitesse pour chacun des passages simulés. On obtient alors, au final, une série de signaux qui élargit significativement la largeur du faisceau de DSP et ce sur l'ensemble des fréquences spatiales. Cette observation confirme l'importance relative du facteur vitesse de passage parmi les autres facteurs de variabilité associés à la méthode d'auscultation par véhicules traceurs.

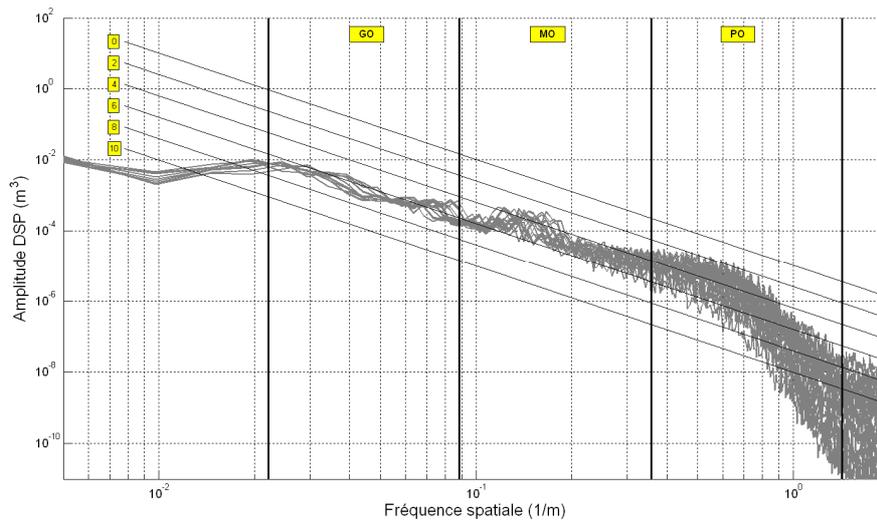


Figure 6.6 : Faisceau de DSP final correspondant à la simulation de plusieurs passages de véhicules traceurs différents sur la section dégradée

D – Bilan sur la construction des jeux de données

Dans nos travaux, nous avons choisi d'évaluer le niveau de performance des méthodes de fusion en les appliquant sur des jeux de données offrant une diversité de caractéristiques liées, notamment, au nombre de sources de mesures utilisées et à leurs propriétés.

Les premiers jeux de données ont été élaborés à partir de relevés expérimentaux effectués par trois véhicules traceurs correspondant à des catégories différentes (utilitaire, berline et citadine). Pour faire croître artificiellement le degré de conflit existant initialement entre les informations, nous avons injecté différents types de bruit dont les niveaux ont été fixés par rapport à l'étude portant sur la variabilité des mesures d'uni. Ces jeux, qui constituent certainement la base la plus solide pour mener à bien une étude comparative des méthodes de fusion, ne proviennent que d'un nombre limité de véhicules traceurs.

Afin d'enrichir les jeux de test par l'intégration d'un nombre plus important de sources de mesures, nous avons fait appel à un modèle vibratoire pour générer des véhicules traceurs virtuels aux propriétés mécaniques différentes. Ce modèle permet de produire autant de sources de mesures que l'on souhaite ainsi qu'une infinité de passages. Cependant, sur le plan physique, il faut rappeler que le modèle quart de véhicule a des limites puisqu'il ne peut pas, par exemple, restituer les mouvements de véhicule dus aux phénomènes de tangage et de roulis¹. Pour cette raison, un second modèle plus complet appelé modèle demi-véhicule longitudinal, a été testé pour prendre en compte les effets de tangage (Cf. Annexe B). Après application, l'observation du faisceau de DSP révèle que ce modèle n'apporte pas un niveau de dispersion des signaux significativement plus élevé que le modèle quart de véhicule. En conséquence, seul ce dernier a été utilisé pour constituer les jeux de données synthétiques.

¹ Les fréquences associées à ces phénomènes étant comprises entre 1 et 2 Hz, ceux-ci peuvent potentiellement générer des modifications de notes dans la bande MO.

Au final, selon le procédé évoqué dans la partie B, neuf jeux de données ont été formés : trois proviennent de données expérimentales (Jeux A_0 , A_1 et A_2) et six sont issus de simulations (jeux B_0 , B_{1a} , B_{1b} , B_{2a} , B_{2b} et B_{2c}). Leurs caractéristiques sont les suivantes :

Jeux expérimentaux (trois véhicules traceurs réels rassemblant une quarantaine de passages)

- **Jeu A_0** : données expérimentales ;
- **Jeu A_1** : données expérimentales bruitées modérément ;
- **Jeu A_2** : données expérimentales bruitées fortement ;

Jeux synthétiques (véhicules traceurs virtuels)

- **Jeu B_0** : trois véhicules traceurs virtuels aux propriétés calées sur ceux des véhicules expérimentaux ;
- **Jeu B_{1a}** : application d'une loi d'usure sur les paramètres des véhicules utilisés dans le jeu B_0 ;
- **Jeu B_{1b}** : ajout d'un bruit de capteurs et d'un bruit de passages aux données du jeu B_{1a} ;
- **Jeu B_{2a}** : 10 sources simulées effectuant chacune 10 passages ;
- **Jeu B_{2b}** : 20 sources simulées effectuant chacune 10 passages ;
- **Jeu B_{2c}** : 30 sources simulées effectuant chacune 10 passages ;

Les jeux de classe A et B sont constitués de données provenant de sources fonctionnant de façon « normale ». Afin d'intégrer l'hypothèse que la flotte de véhicules traceurs puisse contenir un voire plusieurs véhicules totalement défectueux, nous avons créé des jeux de classe C aux propriétés suivantes :

- **Jeu C_{1a}** : ce jeu simule une panne totale et franche d'accéléromètre sur un véhicule traceur parmi vingt. Dans ce cas, le profil délivré est constamment plan et les notes d'uni sont toutes égales à 10.
- **Jeu C_{1b}** : ce jeu intègre également une source de mesure défectueuse parmi les vingt véhicules mais, cette fois-ci, les notes d'uni générées sont aléatoires.
- **Jeux C_{2-x}** : ces jeux comportent x sources défectueuses parmi vingt autres ($x = 1, 2, 4, 6, 8, 10$) ;

6.2 Analyse des résultats après application des méthodes de fusion sur les jeux de données

L'analyse des résultats est effectuée en deux temps. Le premier fait suite à l'application des méthodes de fusion sur les jeux de données de classe A et B pour lesquels aucune source de mesures n'est défaillante. Pour chacun de ces jeux, les critères suivants sont observés :

- Effet du filtre de rejet de données aberrantes ;
- Estimation et observation du niveau de conflit global généré par chaque méthode lors des opérations de combinaison ;
- Taux de non-décisions (quand le processus de décision ne débouche pas sur une note d'uni de synthèse) ;
- Niveaux d'exactitude des notes d'uni finales délivrées par chaque méthode par comparaison avec des notes de référence ;
- Observation des indices de confiance.

Dans le deuxième temps, seuls les résultats portant sur l'application des méthodes de fusion sur les jeux de classe C sont examinés. Cette analyse s'est principalement focalisée sur l'évolution du degré d'exactitude en fonction du nombre de sources défaillantes au sein de la flotte de véhicules traceurs.

Par ailleurs, on rappelle que les résultats étudiés proviennent du processus de traitement après l'étape de combinaison inter-sources à partir de laquelle la décision est prise.

6.2.1 Analyse des résultats sur les jeux de classe A et B

Ces deux classes, qui rassemblent au total neuf jeux de données, comportent des données expérimentales et simulées délivrées par des sources au fonctionnement « normal ». En fait, on peut dire que ces sources sont fiables voire très fiables au sens de la fonction de fiabilité introduite dans la section 5.3, puisque, sur l'ensemble des jeux A et B, les degrés de fiabilité calculés sont compris entre 0.85 et 0.97 sur une échelle allant de 0 à 1.

Enfin, on rappelle également que ces jeux de données ont été construits dans l'idée d'alimenter les méthodes de fusion par des données issues de configurations diverses, soit en termes de nombre de sources de mesures, soit en termes de qualité des informations proprement dit.

A – Effet du filtre de rejet des données aberrantes

Pour mémoire, la fonction de ce filtre est d'identifier et d'éliminer, de façon statistique, les mesures jugées aberrantes. Ces dernières peuvent par exemple provenir d'évènements particuliers et ponctuels lors de la collecte des données (ex : modification de trajectoire suite à l'évitement d'un obstacle, variation brusque de vitesse, etc.).

Après application sur les jeux de classe A et B, le taux de mesures rejetés est relativement faible, puisqu'il atteint, sur l'ensemble de ces jeux, au maximum 2% pour la bande PO et environ 1% pour les bandes MO et GO. On peut ainsi considérer que, pour ces jeux, ce filtre conserve l'essentiel des données et que son utilisation ne biaise pas le niveau de

performance global des méthodes de fusion. Ceci est cohérent avec le fait qu'aucun obstacle perturbateur n'a été rencontré lors des mesures de site, ni introduit dans les simulations.

B – Observation du niveau de conflit inter-sources

Les méthodes issues de la théorie des possibilités et des croyances sont capables, à chaque étape de combinaison et à leur manière, de mesurer le niveau de conflit (ou de consensus) régnant entre les informations (mesure à valeur dans $[0,1]$). On rappelle que les situations de conflit traduisent le fait qu'au moins une partie des informations à fusionner sont partiellement voire totalement discordantes ce qui implique la présence de sources plus ou moins fiables. Par ailleurs, la quantification du degré de conflit dépend de façon générale du formalisme choisi pour fusionner les informations et, de façon plus particulière, des propriétés du modèle et de l'opérateur de combinaison.

À ce stade de l'étude, le niveau de conflit inter-sources a été analysé afin de savoir s'il était possible de différencier puis hiérarchiser les jeux de données selon ce critère. L'objectif visé derrière cet exercice était de présenter les résultats portant sur les niveaux d'exactitude de chacune des méthodes de fusion en fonction du classement des jeux de données par niveau de conflit inter-sources croissant. Pour cela, on calcule, pour l'ensemble des jeux de données, un indicateur qui correspond selon les cas à :

- la moyenne des mesures de conflit provenant des opérations successives de combinaisons des informations effectuées deux à deux (mode cascade) ;
- la mesure de conflit directement retournée par les opérateurs de combinaison généralisée.

Cet indicateur est ensuite présenté en fonction des jeux de données et pour chaque méthode (Fig. 6.7).

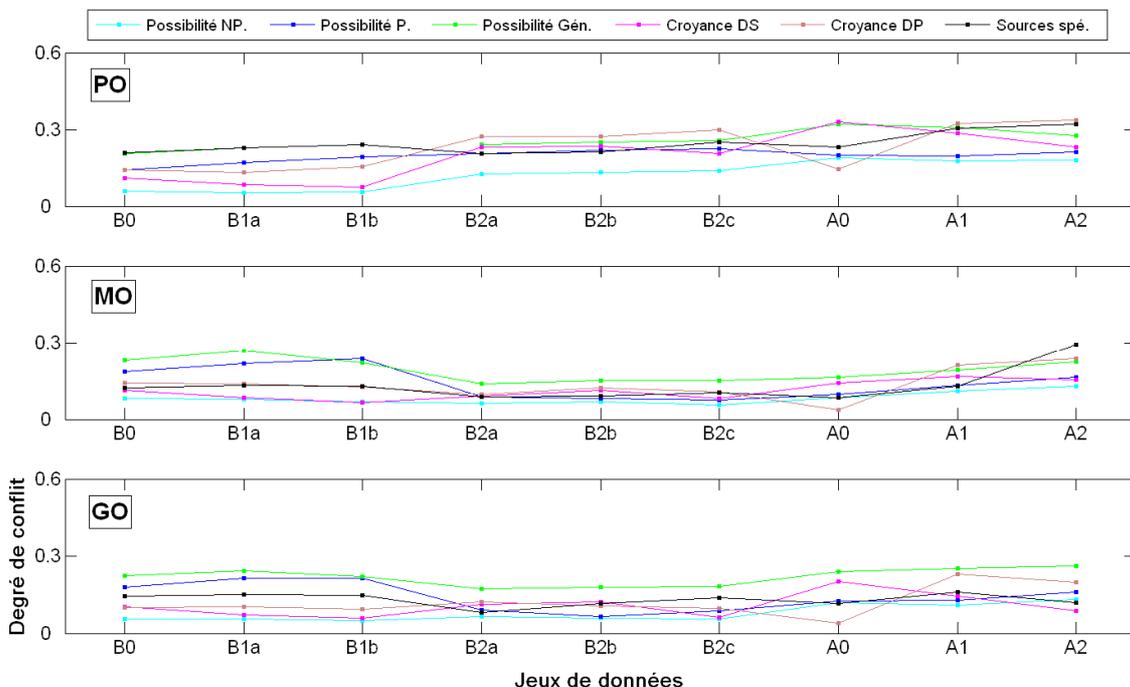


Figure 6.7 : Degré de conflit inter-sources global pour chaque jeu de données et pour chaque méthode de fusion

En considérant dans un premier temps l'ensemble des méthodes de fusion et des jeux de données et en observant les niveaux de conflit inter-sources selon les bandes d'ondes, on remarque que ceux-ci sont plus élevés pour la bande PO que pour les bandes MO et GO. Ce résultat est en adéquation avec ce qui avait été relevé, d'abord expérimentalement puis à travers les simulations, à savoir que le niveau de variabilité des notes d'uni pour la bande PO est plus fort que pour les autres.

Par ailleurs, si l'on regarde maintenant l'évolution des niveaux de conflit en fonction des jeux de données, on constate que, de façon générale, les plus élevés sont obtenus sur les jeux de données pour lesquels seuls trois véhicules traceurs ont été utilisés (jeux de classe A et B₁). Ce résultat peut s'expliquer par le fait que les trois véhicules en question correspondent à des catégories distinctes qui délivrent donc des réponses distinctes. De plus, on remarque également que l'introduction d'un plus grand nombre de véhicules traceurs, ayant qui plus est des propriétés mécaniques différentes, donne un ensemble de réponses plus nuancé et génère ainsi un niveau de conflit inter-sources global plus faible.

On synthétise donc l'ensemble de ces résultats en disant la multiplication des véhicules traceurs virtuels ne fait pas pour autant augmenter le niveau de conflit global inter-sources et que ce dernier est plus important pour les jeux expérimentaux faisant intervenir un ensemble de trois véhicules de catégorie différentes. En conséquence, par rapport au classement des jeux de données que nous voulions établir selon le niveau de conflit global généré par les méthodes de fusion, il faudrait distinguer dans un premier temps les jeux de classe B de ceux de classe A. Dans un second temps, on remarque que pour les jeux de classe A, le conflit est généralement plus fort pour le jeu A₂ que pour le jeu A₁ celui-ci étant lui-même plus fort que le jeu A₀. Cette observation tend donc à montrer que l'application du générateur de bruit décrit dans la section 6.1.1 a bien permis de faire croître le niveau de conflit de façon générale. Mais si l'on veut accentuer davantage ce niveau de conflit, il ne faut plus donc travailler à partir de sources fiables (peu importe leur nombre) mais à bien au moyen de sources non fiables (cas pris en charge dans les jeux de classe C).

C – Proportion des situations n'engendrant aucune note d'uni de synthèse

Selon les propriétés de l'ensemble résultant de la combinaison inter-sources, l'application des règles de décision peut donner lieu à une non-prise de décision. Dans ce cas, la méthode de traitement ne propose aucune note d'uni de synthèse sur le segment de route considéré.

Parmi les méthodes utilisées, celles qui ont le plus fort taux de non-décision (on entend par là aucune note d'uni en sortie du processus de traitement) sont les méthodes faisant appel à l'opérateur de Dempster-Shafer dans la théorie des croyances (méthodes n°6 et n°8). La proportion maximale des segments de route pour lesquels ces situations ont été constatées est indiquée dans le tableau suivant (valeurs issues du jeu A₀).

	Pourcentage de non-décision					
	Croyance Op. D-Shafer (Méthode n°6)	Croyance Sources spé. (Méthode n°8)	Croyance Op. D-Prade (Méthode n°7)	Possibilité Op. non-priorisé (Méthode n°3)	Possibilité Op. priorisé (Méthode n°4)	Possibilité Op. généralisé (Méthode n°5)
Bande PO	16 %	10 %	1 %	2 %	0 %	1 %
Bande MO	7 %	8 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Bande GO	2 %	2 %	0 %	0 %	0 %	0 %

Tableau 6.2 : Pourcentage de segments du circuit-test pour lesquels aucune décision n'a été prise

L'opérateur de Dempster-Shafer étant de nature exclusivement conjonctive, donc avec un comportement très discriminant, il est assez naturel que les méthodes n°6 et n°8 soient celles qui délivrent le plus fort taux de non-décision. En effet, en présence d'une succession d'informations partiellement ou totalement conflictuelles, le nombre d'éléments focaux commun et non-vides peut se réduire jusqu'à devenir nul et provoquer ainsi une non-prise de décision.

Pour ces méthodes, les cas de non-décision sont significativement plus fréquents pour la bande où le degré de conflit global est le plus élevé c'est-à-dire sur la bande PO. Cela étant, il faut relativiser ces chiffres car une majeure partie des situations de non-décision est recensée sur des segments de route particuliers (ex : giratoires, zones de raccordement, zones à très faible vitesse de passage), pour lesquels le suivi de l'uni longitudinal ne présente pas un réel intérêt opérationnel.

Enfin, compte-tenu du contexte opérationnel, le fait qu'une méthode soit ponctuellement incapable de délivrer une note finale sur chacun des segments de route est certainement une forme de limite mais pas nécessairement une faiblesse rédhibitoire, en particulier pour les segments de la bande PO qui sont relativement courts (20 m). D'une manière générale, on préférera, vis-à-vis du gestionnaire, une logique de prudence plutôt que d'apporter, coûte que coûte, des éléments de décision pris dans un contexte de traitement difficile.

D – Niveaux d'exactitude des résultats délivrés par les méthodes de fusion

Le niveau d'exactitude des notes d'uni de synthèse calculées par les méthodes de fusion représente évidemment l'un des critères de performances les plus importants pour mener à bien cette étude comparative. Grâce aux mesures de référence obtenues sur le circuit test avec l'appareil MLPL, il est possible de comparer segment par segment le degré d'exactitudes des résultats fournis par les différentes méthodes de fusion. L'analyse de ce critère a prioritairement été menée sur l'ensemble des segments composant le circuit-test et au moyen de deux indicateurs :

- L'indicateur I_1 correspondant à la moyenne des valeurs absolues des écarts de notes (entre les « notes MLPL » et les notes issues des processus de fusion) ;
- L'indicateur I_2 correspondant à la distribution des écarts de notes ;

Les résultats de cet exercice, mené pour chacune des trois bandes d'ondes, sont présentés dans les paragraphes suivants.

• **Analyse n°1 : Écarts moyens entre les notes d'uni de référence et les notes issues de la fusion**

La figure suivante représente l'indicateur I_1 calculé sur l'ensemble du circuit-test, pour chaque méthode de fusion et pour les trois bandes d'ondes.

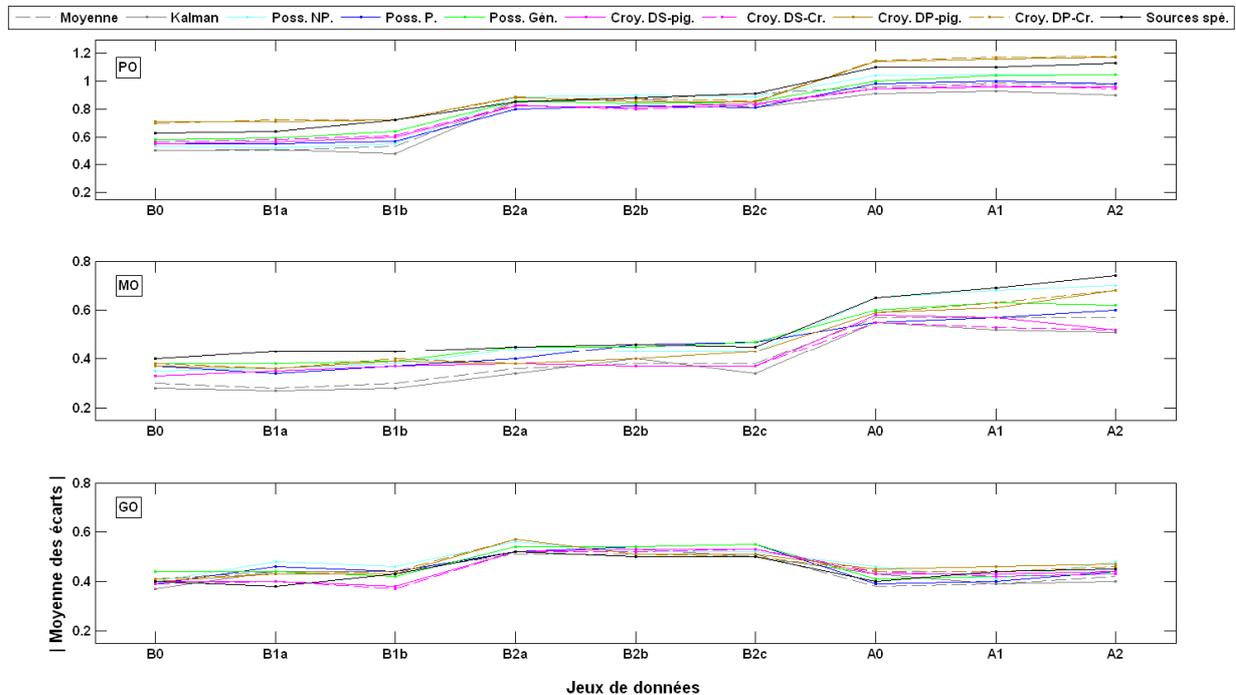


Figure 6.8 : Moyenne des valeurs absolues des écarts de notes pour chaque méthode de fusion et pour l'ensemble des jeux de données

En considérant l'ensemble des méthodes de fusion, on peut faire les constats suivant :

- Les notes d'uni présentent un écart de justesse plus fort dans les PO et dans les MO que dans les GO soit :
 - Entre 0.8 pt et 1.2 pt pour la bande PO ;
 - Entre 0.5 pt et 0.7 pt pour la bande MO ;
 - Entre 0.3 pt et 0.6 pt pour la bande GO.

On peut être tenté de rapprocher cette observation du fait, illustré sur la figure 6.7, que la dispersion des notes entre les différents jeux, est plus faible dans la gamme des GO que dans celles des MO et des PO. Les conclusions que nous pourrions tirer de la présente analyse seront donc mieux fondées en considérant les MO et surtout les PO, que sur les GO. Il reste quand même que, si on se limite à l'analyse des seuls jeux de données issus de mesure réelles, les mesures faites dans les GO sont plus exactes que celles faites dans les MO, elles-mêmes plus exactes que celle faites dans les PO.

- Dans tous les cas, les écarts de justesse les plus faibles sont observés sur les jeux simulés B0, B1a et B1b. Ils sont plus élevés sur les jeux B2a, B2b et B2c. Enfin, les écarts les plus élevés sont observés sur les jeux issus de mesures réelles, A0, A1 et A2.
- Sur les jeux B₂, le niveau d'exactitude reste quasi constant malgré l'augmentation du nombre de sources (passage de 10 à 30 sources) ; cela tend donc à montrer que le degré d'exactitude n'est pas forcément lié au nombre de véhicules traceurs utilisés.
- Malgré une relative homogénéité des niveaux d'exactitude, plusieurs méthodes semblent être légèrement plus performantes que d'autres. Ainsi, quelle que soit la bande d'ondes, les méthodes qui sont fréquemment les plus précises sont :
 - Le filtre de Kalman (méthode n°2) ;
 - La moyenne pondérée (méthode n°1) ;
 - La méthode possibiliste priorisée (méthode n°4) ;
 - La méthode crédibiliste de Dempster-Shafer¹ (méthode n°6).

À l'inverse, la méthode possibiliste non-priorisée, la méthode crédibiliste de Dubois et Prade² et la méthode des sources spécialisées (excepté pour la bande GO) sont celles qui conduisent, de façon récurrente, aux degrés d'exactitude les plus faibles.

On conclut cette analyse en faisant remarquer que les différentes règles de décision associées aux méthodes de croyances (maximum de croyance et de probabilité pignistique) ont un très faible impact sur le degré d'exactitude.

• Analyse n°2 : Distribution des écarts de notes d'uni

Afin de compléter les observations formulées précédemment sur la base de l'écart de justesse moyen, on a analysé la distribution des écarts de notes d'uni sur l'ensemble des segments composant le circuit-test. Cette approche permet en effet d'apprécier plus finement le niveau d'exactitude et est susceptible d'identifier d'éventuelles tendances (biais).

Comme il n'est pas possible d'intégrer dans ce mémoire l'ensemble des graphiques correspondant aux neuf jeux de données pour les trois bandes d'ondes, nous présentons ci-après les résultats correspondant au jeu expérimental A₀ (Fig. 6.9).

¹ Il faut comprendre ici la méthode crédibiliste utilisant l'opérateur de combinaison de Dempster-Shafer.

² Idem que le renvoi précédent mais avec l'opérateur de combinaison de Dubois et Prade.

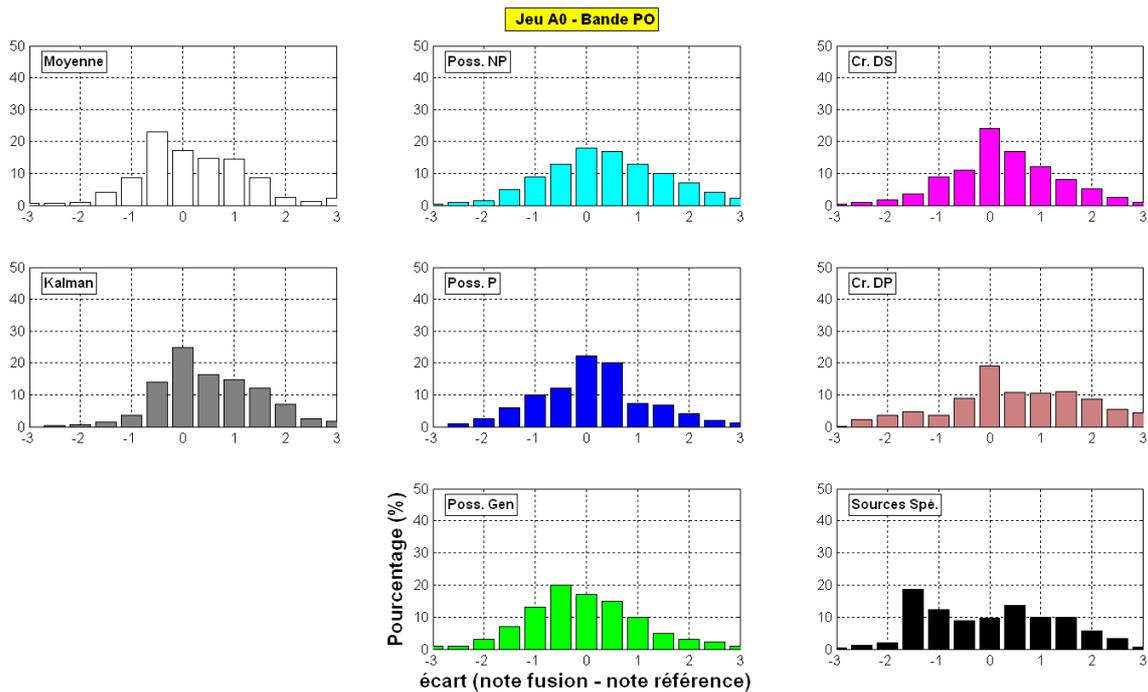


Figure 6.9 : Distribution des écarts de notes pour la bande PO (Jeu A₀)

Pour la bande PO, en observant l'allure des distributions pour l'ensemble des méthodes, on remarque une légère tendance à la surestimation des notes de référence. Ceci s'interprète, dans le référentiel NBO, par une tendance à sous-estimer le niveau de gravité du défaut d'uni. Ce constat s'explique en partie par une observation indépendante du fonctionnement des méthodes de fusion. En effet, les véhicules traceurs, de par la méthode de relevé d'informations (capteur monté sur la roue), ne peuvent restituer complètement les défauts de très petites longueurs d'ondes (défauts de longueurs d'ondes inférieures à 1 m environ). Par conséquent, le signal étant amputé d'une partie des défauts, la note d'uni correspondante est plus élevée. Ceci conduit à minimiser la conclusion précédente : certes, l'écart moyen de justesse est plus fort dans les PO, mais ceci ne provient pas entièrement des méthodes de fusion.

Par la suite, nous présentons successivement les planches correspondant aux bandes MO et GO, leur analyse se faisant simultanément (Fig. 6.10 et Fig. 6.11).

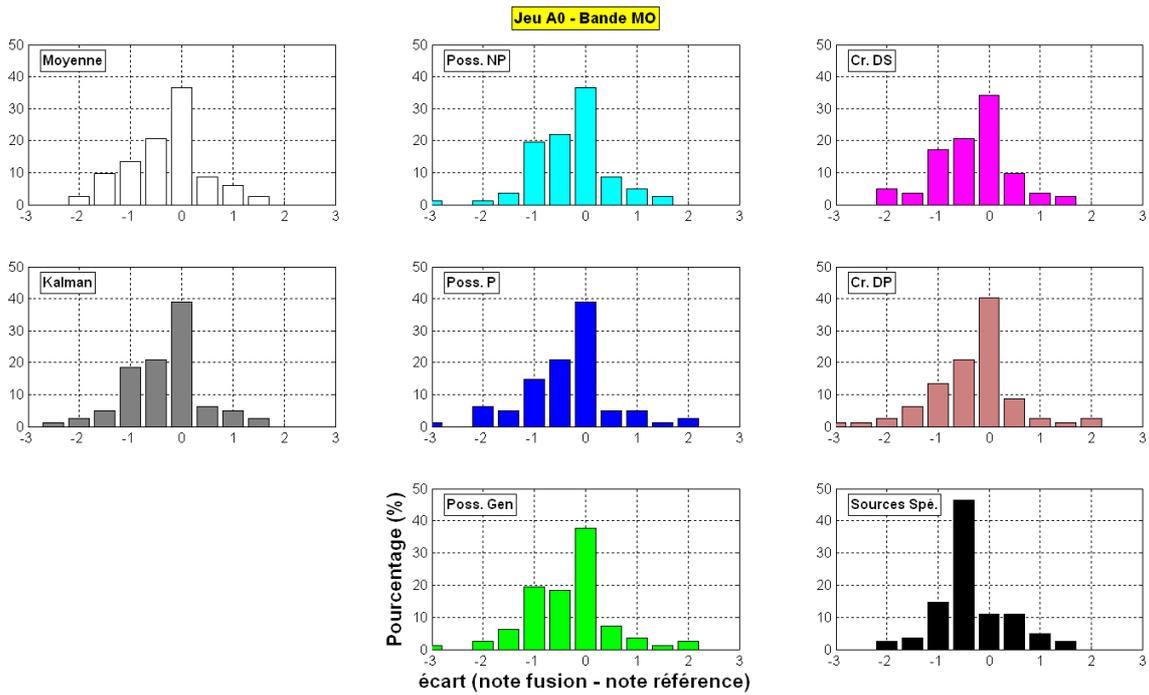


Figure 6.10 : Distribution des écarts de notes pour la bande MO (Jeu A₀)

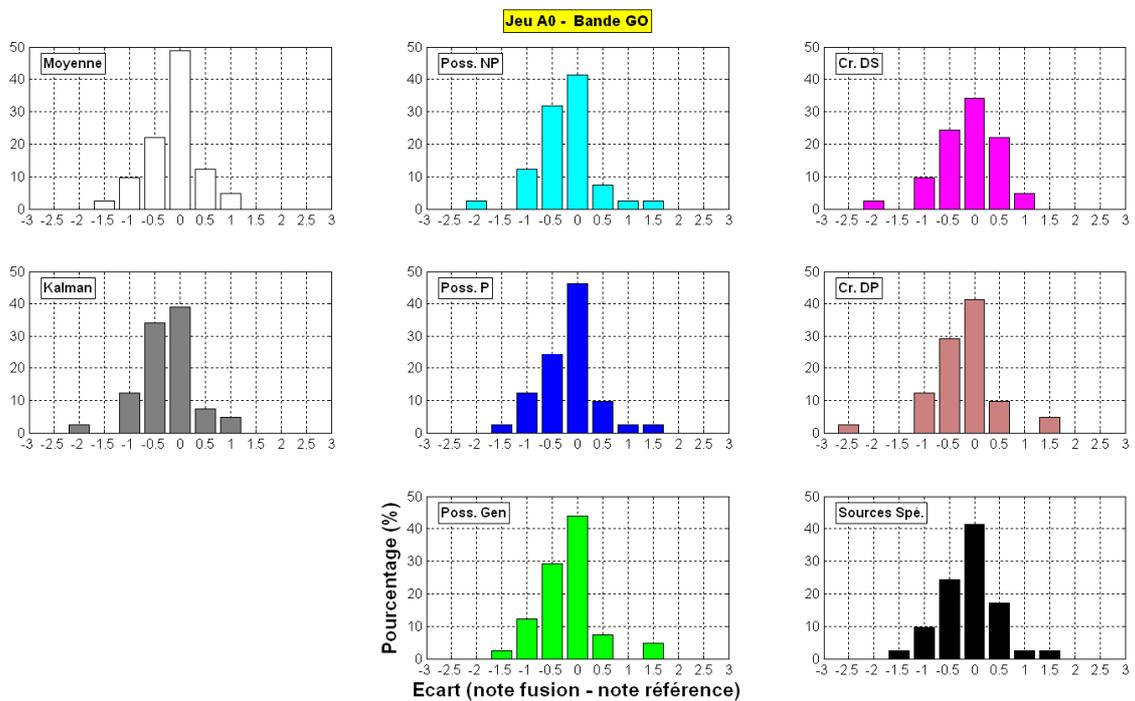


Figure 6.11 : Distribution des écarts de notes pour la bande GO (Jeu A₀)

Par comparaison avec la bande PO, les distributions observées sur les bandes MO et GO sont moins larges et davantage centrées sur 0 ce qui est en accord avec les remarques formulées à partir du premier indicateur (I_1).

Par ailleurs, toujours par comparaison avec la bande PO, la tendance est inversée pour ces deux bandes puisque les notes fournies par les méthodes de fusion sont très légèrement inférieures aux notes de références ; la gravité du défaut est donc quelque peu surestimée. Néanmoins, cette tendance est en accord avec l'esprit de la solution d'auscultation qui préfère avoir une estimation pessimiste de l'état de la chaussée plutôt qu'une estimation optimiste. Dans la mesure où ce phénomène touche l'ensemble des méthodes de traitement, on peut supposer que cette particularité est propre aux données enregistrées par les véhicules traceurs. Cela étant, il faut rappeler que les données du jeu A0, à partir duquel ces remarques sont formulées, ne proviennent que d'un nombre très limité de véhicules traceurs et que ces différentes tendances mériteraient donc d'être confirmées par l'utilisation d'un plus grand nombre de véhicules.

C – Conclusion sur l'exploitation des jeux de classe A et de classe B

L'exploitation des jeux de classe A et de classe B a permis d'étudier le niveau de performance de chacune des méthodes de fusion quand celles-ci sont alimentées par des sources fiables et par conséquent des données fiables. Dans ce contexte, nous avons montré que le filtre de rejet de données aberrantes n'était que très peu sollicité et que le niveau de conflit moyen inter-sources était homogène sur l'ensemble des jeux malgré la différence du nombre de sources utilisés.

Enfin, l'analyse du degré d'exactitude des notes issues de la fusion par comparaison avec des notes de référence a fait ressortir un ensemble de quatre méthodes : la moyenne pondérée, le filtre de Kalman, la méthode possibiliste priorisée et la méthode crédibiliste de Dempster-Shafer. Pour ces jeux, les méthodes citées précédemment sont donc les plus précises sachant que ce degré de précision varie selon la bande d'ondes étudiée. Parmi ces méthodes, on retiendra que la méthode de Dempster-Shafer est celle qui débouche le plus souvent sur une non-décision.

À ce stade, il est donc difficile de choisir ou d'exclure clairement une ou plusieurs méthodes. Pour cette raison, une autre classe de jeux simulés comportant un ensemble de sources non fiables (affectées par diverses défaillances de l'instrumentation) a été introduite afin de savoir si les méthodes en question étaient capables ou non de conserver leur niveau de performance et/ou si d'autres méthodes pourraient s'avérer plus intéressantes.

6.2.2 Analyse des résultats sur les jeux de classe C

Cette analyse a été effectuée en deux temps : la première, basée sur les jeux C_1 , a pour ambition de mettre en évidence la perte de précision (ou d'exactitude) de certaines méthodes par comparaison avec les jeux de classes A et B ; la seconde, utilisant les jeux C_2 , permet de suivre l'évolution du niveau d'exactitude en fonction de la proportion de sources non fiables.

A – Niveaux d’exactitude pour les jeux C₁

Dans un premier temps, seuls les jeux C_{1a} et C_{1b} intégrant une seule source non fiable parmi dix autres font l’objet d’une application des méthodes de fusion. Pour ces jeux, l’utilisation du filtre de rejet aberrantes a été conservé de sorte de permettre la comparaison avec les jeux de classe A et B. Pour le jeu C_{1a}, les mesures étant identiques (toujours égale à 10), le filtre n’a eu aucun effet et l’intégralité des mesures issues de la source non fiable a été dirigée vers les méthodes de fusion. Par contre, dans le cas du jeu C_{1b} qui comporte des notes d’uni tirées aléatoirement, le filtre de rejet a été beaucoup plus sollicité et a ainsi permis de contenir une majeure partie des données non fiables.

Le fait d’alimenter les méthodes de fusion par jeux de classe C₁ a pour effet d’augmenter le niveau de conflit global ainsi que le taux de non-décision. Ce dernier critère permet d’ailleurs de révéler les limites des méthodes faisant appel à l’opérateur conjonctif de Dempster-Shafer (méthodes n°6 et n°8). En effet, pour ces méthodes, le taux de non-décision atteint des valeurs tellement élevées (environ 30 % pour les PO, 52 % pour les MO et 57 % pour les GO pour le jeu C_{1a}) que l’analyse comparative du niveau d’exactitude ne peut être raisonnablement menée.

Sur la figure suivante, les résultats issus du calcul des niveaux d’exactitude des méthodes de fusion pour les jeux C_{1a} et C_{1b} sont ajoutés à ceux obtenus pour les jeux de classe A et B.

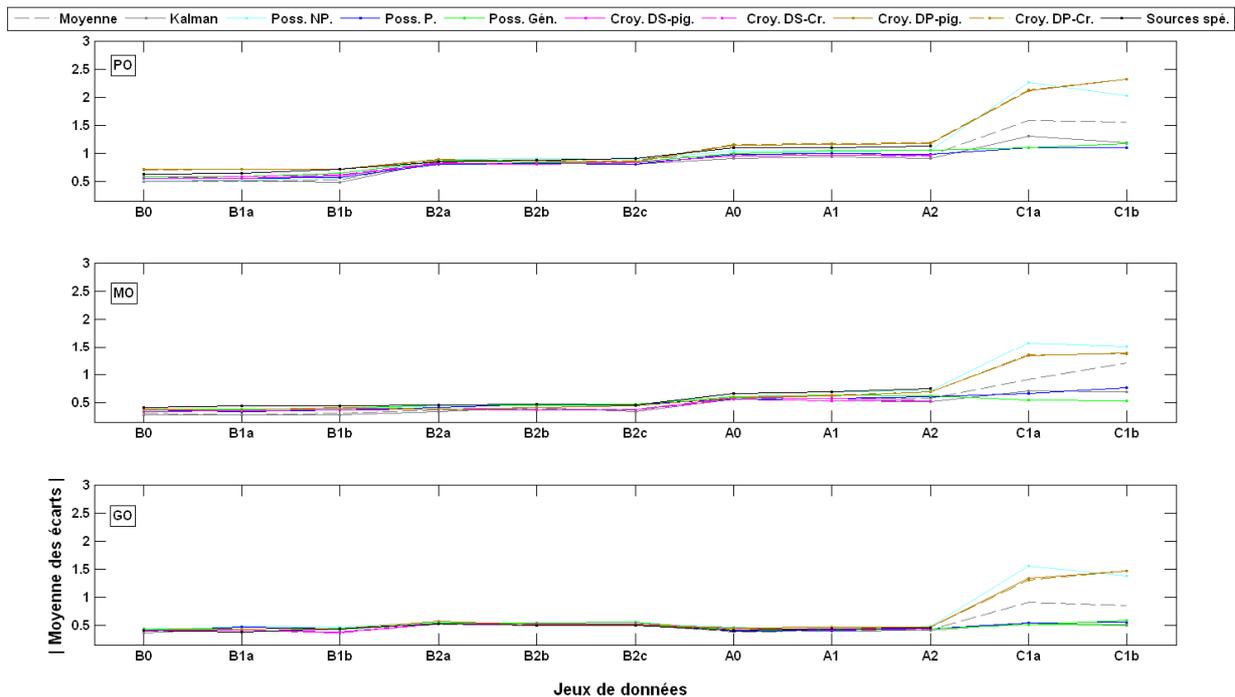


Figure 6.12 : Évaluation des niveaux d’exactitude pour les jeux de classe A, B et C

Sur cette représentation, on remarque rapidement l’émergence de fortes disparités de comportement pour les jeux de classe C. Il est en effet possible de distinguer un groupe de méthodes qui arrivent globalement à conserver le niveau de performance affiché pour les jeux A et B pour les trois bandes d’ondes ; ce groupe est composé du filtre de Kalman, de la

méthode possibiliste priorisée et de la méthode possibiliste généralisée. À l'inverse, un autre groupe de méthodes (moyenne, méthode possibiliste non priorisée et méthode crédibiliste de Dubois et Prade) semble, quant à lui, être très perturbé par la présence de données non fiables puisque le niveau d'exactitude se dégrade très franchement et ce pour les trois bandes d'ondes.

B – Niveaux d'exactitude pour les jeux C_2

Afin d'étudier davantage le comportement de chacune de ces méthodes face à des sources non fiables, celles-ci ont été appliquées sur les jeux $C_{2-1,2,4,6,8,10}$ qui intègrent respectivement de 1 à 10 sources non fiables parmi 20 sources. Pour ces calculs, le filtre de rejet de données aberrantes n'a pas été activé d'une part pour ne pas annihiler la démarche d'ajout progressif de données non fiables et, d'autre part, pour évaluer le niveau d'efficacité intrinsèque des méthodes de fusion dans ce genre de situation. Les résultats de cet exercice pour la bande MO sont reportés sur la figure suivante.

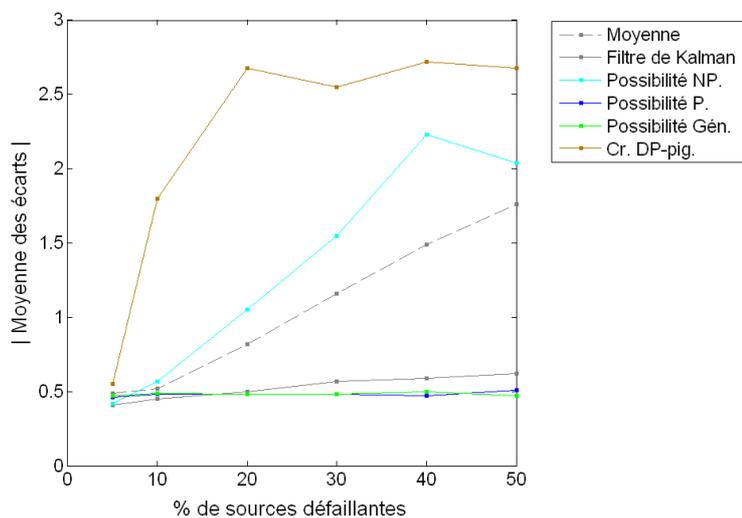


Figure 6.13 : Evolution du niveau d'exactitude moyen calculé sur l'ensemble des segments de la bande MO en fonction du pourcentage de présence de sources défaillantes

Les jeux C_2 permettent de confirmer et d'affiner les conclusions tirées à partir des jeux C_1 puisque, très clairement, le groupe constitué des méthodes possibilistes priorisée et généralisée et, à un moindre type, du filtre de Kalman, arrive à préserver un bon niveau d'exactitude malgré le nombre croissant de sources non fiables. En revanche, pour le groupe constitué de la moyenne pondérée, de la méthode possibiliste non priorisée et de la méthode crédibiliste de Dubois et Prade, le niveau de précision se dégrade au fur et à mesure que la proportion de sources non fiables augmente. L'ensemble de ces remarques formulées pour la bande MO sont également valables pour les bandes PO et GO.

C – Conclusion sur l'exploitation des jeux de classe C

Les jeux de classe C intègre une ou plusieurs sources non fiables dont l'effet est donc d'alimenter les méthodes de fusion avec des mesures non fiables. Ce cas de figure, qui peut très bien arriver dans une application opérationnelle, permet de distinguer assez nettement le niveau de performance des méthodes de fusion telles qu'elles sont utilisées dans ces travaux de thèse.

Parmi les méthodes les plus sensibles à la présence de sources non fiables, celles qui font appel à l'opérateur conjonctif de Dempster-Shafer sont les plus pénalisées (méthodes n° 6 et n° 8) car elles n'arrivent même pas à proposer une note de synthèse pour la plupart des segments de route (comme l'atteste le pourcentage de non-décision). Ce résultat était attendu car on rappelle que les opérateurs conjonctifs font l'hypothèse que les sources à combiner sont toutes fiables et ne sont donc pas adaptés à environnement conflictuel. D'autres méthodes, également sensibles à la présence de sources non fiables arrivent davantage à se prononcer sur la note d'uni de synthèse mais la précision de celle-ci se dégrade au fur et à mesure que le nombre de sources non fiables augmente. Il s'agit des méthodes possibilistes non priorisée, de la méthode crédibiliste de Dubois et Prade et de la moyenne pondérée. Les deux premières méthodes s'adaptent au conflit en se comportant, le cas échéant, de façon disjonctive (hypothèse qu'au moins une des sources est fiable sans savoir laquelle). Dans ce cas, la décision doit être prise parmi un ensemble de singletons plus large (donc plus imprécis) ce qui peut effectivement conduire à une prise de décision plus difficile.

Enfin, les jeux de classe C ont permis de mettre en avant un groupe de méthodes de par leur aptitude à préserver un excellent niveau de précision en présence de sources non fiables ; il s'agit de la méthode possibiliste priorisée, de la méthode possibiliste généralisée et du filtre de Kalman. Parmi ces trois méthodes, la première et surtout la dernière réclament d'établir le meilleur ordre combinatoire possible sans quoi le niveau d'exactitude peut fortement se dégrader. Pour illustrer cette remarque et pour s'en convaincre, nous avons représenté sur la figure suivante le niveau d'exactitude du filtre de Kalman dans deux ordres combinatoires différents.

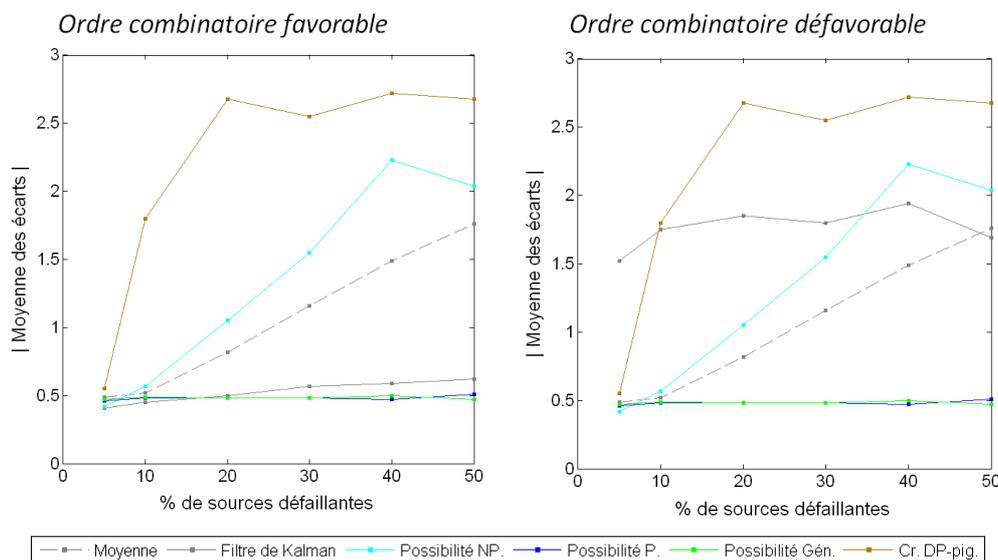


Figure 6.14 : Évolution du niveau d'exactitude du filtre de Kalman selon l'ordre combinatoire

Sur la figure précédente, on constate donc que le degré d'exactitude affiché par le filtre de Kalman est donc fortement conditionné par l'ordre combinatoire, cette méthode pouvant même devenir, dans le cas le plus défavorable, l'une des moins précises. Cette particularité est également valable pour la méthode utilisant l'opérateur adaptatif priorisé qui n'est efficace qu'à la seule condition de hiérarchiser correctement les sources de mesures avant combinaison. On rappelle que, dans ces travaux, cette hiérarchisation est possible grâce au calcul d'un degré de fiabilité par source de mesure mais que ce degré n'est performant qu'à la condition de disposer de mesures de référence (pour avoir accès au niveau de justesse).

Enfin, la méthode possibiliste généralisée offre l'avantage d'être à la fois robuste et précise dans un environnement conflictuel, tout en étant indépendante de l'ordre combinatoire (méthode associative) ; elle est donc conseillée quand il n'est pas possible ou difficile de hiérarchiser les sources de mesures.

6.2.3 Exploitation de l'indice de confiance

L'objectif de l'indice de confiance, qui est associé à chaque note d'uni de synthèse, est de préciser, à travers une valeur, le contexte dans lequel la décision a été prise. Par exemple, une décision prise sur un segment à partir d'un nombre élevé de données recueillies par des sources fiables pour lequel le processus de fusion ne dégage que très peu de conflit sera accréditée d'un indice de confiance élevé. À l'inverse, si la décision a été prise à partir d'un nombre très faible de données et que celles-ci sont en outre très conflictuelles alors l'indice de confiance sera plus faible.

Pour mémoire, l'indice de confiance est défini sur une échelle allant de 0 (incertitude totale) à 10 (confiance maximale) par pas unitaire et il intègre les facteurs suivants :

- Nombre de données utilisées par les méthodes de fusion (critère C_1) ;
- Niveau de fiabilité des sources participant à la mesure (critère C_2) ;
- Niveau de consensus résultant de la combinaison globale des données (critère C_3) ;
- Mesure de possibilité, de croyance, de probabilité pignistique associée à la décision (critère C_4) ;
- Netteté de la décision (critère C_5).

L'indice de confiance (désormais noté IC) peut être examiné sous plusieurs angles. Dans ce chapitre, nous avons choisi de l'étudier pour :

1. Distinguer les méthodes de fusion selon la confiance placée dans la décision ;
2. Savoir s'il est lié au niveau de dégradation de la chaussée (la décision est-elle plus ou moins confiante pour un segment dégradé que pour un segment sain ?) ;
3. Estimer sa variation en présence de sources défailtantes.

• Analyse n°1 : moyenne des indices de confiance des méthodes de fusion

La figure suivante (Fig. 6.15) représente les valeurs moyennes des IC établies pour chaque jeu de données et pour les trois bandes d'ondes. Seuls les tracés correspondant aux méthodes pour lesquelles l'ensemble des critères ont pu être calculés (méthodes relevant des cadres possibilistes et crédibilistes) ont été représentés. Pour chaque jeu de données, les critères portant sur le volume de données et de fiabilité des sources étant identiques pour chaque méthode, la différence éventuelle du niveau de confiance provient donc uniquement des critères 3, 4 et 5.

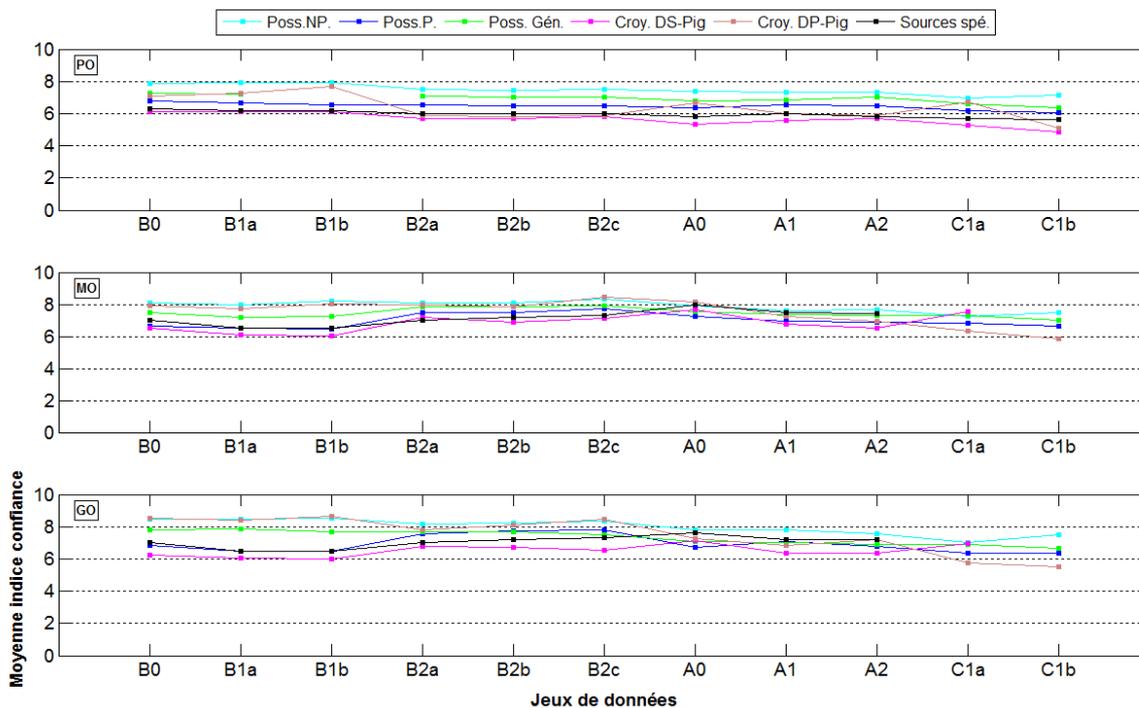


Figure 6.15 : Moyenne des indices de confiance pour chaque méthode et pour chaque jeu

Sur cette figure, on se rend d'abord compte que, pour l'ensemble des méthodes et pour les trois bandes d'ondes, les valeurs moyennes des IC sont comprises entre 6 et 8 sur 10 pour les jeux de classe A et B ce qui peut s'avérer être un peu faible pour des sources supposées fiables ; un travail de calage sera donc éventuellement nécessaire à l'avenir pour les réévaluer. De plus, toujours par rapport à l'ensemble des méthodes, on remarque que l'IC moyen semble fléchir pour les jeux de classe C qui comportent une source non fiable ; de ce point de vue, ce comportement est conforme à ce qui était attendu.

Si l'on étudie l'IC selon la méthode à laquelle il renvoie, on s'aperçoit qu'il existe des écarts significatifs entre celle qui est la plus confiante de celle qui l'est le moins (environ 2 points). D'une façon générale, les méthodes n°6, n°8 (croyance – opérateur de Demspter-Shafer) et n°4 (possibilité – combinaison priorisée) sont les moins confiantes alors que les méthodes n°7 (croyance – opérateur de Dubois et Prade) et n°3 (possibilité – combinaison non priorisée) sont les plus confiantes. En reprenant les conclusions portant les niveaux d'exactitude des méthodes de fusion, on remarque que les méthodes les plus précises sont globalement les moins confiantes et *vice versa*. Ce résultat est en cohérence avec la nature

des opérateurs utilisés car les premiers sont discriminants (combinaison relativement « audacieuse ») tandis que les derniers sont de nature plus prudente.

- **Analyse n°2 : Sensibilité de l'indice de confiance par rapport à l'état de la chaussée**

Pour vérifier si l'IC était sensible à l'état de la chaussée, nous avons confronté, sur les planches suivantes, les notes d'uni de référence avec les valeurs des IC provenant d'une des méthodes de fusion (la méthode n°5 – opérateur généralisé) sur l'ensemble des segments composant le circuit-test (étude menée sur la bande MO du jeu expérimental A₀). Ce type de représentation a été préféré à un diagramme indiquant la répartition des indices de confiance en fonction des notes d'uni car elle permet de raisonner sur la base des segments de route (Fig. 6.16).

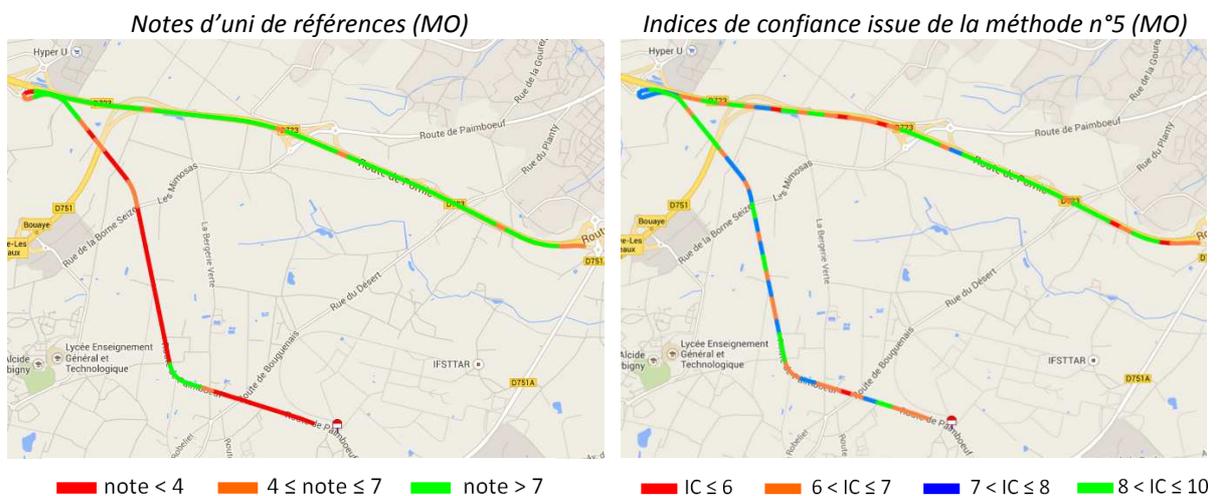


Figure 6.16 : Confrontation entre l'indice de confiance et l'état de la chaussée

Par comparaison avec la section saine, la section dégradée (Cf. section 4.2) où les notes sont globalement inférieures à 4 rassemble les plus faibles valeurs d'IC. Ces résultats tendent donc à montrer que les décisions issues des méthodes de fusion sont plus confiantes quand la note est élevée (chaussée en bon état) que lorsqu'elle est basse (chaussée en mauvaise état). Cette observation étant également valable pour les autres bandes d'ondes et pour l'ensemble des méthodes, la valeur de l'IC serait donc sensible à l'état de la chaussée.

- **Analyse n°3 : Sensibilité de l'indice de confiance par rapport à la présence de sources défaillantes**

L'un des facteurs les plus nuisibles à la précision des résultats produits par les méthodes de fusion est la présence d'une ou plusieurs sources défaillantes. Dans ce genre de situation, on attend que l'indice de confiance s'abaisse pour nuancer le crédit placé dans la décision. Pour vérifier si l'indice de confiance calculé dans ces travaux était effectivement sensible à la présence de sources défaillantes, nous avons représenté les IC d'une même méthode (possibilité généralisée) pour la bande MO des jeux A₀ (aucune source défaillante) et C₂₋₄ (20% de sources défaillantes).

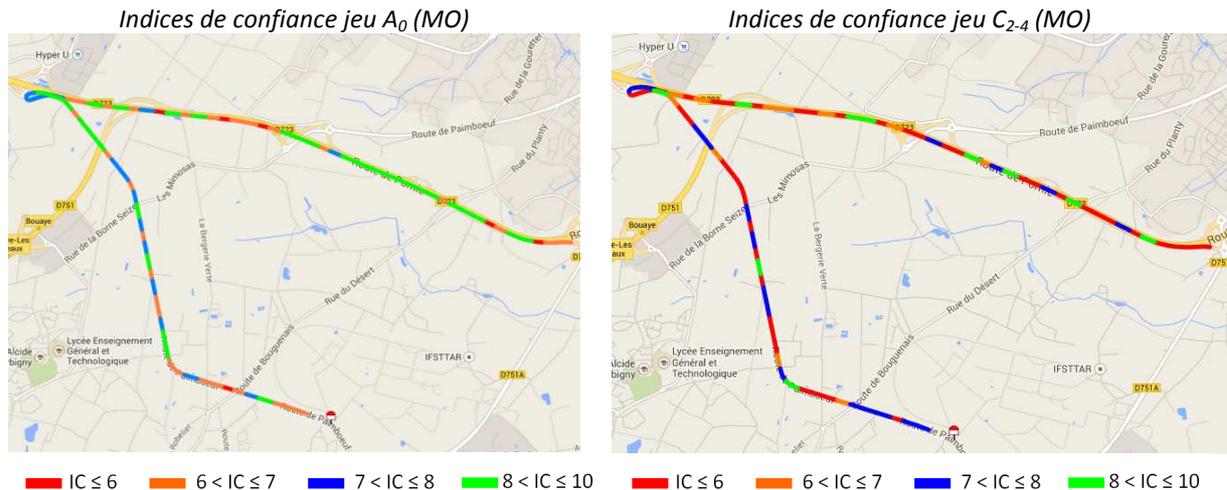


Figure 6.17 : Évolution des indices de confiance en présence de sources défaillantes

Sur ces illustrations, on remarque que, sur l'ensemble du parcours, les IC calculés pour le jeu de classe C sont effectivement plus faibles puisqu'une grande proportion de segments perd en général environ deux points d'indice en présence de sources défaillantes (constat très net sur la section saine). Par conséquent, l'IC est donc, comme attendu, sensible à la présence de sources défaillantes et dans des proportions qui permettent clairement de nuancer les décisions issues des méthodes de fusion pour chaque segment de route.

• Conclusion sur l'exploitation des indices de confiance

Afin de nuancer chaque note d'uni de synthèse issue de l'application des méthodes de fusion, un indice de confiance associé à cette note a été construit en intégrant notamment des critères qui relèvent des méthodes de fusion (ex : niveau de conflit entre les informations). L'idée portée par cet indice de confiance est d'apporter une information supplémentaire au gestionnaire pour faciliter sa prise de décision. Concrètement, si le gestionnaire constate par exemple qu'un segment de route a une faible note d'uni (chaussée en mauvais état) et que, de surcroît, l'indice de confiance est élevé alors il est très probable que cette caractérisation soit exacte. À l'inverse, si l'indice de confiance associé à cette même note est faible, le gestionnaire peut émettre un doute sur la véracité de cette valeur ; il est alors plus prudent d'attendre l'arrivée et le traitement de nouvelles informations pour confirmer ou infirmer cette analyse.

Sur la base des résultats obtenus pour le jeu expérimental A_0 , l'indice de confiance tel qu'il a été défini semble sensible au niveau de dégradation de la chaussée (plus la chaussée est dégradée plus l'indice de confiance est faible). Cela étant, compte-tenu des propriétés de l'échelle de notation des notes d'uni, en particulier le fait qu'elle est bornée [0 - 10], le niveau de dispersion (et donc le conflit) est susceptible d'être plus fort quand les notes se situent autour de la valeur centrale (ex : note de 5) que pour les valeurs extrêmes (autour de 0 ou autour de 10). Or, les notes correspondant à la section dégradée du circuit-test sont comprises entre 4 et 6. De ce fait, la relation entre l'indice de confiance et l'état de la chaussée mérite d'être confirmée sur d'autres itinéraires et sur des notes beaucoup plus faibles (inférieures à 2).

Dans tous les cas, ce qui apparait comme certain, est que l'indice de confiance évolue franchement en présence de sources défaillantes (ou non fiables). Ce résultat, qui était recherché, est logique au regard de la logique de construction de l'indice de confiance car celui-ci fait intervenir le degré de fiabilité des sources de façon directe à travers le critère n°1 (degré de fiabilité général des sources participant à la mesure) et de façon indirecte à travers le critère n°3 (degré général de conflit inter-sources).

6.3 Bilan sur les niveaux de performances des méthodes de fusion

L'analyse des niveaux d'exactitude effectuée sur les trois classes de jeux de données a permis de différencier les méthodes de fusion selon plusieurs cas :

- Quand toutes les sources sont fiables (jeux de classe A et B), la méthode qui donne les meilleurs résultats quelle que soit la bande d'ondes est la méthode n°6 intégrant l'opérateur de combinaison conjonctif de Dempster-Shafer. La méthode n°8 (sources spécialisées) qui utilise également cet opérateur n'affiche pas ce même niveau de performance. Ce constat nous rappelle que l'efficacité d'une méthode ne dépend pas seulement de l'opérateur de combinaison mais également du modèle et des règles de décision choisis.
- Quand il existe au moins une source non fiable (jeux de classe C) et qu'il est possible de hiérarchiser les sources selon leur degré de fiabilité, les méthodes les plus performantes sont le filtre de Kalman (méthode n°2), la méthode possibiliste priorisée (méthode n°4) et la méthode possibiliste généralisée (méthode n°5).

Dans cette situation, la méthode n°6, qui était très performante dans la configuration précédente, est mise en difficulté car elle ne peut se prononcer pour la plupart des segments du fait de son incapacité à s'adapter au conflit induit par la ou les sources non fiables.

- Quand il existe au moins une source non fiable mais qu'il n'est pas possible d'établir clairement et avec certitude une hiérarchie entre les sources, c'est au tour du filtre des méthodes n°2 et n°4 d'être mises en défaut. Dans cette situation, la méthode n°5 est la plus adaptée. On rappelle en effet que cette méthode intègre l'opérateur généralisé de Dubois et Prade qui, dans un premier temps, s'arrange pour déterminer intrinsèquement les sources ou informations supposées fiables de celles qui ne le sont pas et, dans un second temps, de procéder à une combinaison quantifiée qui tient compte de cette pré-analyse. Cependant, on rappelle que cette méthode s'accompagne d'une complexité combinatoire bien plus importante que les autres méthodes et qu'elle nécessite en conséquence plus de ressources de calcul.

L'ensemble de ces remarques justifie donc *a posteriori* le fait d'avoir étudié et pris en compte un spectre relativement large de méthodes de fusion car on perçoit bien, à travers les différents cas évoqués précédemment, que le meilleur niveau d'efficacité serait obtenu à partir d'une solution multi-méthodes dont le choix dépendrait de l'analyse du niveau de fiabilité des sources de mesures. En considérant à chaque fois la méthode de fusion la plus adaptée, les niveaux d'exactitude atteints sont, de façon générale, de l'ordre de :

- ± 2 points pour la bande PO ;
- ± 1 point pour les bandes MO et GO ;

On complète cette analyse en ayant identifié les tendances suivantes :

- Une très légère sous-estimation des notes de référence pour les bandes MO et GO (c'est-à-dire une légère surestimation de la gravité du défaut) ;
- Une légère surestimation des notes de référence pour la bande PO (sous-estimation de la gravité du défaut) ;

On précise néanmoins que ces tendances sont vraisemblablement plus le fait de caractéristiques propres aux mesures (biais) que celles des méthodes de traitement.

Donc, en l'absence d'information *a priori* sur la fiabilité des sources, la méthode n° 5 (possibilité généralisée) apparaît bien comme la plus sûre. Pour illustrer de façon concrète les niveaux de précision obtenus avec cette méthode, nous avons représenté sur les figures suivantes les écarts entre les notes de référence et les notes issues de la méthode n°5 sur chaque segment du circuit-test et pour les trois bandes d'ondes (Fig. 6.18, 6.19 et 6.20).

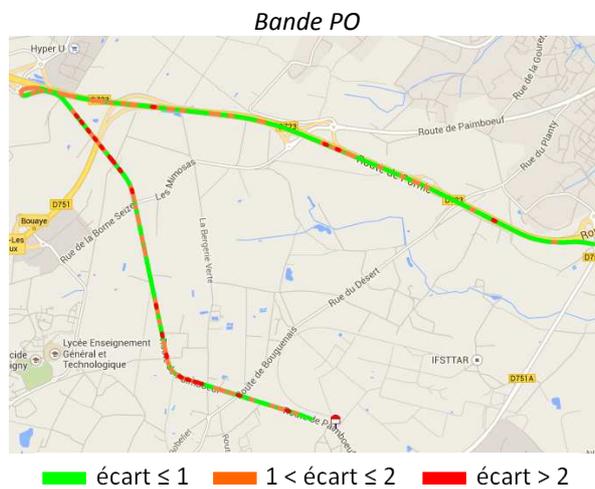


Figure 6.18 : Écarts de notes avec la référence pour la bande PO

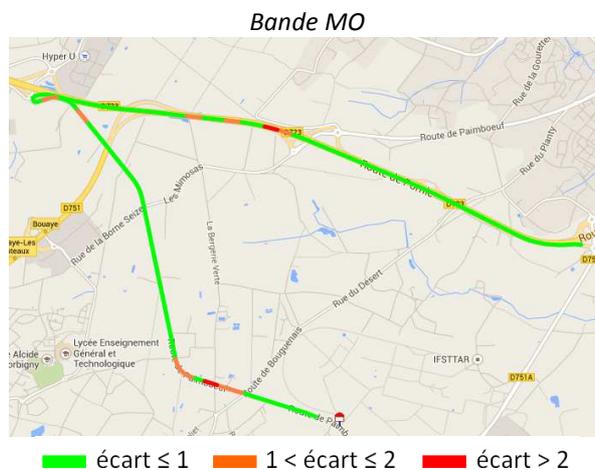


Figure 6.19 : Écarts de notes avec la référence pour la bande MO

Conclusion générale

Dans le contexte économique actuel, les gestionnaires d'infrastructures doivent maintenir le patrimoine routier avec un certain degré de qualité mais avec moins de ressources financières. Cette contrainte implique, de leur part, de surveiller attentivement l'évolution de leur réseau afin de réagir au plus vite en cas de présence de défauts majeurs. En effet, plus le défaut sera rapidement détecté, plus vite les opérations d'entretien pourront être déclenchées et moins les travaux de réhabilitation seront chers.

Pour répondre à ce défi, les besoins en innovation dans le domaine de l'auscultation des routes, et en particulier de celle de l'uni des chaussées, ne porte plus prioritairement sur une amélioration métrologique des appareils de mesure (les appareils existants ont déjà atteint un seuil de précision très suffisant) mais bien sur le développement d'outils et de procédés qui permettent d'avoir une connaissance spatialement étendue et temporellement dense (*i.e.* avec des actualisations fréquentes) de l'état du réseau routier. Dans ce contexte, une solution possible consiste à utiliser une flotte de véhicules traceurs. Ce procédé, déjà employé en France pour traiter des problématiques de mobilité par exemple, n'a jamais vraiment été utilisé dans le domaine de l'auscultation des routes hormis à travers quelques travaux de recherche portant sur la détection de nids-de-poule. Par conséquent, l'ambition des présents travaux de thèse était de proposer et d'évaluer une chaîne de mesures destinée à équiper les véhicules traceurs et de jeter les premières bases méthodologiques pour le traitement des mesures collectées par ces véhicules. Par ailleurs, sur la base d'expérimentations menées sur un circuit-test de quelques kilomètres, ces travaux de thèse ont permis d'apporter quelques éléments de réponses quant au degré de faisabilité, de fiabilité et de précision d'une telle solution.

Bilan des travaux de thèse

Les travaux réalisés durant cette thèse ont connu trois temps forts :

- La mise au point et l'évaluation d'une instrumentation embarquée capable de relever des informations caractérisant le niveau d'uni de la chaussée ;
- L'identification d'un ensemble de facteurs susceptibles de dégrader le niveau de précision de ces informations ;
- L'identification et l'évaluation de méthodes permettant d'agréger les informations délivrées par l'ensemble des véhicules traceurs participant à la mesure.

Concernant le recueil d'informations, ces travaux ont permis d'évaluer rigoureusement le niveau de performance des accéléromètres bas-coût et de valider leur usage pour la mesure d'uni en les installant sur les fusées de roues des véhicules traceurs.

On retiendra, à partir des essais réalisés sur le banc de vibrations et sur route, que l'utilisation de ce type d'accéléromètres implique de considérer des incertitudes de mesures principalement liées à la dépendance du coefficient de sensibilité vis-à-vis de la tension

d'alimentation. En conséquence, il est donc important de veiller à ce que, sur le plan technique, le capteur soit correctement alimenté (tension stabilisée).

Par ailleurs, en tenant compte des différentes possibilités d'intégration du capteur dans le véhicule, nous avons choisi de travailler à partir des signaux correspondant aux déplacements verticaux de la roue. De cette manière, on dispose d'informations suffisamment riches pour restituer intégralement les défauts des bandes GO et MO ainsi qu'une partie de ceux appartenant à la bande PO (les défauts de très petites longueurs d'ondes ne pouvant pas être détectés). Ce choix d'instrumentation permet, en outre, de s'affranchir de certaines contraintes liées aux conditions de mesures puisque, par exemple, les données peuvent être collectées par tous temps (pluie ou soleil) et sur n'importe quel type de surface de chaussée (y compris sur les chaussées non-revêtues).

Enfin, dans la mesure où le niveau de performance de ces capteurs bas-coût était très satisfaisant (pour ne pas dire excellent compte-tenu du rapport qualité-prix), la puissance métrologique contenue dans les informations prélevées par chaque véhicule traceur nous a permis de nous raccorder aux mêmes indicateurs que ceux utilisés pour l'exploitation des mesures issues des appareils de référence. De cette manière, il a été plus facile d'évaluer la qualité des résultats provenant de la solution d'auscultation utilisant des véhicules traceurs par rapport à celle des résultats issus des mesures de référence (MLPL) et surtout, en vue d'une future application opérationnelle, de permettre au gestionnaire de raisonner et de décider au vu d'indicateurs avec lesquels il est familier.

Une fois la caractérisation de la chaîne de mesures effectuée et les indicateurs de défaut d'uni choisis, il était indispensable d'identifier les facteurs de variabilité qui entachent d'imperfections les mesures réalisées par les véhicules traceurs et de quantifier leurs impacts. Cette quantification a été effectuée à partir d'essais expérimentaux menés sur un circuit-test qui est, certes, relativement court, mais qui intègre différents types d'infrastructures (routes de campagne, voie express) ainsi que différents niveaux de dégradation. Ce travail métrologique a par la suite été utilisé dans le cadre des méthodes de fusion, en particulier pour la représentation des connaissances accompagnant la mesure. Néanmoins, il faut rappeler que les résultats portant sur les facteurs de variabilité ne sont que des estimations et que celles-ci mériteraient d'être complétées par l'ajout de facteurs supplémentaires comme l'erreur due au recalage spatiale des sessions de mesure (opération de map-matching).

La solution d'auscultation au moyen de véhicules traceurs suppose qu'une grande quantité d'informations soit collectée et que soit identifiée une procédure de traitement permettant de convertir ce volume de données élémentaires, parfois imprécises et incertaines, en des notes d'uni les plus précises et les plus fiables possible. Ce traitement comporte deux phases: une combinaison des informations (accélération, localisation...) à l'échelle intra-véhiculaire suivie d'une seconde fusion à l'échelle inter-véhiculaires. Ces processus de fusion, qui s'appliquent sur des données de même nature (notes d'uni), ont l'intérêt de tenir compte des particularités des sources de mesures d'où proviennent les données et de les « pondérer » en conséquence. Le recours à ce genre de méthodes pour la mesure d'uni étant un procédé innovant, il a été décidé d'étudier un panel d'outils de fusion relativement large faisant intervenir plusieurs formalismes (probabiliste, possibiliste et crédibiliste).

Les théories de fusion des informations, tant celle dite « des possibilités » que celle appelée « des croyances » comportent plusieurs étapes : la modélisation des données, leur

combinaison et la prise de décision. La première étape est certainement la plus complexe des trois car elle nécessite une adaptation « sur mesure » vis-à-vis du contexte applicatif dans lequel la fusion s'opère. Dans notre étude, l'une des difficultés était d'intégrer à chaque donnée initiale (qui, rappelons-le, prend la forme très compacte voire très simple d'une note sur une échelle de 0 à 10), une somme de connaissances supplémentaires afin de créer une représentation plus riche (ex : distribution de possibilité). Dans la plupart des méthodes étudiées, la modélisation des données a été effectuée sur la base de deux intervalles encadrant la mesure issue de chaque véhicule traceur : l'intervalle le plus « large », de nature pessimiste, considère l'interaction d'un ensemble de facteurs de variabilité pour une source de mesure et une bande d'ondes données ; l'intervalle le moins large, donc beaucoup plus optimiste, est calculé, quant à lui, à partir du degré de répétabilité de la source en question sur le segment de route sur lequel le traitement a lieu. Ce dernier critère a été introduit dans la modélisation car il correspond à l'hypothèse que chaque véhicule traceur sera amené à passer régulièrement sur le même itinéraire (cas d'un véhicule de patrouille). Il est clair que, dans les cas où cette hypothèse ne serait pas valable (véhicules très différents passant rarement aux mêmes endroits), le modèle devrait être révisé pour en tenir compte.

Une fois les méthodes de fusion implémentées et intégrées dans l'architecture globale de traitement, celles-ci ont été appliquées sur plusieurs types de jeux de données (expérimentaux et synthétiques) afin de savoir si une ou plusieurs méthodes se distinguaient des autres et quel était le niveau d'exactitude atteint par rapport à des mesures de référence. En effet, le but de la thèse n'était pas de créer un nouvel outil de fusion mais bien de tester les méthodes existantes les plus communes pour identifier le cas échéant, celles qui s'appliquaient le mieux au traitement des mesures des véhicules traceurs. Il ressort, de l'application sur les différents jeux de données, que le comportement et le degré de précision de certaines méthodes est très dépendant de la présence ou non de sources non fiables d'une part et de la possibilité d'optimiser ou pas l'ordre combinatoire de l'ensemble des sources d'autre part. On retiendra ainsi que la méthode crédibiliste de Dempster-Shafer se montre très précise en présence de sources exclusivement fiables mais qu'elle devient vite inadaptée quand une source non fiable se glisse parmi les sources participant à la mesure. D'autres méthodes, comme le filtre de Kalman ou la méthode utilisant l'opérateur adaptatif priorisé de Dubois et Prade, offrent un très bon niveau de précision y compris en présence de sources non fiables mais à la condition que l'ensemble des sources puisse être correctement hiérarchisé (selon le niveau de fiabilité) puis combiné. Enfin, quand la flotte de véhicules traceurs contient une ou plusieurs sources non fiables et qu'il est de surcroît difficile d'établir, de façon claire, une hiérarchie entre elles (ou bien encore quand les sources sont mal caractérisées), ce qui est le cas le plus général, la méthode possibiliste utilisant l'opérateur généralisé de Dubois et Prade est la plus conseillée. En effet, de par sa faculté à identifier intrinsèquement les sources supposées fiables et à les combiner spécifiquement avec celles qui ne le sont pas, elle s'avère être la méthode qui allie robustesse et précision.

En plus de pouvoir agréger un ensemble de données, certaines méthodes de fusion (celles relevant de la théorie des possibilités et des croyances) dégagent des informations très intéressantes, comme le degré de conflit régnant entre les sources de mesures lors de l'étape de combinaison. Dans nos travaux, ce type d'informations a servi à la construction d'un indice de confiance associé à chaque note d'uni de synthèse en fonction du contexte

(favorable ou défavorable) dans lequel la décision (c'est-à-dire le choix de la note résultante) a été prise.

Compte-tenu des enseignements et des résultats obtenus à travers ces travaux de thèse, on peut se montrer optimiste quant à la faisabilité de la solution d'auscultation utilisant des véhicules traceurs pour détecter et suivre l'évolution des défauts d'uni. En effet, les résultats issus des expérimentations menées sur le circuit-test avec des véhicules traceurs « réels » tendent à montrer que les défauts relevant des bandes MO et GO sont susceptibles d'être caractérisées de façon relativement précise (à environ ± 1 point près) ; pour la bande PO, les défauts de très petites longueurs d'ondes étant difficilement accessibles par cette méthode de relevé, la solution d'auscultation perd légèrement de sa précision (écart d'environ ± 2 points par rapport à la référence) mais reste adaptée à la détection de défauts significatifs.

Perspectives

Beaucoup de prolongements scientifiques et technologiques peuvent être donnés à ces travaux de thèse avant d'envisager une application opérationnelle.

Prolongements scientifiques

En premier lieu, un certain nombre de résultats mériteraient d'être confirmés, notamment :

- En appliquant les méthodes sur un parc beaucoup plus divers et/ou plus nombreux de véhicules traceurs, pour s'assurer que les conclusions sur la justesse relatives des différentes méthodes de fusion restent valables ;
- En exécutant des mesures sur des itinéraires plus longs et plus diversifiés, en vue de s'assurer de la validité des relations observées entre l'indice de confiance et l'état des chaussées ;
- En intégrant certaines situations particulières comme la présence d'une zone de masquage GPS plus ou moins longue sur l'itinéraire et d'évaluer la perte de précision des résultats;
- Etc.

Surtout, compte-tenu des conclusions portant sur les propriétés des méthodes de fusion dans le bilan, il serait intéressant et pertinent de placer, au cœur de l'architecture globale de traitement, une stratégie pluri-méthodologique qui ferait le choix de la meilleure méthode à utiliser en fonction des caractéristiques des sources de mesures. Cette stratégie devrait naturellement s'accompagner de nouvelles fonctionnalités relatives à la détection automatique des sources non fiables (ou du moins clairement défailtantes) parmi un ensemble de véhicules traceurs. Sur ce sujet, nous avons, en fin de thèse, identifié plusieurs pistes, certaines étant basées sur l'exploitation des signaux « bruts » de mouvement de roue (appel à des fonctions de corrélation), et d'autres s'appuyant sur des éléments provenant des opérations de fusion comme les niveaux de conflit inter-sources.

En parallèle, afin de mieux prendre en compte les observations antérieures, il serait également judicieux de mettre en place une méthode « superviseur » qui veillerait à ce que les notes d'uni d'une période à une autre soient cohérentes et qui intégrerait, de façon automatisée, des modifications faisant suite à des événements particuliers comme, par exemple, la réfection de la couche de surface de la chaussée (remise des notes d'uni à 10).

Une telle méthode pourrait également mémoriser les sources supposées non fiables et les exclure de tout processus de traitement tant que leurs mesures semblent discordantes avec celles provenant des autres sources.

Prolongements technologiques

À l'échelle du capteur (accéléromètre), il serait très intéressant de prolonger le travail de caractérisation en étudiant, par exemple, sa réponse en fonction des conditions de température. Une telle approche aurait un intérêt opérationnel évident afin de détecter d'éventuelles disparités de résultats selon les saisons et/ou selon la région où la solution d'auscultation est appliquée. Enfin, une connaissance approximative de la durée de vie de ce type de capteurs serait également une information pertinente sur le plan opérationnel car elle permettrait d'envisager des plans de maintenance préventive sur les véhicules traceurs.

À l'échelle du véhicule et sur le plan instrumental, on rappelle que les équipements de mesure développés pour ces travaux n'avaient pour seule ambition que d'enregistrer des données lors de la conduite d'essais expérimentaux. Pour cette raison, nous avons travaillé avec des systèmes filaires ainsi que des moyens informatiques de « bureau » forcément inadaptés à une application opérationnelle. Dans ce domaine, des développements technologiques sont donc nécessaires afin de rendre les équipements de mesure plus robustes et plus discrets¹ en utilisant par, exemple, des capteurs communiquant par liaison bluetooth.

Pour finir, afin de confirmer le potentiel opérationnel de la solution d'auscultation proposée dans cette thèse, il serait souhaitable de se rapprocher d'un gestionnaire d'infrastructures pour mener des expérimentations « en vraie grandeur » tout en restant, dans un premier temps, à une échelle localisée (ex : une partie d'un département).

¹ En effet, dans la vision opérationnelle de l'application, celle-ci sera une fonction "masquée" du véhicule traceur dont les fonctions principales seront différentes (patrouillage, livraison, taxi...)

Bibliographie

- [1] SETRA-LCPC : *Conception et dimensionnement des structures de chaussée-Guide technique*. Paris : Documentation des Techniques Routières Françaises, 1994.
- [2] ISO 13473-2 : *Caractérisation de la texture d'un revêtement de chaussée à partir de relevés de profils de la surface – Partie 2 : Terminologie et exigences de base relatives à l'analyse des profils de texture d'une surface de chaussée*, 2002.
- [3] R. ELVIK et T. VAA : *The handbook of road safety measures*. Elsevier, 2004.
- [4] O. ORFILA : *Influence de l'infrastructure routière sur l'occurrence des pertes de contrôle de véhicules légers en virage : modélisation et validation sur site expérimental*. Thèse de doctorat, Université d'Evry-Val-d'Essone, 2009.
- [5] G. KANELLAIDIS : Factors affecting driver's choice of speed on runway curves. *Journal of Safety Research*, Vol. 26, pp. 49-56, 1995.
- [6] F. TAN, T. THORESEN et C. EVANS : Review of vehicle operating costs and road roughness: past, current and future. In *25th AARB Conference, 2012*.
- [7] USDT FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, RESEARCH, DEVELOPMENT AND TECHNOLOGY: *WestTrack – Track roughness, fuel consumption and maintenance costs*. TECHBRIEF, 2000.
- [8] C. KALEMBO, M. JEIHANI et A. SAKA : Evaluation of the impact of pavement roughness on vehicle gas emissions in Baltimore county. In *TRB 2012*.
- [9] LCPC : *Mesure de l'uni longitudinal des chaussées routières et aéronautiques*. Méthode d'essai des LPC n°46 version 2.0, 2009.
- [10] D. SADOUL : *Analyseur dynamique de profil en long*. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées n°37, Réf. 659, pp.73-82.
- [11] E.B. SPANGLER : *Method and system for measurement of road profile*. Brevet américain, US Patent 4.422.322, 1983.
- [12] ISO 2631-1 : *Vibrations et chocs mécaniques – Évaluation de l'exposition de l'individu à des vibrations globales du corps – Partie 1 : spécifications générales*, 1997.
- [13] W. N. CAREY et P. E. IRICK : *The pavement serviceability-performance concept*, HRB Bull. 250, 1960.

-
- [14] M. W. SAYERS : On the calculation of International Roughness Index from Longitudinal Road Profile – *Transportation Research Record N° 1501* (UMTRI), pp. 1-12, 1995.
- [15] ASSOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION NF P 98-218-3 : *Essais relatifs aux chaussées – Partie 3 : détermination de quantificateur d’uni longitudinal à partir de relevés profilométriques*, 1995.
- [16] ISO 8608 : *Vibrations mécaniques – Profils de route – Méthode de présentation des résultats de mesures*, 1995.
- [17] P.D. WELCH : The use of fast Fourier transform for the estimation of Power Spectra : a method based on time averaging over short, modified periodograms, *IEEE Transactions on Audio Electroacoustics*, AU-15, pp. 70-73, 1967.
- [18] GNCDS Sous-groupe Uni : *Uni des couches de roulement neuves – Des surprises à éviter. Note de sensibilisation*, 2007.
- [19] DIRECTION DES ROUTES : *Contrôle de l’uni longitudinal des couches de roulement neuves*, Circulaire n°2000-36, 2000.
- [20] ISO 22837 : *Vehicle probe data for wide area communication*, 2009.
- [21] S. BESSLER et T. PAULIN : *Literature study on the state of the art of probe data systems in Europe*, Rapport des projets européens iMobility Support et FOT-Net, 2013.
- [22] ISO/TS 29284 : *Intelligent Transport Systems – Event-based probe vehicle data*, 2012.
- [23] ISO 25114 : *Intelligent Transport Systems – Probe data vehicle reporting management*, 2010.
- [24] Texas Transportation Institute et LEE Engineering : *Private probe vehicle data for real-time applications – Final report*, UPWP task number 600-0170-11, 2011.
- [25] E.J. OBRIEN, P. MCGETRICK et A. GONZALEZ : Identification of road irregularities via vehicle accelerations. In *TRA 2010*.
- [26] J. FRADEN : *The handbook of modern sensors*. Springer-Verlag, 2004.
- [27] V. LEGEAY, Y. DELANNE, P. DABURON, C. GOURRAUD : *Mesure de l’uni à partir d’une mesure de déplacement avec compensation dynamique*. Littérature grise LCPC, 1995.
- [28] A. MARTIN : *La fusion d’informations*. Polycopié de cours ENSIETA réf. 1484, 2005.
- [29] I. BLOCH : *Fusion d’informations en traitement du signal et des images*. Hermes Science Publication, 2003.

-
- [30] D. DUBOIS et H. PRADE : La fusion d'informations imprécises. *Traitement du Signal*, vol. 11 (6), pp. 447-458, 1994.
- [31] I. BLOCH : Incertitude, imprécision et additivité en fusion de données : point de vue historique. *Traitement du Signal*, vol. 13 (4), pp. 267-288, 1996.
- [32] D. DUBOIS et H. PRADE : Representation and combination of uncertainty with belief functions and possibility measures, *Computational Intelligence*, vol. 4 (3), pp. 244-264, 1988.
- [33] D. DUBOIS et H. PRADE : La problématique scientifique du traitement de l'information. In *Interaction-Intelligence-Information*, vol. 1 (2), 2001.
- [34] P. SMETS : The variety of ignorance and the need for well-founded theories. *Information Sciences*, vol. 57-58, pp. 135-144, 1991.
- [35] J.-F. GRANDIN : *Fusion de données – Théorie et méthodes*, Techniques de l'ingénieur, réf. S7224, 2006.
- [36] D. GRUYER : *Etude du traitement de données imparfaites pour le suivi multi-objets : Application aux situations routières*. Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Compiègne, spécialité Contrôle des systèmes, 1999.
- [37] R. LABEYRADE, C. ROYERE, D. GRUYER et D. AUBERT : Cooperative fusion for multi-obstacles detection with the use of stereovision and laser scanner. In the special issue "Robotics Technologies for Intelligent Vehicles" in *Autonomous Robots*, vol. 19, pp. 117-140, 2005.
- [38] R.E. KALMAN : A new approach to linear filtering and prediction system. *Transactions of the ASME-Journal of basic engineering*, vol. 82, pp. 35-45, 1960.
- [39] G. WELCH et G. BISHOP : *An introduction to the Kalman filter*. Technical Report 95-041, University of North Carolina - Chapel Hill, 2006.
- [40] L.A. ZADEH : Fuzzy sets as a basis for theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 1, pp 3-28, 1978.
- [41] D. DUBOIS et H. PRADE : *Théorie des possibilités : application à la représentation des connaissances en informatique*, Masson, 1988.
- [42] L.A. ZADEH : Fuzzy sets. *Information and Control*, vol. 8, pp.338-353, 1965.
- [43] D. DUBOIS et H. PRADE : Possibility theory, probability theory and multiple-valued logics : a clarification, *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, pp. 35-66, 2001.
- [44] D. DUBOIS et H. PRADE : Combination of fuzzy information in the framework of possibility theory. In *Data fusion in Robotics and Machine Intelligence*, Academic Press, New-York, 1992, pp. 481-505.

-
- [45] R.R. YAGER : Non-monotonic set-theoretic operators. *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 42, pp. 173-190, 1991.
- [46] D. DUBOIS et H. PRADE : La fusion d'informations imprécises. *Traitement du Signal*, vol. 11 (6), pp. 447-458, 1994.
- [47] A.P. DEMPSTER : Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping. *Annals of Mathematical Statistics*, vol. 38, pp. 325-339, 1967.
- [48] A.P. DEMPSTER : A generalization of Bayesian inference. *Journal of the Royal Statistical Society*, pp.207-247, 1968.
- [49] G. SHAFER : *A mathematical theory of Evidence*. Princeton University Press, 1976.
- [50] D. DUBOIS et H. PRADE : Representation and combination of uncertainty with belief functions and possibility measures. *Computational Intelligence*, vol. 4, pp. 244-264.
- [51] P. SMETS : Constructing the pignistic probability function in a context of uncertainty. *Uncertainty in Artificial Intelligence*, vol. 5, pp. 29-39, 1990.
- [52] A. APPRIOU : Multisensor signal processing in the frame work of the theory of evidence. In *Application of Mathematical Signal Processing Techniques to Mission Systems*, Research and Technology Organization (Lecture Series 216), pp. 5-31, November 1999.
- [53] T. DENOEUUX : Application du modèle des croyances transférables en reconnaissance de formes. *Traitement du Signal*, vol. 14, pp. 443-451, 1998.
- [54] A. APPRIOU : Formulation et traitement de l'incertain en analyse multisenseurs. In *GRETSI*, pp. 951-954, Juan-les-Pins, France, 1993.
- [55] T. DENOEUUX : A k -nearest neighbor classification rule based on Dempster-Shafer theory. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics – Part A : Systems and Humans*, vol. 25 (5), pp. 443-451, 1997.
- [56] M. ROMBAUT et Y.M. ZHU : Study of Dempster-Shafer theory for image segmentation applications. *Image and Vision Computing*, vol. 20, pp. 15-23, 2002.
- [57] E. LEFEVRE, O. COLOT, P. VANNOORENBERGHE et D. de BRUCQ : Informations et combinaison : les liaisons conflictuelles. *Traitement du Signal*, vol. 18, n°3, pp. 161-177, 2001.
- [58] D. GRUYER, C. ROYERE et V. CHERFAOUI : *Heterogeneous multi-criteria combination with partial or full information*. FUSION'03, July 2011, Cairns, Australia.

[59] C.B. PATEL, P.P. GOHIL et B. BORHADE : Modelling and vibration analysis of a road profile measuring system. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, vol. 1, pp. 13-28, 2010.

[60] Y. DELANNE : *Mesure et analyse de l'uni des chaussées*. Routes et sécurité routière CR50, Ed. Études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, 2008.

Références bibliographiques non citées dans le mémoire :

D. GRUYER : Fusion de données Multi-capteurs – Application au développement des systèmes d'aide à la décision, 2012.

D. GRUYER et V. BERGE-CHERFOAUI : Multi-objects association in perception of dynamical situation. *In Proceedings of the 15th International Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, pp. 255-262, Suède, 1999.

M. OUSSALAH, H. MAAREF et C. BARRET : From adaptative to progressive combination of possibility distributions. *Fuzzy sets and systems*, vol. 139, pp. 559-582, 2003.

F. DELMOTTE : Un nouvel opérateur de fusion adaptatif. *Traitement du Signal*, vol. 17, pp. 299-311, 2000.

H. MAAREF, M. OUSSALAH et C. BARRET : Fusion de données capteurs en vue de la localisation absolue d'un robot mobile par une méthode basée sur la théorie des possibilités. Comparaison avec le filtre de Kalman. *Traitement du Signal*, vol. 16, pp. 345-359, 1999.

S. DESTERCKE, D. DUBOIS et E. CHOJNACKI : Fusion d'opinions d'experts et théories de l'incertain. *In Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications*, Toulouse, France 2016.

J-M. TACNET, M. BATTON-HUBERT, J. DEZERT : Analyse multicritères et fusion d'information pour l'expertise et la gestion intégrée des risques naturels en montagne. *In Colloque LambdaMu*, La Rochelle, France, 2010.

M.E. EL NAJJAR, V. CHERFAOUI, P. BONNIFAIT et C. ROYERE : Élaboration de fonctions de croyance à partir de données GPS et SIG. *Technique et Science informatiques*, vol. 22, pp. 935-964, 2003.

P.H. GIANG et P. SHENOY : Decision making with partially consonant belief functions. *In Proceedings of the 19th International Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, pp. 272-280, Mexique, 2003.

A.-M. OLTEANU : *Fusion de connaissances imparfaites pour l'appariement de données géographiques – Proposition d'une approche s'appuyant sur la théorie des fonctions de croyance*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 2008.

M.-H. MASSON : Apports de la théorie des possibilités et des fonctions de croyance à l'analyse des données imprécises. Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Technologie de Compiègne, 2005.

V. BERGE-CHERFOAUI : Contribution à la gestion des incertitudes en fusion multicapteurs – Application à la perception du contexte de conduite. Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Technologie de Compiègne, 2009.

M. HA-DUONG : Hierarchical fusion of expert opinion in the Transferable Belief Model, application on climate sensitivity. *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 49, pp. 555-574, 2008.

Annexe A

Application des opérateurs de croyance sur des exemples simples

Les exemples suivants ont pour seule ambition de faciliter la compréhension des opérateurs de Dempster-Shafer et de Dubois et Prade dans la théorie des croyances (Cf. section 5.4.4).

A – Opérateur de Dempster-Shafer

Soit S le cadre de discernement défini par :

$$S = \{1,2,3\} \quad (\text{A.1})$$

Le référentiel de définition 2^S contient alors les propositions suivantes :

$$2^S = \{\emptyset, 1,2,3, \{1,2\}, \{1,3\}, \{2,3\}, \{1,2,3\}\} \quad (\text{A.2})$$

1^{er} scénario : Combinaison de deux sources avec conflit nul

On considère une source s_1 de fonction de masses élémentaires m_1 ainsi qu'une source s_2 de fonction de masses élémentaires m_2 tel que :

$$\left| \begin{array}{l} m_1(\{2\}) = 0.8 \\ m_1(\{1,2,3\}) = 0.2 \end{array} \right. \quad \left| \begin{array}{l} m_2(\{2,3\}) = 0.4 \\ m_2(\{1,2,3\}) = 0.6 \end{array} \right. \quad (\text{A.3})$$

La combinaison de ces deux fonctions de masses au moyen de l'opérateur de Dempster-Shafer donne les résultats suivants :

$$\left| \begin{array}{l} m_{1\&2}(\{2\}) = m_1(\{2\}) \cdot m_2(\{2,3\}) + m_1(\{2\}) \cdot m_2(\{1,2,3\}) = 0.8 \\ m_{1\&2}(\{2,3\}) = m_1(\{1,2,3\}) \cdot m_2(\{2,3\}) = 0.08 \\ m_{1\&2}(\{1,2,3\}) = m_1(\{1,2,3\}) \cdot m_2(\{1,2,3\}) = 0.12 \end{array} \right. \quad (\text{A.4})$$

Dans cette situation, la masse portant sur l'ensemble vide est nulle (pas de conflit) tout comme les masses des autres propositions de 2^S .

2^{ème} scénario : Combinaison de deux sources avec conflit non-nul

On considère une source s_1 de fonction de masses élémentaires m_1 ainsi qu'une source s_2 de fonction de masses élémentaires m_2 tel que :

$$\left| \begin{array}{l} m_1(\{1\}) = 0.9 \\ m_1(\{1,2,3\}) = 0.1 \end{array} \right. \quad \left| \begin{array}{l} m_2(\{2,3\}) = 0.4 \\ m_2(\{1,2,3\}) = 0.6 \end{array} \right. \quad (\text{A.5})$$

La combinaison de ces deux fonctions de masses au moyen de l'opérateur de Dempster-Shafer donne les résultats suivants :

$$\left| \begin{array}{l} m_{1\&2}(\{1\}) = m_1(\{1\}) \cdot m_2(\{1,2,3\}) = 0.54 \\ m_{1\&2}(\{2,3\}) = m_1(\{1,2,3\}) \cdot m_2(\{2,3\}) = 0.04 \\ m_{1\&2}(\{1,2,3\}) = m_1(\{1,2,3\}) \cdot m_2(\{1,2,3\}) = 0.06 \\ m_{1\&2}(\{\emptyset\}) = m_1(\{1\}) \cdot m_2(\{2,3\}) = 0.36 \end{array} \right. \quad (\text{A.6})$$

Ici, la masse portant sur la proposition vide est non nulle (situation partiellement conflictuelle). Dans le cas d'une normalisation (c'est-à-dire une redistribution de la masse de la proposition vide vers les autres éléments focaux), le facteur de normalisation vaut :

$$K = \frac{1}{1 - m_{1\&2}(\{\emptyset\})} = 1.5625 \quad (\text{A.7})$$

Après application de ce facteur de normalisation sur le jeu de masses combinées celui-ci devient :

$$\left| \begin{array}{l} m'_{1\&2}(\{1\}) = K \cdot m_{1\&2}(\{1\}) = 0.84375 \\ m'_{1\&2}(\{2,3\}) = K \cdot m_{1\&2}(\{2,3\}) = 0.06250 \\ m'_{1\&2}(\{1,2,3\}) = K \cdot m_{1\&2}(\{1,2,3\}) = 0.09375 \\ m'_{1\&2}(\{\emptyset\}) = 0 \end{array} \right. \quad (\text{A.8})$$

B – Opérateur de Dubois et Prade

Pour illustrer le fonctionnement de cet opérateur, on reprend une configuration identique à celle mentionnée dans le 2^{ème} scénario de la partie A.

On considère donc à nouveau les jeux de masses suivants :

$$\left| \begin{array}{l} m_1(\{1\}) = 0.9 \\ m_1(\{1,2,3\}) = 0.1 \end{array} \right. \quad \left| \begin{array}{l} m_2(\{2,3\}) = 0.4 \\ m_2(\{1,2,3\}) = 0.6 \end{array} \right.$$

La combinaison de ces jeux de masses au moyen de l'opérateur de Dubois et Prade donne les résultats suivants :

$$\begin{cases} m_{1\&2}(\{1\}) = m_1(\{1\}) \cdot m_2(\{1,2,3\}) = 0.54 \\ m_{1\&2}(\{2,3\}) = m_1(\{1,2,3\}) \cdot m_2(\{2,3\}) = 0.04 \\ m_{1\&2}(\{1,2,3\}) = m_1(\{1,2,3\}) \cdot m_2(\{1,2,3\}) + m_1(\{1\}) \cdot m_2(\{2,3\}) = 0.42 \end{cases} \quad (\text{A.9})$$

Dans cette situation, la masse correspondant à l'intersection $\{1\} \cap \{2,3\} = \emptyset$ est reportée sur la proposition correspondant à l'union de ces sous-ensembles soit $\{1,2,3\}$.

Annexe B

Modélisation quart de véhicule

Le modèle quart de véhicule est composé des éléments suivants :

- Une masse non-suspendue m_u qui représente la masse du pneu, de la jante, du moyeu et une partie des bras de suspension ;
- Une masse suspendue m_s qui représente la masse du châssis supportée par la roue en question ;
- Un ressort de constante de raideur k_t situé entre la masse non-suspendue et la surface de la route qui représente le pneu¹ ;
- L'association en parallèle d'un ressort de constante de raideur k_s et d'un amortisseur de coefficient c_s .

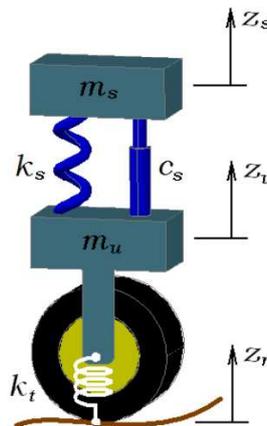


Figure B.1 : Schématisation du modèle quart de véhicule
(source InTech)

Le modèle prend, en entrée, un signal représentant le profil longitudinal de la chaussée à une dimension. Par une liaison sol-pneu ponctuelle, ce signal excite alors l'ensemble des éléments cités précédemment.

La mise en mouvement des masses est régie par le principe fondamental de la dynamique qui fait intervenir, dans le cas présent, deux types de forces : la force de rappel du ressort et la force d'amortissement. L'application de ce principe physique sur le modèle quart de véhicule donne les équations suivantes :

¹ L'amortissement du pneumatique est considéré comme négligeable devant la raideur

$$m_s \ddot{z}_s = -k_s(z_s - z_u) - c_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) \quad (\text{B.1})$$

$$m_u \ddot{z}_u = -k_s(z_s - z_u) + c_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) - k_t(z_u - z_r) \quad (\text{B.2})$$

où z_r correspond à l'élévation du profil de la route, z_u au déplacement de la masse non-suspendue et z_s au déplacement de la masse suspendue.

En se plaçant dans une représentation d'état, le système quart de véhicule peut être décrit au moyen du vecteur d'état suivant :

$$x = \begin{bmatrix} x_1 = z_s - z_u \\ x_2 = \dot{z}_s \\ x_3 = z_u - z_r \\ x_4 = \dot{z}_u \end{bmatrix} \quad (\text{B.3})$$

À chaque instant, le modèle est donc caractérisé par :

- le débattement de suspension (x_1) ;
- la vitesse de la masse suspendue (x_2) ;
- la déflexion du pneumatique (x_3) ;
- la vitesse verticale de la roue (x_4).

Son évolution et son observation sont, quant à eux, gouvernés par le système d'équations :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (\text{B.4})$$

Avec :

- y : vecteur de sortie (ou d'observation) ;
- u : vecteur d'entrée du système ;
- A : matrice d'évolution ;
- B : matrice de commande ;
- C : matrice d'observation ;
- D : matrice d'action directe ;

En combinant les relations C.1 et C.2 avec C.3, les équations d'état et d'observation du système précédent s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ -k_s & -c_s & 0 & c_s \\ m_s & m_s & 0 & m_s \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ k_s & c_s & -k_t & -c_s \\ m_u & m_u & m_u & m_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} z_r \quad (\text{B.5})$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} z_r \quad (\text{B.6})$$

La résolution numérique du système composé des équations B.5 et B.6 peut être pris en charge par un solveur du logiciel Matlab®. Celui-ci fournit, à chaque instant, les valeurs du vecteur de sortie y ce qui permet, à travers l'élément y_3 de disposer des valeurs successives de déplacement de la roue :

$$z_u = y_3 + z_r \quad (\text{B.7})$$

Annexe C

Modélisation demi-véhicule longitudinal

Ce modèle, constitué de deux trains roulants (avant et arrière) reliés à une même masse suspendue, correspond à une vue en coupe du véhicule dans le sens de sa longueur. Il contient les composants suivants :

- une masse suspendue (demi-châssis);
- une masse non-suspendue à l'avant et à l'arrière (roues) ;
- un couple ressort-amortisseur à l'avant et à l'arrière (suspensions) ;
- un ressort à l'avant et à l'arrière au contact de la chaussée (pneus).

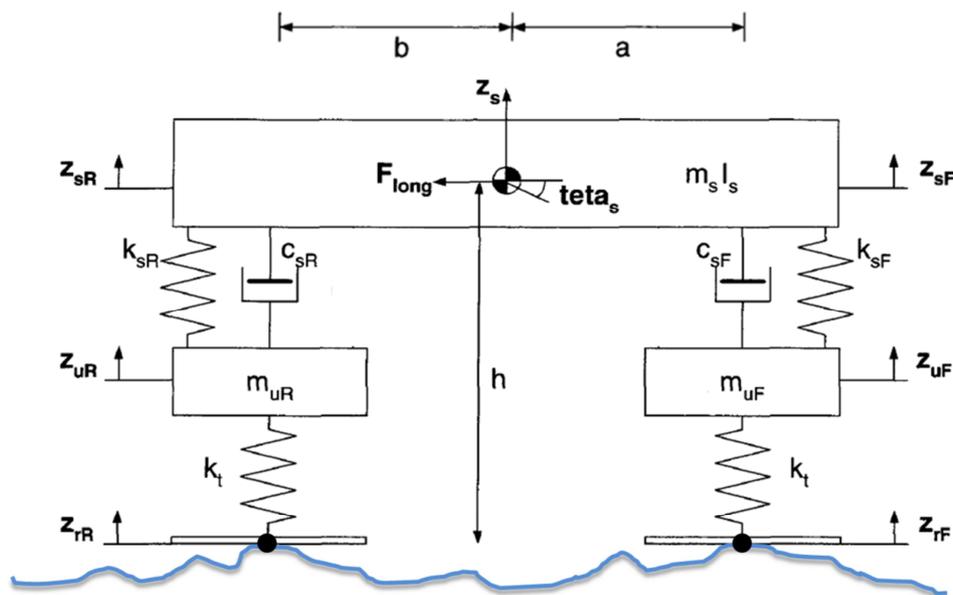


Figure C.1 : Schématisation du modèle demi-véhicule longitudinal

Dans ce modèle, le véhicule traceur est caractérisé par un nombre plus important de paramètres :

$$p_{half-car} = \begin{bmatrix} m_s \\ I_s \\ m_{uF} \\ m_{uR} \\ k_{sF} \\ k_{sR} \\ c_{sF} \\ c_{sR} \\ k_t \\ a \\ b \end{bmatrix} \quad (C.1)$$

où I_s représente le moment d'inertie de la masse suspendue, a la distance train avant-centre de gravité et b la distance train arrière-centre de gravité.

Le paramétrage de ce modèle ainsi que l'opération de diversification a été effectuée sur un principe similaire au modèle quart de véhicule. On recherche d'abord un paramétrage d'équilibre que l'on valide par comparaison avec des signaux expérimentaux puis on génère de nouveaux paramétrages autour de ces positions d'équilibre.

Comme pour la modélisation précédente, la simulation de mouvements de roue, dont découlent les notes d'uni synthétiques, est réalisée au moyen d'une représentation d'état. Celle-ci considère le vecteur d'état suivant :

$$x = \begin{bmatrix} x_1 = z_{sR} - z_{uR} \\ x_2 = z_{uR} - z_{rR} \\ x_3 = \dot{z}_{uR} \\ x_4 = z_{sF} - z_{uF} \\ x_5 = z_{uF} - z_{rF} \\ x_6 = \dot{z}_{uF} \\ x_7 = \dot{z}_s \\ x_8 = \dot{\theta}_s \end{bmatrix} \quad (C.2)$$

où θ_s est l'angle d'inclinaison de la masse suspendue selon l'axe longitudinal.

Dans le modèle demi-véhicule longitudinal, le véhicule est sollicité par un signal d'excitation (profil de référence de la route) injecté de façon décalé aux pneus avant et arrière (d'une longueur $L = a + b$). Son évolution et son observation sont décrites au moyen des relations C.3 et C.4 suivantes.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{rF} \\ z_{rR} \end{bmatrix} \quad (\text{C.3})$$

où

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & b \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_{sR}}{m_{uR}} & \frac{-k_t}{m_{uR}} & \frac{-c_{sR}}{m_{uR}} & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{sR}}{m_{uR}} & \frac{b c_{sR}}{m_{uR}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & a \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{k_{sf}}{m_{uF}} & \frac{-k_t}{m_{uF}} & \frac{-c_{sF}}{m_{uF}} & \frac{c_{sF}}{m_{uF}} & \frac{-a c_{sF}}{m_{uF}} \\ \frac{-k_{sR}}{m_s} & 0 & \frac{c_{sR}}{m_s} & \frac{-k_{sF}}{m_s} & 0 & \frac{c_{sF}}{m_s} & \frac{-c_{sF} - c_{sR}}{m_s} & \frac{a c_{sF} - b c_{sR}}{m_s} \\ \frac{-b k_{sR}}{I_s} & 0 & \frac{b c_{sR}}{I_s} & \frac{a k_{sF}}{I_s} & 0 & \frac{-a c_{sF}}{I_s} & \frac{a c_{sF} - b c_{sR}}{I_s} & \frac{-a^2 c_{sF} - b^2 c_{sR}}{I_s} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \end{bmatrix} = I \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{bmatrix} \quad (\text{C.4})$$

I étant la matrice identité de dimension 8.

Au final, à travers le vecteur de sortie y il est donc possible d'accéder aux signaux de déplacement des roues avant et arrière. Nous avons retenu ce dernier qui s'obtient par

$$z_{uR} = y_2 + z_{rR} \quad (\text{C.5})$$

Afin d'évaluer le niveau de diversité des signaux de roue générés par le modèle demi-véhicule, nous avons représenté le faisceau de DSP correspondant aux passages de 20 véhicules traceurs différents (Fig. C.2).

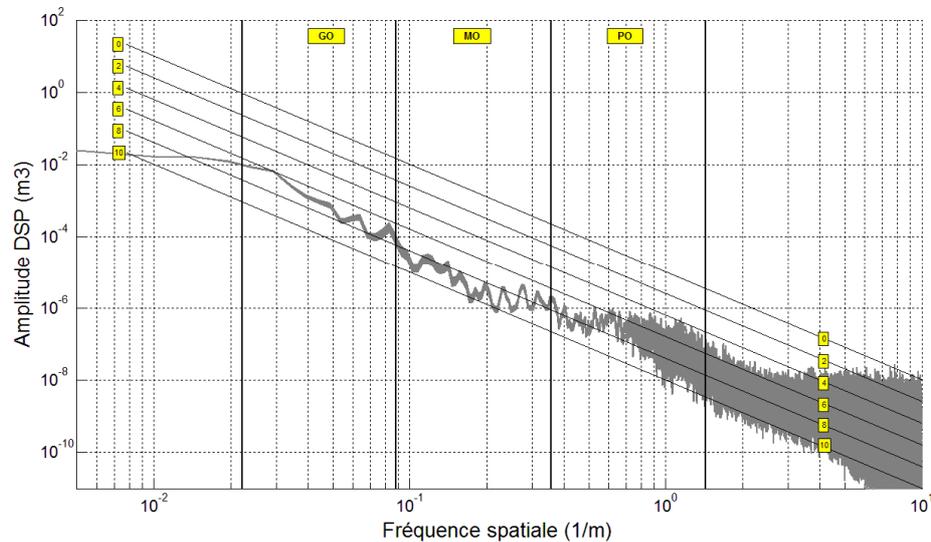


Figure C.2 : DSP des signaux délivrés par 20 véhicules traceurs virtuels (modélisation demi-véhicule)

En faisant appel au modèle demi-véhicule nous espérons élargir le faisceau de DSP sur les bandes MO et GO. En effet, dans la mesure où celui-ci peut prendre en charge les phénomènes de tangage, la roue arrière est susceptible d'enregistrer des mouvements additionnels dont les fréquences (comprises entre 1 et 2 Hz) coïncident avec celles des défauts d'uni des bandes MO et GO. Mais, à la vue des tracés précédents et malgré un très léger épaissement du faisceau de DSP (par comparaison avec la Figure 6.6), il est clair que les profils restent très similaires dans ces bandes d'ondes.

Thèse de Doctorat

Fabien MENANT

Estimation de l'uni longitudinal des infrastructures routières au moyen de véhicules traceurs

Développements méthodologiques et expérimentations

Résumé

Aujourd'hui, les gestionnaires d'infrastructures routières doivent composer avec des contraintes financières de plus en plus fortes. Le défi auquel ils doivent faire face est clair : maintenir leur patrimoine avec un budget restreint. Dans le domaine de l'auscultation des chaussées, cette problématique peut être résolue à travers deux approches complémentaires :

- L'optimisation de l'utilisation des systèmes existants pour le suivi de l'état de dégradation des chaussées ;
- Le développement d'une nouvelle génération de systèmes (appareils et méthodes) conciliant exigences métrologiques et contraintes financières.

Ces travaux de thèse s'inscrivent dans ce second point puisqu'ils s'intéressent à l'utilisation de véhicules traceurs (véhicules de flottes industrielles, dont la fonction première est autre que la mesure de l'état des chaussées) munis d'une instrumentation « bas-coût » pour le suivi de l'uni longitudinal des routes. Moins coûteux (à l'achat et à l'usage) que les moyens d'auscultation dédiés à cette fonction qui effectuent une mesure tous les 3 à 6 ans, ils permettront de recueillir des informations certes un peu moins précises mais continues (dans le temps) et denses (dans l'espace) sur l'intégralité du réseau routier.

Le niveau de performance d'une telle solution d'auscultation est conditionné par deux critères :

- La « richesse » (pertinence, exactitude, fidélité) des données apportées par chaque véhicule traceur ;
- La capacité des méthodes de traitement à délivrer, à partir de l'ensemble des données produites par les multiples passages des différents véhicules, une information agrégée qui soit la plus exacte et la plus fiable possible.

Dans cette perspective générale, un des objectifs spécifiques des travaux de thèse est d'estimer ce niveau de performance grâce, notamment, à la conduite d'expérimentations menées avec un dispositif prototype sur un itinéraire-test représentatif des réseaux routiers à ausculter. Pour y parvenir, une chaîne de mesures bas-coût a été spécialement développée et caractérisée sur un banc d'essais avant d'être intégrée dans plusieurs véhicules traceurs. Les données résultant des passages successifs de ces véhicules sur l'itinéraire-test ont ensuite été traitées par un panel de méthodes de fusion appartenant aux principaux cadres mathématiques existants (formalismes probabilistes, possibilistes et crédibilistes). Grâce à ces méthodes, les données issues des véhicules traceurs peuvent être agrégées tout en tenant compte des imprécisions et des incertitudes associées aux mesures. Dans ce domaine, l'une des contributions de la thèse est de proposer une architecture globale de traitement qui organise les connaissances, les modélisent et les combine au moyen de différents opérateurs de fusion. Au final, les informations résultant des méthodes de fusion ont été comparées à des informations de référence afin d'estimer le niveau de précision offert par cette solution d'auscultation innovante.

Mots-clés : auscultation des chaussées, uni longitudinal, capteurs bas-coût, véhicules traceurs, fusion de données/informations.

Abstract

Nowadays, road infrastructure managers must deal with stronger and stronger financial constraints. The challenge they are facing is clear: maintain road assets with a limited budget. In the field of pavement monitoring, this problem can be solved through two complementary approaches:

- Optimizing the use of existing road condition measurement systems;
- Developing a new generation of systems (devices, methods) which meets both metrological requirements and financial constraints.

The works conducted under this PhD refer to the second item: they are investigating the use of probe vehicles (vehicles of industrial fleets, the first function of which is not the road condition measurement) equipped with a "low-cost" instrumentation for assessing the road longitudinal evenness. Less expensive than specialized measurement systems (i.e. systems exclusively dedicated to this function) performing a measurement every 3 to 6 years, they will certainly collect less accurate but continuous (in time) and dense (in space) data, on the entire road network.

- The level of performance of this monitoring method depends on two criteria: The "richness" (relevance, exactness, fidelity) of the data provided by each probe vehicle;
- The ability of processing methods to deliver, from the whole set of data produced by the multiples paths of the different probe vehicles, the most exact and reliable aggregated information.

Within this general prospect, the specific aim of the PhD thesis is to estimate this level of performance, mainly by performing experiments with a prototype system on a special itinerary representative of the roads networks.

To meet this goal, a measurement chain composed with low-cost sensors has been specially developed and characterized on a test bed before being integrated into several probe vehicles. The data issued by successive runs of probe vehicles were then processed with a panel of data fusion methods belonging to the main mathematical frameworks (probabilistic, possibility and evidence theories). It was demonstrated that, with these methods, data can be combined taking into account inaccuracy and uncertainty of the measurements. One of the contributions of the PhD works is to propose a processing framework which organizes the knowledge, represents it (modeling, weighting method) and select the relevant data fusion operators. Finally, the information resulting from each data fusion methods are compared with benchmark information in order to estimate the level of accuracy provided by this innovative pavement monitoring method.

Keywords: pavement monitoring, longitudinal evenness, low-cost sensors, probe vehicles, data/information fusion